

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANOKİL-SBS/EVA-BİTÜM MODİFİKASYONUNDA OPTİMUM MODİFİKASYON
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Cansu İSKENDER

**MART 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**NANOKİL-SBS/EVA-BİTÜM MODİFİKASYONUNDA OPTİMUM MODİFİKASYON
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Cansu İSKENDER

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 / 03 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 28 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erol İSKENDER

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlamış olduğum “Nanokil-SBS/EVA-Bitüm Modifikasyonunda Optimum Modifikasyon Parametrelerinin Araştırılması” adlı bu tezin ülke bilimine katkıda bulunacağını ümit ediyorum.

Günümüzde asfalt kaplamaların performans düzeyini artırmak için yenilikçi karışım türleri uygulanmaktadır. Bu uygulamalardan biri de polimer modifiye asfalt nanokompozit karışımlarıdır. Tez çalışmasında nanokillerin, SBS ve EVA ile modifikasyonu yapılarak polimer modifiye asfalt nanokompozit karışımları hazırlanmıştır. Ancak, literatürde bitüm modifikasyonunda karıştırma hızları, sıcaklıkları ve süreleri için farklı parametreler kullanılmış olup yaygın olarak kabul görmüş modifikasyon parametreleri henüz belirlenememiştir. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında nanokil-SBS/EVA-bitüm modifikasyonunda, karıştırma sıcaklığı, hızı ve süresinin optimize edilmesi ve optimum modifikasyon parametrelerinin ortaya konularak parametre değişiminin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Çalışma konusunu öneren ve bu konuda desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Erol İSKENDER’e çalışmam esnasında vakitlerini bana ayırdıkları ve yol gösterdikleri için teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Tezin deneysel çalışmasında mikroskop görüntülerinin çekilmesinde yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Canan AKSOY’a, desteklerinden ötürü saygıdeğer hocam Prof. Dr. Atakan AKSOY’a, çalışmama görüş ve önerileriyle katkı sağlayan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Şeref Oruç ve Doç. Dr. Mustafa ASLAN’a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olarak daima bana destek olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunar ve bu çalışmamın bilim adına katkı sağlamasını dilerim.

Cansu İSKENDER
Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Nanokil-SBS/EVA-Bitüm Modifikasyonunda Optimum Modifikasyon Parametrelerinin Araştırılması ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol İSKENDER’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/03/2023

Cansu İSKENDER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	XVIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç	1
1.3. Bitümün Kimyasal Yapısı	2
1.4. Bitüm Reolojisi	4
1.5. Bitüm Modifikasyonu	6
1.6. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkılar	8
1.6.1. Polimer Modifiye Bitüm	12
1.6.2. Polimer Modifiye Bitüm Üretimine Etki Eden Parametreler	15
1.6.3. Polimer Modifiye Bitümlerde Bitüm-Polimer Uyumluluğu	19
1.7. Reaktif Etilen Terpolimerlerin Bitüm Modifikasyonunda Kullanılması ..	22
1.8. Nanomalzemeler ile Bitüm Modifikasyonu	26
1.9. Polimer Modifiye Asfalt Nanokompozitler (PMAN)	34
1.10. Polimer Modifiye Asfalt Nanokompozit Hazırlama Yöntemleri	36
1.11. Literatür Taraması	37
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	50
2.1. Giriş	50
2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler	51
2.2.1. Agrega	51

2.2.2.	Bitümlü Bağlayıcı	52
2.2.3.	Nanokil	53
2.2.4.	Stiren Bütadien Stiren	55
2.2.5.	Reaktif Etilen Terpolimer	56
2.2.6.	Elvax	58
2.2.7.	Polifosforik asit	59
2.3.	Polimer/Nanokil/Bitüm Nanokompozit Modifiye Bitümlerinin Hazırlanması	60
2.4.	Karışım Tasarımları	63
2.5.	Yöntem	65
2.5.1.	AASHTO T 283 Koşullandırma Sistemi	65
2.5.2.	Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi	67
2.5.3.	İndirekt Çekme Mukavemeti Testi	69
2.5.4.	Marshall Oranı (MO)	71
2.5.5.	Tekrarlı Yük Sünme Testi	74
2.5.6.	Morfolojik Yapı İncelemesi	83
3.	BULGULAR VE İRDELEME	85
3.1.	Modifiye Bağlayıcıların Morfolojik Özelliklerinin Değerlendirilmesi	85
3.2.	Modifiye Lottman Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	95
3.3.	İndirekt Çekme Mukavemeti Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	127
3.4.	Marshall Oranı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	141
3.5.	Tekrarlı Yük Sünme Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	158
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	205
5.	KAYNAKLAR	217

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

NANOKİL-SBS/EVA-BİTÜM MODİFİKASYONUNDA OPTİMUM MODİFİKASYON PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Cansu İSKENDER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Erol İSKENDER
2023, 230 Sayfa

Nanokil/polimer/bitüm nanokompozit (PMAN) üretiminde çeşitli yöntemler kullanılabilmesine rağmen eriyik karıştırma yöntemi en yaygın kullanılan metottur. Eriyik karıştırma yöntemine göre PMAN hazırlanmasında modifiyerin türü ile karıştırma sıcaklığı, hızı ve süresi modifikasyonun başarısı üzerinde anahtar rol oynamaktadır. Asfalt karışımları modifiye etmek için farklı karıştırma hızları, sıcaklıkları ve süreleri denenmiştir ancak genel olarak kabul görmüş modifikasyon parametreleri henüz belirlenememiştir. Bu çalışmada, SBS ve EVA ile PMAN üretiminde en uygun modifikasyon parametreleri araştırılmıştır. Nanokil, bitüm ağırlığına göre %3 oranında, polimerler ise; %5 SBS, %1.8 EVA (%1 Elvaloy RET + %0.8 Elvax) oranlarında kullanılmıştır. Modifikasyon parametreleri olarak, 160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıkları; 60, 90 ve 120 dk. karıştırma süreleri; 3000, 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızları seçilmiştir. Seçilen parametrelerde SBS PMAN ve EVA PMAN üretimi için 54'er farklı kombinasyonda modifiye bitümler hazırlanmıştır. PMAN'lerin morfolojik özellikleri optik mikroskopi yöntemi ile PMAN ile üretilen asfalt karışım örneklerinin mekanik özellikleri ise indirekt çekme mukavemeti, modifiye Lottman, tekrarlı yük sünme ve Marshall stabilite deneyleri ile değerlendirilmiştir. Tüm çalışma kapsamında 909 adet Marshall briketi üretilmiş, bunlardan 738 tanesine koşullandırma uygulanmıştır. Yapılan deneyler neticesinde, EVA PMAN ve SBS PMAN hazırlama sürecinde modifikasyon parametrelerinin değişiminin nihai asfalt karışımların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etki yarattığı görülmüş ve ele alınan problem açısından tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. SBS PMAN ve EVA PMAN'ler için tüm deneyler sonucunda optimum modifikasyon parametreleri sırasıyla 170 °C – 4000 dev./dk. – 90 dk. ve 180 °C – 3000 dev./dk. – 120 dk. olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nanokil, SBS, EVA, Elvaloy RET, Elvax, Polimer modifiye asfalt nanokompozit, Modifikasyon parametreleri, Modifiye Lottman, Tekrarlı yük sünme testi, Marshall oranı, Morfoloji

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF OPTIMUM MODIFICATION PARAMETERS IN NANOCLAY- SBS/EVA-BITUMEN MODIFICATION

Cansu İSKENDER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Erol İSKENDER
2023, 230 Pages

Although various methods can be used in the production of nanoclay/polymer/bitumen nanocomposite (PMAN), the melt blending method is the most widely used method. In the preparation of PMAN according to the melt blending method, the type of modifier and the mixing temperature, speed and time play a key role on the success of the modification. Different mixing speeds, temperatures and times have been tried to modify asphalt mixtures, but generally accepted modification parameters have not been determined yet. In this study, the most suitable modification parameters were investigated in the production of PMAN with SBS and EVA. Nanoclay is 3% by weight of bitumen, and polymers; 5% SBS, 1.8% EVA (1% Elvaloy RET + 0.8% Elvax) ratios were used. As modification parameters, mixing temperatures 160 °C, 170 °C, 180 °C; 60, 90 and 120 minutes mixing times; 3000, 4000 and 5000 rpm mixing speeds were selected. Modified bitumen was prepared in 54 different combinations for the production of SBS PMAN and EVA PMAN in selected parameters. Morphological properties of PMANs were evaluated by optical microscopy method and mechanical properties of asphalt mixture samples produced with PMAN were evaluated by indirect tensile strength, modified Lottman, repeated load creep and Marshall stability tests. In the whole study, 909 Marshall briquettes were produced and conditioning was applied to 738 of them. As a result of the tests it was observed that the change of modification parameters process the preparation of EVA PMAN and SBS PMAN had a significant effect on the mechanical properties of the final asphalt mixtures and satisfactory results were obtained in terms of the problem addressed. In consequence of all tests for SBS PMAN and EVA PMAN, optimum modification parameters were determined as 170 °C – 4000 rpm – 90 min. and 180 °C – 3000 rpm – 120 min. respectively.

Key Words: Nanoclay, SBS, EVA, Elvaloy RET, Elvax, Polymer modified asphalt nanocomposite, Modification parameters, Modified Lottman, Repeated load creep test, Marshall ratio, Morphology

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Stiren-bütadien blok kopolimer morfolojik yapısı	11
Şekil 2.	Asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerinde modifikasyondan beklenen değişiklik	13
Şekil 3.	Asfalt aşınma tabakasındaki kohezyon ve adezyon kaybı nedeniyle oluşan soyulma	31
Şekil 4.	Kil partiküllerinin asfalt içerisinde mümkün yayılma şekillerinin şematik gösterimi	32
Şekil 5.	Polimerlerde organokillerin farklı dağılım durumlarının WAXS ve TEM sonuçlarıyla birlikte gösterimi	33
Şekil 6.	Bitüm-nano kil yapısının şematik gösterimi	34
Şekil 7.	OMMT ile modifiye edilmiş asfaltın yaşlanmayı geciktirme mekanizmasının şematik gösterimi	34
Şekil 8.	Deneysel akış diyagramı	50
Şekil 9.	Asfalt betonu gradasyon eğrisi	52
Şekil 10.	Kullanılan nanokilden bir görüntü	53
Şekil 11.	Nanokilin tane boyutu analizi	54
Şekil 12.	Montmorillonit yapısı	55
Şekil 13.	SBS polimerinin fiziksel görünümü	56
Şekil 14.	Elvaloy 5160 terpolimerinin fiziksel görünümü	57
Şekil 15.	Elvax 660A katkısının fiziksel görünümü	58
Şekil 16.	Polifosforik asitin fiziksel görüntüsü	60
Şekil 17.	Polimer modifiye asfalt nanokompozit modifikasyonundan görüntü	61
Şekil 18.	Elvaloy RET ile modifiye edilmiş bitümden bir görüntü	62
Şekil 19.	Üretilen asfalt karışım örneklerinin bir bölümünden görüntü	65
Şekil 20.	AASHTO T 283 koşullandırma aşamalarından görüntüler	67
Şekil 21.	İndirekt çekme mukavemeti testi sırasında çapsal olarak yüklenmiş bir örnekte gerilmenin gelişimi	70
Şekil 22.	İndirekt çekme mukavemeti testinden görüntüler	70
Şekil 23.	Marshall stabilite testinden bir görüntü	72

Şekil 24.	Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı	76
Şekil 25.	Üniversal asfalt test cihazı	77
Şekil 26.	Modifiye bağlayıcıların ince kesit örnekleri	84
Şekil 27.	SBS modifiye bitüm optik mikroskop görüntüsü	85
Şekil 28.	160 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	86
Şekil 29.	160 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	86
Şekil 30.	160 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	86
Şekil 31.	170 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	87
Şekil 32.	170 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	87
Şekil 33.	170 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	87
Şekil 34.	180 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	88
Şekil 35.	180 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	88
Şekil 36.	180 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri	88
Şekil 37.	EVA modifiye bitüm optik mikroskop görüntüsü	89
Şekil 38.	160 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	90
Şekil 39.	160 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	90
Şekil 40.	160 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	90
Şekil 41.	170 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	91
Şekil 42.	170 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	91
Şekil 43.	170 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	91
Şekil 44.	180 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	92
Şekil 45.	180 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	92

Şekil 46.	180 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri	93
Şekil 47.	60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	95
Şekil 48.	60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	95
Şekil 49.	90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	97
Şekil 50.	90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	97
Şekil 51.	120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	98
Şekil 52.	120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	98
Şekil 53.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	99
Şekil 54.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	100
Şekil 55.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	100
Şekil 56.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	101
Şekil 57.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	101
Şekil 58.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	102
Şekil 59.	160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	103
Şekil 60.	160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	103
Şekil 61.	170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	104
Şekil 62.	170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	104
Şekil 63.	180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	105
Şekil 64.	180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri	105
Şekil 65.	60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	106

Şekil 66.	60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	106
Şekil 67.	90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	107
Şekil 68.	90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	107
Şekil 69.	120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	108
Şekil 70.	120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	108
Şekil 71.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	109
Şekil 72.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	110
Şekil 73.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	110
Şekil 74.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	111
Şekil 75.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	111
Şekil 76.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	112
Şekil 77.	160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	113
Şekil 78.	160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	113
Şekil 79.	170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	114
Şekil 80.	170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	114
Şekil 81.	180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	115
Şekil 82.	180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri	115
Şekil 83.	60 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	116
Şekil 84.	90 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	117
Şekil 85.	120 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri ..	117
Şekil 86.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	118

Şekil 87.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	119
Şekil 88.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	119
Şekil 89.	160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	120
Şekil 90.	170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	120
Şekil 91.	180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri	121
Şekil 92.	60 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri ...	122
Şekil 93.	90 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri ...	122
Şekil 94.	120 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri .	122
Şekil 95.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri	123
Şekil 96.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri	124
Şekil 97.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri	124
Şekil 98.	160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri	125
Şekil 99.	170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri	125
Şekil 100.	180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri	126
Şekil 101.	60 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	127
Şekil 102.	90 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	128
Şekil 103.	120 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	128
Şekil 104.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	129
Şekil 105.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	130
Şekil 106.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	130
Şekil 107.	160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	131
Şekil 108.	170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	132

Şekil 109.	180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	132
Şekil 110.	60 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	133
Şekil 111.	90 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	134
Şekil 112.	120 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	134
Şekil 113.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	136
Şekil 114.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	136
Şekil 115.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	137
Şekil 116.	160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	138
Şekil 117.	170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	138
Şekil 118.	180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri	139
Şekil 119.	60 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların Marshall oranları ..	142
Şekil 120.	90 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların Marshall oranları ..	142
Şekil 121.	120 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların Marshall oranları.	143
Şekil 122.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları	145
Şekil 123.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları	145
Şekil 124.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları	146
Şekil 125.	160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları	147
Şekil 126.	170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları	148
Şekil 127.	180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları	148
Şekil 128.	60 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların Marshall oranları .	150
Şekil 129.	90 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların Marshall oranları .	150

Şekil 130.	120 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların Marshall oranları	151
Şekil 131.	3000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları	152
Şekil 132.	4000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları	153
Şekil 133.	5000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları	153
Şekil 134.	160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları	155
Şekil 135.	170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları	155
Şekil 136.	180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları	156
Şekil 137.	160 °C’de 3000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	159
Şekil 138.	160 °C’de 4000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	159
Şekil 139.	160 °C’de 5000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	160
Şekil 140.	160 °C’de 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	161
Şekil 141.	160 °C’de 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	161
Şekil 142.	160 °C’de 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	162
Şekil 143.	160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri .	163
Şekil 144.	170 °C’de 3000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	164
Şekil 145.	170 °C’de 4000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	164
Şekil 146.	170 °C’de 5000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	165
Şekil 147.	170 °C’de 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	166
Şekil 148.	170 °C’de 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	166
Şekil 149.	170 °C’de 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	167
Şekil 150.	170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri .	168
Şekil 151.	180 °C’de 3000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	168
Şekil 152.	180 °C’de 4000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	169
Şekil 153.	180 °C’de 5000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	169
Şekil 154.	180 °C’de 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	170
Şekil 155.	180 °C’de 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	171
Şekil 156.	180 °C’de 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	171
Şekil 157.	180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri .	172
Şekil 158.	3000 dev./dk.’da 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	173

Şekil 159. 3000 dev./dk.'da 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	173
Şekil 160. 3000 dev./dk.'da 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri ...	174
Şekil 161. 4000 dev./dk.'da 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	175
Şekil 162. 4000 dev./dk.'da 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	175
Şekil 163. 4000 dev./dk.'da 120 dk için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	176
Şekil 164. 5000 dev./dk.'da 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	177
Şekil 165. 5000 dev./dk.'da 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri	177
Şekil 166. 5000 dev./dk.'da 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri ...	178
Şekil 167. 160 °C'de 3000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	179
Şekil 168. 160 °C'de 4000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	180
Şekil 169. 160 °C'de 5000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	180
Şekil 170. 160 °C'de 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	181
Şekil 171. 160 °C'de 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	182
Şekil 172. 160 °C'de 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	182
Şekil 173. 160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	183
Şekil 174. 170 °C'de 3000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	184
Şekil 175. 170 °C'de 4000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	184
Şekil 176. 170 °C'de 5000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	185
Şekil 177. 170 °C'de 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	186
Şekil 178. 170 °C'de 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	186
Şekil 179. 170 °C'de 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	188
Şekil 180. 170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	188
Şekil 181. 180 °C'de 3000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	188
Şekil 182. 180 °C'de 4000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	189
Şekil 183. 180 °C'de 5000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	189
Şekil 184. 180 °C'de 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	190
Şekil 185. 180 °C'de 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	190
Şekil 186. 180 °C'de 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	191
Şekil 187. 180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımları sünme eğrileri ..	192
Şekil 188. 3000 dev./dk.'da 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	192
Şekil 189. 3000 dev./dk.'da 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	193
Şekil 190. 3000 dev./dk.'da 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	193
Şekil 191. 4000 dev./dk.'da 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	194

Şekil 192. 4000 dev./dk.'da 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	194
Şekil 193. 4000 dev./dk.'da 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri ...	195
Şekil 194. 5000 dev./dk.'da 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	196
Şekil 195. 5000 dev./dk.'da 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	196
Şekil 196. 5000 dev./dk.'da 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri	197



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	Bitümün kimyasal bileşimi	3
Tablo 2.	Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkılar	9
Tablo 3.	Bitüm modifikasyonunda çoğunlukla kullanılan farklı polimer kategorileri	10
Tablo 4.	Bitüm modifikasyonunda yaygın kullanılan polimerlerin avantaj ve dezavantajları	15
Tablo 5.	Asfaltın nanokil ve polimerlerle modifikasyonunda kullanılan modifikasyon parametreleri	29
Tablo 6.	Bazalt agregasının temel özellikleri	51
Tablo 7.	Asfalt betonu gradasyonu ve agrega fraksiyon oranları	52
Tablo 8.	Asfalt çimentosu özellikleri (AC 50-70)	53
Tablo 9.	Kullanılan nanokilin kimyasal analiz sonuçları	54
Tablo 10.	SBS katkısının özellikleri	56
Tablo 11.	Elvaloy 5160 katkısının özellikleri	57
Tablo 12.	Elvax 660A katkısının özellikleri	58
Tablo 13.	PPA'nın özellikleri	59
Tablo 14.	Hazırlanan kontrol ve PMAN karışımlarının tasarım sonuçları	64
Tablo 15.	EVA PMAN ile üretilen örneklerin ortalama indirekt çekme mukavemeti oranları	68
Tablo 16.	SBS PMAN ile üretilen örneklerin ortalama indirekt çekme mukavemeti oranları	69
Tablo 17.	SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların 0 °C'deki ortalama İÇM değerleri (kPa)	71
Tablo 18.	EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların 0 °C'deki ortalama İÇM değerleri (kPa)	71
Tablo 19.	EVA PMAN ve kontrol (saf-EVA) bitümlü karışımların ortalama MO değerleri	73
Tablo 20.	SBS PMAN ve kontrol (saf-SBS) bitümlü karışımların ortalama MO değerleri ..	74
Tablo 21.	Tekrarlı yük sünme deneyinde uygulanan parametreler	77
Tablo 22.	160 °C'de hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)	78
Tablo 23.	170 °C'de hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)	79
Tablo 24.	180 °C'de hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)	80

Tablo 25.	160 °C’de hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)	81
Tablo 26.	170 °C’de hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)	82
Tablo 27.	180 °C’de hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)	83
Tablo 28.	SBS PMAN karışımlarının 10000 yük tekerrüründeki deformasyonları (mm)	179
Tablo 29.	EVA PMAN karışımlarının 10000 yük tekerrüründeki deformasyonları (mm)	197
Tablo 30.	SBS PMAN karışımların performans derecelendirme tablosu	199
Tablo 31.	EVA PMAN karışımların performans derecelendirme tablosu	200



SEMBOLLER DİZİNİ

AASHTO	Amerika Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
AC	Asfalt çimentosu
APP	Ataktik polipropilen
ASTM	Amerika Test ve Malzeme Kurumu
dev.	Devir
dk.	Dakika
EBA	Etilen-butil akrilat
EMA	Etilen-metil akrilat
EVA	Etilen vinil asetat
IIR	İzobüten-izopren rastgele kopolimer (IIR)
İÇM	İndirekt çekme mukavemeti
İÇMO	İndirekt çekme mukavemeti oranı
kN	Kilonewton
kPa	Kilopaskal
KTŞ	Karayolları teknik şartnamesi
MMT	Montmorillonit
MO	Marshall oranı
MPa	Megapaskal
NC	Nanokil
nm	Nanometre
NR	Doğal kauçuk
NS	Nanosilika
OMMT	Organik montmorillonit
OVMT	Organik olarak modifiye edilmiş vermikülit
MMNC	Organik olarak modifiye edilmiş nanokil
PBD	Polibutadiyen
PI	Poliizopren
PIB	Poliizobutan
PMA	Polimer modifiye asfalt

PMAN	Polimer modifiye asfalt nanokompozit
PMB	Polimer modifiye bitüm
PE	Polietilen
PP	Polipropilen
PPA	Polifosforik asit
PVC	Polivinil klorür
SBR	Stiren-bütadien kauçuğu
SBS	Stiren-bütadien-stiren
SEBS	Stiren -etilen- bütadien-stiren
SIS	Stiren izopren stiren
TEM	Transmisyon elektron mikroskobu
VMA	Agregalar arası boşluk
WAXS	Geniş açılı X-ışını saçılması
D	Asfalt briket örneğinin çapı
G*	Kompleks modül
P	Maksimum yük
t	Asfalt briket örneğinin testten önceki yüksekliği
V _h	Hava boşluğu
V _f	Asfaltla dolu boşluk
W _{a,,}	Bitüm içeriği
δ	Faz açısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Nüfus ve araç sayısının artması, üretim ve tüketim eğilimlerinin değişmesi sebebiyle artan dingil yükleri gibi nedenlerle asfalt kaplamalarda daha fazla gerilmeler oluşmaktadır. Asfalt kaplamalarda oluşan gerilmeler ve çevresel koşullar kaplamada su hasarı, tekerlek izi, yorulma ve termal çatlamlar başta olmak üzere çeşitli bozulmalara yol açmaktadır.

Asfalt kaplamaların performansını artırmak için yenilikçi karışım türleri uygulanabilmekte veya agrega granülometrisinde değişiklikler yapılabilmektedir. Her iki yöntemde de katkı uygulamaları sıkça kullanılmaktadır. Katkı olarak genellikle elastomerik ve plastomerik polimerler tercih edilmektedir. Son zamanlarda, nano boyutlu malzemeler de araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Nanokiller, asfalt karışımlarda tek başına veya polimer gibi katkılarla birlikte katkı maddesi olarak kullanılabilir. Nanokillerin her iki durumda da asfalt karışımların performansını önemli derecede artırdığı, birlikte kullanıldıklarında ise SBS gibi katkıların performansını iyileştirdiği bilinmektedir. (Mortezaei vd., 2020).

1.2. Amaç

Modifiyer ve asfalt çimentosu arasındaki uyum modifikasyonun etkisini artırmak için son derece önemli olmaktadır. SBS ve asfalt bağlayıcı arasındaki zayıf uyumluluk ve yüksek sıcaklıkta SBS gibi polimerlerin depolanmasında ortaya faz ayrışması çıkmaktadır (Leng vd., 2019; Qian vd., 2018; Zhang ve Hu., 2015; Li vd., 2019). SBS ve bitüm arasındaki uyumluluğu artırmak için nanokil gibi malzemeler kullanılmaktadır (Shafabakhsh vd., 2020). Bu sebeple modifiyerin türü, hazırlama sıcaklığı, karıştırma hızı ve karıştırma süresi modifikasyonun başarısı üzerinde büyük öneme sahiptir.

Literatürde karıştırma hızları, sıcaklıkları ve süreleri için farklı uygulamalar mevcuttur. Araştırmacılar tarafından yaygın olarak kabul görmüş ve standartlaşmış modifikasyon parametreleri henüz belirlenememiştir. Asfalt bağlayıcıların viskozitesini düşürerek, nanokillerin daha üniform olarak dağılmalarını sağlamak için daha yüksek sıcaklıklarda, daha uzun sürelerde ve yüksek devirlerde karıştırma yapmak gerekmektedir; ancak asfalt

bağlayıcı oksijen ile kolaylıkla yaşlanabileceğinden, sıcaklığı çok yüksek değerlere yükseltmek sakıncalı olmaktadır. Bu durumda, karıştırma hızı, süresi ve sıcaklığı arasında optimum bir denge kurma gerekliliği oluşmaktadır.

Literatürde yer alan nanokillerin ve nanokompozit malzemelerin asfalt bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılması ile ilgili çalışmalar, seçilen modifikasyon parametrelerinde ya bağlayıcı özelliklerini ya da hazırlanan karışımın mekanik özelliklerini değerlendirmeye yönelik kalmaktadır. Polimer modifiye asfalt nanokompozit üretiminde farklı modifikasyon kombinasyonları (karıştırma hızı, süresi ve sıcaklığı açısından) seçilerek çok sayıda modifikasyonun yapılmamasının eksikliği ve bu bağlamda tüm çalışmalarda kullanılabilecek optimum bir modifikasyon parametresinin olmadığı literatürden tespit edilmiştir. Bu bağlamda yapılan tezde, bitüme nanokil – SBS ve nanokil – EVA ilave edilerek yüksek kesme etkili mikser ile üç farklı karıştırma sıcaklığı, üç farklı karıştırma süresi ve üç farklı karıştırma hızı seçilerek farklı iki polimer modifiye asfalt nanokompozitleri üretilmiştir. Üretilen modifiye bitümlerin morfolojik özellikleri optik mikroskopi yöntemi ile değerlendirilmiştir. Polimer modifiye asfalt nanokompozitleri ile hazırlanan karışımların performans özellikleri, düşük sıcaklık çatlama direnci, su hasarı direnci ve tekerlek izi direnci açısından değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında; yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre modifiyerlerin karıştırma sıcaklığı, hızı ve süresi bakımından en iyi performans değerlerini veren optimum modifikasyon parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Üçer farklı karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızı seçilerek modifikasyon parametrelerinin etkisinin üçlü kombinasyonlar halinde araştırılması bu çalışmanın diğer amacıdır. Ayrıca, Nanokil – Elvaloy – Elvax'ın üçlü kombinasyon olarak polimer modifiye asfalt nanokompozit üretiminde incelenmesi de hedeflenen bir diğer konudur. Polimer modifiye asfalt nanokompozit üretiminde nanomalzemelerin polimer modifiye bitüme ilavesiyle modifiye bitüm özelliklerinin daha da iyileştirilmesi ve böylece geliştirilmiş bağlayıcı özelliklerinin asfalt karışımların performansına yansımaları seviyelerinin belirlenmesi planlanmıştır.

1.3. Bitümün Kimyasal Yapısı

Bir bitümün iç yapısı, büyük ölçüde mevcut moleküler türlerin kimyasal yapısı tarafından belirlenir. Bitüm, az miktarda yapısal olarak benzer değişik halkalı türler ve

sülfür, nitrojen ve oksijen atomu içeren fonksiyonel gruplar ile ağırlıklı olarak hidrokarbon olan moleküllerin karmaşık bir kimyasal karışımıdır. Bitüm ayrıca inorganik tuzlar ve oksitler şeklinde veya porfirin yapılarda oluşan vanadyum, nikel, demir, magnezyum ve kalsiyum gibi eser miktarda metaller içermektedir (Read ve Whiteoak, 2003).

Çeşitli ham petrolardan üretilen bitümlerin temel analizinde, çoğu bitüm Tablo 1’de verilen kimyasal bileşenleri içermektedir.

Tablo 1. Bitümün kimyasal bileşimi

Bileşenler	Yüzde (%)
Karbon	82-88
Hidrojen	8-11
Sülfür	0-6
Oksijen	0-1.5
Nitrojen	0-1

Bitüm, asfaltenler ve maltenler olarak adlandırılan iki ana kimyasal gruba ayrılmaktadır. Maltenler ayrıca doymuşlar, aromatikler ve reçineler olarak ayrılmaktadır.

Asfaltenler, karbon ve hidrojene ek olarak bir miktar nitrojen, sülfür ve oksijen içeren ve n-heptanda çözünmeyen siyah veya kahverengi amorf katılardır. Asfaltenler genellikle oldukça yüksek moleküler ağırlıklı, oldukça polar ve karmaşık aromatik malzemeler olarak kabul edilir. Molekül ağırlıklarını belirlemeye yönelik farklı yöntemler, buhar basıncı ozmometrik ölçümlerine (Raoult yasasını kullanarak çözeltilerin buhar basıncını belirlemeye dayalı olarak bileşiklerin moleküler ağırlığını ölçmek için kullanılan bir yöntem) dayalı olarak 800 ila 3500 g/mol arasında değişen çeşitli değerlere yol açmıştır ve asfaltenlerin hidrojen/karbon (H/C) oranı 0.98 ile 1.6 arasında değişmektedir. 2-5 nm partikül boyutuna sahiptirler (Hunter vd., 2015). Asfalten içeriği, bir bitümün reolojik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Asfalten içeriğinin artırılması, daha viskoz bitüm ile daha düşük penetrasyon, daha yüksek yumuşama noktası ve sonuç olarak daha yüksek viskozite ile daha sert bir bitüme sebep olur. Asfaltenler bitümün %5-25’ini oluşturur (Read ve Whiteoak, 2003).

Reçineler n-heptan içinde çözünür. Asfaltenler gibi, büyük ölçüde hidrojen ve karbondan oluşur ve az miktarda oksijen, sülfür ve nitrojen içerir. Koyu kahverengi renkli, katı veya yarı katıdır ve doğaları gereği polar oldukları için kuvvetli adhezif özelliğe sahiptir (Read ve Whiteoak, 2003). Bitümden ayrılan reçinelerin, 780 ila 1400 g/mol arasında

değişen moleküler ağırlıklara ve 1.4-1.7'lik bir hidrojen/karbon atom oranına sahip olduğu bulunmuştur (Hunter vd., 2015).

Aromatikler, bitümdeki en düşük moleküler ağırlıklı naftenik aromatik bileşikleridir. Toplam bitümün %40-65'ini oluşturur ve koyu kahverengi viskoz sıvılardır. Ortalama moleküler ağırlık aralığı 570-980 g/mol arasındadır (Hunter vd., 2015). Doymamış halka sistemlerinin (aromatikler) hâkim olduğu polar olmayan karbon zincirlerinden oluşurlar ve diğer yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonları çözme yetenekleri yüksektir (Read ve Whiteoak, 2003).

Doymuş maddeler, alkil-naftenler ve bazı alkil aromatiklerle birlikte düz ve dallı zincirli alifatik hidrokarbonlardan oluşur. Beyaz renkli polar olmayan viskoz yağlardır. Ortalama moleküler ağırlık aralığı, aromatiklerinkine benzerdir ve bileşenler hem parafin hem de parafin olmayan doymuş maddeleri içerir. Doymuşlar, bitümün %5 ila 20'sini oluşturur (Read ve Whiteoak, 2003).

Genel olarak, asfalt bağlayıcılar yağlı faz ve yağlı olmayan faz olmak üzere iki ana fazdan oluşur (Ait-Kadi vd., 1996). Asfalttaki yağlı faz, doymuş hidrokarbonlardan (parafinikler ve maltenler), döngüsel ürünlerden (naftenler ve aromatikler) ve reçinelerden (polar aromatikler) oluşurken, yağlı olmayan faz ise asfaltenlerden, karbonlardan vb. oluşur. Asfalt bileşimini analiz etmek ve tanımlamak için SARA metodu olarak adlandırılan yöntem, çok sayıda asfalt molekülünü, kimyasal bileşimlerindeki ilgiye bağlı olarak sınırlı sayıda fraksiyona ayırır. SARA fraksiyonları: Doymuş maddeler (S), aromatikler (A), reçineler (R) (malten fraksiyonundan) ve asfaltenler (A) olarak tanımlanır. Karmaşıklık, moleküler ağırlık, heteroatomik içerik, polarite ve aromatiklik $S < A < R < A$ düzeyinde artar (Behnood ve Gharehveran, 2019).

Asfaltenler; karboksilik asitler, fenolikler, aminler ve tiyoller gibi fonksiyonel grupların varlığından dolayı asfaltın en polar fraksiyonudur. Bu polar bileşenler, asfalt bağlayıcının agregaların kutup yüzeylerine yapışmasında önemli bir rol oynar (Bouldin vd., 1991; Sergeant vd., 1994).

1.4. Bitüm Reolojisi

Bir bitümün belirli bir sıcaklıktaki reolojik özellikleri, malzemedeki moleküllerin hem bileşimi (kimyasal bileşimi) hem de yapısı (fiziksel dizilimi) tarafından belirlenmektedir. Bileşimindeki, yapısındaki veya her ikisindeki değişiklikler reolojisinde bir değişiklik

sonuçlanacaktır. Bu nedenle bitüm reolojisindeki değişiklikleri anlamak için bir bitümün yapısının ve bileşiminin reolojiyi etkilemek için nasıl etkileşime girdiğini anlamak önemlidir (Read ve Whiteoak, 2003).

Bitüm reolojisi geniş anlamda, bitümün akma ve deformasyon özellikleriyle ilişkili temel ölçümler olarak tanımlanabilir. Bitüm, düşük sıcaklıklarda ve/veya kısa yükleme sürelerinde cam benzeri elastik bir katı olarak ve yüksek sıcaklıklarda ve/veya yavaş yükleme sırasında viskoz bir sıvı olarak davranan termoplastik, viskoelastik bir sıvıdır. Bitümün gerilmelere tepkisi bu nedenle hem sıcaklığa hem de yükleme süresine bağlıdır ve sonuç olarak bitümün reolojisi, gerilme/deformasyon/zaman/sıcaklık tepkisi ile tanımlanmaktadır (Hunter vd., 2015).

Viskoelastisite terimi, sıcaklığa ve yükleme süresine bağlı olarak malzemenin elastik bir katı veya viskoz bir sıvı olarak davranmasına neden olabilen bir malzemenin mekanik özelliklerini ifade eder. Viskoelastisite, viskoelastik malzemelerin bir yük kaldırıldığında zamana bağlı bir geri kazanım sergilemesi bakımından plastiklikten farklıdır: Buna genellikle gecikmiş elastik tepki denilmektedir. Plastik bir malzeme, yük kaldırıldıktan sonra orijinal şekline geri dönmez (Hunter vd., 2015).

Bitüm, tipik olarak düşük sıcaklıklarda elastik özelliklerin baskın olduğu, yüksek sıcaklıklarda malzemenin viskoz bir sıvı gibi davrandığı viskoelastik bir malzeme olarak kabul edilmektedir (Hunter vd., 2015).

Asfalt çimentosunun viskoelastik özellikleri, dinamik araç yüküne ve aşırı iklim koşullarına karşı direnç gösterdiğinden onu uygun bir seçenek haline getirmektedir. Asfalt çimentosunun kalıcı deformasyonu önlemek için yüksek sıcaklıklarda ve düşük frekanslarda rijit davranış göstermesinin yanı sıra yorulma çatlamasını önlemek için düşük sıcaklıklarda ve yüksek frekanslarda elastik davranış göstermesi uygundur (Ahmed vd., 2019).

Yük altında bir malzeme, bir oranda deformasyonun meydana geldiği karışık bir viskoelastik ve plastik tepki sergileyebilir. Bu, asfalt kaplamaların tekerlek izi gelişiminde biriken geri kazanılmamış deformasyonun kendini gösterdiği bitüm ve asfaltların önemli bir özelliğidir. Bu durumun azaltılması, kalıcı deformasyonu azaltma yollarının benimsenmesiyle sonuçlanmıştır ve polimerleri kullanarak bitüm modifikasyonunu içermektedir (Hunter vd., 2015).

1.5. Bitüm Modifikasyonu

Asfaltların uzun vadeli davranışını tahmin etme yeteneği, trafik yükü arttıkça ve performans gereksinimleri her zamankinden daha zorlu hale geldikçe daha da önemli hale gelmektedir. Yoldaki performans; tasarım, uygulamanın doğası ve bireysel bileşenlerin kalitesi dâhil olmak üzere birçok faktöre bağlıdır. Hacimsel olarak bitüm, bir asfaltın nispeten küçük bir bileşenidir; ancak hem dayanıklı bir bağlayıcı olarak hareket eden hem de asfalta visko-elastik özellikler kazandıran çok önemli bir role sahiptir (Read ve Whiteoak, 2003).

Yolların çoğunda geleneksel bitümler, karşılaşılan trafik ve iklim koşullarının büyük çoğunluğunda asfalt kaplamalarda kullanımı için tatmin edici adezyon ve mekanik özelliklere sahip olmuştur. Bununla birlikte, yollara yönelik talepler yıldan yıla artmakta ve bazı durumlarda esas olarak aşağıdaki nedenlerden dolayı geleneksel bitümlerin kullanılmasının sınırlandırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Hunter vd., 2015):

- Yağış ve sıcaklık değişimlerinde artış,
- Aks ağırlığında, lastik basınçlarında ve yük hareketinde artışlar, daha yüksek bir bakım ihtiyacına ve dolayısıyla yolu kullananlar için artan maliyetlere sebep olma,
- Kaplamalarda daha ince tabakaları kullanma eğilimi,
- Trafik akışındaki kesintiye en aza indirmek ve daha uzun bir hizmet ömrü sağlamak için gereken bakım sıklığının azaltılmak istenmesi, böylece finansal verimlilik ve maliyet tasarrufu için süregelen bir talep.

Böylece yoldaki bozulmalar beklenenden daha erken sürede gerçekleşir ve bakım kesintileri yolu kullananlar için daha pahalı hale gelir. Bu zorlukların üstesinden gelmenin bir yolu, iyileştirilmiş kaplama performansını sağlamak için bitümü polimerler veya diğer katkıları ile modifiye etmektir (Hunter vd., 2015).

Modifiye bitümler ve karışımlar (Orhan, 2012):

- Düşük sıcaklıklar için daha yumuşak karışımlar elde etmek ve çatlakları azaltmak,
- Yüksek sıcaklıklar için daha sert karışımlar elde etmek ve tekerlek izinde oturmayı azaltmak,
- Yapım sıcaklıklarında viskoziteyi düşürmek,
- İşlenebilirliği ve sıkışmayı iyileştirmek,
- Karışım dayanımını ve stabilitesini artırmak,

- Karışımın aşınma dayanımını iyileştirmek ve agrega kopmasını azaltmak,
- Kaplamanın düşük sıcaklık çatlaklarını azaltmak,
- Karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek,
- Marjinal asfalt çimentolarının kalitesini yükseltmek,
- Yaşlanmış asfalt bağlayıcıyı tekrar gençleştirmek,
- Asfalt bağlayıcının ömrünü uzatmak,
- Agrega üzerinde daha kalın asfalt filmi oluşturmak,
- Yapışmayı iyileştirmek ve asfalt çimentosunun agrega yüzeyinden soyulmasını azaltmak,
- Kusmayı azaltmak,
- Geliştirilmiş çatlak dolgusu sağlamak,
- Yakıt dökütülerine karşı dayanım artışı sağlamak,
- Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı dayanım artırmak,
- Kaplama tabakalarının kalınlığı azaltmak,
- Kaplamanın ömür-döngü maliyeti azaltmak,
- Kaplamaların tüm performansını geliştirmek için kullanılabilir.

Modifiye bitüm tipi, karışımın yapılacağı bölgenin iklim koşulları ve yolun trafiği göz önünde tutularak kaplamanın iyileştirilmek istenilen özelliklerine göre seçilir. Farklı modifiye edici katkıları kullanılarak istenilen özellikleri sağlayan modifiye bitüm üretimi yapılır (Orhan, 2012).

Avrupa’da kullanılan modifiye bitüm oranları ile Türkiye’deki oranlar karşılaştırıldığında ve trafik yükleri ile iklim koşullarının esnek üstyapılar için daha zorlayıcı olduğu göz önüne alındığında, ülkemizde modifiye bitüm kullanımının önümüzdeki yıllarda hızla artacağı öngörülmektedir (Gökalp vd., 2019).

Modifikasyon genel olarak iki şekilde yapılabilir: İlk yöntem bitümün modifikasyonudur. Katkı maddesi bitüme ilave edilerek modifiye bitüm elde edilir. Modifiye bitüme çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak, bitüm özelliklerindeki değişiklikler belirlenebilmektedir. Böylelikle, modifiye bitüm özellikleri belirlenerek değerlendirme yapılabilir; fakat bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ek ekipmanlar kullanılmaktadır. İkinci yöntem ise karışımın modifikasyonudur. Katkı maddesinin asfalt plentinde doğrudan karışıma ilave edilmesiyle

modifiye karışım elde edilir. Katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katıldığından ek karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma vb. sorunlarla karşılaşmamaktadır; fakat bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi uygun olmamaktadır (İlıcılı vd., 2001).

1.6. Bitüm Modifikasyonunda Kullanılan Katkılar

Gerekli mühendislik özellikleri göz önüne alındığında, bazı uygulamalarda soğuk bir ortamda gevrek (kırılgan) olduğu ve sıcak bir ortamda kolayca yumuşadığı için geleneksel saf bitümlerin performansı tatmin edici olmamaktadır. Bu sınırlı performans sıcaklık aralığı, saf bitümün ana dezavantajı olmakta ve hem çatı kaplaması hem de yol kaplaması uygulamalarında kullanımını sınırlamaktadır. Buna ilaveten trafik hızı ve yükü önemli ölçüde arttığından plansız aşırı yükleme, asfalt kaplamaların ömrünü önemli ölçüde kısaltarak bakım maliyetlerini ve kullanıcılar için oluşan riskleri artırmıştır. Bu nedenle saf bitümün performans özelliklerini geliştirmek için bugüne kadar çeşitli katkıları tanıtılmış ve bazıları birçok uygulamada başarıyla kullanılmıştır (Porto vd., 2019).

Ağır trafik yükleri, sıcaklık değişimleri, düşük kaliteli malzemeler, iklimsel bozukluklar ve düşük bağlayıcı kalitesi gibi etmenler kaplamaların tasarım ömründen önce bozulması konusunda ciddi endişeler doğurmaktadır (Saltan vd., 2019; Shah ve Mir, 2020). Bununla birlikte altyapı geliştirmelerine yönelik artan talep yol ağlarının genişlemesini artırmış ve aynı zamanda uzun ömürlü ve dayanıklı kaplamalar inşa edilmesini teşvik etmiştir (Debbarma vd., 2022). Bu nedenle araştırmacılar ve yol idareleri yorulma çatlaması, yüksek sıcaklıkta tekerlek izi gibi kaplama deformasyonlarını iyileştirmek için modifiye asfalt bağlayıcılara odaklanmışlardır (You vd., 2011; Saboo vd., 2021; Mahali ve Sahoo, 2019; Crucho vd., 2019). Son yıllarda, reaktif polimerler, doğal/sentetik lifler, doğal/kauçuk, atık plastikler ve nano malzemeler gibi çeşitli modifiyerler bu gaye ile kullanılmıştır (Debbarma vd., 2022). Son zamanlarda bitüm modifiyeri olarak polimerler, nanomalzemeler ve polimer/nanokompozit malzemeler daha popüler hale gelmiştir (Mahali ve Sahoo, 2019; Crucho vd., 2019).

Katkı maddeleri kullanılarak daha dayanıklı asfalt karışımlar elde edilmekte ve bu karışımlar kaplamaların yapısal kapasitesini artırmaktadır (Islam ve Hossain, 2020). İyileştirilmiş asfalt bağlayıcının kullanılması, asfalt kaplamaların uzun dönem performansını iyileştirirken, kaplamadaki bozulmaları en aza indirmede önemli bir rol oynamaktadır

(Golestani vd., 2015). Asfalt bağlayıcıyı modifiyerleri Tablo 2’de, bitüm modifikasyonunda sık kullanılan polimerlerin kategorileri de Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 2. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkılar (Rodrigues ve Hanumanthgari, 2015; Hunter vd., 2015).

Modifiyer türü	Örnekler
Termoplastik elastomerler	Stiren-bütadien elastomer (SBE)
	Stiren-bütadien-stiren elastomer (doğrusal veya radyal) (SBS)
	Stiren- izopren-stiren elastomer (SIS)
	Stiren -etilen- bütadien-stiren elastomer (SEBS)
	Etilen-propilen-dien terpolimer
	İzobüten-izopren rastgele kopolimer (IIR)
	Poliizobutan (PIB)
	Polibutadiyen (PBD)
Lateks	Poliizopren (PI)
	Doğal kauçuk (NR)
Termoplastik polimerler	Etilen-vinil asetat (EVA)
	Etilen-metil akrilat (EMA)
	Etilen-butil akrilat (EBA)
	Ataktik polipropilen (APP)
	Polietilen (PE)
	Polipropilen (PP)
	Polivinil klorür (PVC)
	Polistiren (PS)
Termoset polimerler	Epoksi reçine
	Poliüretan reçine (PU)
	Akrilik reçine
	Fenolik reçine
Kimyasal modifiyerler	Organometalik bileşikler
	Kükürt (S)
	Fosforik asit, polifosforik asit (PA, PPA)
	Sülfonik asit, sülfürik asit
	Karboksilik anhidritler veya asit esterler
	Dibenzoilperoksit
	Silanlar
	Organik veya inorganik sülfidler
	Üre
Geri dönüştürülmüş malzeme lifleri	Lastik kırıntısı, plastik
	Lignin
	Selüloz
	Alümino-magnezyum silikat
	Cam elyaflar
	Asbest
	Polyester
	Polipropilen
Adezyon artırıcılar	Organik aminler
Antioksidanlar	Amitler
	Fenoller
	Organo-çinko veya organo-kurşun bileşikleri
Doğal asfaltlar	Trinidad göl asfaltı (LA)
	Gilsonit
	Kaya asfaltı

Tablo 3. Bitüm modifikasyonunda çoğunlukla kullanılan farklı polimer kategorileri (Porto vd., 2019).

Termoplastik polimerler	Polietilen Polipropilen Etilen-vinil-asetat PVC EBA
Termoplastik elastomerler	Stiren-bütadien-stiren blok kopolimerleri Stiren-izopren-stiren-blok kopolimerleri
Termosetler	Epoksi reçine Poliüretan reçine Akrilik reçine Fenolik reçine
Doğal ve sentetik kauçuklar	Stiren-Bütadien kauçuğu (SBR) Doğal kauçuk Polidiolefinler Geri dönüştürülmüş lastik kauçuğu
Bitüm kimyasal modifiyerleri	Kükürt Polifosforik asit Reaktif polimerler Maleik anhidrit (MAH) Nanokompozit modifiyerler

Tablo 3’te verilen grupların her biri, bitüm katkı maddesi olarak farklı avantajlar ve dezavantajlar sağlayabilmektedir. Geniş polimer grubuna ek olarak polifosforik asit (PPA), kükürt, maleik anhidrit ve farklı kil türleri gibi diğer bitüm modifiyerleri de tanıtılmış ve deneyimlenmiştir; bu açıdan bazı başarılar elde edilmiştir (Porto vd., 2019).

Genellikle modifiyer olarak kullanılan termoplastik elastomerler, mono- veya di-olefinlerin blok kopolimerleridir. Mono-olefin birimi olarak stiren molekülü mezomer olarak kullanılırken, diolefin olarak bütadien veya izopren birimi olarak kullanılmaktadır. Karşılık gelen elastomerler, stiren bütadien stiren (SBS), stiren izopren stiren (SIS), stiren etilen / bütadien-stiren (SEBS) olarak adlandırılmaktadır. Termoplastik elastomer yapısı genellikle doğrusaldır (lineer) ve zayıf zincirler arası bağlantısı ile karakterize edilir. Radyal SBS kopolimeri, yaygın olarak kullanılan bitüm modifiyeridir (Porto vd., 2019).

Doğrusal polimer iki-polibütadien bloğuna bağlı iki polistirenik blok ile karakterize edilirken, radyal yapıdaki polistiren bloklar, polibütadien bloğu etrafında radyal bir konfigürasyon oluşturur. Karışımın nihai performansını karakterize etmek için bu yapı ayrımı belirleyicidir. Stirenik elastomerlerin elastik ve sağlamlık özelliği, moleküllerin fiziksel olarak birbirine kenetlenmesiyle oluşan üç boyutlu kafesten kaynaklanmaktadır.

Kafesin üç boyutlu tepe noktaları, polibütadien birimleri tarafından oluşturulan bir kauçuk matris içinde ayrı alanlar oluşturan polistirenik bloklar tarafından oluşturulmaktadır (Porto vd., 2019). Stiren-bütadien blok kopolimer morfolojisi (URL-1, 2022) Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Stiren-bütadien blok kopolimerinin morfolojik yapısı

Polistirenik bloklar, polimerlerin sağlamlığından sorumluyken, polibütadien bloklar polimere esneklik verir. Polistirenin camsı geçiş sıcaklığı ($T_g=100\text{ }^{\circ}\text{C}$) üzerindeki sıcaklıklarda polistiren bölgelerinin zayıflaması ile bitüm yumuşar. Böylece daha işlenebilir bir bitüm elde edilir. Oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra stirenik bloklar yeniden bir araya gelerek sert bölgeleri yeniden oluşturup sağlamlığı ve esnekliği geri kazanır. SBS polimeri eklendikten sonra polistiren bloklar, bitümün hafif bileşenlerini emerek şişer ve bu durumda bitümün sertleşmesine neden olur (Chen vd., 2002; Airey, 2003).

Termoplastik elastomerlerin asfalta ilave edilmesi durumunda, kopolimerin bütadien fazı, yağ fraksiyonlarının (maltenlerin) emilmesiyle şişer. Polimerin orijinal hacmi yaklaşık 4 ila 10 kat artmış olur. Bu olay, SBS’nin tüm karışıma elastomerik özellikleri aktardığı ve yüksek sıcaklıklarda erime kabiliyetini koruduğu bir asfalt karışımında üç boyutlu (3D) bir polimerik ağı geliştirilmesinin anahtarıdır (Jasso vd., 2015).

Bazı plastomerler, yol kaplama uygulamalarında elastomerlere alternatif olarak bitüm endüstrisinde kullanılmaktadır. Polietilen, polipropilen, polivinilklorür, polistiren ve etilen-vinil asetat kopolimeri, son yıllarda incelenen, ana kauçuk olmayan termoplastik polimerlerdir. Termoplastik polimerler, ısıtıldığında yumuşaması ve soğutulduğunda sertleşmesi ile karakterize edilirler. Bu polimerler bitüme eklendiğinde bitümün penetrasyonunu, yumuşama noktası özelliklerinden daha fazla etkileme eğilimindedir ve bu da termoplastik elastomerlerin ters eğilimindedir (Hunter vd., 2015).

Reaktif polimerler, nanomalzemeler / kil mineralleri ve biyo-yağlar gibi geleneksel olmayan modifiyerlerin kullanımı da asfalt bağlayıcıların özelliklerini geliştirebilmektedir. Bu malzemeler, asfalt bağlayıcılar için tek modifiyer olarak veya polimerlerle kombinasyonu halinde kullanılabilir. Bu teknikler/geleneksel olmayan modifiyerler, asfalt bağlayıcıların özelliklerini iyileştirebilmektedir (Behnood ve Gharehveran, 2019).

1.6.1. Polimer Modifiye Bitüm

Yüksek sıcaklıklarda (40 ile 60 °C), asfalt viskoelastik bir davranış sergilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda asfalt kaplamalarda kalıcı deformasyon oluşmaktadır. Bu durum, asfalt matriksinin viskoz akmasından dolayı trafikten kaynaklanan gerilmelerin birikmesiyle oluşur. Bu nedenle kaplama performansı, büyük ölçüde asfalt çimentosunun reolojik özellikleriyle ilgilidir. Yüksek performanslı bir kaplama, yüksek sıcaklıkta tekerlek izine ve düşük sıcaklıkta çatlamaya daha az duyarlı olan ve agregalara mükemmel yapışan asfalt çimentosu gerektirir. Polimerin asfaltla karıştırılması, günümüz karayollarında var olan problemleri çözme potansiyeline sahiptir (Chen, vd., 2002).

Asfalt bağlayıcılar, asfalt karışımlarının performansında ve özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Daha ağır yükler, daha yüksek trafik hacmi ve daha yüksek lastik basıncı gibi yol kaplamalarında artan trafik ile ilgili faktörler ile kaplamanın günlük ve mevsimsel sıcaklıklardan kaynaklanan önemli değişiklikler asfalt kaplamaların bozulmasına neden olmuşlardır. Kaplamalarda meydana gelen bu bozulmaları önlemek veya azaltmak için polimer bilimciler ve inşaat mühendisleri tarafından asfalt bağlayıcıların özellikleri değiştirilerek asfalt kaplamaların performansını iyileştirmek için birçok girişimde bulunulmuştur. İyi bir modifiyer bozulma özelliklerini, bağlayıcının bozulmadan önce daha fazla gerilme ve şekil değiştirme üreteceği şekilde değiştirir. Reolojik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için bir polimer ilavesiyle asfalt bağlayıcıların modifikasyonu, asfalt endüstrisinde uzun bir geçmişe sahiptir. Polimer modifiyeli asfalt bağlayıcıların, polimerlerin zayıf çözünürlüğü ile ilgili bazı dezavantajları olabilir. Polimer modifiye asfalt bağlayıcıların iç yapısının anlaşılması çok sayıda araştırma çalışmasının konusu olmuştur (Behnood ve Gharehveran, 2019).

En yaygın modifiye katkıları polimerlerdir. Bunlar, aynı atom grubunun birçok kez tekrarlandığı makromoleküllerdir. Bu tekrarlanan gruplar bir veya birkaç farklı molekülden (monomer) oluşabilir (Hunter vd., 2015). Polimerler uzun zincirler oluşturmak için daha

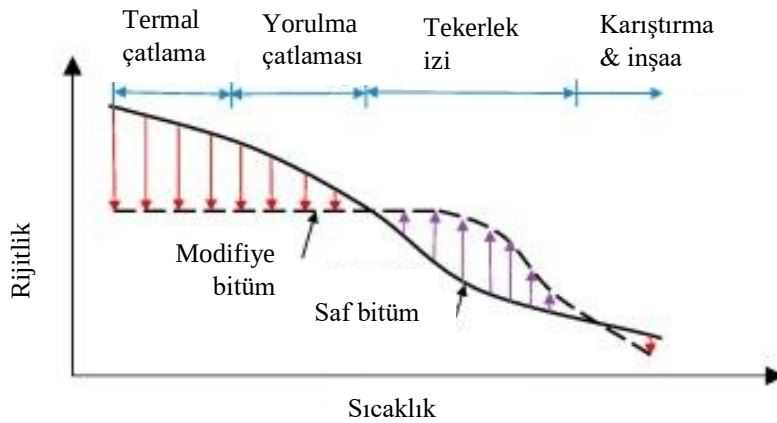
küçük moleküller arasında kimyasal reaksiyon yoluyla sentezlenen makromoleküllerdir. (Boutevin vd., 1989). Modifiyerin (polimer, katkılar) etkili olması ve kullanımının hem pratik hem de ekonomik olması için (Hunter vd., 2015):

- Kolaylıkla elde edilebilir olmalı,
- Uygun maliyetli olmalı,
- Bitümle karışabilmeli,
- Asfalt karıştırma sıcaklıklarında bozulmaya karşı dayanıklı olmalı,
- Karıştırma ve serme sıcaklıklarında bitümü çok viskoz hale getirmeden veya düşük yol sıcaklıklarında çok sert veya kırılgan hale getirmeden yüksek yol sıcaklıklarında akmasına karşı direnci iyileştirmeli,
- Bağlayıcı kohezyon veya adezyon özelliklerini iyileştirmelidir.

Modifiyer bitüm ile karıştırıldığında:

- Geleneksel ekipman kullanılarak işlenebilmeli,
- Uygulama ve serviste, depolama, nakliye sırasında sağladıkları en iyi özelliklerini korumalı,
- Uygulama ve servis, depolama, nakliye sırasında fiziksel ve kimyasal olarak stabil olmalı,
- Normal uygulama sıcaklıklarında kaplama veya püskürtme viskozitesi sağlamalıdır.

İdeal bir modifiyer, Şekil 2’de gösterildiği gibi termal çatlama, yorulma çatlama, tekerlek izi, su hasarı gibi bozulmalara karşı direnç göstermek için asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerini iyileştirmelidir.



Şekil 2. Asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerinde modifikasyondan beklenen değişiklik (Bahia, 2006).

Polimerin fiziksel özellikleri, monomerlerin kimyasal yapısı ve polimer içindeki dizilişleri ile belirlenir. Polimerler, en yaygın kullanılan tipleri olan elastomerler ve plastomerler ile geniş yelpazede modifiyerler içerir. Polimerle modifiye edilmiş bitümler bir bitümün ve bir veya daha fazla polimerin mekanik olarak karıştırılması veya kimyasal reaksiyonları ile genellikle bitümün ağırlığına göre %3 ile %10 arasında değişen bir yüzdeyle üretilmektedir. İlk durumdaki karışımların basit olduğu söylenmektedir; çünkü iki bileşen arasında hiçbir kimyasal reaksiyon meydana gelmez. Bu durumda polimer, karışıma belirli özellikler veren bir filler olarak kabul edilir. İkinci durumda, iki bileşen arasında kimyasal reaksiyonlar olmakta veya başka bir etkileşim meydana geldiği için karışımların karmaşık olduğu söylenmektedir (Boutevin vd., 1989).

Bir polimer / asfalt sisteminin özelliklerini, asfalt bağlayıcıların kimyasal bileşimi ve içyapısı, polimerlerin içyapısı / türü ve konsantrasyonu, polimer faz ile asfalt fazın uyumluluğu, karıştırma koşulu vb. dâhil olmak üzere çok çeşitli faktörler etkileyebilir. Yaygın olarak kullanılan polimerler genellikle asfalt bağlayıcı ağırlığının %4-6 konsantrasyonunda eklenir ve çok çeşitli hizmet ömrü sıcaklıkları ve koşullarında baz asfaltın özelliklerini iyileştirir. Daha yüksek polimer konsantrasyonları ekonomik olarak daha az elverişli olup ayrıca faz ayrışması gibi başka sorunlara da neden olabilmektedir. (Behnood ve Gharehveran, 2019).

Farklı polimer modifiye bitüm türleri üzerinde yapılan incelemede (Porto vd., 2019):

- Plastomer ile modifiye edilmiş bitümler, bitümlü bileşiklerin ve asfalt betonu karışımlarının üzerindeki yüksek gerilmelerin kalıcı deformasyon direncini arttırmak için uygun olmasına rağmen, düşük sıcaklıkta elastisitesinin olmaması bu modifiye bitümlerin uygulanmasını sınırlandırmıştır.
- Plastomer ile modifiye edilmiş bitümlerin çift bağlarının bulunmamasından dolayı termal ve yaşlanma stabilitesine rağmen asıl sorun, karışımın (polimer + bitüm) depolama sırasında stabilitesinde ve bitüm matriksinde homojen olarak dağılmasında zorluklar yaşanmasından kaynaklanmaktadır.
- En yaygın olarak kullanılan elastomer olan SBS ile yapılan bitüm modifikasyonu, gelişmiş termal duyarlılık, artırılmış yumuşama noktası ve 25 °C'de penetrasyon değerinde hafif düşüş dahil olmak üzere çok sayıda faydaya sahiptir. Ek olarak, SBS'nin oksidasyon sürecinden kaynaklanan sertlik artışını azaltabildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4'te bitüm modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan polimerlerin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 4. Bitüm modifikasyonunda yaygın kullanılan polimerlerin avantaj ve dezavantajları (Zhu vd., 2014).

Sınıflandırma	Örnekler	Avantajlar	Dezavantajlar
Plastomerler	Polietilen Polipropilen	İyi yüksek sıcaklık özellikleri Nispeten daha ucuz	Esneklikte sınırlı gelişme Faz ayrışma sorunları
	Etilen-vinil asetat Etilen-butil akrilat	Nispeten daha iyi depolama stabilitesi Tekerlek izine karşı yüksek direnç	Elastik geri dönmede sınırlı gelişme Düşük sıcaklık özelliklerinde sınırlı iyileşme
Termoplastik elastomerler	Stiren-bütadien-stiren Stiren- izopren-stiren	Artırılmış rijitlik Azaltılmış sıcaklık hassasiyeti Geliştirilmiş elastik tepki	Bazı bitümlerde uyumluluk sorunları Isıya, oksidasyona ve ultraviyoleye karşı düşük direnç Nispeten yüksek maliyet
	Stiren -etilen- bütadien- stiren	Isı, oksidasyon ve ultraviyole karşı yüksek direnç	Depolama kararsızlığı sorunları Nispeten azaltılmış esneklik Yüksek maliyet

1.6.2. Polimer Modifiye Bitüm Üretimine Etki Eden Parametreler

Spesifik bir polimerin fiziksel özellikleri, oluşan monomerlerin dizisi, kimyasal yapısı, moleküler ağırlığı ve moleküler ağırlık dağılımı ile belirlenmektedir. Asfalta polimerler eklendiğinde modifiye asfalt çimentosunun özellikleri: Polimer özellikleri, asfalt özellikleri, karıştırma koşulları ve polimerin asfaltla uyumluluğu gibi çeşitli parametrelere bağlı olmaktadır (Becker vd., 2001).

Başarılı bir modifikasyon elde edilebilmesi birçok parametreye bağlı olmaktadır. Yapılan araştırmalara göre, iyi bir polimer modifiye bitüm elde etmek için dikkat edilmesi gereken parametrelerin, bitüm ve polimerin kimyasal yapısı, bitüm ve polimerin türü, polimer/bitüm oranı, polimer parçacık boyutu ve polimer modifiye bitüm üretim/işlem koşulları vb. olduğu ifade edilmektedir. Bu parametrelerin her birinin polimer modifiye bitüm özelliklerini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir (Behnood ve Gharehveran, 2019; Özdemir vd., 2020; Neves vd., 2015; Sağlık ve Öztürk, 2014; Pérez-Lepe vd., 2003; Isacson ve Zeng, 1997).

Modifiye asfaltın reolojik ve mekanik özellikleri, asfalt ve polimeri karıştırmak için takip edilen süreçlerden büyük ölçüde etkilenir (Behnood ve Olek, 2017; Behnood ve Olek, 2017). Bu nedenle karıştırma sıcaklığı, hızı ve süresi gibi optimize edilmiş bir karıştırma koşulunun oluşturulması, istenen özelliklerin elde edilmesi için bir gerekliliktir. Karıştırmanın amacı, polimerin asfalt tarafından şişirildiği bir durum elde etmektir. Karıştırma koşulu, polimer türü, polimerin fiziksel biçimi, bitümün türü ve yapısı, karıştırma ekipmanı türü ve karıştırma sırasındaki zaman-sıcaklık profili gibi bir dizi faktörden etkilenir (Behnood ve Gharehveran, 2019).

Polimer sıcak bitüme eklendiğinde, bitüm hemen polimer partiküllerine nüfuz etmeye başlar ve polimerin stiren alanlarının çözülmesine ve şişmesine neden olur. Bu gerçekleştiğinde, gerçek bir karıştırma süresi içinde tatmin edici bir dağılım elde edilecekse şişmiş parçacıklar üzerine uygulanan kesme seviyesi kritik olmaktadır. Bu nedenle termoplastik elastomerleri bitüm içine yeterince dağıtmak için orta veya tercihen yüksek kesmeli karıştırıcılar gereklidir (Read ve Whiteoak, 2003).

Elde edilen polimer dağılımının kalitesi bitümün yapısı, polimerin türü ve konsantrasyonu, karıştırıcı tarafından uygulanan kesme hızı gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Read ve Whiteoak, 2003).

Polimer ve asfaltın karıştırılmasında homojen karışım elde etmek için gereken süre; polimerin tipine, moleküler ağırlığına ve (termoplastik kauçuklar için) polimerin kimyasal bileşimine göre değişiklik gösterecektir. Daha yüksek bir moleküler ağırlık daha uzun karıştırma sürelerine yol açacaktır veya bunun tersi de geçerli olabilmektedir (Morgan ve Mulder, 1995).

Polimerin fiziksel formu (toz, kırıntılar, peletler) karıştırma sürecini iki şekilde etkilemektedir. Polimerin partikül boyutu ne kadar küçükse iyi bir dağılım elde etmek için o kadar daha az küçültülmesi gerekmektedir. Daha küçük partikül boyutu, birim polimer kütlesi başına daha geniş yüzey alanı anlamına geldiğinden, bitümün penetrasyonu ve polimerin şişmesi kolaylaştırılır ve böylece daha hızlı çözünme gerçekleşir. Toz polimerler bu nedenle gözenekli peletlerden daha hızlı dağılır ve çözülür (Morgan ve Mulder, 1995).

Bitümün hem bileşimi hem de viskozitesi karıştırma sürecini birden fazla şekilde etkilediğinden karıştırma işleminde karmaşık bir rol oynamaktadır. Düşük viskoziteli bitüm, polimerin bitüm içinde önceden dağılmasına yardımcı olmakta faydalıdır ve daha sonra polimer partiküllerinin penetrasyonunu ve şişmesini hızlandıracaktır. Karıştırma

sıcaklığında düşük bir bitüm viskozitesi, polimerin değirmende dağılımını geliştirecek ve daha hızlı bir partikül boyutu küçülmesine neden olacaktır (Zieliński vd., 1995).

Karıştırma sırasında zaman-sıcaklık profili, ideal karıştırma işlemi hem ekonomik açıdan hem de polimer üzerindeki herhangi bir termal etkiyi en aza indirmek için polimerin bitüme tam olarak dahil edilmesine karşılık gelen mümkün olan en kısa sürede ve mümkün olan en düşük sıcaklıkta gerçekleştirilmelidir. Bununla birlikte zaman-sıcaklık profili, seçilen bitümün ve polimerin hareketliliğini ve ilk şişmesini sağlama gereksiniminin bir fonksiyonudur. Örneğin, SBS için polimer üzerindeki termal etkileri en aza indirmek için 190 °C'den yüksek sıcaklıklardan kaçınılmalıdır (Brûlé vd., 1988).

Karıştırma koşulları, modifiye bağlayıcıların yapısı ve özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Karıştırma süresi ne kadar uzun olursa mikroyapı o kadar ince olur. Bununla birlikte polimer bozunmasının mekanik özelliklerde ve daha kesin olarak düşük sıcaklıkta deformasyon olasılıklarında azalmaya yol açtığı bir başlangıç noktası vardır. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa bu eşiğe o kadar hızlı ulaşılır (Brûlé vd., 1988).

Polimer modifiye bitüm (PMB) modifikasyonunda seçilen sıcaklıklar gerek polimerlerin yapısında gerekse bitümün yapısında mevcut olan temel malzemelerin kaybolmasına neden olmamalıdır (Shi vd., 2017).

Yüksek karıştırma sıcaklığı, asfalt bağlayıcıya eklenmiş polimer partiküllerinin miktarını artırabilir (Navarro vd., 2007). Bununla birlikte polimer ve asfaltın yapıların üzerindeki olumsuz termal etkilerden kaçınmak için makul olmayan yüksek karıştırma sıcaklıklarından kaçınılmalıdır. İdeal bir karıştırma sürecini elde etmek için polimer partiküllerinin asfalt bağlayıcıya tam olarak katılmasına izin veren, mümkün olan en kısa karıştırma süresi için mümkün olan en düşük karıştırma sıcaklığı kullanılmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda asfalt ve polimerin viskozitelerindeki büyük farklılık nedeniyle karıştırmak kolay bir iş değildir ve polimer parçacıklarının parçalanması için genellikle kesilmesi gerekir. Polimeri asfalt bağlayıcı ile karıştırmak için yüksek kesme ve düşük kesme olmak üzere iki ana kesme işlemi vardır. Yüksek kesmeli karıştırma, polimer parçacıklarının boyutunu azaltmak için mekanik ve hidrodinamik kesme uygularken; düşük kesme, toz ve sıvı modifiyerler için daha uygun olmaktadır (Behnood ve Gharehveran, 2019).

Polimer ile bitüm arasında uyumluluk sadece kimyasal olmamaktadır. Koloidal yapıdaki bitümün içerisinde polimerin fiziki olarak da homojen yayılabilmesi gerekmektedir. Bunun için belirlenen sıcaklıkta karıştırma devir sayısı ve süresi doğru bir şekilde belirlenmelidir. Bu parametreler uygun seçilmediklerinde, modifiye bitümün kısa

ve/veya uzun dönem performansını olumsuz yönde etkileyen birçok bozulma gözlenebilmektedir. Dolayısıyla karıştırma hızı ve süresinin dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Gökalp vd., 2019).

Bitümün farklı polimerler ile modifikasyonu, polimerin tipi, bitüm bileşenleri ve karışım koşulları gibi faktörlere bağlı olarak, reolojik ve kimyasal karakterizasyon farklılıklarına neden olmaktadır. PMB karışım koşulları, malzemenin yaşlanma özellikleri, polimerin degradasyonu ya da polimerin bitüm tarafından emilimi gibi PMB karakterizasyonu üzerinde önemli etkilere sahiptir ve bu sebeple araştırmacılar için her zaman ilgi çekici bir konu olmuştur (Özdemir vd., 2020).

Bitümün modifiyerlerle modifikasyonu; polimerin türü, bitüm bileşenleri ve sıcaklık, kesme hızları veya karıştırma süreleri açısından karıştırma koşulları gibi faktörlere bağlı olarak morfolojik, reolojik ve kimyasal karakterizasyon farklılıklarına neden olmaktadır. Karıştırma koşulları; polimer dağılımı, faz ayrışması ve en önemlisi bitümün yaşlanmasında etkilidir. Polimerin bitümle daha uzun süre karıştırılması veya daha yüksek kesme hızları, oksijenin bitümle etkileşimini doğrudan etkilediği için bitümün oksitlenmesine neden olmuştur. Bu anahtar parametreler ve etkileri, araştırmacılar için her zaman ilgi çekici bir konu olmuştur, çünkü numunenin yaşlanması, polimerin degradasyonu veya bazen polimerin bitüm tarafından daha az emilmesi gibi bazı sonuçları olabilmektedir (Özdemir vd., 2020).

Karıştırma koşulları, nihai ürünün özelliklerini etkilediği için anahtar parametreler olarak adlandırılabilir. Gerekli ve yeterli karıştırma koşullarının belirlenmesi sadece PMB'nin üretim aşamasında değil, aynı zamanda numunenin karakterizasyonları yapılmadan önce numune hazırlama aşamasında da çok önemlidir. Anahtar parametreler birbirine bağlıdır; ancak modifikasyon için kullanılan polimer tipine veya bitümün kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır (Özdemir vd., 2020).

Karıştırma süresi olması gerekenden daha uzun seçilirse numunenin yaşlanmasına veya topaklaşmasına (toplanma) neden olabilir, diğer yandan homojen bir PMB örnekleri elde etmek için yeterli bir karıştırma süresine sahip olmak önemlidir. PMB üretimi sırasında gerekenden daha yüksek kesme hızlarının kullanılması, bitümün oksidasyonuna neden olmaktadır. Ancak kesme oranının düşürülmesi polimerin bitüm tarafından emilmesini etkiler. Bu nedenle karıştırma koşulları arasında kesme oranının belirlenmesi özel dikkat gerektirir (Özdemir vd., 2020).

Karışım sıcaklığı hem polimerin hem de bitümün erime noktası göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Önceki çalışmalar, yüksek karıştırma sıcaklığının kullanılmasının, oksidasyon nedeniyle hem polimer hem de bitümde bazı hasarlara neden olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı seçilen karıştırma sıcaklığı, bitüm ve polimerin erimesini sağlamalı ancak numunenin yaşlanmasını önlemelidir (Özdemir vd., 2020).

Bitümlü bağlayıcının polimerlerle modifikasyonu sürecinde karıştırma aracına, zamana ve sıcaklığa bağlı olarak bitümün fiziksel ve kimyasal yapısında değişiklikler meydana geldiği ifade edilmiştir. İstenilen özelliklerde ve stabil kompozisyonda bir modifikasyon elde etmek karıştırma aracı, zaman ve sıcaklık olmak üzere üç faktöre bağlıdır. Birçok polimer, bitüm içinde bazı sıcaklıklarda çözünmemekte ve kümeler halinde dağılmakta ve iyi bir bağ kurulamamaktadır (Kök vd., 2011).

Bıçak (değirmen) şekli, sıcaklık, kesme hızı ve karıştırma süresi gibi çeşitli karıştırma işlemi parametreleri, üretilen polimer modifiye asfalt (PMA) özelliklerini etkilemektedir. Karıştırma süresinin, altı farklı polimer türü ile elde edilen PMA karışımların üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada tüm modifiye asfaltların en iyi reolojik özellik gösterdiği optimum karıştırma süresi, Lucolast7010 ve Anglomak2144 ile modifiye edilmiş asfalt haricinde 30 dakika olmuştur. Karıştırma hızları olarak Lucolast7010, Anglomak2144, SBS KTR401 ve Pavflex140 için 2500 dev./dk. seçilirken; EE-2 için 1800 dev./dk. alınmıştır. Sonuç olarak, karıştırma süresinin asfalt-polimer karışımının kalitesini sağlamak için bağlayıcı içindeki polimer partikül dağılımı üzerinde önemli etkisinin olduğu saptanmıştır (Babalghaith, vd., 2019).

1.6.3. Polimer Modifiye Bitümlerde Bitüm-Polimer Uyumluluğu

Bitümün yapısındaki farklılıklar polimer ile bitüm arasında uyumluluk problemlerinin oluşmasına eden olabilmektedir. Uyumluluk, modifiye bitümün istenilen özelliklere sahip olmasını sağlayan, bitümün bileşenleri ve polimer türü ile yakından ilgili bir kavramdır. (Gökarp vd., 2019). Uyum, modifiye bitümün depolanması sırasında ayrışmama eğilimi olarak da tanımlanabilmektedir (İskender, 2019). Bitüm modifikasyonunda, birbirine yakın molekül ağırlıklarına sahip uyumlu polimerlerin kullanılması tercih edilmelidir. Birbirleri ile yakın molekül ağırlığına sahip malzemelerle yapılan modifikasyonlar, bitüm ile polimerlerin daha homojen karışmasını sağlayacak ve molekül ağırlık farklarından kaynaklı ayrışmaların da önüne geçilmiş olunacaktır (Gökarp vd., 2019).

Saf polimer modifiyerlerinin en büyük eksikliklerinden biri, polimer ve asfalt arasındaki yoğunluk, polarite, moleküler ağırlık ve çözünürlükteki büyük farklılıklardan dolayı polimerlerin çoğunun termodinamik olarak asfalt ile uyumsuz olmasıdır. Bu durum, termal depolama sırasında kompozitin tabakalarının ayrılmasına neden olabilmekte, bu da kolaylıkla görülmemekte ve yapımda kullanıldığında malzemeyi olumsuz etkilemektedir. (Fang vd., 2013).

Yapılan bir değerlendirme araştırmasına göre polimerlerin bitüm modifikasyonunda kullanılmasına ilişkin kanıtlanmış avantajlara sahip olmasına rağmen, çeşitli araştırma çalışmaları polimerlerin bitüm ile uyumsuzluğuyla ilgili zorlukları ortaya koymuştur. Bu zorlulardan birisi de polimer modifiye bitümlerin depolama stabilitesi olarak bilinen faz ayrışması problemi (Porto vd., 2019).

Asfalt-polimer karışımlarının reolojik davranışı, kaplamaların performansı ile yakından ilişkili olduğu için büyük ilgi görmektedir. Ayrıca, az miktarda polimer ilavesi asfaltın reolojik özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Polimer ilavesi, yüksek moleküler ağırlığı nedeniyle asfalt karmaşıklığına ek bir zorluk getirmektedir. Homojen bir sistemin oluşması kolay değildir ve uyumsuzluk sorunları ortaya çıkmaktadır (Becker vd., 2001).

Çeşitli çalışmalar, polimer modifiye bitümlerin stabilitesinin, baz bitümün asfaltten ve aromatik içeriğine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir. Daha az asfaltenden daha stabil modifiye edilmiş bileşim beklenilebilir. Bununla birlikte polimerin kimyasal yapısı ve reaktifliği de bitüm / polimer sistem uyumluluğunda büyük önem taşımaktadır (Porto vd., 2019).

Polimerlerin bitüm ile uyumu ve modifikasyon süreci modifiye bitümün ve asfalt karışımının özellikleri üzerinde anahtar rol oynamaktadır (İskender, 2019).

Yapılan deneysel çalışmalar, polietilen ve polipropilen gibi plastomer ile modifiye edilmiş bitümlerin uyumluluk sorunlarına yol açan en yaygın plastomerler olduğunu göstermiştir. Bu durum polar olmayan kimyasal doğalarından kaynaklanmaktadır (Porto, vd., 2019).

Polimer modifiye asfalt endüstrisindeki ana zorluk, yüksek sıcaklıkta statik depolama veya serim sahasına nakliye sırasında ayrılma eğilimi ile kendini gösteren, asfalt ve polimer arasındaki zayıf uyumlulukla ilgilidir. En kötü durumda bu olay, asfalt bakımından zengin ve polimerce zengin fazların makroskopik olarak ayrılmasına neden olur. İkincisi oldukça viskozdur ve işlenmesi zordur. Bu nedenle yüksek sıcaklık/yüksek kesme işlemi ile

hazırlanan termodinamik olarak kararsız asfalt/polimer karışımları ayrışmadan önce kullanılmalıdır. Hemen hemen tüm PMA'lar bu riske maruz kalır ve ayrışıp ayrışmamaları temelde kinetik bir problemdir (Polacco vd., 2015).

Araştırmacılar; polimerlerin yüksek maliyeti, bazı polimer modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık hassasiyeti, düşük yaşlanma direnci, zayıf depolama stabilitesi ve elastisitesindeki sınırlı iyileşmesi gibi çeşitli zorluklarıyla karşılaşmışlardır. Bu durum da bitüm oksidasyonu ve polimer bozunmasının (ayrışması), polimer modifiye bitümlerin yaşlanma eğilimine neden olmuştur. Bazı PMB'lerin zayıf depolama stabilitesi genellikle polimer modifiyerler ile bitüm arasındaki zayıf uyumluluktan kaynaklanmakta ve bu da polimerler ve bitümün yoğunluk, moleküler ağırlık, polarite ve çözünürlük gibi farklı özellikleri tarafından kontrol edilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için araştırmacılar; doygunluk (saturasyon), kükürt vulkanizasyonu, antioksidanların eklenmesi, hidrofobik kil minerallerinin kullanılması, reaktif polimerlerin işlevselleştirilmesi ve uygulanması (yeni işlevselleştirilmiş ürünler olarak da kabul edilebilir) gibi farklı çözümler denemişlerdir (Zhu vd., 2014).

Kil polimer ile bitüm arasındaki yoğunluk farkını azalttığı ve depolama stabilitesini iyileştirdiği için bitüm ile polimer arasında artan bir uyumluluğa katkıda bulunmaktadır (Farias vd., 2016).

Halihazırda kullanılan polimerlerin performansını artırmak ve ayrıca kullanılabilir polimerler listesini genişletmek için polimer/asfalt uyumlaştırıcı konusunda aktif bir araştırma bulunmaktadır. Asfalt ve polimer arasındaki kimyasal etkileşim, kükürt veya mineral asitler gibi düşük moleküler ağırlıklı bileşiklerin eklenmesiyle desteklenebilir. Organo-modifiye killerin son zamanlarda böyle bir amaç için muhtemel bir aday olduğu görülmüştür. Bu nedenle asfaltların ve PMA'ların killere modifikasyonuna artan bir ilgi vardır. Asfalt/polimer/kil üçlü sistemlerinin kullanımının iki potansiyel avantajı vardır: Bunlar, polimer ve asfalt özelliklerinin iyileştirilmesi ve polimer/asfalt uyumlaştırıcı etkisidir (Polacco vd., 2014).

Mükemmel uyumlu bir polimer, baz asfaltta tamamen dağılır ve böylece faz ayrışması sorunları olmadan homojen bir karışım elde edilir. Ancak bu durumda polimerin varlığı, temel kimyasal-fiziksel özelliklerin küçük değişimleri ile ortalama moleküler ağırlıkta basit bir artışa karşılık gelir. Bu nedenle karıştırmanın amacı, asfaltik malzeme tarafından şişirilmiş bir polimer elde etmek ve böylece yapısı orijinal polimerin yapısını “anımsatan” bir ağ oluşturmaktır (Polacco vd., 2014).

1.7. Reaktif Etilen Terpolimerlerin Bitüm Modifikasyonunda Kullanılması

Bitüm modifikasyonunun daha yaygın hale gelmesiyle bitüm için çeşitli polimer modifiyerleri geliştirilmiştir. Bu polimer modifiyerlerin doğası gereği genel olarak termoplastik elastomerler, plastomerler ve reaktif polimerler olarak üç gruba ayrılabilir. Polimerin yapısı ve bileşimi önemli bir rol oynasa da geniş ölçekte bu grupların her birine ait polimerlerin bitümle benzer etkileşim mekanizmaları geliştirdiği düşünülmektedir. Bununla birlikte bu tür özdeş etkileşimin belirli bir modifiyer sınıfı için reolojik özelliklerde aynı değişimle sonuçlanıp sonuçlanmadığı inandırıcı bir şekilde gösterilmemiştir. Baz bitümün özellikleri, modifiyerin özelliklerine ek olarak kritik bir rol oynamaktadır (Athira vd., 2020).

Yapılan çalışmalar, SBS'nin bitümün sertliğini artırmasına karşılık düşük sıcaklıklarda çatlamaya, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumuna ve yorulmaya karşı dayanımı artırdığını göstermiştir. Ancak, SBS ile modifiye edilmiş bitümde karşılaşılan en büyük sorunlardan biri bu karışımın sıcak tutulması gerekliliğidir. Üretiminden sonra istenilen sıcaklıkta tutulmaz ise bitümden çok kolay ayrılmaktadır. Taşımaya ve depolamaya uygun değildir. Sıcak tutulmaması ekipmanlara yapışma, ayrışma ve donma gibi sorunlar yaratabilmektedir (Aglan vd., 1993; Isacson ve Lu, 1999; Airey, 2004). Bu sebeplerden dolayı, DuPont firması reaktif elastomerik terpolimer Elvaloy RET malzemesini geliştirmiştir. Elvaloy RET, bitüm ile kimyasal bağ oluşturarak dönüşümsüz olarak bitümü modifiye etmektedir. Stoklamada ve sevkiyat aşamasında herhangi bir ayrılmaya uğramayan Elvaloy RET ile modifiye olan bitüm, saf bir bitüm gibi depolanmakta ve sevk edilebilmektedir (Hrdlicka vd., 2007; Yıldırım, 2007).

Reaktif etilen terpolimerler (RET) genellikle maleik anhidrit veya epoksi halkalar içeren etilen bazlı kopolimerler ile işlevselleştirilmiş termoplastik elastomerlerdir. İkincisi daha yaygındır ve etilenli terpolimerler, glisidilmetakrilat veya maleik anhidrit gibi epoksi içeren fonksiyonellikler ve metil / etil / butil akrilat gibi ester olarak mevcuttur (Zhu vd., 2014; Nivitha vd., 2016). Glisidilmetakrilat veya maleik anhidritte bulunan epoksi halkası, doğası gereği oldukça kutupsaldır ve bağlayıcı içinde üç boyutlu yapı oluşturmak için karboksilik asit grupları gibi bağlayıcıdaki fonksiyonel gruplarla kolayca reaksiyona girer. Bu üç boyutlu yapılar, elastomerlere benzer bir şekilde bağlayıcının “elastik” doğasını geliştirir. Ester gruplarının bağlayıcı ile uyumluluğu geliştirdiği düşünülmektedir. Etilen gibi elastomerik fraksiyonun ve glisidilmetakrilat gibi reaktif fonksiyonel grupların varlığından

dolayı, RET'ler ile bitüm arasındaki etkileşim hem fiziksel hem de kimyasaldır. RET'ler böylece geleneksel plastomerik bağlayıcıların eksikliklerinin üstesinden gelir ve sünme-geri dönme ve elastik geri dönme testlerinde elastomer ile modifiye edilmiş bağlayıcılarınkine benzer elastik geri dönme sergiler (Gibson vd., 2012).

Elastomerler, plastomerler ve reaktif polimerler, asfalt bağlayıcı ile farklı şekilde etkileşime girdiklerinden ve bağlayıcının reolojik özelliklerini farklı şekillerde etkilediğinden, bu polimerlerin bitümlü karışımların deformasyon, çatlama ve yorulma gibi mekanik özelliklerini etkileme dereceleri de farklı olmaktadır. Bu farklılıklar nedeniyle, farklı polimer modifiyerlerin bitümlü bağlayıcının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak ilgi çekici bir araştırma konusudur (Athira vd., 2020).

Plastomerler ve termoplastik elastomerlerden farklı olarak reaktif polimerler, asfalt modifikasyonunda farklı bir kimyasal etkileşim gösterir. RET, kimyasal olarak çapraz bağlı üç boyutlu bir sistem olarak karakterize edilebilir. Çapraz bağlar, polimerler ısı ve basıncın veya bir katalizörün etkisine maruz kaldığında gerçekleşir. Bu koşullar altında, polimerin molekülleri arasındaki kovalent bağlarla dahili bir 3D ağ oluşur ve bu da erime veya çözünme yeteneğinin kaybolmasına neden olur. Maleik anhidrit tarafından modifiye edilen termoplastik elastomerler, epoksi halkaları içeren etilen bazlı kopolimerler ve yakın zamanda piyasada bulunan etilen, glisidilmetakrilat ve bir ester grubu (genellikle metil, etil veya bütillakrilat) terpolimerleri, asfalt modifikasyonu için kullanılan RET'e aittir (Polacco, vd., 2006).

Reaktif terpolimerler, bazı bitüm bileşenleri ile kimyasal bağlar oluşturabilen fonksiyonel gruplar içeren polimerlerdir. Bu polimerler, bitümdeki asfaltın etrafında bir ağ oluşturarak bütünsel bir bileşik oluşturur ve bitüm ile kimyasal bir reaksiyon üretir (Polacco vd., 2006; Jasso vd., 2015; Polacco vd., 2015; Gama vd., 2016; Gama vd., 2018). Ancak bu kimyasal bağlar oluştuğunda, bu durumda erime ve çözünme özelliklerine sahip olmayan ve bitüm modifikasyonunda fayda sağlamayan bir polimer - bitüm jeli oluşabilir (Polacco vd., 2006; Jasso vd., 2015; Polacco vd., 2015).

RET polimeri, baz bağlayıcı ile kimyasal olarak reaksiyona girerek bir dereceye kadar performansta iyileşmelerin yanı sıra kabul edilebilir depolama stabilitesi sağlar. Ancak bağlayıcının jelleşmesine neden olmaksızın eklenebilecek RET miktarı memnun edici bir performans sağlamak için yeterli değildir. Bu nedenle iyileştirilmiş bağlayıcı özelliklerini etkili bir şekilde elde etmek için yardımcı modifiyerler ve/veya katalizörler ekleyerek RET

polimerinin kullanımını optimize etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır (Gama vd., 2018).

Çalışmalarda, terpolimerlerin modifiyerler olarak tek başına kullanılmasının ideal olmadığı, çünkü jelin oluşma riskinden dolayı asfaltın performansı üzerinde zayıf bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Jasso vd., 2015; de Sá vd., 2013; Polacco vd., 2006). Terpolimer asfalt ile karıştırıldığında, genellikle karışıma polifosforik asit ilave edilerek karışımındaki kimyasal reaksiyonu hızlandırması ve katalizör işlevi görmesi sağlanmaktadır (Gama vd., 2016; Jasso vd., 2015; de Sá vd., 2013; Singh vd., 2018). Modifikasyonda PPA kullanıldığında, PPA karışımın tekerlek izi gibi özelliklerini iyileştirmekte, yaşlanma ve yorulma direnci ve karışımda ihtiyaç duyulan polimer miktarını azaltmaktadır (de Sá vd., 2013; Jasso vd., 2015; Gama vd., 2016, Ge vd., 2017, Singh vd., 2018).

PPA, asfaltın yüksek servis sıcaklıklarını değiştirirken bu tür bağlayıcıların düşük servis sıcaklıkları çoğunlukla değişmeden kalır. Asfaltın PPA ile modifiye edilmesinin ana nedeni, iyileştirilmiş işleme koşulları, yüksek sıcaklıkta viskozite ve depolama stabilitesi için gerekli polimer miktarının sınırlandırılmasıdır (Trakarnpruk ve Chanathup, 2005).

Bitüme %3 ve %4.5 oranında SBS ve %1.5 ve %2 oranında Elvaloy RET ilave edilerek hazırlanmış modifiye bağlayıcıların tekerlek izi oluşumu incelenmiştir. Modifiye bitümler 500 dev./dk. hızda, 170 °C sıcaklıkta ve 90 dakika karıştırılarak üretilmiştir. Elvaloy RET modifiye bitümlü bağlayıcılar da aynı sıcaklıkta ve hızda hazırlanmıştır. Ancak reaksiyonu hızlandırmak için karışıma fosforik asit ilave edilerek karıştırma süresi 4 saate çıkartılmıştır. Kompleks kayma modülü ve faz açısı değerleri kullanılarak tekerlek izi dayanım parametresi olan ($G^*/\sin\delta$) değeri belirlenmiş ve Kraton D 1101 ile Elvaloy RET polimerlerinin bitümlü bağlayıcının tekerlek izi dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Deney sonucunda polimer modifiyeli bağlayıcılarda gözlenen kompleks kayma modülü ve tekerlek izi parametresi değerlerindeki artış ve faz açısındaki azalış, Kraton D 1101 ve Elvaloy RET polimerlerinin bitümün tekerlek izine karşı dayanımını ve elastisitesini arttırdığını göstermiştir. Elvaloy RET modifiyeli bağlayıcıların faz açısı değerlerinin Kraton D 1101 katkılı bağlayıcı değerlerinden daha düşük çıkması, Elvaloy RET reaktif elastomerik terpolimerin, bitümün tekerlek izi dayanımını, Kraton D 1101'den daha çok arttırdığını göstermiştir (Ahmedzade ve Göktepe, 2009).

Ağırlıkça %0, %0.4, %0.8 ve %1.2 gibi dört farklı Elvaloy RET yüzdesi ile 160/220 penetrasyon dereceli bitüm ile yapılan modifikasyonda modifiye bitümlerin fiziksel, kimyasal, mikro yapısal ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tüm

modifiye bitümler, 185 °C sıcaklıkta, 500 dev./dk. dönme hızında 120 dakika boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlara saf bitümün ağırlığınca %0.3 oranında katalizör olarak polifosforik asit ilave edilmiş ve karıştırma işlemine 30 dakika daha devam edilmiştir. Sonuçlar Elvaloy 5160'ın bitümdeki ana makromoleküler gruplarla reaksiyona girdiğini ve bu reaksiyon sonucunda modifiye bitümlerin homojen tek fazlı bir yapı olarak davrandığını göstermiştir. Elvaloy RET ile modifiye edilmiş bitümlerin saf bitümden çok daha sert olduğu ve daha iyi yaşlanma direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu bitümlerin penetrasyon sınıfları değişmiş ve sıcaklık duyarlılıkları önemli ölçüde azalmıştır. Reolojik testler, Elvaloy RET katkısının bitümün yorulma çatlamasına ve özellikle kalıcı deformasyona karşı direncini arttırdığını göstermiştir. Bitümün sertleşmesine paralel olarak düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı direncinde bir azalma gözlenmiştir. Sonuç olarak, bitümdeki Elvaloy RET miktarının artmasının bitümü sertleştirdiği ve sıcaklık hassasiyetini azalttığı, bitüm elastikiyetini artırdığı, yorulma ve tekerlek izi direncini artırdığı ancak ısıl çatlama direncini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Elvaloy modifiyeli bitümlerin orta ve yüksek sıcaklıklar için daha uygun olduğunu gösterir. Ek olarak, Elvaloy RET ile bitüm bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonun oluşturduğu güçlü bitüm-polimer bağının modifiye bitümün performansını iyileştirdiği düşünülmektedir (Geçkil, 2019).

Reaktif terpolimerin modifiye bitümlerin performans özelliklerini iyileştirmedeki işlevini araştırmak amacıyla, bitüm ağırlığınca %0.5, %0.75 ve %1.0 gibi farklı yüzdeleri kullanılarak bitüm ile karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sırasında kimyasal reaksiyona bağlı olarak %1.25 Elvaloy RET içeren karışımda çözünmez bir jelleşme (katılaşma) meydana gelmiştir. Bu nedenle Elvaloy RET modifikasyonda %1'den fazla kullanılmamıştır. Modifiye bağlayıcıları hazırlamak için saf bitüm ve katkı maddeleri, 120 dakika karıştırma süresinde 500 dev./dk. hızda bir karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Katalizör olarak, karışıma ağırlıkça %0.3 oranında süper fosforik asit ilave edilmiş ve karıştırma işlemi yapılmıştır. Dönel viskozite, dinamik kayma reometresi ve kirli eğme reometresi testleri gibi Superpave bağlayıcı testleri yapılmıştır. Sonuçlar, Elvaloy RET ile modifiye edilmiş bitümlerin sıcaklık değişikliklerine daha az duyarlı olduğunu göstermiştir. Elvaloy RET, bitümün sertliğini önemli ölçüde geliştirmiştir. Bitümün ısıl çatlamaya karşı direncinde ciddi bir düşüşe neden olmadan bitümün tekerlek izine ve yorulma çatlamasına karşı direncini de geliştirmiştir (Geçkil ve Seloglu, 2018).

Bitüme %1-5 aralığındaki oranlarda, SBS fiziksel olarak eklenerek Elvaloy RET'in bitüm içindeki asfaltinin karboksilik asit grubuyla kimyasal tepkime vererek katılması

sağlanmıştır. Modifiye edilen bitümlere penetrasyon testi yapılmıştır. Saf bitüme bitümle reaksiyona giren Elvaloy RET ve bitüme fiziksel karışan SBS'in (Kraton D1101) ilave edilmesiyle son üründe saf bitümlü bağlayıcıya göre penetrasyon değerinin azaldığı belirlenmiştir. Penetrasyon değerlerindeki azalma eklenen SBS (Kraton D1101)'den ve özellikle oksijenden dolayı bitümün sertleşmesini geciktirmede etkili olan reaktif terpolimer (Elvaloy RET)'den kaynaklanmaktadır. Penetrasyon testinde öncelikle başlangıçtan itibaren 2 saat süreyle SBS'nin eritilmesiyle penetrasyon değerinde oldukça önemli oranda bir azalma görülmüştür, sonra Elvaloy RET'in katılmasından sonra eklenen katalizör polifosforik asitin 4. saatten 5. saate doğru Elvaloy RET' in tepkimeye girmesinden kaynaklı penetrasyon değerinde bir azalmanın olduğu belirgin bir şekilde tespit edilmiştir. Çalışmada SBS ve Elvaloy RET ile modifiye edilen bitümün penetrasyon değerlerini azalttığı ve penetrasyon indeksini artırdığı tespit edilmiştir. Penetrasyonun azalmaya bağlı olarak modifiye edilmiş bitümün; sıcaklığa karşı dayanımının arttığını böylelikle daha uzun kullanım ömrüne sahip olacağı belirtilmiştir (Keyf, 2010).

Farklı bağlayıcı ve karışım testleri kullanılarak SBS ve RET polimerleri ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıların kalıcı deformasyona karşı direnci değerlendirilmiştir. Genel olarak terpolimer modifiye bağlayıcılar ile hazırlanan karışımlar, elastomer modifiye bağlayıcılar ile hazırlanan karışımlara göre kalıcı deformasyona karşı daha yüksek direnç göstermiştir. Modifiye bağlayıcılarla hazırlanan tüm karışımlar, 60 °C'de en az 3-5 kat daha düşük kalıcı deformasyon sergilemiştir. Modifiye edilmemiş ve modifiye edilmiş bağlayıcılara ait karışımların kalıcı deformasyonları arasındaki fark sıcaklıkla önemli ölçüde değişmiştir. Modifiye edilmemiş bağlayıcı ile karışımların kalıcı deformasyonu, 50 °C'de elastomer modifiye bağlayıcılar içeren karışımlarla karşılaştırılabilirken modifiye edilmiş bağlayıcılarla tüm karışımların kalıcı deformasyonu 60 °C'de en az 3-5 kat daha küçük çıkmıştır. Bu durum, polimer modifikasyonunun etkisinin daha yüksek sıcaklıklarda, modifiye edilmemiş bağlayıcının tekerlek izine bağlı önemli hasara maruz kalabileceği sıcaklıklarda daha fazla hissedildiğini göstermektedir (Athira vd., 2020).

1.8. Nanomalzemeler ile Bitüm Modifikasyonu

Esnek kaplamalarda hem ağır araç yükleri hem de mevsimsel sıcaklıklardaki değişiklikler, asfalt bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılıklarındaki özelliklerini değiştirebilmektedir. Böylece asfalt karışımların mekanik özellikleri ve uzun vadeli

performansı etkilenecektir. Zorlu hava koşulları altında yoğun trafik için tasarlanan ve inşa edilen kaplamalar genellikle tasarlanmış asfalt çimentosu modifikasyonu gerektirmektedir. İhtiyaç duyulan özelliklere bağlı olarak özellikleri iyileştirmek için uygun modifiyerler kullanılmalıdır (Johnson vd., 2019).

Nanoteknoloji aşamalı olarak asfalt modifikasyonu alanına girmiştir. Araştırmacılar, ileriye dönük uygulamaların birçoğunu göstermek için modifikasyon mekanizmasını ve bunun sonucunda performanstaki iyileşmeyi göstermek için modifiye asfaltın hazırlanmasıyla ilgili bir dizi olumlu ve etkili çalışmalar yürütmüşlerdir. Nanomalzemelerin baz asfalt veya modifiye asfalt üzerinde modifikasyonunun kimyasal bir reaksiyon süreci olduğuna inanılmaktadır. Nanoboyutta dağılım elde etmek ve her fazın uyumluluğunu iyileştirmek için asfalta uygun dozda nano partikül ekleme yöntemleri ve modifiye asfalt malzemelerinin kapsamlı özellikleri bu alandaki araştırma çalışmalarının odak noktası olacaktır (Fang vd., 2013).

Mevcut ürünleri ve işlemleri daha uygun maliyetli, dayanıklı ve etkili hale getirerek tamamen yeni ürünler oluşturmak nano teknolojinin faydaları arasındadır. Asfalt bağlayıcı ve asfalt karışım özellikleri açısından; polimer modifiye asfaltın depolama stabilitesini iyileştirme, UV yaşlanmasına karşı direncini artırma, su, kar ve buz çözücülere karşı su hasarı direncini artırma, düşük sıcaklıkta asfalt karışımların çatlama direncini iyileştirme, enerji ve maliyetten tasarruf etme ve bakım gereksinimlerinde azalma sağlama nanoteknolojinin sağladığı diğer faydalardandır (Yang ve Tighe, 2013).

Nano partiküller nanometre (nm) ile ölçülen ve genellikle en az bir boyutta 100 nm'den daha küçük olarak ögütülmüş parçacıklardır. Kil nano-partikülleri asfalt karışım inşaatında nano malzeme ve nano partikül anlamında kullanılan birincil malzemelerdir. Nanokil, organik monomer ve polimerlerle uyumlu killer yapmak için modifiye edilen kildir. Bu nanokompozitler bir nm kalınlığa ve çok büyük yüzey alanı oranına sahip tabakalı silikatlarla bir veya daha fazla polimerin ögütülmesinden oluşmaktadır. Yaygın killer, doğal olarak oluşan minerallerdir ve oluşumlarında doğal değişime tabidirler. Kil tabakalarının birbirlerinden ayrışması ile aktif yüzey alanları çok büyük ($700-800 \text{ m}^2/\text{g}$) malzemeler oluşmaktadır. Bu durum, nanokil ve bitüm arasında yoğun bir etkileşim ile sonuçlanır (Yang ve Tighe, 2013).

Doğal nanokiller en yaygın, güvenli (uygun şekilde kullanılırsa), ucuz ve sürdürülebilir katmanlı silikatlardan biridir ve en çok kullanılanı montmorillonit (MMT)'dir.

Hektorit, saponit ve kaolinit gibi diğer doğal killeri de kompozitlerde kullanılmak üzere kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Martinho ve Farinha, 2019).

Nanokiller, tabakalı mineral silikatların nanopartikülleridir. Kimyasal bileşime ve nanopartikül morfolojisine bağlı olarak nanokiller, montmorillonit, bentonit, kaolinit, hektorit ve halloysit gibi çeşitli sınıflar halinde sıralanmaktadır (Varun ve Gehlot., 2018).

Yaygın killeri doğal olarak oluşan minerallerdir ve bu nedenle yapılarında doğal varyasyona tabidir. Pek çok kil türü, katmanlı bir yapıya sahip olan ve çeşitli şekillerde alümina AlO_6 oktahedrona bağlanmış silika SiO_4 tetrahedrondan oluşan alümina-silikatlardır. Nanokompozit özellikleri, organik katyonların ve polimer zincirlerinin kimyasal yapısına hem de nanokompozit oluşturmak üzere kili dağıtmak için kullanılan yöntemle oldukça bağlıdır (Golestani vd., 2012).

Son yıllarda nanokiller asfalt karışımların performansını iyileştirme yeteneklerinden dolayı dikkatleri üzerine çekmektedir (İskender, 2017; İskender vd., 2021). Nanokillerin birçok polimerin özelliklerini geliştirdiği ve birçok malzemenin modül ve çekme mukavemetini, alev alma direncini, termal ve yapısal özelliklerini iyileştirmek için kullanıldığı bilinmektedir. Nanokillerin doğal elektrostatik yüklerinden dolayı birbirine yapışma eğilimi olduğundan, daha yüksek bir dağılım oranı gereklidir (Varun ve Gehlot., 2018).

Nano modifiye asfaltın ekonomik, ekolojik ve çevresel değerlendirmelerinin de büyük ölçekli bir uygulamadan önce dikkate alınması gerekmektedir (Li vd., 2017).

Farklı polimerler ve nanokillerle hazırlanan polimer modifiye asfalt nanokompozit üretiminde kullanılan modifikasyon parametreleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Tablodan, seçilen nanokil oranlarının, karıştırma yöntemlerinin ve karıştırma parametrelerinin çok değişken olduğu görülmektedir.

Yeni karışımların tasarımına ilişkin olarak, nanopartikül dağılımının homojenliğini değerlendirmek ve en iyi prosedürleri bulmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuçların daha geniş bir temel malzeme dizisi ve en uygun kombinasyonlarının incelenerek doğrulanması, ayrıca kullanılan karıştırma yöntemlerinin etkisinin ve bunun sıcaklık, hız ve süre ile korelasyonunun da geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda istatistiksel bir bakış açısıyla incelenen bir çalışmada literatürde en sık belirtilen karıştırma parametreleri değerleri; nanokil içeriği için bitümün ağırlıkça %3'ü, kullanılan sıcaklık için 160 °C, seçilen karıştırma hızı için 4000 dev./dk. ve karıştırma süresi için 120 dk. olmuştur (Martinho ve Farinha, 2019).

Tablo 5. Asfaltın nanokil ve polimerlerle modifikasyonunda kullanılan modifikasyon parametreleri

Malzemeler	Nanokil içeriği (%)	Nanokil hazırlama veya karıştırma yöntemi	Karıştırma sıcaklığı (°C)	Karıştırma hızı (dev./dk.)	Karıştırma süresi (dk.)	Referans
Nanokil+SBS, Nanokil+ EVA	%3		155	5000	40	(İskender ve Aksoy, 2021)
Closite 15A + SBS	%1, 2, 3, 4	Eriyik interkalasyonlu	160	5000	60	(Ameli vd., 2020)
Cloisite 15A+SBS	%2, %4 ve %6	Eriyik karıştırma	180	1200	90	(Martínez-Anzures vd., 2019)
NC+SBS	%1, 2, 3		140 ± 5	1500	60	(Ouf vd., 2019)
OMMT + SBS	%3	Eriyik karıştırma	180	4000	90	(Liu vd., 2018)
Cloisite 10A, Cloisite 11B ve Cloisite 15A nanokilleri + SBS	%1, %2 ve %3	Eriyik halde ve kuru karıştırma	150 ve 160	1500 ve 2000	120, 180 ve 240	(Hossain & Elsayed., 2018)
NC+EVA	%1, 3, 5 ve 7	Eriyik karıştırma	150 ± 5	4500	60	(Siddig vd., 2018)
Halloysit ve sepiyolit nanokil + SBS	%2 ve %4	Fiziksel karıştırma ve eriyik harmanlama	180±5	2000	60	(Uncu, 2017)
OMMT + SBS	%1.5		180	3000	120	(Bayekolaei vd., 2016)
OMMT+SBS	%4	Çözelti interkalasyon	160	2000	120	(Farias vd., 2016)
Cloisite 20 Å +SBS						
MMNC+SEBS	SEBS/kil kütle oranı 100/10)	Eriyik karıştırma	180	1200	90	(Zapién-Castillo vd., 2016)
OMMT, Cloisite 20A +SBS	%4	Çözelti interkalasyon	160	2000	120	(Tomé vd., 2015)
OMMT+SBS	%1.5	Eriyik karıştırma	180	4000	120 dk.SBS +45 dk. OMMT	(Golestani vd., 2015)
OMMT+SBS	SBS/OMMT (100/12.5, 100/25, 100/50)	Eriyik karıştırma	180±5	4000	120 dk. SBS+45 dk. OMMT	(Golestani vd., 2012)
Org.mod.mont+ SBS	%4		180 ± 1	4000	60	(Merusi vd., 2012)
OMMT+SBS	%3	Eriyik karıştırma	180	2000	120	(Zhang vd., 2012)
Na ⁺ -MMT+SBS						
OVMT+SBS	%2.5		160	2000	120	(Pamplona vd., 2012)
OMMT+SBS						
OMMT+SBS	SBS/OMMT (100/35, 100/50 ve 100/65)	Eriyik interkalasyonlu	180	4000	120 dk. SBS+30 dk. OMMT	(Galooyak vd., 2010)
Cloisite 20A, Dellite 43B +EVA	%2 ve %4	Fiziksel karıştırma /ana harman yöntemi	190 ± 1	4000	60	(Sureshkumar vd., 2010)
Cloisite 20A+SBS		Eriyik karıştırma	180 ± 1	4000	60	(Polacco vd., 2008).

Hidrofilik bentonit ve halloysit nanotüp nanokillerinin bitüm ağırlığının %3'ü ve %6'sı oranlarında, 140 °C'deki asfalt bağlayıcıda 5500-6000 dev./dk.'lık bir kesme hızında 4.5 saat karıştırılmasıyla bitüm modifikasyonu yapılmıştır. Hamburg tekerlek izi test sonuçları, nanokil modifiye karışımların hem tekerlek izi direncini hem de su hassasiyetini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. %3 nanokille hazırlanan modifiye bağlayıcı ile üretilen karışım düşük servis sıcaklıklarında karışım performansında önemli bir iyileşme sağlamıştır. Ayrıca %6 nanokil modifikasyonu, karışımın çekme mukavemetinde hafif bir azalmaya neden olmasına rağmen çatlak oluşumu başladığında çatlağın yayılması, saf bağlayıcı ile üretilen sıcak karışım asfalta göre meydana gelen çatlak oluşumundan daha yavaş olduğu görülmüştür (Johnson vd., 2019).

Karışım hızı değişiminin bitüm/organo-modifiye monmorillonit (OMMT) nanokompozitlerin morfolojisi ve fiziksel özellikleri üzerine etkilerinin incelendiği araştırmada OMMT, ağırlık olarak %3 oranında bitüme ilave edilmiştir. Karıştırma hızları 750, 1500, 2000, 3000 ve 4500 dev./dk. olarak seçilmiş olup nanokompozitler 140 °C'de yüksek kesme etkili mikser ile hazırlanmıştır. Fillerin bitümlü matris içinde üniform bir şekilde dağılmasını sağlamak için karışım 60 dakika karıştırılmıştır. Geniş açılı X-ışını saçılması (WAXS) ile elde edilen sonuçlara göre, 2000 dev./dk.'ya kadar, bitüm/OMMT nanokompozitlerinin arakatkılı bir yapı sergilediği; 3000 dev./dk. ve daha fazlasında eksfoliye bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir. Atomik kuvvet mikroskobu, bitümlü matriks içinde homojen bir OMMT dispersiyonu sergilemiştir. Tüm sonuçlarla ilgili olarak, 3000 dev./dk.'nın bitüm/OMMT nanokompozitleri hazırlamak için en verimli karıştırma oranı olarak kabul edilebileceği sonucuna varılmıştır (Dehouche vd., 2016).

MMT nanokilin asfalt karışımının Marshall özellikleri ve su duyarlılığı üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada iki tip asfalt çimentosu AC (40-50) ve AC (60-70) %2, %4 ve %6 oranlarında nanokil ile modifiye edilmiştir. MMT ile modifiye edilmiş asfalt çimentolu karışım Marshall stabilitesini artırmış ve %6 MMT eklenmesi en yüksek artışı göstermiştir. Asfalt çimentosuna MMT ilavesi çekme mukavemeti oranı değerlerindeki artışa bağlı olarak asfalt karışımının suya duyarlılığının azalmasına neden olmuştur. Montmorillonit içeriğinin artmasıyla birlikte optimum asfalt içeriği de artmıştır. Asfalt içeriğindeki artış, asfalt karışımının birim hacim ağırlığının artmasına neden olmaktadır. Daha sonra belirli bir artış yüzdesine ulaşıldıktan sonra, birim hacim ağırlığı azalmaya başlar; çünkü yüksek asfalt yüzdesi agregayı karışımın dışına çıkarma eğilimindedir. Ayrıca asfalta

eklenen nanokil için yüksek yüzey alanı nedeniyle asfalt karışımı daha yoğun hale gelir ve bu da birim hacim ağırlığındaki bu artışa neden olur (Ismael ve Ismael, 2019).

Asfalt kaplamadaki su hasarı asfalt-agrega yapışma kaybına ve asfalt bağlayıcı içinde kohezyon kaybına neden olmaktadır (Das vd., 2015). Asfalt betonu mastiğinin yumuşamasından dolayı kohezyon kaybı oluşmaktadır (Aksoy vd., 2012). Şekil 3'te su hasarının neden olduğu bozulmalar gösterilmektedir.



Şekil 3. Asfalt aşınma tabakasındaki kohezyon ve adezyon kaybı nedeniyle oluşan soyulma (Das vd., 2015).

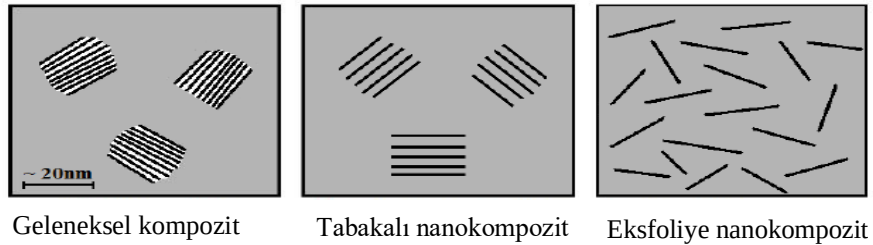
Nanokil modifiyerlerinin yaşlandırılmamış ve yaşlandırılmış bitüm üzerindeki etkisinin dinamik kesme reometresi ile ve asfalt karışımı üzerinde düşük sıcaklıkta doğrudan çekme dayanımı, yorulma, esneklik modülü testi ve yüksek sıcaklıklarda dinamik sünme testi ile yapılan test sonuçları nanokilin, nanokil modifiye asfalt bağlayıcının mekanik özelliklerinde ve yaşlanma direnci performansında dikkate değer bir gelişme göstermiştir. Asfalt bağlayıcıya nanokil eklemek, asfalt bağlayıcıların viskozitesini artırır ve asfalt karışımlarının tekerlek izi ve yorulma direncini iyileştirir. Nano partiküllerin kullanılması, polimer modifiye asfaltların depolama stabilitesini artırabilir. Nano-modifiye asfalt, asfalt bağlayıcıdaki nano malzemelerin optimizasyonu ile birçok avantajla birlikte soğuk bölgelerde iyi performans gösterir (Varun ve Gehlot, 2018).

Genel olarak yüksek sıcaklık, asfaltın viskozitesini azaltmaktadır. Asfalt, sıcaklığa duyarlı bir malzemedir. Bu nedenle daha yüksek bir sıcaklık yaşlanma oranını hızlandırır ve bu da asfalt bağlayıcının dayanıklılığını bozar. Hazırlama sırasındaki sıcaklığın çok yüksek olmaması gerektiği düşünülmektedir. Bu nedenle homojen olarak dağılmış nano-modifiyeli kompozitlerin üretilmesi ve orjinal asfaltın yaşlanma derecesinin mümkün olduğunca azaltılması için sıcaklığının nasıl dengeleneceği iyi anlaşılması gereken bir konudur (Li vd., 2017).

Karıştırma süresi açısından, kompozitlerin homojen bir şekilde dağılmasını elde etmek için uzun bir süre gereklidir. Aksine, daha uzun karıştırma süresi daha yüksek enerji tüketimine ve israfa neden olabileceği gibi nanokompozitlerin üretim maliyetini de artırabilir. Bu nedenle iyi seçilmiş bir karıştırma süresi ve karıştırma hızı nano parçacıkların yeterli dağılımını sağlamak için gereklidir. Bununla birlikte aşılacak yüksek hız nano malzemenin yapısını bozabilir (Li vd., 2017).

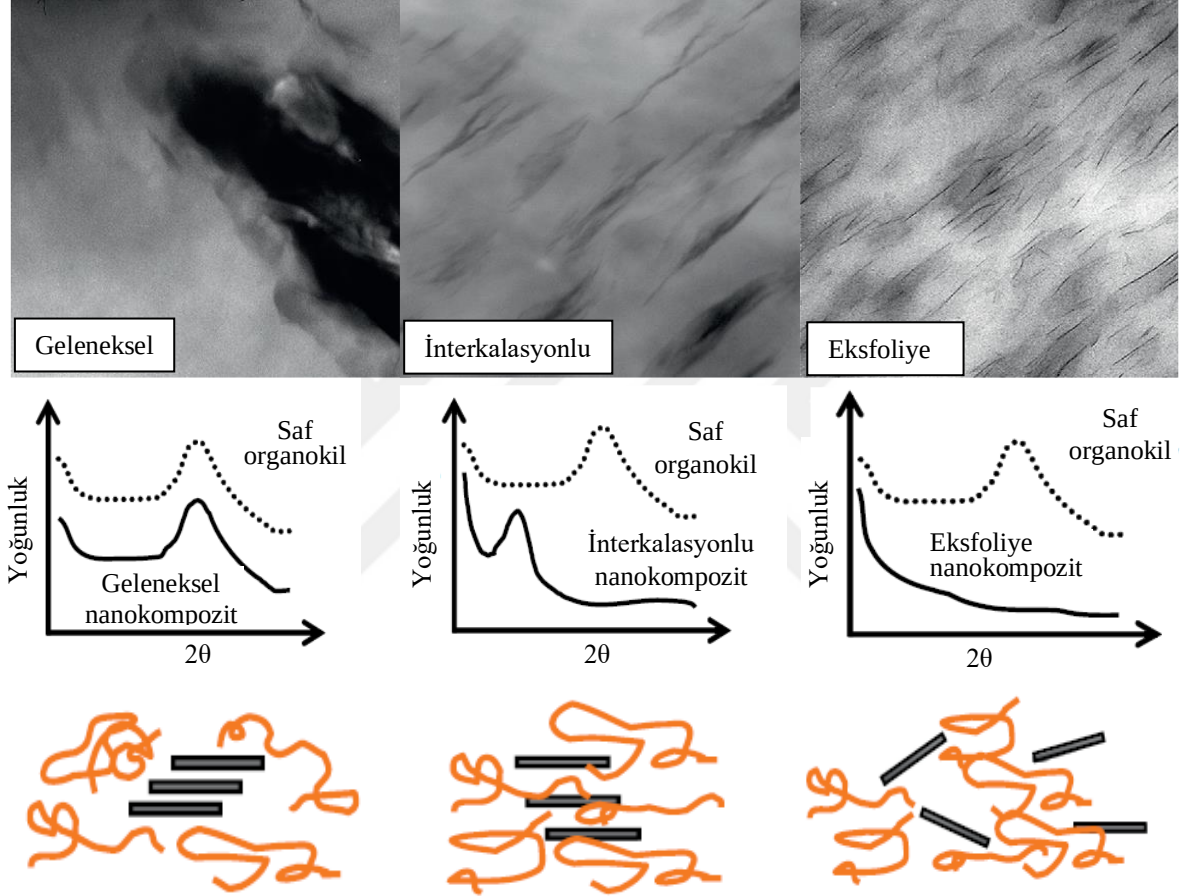
Nano modifiyeli asfalt bağlayıcının özellikleri üzerinde bağlayıcı türü, parçacık türü, parçacık içeriği, parçacık boyutu, üretim süreci vb. olmak üzere birçok faktör etkili olmuştur. Nanomalzemeler, asfaltın yapışma kuvvetini artırabilir ve asfalt ile nano partikül arasında "kenetleme" etkisi yaparak mikro çatlakların oluşmasını ve gelişmesini önleyebilir. Sonuç olarak, yorulma ömrü uzayabilir ve kalıcı deformasyon azalabilir. Gelecekteki çalışmalar, homojen nano malzemeyle modifiye edilmiş bağlayıcıyı garanti altına almada karıştırma parametrelerinin etkisini analiz etmek için yapılabiliirliğinin araştırılması üzerine odaklanmalıdır (Li vd., 2017).

Kil parçacıklarının matriks içindeki dağılımı üç farklı şekilde olabilmektedir: Birincisi, silikat levhalarının küme şeklinde olduğu geleneksel kompozit yapıdır. İkincisi, bazı matriks moleküllerinin bireysel silikat tabakaları arasına yerleştiği, ancak tabakaların birbirlerine paralel kaldığı interkalasyonlu (aratabakalı) nanokompozit yapıdır. Üçüncü tip ise kilin tabakalı yapısının bozulduğu, silikat tabakalarının artık birbirleriyle etkileşime girecek kadar yakın olmadığı ve nanometrik parçacıkların matriks içinde tamamen dağıldığı eksfoliye nanokompozit yapıdır. Aratabakalı veya eksfoliye yapılar oluşturabilen tipik killer montmorillonit, fluorohektorit ve bentonittir. Şekil 4'te kil partiküllerinin asfalt içerisinde yayılma şekilleri gösterilmiştir (Zare-Shahabadi vd., 2010).



Şekil 4. Kil partiküllerinin asfalt içerisinde mümkün yayılma şekillerinin şematik gösterimi

Literatürde genellikle karışmaz (geleneksel veya mikrokompzit), aratabakalı ve karışabilir veya eksfoliye olmak üzere üç tür morfolojiden bahsedilmiştir. Bunların transmisyon elektron mikroskobu (TEM) örnekleri ve beklenen geniş açılı X-ışını saçılmaları Şekil 5’te şematik olarak gösterilmiştir (Paul ve Robeson, 2008).

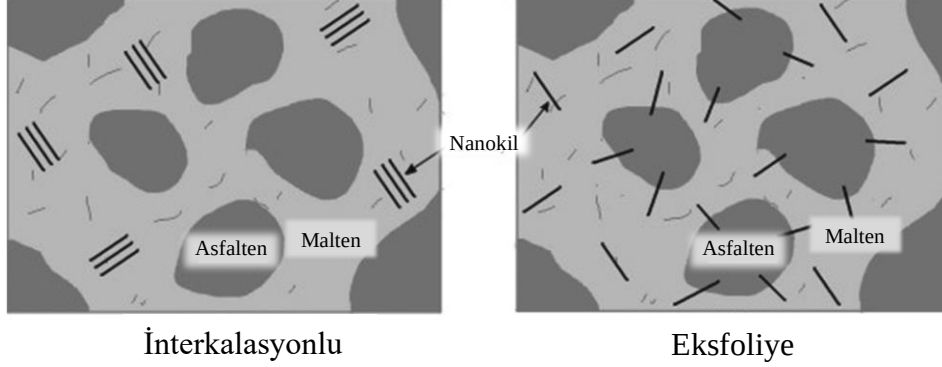


Şekil 5. Polimerlerde organokillerin farklı dağılım durumlarının WAXS ve TEM sonuçlarıyla birlikte gösterimi

Kil tabakalarının tam eksfoliasyonu, yani tabakalarının birbirinden ayrılması ve polimer matriks içinde ayrı ayrı dağılması oluşum sürecinin istenilen amacıdır. Bununla birlikte bu ideal morfoloji sıklıkla elde edilememekte ve değişen derecelerde dağılımlar daha yaygın olmaktadır (Paul ve Robeson, 2008).

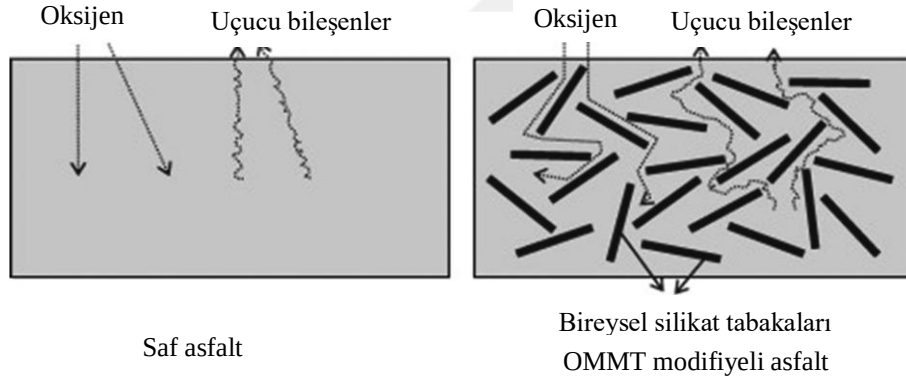
Şekil 6’da bitüm-nano kil yapısının şematik gösterimi verilmiştir. Eksfoliye ve aratabakalı yapılar özellikle eksfoliye yapıda olanlar, asfaltın hafif bileşenlerinin buharlaşmasını engellerken oksijen, su ve organik çözücülere karşı etkili bir bariyer

oluşturabilir. Bu nedenle organik montmorillonit, modifiye asfaltın yaşlanma direncini iyileştirir ve böylece modifiye asfalt kaplamanın hizmet ömrünü uzatır (Fang vd., 2013).



Şekil 6. Bitüm-nano kil yapısının şematik gösterimi (Jahromi ve Khodaii, 2009).

OMMT ile modifiye edilmiş asfaltın yaşlanmayı geciktirme mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. OMMT ile modifiye edilmiş asfaltın yaşlanmayı geciktirme mekanizmasının şematik gösterimi (Yu vd., 2009).

1.9. Polimer Modifiye Asfalt Nanokompozitler (PMAN)

Nanokiller ekonomiktir ve ham maddesi doğal olarak bol miktarda bulunmaktadır. Polimerler yerine nanokil kullanımının asfalt bağlayıcıların maliyetini önemli ölçüde azaltması beklenmektedir. Nanokillerin kuantum etkileri, yüksek yüzey enerjisi, üç boyutlu sınırlama gibi nano ölçekli davranışları asfalt bağlayıcıların ve karışımlarının performansını geliştirmede önemli bir potansiyele sahiptir. Polimer modifiye bağlayıcıların mevcut

kullanımlarının önemli bir kısmı potansiyel olarak nanokil modifiye bağlayıcılarla değiştirilebilmektedir. Nanokiller doğal olarak bulunan katmanlı silikatlardır ve bu nedenle çevre açısından güvenli, ekonomik ve sürdürülebilirlerdir (Hossain ve Elsayed, 2018).

Polimer modifiyeli bitümün umut verici sonuçlar ortaya koymasına rağmen, birçok araştırmacı polimer ve bitüm arasındaki uyumluluk sorunu olan modifikasyon işleminin önemli bir eksikliğine dikkat çekmektedir (Galooyak vd., 2010; Polacco vd., 2015).

Nano ölçekli mineral killer, polimerin fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirmek için bir katkı olarak veya kullanılan polimer miktarını azaltmak için filler olarak polimer modifikasyonu için kullanılmaktadır (Rehab ve Salahuddin, 2005).

Polimerler düşük miktarlarda nanokil ile modifiye edildiğinde ve bu modifikasyonda kil nanoskopik seviyede dağıldığında polimerik nanokompozitlerin fiziksel özellikleri başarılı bir şekilde iyileştirilebilmektedir (Jahromi ve Khodii, 2009; Mittal vd., 2012). Nanokiller çeşitli çalışmalarda SBS kopolimer modifiye asfaltın performans özelliklerini daha da geliştirmek için ikincil bir modifiyer olarak kullanılmıştır (Polacco vd., 2008; Uncu, 2017; Farias vd., 2016; Ameri vd., 2016, Ameri vd., 2020).

Polimer modifiye asfalt nanokompozitler temelde bir veya daha fazla polimerin nano kil, karbon nanotüp, nano sönmüş kireç gibi çeşitli nanomateryallerle karışımından oluşmaktadır (Sureshkumar, 2011).

Polimer modifiye asfalt nanokompozit, nanokil ve polimerin asfalta ayrı ayrı ya da önceden karıştırılmış bir bileşim biçiminde eklenmesiyle hazırlanan üçlü bir polimer/nanokil/bitüm karışımıdır. Son araştırmalar, nanokilin asfalta katılma yönteminin karışım morfolojisi, dispersiyonu ve reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. (Sureshkumar, 2011; İskender ve Aksoy, 2021).

Polimer/nanokompozit modifiye asfalt çimentosu, yolların tasarımını üstün performans ve artan dayanıklılık ile kolaylaştıran, üstyapı mühendisliği alanındaki en son gelişme olarak kabul edilmektedir (Porto vd., 2019). Polimer modifiyerlerin aksine polimer nanokompozitler teknolojik malzemelerdir ve literatürde oldukça ilgi görmektedir (Mahali ve Sahoo, 2019).

Polimerik nanokompozitler, keşfedilen en heyecan verici ve gelecek vadeden malzeme sınıfları arasındadır. Bir polimer küçük miktarda nanokil ile modifiye edildiğinde, kilin nanoskopik seviyede dağılması koşuluyla bir takım fiziksel özellikler başarılı bir şekilde geliştirilmektedir (Jahromi ve Rajaei, 2013).

Bir polimerin ve silikatın basitçe karıştırılması mutlaka bir nanokompozit üretmez. Nanometre seviyesinde dağılımın elde edilip edilmediği hem bileşenlerin kimyasal özelliklerine hem de karıştırma yöntemine bağlıdır. Saf tabakalı silikatlar genellikle sadece hidrofilik polimerlerle karışabilir ve katyonik yüzey aktif maddelerle iyon değişim reaksiyonları sıklıkla silikatın hidrofobik karakterini artırmak için kullanılır. Benzer şekilde polimerik kısımda polar grupların eklenmesi, kilin polimer matriks içinde dağılmasına yardımcı olabilir. Polimer / kil etkileşimi seviyesi son dağılımı etkiler ve elde edilen morfolojiye bağlı olarak nanokompozitler genellikle interkalasyonlu (ara tabakalı) ve eksfoliye dağılım gösterirler (Paul ve Robeson, 2008; Ray ve Okamoto, 2003; Ahmadi vd., 2004; Alexandre ve Dubois, 2000).

Polimer ve silikatların hidrofilik ve hidrofobik özellikleri ve polimerik malzemeye polar grubun eklenmesi, kilin polimer matris içinde dağılımını kontrol etmekte ve karışımın son morfolojisini oluşturmaktadır (Pavlidou ve Papaspyrides, 2008).

Polimer nanokompozitlerin hazırlanması için tabakalı silikatların iki özelliği önemlidir: Birincisi silikat partiküllerinin tabakalar seviyesinde dağılma kabiliyeti, ikincisi ise organik ve inorganik katyonlarla iyon değişim reaksiyonları ile yüzeylerini değiştirme kabiliyetidir. Bu iki özellik, tabakalı silikatın polimer matriks içinde dağılma derecesi ile ilgilidir ve ara katmandaki katyona bağlıdır (Jasso vd., 2013).

Hem yüksek sıcaklıkta hem de düşük sıcaklıkta asfaltın performansını iyileştirmek için kompozit modifiyerler olarak nano malzemeler ve polimerler üzerinde çalışılmaktadır (Sun, vd., 2017).

1.10. Polimer Modifiye Asfalt Nanokompozit Hazırlama Yöntemleri

Genel olarak polimer ile asfalt modifikasyonunda kullanılan iki ana yöntem vardır. (Shen, 2011): Birinci yöntemde, polimerin kesme etkili karıştırma cihazı kullanılarak asfalt bağlayıcıda dengeli bir şekilde dağıtılabildiği, en yaygın kullanılan ve oturmuş teknoloji olan yüksek hızlı kesmedir. İkinci yöntem ise “ana çözeltide eritme” olarak adlandırılmaktadır ve yüksek konsantrasyonlu bir polimer çözeltisi (ana çözelti) hazırlamak için polimer modifiyerinin organik bir çözücü içinde çözülmesini ve ardından ana çözeltinin karıştırılarak asfalta dahil edilmesini içermektedir. Son adım, yüksek sıcaklık koşulları altında çözücünün damıtılması ve geri kazanılması için karışımın ısıtılmasını içerir. Modifiyer ile asfalt arasındaki uyumluluk, asfaltın modifikasyon etkilerini iyileştirmenin anahtarıdır.

Uyumluluk, temel asfalt bileşenlerinin yanı sıra polimerin polaritesine, parçacık boyutuna ve moleküler yapısına ve asfalt ile polimer arasındaki ara yüzey etkileşimine bağlıdır. Modifiyer katkısının türü, hazırlama sıcaklığı ve modifikasyon süreci de modifiye asfaltın performansını etkilemektedir (Fang vd., 2013).

Asfalttaki nano parçacıkları dağıtmak için iki ana karıştırma yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri kuru karıştırma, diğeri ise çözücüde karıştırma yöntemleridir. Çözücü karıştırma yönteminin nano malzemelerin asfalt içinde daha iyi dağılmasını sağlayabildiği kanıtlamıştır. Bununla birlikte bu teknik, ekonomik ve çevre dostu olmayan daha fazla enerji tüketimine ve israfa sebep olan bir yöntemdir. Çözücüde karıştırma yöntemi; çözücü eritme işlemi tekniği “ana çözeltide eritme” olarak adlandırılır ve bu yöntemde nano partiküllü çözücü, çözücü yeterince buharlaşana kadar orta ila yüksek sıcaklık koşullarında düşük kesmeli bir karıştırıcı kullanılarak asfalt bağlayıcı ile karıştırılır. Uygun bir organik “ana çözelti” seçmenin, çözücü karıştırma yönteminin başarısı için önemli bir rol oynadığına inanılmaktadır. Nano modifiyeli kompozit üretmek için en yaygın kullanılan yöntem, etkinliği ve basitliği nedeniyle kuru karıştırma yöntemidir. Bu teknik iki aşamadan oluşmaktadır: İlk aşamada, nano parçacıklar asfalta eklenmektedir. İkinci aşamada ise asfalt bağlayıcı nano parçacıklarla yeterli bir homojenlik elde edilene kadar karıştırılmaktadır. (Li vd., 2017).

1.11. Literatür Taraması

Bitüm modifikasyonunda nanomalzeme ve polimer katkıların kullanılması ile hazırlanan polimer modifiye asfalt nanokompozit ile yapılan çalışmalar irdelenmiş ve literatür araştırması aşağıda özetlenmiştir.

%2 ve %4 oranlarında nanomalzemenin (halloysit ve sepiyolit nanokilleri), %3 ve %5 oranlarındaki SBS polimer modifiye bitüm üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada modifiye bitüm hazırlanmasında fiziksel karıştırma ve eriyik harmanlama gibi iki farklı üretim yöntemi kullanılmıştır: İlk yöntem yüksek devirli laboratuvar mikseri ile gerçekleştirilen fiziksel karışım yöntemi, ikinci yöntem de öncelikle ekstrüder ile polimer ve nanokillerin tek bir malzeme olmasını sağlayarak, bu malzemenin yüksek devirli laboratuvar mikseri ile bitüme karıştırıldığı eriyik harmanlama yöntemi olarak belirlenmiştir. Karıştırma parametreleri başlangıçta, sıcaklık için 180 °C, hız için ise 4000 dev/dk. olarak belirlenmiştir. Modifiye bitümlerin üretimi için katkıların hangi sürelerde

karıştırılacakları Brookfield viskozimetre cihazı ile yapılan ölçümler ile belirlenmiştir. Nihai karıştırma parametreleri olarak sıcaklık 180 ± 5 °C, hız 2000 dev./dk. ve süre 60 dk. olarak seçilmiştir. Yumuşama noktası deney sonuçlarına göre saf bitüme göre tüm katkılı bitümlü bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinde artış meydana gelmiştir; fakat genellikle sadece polimer modifiyeli örnekler için nano katkılı örneklerin yumuşama noktası değerleri daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi olarak nanokillerin polimer matrisinde homojen dağılması sonucunda bitümlü bağlayıcının yapısındaki uçucu maddelerin bitüm fazından ayrılmasını zorlaştırdığı düşünülmektedir. Farklı sıcaklık ve frekans değerlerinde elde edilen tekerlek izi parametresi sonuçları irdelendiğinde tekerlek izine karşı direncin arttığı görülmüştür. Floresan mikroskobu ile yapılan görüntü incelemelerinde nanokil ilavesinin, alınan ince kesit örneklerinde yayılmayı azalttığı ve bunun da artan viskozite değerlerini desteklediği yönünde görüş bildirilmiştir. Nanokil ilavesi ile bitümlü bağlayıcı fazında yayılarak bağ oluşturan polimerlerin bağlarının genişlediği gözlemlenmiş ve nanokil oranının artışıyla birlikte bağ yapılarını da güçlendirdiği belirtilmiştir. Çalışmalar sonucunda, nano katkıların SBS ile birlikte kullanılmasının polimerlerden doğan bazı olumsuzlukları azalttığı ve bitümün fiziksel özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Fakat SBS yüzdesindeki artışın nanokillerin iyileştirici etkilerini gösterebilmesini engellediği görülmüştür. Bundan dolayı polimer ve nano katkıların bir arada kullanımında özellikle polimer oranı için optimum bir değerin belirlenmesinin çok önemli olduğu önerilmiştir. Üretilen nanokompozit katkıları için de karışımdaki kil miktarının önemli etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir (Uncu, 2017).

Asfalt bağlayıcıların performans derecesini değiştirmek için SBS gibi yaygın kullanılan polimerlere alternatif olarak nanokil kullanımının uygulanabilirliğinin araştırıldığı çalışmada Cloisite 10A, Cloisite 11B ve Cloisite 15A olmak üzere üç tür nanokil ve iki tip saf bağlayıcı seçilmiştir. Nanokiller %1, 2 ve 3 oranlarında kullanılmıştır. Nanokil ile asfalt bağlayıcının karıştırılmasında farklı sıcaklıklar (150 ve 160 °C), farklı karıştırma süreleri (2, 3 ve 4 saat) ve farklı karıştırma hızları (1500 ve 2000 dev./dk.) seçilerek bir karıştırma protokolü geliştirilmiştir. Karışımlar yüksek kesme etkili mikser ile karıştırılmıştır. %1 Cloisite 10A ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcı numuneleri için minimum adezyon ve deformasyon değerleri bulunmuştur. Sonuçlara göre Cloisite 10A ve Cloisite 11B'nin polimerlerin alternatifi olma potansiyeline sahip olduğu söylenebilmektedir. Laboratuvar incelemelerine göre nanokilin bir bağlayıcı ile karıştırılması için yüksek kesme etkili bir karıştırıcı önerilmektedir. 2000 dev./dk. karıştırma

hızı, 150 °C sıcaklık ve 2 saatlik karıştırma süresi ile karıştırma protokolü, nanokilin bağlayıcılarla karıştırılması için uygun bulunmuştur. Nanokilin yüksek kesme etkili bir karıştırma ile saf bağlayıcılara eriyik halinde karıştırılması için uygun bir karıştırma protokolü geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, sahaya (rafineri veya karıştırma tesisi) laboratuvar karıştırma protokolü fikrini aktarmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu, nanokillerin saf bağlayıcılarla kuru olarak karıştırılmasının mı yoksa ıslak olarak karıştırılmasının mı daha iyi bir seçim olacağının hala bilinmediği ifade edilmiştir. Kuru karıştırma, asfalt karıştırma tesisinde nanokillerin karıştırılması anlamına gelirken eriyik halinde karıştırma nanokillerin asfalt bağlayıcılarla karıştırılmasıdır (Hossain ve Elsayed, 2018).

SBS yapısının ve baz bağlayıcı tipinin polimer modifiye asfalt ve polimer-nanokompozit asfalt karışımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel analiz kullanılarak incelendiği çalışmada, iki farklı penetrasyon dereceli asfalt bağlayıcı modifikasyon sürecinde polimer yapısının rolünü araştırmak için de doğrusal veya doğrusal olmayan iki SBS yapısı seçilmiştir. Nanokil olarak organofilik montmorillonit Cloisite 15A kullanılmıştır. Polimer nanokompozit modifiye asfalt bağlayıcılar her bir polimer modifiye asfalta (%6 SBS ile hazırlanan) %1.5 Cloisite 15A eklenerek üretilmiştir. Karışımlar 3000 dev/dk. karıştırma hızında 120 dakika süre ile yüksek kesme etkili mikser kullanılarak hazırlanmış ve karıştırma sıcaklığı 175 ve 170 °C olarak belirlenmiştir. Varyans analizi hem bağlayıcı türünün hem de SBS yapısının asfalt karışımlarının mekanik özellikleri üzerindeki önemli etkisini göstermiştir. SBS yapısının (doğrusal ve doğrusal olmayan) polimer nanokompozit modifiye asfalt karışımının Marshall stabilitesi üzerinde önemli etkisi olduğu sonucuna varılmıştır (Bayekolaei vd., 2016).

Organik olarak modifiye edilmiş vermikülit (OVMT) ve organik olarak modifiye edilmiş montmorillonitin SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. %4 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ve %2.5 SBS/%2.5 organokil ile modifiye edilmiş polimer modifiye asfalt nanokompozitin fiziksel ve reolojik özellikleri araştırılmıştır. SBS ve SBS/organokil modifiye bitümler yüksek kesme etkili mikser ile 2000 dev./dk. karıştırma hızında, 2 saat boyunca 160 °C’de karıştırılmıştır. OVMT’nin varlığı SBS modifiyeli bitümün depolama stabilitesini iyileştirmiştir. Sertleştirme etkisinde, termal duyarlılıkta ve ayrıca SBS/organokillerin varlığından kaynaklanan penetrasyon değerlerinde SBS modifiye bitüme kıyasla iyileşme gözlenmiştir. Elastik tepkide ve deformasyona karşı dirençte pozitif bir etki gözlenmiştir. %2.5 OMMT ve OVMT killeri ve %2.5 SBS ile

modifiye edilen bağlayıcı %4 SBS ile modifiye edilen bağlayıcıya benzer davranış sergilemiştir. Bu durum, bağlayıcıya kil ilavesinin gerekli polimer miktarında önemli bir tasarruf sağladığını doğrulamıştır (Pamplona vd., 2012).

Birçok çalışma OMMT katkısının asfaltın performansı üzerindeki etkisini incelemesine rağmen, çok az araştırma SBS/OMMT ile modifiye edilmiş bağlayıcıların çatlama özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmıştır. SBS ve SBS/OMMT örnekleri yüksek kesmeli bir mikser ile hazırlanmıştır. Asfalt /SBS /OMMT numunelerinin üçlü kompozitini hazırlamak için, baz asfalt 180 °C sıcaklığa getirilmiş ve toz halindeki SBS (%1, %2, %3, %4, ve %5) polimeri bitüme yavaş yavaş ilave edilmiştir. Daha sonra sıcaklık 180 °C’de tutularak, katkıların fiziksel karışımlarından sonra bu sıcaklıkta karıştırmaya 30 dakika daha devam edilmiştir. Asfalt/SBS/OMMT kompozit numuneleri 60 dakika boyunca, 4000 dev./dk. hızında karıştırılarak SBS ile modifiye edilmiş bitüme ağırlıkça %3 OMMT ilave edilerek hazırlanmıştır. OMMT / SBS/bitüm asfalt nanokompozit ile modifiye edilmiş asfalt, aralanmış tabakalı bir nanokompozit oluşturmuştur. OMMT ve SBS’nin bileşik modifikasyonu genellikle tek SBS ile modifiye edilmiş bitümden orta sıcaklıkta daha fazla çatlama direnci sergilemiştir; ancak SBS ve OMMT’nin etkisi istatistiksel olarak önemsizdir. SBS’nin ilavesi, düşük sıcaklıklarda bağlayıcının sünme rijitliğini istatistiksel olarak azaltırken, SBS içeriği ne kadar yüksekse sertlik o kadar düşük olmaktadır. Yaşlanma süresindeki bir artışın ardından rijitlik belirgin bir azalma göstermekte, bu da yaşlanma sürecinin düşük sıcaklıkta çatlama direnci üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu anlamına gelmektedir (Liu vd., 2018).

Closite 15A ve bir triblok kopolimer asfalt modifiyerlerinin kullanımının incelendiği çalışmada modifiye asfalt bağlayıcıları SBS kopolimer ve Cloisite 15 A nanokompozitinin eklenmesiyle hazırlanmıştır. Nanokompozit eriyik karıştırma tekniği ile elde edilmiştir. Nanokompozit sıcak asfalta ağırlıkça %2, %4 ve %6 oranlarında ilave edilmiş olup nanokompozit modifiye asfalt karışımları, düşük kesmeli bir karıştırıcı vasıtasıyla hazırlanmıştır. Asfalt bağlayıcıda nanokompozitin tam dağılması için modifikasyon işlemi, 90 dakika boyunca, modifikasyon sıcaklığı 180 °C’de ve karıştırma hızı 1200 dev/dk.’de sabit tutularak yapılmıştır. Modifiye asfalt karışımlarının morfolojisi, asfalt bağlayıcıda Cloisite 15 A’nın iyi bir dağılım modelini ortaya çıkaran ve karışımların nihai reolojik davranışlarını önemli ölçüde açıklayan floresan mikroskobu ile gözlemlenmiştir. Modifiye edilmiş asfaltlar, modifiye edilmemiş asfalta kıyasla nispeten yüksek bir kompleks modülü ve gelişmiş viskoelastik özellikler sergilemiştir. Cloisite 15 A, artan sıcaklıklarda modifiye

asfaltların hem yumuşama noktasını hem de viskozitesini biraz artırmış ve bunlar üzerinde uyumlaştırıcı bir etkiye sahip olmuş, bu da onların depolama stabilitesinde bir gelişme göstermiştir. Genel olarak nanokompozitin, modifiye edilmiş asfaltların fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisinin yeterli bir dağılım stabilitesi ve morfolojisi elde etmek için bir modifiye edici katkı olarak küçük miktarlarda kullanıldığında daha etkili olduğunu göstermektedir (Martínez-Anzures vd., 2019).

SBS'nin bitüm ağırlığına göre %5 oranında ve çeşitli oranlarda (SBS/nanokil = 100/35, 100/50 ve 100/65 ağırlık/ağırlık) kullanılması ile hazırlanan polimer modifiye bitümün orijinal bitüm üzerindeki fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği araştırmada bitüm/organofilik montmorillonit/SBS modifiye bitümlerin üretilmesinde eriyik halinde karıştırma yöntemi seçilmiştir. Organofilik montmorillonit 180 °C'deki SBS modifiye bitüm içine ilave edilmiş ve karışımlar 30 dakika 4000 dev./dk. hızında karıştırma sıcaklığı 200 °C'yi geçmeden karıştırılmıştır. Sonuçlar, nanokilin polimer modifiye asfaltın depolama stabilitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. OMMT, SBS içinde uygun şekilde dağılarak eksfoliye yapı adı verilen homojen bir karışım sağlamıştır. Öte yandan, 4 °C'de elastik geri kazanım ve süneklikteki (düktilite) artış, PMB'nin elastikiyetinin düşük sıcaklıkta iyileştiği ve ısı çatlamasının meydana gelmediğini göstermiştir. SBS modifiye bitüm ve SBS/OMMT/bitüm PMAN'lerin viskozite davranışları incelendiğinde viskozitedeki artışın, nanokilin sertleştirici etkisinin bir sonucu olduğu ve asfalt viskozitesinin artması ile OMMT miktarı arasında doğrusal bir ilişki olmadığı açıklanmıştır. Bitüm molekülü zincirlerinin hareketi, eksfoliye yapının oluşumu sırasında yüksek sıcaklıkta OMMT katmanları ile sınırlandırıldığından dolayı viskozite artmaktadır. Viskozite, karışım bileşenlerinin kimyasal yapısı ve faz davranışıyla ilgili olmaktadır (Galooyak vd., 2010).

Doğrusal SBS kopolimeri ve organo-modifiye montmorillonit karıştırılarak polimer / kil/ bitüm PMAN karışım hazırlanmıştır. Karışımların termo-reolojik davranışını analiz etmek için genişletilmiş sıcaklık ve frekans aralığında dinamik mekanik analizler gerçekleştirilmiştir. PMAN'ler bitüme ağırlıkça %4 oranında Cloisite 20A ve %6 oranında SBS ilavesi ile hazırlanmıştır. Modifikasyon iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir: İlk karıştırma prosedüründe, bitüm ilk olarak Cloisite 20A ile karıştırılmış ardından bitüm/Cloisite karışımına polimer eklenmiştir. İkinci karıştırma prosedüründe ise polimer öncelikle Cloisite 20A ile karıştırılmış, böylece bir polimer nanokompozit oluşturulmuş, ardından oluşan nanokompozit bitüme eklenmiştir. 180 °C asfalt sıcaklığında yüksek

kesmeli bir karıştırıcı ile 4000 dev/dk. karıştırma hızında polimer ve kil (veya polimer / kil nanokompozit) kademeli olarak asfalta ilave edilmiş, ilave sırasında ve sonraki 1 saatlik karıştırma sırasında sıcaklık 180 ± 1 °C aralığında tutulmuştur. Tüm üçlü karışımlar için sistemin mekanik tepkisinin, nanokompozit modifikasyonundan yakından etkilendiği bulunmuştur. Kil varlığı ve karıştırma sırası, karışımın nihai özelliklerini kontrol eden ana faktörlerdir. İkinci karıştırma prosedüründe kil, bitümün içyapısı ve reolojisi üzerinde etkili ve temel bir etkiye sahip olmuştur. Bu durumda kilin varlığı, polimer açısından zengin faz ile asfalten açısından zengin faz arasındaki dengeyi derinden değiştirerek iki faz arasındaki uyumluluğu artırmıştır (Merusi vd., 2012).

Nanokil/polimer/bitüm asfalt nanokompozitlerin üretim süreçlerinin asfalt karışım performansı üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada nanokil ile SBS ve EVA polimerlerinin katılma sırası değiştirilerek bitüme ilave edilmiştir. Çalışmada, SBS ve EVA polimerleri ağırlıkça %5 oranında, nanokil ise ağırlıkça %3 oranında kullanılmıştır. Nanokil ve polimerin bitüme katılma sıraları değiştirilerek Nanokil/SBS ve Nanokil/EVA modifiye bitümleri üretilmiştir. Modifikasyon yüksek kesme etkili mikserde, 155 °C sıcaklıkta, 5000 dev./dk. karıştırma hızında her bir katkı maddesi için 20 dakika olmak üzere toplam 40 dakika süre ile uygulanmıştır. Yapılan test sonuçlarında EVA/nanokil/bitüm asfalt nanokompozitler için öncelikle EVA polimerinin eklenmesi durumunda su hasarı, deformasyon ve çatlama dirençlerinde artış gözlenmiştir. Nanokil modifiye karışımlar kontrol karışımlarla karşılaştırıldığında, koşullandırılmamış durumda çekme mukavemetlerinde çok küçük artış sağladığı, koşullandırma ile birlikte modifikasyonun etkisinin daha iyi görüldüğü ifade edilmiştir. SBS'li nanokompozitler kullanıldığında önce nanokil ilavesi genelde daha iyi sonuçlar vermiştir (İskender ve Aksoy, 2021).

Bitümün %4 nanokil (OMMT ve CLO), %4 SBS ve %4 SBS/nanokil ile modifiye edilmesiyle hazırlanan modifiye bağlayıcıların kaplama performansına ait fiziksel ve reolojik parametreleri değerlendirmek için incelenmiştir. Polimer bitüm modifikasyonundan önce, bir çözelti interkalasyon yöntemi ile polimer / nanokil kompoziti üreten kil tabakaları arasında polimer interkalasyonunu kolaylaştırmak için ilk olarak kil ile önceden karıştırılmıştır. Tüm modifiye bitümler 2000 dev./dk.'da, 160 °C sıcaklıkta ve 2 saat yüksek kesmeli bir karıştırıcı ile karıştırılmıştır. SBS ve SBS / nanokil katkıları ile modifiye edilmiş bitümler daha yüksek kompleks modül ve daha düşük faz açısı sergilemiş, bu durum da bu katkı maddelerinin bitümün tekerlek izine karşı direncini ve elastikiyetini geliştirdiğini göstermiştir. SBS / nanokil/bitüm PMAN, SBS modifiye bitümle benzer reolojik davranış

sergilemiş ve bu da SBS polimeri azaltılarak maliyette tasarruf sağlanabileceğini ortaya koymuştur (Farias vd., 2016).

Polimer-nanokompozit asfalt bağlayıcılar ve karışımlarının tekerlek izi davranışına SBS (lineer ve radyal) yapısının ve temel bağlayıcı tipinin (85/100 ve 120/150) etkisinin araştırıldığı çalışmada, geleneksel/modifiye bağlayıcılar ve karışımlar üzerinde tekerlek izi direncini değerlendirmek için bir dizi bağlayıcı ve karışım testleri yapılmıştır. 180 °C'ye ısıtılan bağlayıcıya SBS eklenerek, 4000 dev./dk. karıştırma hızında yüksek kesme etkili mikser ile 60 dakika karıştırılması ile SBS modifiyeli karışımlar üretilmiştir. Üretilen her bir SBS modifiyeli karışıma nanokil (OMMT) ilave edilerek yüksek kesme etkili mikser ile 3000 dev./dk. hızda 120 dk. boyunca karıştırılmıştır. Sonuçlar hem baz bağlayıcı tipinin hem de SBS yapısının, polimer-nanokompozit ile modifiye edilmiş asfalt karışımların tekerlek izi direnci üzerinde önemli bir pozitif etkiye sahip olduğunu göstermiştir. En önemli etki, 0.55 mm tekerlek izi derinliği ve 0.27 mm/sa tekerlek izi derinliği oranı ile nanokil+radyal SBS+85/100 penetrasyon dereceli bitüm için kaydedilmiştir. Lineer SBS nanokompozitleri ile modifiye edilen asfalt karışımlar ve bağlayıcılar, daha yüksek esneklik modülü ve Superpave tekerlek izi faktörü ($G^*/\sin\delta$) değerleri göstermiştir. Polimer nanokompozit modifikasyonunun asfalt karışımlarının Marshall oranı değerlerini büyük ölçüde etkilemesine rağmen, lineer ve radyal tipi SBS'te önemli bir farklılık göstermemiştir (Bayekolaei vd., 2018).

SBS / montmorillonit nanokompozit ile modifiye edilen bağlayıcıların ve taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi performansının değerlendirildiği bir çalışmada nanokil, asfalt bağlayıcıya bağlayıcı ağırlığına göre %1, 2, 3 ve 4 oranlarında, SBS ise %5 oranında ilave edilmiştir. Bağlayıcı modifikasyonunda önce asfalt bağlayıcı 160 °C'ye kadar ısıtılmış, ardından SBS bitüme eklenmiş ve 1 saat boyunca yüksek kesmeli bir karıştırıcı kullanılarak 5000 dev./dk.'da karıştırılmıştır. Daha sonra çeşitli montmorillonit yüzdeleri, SBS modifiyeli karışıma ilave edilmiştir. Eriyik halinde karıştırma yöntemi kullanılarak bu karışım aynı sıcaklık ve hızda 1 saat karıştırılmıştır. Farklı nanokil modifiyeli taş mastik asfalt karışımları arasında, %3 montmorillonit ile modifiye edilmiş karışım kalıcı deformasyona karşı en iyi performansı sergilemiştir. Polimer ve nanokil ilavesinin karışımın tekerlek izi direncinde artışa neden olduğu ve modifiye karışım arasında %5 SBS+%3 NC karışımının modifiye karışımlar arasında tekerlek izine karşı daha iyi performansa sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Montmorillonit ile modifiye edilmiş bağlayıcılara SBS eklenerek karışımların tekerlek izi derinliğinin azalmasının sebebi olarak SBS ile modifiye

edilmiş bağlayıcılarda montmorillonit tabakalarının eksfoliye yapısının oluşmasına bağlı olabileceği açıklanmıştır. OMMT'nin, doğrusal yapıdaki SBS içinde asfaltın viskoelastik davranışlarını iyileştirebileceği ifade edilmiştir (Ameli vd., 2020).

Lineer ve radyal SBS blok kopolimeri ile hazırlanan PMB'e üçüncü bileşen olarak nanokil eklenmesinin etkileri araştırılmıştır. Modifiye bağlayıcılar, SBS polimerinin lineer tipi için asfalt ağırlığının %3, %4, %5 ve %6'sı oranında ve radyal tipi için %3.5, %4.5 ve %5.5'i oranında kademeli olarak 180 ± 5 °C'deki asfalta ilave edilmesi ve yüksek kesme etkili mikserle 4500 dev./dk.'da 2 saat süreyle karıştırılması ile üretilmiştir. Nanokompozit örnekleri eriyik karıştırma yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Bu amaçla polimer modifiye asfalta 180 ± 5 °C'de OMMT ilave edilmiş ve karışım 45 dakika 4000 dev./dk. sabit hızda karıştırılmıştır. Sonuçlar nanokilin, polimerik asfaltların fiziksel özelliklerini, reolojik davranışlarını ve depolama stabilitesini iyileştirebileceğini göstermiştir. Lineer tip SBS-nanokompozit ile modifiye edilmiş asfalt eksfoliye bir yapı oluştururken, radyal tipi SBS-nanokompozit modifiye asfaltın X-ışını kırınımı sonuçlarına dayalı olarak aralanmış tabakalı bir yapı sergilediğini göstermiştir. OMMT'nin polimer modifiye asfaltların elastik ve viskoelastik davranışını iyileştirebileceği görülmüştür. En yüksek tekerlek izi direnci SBS / OMMT = 100/25 oranında elde edilmiştir (Golestani vd., 2012).

Nano modifiye asfalt, polimer modifiye asfalt ve nanokompozit modifiye asfalt bağlayıcıları ve bu modifiye bağlayıcılar kullanılarak hazırlanan karışımların fiziksel, mekanik ve reolojik özellikleri ve davranışları incelenmiştir. Çalışmada polimer olarak SBS ve nano malzeme olarak nanokil (OMMT) kullanılmıştır. Nanokompozitler hazırlanırken öncelikle asfalt bağlayıcı 180 ± 5 °C'ye ısıtılmış, ardından ısıtılan asfalta ağırlıkça %6 oranında SBS ilave edilmiş ve yüksek kesmeli mikser ile homojen bir karışım elde etmek için bağlayıcı 4500 dev./dk. hızında 2 saat boyunca karıştırılmıştır. Kompozitler hazırlanırken eriyik karıştırma yöntemi seçilmiş ve 180 °C'de hazırlanmış SBS modifiye bağlayıcıya OMMT eklenerek karışım 4000 dev./dk. karıştırma hızında 45 dakika karıştırılmıştır. Karıştırma sırasında polimer içeriğinin bozulmaması için karıştırma sıcaklığının 200 °C'yi geçmemesine dikkat edilmiştir. Test sonuçları nanokilin, PMA bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerinin yanı sıra depolama stabilitesini artırabildiğini göstermiştir. Reolojik test sonuçları nanokilin polimer modifiye asfalt karışımların elastik ve viskoelastik davranışını iyileştirdiğini göstermiştir. Nanokil, polimer ve kompozit ilavesiyle modifiye edilmiş bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığı önemli ölçüde azalmıştır. Kalıcı deformasyona direnci de sırasıyla %26, %50 ve %64 oranında iyileşmiştir. Polimer

modifiye asfalt betonu, geleneksel asfalt ve nano modifiye asfalt betonundan daha yüksek tekerlek izi direncine sahip olmuştur ancak nanokompozit modifiye asfalt betonundan daha düşük tekerlek izi direnci göstermiştir. Polimer modifiye asfalt ve nanokompozit modifiye asfaltları ile hazırlanan karışımlar, daha yüksek sıcaklıkta (40 °C) ve ayrıca su koşullamasında daha yüksek çekme mukavemeti göstermiş; ancak düşük sıcaklıkta (5 °C) önemli bir gelişme gözlenmemiştir. Nano modifiye asfalt, polimer modifiye asfalt ve nanokompozit modifiye asfalt bağlayıcıları ile hazırlanan karışımlar, çekme mukavemeti oranında %4.5, %17.2 ve %23.2 artış göstermiştir (Golestani vd., 2015).

Saf ve SBS modifiyeli asfalt bağlayıcılar ve karışımlarının tekerlek izi ve su hasarı üzerinde nanokilin etkisi araştırılmıştır. Modifiye bağlayıcı için 170 °C'ye ısıtılan bağlayıcıya, baz asfalt ağırlığının %4'ü oranında SBS ilave edilerek 6000 dev./dk. karıştırma hızında yüksek kesmeli karıştırıcı kullanılarak karıştırma işlemi en az 1 saat sürdürülmüştür. %2 nanokil ayrıca %4 SBS ile modifiye edilmiş bitüm ile karıştırılmıştır. Nanokil için karıştırma işlemi Ultrasonik karıştırıcı kullanılarak 65 watt sabit güçte 150 °C'de 20 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre nanokil, sadece saf asfalt bağlayıcının viskozitesini ve optimum bitüm içeriğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının viskozitesini ve optimum bitüm içeriğini de artırmıştır. Nanokil, asfalt karışımlarının neme karşı duyarlılığını SBS'den daha fazla artırmış ve SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıya nanokil ilavesi, nem hasarı direnci üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olmuştur. Hem nanokilin hem de SBS modifiyeli karışımların tekerlek izi dirençlerindeki gelişimi kullanılan asfalt karışımlara göre aynı olmuştur. Nanokilin SBS-modifiyeli asfalt bağlayıcıya eklenmesi tekerlek izi direncini artırmıştır. Nanokil, SBS ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının termal stabilitesini geliştirmiştir (Ameri vd., 2016).

Bitümlü bağlayıcı ağırlığına göre bağlayıcıya ayrı ayrı %1, %2 ve %3 oranlarında nanokil ve nanosilika (NS) malzemeleri ve %5 oranında SBS polimeri katılarak NC+SBS ve NC+NS modifiye karışımları elde edilmiştir. Öncelikle nano partiküller bağlayıcıya ilave edilmiş ardından bağlayıcıya yavaşça SBS eklenerek yüksek kesmeli bir karıştırıcıda 1500 dev./dk. kesme hızında karışımlar karıştırılmıştır. Karıştırma süresi boyunca, tam dağılmayı sağlamak için yaklaşık olarak 60 dakika boyunca sıcaklık 145 ± 5 °C'de tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan, nano silika ve nano kile SBS ilavesinin penetrasyonu azalttığı ve yumuşama noktasını arttırdığını göstermiştir. Yumuşama noktası, sıcaklık duyarlılığının azalmasının bir göstergesi olup ve bu da düşük sıcaklıklarda çatlamaya ve kalıcı

deformasyona karşı direnci artırmaktadır. Bağlayıcının en iyi fiziksel özellikleri (%2 NC+%5 SBS) ve (%2 NS+%5 SBS)'de elde edilmiştir (Ouf vd., 2019).

Farklı oranlarda SBS/CR (kırıntı kauçuk) ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcılar ve bunlara kil eklenmesiyle polimer modifiye asfalt nanokompozitler hazırlanmıştır. Çalışma CR'nin, etkili fakat maliyetli bir polimerik modifiyer olan SBS'nin bir kısmının etkili bir şekilde yerini tutabileceğini göstermiştir. Polimer modifiye asfalt nanokompozitler, mekanik özelliklerde ve döngü performansında olağanüstü bir gelişme göstermektedir; killer, iki polimer ve bitüm arasında uyumlaştırıcı olarak hareket etmekte ve depolama koşulları altında kararlı bir sistem sağlamaktadır. SBS ve CR kombinasyonuna dayalı nanokompozit numuneleri en iyi depolama stabilitesi göstermişlerdir. Geliştirilmiş özellikler, nanokil varlığında bitümdeki katkı maddelerinin daha iyi dağılmasına bağlanmaktadır. SBS / CR ile modifiye edilmiş bitüm / agrega nanokompozit, tek başına matriksin sonuçlarıyla tutarlı olarak saf bitüme kıyasla mukavemette %400'den fazla artış göstermiştir (Kosma vd., 2018).

Polimer modifiye asfaltlarda üçüncü bileşen olarak kil ilavesinin etkisinin araştırıldığı çalışmada ikili asfalt / Cloisite 20A kil ve SBS / Cloisite 20A kil karışımları üzerinde bir ön araştırma yapıldıktan sonra üçlü karışımlar, asfalta ayrı ayrı veya önceden karıştırılmış ana karışım şeklinde kil ve polimerin ilave edilmesi ile hazırlanmıştır. Asfalt modifikasyonu, 180 °C'de, yüksek kesmeli mikser ile 4000 dev./dk. hızında polimer ve kilin (veya polimer /kil nanokompozit) kademeli olarak eklenmesi ile 1 saat karıştırılarak yapılmıştır. Karıştırma sırasında sıcaklık $180 \pm 1^\circ\text{C}$ aralığında tutulmuştur. Her iki durumda da karşılaştırılabilir ara katman mesafelerine ve cam geçiş sıcaklıklarına sahip interkalasyonlu nanokompozitler elde edilmiştir. Sonuçlar karıştırma prosedürünün nihai reolojik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir (Polacco vd., 2008).

EVA kopolimeri ve nanokil ilavesinin asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada NC, EVA ve %1, 3, 5 ve 7 konsantrasyonlarda nanokil kullanılarak polimer-modifiyeli bağlayıcılar eriyik harmanlama metoduyla hazırlanmıştır. Eriyik harmanlama ile hazırlanan ürün, daha sonra yaklaşık 3 saat soğutulmuş ve $150 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de 60 dakika boyunca 4500 dev./dk.'lık bir kesme hızında modifiye edilmiş asfalt bağlayıcıyı hazırlamak için asfalta istenen miktarda polimerle modifiye edilmiş nanokil ilave edilmiştir. Fiziksel ve reolojik özellikler; geleneksel testler, viskozite ölçümleri ve dinamik kayma reometresi ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, EVA ve NC'nin bağlayıcı özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. PMAN, modifiye edilmemiş asfalta ve ayrıca NC ve EVA modifiye asfalta göre daha yüksek sıcaklık

performansı göstermiştir. Test sonuçlarına göre, PMAN'lerin en yüksek tekerlek izi direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle en iyi asfalt bağlayıcı performansını elde etmek ve polimer ekleme maliyetini düşürmek için yüksek sıcaklıktaki alanlarda kullanım için PMAN önerilmiştir. PMAN'lerin penetrasyonunun, yumuşama noktasının ve viskozite değerlerinin arttığı ve bunun sıcaklık duyarlılığını azalttığı görülmüştür (Siddig vd., 2018).

Etilen vinil asetat, stiren-bütadien-stiren, etilen metakrilat ve organo modifiye montmorillonit katkıları ile iki farklı hazırlama yöntemi kullanılarak polimer modifiye asfalt nanokompozitler üretilmiştir. Birinci hazırlama yönteminde polimer ve nanokil sıcak asfalta ayrı ayrı eklenerek fiziksel karıştırma ile ve ikinci yöntemde ise polimer ve nanokil önceden yüksek kesmeli bir karıştırıcıda karıştırılmasıyla nanokompozit karışımlar hazırlanmıştır. Polimer, polimer / kil ve nanokompozit modifiyeli karışımlar yüksek kesmeli mikser ile 180 °C'de 45 dakika boyunca 4500 dev./dk. karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. 45 dakikalık karıştırma süresinden sonra, daha düşük rotor hızıyla gazın alınması için 5 dakika bırakılmıştır. Fiziksel karışım için polimer ve nanokil tartılmış ve küçük bir beherde 5 dakika boyunca manuel olarak karıştırılmıştır. Nanokompozitler, 120 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda Brabender Plasticorder kullanılarak ağırlıkça %60:40 oranında polimer ve nanokil ilave edilerek hazırlanmıştır. Elde edilen PMAN'ın termal ve morfolojik özelliklerinin yanı sıra yakıt direnci incelenmiştir. Bu ön araştırmalarla etilen vinil asetat ve etilen metakrilat esaslı asfalt bileşimlerinin olağanüstü yakıt direnci ile yumuşama noktası değerlerinden kanıtlanan iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Karışımların daha iyi bileşimini seçmek için daha fazla karakterizasyonlar devam etmektedir (Sureshkumar ve Polacco, 2010).

Nanomalzemes ve polimer kompozitler kullanarak modifiye bağlayıcıların yüksek ve düşük sıcaklık performansı araştırılmıştır. Altı farklı nano malzeme (SiO_2 , bentonit, CaCO_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , ZnO) ve dört farklı polimer (SBR, SBS, PE, kırıntı kauçuk) asfalt bağlayıcıyı modifiye etmek için kullanılmıştır. Aralarından en uygun olanları yumuşama noktası, 5 °C'de duktilite ve 60 °C'de viskozite de dahil olmak üzere geleneksel asfalt bağlayıcı testlerine göre seçilmiştir. Nanomalzemelerin ve polimerlerin modifikasyonu için öncelikle nanomalzemes asfalta eklenmiştir. 120 °C'de 5 dakika elle karıştırma ve 15 dakika 5000 dev./dk. yüksek hızdaki kesmeli karıştırmadan sonra polimerler eklenmiştir. 30 dakikadan daha az olmaması koşuluyla 170 °C'de 5000 dev. /dk.'da yüksek hızlı kesme ile kompozit nano malzemeler ve polimer modifiye asfalt bağlayıcı hazırlanmıştır. SBS ve PE modifiye asfalt bağlayıcının yüksek sıcaklık performansı üzerinde belirgin bir artış

göstermiştir. Bununla birlikte SBS, %4 dozajını geçene kadar etkisini göstermiştir. Ortogonal test ve analiz metodu ile farklı türlerdeki nano malzemelerin ve polimerlerin modifiye asfalt bağlayıcıların kaplama performansı üzerindeki etki eğilimleri analiz edilmiş ve optimum nano malzeme-polimer kompozit modifiye asfalt formülü %0.5 SiO₂ + % 5 SBR + %1 PE olarak belirlenmiştir. Önerilen modifiye asfalt bağlayıcı, baz asfalt bağlayıcı ve %5 SBS modifiyeli asfalt bağlayıcıdan yaşlanmaya karşı daha iyi performans göstermiştir. Önerilen modifiye asfalt bağlayıcı, baz asfalt bağlayıcının düşük sıcaklık performansını artırmış ve %5 SBS modifiyeli asfalt bağlayıcıdan daha iyi düşük sıcaklık performansı sergilemiştir. Önerilen modifiye asfalt bağlayıcı en iyi yüksek sıcaklık performansına sahip olmuştur. Aynı rol asfalt karışımlarına da yansımaktadır. Önerilen modifiye asfalt karışımı diğer asfalt karışımlarından daha büyük bir kırılma gerilmesi ve daha küçük rijitlik modülü sergilemiş, bu durum da önerilen karışımın düşük sıcaklıkta daha iyi bir çatlama direncine sahip olduğunu göstermiştir (Sun vd., 2017).

Nanokil ve SBR polimeri ile bunların kombinasyonunun, bağlayıcı ve asfalt karışımının tekerlek izi performansı üzerindeki etkisinin değerlendirildiği araştırmada 60-70 penetrasyon dereceli bağlayıcıya aynı anda %2 Nanokil + %4 SBR ve %3 Nanokil + %3 SBR eklenerek iki farklı kombinasyonla modifiye karışımlar hazırlanmıştır. 50 °C'de gerçekleşen dinamik sünme testinde özellikle nanokil ve SBR kombinasyonu ile yapılan modifikasyon, daha yüksek döngülerde kayma deformasyonlarının oluşmasına neden olurken, modifiye edilmemiş karışım yüklemenin ilk aşamasında daha büyük deformasyonlara sahip olmuştur. Dinamik sünme test sonuçlarına bakıldığında nanokil, SBR ve bunların kombinasyonlarının tekerlek izi direnci ve elastik deformasyonlar üzerinde olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Tekerlek izi test sonuçları, modifiye bağlayıcı içeren asfalt karışımlarının tekerlek izi derinliğinin daha az olduğunu göstermiştir. Test sonuçları, %2 Nanokil + %4 SBR ikili kombinasyonunun SBR polimeri ile kombinasyonu halinde, bağlayıcı geliştirme özellikleri ile nanokilin varlığına atfedilebilecek en iyi performansa ve tekerlek izi direncine sahip olduğunu göstermiştir (Ameri vd., 2018).

%2 ve %4 oranlarında polipropilen / nanokil ile modifiye edilmiş PMAN ve iki tip agrega (granit ve kireçtaşı) kullanılarak hazırlanan asfalt karışımların suya karşı olan hassasiyetleri değerlendirilmiştir. Polipropilen/nanokil nanokompozit içeren asfalt karışımlarının suya karşı olan hassasiyetlerini ölçmek için AASHTO T 283 ve yüzey serbest enerjisi olmak üzere iki yöntem kullanılmıştır. Modifiye asfalt bağlayıcıları ile kireçtaşı veya granit agregaları içeren asfalt karışımlarının koşullandırılmamış ve koşullandırılmış dolaylı

çekme mukavemeti değerleri iyileşmiştir. Test sonuçları, nanokompozit içeren asfalt karışımlarının çekme mukavemeti oranı değerlerinin iyileştiğini göstermiştir. Ek olarak yüzey serbest enerji testinin sonuçları, nanokompozitin asfalt karışımların suya karşı hassasiyetini iyileştirmek için kullanılabileceğini göstermiştir (Mansourian ve Gholamzadeh, 2017).

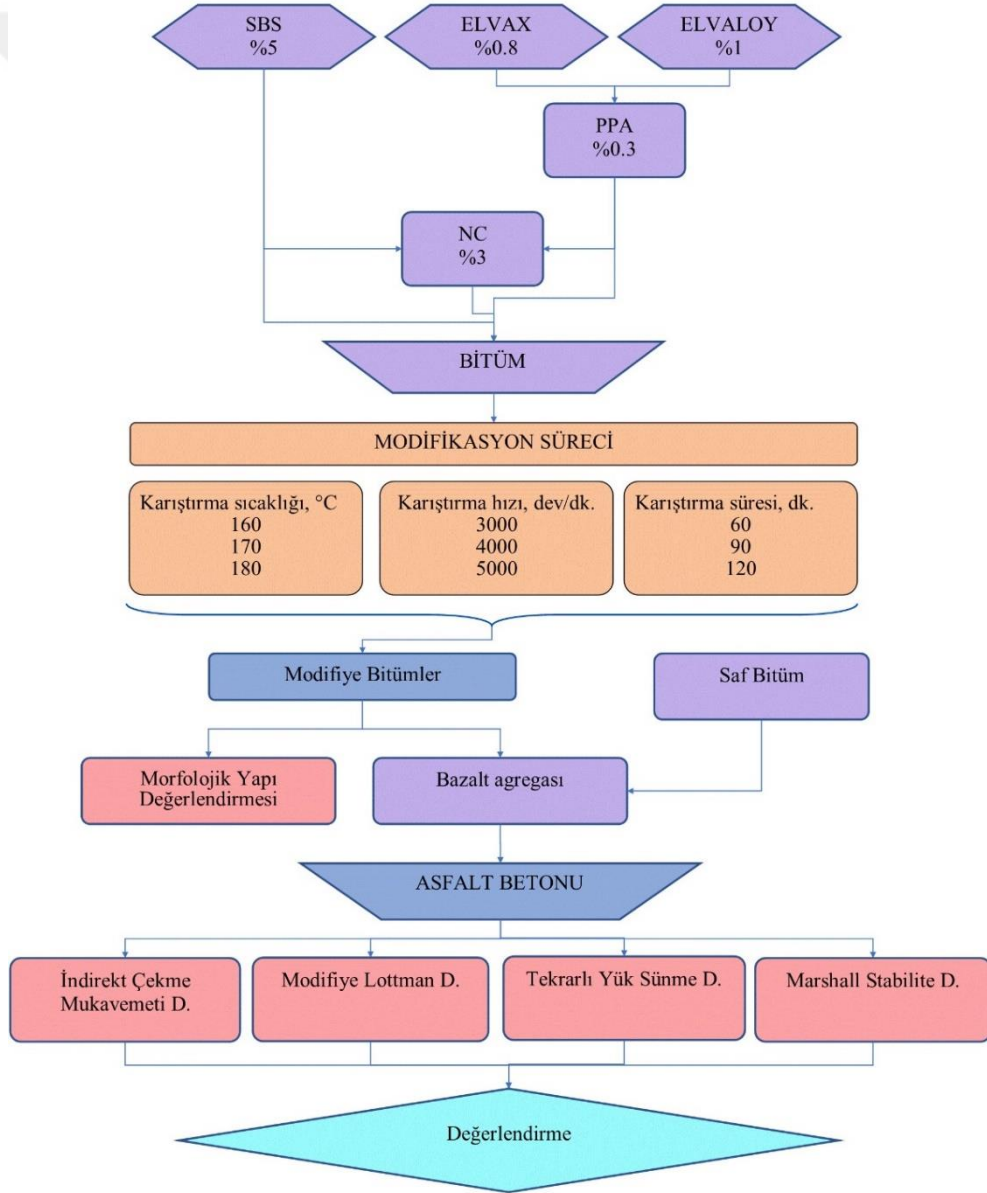
SEBS blok kopolimeri ve montmorillonit nanokilden elde edilen nanokompozit, asfalt modifikasyonu için eriyik halinde karıştırma tekniği ile hazırlanmıştır. PMAN'ler %3, %4 ve %6 SEBS/nanokil modifiyeri ile yüksek kesmeli bir karıştırıcı ile elde edilmiştir. Asfaltın yoğunluğu ile modifiyerin yoğunluğu arasındaki fark azalmış, asfaltın içinde yayılan modifiyer partiküllerin düşme hızı azalmış ve polimer ile bitümün kimyasal fraksiyonları arasındaki uyumluluk iyileşmiştir. Nanokompozitin modifiye asfaltların fiziksel ve reolojik özellikleri üzerindeki etkisinin yeterli bir dispersiyon stabilitesi ve morfolojisini korumak için bir modifiye edici katkı olarak küçük miktarlarda nanokompozit kullanıldığında daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır (Zapién-Castillo vd., 2016).

Montmorillonitin, triblok kopolimer ile modifiye edilmiş asfaltların reolojik, termal stabilite ve morfolojik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. PMAN'ler, montmorillonit ile SBS, SIS ve SEBS'nin AC-20 sınıfı bitüm ile art arda karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. PMAN'ler, 180 °C'ye kadar ısıtılan asfalta ağırlıkça %4 triblok kopolimer ilave edilmesi ile 500 dev./dk.'da 20 dakika karıştırılmış, ardından bu karışıma ağırlıkça %2.5 MMT ilave edilmiş ve karışım, MMT nanokilinin iyi bir şekilde dağılmasını sağlamak için 4 saat daha aynı koşullarda karıştırılmaya devam edilmiştir. Sonuçlar, MMT ile modifiye edilmiş asfaltın interkalasyonlu veya eksfoliye bir yapı sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, modifiye edilmiş asfaltlar nispeten daha yüksek kompleks modülü sergilemiştir ve sonuç olarak, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine karşı direncini artıran gelişmiş viskoelastik özellikler sergilemiştir. MMT'nin triblok polimer/asfalt/karışımlara eklenmesi, ayrılmış faz partiküllerinin boyutunda önemli bir azalmaya ve daha iyi dağılmasına sebep olmuştur. En iyi dağılım sırasıyla SIS, SBS ve SEBS polimerleri ile sağlanmıştır (Vargas-Hernández ve Vázquez-Torres, 2015).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde çalışmanın deneysel bölümde kullanılan bitüm, agrega, Nanokil, SBS elastomeri, EVA plastomeri ve reaktif etilen terpolimerinin malzeme özelliklerini belirlemede kullanılan deneyler, malzeme özellikleri ve karışım tasarımına ait bilgiler verilmiştir. Şekil 8’de tez kapsamında yapılan çalışmanın akış diyagramı sunulmuştur.



Şekil 8. Deneysel akış diyagramı

2.2. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Agregası

Çalışmada kullanılan agregalar Trabzon ili, Zigana bölgesinde bulunan bazalt taşocağından temin edilmiştir. Bazalt agregasının temel özelliklerini belirlemek için yapılan deney metodları ve deney sonucu elde edilen değerler Tablo 6’da sunulmuştur.

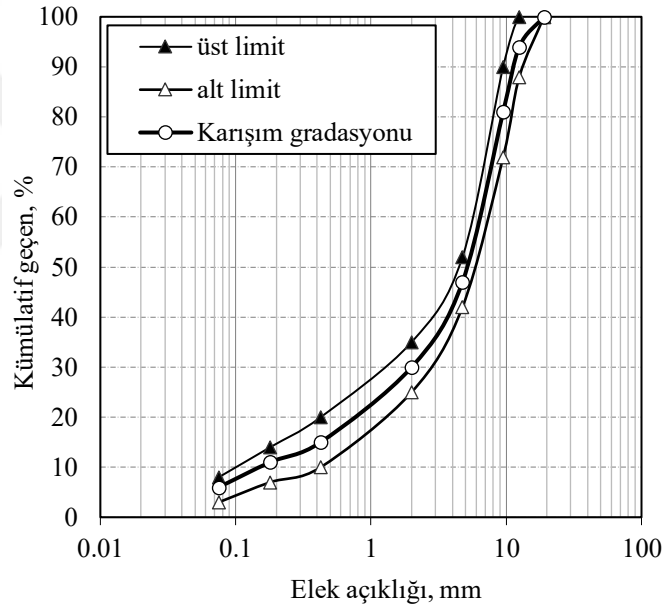
Tablo 6. Bazalt agregasının temel özellikleri

Özellik	Deney metodu	Değer	Şartname limitleri
Özgül ağırlık (Kaba agregası)	ASTM C 127		
Hacim		2.657	
Zahiri		2.753	
Özgül ağırlık (İnce agregası)	ASTM C 128		
Hacim		2.627	
Zahiri		2.784	
Özgül ağırlık (filler)		2.821	
Parçalanma direnci (Los Angeles) (%) kayıp	TS EN 1097-2	12	En fazla 25
Yassılık indeksi, (%)	BS 812	14	En fazla 25
Soyulma direnci (katkısız) (%)	ASTM D-1664	35-40	
Cırlanma değeri, (%)	TS EN 1097-8		En az 50
Absorbsiyon (kaba agregası), (%)	TS EN 1097-6	1.31	En fazla 2
Donma kaybı (NaSO ₄) (%)	ASTM C-88	0.92	En fazla 8
Kil toprakları ve ufalanabilir daneler, (%)	ASTM C 142		Bulunmayacak
İnce agregası için plastisite indeksi	TS-1900-1	Plastik değil	Plastik değil
İnce agregası için organik madde, (%)	TS EN 1744-1		Negatif

Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolları Teknik Şartnamesi asfalt betonuna (TİP-1) uygun agregası gradasyonu seçilmiş olup seçilen maksimum agregası boyutu 19 mm’dir (KTŞ, 2013). Asfalt betonu agregası karışımının gradasyonu ve fraksiyon oranları Tablo 7’de sunulmuştur. Karışıma ait gradasyon eğrisi ise Şekil 9’da gösterilmiştir.

Tablo 7. Asfalt betonu gradasyonu ve agregra fraksiyon oranları

Elek Boyutu		Şartname Limitleri		Agregra gradasyonu (% geçen)	Agregra fraksiyonu ve oranları
İnç	mm	Alt limit	Üst limit		
¾	19.0	100	100	100	Kaba agregra, %53
½	12.5	88	100	94	
3/8	9.5	72	90	81	
No. 4	4.75	42	52	47	İnce agregra, %41
No. 10	2.00	25	35	30	
No. 40	0.425	10	20	15	
No. 80	0.18	7	14	11	
No. 200	0.075	3	8	6	Filler, %6



Şekil 9. Asfalt betonu gradasyon eğrisi

2.2.2. Bitümlü Bağlayıcı

Çalışmada 50-70 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Kullanılan asfalt çimentosunun özelliklerini belirlemek için yapılan testler ve sonuçları şartname limitleriyle Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Asfalt çimentosu özellikleri (AC 50-70)

Test	Yöntem	Değer	Şartname limitleri
Özgül ağırlık (25°C)	ASTM D-70	1.011	
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	52	46-54
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2592	240	En az 230
Penetrasyon (25°C), 0.1mm	TS EN 1426	63	50-70
Düktilite (25°C)	ASTM D-113	100+	

2.2.3. Nanokil

Asfalt modifikasyonunda kullanılan veya kullanılma potansiyeli olan çeşitli nanomalzemeler vardır. Bunlar: nanokil, nanosilika, nano sönmüş kireç, nano boyutlu plastik tozlar veya polimerize tozlar, nano fiberler ve nano tüplerdir (You, 2013). Nanokil, asfalt modifikasyonu için en yaygın kullanılan nanomalzemedir (Fang vd., 2013).

Tez çalışmasında kullanılan nanokil 1-140 Eczacıbaşı ESAN tarafından üretilmiştir. EsanNano 1-140 üretiminde montmorillonitin saflaştırılması ve organik modifikasyonu sağlanmaktadır. Kullanılan nanokilin görüntüsü Şekil 10'da kimyasal özellikleri de Tablo 9'da sunulmuştur. Nanokil bitüme ağırlıkça, %3 oranında ilave edilerek yüksek kesme etkili mikserle karıştırılmıştır.

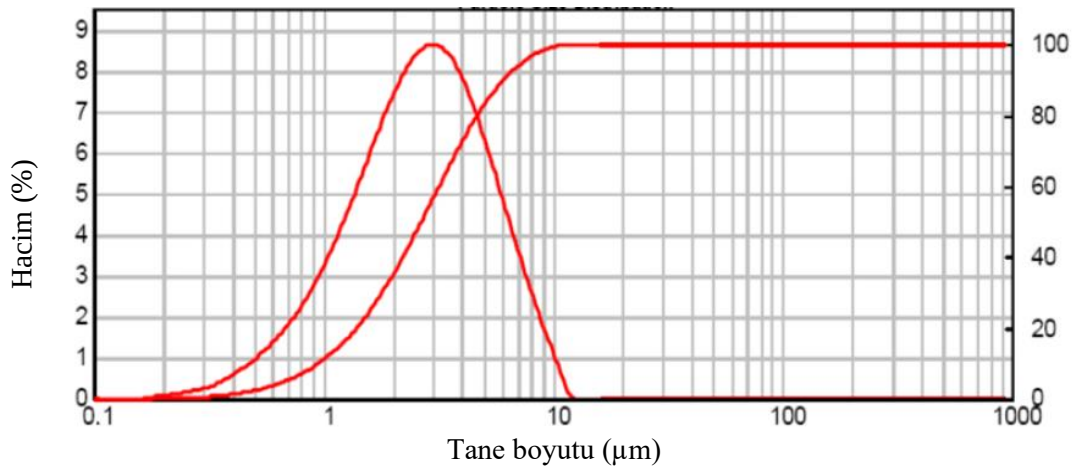


Şekil 10. Kullanılan nanokilden bir görüntü

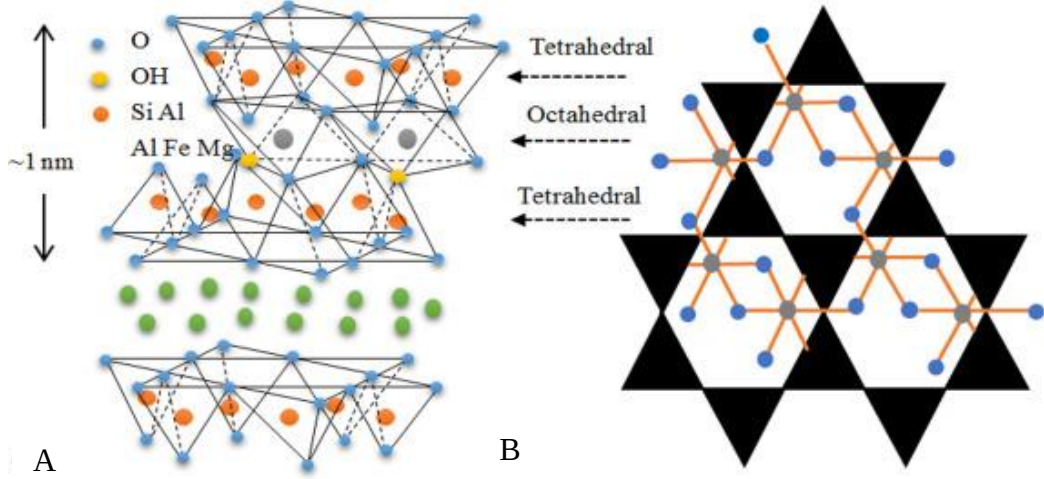
Tablo 9. Kullanılan nanokilin kimyasal analiz sonuçları

Bileşim	Formül	Oranı (%)
Alüminyum oksit	Al_2O_3	6±1
Kalsiyum oksit	CaO	0.4±0.1
Demir oksit	Fe_2O_3	0.4±0.2
Potasyum oksit	K_2O	0.3±0.1
Magnezyum oksit	MgO	1.4±0.2
Sodyum oksit	Na_2O	0.6±0.2
Silisyum dioksit	SiO_2	44±1
Kızdırma kaybı		45±2
Titanyum dioksit	TiO_2	0.05±0.02

Montmorillonit killerin tabakalı yapısından dolayı yüzey özelliklerinin modifikasyonu sağlanabilmektedir. Montmorillonitik killerin başlangıç tabakalar arası mesafe değerleri yaklaşık olarak 15Å iken, organik modifikasyon yapıldığında bu değerler yaklaşık olarak 38-40 Å aralıklarına taşınabilmektedir. Tabakalar arası mesafedeki bu artış da kilin polimer ana yapıda homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Hazırlanan bu ürün özellikle PP ve PE nanokompozit uygulamalarında etkilidir (Eczacıbaşı ESAN). Çalışmada kullanılan nanokilin tane boyutu analizi Şekil 11’de verilmiştir. Montmorillonit kilinin şematik yapısı Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Nanokilin tane boyutu analizi (<20 mikron)



Şekil 12. Montmorillonit yapısı (A) yandan görünüş: zayıf van der Waals ve elektrostatik kuvvetler yoluyla birincil parçacıkları oluşturmak için birleştirilmiş MMT'nin tetrahedron birimleri, (B) üstten görünüş, oksijenin altıgen yapısı ve hidroksil ligandları sekizgen katman (Zhou vd., 2019).

2.2.4. Stiren Bütadien Stiren

SBS polimeri ile modifiye edilmiş bitüm, iyi performans göstermesi sebebiyle asfalt yol kaplamalarının yapımında sıkça tercih edilir. Bitümde üç boyutlu ağlarının oluşmasıyla SBS, asfalt karışımının performansını artırarak bitüm-agrega bağ direncini iyileştirme eğilimindedir (Yan vd., 2019; Yin vd., 2017). Yapılan çalışmalarda SBS, bitümün reolojik özelliklerini ve asfalt karışımlarının kalıcı deformasyona olan direncini, neme karşı duyarlılığını, yorulma ömrünü ve dayanıklılığı gibi performans özelliklerini iyileştirmiştir (Shan vd., 2019; Zhao vd., 2016).

SBS konsantrasyonu, polimer eklenmiş bitüm özelliklerinde temel bir rol oynar. Bitüm modifikasyonu %7'ye kadar elastomer eklenerek yapılabilmekte, bazı durumlarda aynı anda farklı polimerler kullanılabilmektedir. Düşük ve orta dereceli modifikasyonlar için polimer miktarları %4.5'ten azdır (yumuşak modifikasyonda yaklaşık %3 ve orta modifikasyonda yaklaşık %4.2). Yüksek dereceli modifikasyonlar için eklenen miktarlar %5'in üzerindeyken düşük konsantrasyonlarda SBS, bitümde ayrı bir faz olarak dağılır (Chen vd., 2002). Bir bağlayıcıda kullanılan SBS içeriği ağırlıkça %2 ile %5 arasında değişmektedir ve daha yüksek yüzdelere kullanılması ekonomik açıdan dezavantajdır (Jasso vd., 2015).

Bu nedenle tez çalışmasında SBS oranı %5 seçilmiştir. Çalışmada, Kraton D 1192 ESM (SBS) elastomerik polimeri kullanılmıştır. Toz formundaki SBS bitüme, bitüm ağırlığının %5'i oranında katılarak yüksek kesme özellikli mikserle karıştırılmıştır. SBS

polimerinin görüntüsü Şekil 13'te, genel özellikleri de Tablo 10'da verilmiştir. Kullanılan SBS, kütlece %30 stiren bağı ile stiren ve bütadien bazlı şeffaf bir lineer blok kopolimerdir (URL-2, 2021).



Şekil 13. SBS polimerinin fiziksel görünümü

Tablo 10. SBS katkısının özellikleri

Özellikler	Değer	Birim	Deney Standardı
Özgül ağırlık	0.94	-	ISO 2781
Birim hacim ağırlık	0.4	kg/dm ³	ASTM D1895
Sertlik, Shore A	70	Shore A (15sn)	ASTM D2240
Erime akma oranı, 2000 C/5kg	<1	g/10 dk.	ISO 1133
%300 modülü	4.8	MPa	ISO 37
Kopma uzaması	1000	%	ISO 37
Çekme dayanımı	33	MPa	ISO 37
Çözelti viskozitesi	1.8	Pa.s	KM06

2.2.5. Reaktif Etilen Terpolimer

Reaktif terpolimer, bitümün bazı bileşenleri ile kimyasal bağlar oluşturabilen fonksiyonel gruplardan oluşan bir polimerdir. Bu polimer, asfaltın etrafında bir ağ kurarak ayrılmaz bir bileşik oluşturur ve asfalt ile kimyasal bir reaksiyon üretir (Polacco vd., 2006; De Sá vd., 2013; Polacco vd., 2015; Jasso vd., 2015; Gama vd., 2016; Ge vd., 2017).

Elvaloy 5160, kaplamada kullanılan asfalt bağlayıcının özelliklerini değiştirmek için kullanılan reaktif elastomerik terpolimerdir. Elvaloy 5160, DuPont tarafından asfaltta kullanım için üretilen terpolimerlerin kimyasal olarak en reaktif olanıdır. Çeşitli kaynaklarda, Elvaloyun asfalt ile birlikte kullanımı etkili sonuçlar göstermiştir. Üretilen PMA çok stabildir ve uzun süre saklanabilmektedir (URL-3, 2023).

Tez çalışmasında DuPont firması tarafından üretilen reaktif elastomerik terpolimer olan Elvaloy 5160 polimeri bitüme, bitüm ağırlığının %1'i oranında ilave edilerek kullanılmıştır. Kullanılan Elvaloy 5160 terpolimerinin fiziksel görüntüsü Şekil 14'te verilmiştir. Tipik özellikleri ise Tablo 11'de sunulmuştur.



Şekil 14. Elvaloy 5160 terpolimerinin fiziksel görünümü

Tablo 11. Elvaloy 5160 katkısının özellikleri (URL-3, 2023).

Fiziksel Özellikler	Değer	Birim	Deney Standardı
Yoğunluk	0.95	g/cm ³	ASTM D792, ISO 1183
Erime akma oranı	12	g/10 dk.	ASTM D1238, ISO 1183
Termal Özellikler			
Erime noktası	80	°C (176 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Donma noktası	55	°C (131 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Mekanik Özellikler			
Çekme mukavemeti	3653	PSI	D638
Kopma uzaması	718	%	D638
İşleme Bilgileri			
Maksimum işleme sıcaklığı	220	°C (428 °F)	

2.2.6. Elvax

Çalışmada reaktif elastomerik terpolimer ile birlikte etilen vinil asetat kopolimeri kullanılmıştır. Etilen vinil asetat kopolimeri olarak Elvax 660A kullanılmıştır.

Elvax 660A, endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir etilen-vinil asetat kopolimer reçinesidir. Ağırlıkça %12 vinil asetat komonomer içeriğine sahiptir. Elvax katkısının üretici firma tarafından sağlanan fiziksel ve termal özellikleri Tablo 12’de görüntüsü ise Şekil 15’te sunulmuştur. Elvax polimeri bitüme ağırlıkça %0.8 oranında katılmıştır.



Şekil 15. Elvax 660A katkısının fiziksel görünümü

Tablo 12. Elvax 660A katkısının özellikleri (URL-4, 2023)

Fiziksel Özellikler	Değer	Birim	Deney Standardı
Yoğunluk	0.93	g/cm ³	ASTM D792, ISO 1183
Erime akma oranı	2.5	g/10 dk.	ASTM D1238, ISO 1133
Termal Özellikler			
Erime noktası	95	°C (203 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Donma noktası	81	°C (177.8 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Vicat yumuşama noktası	71	°C (159.8 °F)	ASTM D1525, ISO 306
İşleme Bilgileri			
Maksimum işleme sıcaklığı	235	°C (455 °F)	

2.2.7. Polifosforik asit

Polifosforik asit, genellikle ortofosforik asit ve pirofosforik asit gibi çeşitli asitlerin bir karışımı olarak karakterize edilen inorganik zayıf asittir. Yüksek saflıkta PPA, H_3PO_4 'ün dehidrasyonu yoluyla veya H_3PO_4 içinde dağılmış P_2O_5 'in ısıtılmasıyla elde edilmektedir. PPA, P_2O_5/H_3PO_4 konsantrasyon oranına bağlı olarak farklı sınıflarda mevcuttur (Rios Carreno, 2021). Polifosforik asitler güçlü higroskopik özelliklere sahip, kokusuz, yüksek viskoziteli sıvılardır. $>68\%$ P_2O_5 konsantrasyonuna sahip asitler polifosforik asitler olarak bilinmektedir (URL-5, 2023).

Reaktif polimer Elvaloy asfaltanlarla kimyasal bağlar oluşturduğu için bu durum da boyut, hareketlilik ve sertlik bakımından değişebilen Elvaloy-asfaltan bileşiğinin oluşumuna yol açmaktadır. Böyle bir karmaşık görünüm, ağırlıkça 1.5% 'in üzerindeki Elvaloy konsantrasyonunda olmaktadır (Jasso, 2016). Bu nedenle Elvaloy'un asfaltanlarla reaksiyonunu artırmak ve asfaltın özelliklerini iyileştirmek için katalizör olarak PPA kullanılması önerilmiştir (Rios Carreno, 2021; Jasso, 2016).

Bu çalışmada Dupont tarafından üretilen $115-117\%$ polifosforik asit kullanılmış olup, PPA yetkili satıcının tavsiyesi üzerine bitüme, bitüm ağırlığının 0.3% 'ü oranında ilave edilmiştir. Kullanılan PPA'nın genel özellikleri Tablo 13'te ve fiziksel görünümü Şekil 16'da sunulmuştur.

Tablo 13. PPA'nın özellikleri

Özellik	Durum
Görünüm	viskoz sıvı
Renk	renksiz
Koku	kokusuz
20 °C'de pH değeri	<1
Erime aralığı	$38-34\%$ ($115-117\%$)
Kaynama aralığı	$> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
Yoğunluk	2.07 g/cm^3
Suda çözünürlük	tamamen karışabilir
25 °C'de viskozite	36000 mPas
H_3PO_4	$116-117.4\%$
P_2O_5	$84-85.2\%$



Şekil 16. Polifosforik asitin fiziksel görüntüsü

2.3. Polimer/Nanokil/Bitüm Nanokompozit Modifiye Bitümlerinin Hazırlanması

Sıcaklık, karıştırma hızı ve karıştırma süresi polimer modifiye bitüm üretiminin değiştirilebilen koşullarıdır. Bir bitümün doğru bir polimer ile uygun sıcaklıkta, karıştırma süresinde ve hızında modifiye edilmesi üstyapı için büyük önem arz etmektedir. Polimer modifiye bitüm üretimi, sadece bitümün akışkan olduğu sıcaklıklarda gerçekleşmeyebilir. İlgili polimerin, bitümde olduğu gibi eriyebileceği veya kimyasal reaksiyon oluşturabileceği sıcaklık değerlerinin de göz önünde tutulması gerekmektedir (Gökalp vd., 2019).

Üretim sürecinde nano malzemenin asfalt içinde etkili bir şekilde dağılması hala zorluk arz etmektedir. Etkili bir dağılma derecesi, karışım sıcaklığı, süresi ve hızı gibi faktörlere bağlı olmaktadır. Nano malzeme ve orijinal bağlayıcı yapısı, optimum üretim süreci parametrelerinin belirlenmesinde kilit rol oynamaktadır (Li vd., 2017).

Yapılan literatür araştırmasında nanomalzemeler ile birlikte polimerlerin karıştırılmasıyla hazırlanan polimer modifiye asfalt nanokompozit modifikasyonlarında çeşitli karıştırma hızları, süreleri ve sıcaklıklarının denendiği görülmüştür.

Nanokilin SBS ve EVA ile modifikasyonunda karıştırma sıcaklığı, hızı ve süresi açısından optimum modifikasyon parametrelerinin araştırıldığı bu tez çalışmasında karıştırma sıcaklıkları olarak 160 °C, 170 °C, 180 °C; karıştırma süreleri olarak, 60 dk., 90 dk. ve 120 dk. ve karıştırma hızları olarak 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. seçilerek Silverson L5M yüksek kesme etkili mikser ile polimer modifiye asfalt nanokompozitler üretilmiştir.

Öncelikle seçilen modifikasyon sıcaklığına getirilen bitüme ilk olarak bitüm ağırlığına göre %3 oranında nanokil eklenmiş, ardından hem SBS hem de EVA polimerleri nanokil modifiye bitüme ayrı ayrı eklenerek SBS/NC/bitüm ve EVA/NC/bitüm nanokompozit modifiye bağlayıcılar üretilmiştir. Seçilen tüm karıştırma hızları, süreleri ve sıcaklıklarına göre polimer modifiye asfalt kompozit bitümleri hazırlanmıştır.

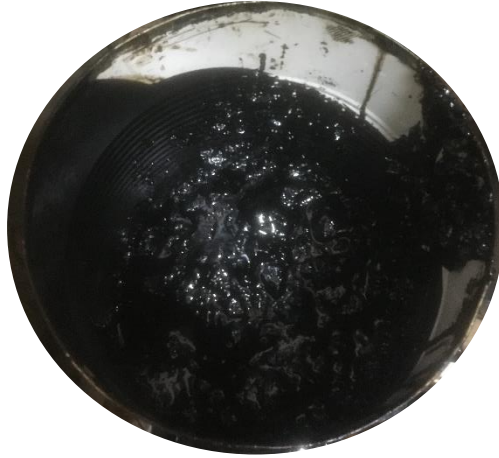
SBS/NC/bitüm kompozit üretimi için; belirlenen sıcaklığa getirilen (160 °C, 170 °C, 180 °C) bitüme bitüm ağırlığının %3'ü oranında nanokil ilave edilip yüksek kesme etkili mikserle seçilen hızda (3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk.) karıştırıldıktan hemen sonra SBS, bitüm ağırlığının %5'i oranında nanokil modifiye bitüme eklenmiştir ve seçilen karışım parametrelerinde (160 °C, 170 °C, 180 °C; 60 dk., 90 dk. ve 120 dk.; 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk.) modifikasyon işlemi sürdürülmüştür. Modifikasyon süresi boyunca polimer modifiye asfalt nanokompozit bitümlerinin sıcaklığının sabit kalmasına özen gösterilerek hassas bir üretim süreci izlenmiştir. Polimer nanokompozit modifiye bitümler hazırlanırken karışımın oksijenle bağlantısını azaltmak ve ısı kaybını önlemek için cam beherin üzeri alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Modifikasyon süresince PMAN sıcaklığı sürekli ölçülmüştür. Tüm modifikasyon parametrelerine (160 °C, 170 °C, 180 °C karıştırma sıcaklığı; 60 dk., 90 dk. ve 120 dk. karıştırma süresi; 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızı) göre toplamda 27 farklı seçenekte SBS/NC/bitüm nanokompozit modifikasyonu yapılmıştır. Üretilen PMAN'in yüksek kesme etkili mikser ile modifikasyonundan görüntüler Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. Polimer modifiye asfalt nanokompozit modifikasyonundan görüntü

EVA/NC/bitüm nanokompozit asfalt bağlayıcıları hazırlanırken seçilen sıcaklığa getirilen (160 °C, 170 °C, 180 °C) bitüme öncelikle bitüm ağırlığının %3'ü oranında nanokil ilave edilip yüksek kesme etkili mikserle belirlenen hızda (3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk.) karıştırılmıştır. Hemen ardından, bitüm ağırlığının %1'i oranında Elvaloy® 5160 ve %0.8'i oranında Elvax 660A bitüme ilave edilerek seçilen karışım parametrelerinde (160 °C, 170 °C, 180 °C; 60 dk., 90 dk. ve 120 dk.; 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk.) karıştırma işlemi yapılmıştır. Elvaloy ve Elvax oranlarına üretici firma danışman önerileri ve uygulayıcı firma tavsiyelerinden yararlanılarak karar verilmiştir. Bu çalışma kapsamında Elvax-Elvaloy karışımı EVA olarak adlandırılmıştır. SBS/NC/bitüm nanokompozitleri hazırlarken olduğu gibi modifikasyon süresi boyunca modifiye bitümün sıcaklığı sürekli ölçülerek hassas bir EVA/NC/bitüm kompozit modifiye bitümleri elde edilmeye çalışılmıştır. Tüm modifikasyon parametrelerine göre toplamda 27 farklı seçenekte EVA/NC/bitüm nanokompozitleri hazırlanmıştır.

Çalışmada reaktif etilen terpolimer (Elvaloy RET) kullanılarak üretilen polimer modifiye asfalt nanokompozitleri belli bir süre bekledikten sonra modifiye bitümde katılaşma, kümelenme meydana gelmiştir. Şekil 18'de sadece Elvaloy RET ile modifiye edilmiş bitümden bir görüntü verilmiştir. Bu sebeple bağlayıcı ve reaktif etilen terpolimer arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonu hızlandırmak için Elvaloy RET ile hazırlanan tüm modifiye bitümlere bitüm ağırlığının %0.3'ü oranında polifosforik asit (PPA) ilave edilmiştir. Polifosforik asit, seçilen karıştırma sürelerinin (60 dk., 90 dk. ve 120 dk.) son yarım saatinde modifiye bitümlere ilave edilerek yüksek kesme etkili mikserle karıştırılmaya devam edilmiştir.



Şekil 18. Elvaloy RET ile modifiye edilmiş bitümden bir görüntü

Reaktif etilen terpolimerdeki belirli fonksiyonel gruplar asfalt molekülleri ile reaksiyona girerek 3 boyutlu bir ağ oluşturur. Bu durumda gelişmiş bağlayıcı özellikleri ve performansları elde edilmiş olur. Tipik olarak, RET polimerleri düşük yüzdelerde (ağırlıkça %1.5-2.5 arasında) kullanılır, çünkü daha yüksek dozaj çözünmeyen ve erimeyen bir asfalt jelinin oluşumuna yol açar (Polacco vd., 2004). Bazı çalışmalarda da reaktif terpolimer kullanım sınırı ağırlıkça %2-2.5 olarak kabul edilmekle birlikte %1'den az olabileceği de belirtilmektedir (Polacco vd., 2006; Polacco vd., 2015). Başka bir çalışmada da reaktif etilen terpolimerin bitüme %1-2 aralığında ilave edilebileceği ifade edilmiştir (Kumandaş vd., 2021). Literatürde yapılan araştırmalara istinaden çalışmada nanokil modifiye bitüme, bitüm ağırlığının %1'i oranında reaktif etilen terpolimer ilave edilmiş ve EVA/NC/bitüm nanokompozitleri üretilmiştir.

Farklı polimer sınıfları arasında RET kullanılarak yapılan modifikasyon umut verici sonuçlar göstermiştir; bununla birlikte RET ile asfalt bağlayıcı arasında daha yavaş bir kimyasal reaktivite oranı, en büyük zorluklardan biri olarak belirtilmiştir (Kodrat vd., 2007; Zegeye vd., 2012). Bu nedenle, reaktivite derecesini iyileştirmek için RET ile asfalt bağlayıcı arasındaki reaktiviteyi hızlandıran polifosforik asit kullanımı önerilmiştir (Cao vd., 2011). Ayrıca polifosforik asitin RET ile birlikte kullanılması gereklidir, çünkü daha düşük bir RET dozunda istenilen özellik elde edilemeyebilir ve daha yüksek bir doz da jelleşmeye neden olabilir (Gama vd., 2018).

PMAN'lerin yanı sıra saf bitüm ve polimer modifiye bitümler de deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. SBS modifiye bitüm, bitüme ağırlıkça %5 oranında SBS ilave edilerek yüksek kesme etkili mikser ile 170 °C sıcaklıkta, 90 dk. süre ile 4000 dev./dk. hızında karıştırılarak üretilmiştir. Bitüme, bitüm ağırlığının %1'i oranında Elvaloy RET ve %0.8'i oranında Elvax 660A ilave edilerek yüksek kesme etkili mikser ile yine 170 °C sıcaklıkta, 90 dk. boyunca 4000 dev./dk. hızında modifiye bitüm karıştırılmıştır. 90 dk. karıştırma süresinin son 30 dakikasında karışıma %0.3 oranında PPA ilave edilerek karıştırma işlemi sürdürülmüştür. Böylelikle nanokil içermeyen reaktif etilen terpolimer ve plastomer modifiye bitümler de hazırlanmıştır.

2.4. Karışım Tasarımları

Yukarıda özellikleri verilen malzemelerle, Marshall tasarım yöntemi (ASTM D 1559) ile asfalt betonu dizaynı yapılmıştır. Karışım tasarımı için Karayolları Genel Müdürlüğü,

Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ, 2013) esas alınmıştır. Saf bitüm, SBS modifiye bitüm, EVA modifiye bitüm, EVA/NC/bitüm ve SBS/NC/bitüm nanokompozitleri kullanılarak 5 farklı tasarım yapılmıştır.

Optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde, SBS modifiye bitüm, EVA modifiye bitüm, EVA PMAN ve SBS PMAN'lerin yüksek kesme etkili mikserle karıştırılmasında karıştırma parametrelerinden sıcaklık için 170 °C, karıştırma süresi olarak 90 dk. ve karıştırma hızı olarak 4000 dev./dk. seçilmiştir.

Optimum bitüm içeriği; asfalt betonu için %4 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm yüzdesi olarak belirlenmiştir. Optimum bitüm içeriği, EVA PMAN ile hazırlanan asfalt karışımlar için %6.1; SBS PMAN ile hazırlanan asfalt karışımlar için %5.85 ve saf bitüm ile hazırlanan asfalt karışımlar için %5.55 olarak hesaplanmıştır. SBS modifiye bitüm ve EVA modifiye bitüm için optimum bitüm içerikleri sırası ile %5.85 ve %6.1 olarak kullanılmıştır. Tasarım sonuçlarından elde edilen karışım özellikleri ve karışımın şartname limitleri Tablo 14'te sunulmuştur. Belirlenen optimum bitüm içeriklerinde üretilen Marshall briketlerinin bir bölümünün görüntüsü Şekil 19'da verilmiştir.

Tablo 14. Hazırlanan kontrol ve PMAN karışımlarının tasarım sonuçları

Tasarım parametreleri	Şartname limitleri	Saf bitümlü karışım	SBS PMAN modifiye karışım	EVA PMAN modifiye karışım
Darbe sayısı, her bir yüze	75	75	75	75
Yoğunluk, gr/cm ³		2.44	2.37	2.38
Marshall stabilitesi, kg	En az 900	4663	5234	4900
Boşluk, V _h , %	3-5	4.0	4.0	4.0
Asfaltla dolu boşluk, V _f , %	65-75	74.80	74.90	74.95
Akma, mm (10 ⁻² in)	2-4	2.21	2.17	2.13
Bitüm içeriği, (%)	4-7	5.55	5.85	6.1
VMA, %	14-16	15.14	15.52	15.4



Şekil 19. Üretilen asfalt karışım örneklerinin bir bölümünden görüntü

2.5. Yöntem

Tez çalışmasında, çeşitli karıştırma parametreleri (160 °C, 170 °C, 180 °C; 60 dk., 90 dk., 120 dk.; 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk.) kullanılarak elde edilen EVA PMAN ve SBS PMAN ile asfalt karışım örnekleri üretilmiştir. Üretilen Marshall briketleri kullanılarak asfalt karışımlar, su hasarına karşı direnç, düşük sıcaklık çatlama direnci ve tekerlek izi potansiyelleri yönünden değerlendirilmiştir. Düşük sıcaklık çatlaması indirekt çekme mukavemeti; tekerlek izi potansiyeli, tekrarlı yük sünme ve Marshall oranı yöntemi; su hasarına karşı direnç ise modifiye Lottman yöntemi ile değerlendirilmiştir. PMAN örneklerinin morfolojik yapı analizleri optik mikroskop görüntüleri ile yapılmıştır.

Bu bölümde önce yapılan koşullama sistemi kısaca anlatılmış, daha sonra da yapılan indirekt çekme mukavemeti, modifiye Lottman, Marshall stabilite testi ve tekrarlı yük sünme testleriyle birlikte bu testlerde kullanılan parametreler açıklanmış ve test sonuçları sunulmuştur.

2.5.1. AASHTO T 283 Koşullandırma Sistemi

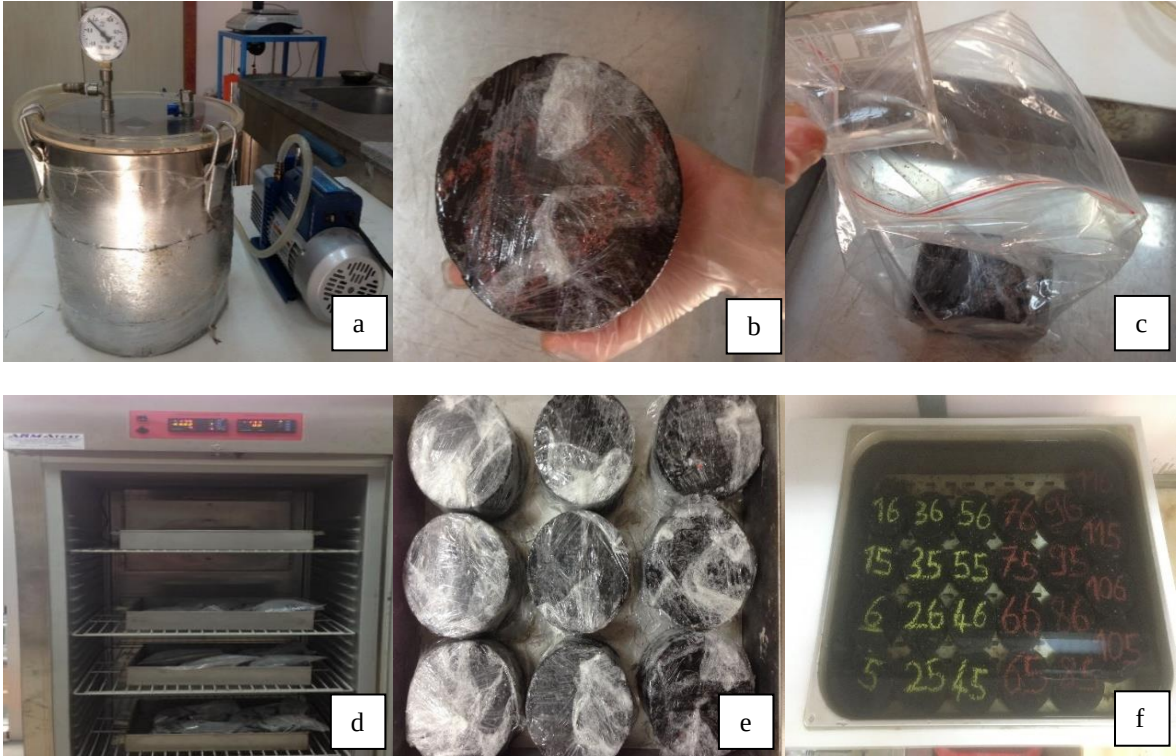
Sıcak karışım asfaltın nem duyarlılığını değerlendirmek için çeşitli laboratuvar testleri geliştirilmiştir. Laboratuvar testleri saha koşullarını tamamen simüle etmemekte ancak yararlı bilgiler sağlayabilmektedir. Asfalt karışımların sudan kaynaklanan hasarının değerlendirilmesi için geliştirilen bu testler ya asfaltın agrega yüzeyinden soyulmasını ya da

sıkıştırılmış sıcak karışım asfalt örneklerinin dayanım kaybını değerlendirmektedir (Liang, 2008).

Modifiye Lottman test prosedürü (AASHTO T 283), asfalt karışımlarının neme karşı duyarlılığının değerlendirilmesi için en yaygın olarak kabul edilen yöntemdir. Orijinal prosedür Lottman tarafından (1978, 1982) tarafından resmileştirilmiş ve o zamandan beri birkaç revizyondan geçmiştir (Epps vd., 2000).

AASHTO T 283 prosedüründe örnekler koşullandırılmamış (kuru) ve koşullandırılmış (suya doymuş) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Kuru örnekler oda sıcaklığında tutulurken koşullandırılmış örnekler test yapılmadan önce donma ve su içerisinde çözülme döngüleri uygulanmaktadır. Koşullandırılmış örnekler hazırlanırken; örnekler önce içerisinde oda sıcaklığında içme suyu bulunan vakum kabına yerleştirilir. Su seviyesi örnek üzerinden en az 25 mm yukarıda olmalıdır. Kısa bir süre için (yaklaşık 5-10 dakika) 13-67 kPa mutlak basınçta (10 ila 26 in. Hg kısmi basınç) bir vakum uygulanmaktadır. Vakumlama bittikten sonra örnekler suyun içerisinde yaklaşık 5-10 dk. daha bekletilmektedir. Bazı örneklerin doğru doygunluk derecesine (%70 ile 80 arasında) ulaşması için gereken süre 5 dakikadan az olabilmektedir. Ek olarak, bazı numuneler 67 kPa'dan (26 in. Hg kısmi basınç) daha yüksek veya 13 kPa'dan (10 in. Hg kısmi basınç) daha düşük bir mutlak basınç kullanılmasını gerektirebilmektedir. Briketlerin doygunluk derecesi %80'den fazlaysa, örnekler hasar görmüş kabul edilir ve sonraki süreçlerde kullanılmaz. Doğru oranda suya doyurulmuş örnekler vakumlu piknometreden alınarak plastik film ile kaplanarak içerisinde 10 ± 5 ml su bulunan plastik bir poşet içerisine koyulur ve poşet kapatılır. Örnekleri içeren plastik poşet -18 ± 3 °C sıcaklıktaki bir kabine koyularak minimum 16 saat bekletilir. Donma süreci tamamlandıktan sonra kabinden alınan örnekler 60 ± 1 °C sıcaklıktaki su banyosunda 24 ± 1 saat tutulur. Su banyosundaki örneklerin üzerinde minimum 25 mm su bulunmalıdır. Su banyosuna yerleştirildikten sonra en kısa sürede örneklerin plastik filmi ve poşeti çıkarılır ve soğumaya bırakılır. Bu işlemten sonra koşullandırma tamamlanmış olur (TS EN 12697-12., 2018).

Çalışmada farklı modifikasyon parametreleri kullanılarak üretilmiş SBS PMAN ve EVA PMAN, SBS modifiye bitüm, EVA modifiye bitüm ve kontrol bitüm ile üretilmiş özdeş Marshall örnekleri AASHTO T 283 prosedürüne göre koşullandırılmıştır. Koşullandırma işlemi sırasında çekilmiş örnek fotoğraflar Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. AASHTO T 283 koşullandırma aşamalarından görüntüler a) Vakumla suya doygun hale getirme b) plastik filmle kaplama c) plastik poşet içine su ekleme d, e)-18°C’de kabin içinde örnekleri bekletme f) 60 °C’de örnekleri su banyosunda bekletme

2.5.2. Modifiye Lottman (AASHTO T 283) Testi

Bu yöntemde, koşullandırılmamış ve koşullandırılmış örneklerin 25 ± 0.5 °C sıcaklıktaki indirekt çekme mukavemetleri belirlenmektedir. Bu deneyde kullanılmak üzere PMAN, polimer modifiye asfalt ve kontrol bitümlerle üretilen Marshall briketlerinden altışar adet kullanılmıştır. Yoğunlukları yaklaşık olarak eşit, üçerli iki gruba ayrılan örneklerin birinci grubuna koşullandırma yapılmamıştır. Bu gruptaki örnekler 25 ± 0.5 °C’deki su banyosuna yerleştirilmiş ve 2 saat ± 10 dk. su banyosunda bekletilmiştir. Bu süre sonunda su banyosundan alınan her bir örnek Marshall stabilite testi cihazında indirekt çekme mukavemeti test fikstürü kullanılarak test edilmiştir. Yük, deney cihazı başlığının 50 mm/dk.’lık sabit hareket hızı aracılığıyla örneğe uygulanmaktadır. Test cihazında kaydedilen maksimum basınç dayanımı örneklerin indirekt çekme mukavemetleri olarak alınmaktadır. İkinci gruptaki üç tane Marshall örneğine ise bölüm 2.5.1. de belirtildiği gibi AASHTO T 283 koşullandırması uygulanmıştır. Koşullandırılması tamamlanan örnekler son olarak birinci gruptaki örneklerde olduğu gibi 25 ± 0.5 °C’deki su banyosuna

yerleştirilmiş ve 2 saat ± 10 dk. su banyosunda bekletilmiştir. Su banyosundan alınan her bir örneğe indirekt çekme mukavemeti testi yapılmıştır. Örneklerin her birinin çekme mukavemeti değerleri Formül 1 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{I}\dot{C}M = \frac{2000 * P}{\pi t D} \quad (1)$$

Formülde; $\dot{I}\dot{C}M$: İndirekt çekme mukavemetini (kPa), P: maksimum yükü (N), t: örneğin testten önceki yüksekliğini (mm) ve D: örneğin çapını (mm) ifade etmektedir. Birinci ve ikinci gruptaki örneklerin indirekt çekme mukavemeti oranlarının ortalaması alınarak Formül 2 yardımı ile indirekt çekme mukavemeti oranları ($\dot{I}\dot{C}MO$) hesaplanmıştır.

$$\dot{I}\dot{C}MO = \frac{\text{Koşullandırılmış örneklerin indirekt çekme mukavemeti ortalaması}}{\text{Koşullandırılmamış örneklerin indirekt çekme mukavemeti ortalaması}} \quad (2)$$

Kontrol (saf) bitüm, EVA modifiye bitüm ve EVA PMAN ile üretilen karışımların ortalama indirekt çekme mukavemeti oranları Tablo 15'te, SBS modifiye bitüm ve SBS PMAN'le hazırlanan karışımlarının ortalama indirekt çekme mukavemeti oranları da Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 15. EVA PMAN ile üretilen örneklerin ortalama indirekt çekme mukavemeti oranları

		3000 dev./dk.	4000 dev./dk.	5000 dev./dk.
	Kontrol (saf)		0.667	
	Kontrol (EVA)		0.811	
160 °C	60 dk.	0.803	0.846	0.850
	90 dk.	0.826	0.851	0.860
	120 dk.	0.863	0.866	0.878
170 °C	60 dk.	0.888	0.896	0.894
	90 dk.	0.880	0.892	0.910
	120 dk.	0.929	0.920	0.921
180 °C	60 dk.	0.926	0.899	0.927
	90 dk.	0.919	0.879	0.904
	120 dk.	0.913	0.909	0.891

Tablo 16. SBS PMAN ile üretilen örneklerin ortalama indirekt çekme mukavemeti oranları

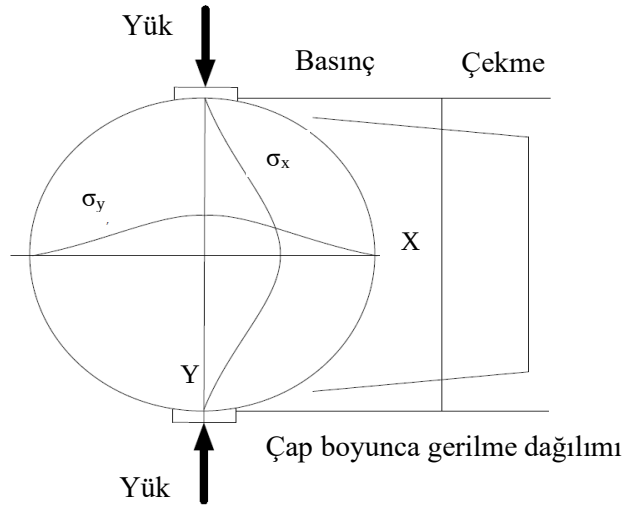
		3000 dev./dk.	4000 dev./dk.	5000 dev./dk.
	Kontrol (saf)		0.667	
	Kontrol (SBS)		0.781	
160 °C	60 dk.	0.723	0.785	0.783
	90 dk.	0.783	0.779	0.827
	120 dk.	0.807	0.815	0.776
170 °C	60 dk.	0.808	0.825	0.797
	90 dk.	0.818	0.824	0.837
	120 dk.	0.820	0.835	0.834
180 °C	60 dk.	0.878	0.876	0.875
	90 dk.	0.847	0.897	0.879
	120 dk.	0.875	0.839	0.810

2.5.3. İndirekt Çekme Mukavemeti Testi

Asfalt karışımlar, düşük sıcaklıkta gevrek ve sert, yüksek sıcaklıkta sünek ve yumuşak hale gelmektedir. Hızlı gerçekleşen donma-çözülme döngüleri sırasında oluşan termal gerilmeler nedeniyle asfalt kaplamalar daha kararsız ve kırılgan olmaktadır. Sıcaklık duyarlılığı nedeniyle asfalt kaplamada termal çatlama ve deformasyon gibi çeşitli bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık kaynaklı bozulmalar, kaplama performansını kötüleştirerek taşıma güvenliğini azaltıp kaplama yaşam döngüsünü kısaltarak hem yola yapılan harcamaları hem de yolu kullananların harcamalarını artırmaktadır (Si vd., 2016).

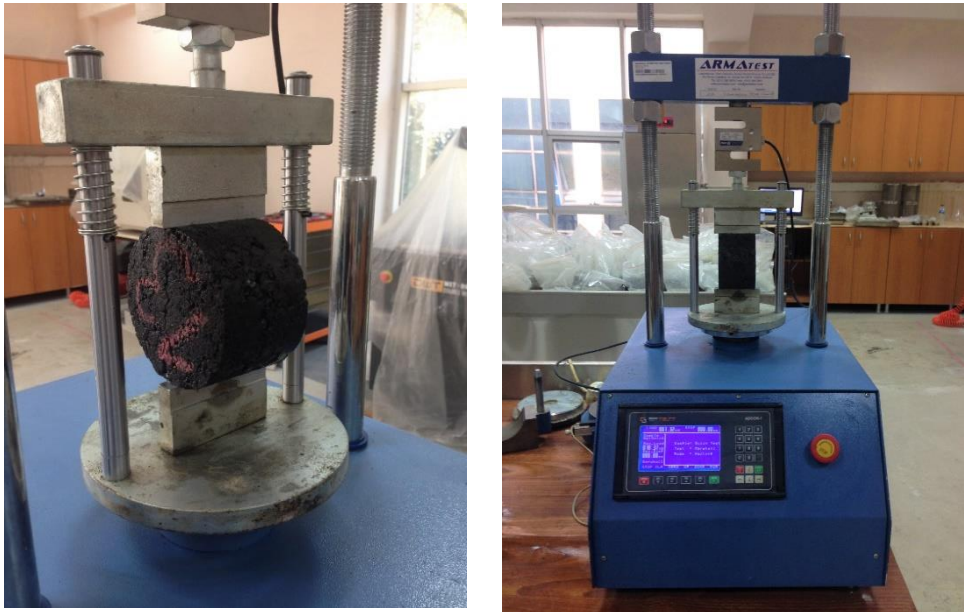
Uzun bir süre zarfında trafik yükünün etkisiyle asfalt kaplamada, yorulma çatlakları ve/veya tekerlek izi oluşarak kaplamanın mukavemeti azalabilir. Oluşan hasarı belirlemek için kolay gerçekleştirilebildiği ve iyi fikir verdiğinden dolayı sıklıkla indirekt çekme mukavemeti deneyi kullanılmaktadır. İndirekt çekme mukavemetini değerlendirmek için, silindirik örnek, sabit hızda hareket eden ve sıkıştırma (basınç) etkisi oluşturan test cihazının (Marshall stabilite cihazı veya üniversal asfalt test cihazı) yükleme çubukları arasına yerleştirilir ve kırılana kadar silindir eksenine doğrultusu boyunca çapsal olarak yüklenmelidir. İndirekt çekme mukavemeti, kopmada uygulanan pik yükten hesaplanan maksimum çekme gerilmesidir (Veropalumbo vd., 2019).

Şekil 21, İÇM testinde yükleme durumunu ve örnek içinde oluşan gerilme dağılımını göstermektedir. Dairesel örneklerin çapı boyunca uygulanan yükleme, yükleme doğrultusuna dik olarak çekme kuvvetlerinin gelişmesine ve sonuçta bir çekme kırılmasına neden olur (Krcmarik, 2013).



Şekil 21. İndirekt çekme mukavemeti testi sırasında çapsal olarak yüklenmiş bir örnekte gerilmenin gelişimi

İndirekt çekme mukavemeti deneyinde, üçer adet koşullandırılmış özdeş asfalt briketi kullanılmıştır. Deney yapılmadan önce her bir örnek test sıcaklığına gelmesi için 0 °C sıcaklıkta 9 saat bekletilmiştir. Deney 0 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında çekilen görüntülerden bir kesit Şekil 22’de verilmiştir. Üretilen asfalt karışımların indirekt çekme mukavemeti sonuçları, üçer örneğin ortalaması alınarak, SBS PMAN’ler için Tablo 17 ve EVA PMAN’ler için Tablo 18’de sunulmuştur.



Şekil 22. İndirekt çekme mukavemeti testinden görüntüler

Tablo 17. SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların 0 °C'deki ortalama İÇM değerleri (kPa)

		3000 dev./dk.	4000 dev./dk.	5000 dev./dk.
Kontrol (saf)			2779.215	
Kontrol (SBS)			3034.038	
160 °C	60 dk.	2930.753	3005.209	3019.035
	90 dk.	3255.499	3502.039	3458.862
	120 dk.	3495.856	3446.911	3773.414
170 °C	60 dk.	3146.863	2926.84	3238.491
	90 dk.	3295.936	3748.977	2905.329
	120 dk.	3877.186	3505.237	2862.142
180 °C	60 dk.	2983.865	3301.571	3055.101
	90 dk.	3053.913	3142.511	3064.991
	120 dk.	2945.783	3028.725	2859.877

Tablo 18. EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların 0 °C'deki ortalama İÇM değerleri (kPa)

		3000 dev./dk.	4000 dev./dk.	5000 dev./dk.
Kontrol (saf)			2779.215	
Kontrol (EVA)			3374.086	
160 °C	60 dk.	3463.467	3743.92	3787.472
	90 dk.	3991.872	3969.265	3868.258
	120 dk.	3847.624	3922.633	3924.486
170 °C	60 dk.	3743.159	3823.066	3836.977
	90 dk.	3873.311	3780.989	3792.614
	120 dk.	3694.916	3647.279	3580.901
180 °C	60 dk.	3753.484	3701.226	3704.226
	90 dk.	3571.886	3747.629	3710.68
	120 dk.	3906.737	3600.091	3344.394

2.5.4. Marshall Oranı (MO)

Marshall özellikleri kaplama performansının doğrudan göstergeleri olarak kabul edilmektedir. Marshall testinde daha yüksek stabilite ve daha düşük akma daha iyi kaplama performansı ile ilişkilendirilmektedir (Mashaan vd., 2021).

Asfalt karışımların rijitliğinin göstergesi olarak ta kullanılan Marshall oranı, asfalt karışımların stabilitesinin akma değerine oranlanması ile hesaplanmaktadır (Siswanto vd., 2017).

Marshall oranı, sıcak karışım asfaltın plastik deformasyona karşı direncini tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir. Başka bir ifadeyle, Marshall stabilitesi ile akma değerleri arasındaki ilişkidir (Al-Mousawi vd., 2021). Marshall stabilitesi, asfalt karışımın

uygulanan yüklere dayanma yeteneğini (Geraldin ve Makmur, 2020); akma sayısı, karışımın tekerlek izine karşı direnç gösterme potansiyelini değerlendirmektedir (Attaelmanan vd., 2011; Vamegh vd., 2020). Marshall oranındaki artış sıcak karışım asfalttaki kalıcı deformasyonlarda bir azalmaya işaret etmektedir (Al-Mousawi vd., 2021).

Marshall oranı kayma gerilmelerine, kalıcı deformasyona ve tekerlek izine karşı direncin bir göstergesi olup yüksek Marshall oranı değerleri, yüksek rijitliğe ve uygulanan yükü yayma kabiliyetine ve sünme deformasyonuna karşı dirence sahip bir karışımı göstermektedir (Kök ve Çolak, 2011; Yılmaz vd., 2011; Bostancıoğlu ve Oruç, 2016).

Bu çalışmada, Marshall stabilite testi 25 °C sıcaklıkta, Marshall stabilite cihazında yapılmıştır. Marshall stabilitesinin (kN), akmaya (mm) oranlanması ile Marshall oranı (kN/mm) hesaplanmıştır. Deneyde koşullandırılmış, üçer özdeş Marshall briketi kullanılmıştır. Marshall testi Şekil 23'te gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 23. Marshall stabilite testinden bir görüntü

Tablo 19'da katkısız (saf), EVA modifiye bitüm ve farklı modifikasyon parametrelerinde hazırlanan EVA polimer modifiye asfalt nanokompozit ile üretilen asfalt karışımların ortalama Marshall oranları verilmiştir. Tablo 20'de ise kontrol (saf-SBS) bitüm ve SBS polimer modifiye asfalt nanokompozitle hazırlanan asfalt karışımların ortalama Marshall oranları verilmiştir.

Tablo 19. EVA PMAN ve kontrol (saf-EVA) bitümlü karışımların ortalama MO değerleri

Karışım parametresi	Marshall oranı (kN/mm)
Katkısız (saf)	32.22
EVA mod. bitüm	51.88
160 °C-3000 dev.-60 dk.	51.19
160 °C-3000 dev.-90 dk.	56.70
160 °C-3000 dev.-120 dk.	51.32
160 °C-4000 dev.-60 dk.	53.76
160 °C-4000 dev.-90 dk.	56.54
160 °C-4000 dev.-120 dk.	46.09
160 °C-5000 dev.-60 dk.	54.10
160 °C-5000 dev.-90 dk.	53.69
160 °C-5000 dev.-120 dk.	50.85
170 °C-3000 dev.-60 dk.	56.16
170 °C-3000 dev.-90 dk.	57.85
170 °C-3000 dev.-120 dk.	54.29
170 °C-4000 dev.-60 dk.	58.34
170 °C-4000 dev.-90 dk.	58.10
170 °C-4000 dev.-120 dk.	56.91
170 °C-5000 dev.-60 dk.	60.80
170 °C-5000 dev.-90 dk.	54.63
170 °C-5000 dev.-120 dk.	58.87
180 °C-3000 dev.-60 dk.	53.68
180 °C-3000 dev.-90 dk.	59.06
180 °C-3000 dev.-120 dk.	60.56
180 °C-4000 dev.-60 dk.	54.75
180 °C-4000 dev.-90 dk.	59.30
180 °C-4000 dev.-120 dk.	50.28
180 °C-5000 dev.-60 dk.	59.55
180 °C-5000 dev.-90 dk.	53.95
180 °C-5000 dev.-120 dk.	48.68

Tablo 20. SBS PMAN ve kontrol (saf-SBS) bitümlü karışımların ortalama MO değerleri

Karışım parametresi	Marshall oranı (kN/mm)
Katkısız (saf)	32.22
SBS mod. bitüm	48.05
160 °C-3000 dev.-60 dk.	48.59
160 °C-3000 dev.-90 dk.	56.32
160 °C-3000 dev.-120 dk.	51.36
160 °C-4000 dev.-60 dk.	53.02
160 °C-4000 dev.-90 dk.	45.75
160 °C-4000 dev.-120 dk.	49.60
160 °C-5000 dev.-60 dk.	60.18
160 °C-5000 dev.-90 dk.	49.66
160 °C-5000 dev.-120 dk.	70.91
170 °C-3000 dev.-60 dk.	54.46
170 °C-3000 dev.-90 dk.	67.00
170 °C-3000 dev.-120 dk.	76.02
170 °C-4000 dev.-60 dk.	67.79
170 °C-4000 dev.-90 dk.	63.69
170 °C-4000 dev.-120 dk.	59.04
170 °C-5000 dev.-60 dk.	60.00
170 °C-5000 dev.-90 dk.	52.90
170 °C-5000 dev.-120 dk.	59.13
180 °C-3000 dev.-60 dk.	61.47
180 °C-3000 dev.-90 dk.	53.42
180 °C-3000 dev.-120 dk.	69.22
180 °C-4000 dev.-60 dk.	72.90
180 °C-4000 dev.-90 dk.	66.13
180 °C-4000 dev.-120 dk.	60.91
180 °C-5000 dev.-60 dk.	56.33
180 °C-5000 dev.-90 dk.	61.00
180 °C-5000 dev.-120 dk.	66.70

2.5.5. Tekrarlı Yük Sünme Testi

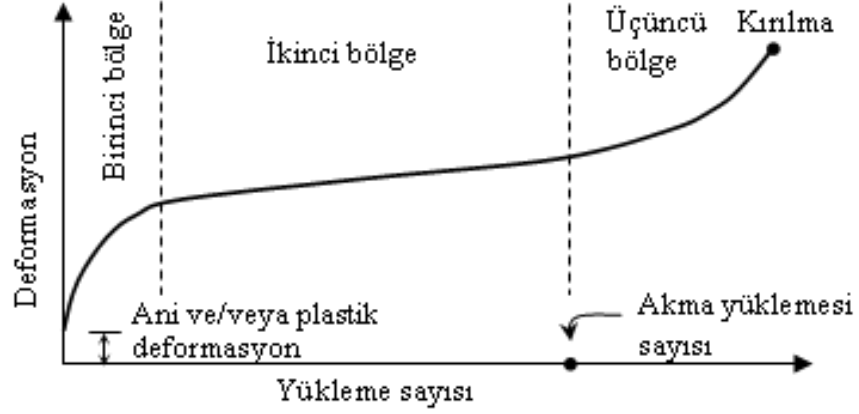
Tekerlek izi, esnek kaplamaların yüzeyinde ortaya çıkan ciddi bozulmalardan biridir. Sıkışma, yanal plastik akma ve/veya tekrarlanan ağır trafik yükleri nedeniyle tekerlek yolu altındaki malzeme kaybı gibi çeşitli nedenlerden dolayı tekerlek izi oluşmaktadır (Ali vd., 2017).

Sıcaklık ve yükleme koşulları, asfalt çimentosu ile hazırlanan karışımların özelliklerine ilaveten tekerlek izi potansiyelini büyük bir yoğunlukla etkilemektedir (Apeagyei, 2014).

Trafik yükünün tekrarlanan hareketi esnek kaplamalarda kalıcı deformasyonların birikmesine sebep olarak tekerlek izine yol açabilir. Esnek kaplamalarda tekerlek izinin başlama ve ilerleme süreci artan sayıda yük uygulamalarının bir fonksiyonudur. Tekerlek izi, esnek kaplamaların hizmet ömrü boyunca farklı zamanlarda gerçekleşir. Genel olarak tekerlek izi; başlangıç (ilk) tekerlek izi ve ikincil tekerlek izi olmak üzere iki mekanizmaya sahiptir. İlk tekerlek izi, asfalt betonunun sıkışması (hacimdeki azalma ve yoğunluktaki artış) nedeniyle hizmet ömrünün ilk birkaç yılında meydana gelirken, ikincil tekerlek izi (kesme deformasyonu olarak da adlandırılabilen) tekerlek yolunun altındaki malzeme hareketi nedeniyle ortaya çıkar ve yol/yol şeridi kenarlarında kabarmaya neden olur (Irfan vd., 2018).

Tekrarlı yük testi asfalt çimentosu karışımların tekerlek izi potansiyelini değerlendirmek için kabul edilen en iyi yöntemlerden biridir (Irfan vd., 2018). Tekrarlı yük testlerinin amacı yolda meydana gelen tekrarlanan yük koşullarını simüle etmektir (Alzaidy ve Albayati 2021). Akma sayısı (tekrarlı yük) üçüncül akışın başladığı yükleme döngüsü sayısı olarak tanımlanmaktadır. Akma sayısı kaplamaya yükleme sürekli olmadığı için saha koşullarını iyi yansıtmaktadır. Tekrarlı yük sünme deneyi asfalt kaplamanın, yüklemenin neden olduğu gerilmelerin bir kısmını geri kazanması için bir dinlenme süresi sağlamaktadır (Irfan vd., 2018).

Şekil 24'te kümülatif kalıcı deformasyon ile yükleme sayısı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Kümülatif kalıcı deformasyon eğrisi genellikle birinci, ikinci ve üçüncü bölge olmak üzere üç bölgede incelenmektedir. Kalıcı deformasyon, birinci bölgede hızlı bir şekilde birikmekte, yük kaldırılmazsa malzeme azalan oranda deforme olmaya devam etmektedir. Kalıcı deformasyondaki artış hızı ikinci bölgede sabittir. Bu bölgedeki deformasyon eğrisinin eğimi doğrusal (sabit) olup buradaki deformasyonlar geri dönüşümsüzdür. Kalıcı deformasyonun artış hızı üçüncü bölgede tekrar artmakta ve kalıcı deformasyon hızla birikmektedir. Üçüncül bölgenin ilerlemesi sonucunda kırılma meydana gelmektedir (İskender, 2008).



Şekil 24. Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı

Tekerlek izine dayanıklı kaplamaların tasarımında önemli bir unsur, karışım tasarımı ve değerlendirmesi sırasında asfalt karışımlarının tekerlek izi duyarlılığı açısından incelenmesidir. Üçüncül akma bozulmasına kadar geçen süre, asfalt karışımın tekerlek izi direncinin iyi bir göstergesi olarak kabul edilir. Bu tekrarlı yük tekerlek izi testinde ölçülen akma sayısı ile ölçülebilir. Tekrarlı yük testi, birkaç bin tekrar için asfalt kaplama malzemelerinin tekerlek izi özelliklerini belirlemek için tekrarlanan bir dinamik yük kullanır ve test süresi boyunca döngü sayısının (tekrarların) bir fonksiyonu olarak kümülatif deformasyonu kaydeder. Akma sayısı testinin en önemli çıktısı, yükleme döngüleri sayısına karşı birikmiş deformasyon eğrisidir (Irfan vd., 2018).

Bu tez kapsamında EN-12697-25(A) test standardına uygun olarak, AASHTO T 283 yöntemine göre koşullandırması yapılmış asfalt örneklerine tekrarlı yük sünme deneyi yapılmıştır. Deneyde 101.6 mm (4 inç) çaplı Marshall briketleri kullanılmıştır. Tekrarlı yük sünme deneyinde test sıcaklığı 45 °C olarak seçilmiştir. Marshall briketlerinin içsel sıcaklığının deney sıcaklığı olan 45 °C'ye ulaşması için 8 saat önceden Cooper universal pnömatik asfalt test cihazına yerleştirilmiştir. Marshall örneğinin yüksekliği, çapı, deney sıcaklığı, deney yükleme gerilmesi, koşullandırma gerilmesi, koşullandırma gerilmesi uygulama süresi, deneyi sonlandıran vuruş sayısı için seçilen değerler test yazılımına girilerek deney başlatılmıştır. Tekrarlı yük sünme testi değişkenleri Tablo 21'de, deneyden bir görüntü de Şekil 25'te verilmiştir.

Tablo 21. Tekrarlı yük sünme deneyinde uygulanan parametreler

Deney ölçütü	Değer
Deney sıcaklığı (°C)	45
Koşullandırma gerilmesi (kPa)	3
Koşullandırma gerilmesi uygulama süresi (dk.)	2
Deney yükleme gerilmesi (kPa)	95
Frekans (Hz)	0.5
Deneyi sonlandıran vuruş sayısı	10000



Şekil 25. Üniversal asfalt test cihazı

160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışım örneklerinin tekrarlı yük sünme deneyi sonucunda elde edilen ortalama deformasyon değerleri üçer örneğin değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. 160 °C’de hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların ortalama deformasyon değerleri Tablo 22’de, 170 °C’de üretilen SBS PMAN’lerle hazırlanan asfalt karışımların ortalama deformasyon değerleri Tablo 23’te ve 180 °C’de hazırlanan SBS PMAN’lerle üretilen asfalt karışımların ortalama deformasyon değerleri de Tablo 24’te verilmiştir.

Tablo 22. 160 °C’de hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)

Yük tekerrür sayısı	Kontrol (katksız)	SBS mod. bitüm	3000 dev. 60 dk.	3000 dev. 90 dk.	3000 dev. 120 dk.	4000 dev. 60 dk.	4000 dev. 90 dk.	4000 dev. 120 dk.	5000 dev. 60 dk.	5000 dev. 90 dk.	5000 dev. 120 dk.
2	0.45	0.22	0.20	0.19	0.18	0.20	0.29	0.24	0.38	0.25	0.24
10	0.48	0.23	0.22	0.21	0.19	0.21	0.30	0.26	0.39	0.27	0.25
50	0.53	0.26	0.25	0.24	0.23	0.25	0.34	0.28	0.43	0.30	0.28
100	0.56	0.28	0.27	0.26	0.24	0.27	0.36	0.30	0.45	0.32	0.30
200	0.58	0.30	0.29	0.28	0.26	0.29	0.38	0.32	0.47	0.33	0.32
500	0.60	0.32	0.31	0.30	0.28	0.31	0.40	0.34	0.49	0.35	0.33
1000	0.62	0.33	0.33	0.32	0.30	0.33	0.41	0.35	0.51	0.37	0.35
1500	0.63	0.34	0.34	0.33	0.31	0.34	0.42	0.36	0.52	0.38	0.36
2000	0.64	0.35	0.34	0.34	0.31	0.35	0.43	0.37	0.53	0.38	0.36
2500	0.64	0.35	0.35	0.34	0.31	0.35	0.43	0.37	0.53	0.39	0.36
3000	0.65	0.36	0.35	0.34	0.32	0.36	0.44	0.37	0.53	0.39	0.37
3500	0.65	0.36	0.35	0.35	0.32	0.36	0.44	0.37	0.54	0.39	0.37
4000	0.66	0.36	0.36	0.35	0.32	0.36	0.44	0.38	0.54	0.40	0.37
4500	0.66	0.36	0.36	0.35	0.32	0.36	0.44	0.38	0.54	0.40	0.37
5000	0.66	0.36	0.36	0.35	0.33	0.37	0.45	0.38	0.54	0.40	0.38
5500	0.66	0.37	0.36	0.36	0.33	0.37	0.45	0.38	0.54	0.40	0.38
6000	0.67	0.37	0.36	0.36	0.33	0.37	0.45	0.38	0.55	0.40	0.38
6500	0.67	0.37	0.37	0.36	0.33	0.37	0.45	0.38	0.55	0.41	0.38
7000	0.67	0.37	0.37	0.36	0.33	0.37	0.45	0.38	0.55	0.41	0.38
7500	0.67	0.37	0.37	0.36	0.33	0.37	0.45	0.39	0.55	0.41	0.38
8000	0.67	0.37	0.37	0.36	0.33	0.37	0.45	0.39	0.55	0.41	0.38
9000	0.67	0.37	0.37	0.36	0.33	0.38	0.45	0.39	0.55	0.41	0.38
9500	0.68	0.37	0.37	0.36	0.33	0.38	0.46	0.39	0.55	0.41	0.38
10000	0.68	0.38	0.37	0.36	0.34	0.38	0.46	0.39	0.55	0.41	0.38

Tablo 23. 170 °C’de hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)

Yük tekerrür sayısı	Kontrol (katksız)	SBS mod. bitüm	3000 dev. 60 dk.	3000 dev. 90 dk.	3000 dev. 120 dk.	4000 dev. 60 dk.	4000 dev. 90 dk.	4000 dev. 120 dk.	5000 dev. 60 dk.	5000 dev. 90 dk.	5000 dev. 120 dk.
2	0.45	0.22	0.25	0.24	0.19	0.23	0.18	0.27	0.20	0.20	0.22
10	0.48	0.23	0.26	0.25	0.20	0.25	0.19	0.28	0.22	0.22	0.23
50	0.53	0.26	0.29	0.29	0.23	0.28	0.22	0.32	0.25	0.25	0.26
100	0.56	0.28	0.32	0.31	0.25	0.30	0.24	0.34	0.27	0.27	0.28
200	0.58	0.30	0.34	0.33	0.27	0.32	0.26	0.36	0.30	0.29	0.29
500	0.60	0.32	0.36	0.35	0.29	0.34	0.28	0.38	0.32	0.31	0.31
1000	0.62	0.33	0.37	0.37	0.31	0.36	0.29	0.40	0.34	0.32	0.32
1500	0.63	0.34	0.38	0.38	0.32	0.37	0.30	0.41	0.35	0.33	0.33
2000	0.64	0.35	0.39	0.38	0.33	0.38	0.31	0.41	0.35	0.34	0.34
2500	0.64	0.35	0.39	0.39	0.33	0.38	0.31	0.42	0.36	0.34	0.34
3000	0.65	0.36	0.40	0.39	0.33	0.38	0.31	0.42	0.36	0.34	0.34
3500	0.65	0.36	0.40	0.39	0.34	0.39	0.32	0.42	0.36	0.35	0.34
4000	0.66	0.36	0.40	0.39	0.34	0.39	0.32	0.43	0.37	0.35	0.35
4500	0.66	0.36	0.40	0.40	0.34	0.39	0.32	0.43	0.37	0.35	0.35
5000	0.66	0.36	0.41	0.40	0.34	0.39	0.32	0.43	0.37	0.35	0.35
5500	0.66	0.37	0.41	0.40	0.34	0.40	0.32	0.43	0.37	0.35	0.35
6000	0.67	0.37	0.41	0.40	0.35	0.40	0.32	0.43	0.37	0.36	0.35
6500	0.67	0.37	0.41	0.40	0.35	0.40	0.33	0.44	0.38	0.36	0.35
7000	0.67	0.37	0.41	0.40	0.35	0.40	0.33	0.44	0.38	0.36	0.35
7500	0.67	0.37	0.41	0.40	0.35	0.40	0.33	0.44	0.38	0.36	0.35
8000	0.67	0.37	0.41	0.41	0.35	0.40	0.33	0.44	0.38	0.36	0.36
9000	0.67	0.37	0.41	0.41	0.35	0.40	0.33	0.44	0.38	0.36	0.36
9500	0.68	0.37	0.42	0.41	0.35	0.40	0.33	0.44	0.38	0.36	0.36
10000	0.68	0.38	0.42	0.41	0.35	0.41	0.33	0.44	0.38	0.36	0.36

Tablo 24. 180 °C’de hazırlanan SBS PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)

Yük tekerrür sayısı	Kontrol (katksız)	SBS mod. bitüm	3000 dev. 60 dk.	3000 dev. 90 dk.	3000 dev. 120 dk.	4000 dev. 60 dk.	4000 dev. 90 dk.	4000 dev. 120 dk.	5000 dev. 60 dk.	5000 dev. 90 dk.	5000 dev. 120 dk.
2	0.45	0.22	0.21	0.21	0.33	0.22	0.24	0.24	0.27	0.20	0.21
10	0.48	0.23	0.23	0.23	0.35	0.23	0.26	0.25	0.29	0.22	0.22
50	0.53	0.26	0.26	0.27	0.38	0.27	0.29	0.29	0.33	0.25	0.26
100	0.56	0.28	0.28	0.29	0.41	0.29	0.31	0.31	0.35	0.28	0.28
200	0.58	0.30	0.31	0.31	0.43	0.31	0.33	0.33	0.37	0.30	0.31
500	0.60	0.32	0.33	0.33	0.45	0.33	0.35	0.35	0.39	0.32	0.33
1000	0.62	0.33	0.35	0.35	0.47	0.35	0.37	0.37	0.41	0.34	0.35
1500	0.63	0.34	0.36	0.36	0.48	0.36	0.38	0.38	0.42	0.35	0.36
2000	0.64	0.35	0.37	0.36	0.49	0.37	0.38	0.39	0.42	0.36	0.36
2500	0.64	0.35	0.37	0.37	0.50	0.38	0.39	0.39	0.43	0.36	0.37
3000	0.65	0.36	0.37	0.37	0.50	0.38	0.39	0.40	0.43	0.37	0.37
3500	0.65	0.36	0.38	0.38	0.50	0.38	0.39	0.40	0.43	0.37	0.37
4000	0.66	0.36	0.38	0.38	0.51	0.39	0.40	0.40	0.44	0.37	0.38
4500	0.66	0.36	0.38	0.38	0.51	0.39	0.40	0.41	0.44	0.37	0.38
5000	0.66	0.36	0.38	0.38	0.51	0.39	0.40	0.41	0.44	0.38	0.38
5500	0.66	0.37	0.39	0.38	0.51	0.39	0.40	0.41	0.44	0.38	0.38
6000	0.67	0.37	0.39	0.39	0.51	0.39	0.40	0.41	0.44	0.38	0.38
6500	0.67	0.37	0.39	0.39	0.52	0.40	0.41	0.41	0.44	0.38	0.39
7000	0.67	0.37	0.39	0.39	0.52	0.40	0.41	0.41	0.45	0.38	0.39
7500	0.67	0.37	0.39	0.39	0.52	0.40	0.41	0.41	0.45	0.38	0.39
8000	0.67	0.37	0.39	0.39	0.52	0.40	0.41	0.42	0.45	0.38	0.39
9000	0.67	0.37	0.39	0.39	0.52	0.40	0.41	0.42	0.45	0.39	0.39
9500	0.68	0.37	0.39	0.39	0.52	0.40	0.41	0.42	0.45	0.39	0.39
10000	0.68	0.38	0.40	0.39	0.52	0.40	0.41	0.42	0.45	0.39	0.39

160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt karışım örneklerinin tekrarlı yük sünme deneyi sonucunda elde edilen ortalama deformasyon değerleri üçer örneğin değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır. 160 °C’de hazırlanan EVA PMAN’lerle üretilen asfalt karışımların ortalama deformasyonları Tablo 25’te, 170 °C’de hazırlanan EVA PMAN karışımlarının ortalama deformasyonları Tablo 26’da ve 180 °C’de üretilen EVA PMAN karışımlarının ortalama deformasyonları da Tablo 27’de verilmiştir.

Tablo 25. 160 °C’de hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)

Yük teker rür sayısı	Kontrol (katksız)	EVA mod. bitüm	3000 dev. 60 dk.	3000 dev. 90 dk.	3000 dev. 120 dk.	4000 dev. 60 dk.	4000 dev. 90 dk.	4000 dev. 120 dk.	5000 dev. 60 dk.	5000 dev. 90 dk.	5000 dev. 120 dk.
2	0.45	0.36	0.19	0.35	0.30	0.29	0.25	0.27	0.24	0.35	0.32
10	0.48	0.38	0.20	0.36	0.31	0.31	0.26	0.29	0.26	0.37	0.33
50	0.53	0.41	0.23	0.40	0.34	0.34	0.29	0.32	0.29	0.40	0.37
100	0.56	0.43	0.25	0.42	0.36	0.36	0.31	0.34	0.31	0.43	0.39
200	0.58	0.45	0.27	0.44	0.38	0.38	0.33	0.37	0.33	0.45	0.41
500	0.60	0.47	0.28	0.45	0.40	0.40	0.34	0.39	0.35	0.46	0.43
1000	0.62	0.48	0.29	0.47	0.41	0.41	0.35	0.40	0.36	0.48	0.44
1500	0.63	0.49	0.30	0.48	0.42	0.42	0.36	0.41	0.37	0.49	0.45
2000	0.64	0.50	0.30	0.48	0.43	0.42	0.37	0.42	0.37	0.49	0.46
2500	0.64	0.50	0.30	0.48	0.43	0.43	0.37	0.42	0.37	0.50	0.46
3000	0.65	0.51	0.31	0.49	0.43	0.43	0.37	0.42	0.38	0.50	0.46
3500	0.65	0.51	0.31	0.49	0.44	0.43	0.37	0.42	0.38	0.50	0.47
4000	0.66	0.51	0.31	0.49	0.44	0.43	0.37	0.43	0.38	0.50	0.47
4500	0.66	0.51	0.31	0.49	0.44	0.43	0.38	0.43	0.38	0.51	0.47
5000	0.66	0.51	0.31	0.49	0.44	0.44	0.38	0.43	0.38	0.51	0.47
5500	0.66	0.52	0.31	0.50	0.44	0.44	0.38	0.43	0.38	0.51	0.47
6000	0.67	0.52	0.32	0.50	0.44	0.44	0.38	0.43	0.39	0.51	0.47
6500	0.67	0.52	0.32	0.50	0.44	0.44	0.38	0.43	0.39	0.51	0.48
7000	0.67	0.52	0.32	0.50	0.44	0.44	0.38	0.43	0.39	0.51	0.48
7500	0.67	0.52	0.32	0.50	0.45	0.44	0.38	0.44	0.39	0.51	0.48
8000	0.67	0.52	0.32	0.50	0.45	0.44	0.38	0.44	0.39	0.52	0.48
9000	0.67	0.52	0.32	0.50	0.45	0.44	0.38	0.44	0.39	0.52	0.48
9500	0.68	0.52	0.32	0.50	0.45	0.44	0.39	0.44	0.39	0.52	0.48
10000	0.68	0.52	0.32	0.50	0.45	0.44	0.39	0.44	0.39	0.52	0.48

Tablo 26. 170 °C’de hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)

Yük tekerrür sayısı	Kontrol (katksız)	EVA mod. bitüm	3000 dev. 60 dk.	3000 dev. 90 dk.	3000 dev. 120 dk.	4000 dev. 60 dk.	4000 dev. 90 dk.	4000 dev. 120 dk.	5000 dev. 60 dk.	5000 dev. 90 dk.	5000 dev. 120 dk.
2	0.45	0.36	0.19	0.28	0.35	0.25	0.28	0.22	0.27	0.21	0.30
10	0.48	0.38	0.21	0.30	0.37	0.27	0.29	0.24	0.29	0.23	0.31
50	0.53	0.41	0.24	0.33	0.41	0.30	0.33	0.26	0.32	0.26	0.35
100	0.56	0.43	0.26	0.35	0.43	0.32	0.35	0.28	0.34	0.28	0.37
200	0.58	0.45	0.28	0.37	0.45	0.34	0.36	0.30	0.36	0.29	0.38
500	0.60	0.47	0.30	0.38	0.46	0.36	0.38	0.31	0.38	0.31	0.40
1000	0.62	0.48	0.31	0.40	0.48	0.37	0.40	0.33	0.39	0.32	0.42
1500	0.63	0.49	0.32	0.40	0.49	0.38	0.40	0.34	0.40	0.33	0.42
2000	0.64	0.50	0.33	0.41	0.49	0.38	0.41	0.34	0.41	0.34	0.43
2500	0.64	0.50	0.33	0.41	0.49	0.39	0.41	0.34	0.41	0.34	0.43
3000	0.65	0.51	0.33	0.42	0.50	0.39	0.41	0.35	0.41	0.34	0.43
3500	0.65	0.51	0.34	0.42	0.50	0.39	0.42	0.35	0.42	0.34	0.44
4000	0.66	0.51	0.34	0.42	0.50	0.39	0.42	0.35	0.42	0.35	0.44
4500	0.66	0.51	0.34	0.42	0.50	0.40	0.42	0.35	0.42	0.35	0.44
5000	0.66	0.51	0.34	0.42	0.50	0.40	0.42	0.35	0.42	0.35	0.44
5500	0.66	0.52	0.34	0.42	0.51	0.40	0.42	0.35	0.42	0.35	0.44
6000	0.67	0.52	0.34	0.43	0.51	0.40	0.42	0.36	0.43	0.35	0.44
6500	0.67	0.52	0.35	0.43	0.51	0.40	0.42	0.36	0.43	0.35	0.44
7000	0.67	0.52	0.35	0.43	0.51	0.40	0.43	0.36	0.43	0.35	0.45
7500	0.67	0.52	0.35	0.43	0.51	0.40	0.43	0.36	0.43	0.35	0.45
8000	0.67	0.52	0.35	0.43	0.51	0.40	0.43	0.36	0.43	0.35	0.45
9000	0.67	0.52	0.35	0.43	0.51	0.40	0.43	0.36	0.43	0.36	0.45
9500	0.68	0.52	0.35	0.43	0.51	0.41	0.43	0.36	0.43	0.36	0.45
10000	0.68	0.52	0.35	0.43	0.51	0.41	0.43	0.36	0.43	0.36	0.45

Tablo 27. 180 °C’de hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımların deformasyon değerleri (mm)

Yük tekerrür sayısı	Kontrol (katkısız)	EVA mod. bitüm	3000 dev. 60 dk.	3000 dev. 90 dk.	3000 dev. 120 dk.	4000 dev. 60 dk.	4000 dev. 90 dk.	4000 dev. 120 dk.	5000 dev. 60 dk.	5000 dev. 90 dk.	5000 dev. 120 dk.
2	0.45	0.36	0.24	0.29	0.20	0.26	0.33	0.22	0.19	0.23	0.24
10	0.48	0.38	0.26	0.31	0.22	0.28	0.35	0.23	0.21	0.25	0.25
50	0.53	0.41	0.29	0.34	0.25	0.31	0.38	0.26	0.24	0.28	0.29
100	0.56	0.43	0.31	0.36	0.27	0.33	0.40	0.28	0.26	0.30	0.31
200	0.58	0.45	0.33	0.38	0.29	0.34	0.43	0.30	0.28	0.31	0.33
500	0.60	0.47	0.35	0.39	0.30	0.36	0.45	0.31	0.30	0.33	0.34
1000	0.62	0.48	0.36	0.41	0.32	0.37	0.46	0.33	0.31	0.34	0.36
1500	0.63	0.49	0.37	0.42	0.33	0.38	0.47	0.33	0.32	0.35	0.37
2000	0.64	0.50	0.37	0.42	0.33	0.39	0.48	0.34	0.32	0.35	0.37
2500	0.64	0.50	0.38	0.43	0.33	0.39	0.48	0.34	0.33	0.36	0.37
3000	0.65	0.51	0.38	0.43	0.34	0.40	0.48	0.34	0.33	0.36	0.38
3500	0.65	0.51	0.38	0.43	0.34	0.40	0.49	0.35	0.33	0.36	0.38
4000	0.66	0.51	0.39	0.43	0.34	0.40	0.49	0.35	0.34	0.37	0.38
4500	0.66	0.51	0.39	0.44	0.34	0.40	0.49	0.35	0.34	0.37	0.38
5000	0.66	0.51	0.39	0.44	0.35	0.40	0.49	0.35	0.34	0.37	0.38
5500	0.66	0.52	0.39	0.44	0.35	0.41	0.49	0.35	0.34	0.37	0.39
6000	0.67	0.52	0.39	0.44	0.35	0.41	0.50	0.35	0.34	0.37	0.39
6500	0.67	0.52	0.39	0.44	0.35	0.41	0.50	0.35	0.34	0.37	0.39
7000	0.67	0.52	0.39	0.44	0.35	0.41	0.50	0.36	0.34	0.37	0.39
7500	0.67	0.52	0.39	0.44	0.35	0.41	0.50	0.36	0.35	0.37	0.39
8000	0.67	0.52	0.39	0.45	0.35	0.41	0.50	0.36	0.35	0.37	0.39
9000	0.67	0.52	0.39	0.45	0.35	0.41	0.50	0.36	0.35	0.38	0.39
9500	0.68	0.52	0.40	0.45	0.35	0.41	0.50	0.36	0.35	0.38	0.39
10000	0.68	0.52	0.40	0.45	0.35	0.41	0.50	0.36	0.35	0.38	0.39

2.5.6. Morfolojik Yapı İncelemesi

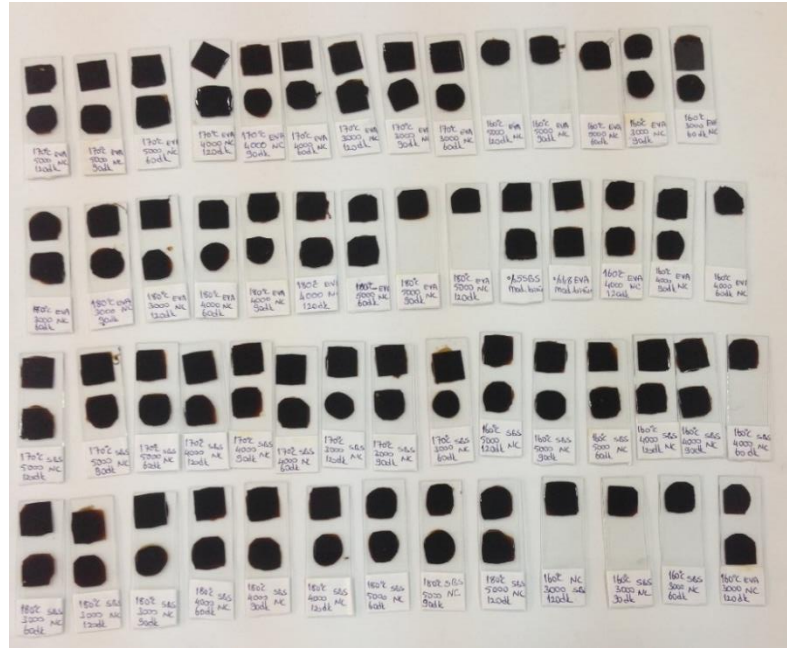
Polimer modifiye bitümlerin uyumluluğunu dolaylı olarak tahmin etmek için yıllar içinde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Karışım morfolojisinin araştırılması en doğru yöntemlerden birisidir ve optik mikroskopi örneğin hızlı ve ekonomik bir şekilde gözlemlenmesine olanak sağladığı için en popüler yöntemdir. Optik mikroskop kullanılarak elde edilen görüntü, uyumluluğun anlamlı bir temsiline izin vermekte ve karışımın makroskobik stabilitesini tahmin etmek için başarılı bir şekilde kullanılabilir. Asfaltça zengin faz ve polimerce zengin fazın karışım içindeki morfolojik düzeni spesifik asfalt/polimer uyumluluğuna güçlü bir şekilde bağlı olmaktadır. Bu nedenle, polimer ve

asfalt uyumlu olduğunda sistemin morfolojisi iyi tanımlanmış bir genel düzenlemeyi üstlenirken, birbirine karışmayan sistemlerde aslında tamamen farklı bir morfoloji ortaya çıkmaktadır (Polacco vd., 2015).

Floresan mikroskopu, polimerlerin baz bitümün bazı bileşenlerinin absorpsiyonu nedeniyle şişmesi ve ultraviyole ışığına maruz kaldığında değiştirilmiş floresan özellikleri göstermesi ilkesine dayanmaktadır (Airey, 2002). Bitümce zengin faz koyu veya siyah görünürken, polimerce zengin faz açık renkte görünür (Topal, 2010).

Floresan mikroskobundan PMB mikro yapısının değerlendirilmesinde yararlanılmaktadır. Floresan mikroskopu, homojenitenin gözlemlenmesine imkân sağlayan, PMB'lerin faz morfolojisinin incelenmesinde en önemli yöntemdir (İskender, 2019).

Bu çalışma kapsamında hazırlanan bütün polimer modifiye ve PMAN'lerin morfolojik görüntüleri Optik Mikroskop kullanılarak elde edilmiştir. Morfolojik görüntüler x20 büyütme oranında 0.4 lenslerle ince kesit yöntemi ile sağlanmıştır. PMAN ve polimer modifiye bitümden sıcak iken yeterli miktarda (bir damlacık) alınarak cam bir lam üzerine damlatılmıştır. Modifiye bitümün yeterli inceliğe ulaşabilmesi için, ısıtma tablasında kısa bir süre bekletilerek üzerine lamel yerleştirilerek ince kesit örnekleri hazırlanmıştır. Modifiye bitümlerin lam-lamel arasında yeterli incelikte yayılması floresan mikroskobundan elde edilen görüntüler açısından önemli olmaktadır. Şekil 26'da alınan ince kesit örneklerinden bir görüntü verilmiştir.



Şekil 26. Modifiye bağlayıcıların ince kesit örnekleri

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde, hazırlanan polimer modifiye asfalt ve PMAN'lerin floresan mikroskobu görüntüleri verilerek morfoloji değerlendirmesi yapılmıştır. Katkısız bitüm, polimer modifiye asfalt ve PMAN'le üretilen asfalt karışım örneklerinin mekanik özellikleri su hasarı, düşük sıcaklık çatlaması ve tekerlek izi performansı açısından değerlendirilmiştir ve bu amaçla grafikler hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmış ve irdelenmiştir.

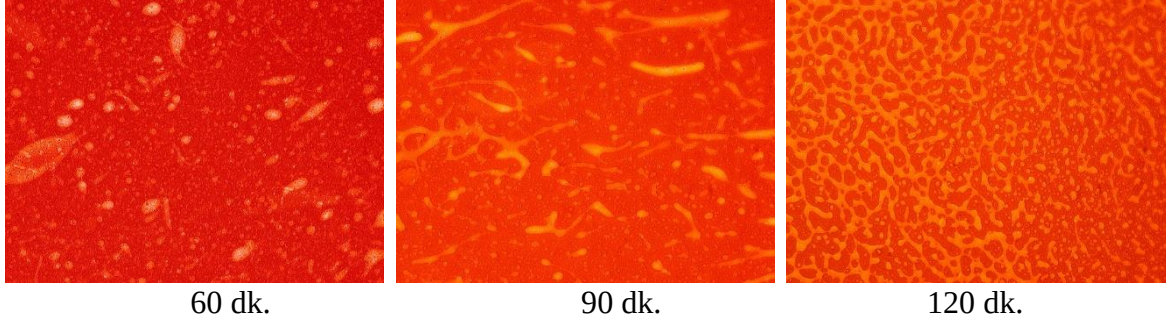
3.1. Modifiye Bağlayıcıların Morfolojik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Floresan mikroskobu, baz bitüm içinde polimerin dağılma durumunu belirleyerek polimer modifiye bitümlerin morfolojisini araştırmak ve ayrıca sürekli ve süreksiz fazların doğasını karakterize etmek için kullanılmaktadır (Sengoz vd., 2009).

Çalışma kapsamında polimer modifiye asfaltlar ve PMAN'lerden alınan ince kesit örnekleri floresan mikroskobunda incelenerek modifikasyonda kullanılan katkıların bağlayıcı içerisindeki dağılımları incelenmiştir. Dağılımları incelemek amacıyla çok sayıda ince kesit örnekleri alınmış ve mikroskop altında incelenmiştir ancak bu çalışmada örneği temsil ettiği düşünülen bir görüntüye yer verilmiştir. SBS PMAN, EVA PMAN, SBS modifiye bitüm ve EVA modifiye bitüm ile hazırlanan görüntülerde koyu renkli alanlar bitümü, açık renkli alanlar da polimeri göstermektedir. 170 °C karıştırma sıcaklığı 4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dk. karıştırma süresinde hazırlanan SBS modifiye asfalt ve 160 °C sıcaklıkta, değişen karıştırma süreleri ve karıştırma hızlarında hazırlanan SBS PMAN'lere ait mikroskop görüntüleri Şekil 27 - Şekil 30'da verilmiştir.



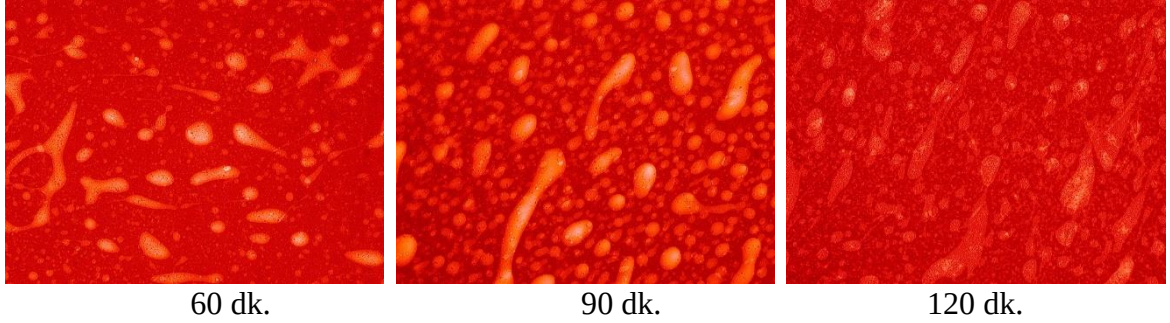
Şekil 27. SBS modifiye bitüm optik mikroskop görüntüsü



Şekil 28. 160 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri



Şekil 29. 160 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri

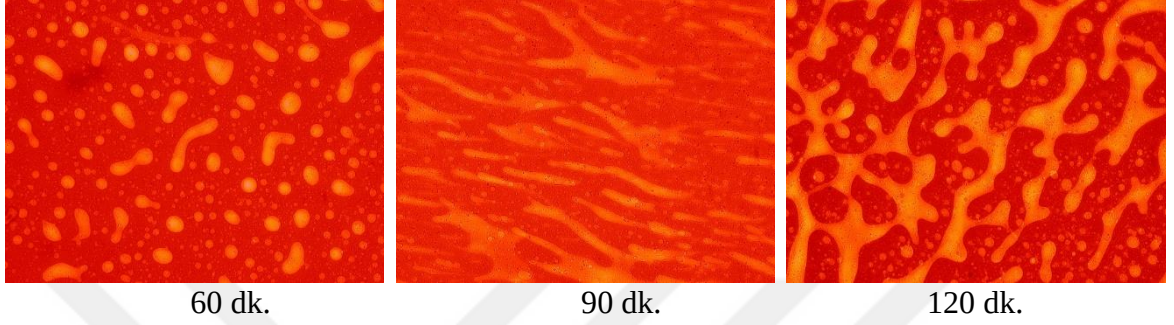


Şekil 30. 160 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri

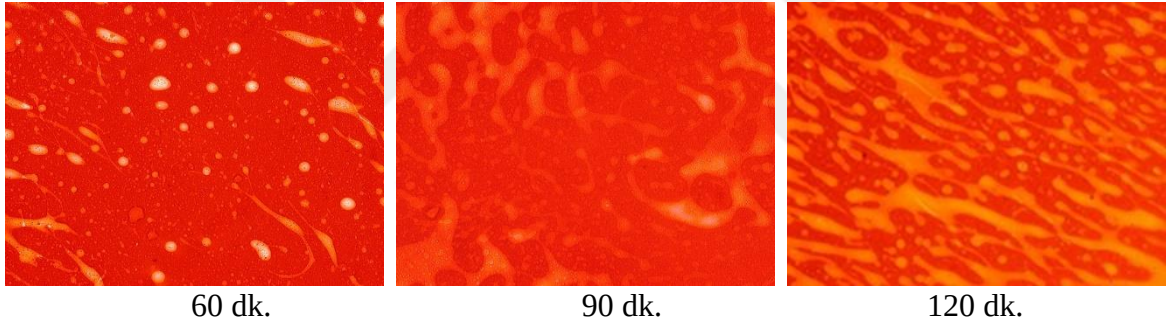
160 °C sıcaklıkta hazırlanan SBS PMAN bağlayıcıları ve SBS modifiye bağlayıcının optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde sadece SBS modifiyeli bağlayıcının görüntüsünde kırmızı (koyu) alanlar daha baskın olduğundan, bitümün sürekli fazı oluşturduğu, polimerin dağılan fazı oluşturduğu anlaşılmaktadır. Nanokil katkısının SBS modifikasyonuna ilave edilmesiyle polimerin bitüm fazındaki yayılımı artmıştır. Karıştırma süresi arttıkça polimer damlacıklarının bitüm içerisindeki yağimsı dağılımı artmış, polimer küreciği boyutları azalmıştır. Süreye bağlı olarak bitüm içerisindeki polimer yoğunluğunun daha homojen dağıldığı anlaşılmıştır. 60 ve 90 dakika karıştırma hızlarında polimer

küreciklerinin halen tam dağılmadığı anlaşılmaktadır. Ancak, 120 dakika karıştırma hızında hazırlanan PMAN’lerde polimer ağının geliştiği görülmektedir.

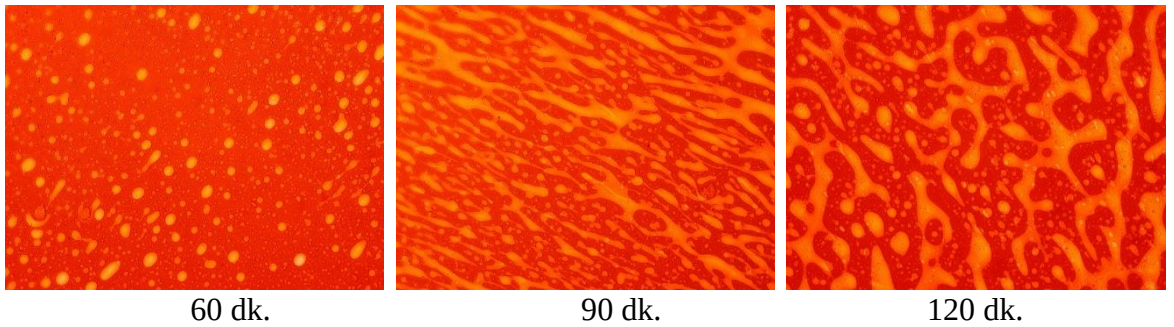
170 °C sıcaklıkta, değişen karıştırma süreleri ve hızlarında hazırlanan SBS PMAN bağlayıcılarına ait mikroskop görüntüleri Şekil 31 - Şekil 33’te verilmiştir.



Şekil 31. 170 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri



Şekil 32. 170 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri



Şekil 33. 170 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri

170 °C sıcaklıkta da 160 °C sıcaklıktaki dağılıma benzer olarak karıştırma süresi ve hızı arttıkça polimerin bitüm fazı içerisindeki dağılımı artmıştır. 60 dakika karıştırma

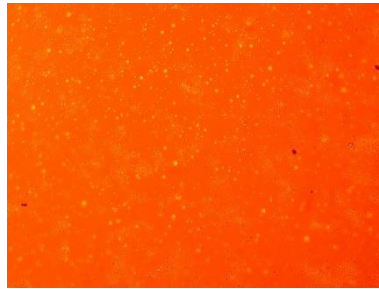
Şekil 36. 180 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN optik mikroskop görüntüleri

180 °C sıcaklıkta 60 dakika karıştırma sürelerinde 3000 dev./dk. karıştırma hızında bazı örneklerde polimer taneciklerinin tam olarak parçalanıp eriyerek bitüm içerisine karışmadığı, karıştırma hızının 4000 dev./dk. hıza çıkarılmasıyla bitüm içerisinde polimer küreciklerinin oluştuğu ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında ise ağ şeklinde dağılımın oluştuğu görülmüştür. Karıştırma süresinin 90 ve 120 dk.'ya çıkarılması durumunda arzulanan dağılımın gerçekleştiği, polimerin bitüm içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Morfolojik açıdan değerlendirildiğinde, modifikasyon 180 °C sıcaklıkta ve 60 dk. gibi kısa süreli yapılacaksa karıştırma hızının en az 4000 dev./dk. seçilmesi gerektiği görülmektedir. Aksi takdirde karıştırma süresinin 90 dk. veya üzerinde seçilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Morfolojik açıdan değerlendirildiğinde, modifikasyon başarımı açısından sıcaklığın etkisinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Sıcaklığın 10 °C artırılmasıyla (160 °C' den 170 °C'ye veya 170 °C' den 180 °C'ye), sabit karıştırma süresi ve hızı altında polimer dağılımının önemli ölçüde iyileştiği görülmektedir. Bu etki özellikle 60 dk. gibi kısa karıştırma sürelerinde daha çok ortaya çıkmıştır.

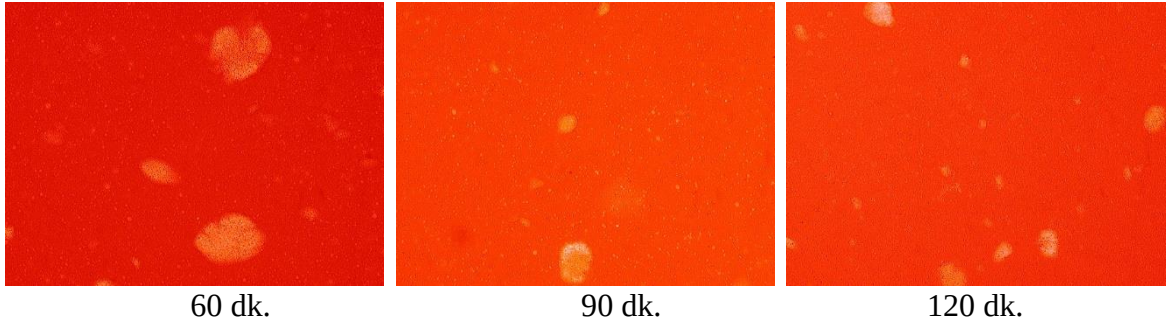
SBS modifiye bitüm ile karşılaştırıldığında, nanokompozit türü modifikasyonda SBS polimerinin bitüm içerisine daha homojen karıştığı görülmektedir. SBS modifiye bitümde polimer taneciklerinin eridiği fakat tam olarak dağılmadığı görülmüştür. Fakat üçüncü bileşen olarak nanokil katkısının kompozite eklenmesi durumunda dağılımın homojenleştiği, artan karıştırma süresi ve hızıyla uzaysal ağı da oluştuğu anlaşılmıştır. Bu anlamda nanokompozit uygulamasının avantaj sağladığı değerlendirilmiştir.

170 °C karıştırma sıcaklığı, 4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dk. karıştırma süresinde hazırlanan EVA modifiye asfalt bağlayıcı ve 160 °C karıştırma sıcaklığında değişen karıştırma süreleri ve hızlarında hazırlanan EVA PMAN bağlayıcılarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 37 - Şekil 40'ta verilmiştir.

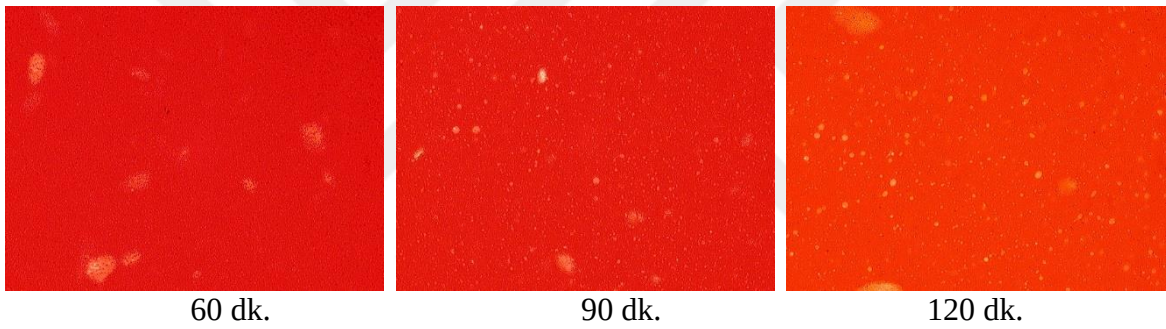


Şekil 37. EVA modifiye bitüm optik mikroskop görüntüsü

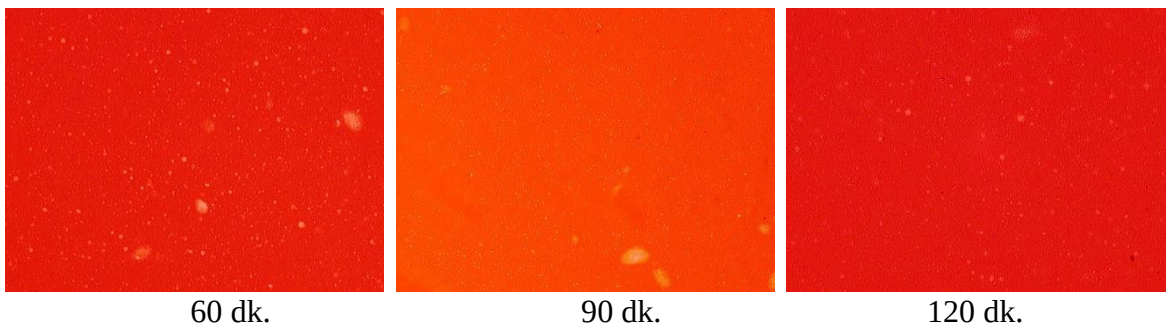
EVA modifiye bitümün optik mikroskop görüntüsünde genel olarak polimer parçacıklarının erimiş olduğu, damlacıklar şeklinde bitüm içerisinde dağıldığı bununla birlikte küçük polimer parçacıklarının da bitüm içerisinde kaldığı görülmüştür.



Şekil 38. 160 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri



Şekil 39. 160 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri

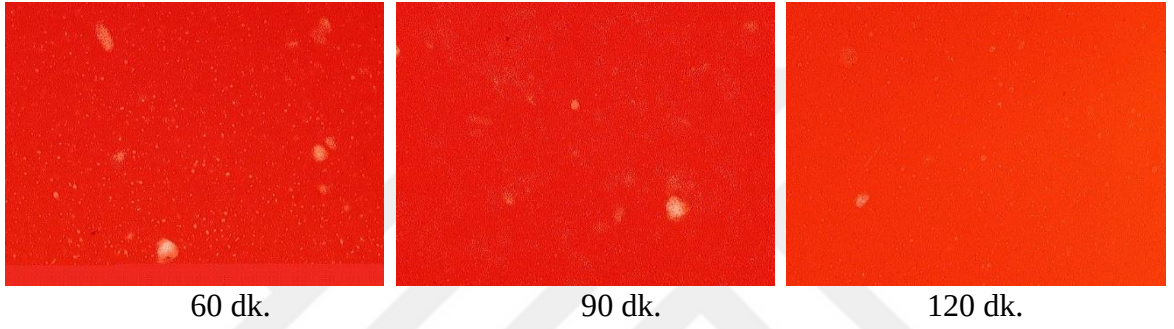


Şekil 40. 160 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri

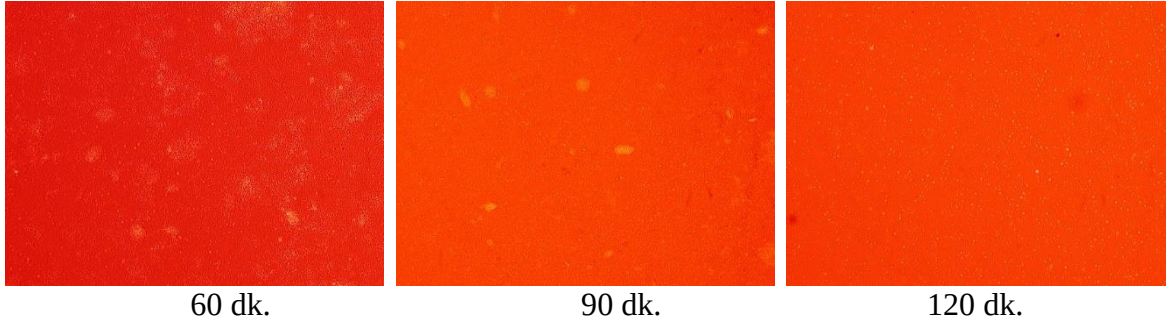
Çok sayıda örnek üzerinde optik mikroskop ile değerlendirmeler yapılmıştır. NC ilaveli EVA PMAN örnekleri 160 °C sıcaklıkta hazırlandığında tam olarak erimemiş veya parçalanmamış polimer taneciklerinin bitüm içerisinde küçük miktarda da olsa kaldığı görülmektedir. Polimer parçacıklarına düşük hızda karıştırılan (3000 dev./dk.) örneklerde

daha sık rastlanmaktadır. Eriyen veya parçalanmış polimerlerin bitüm içinde iyi bir dağılım oluşturduğu görülmektedir. Karıştırma hızının artırılmasıyla bitüm içerisinde erimeyen taneciklerin azaldığı, aynı şekilde karıştırma süresinin artmasıyla da modifiye bitümün daha homojen hale geldiği, parçalanmamış veya erimemiş polimer taneciklerinin azaldığı belirlenmiştir. Ancak 160 °C’de yapılan modifikasyonların tamamında, karıştırma süresi ve hızından bağımsız olarak, bitüm içerisinde dağılmamış polimer taneciklerine rastlanılmıştır.

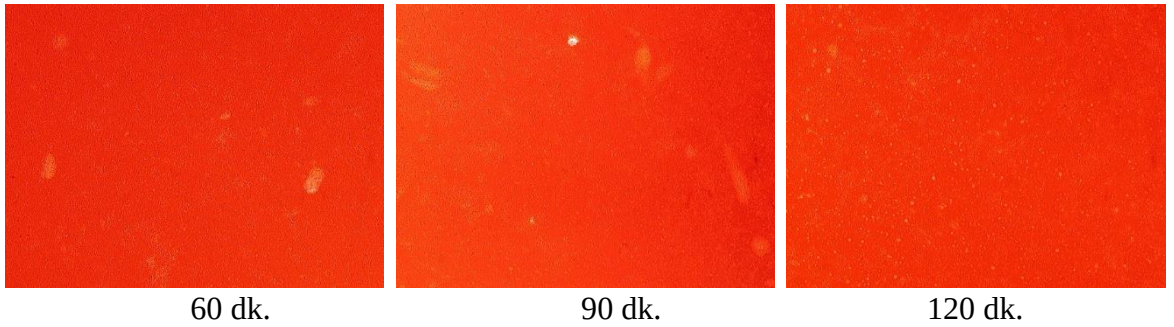
170 °C’de üretilen EVA PMAN’lerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 41 - Şekil 43’te verilmiştir.



Şekil 41. 170 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri



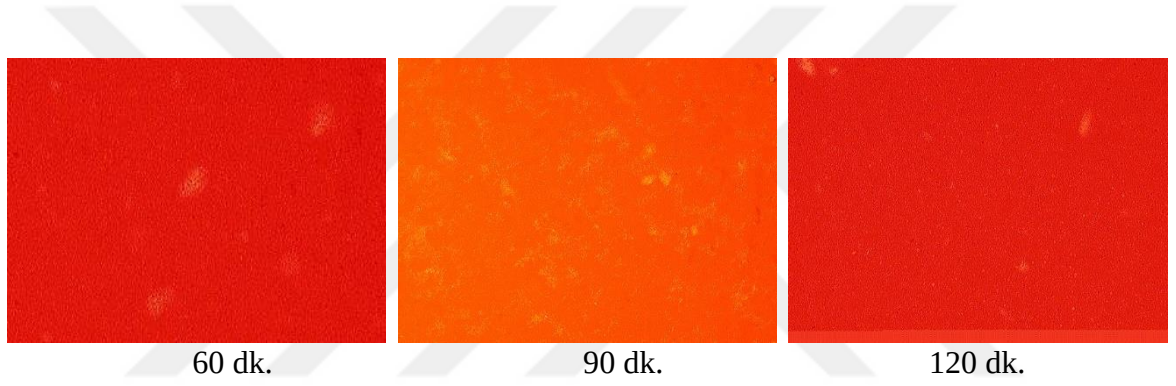
Şekil 42. 170 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri



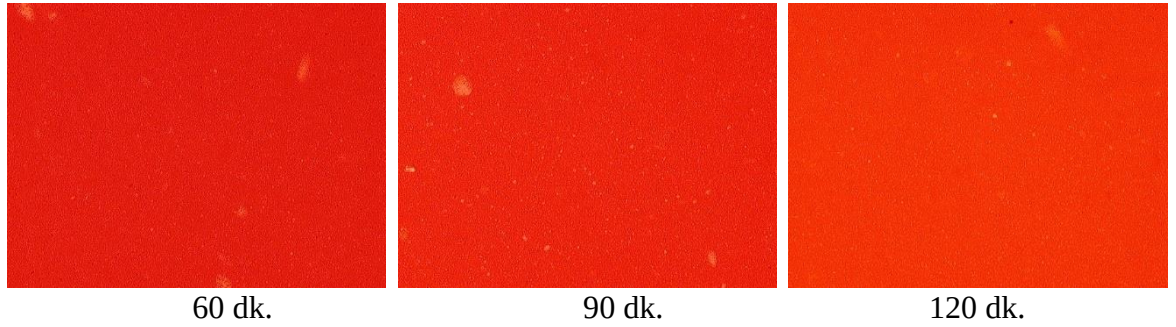
Şekil 43. 170 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri

Modifikasyon sıcaklığı 170 °C sıcaklığa yükseltildiğinde dağılımın 160 °C sıcaklığa göre önemli oranda iyileştiği ancak bitüm içerisinde yine de çoğu seçenekte erimemiş polimer parçacıklarının kaldığı görülmüştür. 3000 dev./dk. karıştırma hızlarının tamamı ve 4000 dev./dk. ile 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında ise 60 dk. ve 90 dk. karıştırma hızlarında homojen bir dağılım gözlemlenmemiştir. 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızları için 120 dk. karıştırma süresinde daha homojen nanokompozit modifiye bitümler elde edilebilmiştir. 170 °C sıcaklıkta modifiye edilen EVA modifiye bitümle karşılaştırıldığında EVA PMAN morfolojisinin daha homojen olduğu anlaşılmaktadır.

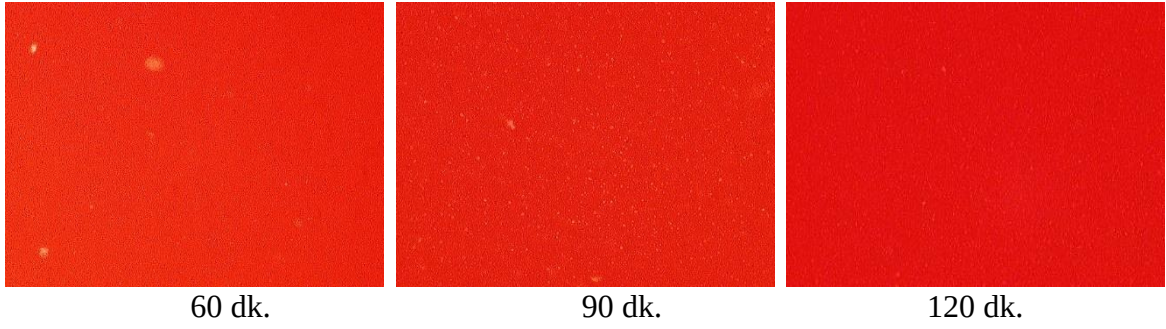
180 °C karıştırma sıcaklığında değişen karıştırma süreleri ve hızlarında hazırlanan EVA PMAN bağlayıcılarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 44 - Şekil 46'da verilmiştir.



Şekil 44. 180 °C’de 3000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri



Şekil 45. 180 °C’de 4000 dev./dk.’da hazırlanan EVA PMAN optik mikroskop görüntüleri



Şekil 46. 180 °C’de 5000 dev./dk.’da hazırlanan EVA/PMAN optik mikroskop görüntüleri

180 °C sıcaklıkta genel olarak en homojen dağılım gözlemlenmiştir. Yine de 3000 dev./dk. karıştırma hızının polimer taneciklerinin dağılması için yetersiz kaldığı, karıştırma hızının 4000 dev./dk. veya daha yüksek seçilmesi gerektiği görülmüştür. 4000 dev./dk. karıştırma hızında karıştırma süresinin homojen bir görünüm için 120 dk., 5000 dev./dk. karıştırma hızında ise 90 dk. veya daha uzun seçilmesinin uygun olacağı anlaşılmaktadır.

SBS/PMAN ve EVA/PMAN bağlayıcılarının optik mikroskobik görüntüleri kıyaslandığında morfolojik olarak farklı yapıların ortaya çıktığı görülmektedir. SBS ile hazırlanan PMAN görüntülerinde daha ağsı bir yapı gözlemlenirken, EVA ile hazırlanan PMAN görüntülerinde çok küçük kürecikler halinde dağılım gözlemlenmiştir.

Halloysit ve sepiyolit killerin SBS modifiye bitüme ilave edilmesiyle üretilen polimer nanokompozitlerin ve modifiye bitümlerin floresan mikroskobu görüntülerinin incelendiği bir çalışmada; yayılarak bitümlü bağlayıcıda bağ oluşturan polimerlerin, nanokil eklenmesi ile bağlarının genişlediği görülmüştür. %5 SBS polimerli modifiye bitüm örnekleri incelendiğinde, daha yoğun bağlar oluşmuş fakat nanokillerin SBS modifiye bitüme eklenmesi ile katkıların bitüm içerisindeki yayılımının ve kapladığı alanların arttığı gözlemlenmiştir (Uncu, 2017).

Modifiye asfaltların morfolojisi, asfalt matriksindeki modifiyerlerin dağılımı ve inceliği floresan mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. İncelemede depolama stabilitesi testi yapılmış ve yapılmamış örnekler kullanılmıştır. Çok az miktarda modifiye bitüm iki lam arasında sıkıştırılarak yayılmış ve mikroskopta incelenmiştir. Organofilik montmorillonitsiz SBS ile modifiye edilmiş asfaltlar faz ayrışması göstermiş ve daha büyük partiküller toplanarak SBS kümelenmelerini oluşturmuştur. OMMT’nin eklenmesi, lineer ve radyal SBS ile modifiye edilmiş asfaltların uyumluluğu üzerinde önemli bir etkiye sahip

olmuştur. SBS parçacıkları asfalt matriksi içinde dağılmıştır. Bu durum, OMMT'li karışımların yüksek sıcaklıkta depolanabileceği anlamına gelmektedir (Golestani vd., 2012).

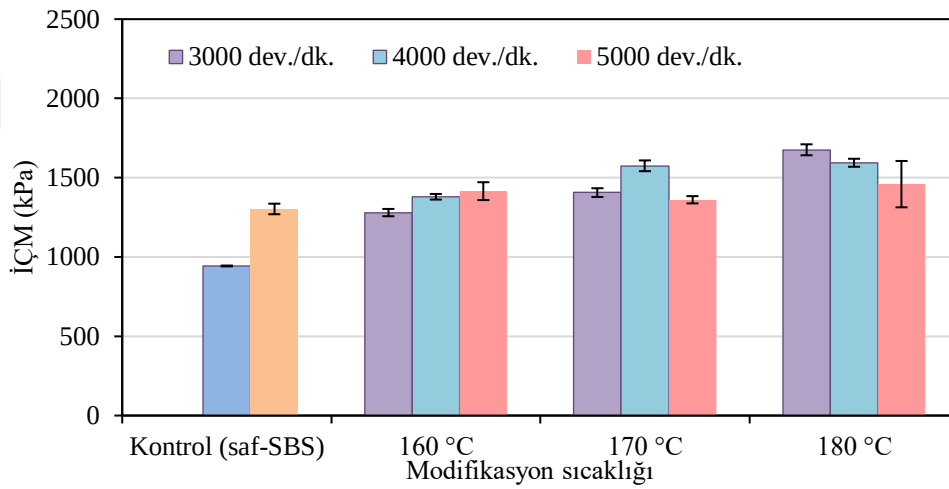
Asfalt matriksi içinde SBS ve OMMT'nin dağılma durumunu belirlemek ve polimer modifiye asfalt ve nanokompozit modifiye asfaltların mikroyapısını araştırmak için floresan mikroskopu görüntüleri kullanılmıştır. 163 ± 5 °C'de 48 saatlik depolamadan önce ve sonra polimer modifiye asfalt ve nanokompozit modifiye asfalt numunelerinin morfolojisi incelendiğinde; polimer modifiye asfalt görüntüsünde grimsi parçacıklara, SBS ve asfalt matrisi arasında ise faz ayrımı gösteren kümelenmiş SBS parçacıklarına rastlanılmıştır. Ancak, OMMT'ye SBS ilavesi ile elde edilen görüntülerde ince beyaz SBS partikülleri, karışım içinde homojen olarak dağılmış ve hiçbir faz ayrımı gözlemlenmemiştir (Golestani vd., 2015).

SBS, SBR ve PE polimerleri ve nano- CaCO_3 , nano- ZnO , nano- TiO_2 , nano- Fe_3O_4 ve nano-MMT gibi nanomalzemeler kullanılarak iki veya üç çeşit modifiyerli modifiye asfalt karışımları hazırlanmıştır. Modifiye asfaltların SEM görüntüleri incelendiğinde, polimer modifiye asfaltın morfolojisi, nano parçacıkların büyük aktif yüzey alanı, yüksek yüzey enerjisi ve kuantum etkileri gibi özellikleri sayesinde nano parçacıklar eklendiğinde büyük ölçüde değişmiştir. Yüksek yüzey enerjisine ve aktif yüzey alanına sahip nano-partiküller, asfalta güçlü bağlanma kapasitesine sahip olup asfaltta iyi bir dağılım göstermiştir. Ayrıca, arayüz yapısı nano parçacıklar ve polimer arasında olduğu kadar nano parçacıklar ve asfalt arasında da meydana gelmiştir. Arayüz, polimer ve asfaltın makromoleküler zincirlerinin hareketini engelleyebilmekte ve asfalttaki mikro çatlağın uzamasını azaltabilmektedir. Bu nedenle, asfaltın mekanik mukavemeti, yorulma önleme performansı ve kırılma tokluğunu oldukça iyileştirmiştir (Zhang, vd., 2016).

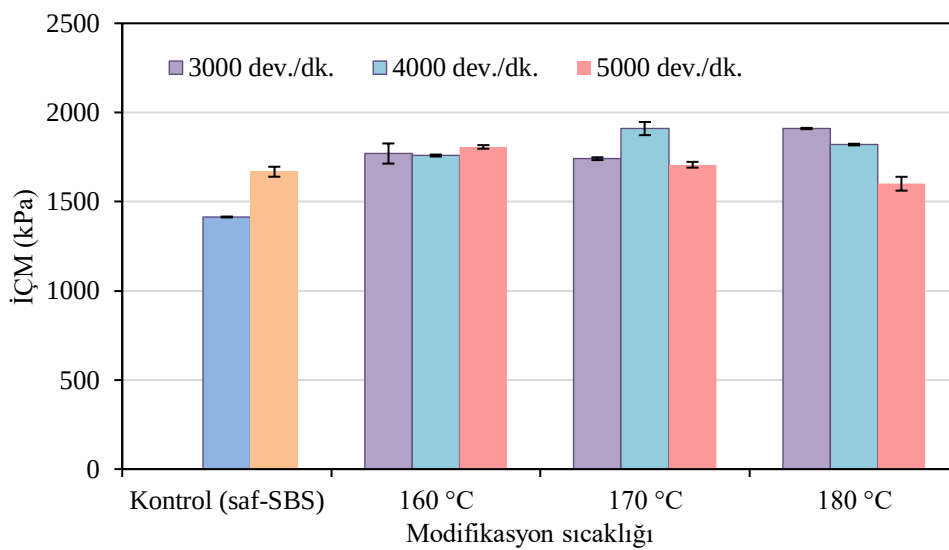
%4 EVA ve %4 SBS ile modifiye edilmiş asfaltların mikroskop görüntüleri incelendiğinde görüntüler arasında net bir farklılık görülmektedir. EVA ile modifiye edilmiş asfalt çok az polimer dağılımı sergilerken, SBS ile modifiye edilmiş asfaltta dağılım daha belirgin olmuştur (Topal vd., 2011; Sengoz vd., 2009). SBS ve EVA kopolimerlerinin polimer içeriği ile polimer dağılım alanı arasındaki ilişkiden EVA'nın polimer dağılımı SBS'den daha yüksek olmuştur. Bu nedenle EVA kopolimeri aynı polimer içeriğinde SBS'e göre asfaltta daha iyi dağılmıştır (Topal vd., 2011).

3.2. Modifiye Lottman Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Modifiye Lottman testi polimer modifiye asfalt, PMAN ve katkısız asfalt karışımların su hasarına karşı dirençlerini belirlemek için kullanılmıştır. Modifiye Lotmann testine göre koşullandırılmış ve koşullandırılmamış özdeş örneklerle 25 °C sıcaklıkta indirekt çekme mukavemeti (İÇM) testi yapılmıştır. Tüm asfalt karışımlarda İÇM değerleri için üçer örneğin değerlerinin ortalaması esas alınarak grafikler hazırlanmıştır. SBS PMAN karışımlarının koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değerleri Şekil 47 - Şekil 64'te gösterilmiştir.



Şekil 47. 60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

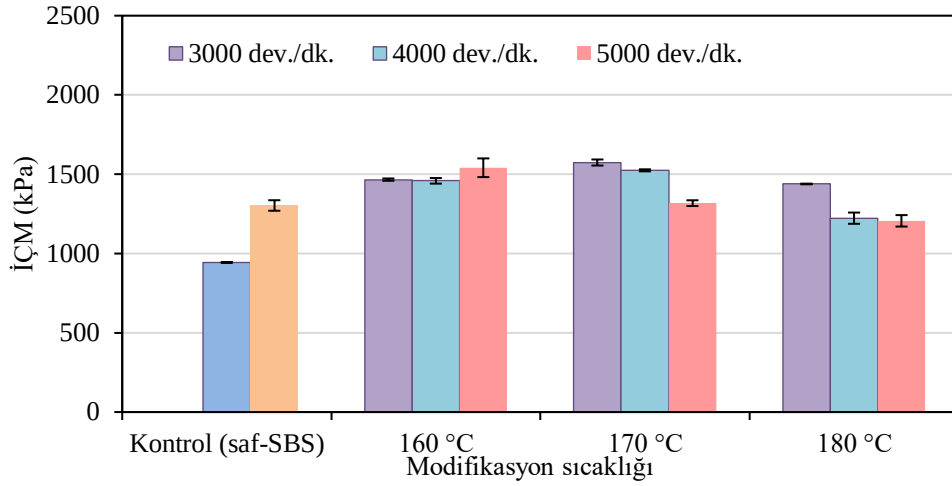


Şekil 48. 60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

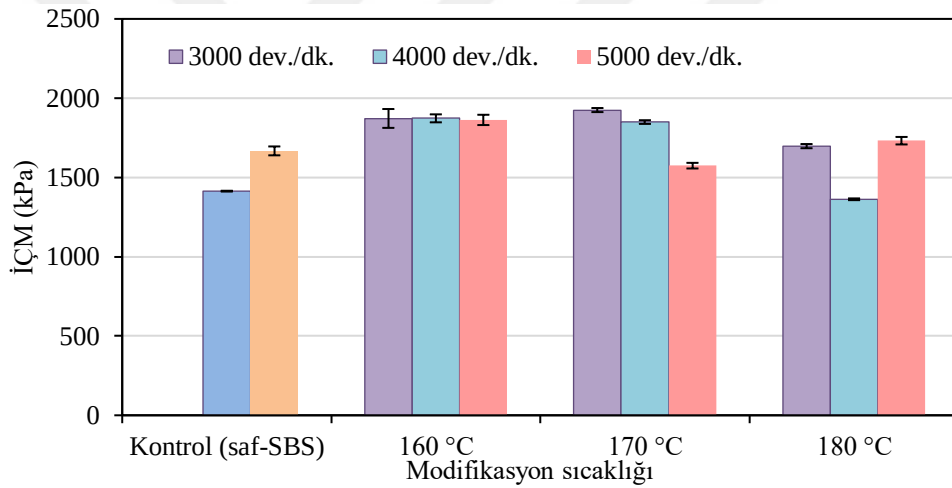
60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımların koşullandırılmış indirekt çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde, 160 °C sıcaklıkta karıştırma hızı artırıldığında karışımların İÇM değerleri artmıştır. 170 °C’de hazırlanan karışımların çekme mukavemeti değerlerine bakıldığında en yüksek değeri 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımı ardından da 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışım göstermiştir. 180 °C sıcaklıkta, karıştırma hızı artırıldığında çekme mukavemeti değerlerinde sürekli olarak azalma meydana gelmiştir. Koşullandırılmış indirekt çekme mukavemeti değerleri koşullama yapılmadan elde edilen çekme mukavemeti değerleri ile kıyaslandığında koşullama yapılmasıyla birlikte çekme mukavemeti değerlerinin azaldığı görülmüştür ve çoğunlukla koşullandırılmış çekme mukavemeti değerlerinin 1500 kPa’ın altında kaldığı gözlenmiştir.

60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarının koşullandırılmamış indirekt çekme mukavemetleri incelendiğinde, 160 °C’de hazırlanan PMAN karışımlarının çekme mukavemetleri birbirine çok yakın değerler göstermiştir. 170 °C sıcaklıkta en yüksek çekme mukavemeti değerini 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışım, ardından da 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımı vermiştir. 180 °C’de hazırlanan PMAN karışımların koşullandırılmış örneklerinde olduğu gibi karıştırma hızının artmasıyla birlikte çekme mukavemetleri azalmıştır. PMAN karışımların indirekt çekme mukavemetleri 180 °C sıcaklıkta 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımı hariç, kontrol (SBS) karışımın çekme mukavemeti değerinden daha fazla çıkmıştır.

Koşullandırılmış SBS modifiye karışımın çekme dayanımı yaklaşık olarak 160 °C sıcaklıkta – 3000 dev./dk.’da hazırlanan SBS PMAN karışımının dayanımına eşit çıkmıştır. Diğer PMAN karışımların dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Koşullandırılmamış karışımlarda ise PMAN karışımların dayanımları SBS modifiye karışımlarından daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlardan, SBS modifiye bitümün modifikasyon sürecine nanokil ilavesinin modifikasyon sıcaklığını çekme dayanımları açısından, yaklaşık 10 °C düşürdüğü anlaşılmaktadır.



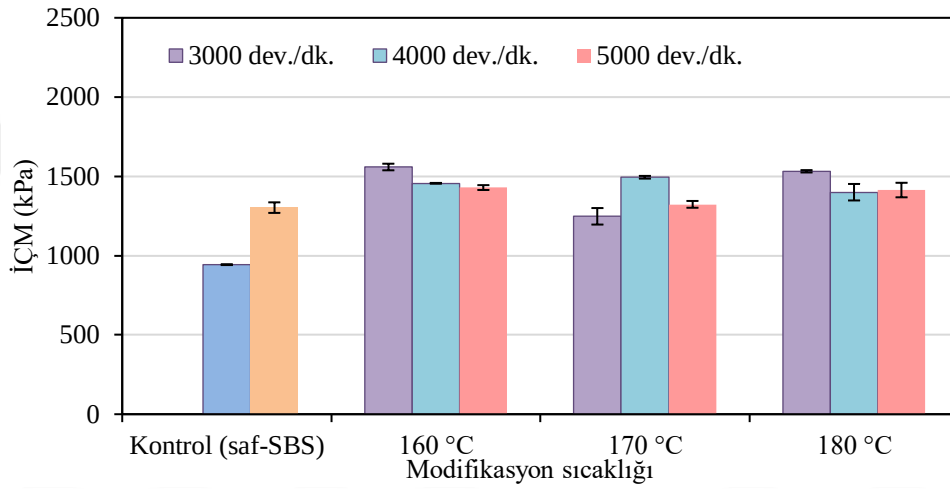
Şekil 49. 90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri



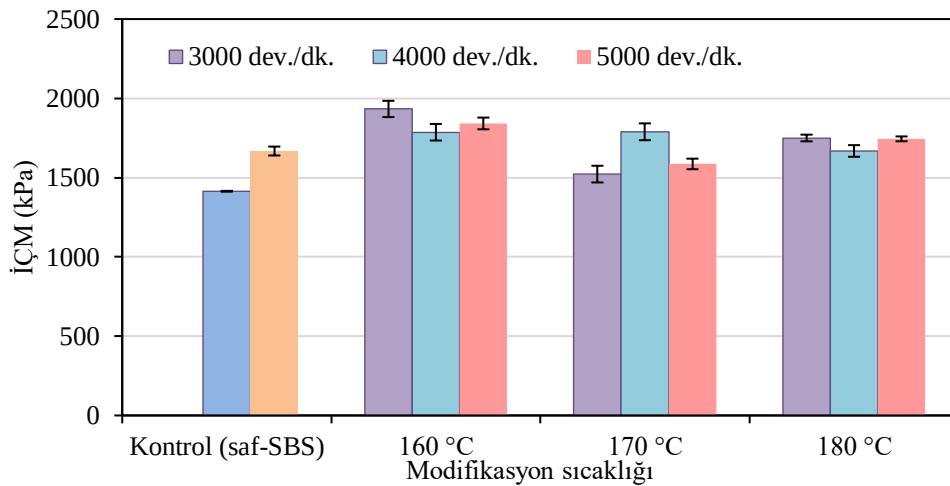
Şekil 50. 90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

90 dakika karıştırma süresinde üretilen koşullandırılmış PMAN karışımların indirekt çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde, 160 °C sıcaklıkta 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışım en yüksek değeri göstermiş olup, 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan karışımlar yaklaşık olarak aynı çekme mukavemeti değerine sahiptir. 170 °C ve 180 °C sıcaklıklarda hazırlanan PMAN'lerde karıştırma hızı arttığında İÇM değerleri azalmıştır. Koşullandırılmış PMAN karışımların çekme mukavemetleri 180 °C sıcaklıkta 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan PMAN karışımları hariç, SBS modifiyeli karışımın çekme mukavemeti değerinden fazla çıkmıştır.

90 dakika karıştırma süresinde üretilen karışımların İÇM değerleri incelendiğinde, 160 °C sıcaklıkta hazırlanan tüm PMAN karışımları yaklaşık olarak aynı çekme mukavemeti değerini göstermiştir. 170 °C’de üretilen PMAN karışımlarında karıştırma hızı artırıldığında çekme mukavemeti değerleri azalmıştır. 180 °C sıcaklıkta üretilen PMAN’lerde en yüksek İÇM değerlerini 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışım, sonrasında ise 3000 dev./dk.’da hazırlanan karışım göstermiştir. 90 dk. karıştırma süresinde hazırlanan PMAN’lerin koşullandırılması ile karışımların İÇM değerleri azalmıştır.

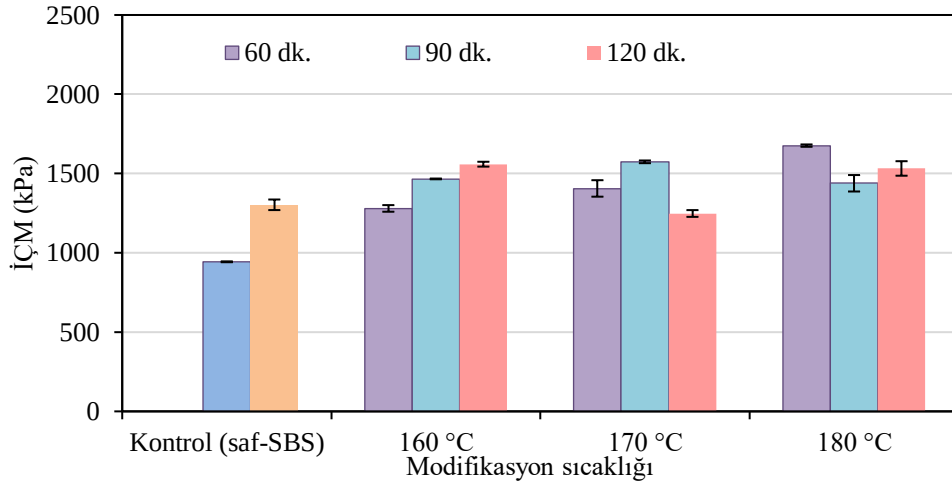


Şekil 51. 120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

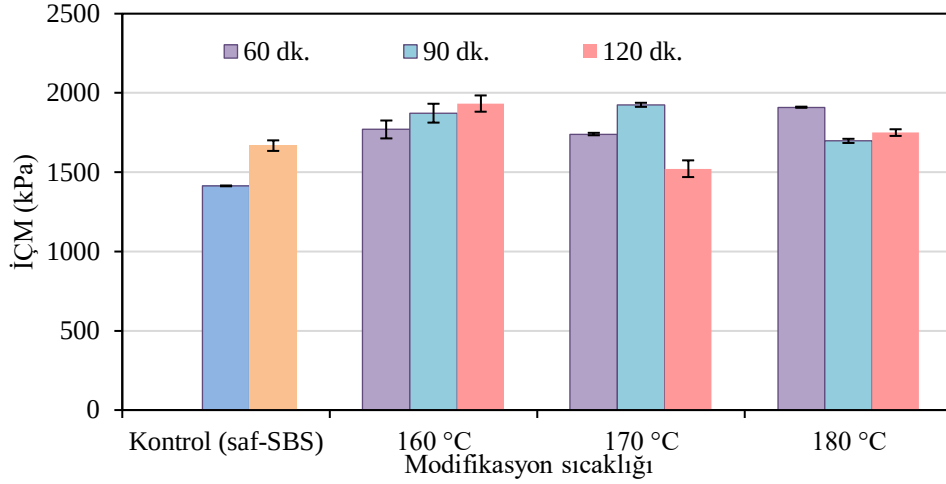


Şekil 52. 120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

120 dk. karıştırma süresinde modifiye edilmiş karışımların koşullandırılmış İÇM değerleri incelendiğinde, 160 °C sıcaklıkta modifiye edilen karışımların karıştırma hızları arttıkça İÇM değerleri azalmıştır. 170 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN karışımlarında en yüksek çekme mukavemeti değerini 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışım, ardından da 5000 dev. /dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımı göstermiştir. 180 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN karışımlarında ise en yüksek çekme mukavemeti değerini 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışım vermiştir. 120 dk. karıştırma süresinde modifiye edilen karışımlarda, koşullandırılmamış karışımlar koşullandırılmış karışımlara nazaran daha yüksek çekme mukavemeti değerleri göstermiştir. 160 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN karışımlarda en yüksek çekme mukavemeti değerini 3000 dev./dk. karıştırma hızı, ardından da 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımı vermiştir. 170 °C sıcaklıkta karıştırma hızı 4000 dev./dk.'ya çıktığında çekme mukavemeti değeri artmış ancak karıştırma hızı 5000 dev./dk. olduğunda çekme mukavemeti değerinde 4000 dev./dk.'ya göre azalma meydana gelmiştir. 180 °C sıcaklıkta 3000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hazırlanan PMAN karışımları yaklaşık olarak aynı çekme mukavemeti değerlerini göstermiştir. 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımı ise 3000 ve 5000 dev./dk.'da hazırlanan karışımlara nazaran daha az çekme mukavemeti göstermiştir.

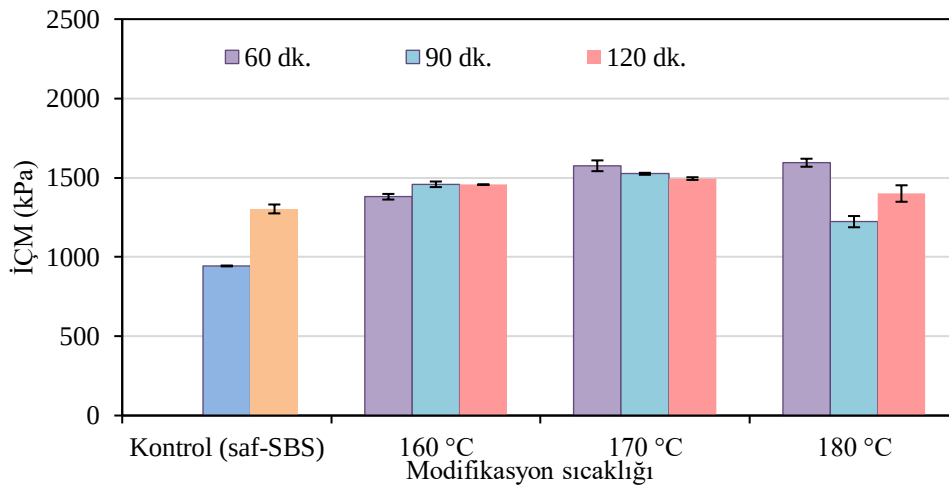


Şekil 53. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

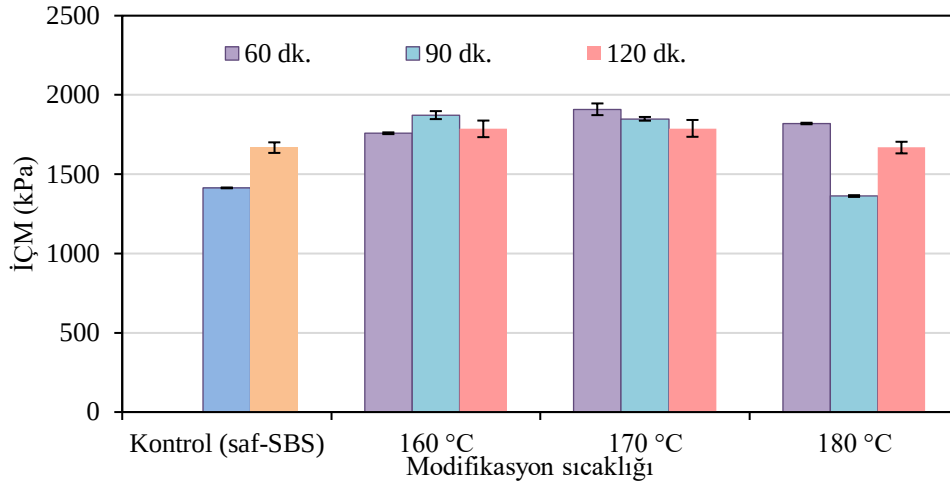


Şekil 54. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen karışımların İÇM değerleri koşullama ile birlikte azalmıştır. 160 °C’de hazırlanan PMAN’lerde, karıştırma süresinin artmasına paralel olarak hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış karışımların İÇM değerleri artmıştır. 170 °C’de hazırlanan PMAN’lerde ise hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış İÇM değerleri, karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında artarken, karıştırma süresi 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında azalmıştır. 180 °C’de üretilen PMAN’lerin karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış örneklerin İÇM değerinde azalma görülürken, karıştırma süresi 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında bir miktar artış gözlenmiştir.

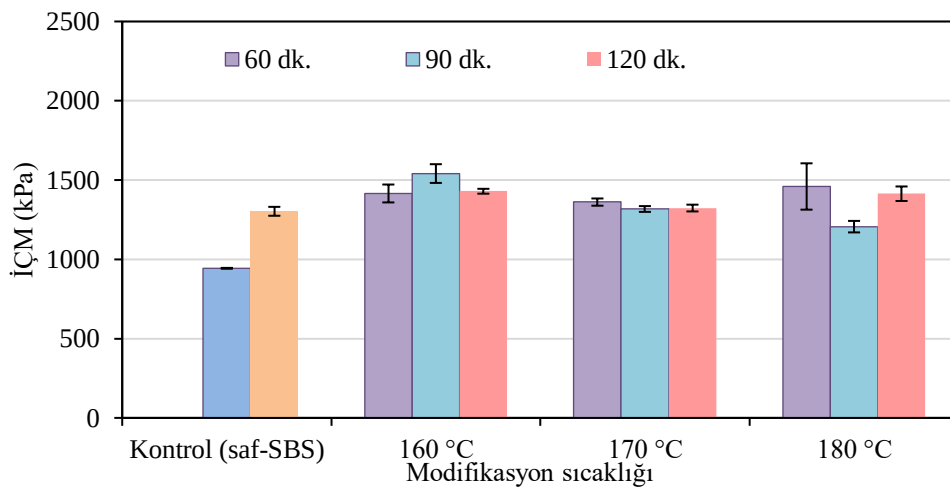


Şekil 55. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

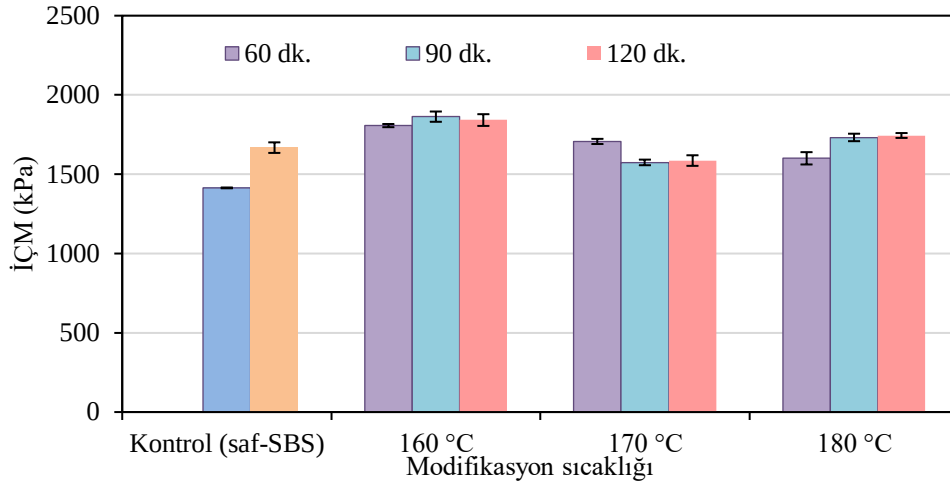


Şekil 56. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

4000 dev./dk. karıştırma hızında modifiye edilen örneklerin koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değerlerine bakıldığında, 160 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN karışımlarında, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında İÇM değerleri artarken, karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında azalmıştır. 170 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN karışımlarında ise hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış İÇM değerleri, karıştırma süresi artırıldığında azalmıştır. 180 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN karışımlarının karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında koşullandırılmış ve koşullandırılmamış örneklerin çekme mukavemeti değerlerinde azalma meydana gelirken, karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında artış gözlenmiştir.

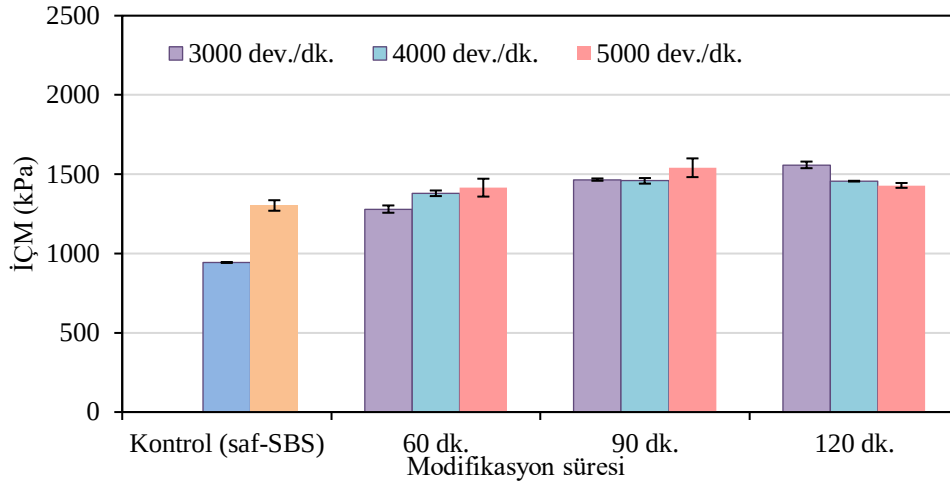


Şekil 57. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

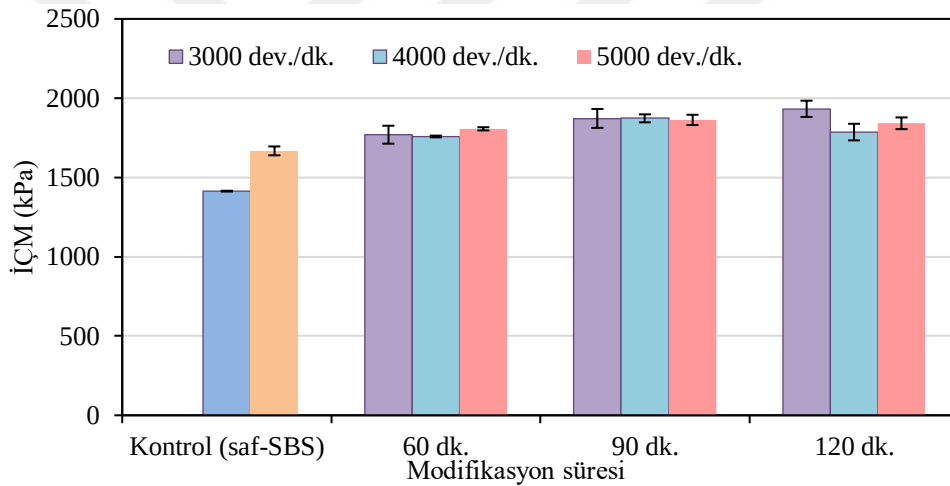


Şekil 58. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerin koşullandırılmış ve koşullandırılmamış indirekt çekme mukavemeti değerlerine bakıldığında koşullandırılmamış karışımların çekme mukavemeti değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. 160 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN karışımlarında koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değerleri irdelendiğinde, en yüksek İÇM değerini 90 dk. karıştırma süresi ardından da 120 dk. karıştırma süresi göstermiştir. 170 °C sıcaklıkta hazırlanan koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değerleri incelendiğinde, 60 dk. modifikasyonu en yüksek indirekt çekme mukavemeti değerini gösterirken; 90 ve 120 dk. karıştırma süreleri yaklaşık olarak aynı İÇM değerlerini göstermiştir. 180 °C hazırlanan koşullandırılmamış PMAN karışımların İÇM değerleri karıştırma süresinin artmasıyla birlikte sürekli bir artış göstermiştir. Ancak aynı sıcaklıkta koşullandırılmış PMAN karışımların İÇM değerleri incelendiğinde, en yüksek İÇM değerine 60 dk. modifikasyonunda ulaşılmış olup ardından 120 dk. modifikasyonu en yüksek İÇM değerini göstermiştir. Genel olarak bakıldığında, 5000 dev./dk. karıştırma hızında, 160 °C'de hazırlanan koşullandırılmamış PMAN karışımları bütün karıştırma sürelerinde diğer karıştırma sıcaklıklarında ve sürelerinde hazırlanan karışımlara nazaran yüksek İÇM değerleri vermiştir. En yüksek çekme dayanımı 90 dakika karıştırma süresinde görülmüştür. Bu açıdan, eğer modifikasyon 160 °C'de yapılacaksa, karıştırma hızının 5000 dev./dk. ve karıştırma süresinin de 90 veya 120 dakika seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.

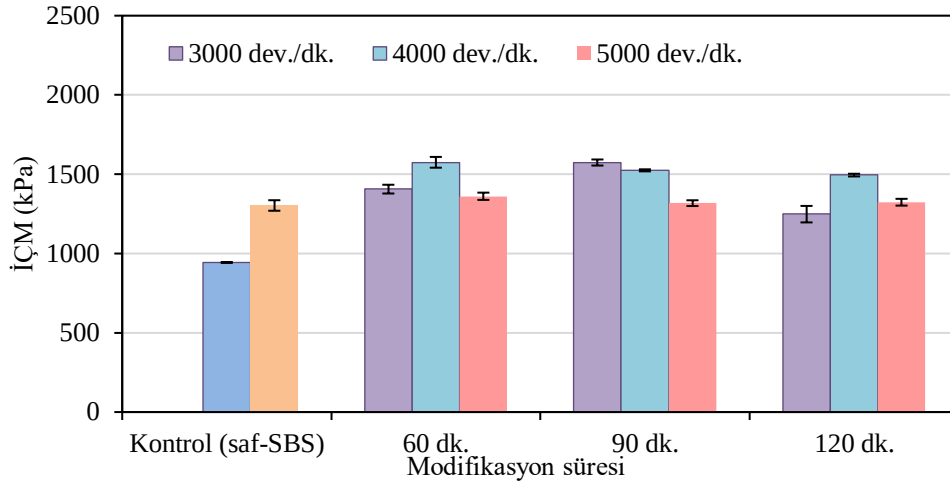


Şekil 59. 160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

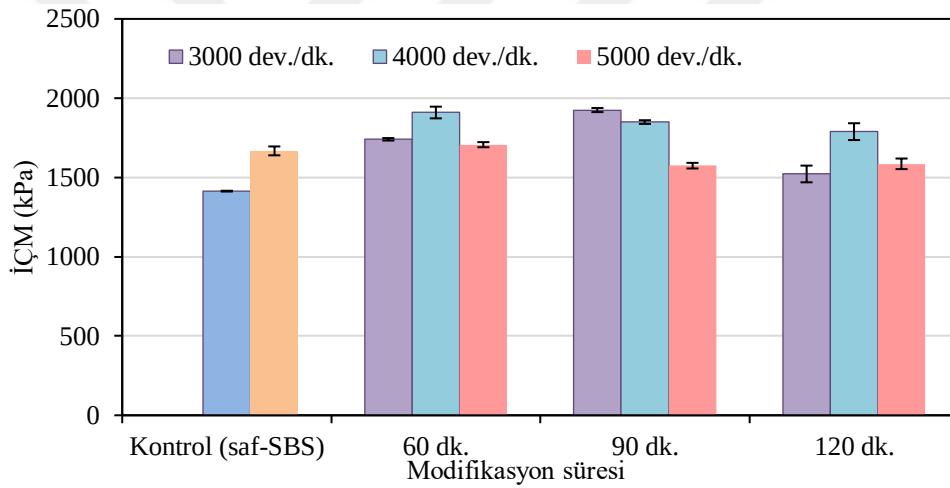


Şekil 60. 160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

160 °C’de hazırlanan koşullandırılmamış PMAN karışımlarda en yüksek ortalama İÇM değeri 90 dk. karıştırma süresinde meydana gelmiştir. Koşullandırılmış karışımların 60 dk. modifikasyonundaki İÇM değerleri, karıştırma hızı artırıldığında artarken, 120 dk. modifikasyonunda tam tersi olarak karıştırma hızı artırıldığında azalmıştır. Koşullandırılmış karışımların 60 ve 90 dk. modifikasyonlarında en yüksek İÇM değerlerine 5000 dev./dk. karıştırma hızında ulaşılırken, 120 dakika modifikasyonunda 3000 dev./dk. karıştırma hızında ulaşılmıştır. Genel olarak, 160 °C sıcaklıkta koşullandırılmamış ve koşullandırılmış PMAN karışımları için 60 ve 90 dk. karıştırma sürelerinde en yüksek İÇM değerleri 5000 dev./dk. karıştırma hızında; 120 dk. karıştırma süresinde ise 3000 dev./dk.’da çıkmıştır.

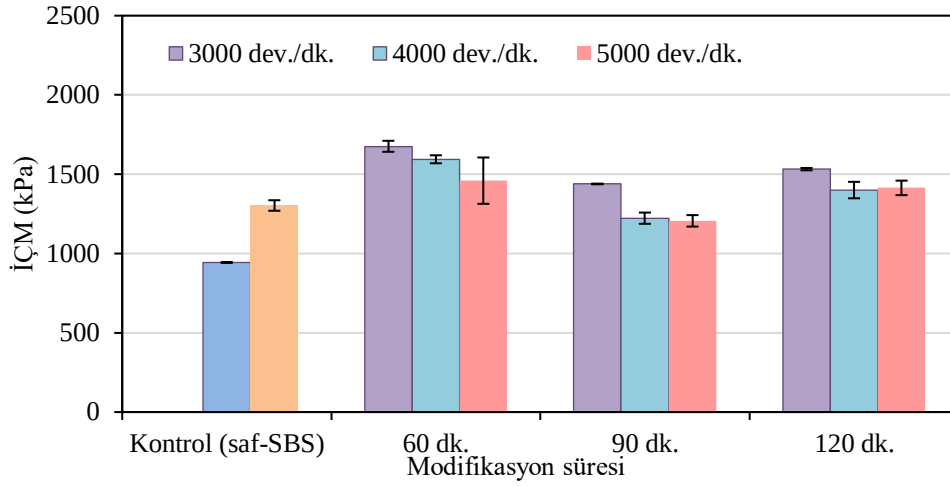


Şekil 61. 170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

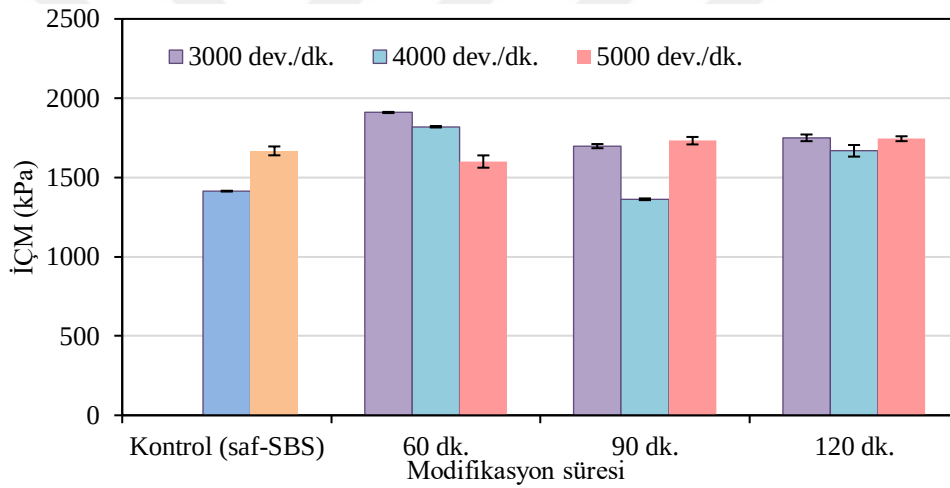


Şekil 62. 170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

170 °C sıcaklıkta hazırlanan koşullandırılmış ve koşullandırılmamış PMAN karışımlarında 60 ve 120 dakika karıştırma sürelerinde, karıştırma hızları 4000 dev./dk.'ya çıktığında İÇM değerleri artarken, karıştırma hızı 5000 dev./dk.'ya çıktığında İÇM değerlerinde azalma meydana gelmiştir. 90 dakika karıştırma süresinde yapılan modifikasyonlarda ise karıştırma hızı arttıkça karışımların İÇM değerleri azalmıştır. Şekil 61 - Şekil 62'den en yüksek İÇM değerlerine koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımlar için 60 dakika modifikasyon süresinde 4000 dev./dk.'da ve 90 dakika modifikasyon süresinde 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında ulaşılmıştır.



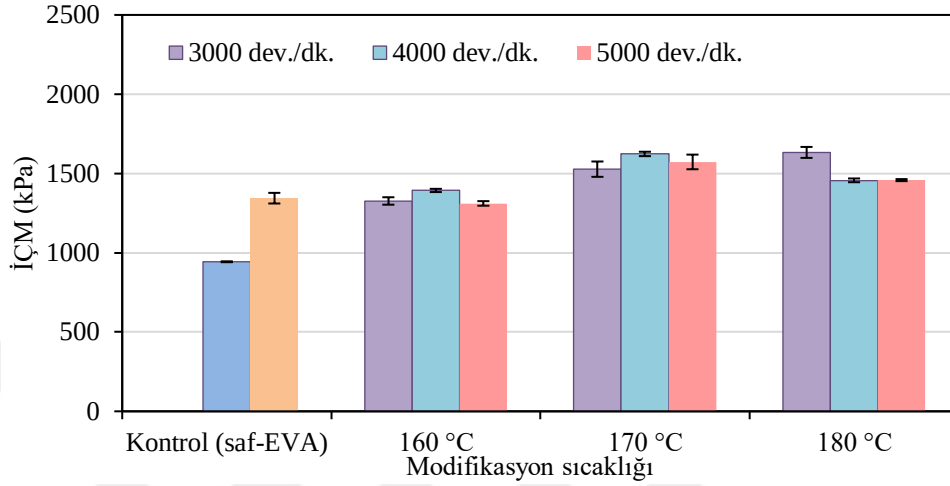
Şekil 63. 180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri



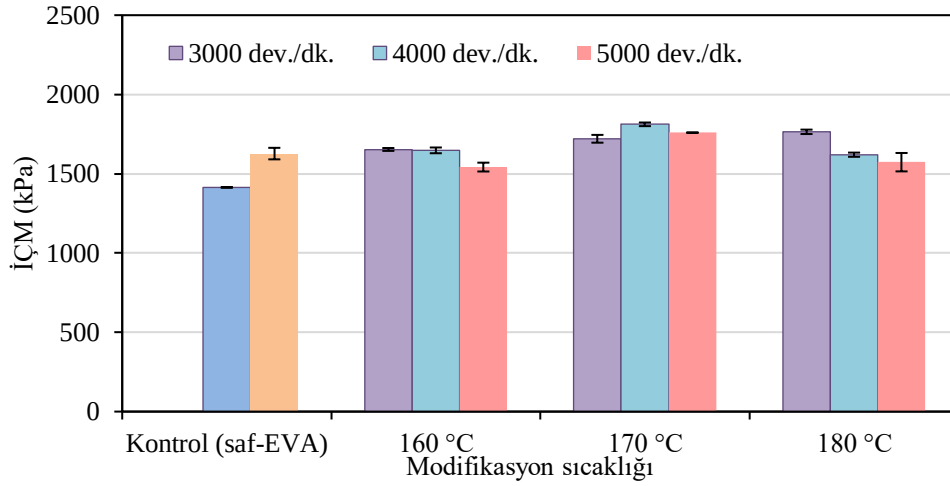
Şekil 64. 180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların İÇM değerleri

180 °C karıştırma sıcaklığında koşullandırılmış ve koşullandırılmamış SBS PMAN karışımlarında 60 dk. karıştırma süresi için karıştırma hızları artırıldığında İÇM değerleri azalmıştır. 90 ve 120 dk. karıştırma sürelerinde yapılan modifikasyonlarda ise koşullandırılmış PMAN'lerin karıştırma hızları arttıkça karışımların İÇM değerleri azalmıştır. 180 °C'deki SBS PMAN modifikasyonlarında en yüksek İÇM değerleri 60 dk. karıştırma süresinde görülmüştür. 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında daha yüksek İÇM değerleri elde edilmiştir.

EVA PMAN ve kontrol (saf ve EVA modifiye bitüm) karışımlarla hazırlanan koşullandırılmış ve koşullandırılmamış örneklerin karıştırma sürelerine göre indirekt çekme mukavemeti test sonuçlarının grafikleri Şekil 65 – Şekil 70’te verilmiştir.



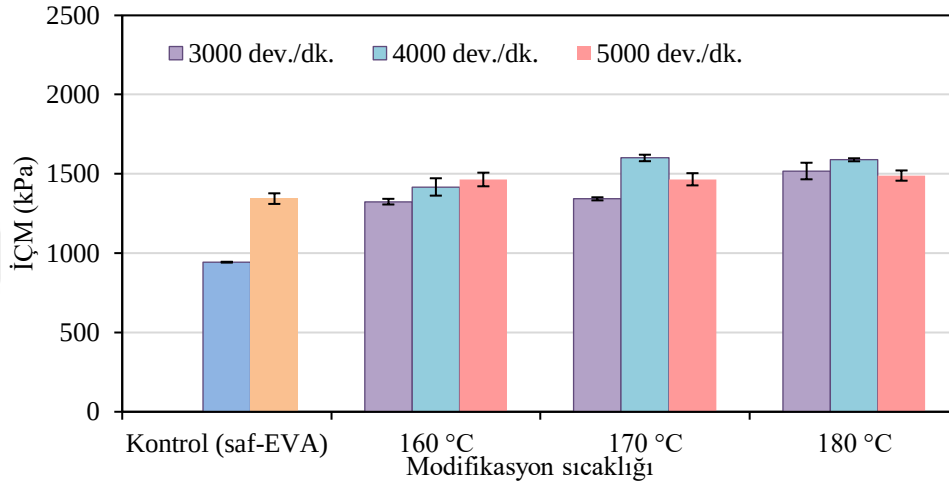
Şekil 65. 60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri



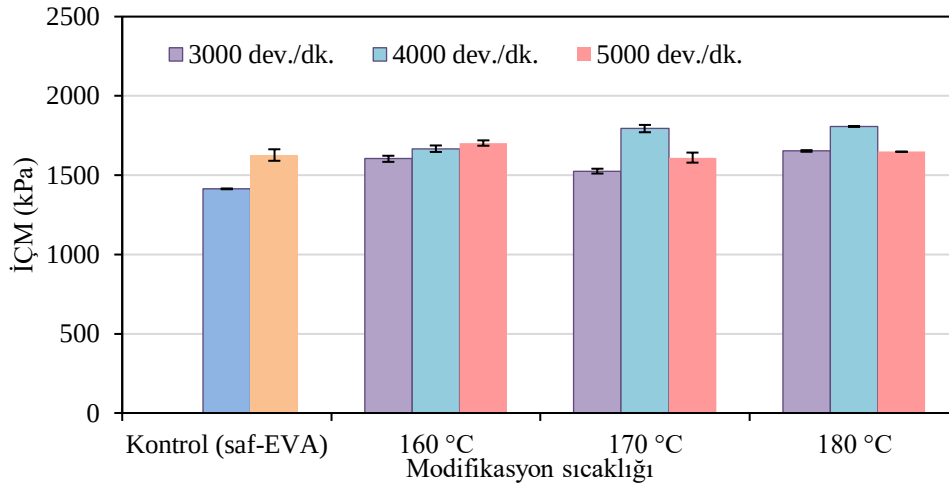
Şekil 66. 60 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

60 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN ve kontrol karışımların koşullandırılmamış İÇM değerleri, koşullandırılmış İÇM değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. 60 dk. karıştırma süresi için; 160 °C sıcaklıkta 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında modifiye edilen; 170 °C sıcaklıkta 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında ve 180 °C sıcaklıkta ise 3000

dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışımlar en yüksek İÇM değerlerine sahip olmuştur. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımlarda, 170 °C - 4000 dev./dk. ve 180 °C - 3000 dev./dk. karıştırma parametrelerinde üretilen karışımlar en yüksek İÇM değerlerini göstermiştir. 60 dk. karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarında en yüksek İÇM değerleri için 170 °C karıştırma sıcaklığı daha uygun görülmektedir.



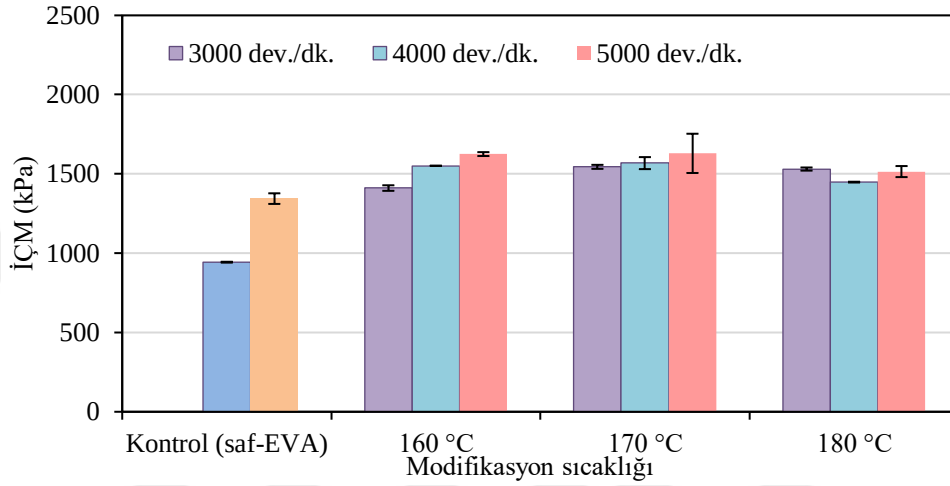
Şekil 67. 90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri



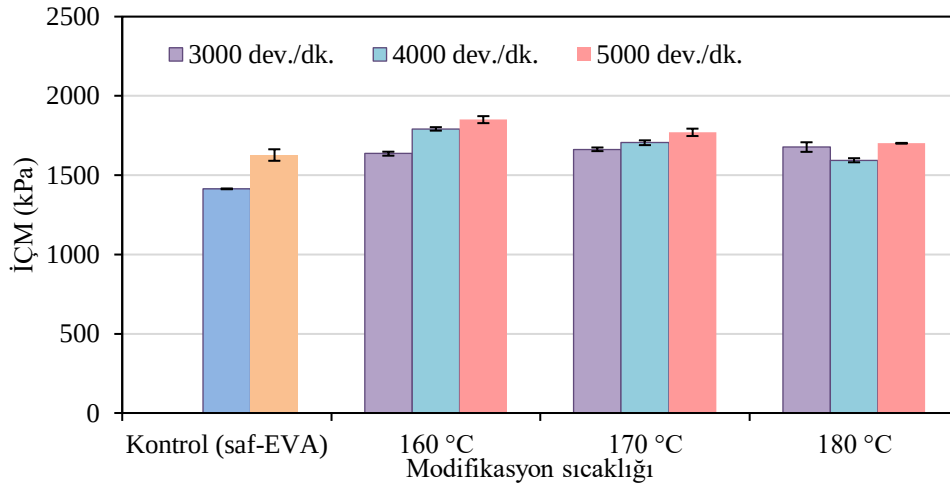
Şekil 68. 90 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

90 dakika karıştırma süresinde ve 160 °C sıcaklıkta modifiye edilen PMAN'lerin koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değerleri için, karıştırma hızları arttıkça İÇM değerleri artmıştır. 170 ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında üretilen PMAN'lerde

koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımlarda karıştırma hızının 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarılmasıyla İÇM değerleri artarken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarılması durumunda İÇM değerleri azalmıştır. Tüm koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımlar içinde en yüksek İÇM değerlerine 4000 dev./dk. karıştırma hızında, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında ulaşılmıştır.



Şekil 69. 120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

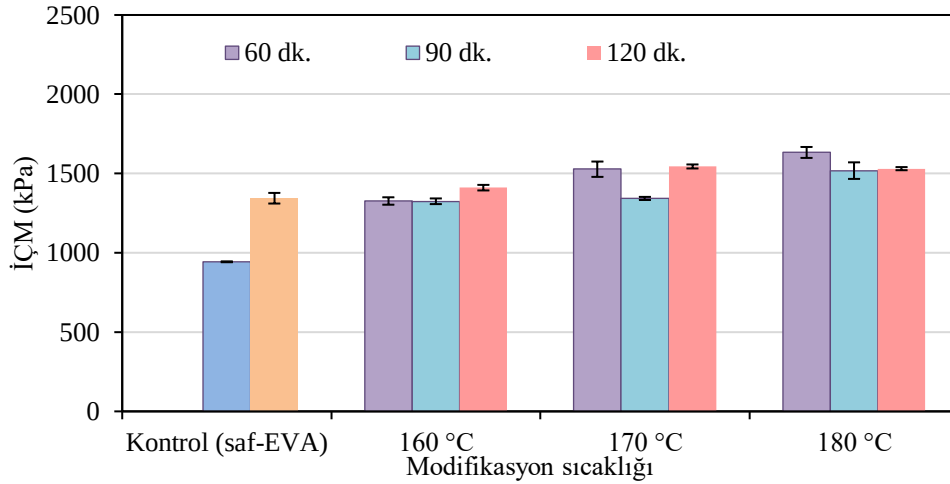


Şekil 70. 120 dk. karıştırma süresi için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

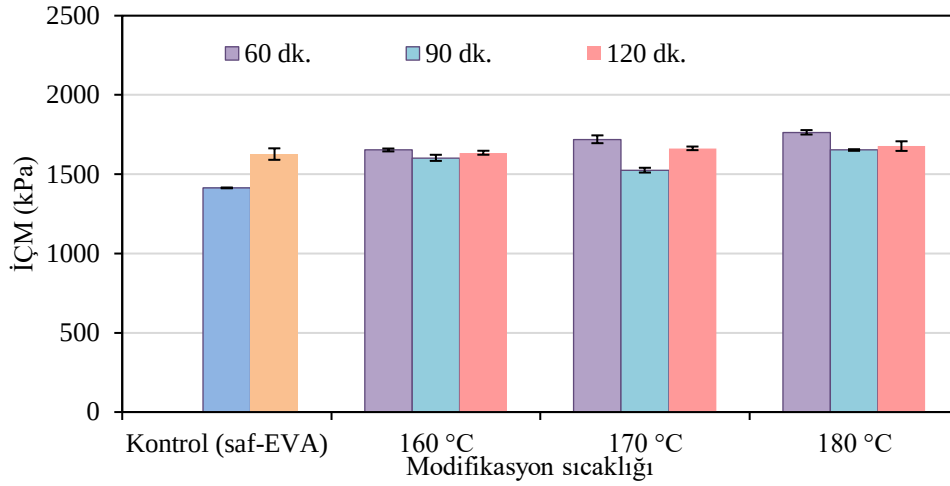
120 dakika karıştırma süresinde, 160 ve 170 °C karıştırma sıcaklıklarında üretilen PMAN'lerin koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değerleri, karıştırma hızlarının

artırılmasıyla artmıştır. Koşullandırılmış karışımlar içerisinde en yüksek İÇM değerlerine sırasıyla, 170 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında, 5000 dev./dk. karıştırma hızında; koşullandırılmamış karışımlar için 160 °C sıcaklıkta 5000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında ulaşılmıştır. EVA modifiye bitümle hazırlanan koşullandırılmamış karışım ve 160 °C - 3000 dev./dk.'da hazırlanan koşullandırılmamış PMAN karışımının çekme dayanımları birbirine çok yakın çıkmakla beraber PMAN karışımının dayanım değeri biraz daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç, EVA modifiye bitüme nanokil ilave edildiğinde modifikasyon sıcaklığı yaklaşık 10 °C düşürülse bile EVA modifiye bitüme eşit veya daha yüksek İÇM değerleri elde edilebileceğini göstermektedir. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış PMAN karışımları için genel bir değerlendirme yapıldığında daha düşük karıştırma sıcaklıklarında yüksek karıştırma hızı ile daha yüksek İÇM değerlerine erişilebileceği sonucu çıkarılabilir. Bununla birlikte düşük karıştırma hızında yüksek sıcaklıkta daha yüksek İÇM değerleri elde edilebilmektedir.

Saf bitüm, EVA modifiye bitüm ve EVA PMAN karışımlarıyla üretilen koşullandırılmış ve koşullandırılmamış örneklerin karıştırma hızları için indirekt çekme mukavemeti değerlerindeki değişimler hesaplanarak Şekil 71 – Şekil 76'da grafikler halinde sunulmuştur.

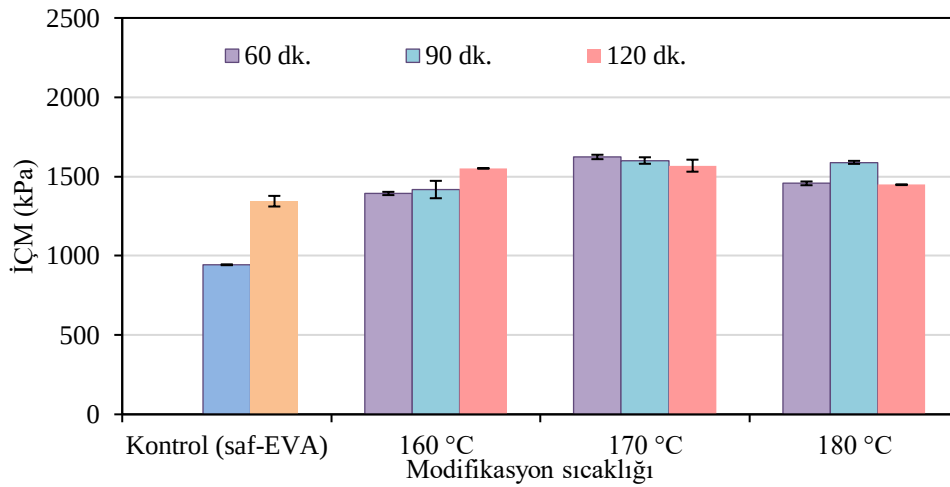


Şekil 71. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

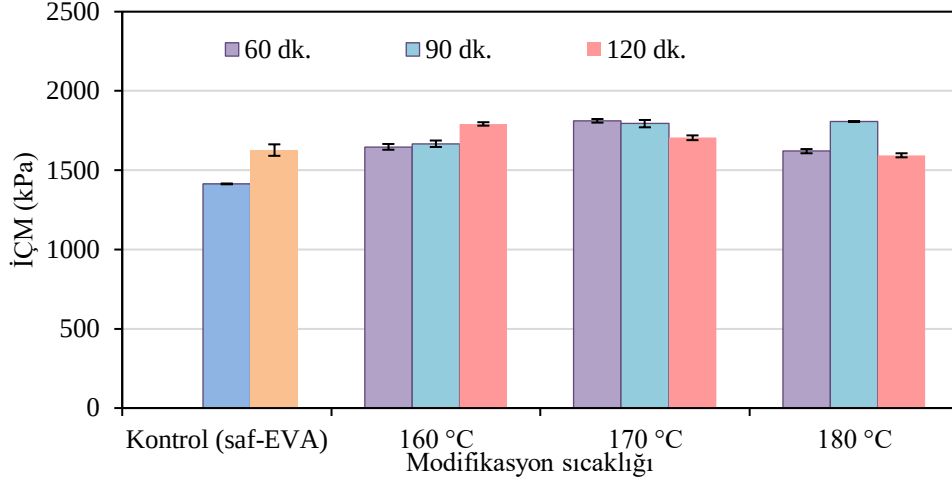


Şekil 72. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

3000 dev./dk.'da üretilen tüm PMAN ve kontrol karışımlarda koşullandırma ile karışımların İÇM değerleri azalmıştır. 160 °C'de yapılan PMAN'lerde hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış İÇM değerleri, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında azalırken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında artmıştır. 180 °C sıcaklıkta 60 dk.'da üretilen PMAN'lerin İÇM değerleri hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış karışımlarda en yüksek değeri göstermiştir. 160 °C'de yapılan modifikasyon hariç tüm PMAN modifikasyonlarında 60 dk. karıştırma süresinde en yüksek İÇM değerleri elde edilmiştir. Karıştırma sıcaklığının artmasıyla birlikte koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların İÇM değerleri artmıştır.

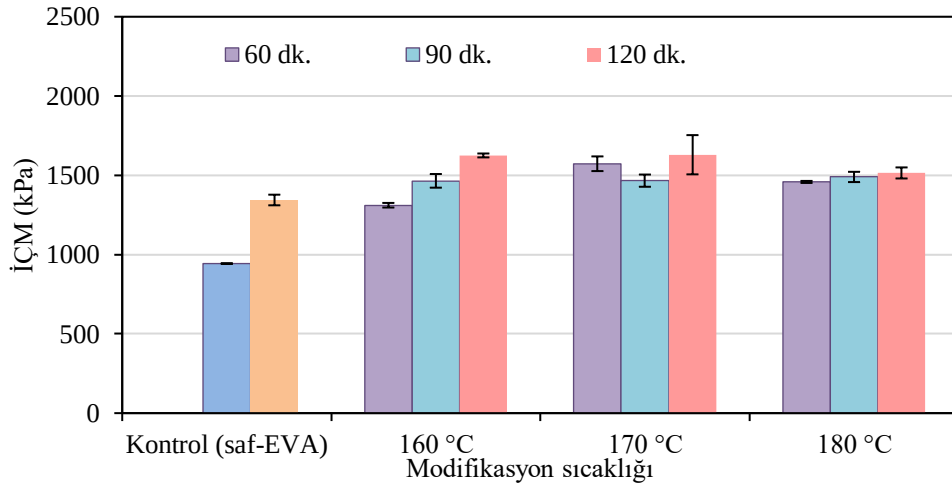


Şekil 73. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

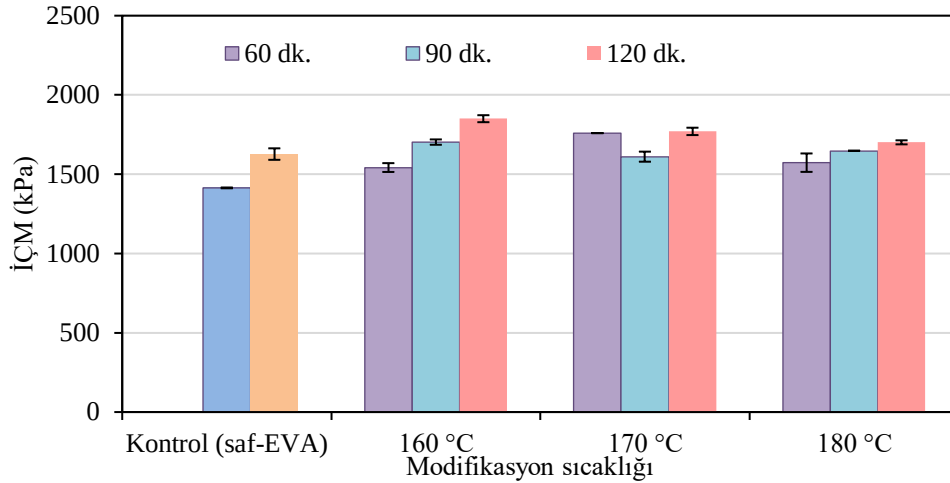


Şekil 74. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

4000 dev./dk.'da ve 160 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'lerin koşullandırılmış ve koşullandırılmamış örneklerinde karıştırma süresinin artırılmasıyla, karışımların İÇM değerleri artmıştır. Fakat, 170 °C sıcaklıkta hazırlanan koşullandırılmış ve koşullandırılmamış PMAN karışımlarında karıştırma süresinin artmasıyla karışımların İÇM değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. 180 °C'de yapılan PMAN'lerde koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değerleri, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında azalmıştır. 4000 dev./dk.'da üretilen tüm PMAN karışımlarında 170 °C'de ve 60 dk.'da yapılan modifikasyonda en yüksek İÇM değeri elde edilmiştir.



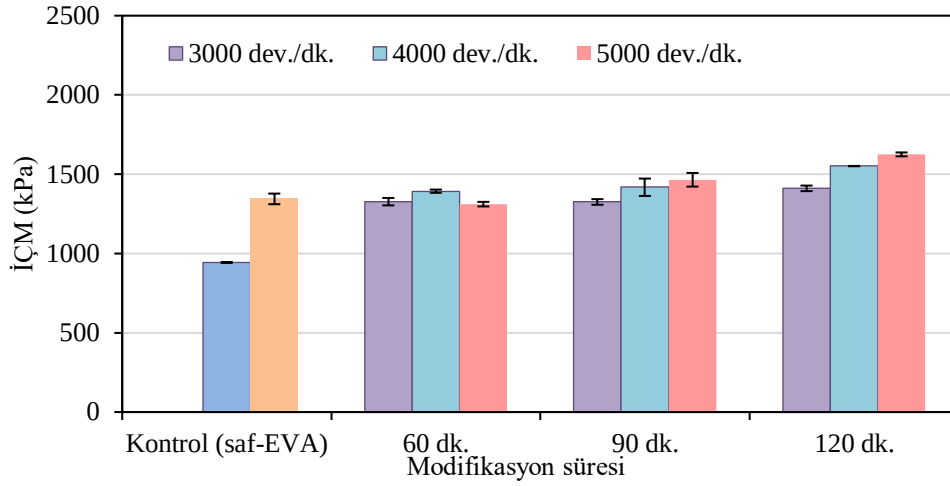
Şekil 75. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri



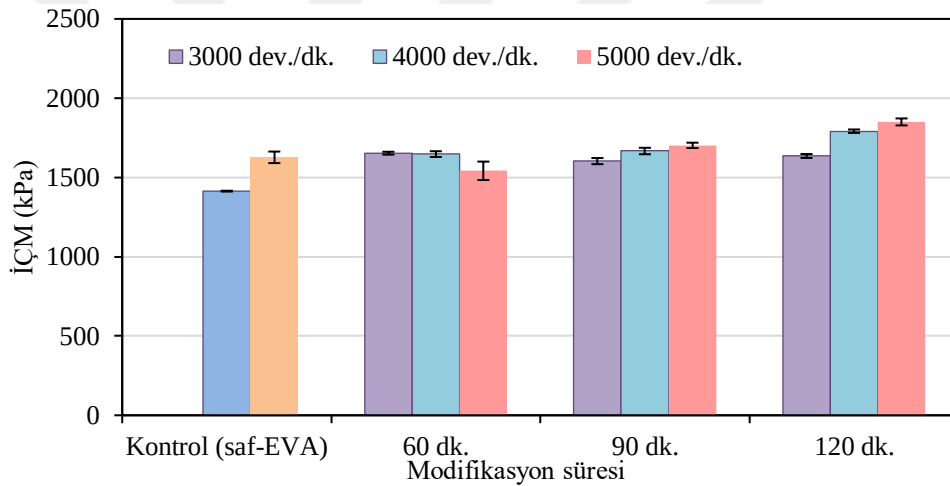
Şekil 76. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

5000 dev./dk. karıştırma hızında, 160 ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında üretilen koşullandırılmış ve koşullandırılmamış PMAN karışımlarında, karıştırma süresinin artmasıyla karışımların İÇM değerleri artmıştır. Ancak, 170 °C’de hazırlanan PMAN’lerin koşullandırılmış ve koşullandırılmamış İÇM değeri, karıştırma süresi 60 dakikadan 90 dakikaya çıkarıldığında azalırken, 90 dakikadan 120 dakikaya çıkarıldığında artmıştır. 5000 dev./dk.’da ve tüm karıştırma sıcaklıklarında üretilen PMAN’lerde 120 dakika karıştırma süresinde en yüksek İÇM değerine ulaşılmıştır. Ayrıca, koşullandırılmamış PMAN örneklerinde en yüksek çekme dayanımına 160 °C karıştırma sıcaklığında 120 dakika karıştırma süresinde; koşullandırılmış örneklerde 170 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında 120 dakika karıştırma süresinde erişilmiştir. 5000 dev./dk.’da yapılan PMAN’lerde 160 °C sıcaklıkta ve 120 dakika karıştırma süresinde maksimum indirekt çekme dayanımına ulaşılmıştır.

EVA PMAN karışımlarıyla üretilen koşullandırılmış ve koşullandırılmamış örneklerin karıştırma sıcaklıkları için hazırlanan İÇM grafikleri Şekil 77 – Şekil 82’de sunulmuştur.

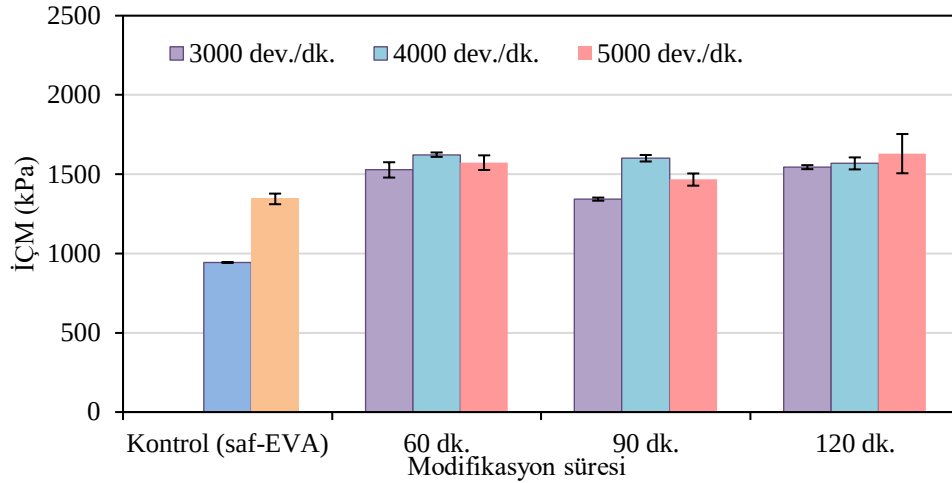


Şekil 77. 160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

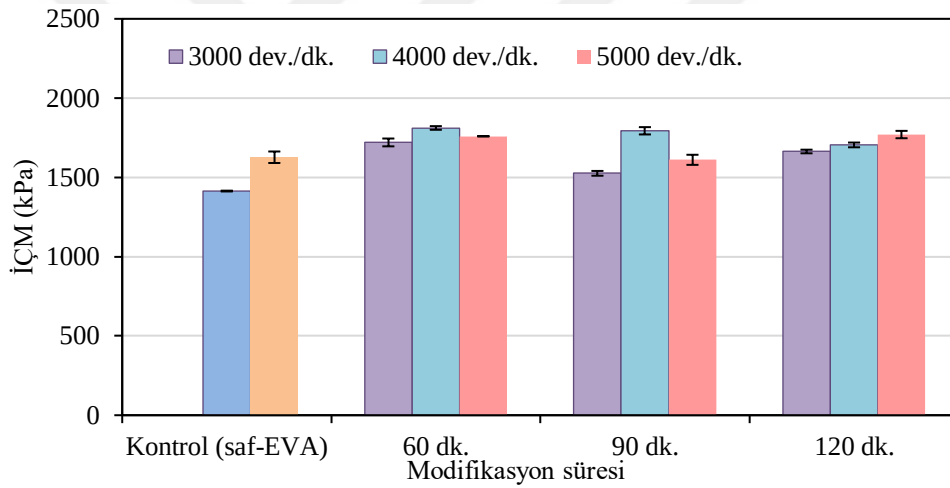


Şekil 78. 160 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

160 °C karıştırma sıcaklığında ve 4000 dev./dk. karıştırma hızında koşullandırılmış karışımların İÇM değerleri, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %1.8, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %9.4 artmıştır. 5000 dev./dk.'da üretilen PMAN'lerin koşullandırılmış İÇM değerleri karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %11.7, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %10.9 artmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin koşullandırılmamış ve koşullandırılmış İÇM değerleri karıştırma hızı artırıldığında artmıştır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış PMAN karışımlarında en yüksek İÇM değerlerine 120 dakika karıştırma süresinde sırasıyla 5000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında ulaşılmıştır.

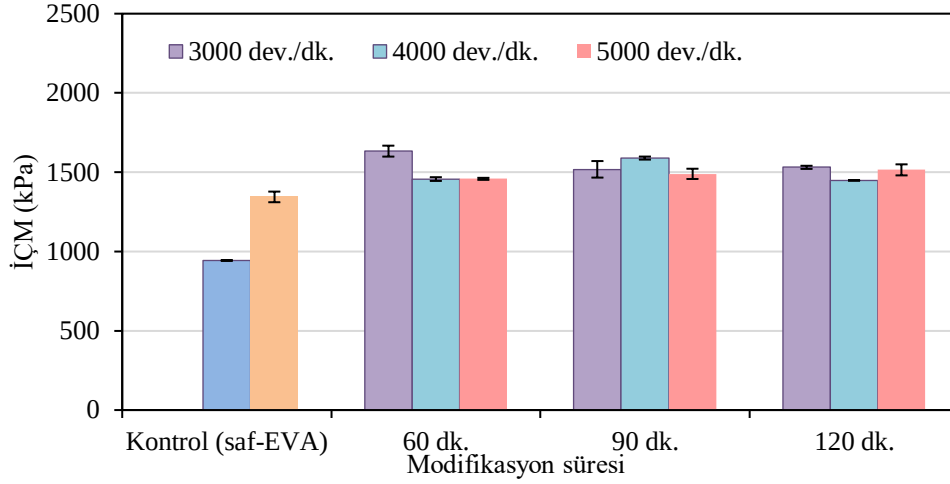


Şekil 79. 170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

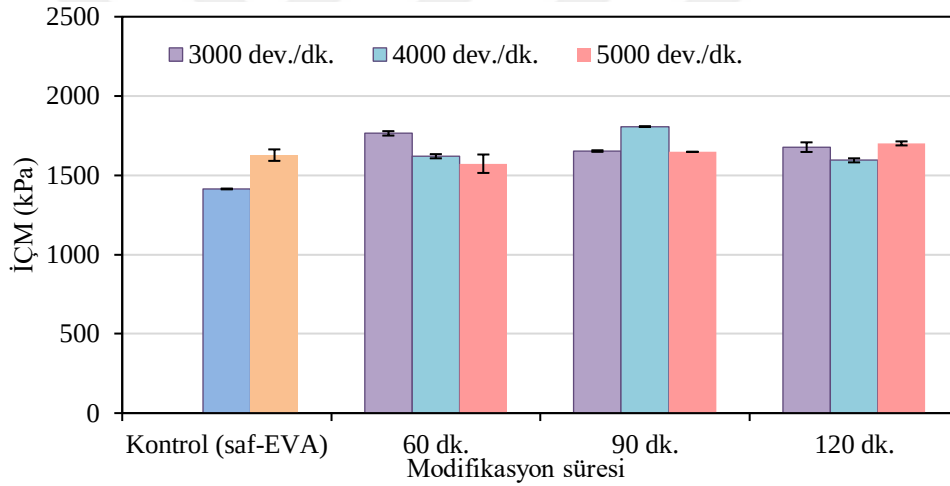


Şekil 80. 170 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

170 °C karıştırma sıcaklığında, 60 ve 90 dk. karıştırma sürelerinde üretilen EVA PMAN'lerin İÇM değerleri, karıştırma hızı 3000 dev.dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında artarken; 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında azalmıştır. 120 dk.'da üretilen PMAN'lerin İÇM değerleri karıştırma hızının artmasıyla artmıştır. 170 °C'de koşullandırılmamış örnekler için en yüksek çekme mukavemeti değeri 4000 dev./dk. - 60 dk.'da, koşullandırılmış örnekler için 5000 dev./dk. - 120 dk. ve 4000 dev./dk - 60 dk.'da gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, 170 °C modifikasyon sıcaklığında 4000 dev./dk. ve 60 dk. karıştırma süresi yüksek İÇM değerini elde etmek için yeterli olmaktadır.



Şekil 81. 180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri



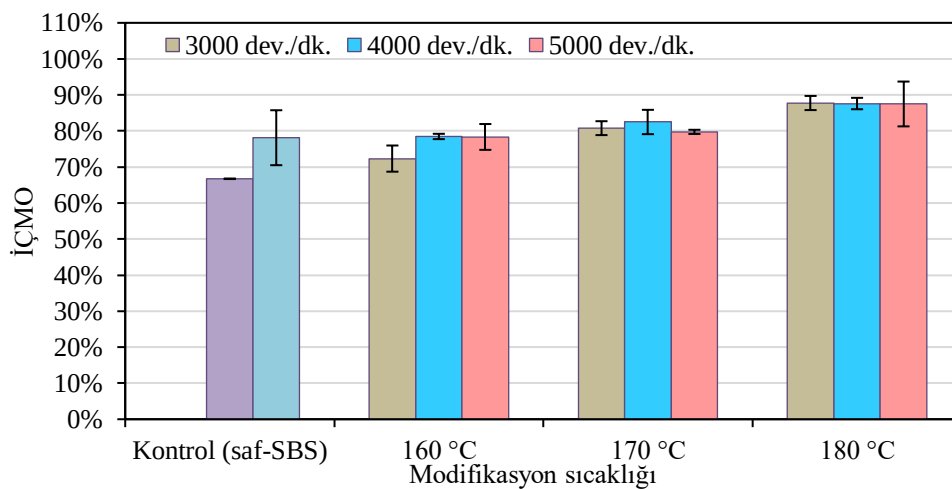
Şekil 82. 180 °C karıştırma sıcaklığı için koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların İÇM değerleri

180 °C karıştırma sıcaklığında koşullandırılmamış örneklerde sırasıyla, 90 dk. - 4000 dev./dk. ve 60 dk. - 3000 dev./dk. karıştırma parametrelerinde üretilen karışımların İÇM değerleri daha yüksek çıkmıştır. Koşullandırılmış örneklerde en yüksek İÇM değerleri, 60 dk. - 3000 dev./dk. ve 90 dk. - 4000 dev./dk. karıştırma parametrelerinde üretilen seçeneklerde çıkmıştır. Koşullandırılmamış örneklerde EVA modifiye karışımın İÇM değeri 60 dk. sürede 4000 dev./dk.'da üretilen PMAN karışımına eşit sayılabilecekken, koşullandırmadan sonra İÇM değeri tüm PMAN karışımlardan daha düşük çıkmıştır. Buradan hareketle, EVA modifiye asfalta nanokil ilavesinin koşullandırmadan sonra kontrol karışımlara göre İÇM değerlerinde daha fazla artış göstermesini sağlamıştır.

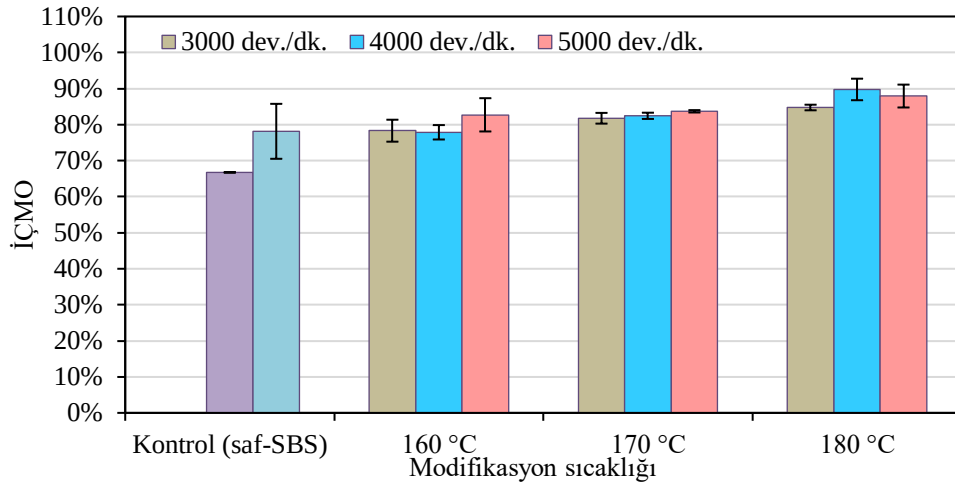
Tüm EVA PMAN ve SBS PMAN'le üretilen koşullandırılmamış karışımlarının 160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında yapılan modifikasyonlarında en yüksek ortalama İÇM değerlerine SBS PMAN karışımlarında ulaşılmıştır. Koşullandırılmış karışımların 160 °C'de yapılan modifikasyonlarında en yüksek ortalama İÇM değerine SBS PMAN karışımında; 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında yapılan modifikasyonlarında ise EVA PMAN karışımlarında elde edilmiştir.

SBS PMAN ve kontrol (saf ve SBS mod.) bitümlerle üretilen tüm karışımların su hasarına karşı dirençlerini belirlemek için karışımların koşullandırılmış indirekt çekme mukavemeti değeri koşullandırılmamış indirekt çekme mukavemeti değerine oranlanarak indirekt çekme mukavemeti oranları (İÇMO) elde edilmiştir.

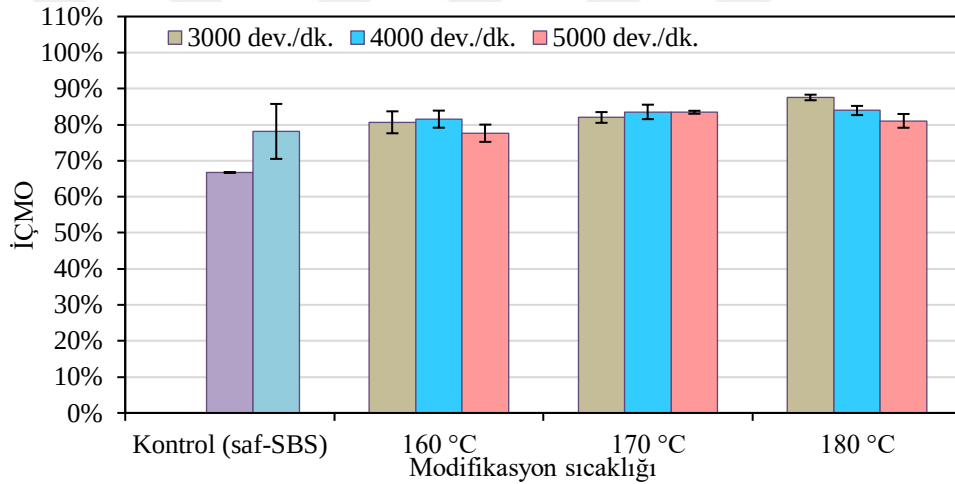
Asfalt karışımların su hasarına karşı direncinin bir göstergesi olarak koşullandırılmış test numunelerinde herhangi bir soyulma belirtisi olmadan 0.8 ve üzeri bir çekme mukavemeti oranı değeri gerekmektedir. Çekme mukavemeti oranının 0.8'in altında olması soyulma meydana gelebileceğini göstermektedir (Boz vd., 2021). Çoğu kurum sıcak karışım asfaltların su hasarına karşı direncinde minimum çekme mukavemeti oranını %80 olarak kullanmaktadır (Al-Shaybani, 2017). KGM teknik şartnamesinde asfalt betonu karışımları için indirekt çekme mukavemeti oranı minimum %80 kriteri olarak alınmaktadır (KTŞ, 2013). Bu bağlamda çalışmada karışımların su hasarına karşı direncini belirlemede %80 indirekt çekme mukavemeti oranı kabul edilebilir bir limit değeri olarak seçilmiştir. Kontrol (saf-SBS) ve SBS PMAN karışımların su hasarına karşı dirençlerini belirlemek için test sonuçlarından elde edilen grafikler Şekil 83 ve Şekil 91'de sunulmuştur.



Şekil 83. 60 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri



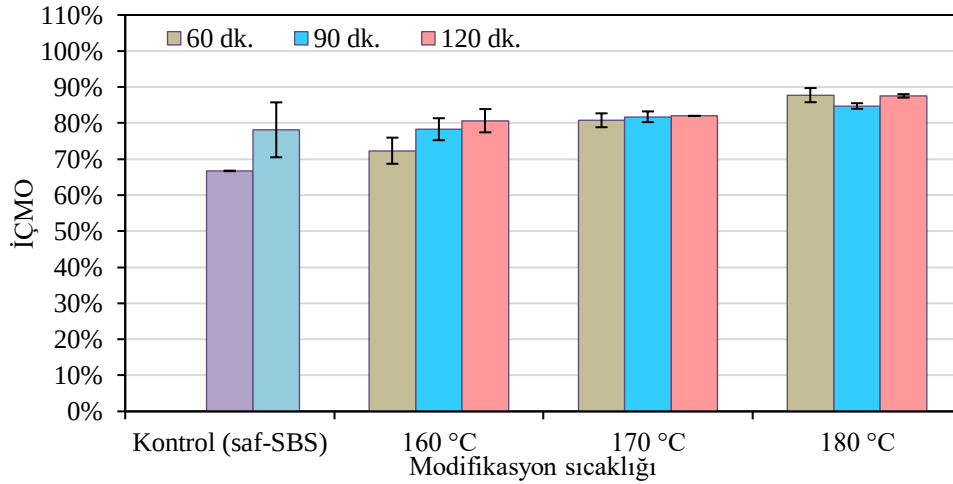
Şekil 84. 90 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri



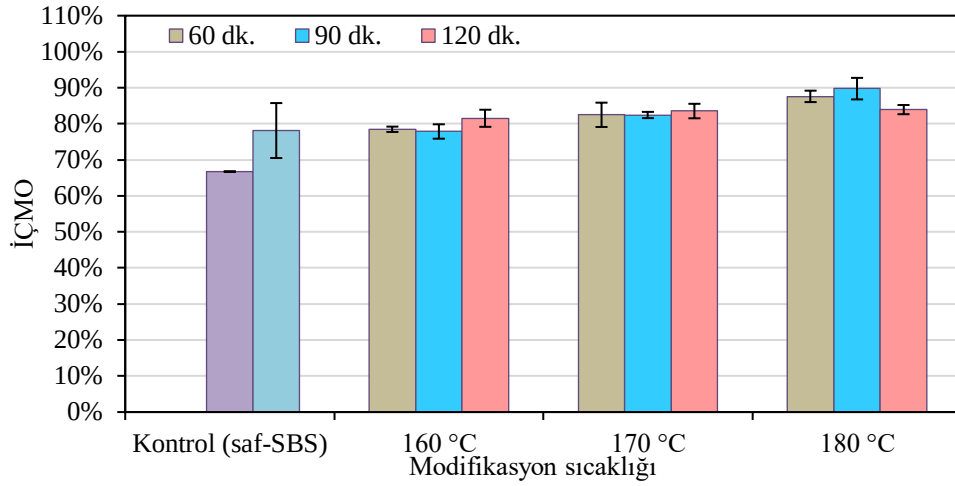
Şekil 85. 120 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri

SBS PMAN ve kontrol (saf ve SBS modifiye) bitümlerle üretilen karışımların 60 ve 90 dakika modifikasyon sürelerinde, herbir karıştırma hızı için yapılan modifikasyonlarında, karıştırma sıcaklığı artırıldığında, karışımların indirekt çekme mukavemeti oranları artmıştır. 60 dk. karıştırma süresinde, 170 °C ve 180° C sıcaklıklarda yapılan tüm modifikasyonlarda indirekt çekme mukavemeti oranları %80 sınırının üstünde kalırken, 160 °C’de yapılan modifikasyonlarda çekme mukavemeti oranları bu sınır değerinin altında kalmıştır. 90 dk. karıştırma süresinde, 170 °C ve 180 °C’de üretilen tüm SBS PMAN karışımlarında İÇM oranı %80’nin üstünde kalırken, 160 °C’de yapılan karışımlarda sadece 3000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen karışımlarda %80’nin altında ve bu değere yakın oranlar elde edilmiştir. 120 dk. modifikasyon süresinde, 3000 ve 4000

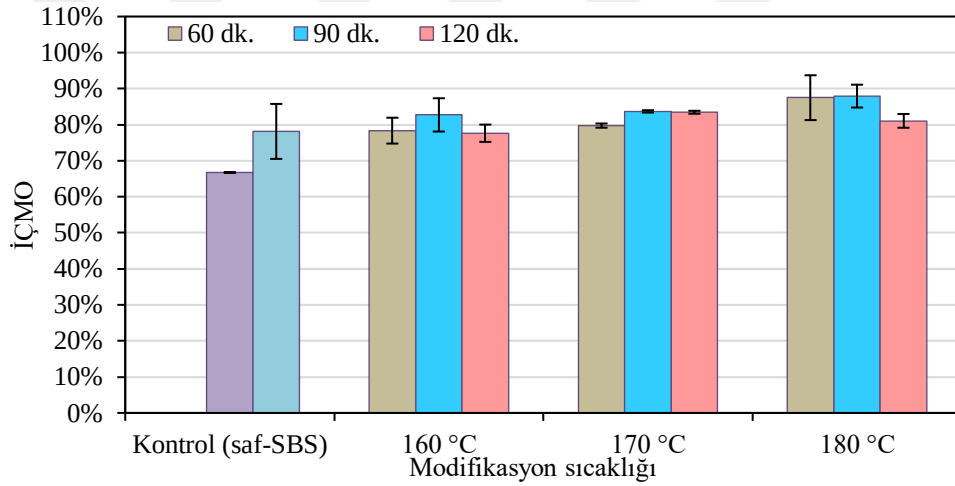
dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan PMAN karışımlarının İÇM oranları incelendiğinde, sıcaklık arttıkça karışımların indirekt çekme mukavemeti oranları artmıştır. Ancak 5000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan modifikasyonlarında sıcaklık 170 °C'ye çıkarıldığında İÇMO değeri artarken, 180 °C'ye çıkarıldığında ise azalmıştır. 120 dk.'da, 160 °C'de 5000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan modifikasyon hariç diğer tüm karıştırma parametreleriyle üretilen karışımların İÇM oranları %80 sınır değerinin üzerinde çıkmıştır. Tüm karıştırma sürelerinde üretilen PMAN karışımlarında en yüksek İÇM oranlarına 180 °C karıştırma sıcaklığında ulaşılmıştır. Karıştırma sıcaklığı azaldıkça PMAN karışımların İÇMO değerleri azalarak su hasarına karşı dirençleri de zayıflamıştır. SBS modifiye karışımın İÇMO değeri, 160 °C sıcaklıkta ve 60 dk. ve 90 dk. karıştırma sürelerinde üretilen PMAN karışımlarının İÇMO değerlerine oldukça yakın (60 dk. - 3000 dev./dk.'da daha fazla, 90 dk. - 5000 dev./dk. daha az) çıkmıştır. Buradan, SBS modifiye bitümün modifikasyon sıcaklığının yaklaşık 10 °C düşürülerek nanokil ilave edilmesi durumunda SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımdan daha yüksek İÇM oranlarının elde edilebileceği sonucuna varılmaktadır. Ancak, karıştırma süresinin 120 dakikaya çıkarılmasıyla 160 °C'de hazırlanan PMAN karışımlarının İÇMO değerleri artarak (5000 dev./dk. hariç) su hasarına karşı dirençleri SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımdan daha yüksek olmuştur.



Şekil 86. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri



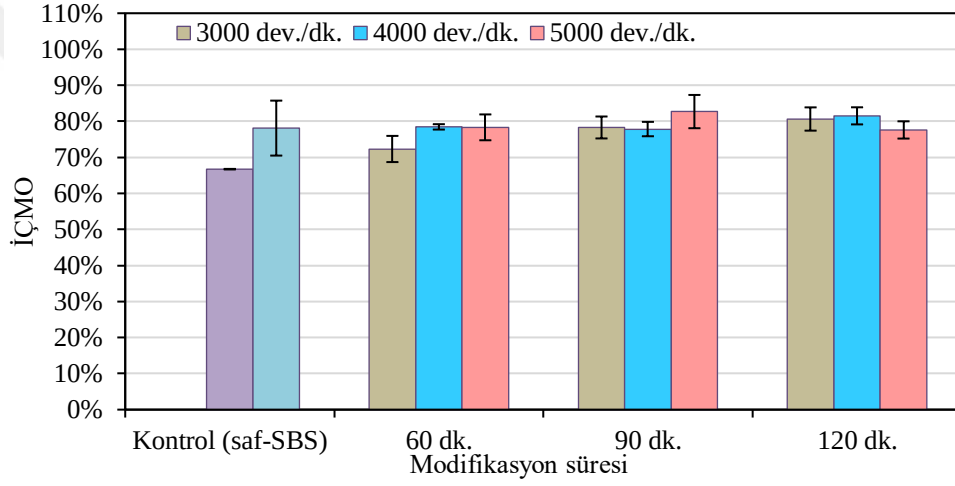
Şekil 87. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri



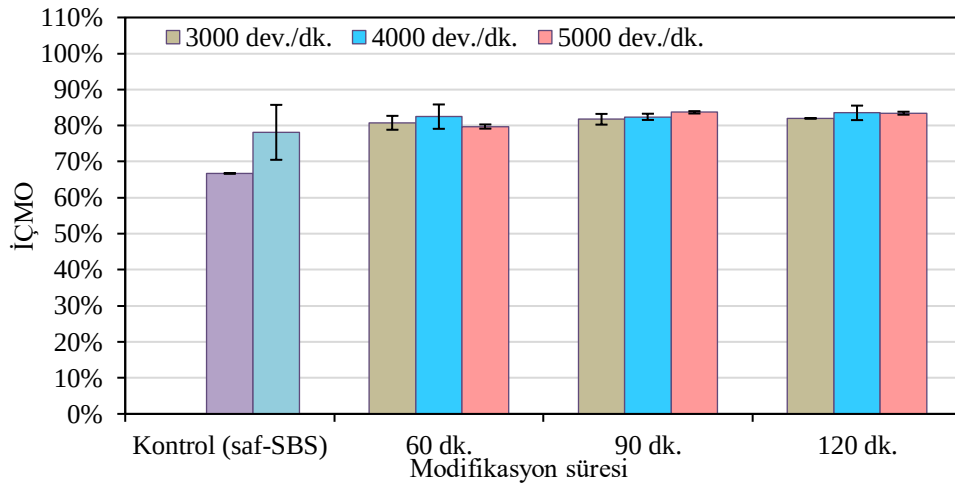
Şekil 88. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri

Şekil 86 - Şekil 88'den 3000 dev./dk. karıştırma hızında, 160 ve 170 °C'de üretilen SBS PMAN'lerin modifikasyon süresi artırıldığında karışımların İÇM oranları artmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında, tüm karıştırma sıcaklıkları için PMAN'lerin karıştırma süresi 90 dk.'ya çıkarıldığında İÇM oranları artarken, karıştırma süresi 120 dk.'ya çıkarıldığında azalmıştır. 170 °C ve 180 °C'de 3000 dev./dk. karıştırma hızında ve tüm karıştırma sürelerinde üretilen karışımların İÇMO değerleri %80'in üstünde çıkarken, 160 °C modifikasyonunda 60 ve 90 dk. modifikasyon sürelerinde hazırlanan karışımlarda bu sınırın altında kalan seçenekler olmuştur. Tüm karıştırma hızlarında, 60 ve 90 dakika karıştırma süreleri için karıştırma sıcaklığı arttıkça PMAN karışımların İÇMO değerleri ve

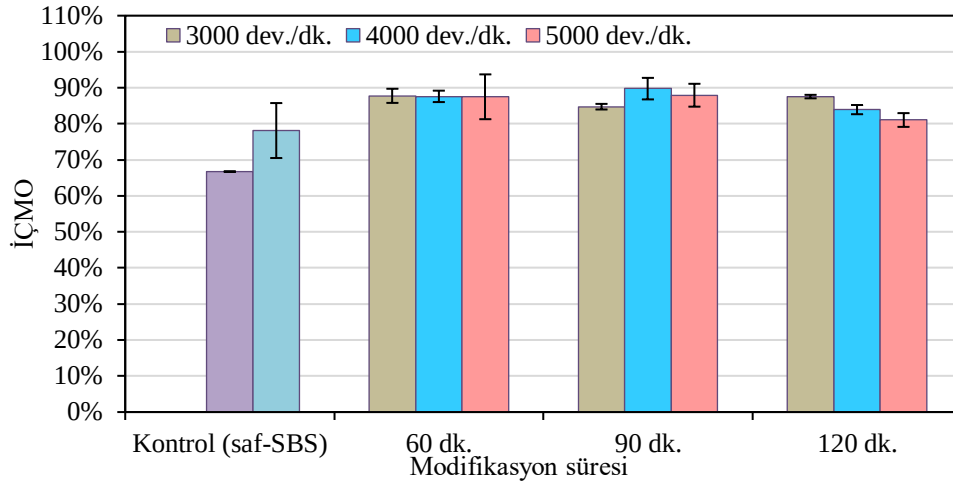
su hasarına karşı dirençleri artmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde, 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı artırıldığında İÇM oranları artmıştır ancak, 5000 dev./dk. karıştırma hızı için karıştırma sıcaklığı 180 °C'ye çıkarıldığında İÇM oranı azalmıştır. Kontrol (saf ve SBS) karışımların İÇMO değerleri %80'nin altında kalmış olup, SBS modifiye bitüm katkısız karışıma göre su hasarına karşı oldukça yüksek direnç göstermiştir. Bütün modifikasyon hızlarında üretilen PMAN karışımlarda en yüksek İÇMO değerlerine 180 °C karıştırma sıcaklığında erişilmiştir. SBS modifiye bitüme nanokil ilavesiyle özellikle 170 ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında elde edilen PMAN karışımlarının su hasarına karşı dirençleri yüksek çıkmıştır.



Şekil 89. 160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri



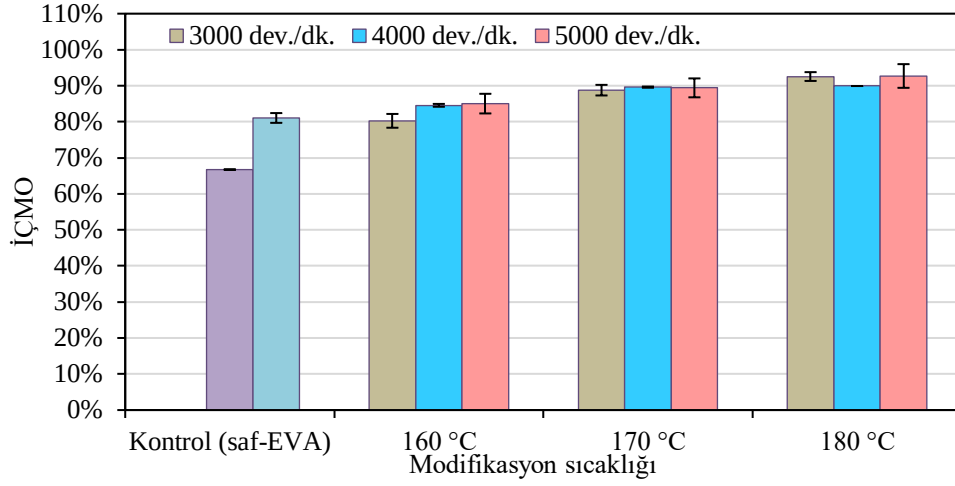
Şekil 90. 170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri



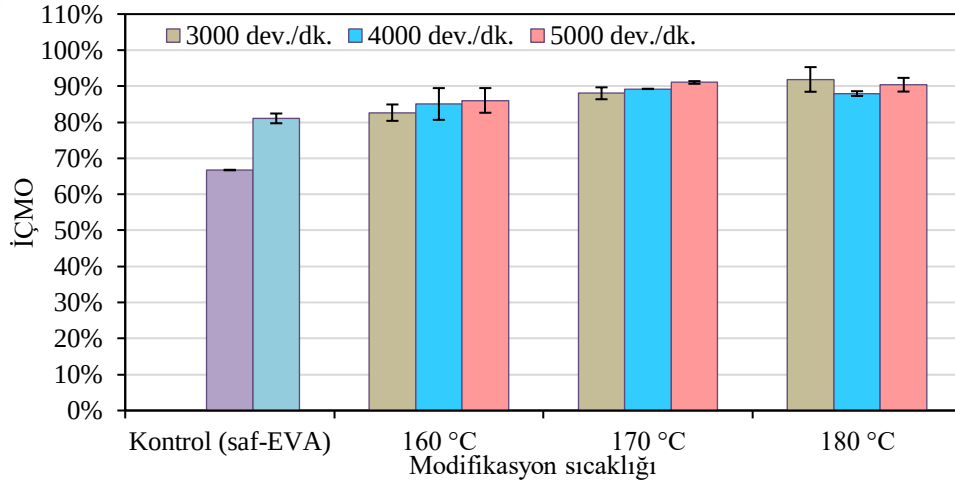
Şekil 91. 180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların İÇMO değerleri

160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen SBS PMAN karışımlarında su hasarına karşı en iyi dirençleri sırasıyla, 90 dk.'da 5000 dev./dk. karıştırma hızı; 120 dk.'da 4000 ve 3000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN karışımları vermiştir. 170 °C'de 90 ve 120 dakika modifikasyon sürelerinde 4000 ve 5000 dev./dk., 60 dakika modifikasyon süresinde ise 4000 ve 3000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan PMAN karışımları su hasarına karşı daha iyi direnç göstermiştir. 180 °C karıştırma sıcaklığında üretilen tüm SBS PMAN karışımları %80'in üzerinde indirekt çekme mukavemeti oranlarına sahiptir. 180 °C ve 60 dakika karıştırma süresinde PMAN karışımlarının indirekt çekme mukavemeti oranları birbirine çok yakınken, karıştırma süresi artırıldığında karışımların İÇM oranları değişmiştir. 160 ve 170 °C karıştırma sıcaklıklarında 90 dk. - 5000 dev./dk. ve 120 dk. - 4000 dev./dk.; 180 °C sıcaklığında 90 dk. - 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma seçeneklerinde üretilen karışımlar su hasarına karşı yüksek direnç göstermişlerdir.

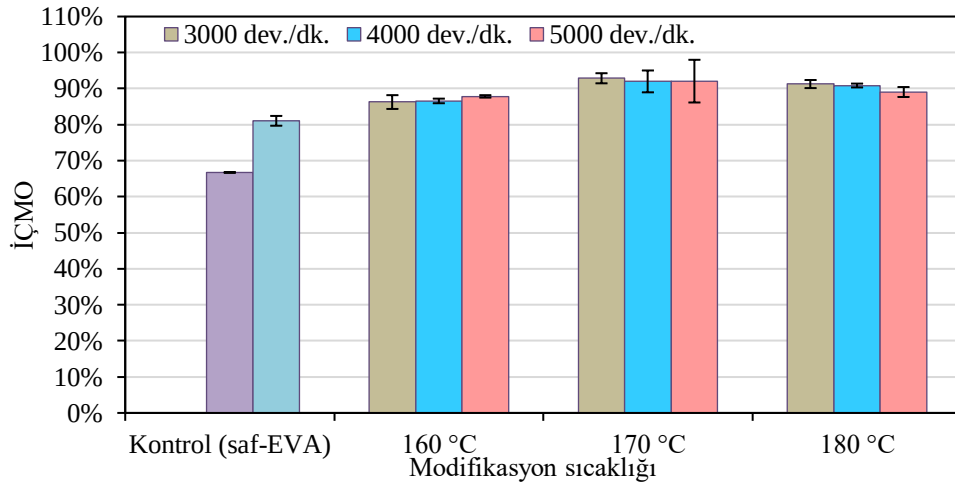
EVA PMAN ve kontrol (saf ve SBS modifiye) bitümlerle üretilen karışımların su hasarına karşı dirençlerini değerlendirmek için indirekt çekme mukavemeti oranlarına ait grafikler Şekil 92 – Şekil 100'de gösterilmiştir.



Şekil 92. 60 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri

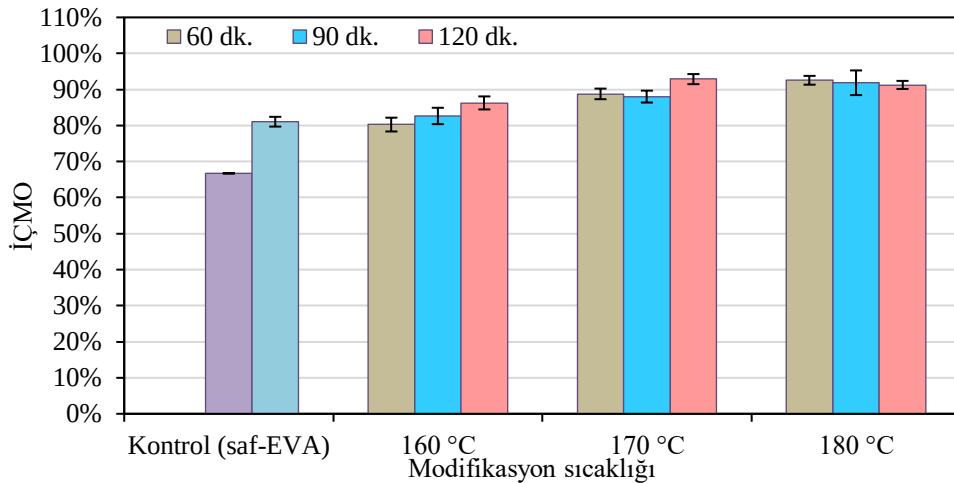


Şekil 93. 90 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri

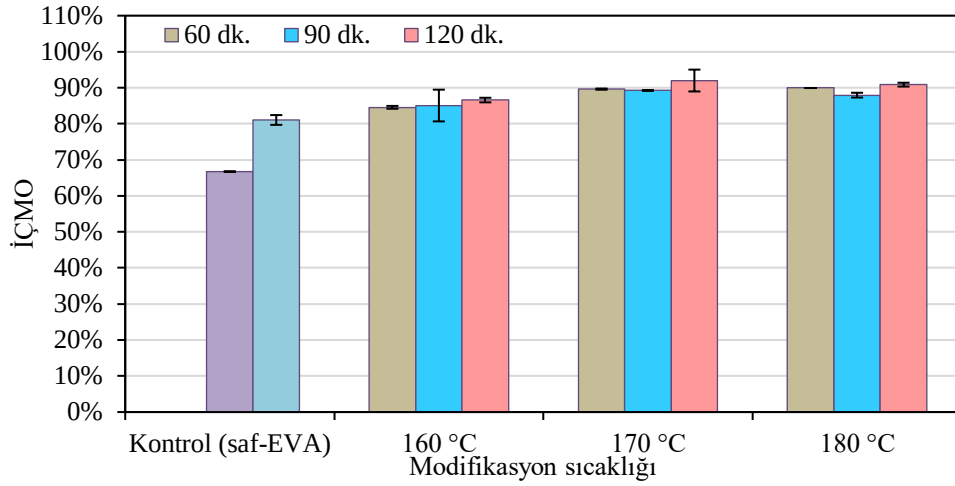


Şekil 94. 120 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri

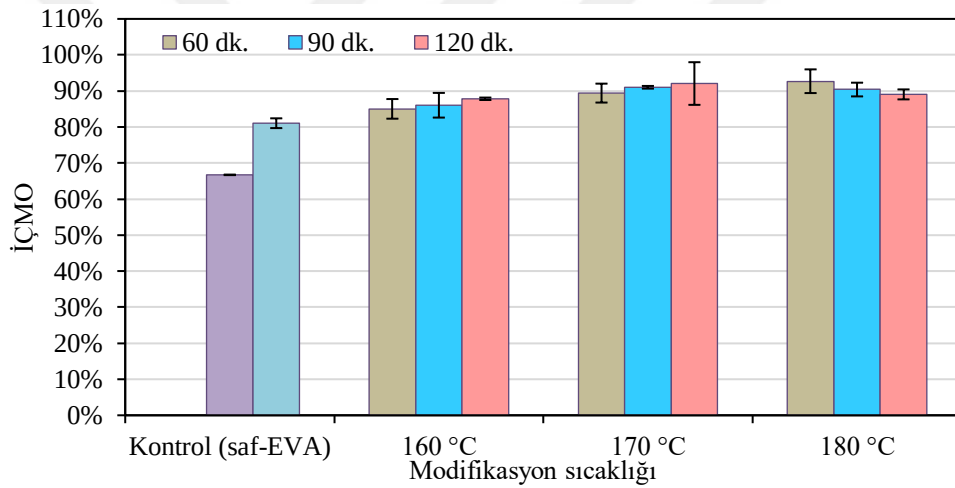
60 dk., 90 dk., ve 120 dk., karıştırma sürelerinde hazırlanan modifiye karışımların tümünde İÇMO değeri %80'in üzerinde çıkmıştır. Şekil 92 - Şekil 94'ten 160 °C'de üretilen EVA PMAN karışımlarında karıştırma hızları arttıkça karışımların İÇM oranlarının arttığı görülmektedir. 60 dk. ve 90 dk. karıştırma sürelerinde ortalama İÇMO değerleri irdelendiğinde en yüksek 180 °C'de, 120 dk.'da ise 170 °C'de üretilen PMAN karışımları sağlamıştır. 60 ve 90 dk. karıştırma sürelerinde üretilen EVA PMAN karışımlarının 3000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan modifikasyonlarında karıştırma sıcaklığının artırılması karışımların İÇMO değerlerini artırmıştır. Bütün karıştırma sürelerinde ve 4000 dev./dk karıştırma hızında üretilen PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı 170 °C'ye çıkarıldığında İÇM oranları artarken, karıştırma sıcaklığı 180 °C olduğunda İÇM oranları azalmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan EVA PMAN'ler için 60 ve 90 dk. karıştırma sürelerindeki modifikasyonlar için karıştırma sıcaklığı artırıldığında karışımların indirekt çekme mukavemeti oranları artmıştır. 120 dk. karıştırma süresi ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında ise karıştırma sıcaklığı 170 °C'ye çıkarıldığında İÇMO değeri artarken, 180 °C'ye çıkarıldığında İÇMO değeri azalmıştır. EVA modifiye karışım sadece 60 dk. karıştırma süresi ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımından daha yüksek İÇM oranı göstermiş olup, diğer tüm PMAN karışımlarından daha düşük İÇMO değerine sahip olmuştur. Buradan, EVA modifiye bitüme nanokil ilavesiyle elde edilen PMAN karışımlarının su hasarına karşı dirençlerinin arttığı sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 95. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri



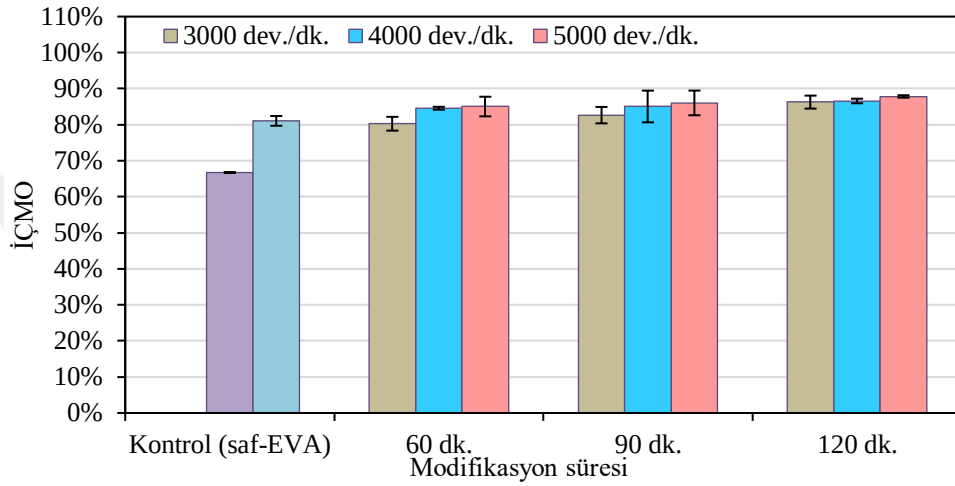
Şekil 96. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri



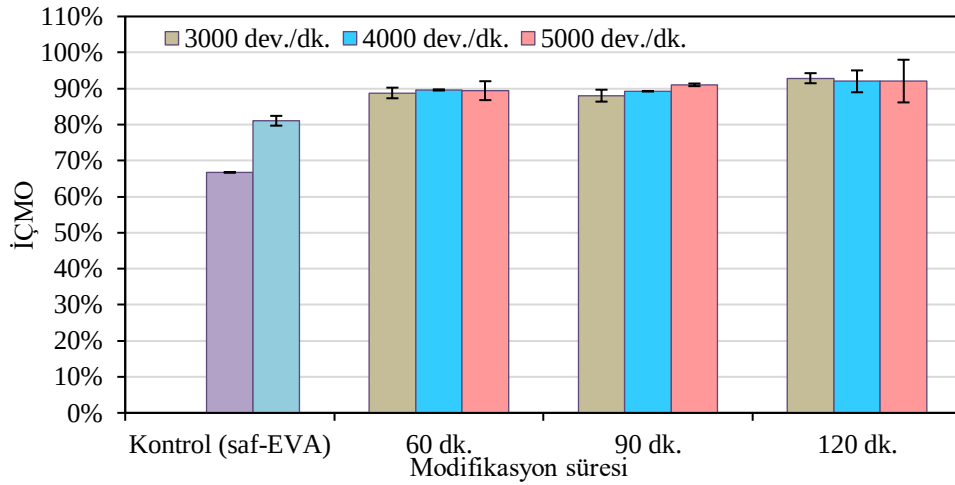
Şekil 97. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri

Şekil 95 - Şekil 97'den 160 °C karıştırma sıcaklığında, 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. üretilen EVA PMAN karışımlarında karıştırma süresi arttıkça karışımların İÇM oranları artmıştır. 170 °C'de hazırlanan tüm EVA PMAN karışımları için, 120 dk. karıştırma süresinde en yüksek İÇMO değerleri elde edilmiştir. 180 °C'de, 3000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında modifiye edilen karışımlarda karıştırma süresi artırıldığında karışımların İÇM oranları azalmıştır. Tüm karıştırma hızlarında üretilen PMAN karışımları için 60 dakika karıştırma süresinde karıştırma sıcaklığının artırılması karışımların İÇMO değerlerinin artmasını sağlamıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında ve 90 dk. karıştırma süresinde üretilen EVA PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı artırıldığında

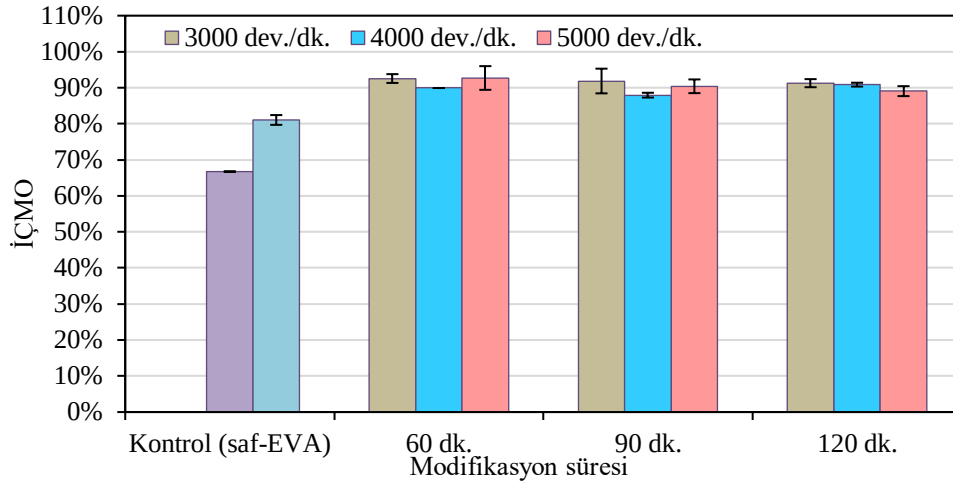
İÇMO değerleri artmıştır. 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında, 90 dk. karıştırma süresinde modifiye edilen PMAN karışımlarının karıştırma sıcaklığı 170 °C olduğunda İÇM oranları artarken, karıştırma sıcaklığı 180 °C'ye çıkarıldığında İÇMO değerleri azalmıştır. Karıştırma süresi 120 dk. olduğunda PMAN'lerin karıştırma sıcaklığının artırılması 170 °C karıştırma sıcaklığı için İÇMO değerlerini artırmış, 180 °C için İÇMO değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.



Şekil 98. 160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri



Şekil 99. 170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların İÇMO değerleri



Şekil 100. 180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA/PMAN karışımların İÇMO değerleri

Şekil 98 - Şekil 100'den 160 °C karıştırma sıcaklığında, 60, 90 ve 120 dakika karıştırma sürelerinde karıştırma hızı arttıkça PMAN karışımların İÇM oranları artmıştır. 160 ve 170 °C karıştırma sıcaklıklarındaki en yüksek çekme mukavemeti oranları 120 dakika karıştırma süresinde yapılan modifikasyonlarda olmuştur. 180 °C'deki en yüksek İÇM oranlarına ise 60 dakika karıştırma süresinde yapılan modifikasyonlarda ulaşılmıştır. 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında, karıştırma süreleri artırıldığında karışımların çekme mukavemeti oranlarında artış gözlemlenmiştir. 160 ve 170 °C sıcaklıklarda, 5000 dev./dk. karıştırma hızında modifikasyon süresi artırıldığında karışımların İÇMO değerleri artarken, 180 °C'de modifikasyon süresi artırıldığında İÇMO değerleri azalmıştır. 170 ve 180 °C sıcaklıklarda PMAN karışımlarından elde edilen en düşük İÇMO değerlerine bakıldığında; EVA modifiye bitüme nanokil ilave edilmesi durumunda modifikasyon sıcaklığı yaklaşık 10 °C düşürülse bile EVA modifiye bitümden daha yüksek İÇM oranları elde edilebilmektedir.

SBS ve EVA modifiye bitümlerle hazırlanan kontrol karışımlarda, EVA modifiye karışım yaklaşık %4 oranında daha fazla su hasarına karşı direnç sergilemiştir. SBS/PMAN ve EVA/PMAN karışımlarının su hasarına karşı gösterdikleri dirençler incelendiğinde ise her bir karıştırma sıcaklığı için ortalama İÇMO değerlerinde en yüksek değerler EVA/PMAN karışımlarına aittir.

Farklı oranlarda SBS'e (%5, %4, %3, %2 ve %1) %2 veya %3 NC ilavesiyle elde edilen SBS/NC/bitüm nanokompozit karışımının su hasarı direncinin irdelendiği çalışmada, nanokil oranı %3 olarak tutulduğunda en yüksek su hasarı direnci %3 SBS - %3 NC

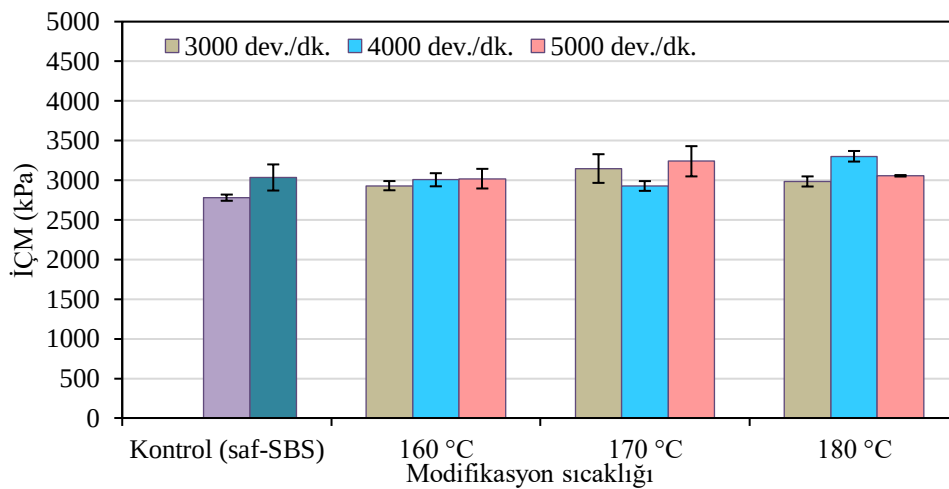
modifiyeli karışımlarda oluşmuştur. %3 SBS ile %2 NC; %3 SBS - %3 NC modifikasyonuna göre daha yüksek su hasarı direnci göstermiştir (Ayyıldız vd., 2021).

%0.5, %0.75 ve %1 oranlarında RET modifiye bitümle hazırlanan sıcak karışım asfalt kaplamaların suya karşı hassasiyetinin araştırıldığı çalışmada indirekt çekme mukavemeti oranı sonuçları, RET katkısının kaplamaların suya karşı hassasiyetinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu göstermiştir. %0.75 - %1 RET katkısıyla hazırlanan modifiye bitümlü karışımların, kaplamaların adezyon ve kohezyon yeteneğini arttırmada etkili olduğu görülmüştür (Geçkil, 2021). Bir başka çalışmada karışımların su hasarına karşı duyarlılığının Elvaloy ilavesiyle büyük ölçüde azaldığı belirtilmiştir (Yıldırım, 2007).

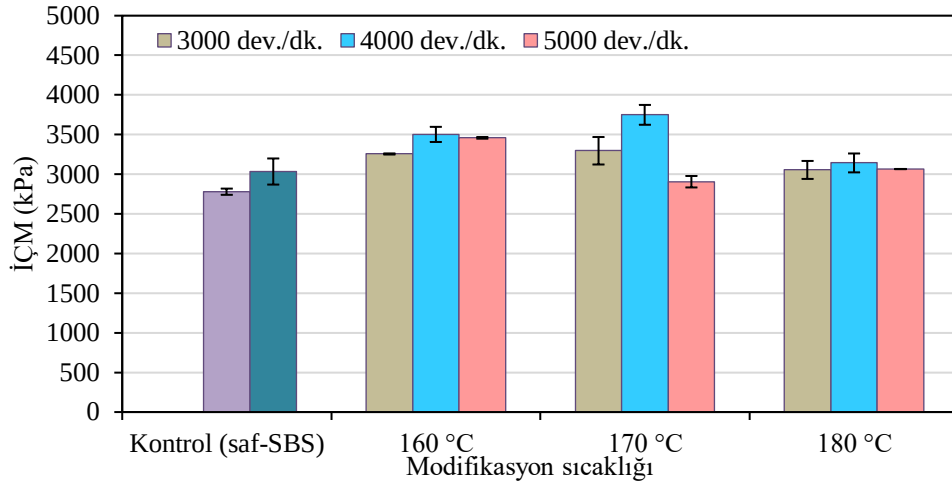
3.3. İndirekt Çekme Mukavemeti Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kontrol (saf bitüm, SBS modifiye bitüm, EVA modifiye bitüm), SBS PMAN ve EVA PMAN ile üretilen asfalt karışım örnekleri düşük sıcaklık çatlaması yönünden irdelenmiştir. İndirekt çekme mukavemeti ile yapılan değerlendirmede koşullandırılmış örnekler kullanılmıştır. Örnekler, deney başlatılmadan önce 19 saat 0 °C sıcaklıktaki kabinde bekletilmiş, ardından deney başlatılmıştır.

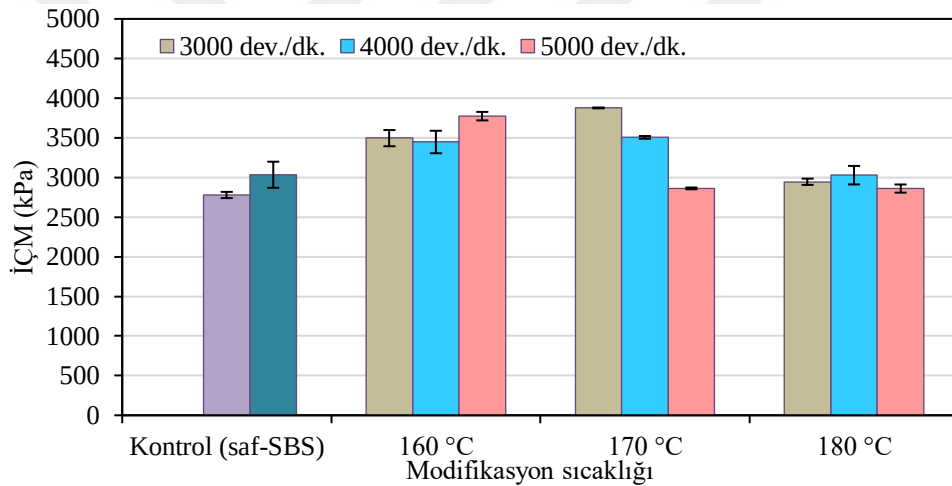
SBS PMAN ve kontrol (saf bitüm ve SBS modifiye bitüm) asfaltlarla hazırlanan örneklerin düşük sıcaklıkta yapılan indirekt çekme mukavemeti test sonuçları üçer örneğin değerleri ortalaması alınarak grafikler halinde Şekil 101 - Şekil 109'da verilmiştir.



Şekil 101. 60 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



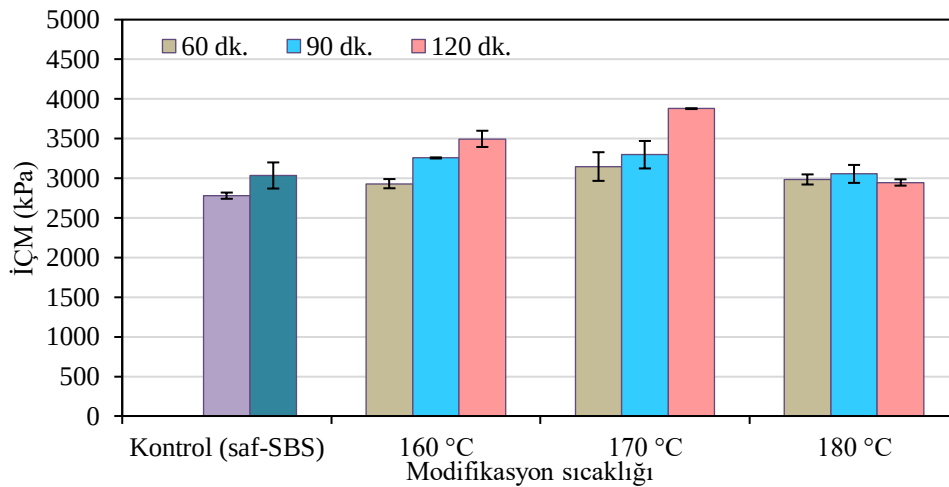
Şekil 102. 90 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların 0 °C’deki İÇM değerleri



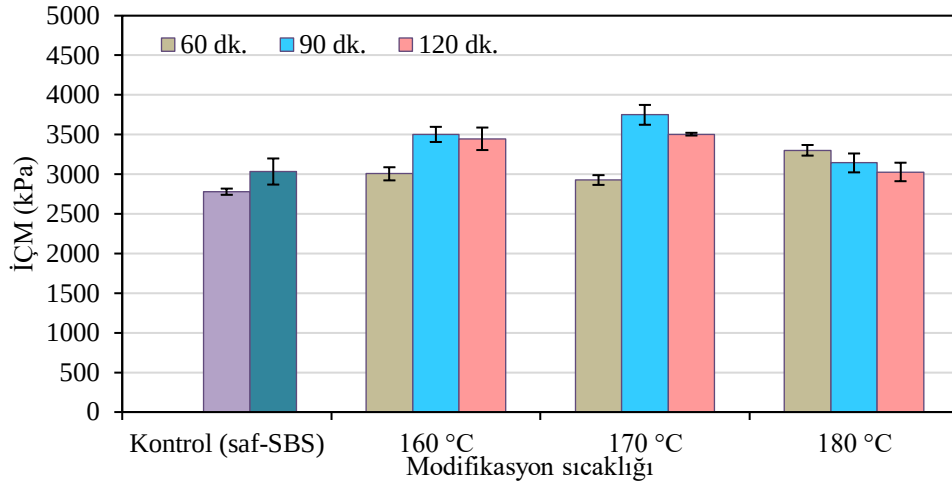
Şekil 103. 120 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların 0 °C’deki İÇM değerleri

60 dakika karıştırma süresinde ve 160 °C’de yapılan SBS PMAN’lerde karıştırma hızının 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarılmasıyla İÇM değeri yaklaşık %2.5; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarılmasıyla İÇM değeri %0.5 oranında artmıştır. İÇM değerlerinin artması PMAN karışımlarının düşük sıcaklık çatlama direncinin arttığını göstermektedir. 180 °C sıcaklıkta tüm karıştırma sürelerinde üretilen PMAN’lerde karıştırma hızı 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değerleri artarken; 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değerleri azalmıştır. 170 °C sıcaklıkta, 90 dakika karıştırma süresinde yapılan PMAN’lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %13.7 düzeyinde artarken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya

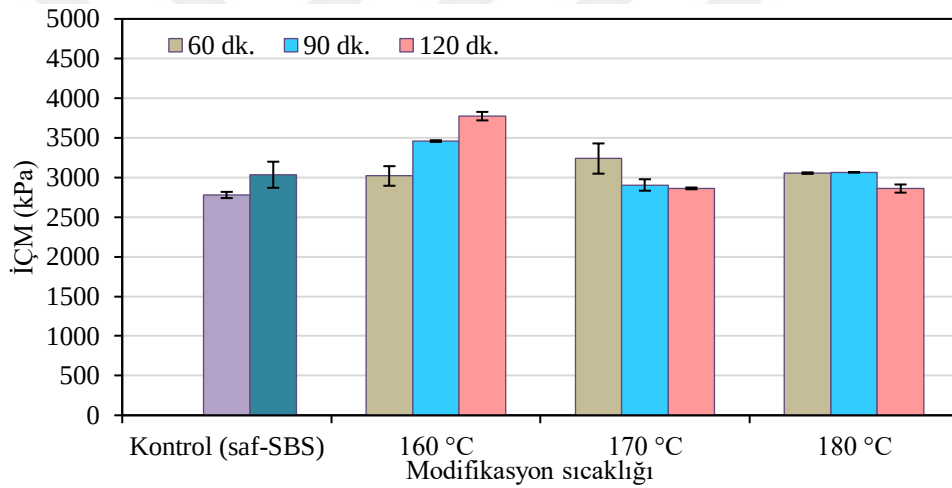
çıkarıldığında İÇM değeri %22.5 oranında azalmıştır. 120 dakika karıştırma süresi ve 170 °C karıştırma sıcaklığında yapılan modifikasyonlarda karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değerinde yaklaşık %9.6 oranında; karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise İÇM değerinde %18 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Bütün karıştırma sürelerinde ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan SBS PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı 170 °C'ye çıkarıldığında İÇM değerleri artarken, sıcaklık 180 °C'ye çıkarıldığında İÇM değerleri azalmıştır. 90 ve 120 dk. karıştırma süreleri ve 4000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan modifikasyonlarda karıştırma sıcaklığının 170 °C'ye çıkarılması durumunda İÇM değerleri artarken, 180 °C'ye çıkarılması durumunda İÇM değerleri azalmıştır. 60 dk. karıştırma süresinde en yüksek düşük sıcaklık çatlama dirençlerine sırasıyla, 180 °C - 4000 dev./dk. ve 170 °C - 5000 dev./dk.'da; 90 dk. karıştırma süresinde ise en yüksek dirençlere 170 °C - 4000 dev./dk. ve 160 °C - 4000 dev./dk.; 120 dk. karıştırma süresinde ise 170 °C - 3000 dev./dk. ve 160 °C - 5000 dev./dk. karıştırma parametreleriyle hazırlanan karışımlarda ulaşılmıştır. 60 dk. karıştırma süresinde 160 °C'de ve 120 dk. karıştırma süresinde 180 °C sıcaklıkta hazırlanan SBS PMAN karışımlarının İÇM değerleri SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımdan daha düşük çıkmıştır. Buradan, karıştırma süresinin yüksek ve aynı zamanda karıştırma sıcaklığının düşük seçildiği durumlarda SBS PMAN karışımlarının düşük sıcaklık çatlama dirençlerinin genellikle arttığı söylenebilmektedir. Ancak düşük karıştırma süresi seçildiği durumda, daha yüksek karıştırma sıcaklığında daha iyi çatlama dirençleri elde edilebilmektedir.



Şekil 104. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



Şekil 105. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların 0 °C’deki İÇM değerleri



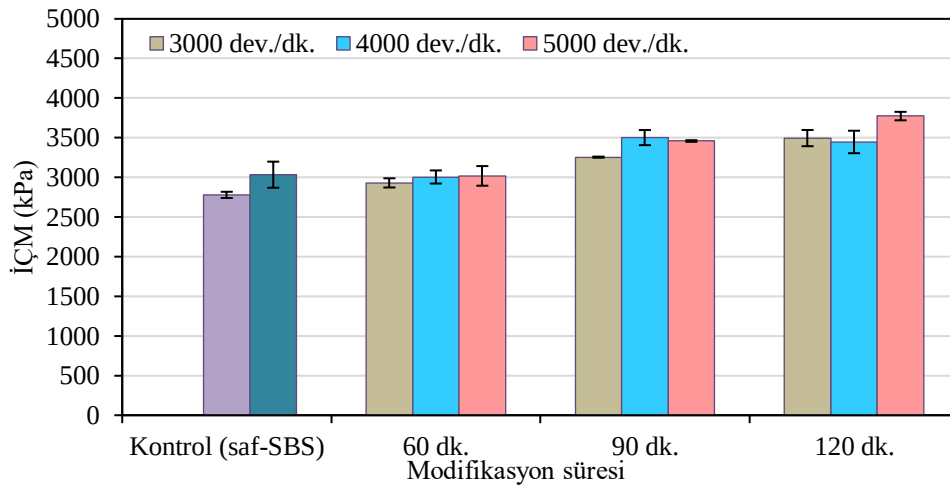
Şekil 106. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların 0 °C’deki İÇM değerleri

160 °C sıcaklıkta ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan modifikasyonda karıştırma süresi 60 dakikadan 90 dakikaya çıkarıldığında yaklaşık %11 düzeyinde, 120 dakikaya çıkarıldığında ise %7 düzeyinde İÇM değerlerinde artış meydana gelmiştir. 170 °C sıcaklıkta üretilen PMAN modifikasyonlarında karıştırma süresi 60 dakikadan 90 dakikaya çıkarıldığında yaklaşık %4.7 oranında, 120 dakikaya çıkarıldığında %17.6 oranında karışımların düşük çatlama dirençlerinde artış gözlenmiştir. 180 °C’de ise karıştırma süresi 60 dakikadan 90 dakikaya çıkarıldığında karışımın düşük sıcaklık çatlama direnci %2.4 oranında artarken, 90 dakikadan 120 dakikaya çıkarıldığında çatlama direnci %3.5 oranında azalmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen tüm SBS PMAN karışımlarında en

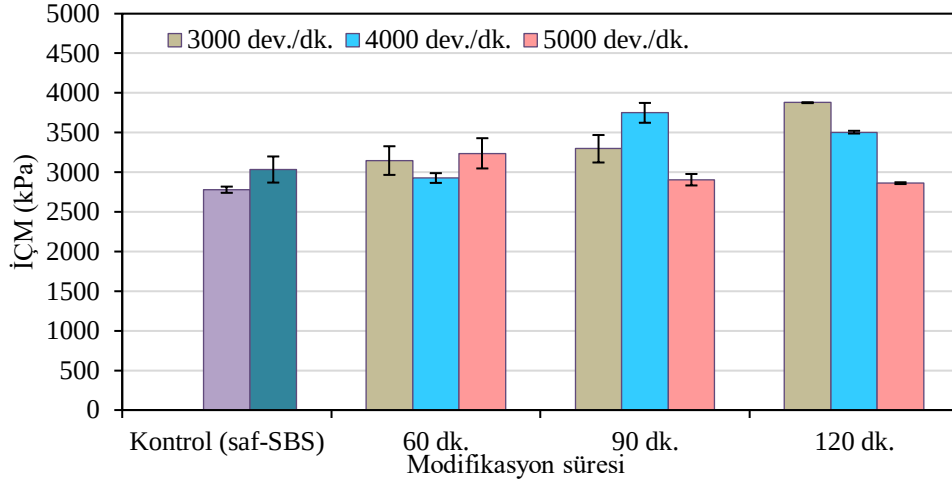
yüksek çatlama dirençleri sırasıyla, 120 dk. karıştırma hızında 170 °C ve 160 °C sıcaklıklarda üretilen karışımlarda görülmüştür.

160 °C karıştırma sıcaklığı ve 4000 dev./dk.'da, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında karışımın İÇM değeri %16.5 oranında artarken; karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %1.6 oranında azalmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında, karıştırma süresinin 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarılmasıyla çekme mukavemeti değerinde %28.1 oranında bir artış, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarılması durumunda ise %6.5 oranında bir azalma meydana gelmiştir. 180 °C' karıştırma sıcaklığında, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında SBS PMAN karışımın İÇM değeri %4.8, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %3.6 oranında azalmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarında en yüksek çatlama dayanımlarını 90 dakika karıştırma süresinde 170 ve 160 °C'de üretilen PMAN karışımları vermiştir.

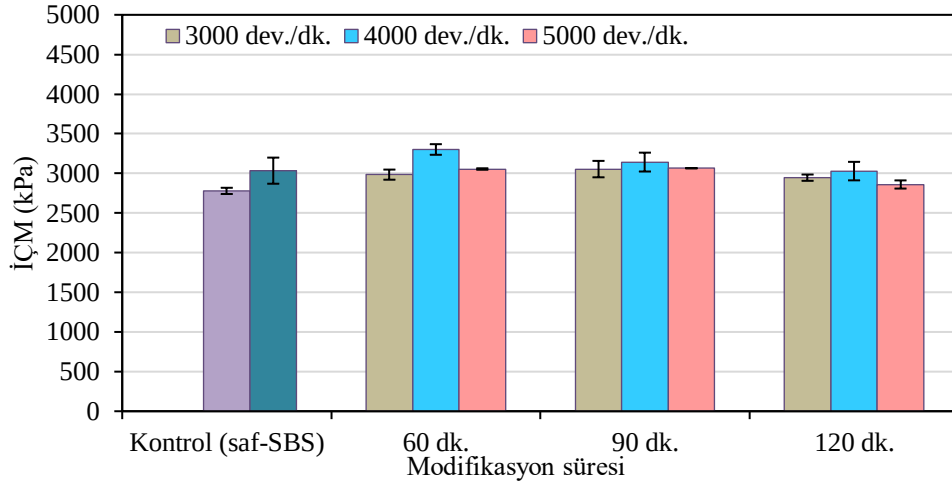
5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 160 °C'de karıştırma süresinin artmasıyla karışımların düşük sıcaklık çatlama dirençlerinde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %14.6; 90 dakikadan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %9.1 oranında artış meydana gelmiştir. Modifikasyon sıcaklığının 170 °C olması durumunda, SBS PMAN karışımların İÇM değerleri karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk. çıkarıldığında %10.3; karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %1.5 oranında azalmıştır. 180 °C'de 90 dakika karıştırma süresinde 60 dakikada yapılan modifikasyona göre düşük sıcaklık çatlama direncinde %0.3 düzeyinde bir artış görülürken; karıştırma süresi 120 dakikaya çıkarıldığında % 6.7 oranında bir azalma görülmüştür.



Şekil 107. 160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



Şekil 108. 170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların 0 °C’deki İÇM değerleri



Şekil 109. 180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların 0 °C’deki İÇM değerleri

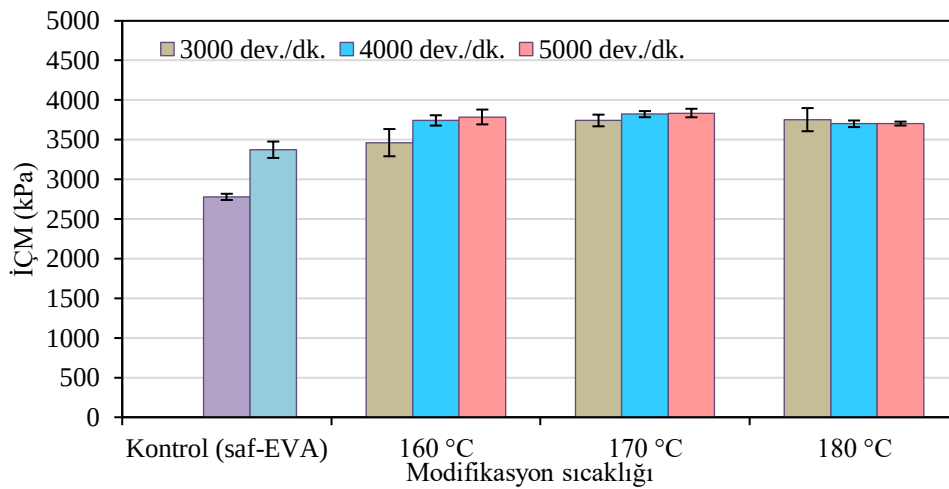
160 °C’de 60 dakika sürede hazırlanan SBS PMAN’lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %2.5; 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %0.5 oranında artmıştır. 90 dk.’da üretilen PMAN’lerin karıştırma hızı 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %7.6 artmış; 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında ise %1.2 azalmıştır. 120 dk.’da, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değerinde %1.4 oranında azalma; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında ise %9.5 oranında artış meydana gelmiştir. Karıştırma süreleri arttıkça kontrol karışımlara nazaran PMAN karışımların düşük sıcaklık çatlamasına karşı dirençleri de artmıştır.

170 °C’de ve 90 dk.’da üretilen PMAN karışımlarında karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %13.7 oranında artarken;

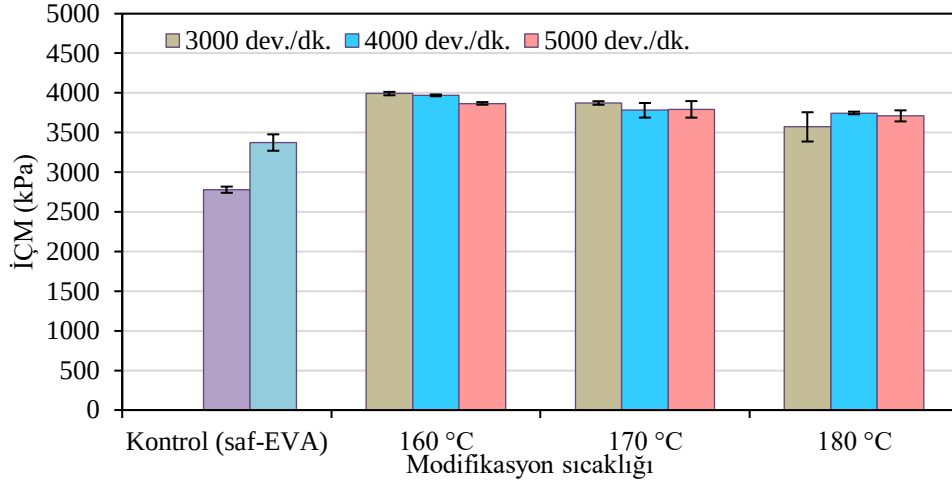
karıştırma hızı 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında 4000 dev./dk.'ya nazaran %22.5 oranında İÇM değeri azalmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %9.6; karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %18.3 oranında azalmıştır. 3000 dev./dk.'da yapılan modifikasyonlarda karıştırma süresi artırıldığında karışımların düşük sıcaklık çatlamasına karşı dirençleri artmıştır. 4000 dev./dk.'de ise karıştırma süresi 90 dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri artarken, 120 dk.'ya çıkarıldığında azalmıştır. 5000 dev./dk.'da üretilen SBS PMAN'lerin karıştırma süresi artırıldığında karışımların İÇM değerleri azalmıştır.

180 °C'de hazırlanan PMAN karışımlarının düşük sıcaklık çatlama performansları incelendiğinde genel olarak birbirlerine yakın İÇM değerleri sergilemişlerdir. Tüm karıştırma sürelerinde hazırlanan PMAN karışımlarında en yüksek İÇM değerini 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen SBS PMAN'ler vermiştir. Karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında 60, 90 ve 120 dk. karıştırma süreleri için İÇM değerlerinde sırasıyla %10.6, %2.9 ve %2.8 oranlarında artış, ancak karıştırma hızı 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değerlerinde sırasıyla %7.5, %2.5 ve %5.6 oranlarında düşüş görülmüştür. 3000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında karıştırma süresi artırıldığında SBS PMAN karışımların İÇM değerleri 90 dk. karıştırma süresinde artarken, 120 dk. karıştırma süresinde azalmıştır. 4000 dev./dk.'da yapılan modifikasyonlarda, karıştırma süresi artırıldığında PMAN karışımlarının çekme mukavemetleri azalmıştır.

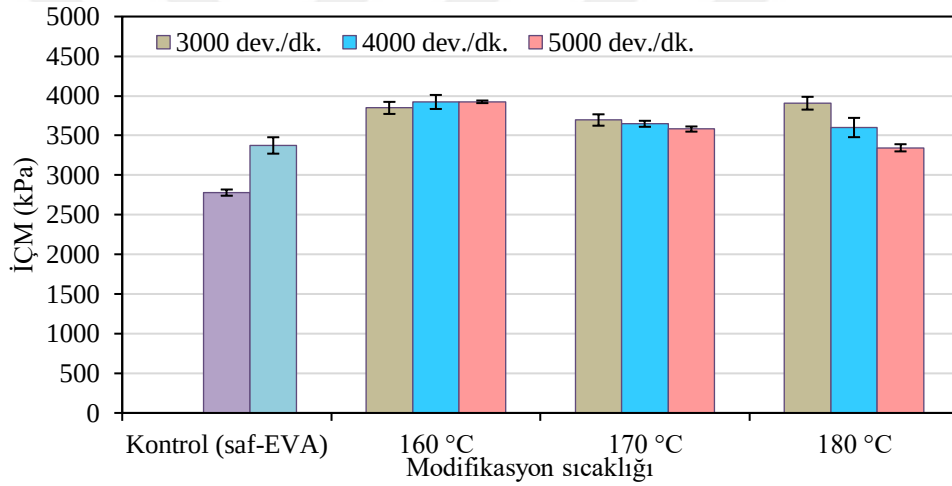
EVA PMAN ve kontrol asfaltlarla hazırlanan asfalt karışımların 0 °C'de yapılan İÇM test sonuçlarının grafikleri Şekil 110 - Şekil 118'de verilmiştir.



Şekil 110. 60 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



Şekil 111. 90 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



Şekil 112. 120 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri

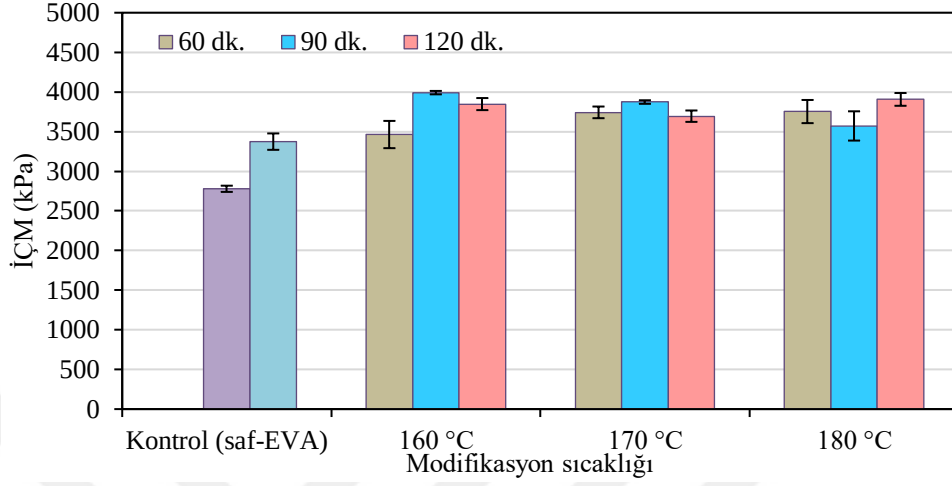
160 °C'de 60 dakika karıştırma süresinde yapılan EVA PMAN modifikasyonunda karıştırma hızının 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarılmasıyla İÇM değeri yaklaşık %8.1; 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarılması durumunda ise yaklaşık olarak %1.2 artmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında çekme dayanımında %2.1; 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise %0.4 artış olmuştur. Ancak, karıştırma sıcaklığı 180 °C olduğunda, 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan karışımlar 3000 dev./dk. karıştırma hızında modifiye edilen PMAN'lere nazaran İÇM değerlerinde sırasıyla %1.4 ve %0.9 azalma görülmüştür. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarının karıştırma sıcaklığı artırıldığında

karışımların düşük sıcaklıktaki çatlama dirençleri artmıştır. 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızları için karıştırma sıcaklığı artırıldığında 170 °C’de PMAN karışımların İÇM değerleri artarken, 180 °C’deki İÇM değerleri azalmıştır. 60 dakikada üretilen PMAN karışımlarının, daha düşük karıştırma sıcaklıklarında daha yüksek karıştırma hızları; daha yüksek karıştırma sıcaklığında ise daha düşük karıştırma hızları seçildiğinde karışımların düşük sıcaklıktaki çatlama karşı dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

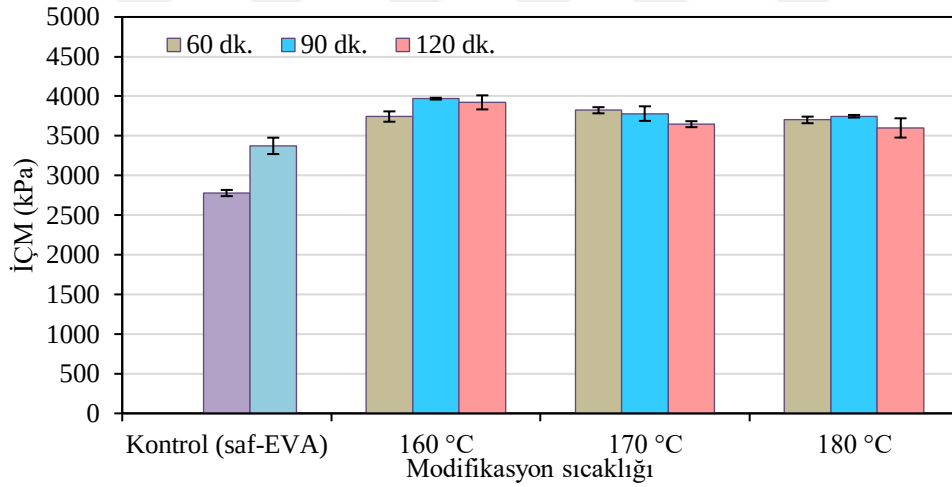
160 °C sıcaklıkta ve 90 dakika karıştırma süresinde yapılan EVA PMAN modifikasyonunda karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıktığında İÇM değeri yaklaşık %0.6; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıktığında ise %2.5 azalmıştır. 170 °C sıcaklıkta, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %2.4 azalırken; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında ise %0.3 düzeyinde bir artış olmuştur. 180 °C karıştırma sıcaklığında, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %4.9 artarken; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında yaklaşık %1 azalmıştır. 3000, 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında yapılan modifikasyonlarda karıştırma sıcaklığı artırıldığında PMAN karışımların İÇM değerleri azalmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde yapılan bütün PMAN karışımlarının düşük sıcaklık çatlama dirençleri kontrol (saf-EVA) karışımlardan yüksek çıkmıştır. En yüksek İÇM değerini 160 °C karıştırma sıcaklığında 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN karışımları vermiştir. Böylelikle, 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen EVA modifiyeli bitüme nanokil eklenmesi ve karıştırma sıcaklığının yaklaşık 10 °C düşürülmesiyle modifikasyon yapılması durumunda, EVA modifiye bitüm karışımından daha yüksek İÇM değeri elde edilebilmektedir.

120 dakika karıştırma süresinde 180 °C karıştırma sıcaklığında ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen EVA PMAN hariç PMAN karışımlar EVA modifiyeli karışımından daha yüksek düşük sıcaklık çatlama dirençleri göstermişlerdir. 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN’de karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri yaklaşık %1.9; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında ise İÇM değeri %0.05 artmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %1.3; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %1.8 azalmıştır. 180 °C karıştırma sıcaklığında, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %7.8; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında İÇM değeri %7.1 azalmıştır. 120 dakika karıştırma

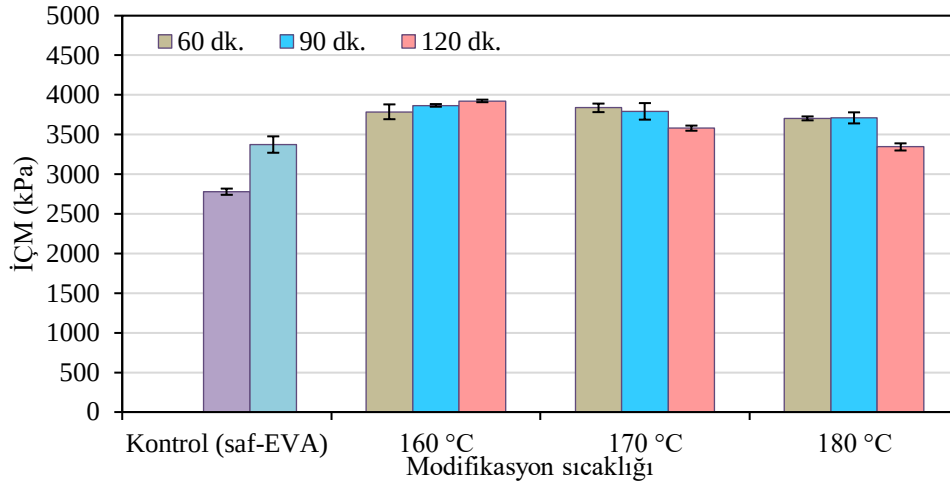
süresinde, 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı artırıldığında karışımların düşük sıcaklık çatlama dirençleri azalmıştır.



Şekil 113. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



Şekil 114. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri

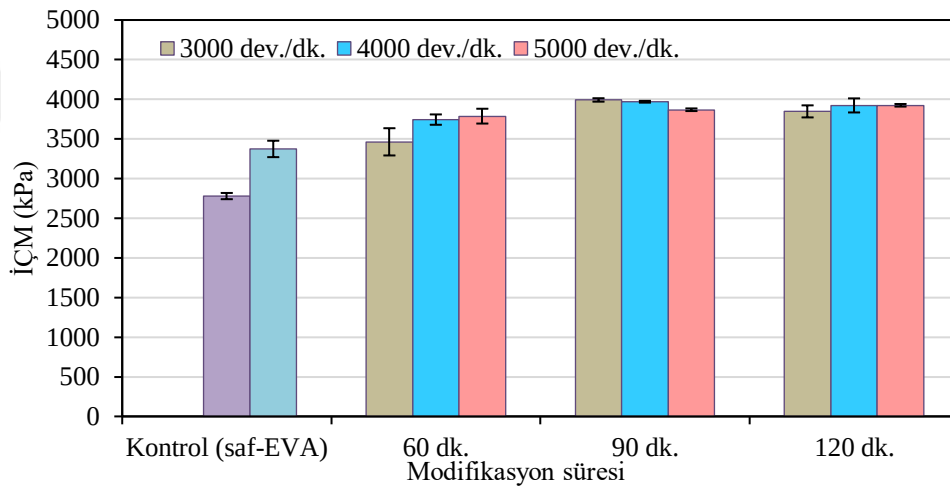


Şekil 115. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımlarının 0 °C’deki İÇM değerleri

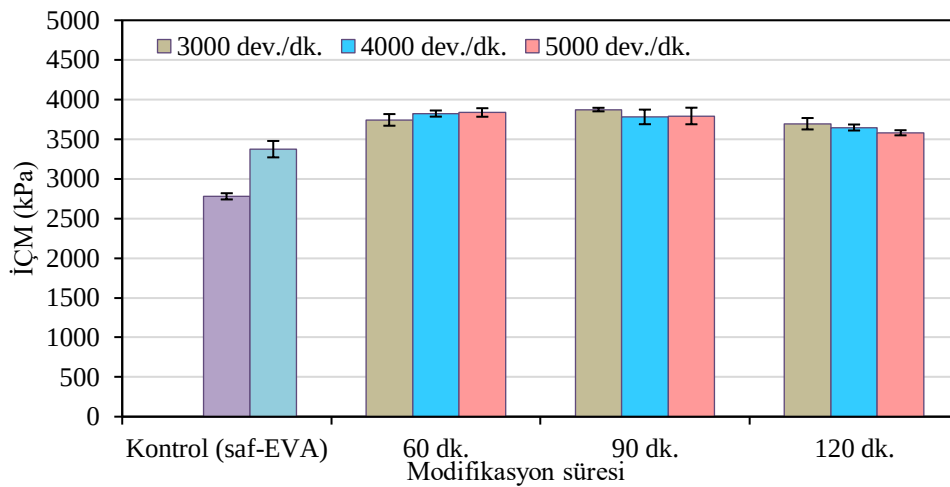
3000 dev./dk. karıştırma hızında, 160 °C ve 170 °C modifikasyon sıcaklıklarında üretilen EVA PMAN karışımlarının karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında karışımların İÇM değerleri artarken, karıştırma süresi 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında İÇM değerleri azalmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarında en iyi düşük sıcaklık çatlama direncine 160 °C ve 90 dk. karıştırma parametrelerinde hazırlanan karışım göstermiştir. 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımlarında 60 dk. karıştırma süresinde karıştırma sıcaklığının artırılması ile karışımların düşük sıcaklıktaki çekme dayanımları artmış, 90 dk. karıştırma süresinde karıştırma sıcaklığının artırılmasıyla da çekme dayanımları azalmıştır.

4000 dev./dk. karıştırma hızında, 160 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında üretilen PMAN karışımlarının karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında düşük sıcaklık çatlama dirençleri artarken, karıştırma süresi 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıktığı zaman düşük sıcaklık çatlama dirençleri azalmıştır. 170 °C modifikasyon sıcaklığında ise karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında karışımın İÇM değeri %1.1, 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında %3.5 azalmıştır. 90 ve 120 dk. karıştırma sürelerinde üretilen EVA PMAN’lerin karıştırma sıcaklıkları artırıldığında karışımların İÇM değerleri azalmıştır. 60 dk. karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarında ise karıştırma sıcaklığı 160 °C’den 170 °C’ye çıkarıldığında İÇM değeri artarken, 170 °C’den 180 °C’ye çıkarıldığında İÇM değeri azalmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında sırasıyla 160, 170 ve 180 °C sıcaklıklarda üretilen EVA PMAN karışımlarının ortalama İÇM değerleri yüksek çıkarak düşük sıcaklık çatlamaına karşı iyi dayanım göstermişlerdir.

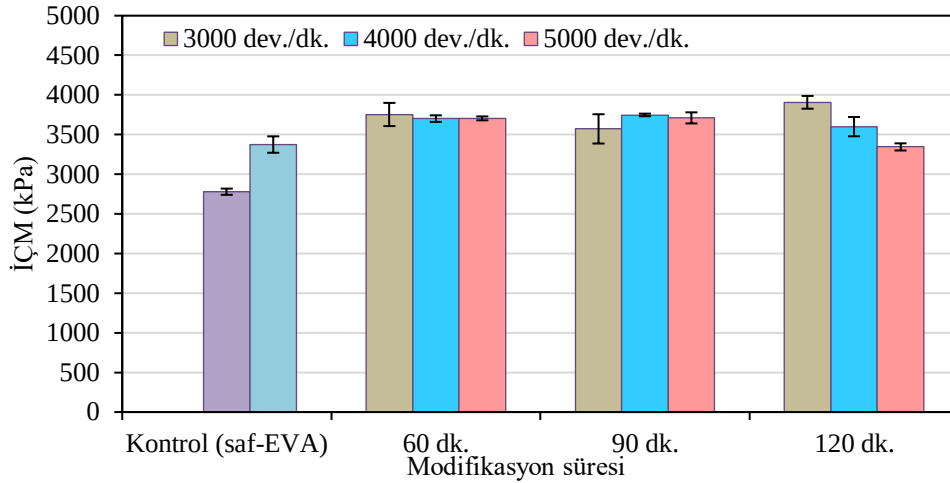
5000 dev./dk. karıştırma hızında ve 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen EVA PMAN karışımlarında, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %2.1, karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığı zaman %1.5 artmıştır. 170 °C modifikasyon sıcaklığında ise karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında karışımın İÇM değeri %1.2 ve 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %5.6 azalmıştır. 180 °C karıştırma sıcaklığında, 60 ve 90 dakika karıştırma süresinde modifiye edilen PMAN karışımları yaklaşık olarak aynı İÇM değerlerine sahip olup karıştırma süresi 120 dakikaya çıkarıldığında İÇM değerinde %9.9 azalma görülmüştür.



Şekil 116. 160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



Şekil 117. 170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların 0 °C'deki İÇM değerleri



Şekil 118. 180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımlarının 0 °C'deki İÇM değerleri

160 °C'de ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarında karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıktığında İÇM değeri %8.1; 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıktığında %1.2 artmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde üretilen EVA PMAN'in, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %1.9, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %0.05 artmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarında karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %0.6, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %2.5 azalmıştır. EVA modifiye bitüme nanokil ilavesiyle karışımların düşük sıcaklıktaki çatlama dirençleri önemli ölçüde artmıştır.

170 °C sıcaklıkta ve 60 dk. karıştırma süresinde üretilen EVA PMAN karışımlarında, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında karışımın İÇM değeri %2.1, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %0.4 artmıştır. 120 dk. modifikasyon süresinde üretilen PMAN karışımlarında karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %1.3, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %1.8 azalmıştır. 60 dk. karıştırma süresinde 5000 dev./dk., 90 ve 120 dk. karıştırma sürelerinde 3000 dev./dk. karıştırma hızlarında yapılan modifikasyonlar düşük sıcaklık çatlama dirençleri açısından en iyi performansları sergilemişlerdir. 170 °C ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN'lerde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri yaklaşık olarak %3.5 oranında artmış, karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında yaklaşık %4.6 oranında azalmıştır. 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk.

kariştırma hızlarında üretilen PMAN'lerin kariştırma süreleri artırıldığında kariştımların düşük sıcaklıktaki çatlama dirençleri azalmıştır.

180 °C kariştırma sıcaklığı ve 60 dk. kariştırma süresinde üretilen PMAN'lerin kariştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıktığında İÇM değeri yaklaşık %1.4 oranında azalırken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıktığında %0.08 oranında bir artış olmuştur. 90 dk. kariştırma süresinde yapılan modifikasyonda kariştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya İÇM değeri %4,9 oranında artarken, kariştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıktığında yaklaşık %1 oranında azalmıştır. 120 dk. kariştırma süresinde yapılan PMAN'lerin kariştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %7.8, kariştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %7.1 oranında azalmıştır. 3000 dev./dk. kariştırma hızında üretilen PMAN'lerde kariştırma süresi 90 dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri yaklaşık %4.8 oranında azalırken, kariştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında İÇM değeri %9.4 oranında artmıştır. 4000 ve 5000 dev./dk. kariştırma hızlarında üretilen PMAN'lerin kariştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında düşük sıcaklık çatlama dirençleri artarken, kariştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında kariştımların düşük sıcaklık çatlama dirençleri azalmıştır.

SBS PMAN ve EVA PMAN'lerin 0 °C sıcaklıktaki İÇM değeri ile düşük sıcaklık çatlama dirençleri karşılaştırılmıştır. EVA PMAN'ler bütün modifikasyon seçeneklerinde SBS PMAN'lere göre daha yüksek çekme dayanımları ve buna bağlı olarak çatlama dirençleri göstermiştir. EVA PMAN'lerin 160 °C kariştırma sıcaklığında yapılan bütün modifikasyonlarından elde edilen İÇM değeri ortalaması 3835.4 kPa iken, SBS PMAN'lerin İÇM değeri ortalama değeri 3320.84 kPa olarak belirlenmiştir. 170 °C sıcaklıkta yapılan bütün EVA PMAN'lerin İÇM değeri ortalaması 3752.58 kPa, SBS PMAN'lerin aynı sıcaklıkta yapılan tüm modifikasyonlarından elde edilen İÇM değeri ortalaması ise 3278.56 kPa'dır. 180 °C kariştırma sıcaklığında üretilen tüm EVA PMAN'lerin İÇM değeri ortalaması 3671.15 kPa, SBS PMAN'lerin İÇM değeri ortalaması ise 3048.48 kPa çıkmıştır. EVA PMAN kariştımlar 160, 170 ve 180 °C sıcaklıklarda sırasıyla SBS PMAN kariştımlara göre %15.5, %14.46 ve %20.43 daha yüksek çekme dayanımları sergilemiştir. Tüm değerler göz önüne alındığında EVA PMAN'lerin %15 civarında daha yüksek çatlama direnci gösterdiği değeri değerlendirilebilir. Aynı zamanda, EVA PMAN kariştımlarının en yüksek ortalama İÇM değeri sahip olduğu kariştırma sıcaklığı 160 °C olmaktadır. Kontrol kariştımların düşük sıcaklık çatlama dirençlerine

bakıldığında, EVA modifiye karışımın İÇM değeri SBS modifiye karışımdan daha fazla çıkmıştır.

Karışımların çekme mukavemetindeki artış, düşük sıcaklıklarda oluşan çekme gerilmelerine karşı koyma yeteneğini artırdığı için kaplamanın daha yüksek çatlama direnci göstermesi anlamına gelmektedir (Ayyıldız vd., 2021).

Bazı çalışmalarda, RET'in asfalt bağlayıcının bazı bileşenleriyle doğrudan reaksiyona girerek asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklık stabilitesi, sıcaklık duyarlılığı, yorulma önleme yeteneği ve yaşlanma direnci gibi performanslarını geliştirdiği ve SBS modifiye asfalt ile hemen hemen aynı performansta olduğu ifade edilmiştir (Jasso vd., 2015). Ancak, RET modifiye asfaltın ve karışımının düşük sıcaklıkta zayıf performans gösterdiğini, RET modifiye asfaltın daha düşük sıcaklıklarda sertleştiğini gösteren çalışmalar da mevcuttur (Geckil ve Seloglu, 2018; Kumandaş vd., 2021). Bu durum RET modifiye uygulamasını bir dereceye kadar sınırlamaktadır. Bu nedenle, RET modifiye asfaltın performansını iyileştirmek ve sorunları çözmek için kompozit modifikasyon tekniğini kullanmak gerekmektedir (Xu vd., 2019).

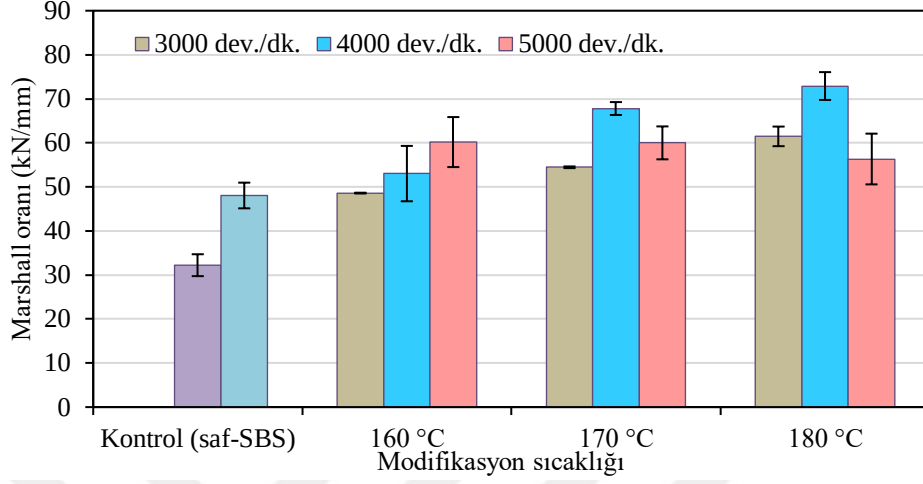
RET modifiyeli asfalt karışımların düşük sıcaklık performansını iyileştirmek için yapılan bir çalışmada ıslak işlemle poliüretan prepolimeri, kuru işlemle öğütülmüş atık kauçuk ve lifleri kullanılmıştır. Tüm modifiyerler, RET modifiye asfalt karışımların düşük sıcaklık performansını iyileştirmiştir (Xu vd., 2020).

Asfaltın yüksek ve düşük sıcaklıktaki performansı aynı anda bir modifiyer ile iyileştirilememiştir. EVA ile modifiye edilmiş asfaltın düşük sıcaklık performansı ve yorulma performansı nispeten zayıftır. Birçok çalışma, daha iyi performans elde etmek için iki veya daha fazla modifikasyonu karıştırmayı düşünmüştür. EVA modifiye asfalt nanokompoziti, EVA modifiye asfaltın yüksek sıcaklıktaki performansını, yaşlanmayı geciktiren performansını ve uyumluluğunu daha da iyileştirmiştir. Ancak, düşük sıcaklık performansına ilişkin araştırma eksikliği mevcuttur (He vd.,2023).

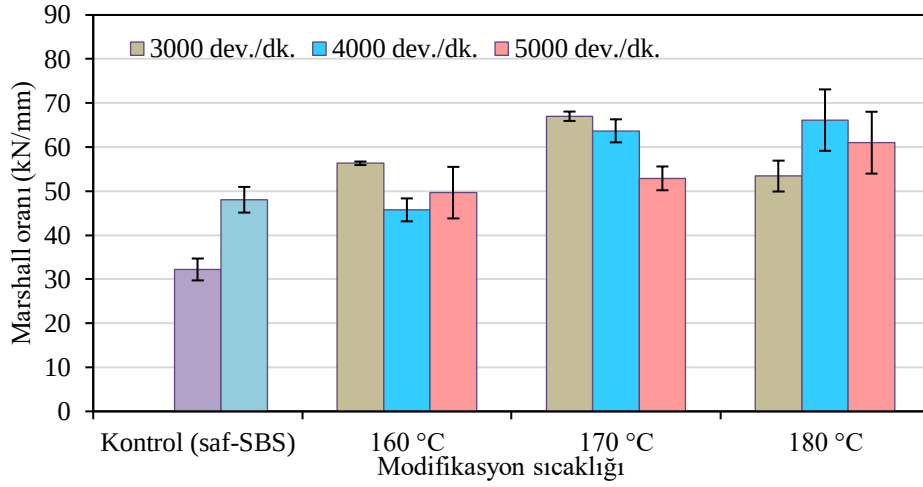
3.4. Marshall Oranı Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kontrol (saf bitüm ve SBS modifiye bitüm, EVA modifiye bitüm), SBS PMAN ve EVA PMAN ile üretilen asfalt karışımlarının tekerlek izi performansları 25 °C sıcaklıkta yapılan Marshall oranı (MO) ile değerlendirilmiştir. Marshall oranı, Marshall stabilitesinin akma değerine oranlanması ile hesaplanmıştır.

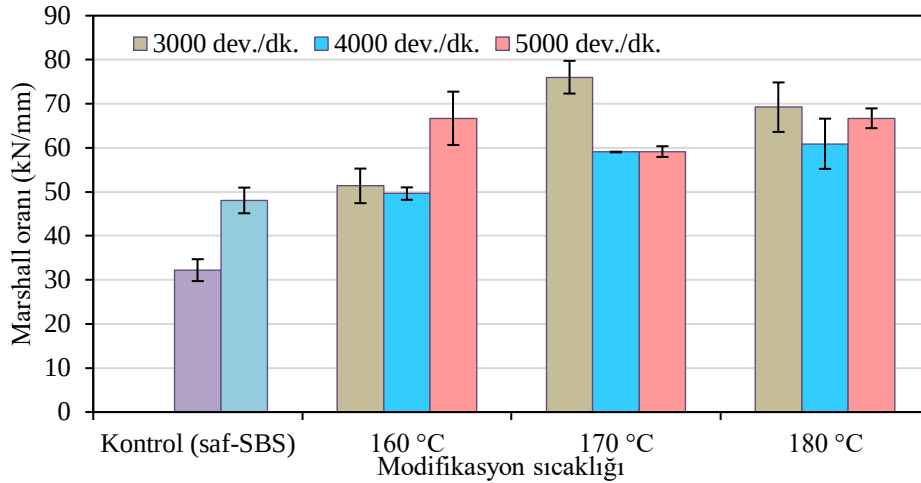
SBS PMAN ve kontrol (saf bitüm ve SBS modifiye bitüm) karışımlarının Marshall oranı değerleri için grafikler hazırlanmış ve Şekil 119 - Şekil 127’de sunulmuştur.



Şekil 119. 60 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 120. 90 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların Marshall oranları



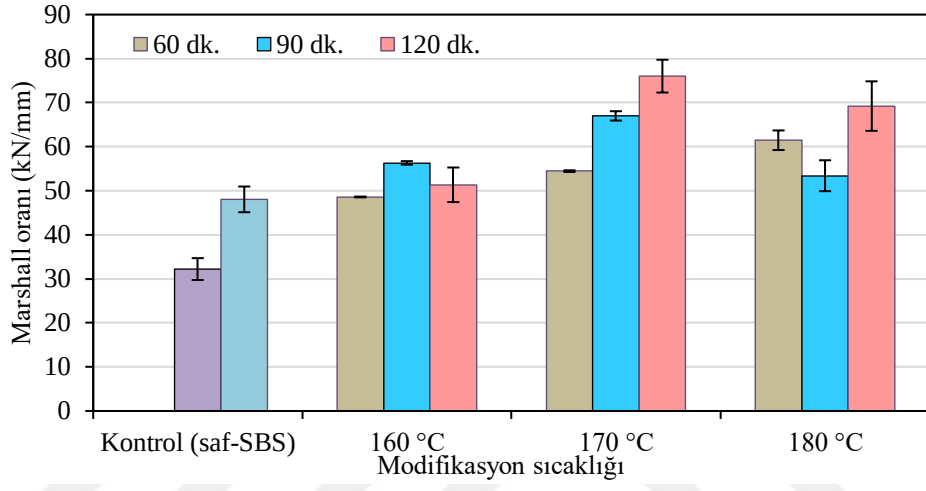
Şekil 121. 120 dk. karıştırma süresi için SBS PMAN karışımların Marshall oranları

60 dakika karıştırma süresinde ve 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen SBS PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %9.1, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %13.5 oranında artmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %24.5 artmış, ancak karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %11.5 azalmıştır. 180 °C karıştırma sıcaklığında ise karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %18.6 artarken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %22.7 oranında azalmıştır. 160 °C'de üretilen SBS PMAN karışımların ortalama Marshall oranı kontrol saf karışıma kıyasla %67.4; SBS karışıma nazaran %12.2 oranında artmıştır. 170 °C'de hazırlanan SBS PMAN karışımların ortalama Marshall oranı kontrol saf karışıma kıyasla %88.5; kontrol SBS karışımlara nazaran %26.4 oranında artmıştır. 180 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'lerin ortalama Marshall oranı kontrol saf karışıma kıyasla %97.3; kontrol SBS karışıma nazaran %32.3 oranında artmıştır. 60 dakika karıştırma süresinde, 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı artırıldığında karışımların kalıcı deformasyona karşı dirençleri de artmıştır. Ancak 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı artırıldığında kalıcı deformasyona karşı dirençleri azalmıştır. 60 dakika karıştırma süresinde sırasıyla 180 °C ve 170 °C karıştırma sıcaklıklarında, 4000 dev./dk.'da hazırlanan PMAN karışımları daha yüksek Marshall oranı değerleri göstermiştir.

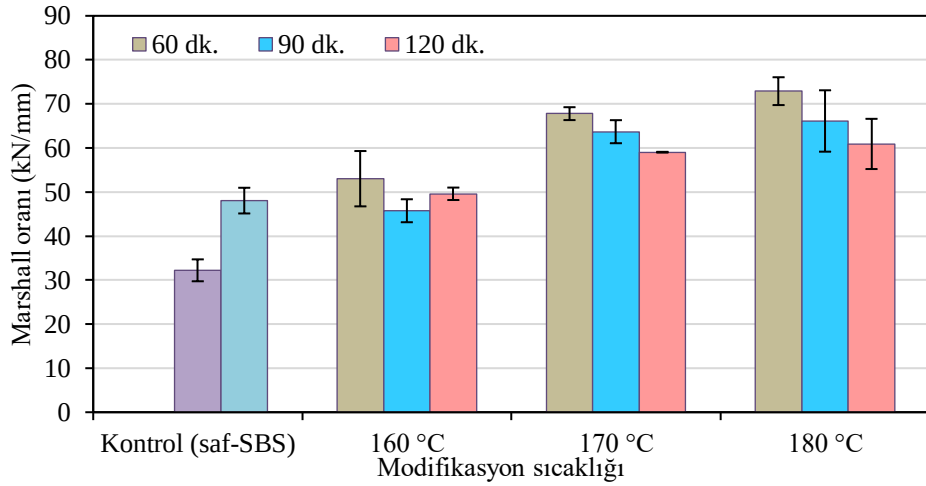
90 dakika karıştırma süresi ve 160 °C sıcaklıkta üretilen SBS PMAN'lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %18.8 azalırken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %8.6 oranında artmıştır. Modifikasyon sıcaklığı 170 °C olduğunda karıştırma hızı arttıkça PMAN karışımların Marshall oranları sırasıyla %4.9 ve %16.9 oranlarında azalmıştır. 180 °C sıcaklıkta yapılan modifikasyonlarda karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıktığında Marshall oranı %23.8 oranında artmış, ancak karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıktığında ise Marshall oranı %7.8 azalmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen SBS PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı artırıldığında karışımların Marshall oranları artmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı 170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı artarken, karıştırma sıcaklığı 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı azalmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde, 170 °C'de 3000 dev./dk.'da ve 180 °C'de 4000 dev./dk. karıştırma parametrelerinde üretilen SBS PMAN karışımları en yüksek Marshall oranlarına sahip olmuştur.

160 °C karıştırma sıcaklığında ve 120 dakika karıştırma süresinde yapılan SBS PMAN'lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıktığında Marshall oranı %3.4 azalırken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %34.5 oranında artmıştır. Karıştırma sıcaklığı 170 °C olduğunda en yüksek Marshall oranı 3000 dev./dk. karıştırma hızında çıkmıştır ve karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %22.3 oranında azalmış, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise Marshall oranı %0.2 artmıştır. 180 °C modifikasyon sıcaklığında karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %12 azalmış ve karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %9.5 oranında artmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı 170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı artarken, karıştırma sıcaklığı 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı azalmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı artırıldığında karışımların Marshall oranları artmıştır. 120 dakika karıştırma süresi ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında sırasıyla, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan PMAN karışımlarında tüm SBS PMAN karışımlarından daha yüksek Marshall oranları elde edilmiştir.

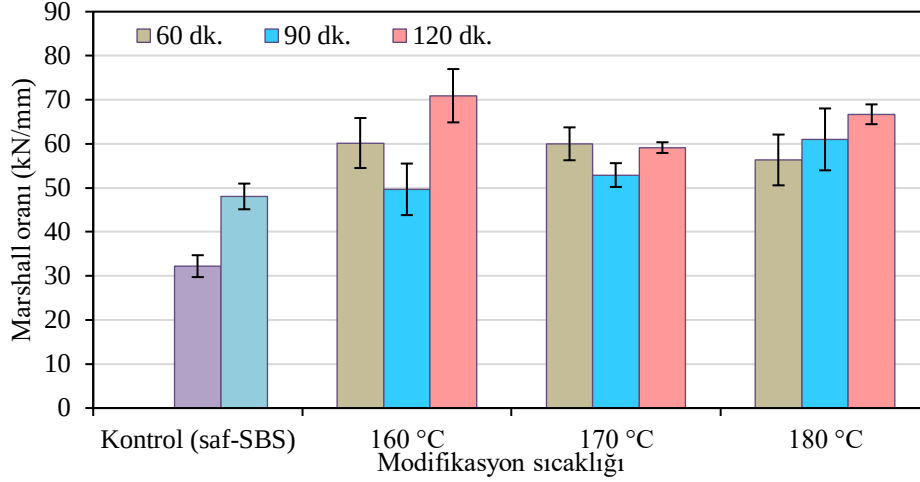
60 ve 90 dakika karıştırma sürelerinde üretilen SBS PMAN karışımlarında en düşük Marshall oranını 160 °C karıştırma sıcaklığında hazırlanan karışımlar göstermiştir. Bu karışımlar, SBS karışımının Marshall oranına yakın ve bu değerden daha yüksek Marshall oranına sahip olmuştur. Buradan, SBS modifiye bitüme nanokil ilavesiyle karışım sıcaklığının yaklaşık 10 °C düşürülmesi durumunda da aynı Marshall oranı değerlerine ulaşılacağı sonucuna varılmaktadır.



Şekil 122. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 123. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 124. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları

Kontrol (saf) karışımın Marshall oranı tüm modifiye karışımların Marshall oranlarından daha düşük çıkmıştır. SBS karışımın Marshall oranı (160 °C’de 90 dk. 4000 dev./dk. modifikasyonu hariç) tüm PMAN karışımlardan daha düşük çıkmıştır.

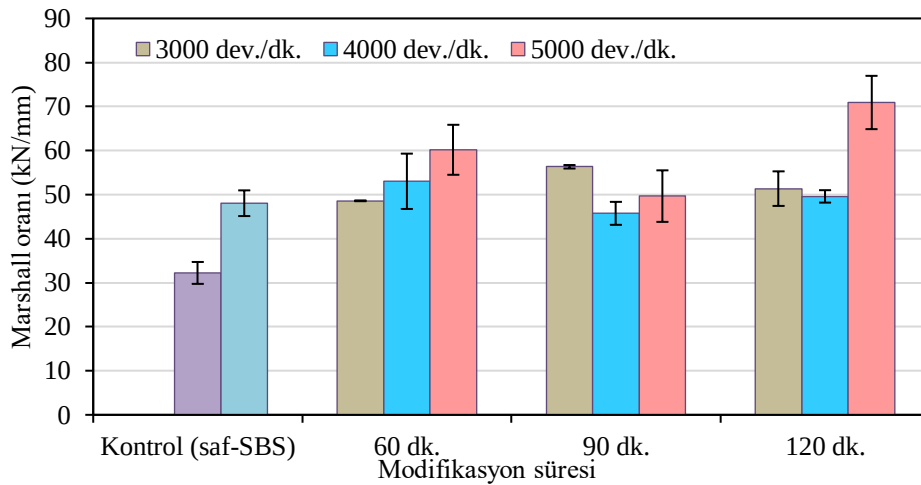
3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 160 °C sıcaklıkta üretilen PMAN’lerin ortalama Marshall oranı, kontrol saf ve SBS karışımların Marshall oranlarından sırasıyla %61.7 ve %8.4 daha fazla çıkmıştır. 160 °C sıcaklıkta yapılan PMAN’lerde karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında Marshall oranı %15.9 oranında artmış, 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında ise %8.1 oranında azalmıştır. 170 °C sıcaklıkta hazırlanan SBS PMAN’lerin karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında Marshall oranı %23, 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında %13.5 oranında artmıştır. 180 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN’lerde karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında Marshall oranı %13.1 azalmış, 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında ise %29.6 oranında artmıştır. 160 °C sıcaklıkta üretilen PMAN’lerde en yüksek Marshall oranını 90 dakika karışımı, 170 ve 180°C sıcaklıklarda üretilen PMAN’lerde en yüksek Marshall oranını ise 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan karışımlar göstermiştir.

4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN’lerde 170 °C sıcaklıkta hazırlanan karışımlarda karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında Marshall oranı %6, 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında %7.3 oranında azalmıştır. 180 °C’de üretilen PMAN’lerde karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında %9.3, karıştırma süresi 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında %7.9 oranında azalmıştır. 160 °C’de hazırlanan modifikasyonlarda karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında Marshall oranı %13.7 oranında azalmış

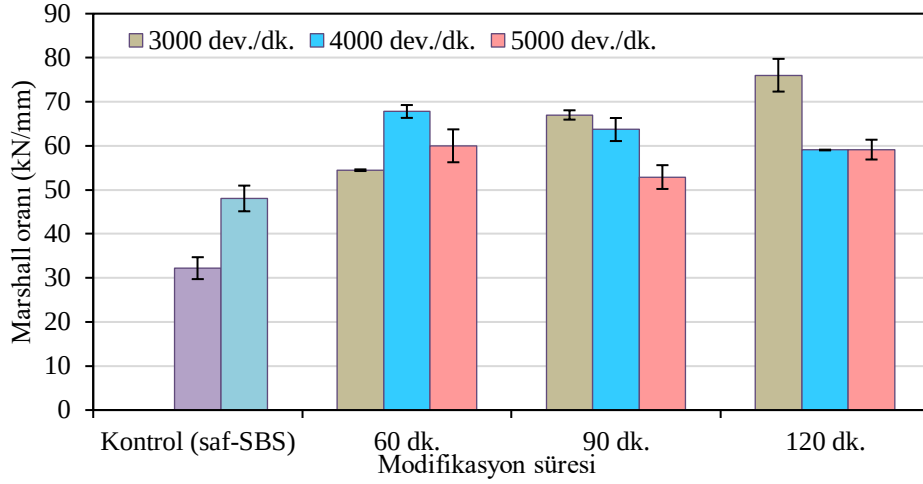
ve karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %8.4 artmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerde en yüksek Marshall oranlarına sırasıyla 180 °C, 170 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında yapılan PMAN'lerde ulaşılmıştır.

5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 160 °C karıştırma sıcaklığında hazırlanan PMAN'lerin karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %17.5 oranında azalırken, karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %42.8 oranında artış göstermiştir. 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı yaklaşık %11.8 azalırken, karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %11.8 artmıştır. 180 °C karıştırma sıcaklığında yapılan PMAN'lerin karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %8.3 karıştırma süresi 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %9.3 oranında artmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarından, 160 °C karıştırma sıcaklığı ve 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımı en yüksek Marshall oranını göstermiştir. 60 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı arttıkça karışımların kalıcı deformasyon dirençleri azalmıştır. 90 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı artırıldığında karışımların kalıcı deformasyon dirençleri artmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımları 60 ve 90 dk. karıştırma sürelerinde üretilen PMAN karışımlarına kıyasla daha yüksek Marshall oranlarına sahiptir.

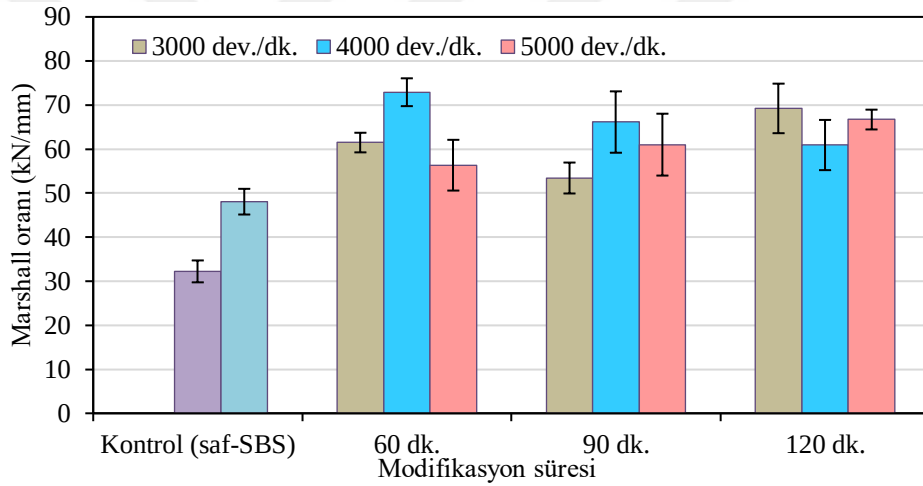
Marshall oranları irdelendiğinde, SBS modifiye bitüme nanokil ilavesiyle elde edilen PMAN karışımların Marshall oranları önemli derecede artarak karışımların kalıcı deformasyona karşı dirençleri de artış göstermiştir.



Şekil 125. 160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 126. 170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 127. 180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların Marshall oranları

160 °C karıştırma sıcaklığı ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerin Marshall oranları, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %9.1, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %13.5 artmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %18.8 azalırken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %8.6 oranında artmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde yapılan PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %3.4 oranında azalırken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise %43 artmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerin karıştırma süresi artırıldığında genel

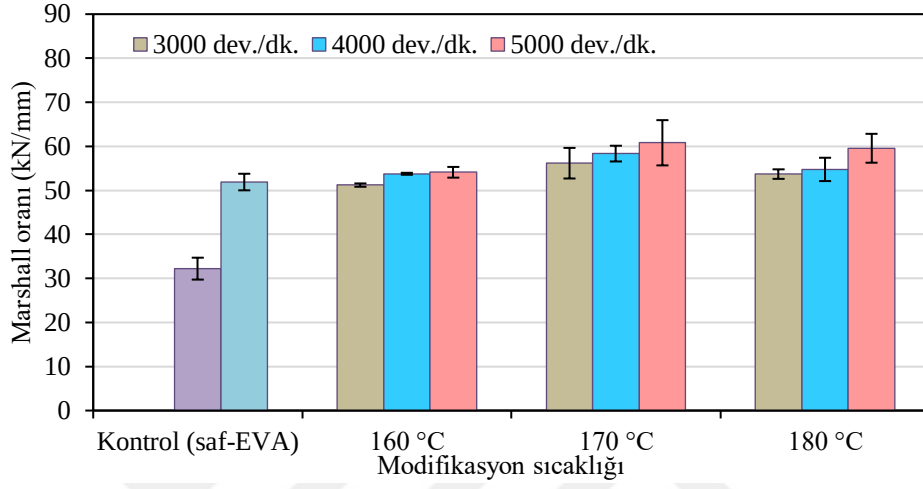
olarak Marshall oranları artış eğilimi, 4000 dev./dk. karıştırma hızında ise karıştırma süresinin artırılmasıyla SBS PMAN'lerin Marshall oranları azalma eğilimi göstermiştir. 160 °C karıştırma sıcaklığında 4000 dev./dk. karıştırma hızında ve 90 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımı hariç tüm PMAN karışımları SBS modifiye bitümle üretilen karışımdan daha yüksek Marshall oranları göstermiştir.

170 °C karıştırma sıcaklığında ve 60 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin Marshall oranları karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %24.5 artarken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %11.5 azalmıştır. 90 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin Marshall oranları karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %4.9, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %17 azalmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %22.3 oranında azalırken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise Marshall oranı %0.2 gibi küçük bir oranda artış göstermiştir. 3000 dev./dk. karıştırma hızında karıştırma süresi artırıldığında PMAN karışımlarının Marshall oranları da artarken, 4000 dev./dk. karıştırma hızında karıştırma süresinin artırılması karışımların Marshall oranlarında azalmaya sebep olmuştur. 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen tüm SBS PMAN karışımları kontrol (saf-SBS) karışımlardan daha yüksek Marshall oranına sahiptir.

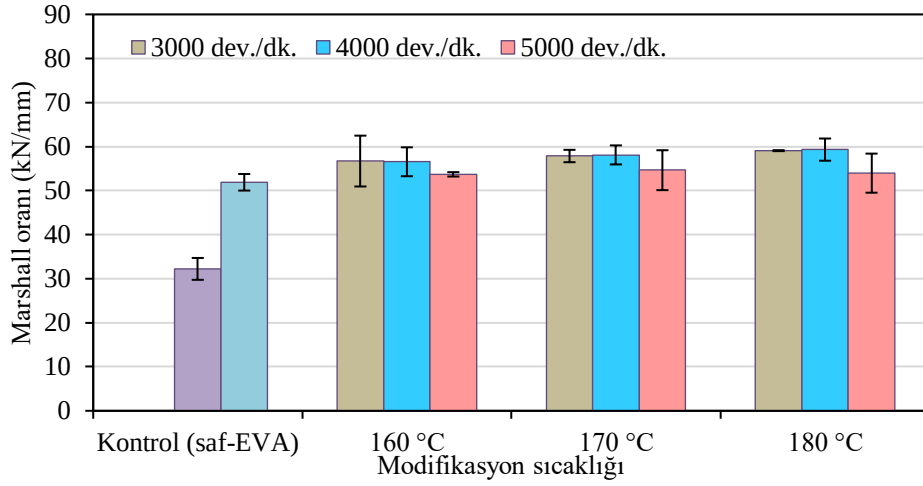
60 dakika karıştırma süresinde ve 180 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerin Marshall oranları karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında yaklaşık %18.6 artarken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %22.7 oranında azalmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde üretilen SBS PMAN'lerin Marshall oranları incelendiğinde ise karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %23.8 oranında artmış, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise %7.8 oranında azalmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %12 azalırken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %9.5 oranında artmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerin karıştırma süresi artırıldığında Marshall oranları azalırken, 5000 dev./dk. karıştırma hızında karıştırma süresi artırıldığında karışımların Marshall oranları artmıştır. 180 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerde 60 ve 90 dakika karıştırma sürelerinde 4000 dev./dk. karıştırma hızı, 120 dakika karıştırma süresinde ise 3000 dev./dk. karıştırma hızı seçildiğinde en yüksek Marshall

oranları elde edilmiştir. 170 ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında en düşük Marshall oranına sahip PMAN karışımlar bile SBS karışımından daha yüksek değerler göstermişlerdir.

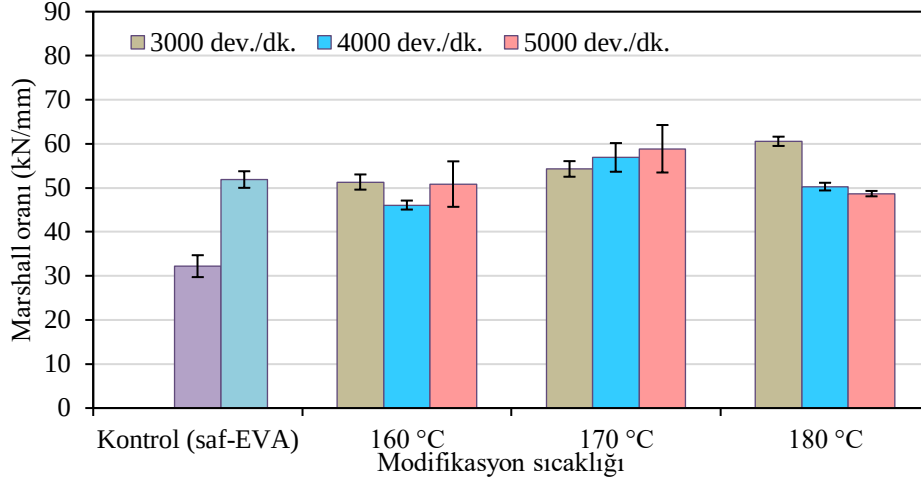
EVA PMAN ve kontrol (saf bitüm ve EVA modifiye bitüm) karışımlarının Marshall oranlarının değerlendirilmesi için hazırlanan grafikler Şekil 128 - Şekil 137’de verilmiştir.



Şekil 128. 60 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 129. 90 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların Marshall oranları



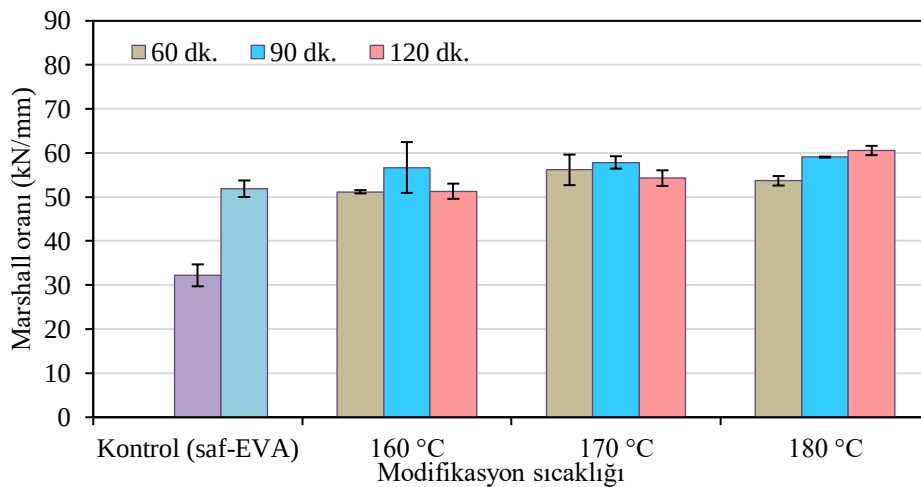
Şekil 130. 120 dk. karıştırma süresi için EVA PMAN karışımların Marshall oranları

60 dakika karıştırma süresi ve 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya artırıldığında Marshall oranı %5, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya artırıldığında %0.6 artmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında karışımın Marshall oranı %3.9, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %4.2 oranında artmıştır. 180 °C sıcaklıkta ise karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında PMAN karışımların Marshall oranı %2 artarken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %8.8 artmıştır. 3000, 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN'lerin, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı artarken, karıştırma sıcaklığı 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı azalmıştır. 60 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımlarında en yüksek Marshall oranlarına sırasıyla 170 °C, 180 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında üretilen karışımlarda ulaşılmıştır. En yüksek Marshall oranını 170 °C sıcaklıkta ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımı göstermiştir.

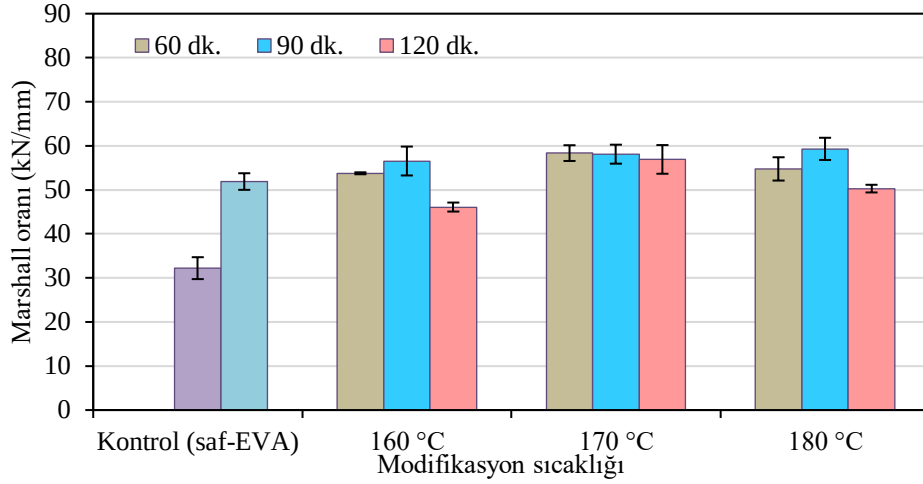
90 dakika karıştırma süresi ve 160 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN'lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %0.3 azalırken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %5.1 oranında azalmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya artırıldığında Marshall oranı %0.4 oranında artmış ve karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %6 oranında azalmıştır. 180 °C karıştırma sıcaklığında hazırlanan PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya

çıkarıldığında karışımların Marshall oranı %0.4 oranında artarken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %9 oranında azalmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde, 3000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan PMAN karışımları daha yüksek Marshall oranlarına sahiptir.

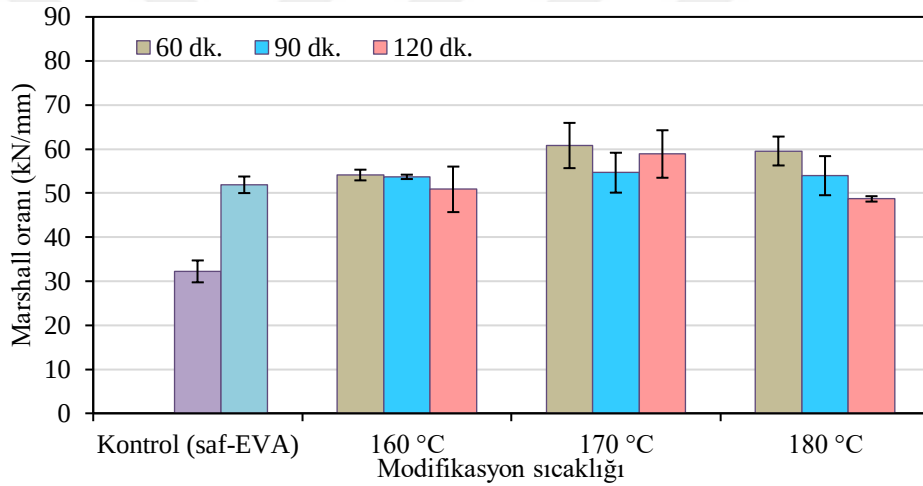
120 dakika karıştırma süresinde ve 160 °C karıştırma sıcaklığında hazırlanan PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %10.2 azalmış, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise %10.3 artmıştır. 170 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'lerde karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya ve 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında karışımların Marshall oranları sırasıyla %4.8 ve %3.5 artmıştır. 180 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %17 azalırken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %3.2 azalmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarında ortalama olarak en yüksek Marshall oranına 170 °C karıştırma sıcaklığında ulaşılmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı yaklaşık %5.8; 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında %11.6 artmıştır. Karıştırma hızı 4000 dev./dk. olduğunda, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı yaklaşık %23.5 artarken; 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında ise yaklaşık olarak %11.7 azalmıştır. 5000 dev./dk.'da üretilen EVA PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı %15.8 artarken, karıştırma sıcaklığı 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında %17.3 azalmıştır.



Şekil 131. 3000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 132. 4000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 133. 5000 dev./dk. karıştırma hızı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları

3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 160 °C karıştırma sıcaklığında hazırlanan PMAN'lerde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %10.8 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %9.5 azalmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %3 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %6.1 oranında azalmıştır. 180 °C sıcaklıkta hazırlanan PMAN'lerde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %10, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %2.5 oranında artmıştır. 60 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı 160 °C'den

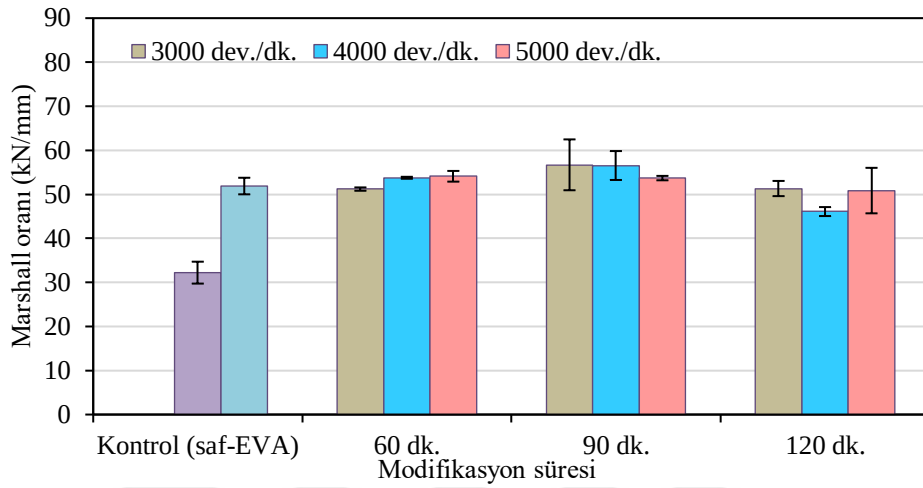
170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı %9.7 artarken, 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında %4.4 azalmıştır.

4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerin karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %5.2 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %18.5 azalmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında hazırlanan PMAN'lerde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %0.4, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığı zaman %2 azalmıştır. 180 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerde ise karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %8.3 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %15.2 azalmıştır. 60 dakika karıştırma süresinde karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında PMAN karışımların Marshall oranı %8.5 artarken, 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında ise %6.2 azalmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarında en yüksek ortalama Marshall oranını sırasıyla 170 °C, 180 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında yapılan modifikasyonlar vermiştir.

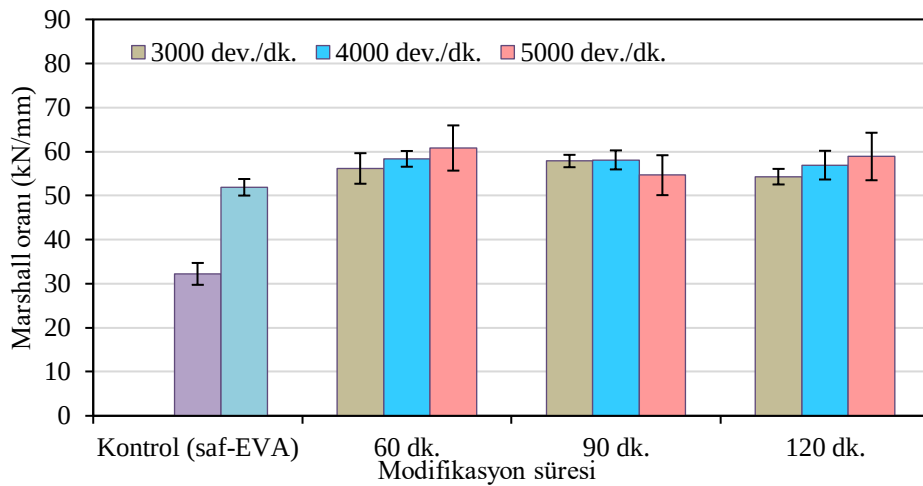
5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN'lerin karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %0.8, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %5.3 azalmıştır. Karıştırma sıcaklığı 170 °C seçildiğinde ve karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında karışımın Marshall oranında %10.1 düzeyinde azalma görülürken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %7.8'lik artış meydana gelmiştir. 180 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'lerde karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında karışımın Marshall oranında %9.4, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %9.8 düzeyinde bir azalma görülmüştür. 60 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında Marshall oranı %12.4 artarken, 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında ise %2.1 azalmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımlarının ortalama Marshall oranları incelendiğinde, sırasıyla en yüksek değerlere 170 °C, 180 °C ve 160 °C sıcaklıklarda yapılan modifikasyonlarda erişilmiştir. 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen tüm EVA PMAN'lerde en yüksek Marshall oranlarına 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan karışımlar göstermiştir.

4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında, 160 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında ve 120 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımlarının Marshall oranları EVA modifiye bitümle hazırlanan karışımdan daha düşük çıkmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında, 160 °C'de 60 ve 120 dakika karıştırma sürelerinde üretilen PMAN'lerin Marshall oranları EVA modifiye bitümle hazırlanan karışıma oldukça yakın çıkmıştır. Bu

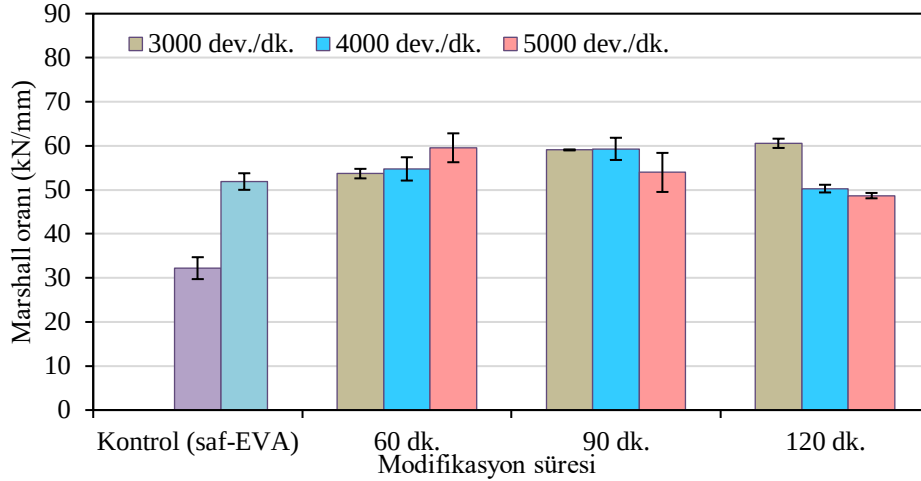
sonuç, daha düşük sıcaklık ve karıştırma hızında üretilen PMAN karışımının, 170 °C’de ve 4000 dev./dk.’da hazırlanan EVA modifiye karışımla yaklaşık aynı Marshall oranı elde edilebileceğinden karışıma nanokil ilavesiyle aynı sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 134. 160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 135. 170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları



Şekil 136. 180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların Marshall oranları

160 °C sıcaklık ve 60 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %5, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %0.6 artış meydana gelmiştir. Karıştırma süresi 90 dk. olduğunda karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında PMAN karışımının Marshall oranı %0.3, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %5.1 düzeyinde azalma tespit edilmiştir. 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %10.2 azalırken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %10.3 artış gözlenmiştir. 3000 dev./dk. karıştırma hızında, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında PMAN karışımlarının Marshall oranı %10.8 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %9.5 azalma meydana gelmiştir. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarının Marshall oranı, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %5.2 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %18.5 azalmıştır. 5000 dev./dk.'da üretilen PMAN karışımlarının Marshall oranları incelendiğinde, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %0.8, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %5.3 azalmıştır. 160 °C sıcaklıkta, kalıcı deformasyona karşı en iyi dirençler 90 dk. karıştırma süresinde sırasıyla, 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN karışımlarında gözlenmiştir.

170 °C karıştırma sıcaklığı ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerde Marshall oranları, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %3.9, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %4.2 artmıştır. Karıştırma süresi 90 dk. olduğunda Marshall oranı, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında

%0.4 artarken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %6 azalmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımların Marshall oranı, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %4.8, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %3.5 artmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen EVA PMAN'lerin Marshall oranları, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %3 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %6.1 azalmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerin Marshall oranları, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında yaklaşık %0.4, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %2 azalmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN'lerin Marshall oranlarına bakıldığında, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında yaklaşık %10 azalırken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %7.8 artmıştır. 170 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'lerde kalıcı deformasyona karşı en yüksek direnci 5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan karışım göstermiştir.

180 °C karıştırma sıcaklığı ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerin Marshall oranı, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %2, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %8.8 artış meydana gelmiştir. 90 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin Marshall oranı, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %0.4 artarken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %9 azalmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde yapılan modifikasyonlarda Marshall oranı, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %17, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %3.2 azalmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarda Marshall oranı, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında yaklaşık %10, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %2.5 artmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarında Marshall oranı, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %8.3 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %15.22 azalmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen karışımlarda karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında Marshall oranı %9.4, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %9.8 azalmıştır. 180 °C sıcaklıkta en iyi kalıcı deformasyon dirençlerini 120 dk. karıştırma süresinde 3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dakika karıştırma süresinde 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımları göstermiştir.

160, 170 ve 180 °C sıcaklıklarda hazırlanan EVA PMAN ve SBS PMAN karışımlarının Marshall oranlarının ortalaması esas alınarak karşılaştırılmıştır. EVA PMAN ve SBS PMAN karışımlar 160 °C sıcaklıkta yaklaşık olarak aynı MO değeri vermiştir.

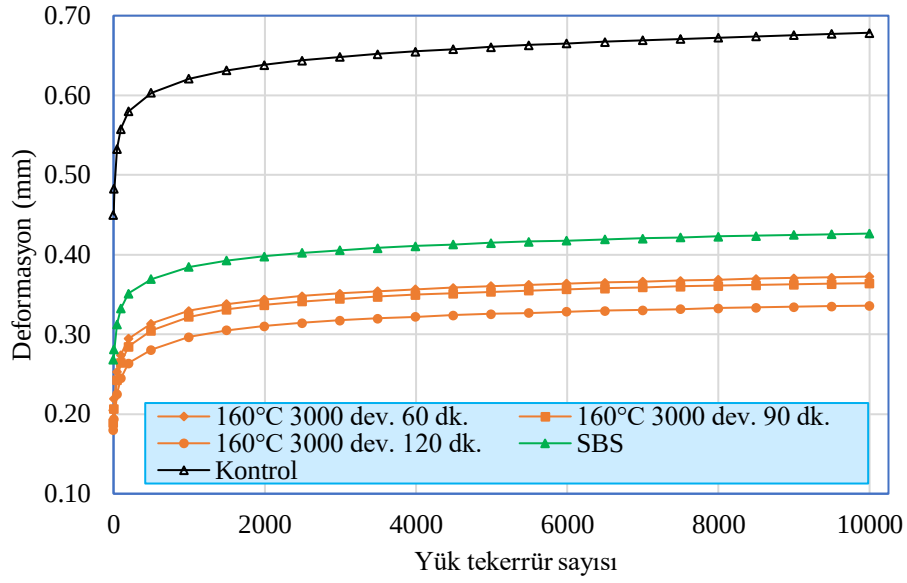
Ancak modifikasyon sıcaklığı 170 ve 180 °C'ye yükseltildiğinde SBS PMAN karışımlar EVA PMAN karışımlardan daha yüksek MO değerleri vermiştir. SBS PMAN karışımlar 160 °C sıcaklıkta %8.6 ve 170 °C sıcaklıkta ortalama %13.6 daha yüksek MO göstermiştir. Genel bir sonuç olarak hem EVA PMAN hem de SBS PMAN karışımlarda modifikasyon sıcaklığı artırıldığında MO değerlerinde artış eğilimi gözlemlenmiştir. Bu sonuç sıcaklığın artmasıyla her iki polimerin de viskozitesinin düşerek asfalt bağlayıcı içerisinde daha iyi dağılım gösterdiği, mümkün eksfoliye dağılımla karışım performansına olumlu yönde etki ettiği şeklinde yorumlanmıştır. Bununla birlikte, bireysel değerlendirmelerde en büyük MO değerlerinin her iki nanokompozit için 170 °C sıcaklıkta çıktığı da görülmüştür.

Karıştırma hızının MO üzerindeki etkisi açısından değerlendirme aynı karıştırma hızındaki MO değerlerinin ortalaması alınarak yapılmıştır. Sonuçlar irdelendiğinde, EVA PMAN karışımların Marshall oranlarının bütün karıştırma hızlarında ortalama olarak yaklaşık 55.2 ± 0.3 kN/mm düzeyinde olduğu görülmüştür. SBS PMAN karışımlarında ise 59.8 ± 0.1 kN/mm olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar karıştırma hızının Marshall oranı üzerinde çok önemli bir etki oluşturmadığı şeklinde yorumlanmıştır.

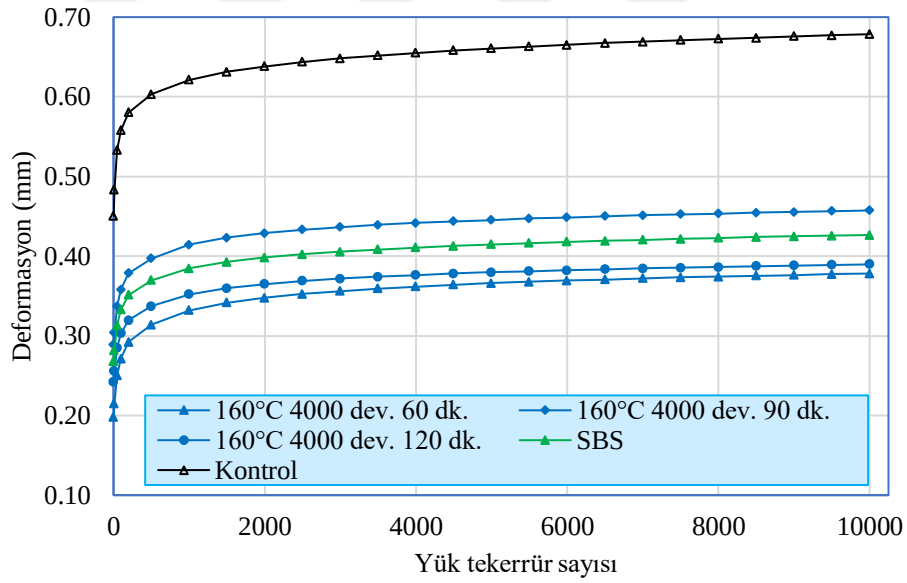
Bütün karıştırma sürelerinde (60, 90 ve 120 dakika) EVA PMAN karışımların ortalama MO değerleri birbirine çok yakın (54.8 ± 0.8 kN/mm) çıkmıştır. Karıştırma süreleri Marshall oranı değerlerini çok etkilememiştir. SBS PMAN karışımların Marshall oranı karıştırma süresinin artmasıyla artış eğilimi göstermiştir. Ortalama anlamında en yüksek MO değeri 164.16 kN/mm ile 120 dakika modifikasyon süresinde oluşmuştur.

3.5. Tekrarlı Yük Sünme Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

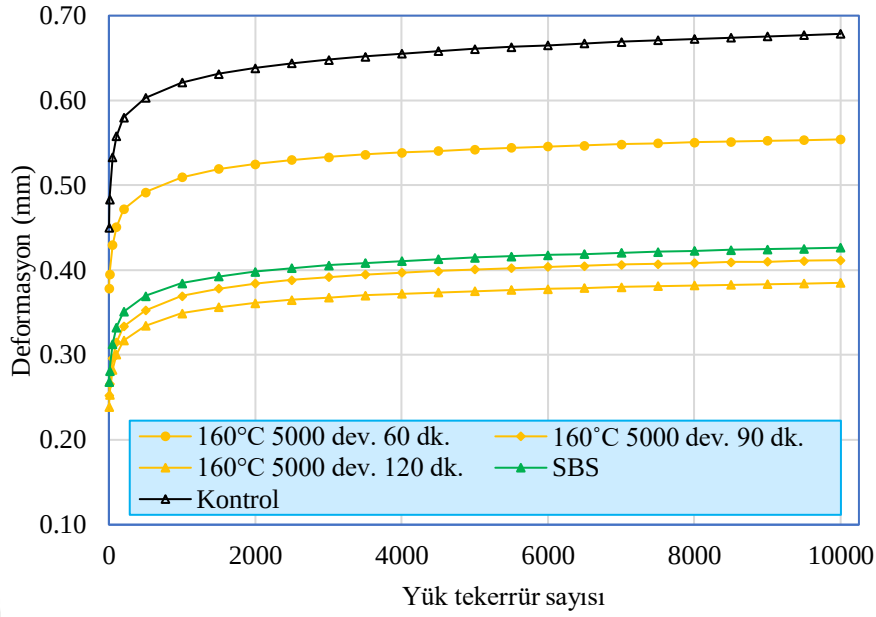
Tekrarlı yük sünme testi kontrol (saf), polimer modifiye asfalt (EVA-SBS) ve polimer modifiye asfalt nanokompozitlerle (SBS PMAN-EVA PMAN) üretilen karışımların tekerlek izine karşı dirençlerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Şekil 137 - Şekil 143'te 160 °C sıcaklıkta üretilen SBS PMAN'le hazırlanan asfalt karışım örneklerinin sünme eğrileri üçer örneğin sünme değerlerinin ortalaması alınarak verilmiştir.



Şekil 137. 160 °C’de 3000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 138. 160 °C’de 4000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



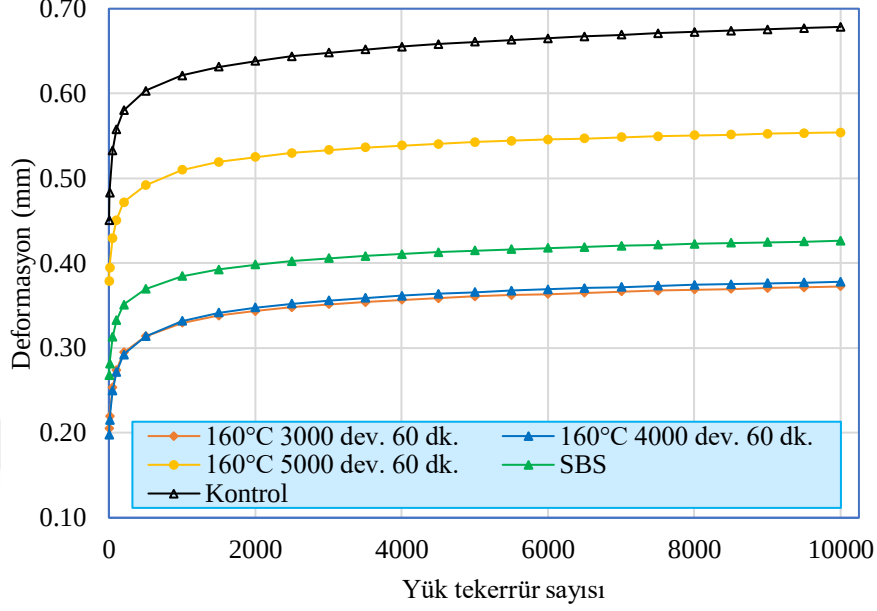
Şekil 139. 160 °C'de 5000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

Yük tekrür sayısına karşılık gelen deformasyon miktarı yüksek olan karışımın tekerlek izine karşı daha dirençsiz olduğu anlaşılmaktadır. Başka bir ifadeyle, tekerlek izi potansiyeli daha yüksek karışım meydana gelmektedir. Yük tekrür sayısı-deformasyon grafiğinden elde edilen sünme eğrilerine göre, 160 °C sıcaklıkta ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN'lerde karıştırma süresi arttığında karışımların deformasyon dirençleri artmıştır. 160 °C'de ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen SBS PMAN'lerin karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında deformasyonu %2.2, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %7.8 azalmıştır. SBS modifiyeli karışım, 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen SBS PMAN karışımlarından daha fazla deformasyon göstermiştir. Kontrol (katkısız bitüm) karışım ise tüm modifiyeli karışımlara nazaran en yüksek deformasyona sahip olmuştur.

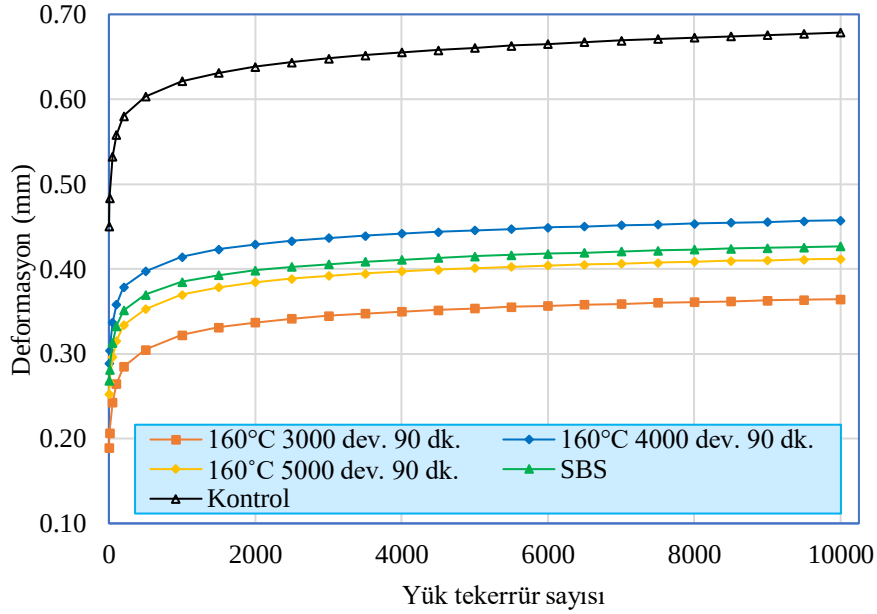
160 °C sıcaklık ve 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerde en yüksek tekerlek izi direncine 60 dk. karıştırma süresinde yapılan modifikasyonda ulaşılmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımı, 60 dk.'da üretilen PMAN karışımından %3 daha fazla deformasyon göstermiştir. 90 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımı modifiye karışımlar içerisinde en yüksek deformasyonu göstermiştir.

160 °C sıcaklıkta ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarında karıştırma süresi artırıldığında karışımlar daha iyi deformasyon dirençleri sergilemişlerdir.

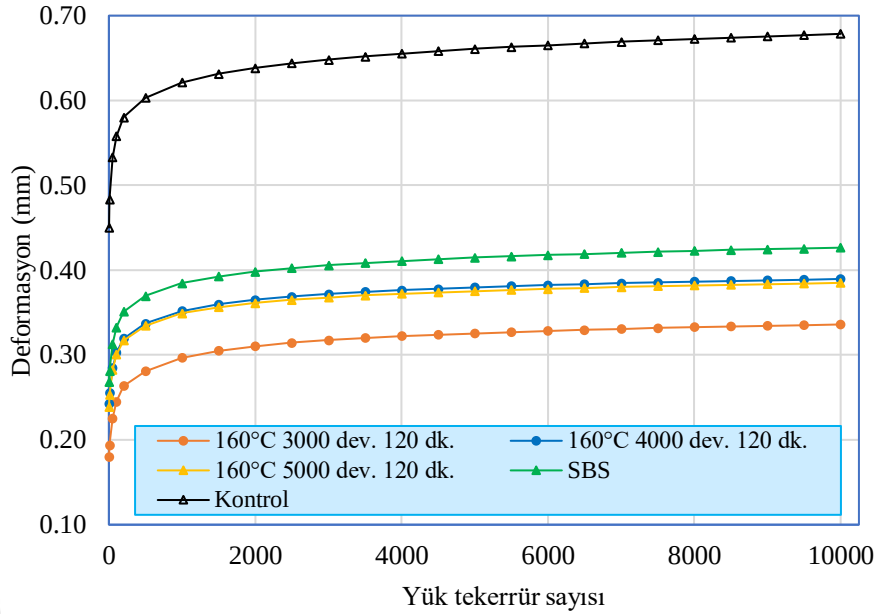
SBS modifiye karışım, 5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dk. karıştırma süresinde hazırlanan SBS PMAN karışımından %21.8 daha düşük deformasyon değeri vermiştir.



Şekil 140. 160 °C'de 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 141. 160 °C'de 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 142. 160 °C’de 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

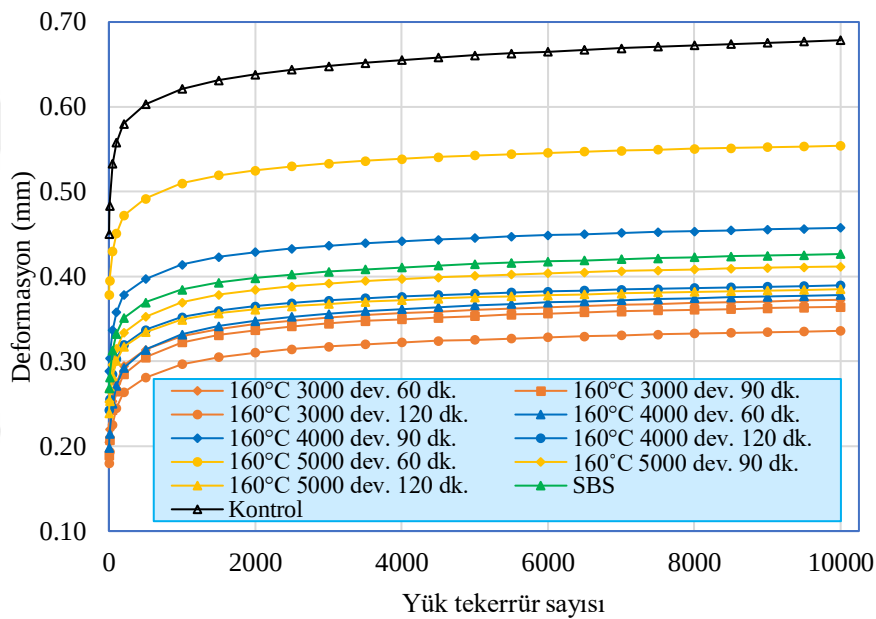
160 °C karıştırma sıcaklığında ve 60 dakika karıştırma süresinde üretilen SBS PMAN’lerde karıştırma hızının değişimine göre deformasyonlar incelendiğinde, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında deformasyonu %1.5; 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %46.5 artmıştır. En iyi tekerlek izi direncini 0.3725 mm deformasyon değeri ile 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımı göstermiştir.

160 °C’de ve 90 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN’lerde en düşük deformasyon, 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen SBS PMAN karışımında gözlemlenmiştir. Karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında deformasyonu %27.8 artarken, 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %10.9 azalmıştır.

160 °C sıcaklıkta ve 120 dakika karıştırma süresinde üretilen SBS PMAN modifikasyonlarında en iyi deformasyon direncini 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN göstermiştir. 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımının deformasyon değerine kıyasla, karıştırma hızı 4000 dev./dk. olduğunda deformasyonu %15.6 ve 5000 dev./dk. olduğunda %14.6 artmıştır. Kontrol (saf) karışımın ve SBS modifiye bitümlü hazırlanan karışımın tekerlek izi direnci PMAN karışımlardan düşük çıkmıştır.

SBS modifiye bitümlü karışım, saf bitümlü karışımına göre %36.8 daha düşük deformasyon göstermiştir. 160 °C’de, 4000 dev./dk. - 90 dk. ve 5000 dev./dk. - 60 dk.

karıştırma parametreleriyle hazırlanan PMAN'ler hariç bütün SBS PMAN karışımları SBS modifiye bitümlü karışımdan daha yüksek deformasyon direnci göstermiştir. Düşük sıcaklıkta yapılan modifikasyon başarımlarının düşük olması, nano malzemenin tam olarak dağılamaması veya SBS'in bitüm içerisinde uzaysal ağ olarak dağılamaması, bir miktar SBS'in bitüm içerisinde erimemesi ve bitüm içerisindeki polimer yoğunluğunun düşük kalmasının karışım performansının yeterince yüksek çıkmamasına ve hatta bazı seçeneklerde daha kötü performans sergilemesine sebebiyet vermiş olabileceği düşünülmektedir.

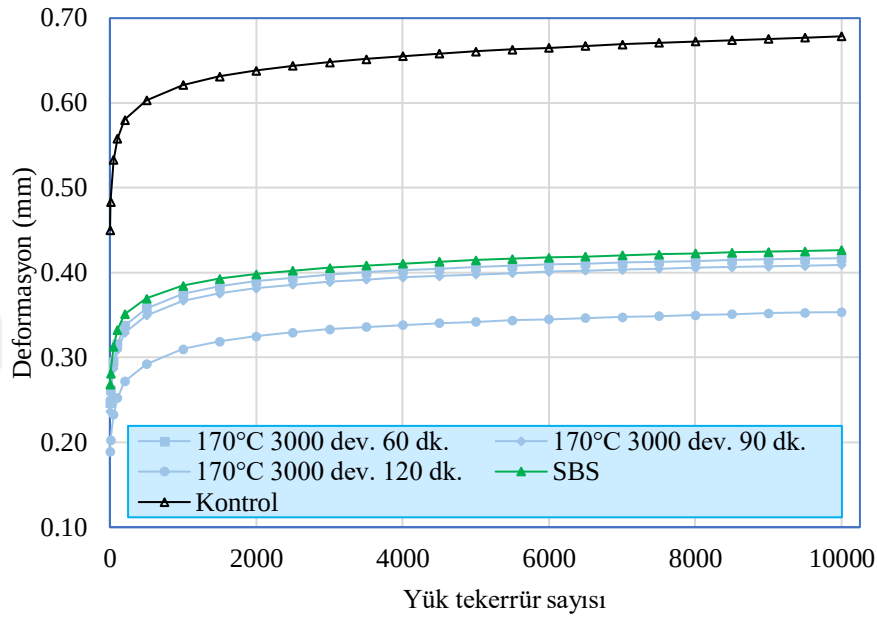


Şekil 143. 160 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

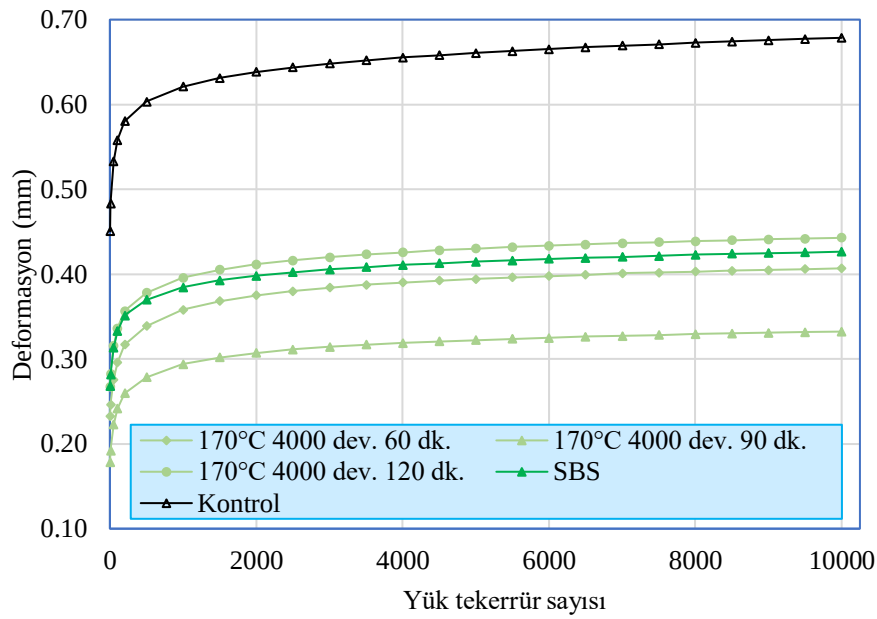
Şekil 143'teki sünme eğrileri incelendiğinde, 160 °C sıcaklıkta ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen SBS PMAN karışımlarında karıştırma süresi artırıldığında karışımların deformasyon dirençlerinin arttığı görülmektedir. 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN'lerde en düşük deformasyon değerine 60 dakika karıştırma süresinde ulaşılmıştır. Karıştırma hızı 5000 dev./dk. olduğunda ve karıştırma süresi artırıldığında karışımların tekerlek izi dirençleri artmıştır. 160 °C sıcaklıkta hazırlanan bütün PMAN'lerde en düşük deformasyonu 0.336 mm deformasyon değeriyle, 3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 120 dakika karıştırma süresinde üretilen karışım, en yüksek deformasyonu

ise 5000 dev./dk. karıştırma hızında ve 60 dakika karıştırma süresinde üretilen karışım göstermiştir.

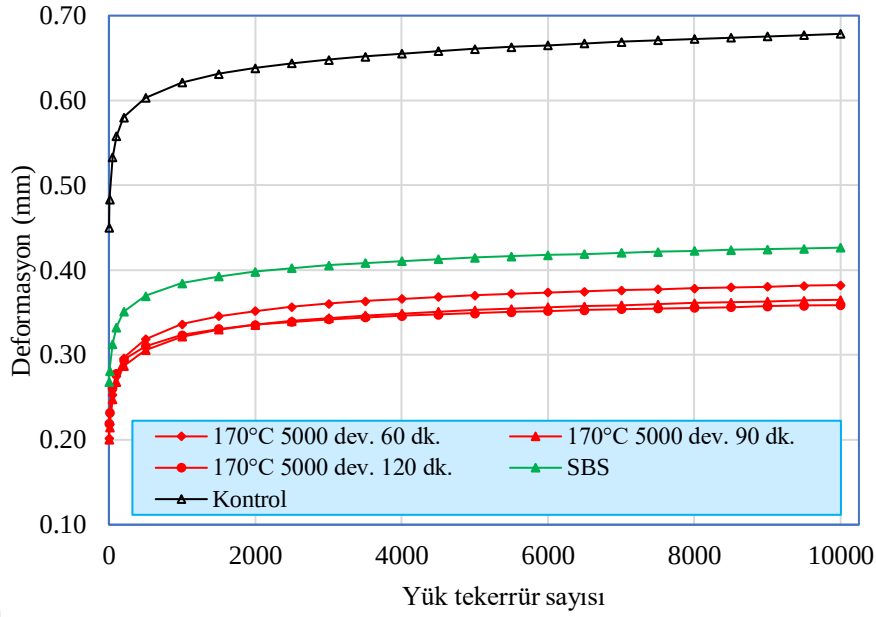
Şekil 144 - Şekil 150’de 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen SBS PMAN karışımlarına ait tekrarlı yük sünme testinin grafikleri verilmiştir.



Şekil 144. 170 °C’de 3000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 145. 170 °C’de 4000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

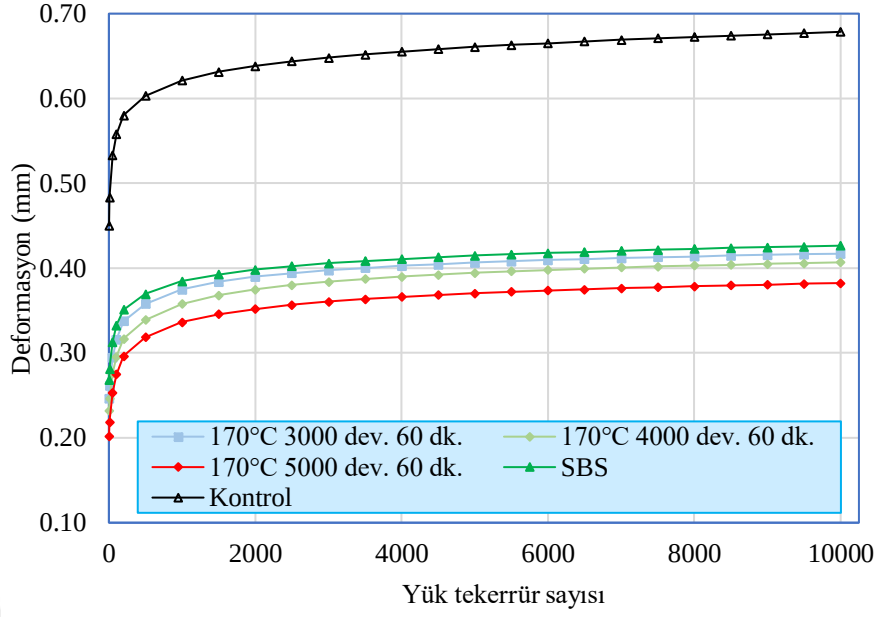


Şekil 146. 170 °C’de 5000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

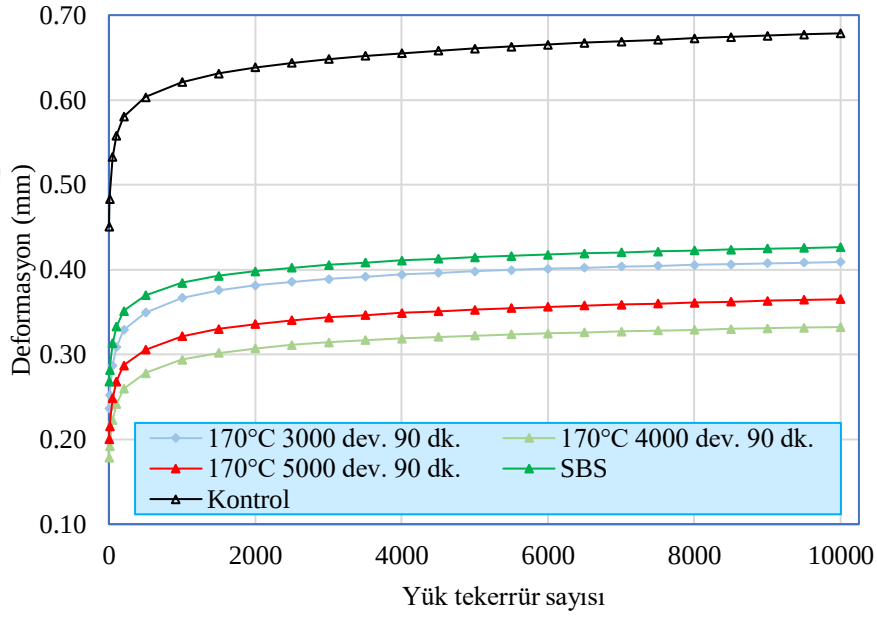
170 °C sıcaklıkta ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımlarında en yüksek deformasyon direncini 0.35 mm deformasyon değeriyle 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan karışım göstermiştir. PMAN’ler hazırlanırken, karıştırma süresi artırıldığında karışımların tekerlek izi dirençleri artmıştır. SBS modifiye bitümlü karışım ve saf bitümlü karışımlar PMAN karışımlarından daha yüksek deformasyon göstermiştir.

170 °C sıcaklıkta ve 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımlarında en yüksek deformasyon direncini 0.3323 mm deformasyon miktarıyla 90 dakika karıştırma süresinde üretilen karışım vermiştir. Karıştırma süresi 60 dakikadan 90 dakikaya çıkarıldığında PMAN karışımın deformasyonu %18.8 azalmış, karıştırma süresi 90 dakikadan 120 dakikaya çıkarıldığında ise deformasyonu %33.3 artmıştır. SBS modifiyeli karışım genel olarak PMAN karışımlardan daha yüksek deformasyon göstermiştir.

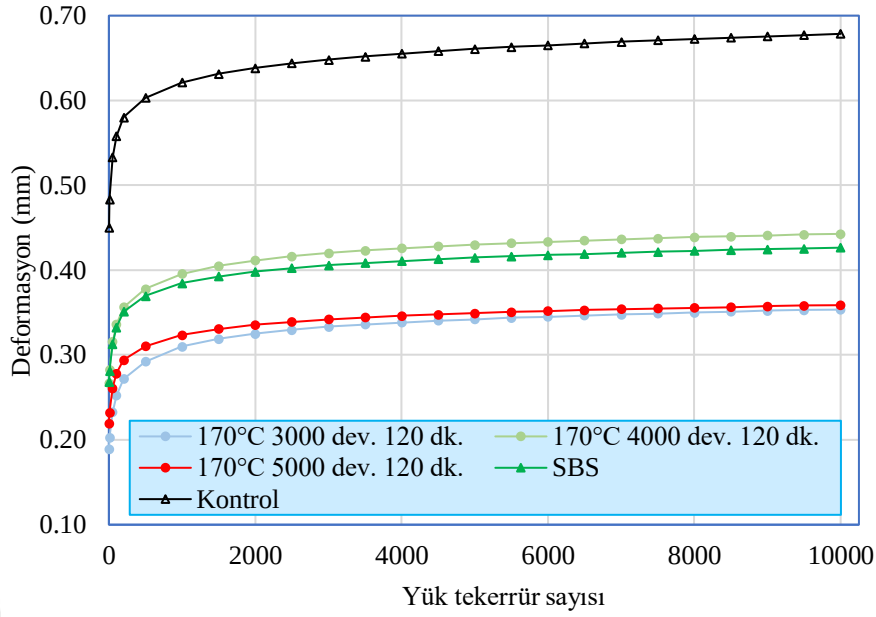
170 °C karıştırma sıcaklığı ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN’lerin karıştırma süresi artırıldığında karışımların tekerlek izi dirençleri artmıştır. PMAN’lerin deformasyonları karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında %4.5; 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında %1.8 azalmıştır. En yüksek deformasyon direncini 120 dakika karıştırma süresinde yapılan PMAN modifikasyonu vermiştir.



Şekil 147. 170 °C’de 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 148. 170 °C’de 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

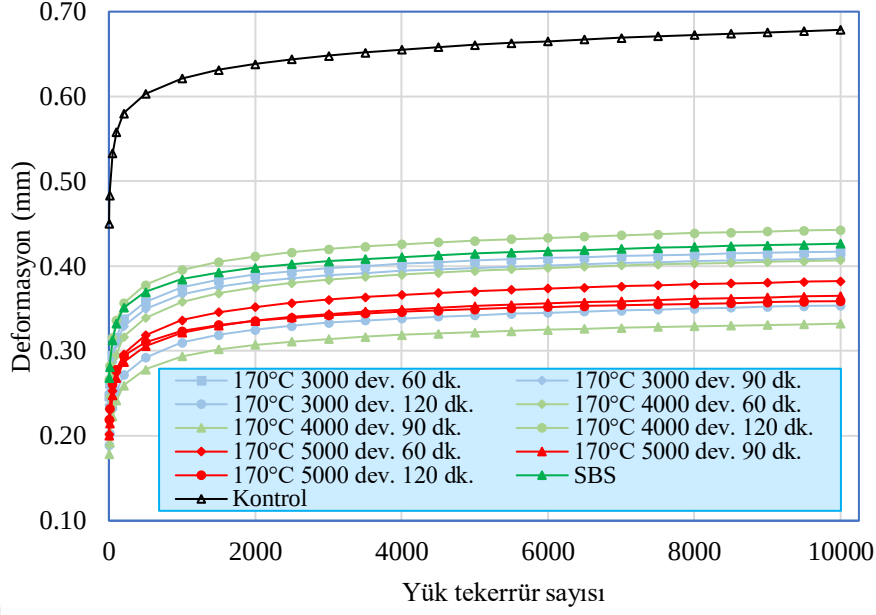


Şekil 149. 170 °C’de 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

170 °C karıştırma sıcaklığında ve 60 dk. karıştırma süresinde hazırlanan SBS PMAN karışımlarında karıştırma hızı artırıldığında karışımların deformasyon dirençleri de artmıştır. PMAN karışımların deformasyonları, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %2.4, 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %6 azalmıştır. 60 dk. karıştırma süresi ve 170 °C sıcaklıkta üretilen PMAN karışımları arasında en yüksek deformasyon direncini 0.3825 mm deformasyon değeri ile 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımı göstermiştir. SBS modifiyeli karışım ile 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN karışımı birbirlerine yakın deformasyonlar göstermiş olup, SBS modifiye bitümle hazırlanan karışım daha fazla deformasyon sergilemiştir.

170 °C karıştırma sıcaklığında ve 90 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN’lerde en yüksek tekerlek izi dirençlerini sırasıyla, 4000 dev./dk., 5000 dev./dk. ve 3000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen karışımlar göstermiştir.

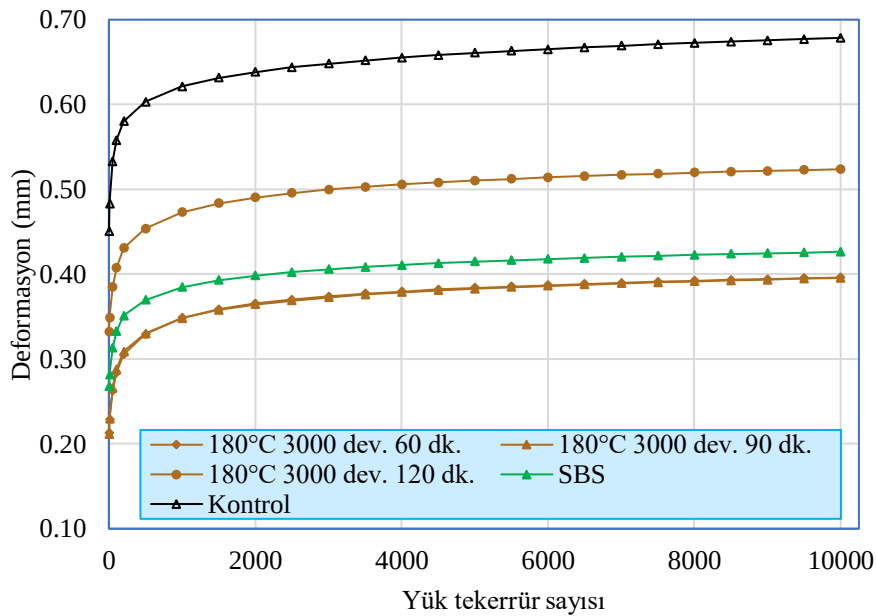
170 °C karıştırma sıcaklığı ve 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN’lerde en yüksek tekerlek izi direncini sırasıyla, 3000 dev./dk., 5000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan karışımlar göstermiştir. 3000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN’ler birbirine yakın deformasyon değerleri sergilerken, karıştırma hızı 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında deformasyon değeri %18.2 azalmıştır. SBS modifiyeli karışım, 3000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN karışımlarından sonra en yüksek tekerlek izi direncine sahiptir.



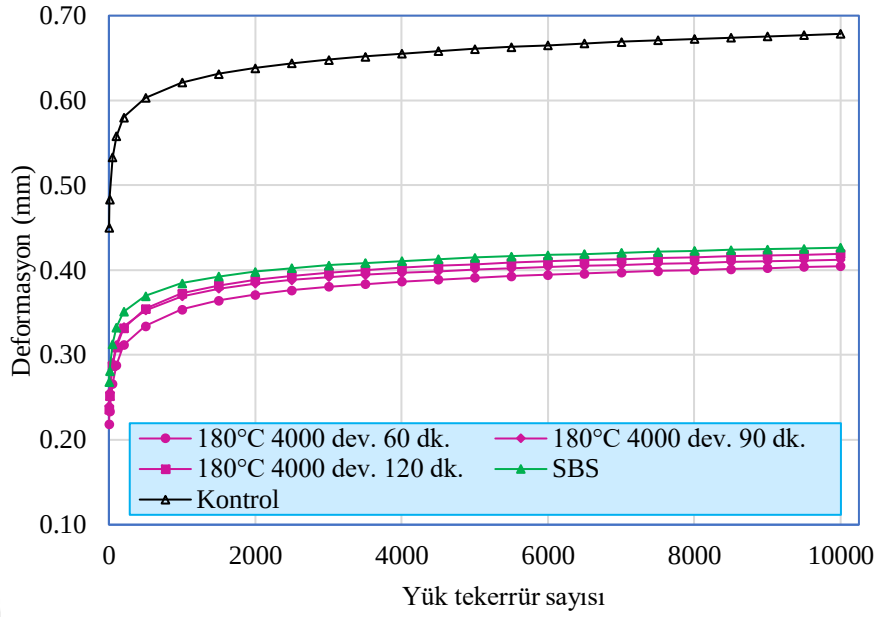
Şekil 150. 170 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımlarının sünme eğrileri

170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen SBS PMAN karışımlarında en yüksek tekerlek izi dirençlerini sırasıyla, 4000 dev./dk. - 90 dk., 3000 dev./dk. - 120 dk. ve 5000 dev./dk. - 120 dk. karıştırma parametrelerinde hazırlanan karışımlar göstermiştir.

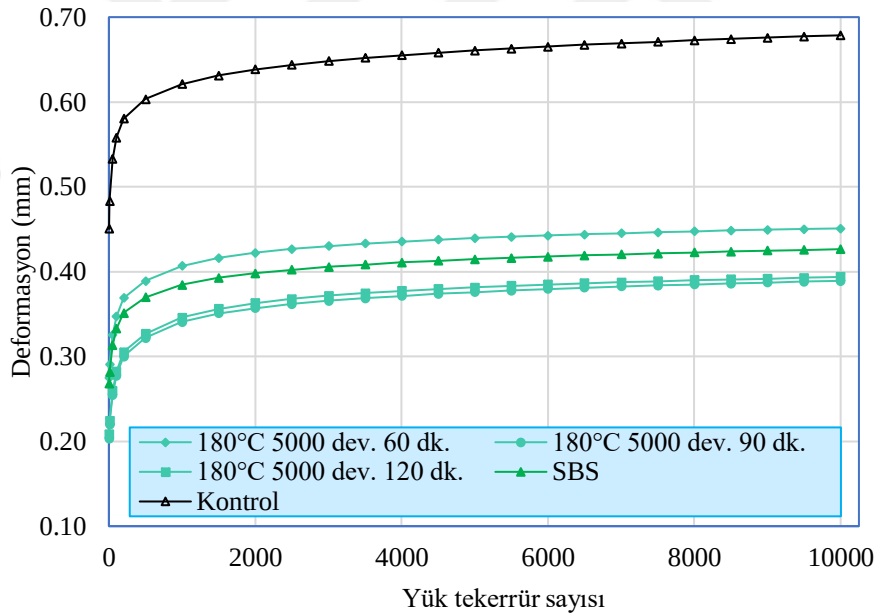
Şekil 151 - Şekil 157’de 180 °C sıcaklıkta hazırlanan SBS PMAN karışımıyla üretilen örneklerin sünme testinin grafikleri verilmiştir.



Şekil 151. 180 °C’de 3000 dev./dk. için SBS PMAN karışımlarının sünme eğrileri



Şekil 152. 180 °C’de 4000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

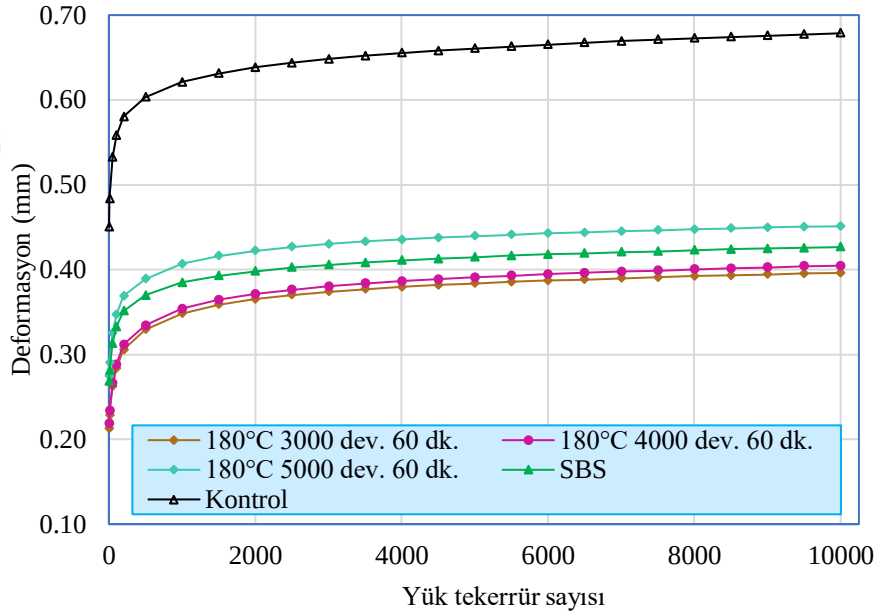


Şekil 153. 180 °C’de 5000 dev./dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

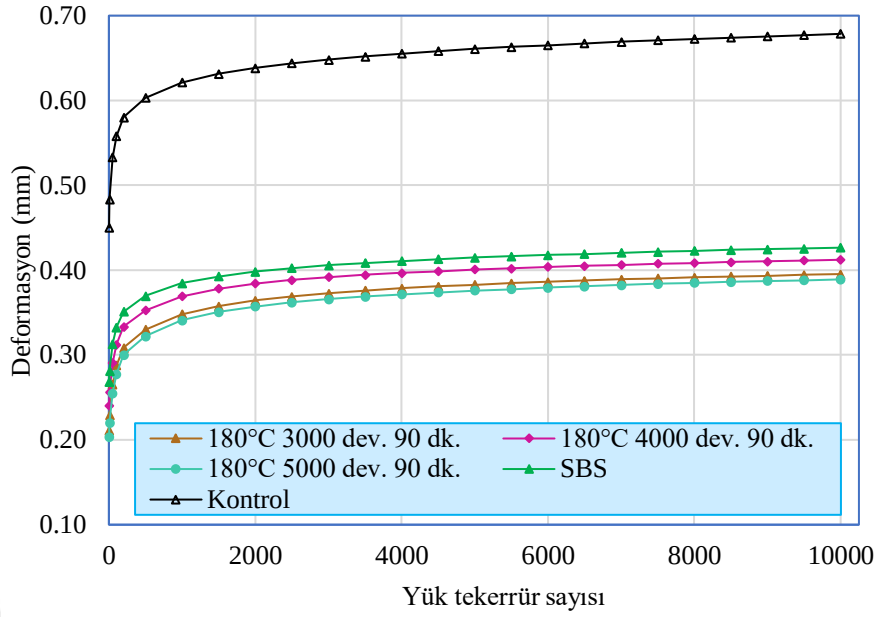
180 °C karıştırma sıcaklığında ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen SBS PMAN’lerde en yüksek tekerlek izi direncini 60 ve 90 dakika karıştırma sürelerinde hazırlanan karışımlar göstermiştir. 120 dakika karıştırma süresinde modifiye edilen PMAN karışımı, 60 ve 90 dakika karıştırma sürelerinde üretilen PMAN karışımlarından %30 daha fazla deformasyon sergilemiştir.

180 °C karıştırma sıcaklığı ve 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan SBS PMAN karışımların deformasyonları, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %1.9, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %1.7 artmıştır. Buna göre, en yüksek tekerlek izi direncini 0.4046 mm deformasyon miktarı ile 60 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımı göstermiştir.

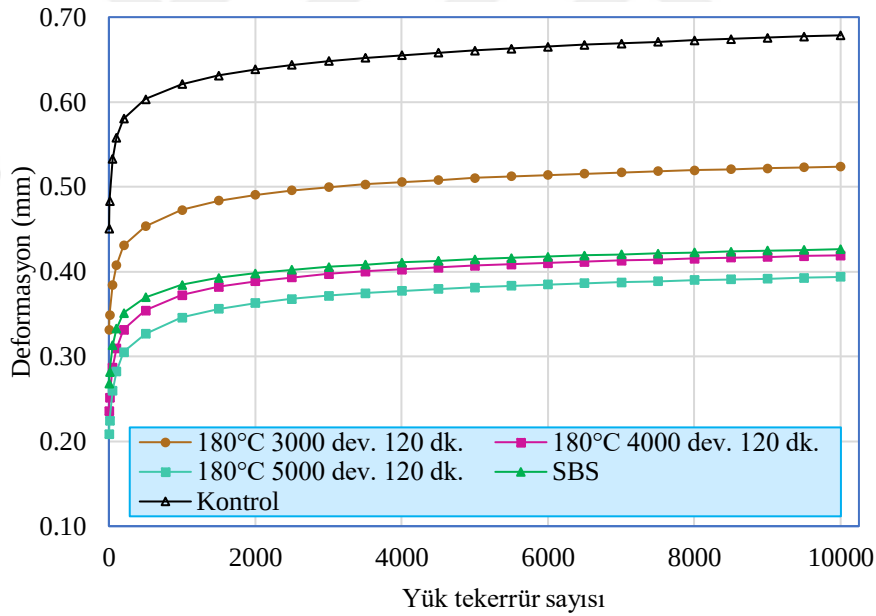
180 °C karıştırma sıcaklığında, 5000 dev./dk. karıştırma hızında 90 ve 120 dakika karıştırma sürelerinde hazırlanan PMAN karışımları birbirlerine çok yakın deformasyonlar göstermişlerdir. 60 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımı, 90 ve 120 dakikada karıştırma sürelerinde yapılan PMAN modifikasyonlarına göre %15.4 daha fazla deformasyon sergilemiştir. 180 °C sıcaklık ve 60 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımı, SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımdan %4.7 daha fazla deformasyon göstermiştir. Daha yüksek karıştırma sürelerinde PMAN karışımlar tekerlek izine karşı daha fazla direnç göstermişlerdir.



Şekil 154. 180 °C’de 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 155. 180 °C'de 90 dk. için SBS PMAN karışımlarının sünme eğrileri



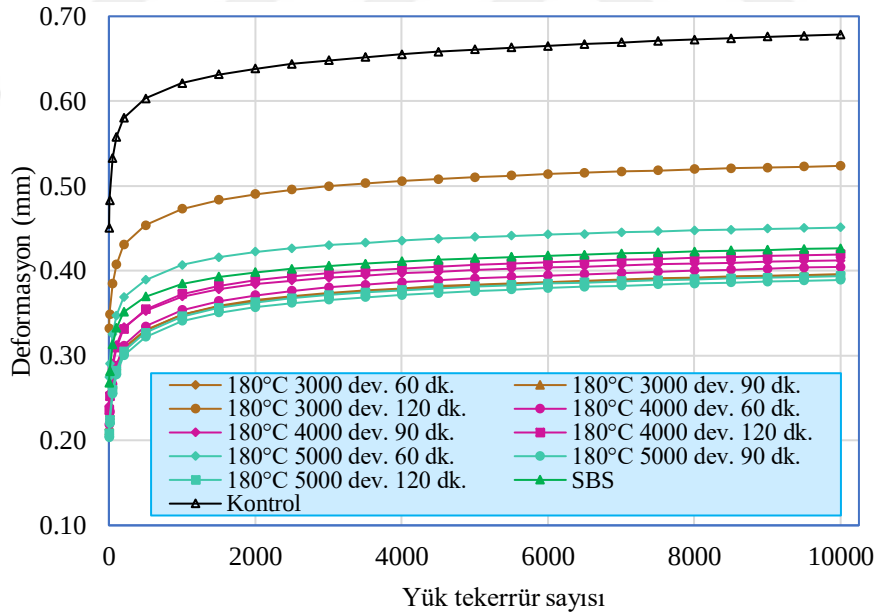
Şekil 156. 180 °C'de 120 dk. için SBS PMAN karışımlarının sünme eğrileri

180 °C karıştırma sıcaklığı ve 60 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerin sünme eğrileri incelendiğinde, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında deformasyonu %2.2, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise %11.5 artmıştır. 180 °C'de ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan SBS PMAN

karışımlarında en düşük deformasyonu 0.396 mm deformasyon değeriyle 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen karışım göstermiştir.

180 °C sıcaklıkta ve 90 dakika karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımlarında en düşük deformasyonu (0.3892 mm) 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN karışımı sergilemiştir. 3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dk. karıştırma süresinde hazırlanan karışım, 4000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen karışımın %4.3 daha az deformasyon göstermiştir.

180 °C karıştırma sıcaklığı ve 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerin deformasyonları, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında yaklaşık %20, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında %6.1 oranında azalmıştır. SBS PMAN karışımlarına ait sünme eğrileri içinde en yüksek deformasyon direncini (0.3937 mm) 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen karışım vermiştir. SBS modifiye bitümlü karışım, 3000 dev./dk. - 120 dk. karıştırma parametresinde hazırlanan PMAN karışımından %17.9 daha az deformasyon göstermiştir.

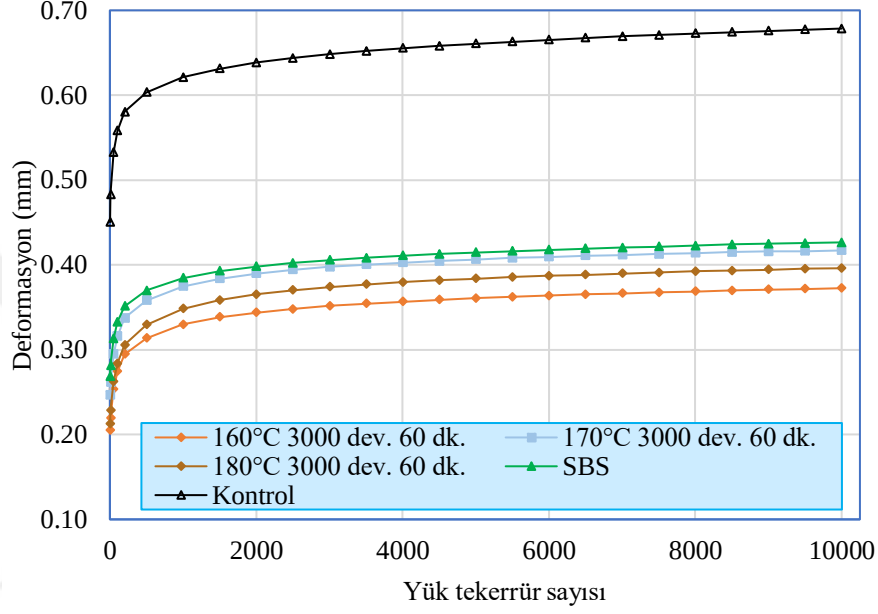


Şekil 157. 180 °C karıştırma sıcaklığı için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

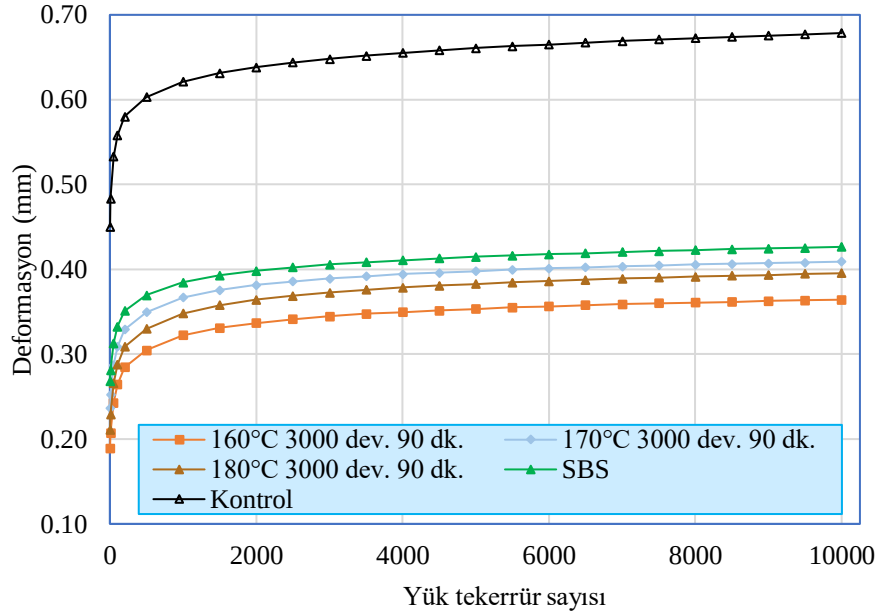
180 °C karıştırma sıcaklığında üretilen SBS PMAN karışımlarına ait deformasyonlar incelendiğinde, en yüksek deformasyon dirençlerini 5000 dev./dk. karıştırma hızında,

sırasıyla 90 ve 120 dk. karıştırma süreleri; 3000 dev./dk. karıştırma hızında 90 ve 60 dk. karıştırma sürelerinde hazırlanan karışımlar göstermişlerdir.

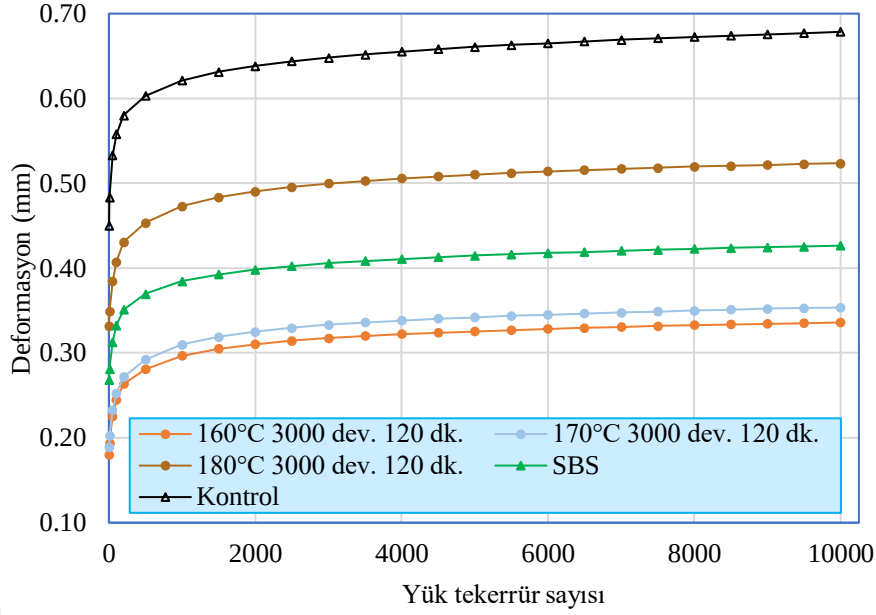
Şekil 158 - Şekil 166'da değişen karıştırma sıcaklıklarında, sabit karıştırma hızları ve karıştırma sürelerinde hazırlanan SBS PMAN karışımlarına ait sünme grafikleri sunulmuştur.



Şekil 158. 3000 dev./dk.'da 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 159. 3000 dev./dk.'da 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

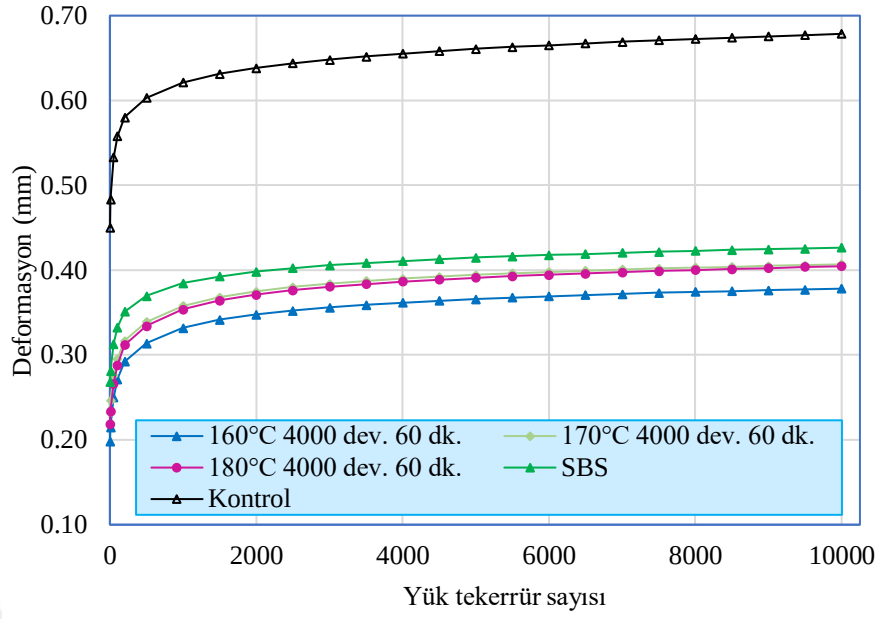


Şekil 160. 3000 dev./dk.'da 120 dk. için SBS PMAN karışımlarının sünme eğrileri

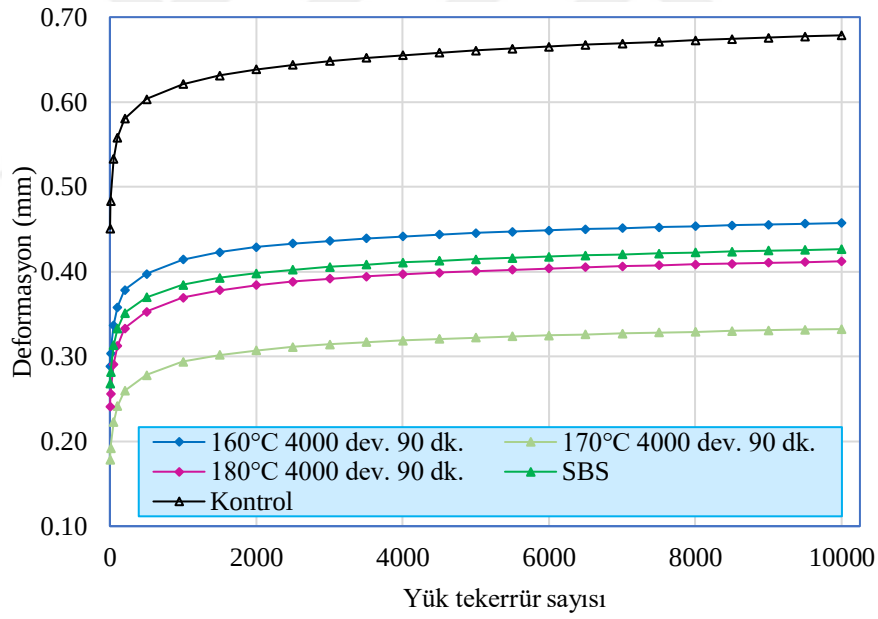
3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan SBS PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı 160 °C olduğunda en düşük deformasyon (0.3725 mm), karıştırma sıcaklığı 170 °C olduğunda en yüksek deformasyon (0.417 mm) değerleri gözlemlenmiştir. Karıştırma sıcaklığı 180 °C olduğunda, deformasyon değeri 160 °C'ye göre %8.1 artmıştır. 3000 dev./dk. ve 60 dk. karıştırma süresinde hazırlanan tüm SBS PMAN karışımları SBS modifiye bitümlü karışımdan daha yüksek tekerlek izi direncine sahiptir.

3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dakika sürede üretilen PMAN'lerde karıştırma sıcaklığı 160 °C seçildiğinde tekerlek izine karşı en yüksek direnç, karıştırma sıcaklığı 170 °C seçildiğinde ise tekerlek izine karşı en düşük direnç gözlemlenmiştir.

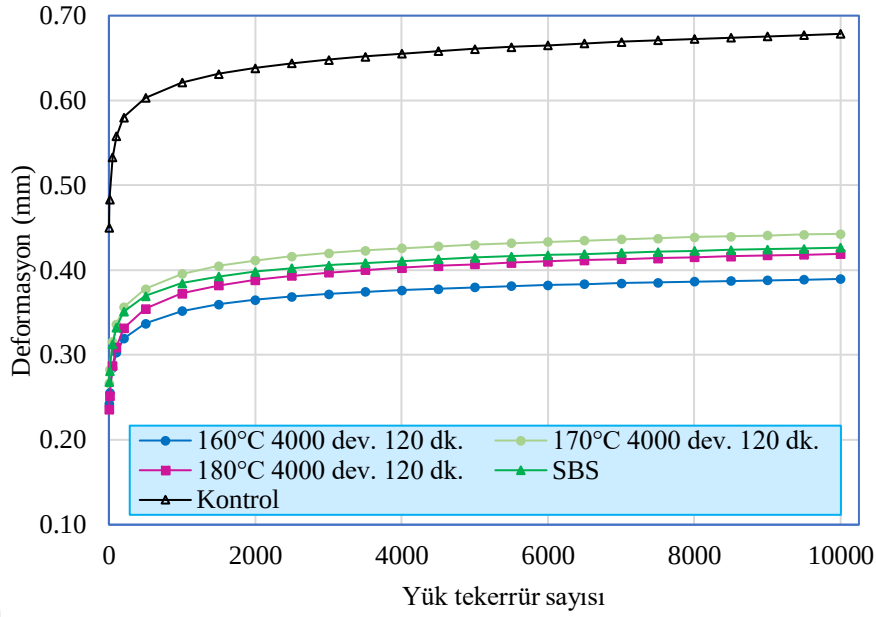
3000 dev./dk. karıştırma hızında ve 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerin deformasyonları, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında %5.2, 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında %48.1 artmıştır. 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen PMAN karışımının deformasyon miktarı (0.336 mm) diğer PMAN karışımlarının deformasyonlarından daha düşük çıkmıştır. SBS modifiye bitümle hazırlanan karışım, 180 °C'de üretilen PMAN karışımının deformasyon değerinden %17.3 daha az deformasyon göstermiştir.



Şekil 161. 4000 dev./dk.'da 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 162. 4000 dev./dk.'da 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

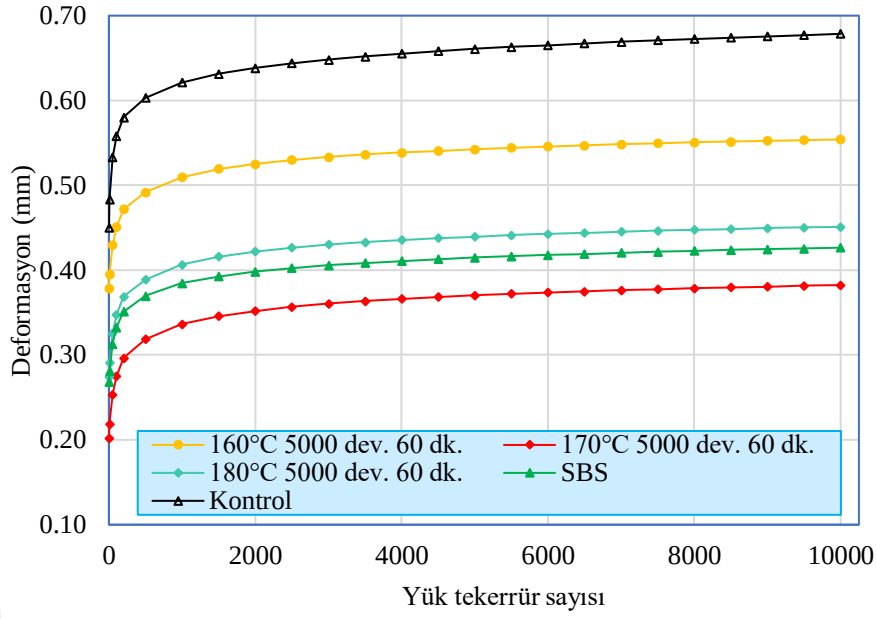


Şekil 163. 4000 dev./dk.'da 120 dk için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

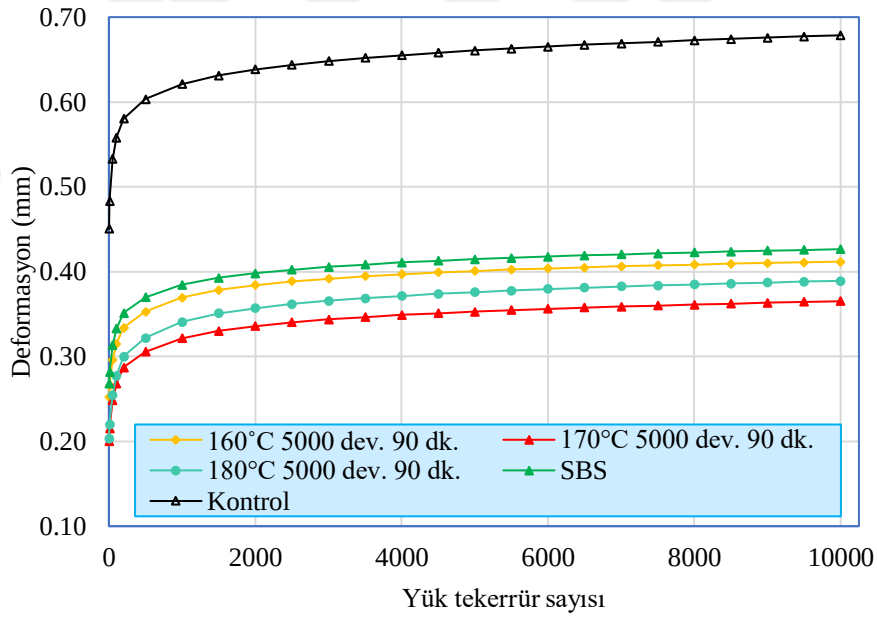
4000 dev./dk. karıştırma hızında ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerde, 160 °C karıştırma sıcaklığında elde edilen deformasyon direnci 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında elde edilen deformasyon dirençlerinden daha fazla olmuştur. 170 ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan PMAN'lerin sünme test sonuçlarından elde edilen deformasyon değerleri (0.4069 mm ve 0.4046 mm) birbirine yakın çıkmıştır.

4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dakika karıştırma süresinde, karıştırma sıcaklığının değişimine göre PMAN karışımların deformasyon değerleri incelendiğinde en düşük deformasyon değerine (0.3323 mm) 170 °C sıcaklıkta ulaşılmıştır. Karıştırma sıcaklığı 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında deformasyon değeri %24.1 artmış olup en yüksek deformasyon 160 °C karıştırma sıcaklığında gözlemlenmiştir.

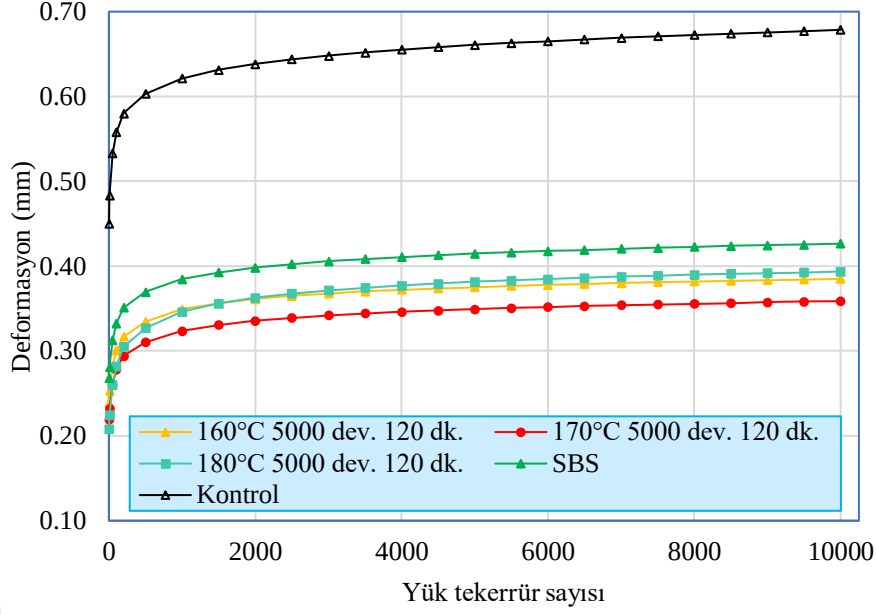
4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan SBS PMAN karışımlarda en düşük deformasyon değerleri sırasıyla; 160 °C, 180 °C ve 170 °C karıştırma sıcaklıklarında elde edilmiştir. SBS modifiye bitümle üretilen karışım 170 °C'de üretilen SBS PMAN karışımından %2.9 daha az deformasyon göstermiştir.



Şekil 164. 5000 dev./dk.'da 60 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 165. 5000 dev./dk.'da 90 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 166. 5000 dev./dk.'da 120 dk. için SBS PMAN karışımların sünme eğrileri

5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dk. karıştırma süresinde sırasıyla 170 °C, 180 °C ve 160 °C sıcaklıklarda hazırlanan SBS PMAN karışımları tekerlek izine karşı yüksek deformasyon dirençleri göstermiştir. Karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C çıkarıldığında PMAN karışımın deformasyon değeri yaklaşık %31 daha az çıkmıştır. Ancak, karıştırma sıcaklığı 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında deformasyon değeri %17.9 artmıştır.

5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dk. karıştırma süresinde yapılan PMAN'lerde deformasyon miktarı, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C çıkarıldığında %11.3 azalırken, 170 °C'den 180 °C çıkarıldığında ise %6.6 artmıştır.

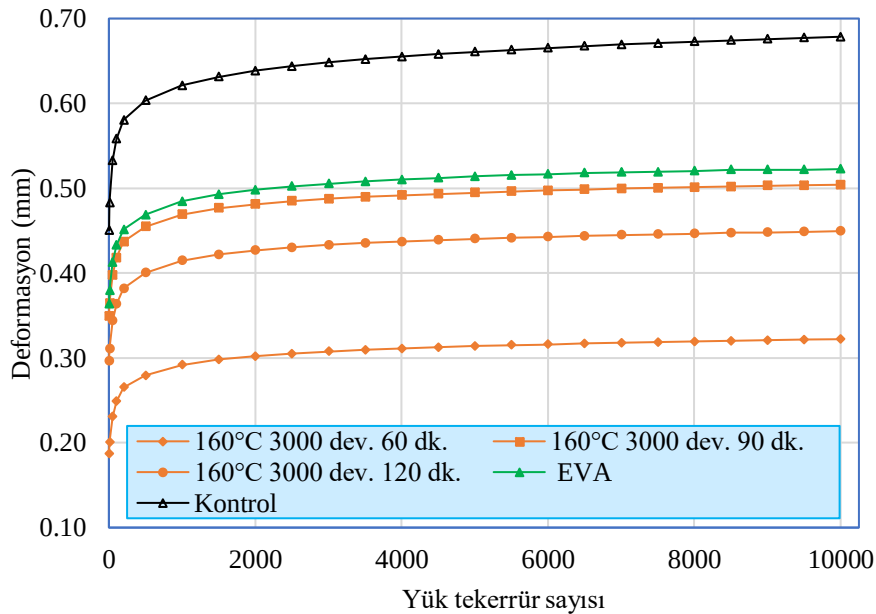
5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 120 dk. karıştırma süresinde sırasıyla 170 °C, 160 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında üretilen PMAN karışımları düşük deformasyon değerleri göstermiştir. Karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C çıkarıldığında karışımın deformasyonu %6.9 azalırken, 170 °C'den 180 °C çıkarıldığında ise deformasyon değeri %9.8 artmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında ve tüm karıştırma sürelerinde üretilen SBS PMAN'lerde tekerlek izine karşı en iyi dirençler 170 °C'de yapılan modifikasyonlarda görülmüştür. 170 °C'de ve 5000 dev./dk.'da üretilen PMAN'lerde en düşük deformasyon miktarları sırasıyla 120, 90 ve 60 dakika karıştırma sürelerinde elde edilmiştir.

Tablo 28. SBS PMAN karışımlarının 10000 yük tekrüründeki deformasyonları (mm)

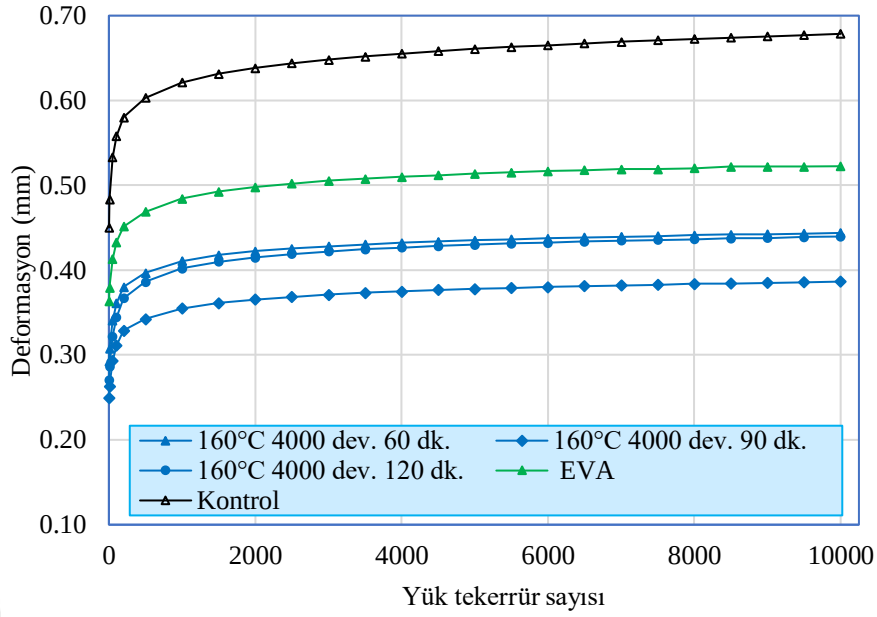
	3000 dev./dk.			4000 dev./dk.			5000 dev./dk.		
	60 dk.	90 dk.	120 dk.	60 dk.	90 dk.	120 dk.	60 dk.	90 dk.	120 dk.
160 °C	0.3725	0.3643	0.3360	0.3782	0.4573	0.3897	0.5542	0.4118	0.3851
170 °C	0.4170	0.4091	0.3535	0.4069	0.3323	0.4428	0.3825	0.3651	0.3587
180 °C	0.3960	0.3954	0.5237	0.4046	0.4123	0.4192	0.4510	0.3892	0.3937

Bütün sıcaklık, karıştırma süresi ve karıştırma hızları birlikte değerlendirildiğinde (Tablo 28); düşük modifikasyon sıcaklığında (160 °C) yüksek karıştırma süresinde (120 dk.), daha yüksek sıcaklıklarda ise daha düşük karıştırma sürelerinde (90 dk.) en düşük deformasyonlar elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek tekerlek izi direncine 170 °C sıcaklıkta ulaşılmıştır. 160 ve 180 °C sıcaklıklarda da yakın deformasyon değerleri elde edilse de özellikle yüksek sıcaklıkta erken dönem yaşlanma riski ve düşük sıcaklıkta da nanokompozit doğasına uygun olmayan PMAN'lerin oluşması, 170 °C modifikasyon sıcaklığının daha ideal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

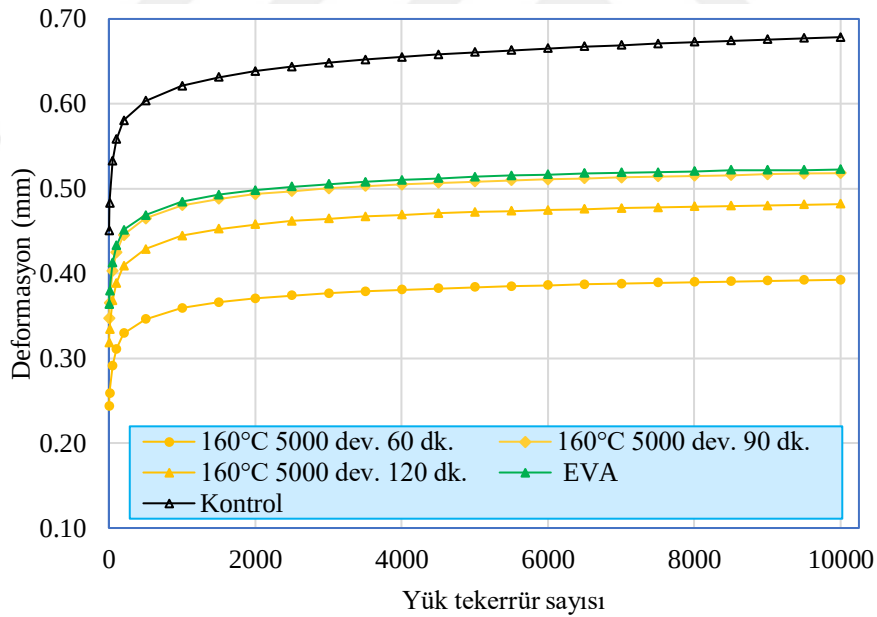
EVA PMAN ile hazırlanan asfalt karışımların tekerlek izi direnci açısından değerlendirilmesi de yapılmıştır. Şekil 167 - Şekil 173'te 160 °C sıcaklıkta hazırlanan EVA PMAN ile üretilen asfalt briketlerinin sünme eğrileri üçer örneğin ortalaması alınarak gösterilmiştir.



Şekil 167. 160 °C'de 3000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 168. 160 °C'de 4000 dev./dk. için EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri



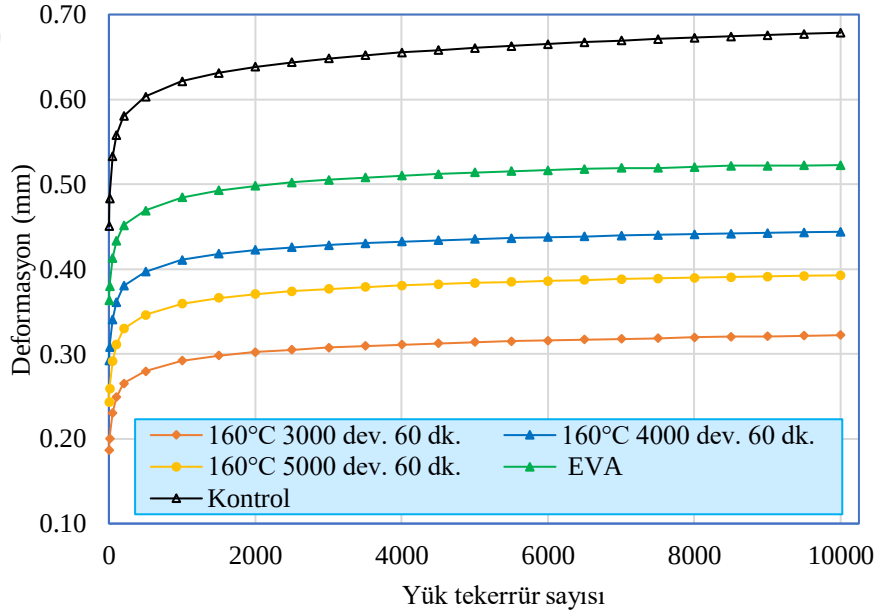
Şekil 169. 160 °C'de 5000 dev./dk. için EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri

160 °C sıcaklıkta ve 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan EVA PMAN'lerde en düşük deformasyon değerini (0.322 mm) 60 dakika karıştırma süresinde üretilen karışım vermiştir. Katkısız bitümle hazırlanan karışım en yüksek deformasyonu gösterirken, EVA

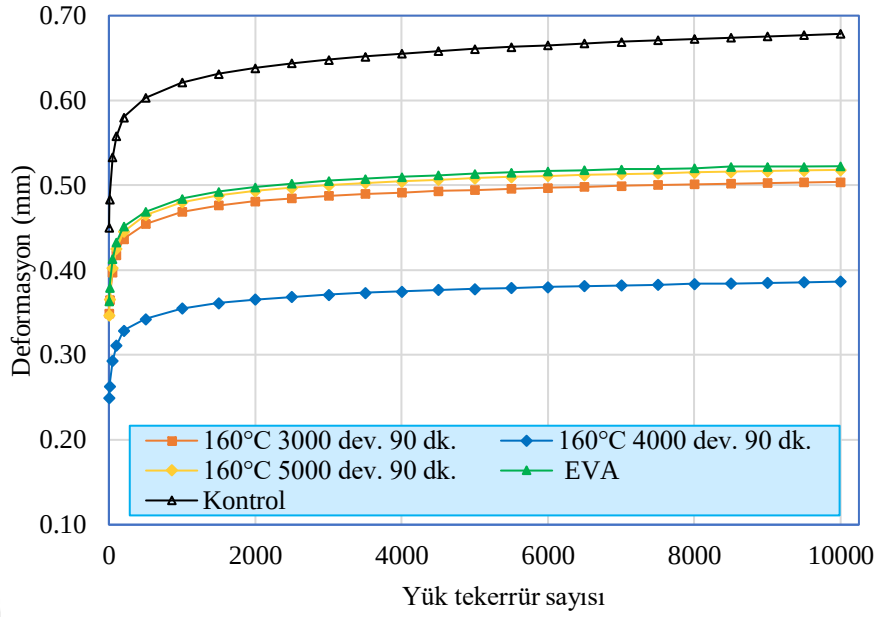
modifiye bitümle hazırlanan karışım PMAN karışımlarından sonra en yüksek deformasyonu göstermiştir.

160 °C sıcaklıkta ve 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan EVA PMAN karışımlarında en düşük deformasyon, 90 dakika karıştırma süresinde yapılan modifikasyonda görülmüştür. Karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında PMAN karışımın deformasyon değeri %12.9 azalırken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında ise %13.7 artmıştır. EVA modifiye bitümle hazırlanan karışım, katkısız bitümle hazırlanan karışımdan %23.5 daha az deformasyon göstermiştir.

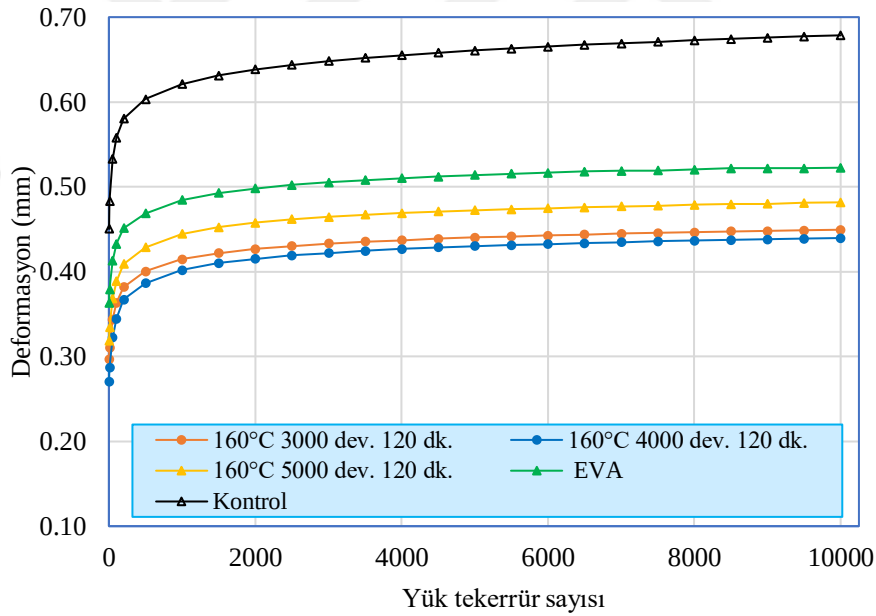
160 °C karıştırma sıcaklığı ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan EVA PMAN karışımlarında en düşük deformasyon (0.3926 mm), 60 dakikada karıştırma süresinde yapılan modifikasyonda meydana gelmiştir. EVA PMAN karışımlarında deformasyon değeri, karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında %32 artarken, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %7 azalmıştır. EVA modifiye bitümle hazırlanan karışım, 160 °C'de ve 90 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımıyla yaklaşık olarak aynı deformasyon miktarına sahip olmuştur.



Şekil 170. 160 °C'de 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



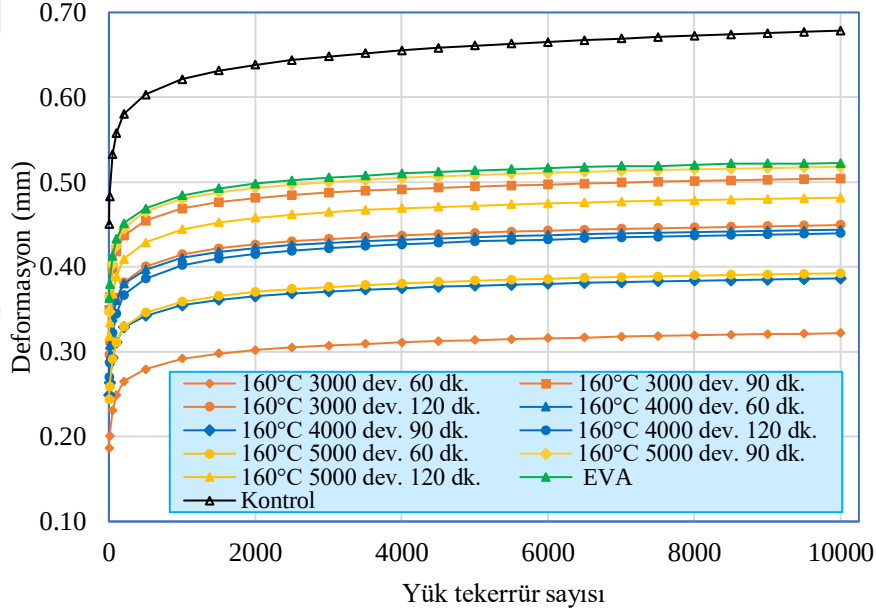
Şekil 171. 160 °C'de 90 dk. için EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri



Şekil 172. 160 °C'de 120 dk. için EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri

Şekil 170 – Şekil 172'den 160 °C karıştırma sıcaklığı ve 60 dakika karıştırma süresinde yapılan EVA PMAN'lerin en düşük deformasyon değerleri sırasıyla, 3000 dev./dk., 5000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında yapılan modifikasyonlarında görülmüştür. Aynı sıcaklıkta, 90 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerde 4000 dev./dk. karıştırma süresinde yapılan modifikasyon en küçük deformasyon değerini

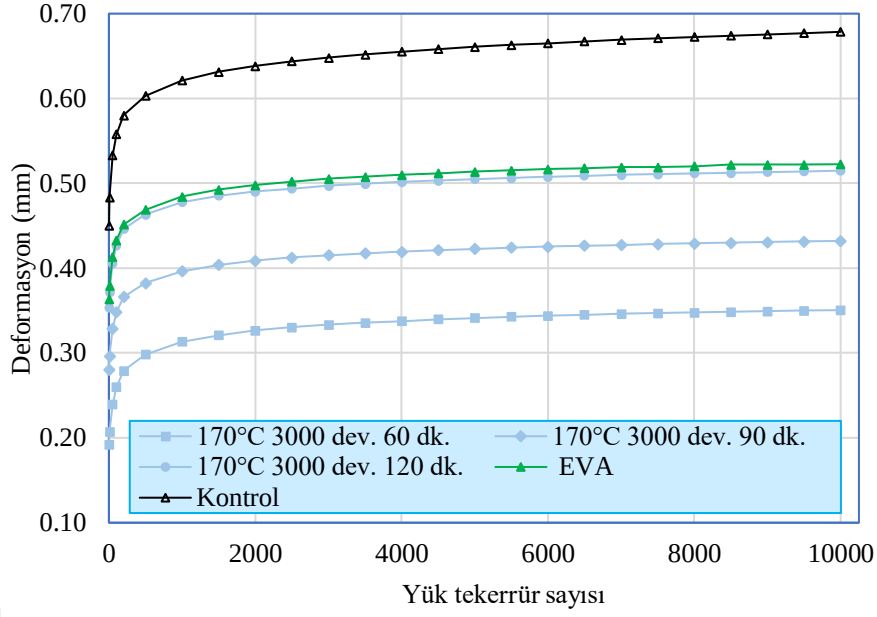
vermiştir. 90 dk. karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerde, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında karışımın deformasyon değeri %23.3 azalırken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise %34 artmıştır. 160 °C karıştırma sıcaklığı ve 120 dk. karıştırma süresinde tekerlek izine karşı dirençlere sırasıyla 4000, 3000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen EVA PMAN karışımlarında ulaşılmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN'lerde, karıştırma hızı 3000 dev./dk.'dan 4000 dev./dk.'ya çıkarıldığında karışımın deformasyon değeri %2.2 azalırken, 4000 dev./dk.'dan 5000 dev./dk.'ya çıkarıldığında ise deformasyonu %9.6 artmıştır. Katkısız bitümle ve EVA modifiye bitümle üretilen karışımlar, 160 °C'de hazırlanan bütün EVA PMAN karışımlarından daha yüksek deformasyon değerlerine sahiptir.



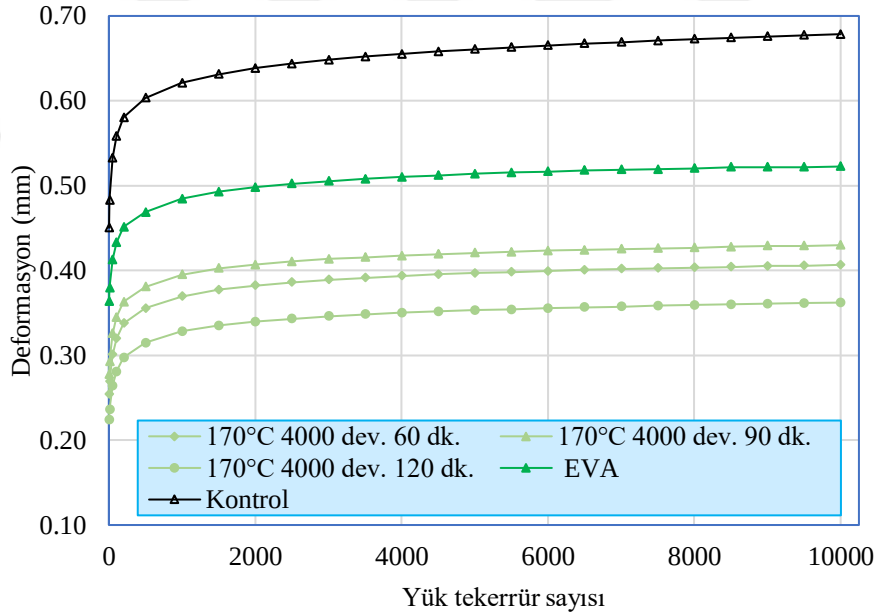
Şekil 173. 160 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

Şekil 173'te, 160 °C karıştırma sıcaklığında üretilen bütün EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri gösterilmiştir. 160 °C sıcaklıkta en düşük üç deformasyon değerini sırasıyla, 3000 dev./dk. - 60 dk., 4000 dev./dk. - 90 dk. ve 5000 dev./dk. - 60 dk. karıştırma parametrelerinde hazırlanan karışımlar vermiştir.

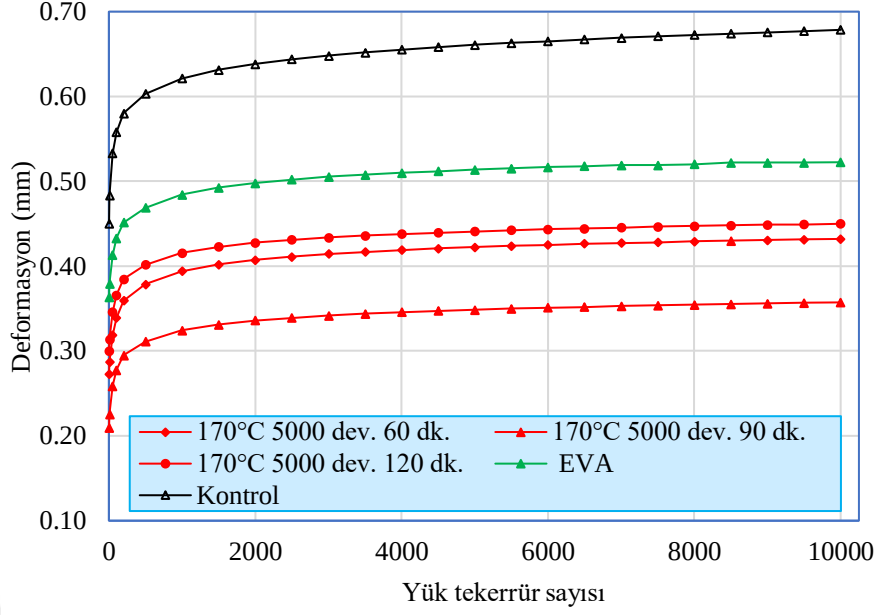
Şekil 174 - Şekil 180'de, 170 °C sıcaklıkta hazırlanan EVA PMAN'lerle üretilen üç asfalt briketin deformasyonlarının ortalaması alınarak grafikler gösterilmiştir.



Şekil 174. 170 °C’de 3000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 175. 170 °C’de 4000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



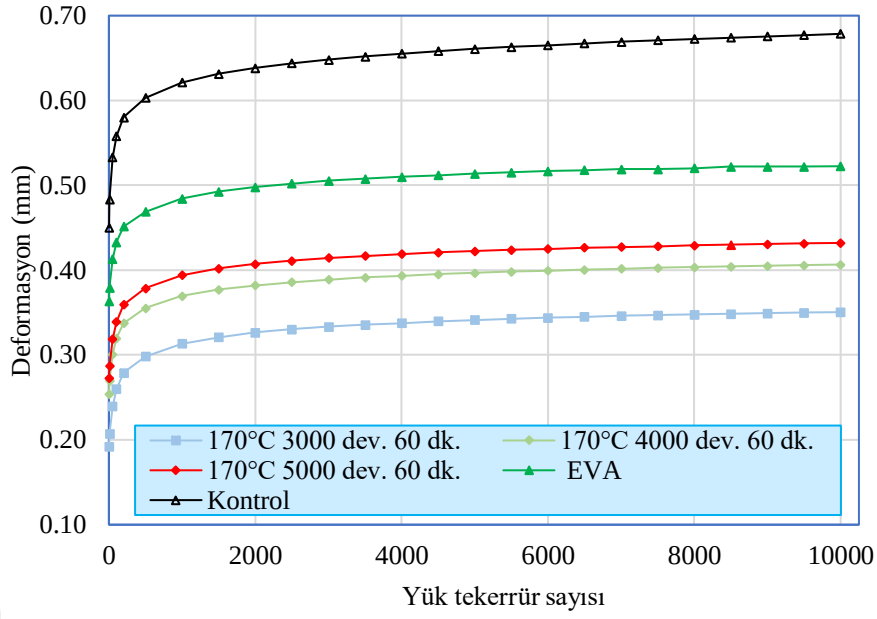
Şekil 176. 170 °C’de 5000 dev./dk. için EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri

170 °C karıştırma sıcaklığında, 3000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan EVA PMAN’lerde karıştırma süresi azaldıkça karışımların tekerlerlek izine karşı dirençleri artmıştır. PMAN’ler üretilirken, karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında karışımın deformasyon miktarı %23.3, karıştırma süresi 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında %19.2 artmıştır.

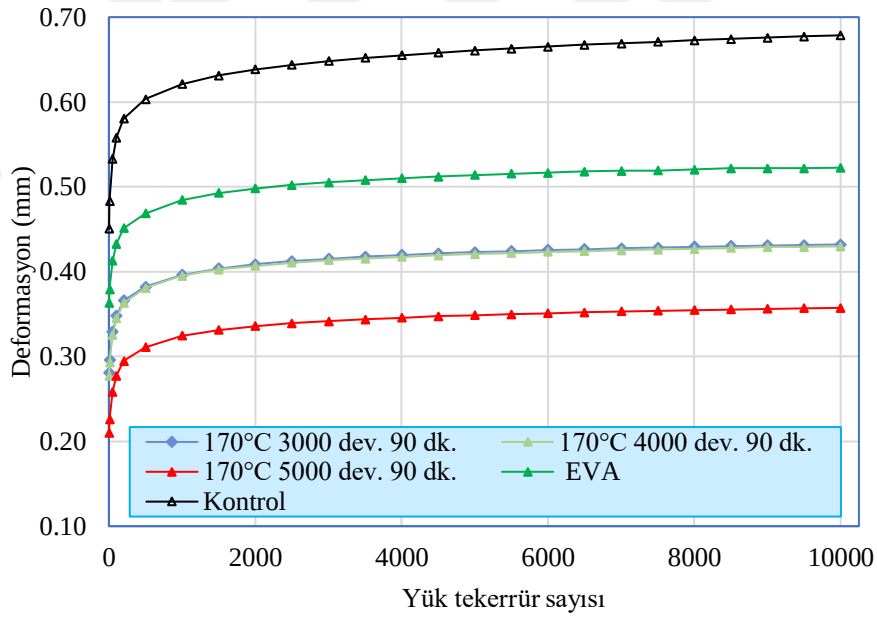
170 °C karıştırma sıcaklığı ve 4000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan PMAN’lerde en düşük deformasyon değerini 120 dakika karıştırma süresinde yapılan PMAN modifikasyonu, en yüksek deformasyonu ise 90 dakika karıştırma süresinde yapılan modifikasyon göstermiştir.

170 °C karıştırma sıcaklığı ve 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN’lerde karıştırma süresi 60 dk.’dan 90 dk.’ya çıkarıldığında karışımın deformasyon miktarı %17.3 azalırken, karıştırma süresi 90 dk.’dan 120 dk.’ya çıkarıldığında ise %26 artmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızındaki en düşük deformasyon değeri (0.3573 mm) 90 dakika karıştırma süresinde yapılan PMAN karışımında gözlemlenmiştir.

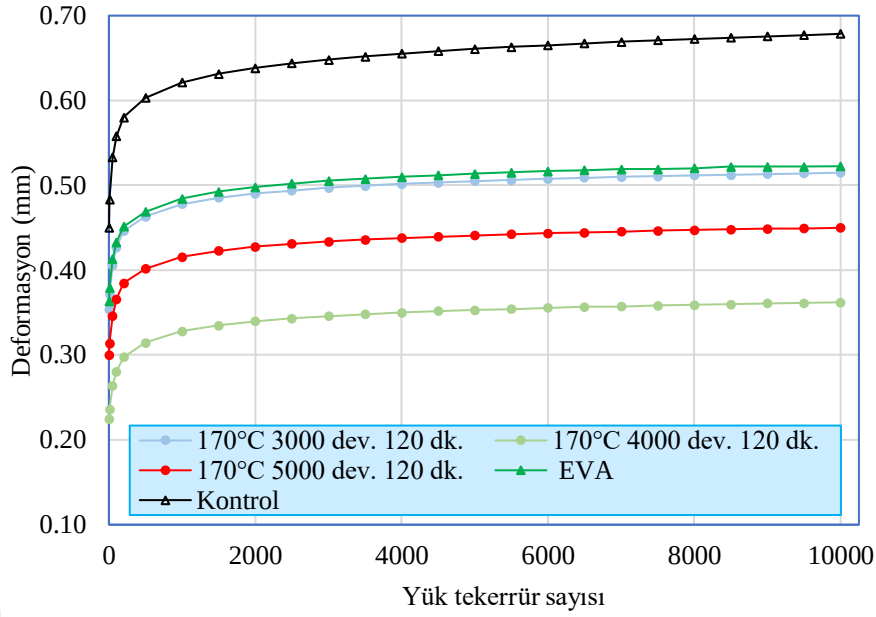
170 °C karıştırma sıcaklığında yapılan bütün EVA PMAN’ler, EVA modifiye bitümle hazırlanan karışımdan daha düşük deformasyonlar göstermişlerdir.



Şekil 177. 170 °C'de 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

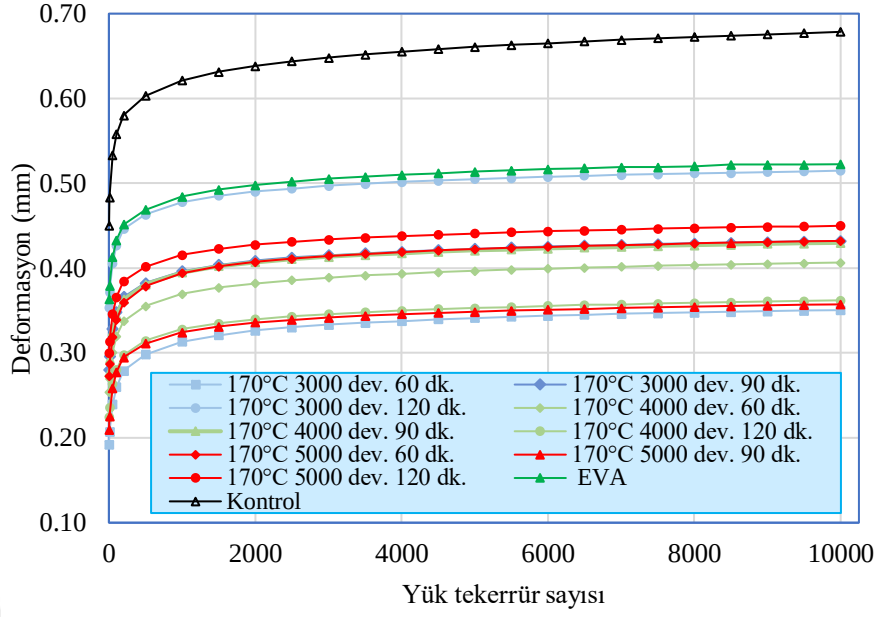


Şekil 178. 170 °C'de 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 179. 170 °C’de 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

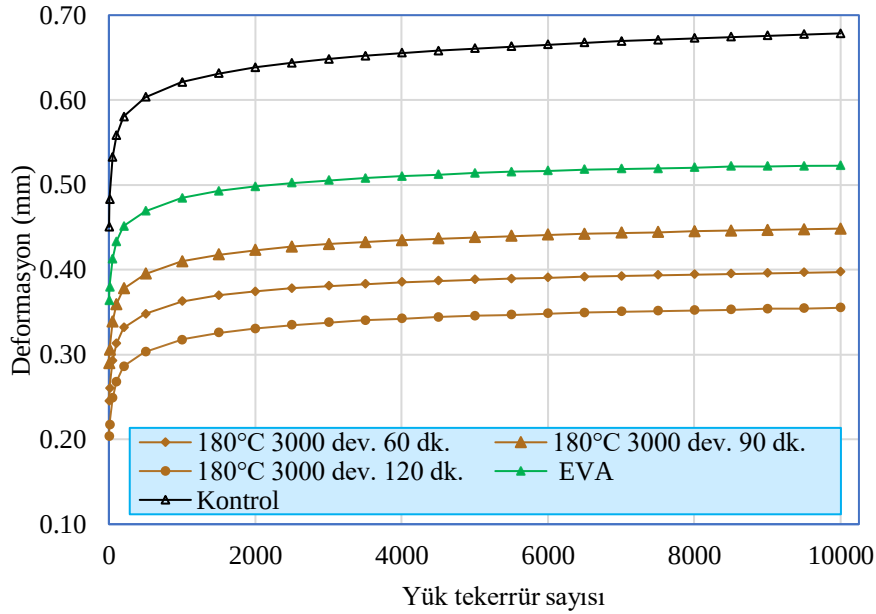
Şekil 177 – Şekil 179’den 170 °C karıştırma sıcaklığında ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarının tekrarlı sünme eğrileri incelendiğinde, en düşük deformasyonlar sırasıyla 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan EVA PMAN karışımlarında gözlemlenmiştir. 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN’lerde, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında deformasyon miktarı %16, 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %6.2 artmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığı ve 90 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN karışımlarında en düşük deformasyon değerini 5000 dev./dk. karıştırma hızında yapılan karışım vermiştir. 3000 ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen EVA PMAN’ler birbirine çok yakın deformasyon değerleri sergilemiş olup, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında deformasyonu %0.5 azalmıştır. Karıştırma hızı 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında ise karışımın deformasyonu %16.9 azalmıştır. 170 °C karıştırma sıcaklığında ve 120 dakika karıştırma süresinde yapılan PMAN’lerde en düşük deformasyonları sırasıyla 4000 dev./dk., 5000 dev./dk. ve 3000 dev./dk. karıştırma hızlarında yapılan PMAN’ler göstermişlerdir.



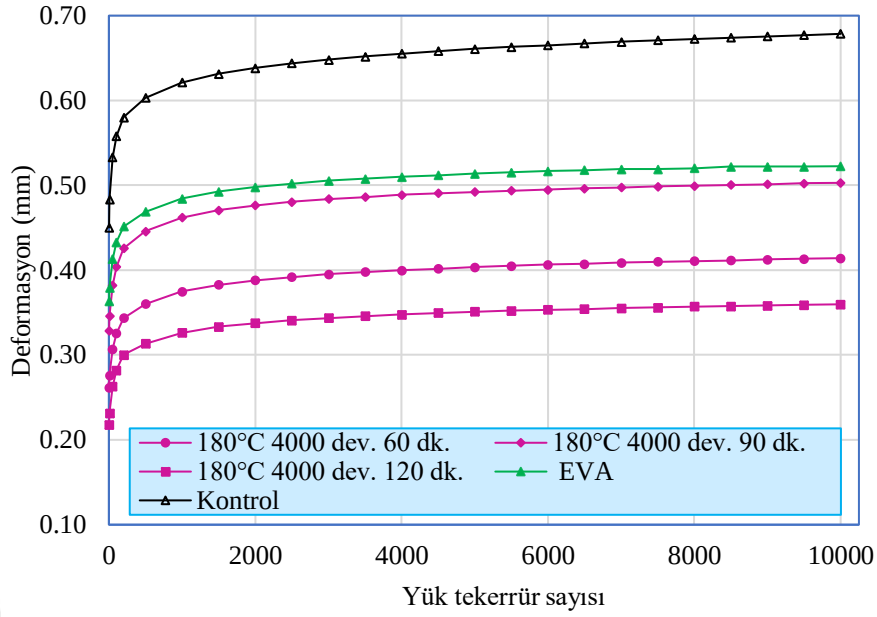
Şekil 180. 170 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

170 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'lerin 10000 yük tekrüründeki deformasyonları değerlendirildiğinde, sırasıyla 3000 dev./dk. – 60 dk., 5000 dev./dk. – 90 dk., ve 4000 dev./dk. – 120 dk. karıştırma parametrelerinde en düşük deformasyonlara ulaşılmıştır.

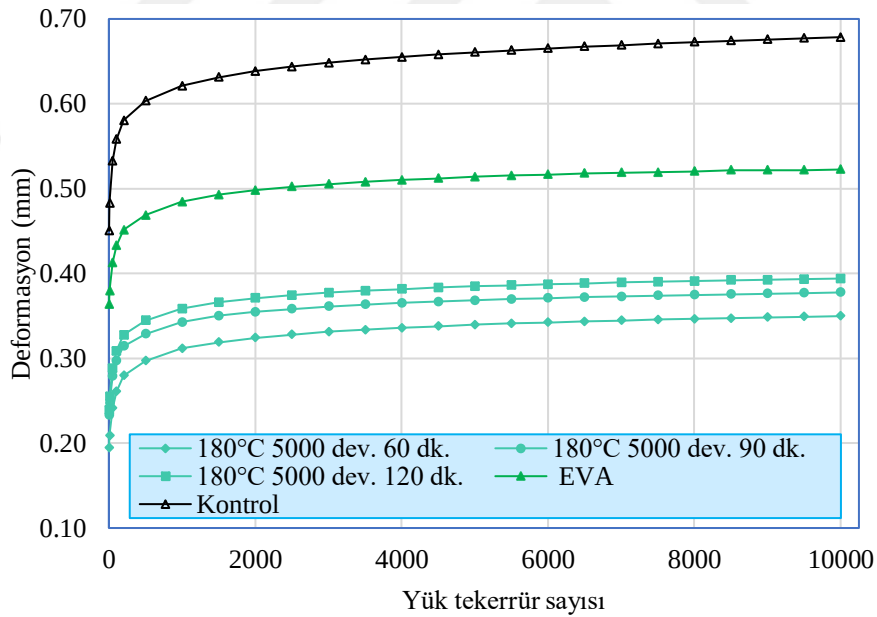
180 °C'de üretilen EVA PMAN'lerin sünme eğrileri Şekil 181 – Şekil 187'de verilmiştir.



Şekil 181. 180 °C'de 3000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



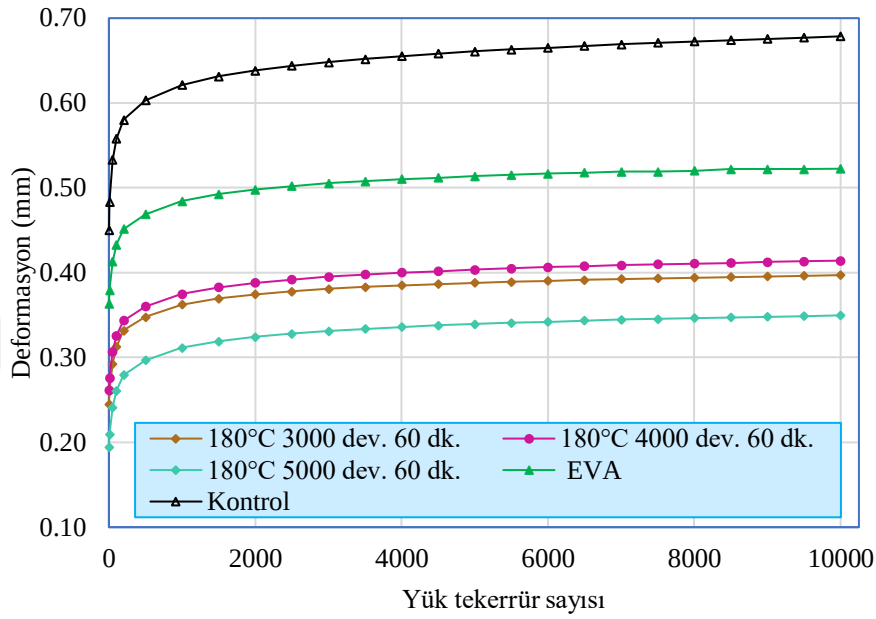
Şekil 182. 180 °C’de 4000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



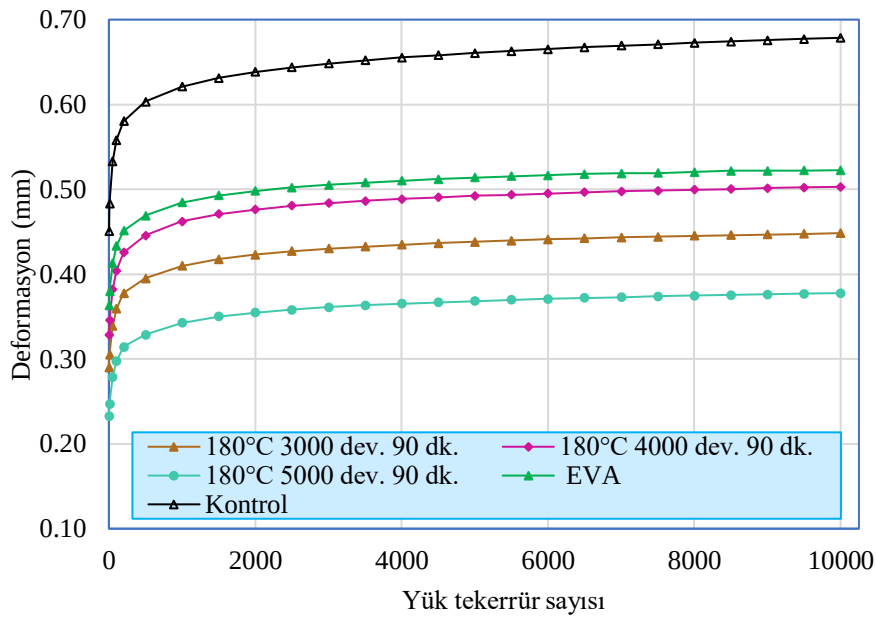
Şekil 183. 180 °C’de 5000 dev./dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

Şekil 181 - Şekil 183’ten 180 °C karıştırma sıcaklığında, 3000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında üretilen PMAN’lerde en düşük deformasyonlar sırasıyla 120 dk., 60 dk. ve 90 dk. karıştırma sürelerinde hazırlanan karışımlarda görülmüştür. 5000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan PMAN’lerde karıştırma süresi azaltıldığında

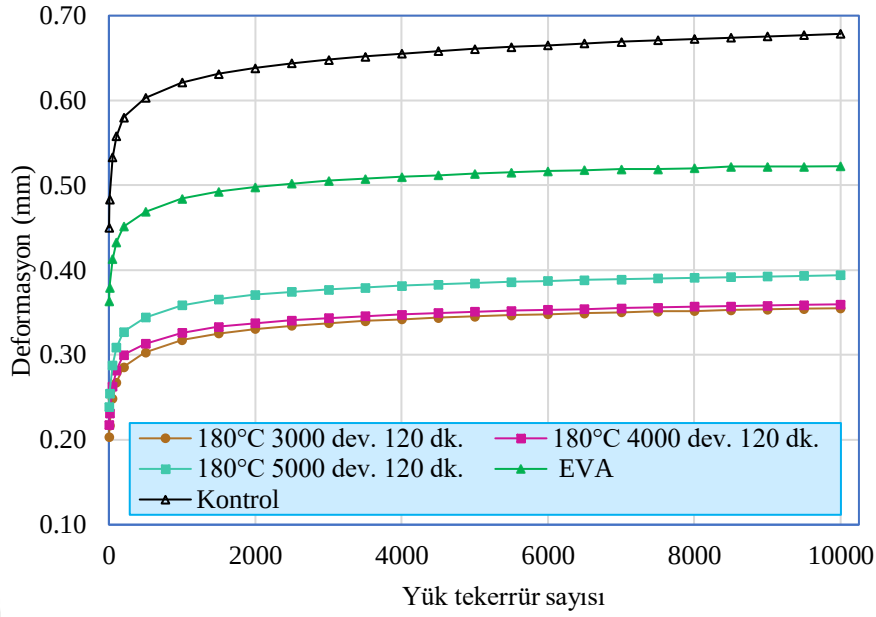
karışımların deformasyonları azalmıştır. 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerin karıştırma süresi 60 dk.'dan 90 dk.'ya çıkarıldığında deformasyonu %8, 90 dk.'dan 120 dk.'ya çıkarıldığında %4.3 artmıştır. 180 °C üretilen EVA PMAN'ler, EVA modifiye bitüm ile hazırlanan karışımdan daha iyi tekerlek izi direnci göstermiştir.



Şekil 184. 180 °C'de 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

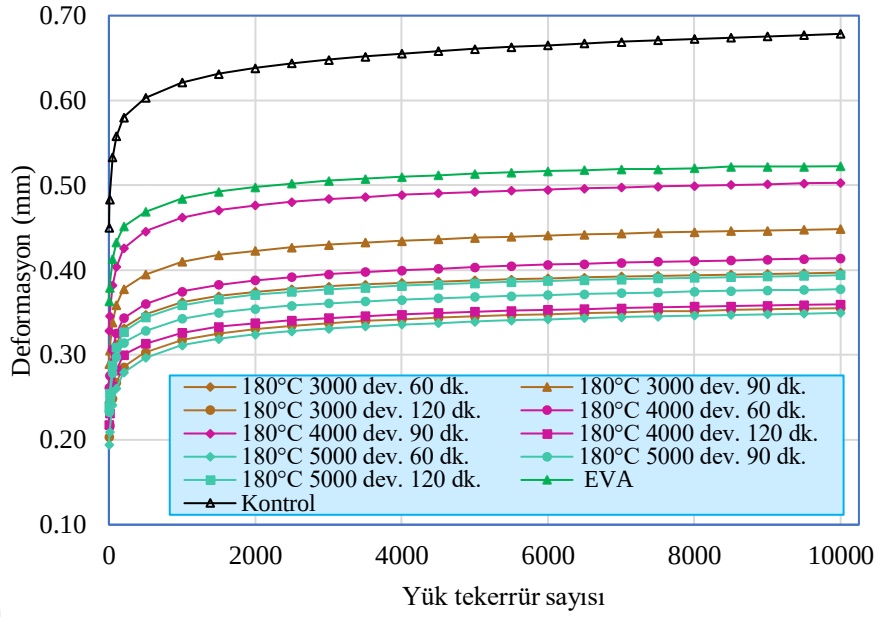


Şekil 185. 180 °C'de 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 186. 180 °C’de 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

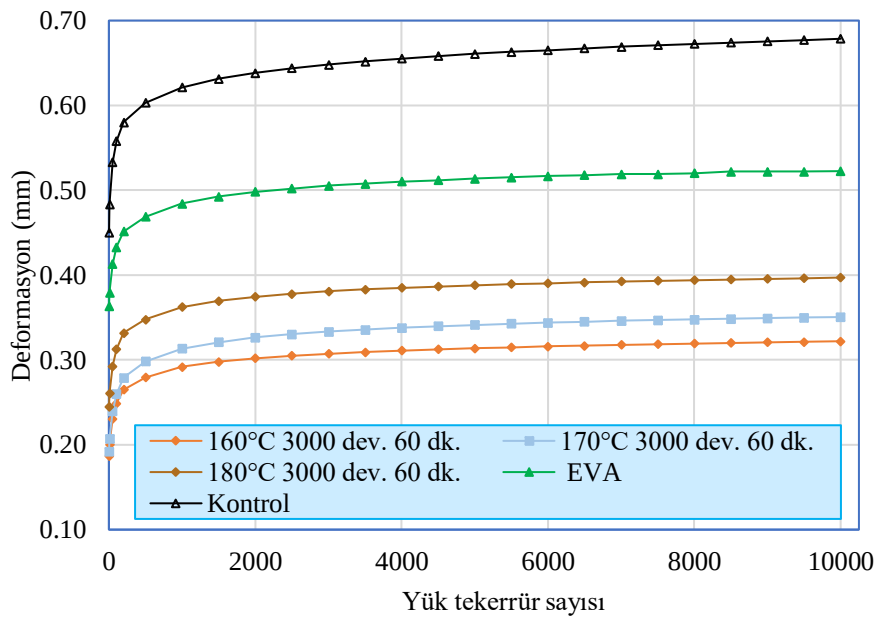
180 °C karıştırma sıcaklığında, 60 ve 90 dakika karıştırma sürelerinde yapılan PMAN’lerde en düşük deformasyon değerleri sırasıyla 5000 dev./dk., 3000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan karışımlarda elde edilmiştir. 180 °C sıcaklıkta ve 60 dakika karıştırma süresinde üretilen EVA PMAN’lerin deformasyonu, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %4.3 artarken, 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında %15.6 azalmıştır. 90 dakika karıştırma süresinde hazırlanan EVA PMAN’lerin deformasyon miktarlarındaki değişimler incelendiğinde, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında deformasyonu %12.2 artarken, 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında ise %24.9 azalmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde hazırlanan PMAN’lerde, karıştırma hızı 3000 dev./dk.’dan 4000 dev./dk.’ya çıkarıldığında karışımın deformasyonu %1.3, 4000 dev./dk.’dan 5000 dev./dk.’ya çıkarıldığında ise %9.5 artmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde yapılan EVA PMAN’lerde tekerlek izine karşı en yüksek direnci 0.3551 mm deformasyon miktarı ile 3000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışım göstermiştir.



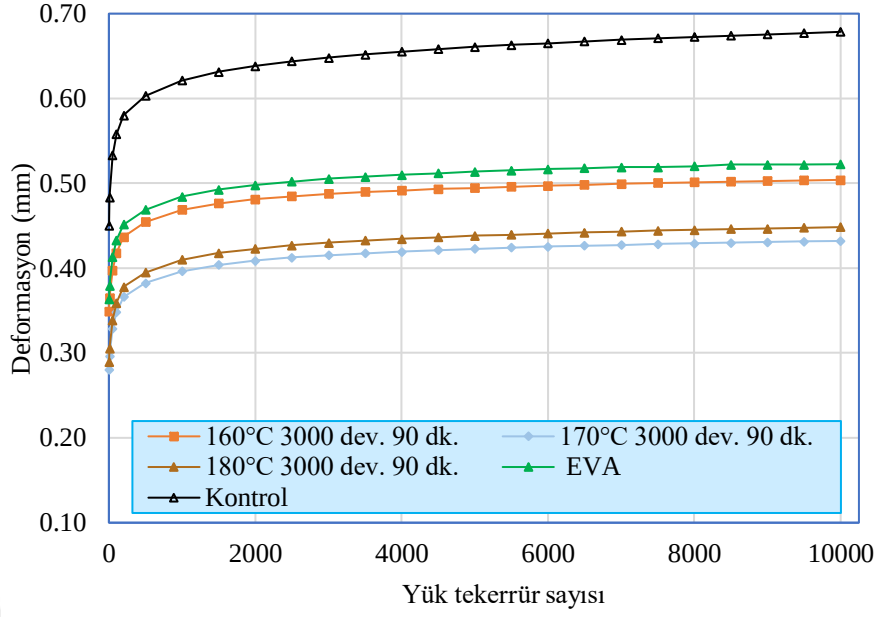
Şekil 187. 180 °C karıştırma sıcaklığı için EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri

180 °C’de hazırlanan EVA PMAN karışımlarında en düşük deformasyonlar sırasıyla 5000 dev./dk. – 60 dk., 3000 dev./dk. – 120 dk. ve 4000 dev./dk. – 120 dk. karıştırma parametrelerinde hazırlanan karışımlarda elde edilmiştir.

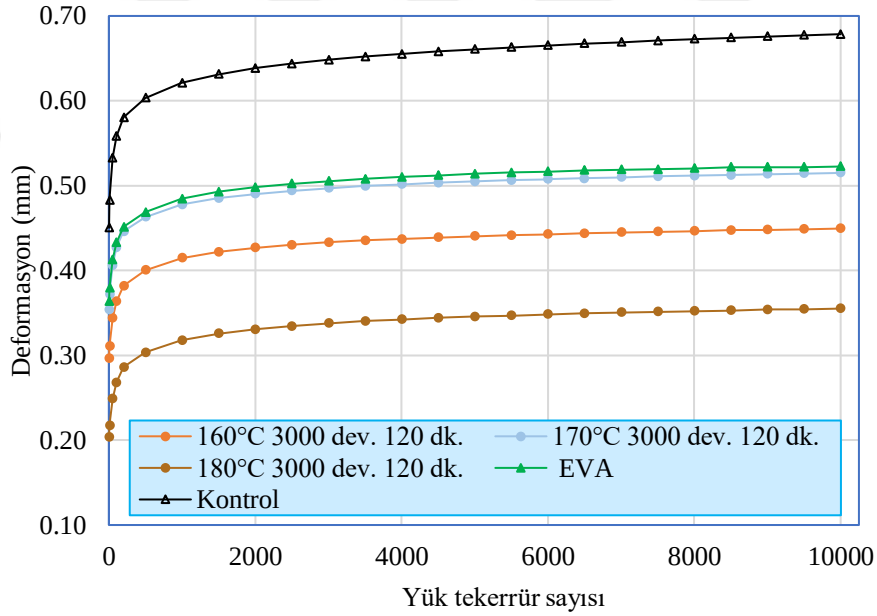
Şekil 188 - Şekil 196’da değişen karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan EVA PMAN karışımlarının deformasyon dirençlerinin değerlendirilmesi için grafikler sunulmuştur.



Şekil 188. 3000 dev./dk.’da 60 dk. için EVA PMAN karışımlarının sünme eğrileri



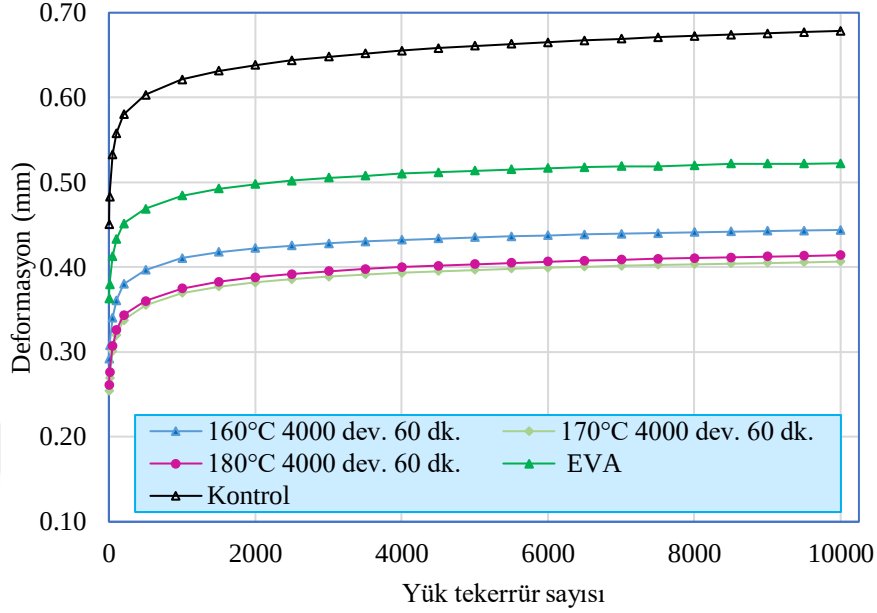
Şekil 189. 3000 dev./dk.'da 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



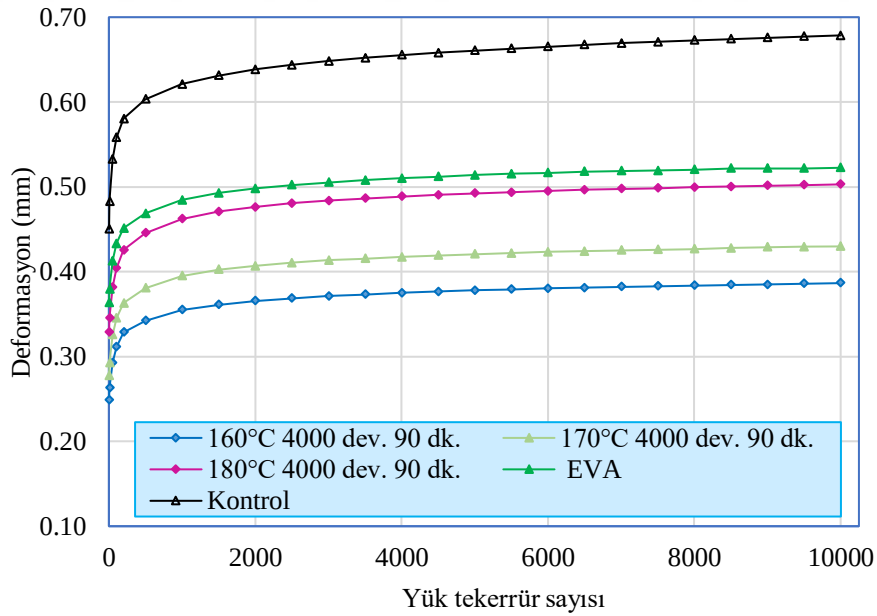
Şekil 190. 3000 dev./dk.'da 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

Şekil 188 - Şekil 190'dan 3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dk. karıştırma sürelerinde hazırlanan PMAN karışımlarında karıştırma sıcaklığı arttıkça karışımların deformasyon değerleri artmıştır. 3000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dk. karıştırma sürelerinde üretilen

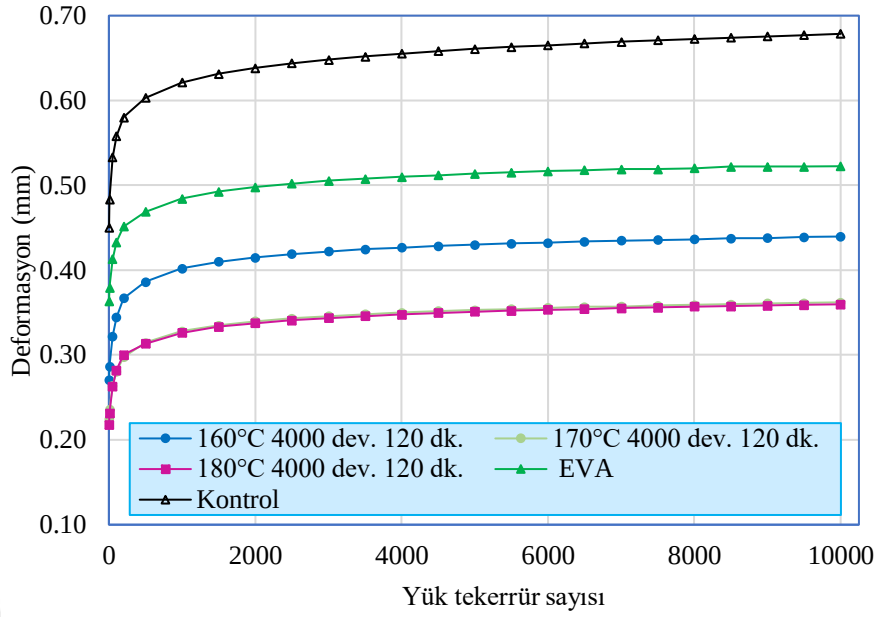
PMAN karışımlarında en düşük deformasyon değerlerine sırasıyla 170 °C, 180 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan karışımlar vermiştir.



Şekil 191. 4000 dev./dk.'da 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

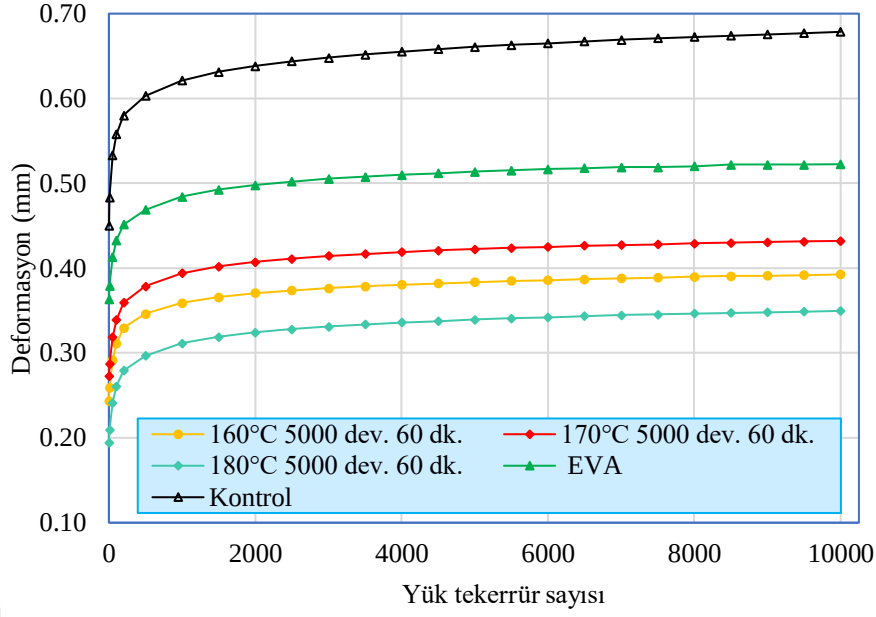


Şekil 192. 4000 dev./dk.'da 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

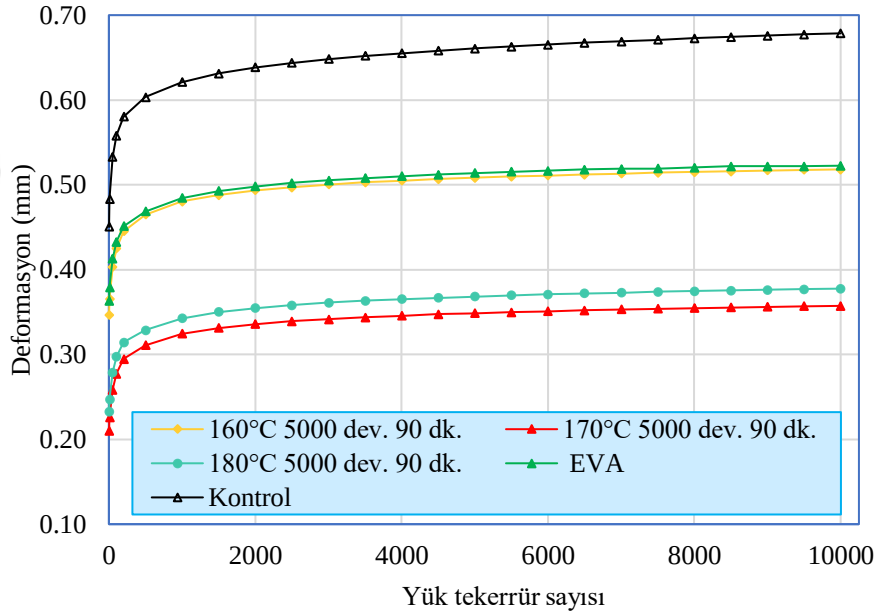


Şekil 193. 4000 dev./dk.'da 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

Şekil 191-Şekil 193'ten 4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dakika karıştırma sürelerinde yapılan PMAN karışımlarında en düşük deformasyon değerlerine sırasıyla 170 °C, 180 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan karışımlarda ulaşılmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızında ve 60 dakika karıştırma süresinde üretilen EVA PMAN'lerde 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan PMAN karışımları yaklaşık olarak aynı deformasyon miktarlarını (sırasıyla 0.407 ve 0.414 mm) göstermişlerdir. Bu deformasyon değerleri, 160 °C karıştırma sıcaklığı ve 60 dakika karıştırma süresinde hazırlanan EVA PMAN karışımının deformasyonundan daha düşük çıkmış olup bu karışımların deformasyon dirençlerinin daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. 4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dakika karıştırma sürelerinde yapılan PMAN'lerde deformasyon değeri, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında %10.3; karıştırma sıcaklığı 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında %16.3 artmıştır. 4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 120 dakika karıştırma sürelerinde hazırlanan PMAN karışımlarında ise en küçük deformasyon değerlerine sırasıyla 180 °C, 170 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklığında yapılan karışımlar göstermiştir.



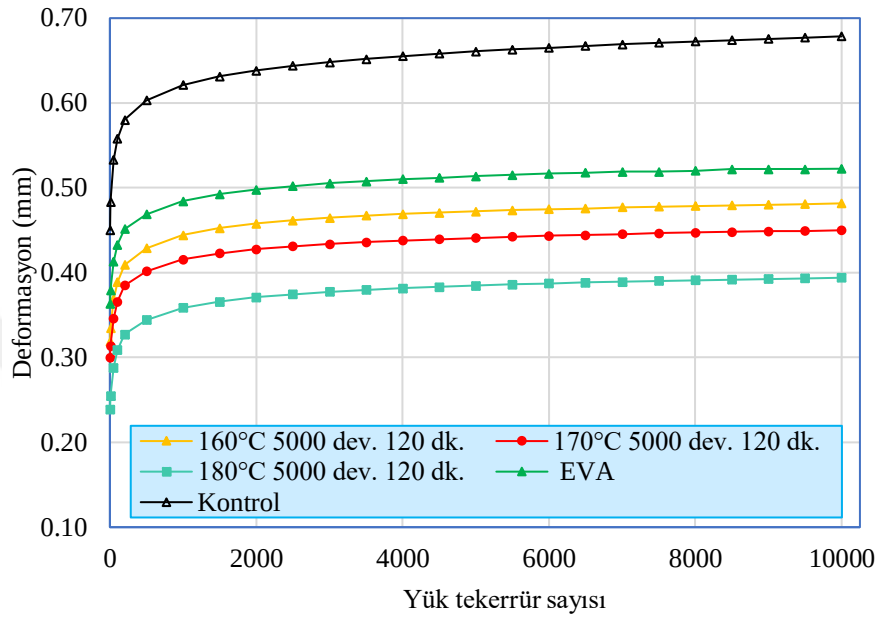
Şekil 194. 5000 dev./dk.'da 60 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri



Şekil 195. 5000 dev./dk.'da 90 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

Şekil 194 - Şekil 195'ten 5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 60 dk. karıştırma süresinde yapılan PMAN'lerde en düşük deformasyon değerlerine sırasıyla 180 °C, 160 °C ve 170 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan karışımlarda ulaşılmıştır. 90 dk. karıştırma süresinde üretilen PMAN karışımlarında en düşük deformasyon değerleri sırasıyla 170 °C, 180 °C ve 160 °C karıştırma sıcaklıklarında elde edilmiştir. 60 dk.'da hazırlanan PMAN'lerin

deformasyonu, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında %10.1 artarken, 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında ise %19.1 azalmıştır. 90 dk. karıştırma süresinde hazırlanan EVA PMAN'lerin deformasyonları, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında %31 azalırken, 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında ise %5.7 artmıştır.



Şekil 196. 5000 dev./dk.'da 120 dk. için EVA PMAN karışımların sünme eğrileri

5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 120 dakika karıştırma sürelerinde hazırlanan PMAN karışımlarında karıştırma sıcaklığı arttıkça karışımların deformasyon değerleri azalmıştır. 120 dakika karıştırma süresinde yapılan PMAN'lerde deformasyon değerleri, karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında %6.6, 170 °C'den 180 °C'ye çıkarıldığında ise %12.4 azalmıştır.

Tablo 29. EVA PMAN karışımlarının 10000 yük tekrüründeki deformasyonları (mm)

	3000 dev./dk.			4000 dev./dk.			5000 dev./dk.		
	60 dk.	90 dk.	120 dk.	60 dk.	90 dk.	120 dk.	60 dk.	90 dk.	120 dk.
160 °C	0.3220	0.5041	0.4494	0.4439	0.3866	0.4397	0.3926	0.5182	0.4817
170 °C	0.3505	0.4321	0.5150	0.4067	0.4298	0.3621	0.4321	0.3573	0.4500
180 °C	0.3971	0.4484	0.3551	0.4142	0.5030	0.3598	0.3497	0.3776	0.3940

EVA PMAN karışımları için bütün karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızları birlikte değerlendirildiğinde (Tablo 29); bütün karıştırma sıcaklıklarında 60 dakika karıştırma süresinde yapılan karışımlarda en düşük deformasyonlar elde edilmiştir. En yüksek tekerlek izi direncine 160 °C karıştırma sıcaklığında ulaşılmıştır. Her bir karıştırma sıcaklığında yapılan PMAN'lerin deformasyon miktarları ortalamalar anlamında incelendiğinde, karıştırma sıcaklığının artırılmasıyla deformasyon miktarında düşüş olduğu görülmüştür. Karıştırma hızlarına göre 3000, 4000 ve 5000 dev./dk. hızlarında 10000 yükleme döngüsünde ortalama deformasyonlar sırasıyla 0.4193; 0.4162 ve 0.4170 çıkmıştır. 60, 90 ve 120 dakika karıştırma sürelerindeki ortalama deformasyonlar da sırasıyla; 0.3899; 0.4397 ve 0.4230 mm çıkmıştır. Bu sonuçlar modifikasyon sıcaklığı ve süresinin karıştırma hızından daha etkili olduğunu göstermektedir. Zira, bütün karıştırma hızlarında ortalama deformasyonlar yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Buna rağmen sıcaklığın ve karıştırma süresinin değiştirilmesi deformasyon miktarlarını da gözlemlenebilir ölçüde değiştirmiştir.

3000 dev./dk. karıştırma hızındaki ortalama deformasyonlar incelendiğinde, SBS PMAN'le hazırlanan karışımlar EVA PMAN'le hazırlanan karışımlardan %5.8 daha az deformasyon göstermiştir. 4000 ve 5000 dev./dk. karıştırma hızlarında hazırlanan SBS PMAN karışımlarının ortalama deformasyonları, EVA PMAN'le üretilen karışımlardan sırasıyla %2.7 ve %1.7 oranında daha düşük çıkmıştır. 160 ve 170 °C karıştırma sıcaklıklarında üretilen PMAN karışımlarının ortalama deformasyon değerleri incelendiğinde, 160 °C'de SBS PMAN'le hazırlanan karışımlar EVA PMAN'le hazırlanan karışımlardan %7.3; 170 °C'de SBS PMAN'le hazırlanan karışımlar EVA PMAN'li karışımlardan %7.2 daha düşük deformasyon değerleri göstermiştir. 180 °C'de, SBS PMAN'le hazırlanan karışımların ortalama deformasyonu EVA PMAN'le hazırlanan karışımlardan %5.2 daha fazla çıkmıştır. 60 dk. karıştırma süresinde üretilen SBS PMAN karışımlarının ortalama deformasyonu, EVA PMAN'le hazırlanan karışımların ortalama deformasyonundan %7.2 daha fazla çıkmıştır. 90 ve 120 dk. karıştırma sürelerinde hazırlanan SBS PMAN karışımlarının ortalama deformasyonları, EVA PMAN karışımlarından sırasıyla %10.6 ve %5.4 daha az çıkmıştır.

SBS PMAN karışımlarının mekanik özelliklerini değerlendirmek için indirekt çekme mukavemeti, modifiye Lotmann, Marshall stabilite ve tekrarlı yük sünme testleri yapılmıştır. Testlerden elde edilen sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmış, performanslar en iyiden en kötüye sıralanmış ve en iyi performansı gösteren karışıma 1, en kötü performansı gösteren karışıma 27 puan verilerek puanlandırma tablosu hazırlanmıştır. Tablonun son sütununda,

hesaplanan ortalama puanlar verilmiştir. En küçük ortalama puan en yüksek performanslı karışım anlamına gelmektedir. SBS PMAN'lerin performans derecelendirmesi Tablo 30'da sunulmuştur.

Tablo 30. SBS PMAN karışımların performans derecelendirme tablosu

SBS PMAN	25 °C koşulsuz İÇM	25 °C koşullu İÇM	İÇMO	0 °C İÇM	MO	Sünme	Ortalama
160 °C-3000 dev.-60 dk.	14	24	27	23	26	7	20.2
160 °C-3000 dev.-90 dk.	6	10	24	11	18	5	12.3
160 °C-3000 dev.-120 dk.	1	5	20	6	23	2	9.5
160 °C-4000 dev.-60 dk.	15	20	22	20	21	8	17.7
160 °C-4000 dev.-90 dk.	5	12	25	5	27	25	16.5
160 °C-4000 dev.-120 dk.	13	13	17	8	25	12	14.7
160 °C-5000 dev.-60 dk.	11	16	23	19	13	27	18.2
160 °C-5000 dev.-90 dk.	7	6	12	7	24	19	12.5
160 °C-5000 dev.-120 dk.	9	15	26	2	3	10	10.8
170 °C-3000 dev.-60 dk.	18	18	19	13	19	21	18.0
170 °C-3000 dev.-90 dk.	2	4	16	10	6	18	9.3
170 °C-3000 dev.-120 dk.	26	25	15	1	1	3	11.8
170 °C-4000 dev.-60 dk.	4	3	13	24	5	17	11.0
170 °C-4000 dev.-90 dk.	8	8	14	3	9	1	7.2
170 °C-4000 dev.-120 dk.	12	9	10	4	16	23	12.3
170 °C-5000 dev.-60 dk.	20	21	21	12	14	9	16.2
170 °C-5000 dev.-90 dk.	25	23	9	25	22	6	18.3
170 °C-5000 dev.-120 dk.	24	22	11	26	15	4	17.0
180 °C-3000 dev.-60 dk.	3	1	3	21	10	15	8.8
180 °C-3000 dev.-90 dk.	21	14	7	17	20	14	15.5
180 °C-3000 dev.-120 dk.	16	7	5	22	4	26	13.3
180 °C-4000 dev.-60 dk.	10	2	4	9	2	16	7.2
180 °C-4000 dev.-90 dk.	27	26	1	14	8	20	16.3
180 °C-4000 dev.-120 dk.	22	19	8	18	12	22	16.8
180 °C-5000 dev.-60 dk.	23	11	6	16	17	24	16.2
180 °C-5000 dev.-90 dk.	19	27	2	15	11	11	14.2
180 °C-5000 dev.-120 dk.	17	17	18	27	7	13	16.5

EVA PMAN'le üretilen karışımların mekanik özelliklerini değerlendirmek için yapılan testlerden elde edilen sonuçlardan performans derecelerine göre karıştırma parametreleri 1'den başlayarak numaralandırılmıştır. Herbir karıştırma parametresindeki numaralandırmalar toplanarak ortalama değerler hesaplanmış ve Tablo 31'de verilmiştir.

Tablo 31. EVA PMAN karışımların performans derecelendirme tablosu

EVA PMAN	25 °C koşulsuz İÇM	25 °C koşullu İÇM	İÇMO	0 °C İÇM	MO	Sünme	Ortalama
160 °C-3000 dev.-60 dk.	16	25	27	26	23	1	19.7
160 °C-3000 dev.-90 dk.	23	26	26	1	11	25	18.7
160 °C-3000 dev.-120 dk.	20	22	21	8	22	21	19.0
160 °C-4000 dev.-60 dk.	19	23	25	16	19	19	20.2
160 °C-4000 dev.-90 dk.	14	21	23	2	12	9	13.5
160 °C-4000 dev.-120 dk.	5	9	20	4	27	18	13.8
160 °C-5000 dev.-60 dk.	26	27	24	12	17	10	19.3
160 °C-5000 dev.-90 dk.	11	17	22	7	20	27	17.3
160 °C-5000 dev.-120 dk.	1	3	19	3	24	23	12.2
170 °C-3000 dev.-60 dk.	9	12	16	17	13	3	11.7
170 °C-3000 dev.-90 dk.	27	24	17	6	9	16	16.5
170 °C-3000 dev.-120 dk.	15	10	1	21	16	26	14.8
170 °C-4000 dev.-60 dk.	2	4	12	10	7	13	8.0
170 °C-4000 dev.-90 dk.	4	5	14	13	8	15	9.8
170 °C-4000 dev.-120 dk.	10	8	5	22	10	7	10.3
170 °C-5000 dev.-60 dk.	8	7	13	9	1	17	9.2
170 °C-5000 dev.-90 dk.	22	16	8	11	15	5	12.8
170 °C-5000 dev.-120 dk.	6	2	4	24	6	22	10.7
180 °C-3000 dev.-60 dk.	7	1	3	14	21	12	9.7
180 °C-3000 dev.-90 dk.	17	13	6	25	5	20	14.3
180 °C-3000 dev.-120 dk.	13	11	7	5	2	4	7.0
180 °C-4000 dev.-60 dk.	21	19	11	20	14	14	16.5
180 °C-4000 dev.-90 dk.	3	6	18	15	4	24	11.7
180 °C-4000 dev.-120 dk.	24	20	9	23	25	6	17.8
180 °C-5000 dev.-60 dk.	25	18	2	19	3	2	11.5
180 °C-5000 dev.-90 dk.	18	15	10	18	18	8	14.5
180 °C-5000 dev.-120 dk.	12	14	15	27	26	11	17.5

SBS ile hazırlanan PMAN'lerde ortalama performans olarak en yüksek mekanik özellikler 170 °C sıcaklıkta 4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dk. karıştırma süresinde elde edilmiştir. Bu karışımı sırasıyla 180 °C - 4000 dev./dk. - 60 dk. ve 180 °C - 3000 dev/dk. 60 dk. parametreleri izlemiştir. Ortalama en iyi mekanik özelliklere ulaşabilmek açısından çok yüksek karıştırma hızlarının gerekmediği 3000 veya 4000 dev./dk. karıştırma hızlarının yeterli olabildiği görülmüştür. Diğer yandan en az 170 °C modifikasyon sıcaklığının gerekli olduğu ortaya çıkmıştır. Morfolojik incelemeler SBS PMAN'lerin 160 °C sıcaklıkta bitüm içerisinde iyi bir dağılım oluşturmadığı, polimer taneciklerinin yeterince şişerek uzaysal ağ şeklinde dağılmadığı görülmüştür. Buradan yola çıkarak, performans decerelendirmesinin tutarlı olduğu anlaşılabilmektedir. Diğer yandan 170 °C sıcaklıkta da 90 dk. ve üzerindeki sıcaklıklarda PMAN morfolojisinin uygun olduğu görülmüştür. En yüksek asfalt karışım performansı da bu parametrelerde hazırlanan PMAN ile üretilen asfalt karışımlardan elde edilmiştir. Sıcaklığın 180 °C'ye çıkarılması ortalama mekanik özellikleri çok az düşürse de başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte sıcaklığın 180 °C'ye yükseltilmesi ile karıştırma süresinin kısaltılabileceği görülmüştür. Bu sıcaklıkta 60 dakika karıştırma süreleri yüksek ortalama performans için yeterli olmuştur.

EVA PMAN'ler için genel morfolojik değerlendirmeler 170 °C için en az 120 dk. karıştırma süresinin gerekli olduğunu (bütün karıştırma hızları için) veya 180 °C sıcaklıkta en az 4000 dev./dk. karıştırma hızı seçilmesi gerektirdiğini ortaya koymuştur. Ortalama mekanik özellikler en iyiden en kötüye sırasıyla 180 °C - 3000 dev./dk. - 120 dk., 170 °C 4000 dev./dk. - 60 dk., 170 °C - 5000 dev./dk. - 60 dk. ve 180 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. şeklinde sıralama ortaya çıkmıştır. Ancak 170 °C sıcaklıkta 60 dk. karıştırma süresi uygun nanokompozit oluşumu için yetersiz kaldığından 180 °C - 3000 dev./dk. - 120 dk. veya 180 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. modifikasyon parametrelerinin seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir. Asfalt karışımlar aslında hazırlanırken homojen mantıkla hazırlandıklarından fakat makro anlamda homojen olmakla birlikte mikro anlamda heterojen olduklarından ve özellikle asfalt karışım hazırlama aşamalarında çok çok hassasiyet mümkün olamadığından karışım özellikleri bir miktar değişkenlik gösterebilmektedir. Bu tezin amaçlarından bir tanesi de bu bağlamda değişken bitüm modifikasyonlarında, bitümün özelliklerindeki değişimin asfalt karışım performansına ne derece yansıyacağını belirlenmesidir. Bu açıdan bakıldığında, modifikasyon parametrelerinin değişiminin nihai asfalt karışımın performansını önemli seviyelerde etkilediği anlaşılabilmektedir. EVA

PMAN hazırlama aşamasında modifikasyon sıcaklığının en az 180 °C seçilmesinin gerekliliği bu çalışmada görülmüştür.

SBS polimeri ile yapılan modifikasyonda 170 °C sıcaklık yeterli olabiliyorken EVA polimeri ile yapılan modifikasyonlarda daha yüksek (180 °C) sıcaklıkların gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

İklim ve trafik koşulları bitümlü bağlayıcılardan beklentileri değiştirebilmektedir. Sıcaklık değişikliklerinin hızlı ve yüksek olduğu soğuk iklimli bölgelerde özellikle düşük sıcaklık çatlamasına karşı yüksek direnç gösteren asfalt karışımlar tercih edilmektedir. Böyle bölgeler için SBS PMAN modifikasyonunda yüksek İÇM değerleri elde edilebilen 170 °C 3000 dev. - 120 dk. değişkenleri seçilebilirken EVA PMAN için 180 °C - 3000 dev.-120 dk. değişkenlerinin tercih edilebileceği; yüksek tekerlek izi direncinin aranabileceği ağır taşıt trafikli yollarda ve yüksek sıcaklıklı bölgelerde yine sırasıyla 180 °C - 3000 dev./dk. -120 dk. ve 180 °C - 5000 dev./dk. - 60 dk. değişkenleri ve yüksek su hasarına karşı SBS ve EVA PMAN'ler için sırasıyla 180 °C - 4000 dev./dk. - 90 dk. ve 170 °C - 3000 dev./dk. -120 dk. değişkenlerinin seçilebileceği görülmüştür.

Kontrol (saf) bitüm, polimer modifiye bitüm (PMB) ve polimer modifiye asfalt nanokompozit (PMAN) bağlayıcılar ile asfalt karışım hazırlanarak mekanik özellikler açısından performans sorgulaması yapılmıştır. Hem EVA hem de SBS ile hazırlanan PMB'ler kontrol bitümlere göre daha yüksek su hasarı, tekerlek izi ve deformasyon dirençleri sergilemiştir. Bu sonuç literatürden de anlaşılabileceği üzere beklenen bir sonuçtur. PMAN'ler ise PMB bitümlere göre asfalt karışım özellikleri esas alındığında daha yüksek performanslar göstermiştir. Ancak bazı PMAN seçeneklerinde PMB, PMAN'lere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Örneğin; tekerlek izi açısından SBS PMAN'lerden 160 °C - 5000 dev./dk. - 60 dk. ve 160 °C - 4000 dev./dk. - 90 dk. seçenekleri daha düşük dirençler ortaya koymuştur. Su hasarı açısından; 160 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. seçeneği, düşük sıcaklık çatlama direnci açısından 160 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. seçeneği verilebilir.

Literatürde bitümlü bağlayıcılar için üç farklı kompozitten söz edilmektedir. Eksfoliye nanokompozit, interkalasyonlu nanokompozit ve geleneksel kompozit şeklinde tanımlama yapılmıştır. Nanokompozit oluşması durumunda bitümlü bağlayıcının ve asfalt karışımının performansının belirgin bir şekilde artabildiği ifade edilirken, geleneksel kompozit oluşması durumunda fayda oluşmayacağı ve hatta performansın düşebileceği savunulmaktadır. Bunun nedeni olarak, nanomalzemelerin küçük boyutlarından dolayı kümelenebilmesi ve heterojen

bir matriks yapısı öne sürülmektedir. Bitüm içerisinde topak şeklinde kalmış nanomalzeme bitüm performansını artırmaktan ziyade azaltabilmektedir.

Morfolojik gözlemlerde de özellikle 160 °C sıcaklıkta her iki polimer ile hazırlanan PMAN'lerde homojen bir dağılımın oluşmadığı, buna rağmen EVA PMAN'lerin SBS PMAN'lere göre biraz daha iyi dağılım gösterdiği anlaşılmıştır. Asfalt karışımların mekanik performanslarına bakıldığında da özellikle 160 °C sıcaklıkta hazırlanan SBS PMAN'lerin bazılarının SBS PMB ye göre nihai asfalt karışım performansı açısından daha kötü sonuçlar verdiği görülmüştür.

Artan trafik yükleri ve araç sayıları nedeniyle kaplamalarda oluşan daha yüksek gerilmeleri karşılamak için asfalt katkı uygulamalarının başarımını yükseltme ihtiyacı hasıl olmuştur. Gerek daha ekonomik katkı maddeleri üretebilmek ve gerekse daha yüksek performanslı modifiyerler geliştirmek için ikili veya üçlü katkı seçenekleri uygulanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan EVA polimeri de iki farklı polimer olan Elvax ve Elvaloy RET kompozisyonu olarak üretilmiştir. EVA PMAN ve SBS PMAN'lerin en yüksek performansları kendi aralarında karşılaştırıldığında, EVA PMAN'lerin SBS PMAN'lere göre su hasarı direnci açısından yaklaşık %4 daha yüksek, tekerlek izi direnci açısından %3, çatlama direnci açısından yaklaşık %3 daha yüksek performans sergilemiştir. Bu sonuçlar kompozit polimerlerin tek bir polimere göre daha yüksek mekanik özellikler sağlayabileceğini kanıtlamaktadır. Farklı, uyumlu polimer türleri bir araya getirilerek bitüm modifikasyonu açısından yüksek özellikli ve ihtiyaca yönelik kompozit polimerlerin oluşturulabileceği anlaşılmaktadır.

Asfalt karışımlarda nanomalzemelerin uygulanması için halihazırda standart bir kılavuzun mevcut olmadığı ve bu nedenle çalışmaların tam olarak karşılaştırılmasının mümkün olmadığı belirtilmiştir. Seçim süreci, karıştırma süreci, nanomalzeme miktarı, saha uygulama yöntemlerinin evrensel bir tasarım yönteminde çerçevelenmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Bu sayede araştırmacıların yalnızca malzeme davranışını anlamalarına yardımcı olmakla kalmayacak, aynı zamanda onu gerçek alanlarda uygulamaya koymalarına da olanak sağlayacaktır. Nanomalzemelerin farklı özelliklere sahip olduğu ve bu nedenle homojen bir dağılım için farklı karıştırma tekniklerine ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir (Debbarma, vd., 2022).

Karıştırma süresi, karıştırma hızı ve karıştırma sıcaklığının seçimi çoğunlukla asfalt bağlayıcıya eklenen nanomalzemelerin türlerine bağlı olmaktadır. Çalışmalarda karıştırma hızının 3000 dev./dk.'dan daha fazla kullanılmasının, asfaltta nanomalzemelerin

karıştırılması için uygun dağılım verdiğini ortaya koymuştur. Asfalt bağlayıcıya nanomalzeme eklendiğinde, 3000 dev./dk.'nın altındaki karıştırma hızlarında topaklanma gözlenmektedir. Bu nedenle, yüksek kesmeli karıştırıcının kullanılması nanomalzemenin asfaltta uygun şekilde dağılmasında etkili karıştırma işlemi olduğundan diğer karıştırma yöntemlerinden daha çok tavsiye edilmektedir (Hasan vd., 2012).

Nanomalzemeler asfalt bağlayıcının viskozite, tekerlek izi direnci, yorulma direnci, sıcaklık duyarlılığı ve yaşlanma direnci gibi özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Polimer modifiye bağlayıcılar, depolama kararsızlığından muzdarip olduğundan dolayı daha yüksek sıcaklıklarda PMB'lerin stabilitesini artırmak için nanomalzemeler karışımlara ilave edilmektedir. Nanomalzemeler bağlayıcıyı sertleştirirerek yüksek sıcaklık ve orta sıcaklıktaki özelliklerini geliştirmektedir. Nanomalzemeler, özellikle yüksek sıcaklıklarda bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığını azaltmaktadır. İnorganik nanomalzemelerin katmanlı yapısı, oksijene karşı bariyer görevi görmekte ve böylece asfaltın yaşlanma performansını iyileştirmek için kullanılmaktadır (Iftikhar vd., 2022).

Kilin varlığı ve karıştırma dizisi, polimer modifiye asfalt nanokompozitlerin nihai morfolojisini ve performansını kontrol eden ana faktörlerdir (Merusi vd., 2014). EVA yoğunluğu, EVA/nanokil modifiye asfaltın reolojik performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Markanday vd., 2010).

OMMT ve Cloisite® 20 A killerinin, bitüm ve SBS modifiyeli bitüm üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada, SBS ve SBS/nanokillerle modifiye edilmiş bitümler, daha yüksek kompleks modül (G^*) ve daha düşük faz açısı (δ) sergilemiştir. Bu durum da bu katkı maddelerinin tekerlek izi oluşumuna karşı direnci ve bitümün elastikiyetini geliştirdiği anlamına gelmektedir. SBS/nanokil kompozitleri ile modifiye edilmiş bitümün performans derecesi de büyük kaplama sorunlarının önlenmesi için en iyi sonuçları vermiştir. %4 SBS ve SBS/nanokil modifikasyonu karşılaştırıldığında, nanokil/polimer kombinasyonunun ekonomik açıdan polimer içeriğinde tasarrufa yol açması mümkün görülmektedir (Tomé vd., 2015).

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, polimer modifiye asfalt nanokompozit (PMAN) üretiminde karıştırma sıcaklığı, karıştırma süresi ve karıştırma hızı için optimum modifikasyon parametreleri nihai asfalt karışım performansı açısından araştırılmıştır. Bitüm modifikasyonu, asfalt bağlayıcının düşük ve /veya yüksek sıcaklık özelliklerinin iyileşmesine olanak sağlayarak asfalt karışımların performansını artırmaktadır. Bu nedenle kaplama performansının artırılmasında katkı uygulamalarına oldukça yer verilmektedir. SBS elastomerik polimeri ve EVA plastomerik polimeri sıklıkla tercih edilen katkı maddelerindendir. Kolay modifikasyon süreçleri ve yüksek performanslarından dolayı reaktif etilen terpolimeri de son zamanlarda ön plana çıkmaya başlamıştır. Asfalt modifikasyonunda modifiyer ve asfalt çimentosu arasındaki uyum modifikasyonun etkisini artırmada son derece önemlidir. SBS ve bağlayıcı arasındaki zayıf uyumluluk, yüksek sıcaklıkta SBS gibi polimerlerin depolanması sonucunda faz ayrışmasına neden olmaktadır. Polimer ile bağlayıcı arasındaki uyumluluğu artırmak için polimer modifikasyonuna ikincil katkı olarak nanokil ilave edilerek polimer/nanomalzeme (nanokompozit) modifikasyonu yapılmaktadır. Nanokil, polimer ile bitüm arasındaki yoğunluk farkını azaltarak depolama stabilitesini iyileştirmektedir. Bu çalışmada, SBS ve EVA polimerlerinin bağlayıcıyla olan uyumluluğunu artırmak için yerli kaynak ve imkânlarla üretilmiş olan nanokil kullanılmıştır. Modifiyerlerin asfalt karışım içindeki kullanım oranları bitüm ağırlığına göre, (%5 SBS -%3 nanokil) ve (%1 Elvaloy RET - %0.8 Elvax - %3 nanokil) olarak seçilmiştir. Bu çalışmada Elvaloy RET ve Elvax kombinasyonu EVA olarak adlandırılmıştır.

PMAN modifikasyonunda, nanokil ve polimerler yüksek kesme etkili bir karıştırıcı kullanılarak seçilen karıştırma değişkenlerinde asfalt çimentosuna karıştırılmıştır. Modifikasyon parametreleri olarak; karıştırma sıcaklıkları 160 °C, 170 °C, 180 °C, karıştırma süreleri 60 dk., 90 dk. ve 120 dk., karıştırma hızları 3000 dev./dk., 4000 dev./dk. ve 5000 dev./dk. seçilmiştir. SBS PMAN modifikasyonunda seçilen karıştırma sıcaklığına getirilen bitüme bitüm ağırlığının %3'ü oranında nanokil ilave edilmiş ve seçilen karıştırma hızında karıştırılmıştır. Hemen ardından seçilen karıştırma hızında bitüm ağırlığının %5'i oranında SBS, nanokil modifiye bitüme eklenerek seçilen karıştırma süresi sonuna kadar yüksek kesme etkili karıştırıcı ile karıştırılarak polimer modifiye asfalt nanokompoziti

üretilmiştir. Bütün modifikasyon parametreleri için işlemler tekrarlanarak yüksek kesme etkili karıştırıcı ile 27 farklı kombinasyonda SBS PMAN'ler hazırlanmıştır.

EVA PMAN'lerin üretilmesinde de seçilen karıştırma sıcaklığına getirilen asfalta, asfalt ağırlığının %3 oranında nanokil ilave edilmesi ve bu sıcaklıkta yüksek kesme etkili karıştırıcı ile karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Ardından nanokil modifiye bitüme, %0.8 Elvax ile %1 Elvaloy RET ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Seçilen her karıştırma süresi için modifikasyonun son 30 dakikasında modifiye bitüme, bitüm ağırlığının %0.3'ü oranında katalizör olarak PPA ilave edilerek seçilen karıştırma hızında karıştırmaya devam edilmiştir. Bütün karıştırma parametreleri için ayrı ayrı EVA PMAN'ler hazırlanmıştır. Polimer modifiye asfalt nanokompozitlerinin yanında, 170 °C sıcaklık 4000 dev./dk. karıştırma hızı ve 90 dk. karıştırma süresi seçilerek bitüm ağırlığının %5'i oranında SBS ilave edilerek SBS modifiye bitüm hazırlanmıştır. Aynı karıştırma parametresi kullanılarak bitüm ağırlığına göre bitüme %1 Elvaloy RET, %0.8 Elvax ve %0.3 oranında PPA ilave ederek EVA modifiye bitüm üretilmiştir.

Hazırlanan polimer modifiye asfalt nanokompozit karışımları, SBS modifiye karışım, EVA modifiye karışım ve saf bitümlü karışımların optimum bitüm içerikleri belirlenmiştir. Belirlenen optimum bitüm içeriklerinde yoğun gradasyonlu sıcak asfalt karışımlar hazırlanarak Marshall tasarım yöntemiyle Marshall briketleri üretilmiştir. Karışımların su hasarına karşı direnç, düşük sıcaklık çatlama ve kalıcı deformasyon özellikleri modifiye Lottman (AASHTO T 283), indirekt çekme mukavemeti, tekrarlı yük sünme ve Marshall stabilite testleri ile değerlendirilmiştir. Hazırlanan tüm modifiye karışımlarda katkıların karışım içerisindeki dağılımı hakkında değerlendirme yapabilmek için Optik Mikroskop değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- EVA ve SBS PMAN'ler 27 farklı modifikasyon süreci ile üretilerek morfolojik açıdan değerlendirilmiştir. SBS PMAN'ler düşük sıcaklıkta, 160 °C'de, üretildiklerinde karıştırma hızı ve karıştırma süresinden bağımsız olarak bütün seçeneklerde morfolojik açıdan yetersiz görüntü oluşturmuştur. Polimer taneciklerinin bütünlüğünün tam olarak kaybolmadığı yani erimeyen taneciklerin bitüm matriksi içerisinde kaldığı görülmüştür. Bu nedenle SBS PMAN üretiminde 160 °C modifikasyon sıcaklığının yetersiz olduğu düşünülmektedir. Sıcaklık 170 °C'ye çıkarıldığında 60 dk. gibi düşük karıştırma süresinde PMAN görüntüsünde uzaysal ağ oluşumunun tamamlanmadığı, yer yer SBS taneciklerinin erimeden kaldığı görülmüştür. Ancak karıştırma süresi yükseltildiğinde SBS uzaysal ağının iyi

bir şekilde ortaya çıktığı görülmüştür. 180 °C modifikasyon sıcaklığında kısa süreli modifikasyonda (60 dk.) düşük karıştırma hızı (3000 dev./dk.) hariç bütün seçeneklerde iyi bir dağılım gözlemlenmiştir. Morfolojik açıdan, SBS PMAN için modifikasyon sıcaklığının en az 170 °C olabileceği ancak bu durumda en az 90 dakika karıştırma süresinin seçilmesi gerektiği veya 180 °C seçilerek en az 60 dk. karıştırma süresinde yine en düşük 4000 dev./dk. karıştırma hızının seçilebileceği sonucuna varılmıştır. SBS PMAN üretiminde sıcaklığın etkisi diğer parametrelere göre daha çok ön plana çıkmıştır.

- EVA PMAN'ler için de SBS PMAN'lere benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. EVA PMAN'lerde özellikle karıştırma sürelerinin daha büyük etki oluşturduğu görülmüştür. Bununla birlikte yüksek sıcaklıklarda yapılan modifikasyonlarda PMAN morfolojisinin daha homojen olduğu anlaşılmıştır. 120 dk. karıştırma süresinde diğer karıştırma sürelerine göre iyi bir polimer dağılımı görülmüştür. 160 °C modifikasyon sıcaklığının diğer sıcaklıklara göre daha heterojen bir görüntü oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Bu uzun modifikasyon süreci literatürle uyumlu görülmektedir. Bitüm bileşenleri ile reaktif terpolimerler arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonların tamamlanması için belirli bir süre gerekmektedir. Kimyasal reaksiyonu hızlandırmak, modifikasyon sürecini kısaltmak ve jelleşmeyi önlemek için modifikasyona PPA da ilave edilmektedir. Bu nedenle kimyasal reaksiyonun tamamlanması modifikasyonun başarılı bir şekilde tamamlanması için hayati bir rol oynamaktadır.
- Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış SBS PMAN karışımların 25 °C sıcaklıktaki indirekt çekme mukavemetleri değerlendirilmiştir. Koşullandırılmış örneklerin İÇM değerleri karşılaştırıldığında, bütün PMAN'lerin İÇM değerlerinin kontrol bitümlü karışımlara ve SBS polimer modifiye bitümlü karışımlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek İÇM değeri 180 °C sıcaklıkta, 3000 dev./dk. karıştırma hızında 60 dk. sürede modifiye edilen bitüm ile elde edilmiştir. Bu seçenekte ortalama 1676 kPa çekme mukavemeti gerçekleşmiştir. Bu değer kontrol karışımdan yaklaşık %78 ve SBS modifiye karışımdan yaklaşık %29 daha yüksektir. Orta sıcaklıkta yapılan indirekt çekme mukavemeti deneyleri yorulma direncinin bir göstergesi olarak ta kullanılabilir. Bu sonuçlar PMAN karışımların geleneksel polimer modifiye asfalt karışımlar ve katkısız karışımlara göre yorulma çatlakları açısından daha performanslı olduğunu ortaya koymaktadır.

- 160 °C sıcaklıkta modifiye edilen SBS PMAN'ler ile hazırlanan asfalt karışımların 25 °C sıcaklıktaki indirekt çekme mukavemetleri karıştırma süresi ve karıştırma hızlarına göre gruplandırıldığında anlamlı bir ilişki oluşturulamamıştır. Bununla birlikte 60 ve 90 dakika karıştırma süresinde 5000 dev./dk. karıştırma hızında, 120 dakika karıştırma süresinde de 3000 dev./dk. karıştırma hızında en yüksek İÇM değerleri elde edilmiştir. 170 ve 180 °C sıcaklıklarda modifiye edilen seçenekler için 5000 dev./dk. karıştırma hızında en düşük İÇM değerleri elde edilmiştir. 170 °C modifikasyon sıcaklığında 4000 dev./dk, 180 °C modifikasyon sıcaklığında da 3000 dev./dk. karıştırma hızında daha yüksek İÇM değerleri görülmüştür.
- Koşullandırılmamış durumda kontrol karışım 1414 kPa, SBS modifiye karışım da 1668 kPa çekme dayanımı göstermiştir. SBS PMAN karışımlarda en büyük çekme dayanımları sırasıyla 160 °C - 3000 dev./dk. - 120 dk., 170 °C - 3000 dev./dk. - 90 dk. ve 180 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. modifikasyon değişkenlerinde 1933 kPa, 1925 kPa ve 1910 kPa değerleri ile elde edilmiştir. Bu değerler birbirine oldukça yakındır. 160 °C modifikasyon sıcaklığının morfolojik değerlendirmede yetersiz görüldüğü bu nedenle ikinci ve üçüncü en yüksek değerlerin elde edildiği değişkenlerin kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir. Diğer yandan, en yüksek çekme dayanımlarının elde edildiği modifikasyon parametrelerinde, sıcaklık arttıkça karıştırma sürelerinin de azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte en yüksek çekme dayanımları 3000 dev./dk. karıştırma hızlarında elde edilmiştir.
- Asfalt karışımların 25 °C sıcaklıktaki indirekt çekme mukavemetleri kaplamanın yorulma dayanımlarının bir göstergesi olarak ta kullanılabilmektedir. Bu bakış açısıyla, asfalt karışıma nanokil eklenmesiyle asfalt kaplamanın yorulma çatlaklarına karşı daha yüksek direnç göstereceği ortaya çıkmaktadır. SBS modifiye karışım kontrol karışıma göre %18, SBS PMAN karışımlar da kontrol karışımlara göre %37'ye kadar daha yüksek çekme dayanımları göstermiştir.
- Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış EVA PMAN karışımların 25 °C sıcaklıktaki indirekt çekme mukavemetleri de değerlendirilmiştir. Koşullandırılmış örneklerde, modifikasyon sıcaklığının ve karıştırma hızının artması genel itibari ile karışımların çekme dayanımlarını artırmıştır. Modifikasyon süresi açısından öne çıkan önemli bir sonuç, 60 ve 90 dakika modifikasyon sürelerinde bazı seçeneklerdeki çekme dayanımlarının EVA modifiye bitümlü karışıma eşdeğer veya daha düşük olmasına rağmen 120 dakika modifikasyon süresinin kullanıldığı bütün modifikasyonlarda

EVA modifiye bitümlü asfalt karışımlardan daha yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. Koşullandırılmış örneklerde en yüksek çekme dayanımları sırasıyla 180 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk., 170 °C - 5000 dev./dk. - 120 dk. ve 160 °C - 5000 dev./dk. - 120 dk. modifikasyon değişkenlerinde 1633 kPa, 1630 kPa ve 1625 kPa değerindedir. Kontrol karışımın çekme dayanımı 943 kPa ve EVA modifiye bitümlü karışımın çekme dayanımını 1344 kPa'dır. EVA PMAN modifikasyonu ile koşullandırılmış kontrol karışımların çekme dayanımının %73 ve EVA polimer modifiye asfaltlarınkinin %22 artırılabilceği görülmüştür.

- Koşullandırılmış EVA PMAN'lerin 25 °C sıcaklıktaki çekme dayanımlarının benzerleri koşullandırılmamış karışımlarda da görülmüştür. 120 dakika modifikasyon sürelerinde genel itibari ile yüksek çekme dayanımları elde edilmiştir. 60 ve 90 dakika karıştırma sürelerinde değişken (standart sapması yüksek) performanslar ortaya çıkmıştır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte karıştırma sürelerinin düşürülebileceği anlaşılmıştır. En yüksek İÇM değeri 160 °C - 5000 dev./dk. - 120 dk., 170 °C - 4000 dev./dk. - 60 dk. ve 180 °C - 4000 dev./dk. - 90 dk. modifikasyon değişkenlerinde 1850 kPa, 1812 kPa ve 1807 kPa değerleri ile ortaya çıkmıştır. EVA PMAN'den elde edilen en yüksek çekme dayanımı kontrol karışıma göre %31 ve EVA modifiye bitümlü karışıma göre yaklaşık %14 daha yüksek çıkmıştır.
- Koşullandırılmamış EVA modifiye karışımlarda performans farklılıkları koşullandırılmış karışımlara göre daha düşüktür. Orta sıcaklıklarda çekme dayanımları açısından kıyaslamaların koşullandırılmış karışımlar üzerinde yapılan indirekt çekme dayanımı testleri ile daha açık görülebileceği değerlendirilmektedir.
- Koşullandırılmış SBS PMAN'lerin en yüksek İÇM değeri koşullandırılmış EVA PMAN'inkine göre %2.6 daha fazla çıkmıştır. Koşullandırılmamış örneklerde ise yine SBS PMAN %4.4 daha yüksek İÇM değeri vermiştir. Genel anlamda (bütün modifikasyon seçeneklerinin ortalama İÇM değerlerine göre) değerlendirme yapıldığında ise EVA PMAN'lerin SBS PMAN'lere göre daha yüksek İÇM değeri gösterdiği belirlenmiştir. Koşullandırılmış EVA modifiye karışımın İÇM değeri koşullandırılmış SBS modifiye karışımından %3.2 daha yüksek iken koşullandırılmamış karışımlarda ise SBS modifiye karışım %2.5 daha yüksek İÇM değeri vermiştir.
- Değişik modifikasyon parametreleri ile hazırlanan bitümlü karışımların su hasarına karşı dirençleri indirekt çekme mukavemeti oranı ile araştırılmıştır. SBS PMAN ile

hazırlanan asfalt karışımlarda, modifikasyon sıcaklığı ile İÇMO değerlerinin doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. PMAN modifikasyonu ile asfalt karışımların su hasarına karşı dirençlerinin artırılabilceği değerlendirilmiştir. Bütün SBS PMAN'lerin İÇMO değerleri kontrol karışımdan (%67) daha yüksek çıkmıştır. SBS modifiye karışımın İÇMO değeri %78 çıkmış, 160 °C sıcaklıkta yapılan bazı modifikasyonlar (3000 dev/dk. karıştırma hızı ve 60 dk. karıştırma süresi ile 5000 dev./dk. karıştırma hızı ve 120 dk. karıştırma süresi) hariç bütün seçeneklerde SBS PMAN'lerden elde edilen İÇMO değerleri SBS modifiye karışımların İÇMO değerinden daha yüksek çıkmıştır. 170 ve 180 °C modifikasyon sıcaklıkları için daha tutarlı İÇMO değerleri elde edilmiştir. İÇMO değerleri açısından sıcaklığın değiştirilmesinin karıştırma süresi ve karıştırma hızına göre daha yüksek etki oluşturduğu görülmüştür. En yüksek İÇMO değerleri sırasıyla 180 °C - 4000 dev./dk. - 90 dk., 180 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. ve 180 °C - 4000 dev./dk. - 60 dk. modifikasyon parametrelerinde hazırlanan PMAN karışımlarında %90, %88 ve %88 olarak belirlenmiştir. Bu değerler kontrol karışıma göre yaklaşık %34.5 ve SBS modifiye asfalt karışımın İÇMO değerinden ise yaklaşık %15 daha yüksektir.

- EVA PMAN ile hazırlanan asfalt karışımlarda, karıştırma sıcaklığının artırılması ile İÇMO değerlerinin arttığı görülmüştür. 160 °C'de bütün karıştırma sürelerinde ve 170 °C'de 60 ve 90 dk. karıştırma sürelerinde üretilen EVA PMAN'lerde karıştırma hızının artırılmasıyla İÇMO değerleri artmış olup en yüksek İÇMO değerleri 5000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerde görülmüştür. 180 °C'de üretilen PMAN'ler ile 170 °C karıştırma sıcaklığı ve 120 dk. karıştırma süresinde hazırlanan PMAN'lerde ise en yüksek İÇMO değerleri 3000 dev./dk. karıştırma hızında üretilen PMAN'lerde gözlemlenmiştir. PMAN modifikasyonu ile asfalt karışımların su hasarına karşı dirençlerinin artırılabilceği değerlendirilmiştir. Bütün EVA PMAN'lerin İÇMO değerleri kontrol karışımdan (%67) daha yüksek çıkmıştır. EVA modifiye karışımın İÇMO değeri %81 çıkmış olup, sadece 160 °C - 3000 dev/dk. - 60 dk. karıştırma parametresinde üretilen PMAN hariç bütün seçeneklerde EVA PMAN'lerden elde edilen İÇMO değerleri EVA modifiye karışımın İÇMO değerinden daha yüksek çıkmıştır. EVA PMAN'lerle üretilen karışımların İÇMO değerleri incelendiğinde, karıştırma sıcaklığının değiştirilmesi karıştırma süresi ve karıştırma hızına göre daha fazla etki göstermiştir. Bu etki özellikle karıştırma sıcaklığı 160 °C'den 170 °C'ye çıkarıldığında daha net olarak gözlemlenmiştir. En

yüksek İÇMO değerleri sırasıyla 170 °C - 3000 dev./dk. - 120 dk., 180 °C - 5000 dev./dk. - 60 dk. ve 180 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. modifikasyon parametrelerinde hazırlanan EVA PMAN karışımlarının tümünde yaklaşık %93 olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu en yüksek İÇMO değeri kontrol karışıma göre yaklaşık %39 ve EVA modifiye asfalt karışımının İÇMO değerine göre ise yaklaşık %15 daha yüksek çıkmıştır.

- EVA modifiye bitümle üretilen asfalt karışımının İÇMO değeri SBS modifiye bitümle üretilen karışımdan %3.8 daha yüksektir. Aynı zamanda EVA PMAN'le üretilen karışımın en yüksek İÇMO değeri SBS PMAN'le üretilen karışımın en yüksek İÇMO değerinden %3.6 daha fazla çıkmıştır. 160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan EVA PMAN ve SBS PMAN karışımlarının ortalama İÇMO değerlerine bakıldığında da tüm sıcaklıklarda yine EVA PMAN'le üretilen karışımlar daha yüksek İÇMO değerleri göstermiştir. Bu sonuçlar su hasarı direnci açısından EVA PMAN'lerin SBS PMAN'lere göre daha etkili sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir.
- İklim ve trafik koşullarındaki değişimler asfalt kaplamaların bozulmasına sebep olmaktadır. Düşük sıcaklıkta asfalt karışımların özelliklerinin iyileştirilerek çatlamaya karşı dirençlerinin artırılması büyük önem arz etmektedir. Bu bakımdan polimer modifiye asfalt nanokompozit karışımları, düşük sıcaklık çatlamasına karşı asfalt karışımların özelliklerini iyileştirmek için kullanılabilir. Çalışmada asfalt karışımların 0 °C sıcaklıktaki düşük sıcaklık çatlaması irdelemesi indirekt çekme mukavemeti testiyle yapılmıştır. SBS PMAN'le hazırlanan karışımların tümü kontrol karışımdan (2779 kPa) daha yüksek İÇM değeri göstermiştir. SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımın 0 °C'deki İÇM değeri (3034 kPa) bazı SBS PMAN karışımlarının (örneğin; 160 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk., 180 °C - 3000 dev./dk. - 60 dk. ve 180 °C - 3000 dev./dk. - 120 dk. karıştırma parametrelerinde üretilen karışımlar) İÇM değerlerinden daha fazla çıkmıştır. SBS PMAN'le hazırlanan karışımlarda düşük sıcaklık çatlamasına karşı en yüksek dirençler sırasıyla 170 °C - 3000 dev./dk. - 120 dk., 160 °C - 5000 dev./dk. - 120 dk. ve 170 °C - 4000 dev./dk. - 90 dk. karıştırma parametrelerinde 3877 kPa, 3773 kPa ve 3749 kPa değerlerinde elde edilmiştir. 160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında elde edilen ortalama İÇM değerlerine bakıldığında karıştırma sıcaklığı artırıldığında karışımların ortalama İÇM değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte

en yüksek İÇM değerleri 170 °C karıştırma sıcaklığında üretilen karışımlarda daha çoğunlukta olmuştur. Bu durum SBS PMAN'lerin morfolojik yapı değerlendirmesiyle birlikte düşünüldüğünde 170 °C karıştırma sıcaklığında 160 °C'ye göre daha homojen bir karışım elde edilmesiyle uyumlu olmuştur. Karıştırma süreleri artırıldığında SBS PMAN karışımların ortalama İÇM değerleri de artmıştır. 160 °C'de en yüksek İÇM değerlerine sırasıyla 5000 dev./dk. ve 4000 dev./dk., 170 °C'de 3000 dev./dk. ve 4000 dev./dk. ve 180 °C'de ise tüm karışımlarda 4000 dev./dk. karıştırma hızında hazırlanan karışımlar göstermiştir. En yüksek İÇM değerine sahip SBS PMAN karışımı kontrol karışımdan %39.5, SBS modifiye bitümle üretilen karışımdan %27.8 daha fazla İÇM değeri göstermiştir.

- EVA PMAN karışımlarının düşük sıcaklıkta çatlamaya karşı gösterdikleri dirençler hem kontrol hem de SBS modifiye bitümle üretilen karışımlardan daha fazla olmuştur. EVA PMAN karışımlarında en yüksek İÇM değerlerine sırasıyla 160 °C – 3000 dev./dk. – 90 dk., 160 °C – 4000 dev./dk. – 90 dk. ve 160 °C – 5000 dev./dk. – 120 dk. modifikasyon parametrelerinde 3992 kPa, 3969 kPa ve 3924 kPa değerleri ile ulaşılmıştır. 160 °C sıcaklıkta üretilen EVA PMAN karışımlarında en yüksek ortalama İÇM değerleri sırasıyla 90 ve 120 dk. karıştırma sürelerinde, 170 °C sıcaklıkta 90 ve 60 dk. karıştırma sürelerinde ve 180 °C'de 60 ve 90 dk. karıştırma sürelerinde elde edilmiştir. Tüm karıştırma parametreleriyle üretilen EVA PMAN karışımlarından elde edilen İÇM değerlerinin değişimlerine bağlı olarak karıştırma sıcaklığının ve süresinin karıştırma hızından daha fazla etkili olduğu söylenilebilir. En yüksek İÇM değeri elde edilen EVA PMAN karışımı kontrol karışımdan %43.6, EVA modifiye bitümle hazırlanan karışımdan %18.3 daha yüksek çatlama direnci göstermiştir.
- 0 °C sıcaklıktaki örneklerle yapılan indirekt çekme mukavemeti testine göre EVA modifiye bitümle hazırlanan karışım SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımdan %11 daha fazla İÇM değerine sahiptir. En yüksek İÇM değerlerine bakıldığında EVA PMAN karışımı SBS PMAN karışımından %3 daha fazla çekme mukavemeti değeri göstermiştir. Her bir karıştırma sıcaklığında üretilen bütün PMAN karışımlarının ortalama indirekt çekme mukavemetlerine bakıldığında tüm karıştırma sıcaklıklarında EVA PMAN ile hazırlanan karışımlar SBS PMAN ile hazırlanan karışımlardan daha yüksek çatlama direnci göstermiştir. Benzer şekilde her bir karıştırma hızı ve karıştırma süresinde üretilen tüm PMAN karışımlarının

ortalama indirekt çekme mukavemeti değerlerinde de EVA PMAN karışımları SBS PMAN karışımlarından daha yüksek çekme dayanımlarına sahip olmuştur. Düşük sıcaklık çatlamasına karşı daha yüksek dirençler üçlü Elvaloy+Elvax+Nanokil PMAN karışımlarından elde edilebilmektedir. Düşük sıcaklıkta artan çekme gerilmelerinden kaynaklanan çatlamalara karşı %3 Nanokile, %1 Elvaloy + %0.8 Elvax + %0.3 PPA ilavesiyle hazırlanan polimer modifiye asfalt nanokompoziti %5 SBS ilavesiyle hazırlanan PMAN'den daha fazla direnç göstermiştir.

- Marshall stabilite/akma oranı başka bir ifadeyle Marshall oranına göre yapılan değerlendirmelerde, 160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında hazırlanan SBS PMAN karışımlarının ortalama Marshall oranlarının modifikasyon sıcaklığı ile birlikte arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek Marshall oranları sırasıyla, 170 °C - 3000 dev./dk. - 120 dk. ve 180 °C - 4000 dev./dk. - 60 dk. karıştırma parametrelerinde elde edilmiştir. 170 °C'de 3000 dev./dk. 120 dk. karıştırma parametresinde üretilen PMAN karışımının Marshall oranı (76 kN/mm) saf bitümlü karışıma (32 kN/mm) göre yaklaşık %136, SBS modifiye bitümle üretilen karışıma (38 kN/mm) göre %58 yüksek çıkmıştır. 160 °C sıcaklıkta üretilen PMAN'ler için beklenen düzeyde MO değerleri elde edilememiştir. Bu sıcaklıkta karıştırma hızının artırılması genel olarak MO değerini artırma eğiliminde olmuştur. 170 ve 180 °C sıcaklıkta daha yüksek MO değerleri elde edilmiştir. Bu sıcaklıklarda karıştırma hızının 5000 dev./dk.'dan ziyade 3000 dev./dk. veya 4000 dev./dk. seçilmesi ile daha yüksek MO değerleri oluşmuştur. Modifikasyon sıcaklığının artırılması MO değerleri üzerinde karıştırma hızı ve süresine göre daha yüksek etki oluşturmuştur.
- MO değerleri açısından SBS PMAN'lere göre EVA PMAN'lerde daha yakın değerler elde edilmiştir. Modifikasyon sıcaklığının değiştirilmesi MO değerlerini önemli seviyede etkilememiştir. Genel bir eğilim elde edilememekle birlikte bütün EVA PMAN'lerin MO değerleri 50-60 kN/mm arasında değişmiştir. 170 °C modifikasyon sıcaklığı için daha kararlı sonuçlar elde edilmiştir. 120 dk. karıştırma süreleri genel olarak daha yüksek MO değerleri ortaya çıkarmıştır. EVA PMAN karışımlar kontrol karışıma göre %89'a kadar, EVA modifiye karışıma göre %17'ye kadar daha yüksek MO değerleri vermiştir.
- Çalışılan modifikasyon parametreleri için MO değerleri kıyaslandığında, SBS PMAN'ler EVA PMAN'lerden %25 daha fazla, EVA modifiye karışım da SBS modifiye karışımdan %8 daha yüksek MO değeri vermiştir.

- Tekrarlı yük sünme deneyi sonuçlarına göre en yüksek tekerlek izi dirençleri 170 °C-4000 dev./dk. -90 dk. modifikasyon parametrelerinde üretilen SBS PMAN'lerde elde edilmiştir. 160 °C sıcaklıkta yapılan modifikasyonlarda bazı seçeneklerde yüksek deformasyon dirençleri oluşsa da standart sapmanın çok yüksek olması; genel anlamda da en kötü performansların bu sıcaklıkta görülmesi, morfolojik değerlendirmelerde polimerlerin bitüm içerisinde tam olarak eriyerek homojen bir dağılım sergilememesi bu nedenle polimer yoğunluğunun bazı örneklerde ortalamanın üzerinde ve bazı örneklerde de çok altında kalmasına bağlanmıştır. Bu nedenle kararlı sonuçlar alınamamıştır. 170 °C sıcaklıkta yapılan modifikasyonlarda 5000 dev./dk. ve 180 °C sıcaklıkta yapılan modifikasyonlarda da 4000 dev./dk. karıştırma hızında daha kararlı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu nedenle tekerlek izi direnci yönünden SBS PMAN modifikasyonunda modifikasyon sıcaklığının en az 170 °C ve süresinin de en az 90 dakika seçilmesi gerektiği görülmektedir. SBS PMAN modifikasyonu ile kontrol karışımların deformasyon direncinin de önemli miktarda (%104'e kadar) artırılabilceği görülmüştür. SBS modifiye karışıma göre ise %29'a kadar daha yüksek deformasyon direnci sağlanabilmektedir.
- EVA PMAN'lerle hazırlanan karışımlarda en düşük deformasyon değeri 160 °C – 3000 dev./dk. – 60 dk. karıştırma parametresinde (0.322 mm) elde edilmiştir. Fakat 160 °C, 170 °C ve 180 °C karıştırma sıcaklıklarında elde edilen ortalama deformasyonlara bakıldığında karıştırma sıcaklığı arttıkça ortalama deformasyonlar azalmıştır. Bütün karıştırma sıcaklıklarında üretilen EVA PMAN karışımlarında 60 dakika karıştırma süresinde yapılan karışımlardan en düşük deformasyonlar elde edilmiştir. Karıştırma süresinin 60 dakikadan 90 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama deformasyonlarda artış meydana gelmiştir. En düşük deformasyon miktarını gösteren EVA PMAN karışımı kontrol karışımdan %52.6, EVA modifiye bitümle hazırlanan karışımdan %38.1 daha az deformasyon göstermiştir.
- SBS modifiye bitümle hazırlanan karışım EVA modifiye bitümle hazırlanan karışımdan yaklaşık %17 daha az; EVA PMAN ile hazırlanan karışım SBS PMAN ile hazırlanan karışımdan yaklaşık %3 daha düşük deformasyon göstermiştir.
- Elvaloy + Elvax + Nanokil üçlü kombinasyonunun bu çalışmada yenilikçi bir metod olarak denenmiş ve yapılan mekanik testler sonucunda bu nanokompozit bileşimin asfalt karışımların düşük sıcaklık çatlama direnci, su hasarı direnci ve tekerlek izi

direncini saf bitümlü ve Elvaloy + Elvax modifiye bitümlü karışımlara göre önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

- Genel performans değerlendirmesi yapıldığında, mekanik deney sonuçlarına göre, SBS PMAN hazırlanma sürecinde modifikasyon parametreleri olarak 170 °C – 4000 dev./dk. – 90 dk. seçilmesinin diğer parametrelere göre daha yüksek performans sağladığı anlaşılmıştır. Morfolojik yönden incelemelerde de bu parametrelerden itibaren uygun bir SBS-bitüm dağılımının elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte daha yüksek sıcaklıklarda da bazı test sonuçlarında olumlu sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle daha yüksek sıcaklıkların da (180 °C) seçilebileceği, bu sıcaklıkta karıştırma süresinin de azaltılabileceği (60 dk.) değerlendirilmektedir. Diğer yandan karıştırma hızının mekanik deneyler açısından karıştırma sıcaklığı ve süresi kadar anlamlandırılabilen bir etki göstermediği belirlenmiştir.
- EVA PMAN’ler açısından genel değerlendirme yapıldığında ise, 180 °C – 3000 dev./dk. – 120 dk. parametresinin en uygun modifikasyon parametresi olduğu görülmüştür. EVA PMAN modifikasyonunda modifikasyon başarımı açısından karıştırma süresinin son derece önemli olduğu ortaya çıkmıştır.

Günümüzde, daha yüksek performanslı asfalt kaplamaların üretilmesinde sıkça kullanılan yöntemlerden olan ikili veya üçlü modifikasyon seçeneklerinde modifikasyon süreçleri oldukça önem taşımaktadır. Bu süreçler bazen morfolojik bazen de birkaç bitüm deneyi ile kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Literatürdeki araştırma konularından bir tanesi de modifiye bitümün morfolojisindeki veya bitüm performansındaki farklılıkların nihai asfalt karışımın performansına yansıma durumudur. Asfalt karışımlar homojen mantıkla hazırlansalar bile aslında gerek üretilme süreçlerinden ve gerekse asfalt karışım bileşenlerinin uzaysal dağılımlarından kaynaklanan heterojenlikler kaçınılmaz olarak ortaya çıkmaktadır. Bu heterojenliklerden kaynaklı olarak bitüm performansındaki küçük değişikliklerin asfalt karışım performansına yansıma-yansıyamama durumu ortaya çıkabilmektedir. Bazen de yanıltıcı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle geniş bir çalışma ile bu parametrelerin asfalt karışımların performansı açısından irdelenmesi önemli görülmüştür. Yapılan çalışmalarla birlikte, modifikasyon parametrelerinin değiştirilmesinin nihai asfalt karışımın mekanik özelliklerini önemli seviyede değiştirdiği bu nedenle modifikasyon süreçlerinde uygulanacak parametrelerin hassas bir şekilde belirlenmesinin gerekli olduğu görülmüştür.

Bütün bu çıkarımlar neticesinde, polimer modifiye asfalt nanokompozit üretiminde amaçlanan optimum modifikasyon parametrelerinin belirlenmesi bu çalışma kapsamında ortaya konulan deneysel çerçeve ve mekanik testler bağlamında SBS ve EVA PMAN'ler için başarıyla sonuçlanmıştır. SBS ve EVA polimer modifiye asfaltların mekanik özelliklerinin modifikasyon sürecine nanokil ilavesiyle geliştirilebildiği görülmüştür.

Polimer modifiye asfalt nanokompozit üretiminde optimum modifikasyon parametrelerinin belirlenmesine yönelik yapılacak ileriki çalışmalarda seçilen üçlü kombinasyonun (karıştırma sıcaklığı, süresi ve hızlarının) daha da netleştirilmesi ve hazırlanan kombinasyonun ortak netleştirilmiş değerler üzerinde sonuca ulaşılabilmesi adına daha fazla veri gerektiren matematiksel modellerin de çalışılması önerilmektedir.



5. KAYNAKLAR

- Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L. ve Rollings, R., 1993. Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures, Transportation Research Record, 1417, 178-186.
- Ahmadi, S. J., Huang, Y. D. ve Li, W., 2004. Synthetic Routes, Properties and Future Applications of Polymer-Layered Silicate Nanocomposites, Journal of Materials Science, 39, 6, 1919-1925.
- Ahmed, A. W., Said, S. F., Lu, X. ve Carlsson, H., 2019. Pavement Performance Follow-Up and Evaluation of Polymer-Modified Test Sections, International Journal of Pavement Engineering, 20, 12, 1474-1487.
- Ahmedzade, P. ve Göktepe, A. B., 2009. Polimerlerin Bitümlü Bağlayıcının Tekerlek İzi Dayanımı Üzerindeki Etkisi, 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Kasım, Ankara, Turkey.
- Airey, G. D., 2002. Rheological Evaluation of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 16, 8, 473-487.
- Airey, G. D., 2003. Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens, Fuel, 82, 14, 1709-1719.
- Airey, G.D., 2004. Styrene Butadiene Styrene Polymer Modification of Road Bitumens, Journal of Materials Science, 39, 951-959.
- Ait-Kadi, A., Brahimi, B. ve Bousmina, M., 1996. Polymer Blends for Enhanced Asphalt Binders, Polymer Engineering & Science, 36, 12, 1724-1733.
- Aksoy, A., İskender, E., Oruç, Ş. ve Özen, H., 2012. SBS Polimeri ve Su Hasarı Önleyici Katkıların Asfalt Kaplamalarda Performans Karşılaştırması, Teknik Dergi, 23, 113, 5967-5986.
- Alexandre, M. ve Dubois, P., 2000. Polymer-Layered Silicate Nanocomposites: Preparation, Properties and Uses of A New Class of Materials, Materials Science and Engineering: R: Reports, 28, 1-2, 1-63.
- Ali, Y., Irfan, M., Ahmed, S. ve Ahmed, S., 2017. Empirical Correlation of Permanent Deformation Tests For Evaluating the Rutting Response of Conventional Asphaltic Concrete Mixtures, Journal of Materials in Civil Engineering, 29, 8, 04017059.
- Al-Mousawi, E. J., Al-Rubaei, R. H. ve Shubber, A. A., 2021. Evaluation the Physical Properties and Marshall Stability for Asphalt Modified with Waste Polypropylene and Nanosilica Powder, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1090, 1, 012007, IOP Publishing.

- Al-Shaybani, M. A. H., 2017. Investigation on Tensile Strength Ratio (TSR) Specimen to Predict Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements Mixture and Using Polymer to Reduce Moisture Damage, Journal of University of Babylon, 25, 2.
- Alzaidy, F. ve Albayati, A. H. K., 2021. A Comparison Between Static and Repeated Load Test to Predict Asphalt Concrete Rut Depth, Engineering, Technology & Applied Science Research, 11, 4, 7363-7369.
- Ameli, A., Babagoli, R., Khabooshani, M., AliAsgari, R. ve Jalali, F., 2020. Permanent Deformation Performance of Binders and Stone Mastic Asphalt Mixtures Modified by SBS/Montmorillonite Nanocomposite, Construction and Building Materials, 239, 117700.
- Ameri, M., Vamegh, M., Imaninasab, R. ve Rooholamini, H., 2016. Effect of Nanoclay on Performance of Neat and SBS-Modified Bitumen and HMA, Petroleum Science and Technology, 34, 11-12, 1091-1097.
- Ameri, M., Vamegh, M., Rooholamini, H. ve Haddadi, F., 2018. Investigating Effects of Nano/SBR Polymer on Rutting Performance of Binder and Asphalt Mixture, Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 1-7.
- Apeagyei, A. K., 2014. Flow Number Predictive Models from Volumetric and Binder Properties, Construction and Building Materials, 64, 240-245.
- Athira, P. K., Narayan, S. A., Krishnan, J. M. ve Jain, P. K., 2020. Comparison of Binder and Mixture Tests to Characterize Permanent Deformation of Elastomer and Terpolymer Modified Binders, Construction and Building Materials, 264, 120138.
- Attaelmanan, M., Feng, C.P. ve Al, A.H., 2011. Laboratory Evaluation Of HMA with High Density Polyethylene as a Modifier, Constr. Build. Mater., 25, 5, 2764 - 2770.
- Ayyıldız, D., Aksoy, A. ve İskender, E., 2021. Investigation of Optimum Composition Ratio for SBS/Nanoclay/Bitumen Nanocomposites in Stone Mastic Asphalt Mixtures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36, 4, 1847-1861.
- Babalghaith, A. M., Koting, S., Sulong, N. H. R. ve Karim, M. R., 2019. Optimization of Mixing Time for Polymer Modified Asphalt, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 512, 1, 012030, IOP Publishing.
- Bahia, H., 2006. Modified Asphalt Binders for Paving Applications, *Asph. Mix Des. Constr.: Past, Present. Futur.*, American Society of Civil Engineers, 84–154.
- Bayekolaei, M. D., Naderi, K. ve Nejad, F. M., 2016. A Statistical Analysis on the Mechanical Properties of Nanocomposite Modified Asphalt Mixtures, Petroleum Science and Technology, 34, 16, 1439-1446.

- Bayekolaiei, M. D., Naderi, K. ve Nejad, F. M., 2018. The Effects of Base Binder and Styrene–Butadiene–Styrene Structure on Rutting Resistance of Polymer–Nanocomposite Asphalt Mixture, Journal of Elastomers & Plastics, 50, 3, 256-275.
- Becker, Y., Mendez, M. P. ve Rodriguez, Y., 2001. Polymer Modified Asphalt, In Vision Tecnologica, 9, 1, 39-50.
- Behnood, A. ve Olek, J., 2017. Rheological Properties of Asphalt Binders Modified with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), Ground Tire Rubber (GTR), or Polyphosphoric Acid (PPA), Construction and Building Materials, 151, 464-478.
- Behnood, A. ve Olek, J., 2017. Stress-Dependent Behavior and Rutting Resistance of Modified Asphalt Binders: An MSCR Approach, Construction and Building Materials, 157, 635-646.
- Behnood, A. ve Gharehveran, M. M., 2019. Morphology, Rheology and Physical Properties of Polymer-Modified Asphalt Binders, European Polymer Journal, 112, 766-791.
- Bostancıoğlu, M. ve Oruç, Ş., 2016. Effect of Activated Carbon and Furan Resin on Asphalt Mixture Performance, Road Materials and Pavement Design, 17, 2, 512-525.
- Bouldin, M. G., Collins, J. H. ve Berker, A., 1991. Rheology and Microstructure of Polymer/Asphalt Blends, Rubber Chemistry and Technology, 64, 4, 577-600.
- Boutevin, B., Pietrasanta, Y. ve Robin, J. J., 1989. Bitumen-Polymer Blends for Coatings Applied to Roads and Public Constructions, Progress in Organic Coatings, 17, 3, 221-249.
- Boz, I., Habbouche, J. ve Diefenderfer, S., 2021. The Use of the Indirect Tensile Test to Evaluate the Resistance of Asphalt Mixtures to Cracking and Moisture-Induced Damage. In *Airfield and Highway Pavements*, 104-114.
- Brûlé, B., Brion, Yvonnick. ve Tanguy, A., 1988. Paving Asphalt Polymer Blends: Relationships Between Composition, Structure and Properties (With Discussion), In Association of Asphalt Paving Technologists Proc., 57.
- Cao, W. D., Liu, S. T. ve Mao, H. L., 2011. Experimental Study on Polyphosphoric Acid (PPA) Modified Asphalt Binders, In Advanced Materials Research, 152, 288-294.
- Chen, J. S., Liao, M. C. ve Shiah, M. S., 2002. Asphalt Modified by Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model. Journal of Materials in Civil Engineering, 14, 3, 224-229.
- Chen, J. S., Liao, M. C. ve Tsai, H. H., 2002. Evaluation and Optimization of the Engineering Properties of Polymer-Modified Asphalt, Practical Failure Analysis, 2, 3, 75-83.

- Crucho, J., Picado-Santos, L., Neves, J. ve Capitão, S., 2019. A Review of Nanomaterials Effect on Mechanical Performance and Aging of Asphalt Mixtures, Applied Sciences, 9,18, 3657.
- Das, P. K., Baaj, H., Kringos, N. ve Tighe, S., 2015. Coupling of Oxidative Ageing and Moisture Damage in Asphalt Mixtures, Road Materials and Pavement Design, 16 (sup1), 265-279.
- De Sá, M. D. F. A., Lins, V. D. F. C., Pasa, V. M. D. ve Leite, L. F. M., 2013. Weathering Aging of Modified Asphalt Binders, Fuel Processing Technology, 115, 19-25.
- Debbarma, K., Debnath, B. ve Sarkar, P. P., 2022. A Comprehensive Review on the Usage of Nanomaterials in Asphalt Mixes, Construction and Building Materials, 361, 129634.
- Dehouche, N., Kaci, M. ve Mouillet, V., 2016. The Effects of Mixing Rate on Morphology and Physical Properties of Bitumen/Organo-Modified Montmorillonite Nanocomposites, Construction and Building Materials, 114, 76-86.
- Epps, J. A., Sebaaly, P. E., Penaranda, J. Maher, M. R., McCann, M. B. ve Hand A. J., 2000. NCHRP Report 444: Compatibility of a Test for Moisture-Induced Damage with Superpave Volumetric Mix Design, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- Fang, C., Yu, R., Liu, S. ve Li, Y., 2013. Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review, Journal of Materials Science & Technology, 29, 7, 589-594.
- Farias, L.G.A.T., Leitinho, J.L., Amoni, B.D.C., Bastos, J.B.S, Soares, J.B., Soares, S.D.A. ve Sant'Ana, H.B., 2016. Effects of Nanoclay and Nanocomposites on Bitumen Rheological Properties, Construction and Building Materials, 125, 873-883.
- Galooyak, S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. ve Moeini, A., 2010. Rheological Properties and Storage Stability of Bitumen/SBS/Montmorillonite Composites, Construction and Building Materials, 24, 3, 300-307.
- Gama, D. A., Júnior, J. M. R., de Melo, T. J. A. ve Rodrigues, J. K. G., 2016. Rheological Studies of Asphalt Modified with Elastomeric Polymer, Construction and Building Materials, 106, 290-295.
- Gama, D. A., Yan, Y., Rodrigues, J. K. G. ve Roque, R., 2018. Optimizing the Use of Reactive Terpolymer, Polyphosphoric Acid and High-Density Polyethylene to Achieve Asphalt Binders with Superior Performance, Construction and Building Materials, 169, 522-529.
- Ge, D., Yan, K., You, L. ve Wang, Z., 2017. Modification Mechanism of Asphalt Modified with Sasobit and Polyphosphoric Acid (PPA), Construction and Building Materials, 143, 419-428.

- Geçkil, T. ve Seloglu, M., 2018. Performance Properties of Asphalt Modified with Reactive Terpolymer, Construction and Building Materials, 173, 262-271.
- Geçkil, T., 2019. Physical, Chemical, Microstructural and Rheological Properties of Reactive Terpolymer-Modified Bitumen, Materials, 12, 6, 921.
- Geçkil, T., 2021. Sıcak Karışım Asfalt Kaplamanın Su Hasarı Direnci Üzerinde RET Katkısının Etkisi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33, 2, 537-546.
- Geraldin, J. ve Makmur, A., 2020. Experimental Study on the Effects of Reclaimed Asphalt Pavement towards Marshall Parameters on Asphalt Course-Wearing Course, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 498, 1, 012025.
- Gibson, N., Qi, X., Shenoy, A., Al-Khateeb, G., Kutay, M. E., Andriescu, A., Stuart, K., Youtcheff, J. ve Harman, T., 2012. Performance Testing for Superpave and Structural Validation (No. FHWA-HRT-11-045), United States, Federal Highway Administration.
- Golestani B., Nejad F.M. ve Galooyak S.S., 2012. Performance Evaluation of Linear and Nonlinear Nanocomposite Modified Asphalts, Construction and Building Materials, 35, 197-203.
- Golestani, B., Nam, B.H., Nejad, F.M. ve Fallah, S., 2015. Nanoclay Application To Asphalt Concrete: Characterization of Polymer and Linear Nanocomposite-Modified Asphalt Binder and Mixture, Construction and Building Materials, 91, 32-38.
- Gökalp, İ., Çetin, H. M., Özinal, Y., Gündoğan, H. ve Uz, V. E., 2019. Polimer Modifiye Bitüm Modifikasyonuna Etki Eden Parametreler Üzerine Bir Literatür Araştırması, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8, 2, 954-964.
- Hasan, Z., Kamran, R., Mohammad, F., Ahmad, G. ve Hosein, F., 2012. Evaluation of Different Conditions on The Mixing Bitumen and Carbon Nano-Tubes, Int. J. Civ. Environ. Eng. IJCEE-IJENS, 12, 06, 53-59.
- He, W., Zhao, Z., Yuan, J. ve Xiao, F., 2023. Recent Development of Ethylene-Vinyl Acetate Modified Asphalt, Construction and Building Materials, 363, 129800.
- Hossain, Z. ve Elsayed, A., 2018. Use of Nanoclays as Alternatives of Polymers Toward Improving Performance of Asphalt Binders, Final Report, Project No.17BASU01, Arkansas State University.
- Hrdlicka, G. M., Tandon, V., Prozzi, J., Smit, A. ve Yildirim Y., 2007. Evaluation of Binder Tests for Identifying Rutting and Cracking Potential of Modified Asphalt Binders, Report No.FHWA/TX-07/0-4824-1, Center for Transportation Infrastructure Systems, The University of Texas at El Paso, El Paso, Texas.
- Hunter, R. N., Self, A., Read, J. ve Hobson, E., 2015. The Shell Bitumen Handbook London, UK: ICE Publishing.

- Iftikhar, S., Shah, P. M. ve Mir, M. S., 2022. Potential Application of Various Nanomaterials on the Performance of Asphalt Binders and Mixtures: A Comprehensive Review, International Journal of Pavement Research and Technology, 1-29.
- İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, No: 1, 280 s.
- Irfan, M., Ali, Y., Iqbal, S., Ahmed, S. ve Hafeez, I., 2018. Rutting Evaluation of Asphalt Mixtures Using Static, Dynamic, and Repeated Creep Load Tests, Arabian Journal for Science and Engineering, 43, 10, 5143-5155.
- Isacsson, U. ve Zeng, H., 1997. Relationships Between Bitumen Chemistry and Low Temperature Behaviour of Asphalt, Construction and Building Materials, 11, 2, 83-91.
- Isacsson, U. ve Lu, X., 1999. Characterization of Bitumens Modified with SEBS, EVA and EBA Polymers, Journal of Materials Science, 34, 3737-3745.
- İslam, T. ve Hossain, K., 2020. A Literature Review on Asphalt Binder Additives and Modifiers, Advanced Road and Transportation Engineering Lab (ARTEL), Department of Civil Engineering, Memorial University.
- İsmail, S.A.D.M. ve İsmail, M.Q., 2019. Moisture Susceptibility of Asphalt Concrete Pavement Modified by Nano Clay Additive, Civil Engineering Journal, 5, 12, 2535-2553.
- İskender, C., 2017. Cam Agrega Boyutu ve Agrega Gradasyonunun Asfalt Kaplama Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- İskender, C., İskender, E., Aksoy, A. ve Şengül, C. E., 2021. Effect of Glass Cullet Size and Hydrated Lime - Nanoclay Additives on the Mechanical Properties of Glassphalt Concrete, Sustainability, 13, 23, 13284.
- İskender, E. ve Aksoy, A., 2021. Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Teknik Dergi, 32, 3, 10885-10906.
- İskender, E., 2008. Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- İskender, E., 2019. Bentonit Nanokilinin Elastomerik ve Plastomerik Polimer Modifiye Bitümlerin Depolama Stabiliteleri Üzerindeki Etkisi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7, 3, 1187-1203.
- Jahromi, S.G. ve Khodaii, A., 2009. Effects of Nanoclay on Rheological Properties of Bitumen Binder, Construction and Building Materials, 23, 2894-2904.

- Jahromi, S. G. ve Rajaei, S., 2013. Nanoclay-Modified Asphalt Mixtures for Eco-Efficient Construction, In Nanotechnology in Eco-Efficient Construction, 108-126, Woodhead Publishing.
- Jasso, M., 2016. The Mechanism of Modification and Properties of Polymer Modified Asphalts, Unpublished Doctoral Thesis. University of Calgary, Calgary.
- Jasso, M., Bakos, D., MacLeod, D. ve Zanzotto, L., 2013. Preparation and Properties of Conventional Asphalt Modified by Physical Mixtures of Linear SBS and Montmorillonite Clay, Construction and Building Materials, 38, 759-765.
- Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D., Stastna, J. ve Zanzotto, L., 2015. Rheology of Conventional Asphalt Modified with SBS, Elvaloy and Polyphosphoric Acid, Fuel Processing Technology, 140, 172-179.
- Johnson, T. W., Hashemian, L., Patra, S. ve Shabani, A., 2019. Application of Nanoclay Materials in Asphalt Pavements, In Annual Conference of Proceedings, 64, 1-15.
- Keyf, S., 2010. Investigation of Penetration and Penetration Index in Bitumen Modified with SBS and Reactive Terpolymer, Sigma, 28, 26-34.
- Kodrat, I., Sohn, D. ve Hesp. S.A., 2007. Comparison of Polyphosphoric Acid-Modified Asphalt Binders with Straight and Polymer-Modified Materials, Transp. Res. Rec., 1998, 1, 47-55.
- Kosma, V., Hayrapetyan, S., Diamanti, E., Dhawale, A. ve Giannelis, E. P., 2018. Bitumen Nanocomposites with Improved Performance, Construction and Building Materials, 160, 30-38.
- Kök, B. V. ve Çolak, H., 2011. Laboratory Comparison of the Crumb-Rubber and SBS Modified Bitumen and Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 25, 8, 3204-3212.
- Kök, B. V., Yılmaz, M., Kuloğlu, N. ve Şengür, A., 2011. Değişik Şartlarda Hazırlanmış SBS Modifiyeli Bitümün Viskozitesinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi, 6th. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), May, Elâzığ, 150-154.
- Krcmarik, M., 2013. Characteristics and Prediction of the Low Temperature Indirect Tensile Strengths of Michigan Asphalt Mixtures, A Thesis, Master of Science, Michigan State University.
- KTŞ., 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kumandaş, A., Çavdar, E., Pancar, E. B. ve Şeref, O., 2021. Reaktif Etilen Terpolimerlerin Bitümün Modifikasyonunda Kullanımı: Bir Literatür Araştırması, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11, 3, 845-862.

- Leng, Z., Tan, Z., Yu, H. ve Guo, J., 2019. Improvement of Storage Stability of SBS-Modified Asphalt with Nanoclay Using A New Mixing Method, Road Materials and Pavement Design, 20, 7, 1601-1614.
- Li, J., Yang, S., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z. ve Yang, J., 2019. Studies on the Properties of Modified Heavy Calcium Carbonate and SBS Composite Modified Asphalt, Construction and Building Materials, 218, 413–423.
- Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. ve Huang, J., 2017. Developments of Nano Materials and Technologies on Asphalt Materials–A Review, Construction and Building Materials, 143, 633-648.
- Liang, R., 2008. Refine AASHTO T 283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave (No. FHWA/OH-2008/1), United States, Federal Highway Administration.
- Liu, S., Zhou, S. B. ve Xu, Y., 2018. Evaluation of Cracking Properties of SBS-Modified Binders Containing Organic Montmorillonite, Construction and Building Materials, 175, 196-205.
- Mahali, I. ve Sahoo, U. C., 2019. Rheological Characterization of Nanocomposite Modified Asphalt Binder, International Journal of Pavement Research and Technology, 12, 6, 589-594.
- Mansourian, A. ve Gholamzadeh, S., 2017. Moisture Susceptibility of Hot Mix Asphalt Containing Asphalt Binder Modified with Nanocomposite, Road Materials and Pavement Design, 18, 6, 1434-1447.
- Markanday, S. S., Stastna, J., Polacco, G., Filippi, S., Kazatchkov, I. ve Zanzotto, L., 2010. Rheology of Bitumen Modified by EVA-Organoclay Nanocomposites, Journal of Applied Polymer Science, 118, 1, 557-565.
- Martínez-Anzures, J. D., Zapién-Castillo, S., Salazar-Cruz, B. A., Rivera-Armenta, J. L., Antonio-Cruz, R. D. C., Hernández-Zamora, G. ve Méndez-Hernández, M. L., 2019. Preparation and Properties of Modified Asphalt Using Branch SBS/Nanoclay Nanocomposite as A Modifier, Road Materials and Pavement Design, 20, 6, 1275-1290.
- Martinho, F. C. ve Farinha, J. P. S., 2019. An Overview of the Use of Nanoclay Modified Bitumen in Asphalt Mixtures for Enhanced Flexible Pavement Performances, Road Materials and Pavement Design, 20, 3, 671-701.
- Mashaan, N., Chegenizadeh, A. ve Nikraz, H., 2021. Laboratory Properties of Waste PET Plastic-Modified Asphalt Mixes, Recycling, 6, 3, 49.
- Merusi, F., Giuliani, F. ve Polacco, G., 2012. Linear Viscoelastic Behaviour of Asphalt Binders Modified with Polymer/Clay Nanocomposites, Procedia-Social and Behavioral Sciences, 53, 335-345.

- Merusi, F., Giuliani, F., Filippi, S. ve Polacco, G., 2014. A Model Combining Structure and Properties of A 160/220 Bituminous Binder Modified with Polymer/Clay Nanocomposites, A Rheological and Morphological Study, Materials and Structures, 47, 819-838.
- Mittal, A., Jain, P.K., Sengupta, J.B. ve GanvirDi., V., 2012. New and Emerging Road Technologies for future: New Building Materials & Construction World NBM & CW.
- Morgan, P. ve Mulder, A., 1995. The Shell Bitumen Industrial Handbook, Shell Bitumen, Surrey.
- Mortezaei, M., Shabani, S. ve Mohammadian-Gerzaz, S., 2020. Assessing the Effects of Premixing on the Rheological Properties for Three-Phases Asphalt Binder Nano-Composite Including Clay and SBS, Construction and Building Materials, 231, 117151.
- Navarro, F. J., Partal, P., Martínez-Boza, F. J. ve Gallegos, C., 2007. Influence of Processing Conditions on the Rheological Behavior of Crumb Tire Rubber-Modified Bitumen, Journal of Applied Polymer Science, 104, 3, 1683-1691.
- Neves, J., Correia Diogo, A. ve De Picado Santos, L., 2015. Bituminous Binders and Mixtures, Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing, and Design, 237-271.
- Nivitha, M. R., Prasad, E. ve Krishnan, J. M., 2016. Ageing in Modified Bitumen Using FTIR Spectroscopy, International Journal of Pavement Engineering, 17, 7, 565-577.
- Orhan, F., 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Ouf, M.E, Abu El-Maaty Behiry, A.E. ve Shahrah, S., 2019. Using of Nano Materials and Additives to Enhance the Hot Mix Asphalt, International Journal of Scientific & Engineering Research, 10,4, 861-871.
- Özdemir, D. K., Topal, A. ve Şengöz, B., 2020. The Influences of Altering the Mixing Conditions on the Properties of Polymer Modified Bitumen: An Overview, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25, 2, 1105-1116.
- Pamplona, T. F., Amoni, B. D. C., Alencar, A. E. V. D., Lima, A. P. D., Ricardo, N. M.P.S, Soares, J. B. ve Soares, S. D. A., 2012. Asphalt Binders Modified by SBS and SBS/Nanoclays: Effect on Rheological Properties, Journal of the Brazilian chemical society, 23, 4, 639-647.
- Paul, D. R. ve Robeson, L. M., 2008. Polymer Nanotechnology: Nanocomposites, Polymer, 49,15, 3187-3204.
- Pavlidou, S. ve Papaspyrides, C. D., 2008. A Review on Polymer–Layered Silicate Nanocomposites, Progress in Polymer Science, 33, 12, 1119-1198.

- Pérez-Lepe, A., Martinez-Boza, F. J., Gallegos, C., González, O., Muñoz, M. E. ve Santamaria, A., 2003. Influence of the Processing Conditions on the Rheological Behaviour of Polymer-Modified Bitumen, Fuel, 82, 11, 1339-1348.
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F. ve Stastna, G., 2015. A Review of the Fundamentals of Polymer-Modified Asphalts: Asphalt/Polymer Interactions and Principles of Compatibility, Advances in Colloid and Interface Science, 224, 72-112.
- Polacco, G., Filippi, S., Paci, M. ve Merusi, F., 2014. Nanoclays as Asphalt-Binder Modifiers, In Handbook of Polymernanocomposites, Processing, Performance and Application, 223-245.
- Polacco, G., Kříž, P., Filippi, S., Stastna, J., Biondi, D. ve Zanzotto, L., 2008. Rheological Properties of Asphalt/SBS/Clay Blends, European Polymer Journal, 44, 11, 3512-3521.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., Antonelli, F., Vlachovicova, Z. ve Zanzotto, L., 2004. Rheology of Asphalts Modified with Glycidylmethacrylate Functionalized Polymers, Journal of Colloid and Interface Science, 280, 366-373.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D. ve Zanzotto, L., 2006. Relation Between Polymer Architecture and Nonlinear Viscoelastic Behavior of Modified Asphalts, Current Opinion in Colloid & Interface Science, 11, 4, 230-245.
- Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Eskandarsefat, S., Teltayev, B. ve Oliviero Rossi, C., 2019. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances, Applied Sciences, 9, 4, 742.
- Qian, C., Fan, W., Liang, M., He, Y., Ren, S., Lv, X., Nan, G. ve Luo, H., 2018. Rheological Properties, Storage Stability and Morphology of CR / SBS Composite Modified Asphalt by High-Cured Method, Construction and Building Materials, 193, 312-322.
- Ray, S. S. ve Okamoto, M., 2003. Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: A Review from Preparation to Processing, Progress in Polymer Science, 28, 11, 1539-1641.
- Read, J. ve Whiteoak, D., 2003. The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford, Fifth Edition.
- Rehab, A. ve Salahuddin, N., 2005. Nanocomposite Materials Based on Polyurethane Intercalated into Montmorillonite Clay, Materials Science and Engineering: A, 399 (1-2), 368-376.
- Rios Carreno, L. C., 2021. Effect of Blending Conditions on the Rheological Properties of Asphalt modified by Reactive Ethylene Terpolymer and Polyphosphoric Acid, Master's Thesis, University of Calgary, Schulich School of Engineering, Calgary.
- Rodrigues, C. ve Hanumanthgari, R., 2015. Polymer Modified Bitumens and Other Modified Binders, In the Shell Bitumen Handbook, 149-183, ICE Publishing.

- Saboo, N., Sukhija, M. ve Singh, G., 2021. Effect of Nanoclay on Physical and Rheological Properties of Waste Cooking Oil–Modified Asphalt Binder, Journal of Materials in Civil Engineering, 33, 3, 04020490.
- Sağlık, A. ve Öztürk, E., 2014. Türkiye’de Sathi Kaplamalarda Kullanılan Bitümlerin Performans Sınıflarının Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29, 4, 689-698.
- Saltan, M., Terzi, S. ve Karahancer, S., 2019. Mechanical Behavior of Bitumen and Hot-Mix Asphalt Modified with Zinc Oxide Nanoparticle, Journal of Materials in Civil Engineering, 31, 3, 04018399.
- Sengoz, B., Topal, A. ve Isikyakar, G., 2009. Morphology and Image Analysis of Polymer Modified Bitumens, Construction and Building Materials, 23, 5, 1986-1992.
- Sergeant, G. D., Leung, R. ve Barrett, D., 1994. The Effect of Aging on the Viscosity of Bitumens Produced From Shale Oil, Fuel Processing Technology, 37, 1, 67-72.
- Shafabakhsh, G., Aliakbari Bidokhti, M. ve Divandari, H., 2020. Evaluation of the Performance of SBS/Nano- Al_2O_3 Composite-Modified Bitumen at High Temperature, Road Materials and Pavement Design, 1-15.
- Shah, P. M. ve Mir, M. S., 2020. Performance of OMMT/SBS on the Rheological Properties of Asphalt Binder, Korea-Australia Rheology Journal, 32, 235-242.
- Shan, L., Xie, R., Wagner, N. J., He, H. ve Liu, Y., 2019. Microstructure of Neat and SBS Modified Asphalt Binder by Small-Angle Neutron Scattering, Fuel, 253, 1589-1596.
- Shen, J. A., 2011. Pavement Performance of Asphalt and Asphalt Concrete, China Communication Press.
- Shi, H., Xu, T., Zhou, P. ve Jiang, R., 2017. Combustion Properties of Saturates, Aromatics, Resins and Asphaltenes in Asphalt Binder, Construction and Building Materials, 136, 515-523.
- Si, W., Li, N., Ma, B., Tian, Y. X. ve Zhou, X. Y., 2016. Temperature Response to Tensile Characteristics of the Hot Asphalt Mixtures, KSCE Journal of Civil Engineering, 20, 4, 1336-1346.
- Siddig, E. A., Feng, C. P. ve Ming, L.Y., 2018. Effects of Ethylene Vinyl Acetate and Nanoclay Additions on High-Temperature Performance of Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 169, 276-282.
- Singh, D., Habal, A., Ashish, P. K. ve Kataware, A., 2018. Evaluating Suitability of Energy Efficient and Anti-Stripping Additives for Polymer and Polyphosphoric Acid Modified Asphalt Binder Using Surface Free Energy Approach, Construction and Building Materials, 158, 949-960.

- Siswanto, H., Supriyanto, B., Pranoto, Chandra, P. R. ve Hakim, A. R., 2017. Marshall Properties of Asphalt Concrete Using Crumb Rubber Modified of Motorcycle Tire Waste, In AIP Conference Proceedings, 1887, 1, 020039, AIP Publishing LLC.
- Sun, L., Xin, X. ve Ren, J., 2017. Asphalt Modification Using Nano-Materials and Polymers Composite Considering High and Low Temperature Performance, Construction and Building Materials, 133, 358-366.
- Sureshkumar, M. S. ve Polacco, G., 2010. Polymer Modified Asphalt Nanocomposites (PMAN): Preparation and Characterization. In Proceedings of the International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN-2010), February, SRM University, Kattankulathur, India (s. 40).
- Sureshkumar, M. S., 2011. Polymer Modified Asphalt Nanocomposites (PMAN), PhD diss., PhD Thesis, University of Pisa, Italy.
- Sureshkumar, M.S, Filippi, S., Polacco, G., Kazatchkov, I., Stastna, J. ve Zanzotto, L., 2010. Internal structure and Linear Viscoelastic Properties of EVA/Asphalt Nanocomposites, European Polymer Journal, 46, 4, 621-633.
- Tomé, L. G. A., Leitinho, J. L., de Castro Amoni, B., Soares, J. B., de Sant'Ana, H. B. ve Soares, S. D. A., 2015. Effects of Nanoclay and Nanocomposites on Rheological Properties of Pure and Modified by SBS Asphalts, Journal of the Brazilian Chemical Society, 1-29.
- Topal, A., 2010. Evaluation of the Properties and Microstructure of Plastomeric Polymer Modified Bitumens, Fuel Processing Technology, 91, 1, 45-51.
- Topal, A., Yilmaz, M., Kok, B. V., Kuloglu, N. ve Sengoz, B., 2011. Evaluation of Rheological and Image Properties of Styrene-Butadiene-Styrene and Ethylene-Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens, Journal of Applied Polymer Science, 122, 5, 3122-3132.
- Trakarnpruk, W. ve Chanathup, R., 2005. Physical and Rheological Properties of Asphalts Modified with Polyethylene-Co-Methylacrylate and Acids, Journal of Metals, Materials and Minerals, 15, 2, 79-87.
- TS EN 12697-12., 2018. Bitümlü Karışımlar - Test Metotları- Bölüm 12: Bitümlü Numunelerin Su Hassasiyetinin Belirlenmesi.
- TS EN 12697-25., 2016. Bitümlü Karışımlar - Deney Yöntemleri - Bölüm 25: Tekrarlı Basınç Deneyi.
- Uncu, D., 2017. Polimer Modifiye Bitüm Özelliklerinin Nano Malzemeler Kullanılarak İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, FBE, İzmir.
- URL-1, https://www.shell.com/shellbitumen100/a-century-of-innovation/_jcr_content/par/iframedapp.static/img/full-scale-trials-1973.e4cbb628.jpg. 4 Aralık 2022.

- URL-2, <https://kraton.com/products/pdsDocs/polymer/D1192E.pdf>. 17 Eylül 2021.
- URL-3, <https://www.gsckw.com/site/admincp/files/datasheets/2-%20Elvaloy%205160%20datasheet.pdf>. 10 Ocak 2023.
- URL-4, <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/914/914-22901-01-elvax-660-ethylene-vinyl-acetate-copolymer-tds.pdf>. 10 Ocak 2023.
- URL-5, <https://atamankimya.com/sayfalar.asp?LanguageID=1&cid=3&id=11&id2=6526> 12 Şubat 2023.
- Vamegh, M., Ameri, M. ve Naeni, SFC., 2020. Experimental Investigation of Effect of PP/SBR Polymer Blends on the Moisture Resistance and Rutting Performance of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 253, 119197.
- Vargas-Hernández, M. A. ve Vázquez-Torres, H., 2015. Rheological Characterization and Thermal Stability of Triblock Copolymers-Modified Asphalt Reinforced with Montmorillonite Nanoparticles in Physical Mixing, Revista Mexicana De Ingeniería Química, 14, 2, 503-515.
- Varun ve Gehlot, T., 2018. Use of Nano-Clay in Asphalt Binder Modification, Journal of Mechanical and Civil Engineering, 15, 1, 25-30.
- Veropalumbo, R., Viscione, N. ve Russo, F., 2019. Indirect Tensile Strength Method for Defining A Proper Practice of Asphalt Mixtures Design, WIT Transactions on Engineering Sciences, 124, 255-265.
- Xu, C., Zhang, Z. ve Liu, F., 2020. Improving the Low-Temperature Performance of RET Modified Asphalt Mixture with Different Modifiers, Coatings, 10, 11, 1070.
- Xu, C., Zhang, Z., Zhao, F., Liu, F. ve Wang, J., 2019. Improving the Performance of RET Modified Asphalt with the Addition of Polyurethane Prepolymer (PUP), Construction and Building Materials, 206, 560-575.
- Yan, C., Huang, W., Lin, P., Zhang, Y. ve Lv, Q., 2019. Chemical and Rheological Evaluation of Aging Properties of High Content SBS Polymer Modified Asphalt, Fuel, 252, 417-426.
- Yang, J. ve Tighe, S., 2013. A review of Advances of Nanotechnology in Asphalt Mixtures, Procedia-Social and Behavioral Sciences, 96, 1269-1276.
- Yıldırım, Y., 2007. Polymer Modified Asphalt Binders, Construction and Building Materials, 21, 1, 66-72.
- Yilmaz, M., Kök, B. V. ve Kuloğlu, N., 2011. Effects of Using Asphaltite as Filler on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt, Construction and Building Materials, 25, 11, 4279-4286.

- Yin, W., Ye, F. ve Lu, H., 2017. Establishment and Experimental Verification of Stability Evaluation Model for SBS Modified Asphalt: Based on Quantitative Analysis of Microstructure, Construction and Building Materials, 131, 291-302.
- You, Z., 2013. Nanomaterials in Asphalt Pavements, International Journal of Pavement Research and Technology, 6, 3, IV.
- You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q. ve Goh, S. W., 2011. Nanoclay-Modified Asphalt Materials: Preparation and characterization, Construction and Building Materials, 25, 2, 1072-1078.
- Yu, J. Y., Feng, P. C., Zhang, H. L. ve Wu, S. P., 2009. Effect of Organo-Montmorillonite on Aging Properties of Asphalt, Construction and Building Materials, 23, 7, 2636-2640.
- Zapién-Castillo, S., Rivera-Armenta, J.L., Chávez-Cinco, M.Y., Salazar-Cruz, B.A. ve Mendoza-Martínez, A.M., 2016. Physical and Rheological Properties of Asphalt Modified with SEBS/Montmorillonite Nanocomposite, Construction and Building Materials, 106, 349-356.
- Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A. ve Ebrahimi-Nejad, S., 2010. Preparation and Rheological Characterization of Asphalt Binders Reinforced with Layered Silicate Nanoparticles, Construction and Building Materials, 24, 7, 1239-1244.
- Zegeye, E. T., Moon, K. H., Turos, M., Clyne, T. R. ve Marasteanu, M. O., 2012. Low Temperature Fracture Properties of Polyphosphoric Acid Modified Asphalt Mixtures, J. Mater. Civ. Eng., 24, 8, 1089-1096.
- Zhang, F. ve Hu, C., 2015. Physical and Rheological Properties of Crumb Rubber/Styrene–Butadiene–Styrene Compound Modified Asphalts. Polymers and Polymer Composites, 16, 2, 1918-1927.
- Zhang, H. L., Su, M. M., Zhao, S. F., Zhang, Y. P. ve Zhang, Z. P., 2016. High and Low Temperature Properties of Nano-Particles/Polymer Modified Asphalt, Construction and Building Materials, 114, 323-332.
- Zhang, H., Yu, J. ve Wu, S., 2012. Effect of Montmorillonite Organic Modification on Ultraviolet Aging Properties of SBS Modified Bitumen, Construction and Building Materials, 27,1, 553-559.
- Zhao, X., Wang, S., Wang, Q. ve Yao, H., 2016. Rheological and Structural Evolution of SBS Modified Asphalts Under Natural Weathering, Fuel, 184, 242-247.
- Zhou, C., Tong, D. ve Yu, W., 2019. Smectite Nanomaterials: Preparation, Properties and Functional Applications, In Nanomaterials from Clay Minerals, Elsevier, 335-364.
- Zhu, J., Birgisson, B. ve Kringos, N., 2014. Polymer Modification of Bitumen: Advances and Challenges, European Polymer Journal, 54, 18-38.
- Zieliński, J., Bukowski, A. ve Osowiecka, B., 1995. An Effect of Polymers on Thermal Stability of Bitumens, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 43,1, 271-277.

ÖZGEÇMİŞ

Cansu İSKENDER, 2007 yılında Kömürcü İlköğretim Okulundan, 2011 yılında Trabzon Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2015 Bahar yarıyılı sonunda Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünden “İnşaat Mühendisi” unvanıyla bölüm ve fakülte birincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl başvurduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını tamamlayarak “İnşaat Yüksek Mühendisi” unvanını aldı.

Avrasya Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapan Cansu İSKENDER İngilizce bilmektedir.