

**POLİPROPİLEN FİBER KATKISININ BİTÜMLÜ
KARIŞIMLARIN STATİK SÜNME DAVRANIŞINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Şenol ÖZCAN
Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Temmuz-2008

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Şenol ÖZCAN'ın "**Polipropilen Fiber Katkısının Bitümlü Karışımların Statik Sünme Davranışına Etkisinin Araştırılması**" başlıklı **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 07.07.2008 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yard. Doç. Dr. SERKAN TAPKIN
Üye	: Prof. Dr. AHMET TUNCAN
Üye	: Doç. Dr. ENDER SUVACI

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POLİPROPİLEN FİBER KATKISININ BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN STATİK SÜNME DAVRANIŞINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Şenol ÖZCAN

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yard. Doç. Dr. Serkan TAPKIN
2008, 209 sayfa**

Yetmişli yıllardan itibaren trafik kompozisyonundaki ağır vasıta oranlarının, dingil yüklerinin ve lastik iç basınçlarının önceden öngörülemeyen değerlere ulaşması, yol mühendislerini yeni arayışlara sevk etmiştir. Karayollarında tekrarlanan bu ağır trafik yüklerine ek olarak iklim koşullarının yıl içinde büyük değişimler göstermesi ve karışım özelliklerinin mevcut gereksinimlere yeterince karşılık verememesi sonucu üstyapıda kalıcı deformasyonlar oluşmaya başlamıştır. Özellikle yurdumuzda büyük bir sorun olan, istiap haddinden fazla yüklenmiş taşıtların trafiğe çıkması ve sıcak iklim koşulları nedeni ile oluşan tekerlek izinde oturmalar, esnek üstyapılarda oluşan başlıca bozulma tipleri içerisinde en önemlilerinden birisidir. Bu nedenlerden ötürü esnek üstyapılarda istenen bir performans sağlayabilmek için tek çözüm olarak bitümlü bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi yöntemi benimsenmiştir.

Polipropilen (PP), tamamen yerli bir modifiye edici olup teknoloji açısından da yurtdışına bağımlılık göstermemektedir. Bu yönden incelendiğinde bitümlü bağlayıcıların PP ile modifikasyonu, yurdumuz için olmazsa olmaz olan “ekonomi” hususunda son derece önemli bir adımdır. Bu çalışmada öncelikle PP'nin bitüm üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkileri incelenmiştir. Daha sonra karışıma katılması gereken “optimum” PP miktarı belirlenmiştir. Bunun tespit edilebilmesi için öncelikle statik sünme deneyleri ve Marshall deneyleri yapılmış, PP katılmış bitümlü bağlayıcının floresan mikroskobu altındaki görüntüleri incelenmiştir. Bu üç deney serisinden elde edilen optimum PP miktarı ile hazırlanan Marshall numunelerine uygulanan fiziksel ve mekanik testler yardımı ile optimum bitüm muhtevası bulunmuş ve son olarak ise ekonomik analizler yapılmıştır. Bitümlü bağlayıcıların PP ile modifiye edilmesinin karışımın fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirdiği ve kalıcı deformasyonlara karşı önemli oranda direnç sağladığı görülmüştür. Ayrıca, PP modifikasyonu, bitümden % 30 oranında bir tasarruf sağlamaktadır ki bu da çağımızda yüksek maliyetlere sahip beton asfalt üretimi imalatı açısından son derece önemli bir kazançtır.

Anahtar Kelimeler: Modifiye Bitüm, Polipropilen, Marshall Deney Yöntemi, Statik Sünme Deneyi, Flüoresan Mikroskopi, Ekonomik Analiz

ABSTRACT

Master of Science Thesis

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBER ADDITION TO THE STATIC CREEP BEHAVIOUR OF BITUMINOUS MIXTURES

Şenol ÖZCAN

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Engineering Program**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Serkan TAPKIN
2008, 209 pages**

The heavy vehicles in the composition of traffic, non-foresightable axle loads and tire pressures have motivated the highway engineers to search for new pursuits. In addition to these repetitive heavy traffic loads, the great fluctuations in the climate conditions and non-counteraction of the mixture properties to the existing necessities, permanent deformations started to occur in the superstructure. Especially in our country, the addition of the overloaded vehicles into traffic stream and the occurrence of rutting, because of the hot climatic conditions, has become one of the most predominant distress parameters. Because of the above mentioned reasons, the modification of physical and chemical properties of the bituminous binders has been assimilated to ensure the desirable performance in the flexible pavements.

Polypropylene (PP) is completely a native modifier and it does not have any dependence to abroad in case of technology. When viewed from this point, the modification of bituminous binders with PP is a very important step for our country's "economical" concerns. In this study, first of all, the physical and chemical effects of PP on bitumen were investigated. Next, the amount of "optimum" PP that has to be added into mixture was determined. In order to determine it, first, static creep tests and Marshall tests were carried out; images of the PP added bituminous binder under fluorescence microscopy was researched. With the application of physical and mechanical tests to the Marshall specimens prepared with the optimum PP amount that was obtained at the end of these three tests, optimum bitumen content was determined and finally economical analyses were carried out. After examining the obtained results, it has been found out that the PP modification of bituminous binders has developed the physical and mechanical properties of the mixture and substantially improved the resistance to permanent deformations. Besides, the PP modification results in 30 % economy form bitumen which is very important for the costly asphalt concrete production in recent times.

Keywords: Modified Bitumen, Polypropylene, Marshall Experiment Method, Static Creep Test, Fluorescence Microscopy, Economical Analysis

TEŞEKKÜR

Bu tezin laboratuvar çalışmalarının tam olarak gerçekleştirilebilmesi için destek olan tez danışmanım ve Ulaştırma Anabilim Dalı Başkanı Sayın Yard. Doç. Dr. Serkan TAPKIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen jüri üyesi ve İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Jüri üyesi Sayın Doç. Dr. Ender SUVACI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca, laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını eksik etmeyen Sayın Nurettin DUMAN ve Sayın Adnan KILIÇ'A teşekkür ederim.

Son olarak, uzun yıllar süren eğitim-öğretim hayatım boyunca ve bu tezin hazırlanması sürecinde maddi-manevi her türlü desteği bana sunan değerli aileme ve sevdiklerime sonsuz teşekkür ederim.

Şenol ÖZCAN

Temmuz-2008

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. ASFALT KARIŞIMLAR	2
2.1. Esnek ve Rijit Kaplamaları Oluşturan Tabakalar	8
2.1.1. Sıkıştırılmış Zemin	8
2.1.2. Zemin Islahı	8
2.1.3. Seçme Malzeme Tabakası	9
2.1.4. Alttemel Tabakası	9
2.1.5. Temel Tabakası	9
2.1.6. Bitüm Esaslı Kaplama Tabakası (Esnek Kaplamalar İçin)	10
2.1.7. Beton Kaplama (Rijit Kaplamalar İçin)	10
2.2. Esnek Üstyapı Tabakaları	10
2.3. Bitümlü Karışımların Tasarımı	12
3. ASFALTIN REOLOJİK KARAKTERİSTİKLERİ	14
3.1. Bitümlü Malzemelerin Deformasyon Davranışı	14
3.2. Bitümlü Malzemelerin Reolojik Karakteristikleri	14
3.2.1. Elastik Malzemeler	16
3.2.2. Viskoz Malzemeler	16
3.2.3. Viskoelastik Malzemeler	18
3.3. Asfaltların Rijitlik Modülü	21
3.3.1. Penetrasyon İndisi	26

3.3.1. Bitüm Test Veri Abağı	29
4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ	31
4.1. Kalıcı Deformasyon Karakteristikleri	31
4.2. Viskoelastik Malzemelerin Sünme Davranışı.....	33
4.3. Bitümlü Karışımların Sünme Davranışı.....	38
5. BİTÜMLERİN MODİFİKASYONU	42
5.1. Modifikasyonun Amaçları	46
5.2. Modifiye Bitüm Üretimi	47
5.3. Modifiye Bitümün Depolanması.....	49
5.4. Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların Özelliklerinin Saptanmasında Kullanılan Standart Olmayan Deney Yöntemleri	49
5.4.1. UV Floresan Mikroskopisi	49
5.4.2. Elastik Geri Kazanım Deneyi.....	51
5.4.3. Vialit Deneyi ile Adezyon Değerinin Hesaplanması	51
5.4.4. Basınçla Yaşlanma Kabı Deneyi.....	52
5.5. Bitümlü Karışımların Polimerler İle Modifikasyonu Hakkında Genel Bilgi	53
5.5.1. Polimerler	53
5.5.2. Polimerlerin Sınıflandırılması	53
5.5.3. Polimer Modifiye Bitümlerin Kullanım Alanları.....	58
5.5.4. Bitümlerin Polimer Modifikasyonu	61
5.5.5. Bitümün Modifiye Yöntemleri.....	62
5.5.6. Polipropilen hakkında genel bilgiler	63
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI	69
6.1. Agrega	69
6.1.1. Kaba Agrega Su Absorpsiyonu ve Özgül Ağırlığının Tayini	71
6.1.2. İnce Agrega Su Absorpsiyonu ve Özgül Ağırlığının Tayini.....	72
6.1.3. Mineral Filler Zahirî Özgül Ağırlığının Tayini.....	74
6.1.4. Los Angeles Deney Metodu İle Aşınma Direncinin Tayini.....	74

6.2. Polipropilen	76
6.3. Bitüm.....	78
6.3.1. Penetrasyon Deneyi.....	78
6.3.2. Düktilite Deneyi	79
6.3.3. Yumuşama Noktası Deneyi.....	81
6.3.4. Parlama ve Yanma Noktası Deneyi.....	82
6.3.5. İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi	83
6.3.6. Özgül Ağırlık Deneyi	84
6.3.7. Bitüm Deneylerinin Sonuçları.....	85
6.4. Marshall Deneyi	88
6.4.1. Marshall Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	88
6.4.2. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	90
6.4.3. Optimum Bitüm Muhtevasının Bulunması	92
6.5. Statik Sünme Deneyi.....	104
6.5.1. UMATTA Deney Aleti	104
6.5.2. Statik Sünme Deneyinin Uygulanması	107
6.6. Stereo (Floresan) Mikroskopi	170
6.7. Optimum Polipropilen Katkılı Numunelerin Optimum Bitüm Muhtevasının Bulunması.....	175
6.8. Ekonomik Analiz	181
7. SONUÇLAR	198
KAYNAKLAR	203

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Esnek kaplama enkesiti	11
3.1. Elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi	16
3.2. Dinamik viskozite tayini	18
3.3. Malzemelerin reolojik modellemesi.....	19
3.4. Maxwell model’de gerilme-deformasyon ilişkisi	20
3.5. Kelvin model’de gerilme-deformasyon ilişkisi	20
3.6. Burger model’de gerilme-deformasyon ilişkisi	21
3.7. Bitüm rijitliği ile karışımın rijitliği arasındaki ilişki (Van der Poel)	23
3.8. Bitümlerin ritlik modülünün tespiti (Van der Poel)	24
3.9. Bitüm rijitliği ile karışımın rijitliği arasındaki ilişki (Heukelom ve Klomp)	26
3.10. PI değerinin saptanması (Pfeiffer-Van Doormal)	28
3.11. Bitüm test veri abağı (Bitumen test data chart-BTDC)	30
4.1. Tekerlek izi deneyi ile gözlemlenen sonuçların sünme deneyi ile hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılması	33
4.2. Tipik sünme eğrisi	34
4.3. Kırılma anına kadar olan sünme eğrisi	36
4.4. Gerilme, deformasyon ve rijitliğin zamanla değişimi	38
4.5. Marshall ve sünme testi arasındaki ilişki	40
4.6. Marshall ve tekerlek izinde oturma testi arasındaki ilişki	40
4.7. Sünme ve tekerlek izinde oturma testi arasındaki ilişki	41
5.1. Bitümün çalışma bölgeleri	60
5.2. Polipropilen’in yapısında bulunan atomların dizilişi	65
5.3. İzotaktik polimer atomlarının dizilişi.....	65
5.4. Sindiyotaktik polimer atomlarının dizilişi	66
5.5. Ataktik polimer atomlarının dizilişi	66
6.1. Agregaların granülometri eğrisi	70
6.2. M-03 tipi polipropilen	76
6.3. Penetrasyon aleti	79
6.4. Penetrasyon deneyi numuneleri	79

6.5. Düktilite aleti	80
6.6. Düktilite deneyi numuneleri.....	80
6.7. Yumuşama noktası aleti	81
6.8. Yumuşama noktası deney numuneleri	81
6.9. Parlama ve yanma noktası tespiti için kullanılan deney aleti	82
6.10. Standart deney kabı	83
6.11. İnce film halinde ısıtma kaybı deney aleti ve deney numuneleri.....	83
6.12. Saf su ile doldurulmuş piknometreler	85
6.13. Bitüm ve saf su ile doldurulmuş piknometreler	85
6.14. Aşınma tabakası Tip-2 gradasyonuna göre elenmiş agrega.....	88
6.15. Modifiye bitüm imalatı	89
6.16. Marshall numunelerinin hazırlanması.....	90
6.17. Su banyosunda bekletilen Marshall numuneleri	91
6.18. Marshall numunelerinin kırılması.....	92
6.19. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (1.seri)	95
6.20. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (1.seri)	96
6.21. Hava boşluğu-bitüm içeriği grafiği (1.seri).....	96
6.22. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-bitüm içeriği grafiği (1.seri).....	97
6.23. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-bitüm içeriği grafiği (1.seri).....	97
6.24. Akma-bitüm içeriği grafiği (1.seri)	98
6.25. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (2.seri)	100
6.26. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (2.seri)	101
6.27. Hava boşluğu-bitüm içeriği grafiği (2.seri).....	101
6.28. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-bitüm içeriği grafiği (2.seri).....	102
6.29. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-bitüm içeriği grafiği (2.seri).....	102
6.30. Akma-bitüm içeriği grafiği (2.seri)	103
6.31. (a) UMATTA deney aleti, (b) CDAS ve hava deposu ve (c) statik sünme deneyinin uygulanması	105
6.32. Birim deformasyon-zaman grafiği ekran görüntüsü	106
6.33. Deformasyon eğimi-zaman grafiği ekran görüntüsü.....	106
6.34. Rijitlik modülü-zaman grafiği ekran görüntüsü.....	106
6.35. Düşey gerilme-zaman grafiği ekran görüntüsü.....	107

6.36. Sıcaklık-zaman grafiği ekran görüntüsü	107
6.37. Farklı önyükleme sürelerine sahip numunelerin birim deformasyon-zaman ilişkisi	109
6.38. Farklı önyükleme sürelerine sahip numunelerin rijitlik modülü-zaman ilişkisi	110
6.39. Katkısız numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri	117
6.40. % 0.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	118
6.41. % 1.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	119
6.42. % 1.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	120
6.43. % 2.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	121
6.44. % 2.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	122
6.45. % 3.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	123
6.46. % 3.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	124
6.47. % 4.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	125
6.48. % 4.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	126
6.49. % 5.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	127
6.50. % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	128
6.51. % 6.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	129
6.52. % 6.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	130
6.53. % 7.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	131
6.54. Katkısız numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi.....	132
6.55. % 0.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	132
6.56. % 1.0 PP katkılı numunelerin deformasyon-zaman zarf eğrisi	132
6.57. % 1.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	133
6.58. % 2.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	133
6.59. % 2.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	133
6.60. % 3.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	134
6.61. % 3.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	134
6.62. % 4.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	134
6.63. % 4.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	135
6.64. % 5.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	135
6.65. % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	135

6.66. %0 6.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	136
6.67. %0 6.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	136
6.68. %0 7.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi	136
6.69. Birim deformasyon-polipropilen miktarı ilişkisi (600 saniye önyüklem ve 3600 saniye yükleme süresi sonunda).....	138
6.70. Katkısız numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri	139
6.71. %0 0.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	140
6.72. %0 1.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	141
6.73. %0 1.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	142
6.74. %0 2.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	143
6.75. %0 2.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	144
6.76. %0 3.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	145
6.77. %0 3.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	146
6.78. %0 4.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	147
6.79. %0 4.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	148
6.80. %0 5.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	149
6.81. %0 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	150
6.82. %0 6.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	151
6.83. %0 6.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	152
6.84. %0 7.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri.....	153
6.85. Katkısız numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi	154
6.86. %0 0.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	154
6.87. %0 1.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	154
6.88. %0 1.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	155
6.89. %0 2.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	155
6.90. %0 2.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	155
6.91. %0 3.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	156
6.92. %0 3.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	156
6.93. %0 4.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	156
6.94. %0 4.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	157
6.95. %0 5.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	157
6.96. %0 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	157

6.97. ‰ 6.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	158
6.98. ‰ 6.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	158
6.99. ‰ 7.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi.....	158
6.100. Rijitlik modülü-polipropilen miktarı ilişkisi (600 saniye önyükleme ve 100 saniyelik yükleme sonunda).....	160
6.101. Rijitlik modülü-polipropilen miktarı ilişkisi (600 saniye önyükleme ve 3600 saniyelik yükleme sonunda).....	160
6.102. Stabilite-polipropilen miktarı ilişkisi	167
6.103. Birim ağırlık-polipropilen miktarı ilişkisi.....	167
6.104. Hava boşluğu-polipropilen miktarı ilişkisi	168
6.105. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-polipropilen miktarı ilişkisi	168
6.106. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-polipropilen miktarı ilişkisi.....	168
6.107. Akma-polipropilen miktarı ilişkisi.....	169
6.108. Marshall oranı(MQ)-polipropilen miktarı ilişkisi.....	169
6.109. (a) Katkısız ve (b) ‰ 0.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri	172
6.110. (a) ‰ 1.0 ve (b) ‰ 1.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri	173
6.111. (a) ‰ 2.0 ve (b) ‰ 2.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri	173
6.112. (a) ‰ 3.0 ve (b) ‰ 3.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri	173
6.113. (a) ‰ 4.0 ve (b) ‰ 4.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri	174
6.114. (a) ‰ 5.0 ve (b) ‰ 5.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri	174
6.115. (a) ‰ 6.0 ve (b) ‰ 6.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri	174
6.116. ‰ 7.0 PP katkılı numunenin mikroskopik görüntüsü.....	
6.117. Stabilite-bitüm içeriği grafiği.....	177
6.118. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği	178
6.119. Hava boşluğu-bitüm içeriği grafiği.....	178

6.120. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-bitüm içeriği grafiği	179
6. 121. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-bitüm içeriği grafiği	179
6. 122. Akma-bitüm içeriği grafiği	180
6.123. % 3.5 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	183
6.124. % 4.0 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	184
6.125. % 4.5 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	185
6.126. % 5.0 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri.....	186
6.127. % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrilerinin karşılaştırılması.....	187
6.128. % 3.5 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri	190
6.129. % 4.0 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri	191
6.130. % 4.5 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri	192
6.131. % 5.0 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri	193
6.132. % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrilerinin karşılaştırılması.....	194

ÇİZELGELER DİZİNİ

5.1. Modifiye bitümler için katkı maddeleri	45
5.2. Modifiye bitümün fiziksel özellikleri	48
5.3. Standart olmayan test yöntemleri	50
5.4. Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması	55
5.5. Polimerlerin sınıflandırılması	56
5.6. Bitüm modifikasyon tipleri	62
5.7. Çalışmadaki deneyler boyunca kullanılan polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri	68
6.1. Aşınma tabakası Tip-2 için agrega gradasyonu ve şartname limitleri	69
6.2. Kaba agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi	72
6.3. İnce agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi.....	73
6.4. Mineral fillerin zahiri özgül ağırlık değeri.....	74
6.5. Los Angeles katsayısı.....	75
6.6. Çalışmada kullanılan polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri	77
6.7. Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümün özellikleri	78
6.8. Katkısız ve çeşitli oranlarda polipropilen katkısı kullanılarak modifiye edilmiş bitümlerin deney sonuçları.....	86
6.9. Asfalt betonu dizayn kriterleri	93
6.10. Marshall deney sonuçları (1. seri).....	94
6.11. 1.seri Marshall formlarından elde edilen ortalama değerleri gösteren tablo	95
6.12. Marshall deney sonuçları (2.seri).....	99
6.13. 2. seri Marshall formlarından elde edilen ortalama değerleri gösteren tablo	100
6.14. Katkısız, ‰ 0.5 PP katkılı, ‰ 1.0 PP katkılı numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar	112
6.15. ‰ 1.5 PP katkılı, ‰ 2.0 PP katkılı, ‰ 2.5 PP numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar	113
6.16. ‰ 3.0 PP katkılı, ‰ 3.5 PP katkılı, ‰ 4.0 PP numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar	114

6.17. %0 4.5 PP katkılı, %0 5.0 PP katkılı, %0 5.5 PP numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar	115
6.18. %0 6.0 PP katkılı, %0 6.5 PP katkılı, %0 7.0 PP numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar	116
6.19. Katkısız, %0 0.5 PP, %0 1.0 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar.....	162
6.20. %0 1.5 PP, %0 2.0 PP, %0 2.5 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar.....	163
6.21. %0 3.0 PP, %0 3.5 PP, %0 4.0 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar.....	164
6.22. %0 4.5 PP, %0 5.0 PP, %0 5.5 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar.....	165
6.23. %0 6.0 PP, %0 6.5 PP, %0 7.0 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar.....	166
6.24. Çizelge 6.19 ila 6.23'den elde edilmiş olan ortalama fiziksel ve mekanik değerler	167
6.25. Optimum polipropilen katkılı numunelerin Marshall deney sonuçları	176
6. 26. Marshall formlarından elde edilen ortalama değerleri gösteren tablo	177
6.27. % 3.5, % 4.0, % 4.5 ve % 5.0 bitüm içeren ve %0 5.5 PP katkılı numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar	182
6.28. Ekonomik analiz için hazırlanmış optimum polipropilen katkılı numunelerin Marshall deney sonuçları.....	196

SİMGELER DİZİNİ

A	=	Isıya Duyarlılık Parametresi
C_v	=	Agrega Hacim Konsantrasyonu
d	=	Numune Yüksekliği
E	=	Elastisite Modülü
H	=	Heaviside Fonksiyonu
K	=	Bitümün Yumuşaklığı
P	=	Uygulanan Yük
PI	=	Penetrasyon İndisi
Q_m	=	Marshall Oranı
S	=	Rijitlik Modülü
S_{bit}	=	Bitüm Rijitliği
S_{mix}	=	Karışım Rijitliği
T	=	Sıcaklık
t	=	Zaman
V_a	=	Hava Boşluğu
V_f	=	Asfaltla Dolu Boşluk
VMA	=	Mineral Agregadaki Boşluk
δ	=	Dirac Delta Fonksiyonu
ϵ	=	Deformasyon
η	=	Viskozite
λ	=	Viskozluk Katsayısı
σ	=	Eksenel Gerilme
τ	=	Kayma Gerilmesi
Ψ	=	Sünme Fonksiyonu

1. GİRİŞ

Karayolu ulaşımı, tüm ulaşım şekilleri içerisinde % 95'ler seviyesine varan payı ile özellikle 2000'li yıllarda en önemli ulaşım modu olma yolunda hızlı adımlarla ilerlemektedir. Özellikle yurdumuzda, karayolu ulaşımı, en sık kullanılan ulaşım modu olup her geçen gün daha da büyük önem kazanmaktadır. 1970'li yıllardan itibaren karayoluna olan talebin önlenemez bir şekilde artması, trafik kompozisyonundaki ağır vasıta oranlarının ve bu vasıtaların dingil yüklerinin ve lastik iç basınçlarının önceden öngörülemeyen değerlere ulaşması yol mühendislerinin yeni nesil kaplamaların dizaynına doğru hızlı bir şekilde adımlar atmalarını gerektirir bir hale gelmiştir. Bu artan trafik hacimleri ve değişen tekerlek tipi ve iç basınç değerleri neticesinde, özellikle ağır vasıtaların asfalt kaplamalara verdikleri zararlar önlem alınmasını gerektirecek derecelere ulaşmış ve klasik asfalt karışımların bu agresif yükleme paternleri altındaki kaçınılmaz son olan bozulmalarla neticelenmesi yadsınamaz bir gerçek olarak yol mühendisliğinin en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Karayolları ağında tekrarlanan bu ağır trafik yüklerine ek olarak iklim koşullarının yıl içinde büyük değişimler göstermesi, bölgesel iklim koşullarının bitümlü sıcak karışım dizaynlarında ve bağlayıcı tipi seçiminde fazla dikkate alınmaması ve karışım özelliklerinin mevcut gereksinimlere yeterince karşılık verememesi sonucu üstyapıda kalıcı deformasyonlar oluşmaya başlamıştır. Tüm bunlara ek olarak günümüzde petrol fiyatlarındaki aşırı yükseliş ve çevreci baskılar da mevcut olan sorunu son derece dramatik bir hale getirerek acilen çözüm bulunması gereken bir problemler sistematiğine dönüştürmüştür.

Bitümlü sıcak karışımlar ile imal edilen esnek üstyapı kaplamalarında meydana gelen başlıca bozulma tipleri;

- Yorulma çatlakları,
- Tekerlek izinde oturmalar (oluklanmalar),
- Yansıma çatlakları,
- Don kabarmaları,
- Çözülmeler,
- Kanama ve kusmalar,

- Oturmalar,
- Kaymadan mütevellit çatlamlar,
- Termal çatlamlar şeklinde meydana gelen kusurlardır.

Bu tip kusurlar, gerek trafik emniyeti açısından gerekse artan onarım maliyetlerinden ötürü büyük sorunlara sebep olmaktadır. Özellikle yurdumuzda büyük bir sorun olan, istiap haddinden fazla yüklenmiş ağır taşıtların trafiğe çıkması ve sıcak iklim koşulları nedeni ile oluşan ve her durumda ama özellikle yağışlı ve sıfırın altı hava şartlarında seyahat güvenliğini önemli oranda azaltan oluklanmalar, yukarıda sayılmış olan kusurlar içerisinde en büyük öneme haiz olanlarından birisidir. Sürüş konforundan verilen ödün ve bu tekerlek izlerinin ilerleyen dönemlerde çatlamlara uğrayarak yapısal bir bozunma geçirmeleri, yol güvenliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu da asfalt mühendisliği açısından kabul edilemez bir durumdur.

Mevcut olan teknolojilerle uzun yıllar başarıyla uygulanmış olan klasik asfalt betonu, yukarıda sayılmış olan tüm olumsuzlukların oluşumunu artık engelleyemez bir noktaya gelmiştir. Piyasadaki konvansiyonel bitümler ile hazırlanmış klasik asfalt betonu karışımları, yüksek sıcaklıklar ve ağır trafik koşulları altında, özellikle tekerlek izinde oturmalara karşı direnç gösteremez bir hale gelmişlerdir. Daha düşük veya yüksek penetrasyonlu bitümlerin karışım imalatında kullanılmasıyla arzu edilen durabilite elde edilememiştir. Derinde, daha sert bitümlerle hazırlanan asfalt karışımlar, tekerlek izinde oturmaya karşı daha iyi performans gösterirken, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşum riski artış göstermiştir.

Tüm bu nedenlerden ötürü üstyapıda çok daha arzulanan bir performans sağlayabilmek için tek çözüm olarak bitümlü bağlayıcının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi, bu konular ile ilgilenen bilim adamlarının başlıca araştırma konusu olmuştur. Belli başlı petrol şirketleri ve araştırma kurumlarının yürütülen araştırma çalışmaları sonucu, 1980'li yılların ilk çeyreğinde ticari anlamdaki ilk modifiye bitümlerin ve dolayısıyla modifiye edicilerin arazide kullanımına geçilmiştir. Günümüzde aynı amaca hizmet etmek üzere çeşitli polimerler kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcılara polimer ilavesiyle üretilen polimer modifiye bitümler (asfalt karışımlara polimer ilave edilmesiyle de

modifikasyon yapılabilmektedir) güçlü adezyon yetenekleri ile suyun bitümlü bağlayıcı ve agrega arasına girmesini önlemekte, asfalt kaplamanın sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetini azaltmakta ve sonuç olarak karışımın kalıcı deformasyonlara (oluklanma) ve yorulma çatlaklarına karşı direncini gözle görülür bir biçimde arttırmaktadır.

Beton kaplamaların ilk maliyetinin esnek kaplamalara göre son derece yüksek olması, modifiye bitümlü bağlayıcılarla imal edilen esnek kaplamaların günümüz şartları içerisinde en uygun çözüm olduğuna vurgu yapmaktadır. Bütün bu bahsedilen avantajların yanında, bitüm modifikasyonu, klasik asfalt betonu kaplamalar ile karşılaştırıldığında önemli oranda maliyet artısını da beraberinde getirmektedir. Bu maliyet artışı, yurdumuz için konuşulduğunda, polimer modifiye edicilerin ve modifikasyon teknolojilerinin tamamen ithal olmasına bağlıdır. Bu noktada bu tez çalışmasının asıl gayesi olan polipropilen modifiye edicisi ile yapılan bitümlü bağlayıcı modifikasyonuna dikkat çekmek gerekmektedir. Termoplastik bir plastomer olan polipropilen, % 100 oranında yerli bir modifiye edici olup modifikasyon teknolojisi açısından da yurtdışına bağımlılık göstermemektedir. Bu yönden incelendiğinde bitümlü bağlayıcıların polipropilen ile modifikasyonu, yurdumuz için olmazsa olmaz olan “ekonomi” hususunda son derece önemli bir adımdır. Bu ekonomikliği bir adım daha öne çıkarmak için bitümlü bağlayıcıya katılması gereken “optimum” polipropilenin miktarının bilinmesinde son derece yarar vardır. Bunun tespit edilebilmesi için öncelikle statik sünme deneyleri ve Marshall deneyleri yapılmış, PP katılmış bitümlü bağlayıcının floresan mikroskobu altındaki görüntüleri incelenmiştir. Bu üç deney serisinden elde edilen optimum polipropilen miktarı ile hazırlanan Marshall numunelerine uygulanan fiziksel ve mekanik testler yardımı ile optimum polipropilen miktarı bulunmuş ve son olarak ise ekonomik analizler yapılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde, “asfalt karışımlar” başlığı altında, esnek kaplamalar hakkında genel bilgi verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise “asfaltın reolojik karakteristikleri”nden bahsedilmiştir. Bitümlü malzemelerin deformasyon davranışı ve reolojik karakteristikleri anlatılmış, malzeme tiplerinden bahsedilmiş (elastik, viskoz ve viskoelastik olmak üzere), viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon

ilişkilerini anlatan modeller verilmiş, asfaltların rijitlik modülü tanımlanmış ve çeşitli destekleyici bilgiler sunulmuştur.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, bitümlü karışımların reolojik özellikleri incelenmiştir. Bu bağlamda bitümlü karışımların kalıcı deformasyon karakteristikleri anlatılmış, viskoelastik malzemelerin sünme davranışı ana hatlarıyla çizilmiştir.

Beşinci bölüm olan “bitümlerin modifikasyonu” kısmında ise bitüm modifikasyonunun tarihçesi verilmiş, çeşitli modifiye edici maddelerden ve bitüm modifikasyonunun amaçlarından bahsedilmiş, modifiye bitüm üretimi anlatılmış, modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin saptanmasında kullanılan standart olmayan deney yöntemleri belirtilmiş, polimerler ve polimer modifikasyonu hakkında genel bilgi verilmiş ve son olarak ise polipropilen modifiye edicisi hakkında detaya girilmiştir.

Altıncı bölümde tez çalışması boyunca yapılmış olan “deneysel çalışmalar” anlatılmıştır. İlk olarak agrega ve bitümün fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik deneylere yer verilmiştir. Yapılmış olan bitüm deneylerinde katkısız ve % 0.5 ile % 7.0 arasında 0.5'er aralıklarla değişen polipropilen katkısıyla (agreganın ağırlıkça bindesi) özgül ağırlık, ince film halinde ısınma kaybı, parlama ve yanma noktaları, düktilite, yumuşama noktası ve penetrasyon deneyleri yapılmış ve polipropilen katkısının bitümün fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkisi, bitümlü bağlayıcı karışıma katılmadan etraflıca incelenmiştir. Daha sonra statik sünme deneylerinde kullanılmak üzere bitümlü karışımın optimum bitüm muhtevasını belirlemek üzere yapılmış olan çalışmalar anlatılmıştır. Bu amaçla 60 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Optimum bitüm muhtevasının tayininden sonra katkısız ve % 0.5 ile % 7.0 arasında 0.5'er aralıklarla değişen 90 adet Marshall numunesi üzerinde sabit sıcaklık ve yükleme paterniyle UMATTA test düzeneği vasıtasıyla statik sünme deneyleri yapılmıştır. Modifiye edici olarak M-03 tipi polipropilen katkı malzemesi kullanılmıştır. Bu yükleme paternini belirlemek amacıyla bir seri kontrol numunesi hazırlanmış ve önyüklemeye süresine karar verilmiştir. Bu sürenin oldukça agresif bir yükleme paterni yaratması amaçlanmıştır (toplam 11 adet numune). Aynı katkı oranları ile hazırlanan 90 adet Marshall numunesi üzerinde de Marshall stabilite ve akma

deneyleri yapılmıştır. Numunelerin hazırlanması sırasında her bir polipropilen içeriğine sahip bitümlü bağlayıcı numunelerden ikişer adet olmak üzere toplam 30 adet numunenin floresan mikroskopi ile fotoğrafları çekilmiş (x40 büyütme oranı) ve bitüme katılan polipropilenin uygun ağ oluşumunu sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Bu üç seri çalışmanın sonucunda ise “optimum polipropilen” içeriği tespit edilmiştir. Daha sonra ise bu optimum polipropilen içeriği ile hazırlanan ve bu içeriğe ait optimum bitüm muhtevasını belirlemek üzere 30 adet numuneden mütevellit bir Marshall dizaynı daha yapılmıştır. Son olarak ise ekonomik analiz yönünden inceleme yapmak üzere uygulanabilir bir bitüm muhtevası ve bu muhtevanın -% 0.5, -% 1.0, -% 1.5 değerlerinde 6’şar adet Marshall numunesine statik sünme deneyi yapılmıştır. Benzer bitüm içeriklerine sahip ve aynı şekilde hazırlanan 24 adet numuneye de Marshall stabilite ve akma deneyleri uygulanmıştır. Bu sonuçların ışığındaysa ekonomik analizler yapılmıştır.

Son bölüm olan “sonuçlar ve öneriler” kısmında ise tüm çalışma boyunca elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve ileride yapılacak olan çalışmalar için çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

2. ASFALT KARIŞIMLAR

Yol ve havaalanı kaplamaları (üstyapıları);

- Rijit (Beton)
- Esnek (Asfalt betonu)
- Kompozit (Karışık)

olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilmektedir. Rijit kaplamalar ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda granüler bir alt temel tabakası üzerine yapılan beton plaklardan ibarettir. Bu kaplamalar, asfalt betonu ile imal edilen kaplamalara göre daha yüksek durabiliteye sahip olup daha uzun servis ömrü sağlamaktadır. Beton kaplamaların suyun zararını herhangi bir oturma olmadan önlemesi ayrıca bir avantajdır. En önemli dezavantajı ise esnek kaplamalara göre daha maliyetli olmasıdır [1].

Esnek kaplamalar çok tabakalı bir yapı olup alt tabakaları dren kabiliyeti yüksek granüler malzemelerle ve üst tabakaları ise yüksek stabilite ve sürüş konforu sağlamak amacıyla bitümlü karışımlarla yapılmaktadır. Bu kaplamalar, beton kaplamalarla karşılaştırıldığında alt temelin dayanımına ve düzgün oluşuna daha çok bağlıdır. Portland çimentosunun rahatlıkla doldurabileceği zemindeki küçük boşluklar, asfalt kaplamanın altında bozulmalara neden olabilir [1].

Kompozit kaplamalar zamanla bozulmuş beton kaplamaların üzerine sıcak bitümlü karışım takviye tabakası yapılarak veya bazen de bozulmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplama yapılarak imal edilir [2].

Kaplamalar, trafik ve çevre etkilerine karşı koyan ve trafik yüklerini zemine ileten yapılardır. Trafik yüklerini zemine iletme kabiliyetleri her bir tabakanın yük dağıtma özelliğine bağlıdır. Bu nedenle kaplama kalınlığı, zeminin taşıma gücüne ve kaplamanın tipine bağlı olarak değişir.

Kaplamaların performans (sürüş konforu ve emniyeti) ve stabilite (deformasyona karşı direnç) olmak üzere iki temel işlevi vardır. Bu nedenle, kaplamalar aşağıdaki hususları yerine getirmekle sorumludur [2].

- Taşıtlar için düzgün ve pürüzsüz yüzeyler sağlayarak sürüş konforunu artırmalı ve taşıt işletme giderlerini azaltmalıdır.

- Kaplama yüzeyi sürüş emniyeti için yeterince kayma direncine sahip olmalıdır.
- Trafik yüklerinin yaratacağı aşınmalara ve deformasyonlara karşı yeterince dirençli olmalıdır.
- Trafik yüklerini yayarak zemine intikal ettirebilmeli fakat bu yüklere karşı koyabilecek kadar da mukavemetli olmalıdır.
- Bakım-onarım ve rehabilitasyon (yeniden kaplama yapılması) maliyetlerinin az olması için yeterince yorulma mukavemetine sahip olmalıdır.
- Hem zeminde istenilen gerilmeyi yaratabilecek hem de tahmin edilen yük tekrür sayısına yeterince direnç gösterebilecek kalınlığa sahip olmalıdır.
- Zeminin don kabarması ve şişmelerden dolayı oluşabilecek gerilmelere karşı koyabilmeli ve zeminin taşıma gücünde olabilecek azalmalarda yeterince rijit ama zeminin uzun dönem oturmalarında da bu çökmelere uyum sağlayabilecek kadar da esnek davranış gösterebilmelidir.
- Yağmur sularının sızmasını önleyecek kadar geçirimsiz olmalıdır.
- Taşıtlar için sürüş konforu ve sürüş emniyetini sağlamalıdır.
- Trafik, iklim ve çevre etkilerine karşı dirençli ve dayanıklı olmalıdır.

Kaplamalarda oluşan radyal çekme ve basınç gerilmeleri, düşey basınç ve çekme gerilmeleri, tabakalar arasındaki kayma gerilmeleri yukarıdan aşağıya doğru azalır. Bu nedenle, kaplamaları oluşturan tabakalar yukarıdan aşağıya doğru daha az kalite ve maliyete sahip olacak şekilde dizayn ve inşa edilmelidir [2].

Rijit kaplamaların ilk yatırım giderleri çok yüksek olduğundan belirli bir trafik hacminin üzerindeki yollar için yapılmalıdır. Ancak esnek kaplamaların sahip olduğu birtakım avantajlardan ötürü son yıllarda yapılan araştırmalar, rijit kaplama yapmak yerine esnek kaplamaların performansını arttırmak yönünde yoğunlaşmaktadır. Henüz ülkemizde beton kaplamalı yollar yapılmamakla beraber havaalanlarında pist, taksirut, apron yapıları, terminallerde (deniz, kara ve demiryolu) yükleme-boşaltma platformları, otopark ve endüstri tesislerinin kaplamalı sahalarında, küçük ve orta ölçekli sanayi bölgeleri ile kentiçi yollarda, vb. yerlerde beton kaplamaların yapımı

hızla yaygınlaşmaktadır. Genel olarak, 20 yıllık proje ömrü içinde, 8.2 ton standart dingil yükü sayısı 60×10^6 ile 75×10^6 arasında olan yolların, rijit kaplama olarak yapılması hemen hemen bir zorunluluktur. Hatta birçok kurum, yolun trafiğe açıldığında tek yöndeki günlük ticari taşıt sayısının 5,000'den fazla olması halinde beton kaplama yapılmasını öngörmektedir. Esnek kaplamalar, ilk yatırım maliyetlerinin az oluşları, kademeli inşaata izin vermeleri, her seviyedeki trafik hacmine hizmet verebilecek şekilde çok farklı tipte (stabilize, makadam, sathi kaplama, asfalt betonu, vb.) imal edilebilmeleri, düşük trafik hacmine sahip yollarda düşük standartlı kaplamaların çok ucuz ve çok kolay yapılabilmesi, vb. nedenlerden ötürü tercih edilmektedir. Fakat esnek kaplamaların yorulma mukavemetinin düşük olması, asfalt bağlayıcının termoplastik ve viskoelastik bir malzeme oluşu, bakım-onarım ihtiyaçlarının ve giderlerinin fazla oluşu, vb. nedenlerden ötürü önemli dezavantajlara sahiptir [2].

2.1. Esnek ve Rijit Kaplamaları Oluşturan Tabakalar

Yol kaplamalarında kullanılan tabakaların fonksiyonları ve amaçlarından aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

2.1.1. Sıkıştırılmış Zemin

Kaplamanın üzerine oturacağı zemin yeterince sıkıştırılarak stabil bir temel görevi görmelidir. Bunun için bitkisel toprak kazılıp atılmalı ve zemin gevşetilip sıkıştırılmalıdır.

2.1.2. Zemin Islahı

Yolun oturduğu zeminin taşıma gücünün artırılması, değişen su içeriği ile taşıma gücündeki değişmelerin azaltılması, don duyarlılığının azaltılması, oturmaların minimuma indirilmesi, vb. nedenlerden ötürü zeminlerin iyileştirilmesi (ıslahı) gerekebilir.

2.1.3. Seçme Malzeme Tabakası

Yolun oturduğu zemin çok düşük taşıma gücüne sahip ise bu zemin kaldırılıp atıldıktan sonra yerine uygun nitelikte bir seçme malzeme konulup sıkıştırılmasıyla seçme malzeme tabakası elde edilir. Zira kaplamanın oturacağı zemin belli bir taşıma gücüne sahip olmalı ve zeminin hacim değiştirmesi (oturma, şişme, kabarma, vb.) kaplamayı olumsuz etkilememelidir.

2.1.4. Alttemel Tabakası

Zeminlerin don kabarması veya şişme ve büzülme gibi hacim değişimlerine karşı koymak, kaplama altında gerekli drenajı sağlamak, kaplamanın taşıma gücünü artırmak, vb. nedenlerden ötürü kaplamaların en altında alttemel tabakası imal edilir. Rijit kaplamalarda ise bunlara ilaveten ağır taşıtların yarattığı pompaj etkisini önlemek ve beton kaplama için yeter düzgünlükte ve stabilitede uygun bir platform yaratmak amacıyla imal edilir. Alttemel tabakası üstteki tabakalara nazaran daha az gerilmeye maruz kalacağından daha düşük kaliteli fakat dren kabiliyeti yüksek ve yeterince stabil olan granüler malzemelerden oluşmaktadır.

2.1.5. Temel Tabakası

Temel tabakası, kaplamaya ve banketlere temel teşkil etmek üzere granüler malzemelerden bağlayıcı ve bağlayıcı olarak farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar halinde imal edilir. Temel tabakası kaplamalar için gerekli stabiliteyi ve yeterli drenajı sağlamakla yükümlüdür. Eğer temel tabakasının yüksek stabilite olması gerekiyorsa bitüm veya çimento ile stabilize edilmelidir.

2.1.6. Bitüm Esaslı Kaplama Tabakası (Esnek Kaplamalar İçin)

Esnek kaplamaların en üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, taşıtlara sürüş konforu ve emniyeti sağlamak amacıyla imal edilir. Yüksek standartlı yollarda kaplama tabakası aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka halinde bitümlü sıcak karışımlar ile imal edilmektedir. Düşük standartlı yollarda kaplama tabakası tek kat veya çift kat sathi kaplama olarak serilmektedir [2].

2.1.7. Beton Kaplama (Rijit Kaplamalar İçin)

Beton kaplamalar, trafik yüklerinden dolayı oluşan gerilmelere karşı koymak ve trafik yüklerini emniyetle zemine intikal ettirmek amacıyla ağır taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda imal edilmektedir. Beton kaplamalar donatısız, kısmen donatılı veya sürekli donatılı olarak yapıldığı gibi öngermeli olarak da imal edilebilmektedir. Beton, sahip olduğu yüksek basınç mukavemeti ve rijitliği sayesinde rijit bir plaka gibi çalışır. Ayrıca taşıtların yarattığı yorulma ve eğilme gerilmelerine ilaveten zemin taşıma gücündeki değişimler, zeminin hacim değiştirmesi, kaplamanın alt ve üst kısımlarında günlük ve/veya mevsimsel ısı değişimlerinden dolayı oluşan eğilme ve hacimsel burulmaların doğurduğu gerilmelere karşı koyabilecek kadar da çekme mukavemetine sahip olmalıdır. Yol ve havaalanı kaplamalarında;

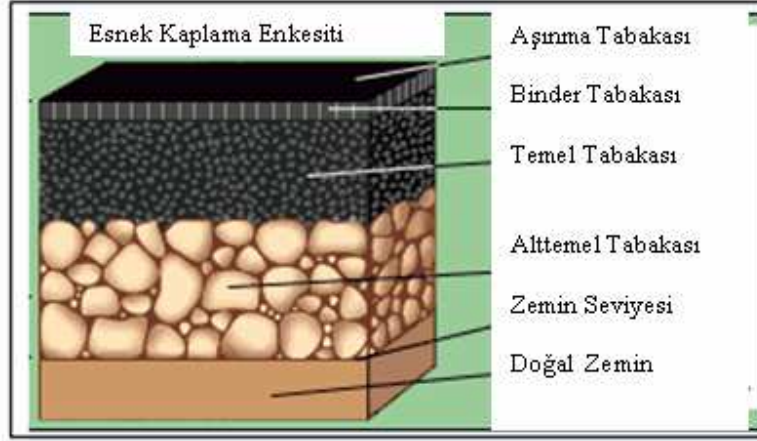
- Sürüş konforu ve sürüş emniyeti,
- Trafik hacmi (kompozisyon, artış trendi, vb.),
- Zemin ve çevre koşulları

gibi kriterler gözönünde tutularak kaplama tipi ve kalınlığı belirlenmelidir [2].

2.2. Esnek Üstyapı Tabakaları

Aşınma ve binder tabakaları bitümlü karışımlardan oluşmaktadır. Ancak, yoldaki ağır taşıt trafiğine ve trafik hacmine bağlı olarak temel tabakası da bitümlü karışımlardan oluşabilir. Ülkemizde granüler malzeme kaynağı oldukça fazla olduğu

için, temel ve alttemel tabakalarında granüler malzeme rahatlıkla ve doğal olmayan malzeme arayışlarına gidilmeden (moloz, cüruf vb.) kullanılmaktadır. Tipik bir esnek üstyapı enkesiti aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Esnek kaplama enkesiti [3]

Dingil yüklerinin etkisine daha bariz bir şekilde maruz kalan üst tabakalar, doğal olarak daha büyük gerilmelerle karşılaştığı için, imalatlarında daha kaliteli malzemelerin kullanılması gerekir. Bu nedenle, üst tabakalar elastisite modülü yüksek bitümlü karışımlardan imal edilirler. Bitümlü karışımlar, agrega, bitüm ve hava boşluğundan oluşur. Karışımda agrega oranı, ağırlıkça % 95, bitüm oranı ise % 5 civarındadır [4].

Kaplama tabakası, üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek elastisite modülüne sahip olmalıdır. Kaplama tabakasının kalınlığı arttıkça yolun trafik yüklerine karşı direnci de artar. Temel tabakasına iletilen basınç, radyal ve kayma gerilmeleri azalır.

Yollarda temel tabakası üzerine yerleştirilen bitümlü kaplama tabakaları, genellikle yapım ve çalışma ilkeleri birbirlerinden oldukça farklı iki tipe ayrılırlar; yüzeysel (sathi) kaplamalar ve bitümlü karışımlarla oluşturulan kaplamalar.

Aşınma tabakasının altında üstyapının oturduğu doğal zemini, yani taban zeminini koruyan temel tabakası bulunur. Temel tabakası bir veya birden fazla tabakadan oluşabilir. Temel tabakasının esas görevi taşıtların geçişlerinden dolayı gerilmeleri taban zemininin taşıma gücü sınırları içerisinde yaymaktır. Temel tabakası duruma göre çimentolu veya bitümlü bağlayıcı karışım, stabilize edilmiş zemin veya dikkatle seçilmiş granüler malzeme olabilir. Trafik hacminin yüksek olduğu kesimlerde bitümlü karışımlar daha yaygın olarak kullanılmaktadır [4].

Temel tabakasının altında alttemel tabakası bulunur. Alttemelin esas görevi, bitümlü tabakaların inşası için çalışma platformu oluşturmaktır. Bu tabakada kullanılan malzemeler genel olarak temel tabakasına göre daha düşük kalitelidir. Alttemel tabakası imalatında, mümkün mertebe yerel malzemeler ve yol inşaatında kullanılmaya elverişli atık malzemeler (molozlar, cüruflar gibi) kullanılmaya çalışılır.

Alttemel tabakasının altında, sıkıştırılmış doğal zemin ya da dolgu malzemesinden oluşan tabaka vardır. Bu tabaka üstyapıya temel görevi yapar. Yapısal olarak en önemli tabakadır. Üstyapı yükü son olarak bu tabakaya iletilir. Bu tabakanın görevini iyi yapabilmesi için son derece iyi drenaj özelliklerine sahip olması gerekir.

2.3. Bitümlü Karışımların Tasarımı

Bitümlü karışımlar agrega ile bitümlü bağlayıcı malzemedен oluşur. Bu karışımlar serbest durumdaki agrega malzemesine göre çok pahalı olduklarından yol yapımında çoğunlukla yalnızca kaplama tabakalarının yapımında kullanılır. Bitümlü karışımlar pahalı olmakla beraber birçok yararlı özelliğe sahiptir. Bu özelliklerin başlıcaları aşağıda sıralanmaktadır:

- Taşıtların tekerlek sürtünmesi nedeniyle yaptığı gürültü önemli ölçüde azalır, konfor artar. Tekerlekler daha az aşınır.

- Bağlayıcı malzeme agrega danelerini çok iyi şekilde birbirine bağladığı için taşıtların taş fırlatması tehlikesi ortadan kalkar.
- Oldukça geçirimsiz bir yol yüzeyi elde edilir [4].

Agrega ile bitüm karışımlarının yol kaplaması olarak kullanılabilmesi için bazı koşulları sağlaması gerekir. Karışımların dizayn edilmesi sırasında aşağıdaki özellikler dikkate alınır[4]:

1. Stabilité,
2. Durabilite (dayanıklılık),
3. Esneklik,
4. Yorulmaya karşı direnç,
5. Kaymaya karşı direnç,
6. Geçirimsizlik,
7. İşlenebilirlik

3. ASFALTIN REOLOJİK KARAKTERİSTİKLERİ

3.1. Bitümlü Malzemelerin Deformasyon Davranışı

Kaplama teknolojisi üzerine çalışan bilim adamları, elli yılı aşkın süredir, bitümlü karışımların deformasyon davranışını modelleyebilmek için uğraşmaktadırlar. Bu bölümde, modelleme konusunda yapılan çalışma ve yaklaşımlar anlatılmaktadır.

Bitümlü karışımlar, karışımı meydana getiren unsurların özelliklerini taşır. Bu parametrelerin tekil etkilerinin yanında, birbirleri arasındaki etkileşimleri de karışımın özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Bitümlü karışımların mekanik davranışını belirleyen bu konu üzerinde sayısız araştırma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, karışım özelliklerini belirleyen faktörler arasında en önemlileri;

- Bitüm içeriği ve sınıfı,
- Hava boşluğu miktarı,
- Agrega gradasyonu ve tipi (malzeme cinsi, yüzeyi, şekli),
- Karışım sıcaklığı olarak gösterilmektedir [5].

3.2. Bitümlü Malzemelerin Reolojik Karakteristikleri

Reoloji, yükleme sırasında malzemelerde oluşan deformasyonu hem yüke hem de yükleme süresine göre inceleyen bilimdir. Bitüm de, gerilme-deformasyon ilişkisi hem yükün miktarına hem de yükleme süresine bağlı olduğu için reolojik malzeme olarak kabul edilir.

1936 yılında, Pfeiffer ve Van Doormal'in bitüm ve bitümlü karışımların reolojik davranışı üzerine yaptıkları araştırmayla başlayan dönem, sayısız araştırmacının bu konudaki benzer çalışmalarıyla devam etmiştir [6]. Van der Poel, yükleme süresi ve sıcaklığa bağlı olarak bitümün reolojik davranışını incelediği çalışmasında, bitümün viskoelastik özelliğini tanımlamaya çalışmıştır [7]. 1953 yılında yapılan bu çalışmadan bir yıl sonra, Mack bitümlü kaplamaların yük taşıma mukavemeti ve deformasyon mekanizması üzerine olan araştırmasının

sonuçlarını yayınlamıştır [8]. 1960 yılında Pister ve Monismith'in viskoelastik esnek kaplamaların analizini, 1961 yılındaki Secor ve Monismith'in bitüm üzerindeki üç eksenli çalışması izlemiştir [9,10]. Hofstra ve Klomp, 1972 yılında, gerçek trafik şartlarının simule edilip uygulandığı esnek kaplamada oluşan kalıcı deformasyonları incelemiş ve sonuçlarını açıklamışlardır [11]. Hills, asfalt karışımların sünme özelliğini incelemiştir [12]. 1985 yılında Uzan, Sides ve Perl, asfalt karışımların performansını viskoelastoplastik modellerle açıklamaya çalışmışlardır [13]. Parmar ve Bhatt ise 1986 yılında mastik asfaltın sünme altındaki reolojik davranışını incelemiştir [14]. Bir yıl sonra Khandal ve Koehler, reolojik özelliklerin kaplamalarda meydana gelen çatlaklar üzerindeki etkisini araştırmışlardır [15]. 1992 yılındaki bir başka araştırmada ise Kadar ve Remtulla modifiye bitüm karışımların mühendislik ve reolojik özelliklerini incelemişlerdir [16]. Negulescu ve Daly, polimer modifiye asfaltın reolojisini araştırmışlardır [17]. 1996 yılındaki bu çalışmadan sonra 2000'li yıllarda da çeşitli araştırma ve çalışmalar yürütülmüştür. 2005 yılındaki iki çalışmadan biri Marastenanu, Clyne, McGraw, Li ve Velasquez tarafından yapılmıştır. Asfaltın yüksek sıcaklıktaki reolojik özelliklerini konu alan bu çalışmayı Syzdlo ve Mackiewicz'in "reolojik parametrelerdeki değişimin deformasyona etkisi" konulu çalışmaları izlemiştir [18,19].

Araştırmacıların üzerinde hemfikir olduğu ve karışımların reolojik özelliklerini kontrol ettiğini kabul ettikleri bazı faktörler vardır. Bunlar;

- malzeme karakteristikleri,
- malzeme kompozisyonu,
- yükleme zamanı ve frekansı,
- sıcaklıktır [20].

Bitümlerin reolojik özelliklerini anlamak için, öncelikle malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkileri hakkında fikir sahibi olmak gerekir. Mühendislikte kullanılan malzemeler gerilme-deformasyon ilişkisi yönünden üç gruba ayrılır. Bunlar;

- Elastik malzemeler
- Viskoz malzemeler
- Visko-elastik malzemelerdir [21].

3.2.1. Elastik Malzemeler

Elastik malzemelere gerilme uygulanırsa deformasyon, yükün miktarı ile doğru orantılı olarak artmaya başlar. Uygulanan gerilmenin kaldırılmasıyla beraber deformasyon da ortadan kalkar. Bu tip gerilme-deformasyon ilişkisine sahip malzemelerde, uygulanan aksel gerilme (σ) ile aksel deformasyon (ε) arasında doğrusal bir bağlantı vardır. Lineer elastik davranış denilen bu durum Hooke Yasası ile ifade edilir [22].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

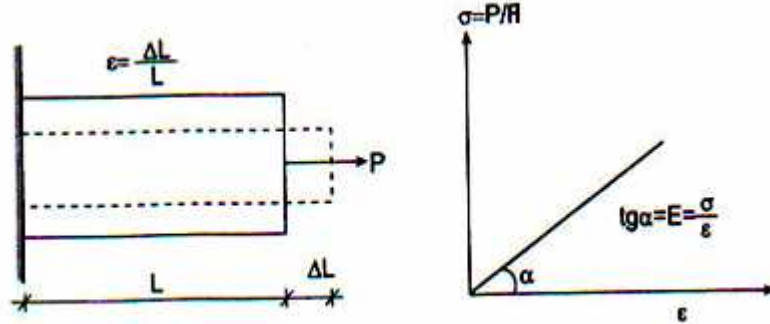
Burada;

σ = aksel gerilme, kg/cm^2 veya psi

E = elastisite modülü, kg/cm^2 veya psi

ε = aksel birim deformasyon

Elastik malzemeler için gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 3.1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.1. Elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi [21]

3.2.2. Viskoz Malzemeler

Viskoz malzemeler ise aşağıda belirtilen özelliklere sahiptir:

- Gerilmenin uygulanmasıyla birlikte deformasyon da başlar ve uygulama süresine bağlı olarak gerilmenin tatbik edildiği süre boyunca deformasyon artar.
- Deformasyon miktarı, gerilme miktarı ile veya gerilmenin uygulandığı süre miktarı ile doğru orantılıdır.
- Gerilmenin kalkmasıyla birlikte, elastik malzemelerde olduğu gibi, gerilme kalkmaz. Deformasyon kalıcı deformasyon olarak tanımlanır [21].

Viskoz malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkileri;

$$\sigma = \lambda \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.2)$$

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (3.3)$$

şeklindedir. Burada;

σ = aksenal gerilme

τ = kayma gerilmesi

λ = viskozluk katsayısı (çekme veya basınç gerilmesi)

η = viskozluk katsayısı (kayma gerilmesi)

$d\varepsilon$ ve $d\gamma$ = birim deformasyon

dt = kuvvetin birim uygulanma süresi

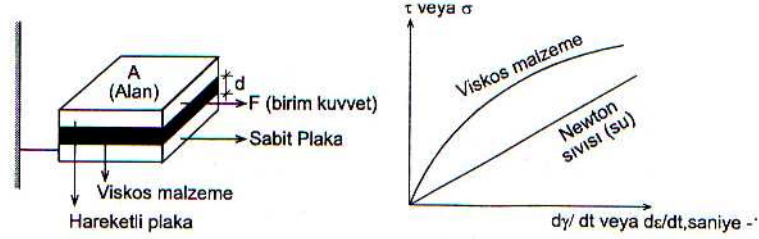
Viskozluk değeri;

- Kinematik viskozite
- Dinamik viskozite olmak üzere iki şekilde belirlenir.

60°C deki sıvı asfaltın, 3.149 mm (0.124") çapındaki delikten, 60 ml boşalması için gerekli sürenin saniye cinsinden değeri Saybolt Furol viskozitesi

olarak adlandırılır. Bu değerin, kullanılan viskometre cihazının kalibrasyon sabiti ile çarpılarak elde edilen değer ise kinematik viskozite değeridir [21].

Aşağıdaki Şekil ise dinamik viskozite değerini bulmak için yapılan deneyi göstermektedir.



Şekil 3.2. Dinamik viskozite tayini [21]

Şekilde görüldüğü gibi hareketli plaka yöntemi ile tayin edilen dinamik viskozite değeri, viskoz malzemenin içsel sürtünmesini ifade etmektedir. Aralarında d kadar mesafe olan iki plaka arasına konan viskoz malzeme, A birim alandaki plakayla, F birim yanal kuvveti ile çekmeye zorlandığında hareketli ve sabit plaka arasındaki viskoz malzemenin viskozluğu yenilmeye çalışılmaktadır [21].

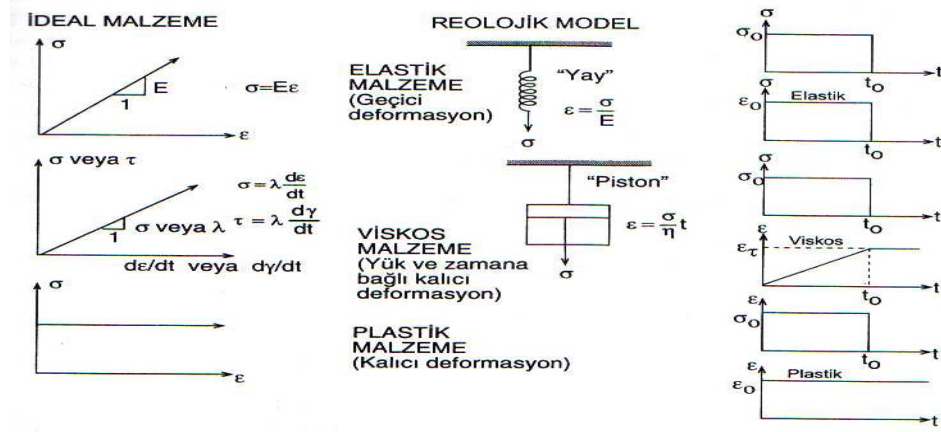
3.2.3. Viskoelastik Malzemeler

Viskoelastik malzemeler ise ne tam elastik ne de tam viskoz davranış gösterirler. Bu tip malzemeler hızlı yüklendikleri zaman elastik malzeme gibi, yavaş yüklendikleri zaman da viskoz malzeme gibi davranış göstermektedirler. Yükleme hızının ne hızlı ne de yavaş olduğu durumlarda da elastik ve viskoz davranışın kombinasyonu Şeklinde davranırlar. Bu malzemelere viskoelastik malzeme denilmesinin nedeni budur.

Bir malzemedeki gerilme meydana geldiği zaman oluşan deformasyon, o malzemenin hem elastik hem viskoz hem de viskoelastik özelliklerinin beraber meydana getirdiği deformasyondur [23].

Viskoelastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkileri genel olarak üç model ile tanımlanmaktadır. Bunlar;

- Maxwell model,
- Kelvin (Voigt) model,
- Burger model'dir.



Şekil 3.3. Malzemelerin reolojik modellemesi [21]

a) Maxwell Model

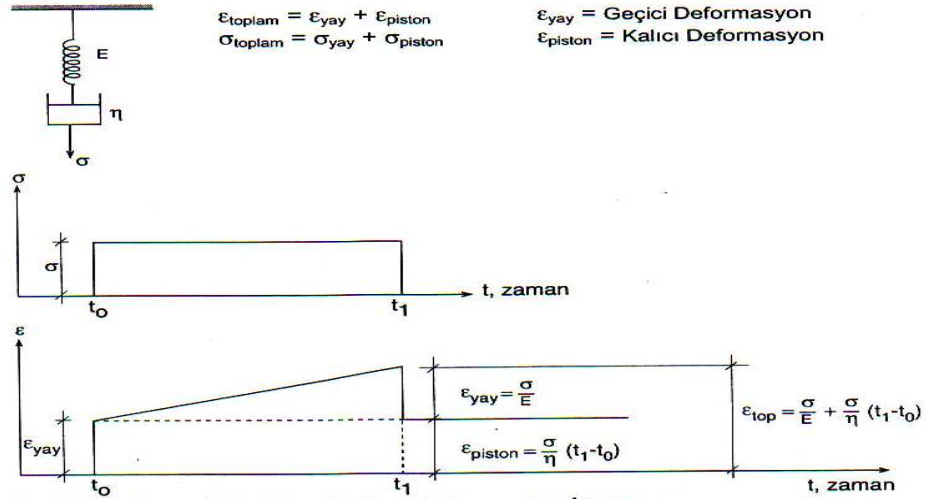
Elastik ve viskoz elemanların seri olarak bağlandığı modeldir. E elastisite modülüne sahip olan yay elastik elemanı, η viskozite değerine sahip olan piston da viskoz elemanı temsil eder. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, t süresi ($t_1 - t_0$) boyunca gerilmeye tabi olan viskoelastik malzemenin deformasyonu, pistondan dolayı doğrusal olarak artarken t_0 anındaki deformasyon yaydan dolayı ani bir şekilde meydana gelir [5]. Yay ve pistonda oluşan gerilme eşit iken oluşan toplam deformasyon, yay ve pistonda oluşan deformasyonların toplamıdır [22].

t_1 anında gerilmenin kalkması ile yaydan dolayı ani oluşan deformasyon ortadan kalkar. Pistondan dolayı oluşan deformasyon ise kalıcıdır [21].

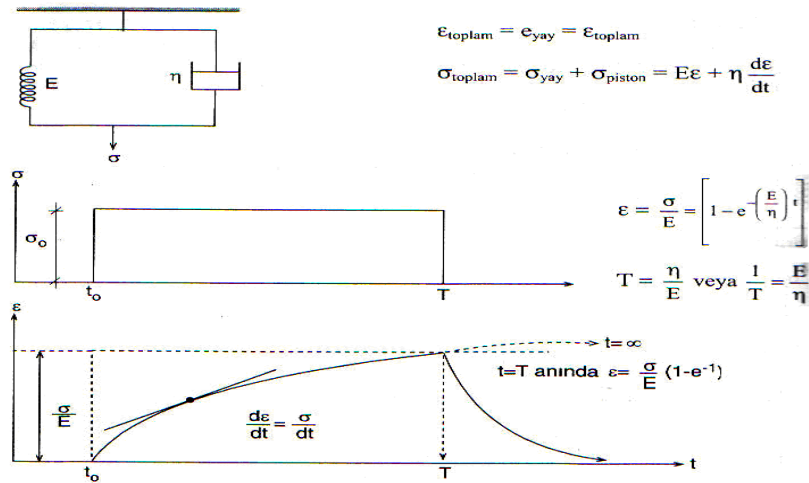
b) Kelvin (Voigt) Model

Viskoelastik davranışı tanımlayan bir diğer model de Kelvin (Voigt) Model'dir. Elastik ve viskoz elemanlar paralel olarak kabul edilirler. Gerilme

uygulandığında, deformasyon eğimi azalan bir artış gösterir. “ $t = 0$ anında gerilme piston tarafından karşılanırken, $t = \infty$ ’da gerilme yay tarafından karşılanır” [5]. Sisteme bir kuvvet uygulandığı zaman, yayda ve pistonda oluşan deformasyon miktarı birbirine eşit olur.



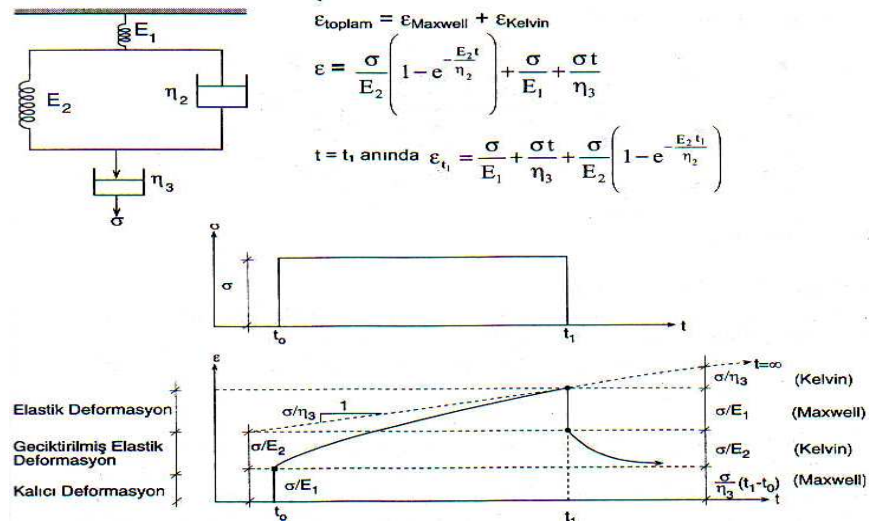
Şekil 3.4. Maxwell model’de gerilme-deformasyon ilişkisi [21]



Şekil 3.5. Kelvin model’de gerilme-deformasyon ilişkisi [21]

c) Burger Model

Maxwell ve Kelvin modellerinin seri olarak bağlandığı bu modelde, gerilme uygulandığı zaman, E_1 elastisite modülüne sahip olan yayda ani bir deformasyon meydana gelir. E_2 ve η_2 parametrelerinin oluşturduğu Kelvin Model'den dolayı sistemde geciktirilmiş elastik deformasyon oluşur. η_3 viskozite değerine sahip olan piston ise kalıcı deformasyona neden olur [22]. Gerilme kalktığına ise E_1 yayından dolayı oluşan ani deformasyon ortadan kalkar. Toplam deformasyon, Maxwell ve Kelvin modellerinde oluşan deformasyonun toplamıdır [21].



Şekil 3.6. Burger model'de gerilme-deformasyon ilişkisi [21]

3.3. Asfaltların Rijitlik Modülü

Asfaltların gerilme-deformasyon ilişkisi reolojik modellerle tam olarak açıklanamadığından dolayı yük altındaki viskoelastik davranışları rijitlik modülü ile tanımlanmaya çalışılmaktadır.

Bu tanımlamaya göre asfaltların deformasyonu gerilme, zaman ve sıcaklığın fonksiyonu olarak düşünülür ve buna göre hesaplanır [21].

Asfaltların rijitlik modülü;

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

ile ifade edilir.

Rijitlik modülü; yükleme şekline, yükleme zamanı veya frekansına ve sıcaklığa bağlıdır. Yani yukarıdaki formül bu şekilde ifade edilmek istenirse;

$$(S)_{t,T} = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right)_{t,T} \quad (3.5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

S = Rijitlik modülü, kg/cm^2 veya psi

σ = Eksenel gerilme, kg/cm^2 veya psi

ε = Toplam birim deformasyon

t = Yükleme süresi, saniye veya dakika

T = Sıcaklık, °C veya °F

Kısa yükleme zamanlarında veya düşük sıcaklıklarda asfaltın davranışı tamamen elastik olurken, daha uzun yükleme sürelerinde veya daha yüksek sıcaklıklarda viskoz olacaktır. Bu durumda da rijitlik, uygulanan gerilme ile oluşan deformasyonun arasındaki ilişki ile tanımlanır. Bu tanımlama sıcaklık ve zamana bağlı olarak yapılır [21].

Nijboer, Marshall deneyini değerlendirmek için rijitlik modülünü yeniden tanımlamıştır. Nijboer'e göre, Marshall deneyi sırasında meydana gelen gerilme ve deformasyon son derece karmaşıktır. Bu durumun aşılabilmesi için, uygulanan yükün, deney numunesinin kesit alanına homojen şekilde dağıldığı kabulünü önermiştir [24]. Buna göre Denklem (3.5);

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P}{A} / \frac{F}{d} = 1.5748 \frac{P}{F} \quad (3.6)$$

şeklinde yeniden yazılmıştır. Burada;

S = Rijitlik (Nijboer) modülü, kg/cm^2 veya psi

P = Marshall stabilitesi, kg veya lb

$A = \text{Alan}, (6.35 \times 10.16 = 64.516) \text{ cm}^2$ veya $(10) \text{ inç}^2$

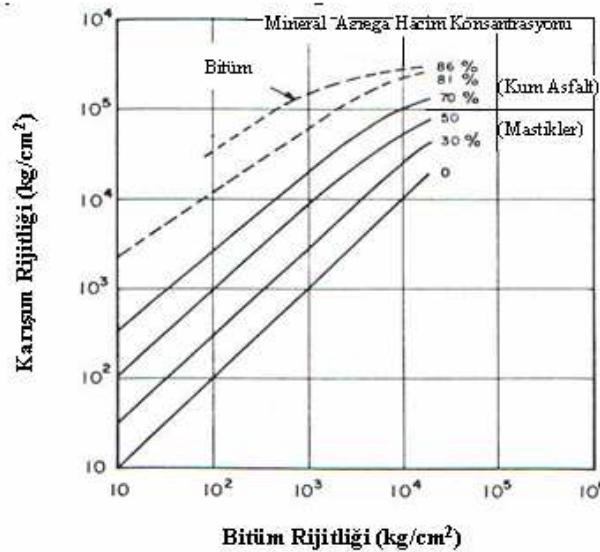
$F = \text{Marshall akma değeri}, \text{ mm}$

$d = \text{Numunenin yüksekliği}, (10.16) \text{ cm}$ veya $(4) \text{ inç}$

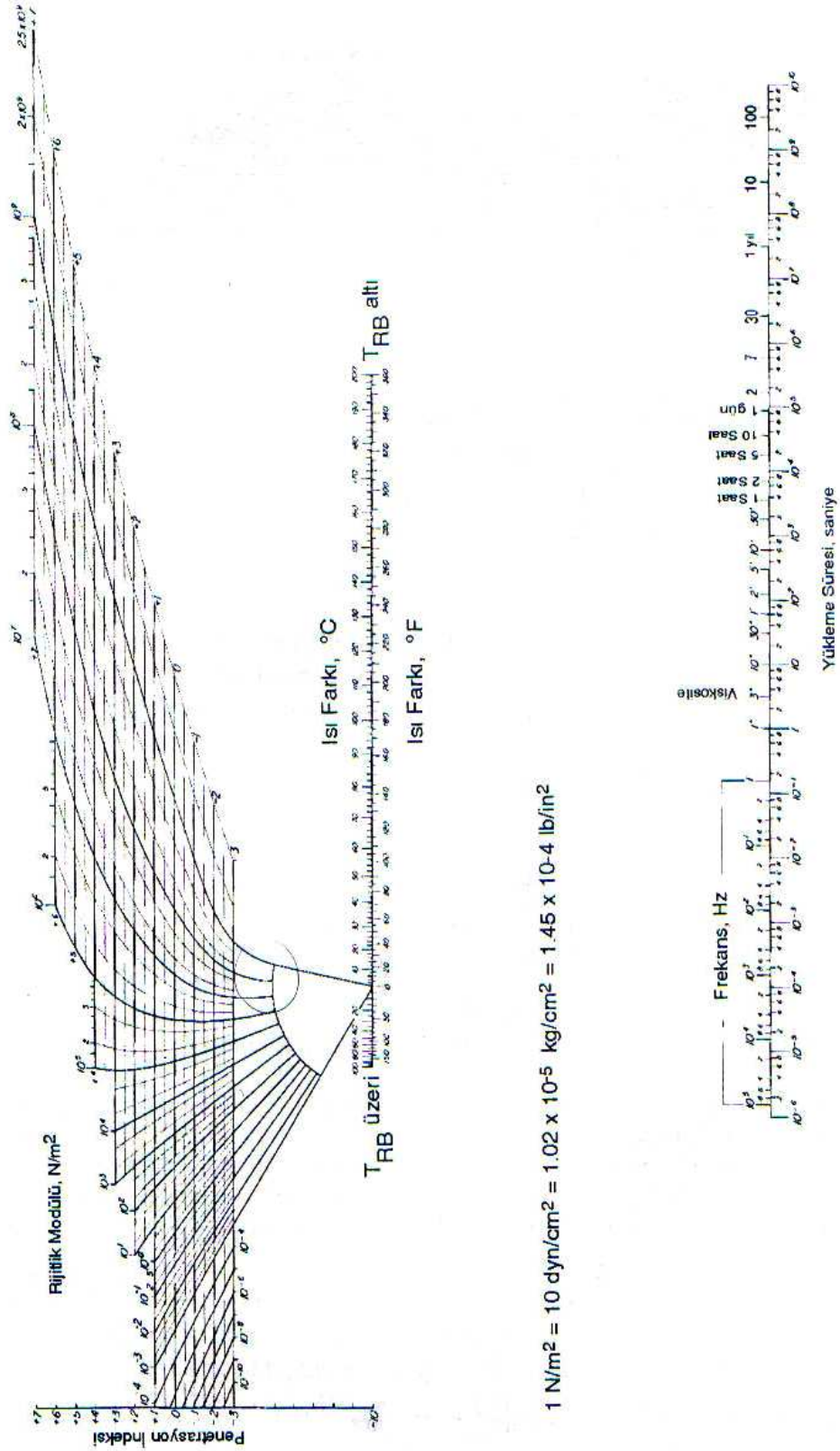
Marshall deneyinde, yükleme genellikle 3-4 saniye sürer. Bu yükleme süresi, gerçek trafik koşulları ile karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. Yani Denklem 3.6 ile elde edilen rijitlik modülü, gerçek yükleme süresi kullanılarak elde edilen rijitlik modülüne eşit değildir [22]. Bu yüzden bu formül, gerçek arazi koşullarındaki yüklemeyi ve asfaltın rijitlik modülünü realize edememektedir.

Van der Poel, 1954 yılındaki çalışmasında, bitümlerin viskoelastik davranışını tanımlayacak genel bir sistem oluşturmuştur [25]. Bunun sonucunda, bitümlerin rijitlik modülünün tayinini sağlayan bir abak geliştirmiştir. Eğer bitümün yumuşama noktası, penetrasyon indisi ve yükleme süresi bilinirse, bu abak yardımı ile bitümün rijitlik modülü bulunabilir [21].

Van der Poel sünme ve tekerlek izi deneylerinden yola çıkarak; karışım rijitliğinin, bitüm rijitliğine ve karışımdaki agrega hacim konsantrasyonuna bağlı olduğunu gösteren bir veri abağı ortaya koymuştur. Buna göre, bitümün penetrasyonu ve yumuşama noktası ile agreganın hacim konsantrasyonu bilinirse, karışımın rijitliği Şekil 3.7 yardımı ile bulunabilir.



Şekil 3.7. Bitüm rijitliği ile karışımın rijitliği arasındaki ilişki (Van der Poel) [25]



$$1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ dyn/cm}^2 = 1.02 \times 10^{-5} \text{ kg/cm}^2 = 1.45 \times 10^{-4} \text{ lb/in}^2$$

Şekil 3.8. Bitümlerin rijitlik modülünün tespiti (Van der Poel) [18]

Van der Poel tarafından geliştirilen grafiğe ek olarak, Heukelom ve Klomp bazı denklemler yardımı ile bir grafik geliştirmiştir [26]. Buna göre;

$$\frac{S_{mix}}{S_{bit}} = \left[1 + \frac{2.5}{n} \frac{C_v}{(1-C_v)} \right]^n \quad (3.7)$$

Burada;

S_{mix} = Karışımın rijitliği, kg/cm² veya psi

S_{bit} = Bitüm rijitliği, kg/cm² veya psi

$n = 0.83 \log(400.000 / S_{bit})$

C_v = agrega hacim konsantrasyonu

$$C_v = \frac{\text{agreganın hacmi}}{(\text{agrega} + \text{bitüm}) \text{ hacmi}} \quad (3.8)$$

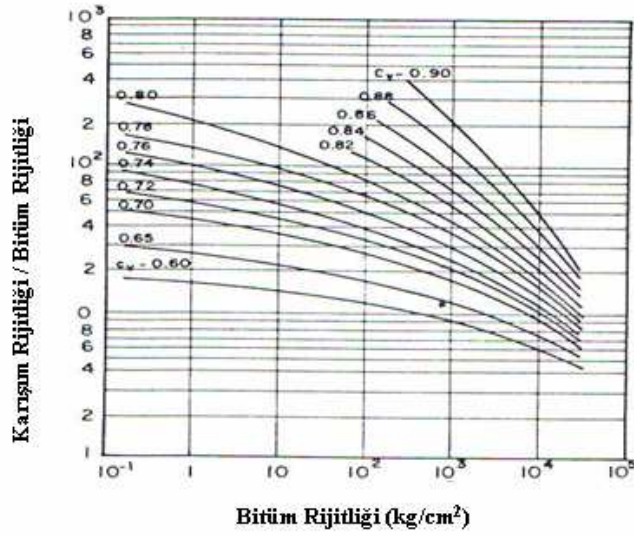
C_v değerleri, % 3.0 civarında hava boşluğuna sahip iyi sıkışmış karışımlar için 0.7 ile 0.9 arasında değişmektedir. Daha fazla hava boşluğuna sahip karışımlar için ise modifiye edilmiş C_v^* değeri kullanılır [22].

$$C_v^* = \frac{C_v}{1 + V_a - 0.03} \quad (3.9)$$

Burada;

C_v^* = Düzeltilmiş agrega hacim konsantrasyonu

V_a = Hava boşluğu, %



Şekil 3.9. Bitüm rijitliği ile karışımın rijitliği arasındaki ilişki (Heukelom ve Klomp) [26]

Yüksek bitüm rijitliği değerlerinde ($S_{bit} = 1$ GPa), bitüm elastik bir katı malzeme gibi davranır. Daha düşük değerlerde ise, rijitlik oranı, elastik, viskoz ve viskoelastik özelliklerin bir fonksiyonu haline gelir [5].

3.3.1. Penetrasyon İndisi

Penetrasyon indisi, karışım rijitliğinin tayininde ihtiyaç duyulan çok önemli bir parametredir. Deney sıcaklığının artması ile birlikte bitümün penetrasyon değeri artar, viskozitesi azalır ve bitüm daha yumuşak bir özellik almaya başlar. Buradan yola çıkarak Pfeiffer, penetrasyon değeri ile sıcaklık arasında var olan doğrusal bir ilişkiyi bahsetmiştir [6]. Bu ilişki;

$$\text{Log } P = AT + K \quad (3.10)$$

ile ifade edilmektedir. Burada;

P = Deney sıcaklığındaki bitümün penetrasyonu

A = Bitümün sıcaklık hassasiyeti

T = Deney sıcaklığı, °C

K = Bitümün yumuşaklığı

Denklem (3.10) ile ifade edilen doğrunun eğimi, kullanılan bitümün sıcaklık hassasiyetini vermektedir. Eğer bu doğrunun, yumuşama noktası deneyi ile elde edilen yumuşama noktasına kadar ekstrapolasyonu yapılırsa doğrunun eğimi;

$$A = \frac{\log 800 - \log P}{T_{RB} - T} \quad (3.11)$$

halini alır [5]. Burada;

T_{RB} = Bitümün yumuşama noktası sıcaklığı, °C

T = Deneysel sıcaklığı, °C

A değeri direkt olarak penetrasyon indisine (PI) eşit değildir. PI ile A arasındaki ilişki;

$$A = \frac{\log 800 - \log P}{T_{RB} - T} = \frac{20 - PI}{10 + PI} \cdot \frac{1}{50} \quad (3.12)$$

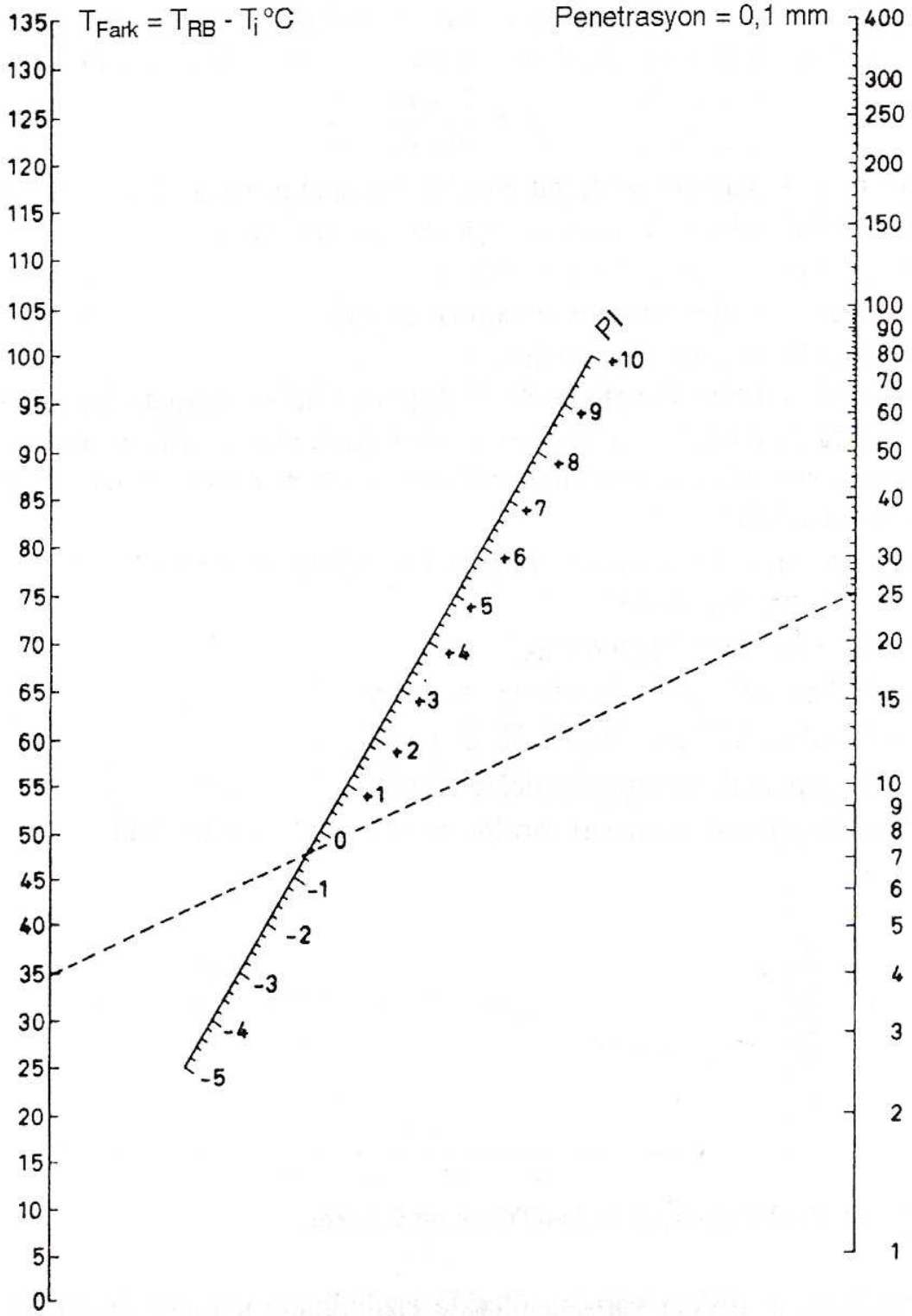
şeklindedir. Denklem (3.12);

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (3.13)$$

halinde yazılabilir [13].

Denklem (3.13)'e göre; PI değeri +2'den büyük olan bitümler, tamamen sıcaklıktan bağımsız olarak hareket ederler denilebilir. PI değeri -2'den küçük olan bitümler ise çok büyük bir sıcaklık hassasiyetine sahiptir [21]. Ara değerler ise ısıya normal duyarlı bitümler için kullanılır. “*Katranlar ve termal asfaltlar ısıya çok duyarlı, ayrıştırma-damıtma metoduyla rafine edilmiş asfaltlar ısıya normal duyarlı ve okside asfaltlar ise ısıya az duyarlıdır*” [21].

Pfeiffer ve Van Doormal, ayrıca bir abak hazırlamışlardır. Eğer bitümün yumuşama noktası sıcaklığı ve 25°C'deki penetrasyon değeri biliniyorsa, bu abak yardımıyla, penetrasyon indisi değeri elde edilebilir (Şekil 3.10) [6].



Şekil 3.10. PI değerinin saptanması (Pfeiffer-Van Doormal) [6]

3.3.1. Bitüm Test Veri Abağı

Denklem (3.11) ve (3.12); referans sıcaklığı (T_{800}) ve sıcaklık hassasiyeti (A) kullanılarak, penetrasyon ve viskozitenin, sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanabileceğini göstermektedir [22].

$$\log \frac{pen}{800} = A(T - T_{800}) \quad (3.14)$$

$$\frac{-5.42(\eta / 13000)}{8.5 + (\eta / 13000)} = A(T - T_{800}) \quad (3.15)$$

Burada;

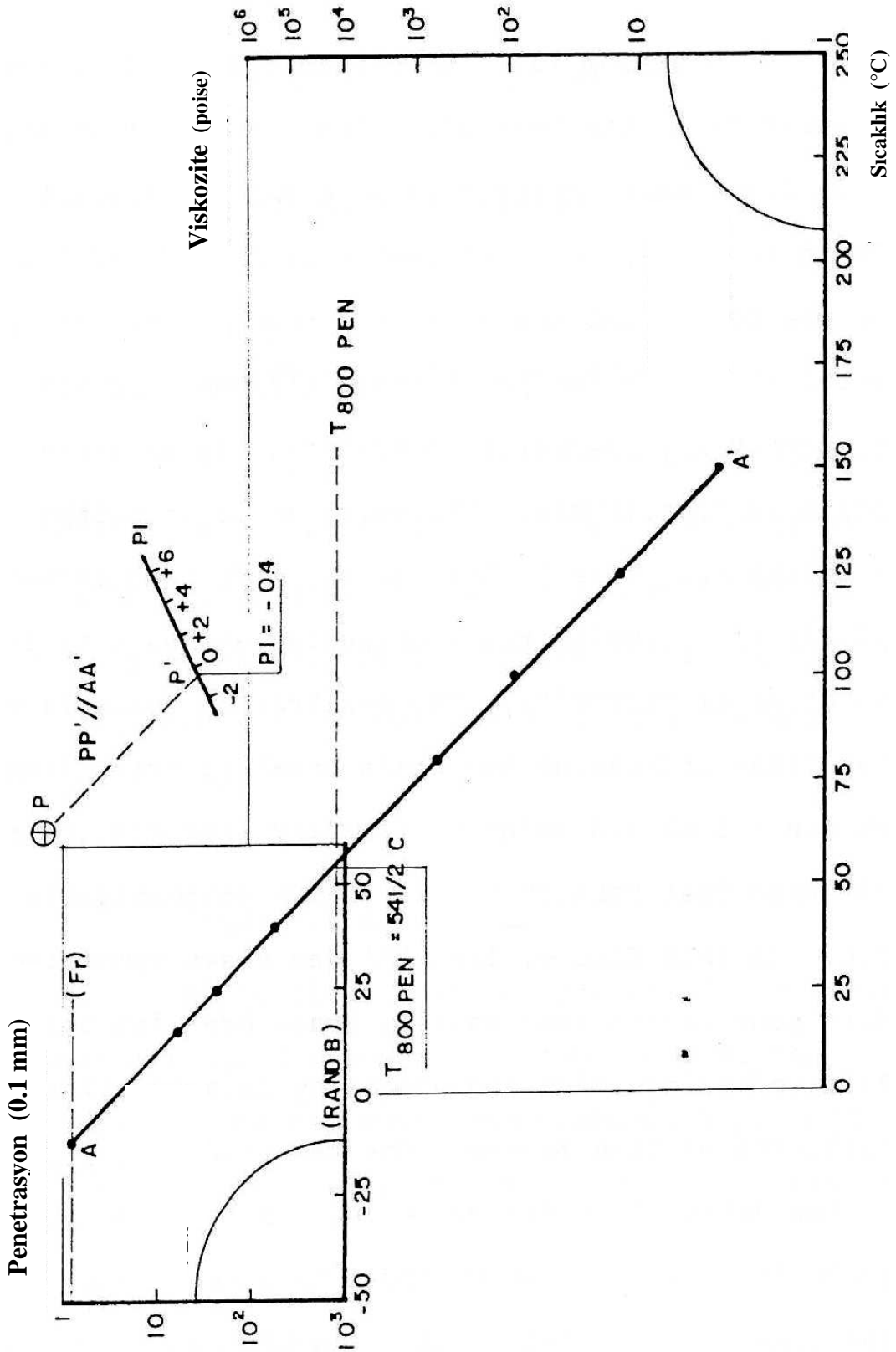
T = Deneysel sıcaklık, °C

T_{800} = Yumuşama noktası, °C

A = Isıya duyarlılık parametresi

η = Viskozite

Heukelom, yukarıdaki eşitliklerin sol taraflarını kullanarak bir abak geliştirmiştir. Abak tek bir düz çizgi ile ifade edilmiştir. Bitüm Test Veri Abağı diye adlandırılan bu abakta; sıcaklık lineer şekilde ölçeklendirilirken, penetrasyon değerleri logaritmik olarak artmaktadır. Viskoziteyi ölçeklendirirken doğrusal veya logaritmik ölçek kullanılmıştır. Penetrasyon ölçeği üzerinde, Fraas kırılma noktası ve yumuşama noktası sıcaklıklarına ait penetrasyon değerleri kesikli çizgi ile gösterilmiştir [22].



Şekil 3.11. Bitüm test veri abağı (Bitumen test data chart-BTDC) [27]

4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

4.1. Kalıcı Deformasyon Karakteristikleri

Çoğu araştırmacı, asfalt mühendisliği ile ilgili çalışmalardaki öneminden dolayı, çalışmalarını esnek kaplamalarda meydana gelen kalıcı deformasyonlar (tekerlek izi) üzerinde yoğunlaştırmışlardır. Kalıcı deformasyonlar, kaplamanın servis yeteneğinde azalmaya neden olmaktadır. Tekerek izlerinin zamanla çatlamaya uğramaları ve su girişi ile birlikte kaplamada meydana gelen bozulma, bu duruma yardımcı olmaktadır. Bitümlü malzemelerde oluşan deformasyonlar daha çok ilkbahar sonlarında, yaz aylarında ve sonbahar başlarında oluşmaktadır. Bunun nedeni olarak, yılın bu dönemlerinde sıcaklıkların yükselmesi, don çözümlerinin meydana gelmesi, yağmurlar, kanama ve kasma olaylarına eşlik eden oluklanmaların oluşması ve sonbaharda yinelenen yağışlar gösterilebilir. Kış aylarında ise zemin donarak asfalt kaplamaya destek olmaya başlamakta ve böylelikle kalıcı deformasyonların miktarında azalma görülmektedir.

Hofstra ve Klomp, asfalt karışımlarda meydana gelen kalıcı deformasyonları incelemek için laboratuvar ortamında bir test düzeneği geliştirmiştir [11]. 18-CBR değerine sahip alt temel üzerine, farklı tabaka kalınlıklarına sahip çeşitli bitümlü karışımların direkt olarak serilmesi ile elde edilen test düzeneği ile yaptıkları çalışmalar sonucunda şu sonuçlara varmışlardır:

- İnce tabakalı (10 cm altı) bitümlü karışımlarda oluşan kalıcı deformasyon, alt temelde oluşan deformasyona bağlı olarak meydana gelmiştir.
- Gerilme ve sıcaklık altındaki malzemenin plastik akması nedeni ile karışımda deformasyon oluşmuştur.
- Daha rijit bitüme sahip karışımların kalıcı deformasyonlara karşı hassaslığının daha az olduğu gözlemlenirken, aynı durumun daha az bitüm içeren karışımlarda meydana gelmediği görülmüştür.
- Tekrarlı yükleme altında, tekrar sayısı başına oluşan kalıcı deformasyon derinliği gitgide azalmıştır. Bu davranış, tekrarlı yük altında karışımın, akmaya karşı dayanım kazandığını göstermiştir.

Hofstra ve Klomp, bunun nedeni olarak agregalar arası içsel sürtünmeyi göstermişlerdir [11].

Araştırmacılar, trafik yükleri altında oluşan gerçek kalıcı deformasyonları tahmin etmeye çalışmışlardır. Tahminlerini yaparken lineer viskoelastik ve doğrusal elastik teorileri kullanmışlardır.

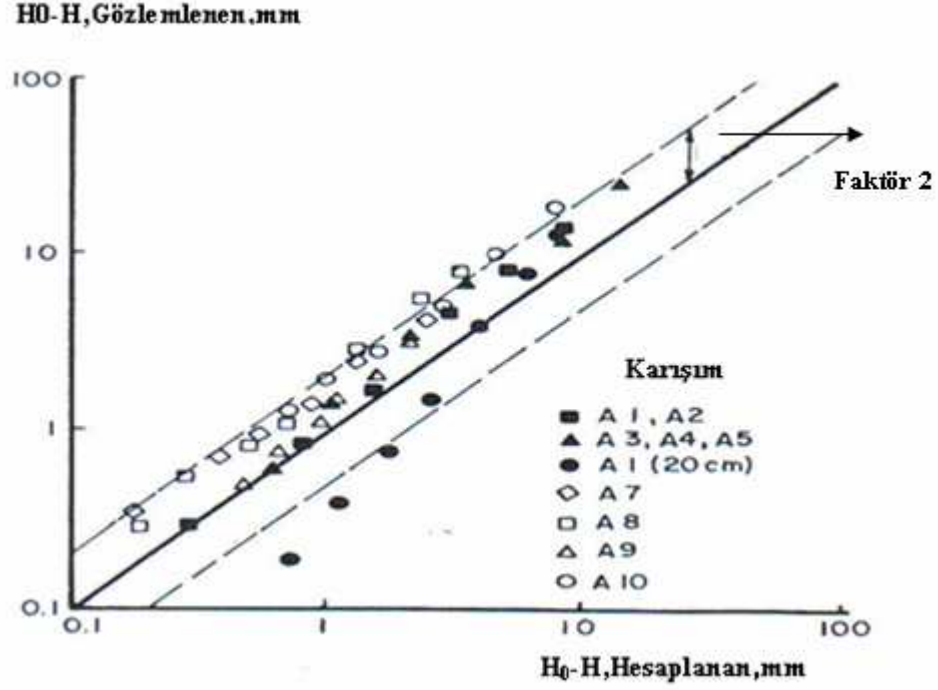
Van der Loo, Hills ve Brien elastik tabaka teorisini kullanarak bitümlü karışımlar üzerinde basınç gerilmeli sünme deneyi uygulamışlardır [12,28,29]. Bu deneyin tüm amacı, kullanılan bitümlü karışımın özellikleri ve servis koşullarının bilindiği bir yolda oluşabilecek kalıcı deformasyon değerinin tahminidir. Bunun için bir prosedür geliştirmeye çalışmışlardır.

Van Draat ve Sommer'in beraber yürüttüğü çalışmalar, karışımın sahip olduğu rijitliğin, bitüm rijitliğinin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir [30]. Fakat bu durum, kısa yükleme süreleri, düşük sıcaklıklar ve % 3 değerini aşmayan agregaya hacim konsantrasyonunda geçerlidir. Hills, daha uzun yükleme sürelerinde ve daha yüksek sıcaklıklarda, karışım rijitliğinin, düşük bitüm rijitliklerinde değişikliklere karşı hassaslığının daha az olduğunu ileri sürmüştür. Buna ek olarak;

- Aynı sınıf bitüme sahip fakat farklı bitüm oranları içeren karışımlar, aynı şekilde sıkıştırıldıklarında; daha az bitüm içeren karışım daha yüksek rijitlik değerine sahip olmaktadır.
- Düzgün yüzeyli agregaya yerine pürüzlü yüzeye sahip agregaya (kırmataş) kullanmak daha büyük karışım rijitlikleri sağlamaktadır.

Hills, Brien ve van der Loo tarafından, bitümlü karışımların sünme ve tekerlek izi özelliklerini incelemek açısından bir çalışma yapılmıştır [29]. Deneylerde bitümlü tabakalar, rijit bir temel üzerine serilmiş ve teker basıncı 80 psi olarak uygulanmıştır. Her iki deney sonuçlarının sağlıklı şekilde karşılaştırılabilmesi için sonuçlar aynı birimlerle ifade edilmiştir. Sünme deneyinin sonuçları için karışım rijitliği-bitüm rijitliği grafiği, tekerlek izi deneyinin sonuçları için ise karışım rijitliği-viskoz bitüm rijitliği grafiği çizilmiştir. Grafiklere bakılarak her iki deneyin sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Deneylere tabi tutulan 10 farklı karışıma ait gözlenen ve hesaplanan tekerlek izi derinliği Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu grafiğe göre;

tekerlek izi derinliği 1 ile 10 mm arasında değişen karışımlarda, sünme testinin sonuçları kalıcı deformasyon derinliğini tahmin etmek için kullanılabilir.



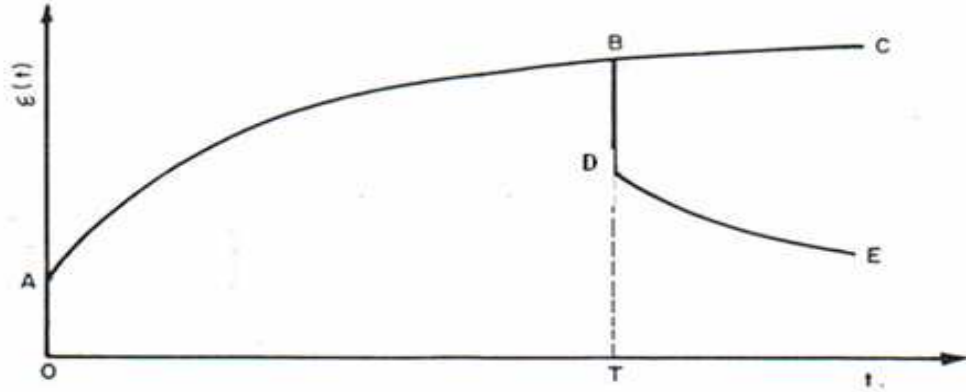
Şekil 4.1. Tekerlek izi deneyi ile gözlemlenen sonuçların sünme deneyi ile hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılması [29]

4.2. Viskoelastik Malzemelerin Sünme Davranışı

Jostrzebski tarafından yapılan tanıma göre; “sünme, sabit gerilmeye maruz kalan malzemede yavaş yavaş artarak meydana gelen deformasyondur” [31]. Oluşan deformasyon malzemenin elastik özelliğine göre değişmektedir [22]. Asfalt mühendisliği ile ilgili çalışmalarda kullanılan malzemelerin sünme özellikleri, sabit gerilme ve sıcaklık altında, zamana bağlı deformasyonları dikkate alınarak incelenir [20]. Bir numuneye zamana bağlı $\sigma_{(t)}$ gibi bir gerilme uygulandığında yine zamana bağlı olan $\varepsilon_{(t)}$ gibi bir birim deformasyon ölçülür. Gerilmenin $t=0$ anında sıfır olduğu, $t>0$ için de sabit bir değer (σ_0) aldığı varsayıldığında eğer malzeme elastik ise deformasyon da gerilmeye benzer bir davranış gösterir. $t=0$ anına kadar gerilme olmadığı için deformasyon oluşmaz.

Gerilmenin uygulanması ile birlikte, malzemenin rijitliğine bağlı olarak sabit bir deformasyon meydana gelir [22].

Aynı gerilmeye viskoelastik bir malzeme maruz kaldığında oluşan deformasyon eğrisi, Şekil 4.2’de gösterilen ABC eğrisine benzer şekildedir.



Şekil 4.2. Tipik sünme eğrisi [22]

$t = 0$ anına kadar viskoelastik malzemedeki deformasyon oluşmaz. Gerilmenin uygulanması ile birlikte malzemedeki ani bir deformasyon oluşur (OA). Gerilme sabit bir değere ulaşmasına rağmen, elastik malzemenin aksine, deformasyon sürekli artar. Bazı malzemelerde ABC eğrisinin eğimi sıfıra ulaşırken bazı malzemeler için de sıfırdan farklı sabit bir değere sahip olur.

$t = T$ anında gerilmenin kalkması ile birlikte elastik malzeme aniden eski haline (deformasyonsuz) dönerken, viskoelastik malzeme BDE ile gösterilen eğriye benzer bir davranış gösterir. Elastik bileşenden dolayı meydana gelen BD eğrisini, aşamalı olarak iyileşmeyi (deformasyonun geri kazanımı) gösteren DE eğrisi takip etmektedir.

Gerilmenin uygulandığı $t = 0$ anından numunenin kırıldığı ana kadar olan sünme eğrisi ise Şekil 4.3’de görüldüğü gibidir. Bu grafiğe göre;

- **Ani Deformasyon (AB arası)** :Gerilmenin uygulanması ile birlikte malzemedeki, zamandan bağımsız olarak ani bir deformasyon oluşur. Yükün kalkmasıyla beraber bu deformasyonun bir miktarı da, ani

olarak, ortadan kalkar. Bu özellik, mekanik modellerdeki yay ile açıklanmaktadır.

- **Birincil Sünme Evresi (BC arası) :** Gerilme devam ettiği müddetçe deformasyon artmaya devam eder. Kelvin Model’le açıklanan bu deformasyon, azalan bir oranla artmaktadır. Bu aşamada yük kaldırılırsa, deformasyonun bir kısmı ortadan kalkar.
- **İkincil Sünme Evresi (CD arası) :** Deformasyon eğiminin doğrusal hale geldiği bu bölüm, Maxwell Model’deki piston ile ifade edilmektedir. Artık deformasyonda geri dönüş olmaz.
- **Üçüncül Sünme Evresi (DE arası) :** Bu bölümde, malzeme tamamen plastik olarak davranmakta ve deformasyon eğimi hızla artmaktadır [5].

Şekil 4.3’de görülen eğri tipik bir sünme eğrisidir ve her durumda malzemelerin bu davranışı yapması beklenemez. Deformasyon-zaman grafiğinin gerçek şekli elde edilmek istenirse aşağıdaki yol izlenmelidir.

Öncelikle yükün uygulandığı zaman seçilmelidir. Eğer yükün uygulandığı an, zaman çizelgesinin orijini olarak seçilirse, numune üzerindeki gerilme;

$$\sigma_{(t)} = \sigma_0 H_{(t)} \quad (4.1)$$

Burada;

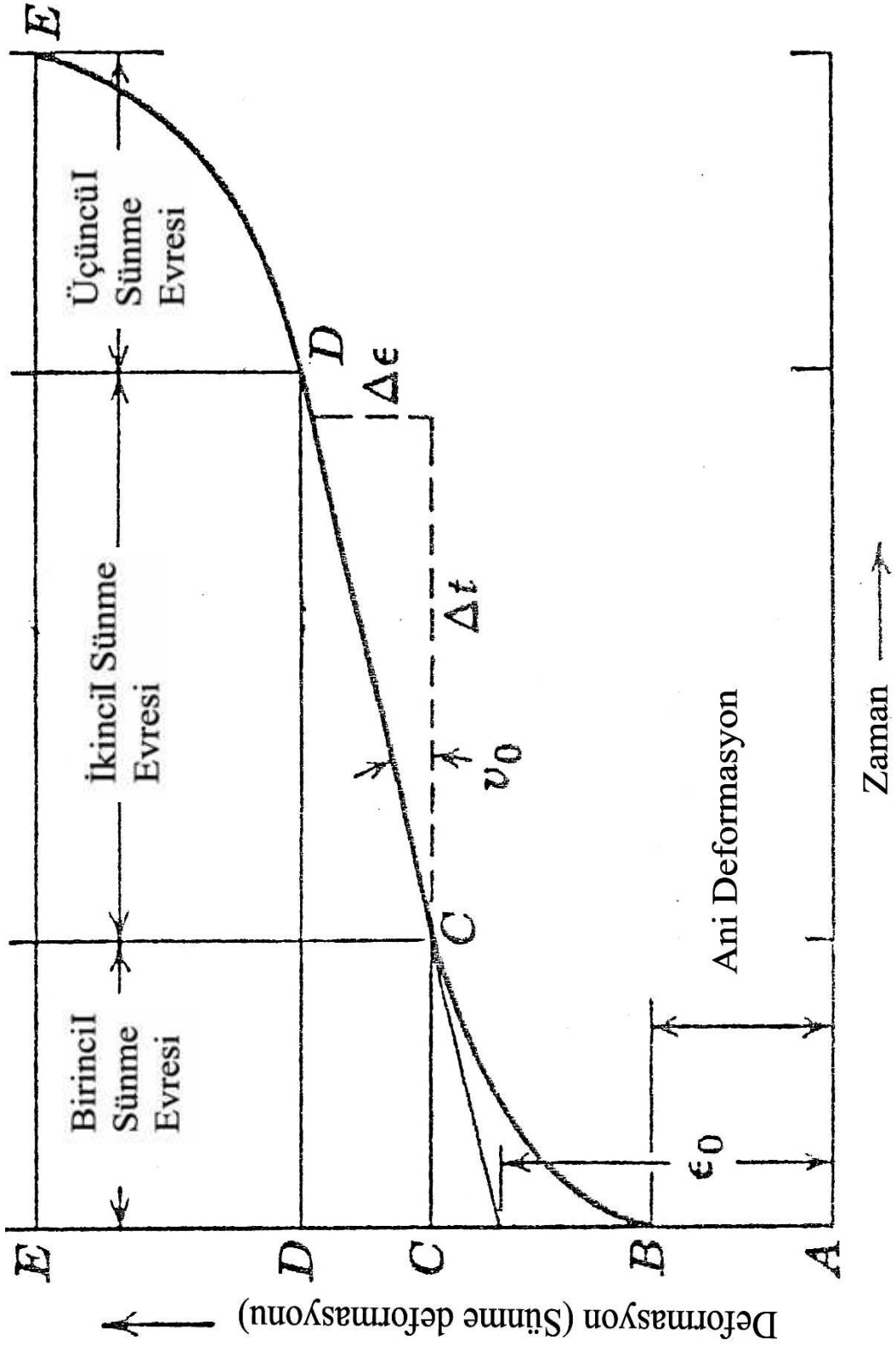
σ_0 = Sabit basınç gerilmesi

$$H_{(t)} = \text{Heaviside fonksiyonu, } \begin{cases} H_{(t)} = 0, & t < 0 \\ H_{(t)} = 1, & t > 0 \end{cases}$$

$$\frac{dH_{(t)}}{dt} = \delta_{(t)} \quad (4.2)$$

Burada;

$\delta_{(t)}$ = Dirac delta fonksiyonu’dur.



Şekil 4.3. Kırılma anına kadar olan sünme eğrisi [5]

Yaşlanmamış viskoelastik malzemenin gerilme altındaki deformasyonu ise aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\varepsilon_{(t)} = \int_{-\infty}^t \psi_{(t-z)} \sigma_{(z)} dz \quad (4.3)$$

Burada;

$\psi_{(t)}$ = Sünme fonksiyonu

$\sigma_{(z)}$ = z anındaki basınç gerilmesi, kg/cm² veya psi

$\varepsilon_{(t)}$ = t anındaki birim deformasyon

t ve z = zaman, saniye

Yukarıdaki denklem t anına kadar z süresi boyunca sabit gerilmeye maruz kalmış lineer viskoelastik malzemenin deformasyonunu göstermektedir. Malzemenin tek yönlü lineer davranışını gösterdiği için denklem;

$$\int_a^b f_{(x)} \delta_{(x-c)} dx = f_{(c)} \quad (4.4)$$

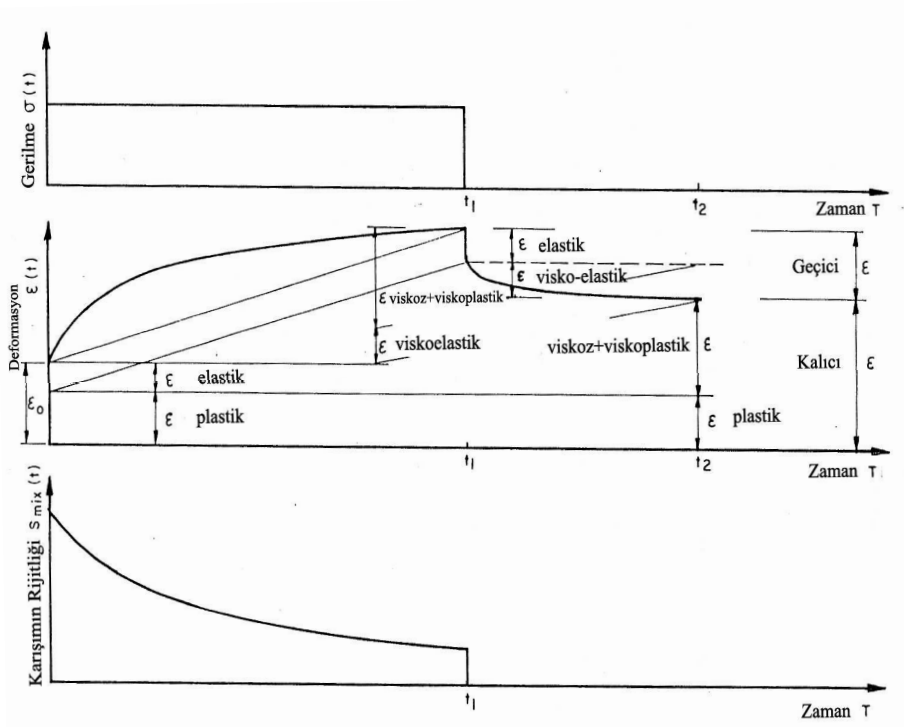
şeklinde yazılabilir.

Denklem 4.1 ve 4.3'ü kullanarak, Denklem 4.4'ü yeniden yazmak mümkündür.

$$\varepsilon_{(t)} = \sigma_0 \psi_{(t)} \quad (4.5)$$

Şekil 4.4'de ise, t_1 süresi boyunca uygulanan yükün, $t = t_1$ anında kaldırılması ile birlikte viskoelastik malzemelerde oluşan deformasyon değişimi gösterilmektedir. Gerilme uygulandığı anda elastik ve plastik özellik taşıyan ani bir deformasyon oluşmaktadır. Gerilmenin ortadan kalktığı $t = t_1$ anına kadar deformasyon artmaktadır. Gerilmenin kalkması ile birlikte deformasyonda elastik

ve viskoelastik özelliğe bağlı bir miktar azalma olmaktadır. Viskoz, viskoplastik ve plastik özellik taşıyan kısım ise kalıcı deformasyon olarak adlandırılmaktadır [22].



Şekil 4.4. Gerilme, deformasyon ve rijitliğin zamanla değişimi [22]

4.3. Bitümlü Karışımların Sünme Davranışı

Bitümlü karışımların farklı yükleme şekilleri altında gösterdiği reolojik tepkiler, birçok araştırmacının çalışmasının konusu olmuştur. Asfalt kaplama teknolojisinde bu büyüyen isteğin nedeni, asfaltların viskoelastik özelliklerini hesaba katarak daha iyi performans gösteren kaplamalar dizayn etmektir. Daha önce ortaya konan tasarımlar, asfaltın sadece elastik bir malzeme olduğu düşünülerek yapılmıştır. Bunun üzerine 1970'lerin başlarında, Shell laboratuvarları daha kapsamlı bir araştırma başlatmıştır. Bu araştırmanın amacı bir asfalt karışım dizayn metodu geliştirmektir. Dizayn metodu yardımı ile tasarımcının mevcut malzemeleri kullanarak optimum karışım kompozisyonu elde etmesi planlanmıştır. Ayrıca geliştirilecek olan metodun, karışım kompozisyonu

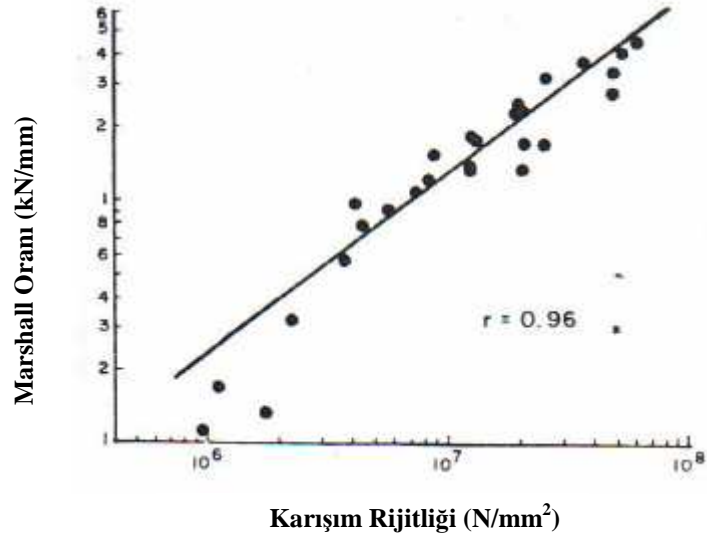
içindeki değişikliklerin performansı nasıl değiştireceği sorusuna cevap verebilmesine dikkat edilmiştir [22].

Sünme deneyinin uygulanması ve sonuçlarının değerlendirilmesi için de Hilster, van der Loo ve İsveç Federal Teknoloji Enstitüsü tarafından bir metot geliştirilmiştir [32,33]. Deney sonuçları, bitüm rijitliğinin bir fonksiyonu olarak gösterilen karışım rijitliği terimi ile verilmiştir. Karışım rijitliği değeri, sabit gerilmenin ölçülen birim deformasyon değerine bölünmesi ile doğrudan hesaplanabilmektedir. Bitüm rijitliği ise Poel abağı gibi çeşitli teknikler kullanılarak elde edilebilmektedir. Hilster deformasyon karakteristiğinin bu şekilde gösterilmesinin bir avantaj olduğunu söylemiştir. “Çünkü tekerlek izi derinliği karışım rijitliği değeri ile doğru orantılı olarak değişmektedir”. Örneğin karışımda doğal kum yerine kırma kum kullanılması, karışım rijitliğinin % 30 artmasına ve tekerlek izi derinliğinin % 30 azalmasına neden olmaktadır [22].

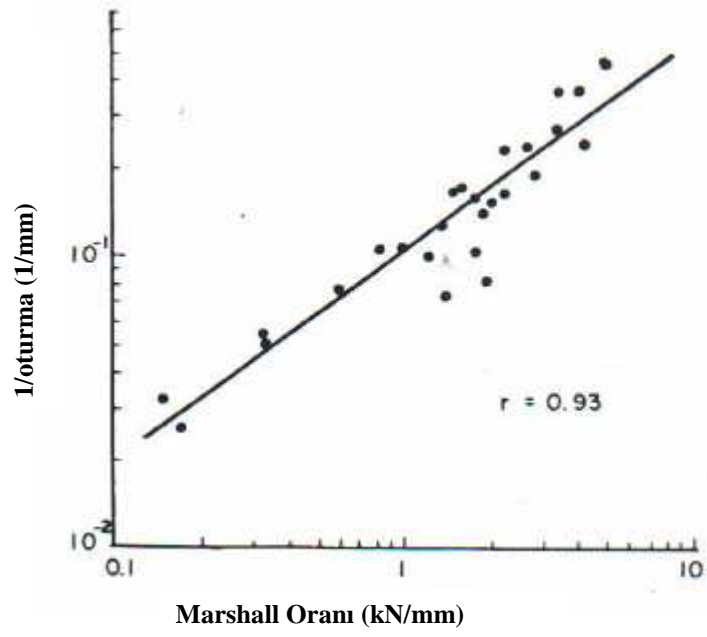
Brien, 1977 yılında yaptığı araştırmasında 27 farklı numune kullanmış ve bu numunelerle Marshall, Tekerlek İzinde Oturma ve Sünme deneylerini karşılaştırmıştır [34]. Yaptığı araştırma sonucunda şu sonuçlara ulaşmıştır:

- Marshall Oranı (stabilite / akma, Marshall Quotient) değerleri ile sünme testinde elde edilen rijitlik değerleri Şekil 4.5’de görüldüğü gibidir.
- Tekerlek İzinde Oturma deneyinden elde edilen “1/oturma derinliği” değerlerinin, Marshall ve sünme deneylerindeki Q_m ve karışım rijitliği değerleri ile karşılaştırılması Şekil 4.6 ve 4.7’deki gibidir.

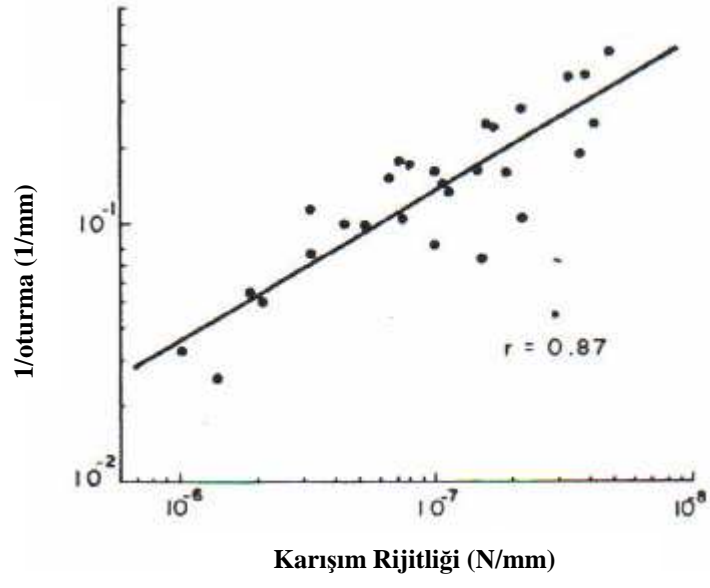
Bu grafiklerden anlaşılacağı gibi Marshall deneyi sonuçları ile sünme deneyi sonuçları arasındaki ilişki, diğerlerine göre çok daha iyidir. Bu yüzden sünme testi numunelerini Marshall deneyi ile hazırlamak çok daha yararlı olacaktır [34].



Şekil 4.5. Marshall ve sünme testi arasındaki ilişki [34]



Şekil 4.6. Marshall ve tekerlek izinde oturma testi arasındaki ilişki [34]



Şekil 4.7. Sünme ve tekerlek izinde oturma testi arasındaki ilişki [34]

5. BİTÜMLERİN MODİFİKASYONU

Esnek kaplamalardan stabilite ve performans yönünden üstün nitelikli ve daha uzun ömürlü olmaları beklenir. Bakım-onarım maliyetinin ve gereksiniminin daha az olması istenir. Bu fonksiyonların elde edilebilmesi için;

- Kalıcı deformasyonlar
- Düşük ısı çatlakları
- Yorulma çatlakları
- Su etkisiyle meydana gelen bitüm soyulması ve düşük durabilite gibi kusurların azaltılması gerekir [21].

Gerek trafik emniyeti açısından, gerekse artan yüksek onarım maliyeti nedenleri ile büyük sorunlar yaratan bu duruma çözüm olarak;

- Karışım dizaynlarının yeniden gözden geçirilmesi,
- Hem agreganın hem de bitümün kalitesinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Bu sorunlara çözüm olabilmesi için yapılmış olan çalışmalarda özellikle bitüm modifikasyonu üzerinde durulmuştur. Bunda, bitümün viskoelastik bir malzeme oluşu ve yol üst yapı performansının belirlenmesinde çok önemli rol oynamasının payı büyüktür. Bu konuda, çeşitli ülkelerde davranış-performans özellikleri, kalite kontrolü ve standartları üzerine çalışmalar yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir [35].

Bitümlerin doğal ve sentetik polimerlerle modifikasyonu için geliştirilen metotlara dair patent çalışmaları 1843 yılına kadar dayanmaktadır [36]. Test projelerinin uygulanmasına ilk olarak 1930'lu yıllarda Avrupa'da başlanmışken, Amerika kıtası ilk uygulamasını 1950'li yıllarda gerçekleştirmiştir. Güney Amerika'da yapılan çalışmada katkı malzemesi olarak neopren lateks kullanılmıştır [35]. 1970'li yılların sonuna kadar, polimer modifiye kullanımında Avrupa, Amerika'nın çok daha önünde yer almıştır. İlk maliyetlerin çok yüksek olması, polimer modifiye asfaltın Amerika'da kullanımının kısıtlı olmasına neden olmuştur. Buna karşın asfalt ömrü boyunca yapılan masrafların azalması, Avrupa'lı müteahhitlerin bitüm modifikasyonuna karşı ilgisini arttırmıştır [37]. 1980'lerin ortalarından itibaren yeni polimerlerin geliştirilmesi ile birlikte,

Avrupa teknolojisi Amerika'da da kullanılmaya başlanmıştır [38,39]. Daha sonra Avustralya'da, Ulusal Asfalt Şartnamesi (National Asphalt Specification) adıyla modifiye bitümlere ilişkin bir şartname geliştirilmiştir [40].FHWA (The United States Federal Highway Administration) tarafından geliştirilen bir ömür maliyet analizi yardımıyla, kauçuk içeren asfalt karışımların ömür maliyetlerinin hesaplanmasına çalışılmıştır [41].

1997 yılında, Amerika Birleşik Devletleri'nde, eyaletlerin ulaştırma departmanları üzerinde yapılan bir araştırma sonucunda; 50 eyaletin 47'sinin gelecek yıllarda modifiye bitüm kullanacağı tespit edilmiştir [42]. Bu arada birçok değişik ülkede, polimer modifiye bitümün kaplama performansı üzerindeki yararlarını tespit etmek için, çeşitli araştırma grupları kurulmuştur. Bu gruplar tarafından çeşitli deney ve standartlar geliştirilmiştir [42].

2001 yılında Ohio Ulaştırma Bölümü'nden Kim ve Sargand, biri modifiye edilmemiş, biri SBS (stiren-bütadiyen-stiren) modifiyeli ve biri de SBR (stiren-bütadiyen-kauçuk) modifiyeli üç adet PG 70-22 bitümün, yorulma ve oluklanma dayanımını incelemişlerdir [43]. Yaptıkları çalışmanın sonucunda modifiye bitümlerin yorulma ve oluklanma mukavemetinin daha yüksek olduğunu bulmuşlardır [43].

Nevada'da 2003 yılında, 60°C'lik sıcaklık altında yapılan çalışmanın sonucunda; modifiye edilmiş bitümün viskozitesi, modifiye edilmemiş göre çok daha yüksek çıkmıştır. Penetrasyonun ise sıcaklık değişimlerine karşın çok az değiştiği gözlemlenmiştir [44].

Yine 2003 yılında Newcomb, yorulma çatlaklarının oluşmasının kaçınılmaz olduğuna dair fikirlerin yanlış olduğunu öne sürmüş ve asfalt tabaka altında kullanılacak polimer modifiyeli bir binder tabakası ile bunun önüne geçilebileceğini belirtmiştir [45]. Binder tabakasının kalınlığının artırılması ile birlikte kaplamanın yorulma çatlaklarına karşı direncinin artacağı ifade etmiştir.

2003 yılında yapılan diğer bir çalışmada, US Army Corps of Engineers (Amerikan Ordu Mühendisleri Birliği), yorulma, oluklanma, termal çatlaklar ve su zararlarına karşı en iyi direnci gösterecek ve ekonomik olacak bir asfalt modifiye malzemesi seçmeye çalışmıştır [46]. Çalışmanın sonucunda seçilen SBS, SBR ve

kauçuğun, yorulma özellikleri üzerinde belirgin etkiye sahip oldukları görülmüştür.

Polimer modifikasyonu yapılmış kaplamalarda, oluklanmaya ve termal çatlaklara karşı dayanımın arttığı görülmüştür. Ayrıca bu kaplamalarda yorulma zararları, soyulma ve ısı hassasiyeti azalmaktadır. Polimer modifiyeli kaplamalar, trafiğin yoğun olduğu yolların birleşme yerleri, havaalanları ve yarış pistleri gibi gerilmelerin yüksek olduğu noktalarda kullanılmaktadır. Polimer modifiyeden istenen özellikler olarak elastik geri kazanım, yüksek yumuşama noktası, yüksek viskozite, yüksek kohezyon ve yüksek düktilite söylenebilir [47].

Herhangi bir katkı malzemesinin bitüm modifikasyonunda kullanılabilir olması için aşağıdaki özelliklere haiz olması gerekir. Bu özellikler, katkı malzemesinin;

- Kolay ve ucuz elde edilebilmesi,
- Karışım sıcaklığında özelliğini kaybetmemesi,
- Karışım ve serme sıcaklığında yeterince viskoz, yüksek hava sıcaklıklarında kalıcı deformasyonlara karşı dirençli ve düşük hava sıcaklıklarında aşırı rijit ve kırılman olmaması,
- Bitüm ile homojen olarak karışabilmesidir [21].

Ayrıca modifiye bitümlerin, depolama, uygulama ve servis ömrü boyunca başlangıç özelliklerini aynen muhafaza etmesi, mevcut olan ekipman ve uygulama anındaki ısılarla kullanılabilir olması gerekmektedir.

Modifiye bitümleri elde etmek için kullanılan çok sayıda katkı malzemesi bulunmaktadır. Bunların içinde en yaygın olanları Çizelge 5.1’de görülmektedir.

Modifiye bitümler, günümüzde en çok SBS ve EVA katkıları ile elde edilmektedir. Kullanılan katkıları, gerek cins gerekse miktar olarak farklı bitümlerde farklı sonuçlara neden olmaktadır. Asfaltlar, kimyasal yapısı nedeni ile asfaltten ve maltenler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Maltenler ise reçine, aromatik ve doymuş hidrokarbonlardan meydana gelir. Dolayısıyla bu dört bileşen her asfaltta farklı oranlarda olacaktır. Modifiye bitüm elde edilmesinde;

- Polimer/bitüm uyumuna,
- Polimer/bitüm homojenliğine,

- Modifiye bitümün ısıyla değişime uğramaması hususlarına dikkat edilmelidir [21].

Çizelge 5.1. Modifiye bitümler için katkı maddeleri [21]

KATKI TİPİ	AMAÇ
Sülfür	İşlenebilirliği, deformasyon direncini ve Marshall direncini arttırmak
Kauçuk (Rubber-Lastik)	Viskozluğu arttırmak (polibütadien, poliizopren, doğal kauçuk, bütül kauçuk, stiren-bütadien kauçuğu v.s.)
Termoplastik Polimerler	Deformasyon direncini ve işlenebilirliği iyileştirmek , viskozluğu arttırmak (polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistren ve etilen vinil asetat)
Termoplastik Kauçuklar	Deformasyon direncini ve yorulma mukavemetini iyileştirmek, bir miktar elastikliği arttırmak, adezyonu arttırmak (poliüretan, polieter-poliester kopolimeri, olefinik kopolimerleri ve stirenik blok kopolimerleri)
Termoseting Polimerler	Kalıcı deformasyon direncini ve adezyonu arttırmak
Organo-Manganez Bileşikleri	Mukavemeti arttırmak, karışımın ısıya duyarlılığını ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek
Doğal Asfaltlar (Göl ve Kaya Asfaltları)	Isıya duyarlılığı iyileştirmek, aşınma direncini arttırmak
Epoksi Reçinesi	Deformasyon direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci arttırmak
Katran	Aşınma direncini ve yakıt hasarlarına karşı direnci arttırmak
Gilsonit (Tabii Asfalt)	Kalıcı deformasyon direncini arttırmak
Siyah Karbon	Asfaltın dayanımını ve karışımın deformasyon direncini arttırmak

Aynı bitüme farklı oranlarda katkı malzemesi katıldığında farklı sonuçlar alınmaktadır. Bu yüzden katkı malzemesinin miktarı son derece önemlidir. Aynı zamanda katkı maddesinin seçiminde de dikkatli olunmalıdır. EVA, SBS, termoseting veya termoplastik polimerler, doğal veya yapay kauçuk, vb. katkı malzemeleri, cins ve miktar olarak bitüme katıldığında elde edilen özellikler farklı olduğundan polimer/bitüm uyumu için gerek cins gerekse miktar doğru olarak saptanmalıdır. Bunun için modifiye bitümler üzerinde, penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, soyulma gibi bazı deneyler yapılarak, sonuçlar katkısız bitümlerle karşılaştırılmalıdır. Katkı cinsi ve miktarı kadar bir diğer önemli konu

da karışımın hazırlanma metodudur. Karışımın süresi, karışım hazırlanma ısı ve kullanılan ekipmanlar, polimer/bitüm homojenliğini sağlamak için önemlidir. Çünkü bitüme katılan polimerler, asfalt içinde şişerek, asfaltın bileşenleri ile etkileşmekte ve bitüm içerisinde uygun ağ oluşumunu sağlamaktadır. Ayrıca katkı malzemesi olarak kullanılan polimerlerin büyük miktarı, yüksek ısılarda uzun süre tutulduğunda veya hava ile temas ettiğinde bozulabilmektedir. Bunun sonucunda genellikle düktilite ve yumuşama noktasında azalma görülmektedir. Sonuç olarak, modifiye malzemelerin yüksek ve uzun süreli ısılarda değişime uğramaması gerekmektedir [21].

Bir katkı malzemesi olarak kullanılan sülfür, bitümün işlenebilirliğinin ve karışımın Marshall stabilitesinin iyileşmesini sağlamaktadır. Sülfür ile modifiye edilen bitümlerle hazırlanan karışımların Marshall stabilitesi başlangıçta çok az değişiklikler gösterirken, 7 veya 21 gün sonunda iki kata kadar artmaktadır. Bitüme SBS, polisopren, doğal lastik, butil lastik, klorpren, araç lastiği gibi modifiye edici malzemeler atıldığında genellikle karışımın viskozitesi artmaktadır. Modifiye edici olarak manganer bileşikler kullanıldığında karışımın mukavemeti artarken ısıya duyarlılığı iyileşmektedir. Termoplastik polimerler (örneğin polipropilen) penetrasyonun azalmasını, yumuşama noktası ve karışımın stabilitesi ile deformasyon direncinin artmasını sağlamaktadır. Termoplastik kauçuklar ise deformasyon ve yorulma direncini arttırmaktadır. Termoset polimerler, ısıya daha az duyarlı, daha elastik ve aşınma direnci daha yüksek modifiye edicilerdir. Deformasyona karşı daha dirençli olan bu polimerler, daha fazla agrega/bitüm adezyonuna sahip olduğundan, soyulma direncini arttırmaktadır [21].

5.1. Modifikasyonun Amaçları

Bitümü modifiye ederek, bitümün viskoelastik özelliğini değiştirmek ve daha önemlisi sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmak hedeflenir. Bu şekilde kaplamanın yorulma ve oluklanmaya karşı mukavemeti artırılmış olur.

Ayrıca;

- Bitümün yumuşama noktası yükselmekte ve Fraas kırılma noktası düşmektedir. Böylece servis sıcaklığı aralığı genişler.
- Penetrasyon indisi değeri yükselir.
- *“Adezyon iyileşmektedir. Polimerlerin, EVA hariç, polar kimyasal fonksiyon ve radikalleri yoktur. Dolayısı ile bitüm/agrega bağına müdahale etmezler. Yalnız viskoziteyi yükselttiklerinden suyun, bitüm filmi ile agrega arasına girmesi daha fazla enerji gerektirir. Bu durum pasif adezyon da denen soyulma mukavemetinde artış sağlar.”*
- Modifiye bitümün yüksek viskozitesi, agrega etrafındaki bitüm filminin kalınlaşmasına neden olduğu için yaşlanma yavaşlamaktadır [48].

5.2. Modifiye Bitüm Üretimi

Türkiye’de modifiye bitüm üretilmesinde, modifiye edici madde olarak, kaya asfaltları, göl asfaltları, elastomerik polimerler, termoplastik polimerler, lateks ve granül kauçuk gibi katkı malzemeleri kullanılır [49].

Bir plentteki modifiye bitüm üretimi kısaca özetlenmek istenirse; ana tanklarda bulunan 170-180 °C’deki AC 50/70 bitüm bir pompa vasıtasıyla 1 nolu modifiye bitüm plenti tankına alınır, helezonlu besleyici ile üzerine belli oranda katkı maddesi ilave edilir ve yüksek devirli değirmenden geçirilerek 2 nolu tanka alınır. Bu işlem 1 pas olarak tanımlanır. 2 nolu tanka alınan karışım tekrar değirmenden geçirilerek 1 nolu tanka alınır. Tankların içinde dikey karıştırıcılar ve ısıtma sistemleri mevcuttur. Modifiye Bitüm Teknik Şartnamesi TABLO-1 “Modifiye Bitümün Fiziksel Özellikleri”ni (Çizelge 5.2) sağlamak için deneme üretimleri gerçekleştirilir ve kaç pas sayısında bu değerlerin yakalandığı bulunur [49]. Daha sonra modifiye bitüm, bir pompa vasıtasıyla stok edilecek tanka aktarılır ve burada minimum 1 saat bekletildikten sonra 170-185 °C sıcaklığa sahip bitüm üretime gönderilir. Bekleme esnasında stok tankının karıştırıcıları, fazla yağın önlenmesi için sürekli çalışır haldedir [50].

Modifiye bitüm; malzemenin serileceği bölgenin iklim koşullarına ve bitümlü kaplamanın tipine bağlı olarak belirlenmektedir. Genel olarak, Akdeniz ikliminin hüküm sürdüğü bölgelerde ve Güney Doğu Anadolu'nun güney kesimlerinde Tip 1 veya Tip 2, Karadeniz, Marmara, İç Anadolu, İç Batı Anadolu, Güney Doğu Anadolu'nun kuzey kesimlerinde ve Doğu Anadolu'nun batı kesimlerinde Tip 3, Doğu Anadolu'nun diğer kesimlerinde Tip 4 kullanılmaktadır [49].

Çizelge 5.2. Modifiye bitümün fiziksel özellikleri [49]

SIRA NO	DENEY ADI	STANDARDI	TİP-1	TİP-2	TİP-3	TİP-4
1	PENETRASYON (25°C, 100g, 5 sn) 0,1mm min.	TS 118	20	20	40	60
2	DÜKTİLİTE (25°C, 5 cm/dk) cm min.	TS 119	10	60	80	1000
3	YUMUŞAMA NOKTASI (R/B) °C min.	TS 120	65-75	65-75	60-70	50-60
4	FRAAS KIRILMA NOKTASI b, °C maks.	TS EN 12593	-8	-12	-15	-20
5	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C), % min.	Pr EN 13398	25	50	50	50
6	PARLAMA NOKTASI, °C min.	TS 123	200	200	200	200
7	ÖZGÜL AĞIRLIK	TS 1087	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1	1.0-1.1
8	DEPOLAMA STABİLİTESİ ^a	Pr EN 13399				
8,1	YUMUŞAMA NOKTASI FARKI °C maks.		4	4	4	4
8,2	PENETRASYON DEĞERİ FARKI °C maks.		5	5	8	8
9	İNCE FİLM HALİNDE ISITMA DENEYİ ^b (163°C, 5 saat)	TS 121				
9,1	KÜTLE KAYBI, % maks.		1	1	1	1
9,2	YUMUŞAMA NOKTASINDAKİ DEĞİŞİKLİK artma, °C maks. azalma, °C maks.	TS 120	7 2	7 2	7 2	7 2
9,3	PENETRASYONDAKİ DEĞİŞİKLİK azalma, % maks. artma, % maks.	TS 118	40 10	40 10	40 10	40 10
9,4	DÜKTİLİTE (25°C, 5 cm/dk) cm min.	TS 119	5	30	50	80
9,5	ELASTİK GERİ DÖNME (25°C), % min.	Pr EN 13398	25	50	50	50

a Modifiye Bitüm depolanmayacaksa, depolama stabilitesi deneyinin yapılmasına gerek yoktur.

b 4 ve 9 sıra nolu deney aletlerinin şantiye laboratuvarında bulundurulması ihtiyaridir, ancak İdare'nin istemesi durumunda söz konusu deneyler müteahhit tarafından yapılacak veya yaptırılacaktır.

5.3. Modifiye Bitümün Depolanması

Bitüm modifikasyonlarında kullanılan katkı malzemelerinin çoğu, normal bitüm depolama sıcaklıklarının üst sınırlarında olan yüksek sıcaklıklarda ve hava ile temas sonucu bozulurlar. Bozulmanın etkisi ile düktilite ve yumuşama noktası gibi özelliklerde azalma görülür. Bazı karışımlarda ise polimer ayrışması görülür [51]. Bu nedenle; merkezi bir plantte üretilen modifiye bitümün depolanması için, taşıma araçlarının modifiye bitümün ayrışmasını önleyecek sisteme sahip olmaları gerekir. Malzeme zengin karışım olarak şantiyeye getirilecekse, seyreltme işlemi için şantiyede gerekli ekipmanlar bulunmak zorundadır. Modifiye bitüm üreten firma tarafından, malzemenin şantiyedeki depolama koşulları ve depolama süresi belirtilmelidir [49].

Eğer modifiye bitüm şantiyede üretilecekse; farklı petrolerden üretilmiş, özellikleri farklı bitümler ayrı olarak depolanır. Katkı malzemesi de üretici firmanın tavsiye ettiği şekilde depolanır. Şantiyede üretilen malzemenin günlük olarak kullanılmaması durumunda depolanabilmesi için, uygun tanklar bulundurulur [49].

5.4. Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcıların Özelliklerinin Saptanmasında Kullanılan Standart Olmayan Deney Yöntemleri

Yol esnek üstyapılarında kullanılan katkılı ve/veya katkısız bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin saptanmasında kullanılan geleneksel yöntemlerle birlikte, yeni test yöntemleri de geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Bunlar Çizelge 5.3'de gösterilmektedir. Bu deneylerden bir bölümü aşağıda anlatılmıştır.

5.4.1. UV Floresan Mikroskopisi

Bu yöntem, polimer modifiye bitümlerin uyumluluğunu, görünümünü ve dağılımını incelemek için kullanılır. Mikroskobik seviyede 500'den 1000'e kadar olan büyütmelemlerde; polimer-bitüm karışımları arasında, polimer matriksinin devamlılığı olan ve içinde polimer parçalarının yayıldığı bağlayıcılar ile polimer

Çizelge 5.3. Standart olmayan test yöntemleri [52]

<p>1.Uyusabilirlik Depolama Stabilitesi Testleri</p> <p>1.1 Tüp Testi</p> <p>1.2 UV Flüoresan Mikroskopisi</p> <p>1.3 Kırma Testi</p> <p>2.Reolojik Testler</p> <p>2.1 Akma Davranışı Testileri</p> <p>A. Akma Testi</p> <p>B. Görünen Viskozite</p> <p>C. Mutlak Dinamik Viskozite, Aynı Akslı Silindir ile</p> <p>D. Çift Küre Yumuşama Noktası</p> <p>E. Düşen Küre Testi</p> <p>2.2 Elastik Özellik Testleri</p> <p>A. Elastik Geridönüş Testi, Düktilometre ile</p> <p>B. Elastik Geridönüş Testi, Silindirik Plaka Reometresi ile</p> <p>C. Elastik Geridönüş Testi, ARRB Elastometresi ile</p> <p>D. Elastik Geridönüş Testi, Kontrollü Germe Reometresi ile</p> <p>E. Elastik Geridönüş Testi, Hopler Kıvamölçeri ile</p> <p>F. Torsiyonel Geridönüş Testi</p> <p>2.3 Çekme gerilmesi testleri</p> <p>A. Sertlik ve gevreklik testi</p> <p>B. Sertlik ve gevreklik testi, Değiştirilmiş Yöntem</p> <p>C. Sertlik ve gevreklik testi, Boussad vd.'ne göre</p> <p>D. Ekstraksiyon Testi</p> <p>E. Zorlama Düktilitesi Testi</p> <p>F. Direkt Çekme Testi, Anderson ve Dongre'e göre</p> <p>2.4 Statik Mekanik Testler</p> <p>A. Sertlik Modülü, Kaydırma Plakası Reometresi ile</p> <p>B. Sertlik Modülü, Kiriş Eğme Reometresi ile</p> <p>2.5 Dinamik Mekanik Testler</p> <p>A. Test Prosedürü Jovanovic vd.'e göre</p> <p>B. Test Prosedürü De Ferrariis vd.'e göre</p> <p>C. Test Prosedürü Cavaliere vd.'e göre</p> <p>D. Mekanik Isı Analizi Test Yöntemi</p> <p>E. Kontrollü Germe Reometresi Test Yöntemi</p> <p>F. Balans Reometresi Test Yöntemi</p> <p>G. Makaslama Reometresi Test Yöntemi</p> <p>3.Adezyon/Kohezyon Testleri</p> <p>3.1 Vialit Test</p> <p>3.2 Kırılma Sıcaklığı</p> <p>3.3 Düşme Sıcaklığı</p> <p>3.4 İmalat Testi</p> <p>3.5 Kohezyon Testi, Vialit Pandül Tokmağı ile</p> <p>3.6 Kaynar Su Soyulması Testi</p> <p>4.Yaşlanma Testi</p> <p>4.1 Basınçlı Yaşlanma Kabı Testi</p> <p>4.2 Yaşlanma Testi BRRC'ye göre</p> <p>5.Kimyasal analiz Yöntemleri</p> <p>5.1 Spektropik Yöntemler</p> <p>A. İnfrared Spektroskopisi</p> <p>B. Nükleer Magnetik Rezonans Spektroskopisi</p> <p>5.2 Kromatografik Yöntemler</p> <p>A. Gaz Kromatografisi</p> <p>B. Yüksek Basınçlı Sıvı Kromatografisi</p> <p>C. İnce Tabaka Kromatografisi- Alev Ionizasyon Dedektörü</p> <p>D. Jel Nüfuzu Kromatografisi</p>
--

parçalarının dağıldığı bitüm matrisi dağılımı arasında farklılıklar görülmüştür. Yani polimer modifiye bağlayıcıların önemli ölçüde heterojen yapı gösterdikleri ortaya çıkmıştır. Bu yöntem termik şartlar altında meydana gelecek mikromorfolojik değişikliklerin gözlenmesinde kullanılır [52].

5.4.2. Elastik Geri Kazanım Deneyi

Düktilometre kullanılarak uygulanan Elastik Gerikazanım Deneyi değerleri farklı şekillerde tespit edilir.

- Alman prosedüründe, deney numunesi 25°C’de 20 cm’ye kadar uzatılır. Bir makas yardımı ile uzatılan numunenin ortasına bir diş atılır. Elastik gerikazanım değeri, iki yarıda bulunan dişlerin 30 dakikadaki ayrılma mesafesidir.
- Muncy tarafından uygulanan işlemde; düktilometre ve deney numunesi 10°C’de 85-95 dakika bekletilir. Deney numunesi 20 cm uzatılarak 5 dakika tutulur ve yarıdan kesilerek 60 dakika hiç dokunulmadan bırakılır. Uzamanın geri dönüşü yukarıda anlatıldığı şekilde hesaplanır.
- Öster tarafından uygulanan işlemde ise bitümlü numune düktilite kalıbının içerisinde, 30 dakika boyunca oda sıcaklığında bekletilir. Daha sonra 13°C’lik su banyosunda 30 dakika bekletilir. Numunenin taşan fazlalıkları kesilir ve 30 dakika daha aynı ortamda bırakılır. Numune düktilometre içine konularak 50 cm uzatılır. Yarısından kesildikten sonra numune 30 dakika olduğu gibi bırakılır ve dişler arasındaki mesafe ölçülür. Geri dönüş yüzde olarak hesaplanır [52].

5.4.3. Vialit Deneyi ile Adezyon Değerinin Hesaplanması

200 x 200 mm plaka üzerine 1 kg/m² olacak şekilde katkılı bitüm yayılır. Bu malzemenin üzerine 100 adet agrega serilir ve lastik silindir ile altı kez sıkıştırılır. Bu sıkıştırma her bir dik kenar yönünde üç kez tekrarlanır. Agregalı plakalar, oda sıcaklığında su içinde bırakılır. Serideki üç plaka sıkıştırıldıktan sonra deney 20

dakikada tamamlanır. Daha sonra plakalar üç ayaklı sehpa üzerine ters çevrilir ve 500 gr. ağırlığında bir çelik bilya, 50 cm yükseklikten plakaların üzerine bırakılır. Adezyon değeri aşağıdaki formüle göre tanımlanır:

$$100 - (a + d) = b + c - d \quad (5.1)$$

Burada;

a = Bağlayıcı ile tamamen kaplanmamış olan ve düşen agrega sayısı,

b = Bağlayıcı ile kısmen kaplanmış agrega sayısı,

c = Tamamen yapışmış agrega sayısı,

$d = b$ ve c 'nin toplamıdır [52].

5.4.4. Basınçla Yaşlanma Kabı Deneyi

Sahadaki uzun süre boyunca meydana gelen yaşlanmayı temsil eden bu deney, sadece sıcaklık etkilerini gösterir. Bu deneyde basınçla yaşlandırma kabı (PAV) kullanılır. 50 gr'lık bitüm numunesi, PAV içindeki hazneye yerleştirilir. Hazne deney sıcaklığına etüv içerisinde getirilir. Numuneleri içeren hazneler, tutucu içine yerleştirilerek sıcak kap içerisine konur. Kapalı olan bu kaba 2.07 MPa hava basıncı verilir. Deney sıcaklığı, bitümün kullanılacağı yerin iklim koşullarına göre belirlenir. Basınç ve sıcaklık 20 saat boyunca sabit tutulur. Kapalı kap, fırın içerisinden çıkarılır ve bitüm hazneleri 135°C'ye kadar fırın içerisinde 30 dakika tutularak hava kabarcıklarının çıkarılması sağlanır. Numuneler depolama kapları içerisine dökülerek diğer deney işlemleri için toplanır [52].

5.5. Bitümlü Karışımların Polimerler İle Modifikasyonu Hakkında Genel Bilgi

5.5.1. Polimerler

Polimerler; çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. “Poli” Latince bir sözcük olup çok sayıda anlamına gelir. Polimerler “monomer” denilen birimlerin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Buna basit bir örnek olarak “polistren” verilebilir. Polistren birçok stren monomerinin bir araya gelmesi ile oluşmuştur .

Polimerler birbirinin tekrarı olan ünitelerin kimyasal bileşimi ile oluşan makro moleküllerdir. Molekül ağırlıkları 70.000 – 80.000 hatta 200.000 – 300.000 olabilmektedir.

5.5.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler, özelliklerine göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadırlar. Bunlardan biri oluşum yöntemleridir ve iki türüdür:

- Ekleme polimerizasyonu : A monomerin “n” defa tekrarlanması ile oluşan polimerlerdir. Örnek olarak polietilen, polistren ve polibütadiyen gösterilebilir.
- Yoğunlaşma polimerizasyonu : Alkoller ve aminler gibi kimyasal reaksiyona giren grupları içeren monomerlerden oluşurlar (poliester, poliamidler, poliüretan) [48].

Polimerler, homopolimerler ve kopolimerler olmak üzere de ikiye ayrılır.

- Hepsi aynı kimyasal kompozisyonda tek monomerin tekrarı ile oluşanlara homopolimerler denir ve örnek olarak polistren ve polipropilenler gösterilebilir.
- Kopolimerler ise kimyasal kompozisyonu farklı iki ya da daha fazla monomerin kompozisyonundan oluşur. EVA ve SBS bu gruba girer [48].

Polimerleri fiziksel açıdan sınıflandırmak istersek aşağıdaki gibi iki gruba ayırabiliriz:

- Tek boyutlu veya lineer polimerler : Adından da anlaşılacağı gibi, monomerlerin lineer zincir halinde birleşmiş olduğu polimerler olup kimyasal ve reolojik özellikleri bakımından ikiye ayrılırlar. Birincisi termoplastik veya plastomerik olanlardır. Normal sıcaklıklarda katı haldedirler. Isıtılınca erirler. Eritme malzemenin yapısını ve özelliklerini etkilemez. İkincisi ise elastomerik olanlardır. Bunlar da elastisiteleri sayesinde gerilme ve sıcaklık altında meydana gelen deformasyonları geri kazanabilirler.
- Üç boyutlu polimerler : “Bunlarda monomerlerin, reaksiyona girebilen birkaç kimyasal fonksiyonu vardır. Molekül artık lineer değildir. Üç boyutlu bir şebeke oluşmuştur” [48].

Karışımın yapılacağı bölgenin iklim koşulları ve yolun trafiği dikkate alınarak, kaplamanın iyileştirilmek istenen özelliklerine uygun modifiye bitüm tipi seçilmelidir. Farklı modifiye edici katkıları kullanılarak, istenilen özellikleri sağlayan modifiye bitüm üretimi mümkün olabilmektedir.

Bitüm katkı maddelerinin genel bir sınıflandırması Çizelge 5.4’de gösterilmektedir.

Polimerlerin sınıflandırılması Çizelge 5.5’de görülmektedir.

“Elastomerler; bitümlü karışımın ağır yükler altında kırılmadan esneyebilmesini sağlayan polimer katkı maddeleridir. Elastomerler, bitümlü karışımlara daneli halde veya sıvı hidrokarbona çözelti halinde katılabilirler. Bitüm modifikasyonunda kullanılan başlıca elastomerlere, doğal kauçuk (NR), polibütadien (BR), isobütadien-isopren kauçuk (IIR), polikloropren (CR), stiren-bütadien kauçuk (SBR) ve stiren bütadien-stiren blok kopolimer (SBS) örnek olarak verilebilir” [53].

“Plastomerler (termoplastikler), mekanik açıdan bitümü sert hale getiren ve böylece bitümlü karışımın fazla esnemenen büyük yüklere dayanabilmesini sağlayan polimer katkı maddeleridir” [53].

Çizelge 5.4. Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması [54]

TİP	ÖRNEKLER	Modifiyerlerin Bitümün Kıvamına Genel Etkisi
1.Filller	Mineral Fillerler <ul style="list-style-type: none">• Taş tozu• Kireç• Portland çimentosu• Uçucu kül	Sertleştirme
2.Ekstender	Sülfür Lignin (odun özü)	Sertleştirme
3.Kauçuklar (elastomerler) <ul style="list-style-type: none">• Doğal lateks• Yapay lateks• Blok kopolimer• İşlenmiş kauçuk	Doğal kauçuk SBS SBR Dönüştürülmüş kauçuk	Sertleştirme
4.Plastikler (plastomerler)	Polietilen Polipropilen EVA PVC	Sertleştirme
5.Polimer kombinasyonları	3 ve 4'deki polimerlerin karışımları	
6.Fiberler	Doğal <ul style="list-style-type: none">• Asbest• Taş yünü Yapay <ul style="list-style-type: none">• Polipropilen• Polyester• Fiberglas	Sertleştirme
7.Oksidanlar	Manganez tuzu	Sertleştirme
8.Antioksidanlar	Kurşun karışımları Karbon Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9.Hidrokarbonlar	Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları	Yumuşatma veya Sertleştirme
10.Soyulma önleyiciler	Aminler Kireç	Yumuşatma

Plastomerler ısıtıldıklarında yumuşar ve akarlar. Soğutuldukları zaman ise tekrar sertleşirler.

Bitüm modifikasyonunda kullanılan başlıca plastomerler, polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorid (PVC), polistiren (PS) ve etilen vinil asetat (EVA) olarak verilebilir. Bu malzemeler bitümle karıştırıldıkları zaman, normal servis sıcaklıklarında bitümün viskozitesini ve sertliğini arttırırlar. Ancak EVA hariç bu gruptaki polimerler bitümün düşük sıcaklıktaki performansını iyileştirmemektedir. Bunun için düşük sıcaklıkların (<-10°C) olmadığı bölgelerde kullanılmaları uygun olur [53].

Çizelge 5.5. Polimerlerin sınıflandırılması [55]

KISALTMA	İSİM	SINIF
SBS	Stiren – Bütadiyen – Stiren	Elastomer
SBR	Stiren – Bütadiyen Kauçuk	Elastomer
EPDM	Dipolien – Propilen ve Etilen Terpolineri	Elastomer
NR	Tabii Kauçuk	Elastomer
PE	Polietilen	Plastomer
PP	Polipropilen	Plastomer
APP	Ataktik Polipropilen	Plastomer
IPP	İsotaktik Polipropilen	Plastomer
PVA	Polivinil Asetat	Plastomer
EVA	Etilen Vinil Asetat	Elastomer
EMA	Etilen Metil Akrilat	Plastomer
PIB	Poliisobutilen	Elastomer
PVC	Polivinil Klorür	Plastomer
PS	Polistiren	Plastomer
SIS	Stiren – İsopren - Stiren	Elastomer

Termosetler, erimeyen ve akmayan polimer katkı maddeleridir. Termosetlerde ısıtma işlemi, kimyasal bir reaksiyonun sonucunda ağlaşmaya ve geri dönülmez bir değişimin oluşmasına neden olmaktadır.

En önemli termosetler, alkidler, amino ve asitfonik reçineler, epoksiler, doymamış poliesterler ve poliüretanlardır. Bu polimerler bitümlü bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılabilmelerine rağmen, çok yüksek olan maliyetleri nedeniyle tercih edilmemektedirler [53].

En çok tercih edilen polimerler kauçuk, SBS, SBR (stiren bütadien kauçuk) ve EGA (etilen glisidil akrilit)'dir. Yıldırım, 2007 yılında yaptığı polimer modifiye asfalt binderleri konulu çalışmasında, sözü edilen polimerleri şu şekilde anlatmıştır [47]:

- Kauçuk : Genellikle kullanılmış otomobil lastiklerinden elde edilen kauçuğun karakteristikleri; kauçuğun tipine, asfalt kompozisyonuna, reaksiyon zamanına ve reaksiyon sıcaklığına bağlıdır. Doğal kauçuk ile modifiye edilen bitümlerde oluklanma mukavemetinin geliştiği ve düktilitenin arttığı görülmektedir. Fakat doğal kauçuk, bozunma ve oksijen absorpsiyonuna elverişlidir. Ayrıca yüksek moleküler ağırlığa sahip olması nedeni ile bitüm ile uyuşmada sorunlar

olmaktadır. Bitüm içinde yeterince dağılmasını sağlamak için yüksek sıcaklık ve uzun karıştırma süresi gerekmektedir. Bu durum da bitüm modifikasyonunda zorluklar yaşanmasına neden olmaktadır. Dönüştürülmüş kauçuklar ise yansıma çatlaklarının oluşmasını azaltarak durabilitenin artmasını sağlamaktadırlar [47].

- SBS (stiren bütadien stiren) : SBS, asfaltın elastisitesini arttıran bir blok kopolimerdir. Becker; ekonomik ve teknik sınırlamalara sahip olmasına rağmen SBS'in, bitüm modifikasyonu için en uygun polimer çeşidi olduğunu belirtmiştir [56]. Bazı yazarlara göre ise; SBS eklenmesi, bitümün düşük sıcaklıktaki esnekliğinin artmasına neden olurken, yüksek sıcaklıklarda mukavemette azalma olmaktadır. 2002 yılında, asfalt içindeki SBS'in davranışını daha iyi anlamak için elektron mikroskobu kullanılmıştır [57]. Bu gözlemler sonucunda binder ile SBS arasında kurulan bağın kompleks modülünü artırdığı ve böylece oluklanmaya karşı daha iyi bir mukavemetin olduğu görülmüştür. Florida Ulaştırma Departmanı'nın 2004 yılında yaptığı araştırmada ise; SBS modifikasyonunun mikro-çatlaklara karşı dayanımı arttırdığı görülürken, asfalt kaplamanın yaşlanması üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmüştür [58].
- SBR (stiren bütadien kauçuk) : SBR, bitüm modifikasyonunda oldukça yaygın olarak kullanılan bir katkı malzemesidir. Düşük sıcaklık duktilitesi ve elastik geridönüşü iyileştirirken, viskozitenin artmasına neden olmaktadır. İçerdiği kauçuk parçacıklarının aşırı şekilde küçük ve düzenli olması, karışım sırasında hızlı ve düzgün şekilde bitüme karışmasını sağlamaktadır. Becker'a göre; SBR polimerleri asfalt kaplamanın duktilitesini arttırmakta [56], kaplamanın düşük sıcaklıklarda daha esnek ve çatlaklara karşı mukavim olmasına neden olmaktadır. Ayrıca elastisiteyi arttırmakta, adezyonu ve kohezyonu geliştirmekte ve oksidasyonu azaltmaktadır [58].

- EGA (etilen glisidil akrilat) : bitüm ile kimyasal reaksiyona giren bu katkı maddesi, depolama ve taşıma sırasında meydana gelen ayrışmalara karşı dayanım kazandırmaktadır. 1995 yılında Witczak, Hafez ve Qi tarafından yapılan laboratuvar çalışması sonucunda, EGA katılan karışımın nemin zararlarına karşı daha iyi korunduğu görülmüştür [59].

5.5.3. Polimer Modifiye Bitümlerin Kullanım Alanları

Maliyet, özellikler, bitümle uyumluluk ve amaca uygunluk gibi faktörler gözönüne alındığında polimerlerin sadece çok sınırlı bir kısmı bitüm modifikasyonunda kullanılabilir. Modifiye bitüm üretimi önemli bir tesis gerektirmekte, üretim ve şantiyeye taşıma sıcak yapılmalıdır. Stoklamak gerekirse tanklarda sıcak olarak muhafaza edilmekte (5-7 gün kadar) ve homojenliğinin bozulmaması için ağır ağır karıştırılması gerekmektedir [48].

Tesisten çıkışta, saf bitüme göre yaklaşık iki kat pahalı olan modifiye bitüm ancak özel amaçlı olarak kullanılmaktadır: Geçirimli asfaltta, yüksek deformasyona maruz yol kaplamalarında, beton kaplamalı otoyolların üzerine sathi kaplama yapımında, taşıtların sık sık fren yapmak zorunda oldukları kesimlerde (rampalar, kavşaklar vb.), ince serilebilen aşınma tabakalarında, %5'den az boşluk içeren yoğun bitümlü karışımlarda, modifiye bitümle elde edilen hizmet ömrü uzatımının fayda/maliyet açısından avantajlı olduğu ortaya konulamamıştır [55].

Başka bir deyişle yoğun klasik asfalt betonunda, saf bitüm yerine modifiye bitüm kullanmak sorunları çözmeye yetmeyecektir. Özellikle sıcaklığın artı ve eksi yönde aşınma tabakasından 5-6°C farklı olduğu ve aşınma tabakası tarafından korunan binder tabakasında modifiye bitüm kullanmak gereksizdir. Gerektiğinde çok daha ucuz ve pratik katkılarla, bu tabakada stabilite artışı sağlamak mümkündür [48].

Yukarıda verilen sınıflandırma göz önüne alındığında iki tip polimer kullanılmaktadır: Plastomerler ve elastomerler. Aşağıda bu polimerlere ait kullanım alanları verilmektedir.

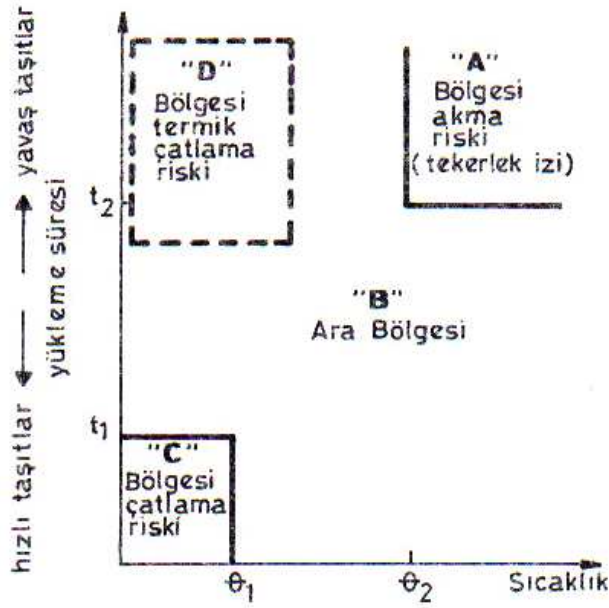
Plastomerler :

- Sathi kaplama amaçlı, saf bitüm ya da katbek ile yapılan emülsiyonların modifikasyonunda,
- Geçirimli asfaltta (yüksek boşluk oranı, düşük temas noktaları nedeni ile),
- İnce veya çok ince (1.5-4 cm) serilebilen aşınma tabakalarında (sıcak karışım),
- Soğuk karışımlarda (emülsiyon halinde),
- Çok deforme olabilen alt tabakalar üzerindeki sathi tabakalarında,
- Su yalıtım örtülerinde ve yerinde sıcak serme yalıtım karışımlarında kullanılmaktadırlar [55].

Elastomerler :

- Sathi kaplama amaçlı, saf bitüm ya da katbek ile yapılan emülsiyonların modifikasyonunda,
- Yüksek trafikli yollarda sathi kaplama yapımında,
- Kalın sathi kaplama yapımında,
- Su yalıtımı veya yansıma çatlaklarını önleme amaçlı gerilme emici ara membranlarda,
- Geçirimli asfaltta,
- İnce ve çok ince serilebilen aşınma tabakalarında,
- İnce serilebilen aşınma tabakalarının altında yapıştırma tabakası olarak,
- Su yalıtım sistemlerinde kullanılmaktadırlar [55].

Daha önce bahsedildiği gibi bitüm ve bitümlü karışımlar viskoelastik malzemelerdir. Trafik altında gösterdikleri davranış, yükleme hızının ve sıcaklığın fonksiyonudur. Buna göre bitümün çalışma bölgeleri aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi dörde ayrılabilir [48].



Şekil 5.1. Bitümün çalışma bölgeleri [60]

A bölgesinde; sıcaklık yüksek ve yükleme süresi uzundur. Bu bölgede akma yani oluklanma riski büyüktür.

B bölgesinde; ya sıcaklık yüksek ve yükleme süresi kısa, ya sıcaklık düşük ve yükleme süresi uzun ya da her ikisi de orta derecededir. Bu üç hal yaklaşık olarak eşdeğerdir. Bu bölge bitümün normal çalışma bölgesidir. Kaplamanın bozulma ihtimali zayıftır.

C bölgesinde; sıcaklıklar düşük ve yükleme süreleri kısadır. Bu bölgede çatlama riski yüksektir.

D bölgesi her ülkede bulunmayabilir. Burada sıcaklık birkaç saat içinde önemli ölçüde düşmekte ve uzun yükleme süresine eşdeğer gerilmelerin doğmasına neden olmaktadır. Bu bölgede termik çatlama riski önemli ölçüdedir [60].

Dolayısıyla elastomer ya da plastomer modifiye bitüm ya da karışım modifikasyonu katkıları seçilirken, yol ya da yol kesiminin grafiğın hangi bölgesine düştüğü göz önüne alınmalıdır. Normal olarak, uygun saf bitüm ve karışım dizaynı kullanılıyorsa, B bölgesinde modifiye bitüme ihtiyaç olmadığı unutulmamalıdır. Modifiye bitüm ve katkıları A, C ve D bölgelerinde kullanılmalıdır [48].

5.5.4. Bitümlerin Polimer Modifikasyonu

Bitüme polimer ilavesinin amacı, bitümün viskoelastik davranışını değiştirmek ve özellikle, düşük sıcaklıklardaki davranışına zarar vermeden, sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmaktır [55]. Çünkü bitümün, viskoelastik ve termoplastik davranış göstermesi; bitümü düşük sıcaklıklarda kırılğan, yüksek sıcaklıklarda ise sıvı hale getirir [61].

Modifiye bitüm yol kaplamalarının yorulma ve oluklanmaya karşı mukavemetini arttırmaktadır.

Modifikasyonun, bitüm ve bitümlü karışımlar üzerindeki faydalı etkileri şunlardır;

- Bitümün servis sıcaklıkları aralığı genişlemektedir. Yumuşama noktası yükselmekte ve Fraas kırılğanlık noktası düşmektedir.
- Bitümün sıcaklık değişimlerine hassasiyeti azalmaktadır. (Penetrasyon İndisi azalmaktadır)
- Bitümün reolojik ve mekanik özellikleri değişmektedir. Geniş sıcaklık ve yükleme hızı aralıklarında kalıcı deformasyona ve kırılmaya karşı mukavemet artmaktadır.
- Tekrarlı yük altında yorulma mukavemeti artmaktadır.
- Yaşlanma yavaşlamaktadır. Çünkü modifiye bitümün yüksek viskositesi agrega etrafındaki bitüm filminin kalınlaşmasını sağlamaktadır [61].

Polimer modifiye bitümün kullanım alanları;

- Yansıma çatlaklarının önlenmesi
- Tekerlek izi oluşumuna karşı direnç
- Yorulmaya karşı direnç
- Soyulmaya karşı direnç
- Yüzey pürüzlülüğünün sağlanması
- Yapım mevsiminin uzatılması
- Absorpsiyonun minimize edilmesi
- Tabaka alanlarının azaltılması
- Su yalıtımının sağlanması

- Açık gradasyonlu asfaltın betona yapıştırılması olarak sıralanabilir [61].

Polimerler, kendi ağırlıklarının 9 misline kadar bitüm bileşenlerini içine katarak hacim yönünden 10 misline kadar çıkabilirler. Bundan dolayı bitüm içinde polimer malzemenin çok iyi şekilde ve homojen olarak karıştırılması gerekmektedir [61].

5.5.5. Bitümün Modifiye Yöntemleri

Bitümün modifiye işlemleri genel olarak iki şekilde yapılabilmektedir. Bunlar;

1. Katkı maddesi bitüme katılır ve modifiye bitüm elde edilir (ıslak karışım).
2. Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan bitümlü sıcak karışıma katılarak modifiye karışım elde edilir (kuru karışım).

Bitümlerin modifikasyon tipleri Çizelge 5.16'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. Bitüm modifikasyon tipleri [54]

MODİFİKASYON TIPLERİ	ÖRNEKLER
1. Polimer olmayan katkı ile modifikasyon <ul style="list-style-type: none"> • Fillerler • Soyulma önleyici katkıları • Ekstenderler • Antioksidan tipleri • Organo-metal bileşimleri • Diğerleri 	Kil, karbon siyahı, uçucu kül Organik aminler ve amidler Lignin, sülfür Çinko antioksidanlar, kurşun antioksidanlar, fenolikler, aminler Organo manganez bileşimleri Organo karbon bileşimleri
2. Polimer modifikasyon <ol style="list-style-type: none"> a) Plastikler <ul style="list-style-type: none"> • Termoplastikler • Termosetler b) Elastomerler <ul style="list-style-type: none"> • Doğal kauçuklar • Yapay kauçuklar c) İşlenmiş kauçuklar d) Fiberler 	Polietilen, polipropilen, polivinil klorid, polistren, EVA Epoksi reçineler SBR, SBS, etilen-proplendien harpolimer, isobüten-isopren kopolimer Polyester fiberler, polipropilen fiberler
3. Kimyasal reaksiyon modifikasyonu	Katkı reaksiyonu (bitüm+monomer) volkanizasyon (bitüm+sülfür), nitrasyon reaksiyonu (bitüm+nitrik asit)

5.5.6. Polipropilen hakkında genel bilgiler

a) Polipropilen'in geçmişi

“Suni reçinelerin keşfinden önce, plastik maddeler yalnız tabii maddelerden hazırlanıyor ve orta kalitede ürünler elde edilebiliyordu. 1840'ta kauçuğun kükürtle işlenmesi, plastik maddelerin daha üstün nitelikler kazanmasını sağlamıştır. 1869'da nitrik asidin selülozla tepkimeye girmesiyle elde edilen ve temel maddesi nitroselüloz olan selüloit ve 1879'da kazeinden çıkarılan galalit sınai olarak üretilmiştir. Reçinelerin ve zamkların molekül ağırlıklarının çok fazla olduğu anlaşılınca, kimyacılar bu tür molekülleri suni olarak meydana getirmeye çalışmıştır. 1909'da Baekeland, temel maddesi fenol-formaldehit olan ilk organik plastik olan bakaliti bulmuştur. 1915'te, selüloitten daha zor tutuşabilen selüloz asetat üretimi başarılmıştır. Daha sonra ard arda, üre-formaldehit (1921), polimetilmetakrilat (1928), polistiren (1930), vinil asetat ve vinil poliklorür (1932), bütadien kauçuğu, melamin-formaldehit, poliamitler, poliüretanlar (1938), yoğunluğu az olan polietilen (1940), viniliden poliklorür (1941), nitrik akrilik ve florlu etilen bileşikleri (1943), silikonlar (1945), yoğunluğu fazla olan polietilen (1954), polipropilen ve polikarbonatlar (1956) ortaya çıkmıştır. Başlangıçta sadece, tabii maddelerin benzerleri olan suni maddeler elde edilmeye çalışılıyordu. Daha sonraki yıllarda, elde edilen bu reçinelerin tabii maddelerden daha üstün nitelikler taşıdığı ve sentetik dokuma elyaflarının üretimiyle boya ve vernik yapımı gibi daha önce düşünülmeyen uygulamalara yol açtığı fark edilmiştir. Plastik sanayiinde kullanılan hammaddeler, inorganik maddelerden, bitkilerden ve az miktarda da hayvanlardan çıkarılır. En önemli temel inorganik maddeler kireçtaşı, tuz, maden kömürü, ham petrol ve yanabilen tabii gazlardır” [62].

b) Polipropilen'in üretimi

1954 yılında İspanyol bilimadamı Natta tarafından üretilen polipropilenin ticari olarak üretimine ilk kez 1957 yılında başlanmıştır. Ve yararlarının fazlalığı nedeniyle de üretiminde hızlı bir artış meydana gelmiştir.

Polipropilen üretimi 3 tip işlemle gerçekleşir [63];

- Gaz faz üretim sistemi
- Hacim faz üretim sistemi
- Sıvı-katı faz üretim sistemi

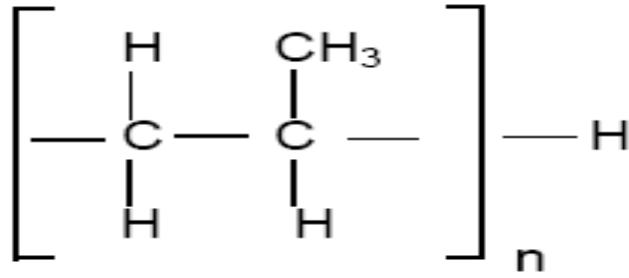
“Propilen petrolün işlenmesi sırasında çıkan bir yan üründür. Propilen, 10 atmosferlik bir basınçta ve 80°C'den düşük bir ısıda polimerize olur. Oksijen, polimer oksitlenip bozulduğu için işlem dışı bırakılmalıdır. Maksimum polimer uzunluğunu elde etmek için sıcaklığın düşük tutulması gerekmektedir. Özel katalizörler monomerlerin yerini kontrol eder. Bunun sonucu olarak, stereospesifik polimerizasyon meydana gelir ve metil gruplarının hepsi polimerin bir tarafına toplanır. Elyafı hazırlamak için birden fazla polimer kullanılır” [63].

“Polipropilen varlığını elyaf ilave maddelerine, stabilize edicilere ve pigmentlere borçludur. Bunlar polipropilenin orijinalindeki yetersizlikleri giderir. Stabilize ediciler polipropilene uzun vadeli termal stabilizasyon ve ultraviyole ışınlarla karşı stabilizasyon sağlar. Stabilize edicilerle istenmeyen sarılaşma gibi yan etkilerin giderilmesini sağlar. Belirli ilave maddeler üreticinin isteğine göre çeşitli oranlarda kullanılabilir. İlave maddelerin çeşidi çoktur. Bütün ilave maddeler aynı zamanda seçilir. Çünkü bu maddeler birbirini etkileyerek işlerler. Polipropilen elyafı döndürmek suretiyle eritilirler. Filamentler döndürücüden çıkarken dışarıda ya da suda soğutulurlar. Naylon veya poliesterin aksine, polipropilen çok hızlı bir şekilde kristalize olur. Suyu batırılmayan kısımlar yüksek miktarda kristalize olur” [63].

c) Polipropilen'in yapısı

Monomer propilenin atomik yapısı $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$ şeklindedir. Ziegler-Natta katalizörleri olarak bilinen TiCl_3 katalizörü etkisinde aradaki çift bağ

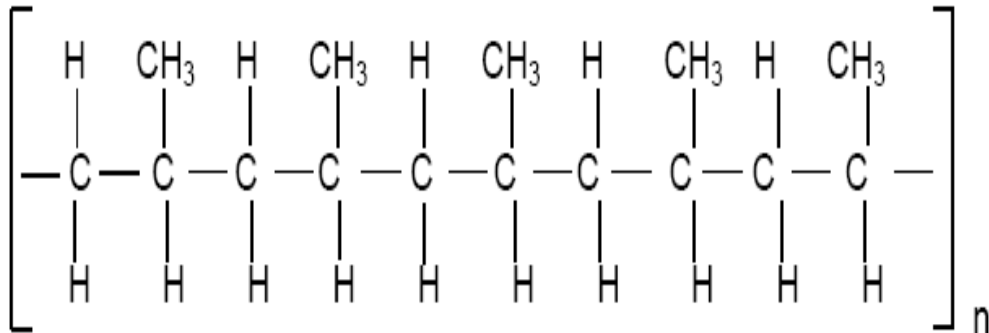
açılarak açık kalan uçlara CH₃ ve H atomlarının bağlanması sonucu polimer oluşur. Oluşan zincirin sonuna H atomu bağlandığı zaman zincir oluşumu sona erer. Buradan da anlaşılabilir gibi polimerizasyon ortamında fazla hidrojen varsa polimer zincir uzunluğu kısa olur. Hidrojen azaldıkça oluşan zincir uzun olur. Zincir uzadıkça “erime akış oranı” azalır. Erime akış oranı polimerin diğer bir anlamda viskozitesidir. Bu değer arttıkça polipropilen yumuşar ve elastikiyeti artar [64].



Şekil 5.2. Polipropilen'in yapısında bulunan atomların dizilişi [64]

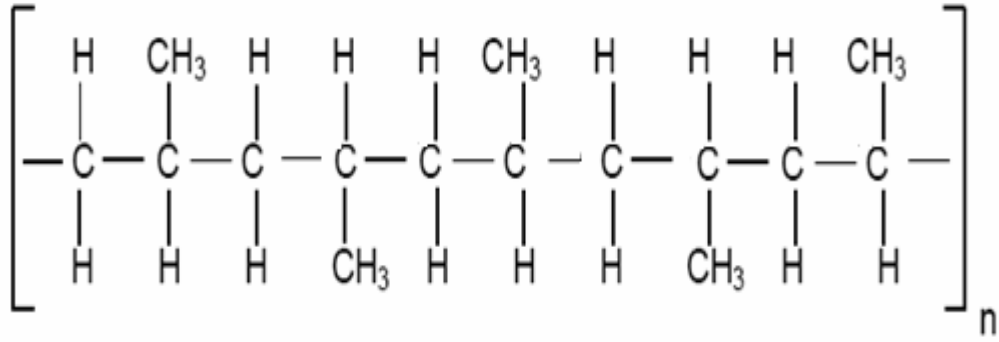
Polipropilenin yapısındaki atomlar Şekil 5.2'de gösterildiği gibi dizili 5000 ile 10000 üniteden oluşur. Polimerizasyon esnasında üç tür polimer oluşur. Bu polimerler;

İzotaktik polimer: Tüm CH₃ molekülleri üç boyutlu düzeyde tek tarafa sıralanır. Alt düzlemde H atomları bulunur. Kristal yapıda bir polimerdir. İzotaktik polimer atomların dizilişi Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



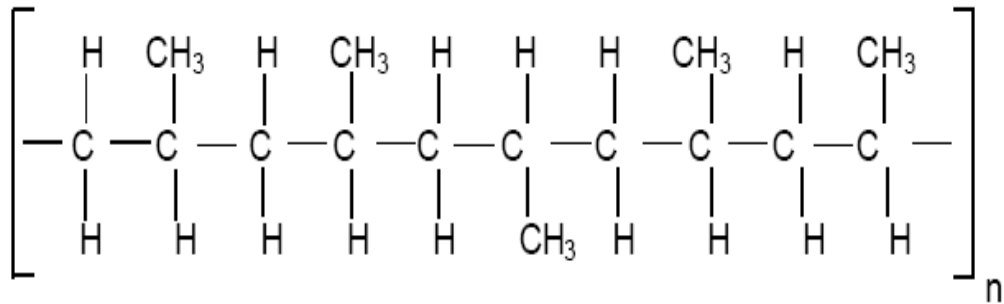
Şekil 5.3. İzotaktik polimer atomlarının dizilişi [64]

Sindiyotaktik polimer: CH₃ molekülleri üç boyutlu düzeyde hem üst düzlemde hem de alt düzlemde yer alır. Aralarda ise H atomları bulunur. Bu da kristal yapıda bir polimerdir. Sindiyotaktik polimer atomların dizilişi Şekil 5.4’de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Sindiyotaktik polimer atomlarının dizilişi [64]

Ataktik polimer: CH₃ molekülleri üç boyutlu düzeyde her iki tarafta da gelişigüzel yerleşmiştir. Amorf yapıda bir polimerdir. Heptan ve heksanda çözünür. Ataktik polimer atomların dizilişi Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Ataktik polimer atomlarının dizilişi [64]

Polimerizasyon sırasında Ziegler-Natta katalizörlerinin aktivitesine bağlı olarak bu üç tür polimer de oluşur. Ortalama bir değer verilecek olursa, %93 civarında izotaktik polimer, %5.5 civarında sindiyotaktik polimer ve %1.5 civarında da ataktik polimer oluşur [64].

d) Polipropilen'in özellikleri

“En yaygın ticari polipropilenin kristal yapısı, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) arasında bir seviyeye sahiptir. Young's modülü de (elastisite modülü) orta seviyededir. Bununla beraber, LDPE'den daha az sert ve HDPE'den çok daha az gevrek. Bu özellik, polipropilenin plastiklerin yerine kullanılmasına izin verir” [65].

Polipropilen, yorulmaya karşı çok iyi direnç gösterir. Düşük maliyetlidir ve iyi bir darbe dayanımına sahiptir. Sürtünme katsayısı düşük olup, çok iyi elektrik yalıtımı sağlar. Kimyasal direnci iyidir. Tüm termoplastik işleme proseslerine uygundur [66].

Polipropilenin avantajlarının yanı sıra UV ışın dayanımının az olması, yüksek termal genleşme göstermesi gibi dezavantajları da vardır. Bunlara ek olarak dış hava şartlarına dayanımının az olması ve oksitlenmeye açık olması da eklenebilir.

Polipropilen fiberler 160-170 °C'de erimelerine rağmen tüm mekanik özelliklerini korurlar [67].

Birçok bükülmeden sonra dahi sertliğini korur. Antioksidan katılmadığı zaman ısı ve ışığın etkisi ile bozulur. Kolay bir şekilde renklendirilemez. İyi bir elektriksel dirence sahiptir. Düşük su absorpsiyonu ve geçirgenliği vardır. Eksi 9.4°C'nin altında kırılma faza geçer. 60°C'ye kadar kuvvetli asitlere ve bazlara dayanıklıdır. Uygun şekilde modifiye edildiğinde iyi bir ısı dayanımına sahiptir. [68].

Çizelge 5.7'de ise bu çalışmadaki deneyler boyunca kullanılan polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri görülmektedir.

Çizelge 5.7. Çalışmadaki deneyler boyunca kullanılan polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri
[69]

Karakteristikler	Değer	Standart
Safılık	100% Polipropilen	-
Renk	Saydam	-
Uzunluk, mm	3 - 50	-
Erime sıcaklığı, °C	160	-
Özgül ağırlık, kg/m ³	910	ASTM D-792
Yanma noktası, °C	590	-
Kırılma geçiş sıcaklığı, °C	-18	-
% 40'lık NaOH solüsyonunda 20°C'da 1000 saat kaldıktan sonra mukavemetin yüzdesi cinsinden alkali rezistansı	99.5	-
Su emme, %	0.01-0.02	ASTM D-570
20 °C ve % 65 bağıl nemlilikte nem muhafazası	< 0.1%	-
Kopma dayanımı, MPa	31-41	ASTM D-638
Uzama, %	≥ 33	ASTM D-638
Kopmada uzama, %	100-600	ASTM D-638
Çekme dayanımı, MPa	31-37	ASTM D-638
Basınç dayanımı, MPa	37-55	ASTM D-695
Eğilme mukavemeti, MPa	41-55	ASTM D-790
Çekme modülü, MPa	1137-1551	ASTM D-638
Eğilme modülü, 23 °C, MPa	1172-1723	ASTM D-790
Sertlik (Rockwell)	R80-R102	ASTM D-785
Isıl genleşme katsayısı, lineer, m/m/°C	0.031-0.039	ASTM D-696

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin şartname limitleri, yapılan deneyler ve bu deneyler sonucu elde edilen veriler sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

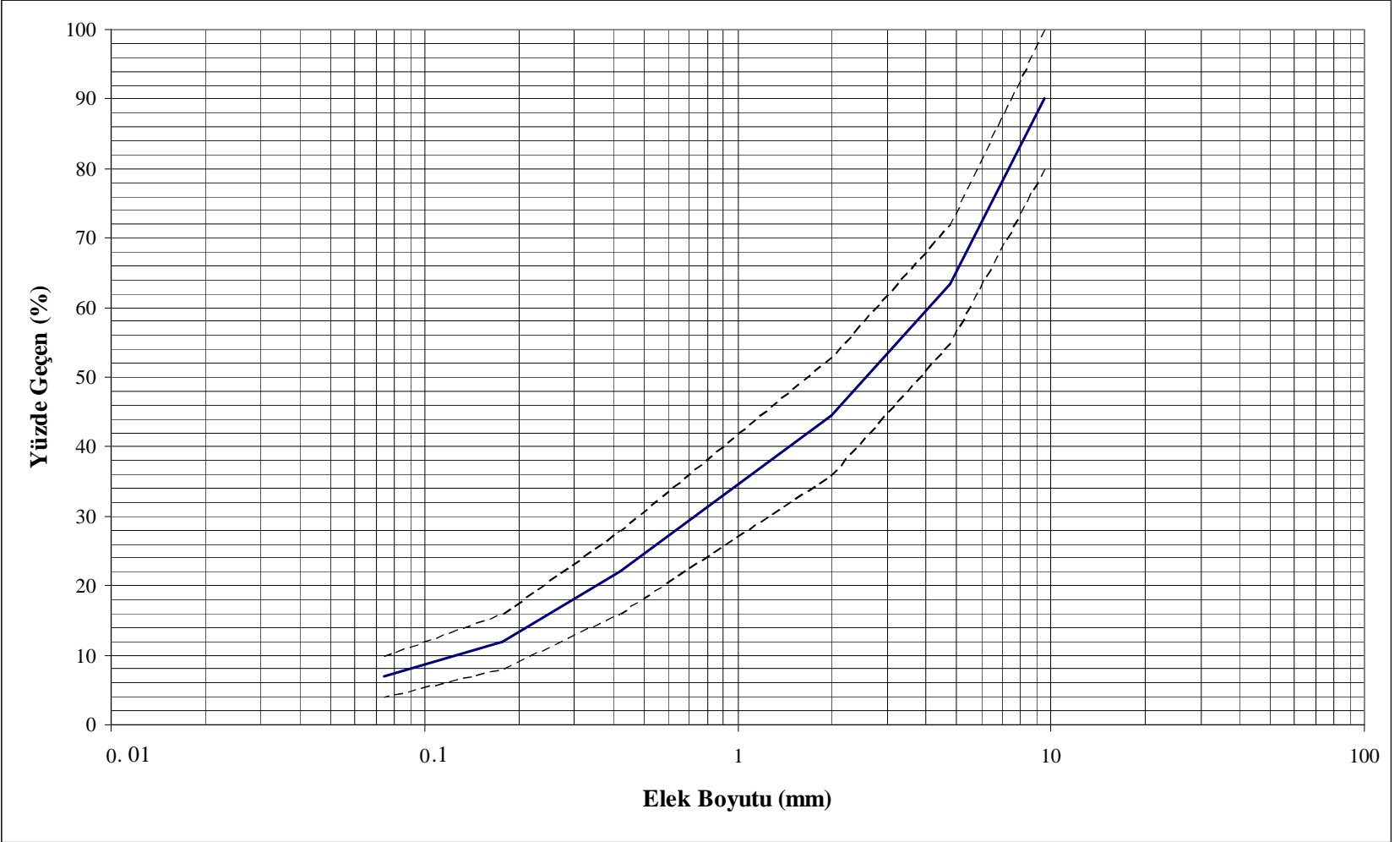
6.1. Agregası

Laboratuvar çalışmaları sırasında kullanılan kalker bazlı kırmataş agregası, Eskişehir Güçlü Hazır Beton santralinden elde edilmiştir. Deneyler için hazırlanan karışımlarda, Karayolu Teknik Şartnamesi'nde belirtilen karışım tiplerinden "Aşınma Tabakası Tip-2" gradasyonu kullanılmıştır (Çizelge 6.1) [70]. Tip-2 agregası gradasyonuna ait granülometre eğrisi Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Aşınma tabakası Tip-2 için agregası gradasyonu ve şartname limitleri [65]

Elek Boyutu (mm)	Şartname Limitleri	% Geçen	% Kalan	Ağırlık (gr)
12.7	100	0	0	
9.52	80-100	90.0	10.0	110.0
4.76	55-72	63.5	26.5	291.5
2.00	36-53	44.5	19.0	209.0
0.42	16-28	22.0	22.5	247.5
0.177	8-16	12.0	10.0	110.0
0.074	4-10	7.0	5.0	55.0
Pan			7.0	77.0

Yukarıdaki tablodan da görülebileceği üzere standart bir Marshall numunesi hazırlamak için 1100 gr agregası kullanılmıştır. Marshall ve sünme deneyleri sonuçlarını yorumlamada yardımcı olması için agregası karışımının özgül ağırlığı bulunmuştur. "Bir agregasının özgül ağırlığı, o agregasının birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 20-25°C'deki suyun ağırlığına oranıdır" [71]. Agregası karışımının özgül ağırlığını elde etmek için kaba agregası, ince agregası ve fillere ait özgül ağırlık değerlerini bilmek gerekir.



Şekil 6.1. Agregaların granulometri eğrisi [70]

6.1.1. Kaba Agregada Su Absorpsiyonu ve Özgül Ağırlığının Tayini

Bu deney 4.75 mm (no.4) elek üzerinde kalan tane boyutundaki agregalara uygulanır. Kaba agregadan 2 kg ağırlığında numune alınır. Numune, agrega gradasyonunu temsil etmek zorundadır. Deney numunesi, yıkanarak bir tepsi içine konur ve 24 saat boyunca kurutulur. Emici özelliği olan bir bez üzerinde doygun-yüzey kuru hale gelinceye kadar kurutulan numune tartılır. Numune, tel sepet içinde, $25\pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $977\pm 2 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip suya daldırılır ve tartılır. Tartım sonrası tel sepetten çıkarılıp bir tepsiye konulan agrega, $110\pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta etüvde kurutulur. Sabit kütleye ulaşan agrega 1-3 saat kadar soğutulur. Kuru numune tartılır ve tartım kaydedilir [71]. Kaba agregaya ait özgül ağırlık sonuçları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{A}{B-C} \quad (6.1)$$

$$\text{Yaş Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{B}{B-C} \quad (6.2)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A}{A-C} \quad (6.3)$$

$$\text{Absorpsiyon \%’i} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (6.4)$$

Burada;

A = Kuru malzemenin havadaki ağırlığı, gr

B = Doygun yüzey kuru malzemenin ağırlığı, gr

C = Malzemenin sudaki ağırlığı, gr

Çizelge 6.2. Kaba agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi

A	Kuru malzemenin havadaki ağırlığı, gr	1987.7
B	Doygun yüzey kuru malzemenin ağırlığı, gr	1994.1
C	Sudaki ağırlık, gr	1259.3
Hacim özgül ağırlık, kg/m³		2705
Doygun yüzey kuru özgül ağırlık, kg/m³		2714
Zahiri özgül ağırlık, kg/m³		2729
Absorpsiyon yüzdesi, %		0.322
Standart		ASTM C 127-04

6.1.2. İnce Agrega Su Absorpsiyonu ve Özgül Ağırlığının Tayini

4.75 mm ile 0.075 mm arasındaki elekler arasında kalan malzemedan, agrega gradasyonunu temsil edecek şekilde 1000 gr numune alınır. 200 no'lu elekte yıkanan malzeme 24 saat boyunca tepsi içinde bekletilir. 24 saat sonunda numune, malzeme kaybına neden olmadan süzülür. Tepsi içindeki numune, sıcak hava akımına tutulur.

Numunenin doymun-yüzey kuru hale geldiği, koni metodu ile tespit edilir. Bu metod, bir koni ve bir sıkıştırma çubuğu ile uygulanır. Numune üç seferde koninin içine yerleştirilir. Her seferde 25 vuruş yapılır. Vuruşlar, malzemenin 5 mm üzerinden yapılır. Sıkıştırma işlemi sonunda koni kaldırılır. Eğer numune doymun-yüzey kuru hale gelmişse, serbest şekilde dökülür. Çökme yoksa kurutma işlemine devam edilir.

Doygun-yüzey kuru hale gelinceye kadar kurutulan numunenin 500 gr'lık kısmı piknometre içine konur ve piknometre ile tartılır. Numune yüksekliğini geçinceye kadar içine su doldurulan piknometre, iki yönde döndürülerek çalkalanır. Hava kabarcıkları çıkmayana kadar işleme devam edilir. İşlem sonunda işaret çizgisine kadar piknometreye su ilave edilir. $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlı su banyosuna yerleştirilir. Su ve malzemenin 25°C 'ye ulaşmasının ardından piknometre, banyodan çıkarılır. Suyun işaret çizgisinde olup olmadığı kontrol edilir ve hemen tartılır. Piknometredeki numune tepsiyeye konulup $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulur. Etüvden çıkarılıp oda sıcaklığında soğutulan numunenin kuru numune ağırlığı tartılır.

$$\text{Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{E}{B+C-A-D} \quad (6.5)$$

$$\text{Yaş Hacim Özgül Ağırlık} = \frac{C-A}{B+C-A-D} \quad (6.6)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{E}{B+E-D} \quad (6.7)$$

$$\text{Absorpsiyon \% 'si} = \frac{C-A-E}{E} \times 100 \quad (6.8)$$

Burada;

A = Piknometre ağırlığı, gr

B = Piknometre+su ağırlığı, gr

C = Piknometre+doygun yüzey kuru numune ağırlığı, gr

D = Piknometre+su+numune ağırlığı, gr

E = Kuru numune ağırlığı, gr

Çizelge 6.3. İnce agreganın özgül ağırlık değerleri ve su absorpsiyonu yüzdesi

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
A	Piknometre ağırlığı, gr	175.20	180.90	
B	Piknometre+su ağırlığı, gr	1168.60	1174.00	
C	Piknometre+doygun yüzey kuru numune ağırlığı, gr	657.30	635.50	
D	Piknometre+su+numune ağırlığı, gr	1473.30	1461.30	
E	Kuru numune ağırlığı, gr	476.80	448.50	
	Hacim özgül ağırlık, kg/m³	2688	2681	2685
	Doygun yüzey kuru özgül ağırlık, kg/m³	2717	2717	2717
	Zahiri özgül ağırlık, kg/m³	2770	2782	2776
	Absorpsiyon yüzdesi, %	1.112	1.360	1.236
	Standart	ASTM C 128-04		

6.1.3. Mineral Filler Zahiri Özgül Ağırlığının Tayini

110±5°C’de en az 4 saat kurutulan numune, soğutulduktan sonra özgül ağırlık şişesine, şişenin üçte biri dolacak şekilde boşaltılır. Şişe, kuru ve temiz kapakla kapatılır ve tartılır. Daha sonra şişenin yarısına kadar su doldurulur. Ağzı kapatılmış şişe birkaç kez tezgaha vurularak, en az 5 dakika bir vakum desikatörle içerisinde bulunan hava çıkartılır. Hava kabarcıkları tamamen bitince ağzına kadar su ile doldurulan şişe 25±1°C’lik su banyosunda en az 60 dakika bekletilir. İşlem sonunda banyodan çıkarılan şişe kurutulup tartılır.

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A}{A+B-C} \quad (6.9)$$

Burada;

A = Kuru numune ağırlığı, gr

B = Piknometre+su ağırlığı, gr

C = Piknometre+su+numune ağırlığı, gr

Çizelge 6.4. Mineral fillerin zahiri özgül ağırlık değeri

		Numune 1	Numune 2	Ortalama
A	Kuru numune ağırlığı, gr	31.032	29.216	
B	Piknometre+su ağırlığı, gr	139.736	138.549	
C	Piknometre+su+numune ağırlığı, gr	159.627	157.275	
	Zahiri özgül ağırlık, kg/m³	2785	2785	2785
	Standart	ASTM D 854-83		

6.1.4. Los Angeles Deney Metodu İle Aşınma Direncinin Tayini

14 mm elekten geçen ve 10 mm elekte kalan agregalara uygulanan bu deneyde 5000±5 gr agrega numunesi, dönen tamburda çelik bilyalar ile birlikte döndürülür. TS 2162 ve EN 10025’de belirtilen S 275 tipine uygun, 12 mm kalınlıklı çelik levhadan aşırı gerilme uygulanmadan şekillendirilmiş ve önemli bir deformasyon olmadan kaynaklanmış boş tamburun her iki ucu kapalı

olmalıdır. Tamburun iç çapı 711 ± 5 mm ve iç uzunluğu 508 ± 5 mm olmalıdır. Deney sırasında kullanılan çelik bilyaların her biri 400 gr ile 445 gr kütleyle sahip olmalı ve çapları 45 mm ile 49 mm arasında değişmelidir.

Tane büyüklüğü 10 mm ile 14 mm arasında değişen ve en az 15 kg'lık kütleyle sahip numune yıkanır ve sabit kütleyle ulaşıncaya kadar $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlı etüvde kurutulur. Daha sonra oda sıcaklığında soğutulan numunenin içinden 5000 ± 5 gr kütleyle sahip deney kısmı alınır.

Numune yüklenmeden önce tamburun içinin temiz olup olmadığı kontrol edilir. Makinaya önce bilyalar, sonra deney numunesi konulur. İç yüzeyin silindirik kalması sağlanacak şekilde seyyar bir kapak kullanılarak kapatılan tambur, 31 devir/dakika ile 33 devir/dakika arasında sabit hızda 500 devir döndürülür. 500 devir sonunda agrega, malzeme kaybı olmadan bir tepsiye alınır. Tepsideki malzeme 1.6 mm'lik elek kullanılarak yıkanır ve elenir. Eleğin üstünde kalan kısım $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde kurutulur. Sabit kütleyle ulaşan numune, oda sıcaklığında soğumaya bırakılır ve tartılır [72].

Los Angeles katsayısı (LA) aşağıdaki eşitlikten hesaplanır:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (6.10)$$

Burada;

$m = 1.6$ mm'lik elek üzerinde kalan fraksiyon, gr

1.6 mm'lik elek üzerinde kalan numune, $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de etüvde kurutulmuş ve daha sonra tartılmıştır. Tartım sonucunda m değeri, 3518.6 olarak bulunmuştur. Buna göre deneylerde kullanılmış olan agrega tipi için Los Angeles katsayısı (LA);

Çizelge 6.5. Los Angeles katsayısı

m	1.6 mm'lik elek üzerinde kalan fraksiyon, gr	3518.6
LA	Los Angeles katsayısı	30
Standart		ASTM C 535-03e1

6.2. Polipropilen

Marshall numunelerinin hazırlanmasında M-03 tipi polipropilen kullanılmıştır. Burada M tipi polipropilen fiberlerin imalatından bahsetmekte fayda görülmektedir. “M”, İngilizce “Multifilament” kelimesinin kısaltılmışıdır. Filament sözcüğünün kelime anlamı incelenecek olursa, filament saç kılı gibi yuvarlak bir kesite sahip olan anlamına gelmektedir. Bu saç kılı gibi yuvarlak kesite sahip olan polipropilen fiberlerin üretilme aşamaları ise şöyledir: polipropilen ilk olarak granül haldedir ve yarıçapı 2 ya da 3 mm olan boncuklardan oluşmaktadır. Bu boncuklar eritme yöntemiyle ekstrüder makinasından geçirilmektedir. Ekstrüder makinası spesifik bir makina olup, polipropilen fiber imalathanelerinde kullanılmaktadır. Eriyen her bir polipropilen hammaddesi, ekstrüder makinası ağzında bulunan 72 ya da 144 delikten akıtılarak (delik sayılarında makinadan makinaya fark olmaktadır) fırınlama aşamasına gelmektedir. Multifilament tipi polipropilen fiberler denmesinin sebebi, bu fiber demetlerinde (buklelerinde) 72 ya da 144 adet fiber bulunmasından kaynaklanmaktadır. Fırınlama aşamasında bu akıtılan filamentler, özel bir proses vasıtası ile gerdirilmektedir. Burada polipropilen fiberler önemli ölçüde mukavemet kazanmaktadırlar. Daha sonra bu polipropilen fiberler bobinlere sarılmaktadır. İplik haline gelen bu fiber demetleri çeşitli boylarda (bu boylar 3, 6, 9, 12 veya 19 mm olmaktadır) kesilerek paketlenmekte ve kullanıma hazır hale gelmektedirler. Şekil 6.2’den de görülebileceği üzere, tüm deneysel çalışmalar boyunca kullanılmış olan M-03 tipi polipropilen fiberler, bu tip 3 mm uzunluğunda demetler halinde paketlerden çıkmakta ve daha sonra ise bitümlle karıştırılmaktadırlar.



Şekil 6.2. M-03 tipi polipropilen

3 mm nominal uzunluğa sahip bu plastomer tipi polimer katkı malzemesi, agreganın ağırlıkça % 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 ve 7.0'si oranında bitüme karıştırılması suretiyle tüm deneysel çalışmalar boyunca kullanılmıştır. Böylece literatürde “ıslak karışım” adı altında anılan tipte bir bitüm modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha önce polipropilen'in malzeme özellikleri verilmiş olmasına rağmen, burada yeri geldiği için bir kez daha çizelge olarak bu özelliklerini vermek yerinde olacaktır. Tapkın, polipropilen fiberlerin asfalt üzerindeki etkisini incelemiştir [69]. Bu çalışma sırasında kullanılan fiberlerin fiziksel özellikleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.6. Çalışmada kullanılan polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri [69]

Karakteristikler	Değer	Standart
Safılık	% 100 Polipropilen	-
Renk	Saydam	-
Uzunluk, mm	3 - 50	-
Erime sıcaklığı, °C	160	-
Özgül ağırlık, kg/m ³	910	ASTM D-792
Yanma noktası, °C	590	-
Kırılma geçiş sıcaklığı, °C	-18	-
% 40'lık NaOH solüsyonunda 20°C'da 1000 saat kaldıktan sonra mukavemetin yüzdesi cinsinden alkali rezistansı	99.5	-
Su emme, %	0.01-0.02	ASTM D-570
20 °C ve % 65 bağıl nemlilikte nem muhafazası	< 0.1%	-
Kopma dayanımı, MPa	31-41	ASTM D-638
Uzama, %	≥ 33	ASTM D-638
Kopmada uzama, %	100-600	ASTM D-638
Çekme dayanımı, MPa	31-37	ASTM D-638
Basınç dayanımı, MPa	37-55	ASTM D-695
Eğilme mukavemeti, MPa	41-55	ASTM D-790
Çekme modülü, MPa	1137-1551	ASTM D-638
Eğilme modülü, 23 °C, MPa	1172-1723	ASTM D-790
Sertlik (Rockwell)	R80-R102	ASTM D-785
Isıl genleşme katsayısı, lineer, m/m/°C	0.031-0.039	ASTM D-696

6.3. Bitüm

Bu bölümde, ilk olarak bitüme uygulanan deneyler hakkında genel bilgi verilmiştir. Bu bilgilerin akabinde katkısız ve çeşitli polipropilen oranlarında modifiye edilmiş bitüm üzerindeki deneylerin sonuçları verilmiştir.

Laboratuar çalışmaları sırasında Ilgazlar A.Ş.'den alınmış olan ve İzmit rafinerisinden getirilmiş 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitüme ait şartname limitleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümün özellikleri [70]

DENEY ADI	Standart	Birim	Değer
Penetrasyon, 25°C	ASTM D 5-97	1/10 mm	50-70
Yumuşama Noktası	ASTM D 36-95	°C	46-54
Düktilite, 25°C	ASTM D 113-99	cm	+100
Parlama Noktası	ASTM D 92-02	°C	min. 230
Yanma Noktası	ASTM D 92-02	°C	min. 270
İnce Film Halinde Isıtma Kaybı	ASTM D 1754-97	%	maks. 0.5
Özgül Ağırlık, 25°C	ASTM D 70-76	kg/m ³	1.0-1.1

6.3.1. Penetrasyon Deneyi

Yarı katı veya akıcı olmayan bağlayıcıların kıvamlarının viskozimetre ile ölçülmesi mümkün değildir. Bu durumda penetrasyon deneyi yapılır. Penetrasyon ölçmek için kullanılan alete penetrometre denir.

Deneyde kullanılacak numuneler 30 dakika boyunca 25°C'da bekletilir. Deney sırasında, penetrasyon cihazı düzgün bir yere yerleştirilir ve gösterge sıfıra getirilir. Su banyosunda bekletilen numuneler, deney sırasında sıcaklığın korunması için 25°C'daki su içinde cihaza yerleştirilir. 100 gr ağırlığındaki iğne, numune yüzeyine ancak degecek şekilde ayarlanır. İğne, 5 saniye süresince serbest bırakılır. 5 sn'lik zaman bitiminde penetrasyon değeri okunur. Kabın kenarından ve birbirinden 1'er cm' lik uzaklıkta en az 3 okuma yapılır. 0.1 mm cinsinden okunan bu okumalar, en kısa zamanda yapılmalıdır. İğne, her seferinde

uygun bir çözücü yardımı ile (karbon tetra klorür, tri klor etilen, benzin) ısıtılmış bezle silinir. Sonra kuru bezle temizlenir [73].

Bitümlü bağlayıcının penetrasyon değeri yükseldikçe viskozite değeri düşecektir. Yani bağlayıcının akmaya karşı direnci azalacaktır. Buna bağlı olarak penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılı olacaktır.



Şekil 6.3. Penetrasyon aleti



Şekil 6.4. Penetrasyon deneyi numuneleri

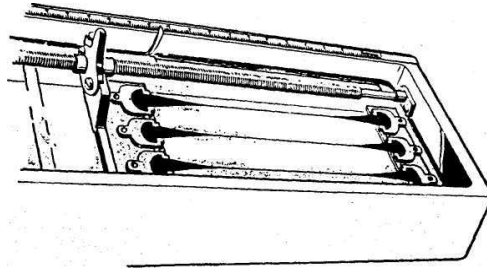
6.3.2. Düktilite Deneyi

Bitümlü karışımlar genişleme ve büzülme doğuran ısı değişikliklerine maruz kaldıklarından, bağlayıcıların belli bir düktilite değerine sahip olması gerekir. Bir asfaltın düktilitesi, belirtilen koşullar altında standart bir briketin kopmadan uzayabileceği santimetre (cm) cinsinden uzaklık olarak belirtilir.

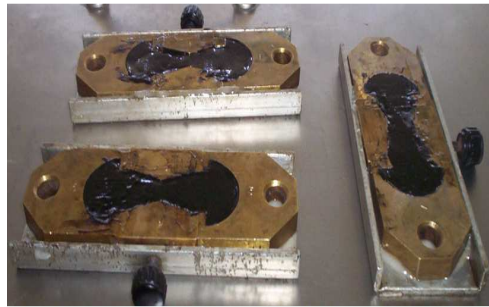
Düktilite, yavaş etkiyen yükler altında bağlayıcının esneme kabiliyetinin bir ölçüsüdür.

Deneyde, eritilmiş numune “ 8 ” şeklindeki kalıp içine doldurulur ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Briketin minimum kesit alanı 1 cm²'dir. Soğuyan kalıplar deney sıcaklığındaki su banyosuna bırakılır. Kalıba yapışan fazla kısımlar sıcak bir bıçakla alınır, kalıbın yan parçaları çıkarılır, deney briketi düktilometreye yerleştirilir. Burada 5 cm/dak'lık sabit bir hızla çekilir. Asfalt ipliğinin kopmasına kadar katedilen yol, düktilite değeri olarak ölçülür (cm). Deney 25 °C sabit sıcaklıktaki su banyosu içinde yapılır [73].

Normal bir deneyde kopma, çekilmekte olan maddenin muayyen bir noktada ayrılması veya iplik şeklinde uzamakta olan numunenin kesit alanının sıfıra inmesi anıdır. Böyle üç normal deney sonucunun ortalaması, numunenin düktilitesi olarak bildirilir. Deney esnasında bitümlü madde suyun üst yüzeyine veya banyonun tabanına değerse bu normal bir deney olarak kabul edilemez. Buna engel olmak için madde suyun dibine çöküyorsa cihazdaki suyun özgül ağırlığını arttırmak gayesi ile suya Sodyum Klorür (tuz), eğer madde suyun yüzeyine çıkıyorsa özgül ağırlığı düşürmek için suya metil alkol katılır [73].



Şekil 6.5. Düktilite aleti [73]



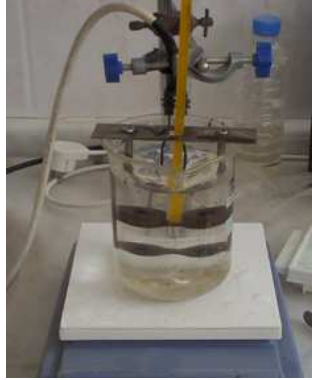
Şekil 6.6. Düktilite deneyi numuneleri

6.3.3. Yumuşama Noktası Deneyi

Asfaltların sıcaklık değişimlerine karşı olan duyarlılıklarını ölçmek için en kısa ve en basit yöntem halka ve bilye yöntemi ile yumuşama noktasının bulunmasıdır.

Yumuşama noktası, 5°C'lık bir su banyosu içine yerleştirilmiş, üzerinde bir bilya bulunan, standart bir kalıp içerisindeki bitümlü maddenin dakikada 5 °C ısıtılmasıyla, yumuşayan malzemenin tabana değdiği anda termometrede okunan sıcaklıktır.

Deneye başlamadan önce, halka bir pirinç levha üzerine oturtulur. Daha önceden vazelinle yağlanmış olan levha üzerindeki halkanın üstünden aşacak şekilde, eritilmiş bitüm ile doldurulur. Bir saat süre ile soğutulur, taşan kısım ısıtılmış bir spatula ile kesilip alınır.



Şekil 6.7. Yumuşama noktası aleti



Şekil 6.8. Yumuşama noktası deney numuneleri

Yumuşama noktası 80°C'den daha düşük olan bitümlere deneyin uygulanması şu şekildedir: beher 5°C'ye kadar soğutulmuş saf su ile tabandan yaklaşık 9 cm yüksekliğe kadar doldurulur. Numuneyi taşıyan halkanın alt yüzü banyonun tabanından 2.5 cm yukarıda olacak şekilde yerleştirilir. Bu arada bilya suya konur. -2 ile 80°C arasında bölmelenmiş olan termometre, civa haznesinin ucu, halkanın alt yüzü ile aynı düzeyde ve halkadan 0.5 cm uzaklıkta bulunacak şekilde banyoya sarkıtılır. Su banyosunun sıcaklığı 15 dakika süreyle 5°C'de sabit tutulur. Sonra bilya uygun bir maşa yardımı ile halka içindeki numunenin tam ortasına yerleştirilir. Banyonun suyu ilk 3 dakikadan sonra dakikada 5°C yükselecek şekilde ısıtılır. Sıcaklığın artması ile yumuşayan malzemenin, banyonun tabanına değdiği anda termometreden okunan sıcaklık yumuşama noktası olarak kaydedilir [73].

6.3.4. Parlama ve Yanma Noktası Deneyi

Isıtılarak akıcı hale getirilen bitüm, standart boyutlara sahip olan deney kabına dökülür. Numune, sıcaklık dakikada 14-17°C artacak şekilde ısıtılır. Tahmin edilen parlama noktası sıcaklığı ile bitümün sıcaklığı arasında 28°C'lik bir fark kaldığı zaman sıcaklık artışı dakikada 5.5°C olacak şekilde ayarlanır. Parlama noktası sıcaklığını tespit etmek için bitümün üzerinde, her 2°C'lik artış sonrası alev gezdirilir. Bitümün alev ile teması sonucu ilk parladığı andaki sıcaklık parlama noktasıdır. Numunenin 5 saniye boyunca yandığı sıcaklık ise yanma noktası sıcaklığıdır [73].



Şekil 6.9. Parlama ve yanma noktası tespiti için kullanılan deney aleti



Şekil 6.10. Standart deney kabı

Bu deneyin amacı, şantiyede bitümün yanmadan hangi ısıya kadar emniyetle ısıtılacağına tespit edilmesidir [21].

6.3.5. İnce Film Halinde Isıtma Kaybı Deneyi

Bitümün bünyesinde bulunan uçucu maddelerin oranı ve yaşlanmaya karşı direncini tespit edebilmek için yapılan deney sırasında, standart deney kabına akıcı haldeki bitüm yerleştirilir. Deney kabına doldurulan numunenin 3.2 mm'lik yüksekliği, 50.72 g'lık bitüme denk gelmektedir. Bu miktara yakın şekilde kaba konulan numune, oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra tartılır. Daha sonra sıcaklığı 163°C'ye ayarlı deney aleti içinde 5 saat 15 dakika boyunca 5 devir/dakika hızla döndürülür. Bu süre sonunda numune oda sıcaklığında soğumaya bırakılır ve tekrar tartılır. İki tartım arasındaki farkın, numunenin ilk ağırlığına oranı alınır [73].



Şekil 6.11. İnce film halinde ısıtma kaybı deney aleti ve deney numuneleri

6.3.6. Özgül Ağırlık Deneyi

Karışımın özgül ağırlığını hesaplamak için, agrega özgül ağırlıklarının yanı sıra, bitümün özgül ağırlığı da bilinmelidir. Bu deney piknometre yardımı ile yapılır. Önce piknometrenin kuru ve temiz haldeki ağırlığı belirlenir. İkinci olarak piknometre saf su ile doldurulur ve bir kapakla kapatılır. Saf su ve piknometre, sıcaklıkları $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ olana kadar su banyosunda bekletilir. İstenen sıcaklık değerine ulaşıldığında piknometre sudan çıkarılır. Hemen kurutulan piknometrenin su ile dolu ağırlığı tartılır. Piknometrenin içinden saf su alınıp, yarısına kadar bitüm ile doldurulur. Piknometre+bitüm ağırlığı bulunur. Son olarak piknometrenin içindeki boşluk saf su ile doldurulur ve piknometre yeniden su banyosuna yerleştirilir. Yaklaşık 1 saat sonunda banyodan çıkarılan piknometre tartılır ve piknometre+bitüm+su ağırlığı bulunmuş olur. Bu tartımlardan bitümün özgül ağırlığını bulmak için [73];

$$\text{Özgül Ağırlık} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)} \quad (6.11)$$

denklemini kullanılır. Burada;

a = Boş piknometre ağırlığı, gr

b = Saf su ile dolu piknometre ağırlığı, gr

c = Yarısına kadar bitüm dolu piknometre ağırlığı, gr

d = Bitüm, saf su ve piknometre ağırlığı, gr

Şekil 6.12 ve 6.13’de, yarısına kadar bitüm ve geri kalanı saf su ile doldurulmuş 50 ml’lik iki piknometre görülmektedir.



Şekil 6.12. Saf su ile doldurulmuş piknometreler



Şekil 6.13. Bitüm ve saf su ile doldurulmuş piknometreler

6.3.7. Bitüm Deneilerinin Sonuçları

Bölüm 6.3’de anlatılan bitüm deneilerinin, katkısız ve çeşitli oranlarda katkı kullanılarak modifiye edilmiş bitümlere uygulanması ile elde edilen sonuçlar Çizelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Kalksız ve çeşitli oranlarda polipropilen katkı kullanılarak modifiye edilmiş bitümlerin deney sonuçları

Polipropilen Katkı Miktarı (%)	Özgül Ağırlık (kg/m³)	Isınma Kaybı (%)	Parlama Noktası (°C)	Yanma Noktası (°C)	Düktilite (cm)	Yumuşama Noktası (°C)	Penetrasyon (dmm)
0.0	1022	0.0572	327	376	109	48.00	55.4
0.5	1021	0.0346	322	370	112	48.65	51.4
1.0	1020	0.0325	318	367	126	49.70	49.4
1.5	1018	0.0316	313	364	139	50.35	48.6
2.0	1017	0.0278	308	357	148	51.30	47.4
2.5	1016	0.0254	299	347	+150	51.65	46.4
3.0	1015	0.0250	292	345	+150	52.05	45.5
3.5	1014	0.0208	290	340	+150	52.65	44.8
4.0	1013	0.0188	289	338	+150	53.15	43.8
4.5	1011	0.0176	280	335	+150	53.70	42.5
5.0	1010	0.0163	269	320	+150	54.70	42.0
5.5	1009	0.0142	260	305	+150	55.25	41.6
6.0	1008	0.0128	250	296	+150	56.15	41.2
6.5	1007	0.0115	239	281	+150	56.80	40.4
7.0	1005	0.0099	220	263	+150	57.45	40.1

Bitümlü bağlayıcıya eklenen polipropilen miktarı arttıkça, modifiye edilmiş bitümün özgül ağırlık değerleri, maksimum katkı miktarına gelindiğinde, % 1.66 oranında azalmıştır. Bu durum, polipropilenin özgül ağırlığının 910 kg/m^3 olmasından kaynaklanmaktadır. Isınma kaybı değerleri ise modifiye edilmemiş bitümde % 0.0572 iken, % 7.0 polipropilen katkılı bitümde % 0.0099'a düşmüştür. Bu kayıp % 82.7'ye tekabül etmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç ise polipropilen katkısının bitümlü bağlayıcıyı, ısınma kaybına karşı çok daha az duyarlı bir hale getirmesidir. Bu da bitümün polipropilen katkısıyla birlikte artık şantiye ortamında, asfalt karışım hazırlamak için ısıtılmasıyla ortaya çıkacak uçucu madde kayıplarından azami derecede korunmasını sağlayacaktır anlamına gelmektedir. Polipropilen katkısı ile parlama ve yanma noktalarında oluşan azalma sırasıyla % 32.7 ve % 30 civarındadır. Sıcaklık cinsinden düşünüldüğü zaman parlama noktası katkısız bitümde 327°C 'dan, % 7.0 polipropilen katkılı bitümde 220°C 'a, yanma noktası ise katkısız bitümde 376°C 'dan, % 7.0 polipropilen katkılı bitümde 263°C 'a gerilemiştir. Bu da dikkat çekici bir husustur. Bu değerler göz önüne alındığında polipropilen katkılı bitüm, şantiye ortamında, parlama ve yanmaya karşı son derece hassas bir hale gelmektedir. Düktilite değeri ise katkısız bitümde 109 cm iken % 2.5 polipropilen katkılı bitümden itibaren "+150 cm" olmuştur. Bu da polipropilen katkılı bitümün bağlayıcılık özelliğinin son derece iyi bir şekilde arttırıldığının göstergesidir. Yumuşama noktası değeri ise katkısız bitümde 48.00°C iken % 7.0 polipropilen katkılı bitümde 57.45°C 'a çıkmıştır. Bu da polipropilen katkılı bitümün sıcaklık hassasiyetinin son derece azaldığını göstermektedir. Sıcak iklimin hüküm sürdüğü yol kesimleri için bu özellik değişimi son derece tercih edilir bir değişimdir. Son olarak katkısız bitümün penetrasyon değeri 55.4 dmm iken % 7.0 polipropilen katkılı bitümün penetrasyon değeri 40.1 dmm'ye düşmüştür. Bu da bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ne oranda iyileştiğinin başka bir önemli göstergesidir. Bu sayede polipropilen katkılı bitümün, özellikle tekerlek izinde oturma yani oluklanma problemine karşı ne kadar önemli bir kazanım gösterdiği ispatlanmıştır.

6.4. Marshall Deneyi

6.4.1. Marshall Deney Numunelerinin Hazırlanması

Her bir karışımda 1100 gr agrega kullanılmıştır. Kullanılan 1100 gr ağırlığındaki agrega, Çizelge 6.1’de belirtilen agrega gradasyonuna (Aşınma Tabakası Tip-2) göre hazırlanmıştır [70]. Agrega numuneleri 24 saat boyunca 170°C’ye ayarlanmış etüvde bekletilmiş ve karıştırma sıcaklığına getirilmişlerdir.



Şekil 6.14. Aşınma tabakası Tip-2 gradasyonuna göre elenmiş agrega

Karışımlarda, katkılı ve katkısız olmak üzere iki farklı bitüm kullanılmıştır. Katkısız bitüm hazırlanırken, kullanılacak bitüm miktarı önceden belirlenmiştir. Karışımın sağlıklı olması için bitüm de 170°C’ye kadar ısıtılmıştır.

Modifiye bitüm hazırlanırken kullanılan katkı malzemesinin (polipropilen) miktarı ‰ 0.5 ile ‰ 7.0 arasında (‰ 0.5’er artarak) değişmektedir. Bu oranlar agreganın ağırlığı esas alınarak hesaplanmıştır. 170°C’ye kadar ısıtılmış bitüm, dakikada en az 500 devir yapacak şekilde ayarlanmış mikser yardımı ile karıştırılmıştır. Miktarı hesaplanmış polipropilen, bitümün içine karıştırma işlemi sırasında yavaş yavaş eklenmiştir. Sıcaklığın sabit kalmasına dikkat edilerek yapılan bu karıştırma işlemi 2 saat sürmüştür.



Şekil 6.15. Modifiye bitüm imalatı

Karışım sırasında, bitüm veya agrega ile temas edebilen her türlü aparat da 170°C'ye kadar ısıtılmıştır. Bunu yapmaktaki amaç, malzemelerin en iyi şekilde karışmasını sağlamaktır. Tüm malzeme ve aparatlar istenen sıcaklığa getirildiğinde asfalt karışımın hazırlanmasına başlanmıştır. Önce 1100 gr agrega karışım kabına yerleştirilmiştir. Daha sonra bitüm, agrega karışımına eklenmiş ve mikserde karıştırılmıştır. Karışım süresi en az 2 dakika olarak ayarlanmıştır. Karıştırma işleminin ardından numune üç aşamada kalıba yerleştirilmiştir. Kullanılan kalıbın yüksekliği 76.2 mm iken çapı 101.6 mm'dir.

Daha sonra Marshall tokmağına yerleştirilen numunenin her iki yüzüne 50 vuruş yapılmıştır. Vuruş sayısı kabul edilirken karışımın orta trafik hacmine maruz kalacağı esas alınmıştır. Marshall tokmağının ağırlığı 4536 gr'dır ve 457.2 mm'den serbest düşüş yapmaktadır. Tüm bu işlemler maksimum 10 dakika içinde bitirilmiştir.

Marshall tokmağından çıkarılan numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numuneler kalıplarından çıkarılmış ve içerdiği bitüm ve polipropilen miktarlarına göre adlandırılmışlardır. Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmadan önce 24 saat bekletilen numunelerin, yükseklikleri ile havadaki ve sudaki ağırlıkları ölçülmüştür. Bu değerler Marshall formlarının hazırlanmasında kullanılmıştır.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

Şekil 6.16. Marshall numunelerinin hazırlanması

6.4.2. Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

Bu deney metodu, Marshall stabilite ve akma deney aleti yardımıyla bitümlü karışımlarından hazırlanan silindirik briketlerin yanal yüzeylerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsar. Ülkemiz karayollarında

bitümlü karışımlara uygulanan stabilite deneyi Marshall deneyidir. Bu deney esas olarak bir serbest basınç deneyi olup numune yüklendiği sırada tamamen sınırlanmaz.

Numuneler, istenilen sıcaklığa getirilmeleri maksadı ile 30-40 dakika su banyosunda bekletilir. Banyo sıcaklığı asfalt çimentolu briketler için 60°C'dir. Numune çelik bir halkanın iki segmanı arasına yerleştirilir. Yük ve akma göstergeleri sıfırlanır. Maksimum yüke erişinceye kadar, dakikada 50.8 mm'lik (2 inç) bir hızla yükleme yapılır. Maksimum yük ve akma değeri kaydedilir. Deney numunesinin su banyosundan çıkarılıp, maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 saniyeden fazla olmamalıdır. Eğer numune yüksekliği 63.5 mm'den (2.5 inç) farklıysa Marshall stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak stabilite değerlerine düzeltme faktörü uygulanır.

Deneyde; üst segman sabittir. Alt segman yükleme hızı 50.8 mm/dakikadır. Basınç arttıkça stabilometrede okunan değer artarak maksimuma ulaşır, daha sonra düşmeye başlar. Bu anda numune kırılır. Stabilometrede okunan maksimum değer yardımıyla bitümlü karışımın stabilitesi saptanır. "Marshall stabilitesi" adı verilen bu değer örneğin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır. Kırılma sırasında numunenin çökme ya da hareket miktarı da ölçülür. Buna "akma" denir.



Şekil 6.17. Su banyosunda bekletilen Marshall numuneleri



Şekil 6.18. Marshall numunelerinin kırılması

6.4.3. Optimum Bitüm Muhtevasının Bulunması

Optimum bitüm muhtevasının tayin edilebilmesi için çeşitli bitüm yüzdelerinde hazırlanmış olan numunelere ait Marshall stabilite, birim ağırlık, asfaltla dolu boşluk yüzdesi, mineral agregadaki boşluk yüzdesi ve boşluk oranı grafiklerinin çizilmesi gerekir. Marshall stabilite değerini maksimum yapan bitüm oranı, maksimum birim ağırlığı veren bitüm oranı, şartnameye uygun olarak asfalt ile dolu boşluk değerini % 70 olarak sağlayan bitüm oranı ve % 4 boşluk oranını sağlayan bitüm oranı grafikler yardımı ile bulunur. Bulunan dört bitüm oranının ortalaması optimum bitüm yüzdesi değerini verecektir.

Bu orana tekabül eden akma değeri akma-bitüm grafiğinden bakılarak, şartnamede belirtilen değerlerin 2 ila 4 mm arasında olup olmadığı kontrol edilir. Bu şekilde saptanan bağlayıcı oranına göre gerçekleştirilen bir beton asfalt karışımı şartnamelerde aranan özellikleri taşıyacaktır.

Optimum bitüm muhtevasında kullanılmak üzere geliştirilmiş olan “Asfalt Betonu Dizayn Kriterleri” aşağıda verilmiştir [70].

Çizelge 6.9. Asfalt betonu dizayn kriterleri [70]

	Minimum	Maksimum
Marshall stabilitesi, kg	900	-
Boşluk, %	3	5
Asfaltla dolu boşluk, V_f, %	65	75
Mineral agregadaki boşluk, VMA, %	14	-
Akma, mm	2	4
Filler/bitüm oranı	-	1.5
Bitüm (ağırlıkça, 100'e)	4.0	7.0

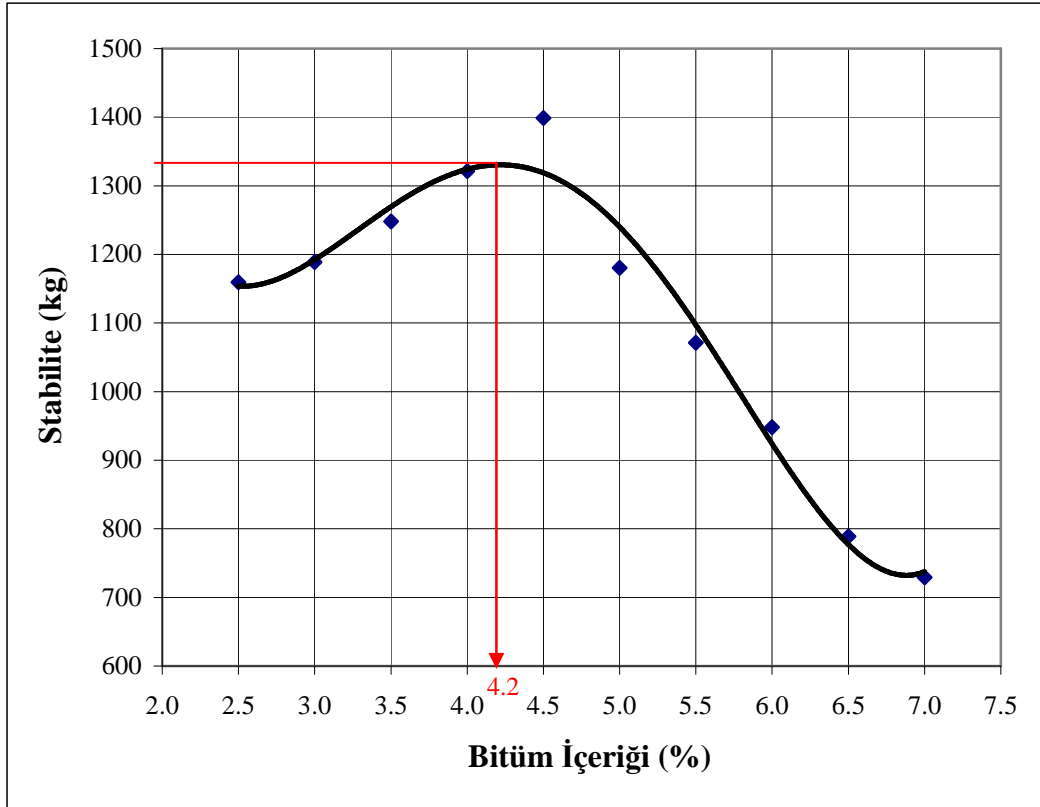
Sünme deneylerine başlamadan önce, deneylerde kullanılmak üzere optimum bitüm yüzdesinin tayini gerekmektedir. Bunun için % 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65 ve 70 oranlarında bitüm kullanılarak, her bitüm oranında 3'er adet olmak üzere, toplam 30 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan 2 seriye ait optimum bitüm muhtevası, asfalt betonu dizayn kriterlerinin ışığında, yukarıda belirtilmiş olan hesaplama yöntemi ile tayin edilmiştir. Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11'de optimum bitüm muhtevası hesaplamak için yapılmış 1.seri Marshall dizaynına ait numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 6.10. Marshall deney sonuçları (1. seri)

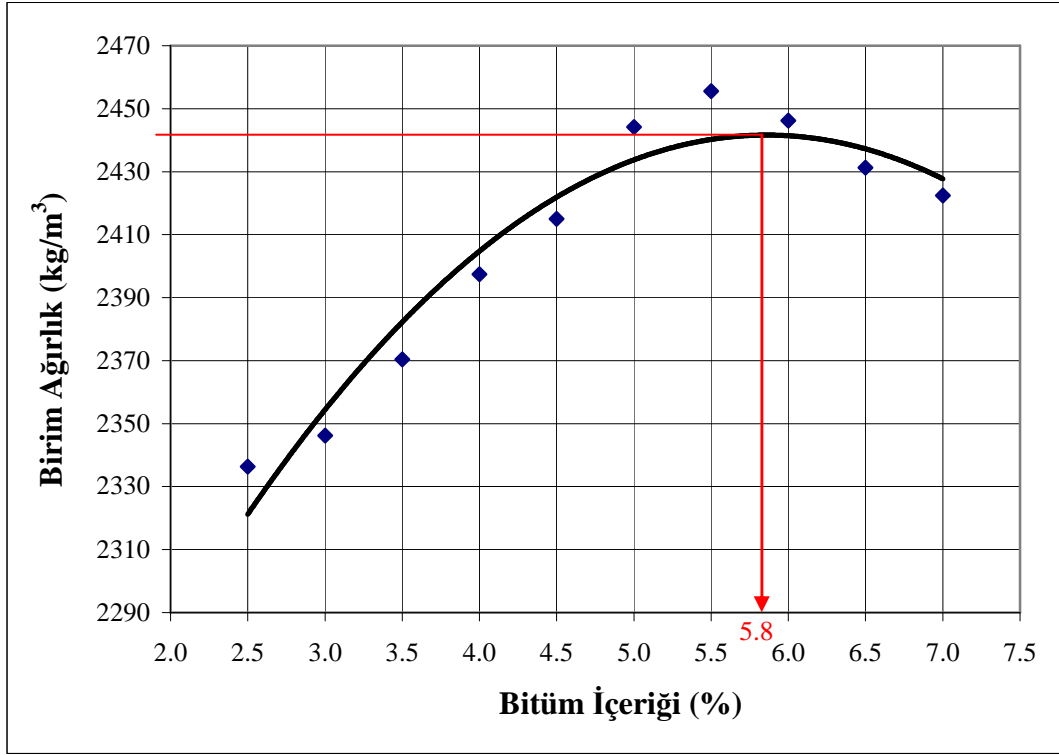
KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		2779 kg / m ³		BFTİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		1022 kg / m ³		2759 kg / m ³														
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		2776 kg / m ³		BFTİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		1022 kg / m ³		2759 kg / m ³														
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		2785 kg / m ³		BFTİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		1022 kg / m ³		2759 kg / m ³														
BİRİKTİR NO		AC		HACİMİ ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)		HACİMİ (Toplama Göre %) Agregası		BOSLUK ORANI (%)		BİRİKTİR NO		AC		HACİMİ ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)		HACİMİ (Toplama Göre %) Agregası		BOSLUK ORANI (%)		BİRİKTİR NO		
%		b		d		e		f		g		h		i		j		k		l		
a (100+)		a (100+)		d		e		f		g		h		i		j		k		l		
1	2.00	4.59	62.400	1125.501	647.500	481.000	2649	5.589	11.487	11.487	11.487	17.033	52.833	11.487	29.496	1142.000	29.496	11.487	103	1157.730	1.940	59.007
2	2.00	4.59	60.800	1125.501	647.500	481.000	2649	5.589	11.487	11.487	11.487	17.033	52.833	11.487	29.496	1142.000	29.496	11.487	103	1157.730	2.295	70.271
3	2.00	4.59	60.800	1125.501	647.500	481.000	2649	5.589	11.487	11.487	11.487	17.033	52.833	11.487	29.496	1142.000	29.496	11.487	103	1157.730	2.354	71.251
Ortl.							2649	5.576	11.487	11.487	11.487	17.033	52.833	11.487	29.496	1142.000	29.496	11.487	103	1157.730	2.354	71.251
4	3.000	2.913	60.700	1131.600	650.300	481.300	2629	5.701	12.329	12.329	12.329	18.103	56.980	12.329	32.882	1152.000	32.882	12.329	108	1164.329	2.198	53.627
5	3.000	2.913	60.700	1131.600	650.300	481.300	2629	5.701	12.329	12.329	12.329	18.103	56.980	12.329	32.882	1152.000	32.882	12.329	108	1164.329	2.198	53.627
6	3.000	2.913	60.700	1131.600	650.300	481.300	2629	5.701	12.329	12.329	12.329	18.103	56.980	12.329	32.882	1152.000	32.882	12.329	108	1164.329	2.198	53.627
Ortl.							2629	5.687	12.329	12.329	12.329	18.103	56.980	12.329	32.882	1152.000	32.882	12.329	108	1164.329	2.198	53.627
7	3.000	3.322	60.800	1132.400	655.100	479.100	2667	6.009	12.813	12.813	12.813	18.718	60.083	12.813	35.142	1154.000	35.142	12.813	109	1166.813	2.198	53.627
8	3.000	3.322	60.800	1132.400	655.100	479.100	2667	6.009	12.813	12.813	12.813	18.718	60.083	12.813	35.142	1154.000	35.142	12.813	109	1166.813	2.198	53.627
9	3.000	3.322	60.800	1132.400	655.100	479.100	2667	6.009	12.813	12.813	12.813	18.718	60.083	12.813	35.142	1154.000	35.142	12.813	109	1166.813	2.198	53.627
Ortl.							2667	6.009	12.813	12.813	12.813	18.718	60.083	12.813	35.142	1154.000	35.142	12.813	109	1166.813	2.198	53.627
10	4.000	3.846	60.200	1137.000	662.000	475.100	2395	6.242	13.122	13.122	13.122	19.122	62.882	13.122	38.242	1156.000	38.242	13.122	109	1168.122	2.198	53.627
11	4.000	3.846	60.200	1137.000	662.000	475.100	2395	6.242	13.122	13.122	13.122	19.122	62.882	13.122	38.242	1156.000	38.242	13.122	109	1168.122	2.198	53.627
12	4.000	3.846	60.200	1137.000	662.000	475.100	2395	6.242	13.122	13.122	13.122	19.122	62.882	13.122	38.242	1156.000	38.242	13.122	109	1168.122	2.198	53.627
Ortl.							2395	6.242	13.122	13.122	13.122	19.122	62.882	13.122	38.242	1156.000	38.242	13.122	109	1168.122	2.198	53.627
13	4.000	4.306	59.200	1142.800	671.300	471.500	2424	6.751	13.613	13.613	13.613	19.613	65.483	13.613	40.751	1158.000	40.751	13.613	110	1170.751	2.198	53.627
14	4.000	4.306	59.200	1142.800	671.300	471.500	2424	6.751	13.613	13.613	13.613	19.613	65.483	13.613	40.751	1158.000	40.751	13.613	110	1170.751	2.198	53.627
15	4.000	4.306	60.000	1138.000	666.200	471.300	2412	6.633	13.566	13.566	13.566	19.566	65.242	13.566	40.566	1157.000	40.566	13.566	110	1169.566	2.198	53.627
Ortl.							2412	6.705	13.599	13.599	13.599	19.599	65.413	13.599	40.666	1157.500	40.666	13.599	110	1170.266	2.198	53.627
16	5.000	4.762	59.300	1155.600	684.600	471.000	2424	6.983	14.003	14.003	14.003	20.003	66.983	14.003	41.003	1160.000	41.003	14.003	111	1174.003	2.198	53.627
17	5.000	4.762	59.300	1155.600	684.600	471.000	2424	6.983	14.003	14.003	14.003	20.003	66.983	14.003	41.003	1160.000	41.003	14.003	111	1174.003	2.198	53.627
18	5.000	4.762	59.300	1155.600	684.600	471.000	2424	6.983	14.003	14.003	14.003	20.003	66.983	14.003	41.003	1160.000	41.003	14.003	111	1174.003	2.198	53.627
Ortl.							2424	6.983	14.003	14.003	14.003	20.003	66.983	14.003	41.003	1160.000	41.003	14.003	111	1174.003	2.198	53.627
19	5.000	5.213	59.200	1157.600	687.600	470.000	2424	7.183	14.443	14.443	14.443	20.443	68.443	14.443	41.443	1161.000	41.443	14.443	111	1175.443	2.198	53.627
20	5.000	5.213	59.200	1157.600	687.600	470.000	2424	7.183	14.443	14.443	14.443	20.443	68.443	14.443	41.443	1161.000	41.443	14.443	111	1175.443	2.198	53.627
21	5.000	5.213	59.200	1157.600	687.600	470.000	2424	7.183	14.443	14.443	14.443	20.443	68.443	14.443	41.443	1161.000	41.443	14.443	111	1175.443	2.198	53.627
Ortl.							2424	7.183	14.443	14.443	14.443	20.443	68.443	14.443	41.443	1161.000	41.443	14.443	111	1175.443	2.198	53.627
22	6.000	5.660	59.000	1136.200	671.700	464.300	2446	6.983	13.946	13.946	13.946	19.946	66.983	13.946	40.983	1159.000	40.983	13.946	110	1171.946	2.198	53.627
23	6.000	5.660	59.000	1136.200	671.700	464.300	2446	6.983	13.946	13.946	13.946	19.946	66.983	13.946	40.983	1159.000	40.983	13.946	110	1171.946	2.198	53.627
24	6.000	5.660	59.000	1136.200	671.700	464.300	2446	6.983	13.946	13.946	13.946	19.946	66.983	13.946	40.983	1159.000	40.983	13.946	110	1171.946	2.198	53.627
Ortl.							2446	6.983	13.946	13.946	13.946	19.946	66.983	13.946	40.983	1159.000	40.983	13.946	110	1171.946	2.198	53.627
25	6.000	6.103	60.100	1150.800	682.000	476.400	2453	7.443	14.873	14.873	14.873	21.073	70.443	14.873	42.073	1163.000	42.073	14.873	111	1177.073	2.198	53.627
26	6.000	6.103	60.100	1150.800	682.000	476.400	2453	7.443	14.873	14.873	14.873	21.073	70.443	14.873	42.073	1163.000	42.073	14.873	111	1177.073	2.198	53.627
27	6.000	6.103	60.100	1150.800	682.000	476.400	2453	7.443	14.873	14.873	14.873	21.073	70.443	14.873	42.073	1163.000	42.073	14.873	111	1177.073	2.198	53.627
Ortl.							2453	7.443	14.873	14.873	14.873	21.073	70.443	14.873	42.073	1163.000	42.073	14.873	111	1177.073	2.198	53.627
28	7.000	6.542	59.400	1132.600	668.100	467.300	2429	6.882	13.813	13.813	13.813	19.813	66.882	13.813	40.813	1158.000	40.813	13.813	110	1172.813	2.198	53.627
29	7.000	6.542	60.100	1132.600	668.100	467.300	2429	6.882	13.813	13.813	13.813	19.813	66.882	13.813	40.813	1158.000	40.813	13.813	110	1172.813	2.198	53.627
30	7.000	6.542	60.100	1132.600	668.100	467.300	2429	6.882	13.813	13.813	13.813	19.813	66.882	13.813	40.813	1158.000	40.813	13.813	110	1172.813	2.198	53.627
Ortl.							2429	6.882	13.813	13.813	13.813	19.813	66.882	13.813	40.813	1158.000	40.813	13.813	110	1172.813	2.198	53.627

Çizelge 6.11. 1.seri Marshall formlarından elde edilen ortalama değerleri gösteren tablo

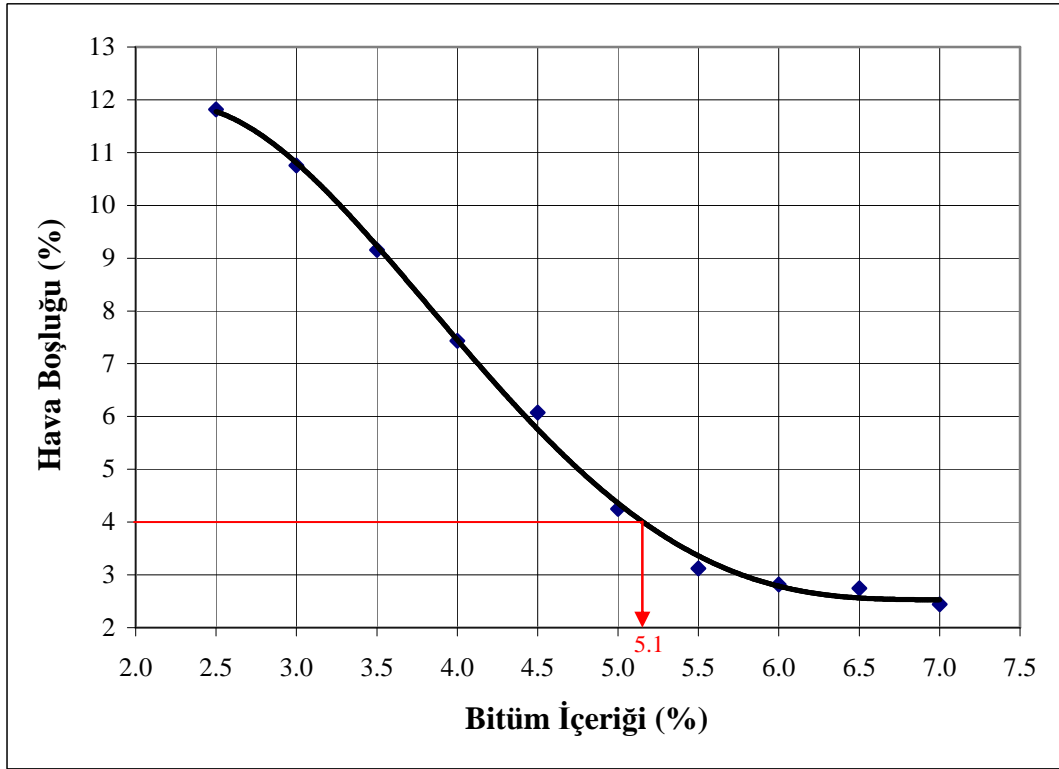
Bitüm Yüzdesi (%)	Stabilite (kg)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Hava Boşluğu (%)	Vf (%)	VMA (%)	Akma (mm)	Marshall Oranı (kg/mm)
25	1159.330	2336	11.815	32.085	17.383	2.198	531.637
30	1188.887	2346	10.759	38.351	17.437	2.261	529.299
35	1248.050	2370	9.157	46.159	16.992	2.481	511.636
40	1321.340	2397	7.435	54.854	16.449	2.515	527.224
45	1398.827	2415	6.078	62.651	16.244	2.560	547.505
50	1180.577	2444	4.247	72.900	15.628	3.097	385.437
55	1071.357	2456	3.122	80.107	15.639	4.273	251.899
60	948.283	2446	2.817	82.832	16.357	5.288	179.328
65	788.777	2431	2.747	84.135	17.258	5.636	139.971
70	729.367	2422	2.444	86.431	17.943	7.093	103.211



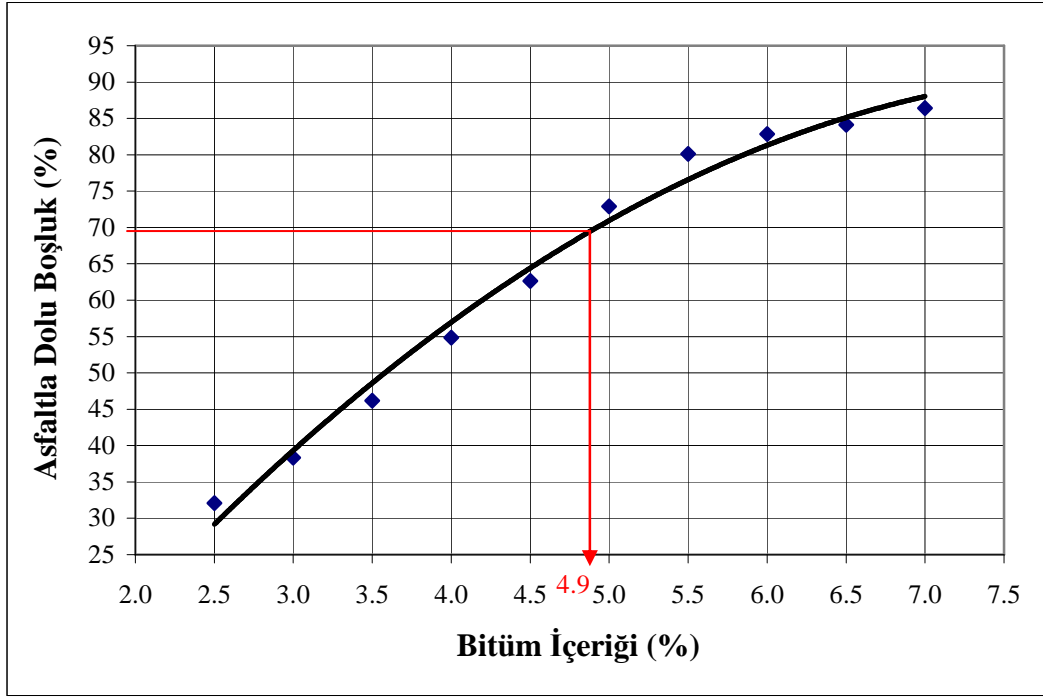
Şekil 6.19. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (1.seri)



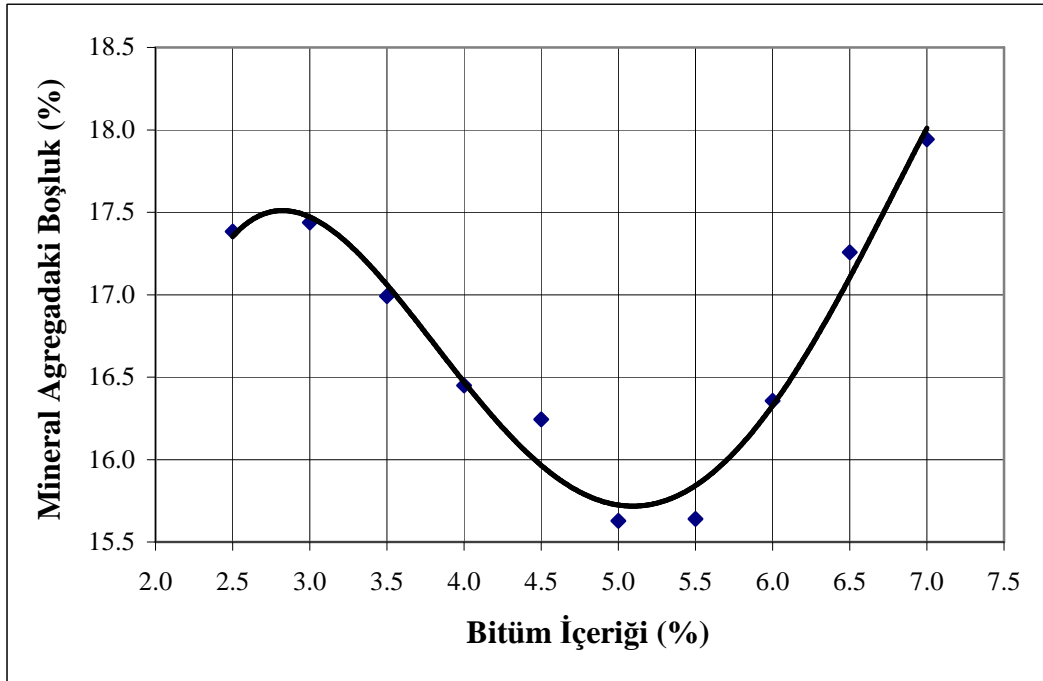
Şekil 6.20. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (1.seri)



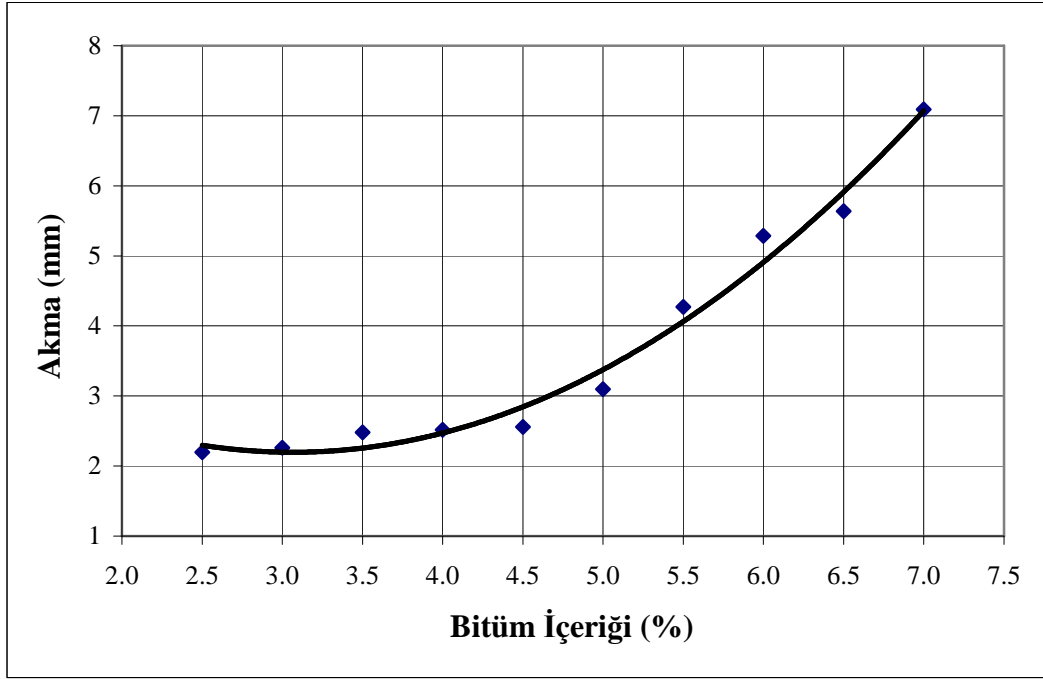
Şekil 6.21. Hava boşluğu-bitüm içeriği grafiği (1.seri)



Şekil 6.22. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-bitüm içeriği grafiği (1.seri)



Şekil 6.23. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-bitüm içeriği grafiği (1.seri)

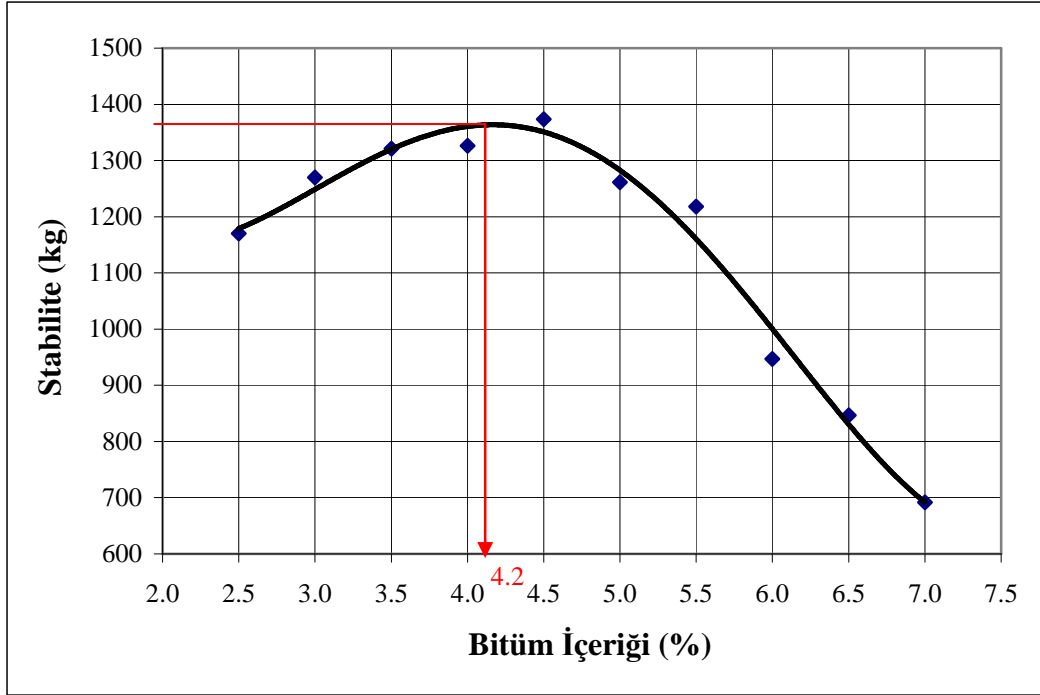


Şekil 6.24. Akma-bitüm içeriği grafiği (1.seri)

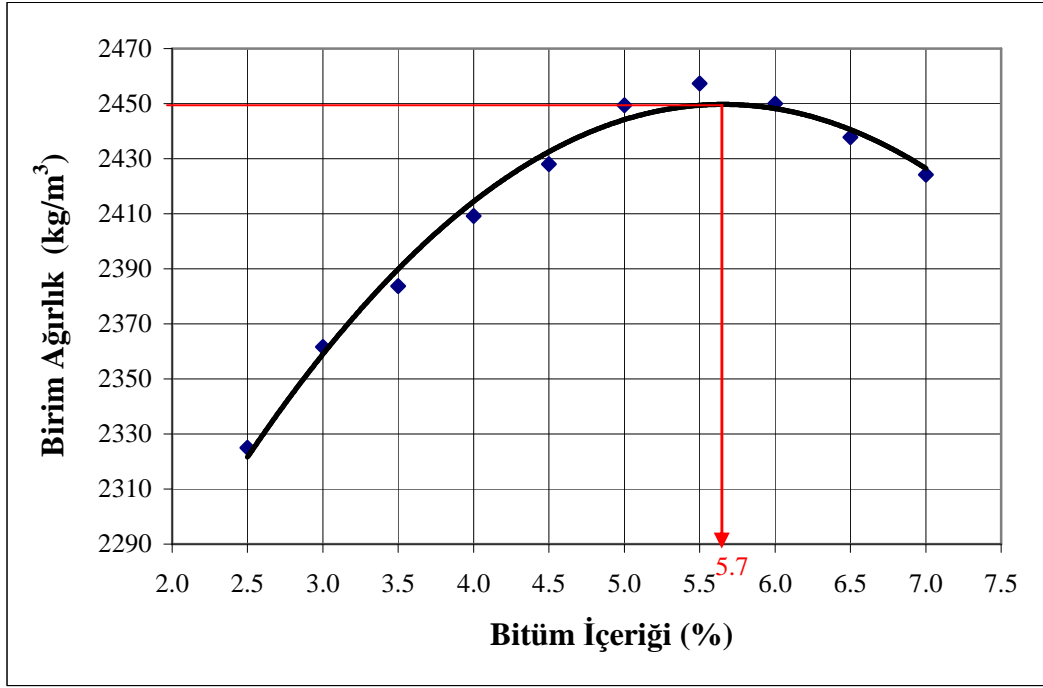
1. seriye ait Şekil 6.19 ila 6.24 numaralı grafikler incelendiğinde; maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, % 4 boşluk oranı ve % 70 asfalt ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri sırası ile % 42, 58, 51 ve 49'dur. 1. seriye ait optimum bitüm muhtevası birinci yöntemle % 50, ikinci yöntemle % 50.3 bulunmuştur. Birinci yöntem ile ikinci yöntem arasındaki fark, ikinci yöntemde asfalt ile dolu boşluk oranı değerinin hesaba katılmamış olmasıdır. Buna göre iki değer ortalaması yaklaşık olarak % 50 olarak alınmıştır.

Çizelge 6.13. 2. seri Marshall formlarından elde ortalama edilen değerleri gösteren tablo

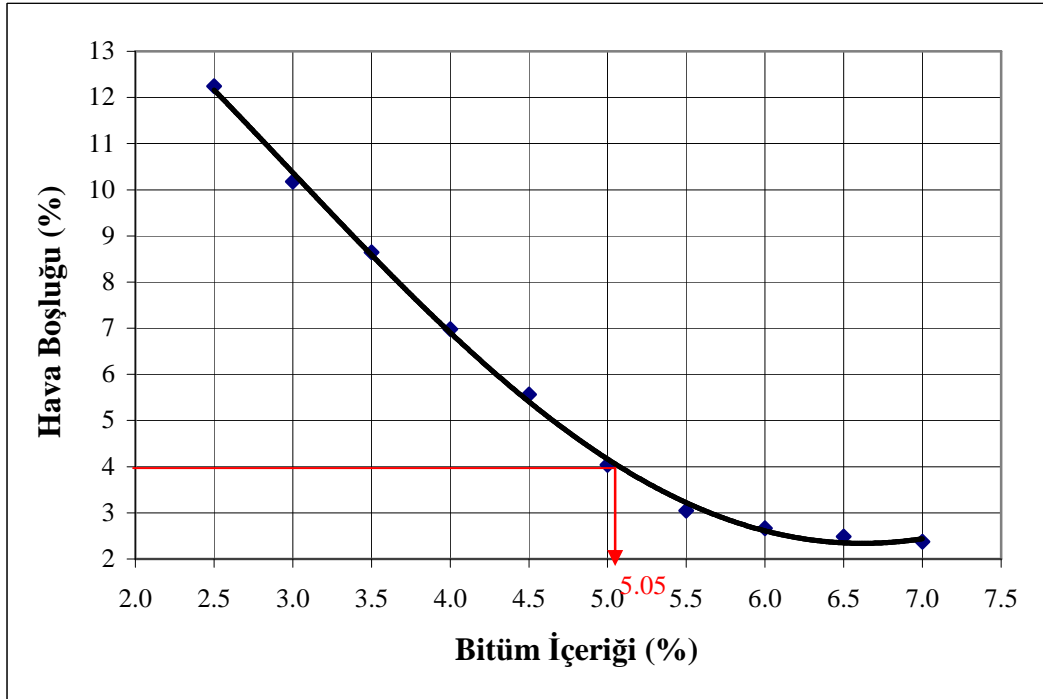
Bitüm Yüzdesi (%)	Stabilite (kg)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Hava Boşluğu (%)	Vf (%)	VMA (%)	Akma (mm)	Marshall Oranı (kg/mm)
25	1170.440	2325	12.245	31.204	17.785	2.275	514.708
30	1269.660	2362	10.174	39.839	16.896	2.341	559.752
35	1321.260	2384	8.645	47.747	16.524	2.507	529.442
40	1326.080	2409	6.978	56.546	16.036	2.780	489.544
45	1373.607	2428	5.564	64.807	15.786	2.888	485.554
50	1261.080	2449	4.042	73.916	15.447	3.280	387.128
55	1217.763	2457	3.050	80.478	15.577	3.839	318.179
60	946.847	2450	2.667	83.619	16.227	4.639	206.262
65	846.910	2438	2.485	85.462	17.035	5.144	165.708
70	691.683	2424	2.372	86.781	17.882	6.572	105.403



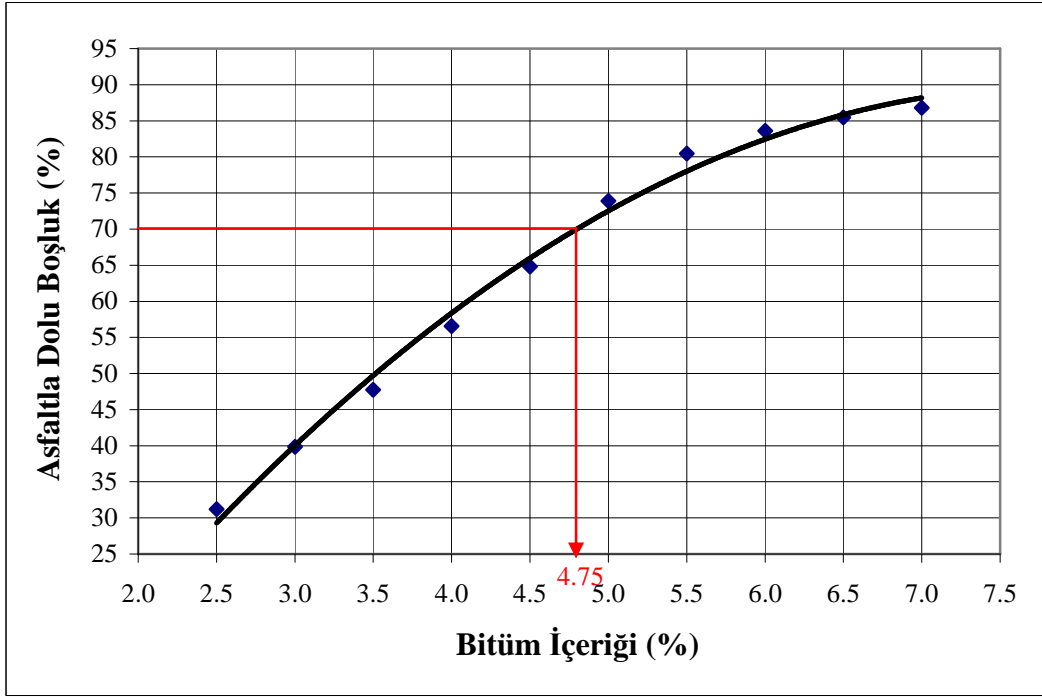
Şekil 6.25. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (2.seri)



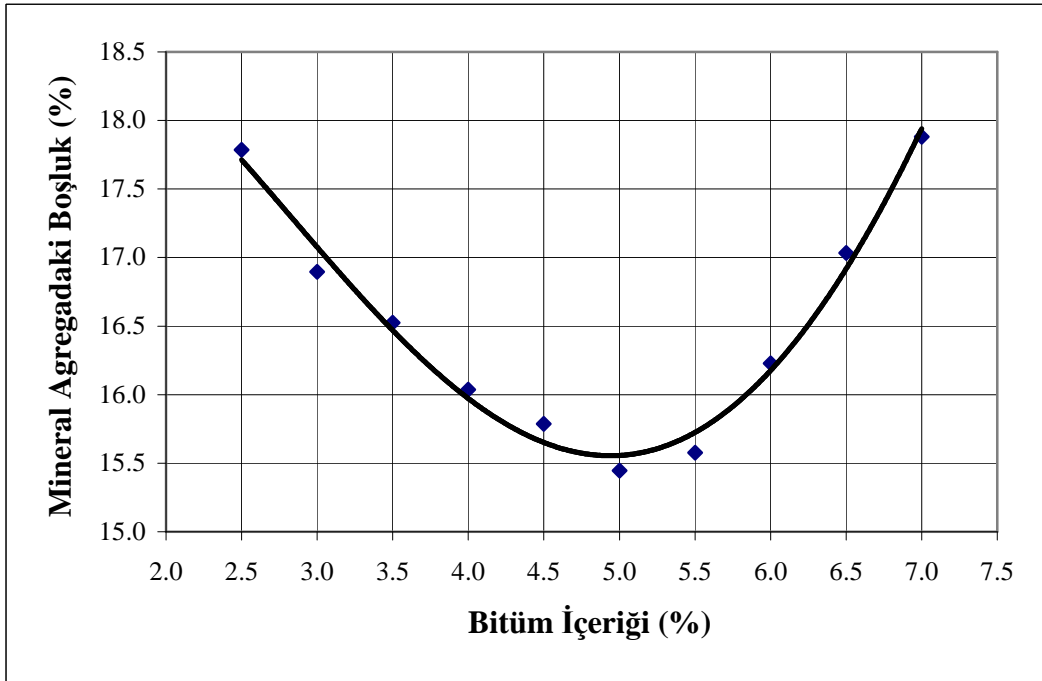
Şekil 6.26. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (2.seri)



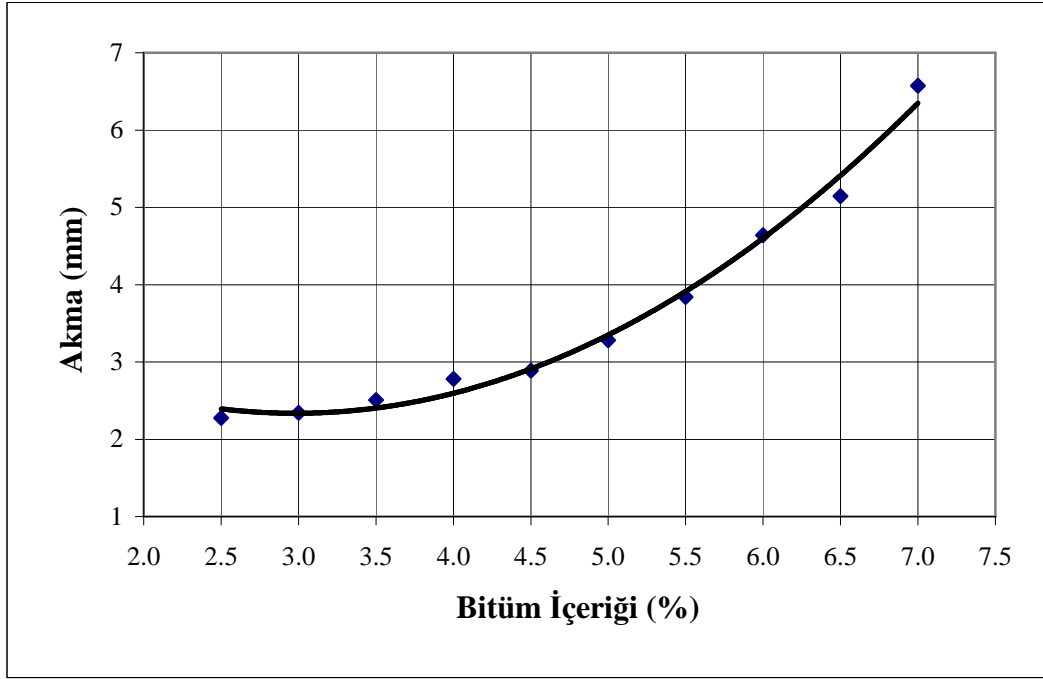
Şekil 6.27. Hava boşluğu-bitüm içeriği grafiği (2.seri)



Şekil 6.28. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-bitüm içeriği grafiği (2.seri)



Şekil 6.29. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-bitüm içeriği grafiği (2.seri)



Şekil 6.30. Akma-bitüm içeriği grafiği (2.seri)

2. seriye ait Şekil 6.25 ila 6.30 numaralı grafikler incelendiğinde; maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, % 4 boşluk oranı ve % 70 asfalt ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri sırası ile % 42, 57, 50.5 ve 47.5'tir. 2. seriye ait optimum bitüm muhtevası birinci yöntemle % 49.3, ikinci yöntemle % 49.8 bulunmuştur. İki değer ortalama % 49.6 olarak alınmıştır.

Her iki serinin optimum bitüm muhtevaları göz önüne alındığında statik sünme deneyleri için hazırlanacak olan Marshall numunelerinde ve Marshall stabilite ve akma deneyleri için kullanılacak Marshall numunelerinde, % 50 bitüm muhtevası kullanılması uygun görülmüştür. İki seri sonucunda çıkan değerler birbirlerini son derece iyi bir biçimde doğrulamaktadırlar. Bu değerler ışığında yapılmış olan statik sünme deneyleri ve sonuçlarının tutarlı olabilmeleri açısından, iki seri Marshall dizaynının yapılmış olması son derece büyük önem arz etmektedir.

6.5. Statik Sünme Deneyi

Optimum bitüm muhtevasının bulunmasından sonra, statik sünme deneylerinde kullanılmak üzere % 50 bitüm ve % 0.5 ile % 7.0 arasında değişen oranlarda (% 0.5'er artarak) M-03 tipi polipropilen içeren Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Her bir polipropilen içeriği için 6 adet olmak üzere toplam 90 adet numune, statik sünme deneyine tabi tutulmuştur. Sünme deneyi sonucunda elde edilen sonuçların, Marshall deneyi sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için 90 adet numune daha hazırlanmış ve bu numunelere Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır. Statik sünme ve Marshall deneylerinden önce, toplam 180 adet olan numunelerin alt ve üst yüzeyleri eğelenerek pürüzsüz hale getirilmiş, bu şekilde yükseklikleri ölçülmüş, havada ve suda tartımları yapılmıştır. Tüm bu çalışmaların sonucunda Marshall ve sünme deneylerinde kullanılan numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar hazırlanmıştır.

Her bir numune, aynı bitüm miktarına ve aynı yükleme süresine sahip olduğu için sadece içerdiği polipropilen miktarına göre adlandırılmıştır. Örneğin;

25-6 : % 2.5 polipropilen muhtevasına sahip 6 numaralı Marshall numunesi,

50-3 : % 5.0 polipropilen muhtevasına sahip 3 numaralı Marshall numunesi.

6.5.1. UMATTA Deney Aleti

Statik sünme deneylerinde UMATTA (Universal Materials Testing Apparatus) deney aleti kullanılmıştır. Bir hava kompresörüne bağlı bu alet, ortalama 7 bar basınç ile çalışmaktadır. Kompresör ile deney aletinin yükleme kafası arasında, hava depolamaya yarayan bir bölüm bulunmaktadır. Maksimum 700 kPa'lık bir yükleme, bu sistem sayesinde numunelerin üzerine uygulanabilmektedir. Yükleme sistemi, isteğe bağlı olarak ısıtma ve soğutma yapabilen bir inkubator (iklimlendirici) içine yerleştirilmiştir. Numuneler, sıcaklığın deney süresince sabit tutulabildiği bu bölüme, üniform dağılan bir sıcaklığı sağlayabilmek amacıyla 24 saat önce yerleştirilmektedir.

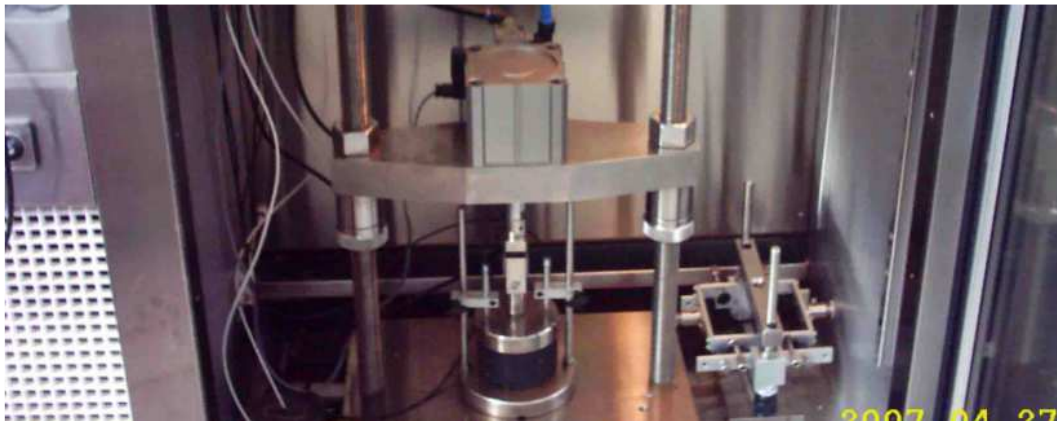
Sistem, iki adet LVDT (Linear Variable Differential Transformer) adı verilen deformasyon okuyucu yardımı ile meydana gelen deformasyonları ölçmektedir. Numunenin iç ve dış yüzeyine ait sıcaklık değerleri ise iki adet sensör (temperature probe) sayesinde anlık olarak ölçümlenmektedir. Uygulanan yük, numunenin iç ve dış yüzeyine ait sıcaklık değerleri ve oluşan deformasyonlar, CDAS (Control and Data Acquisition System) yardımı ile sisteme bağlı bilgisayara anlık olarak iletilmektedir. Bilgisayarda kullanılan program yardımı ile değerler işlenmekte ve grafiklere aktarılmaktadır. Deney ile ilgili tüm veriler deney sırasında bilgisayar ekranından grafik olarak gözlemlenebilmektedir. Ayrıca kullanılan program tüm kaydedilen verileri, zamana veya vuruş sayısına bağlı olarak, Excel formatlı bir çıktı dosyasına aktarmaktadır. UMATTA deney aletini gösteren bazı şekiller aşağıda verilmiştir.



(a)

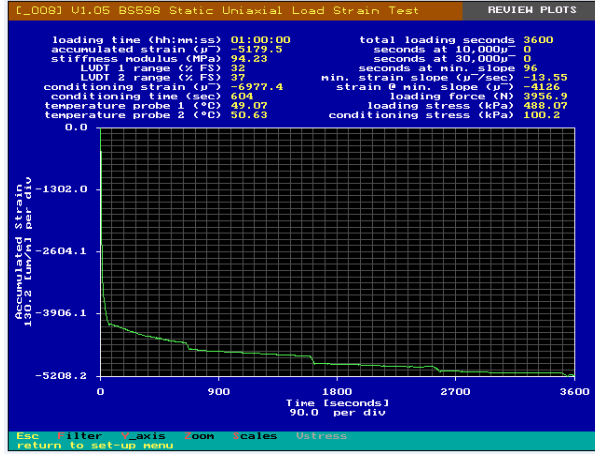


(b)

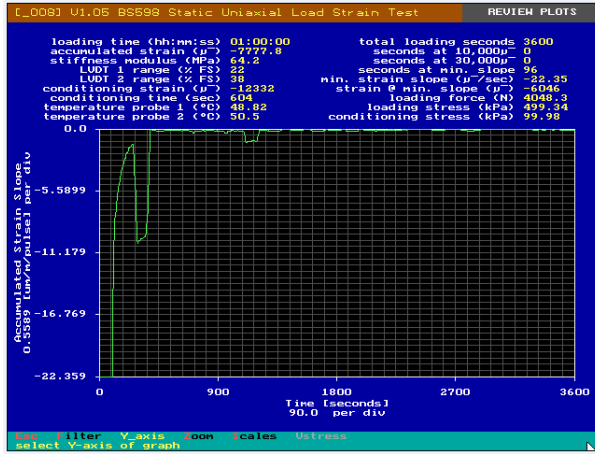


(c)

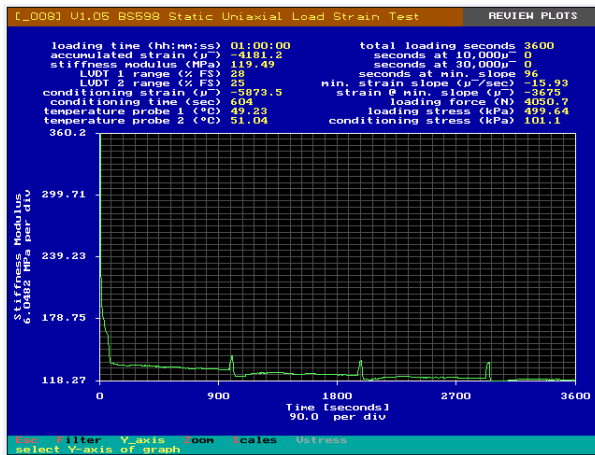
Şekil 6.31. (a) UMATTA deney aleti, (b) CDAS ve hava deposu ve (c) statik sünme deneyinin uygulanması



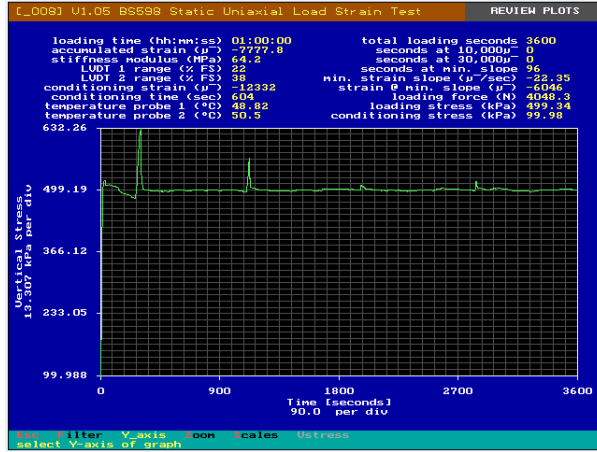
Şekil 6.32. Birim deformasyon-zaman grafiği ekran görüntüsü



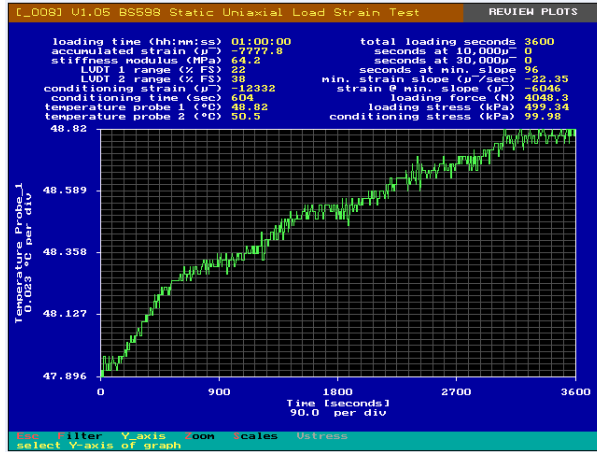
Şekil 6.33. Birim deformasyon eğimi-zaman grafiği ekran görüntüsü



Şekil 6.34. Rijitlik modülü-zaman grafiği ekran görüntüsü



Şekil 6.35. Düşey gerilme-zaman grafiği ekran görüntüsü



Şekil 6.36. Sıcaklık-zaman grafiği ekran görüntüsü

6.5.2. Statik Sünme Deneyinin Uygulanması

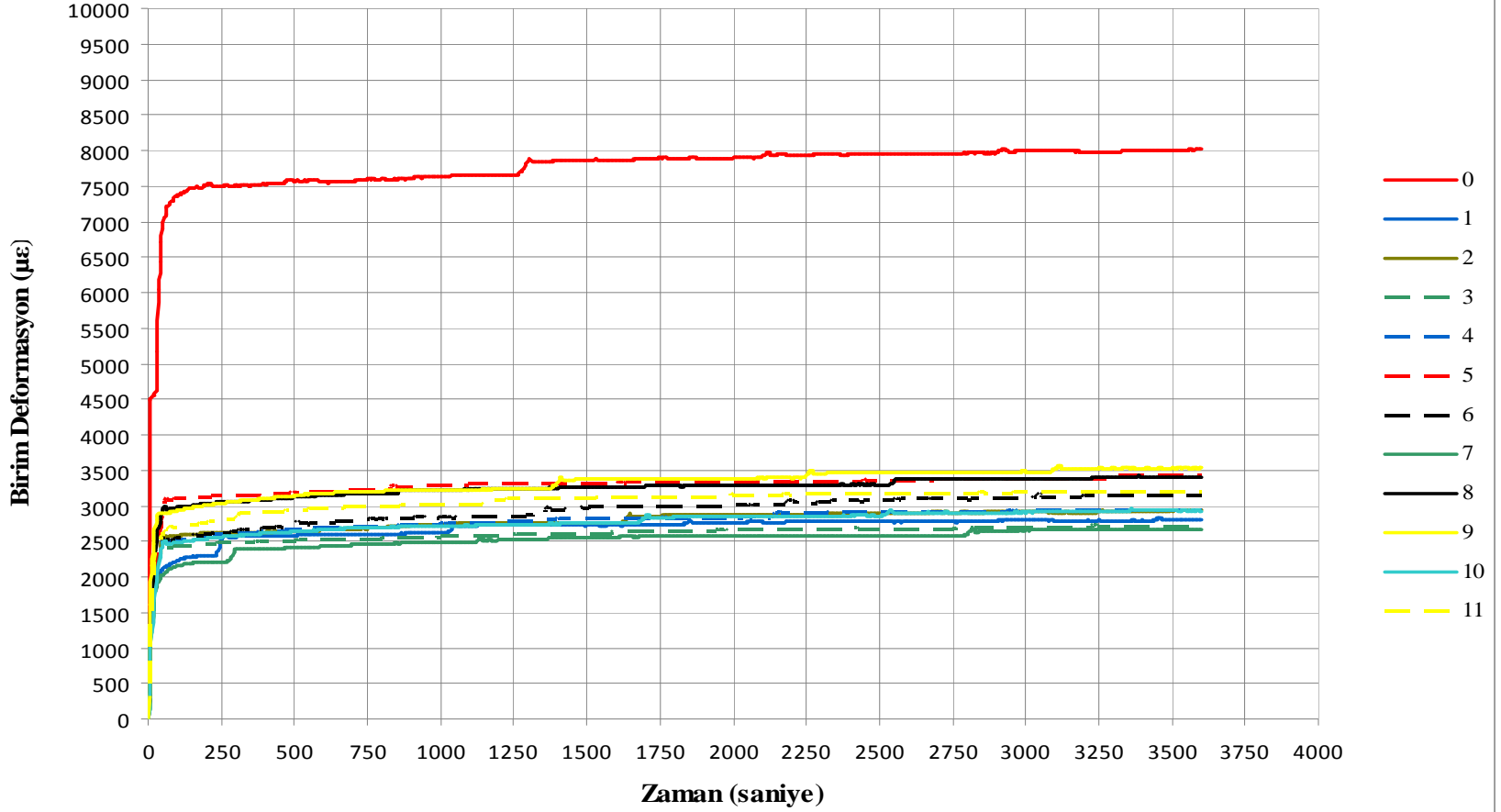
Hazırlanan Marshall numunelerinin alt ve üst yüzeyleri eğelendikten sonra yükseklikleri ölçülüp, havadaki ve sudaki ağırlıkları tartılarak, değerler sünme numunelerinin fiziksel özelliklerini gösteren formlara kaydedilmiştir. Numuneler, sıcaklığı 50 $^{\circ}$ C'ye ayarlanmış inkubatorün içine konulmuş ve deney sıcaklığına erişmeleri için 24 saat bekletilmişlerdir. Deneyden önce numune, yükleme bölümüne yerleştirilmiştir. Kullanılan bilgisayar programı yardımı ile yük ve deformasyon değerleri sıfırlanmıştır. Numunelere ilk 10 dakika 100 kPa'lık önyüklemeye yapıldıktan sonra, 60 dakika boyunca 500 kPa'lık yükleme

yapılmıştır. Deney bitiminden sonra “csv” uzantılı Excel dosyaları alınmış ve bu dosyadaki değerlere göre birim deformasyon-zaman, rijitlik modülü-zaman grafikleri çizilmiştir. Burada bahsedilen rijitlik değeri “sünme rijitliği” olup çalışmanın geri kalan bölümünde kısaca “rijitlik” olarak adlandırılacaktır.

Önyükleme süresinin seçimi için 12 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken, 1100 gr. agregaya % 50 oranında bitüm (optimum bitüm muhtevası) eklenmiş ve bu bitüm, agreganın ağırlıkça % 5.5’u oranında polipropilen ile modifiye edilmiştir. Bu değer, Tapkın tarafından yürütülmüş olan çalışmalar ve Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı’nda daha önceden Uşar tarafından yapılmış olan tez çalışmasından elde edilmiş sonuçların ışığında tahmini olarak alınmıştır [69,74]. İlk numuneye önyükleme uygulanmamıştır. Diğer numunelere ise 1 dakikadan 11 dakikaya kadar (1’er dakika artarak) önyükleme yapılmıştır. Numuneler, uygulanan önyükleme süresine göre adlandırılmıştır. Örneğin 5 numaralı numune, 5 dakikalık önyüklemeye maruz kalmıştır.

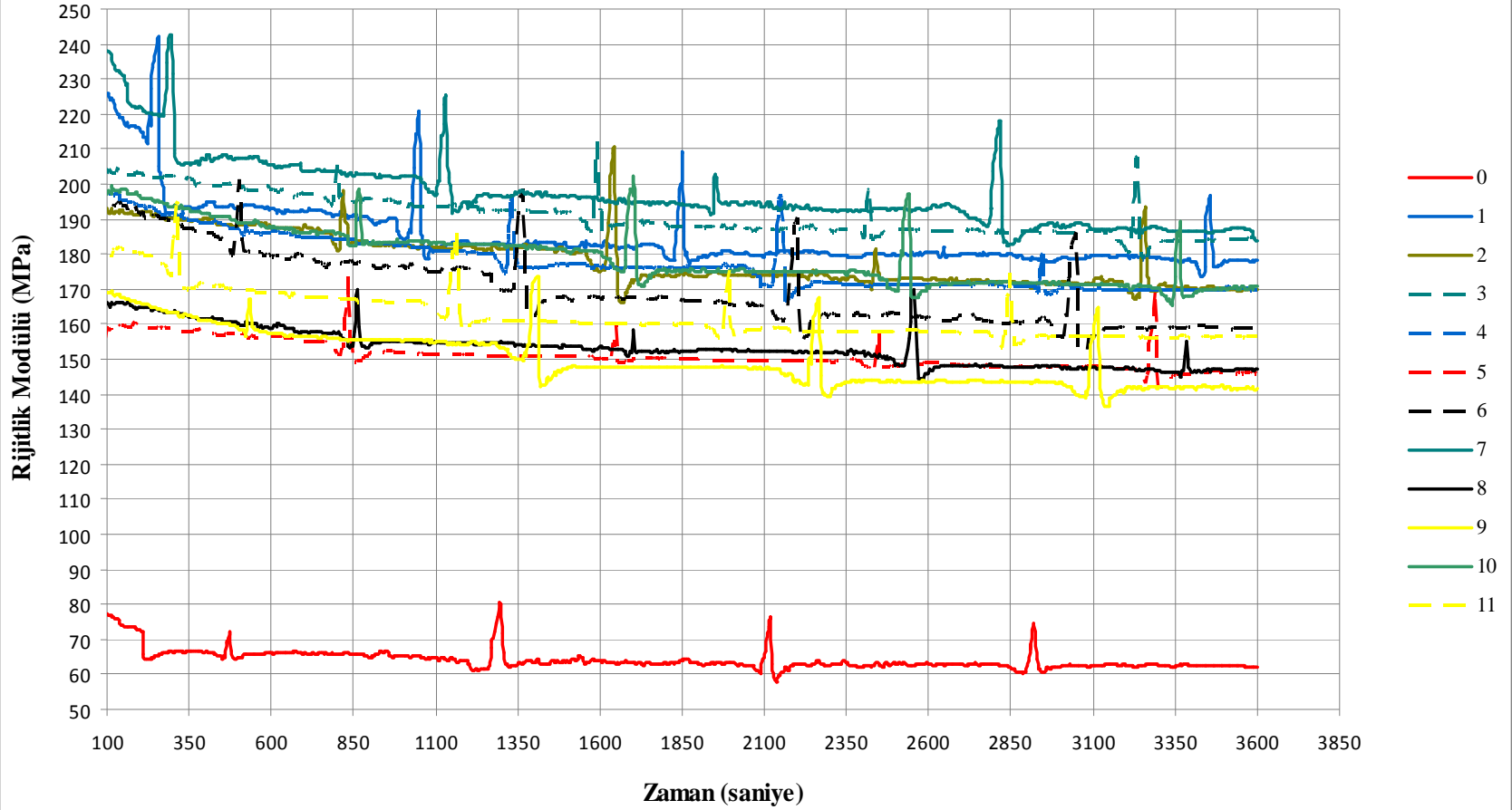
Önyükleme uygulanmayan numunede çok düşük rijitlik modülüne ve çok büyük deformasyona rastlanmıştır. Önyükleme yapılan numunelerin deformasyon ve rijitlik modülü değerleri önemli farklılıklar göstermemiştir. Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’e bakıldığı zaman; 10 dakika önyükleme yapılan numunenin rijitlik ve deformasyon eğrileri, önyükleme yapılan numunelerin tamamını temsil edebilecek bir davranış göstermektedir. Bu yüzden deneylerde önyükleme süresi olarak 10 dakika kullanılmıştır.

**% 5.5 PP KATKISI
% 5.0 BİTÜM**



Şekil 6.37. Farklı önyükleme sürelerine sahip numunelerin birim deformasyon-zaman ilişkisi

**% 5.5 PP KATKISI
% 5.0 BİTÜM**



Şekil 6.38. Farklı önyükleme sürelerine sahip numunelerin rijitlik modülü-zaman ilişkisi

Bu tip agresif bir yükleme paterninin seçilmiş olmasının nedeni ise polipropilen katkısının bir anlamda karışım üzerindeki son derece pozitif etkilerinin en uygun bir biçimde gözlemlenmesine ışık tutmaktır. Bu tip bir yükleme paterni, Brown ve arkadaşlarının 2001 yılında yayınlamış olduğu bir çalışmadan ilham almaktadır [75].

Bunun da ötesinde bu tip bir yükleme ve önyükleme paternine realist bir yaklaşım getirmek gerekirse, daha önceki yıllarda yapılan (özellikle 1970'li, 1980'li ve 1990'lı, hatta 2000'li) çalışmalardaki statik sünme deneyi sonuçları, arazideki oluklanma paternleriyle örtüşen sonuçlar vermemekte idi [75]. Bunun da en temel sebebi, bu statik sünme deneylerindeki yüklemenin 206.9 kPa (30 psi) ve sıcaklıkların ise 40°C'ı aşamamalarıydı. Ancak gerçekte, yani günümüz şartlarında teker basınçları 828 kPa (120 psi)'a kadar çıkabilmekte ve sıcaklıklar ise 60°C'a varmaktadır [75]. Bu yüzden bu çalışmada yapılan statik sünme deneyleri boyunca 50°C, ortam sıcaklığı olarak kullanılmış ve yükleme olarak ise 500 kPa (72 psi)'lık bir değer deneyler boyunca sisteme girilmiştir. Bu değer ise yüklü bir kamyonun teker iç basıncına tekabül etmektedir. Dolayısıyla son derece realist bir yaklaşım esas alınmıştır. Son olarak ise 100 kPa (14.4 psi)'lık yükleme, agresif doğa şartlarının günümüz yollarında ortaya çıkardığı yadsınamaz bir koşullandırma gerçeğine tekabül etmektedir.

Çizelge 6.14 ile başlayıp 6.18 ile biten tablolar katkısız, % 0.5 polipropilen katkılı, % 1.0 polipropilen katkılı, % 1.5 polipropilen katkılı, % 2.0 polipropilen katkılı, % 2.5 polipropilen katkılı, % 3.0 polipropilen katkılı, % 3.5 polipropilen katkılı, % 4.0 polipropilen katkılı, % 4.5 polipropilen katkılı, % 5.0 polipropilen katkılı, % 5.5 polipropilen katkılı, % 6.0 polipropilen katkılı, % 6.5 polipropilen katkılı ve % 7.0 polipropilen katkılı Marshall numunelerinin fiziksel özelliklerini göstermektedirler.

Çizelge 6.14. Katkısız, % 0.5 PP katkılı, % 1.0 PP katkılı numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:											
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:					2730 kg/m ³					2750 kg/m ³					2775 kg/m ³						
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										PP KATKISIZ:											
AC	AC	AC	AC	AC	HACİM	HACİM	HACİM	HACİM	HACİM	Karşım	Karşım	Karşım	Karşım	Karşım	Asfalt	Asfalt	Asfalt	Asfalt	Asfalt		
%	%	%	%	%	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	g	g	g	g	g	i	j	k	l	m		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	g	h	i	j	k	i	j	k	l	m		
Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$		
a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$		
1	5.000	4.762	1148.300	679.900	466.000	2450.918	2543.391	11.342	84.665	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.335	73.961	3.993	15.335	73.961	3.636	2450.918
2	5.000	4.762	1143.900	677.300	466.000	2451.565	2543.391	11.345	84.687	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.313	74.089	3.968	15.313	74.089	3.610	2451.565
3	5.000	4.762	1144.400	678.000	466.000	2452.688	2543.391	11.355	84.760	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.240	74.510	3.885	15.240	74.510	3.527	2452.688
4	5.000	4.762	1149.300	681.400	467.000	2456.294	2543.391	11.367	84.830	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.150	75.032	3.783	15.150	75.032	3.424	2456.294
5	5.000	4.762	1146.600	680.500	466.000	2459.987	2543.391	11.384	84.978	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.022	75.783	3.638	15.022	75.783	3.279	2459.987
6	5.000	4.762	1147.800	680.800	467.000	2457.816	2543.391	11.374	84.903	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.097	75.540	3.773	15.097	75.540	3.365	2457.816
7	5.000	4.762	1147.100	681.800	465.800	2465.291	2543.391	11.409	85.161	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	14.839	76.884	3.480	14.839	76.884	3.071	2465.291
8	5.000	4.762	1148.100	682.100	466.000	2463.734	2543.391	11.401	85.107	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	14.893	76.538	3.485	14.893	76.538	3.132	2463.734
9	5.000	4.762	1145.000	679.100	463.900	2463.893	2543.391	11.402	85.113	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	14.887	76.591	3.485	14.887	76.591	3.126	2463.893
Ort.			1145.000	679.100	463.900	2458.132	2543.391	11.375	84.914	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.086	75.416	3.711	15.086	75.416	3.532	2458.132

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:											
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:					2730 kg/m ³					2750 kg/m ³					2775 kg/m ³						
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										PP KATKISIZ:											
AC	AC	AC	AC	AC	HACİM	HACİM	HACİM	HACİM	HACİM	Karşım	Karşım	Karşım	Karşım	Karşım	Asfalt	Asfalt	Asfalt	Asfalt	Asfalt		
%	%	%	%	%	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	g	g	g	g	g	i	j	k	l	m		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	g	h	i	j	k	i	j	k	l	m		
Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$		
a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$	$\rho_g(SG_{gr})$		
1	5.000	4.762	1133.300	672.900	460.400	2461.535	2543.391	11.391	83.032	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	14.968	76.106	3.376	14.968	76.106	3.218	2461.535
2	5.000	4.762	1141.300	677.100	464.200	2458.639	2543.391	11.378	84.931	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.069	75.507	3.691	15.069	75.507	3.332	2458.639
3	5.000	4.762	1149.800	678.100	464.700	2459.221	2543.391	11.381	84.952	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.048	75.626	3.668	15.048	75.626	3.309	2459.221
4	5.000	4.762	1149.400	679.900	469.800	2448.136	2543.391	11.329	84.569	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.481	73.417	4.102	15.481	73.417	3.745	2448.136
5	5.000	4.762	1148.200	680.500	467.700	2454.993	2543.391	11.381	84.806	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.194	74.770	3.834	15.194	74.770	3.476	2454.993
6	5.000	4.762	1139.200	674.800	464.400	2453.038	2543.391	11.332	84.739	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.261	74.884	3.909	15.261	74.884	3.552	2453.038
Ort.			1139.200	674.800	464.400	2455.954	2543.391	11.365	84.838	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.162	74.969	3.797	15.162	74.969	3.439	2455.954

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:											
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:					2750 kg/m ³					2757 kg/m ³					2775 kg/m ³						
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										PP KATKISIZ:											
AC	AC	AC	AC	AC	HACİM	HACİM	HACİM	HACİM	HACİM	Karşım	Karşım	Karşım	Karşım	Karşım	Asfalt	Asfalt	Asfalt	Asfalt	Asfalt		
%	%	%	%	%	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	g	g	g	g	g	i	j	k	l	m		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	g	h	i	j	k	i	j	k	l	m		
Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$		
a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	a/(100+a)	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	(100-h)/g/SG _{gr}	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$	$\rho_g(SG_{ad})$		
1	5.000	4.762	1136.300	670.200	466.000	2438.197	2543.391	11.283	84.225	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.775	71.528	4.401	15.775	71.528	4.136	2438.197
2	5.000	4.762	1141.800	676.800	464.600	2456.737	2543.391	11.369	84.866	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.134	75.121	3.765	15.134	75.121	3.407	2456.737
3	5.000	4.762	1149.500	680.400	466.100	2459.773	2543.391	11.383	84.971	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.059	75.739	3.646	15.059	75.739	3.288	2459.773
4	5.000	4.762	1152.000	681.400	470.600	2447.939	2543.391	11.338	84.562	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.438	73.379	4.110	15.438	73.379	3.733	2447.939
5	5.000	4.762	1143.400	677.800	465.600	2453.736	2543.391	11.365	84.832	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.168	74.924	3.804	15.168	74.924	3.446	2453.736
6	5.000	4.762	1144.500	678.900	466.000	2456.867	2543.391	11.370	84.870	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.130	75.148	3.760	15.130	75.148	3.402	2456.867
Ort.			1136.300	670.200	466.000	2452.545	2543.391	11.330	84.721	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	100.1-j	15.279	74.306	3.929	15.279	74.306	3.572	2452.545

Çizelge 6.15. % 1.5 PP katkılı, % 2.0 PP katkılı, % 2.5 PP numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar

BİRİKTİR NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										1029 kg / m ³									
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										2757 kg / m ³									
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										PP KATKISI:										1.5 %									
	AC	%	a	b	c	e	d	Havada	Suda	cm ³	HACİM	AGIRLIK (gr)	Karşım	g	h	Asfalt	i	j	k	l	m	n	o							
	Agrega Ağırlığına Göre	a/(100-a)				d-e						ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Karşım (Teorik)			b * g / (SG _{as}) (100-b) * g / SG _{gr}	Hava Boşluğu		100-j	i / a * 100	100-100g/h	Birim Ağırlık (kg/m ³)								
1	5.000	4.762	58.100	58.100	668.600	668.600	465.300	2456.922	2543.391	11.277	84.181	4.541	13.819	4.186	71.291	4.186	2436.922						g							
2	5.000	4.762	58.600	58.600	680.900	680.900	466.300	2460.219	2543.391	11.385	84.986	3.629	13.014	3.270	75.831	3.270	2460.219						g							
3	5.000	4.762	58.300	58.300	680.600	680.600	469.200	2450.554	2543.391	11.340	84.652	4.007	13.348	3.630	73.890	3.630	2450.554						g							
4	5.000	4.762	58.700	58.700	679.700	679.700	468.700	2450.181	2543.391	11.359	84.639	4.022	13.361	3.665	73.816	3.665	2450.181						g							
5	5.000	4.762	58.800	58.800	680.600	680.600	471.500	2446.546	2543.391	11.322	84.514	4.164	13.486	3.808	73.109	3.808	2446.546						g							
6	5.000	4.762	59.000	59.000	680.900	680.900	471.700	2443.502	2543.391	11.308	84.409	4.284	13.591	3.927	72.526	3.927	2443.502						g							
Ortl.								2447.988	2543.391	11.329	84.564	4.108	13.436	3.751	73.410	3.751	2447.988						g							

BİRİKTİR NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										1029 kg / m ³									
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										2757 kg / m ³									
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										PP KATKISI:										2.0 %									
	AC	%	a	b	c	e	d	Havada	Suda	cm ³	HACİM	AGIRLIK (gr)	Karşım	g	h	Asfalt	i	j	k	l	m	n	o							
	Agrega Ağırlığına Göre	a/(100-a)				d-e						ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Karşım (Teorik)			b * g / (SG _{as}) (100-b) * g / SG _{gr}	Hava Boşluğu		100-j	i / a * 100	100-100g/h	Birim Ağırlık (kg/m ³)								
1	5.000	4.762	59.100	59.100	673.900	673.900	470.000	2433.830	2543.391	11.263	84.074	4.662	13.926	4.308	70.723	4.308	2433.830						g							
2	5.000	4.762	59.500	59.500	676.900	676.900	471.800	2431.684	2543.391	11.253	84.000	4.747	13.940	4.392	70.333	4.392	2431.684						g							
3	5.000	4.762	59.300	59.300	672.300	672.300	471.200	2433.149	2543.391	11.260	84.051	4.689	13.949	4.354	70.599	4.354	2433.149						g							
4	5.000	4.762	59.200	59.200	672.200	672.200	468.700	2434.180	2543.391	11.265	84.087	4.649	13.913	4.284	70.787	4.284	2434.180						g							
5	5.000	4.762	59.000	59.000	680.700	680.700	473.000	2439.112	2543.391	11.287	84.257	4.456	13.743	4.100	71.698	4.100	2439.112						g							
6	5.000	4.762	59.000	59.000	679.200	679.200	473.000	2435.941	2543.391	11.273	84.147	4.580	13.853	4.225	71.110	4.225	2435.941						g							
Ortl.								2434.649	2543.391	11.267	84.103	4.630	13.897	4.275	70.875	4.275	2434.649						g							

BİRİKTİR NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										1029 kg / m ³									
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										2757 kg / m ³									
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:										PP KATKISI:										2.5 %									
	AC	%	a	b	c	e	d	Havada	Suda	cm ³	HACİM	AGIRLIK (gr)	Karşım	g	h	Asfalt	i	j	k	l	m	n	o							
	Agrega Ağırlığına Göre	a/(100-a)				d-e						ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Karşım (Teorik)			b * g / (SG _{as}) (100-b) * g / SG _{gr}	Hava Boşluğu		100-j	i / a * 100	100-100g/h	Birim Ağırlık (kg/m ³)								
1	5.000	4.762	59.100	59.100	670.400	670.400	471.400	2422.147	2543.391	11.209	83.671	5.120	16.329	4.767	68.644	4.767	2422.147						g							
2	5.000	4.762	59.700	59.700	674.900	674.900	471.900	2430.176	2543.391	11.246	83.948	4.806	16.052	4.451	70.062	4.451	2430.176						g							
3	5.000	4.762	58.600	58.600	670.100	670.100	470.400	2424.532	2543.391	11.220	83.753	5.027	16.247	4.673	69.060	4.673	2424.532						g							
4	5.000	4.762	59.000	59.000	678.900	678.900	470.900	2441.707	2543.391	11.299	84.347	4.354	15.633	3.998	72.186	3.998	2441.707						g							
5	5.000	4.762	59.200	59.200	674.400	674.400	471.500	2430.329	2543.391	11.247	83.954	4.800	16.046	4.445	70.089	4.445	2430.329						g							
6	5.000	4.762	59.000	59.000	673.100	673.100	473.200	2422.443	2543.391	11.210	83.681	5.109	16.319	4.755	68.696	4.755	2422.443						g							
Ortl.								2428.556	2543.391	11.229	83.892	4.869	16.108	4.515	69.789	4.515	2428.556						g							

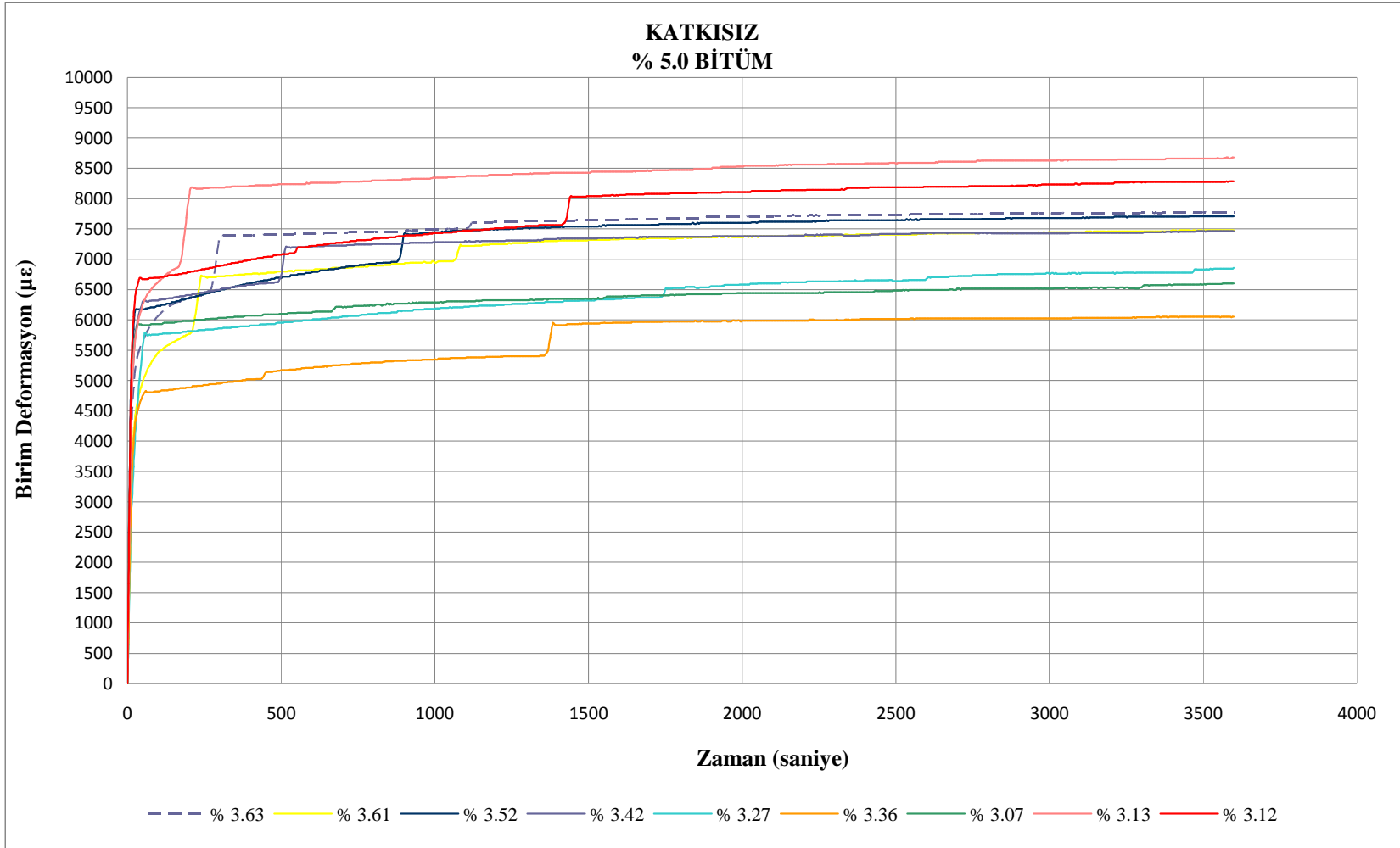
Çizelge 6.17. % 4.5 PP katkılı, % 5.0 PP katkılı, % 5.5 PP numunelerin fiziksel özelliklerini gösterir tablolar

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			1029			2757			4.5		
	AC	%	a(100+)	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM
1	5.000	4.762	60.000	1142.300	666.600	475.900	1142.300	666.600	475.900	1142.300	666.600	475.900	1142.300	666.600	475.900
2	5.000	4.762	60.000	1146.200	669.600	476.600	1146.200	669.600	476.600	1146.200	669.600	476.600	1146.200	669.600	476.600
3	5.000	4.762	60.000	1147.300	670.200	477.100	1147.300	670.200	477.100	1147.300	670.200	477.100	1147.300	670.200	477.100
4	5.000	4.762	60.000	1141.300	664.200	477.100	1141.300	664.200	477.100	1141.300	664.200	477.100	1141.300	664.200	477.100
5	5.000	4.762	60.000	1145.200	664.800	480.400	1145.200	664.800	480.400	1145.200	664.800	480.400	1145.200	664.800	480.400
6	5.000	4.762	60.000	1144.000	669.400	474.600	1144.000	669.400	474.600	1144.000	669.400	474.600	1144.000	669.400	474.600
Ortl.															

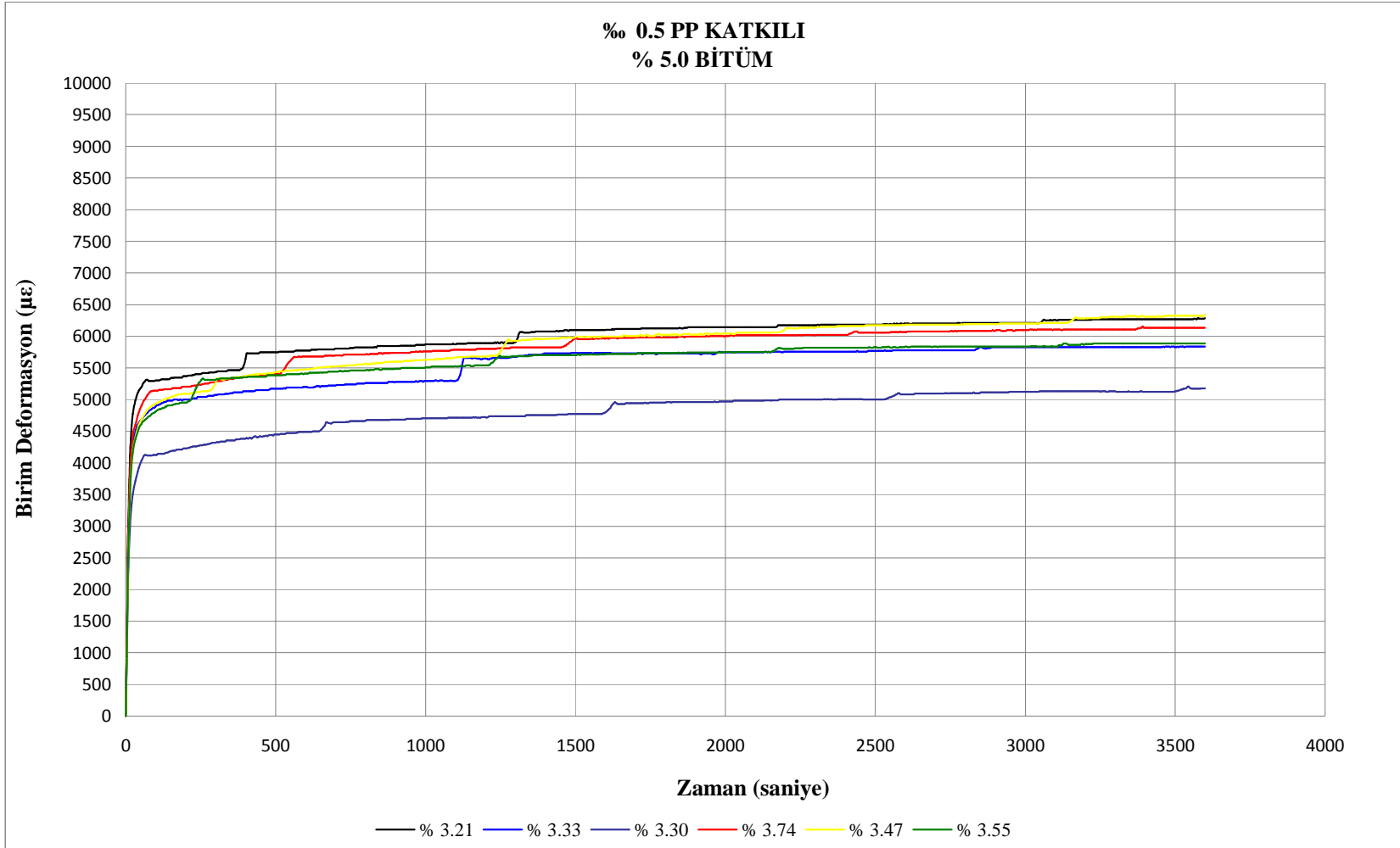
BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			1029			2757			5.0		
	AC	%	a(100+)	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM
1	5.000	4.762	60.000	1149.400	666.600	482.800	1149.400	666.600	482.800	1149.400	666.600	482.800	1149.400	666.600	482.800
2	5.000	4.762	60.000	1150.200	668.300	481.900	1150.200	668.300	481.900	1150.200	668.300	481.900	1150.200	668.300	481.900
3	5.000	4.762	60.000	1153.300	670.900	479.200	1153.300	670.900	479.200	1153.300	670.900	479.200	1153.300	670.900	479.200
4	5.000	4.762	60.000	1149.100	670.200	478.900	1149.100	670.200	478.900	1149.100	670.200	478.900	1149.100	670.200	478.900
5	5.000	4.762	60.000	1156.900	672.700	484.200	1156.900	672.700	484.200	1156.900	672.700	484.200	1156.900	672.700	484.200
6	5.000	4.762	60.000	1156.200	672.200	484.000	1156.200	672.200	484.000	1156.200	672.200	484.000	1156.200	672.200	484.000
Ortl.															

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			1029			2757			5.5		
	AC	%	a(100+)	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM	AGREGA	SUDA	HACİM
1	5.000	4.762	59.500	1142.300	666.600	475.900	1142.300	666.600	475.900	1142.300	666.600	475.900	1142.300	666.600	475.900
2	5.000	4.762	60.000	1153.300	670.200	483.100	1153.300	670.200	483.100	1153.300	670.200	483.100	1153.300	670.200	483.100
3	5.000	4.762	60.000	1149.200	670.300	478.900	1149.200	670.300	478.900	1149.200	670.300	478.900	1149.200	670.300	478.900
4	5.000	4.762	60.000	1150.200	670.000	480.300	1150.200	670.000	480.300	1150.200	670.000	480.300	1150.200	670.000	480.300
5	5.000	4.762	60.000	1147.500	667.700	478.100	1147.500	667.700	478.100	1147.500	667.700	478.100	1147.500	667.700	478.100
6	5.000	4.762	60.000	1147.000	667.700	479.300	1147.000	667.700	479.300	1147.000	667.700	479.300	1147.000	667.700	479.300
Ortl.															

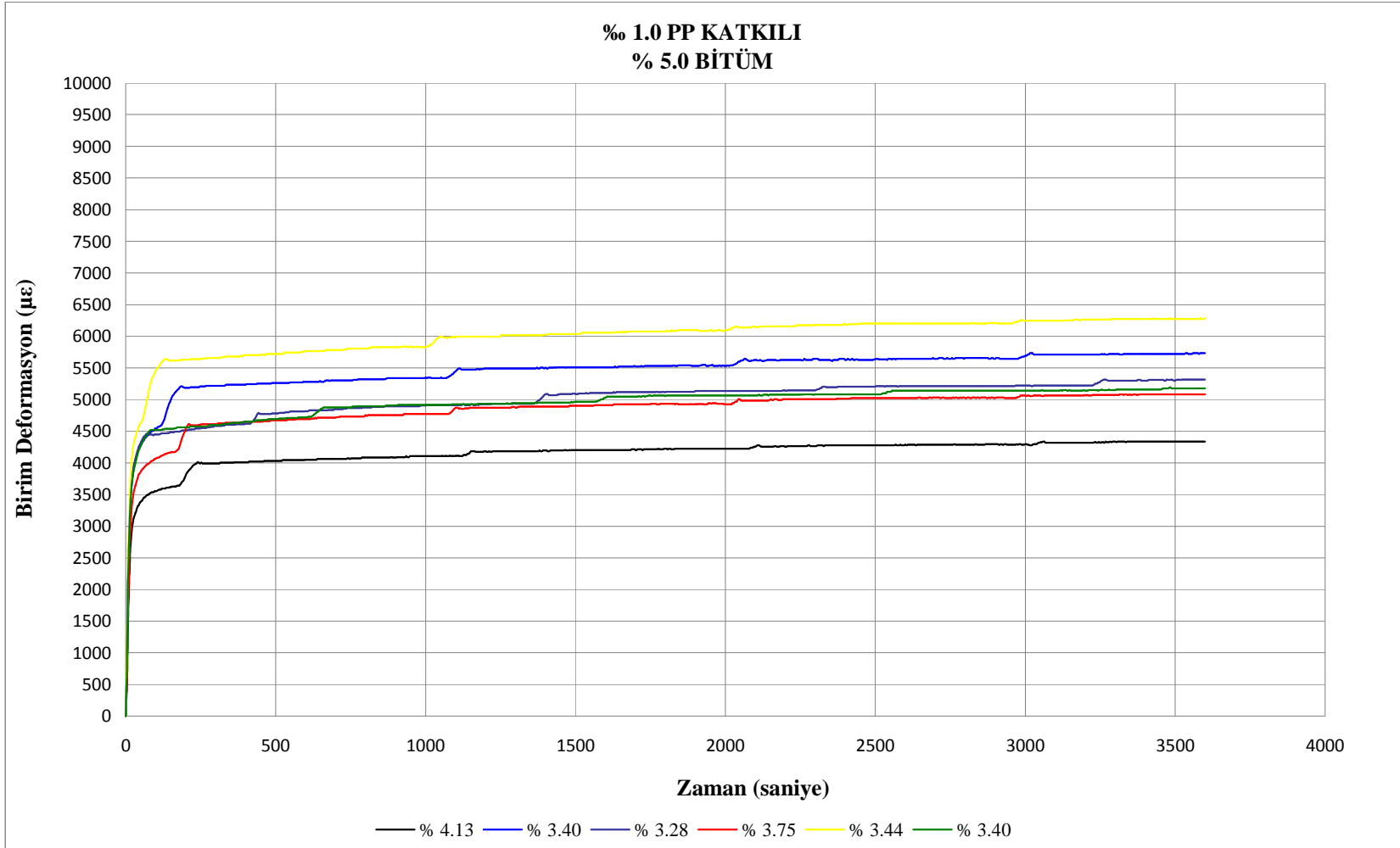
Şekil 6.39. Katkısız numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri



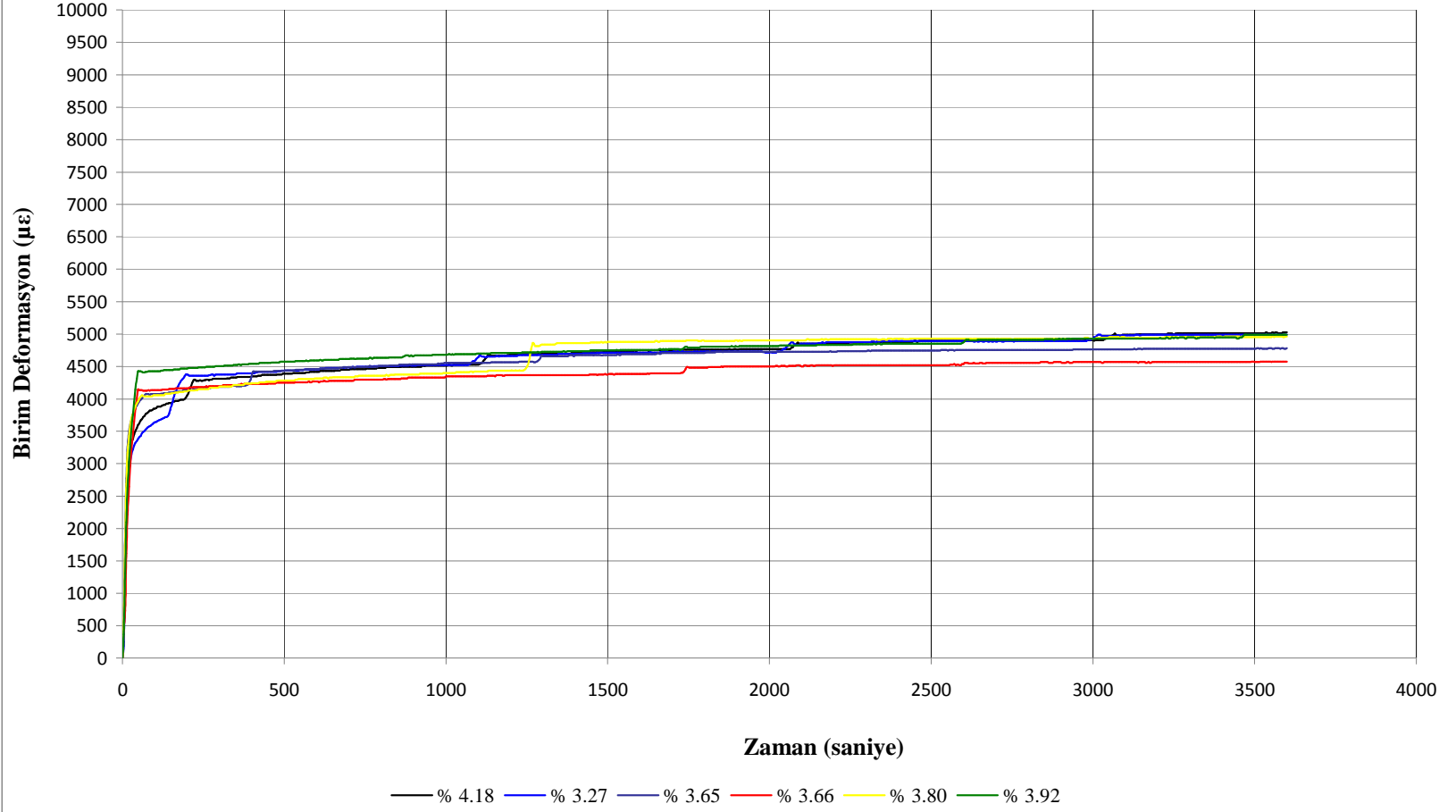
Şekil 6.40. % 0.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri



Şekil 6.41. % 1.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

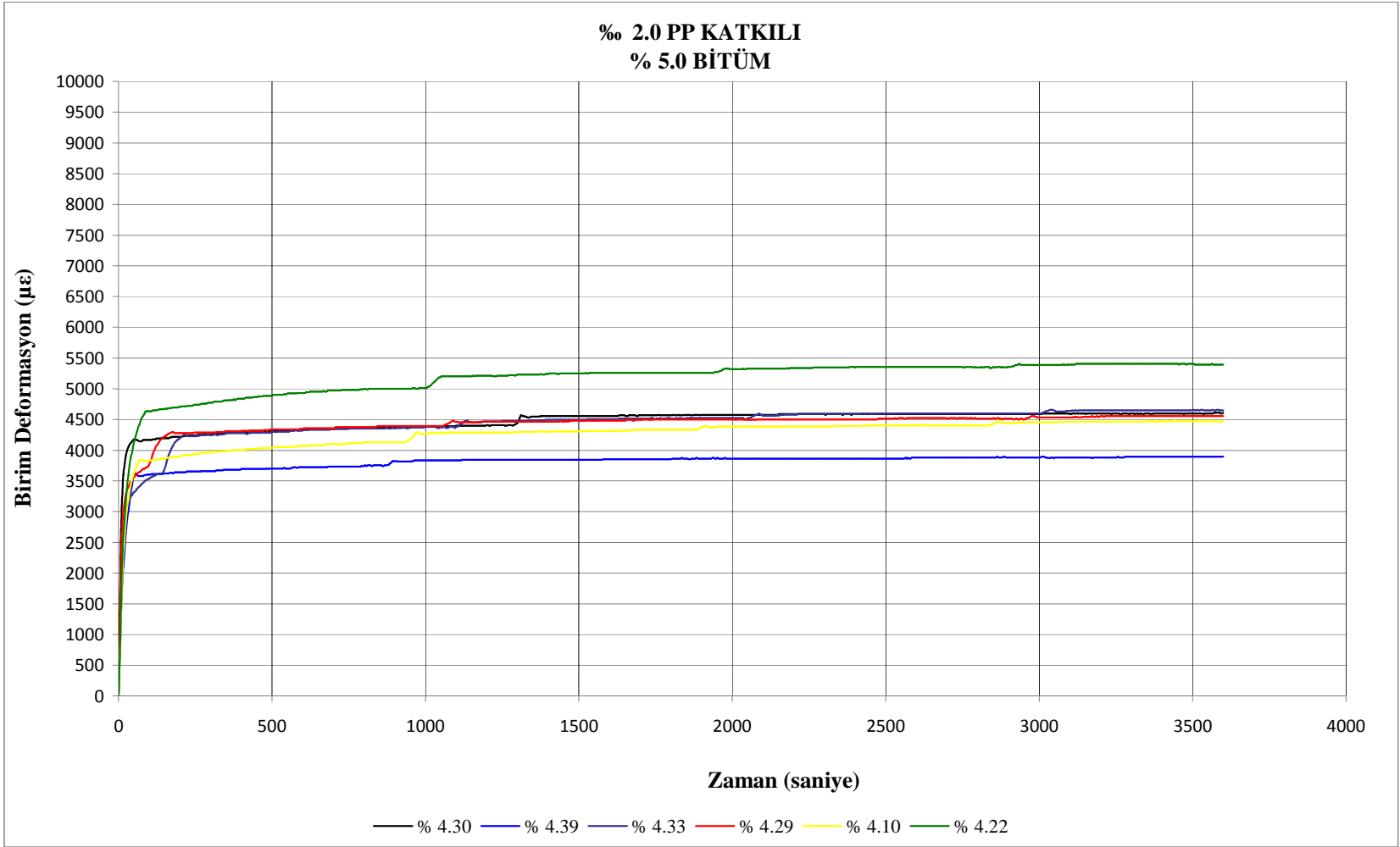


**% 1.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**

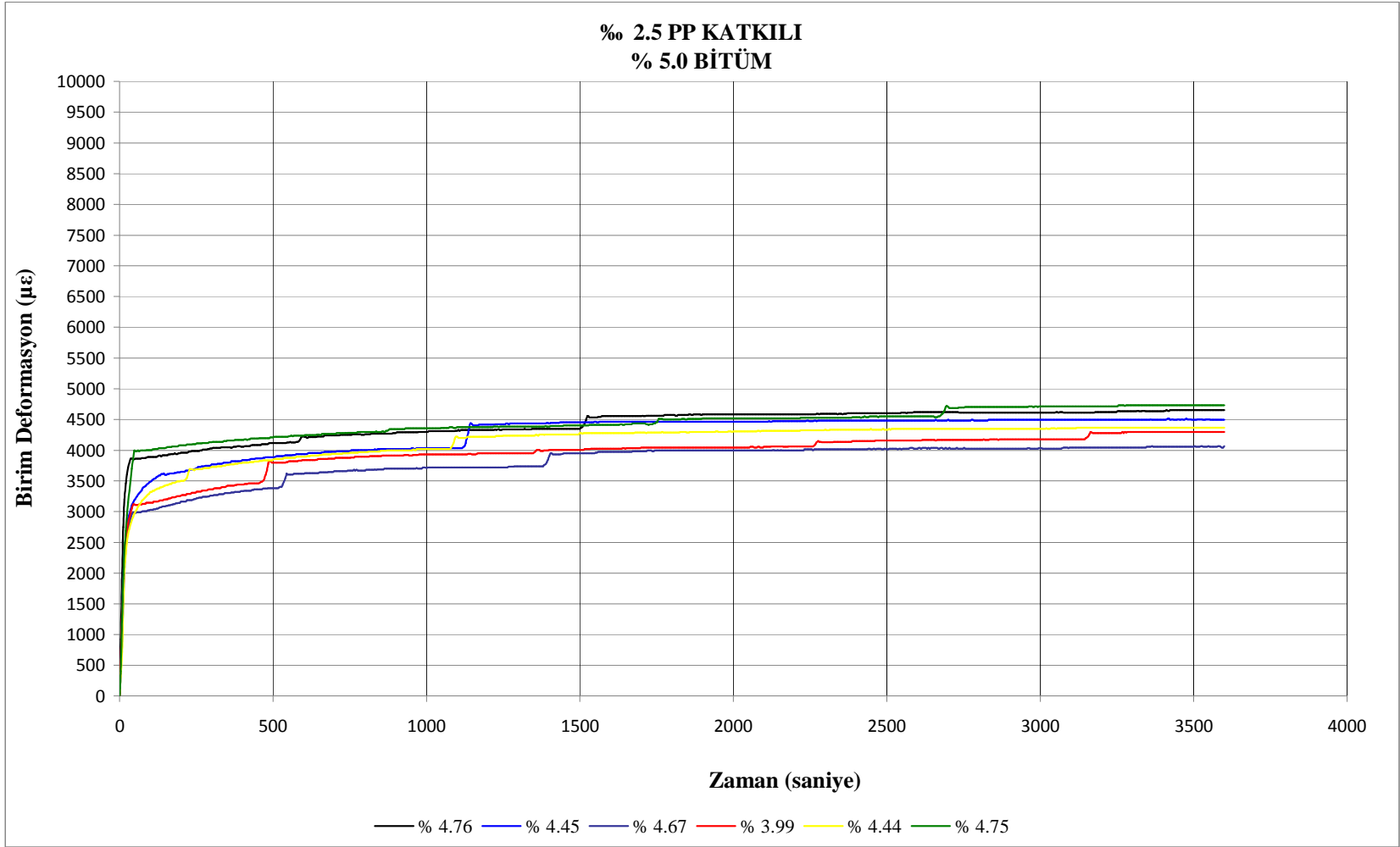


Şekil 6.42. % 1.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

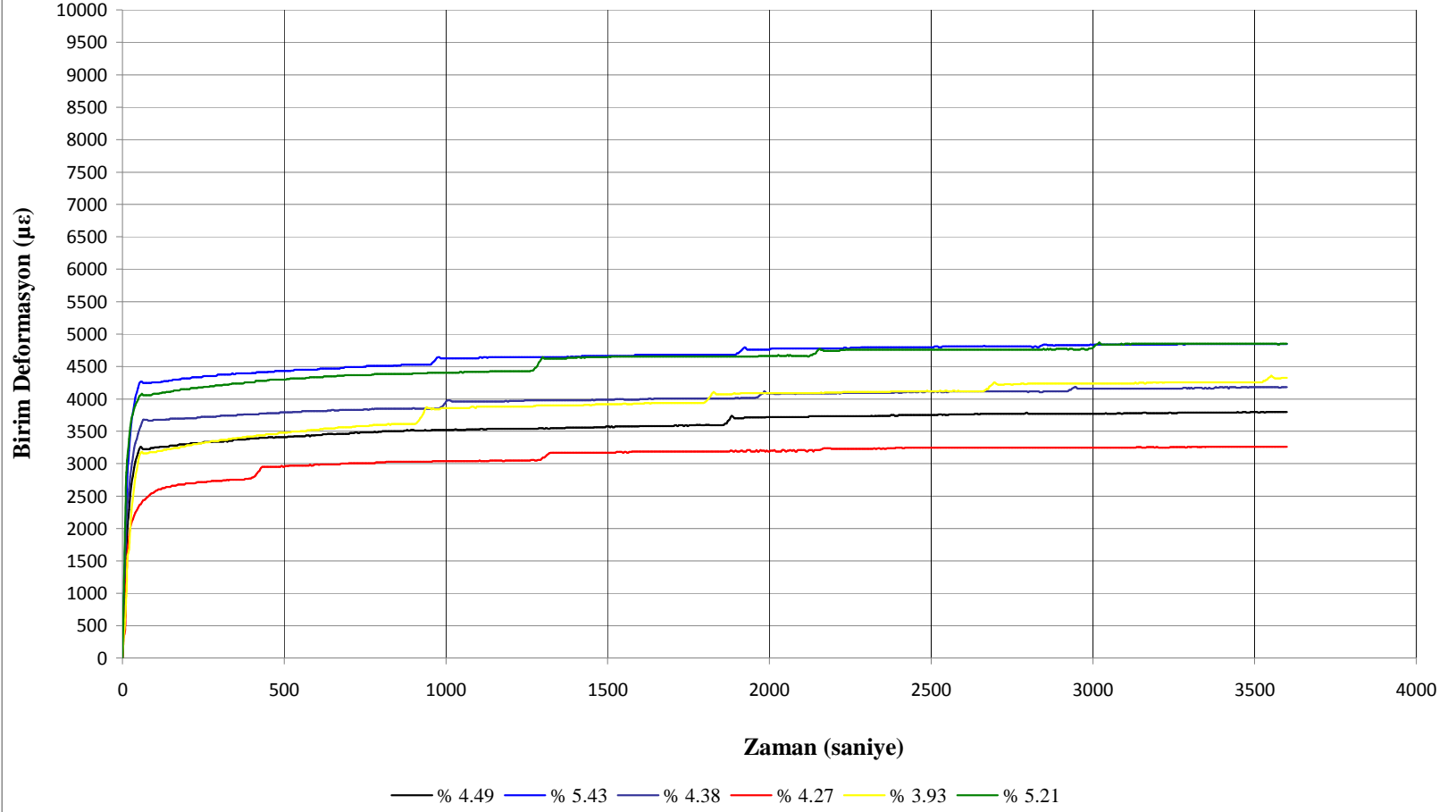
Şekil 6.43. % 2.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri



Şekil 6.44. % 2.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

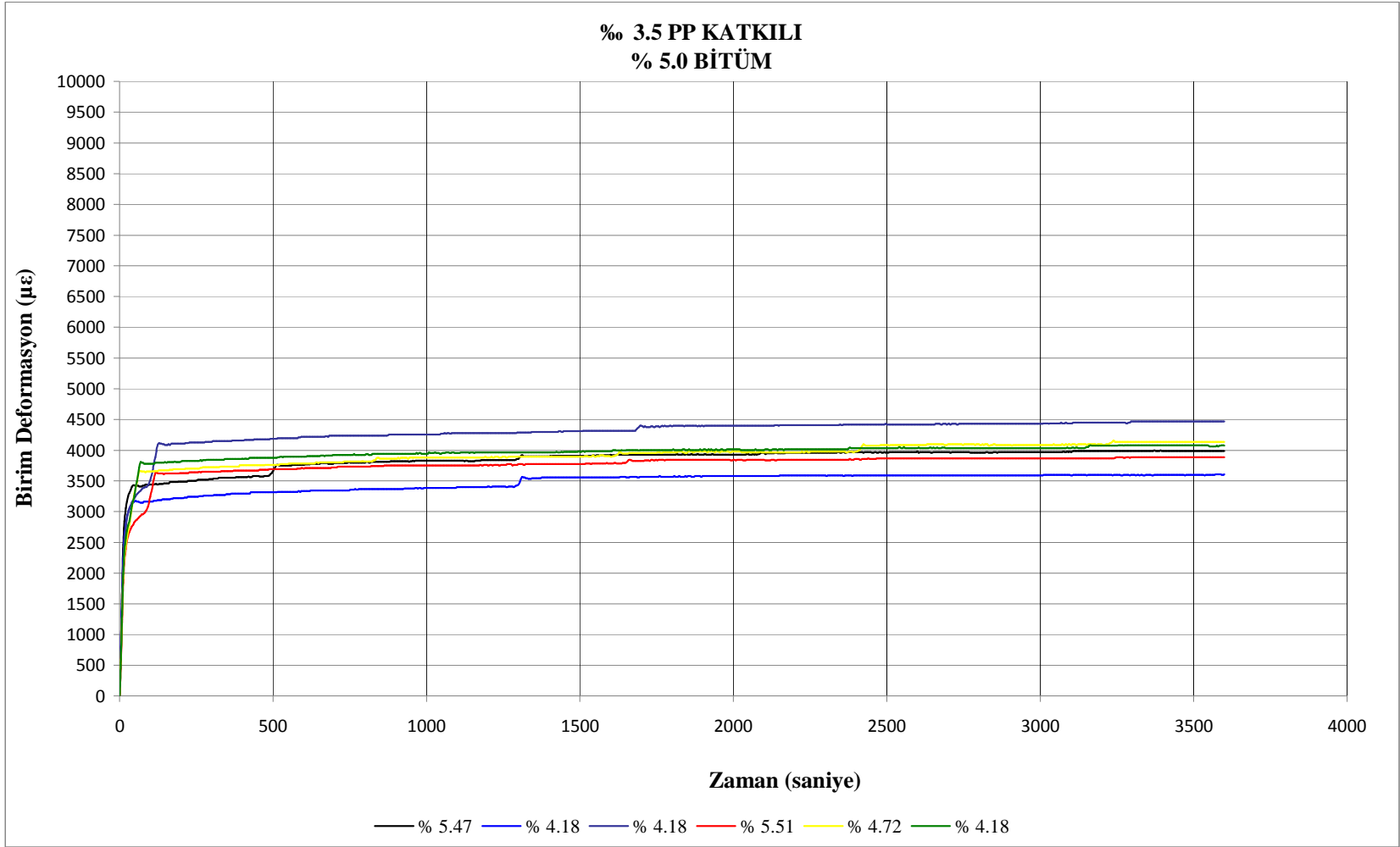


**% 3.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



Şekil 6.45. % 3.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

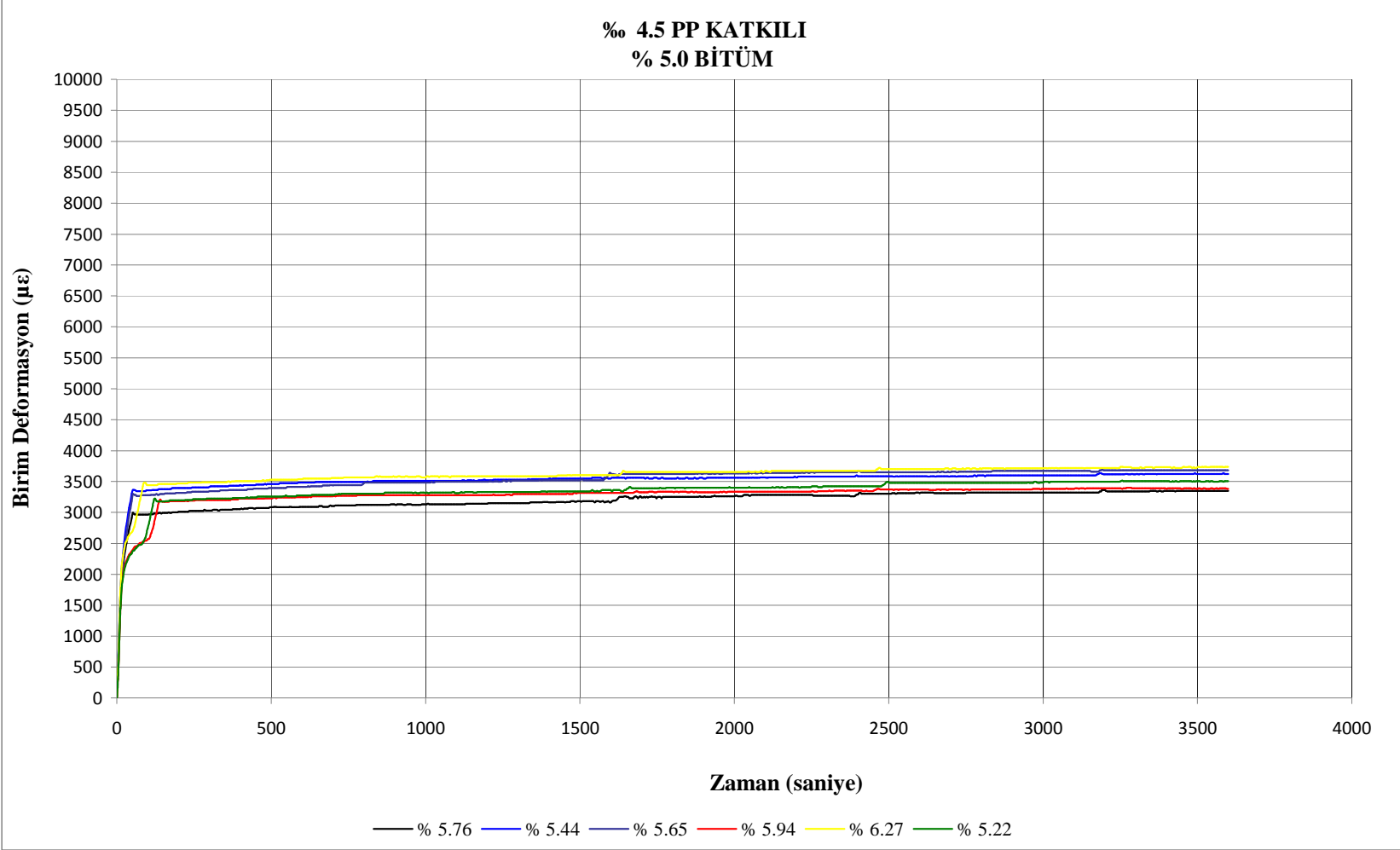
Şekil 6.46. % 3.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri



**% 4.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**

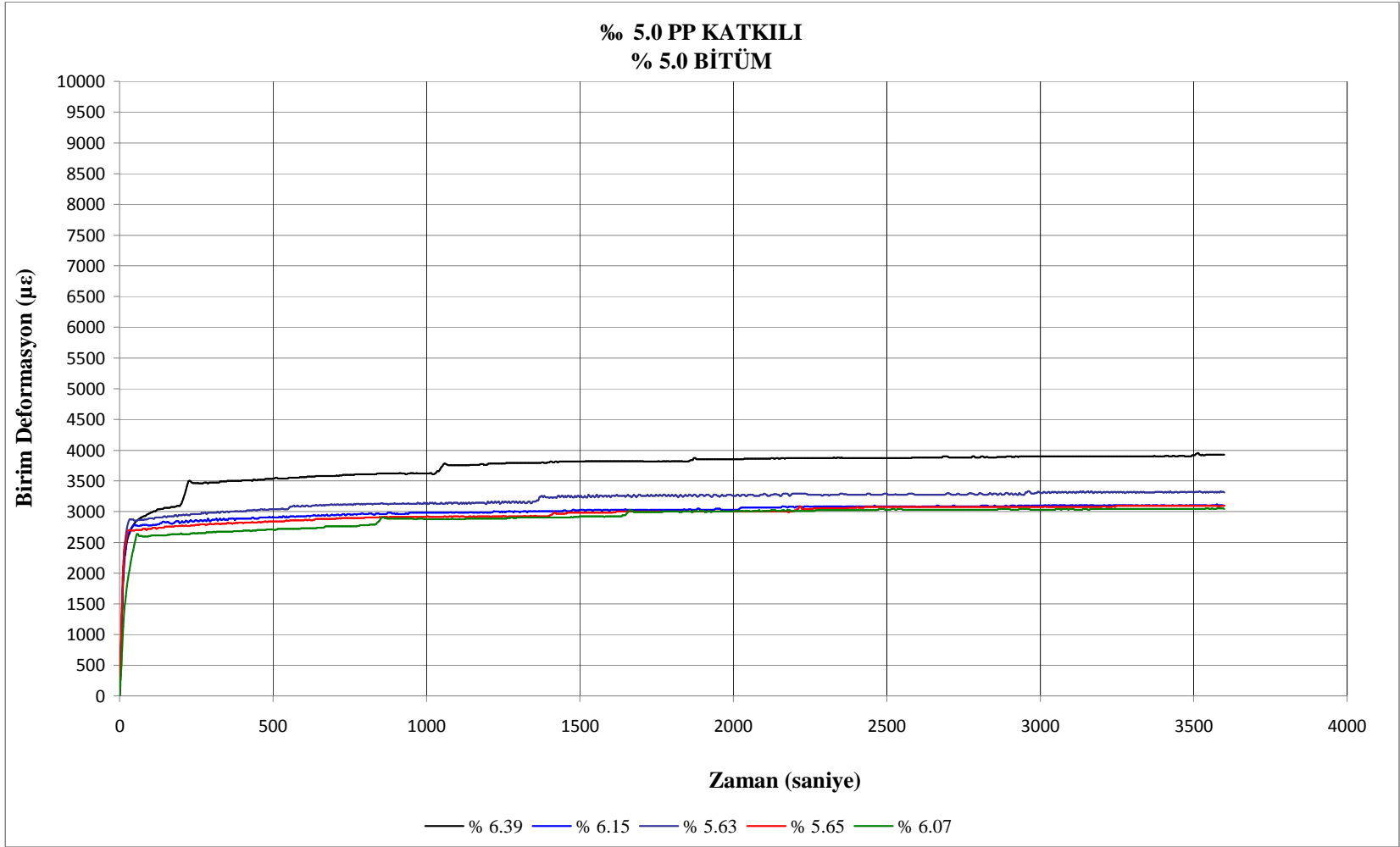


Şekil 6.47. % 4.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

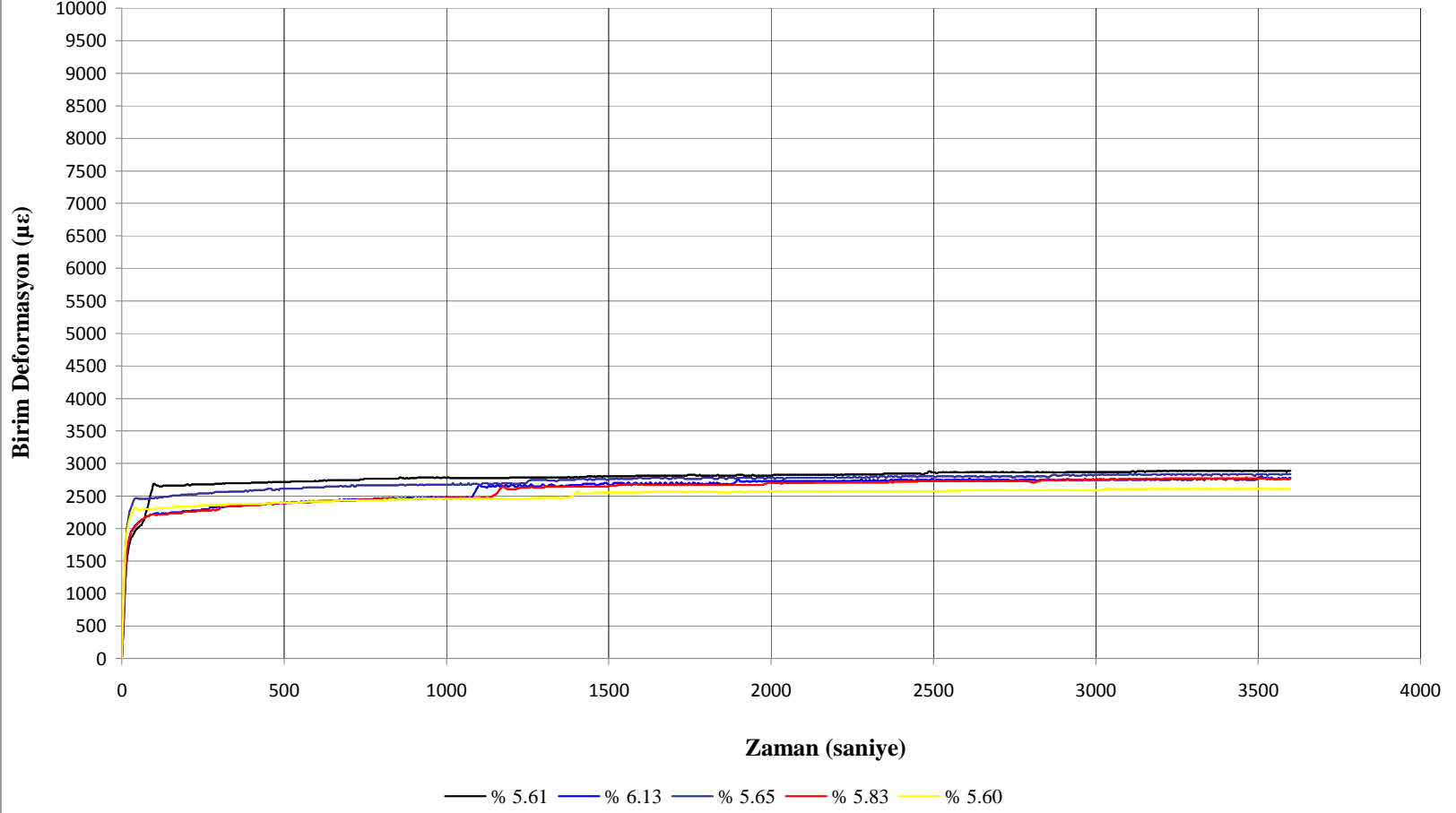


Şekil 6.48. % 4.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

Şekil 6.49. % 5.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

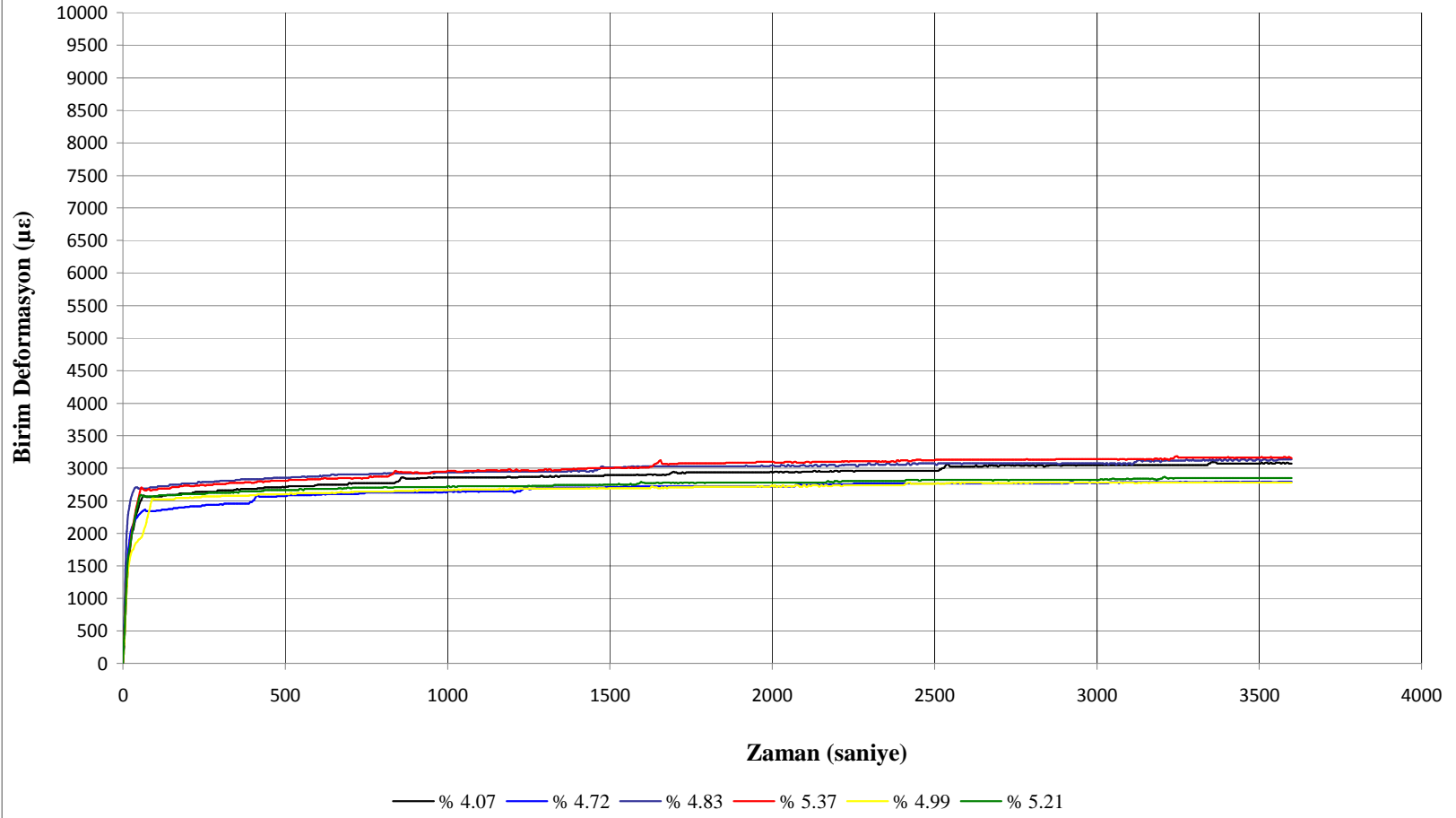


**% 5.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



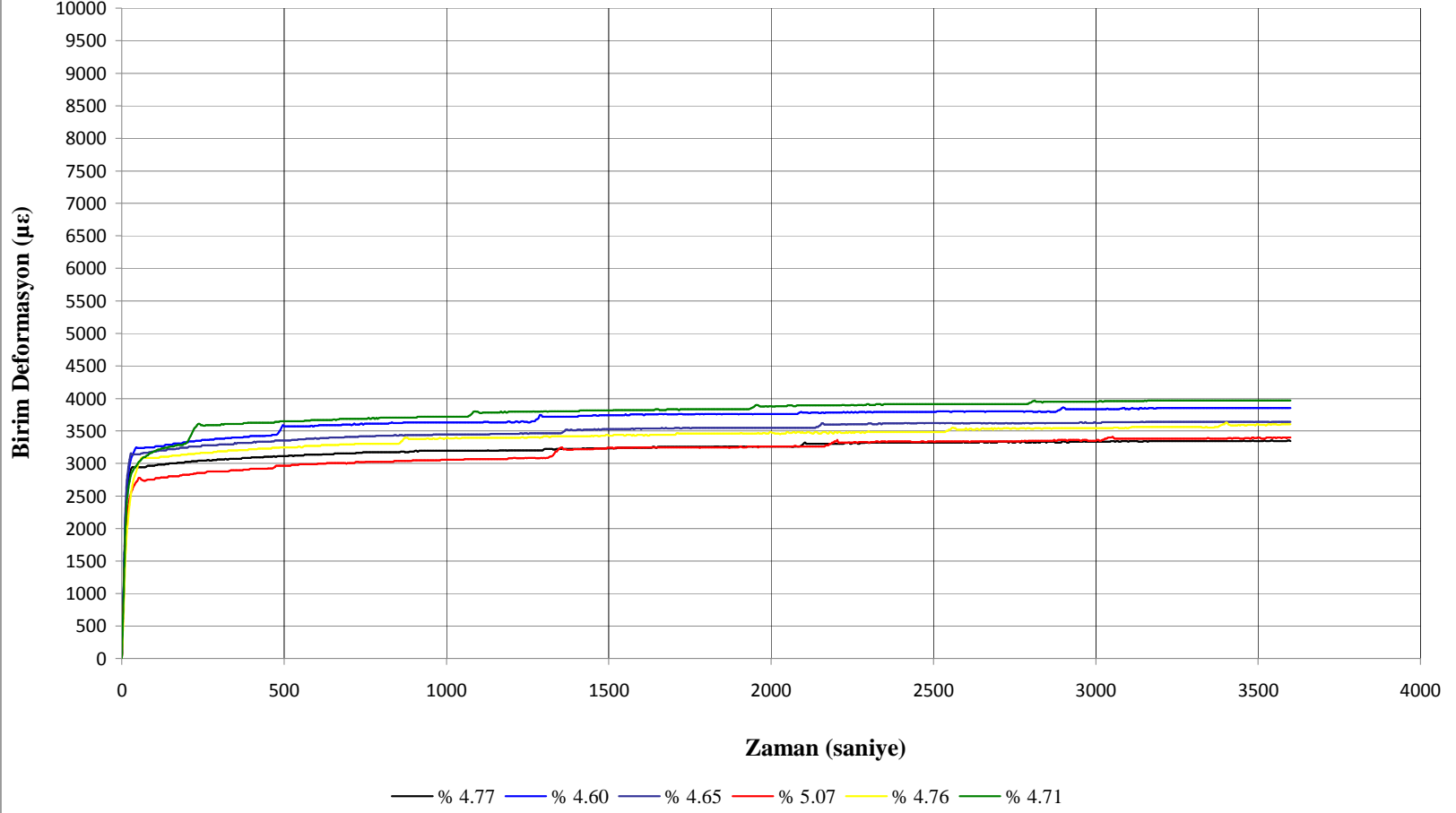
Şekil 6.50. % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

**% 6.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



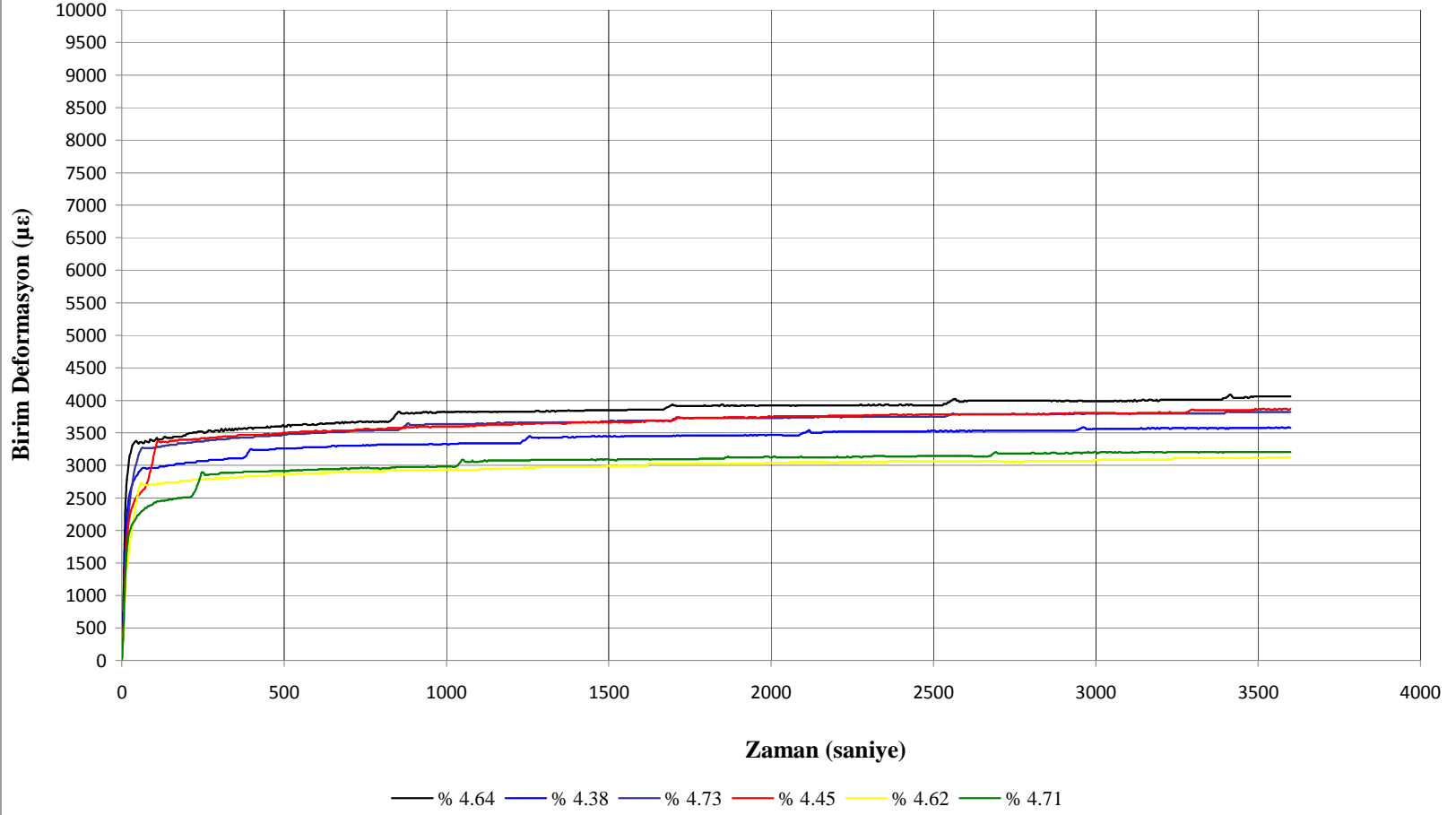
Şekil 6.51. % 6.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

**% 6.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**

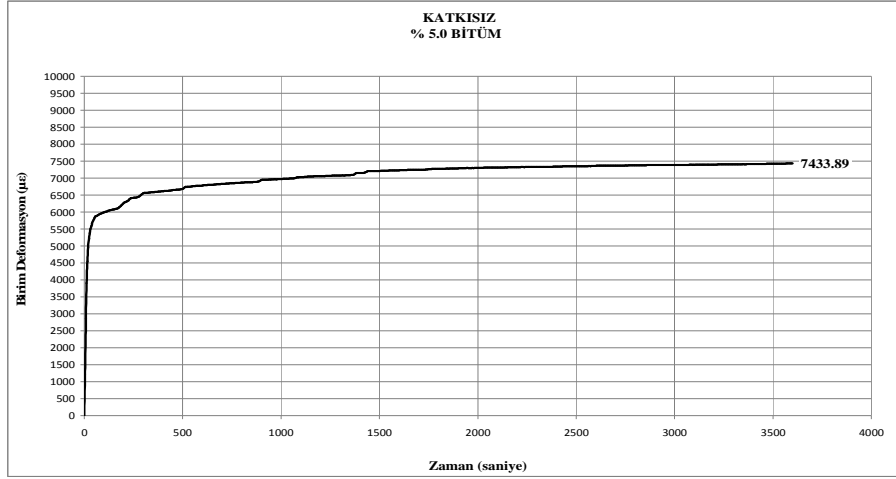


Şekil 6.52. % 6.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

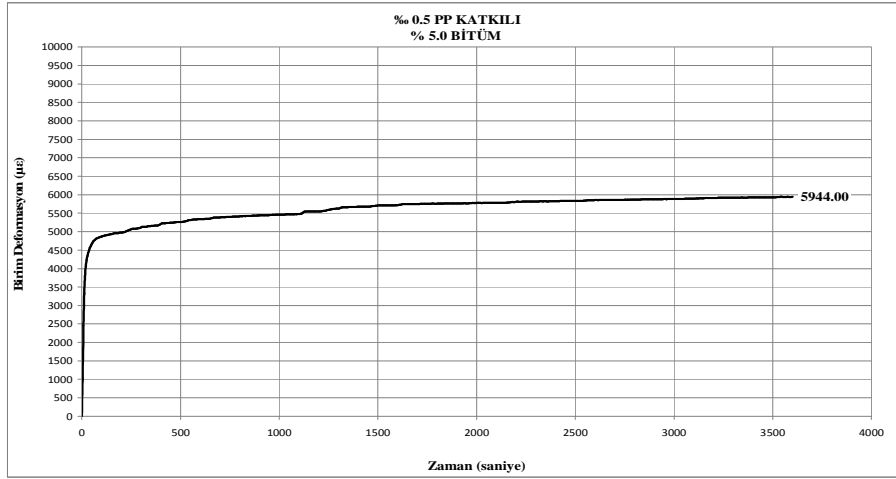
**% 7.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



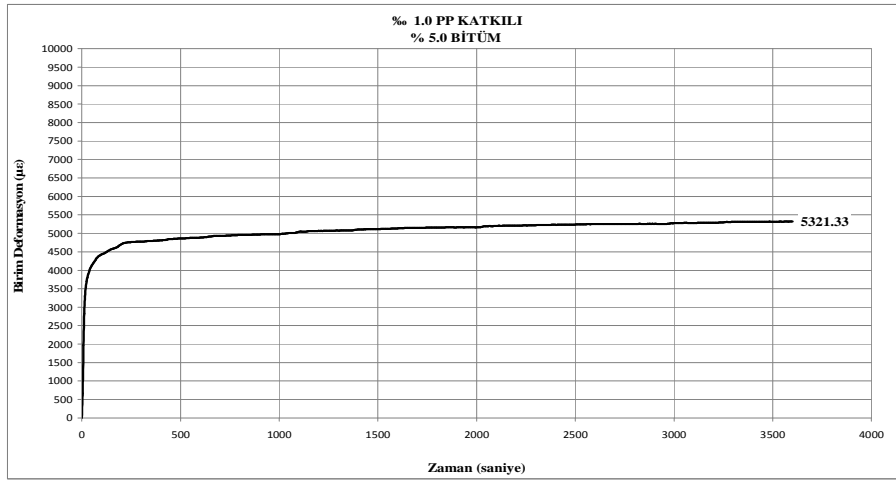
Şekil 6.53. % 7.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri



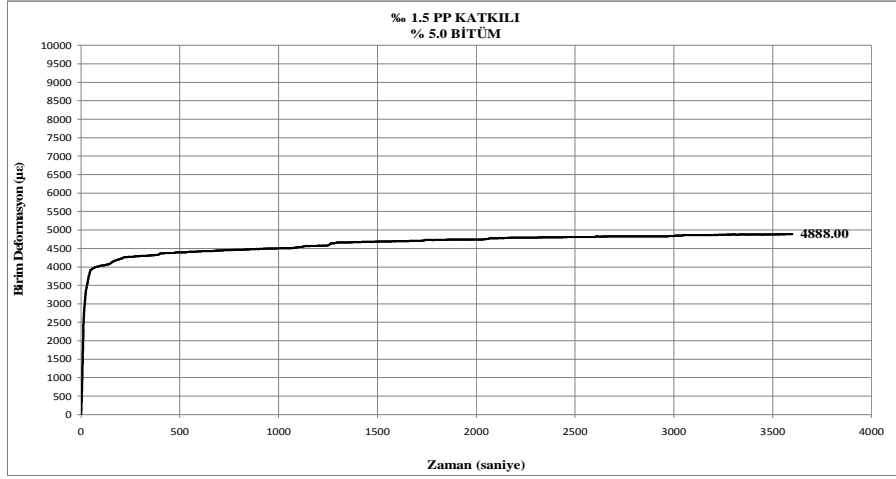
Şekil 6.54. Katkısız numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



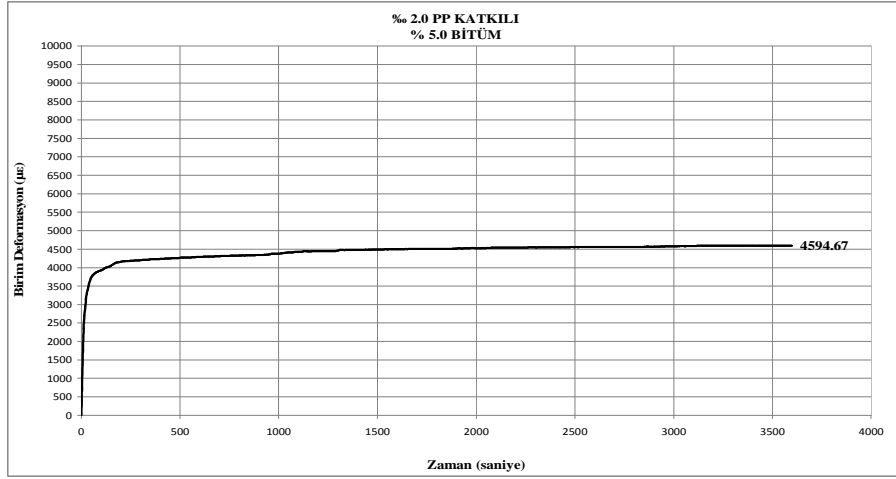
Şekil 6.55. % 0.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



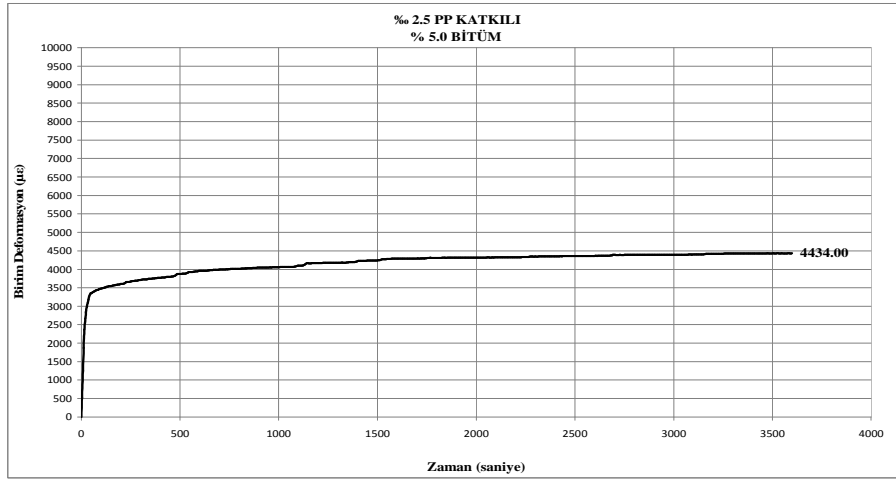
Şekil 6.56. % 1.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



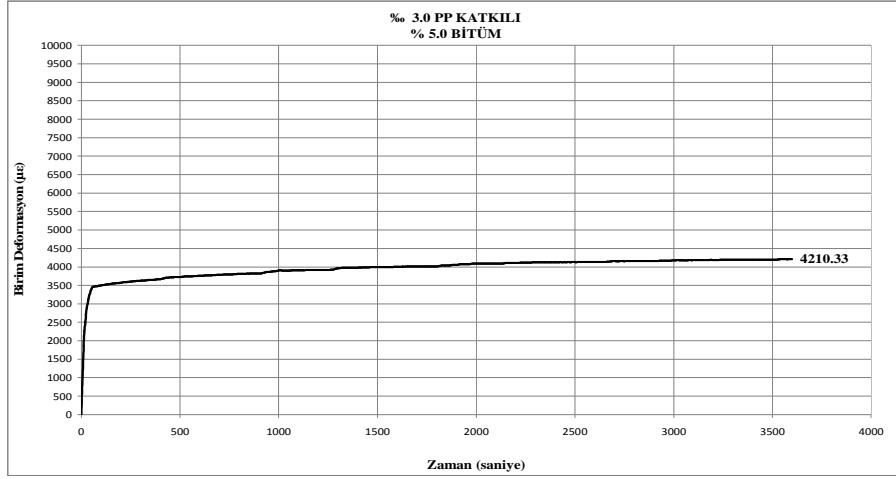
Şekil 6.57. % 1.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



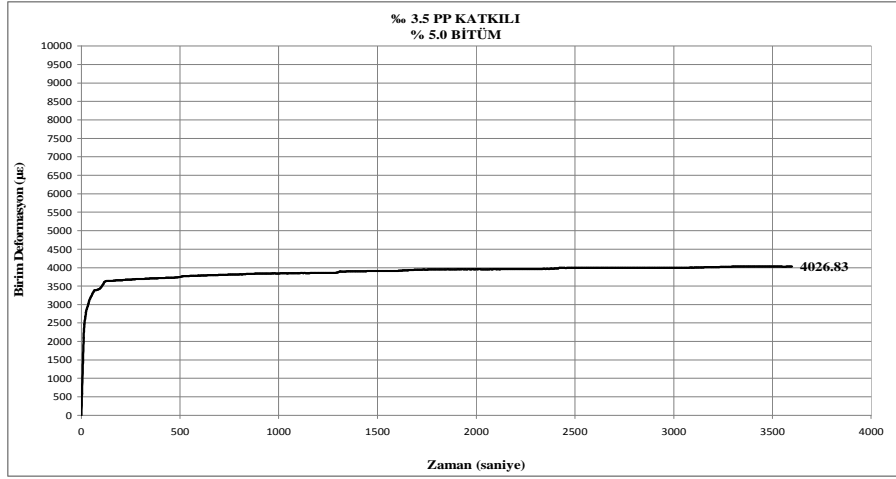
Şekil 6.58. % 2.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



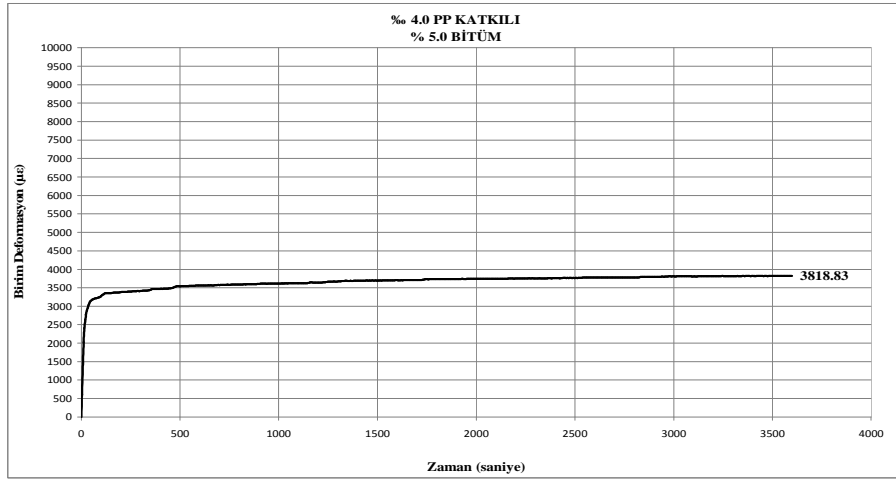
Şekil 6.59. % 2.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



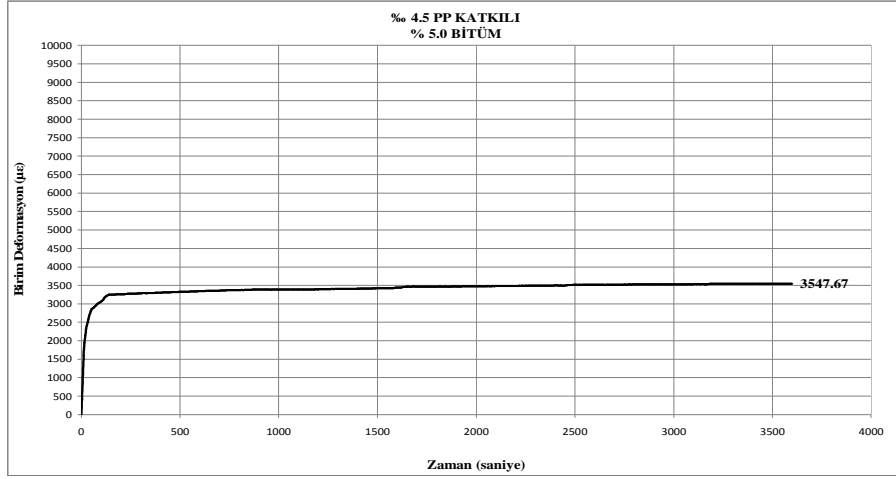
Şekil 6.60. % 3.0 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



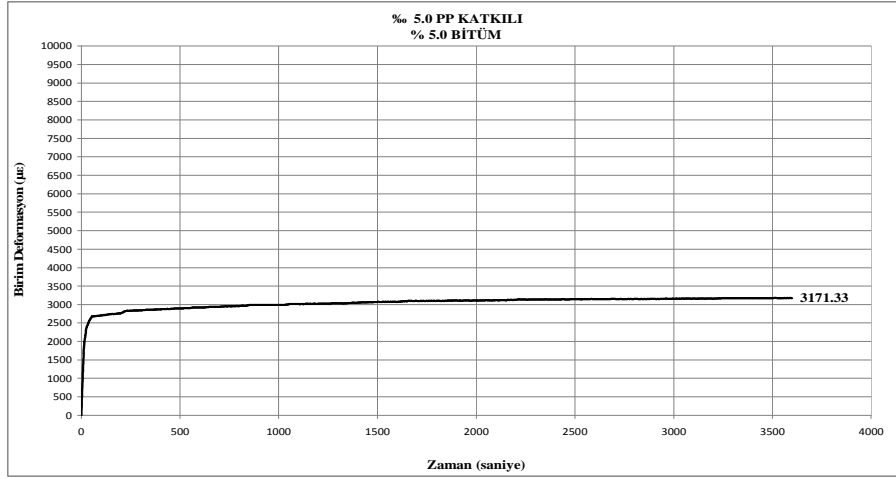
Şekil 6.61. % 3.5 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



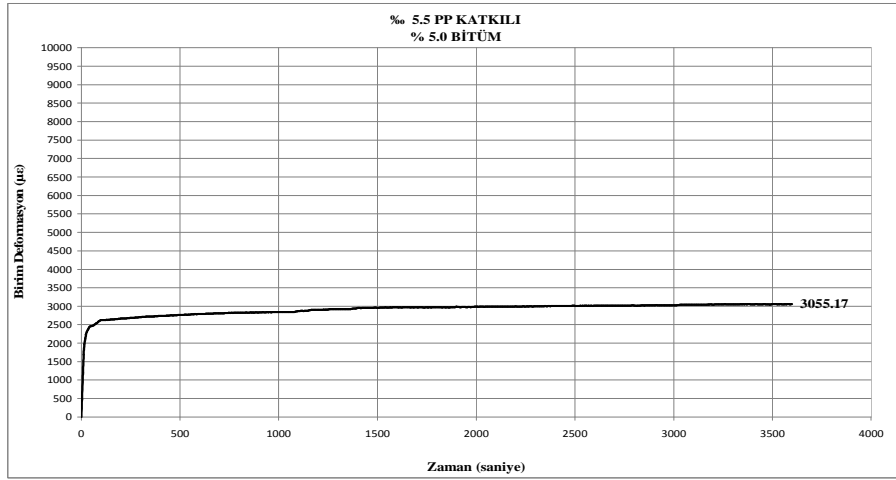
Şekil 6.62. % 4.0 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



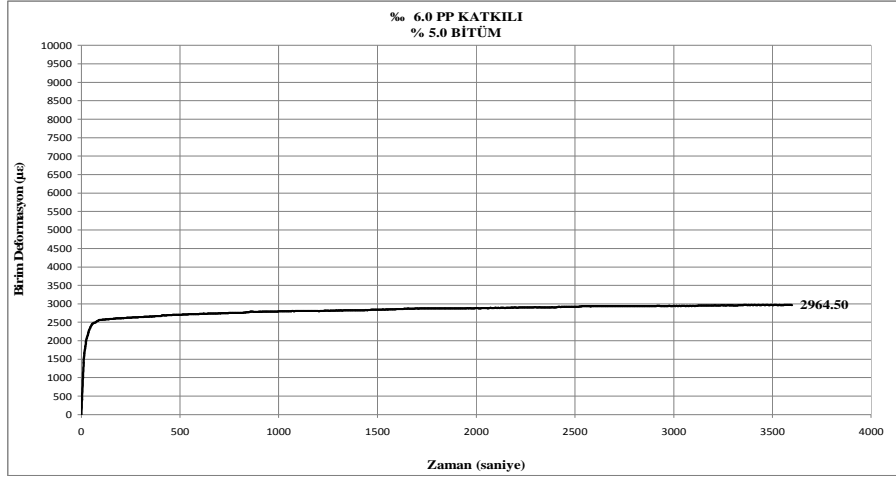
Şekil 6.63. % 4.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



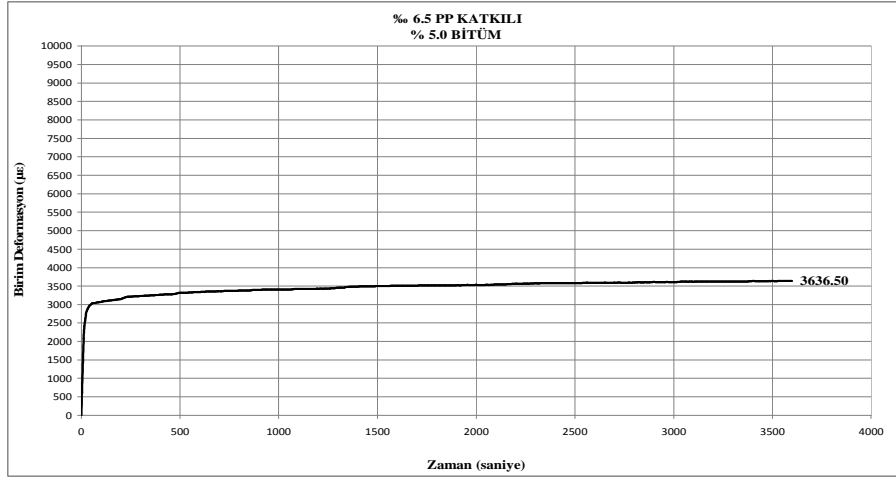
Şekil 6.64. % 5.0 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



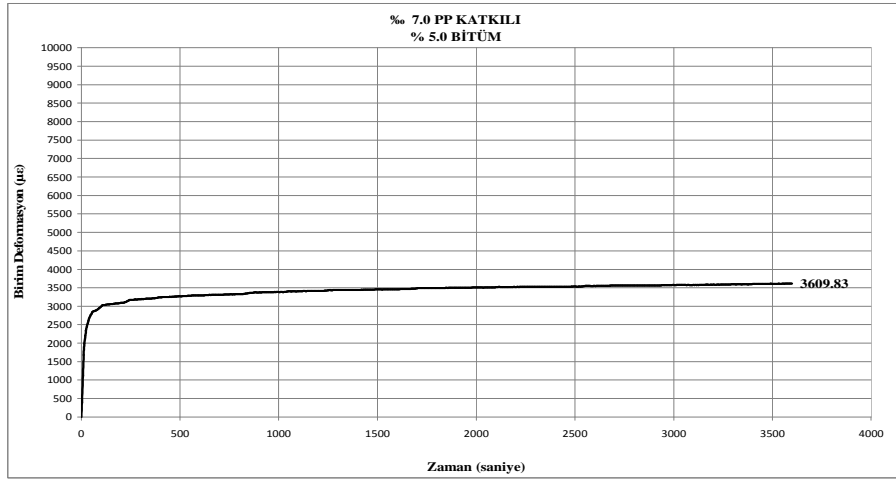
Şekil 6.65. % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



Şekil 6.66. % 6.0 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



Şekil 6.67. % 6.5 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi



Şekil 6.68. % 7.0 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrisi

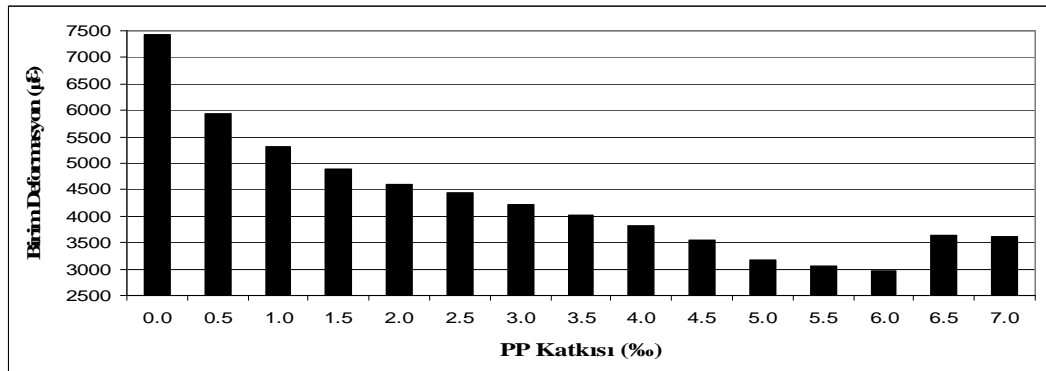
Şekil 6.39 ila 6.53 arasındaki birim deformasyon-zaman grafikleri incelendiğinde, en başta göze çarpan olgu, farklı hava boşluğu değerlerine sahip olmalarına rağmen, polipropilen katkı oranları bazında gruplandırılmaya tabi tutulmuş tüm Marshall numunelerinin son derece tutarlı bir mekanik davranış sergileyerek ortaya çıkmış olan birim deformasyon-zaman eğrilerinin birbirleri ile ve kendi içlerinde olan tutarlı halleridir. Aslında bir adım daha ileri gidip hava boşluğu oranları, gruplandırmalar bazında incelendiğinde (ki bunlar lejand olarak birim deformasyon-zaman ve rijitlik modülü-zaman grafiklerinin altında verilmektedir), bunların da birbirlerine son derece yakın oldukları gözlemlenmektedir. Son olarak birim deformasyon-zaman eğrilerinin teğetlerinin nihai eğimleri de statik sünme deneyinin tabiatından dolayı “sıfır” değerine son derece yaklaşmaktadır. Tüm bu anlatılanlardan çıkarılabilecek ana sonuç, numune hazırlama ve test etme aşamalarında son derece tutarlı ve başarılı bir prosedür uygulandığıdır.

Tüm deneyler boyunca aynı önyükleme ve yükleme süreleri ve yük değerleri kullanılmış olmasına rağmen, özellikle Şekil 6.39’da gözlemlenen ve kendisini birim deformasyon-zaman eğrilerinde kuvvetli bir şekilde hissettiren basamak şeklindeki süreksizlikler, statik sünme testinin tabiatından kaynaklanan ve numunelerdeki kalıcı deformasyonların (oturmaların) kendini hissettirmesi ile ortaya çıkan ve ancak rahatlıkla da ihmal edilebilecek sorunlardır. Şekil 6.39, katkısız numunelerin birim deformasyon-zaman eğrileridir. Polipropilen katkılı numunelere geçildikçe bu etkinin hafiflemesi ve katkı miktarı arttıkça bu etkinin iyice ortadan kalkması beklenmektedir ve ilgili değer eğrilerin gözlemlenmesi, bu iddiayı doğrular niteliktedir.

Katkısız numunelerin eğrilerinin toplanmış olduğu Şekil 6.39’dan başlayıp Şekil 6.53’e doğru gidildikçe, ortaya çıkan (biriken) birim deformasyon değerlerinin de gözle görülür bir biçimde azalması polipropilen modifikasyonun tabiatının bir gereğidir ve oldukça da dikkat çekicidir. Nitekim bu etkiyi çok daha iyi bir biçimde yorumlayabilmek adına; Şekil 6.54’den başlayarak 6.68’e kadar devam eden “zarf eğrileri” çizilerek (envelope curves) bu etki tam anlamı ile ortaya çıkarılmıştır. Mesela Şekil 6.54 incelendiğinde, bu şeklin Şekil 6.39’daki 9 adet farklı numunenin (katkısız) birim deformasyon-zaman eğrilerinin bir

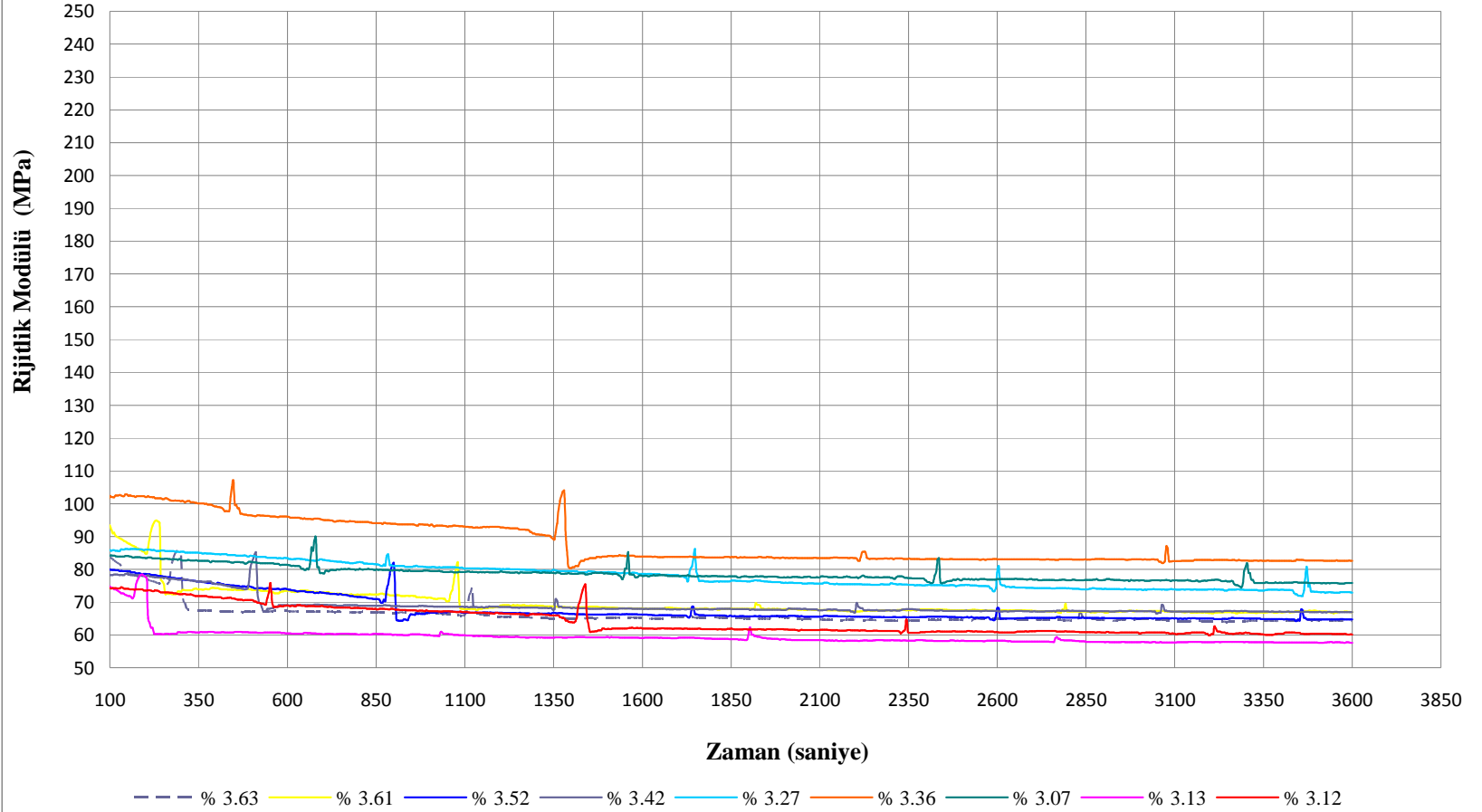
ortalama (zarf) eğrisi olduğu aşıkardır. Şekil 6.54'deki bu eğrinin en sağ ucunda yazan değer ise 70 dakikalık önyükleme ve yüklemeyi içine alan süre sonunda, katkısız numunelerde ortaya çıkan kalıcı birim deformasyonun $\mu\epsilon$ cinsinden bir göstergesidir. Bu tip zarf eğrilerinin son derece rahatlıkla çizilebilmiş olmalarının en temel nedeni numuneler arasındaki üniformiteden kaynaklanmaktadır. Bu sağ üst köşedeki değerler Şekil 6.54'den Şekil 6.68'e kadar incelendiğinde katkısız numunelerde 7433.89 $\mu\epsilon$ olan bu değer, % 6.0 polipropilen katkılı numunelerde 2964.50 $\mu\epsilon$ 'a kadar düştüğü görülmektedir. Bu değer birim deformasyonlarda meydana gelen % 60'lık bir azalmaya tekabül etmektedir. Bu son derece çarpıcı bir sonuçtur ve daha önceki yıllarda, asfaltın polipropilen modifikasyonu ile yapılmış olan çalışmalarda ortaya çıkan sonuçlarla da birebir örtüşmektedir [69,74]. Bu çarpıcı sonuç daha da irdelendiğinde % 6.0'lık polipropilen katkısından sonraki iki değer olan % 6.5 ve % 7.0'li polipropilen katkılarının zarf eğrileri olan, Şekil 6.67 ve 6.68'de toplam birim deformasyon değerlerinin artmaya başladığı görülmektedir. Bu şaşırtıcı ama bir o kadar da beklenen bir durumdur. Zira bir "optimum polipropilen miktarı" zaten mutlaka var olması gereken bir olgudur ve Şekil 6.54 ile 6.68 arasındaki tüm eğrilerin incelenmesi bunu açıkça desteklemektedir.

Şekil 6.69 bu optimal davranışı bir bütün olarak gözler önüne sermektedir. Böylece tam bir özet ve bir anlamda bu son derece enteresan mekanik davranışın güzel bir dışavurumu betimlenmektedir.



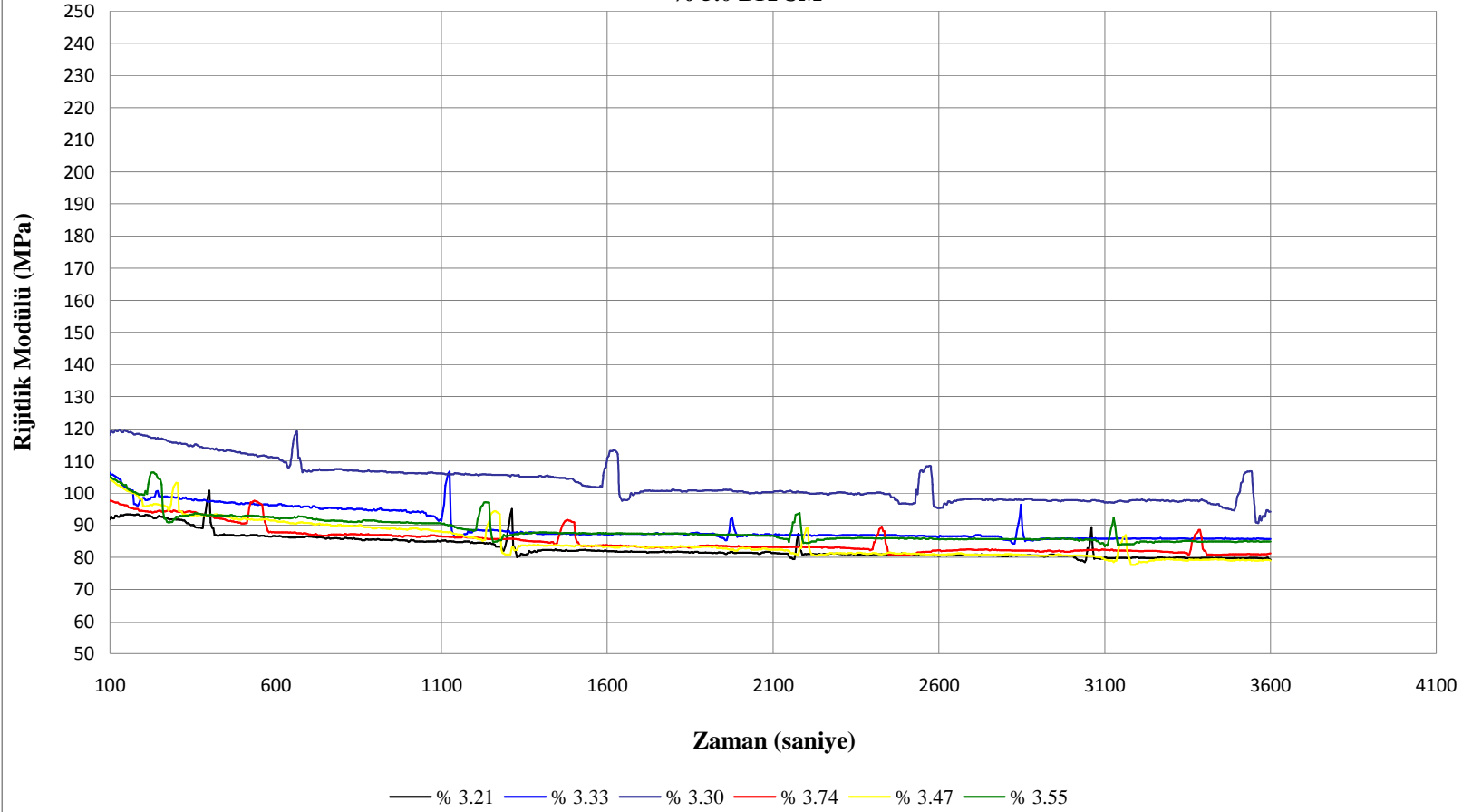
Şekil 6.69. Birim deformasyon-polipropilen miktarı ilişkisi (600 saniye önyükleme ve 3600 saniye yüklemeye süresi sonunda)

**KATKISIZ
% 5.0 BİTÜM**



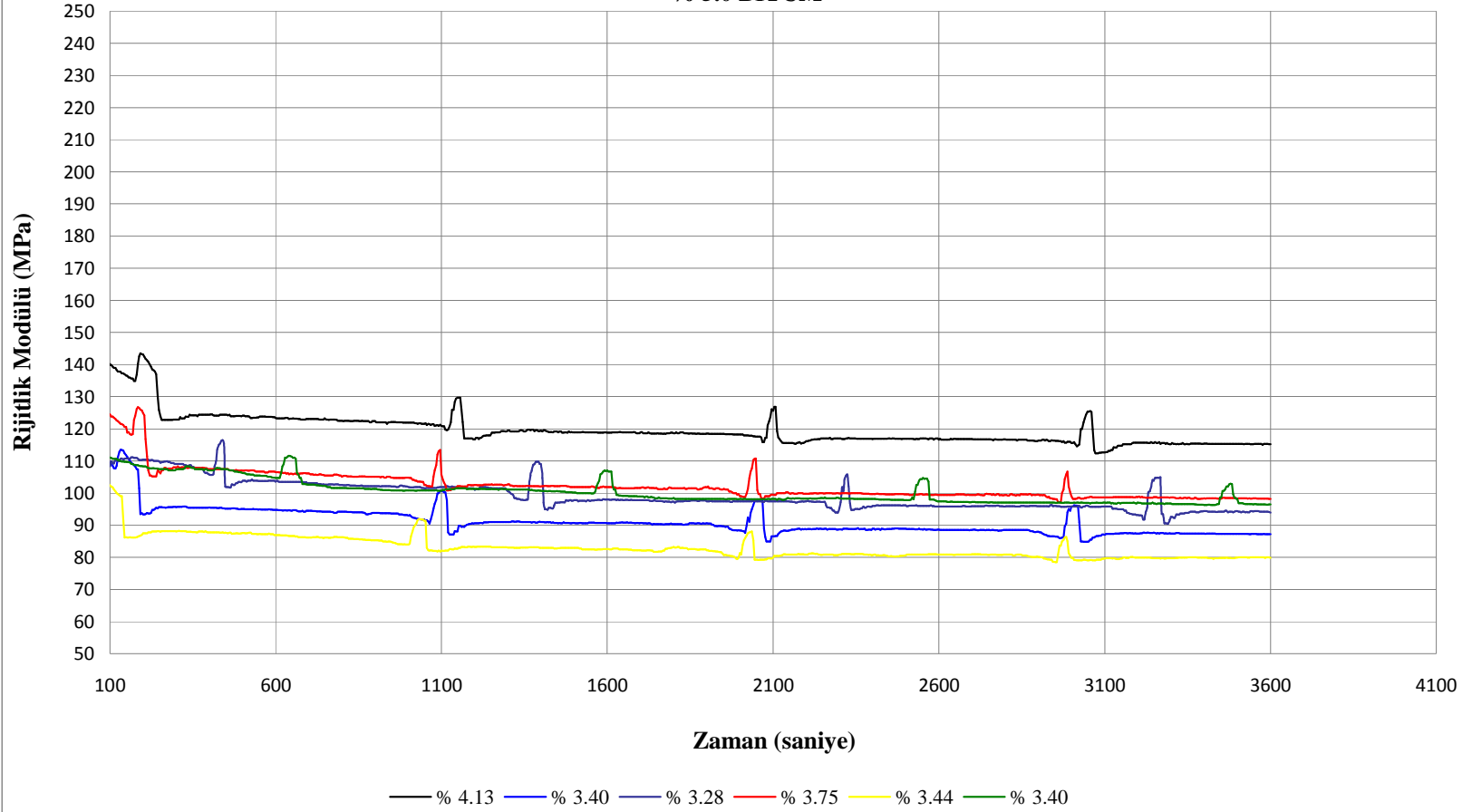
Şekil 6.70. Katkısız numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

**% 0.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



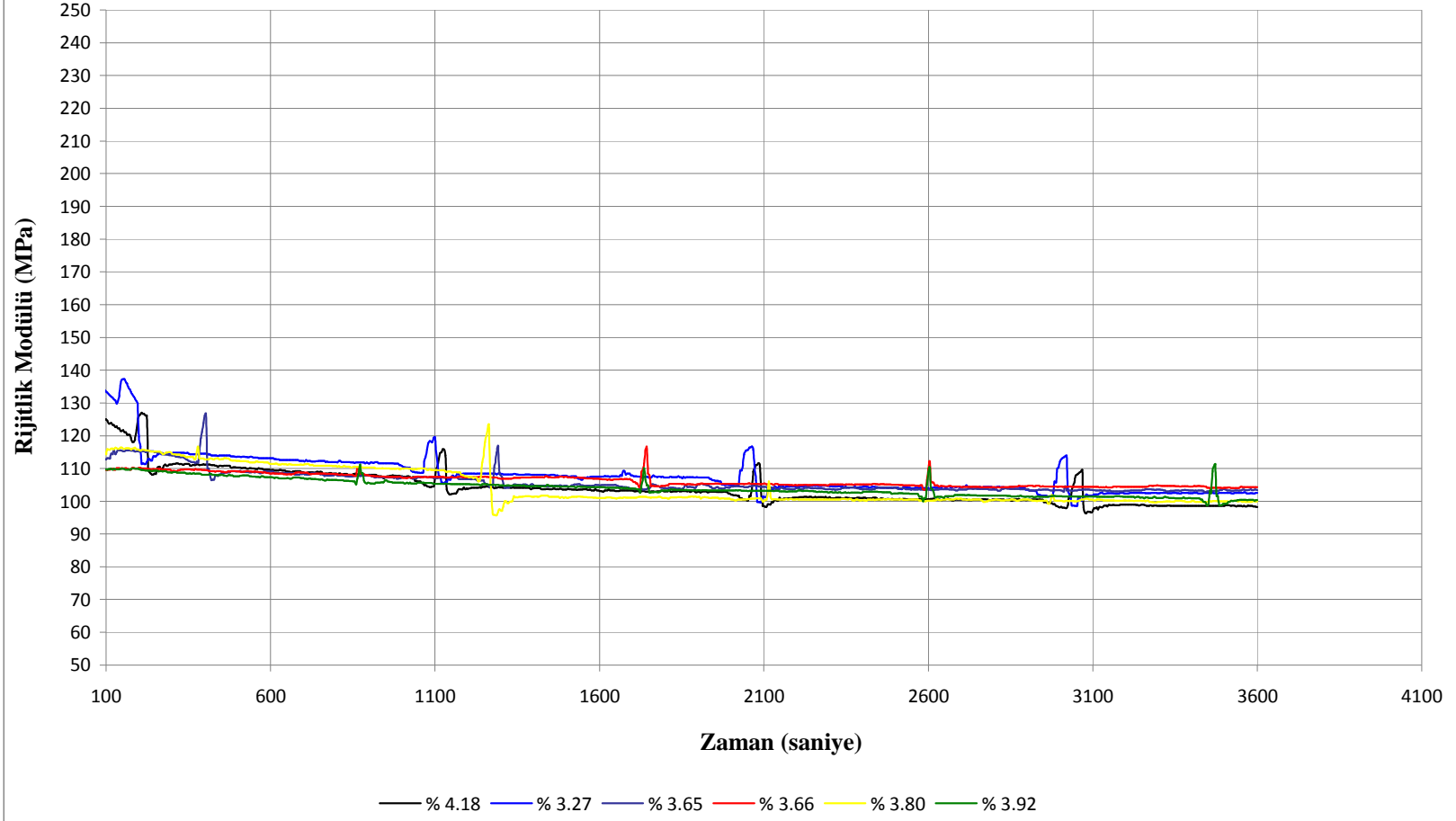
Şekil 6.71. % 0.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

**% 1.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



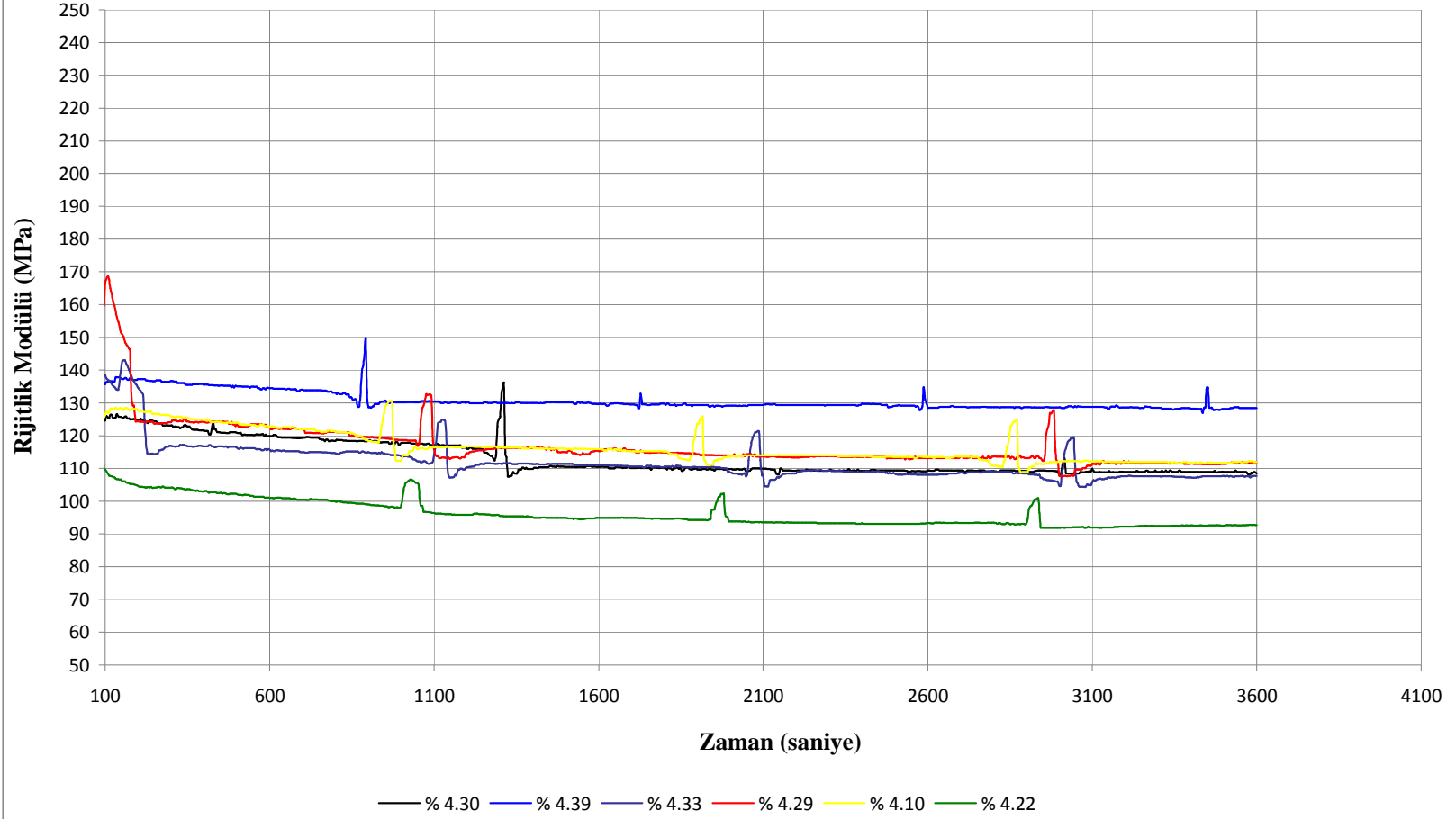
Şekil 6.72. % 1.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

**% 1.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



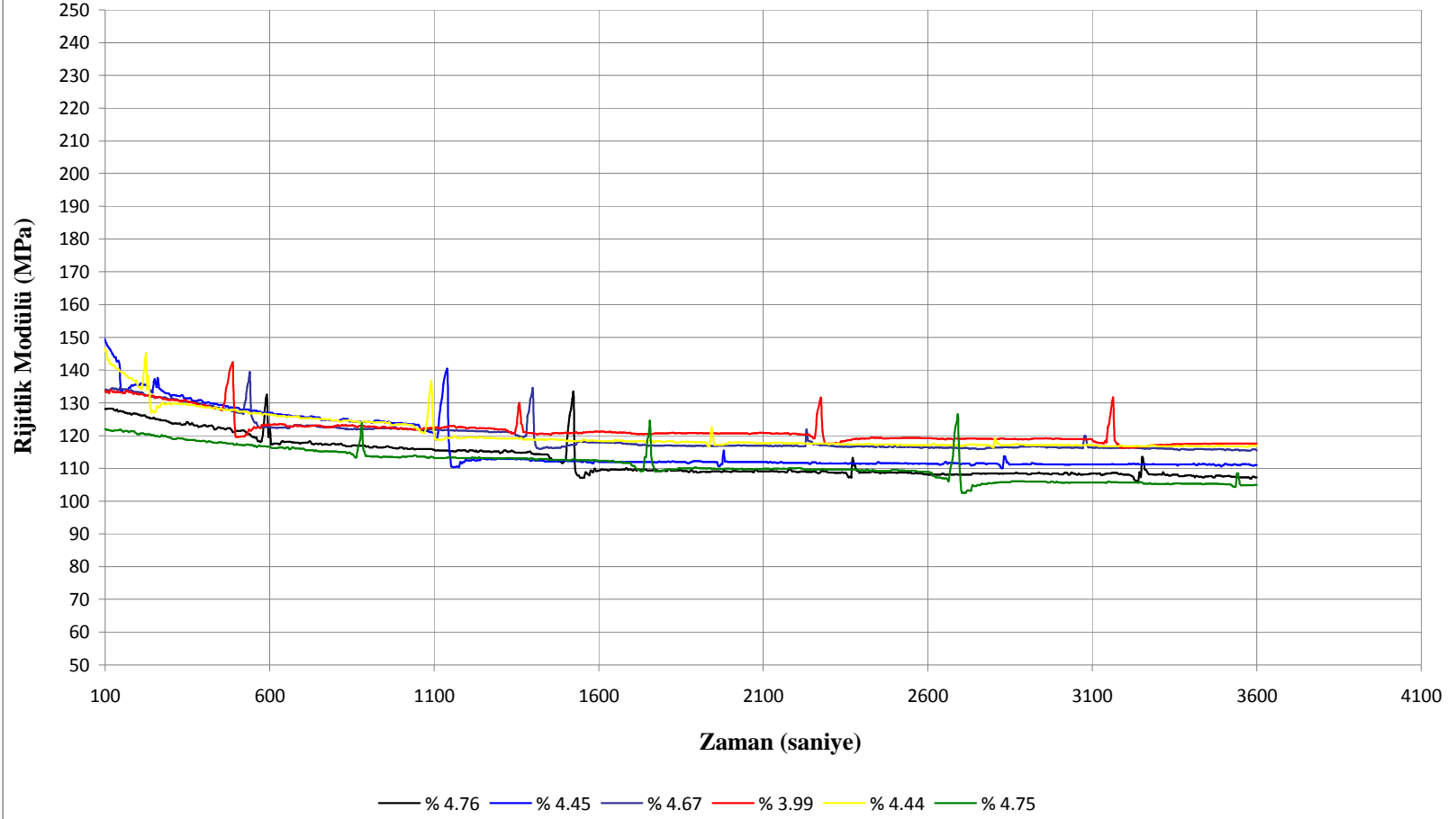
Şekil 6.73. % 1.5 PP katkılı numunelerin rijidlik modülü-zaman grafikleri

**% 2.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



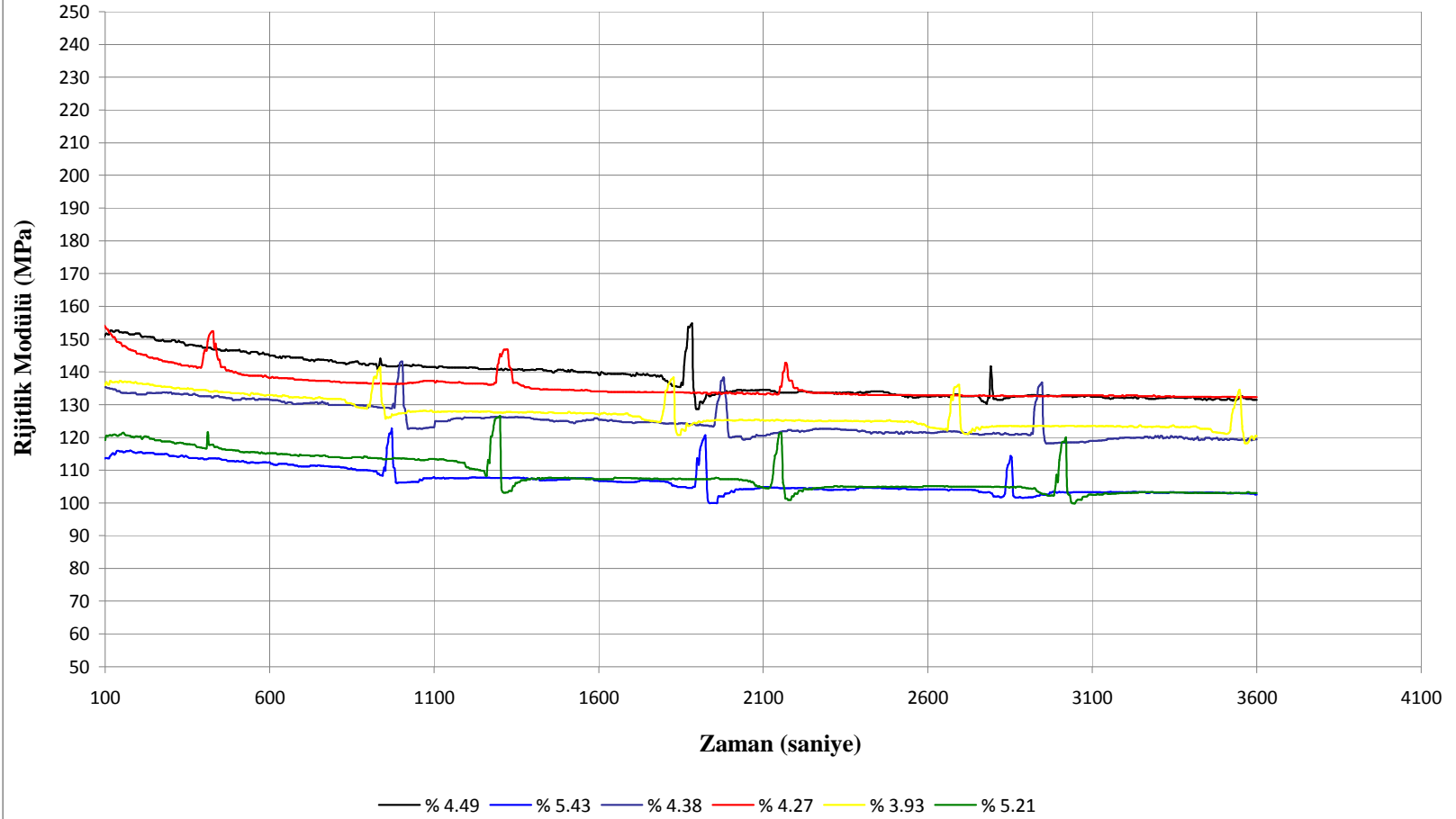
Şekil 6.74. % 2.0 PP katkılı numunelerin rijidlik modülü-zaman grafikleri

**% 2.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



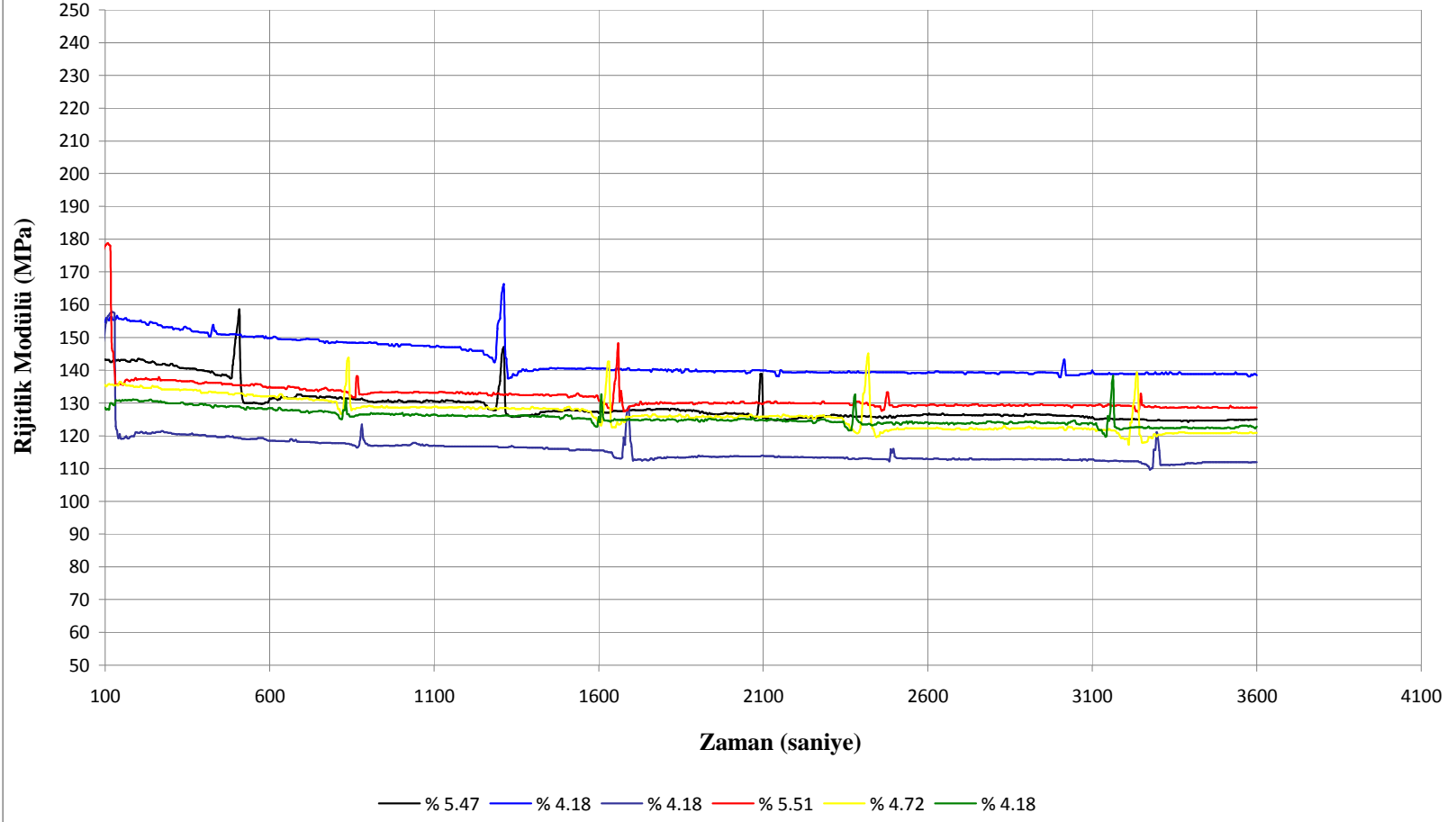
Şekil 6.75. % 2.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

**% 3.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



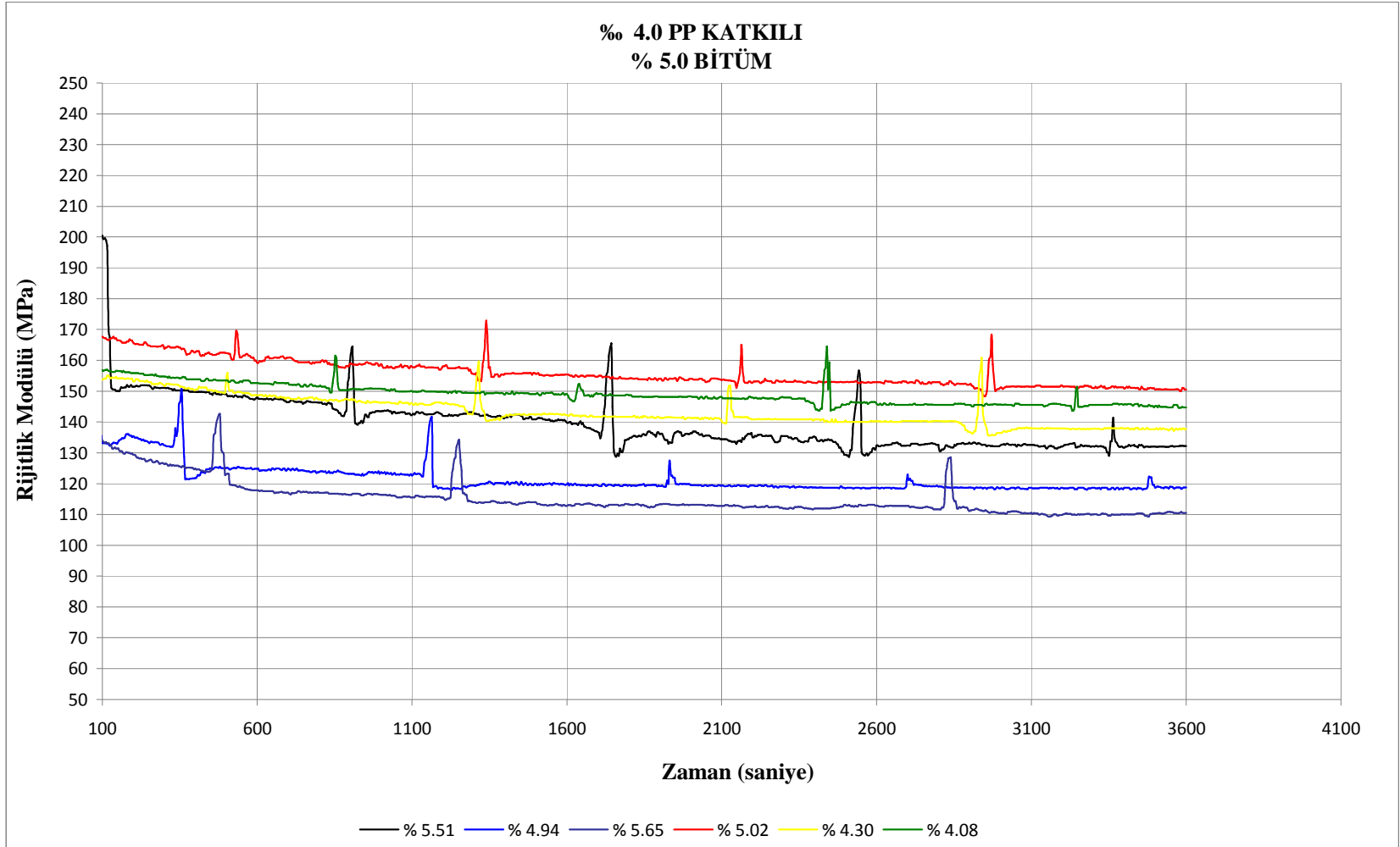
Şekil 6.76. % 3.0 PP katkılı numunelerin rijidlik modülü-zaman grafikleri

**% 3.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



Şekil 6.77. % 3.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

Şekil 6.78. % 4.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri



**% 4.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



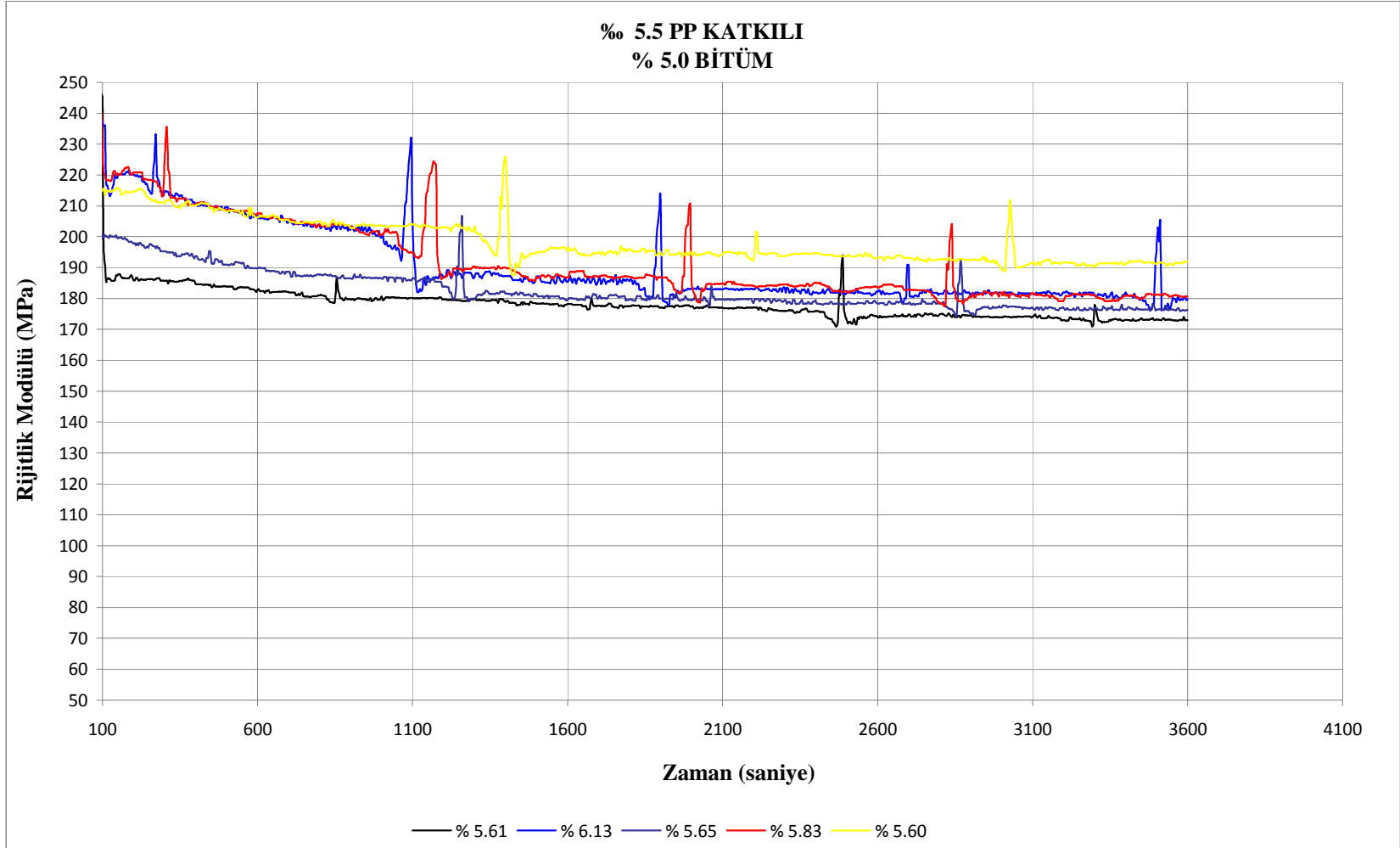
Şekil 6.79. % 4.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

**% 5.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**

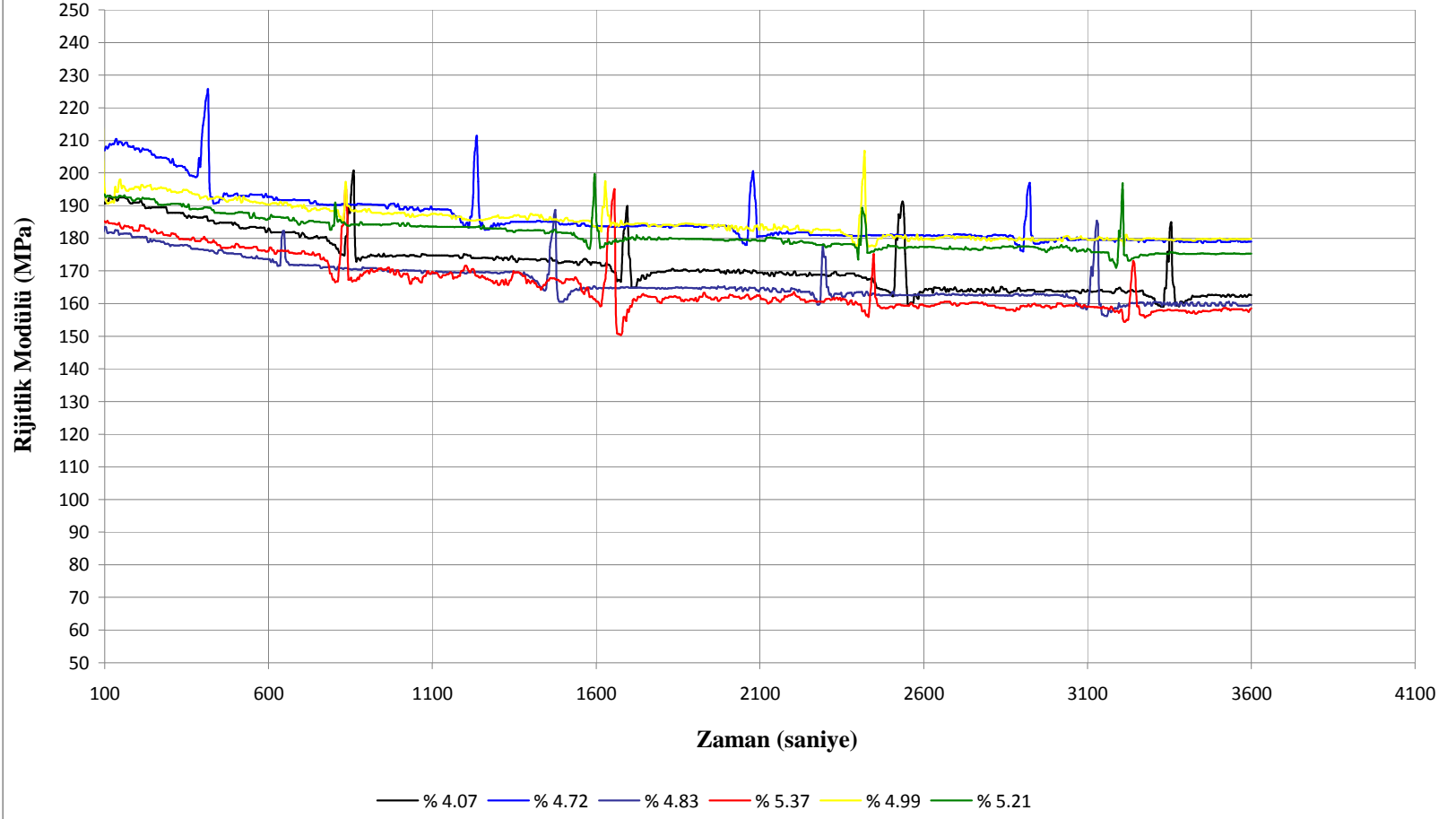


Şekil 6.80. % 5.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

Şekil 6.81. % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

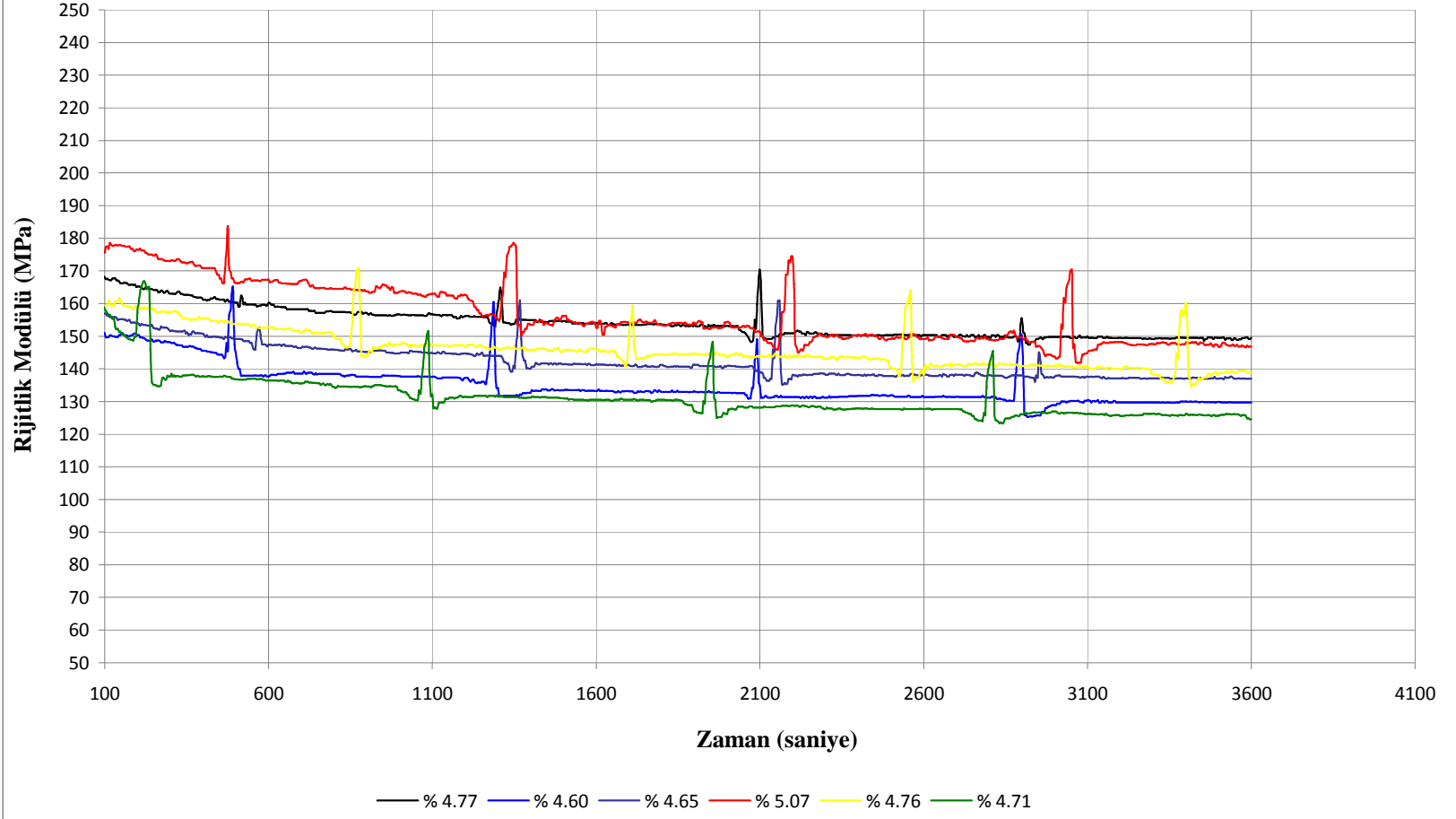


**% 6.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



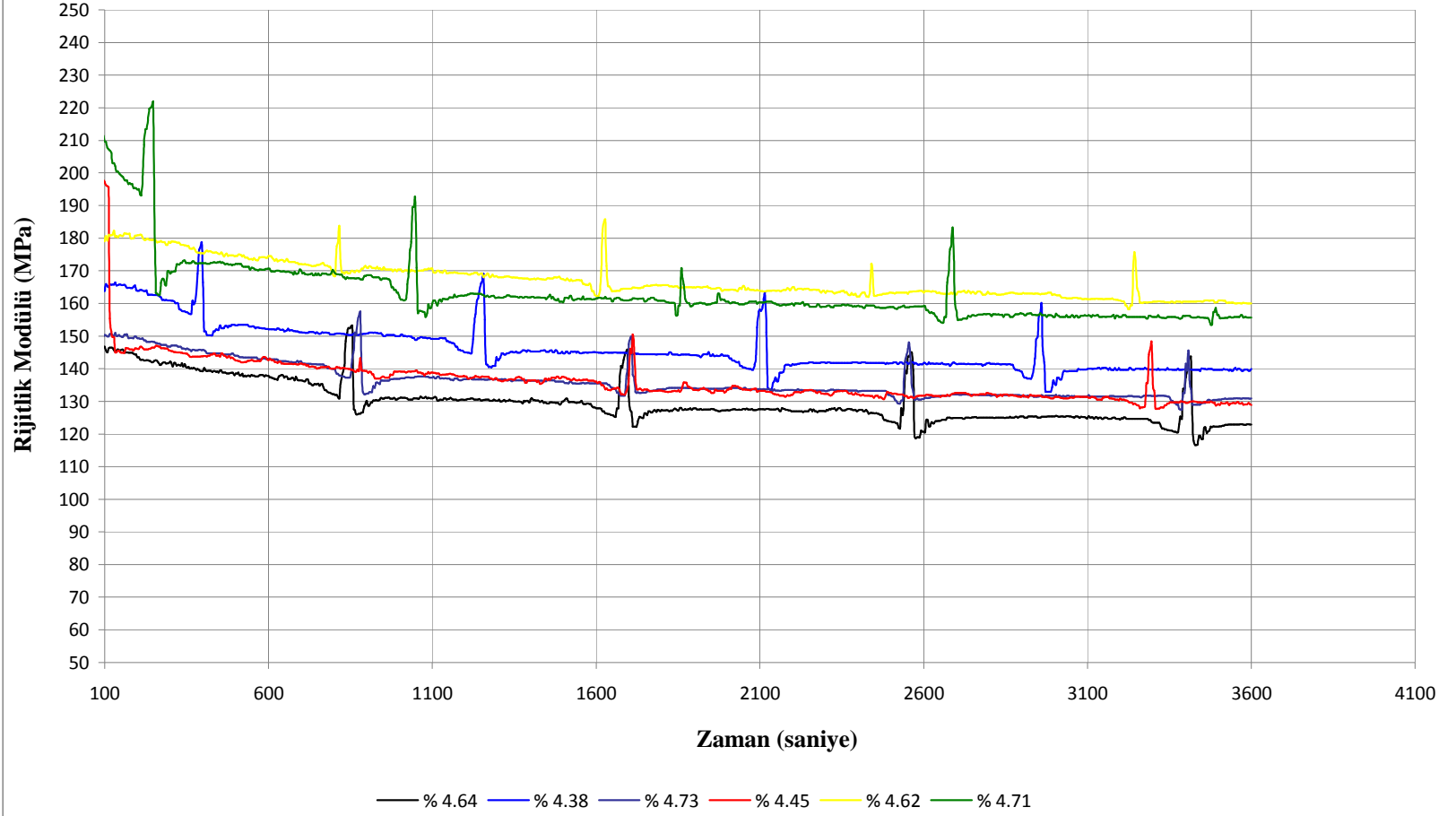
Şekil 6.82. % 6.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

**% 6.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**

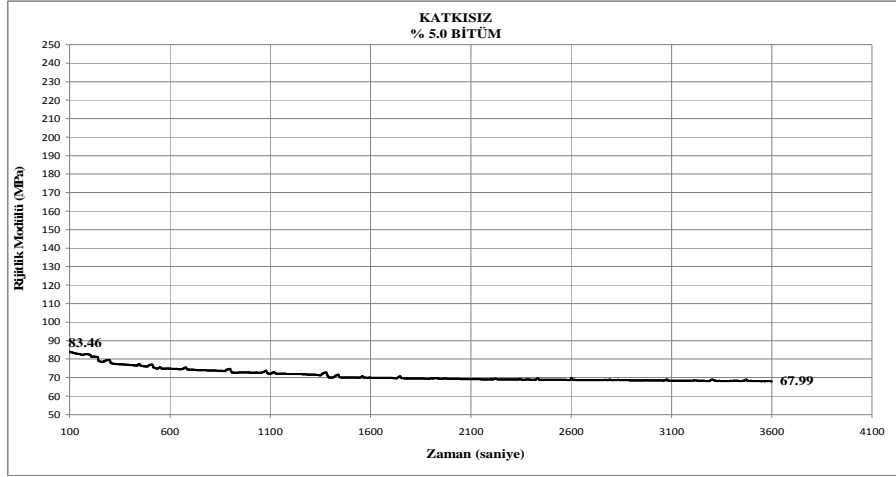


Şekil 6.83. % 6.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

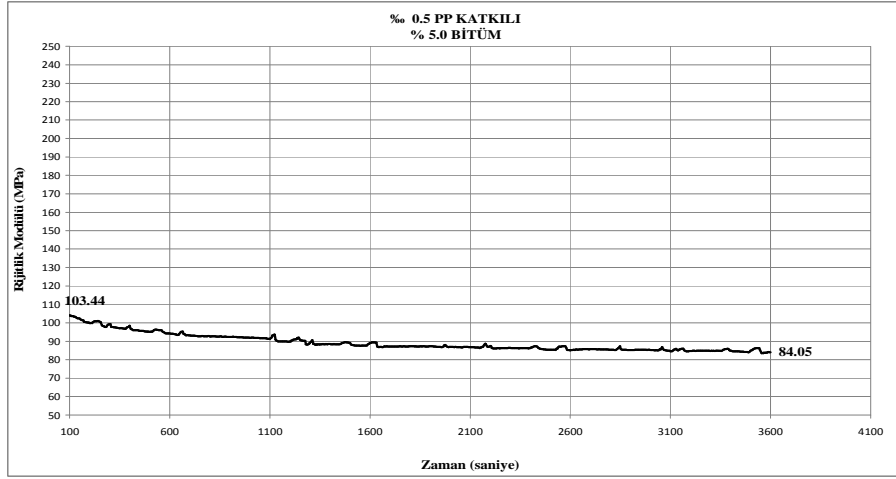
**% 7.0 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



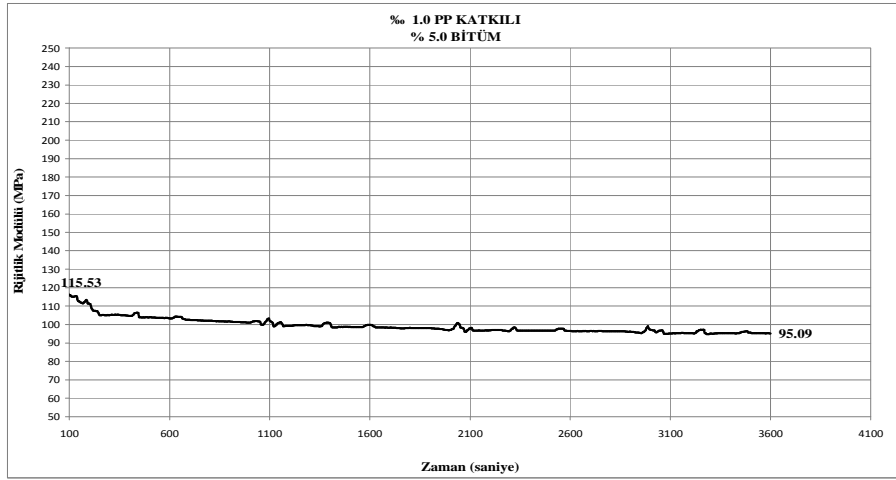
Şekil 6.84. % 7.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri



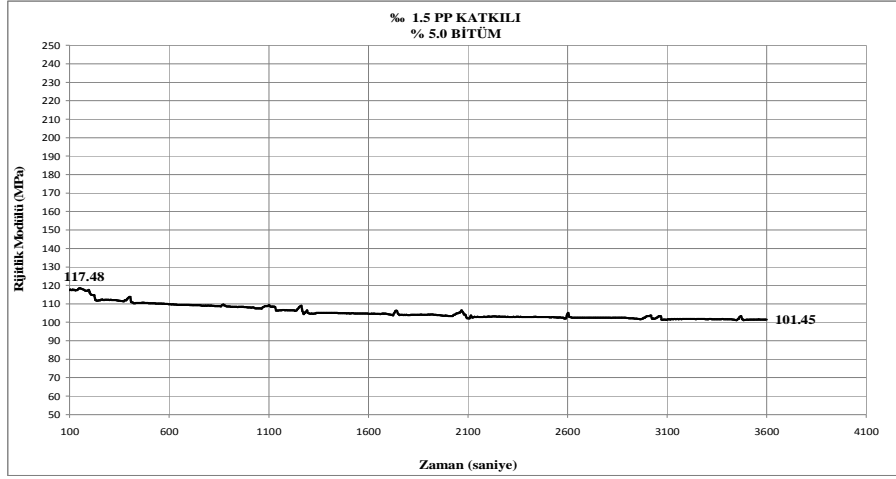
Şekil 6.85. Katkısız numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



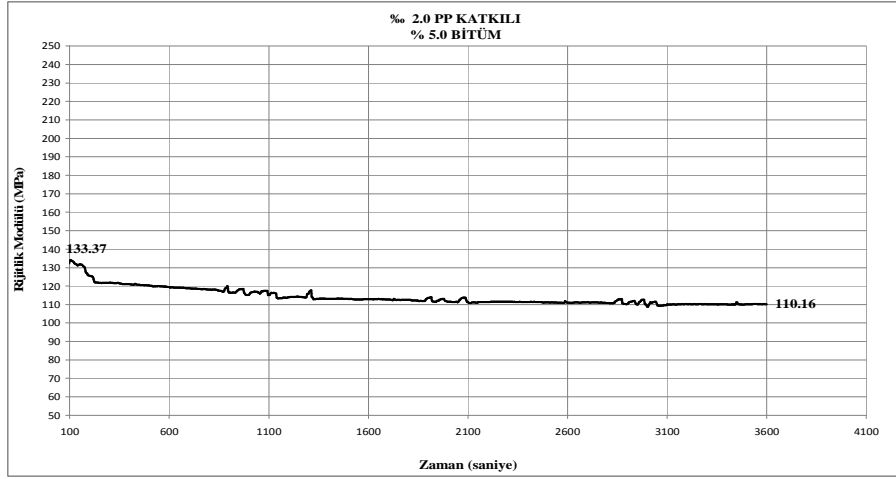
Şekil 6.86. % 0.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



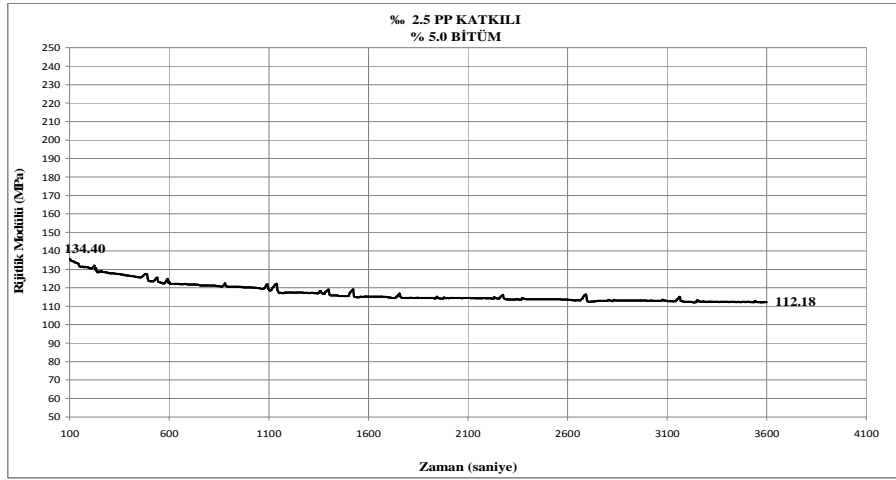
Şekil 6.87. % 1.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



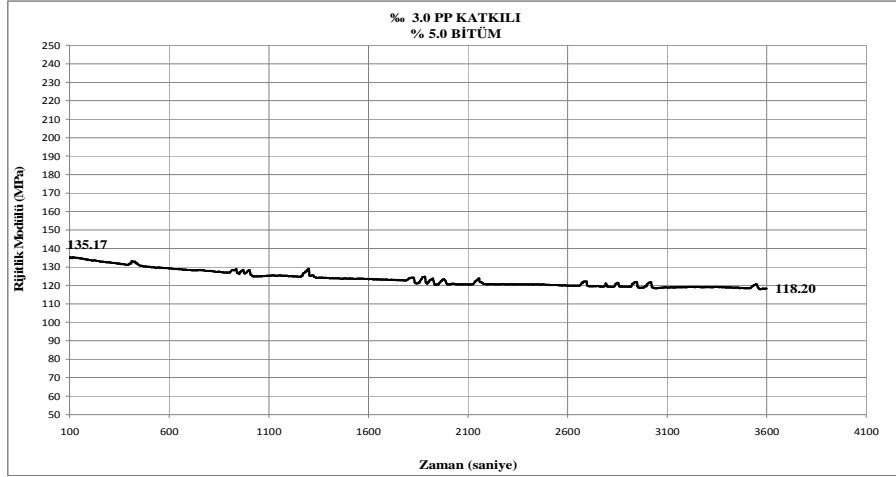
Şekil 6.88. % 1.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



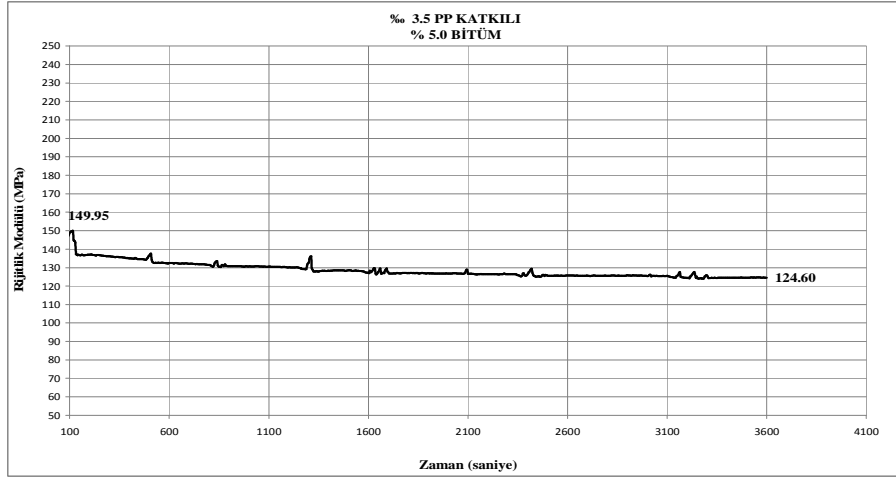
Şekil 6.89. % 2.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



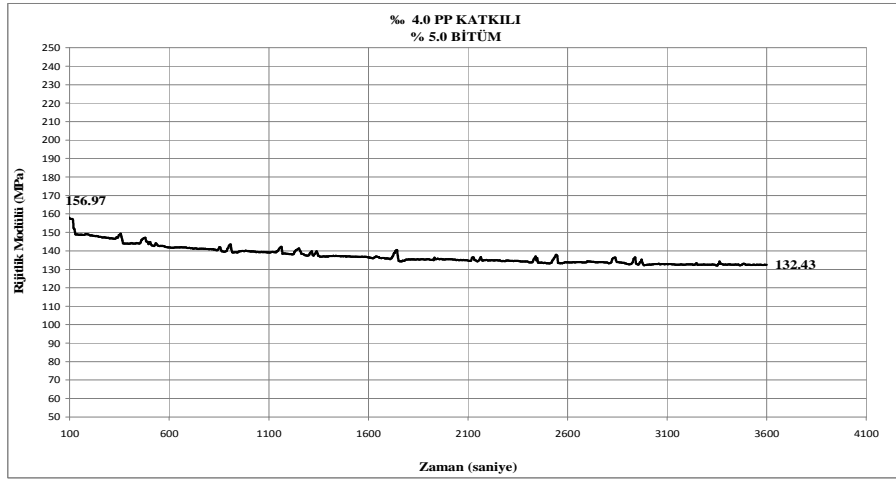
Şekil 6.90. % 2.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



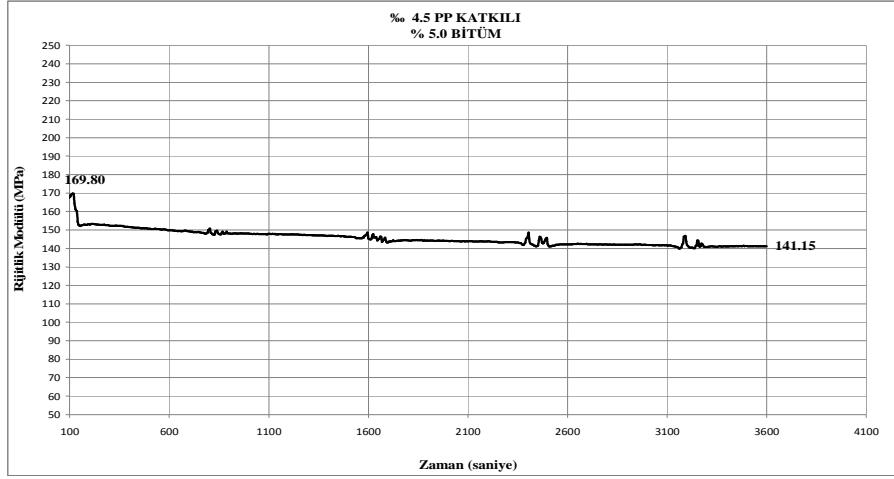
Şekil 6.91. % 3.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



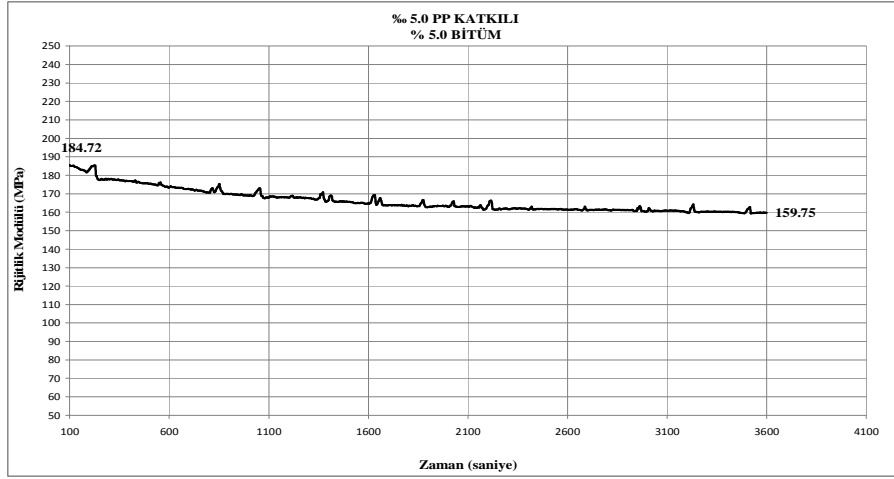
Şekil 6.92. % 3.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



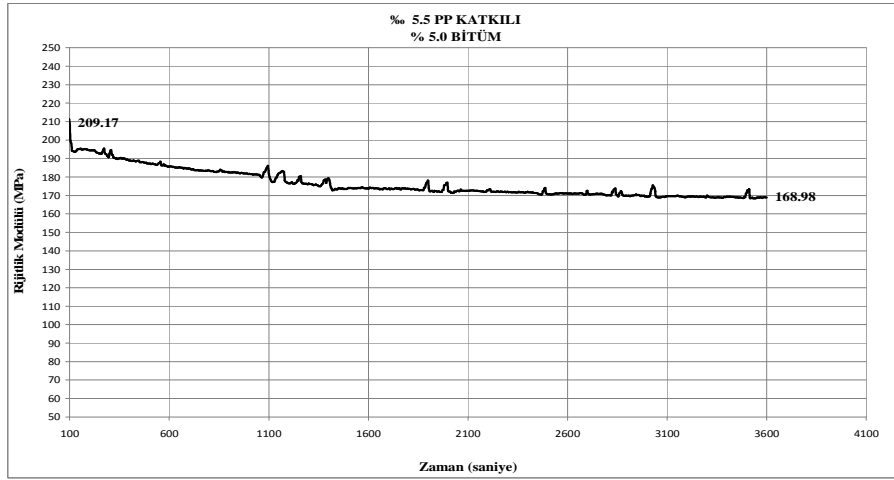
Şekil 6.93. % 4.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



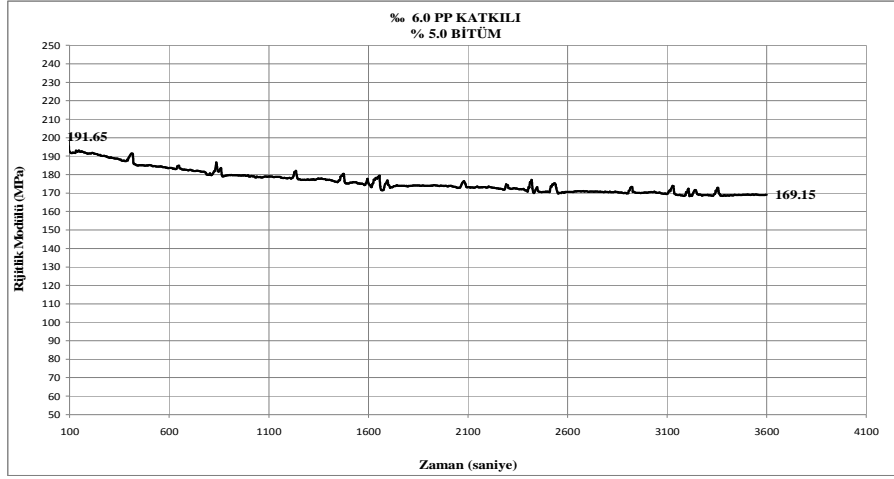
Şekil 6.94. % 4.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



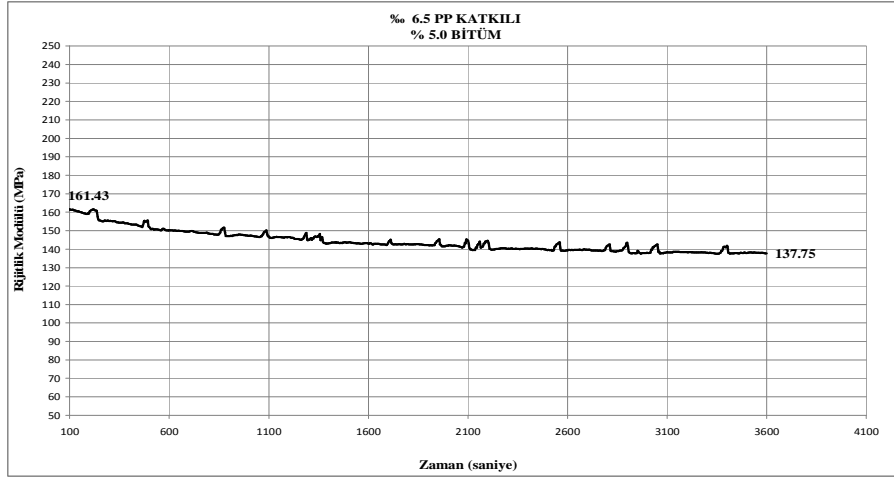
Şekil 6.95. % 5.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



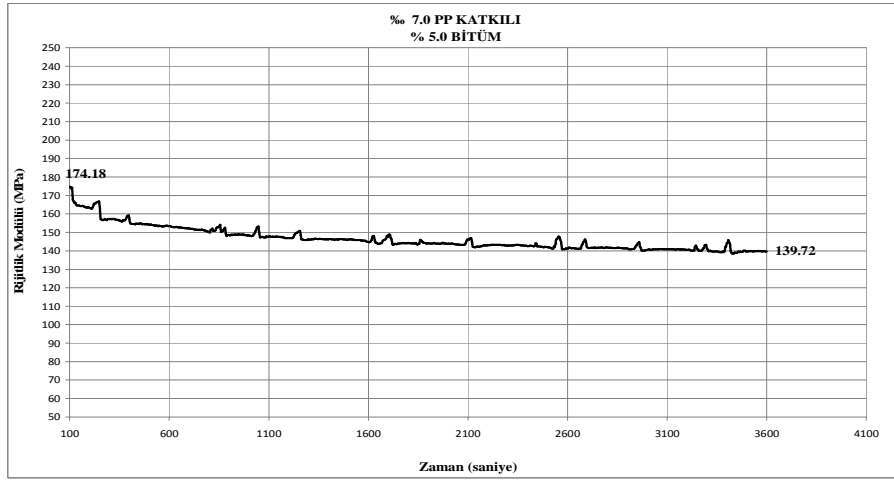
Şekil 6.96. % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



Şekil 6.97. % 6.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



Şekil 6.98. % 6.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi



Şekil 6.99. % 7.0 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi

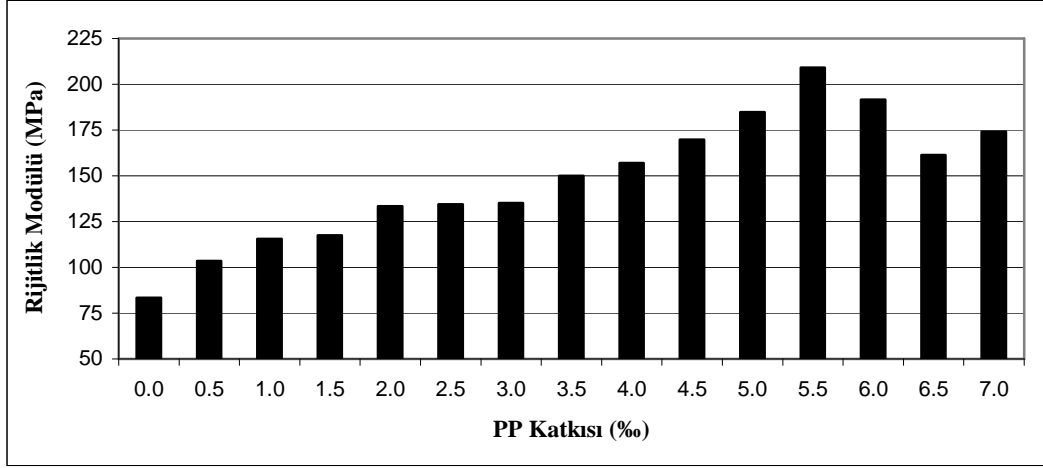
Şekil 6.70 ile 6.84 arasındaki grafikler incelendiğinde, katkısız ve polipropilen katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafiklerinin kendi içlerinde (gruplandırmalar göz önüne alındığında) yine son derece tutarlı oldukları gözlemlenmektedir. Tabii eğrilerde görülen ufak dalgalanmalar birim deformasyon-zaman eğrilerindeki dalgalanmalar için yapılmış olan açıklamalara benzer olmalarından dolayı, aynı biçimde yorumlanabilir. Bu şekiller incelendiğinde en dikkat çekici husus, bu şekillerdeki gruplanmış olan eğrilerin bir bant aralığı oluşturduklarının aşikar olmasıdır. Şekil 6.85 ile 6.99 arasındaki zarf eğrileri ise numunelerin ilk ve son rijitlik modülü değerlerini vermektedir. Bu eğrilerin etraflı analizinden görülebileceği üzere ilk ve son rijitlik modülü değerleri, katkısız numunelerde 83.46 MPa ve 67.99 MPa'dan başlamakta ve %6.0 polipropilen katkılı numunelerde 191.65 MPa ve 169.15 MPa'a kadar çıkmaktadır. İlk rijitlik değerlerinde % 129'luk bir artış varken son rijitlik değerlerindeki artış ise % 149 oranında olmuştur. Bu durum çok önemli bir artışa işaret etmektedir.

Rijitlik modülündeki bu artış, asfaltın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi bakımından son derece büyük önem taşımaktadır. Ve yine daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarla benzerlik arz etmektedir [69,74]. Yine bu zarf eğrileri analiz edildiğinde % 6.0 polipropilen katkısından sonra rijitlik modülü değerlerinin düşmeye başladığı ve bunun da yine modifikasyon için optimum polipropilen miktarının belirlenmesinde kuvvetli bir gösterge olduğu açıktır.

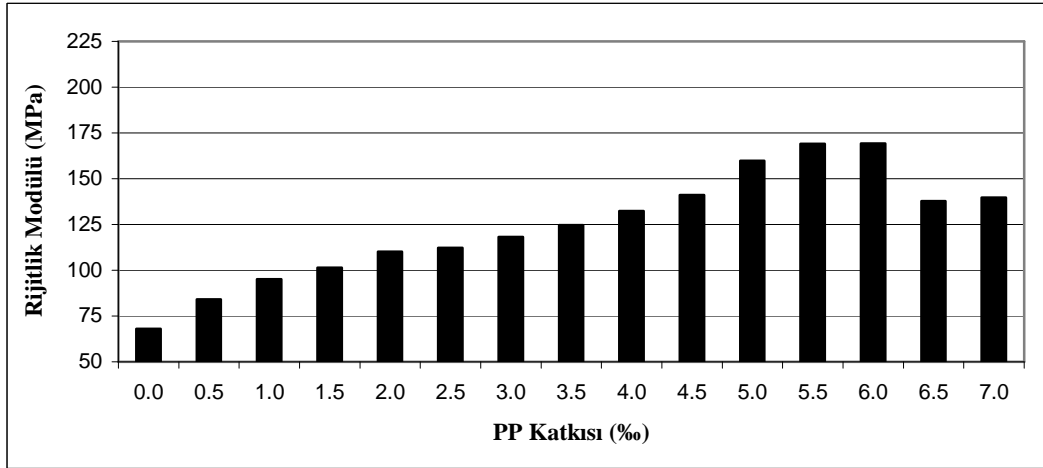
Şekil 6.100 ve 6.101'de tüm bu davranışlar son derece bariz bir şekilde izlenebilmektedir. Polipropilen miktarına bağlı olarak çizilen sütun grafikler, asfalta eklenen polipropilen miktarı arttıkça, asfalta ortaya çıkan iyileşmeleri gözler önüne sermektedir.

Aslında % 5.5 polipropilen ile modifiye edilmiş numuneler, akümüle eden birim deformasyon ve rijitlik modülleri açısından bir kırılma noktası vasfını taşımaktadırlar. Daha başka bir deyişle % 5.5 polipropilen içeriğine sahip karışımlarla % 6.0 polipropilen içeriğine sahip karışımlar arasında mekanik özellikler göz önüne alındığında çok büyük bir farklılık göze çarpmamaktadır. Bu nedenle polipropilen modifikasyonunun ekonomik boyutu göz önüne alındığında, % 5.5 polipropilen katkısının bir "optimum" olduğu rahatlıkla ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca % 5.5 polipropilen katkısından daha fazla oranlarda katkı ile hazırlanmış olan numunelerin çalışabilirlik açısından göz önüne almak gerekirse, bitümün artan viskozitesi işlenebilirliği de önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Tabii bunun arazi şartları ayağını da hiçbir zaman göz ardı etmemek gerekmektedir.



Şekil 6.100. Rijitlik modülü-polipropilen miktarı ilişkisi (600 saniye önyükleme ve 100 saniyelik yüklemeye sonunda)



Şekil 6.101. Rijitlik modülü-polipropilen miktarı ilişkisi (600 saniye önyükleme ve 3600 saniyelik yüklemeye sonunda)

Tüm bu sayılan hususların ışığında % 5.5 polipropilen katkısı, yürütülmüş olan statik sünme deneylerinin sonunda ortaya çıkan bir “optimum” değerdir. Bitüm pastasının, bitüm-agrega arasındaki elastoplastik ve adhesif davranışlar

açısından bir homojenizasyon sağlaması da bu optimum polipropilen katkısı oranıyla sağlanabilmektedir.

Son olarak üzerinde durulması gereken nokta ise aynı bitüm muhtevasına ve polipropilen katkı miktarına haiz olan karışımlardan daha az hava boşluğu olanlarda daha az kalıcı deformasyon ve daha fazla rijitlik değerlerine rastlanmakta olduğudur. Son derece çarpıcı olan bir başka sonuç ise polipropilen katkısının artması ile hava boşluğu oranlarında hatırı sayılır bir artış olmasına rağmen, ortaya çıkan birim deformasyonların % 60 mertebelere kadar azalması, rijitlik modüllerinde ise % 150'ye varan artışların ortaya çıkmasıdır. Bu durum özellikle iklim şartlarının son derece sıcak olduğu yol kesimlerinde “kanama” ve “kasma” olaylarına ve de tabii en önemlisi “oluklanma” problemine karşı verilen mücadelede polipropilen katkısının ne kadar büyük bir başarıyla kullanılabilceğinin en önemli göstergesidir. Statik sünme deneylerinde edinilmiş olan bu büyük kazanımlar park alanları, otobüs durakları, trafik ışıkları ve beton asfalttan imal edilmiş olan ve küçük uçakların iniş-kalkış yaptıkları havaalanı apronlarında serimi yapılacak asfalt karışımların uzun yıllar, hiç bozulmadan ve kalıcı deformasyonlara meydan vermeden servis etme kabiliyetini sağlayacaktır. Bu, tamamen yerli malzeme ile üretilen modifiye asfalt karışımları için çok büyük bir artıdır ve daha önce yapılmış çalışmalarla tam anlamıyla örtüşmektedir [69,74].

Çizelge 6.19 ila 6.23 katkısız ve ‰ 0.5, ‰ 1.0, ‰ 1.5, ‰ 2.0, ‰ 2.5, ‰3.0, ‰ 3.5, ‰ 4.0, ‰ 4.5, ‰ 5.0, ‰ 5.5, ‰ 6.0, ‰ 6.5 ve ‰ 7.0 polipropilen katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tabloları vermektedir.

Çizelge 6.19. Katkısız, % 0.5 PP, % 1.0 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar

KABA AĞIRLAĞI ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2729 kg / m ³ BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 1022 kg / m ³																		
İNCE AĞIRLAĞI ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2776 kg / m ³ AĞIRLAĞININ ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2759 kg / m ³																		
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2785 kg / m ³ PP KATKISI : 0.0 %																		
BİRİKTİRME NO	AC %	a(100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	HACİM (Toplama Göze) %			MQ				
											AĞIRLIK (gr)	Suda	Havadaki		AĞIRLIK (kg/m ³)	Karışım	Teorik	Asfalt
Ağrega Ağırlığına Göre	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%					
														100-b)	100-b)	100-b)	100-b)	100-b)
1	5.000	4.762	59.200	1145.300	680.300	465.000	2463	2533	2533	11.476	85.021	3.512	3.512	1175.000	1.12	1316.000	3.261	403.557
2	5.000	4.762	58.700	1145.400	679.300	464.100	2464	2533	2533	11.479	85.044	3.476	3.485	1122.000	1.14	1279.000	2.875	444.897
3	5.000	4.762	58.800	1146.000	682.100	465.900	2470	2533	2533	11.510	85.275	3.215	3.224	1187.000	1.14	1333.180	3.870	349.659
4	5.000	4.762	58.600	1139.700	677.000	462.700	2463	2533	2533	11.477	85.026	3.498	3.506	1165.000	1.14	1253.820	3.807	348.238
5	5.000	4.762	58.600	1145.300	678.000	465.300	2457	2533	2533	11.449	84.818	3.724	3.742	1170.000	1.14	1333.800	3.560	374.663
6	5.000	4.762	59.100	1146.900	682.800	464.100	2471	2533	2533	11.514	85.305	3.181	3.189	1025.000	1.13	1138.290	3.403	340.361
Ort.							2465	2533	2533	11.484	85.081	3.434	3.443	1294.355	1.13	1294.355	3.463	376.899

KABA AĞIRLAĞI ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2729 kg / m ³ BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 1022 kg / m ³																				
İNCE AĞIRLAĞI ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2776 kg / m ³ AĞIRLAĞININ ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2759 kg / m ³																				
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2785 kg / m ³ PP KATKISI : 0.5 %																				
BİRİKTİRME NO	AC %	a(100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	HACİM (Toplama Göze) %			MQ						
											AĞIRLIK (gr)	Suda	Havadaki		AĞIRLIK (kg/m ³)	Karışım	Teorik	Asfalt	Ağrega	Hava Boşluğu
Ağrega Ağırlığına Göre	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%							
														100-b)	100-b)	100-b)	100-b)	100-b)	100-b)	100-b)
1	5.000	4.762	59.000	1146.800	679.800	467.000	2456	2533	2533	11.447	84.768	3.790	15.222	75.116	3.799	1200.000	1.13	1356.000	2.748	493.450
2	5.000	4.762	58.800	1145.300	677.000	466.800	2450	2533	2533	11.417	84.832	4.001	15.418	74.050	4.010	1206.000	1.14	1374.840	3.647	376.978
3	5.000	4.762	59.100	1148.900	684.300	464.600	2473	2533	2533	11.522	85.361	3.116	14.639	76.711	3.125	1131.000	1.13	1278.030	3.325	384.370
4	5.000	4.762	58.500	1144.300	679.800	464.500	2464	2533	2533	11.478	85.038	3.484	14.962	76.718	3.492	1141.000	1.15	1312.150	3.507	374.152
5	5.000	4.762	58.300	1141.800	678.000	463.200	2465	2533	2533	11.486	85.090	3.424	14.910	77.034	3.433	1227.000	1.15	1411.050	3.610	390.873
6	5.000	4.762	58.800	1145.300	680.100	465.200	2462	2533	2533	11.471	84.984	3.445	15.016	76.395	3.533	1230.000	1.14	1402.200	3.656	383.524
Ort.							2462	2533	2533	11.469	84.971	3.560	15.029	76.337	3.569	1355.712	1.14	1402.200	3.416	400.559

KABA AĞIRLAĞI ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2729 kg / m ³ BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 1022 kg / m ³																				
İNCE AĞIRLAĞI ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2776 kg / m ³ AĞIRLAĞININ ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2759 kg / m ³																				
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2785 kg / m ³ PP KATKISI : 1.0 %																				
BİRİKTİRME NO	AC %	a(100-a)	b	c	d	e	f	g	h	i	HACİM (Toplama Göze) %			MQ						
											AĞIRLIK (gr)	Suda	Havadaki		AĞIRLIK (kg/m ³)	Karışım	Teorik	Asfalt	Ağrega	Hava Boşluğu
Ağrega Ağırlığına Göre	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%							
														100-b)	100-b)	100-b)	100-b)	100-b)	100-b)	100-b)
1	5.000	4.762	59.000	1147.500	680.400	467.100	2457	2533	2533	11.446	84.801	3.752	15.199	75.312	3.761	1275.000	1.13	1408.460	3.373	426.472
2	5.000	4.762	58.700	1146.800	682.200	466.400	2463	2533	2533	11.475	85.101	3.515	14.990	76.548	3.524	1124.000	1.14	1281.960	3.650	373.574
3	5.000	4.762	58.700	1145.200	680.400	464.800	2464	2533	2533	11.480	85.050	3.470	14.950	76.790	3.479	1237.000	1.14	1410.180	3.250	403.902
4	5.000	4.762	58.500	1144.000	676.300	467.700	2446	2533	2533	11.397	84.634	4.169	15.566	73.317	4.178	1211.000	1.15	1392.650	3.323	419.094
5	5.000	4.762	58.900	1148.200	682.400	465.900	2465	2533	2533	11.484	85.079	3.457	14.921	76.964	3.466	1226.000	1.13	1383.380	3.456	403.196
6	5.000	4.762	58.100	1136.600	674.700	461.900	2461	2533	2533	11.465	84.941	3.593	15.059	76.138	3.602	1175.000	1.16	1363.000	3.637	374.759
Ort.							2459	2533	2533	11.438	84.886	3.656	15.114	75.828	3.665	1378.510	1.16	1378.510	3.408	405.166

Çizelge 6.20. % 1.5 PP, % 2.0 PP, % 2.5 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2729	kg / m ³	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022	kg / m ³	İNÇE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2759	kg / m ³	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ									
İNÇE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2776	kg / m ³	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022	kg / m ³	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ													
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ																					
AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC									
a		b		c		d		e		f		g		h		i		j		k		l		m		n		o		p		q		r	
%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%	
a(100-s)		b		c		d		e		f		g		h		i		j		k		l		m		n		o		p		q		r	
Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega	
Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını	
Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze	
1	5.000	4.762	58.900	1150.000	684.400	465.600	2470	d(0+e)	11.508	85.260	3.232	14.740	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
2	5.000	4.762	58.800	1145.900	679.200	466.700	2455	d(0+e)	11.440	84.756	3.804	15.244	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
3	5.000	4.762	58.800	1154.000	680.500	473.500	2437	d(0+e)	11.356	84.129	4.515	15.271	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
4	5.000	4.762	59.300	1157.800	681.100	476.700	2429	d(0+e)	11.317	83.539	4.844	16.161	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
5	5.000	4.762	58.700	1140.100	675.400	464.700	2453	d(0+e)	11.431	84.689	3.879	15.311	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
6	5.000	4.762	58.900	1150.000	684.100	466.500	2466	d(0+e)	11.492	85.140	3.368	14.860	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
Ort.							2452		11.424	84.633	3.940	15.265																							

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2729	kg / m ³	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022	kg / m ³	İNÇE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2759	kg / m ³	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ									
İNÇE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2776	kg / m ³	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022	kg / m ³	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ													
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ																					
AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC									
a		b		c		d		e		f		g		h		i		j		k		l		m		n		o		p		q		r	
%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%	
a(100-s)		b		c		d		e		f		g		h		i		j		k		l		m		n		o		p		q		r	
Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega	
Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını	
Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze	
1	5.000	4.762	59.100	1150.600	680.600	470.000	2448	d(0+e)	11.407	84.506	4.088	15.484	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
2	5.000	4.762	58.300	1134.600	672.600	462.000	2456	d(0+e)	11.443	84.773	3.784	15.227	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
3	5.000	4.762	60.200	1157.700	682.800	474.900	2438	d(0+e)	11.359	84.150	4.492	15.850	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
4	5.000	4.762	57.800	1140.500	674.800	465.700	2449	d(0+e)	11.411	84.537	4.052	15.463	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
5	5.000	4.762	59.700	1150.400	679.000	471.400	2440	d(0+e)	11.371	84.240	4.389	15.760	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
6	5.000	4.762	59.500	1154.000	681.500	472.500	2442	d(0+e)	11.380	84.307	4.313	15.693	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
Ort.							2446		11.395	84.419	4.186	15.581																							

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2729	kg / m ³	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022	kg / m ³	İNÇE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2759	kg / m ³	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ									
İNÇE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2776	kg / m ³	BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022	kg / m ³	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ													
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785	kg / m ³	HACİM (Toplama Göze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		MQ																					
AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC		AC									
a		b		c		d		e		f		g		h		i		j		k		l		m		n		o		p		q		r	
%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%		%	
a(100-s)		b		c		d		e		f		g		h		i		j		k		l		m		n		o		p		q		r	
Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega		Ağrega	
Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını		Ağrılığını	
Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze		Göze	
1	5.000	4.762	58.900	1140.400	673.000	467.400	2440	d(0+e)	11.368	84.222	4.409	15.778	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
2	5.000	4.762	59.300	1144.900	676.500	468.400	2444	d(0+e)	11.389	84.374	4.237	15.626	100-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-o	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	100-u	100-v	100-w	100-x	100-y	100-z	100-aa	100-ab	100-ac	100-ad	100-ae	
3	5.000	4.762	59.100	1147.900	677.900	470.000	2442	d(0+e)	11.380	84.307	4.313	15.693	100-j	1																					

Çizelge 6.21. % 3.0 PP, % 3.5 PP, % 4.0 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar

BİRİKTİR NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		İNÇE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		BİRİKTİR YÜKSEKLİĞİ (mm)		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		HACİM (Toplama Çöze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
	%	AC	%	AC	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
1	5.000	4.762	60.000	1156.200	681.100	475.100	2434	2553	11.339	84.005	4.656	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2434	1385.000	1.10	1523.500	3.317	459.301
2	5.000	4.762	59.100	1144.600	674.900	469.700	2437	2553	11.334	84.119	4.577	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2437	1384.000	1.13	1545.840	3.093	469.787
3	5.000	4.762	59.800	1154.100	680.700	473.400	2438	2553	11.329	84.154	4.487	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2438	1394.000	1.11	1547.840	2.980	519.242
4	5.000	4.762	59.000	1142.800	676.700	472.600	2418	2553	11.267	83.471	5.262	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2418	1396.000	1.13	1577.460	2.382	662.250
5	5.000	4.762	60.000	1152.300	678.900	473.400	2454	2553	11.341	84.023	4.656	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2454	1388.000	1.10	1518.000	3.047	498.195
6	5.000	4.762	59.800	1153.900	679.900	474.000	2454	2553	11.345	84.033	4.654	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2454	1388.000	1.11	1540.680	3.074	501.197
Ort.							2452	2553	11.334	83.967	4.699	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2452	1385.000	1.11	1542.140	2.982	523.329

BİRİKTİR NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		İNÇE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		BİRİKTİR YÜKSEKLİĞİ (mm)		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		HACİM (Toplama Çöze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
	%	AC	%	AC	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
1	5.000	4.762	59.900	1148.700	674.900	474.200	2422	2553	11.287	83.619	5.094	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2422	1482.000	1.10	1630.200	2.740	594.964
2	5.000	4.762	59.200	1145.600	674.000	469.600	2435	2553	11.347	84.063	4.990	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2435	1426.000	1.12	1597.120	2.620	609.388
3	5.000	4.762	59.700	1155.600	680.100	475.500	2430	2553	11.324	83.891	4.785	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2430	1524.000	1.11	1681.640	3.168	533.977
4	5.000	4.762	58.700	1150.700	676.700	474.000	2428	2553	11.311	83.800	4.889	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2428	1446.000	1.14	1648.440	3.359	490.753
5	5.000	4.762	59.800	1151.100	677.900	473.200	2453	2553	11.354	83.971	4.695	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2453	1395.000	1.11	1546.230	2.930	761.690
6	5.000	4.762	60.000	1153.900	679.000	474.900	2450	2553	11.321	83.874	4.805	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2450	1489.000	1.10	1647.800	3.056	542.754
Ort.							2450	2553	11.321	83.869	4.810	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2450	1482.000	1.10	1626.905	2.826	588.954

BİRİKTİR NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		İNÇE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		BİRİKTİR YÜKSEKLİĞİ (mm)		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		HACİM (Toplama Çöze) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
	%	AC	%	AC	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
1	5.000	4.762	59.400	1147.000	675.600	471.400	2433	2553	11.337	83.991	4.672	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2433	1622.000	1.12	1816.640	2.466	736.675
2	5.000	4.762	59.400	1147.000	676.400	473.300	2429	2553	11.318	83.851	4.831	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2429	1613.000	1.12	1806.560	2.767	652.895
3	5.000	4.762	60.100	1151.400	675.400	476.000	2419	2553	11.271	83.488	5.231	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2419	1509.000	1.10	1659.900	2.461	674.482
4	5.000	4.762	60.100	1148.800	672.900	476.300	2412	2553	11.273	83.257	5.504	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2412	1481.000	1.10	1574.100	3.147	500.191
5	5.000	4.762	59.900	1149.400	672.900	477.200	2409	2553	11.228	83.144	5.633	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2409	1505.000	1.10	1655.500	3.030	542.787
6	5.000	4.762	60.000	1146.600	672.400	476.200	2412	2553	11.239	83.260	5.501	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2412	1555.000	1.10	1708.300	2.838	601.938
Ort.							2419	2553	11.271	83.300	5.229	100- \pm j	100-j	100-j	57+100	100-100g/h	2419	1600.000	1.10	1703.500	2.788	618.161

Çizelge 6.22. % 4.5 PP, % 5.0 PP, % 5.5 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2729 kg/m ³		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022 kg/m ³		AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2759 kg/m ³		FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		4.5 %						
AC	AC	YÜKSEKLİĞİ (mm)	AGIRLIK (gr)	HACİM (cm ³)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Karşın	Asfalt	HACİM (Toplama Çıktı) %	AGREGA	Hava Boşluğu	AGREGA	Asfaltla Dolu	Toplam Karşın	BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)	Deneyzel	Stabilite Faktörü	Dışılma	AKMA	MQ	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	
Agrega Adığına Göre	a(100-a)	%	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	5.000	4.762	60.400	1.148.000	688.000	480.000	2.392	11.144	82.538	6.298	17.442	63.891	6.307	2.392	1.692.000	1.09	1844.280	2.693	684.842	
2	5.000	4.762	60.000	1.149.200	670.800	478.400	2.402	11.193	82.921	5.887	17.079	65.534	5.895	2.402	1.630.000	1.10	1793.000	3.379	530.630	
3	5.000	4.762	60.300	1.150.800	671.000	479.800	2.398	11.176	82.994	6.030	17.206	64.951	6.039	2.398	1.682.000	1.09	1833.380	2.297	798.163	
4	5.000	4.762	60.200	1.146.600	670.900	479.200	2.410	11.231	83.203	5.566	16.797	66.861	5.575	2.410	1.699.000	1.09	1819.210	3.052	596.071	
5	5.000	4.762	59.700	1.147.900	673.500	474.000	2.421	11.289	83.667	5.133	16.433	68.640	5.162	2.421	1.699.000	1.11	1883.890	2.465	735.240	
6	5.000	4.762	60.300	1.153.400	674.800	479.600	2.410	11.239	83.189	5.922	16.811	66.795	5.900	2.410	1.698.000	1.09	1830.820	2.500	740.328	
Ort.							2.406	11.209	83.039	5.733	16.961	66.112	5.761	2.406			1837.763	2.748	680.873	

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2729 kg/m ³		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022 kg/m ³		AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2759 kg/m ³		FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		5.0 %						
AC	AC	YÜKSEKLİĞİ (mm)	AGIRLIK (gr)	HACİM (cm ³)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Karşın	Asfalt	HACİM (Toplama Çıktı) %	AGREGA	Hava Boşluğu	AGREGA	Asfaltla Dolu	Toplam Karşın	BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)	Deneyzel	Stabilite Faktörü	Dışılma	AKMA	MQ	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	
Agrega Adığına Göre	a(100-a)	%	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	5.000	4.762	60.100	1.145.200	683.400	474.800	2.408	11.219	83.113	5.688	16.837	66.435	5.676	2.408	1.810.000	1.10	1991.000	2.850	698.596	
2	5.000	4.762	59.700	1.147.500	688.900	479.200	2.395	11.157	82.600	6.183	17.340	64.545	6.191	2.395	1.817.000	1.11	2016.870	2.838	710.666	
3	5.000	4.762	59.300	1.142.300	688.900	479.400	2.413	11.243	83.893	5.484	16.707	67.297	5.472	2.413	1.813.000	1.12	2030.560	2.656	764.518	
4	5.000	4.762	59.500	1.150.700	670.500	480.200	2.396	11.265	82.718	6.117	17.282	64.606	6.125	2.396	1.807.000	1.12	2023.840	2.237	904.712	
5	5.000	4.762	59.700	1.152.400	673.000	479.400	2.404	11.200	82.978	5.821	17.022	65.801	5.820	2.404	1.702.000	1.11	1889.220	2.473	763.321	
6	5.000	4.762	60.000	1.150.800	670.800	480.000	2.398	11.171	82.759	6.070	17.241	64.794	6.078	2.398	1.708.000	1.10	1878.800	2.710	693.284	
Ort.							2.402	11.193	82.920	5.887	17.080	65.546	5.895	2.402			1971.715	2.628	755.830	

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2729 kg/m ³		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022 kg/m ³		AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2759 kg/m ³		FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		5.5 %						
AC	AC	YÜKSEKLİĞİ (mm)	AGIRLIK (gr)	HACİM (cm ³)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m ³)	Karşın	Asfalt	HACİM (Toplama Çıktı) %	AGREGA	Hava Boşluğu	AGREGA	Asfaltla Dolu	Toplam Karşın	BİRİM AĞIRLIK (kg/m ³)	Deneyzel	Stabilite Faktörü	Dışılma	AKMA	MQ	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	
Agrega Adığına Göre	a(100-a)	%	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	5.000	4.762	59.500	1.142.500	666.600	475.900	2.401	11.186	82.870	5.944	17.130	65.302	5.952	2.401	1.712.000	1.12	1917.440	2.619	732.127	
2	5.000	4.762	60.200	1.153.300	670.200	483.100	2.387	11.123	82.407	6.470	17.993	63.226	6.478	2.387	1.766.000	1.09	1924.940	2.813	684.301	
3	5.000	4.762	60.000	1.149.200	670.300	479.900	2.400	11.181	82.834	5.985	17.166	65.135	5.993	2.400	1.789.000	1.10	1967.900	2.239	878.919	
4	5.000	4.762	60.700	1.150.300	670.000	480.300	2.395	11.159	82.072	6.169	17.328	64.398	6.177	2.395	1.712.000	1.08	1848.940	2.906	666.256	
5	5.000	4.762	60.700	1.145.500	665.900	479.600	2.388	11.129	82.447	6.424	17.533	63.401	6.423	2.388	1.658.000	1.09	1807.220	2.373	761.576	
6	5.000	4.762	60.000	1.147.000	667.700	479.300	2.394	11.130	82.807	6.243	17.993	64.107	6.251	2.394	1.854.000	1.10	2039.400	3.115	654.703	
Ort.							2.394	11.135	82.440	6.206	17.980	64.261	6.214	2.394			1917.643	2.678	724.647	

Çizelge 6.23. % 6.0 PP, % 6.5 PP, % 7.0 PP katkılı numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini gösteren tablolar

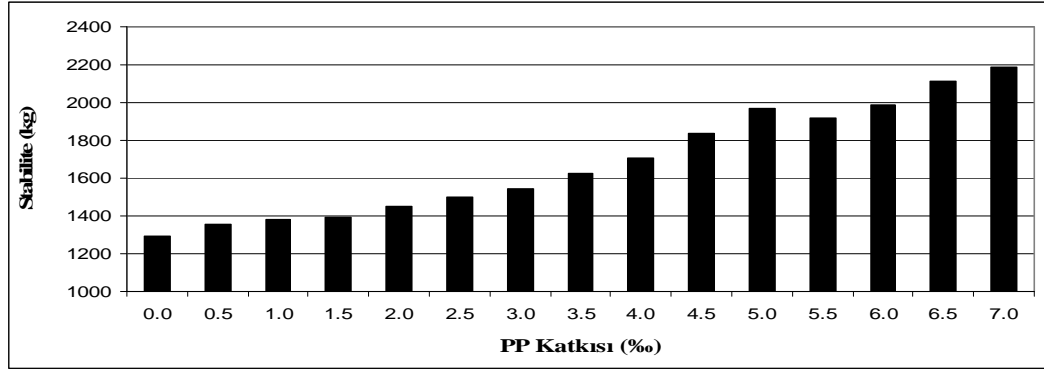
BİRİM NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			1022 kg / m ³			BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			2729 kg / m ³			2776 kg / m ³			2785 kg / m ³			1022 kg / m ³			2759 kg / m ³			6,0 %			AKMA MQ					
	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h			
1	5.000	4.762	59.900	1146.000	673.400	474.600	2419	2553	11.271	83.497	5.252	16.303	68.966	5.240	2419	1995.000	1.10	2084.900																		
2	5.000	4.762	60.600	1139.700	668.400	471.300	2418	2553	11.267	83.474	5.238	16.296	68.180	5.267	2418	1952.000	1.09	2032.160																		
3	5.000	4.762	60.200	1154.400	674.100	480.300	2403	2553	11.199	82.866	5.835	17.034	65.746	5.843	2403	1884.000	1.08	1985.760																		
4	5.000	4.762	59.300	1146.200	671.000	474.600	2415	2553	11.233	83.367	5.381	16.633	67.632	5.389	2415	1775.000	1.12	1985.760																		
5	5.000	4.762	59.700	1145.200	671.000	474.100	2416	2553	11.235	83.382	5.363	16.618	67.726	5.372	2416	1690.000	1.11	1875.900																		
6	5.000	4.762	59.700	1150.300	673.200	477.100	2411	2553	11.234	83.226	5.540	16.774	66.974	5.548	2411	1843.000	1.11	2047.950																		
Ort.							2414	2553	11.246	83.319	5.435	16.681	67.429	5.443	2414																					

BİRİM NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			1022 kg / m ³			BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			2729 kg / m ³			2776 kg / m ³			2785 kg / m ³			1022 kg / m ³			2759 kg / m ³			6,5 %			AKMA MQ						
	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h				
1	5.000	4.762	59.500	1150.300	676.200	474.100	2426	2553	11.305	83.733	4.942	16.247	69.322	4.950	2426	2182.000	1.12	2432.950																			
2	5.000	4.762	59.600	1147.000	672.500	472.500	2417	2553	11.283	83.442	5.295	16.538	68.123	5.303	2417	1942.000	1.11	2155.620																			
3	5.000	4.762	60.400	1150.800	673.500	477.300	2411	2553	11.234	83.228	5.538	16.772	66.980	5.547	2411	1966.000	1.09	2142.940																			
4	5.000	4.762	60.400	1149.200	670.800	478.400	2402	2553	11.193	82.821	5.887	17.079	65.534	5.895	2402	1754.000	1.09	1911.880																			
5	5.000	4.762	59.700	1147.900	672.300	475.600	2414	2553	11.246	83.315	5.440	16.683	67.399	5.448	2414	1984.000	1.11	2200.256																			
6	5.000	4.762	60.900	1151.500	676.600	474.900	2425	2553	11.298	83.699	5.003	16.301	69.307	5.012	2425	1713.000	1.07	1834.623																			
Ort.							2416	2553	11.246	83.393	5.331	16.607	67.804	5.339	2416																						

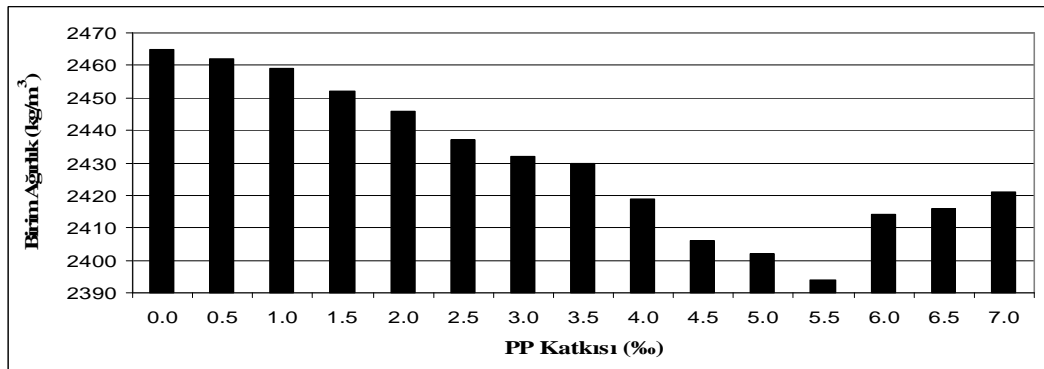
BİRİM NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			1022 kg / m ³			BİRİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			2729 kg / m ³			2776 kg / m ³			2785 kg / m ³			1022 kg / m ³			2759 kg / m ³			7,0 %			AKMA MQ							
	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h	AC	%	h					
1	5.000	4.762	59.400	1144.200	673.200	471.000	2429	2553	11.319	83.857	4.824	16.143	70.118	4.832	2429	2069.000	1.12	2317.280																				
2	5.000	4.762	60.100	1151.700	675.800	475.900	2420	2553	11.276	83.538	5.186	16.462	68.466	5.195	2420	1913.000	1.10	2104.300																				
3	5.000	4.762	59.800	1150.000	676.000	474.000	2426	2553	11.304	83.749	4.947	16.251	69.361	4.955	2426	2052.000	1.11	2277.720																				
4	5.000	4.762	59.400	1147.500	674.200	473.300	2424	2553	11.297	83.690	5.013	16.310	69.263	5.022	2424	2013.000	1.12	2254.560																				
5	5.000	4.762	60.400	1151.200	673.300	477.700	2410	2553	11.229	83.187	5.385	16.813	66.784	5.393	2410	1848.000	1.09	2014.320																				
6	5.000	4.762	59.600	1148.600	673.800	474.800	2421	2553	11.272	83.306	5.222	16.484	68.337	5.231	2421	1940.000	1.11	2153.400																				
Ort.							2421	2553	11.283	83.588	5.130	16.412	68.760	5.138	2421																							

Çizelge 6.24. Çizelge 6.19 ila 6.23'den elde edilmiş olan ortalama fiziksel ve mekanik değerler

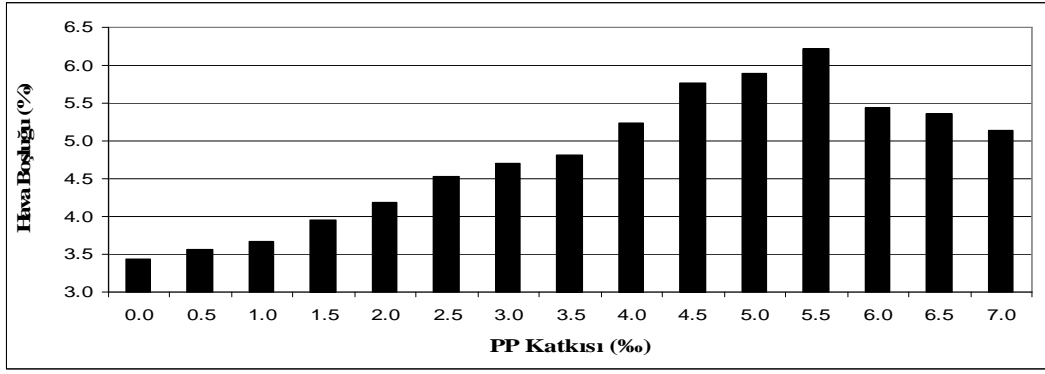
Polipropilen Miktarı (%)	Stabilite (kg)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Hava Boşluğu (%)	Vf (%)	VMA (%)	Akma (mm)	Marshall Oranı (kg/mm)
0.0	1294.355	2465	3.443	76.990	14.919	3.463	376.899
0.5	1355.712	2462	3.569	76.337	15.029	3.416	400.559
1.0	1378.510	2459	3.665	75.828	15.114	3.408	405.166
1.5	1391.292	2452	3.949	74.449	15.365	3.388	411.593
2.0	1453.083	2446	4.195	73.148	15.581	3.233	463.103
2.5	1500.593	2437	4.526	71.555	15.873	3.081	490.412
3.0	1542.140	2432	4.707	70.710	16.033	2.982	523.329
3.5	1626.905	2430	4.818	70.188	16.131	2.826	588.954
4.0	1703.500	2419	5.237	68.340	16.500	2.788	618.161
4.5	1837.763	2406	5.761	66.112	16.961	2.748	680.879
5.0	1971.715	2402	5.895	65.546	17.080	2.628	755.850
5.5	1917.643	2394	6.214	64.261	17.360	2.678	724.647
6.0	1989.972	2414	5.443	67.429	16.681	2.984	682.360
6.5	2113.038	2416	5.359	68.804	16.607	3.169	678.393
7.0	2186.930	2421	5.138	68.760	16.412	3.211	683.755



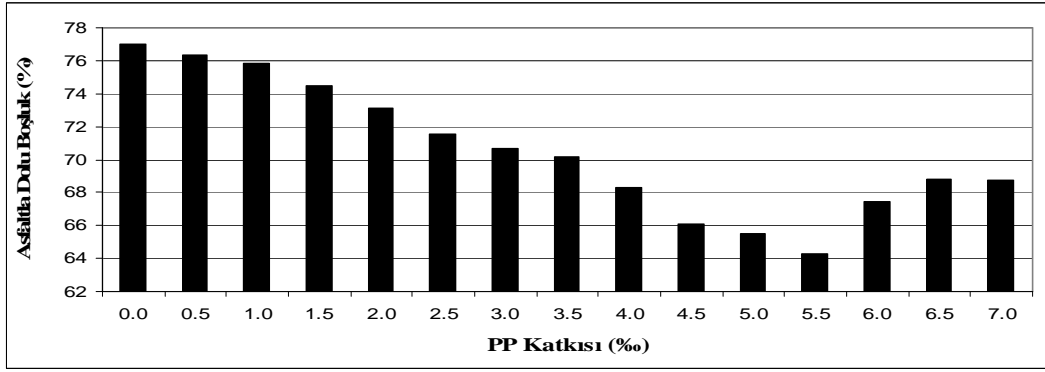
Şekil 6.102. Stabilite-polipropilen miktarı ilişkisi



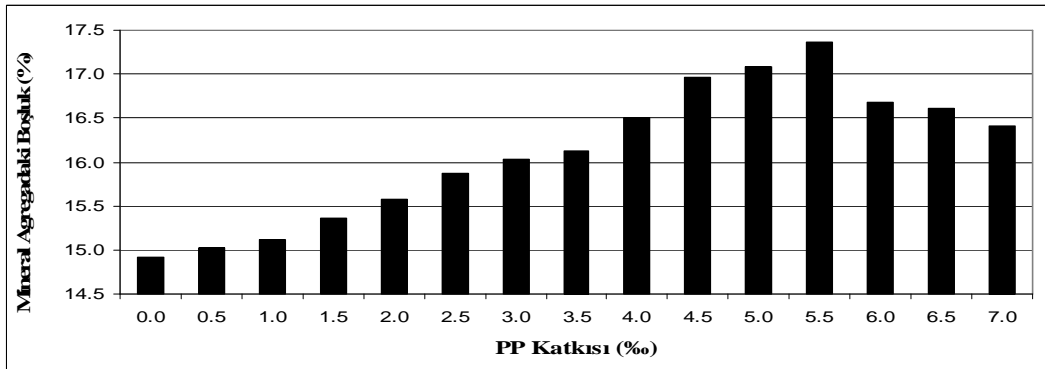
Şekil 6.103. Birim ağırlık-polipropilen miktarı ilişkisi



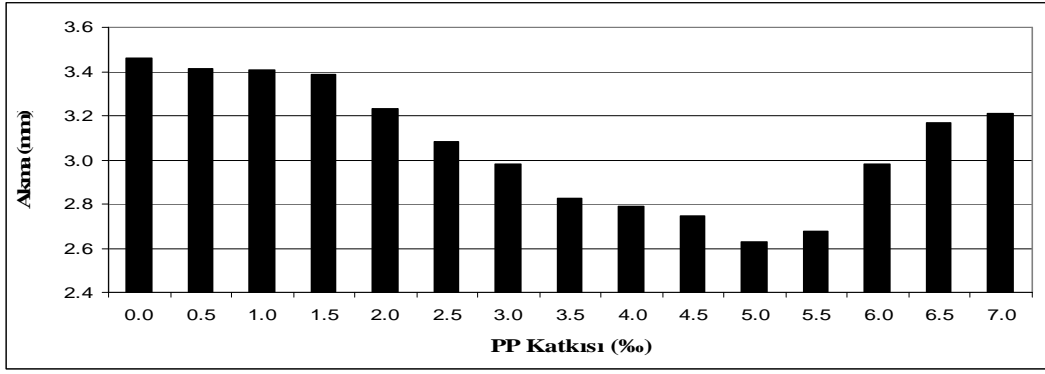
Şekil 6.104. Hava boşluğu-polipropilen miktarı ilişkisi



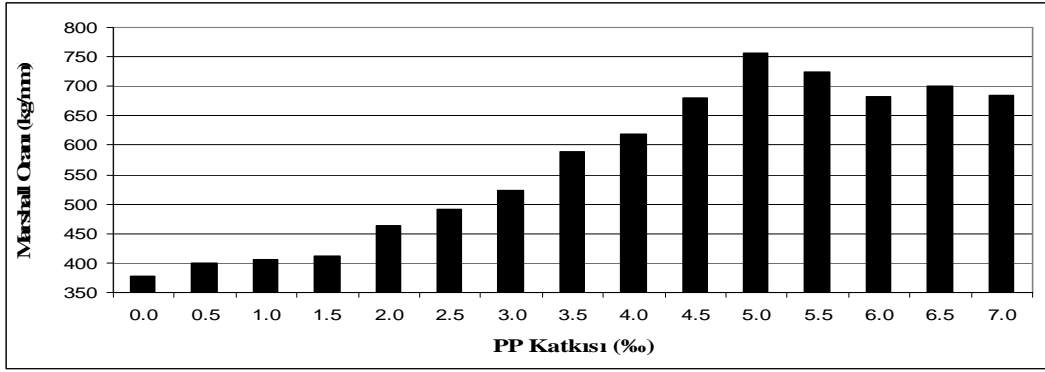
Şekil 6.105. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-polipropilen miktarı ilişkisi



Şekil 6.106. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-polipropilen miktarı ilişkisi



Şekil 6.107. Akma-polipropilen miktarı ilişkisi



Şekil 6.108. Marshall oranı(MQ)-polipropilen miktarı ilişkisi

Çizelge 6.24 ise çizelge 6.19 ila 6.23'den elde edilmiş olan ortalama fiziksel ve mekanik değerleri vermektedir. Bu çizelge bir anlamda 84 adet numunenin tüm fiziksel ve mekanik özelliklerinin bir özeti gibidir.

Şekil 6.102 ile 6.108 arasındaki grafiklerde ise Marshall numunelerinin, polipropilen katkısı ile geçirmiş oldukları çarpıcı değişimleri gözler önüne sermektedir. Stabilité değerlerindeki (% 69'luk artış) % 7.0 polipropilen miktarına kadar sadece % 5.5'te bir istisna olmak kaydıyla sürmektedir.

Birim ağırlık değerleri ise % 5.5'e kadar (% 2.9) düşmekte ve bu noktadan sonra yeniden artış trendine girmektedir. Hava boşluğu değerleri ise yine % 5.5 polipropilen katkısına kadar (% 80) artmakta ve bu noktadan sonra düşmektedir. Asfaltla dolu boşluk değerleri ise benzer bir trend izlemektedir (% 16.5 düşüş). Mineral agregadaki boşluk değerleri % 5.5'e kadar % 16.4 artmakta ve bu

noktadan sonra düşmeye başlamaktadır. Akma değerlerinde de benzerlik izlenmektedir (% 23 düşüş). Son olarak Marshall oranı değerleri de bu trende uymaktadır (% 92 artış).

Polipropilen katkılı ve katkısız numunelerle yürütülen Marshall deneylerinden sonra açıkça görülmektedir ki % 5.5 polipropilen miktarı yine “optimum”dur. Bu sonuç da göstermektedir ki statik sünme deneyleri sonucunda bulunan optimum polipropilen miktarı yine bulunmuş ve bu da ortaya konulan argümanı güçlendirerek bir adım ileriye götürmüştür. Bu davranış Şekil 6.102 ile 6.108 arasındaki grafiklerden açıkça gözlemlenmektedir.

6.6. Stereo Mikroskobi

Stereo mikroskobi yöntemi çeşitli polimerler ile modifiye edilmiş bitümlerin görünümünü, uyumluluğunu ve bitüm matriksi içinde dağılımını incelemek amacıyla kullanılan ve henüz standartlaşmamış bir test yöntemidir. Bu çalışmada Anadolu Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümü Elektroseramik Laboratuvarında bulunan “MEIJI EMZ-TR” model trino/stereo/mikroskobu kullanılmıştır. Katkısız ve polipropilen katkılı bitümlü karışımlardan, karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra akıcı halde iken lam üzerine alınan ve üzerleri lamel ile kapatılarak soğumaya bırakılan bitüm numuneleri en az bir tam gün geçtikten sonra stereo mikroskop altında incelemeye alınmışlardır. Katkısız numunelerden başlayarak sırası ile % 0.5, % 1.0, % 1.5, % 2.0, % 2.5, % 3.0, % 3.5, % 4.0, % 4.5, % 5.0, % 5.5, % 6.0, % 6.5 ve % 7.0 polipropilen katkılı 15 farklı numune tipinden alınan numunelerin stereo mikroskopta çok çeşitli görüntüleri (değişik noktalarda) fotoğraflanmış ve bu fotoğrafların en reprezentatif olanları Şekil 6.109 ile 6.116 arasında sunulmuştur. Çekilmiş olan bu fotoğraflar, dijital bir kamera sistemi sayesinde bilgisayara kaydedilmekte ve daha sonra rahatlıkla kullanılabilir. Bu numuneler mikroskobik seviyede görüntü netliği ve homojenlik kriterleri göz önüne alındığında “x40” yani kırk defa büyütülerek fotoğraflanmışlardır.

Bu büyütme faktörü (magnification factor), araştırmanın amacı göz önüne alındığında son derece yeterli olarak görülmektedir. Bu derecedeki büyütmelerde,

genelde polimer ile modifiye edilmiş bağlayıcılar önemli ölçüde heterojen bir yapı göstermektedirler. Bu heterojen davranış polipropilen modifikasyonu için de geçerlidir. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda polimer-bitüm karışımları arasında, polimer matriksinin devamlılığı olan ve içinde polimer parçalarının yayıldığı bitümlü bağlayıcılar ile polimer parçalarının dağıldığı bitüm matriksi dağılımı arasında farklılıklar belirlenmiştir [52]. Bu farklılıklar Şekil 6.109a'dan başlayarak Şekil 6.114b'ye kadar olan fotoğrafların incelenmesinden rahatlıkla görülebilmektedir. En başta, çok rahatlıkla tahmin edilebileceği gibi tamamen siyah olan fotoğraf, polipropilen katkısı oranının sistematik olarak artması ile birlikte, polipropilen parçacıklarının globüller halinde içerisinde sürekli olarak asılı buldukları bitümlü bağlayıcı fazları haline dönüşmektedirler. Bu noktada mikroyapıdan bahsedilmekte olduğu için daha teferruatlı bilgi verilmesi uygun görülmüştür.

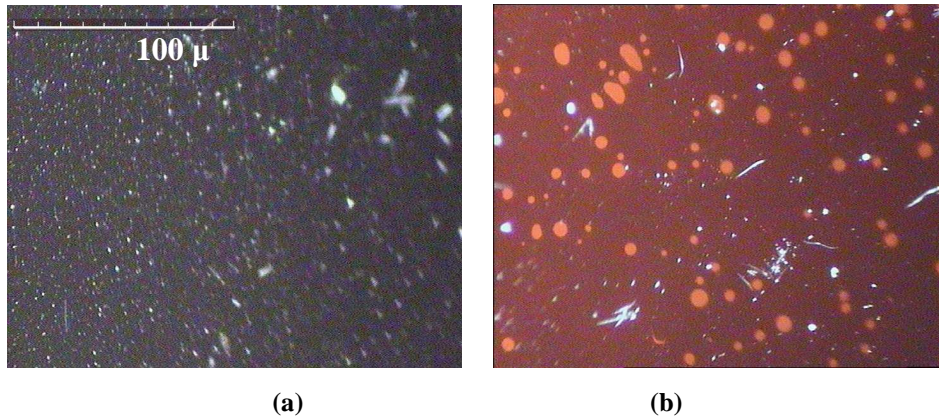
Bitüm ve polimer (burada polipropilen) arasındaki mikroyapıyı tanımlayabilmek için şekilbilim manasına gelen “morfoloji” tanımı sıklıkla kullanılmaktadır. Stereo mikroskopi (floresan mikroskopi) polipropilen ile modifiye edilmiş bitümün morfolojisini incelemek amacı ile kullanılmış olup polimerin bitüm içerisindeki dağılım derecesini belirlemek ve aynı zamanda sürekli ve süreksiz fazları karakterize edebilmek için yararlanılan bir araç olmuştur. Stereo mikroskopi, polimer modifiye bitümlerin faz morfolojisini belirlemek gayesi ile yapılan çalışmalarda, şu ana kadar en kıymetli metotlardan biri olmuştur. Bunun nedeni, homojenlik derecesini ve ham haldeki yapıyı gözlemlemeye olanak tanınmasıdır.

Floresan mikroskopi, polimerlerin, bitümdeki bazı bileşenleri emerek şişmeleri ve ultraviyole (mor ötesi) ışık altında oluşan floresan etkisi prensibine bağlı bir şekilde işlemektedir.

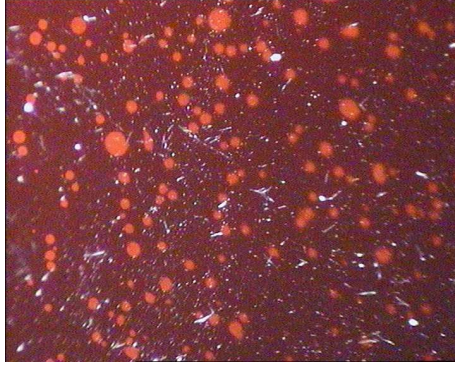
Polimer modifiye bitümün karakteristikleri kapsamında parça ebatlarında dağılımı, polimerin çoğalması ve buna benzer birçok faktör, imaj analizleri ve matematiksel işlemleri kapsayacak biçimde değerlendirilebilir. Bu yöntemler, termik şartlar altında meydana gelecek mikromorfolojik değişikliklerin gözlemlenmesinde kullanılır [52]. Ancak bu tip analizler bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

Şekil 6.115a'ya kadar olan fotoğrafların dikkatli incelenmesi sonucu görülecektir ki, bu fotoğraflarda sürekli bir faz oluşmuştur. Yani polipropilen parçacıkları regüler bir patern içerisinde bitüm fazında dağılan bir görüntü vermektedir. Şekil 6.115a yani % 6.0 polipropilen katkıli numunelerin stereo mikroskop görüntüsü incelendiğindeyse, bu ana kadar regüler bir patern içerisinde dağılan polipropilen parçacıkları, artık kendi içlerinde sürekli bir faz oluşturmaya başlamışlardır. Yani artık sanki “bitüm”, polipropilen parçacıkları arasına serpiştirilmiş bir hal almaya başlamıştır. “Percolation Theory” olarak adlandırılan bu durumda artık polipropilenin özellikleri daha baskın durumdadır ve malzeme daha çok polipropilenin özelliklerine göre davranış sergilemektedir. Bu görüntü 6.115a, 6.115b ve 6.116'da son derece çarpıcı bir hal almaktadır. Özellikle % 6.5 ve % 7.0 polipropilen katkıli bitüm numuneleri, sanki “bitüm katkıli polipropilen numuneleri” haline dönüşmüştür. Bu yorum, polipropilenin bitüm bileşenlerini içerisine alarak haddinden fazla şişmesinden kaynaklanmaktadır. Modifiye bitümün viskozitesindeki artış bunun en açık kanıtıdır. Çalışabilirlikteki azalma da bu durumu destekler niteliktedir.

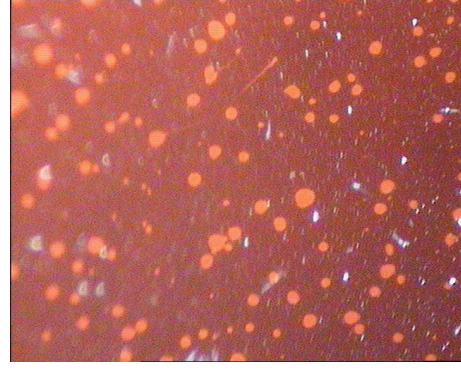
Tüm bu stereo mikroskop görüntülerinin incelenmesi sonucu “optimum” polipropilen katkısı miktarı % 5.5 olarak rahatlıkla belirlenebilir. Bu da statik sünme ve Marshall deneylerinden çıkan sonuçlarla birebir örtüşür niteliktedir.



Şekil 6.109. (a) Katkısız ve (b) % 0.5 PP katkıli numunelerin mikroskopik görüntüleri

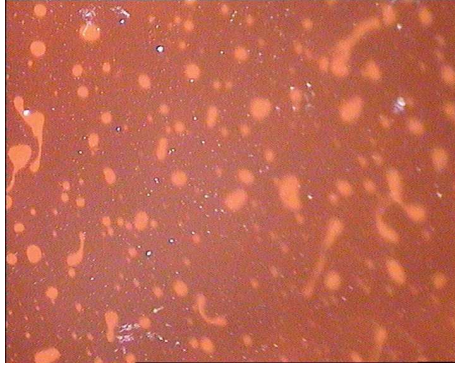


(a)

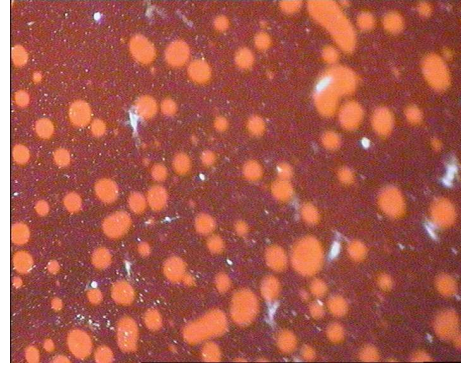


(b)

Şekil 6.110. (a) ‰ 1.0 ve (b) ‰ 1.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri

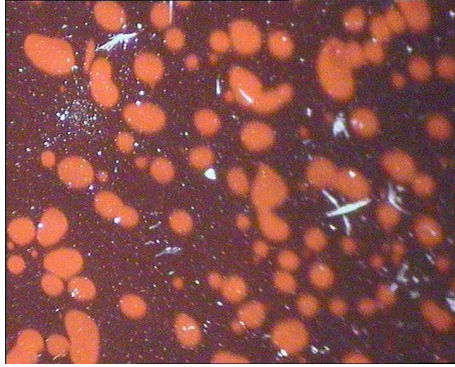


(a)

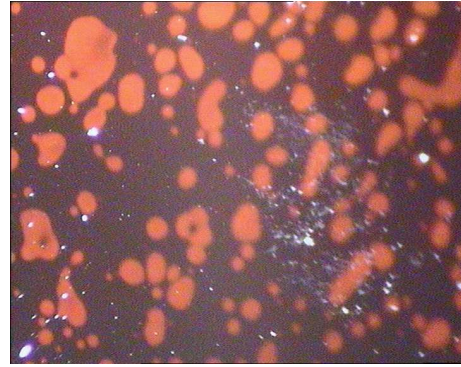


(b)

Şekil 6.111. (a) ‰ 2.0 ve (b) ‰ 2.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri



(a)

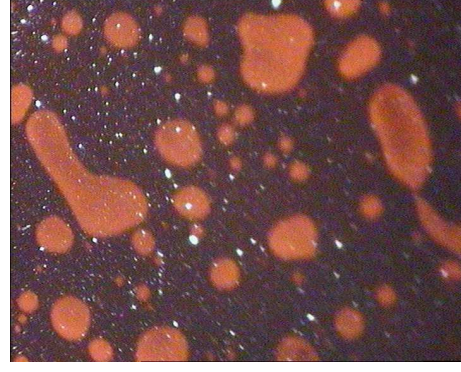


(b)

Şekil 6.112. (a) ‰ 3.0 ve (b) ‰ 3.5 PP katkılı numunelerin mikroskopik görüntüleri

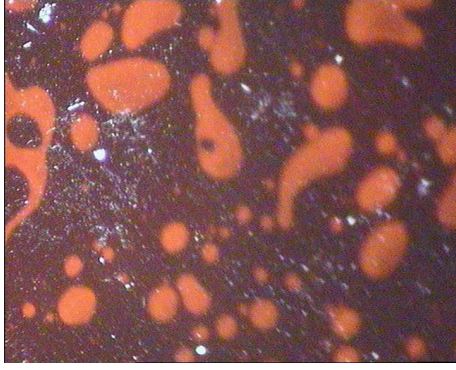


(a)

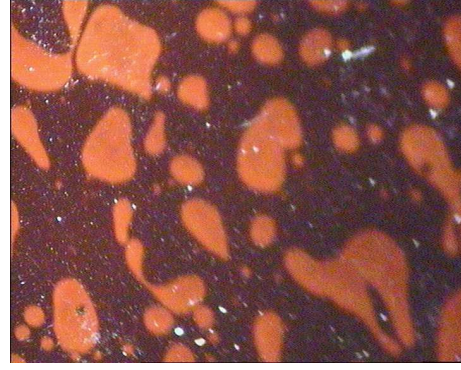


(b)

Şekil 6.113. (a) ‰ 4.0 ve (b) ‰ 4.5 PP katkılı numunelerin mikroskobik görüntüleri

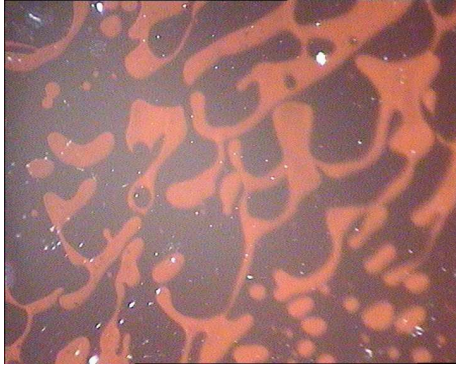


(a)

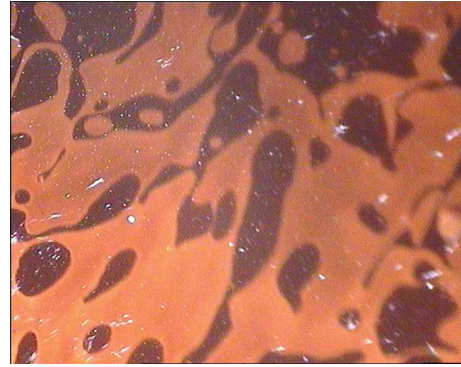


(b)

Şekil 6.114. (a) ‰ 5.0 ve (b) ‰ 5.5 PP katkılı numunelerin mikroskobik görüntüleri

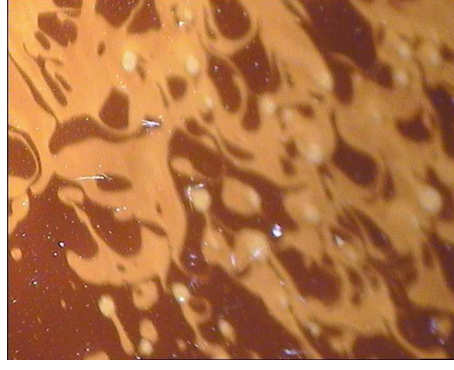


(a)



(b)

Şekil 6.115. (a) ‰ 6.0 ve (b) ‰ 6.5 PP katkılı numunelerin mikroskobik görüntüleri



Şekil 6.116. % 7.0 PP katkılı numunenin mikroskobik görüntüsü

6.7. Optimum Polipropilen Katkılı Numunelerin Optimum Bitüm Muhtevasının Bulunması

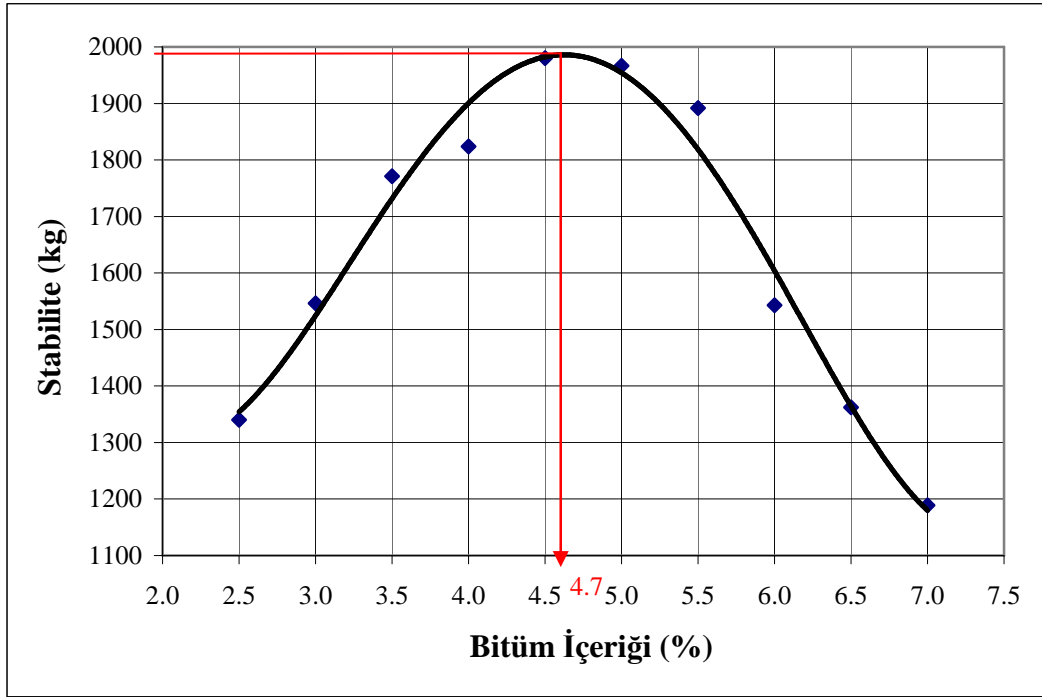
Bu bölümde, daha önceden çeşitli analizler yapılarak belirlenmiş olan % 5.5 optimum polipropilen katkılı numunelerin “optimum bitüm muhteva”larını hesaplamak için yürütülen çalışmalar verilmiştir.

Çizelge 6.25. Optimum polipropilen katkılı numunelerin Marshall deney sonuçları

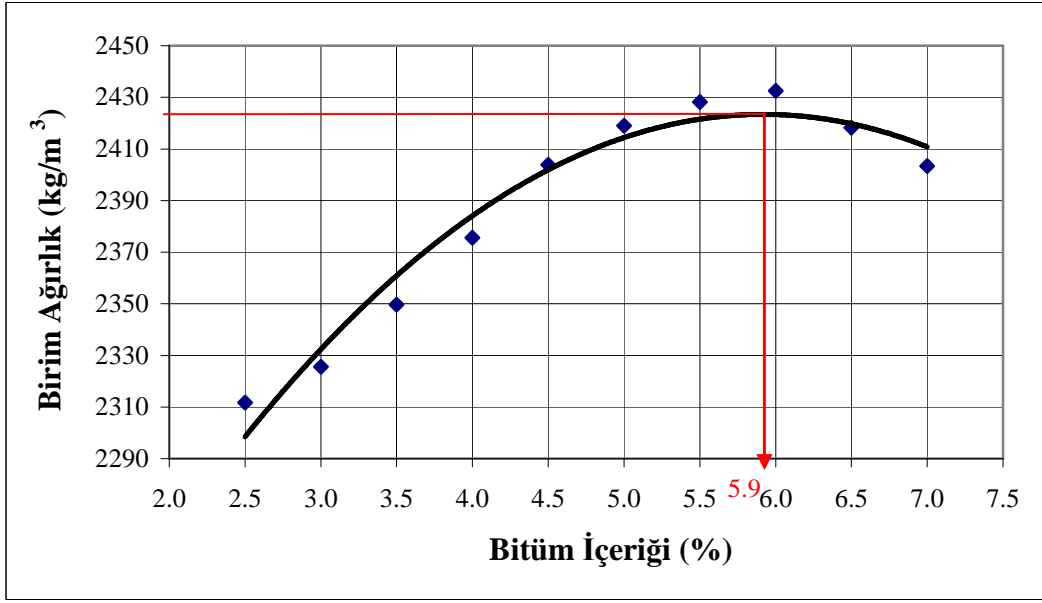
BİRİKTİRİLE NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		BİTİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1022 kg/m ³		2759 kg/m ³		1022 kg/m ³		2759 kg/m ³		AKMA		MO (kg/mm)					
	AC %	AC %	HAVA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA		AGREGA				
BİRİKTİRİLE NO	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		BİTİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2776 kg/m ³		2776 kg/m ³		2776 kg/m ³		2776 kg/m ³		AKMA		MO (kg/mm)					
	AC %	AC %	HAVA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA		AGREGA				
BİRİKTİRİLE NO	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		BİTİM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2785 kg/m ³		2785 kg/m ³		2785 kg/m ³		2785 kg/m ³		AKMA		MO (kg/mm)					
	AC %	AC %	HAVA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA	AGREGA	HAVA	AGREGA		AGREGA				
1	2.90	2.49	61.50	117.00	624.50	482.50	2315	2649	5.525	12.614	18.138	30.459	16.622	2315	1304.000	1.05	1369.200	1.354	1011.226	
2	2.90	2.49	61.50	112.40	624.50	482.50	2308	2649	5.508	12.615	18.277	30.460	16.885	2308	1333.000	1.05	1401.730	1.963	714.086	
3	2.90	2.49	61.40	114.20	622.30	481.900	2312	2649	5.518	12.724	18.248	30.248	17.372	2312	1179.000	1.06	1248.740	1.855	673.714	
Ort.																				799.675
4	3.00	2.913	61.100	1124.700	645.400	482.500	2322	2659	6.646	12.960	17.940	37.045	11.303	2322	1422.000	1.07	1531.540	2.174	699.880	
5	3.00	2.913	61.200	1126.200	641.700	482.500	2324	2659	6.625	12.966	18.204	36.891	11.388	2324	1425.000	1.06	1513.680	2.659	620.615	
6	3.00	2.913	61.300	1129.100	642.500	486.600	2320	2659	6.613	13.153	18.497	36.043	11.742	2320	1326.000	1.05	1604.400	2.813	570.552	
Ort.																				630.852
7	3.500	3.382	60.700	1132.000	651.900	480.100	2338	2669	7.802	13.270	19.430	44.761	9.627	2338	1722.000	1.08	1839.760	3.371	551.684	
8	3.500	3.382	61.400	1133.900	648.200	485.100	2337	2669	7.734	13.546	19.410	42.628	10.418	2337	1597.000	1.06	1692.820	2.991	629.067	
9	3.500	3.382	60.900	1132.200	652.900	482.300	2354	2669	7.788	13.426	19.786	44.316	9.794	2354	1646.000	1.07	1761.220	2.410	730.797	
Ort.																				627.186
10	4.000	3.846	60.200	1132.300	657.500	477.800	2376	2590	8.942	13.209	17.191	52.017	8.227	2376	1801.000	1.09	1963.090	2.448	801.916	
11	4.000	3.846	60.700	1137.600	657.200	480.400	2388	2590	8.912	13.238	17.472	51.066	8.569	2388	1540.000	1.08	1665.300	3.852	487.893	
12	4.000	3.846	60.600	1140.600	661.900	478.700	2383	2590	8.967	13.040	17.993	52.870	8.002	2383	1848.500	1.08	1848.500	3.052	694.030	
Ort.																				611.286
13	4.500	4.306	59.500	1130.000	660.200	469.200	2488	2571	10.148	13.552	16.468	61.620	6.329	2488	1897.000	1.12	2091.040	3.688	566.983	
14	4.500	4.306	60.100	1138.600	665.300	475.300	2396	2571	10.094	13.087	16.913	59.883	6.827	2396	1717.000	1.10	1888.700	2.453	775.647	
15	4.500	4.306	60.100	1140.200	666.600	475.600	2488	2571	10.144	13.503	16.497	61.490	6.861	2488	1783.000	1.10	1940.200	3.886	509.407	
Ort.																				617.546
16	5.000	4.762	59.600	1149.700	673.900	475.600	2416	2553	11.256	13.923	15.671	67.789	5.319	2416	1673.000	1.11	1829.230	3.450	718.878	
17	5.000	4.762	59.700	1153.200	677.300	476.000	2423	2553	11.268	13.929	15.823	68.533	5.091	2423	1543.000	1.11	2046.620	3.490	591.645	
18	5.000	4.762	59.600	1147.100	672.800	474.800	2419	2553	11.269	13.485	15.246	66.515	5.255	2419	1782.000	1.11	1883.570	4.376	433.284	
Ort.																				601.068
19	5.500	5.213	59.300	1152.300	678.100	474.400	2429	2553	12.392	13.463	14.145	16.537	74.936	4.153	1737.000	1.11	1928.070	3.665	526.076	
20	5.500	5.213	60.300	1138.000	680.300	477.700	2424	2553	12.366	13.282	16.718	73.964	4.261	2424	1792.000	1.09	1952.280	3.630	538.044	
21	5.500	5.213	59.200	1149.800	676.800	473.000	2421	2553	12.400	13.314	14.086	16.486	4.095	2421	1794.240	1.12	1904.240	4.387	408.990	
Ort.																				491.033
22	6.000	5.660	58.800	1145.000	673.200	469.800	2453	2517	13.475	13.191	16.899	80.165	3.341	2453	1496.000	1.14	1705.440	3.946	433.195	
23	6.000	5.660	60.200	1162.900	684.200	478.700	2459	2517	13.453	13.066	15.489	79.453	3.268	2459	1407.000	1.09	1592.180	3.635	420.407	
24	6.000	5.660	59.400	1152.300	679.100	473.200	2455	2517	13.487	13.265	16.733	80.592	3.256	2455	1395.520	1.12	1646.000	4.851	289.467	
Ort.																				380.660
25	6.500	6.103	60.800	1165.000	682.400	481.600	2419	2500	14.446	13.226	13.728	81.738	3.226	2419	1323.000	1.09	1397.280	3.935	355.116	
26	6.500	6.103	60.100	1161.000	681.000	480.000	2419	2500	14.445	13.317	13.683	81.686	3.247	2419	1320.000	1.10	1335.000	4.564	286.440	
27	6.500	6.103	60.600	1169.100	683.400	483.700	2417	2500	14.434	13.227	13.909	17.743	3.317	2417	1237.000	1.08	1333.940	5.581	239.376	
Ort.																				296.891
28	7.000	6.542	60.000	1164.100	679.900	484.300	2424	2483	12.386	13.422	13.578	82.820	3.200	2424	1047.000	1.10	1151.700	5.701	202.017	
29	7.000	6.542	60.700	1166.000	678.300	483.200	2424	2483	13.395	13.449	13.551	82.968	3.168	2424	1111.000	1.08	1199.880	5.112	234.718	
30	7.000	6.542	60.800	1166.100	680.000	483.200	2422	2483	13.375	13.360	13.665	82.483	3.273	2422	1136.000	1.07	1215.520	5.910	204.672	
Ort.																				214.136

Çizelge 6. 26. Marshall formlarından elde edilen ortalama değerleri gösteren tablo

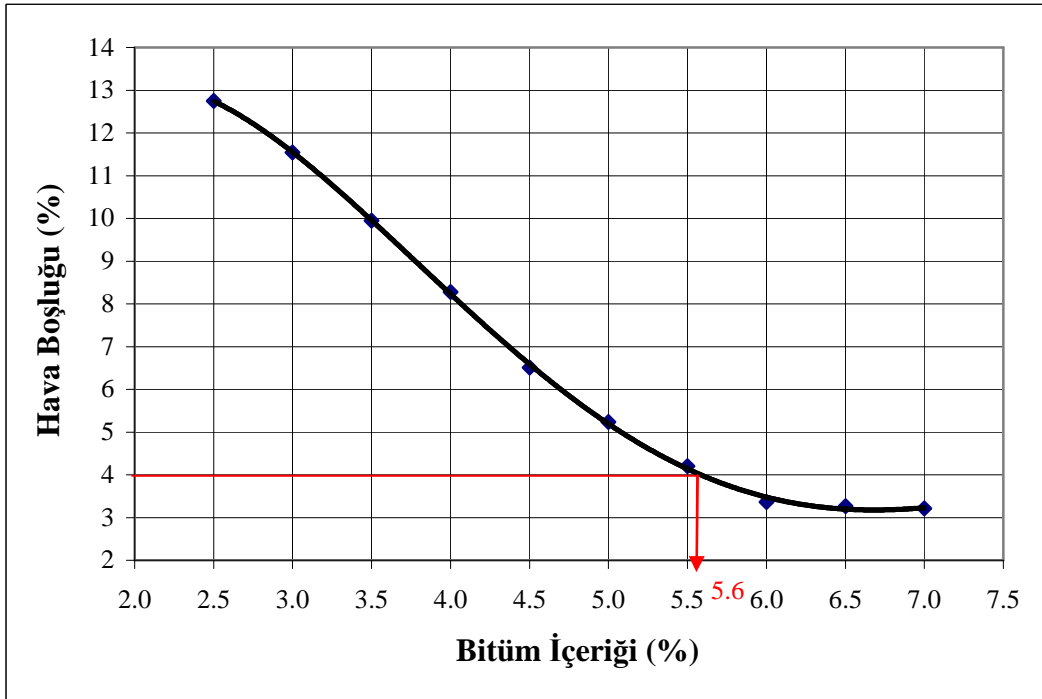
Bitüm Yüzdesi (%)	Stabilite (kg)	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Hava Boşluğu (%)	Vf (%)	VMA (%)	Akma (mm)	Marshall Oranı (kg/mm)
25	1340.230	2312	12.747	30.222	18.255	1.724	799.675
30	1546.540	2326	11.544	36.493	18.164	2.475	630.282
35	1771.267	2350	9.950	43.901	17.716	2.824	637.186
40	1824.003	2376	8.276	51.964	17.208	3.131	611.286
45	1979.980	2404	6.506	60.931	16.626	3.324	617.346
50	1966.550	2419	5.235	68.322	16.498	3.435	601.068
55	1891.863	2428	4.203	74.704	16.581	3.894	491.053
60	1543.047	2432	3.362	80.070	16.826	4.134	380.690
65	1362.113	2418	3.267	81.592	17.700	4.693	296.981
70	1189.033	2403	3.214	82.757	18.590	5.574	214.136



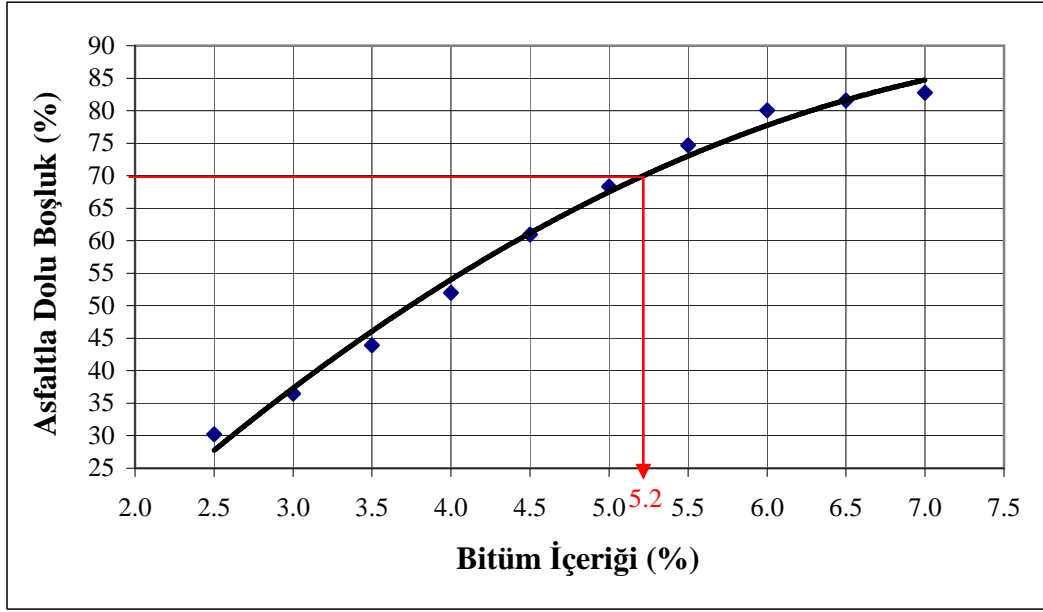
Şekil 6.117. Stabilite-bitüm içeriği grafiği



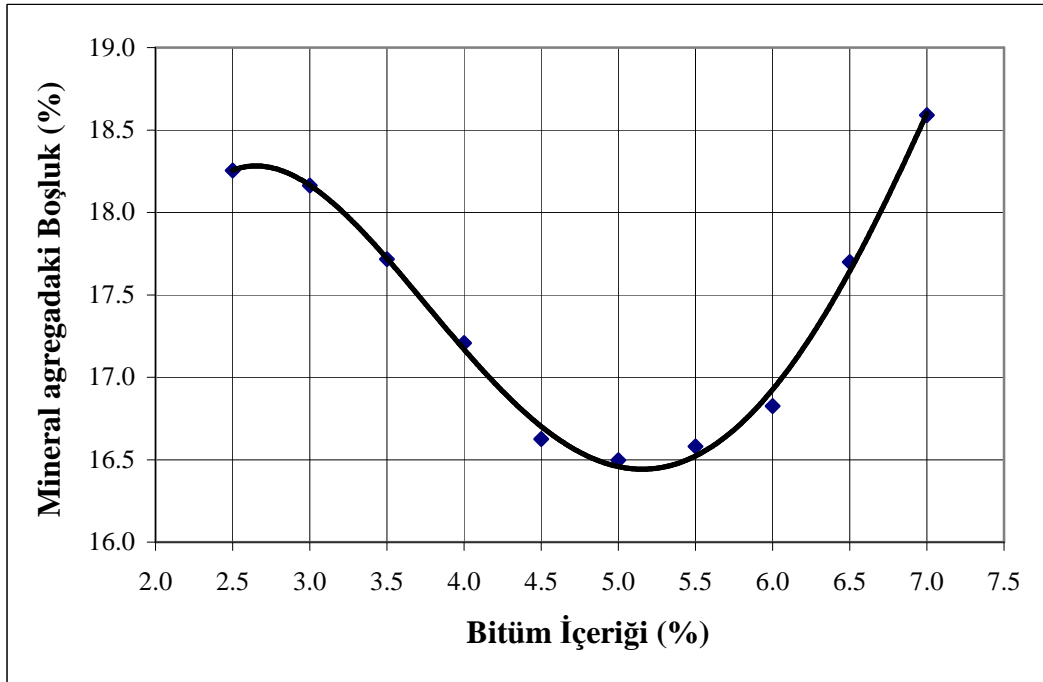
Şekil 6. 118. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği



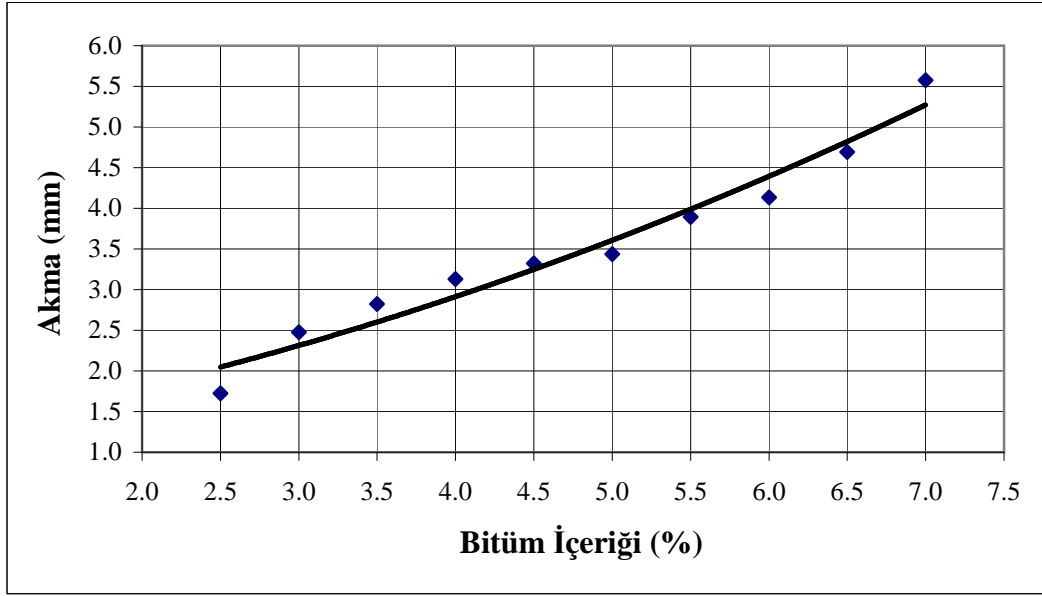
Şekil 6.119. Hava boşluğu-bitüm içeriği grafiği



Şekil 6.120. Asfaltla dolu boşluk oranı (V_f)-bitüm içeriği grafiği



Şekil 6. 121. Mineral agregadaki boşluk (VMA)-bitüm içeriği grafiği



Şekil 6. 122. Akma-bitüm içeriği grafiği

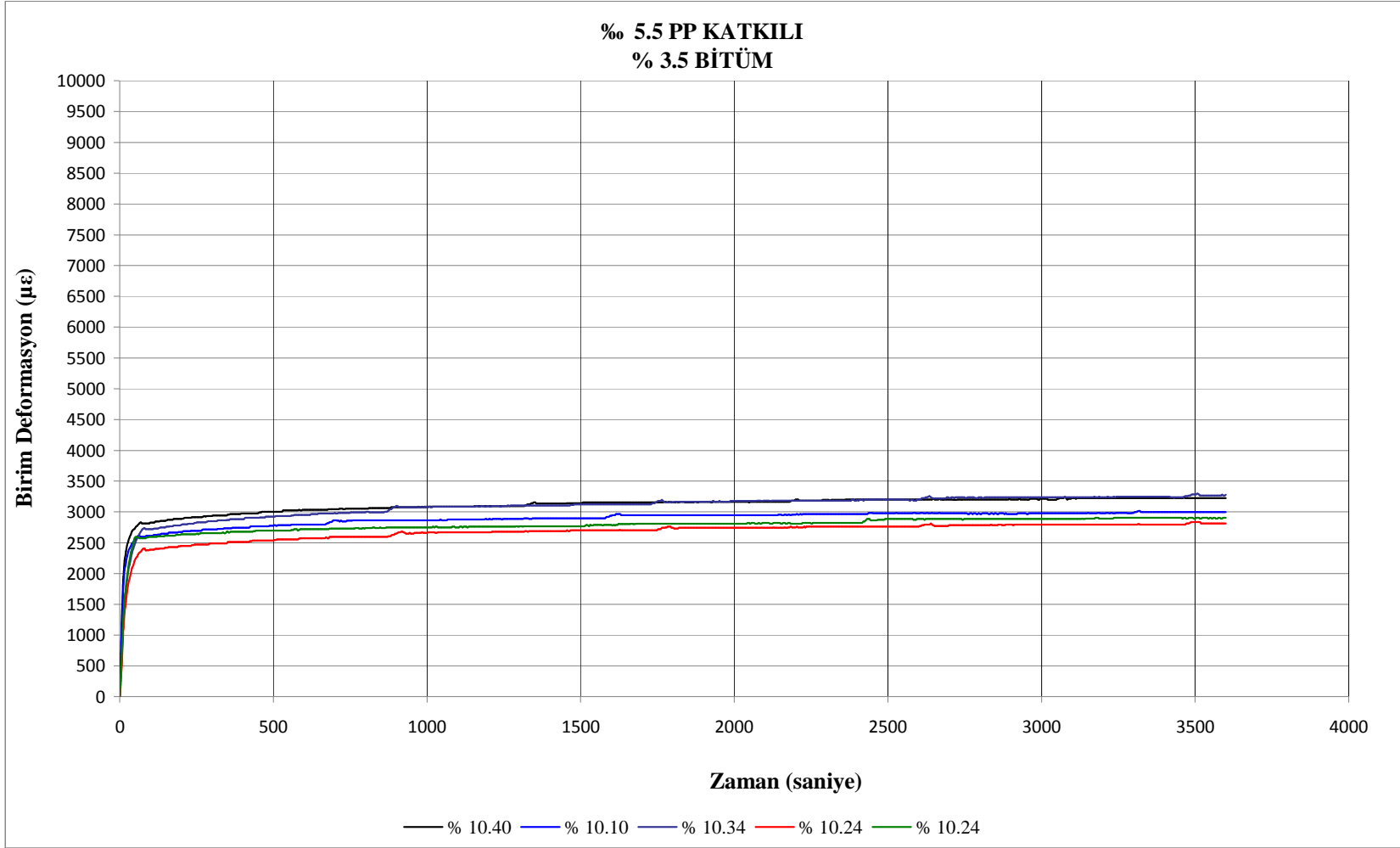
Optimum polipropilen katkılı numunelerin optimum bitüm muhtevasının bulunması ile ilgili verileri içeren Şekil 6.117 ila 6.122 numaralı grafikler incelendiğinde; maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, % 4 boşluk oranı ve % 70 asfalt ile dolu boşluk oranı değerlerini sağlayan bitüm yüzdeleri sırası ile % 47, 59, 56 ve 52'dir. Seriyeye ait optimum bitüm muhtevası birinci yöntemle % 53.5, ikinci yöntemle % 54 bulunmuştur. Birinci yöntem ile ikinci yöntem arasındaki fark, ikinci yöntemde asfalt ile dolu boşluk oranı değerinin hesaba katılmamış olmasıdır. Buna göre iki değerlerin ortalaması yaklaşık olarak % 53.8 olarak alınmıştır. Bu değer, katkısız numunelerin optimum bitüm muhtevası değeri olan “% 50”den yaklaşık olarak % 7.6 fazladır. Bu fazlalığın rasyonel bir açıklaması elbette yapılabilir. Optimum polipropilen katkılı numuneler hazırlanırken, polipropilenin bitümü emerek şişmesi sonucu gerekenden daha fazla bitüm ilave edilerek numuneler hazırlanabilmektedir. Bu aynı zamanda “işlenebilirliği” ve “çalışabilirliği” arttırmakta ve daha açık bir deyişle modifiye bitümün “kıvamlılığını” istenen boyuta getirmektedir. Yalnız şunu unutmamak gerekmektedir ki, optimum polipropilen katkılı numunelerin bitüm muhtevasındaki bu artış, ekonomi faktörünü negatif yönde etkiler gibi gözükse de aslında ekonomik analiz kısmında da teferruatlı olarak ele alınacağı üzere, bitümlü bağlayıcıdan önemli oranda ekonominin sağlanması gerçeği ile sonlanmaktadır.

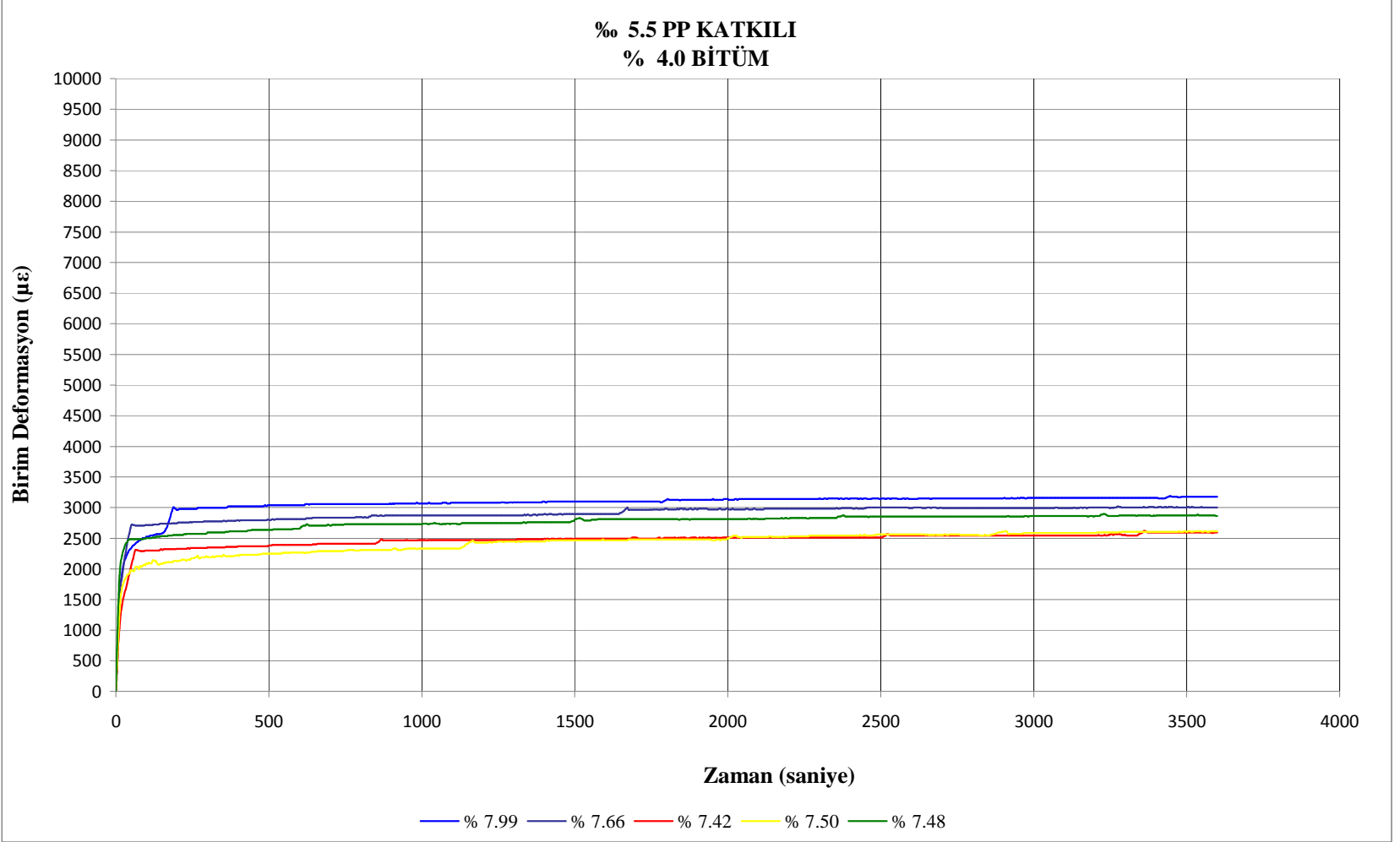
Tam bir tezat gibi görünen bu durum bir sonraki bölümde etraflıca açıklanacaktır. Ayrıca son olarak ‰ 53.8’lik bu değer çok ufak bir fark yarattığından (1100 gr’lık agregada sadece 4.18 gr), optimal-optimum bitüm muhtevası yine ‰ 50 olarak kabul edilebilir. Bu son derece realist bir yaklaşımdır.

6.8. Ekonomik Analiz

Bu bölümde optimum polipropilen katkılı (‰ 5.5) numunelerin daha önceki bölümde belirlenmiş olan ‰ 53.8 optimum bitüm muhtevası üzerine, ekonomik açıdan son derece elverişli numunelerin hazırlanması, bu numunelere statik sünme ve Marshall deneyleri yapılarak ekonomik yönden ‰ 35, 40, 45 ve 50 bitüm muhtevası ile hazırlanan numunelerinde, optimal-optimum mertebesinde mukayese edilebilir sonuçlar vereceğinin ispatlanması açısından önem taşıyan analizler yürütülmüştür. Önce statik sünme ve daha sonra da Marshall deneyleri yapılmış ve bu sonuçlar aşağıda verilmiştir.

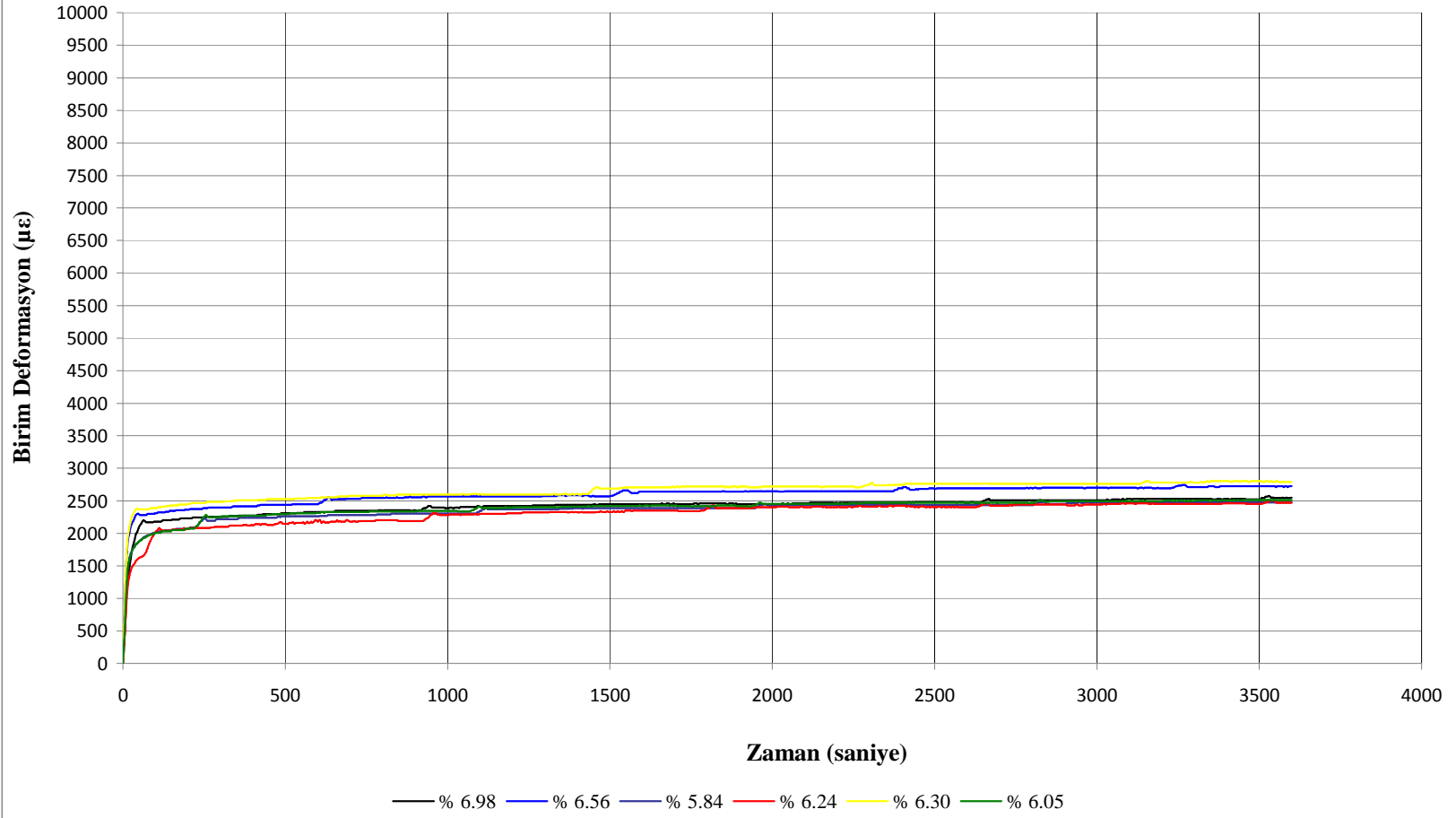
Şekil 6.123. % 35 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri





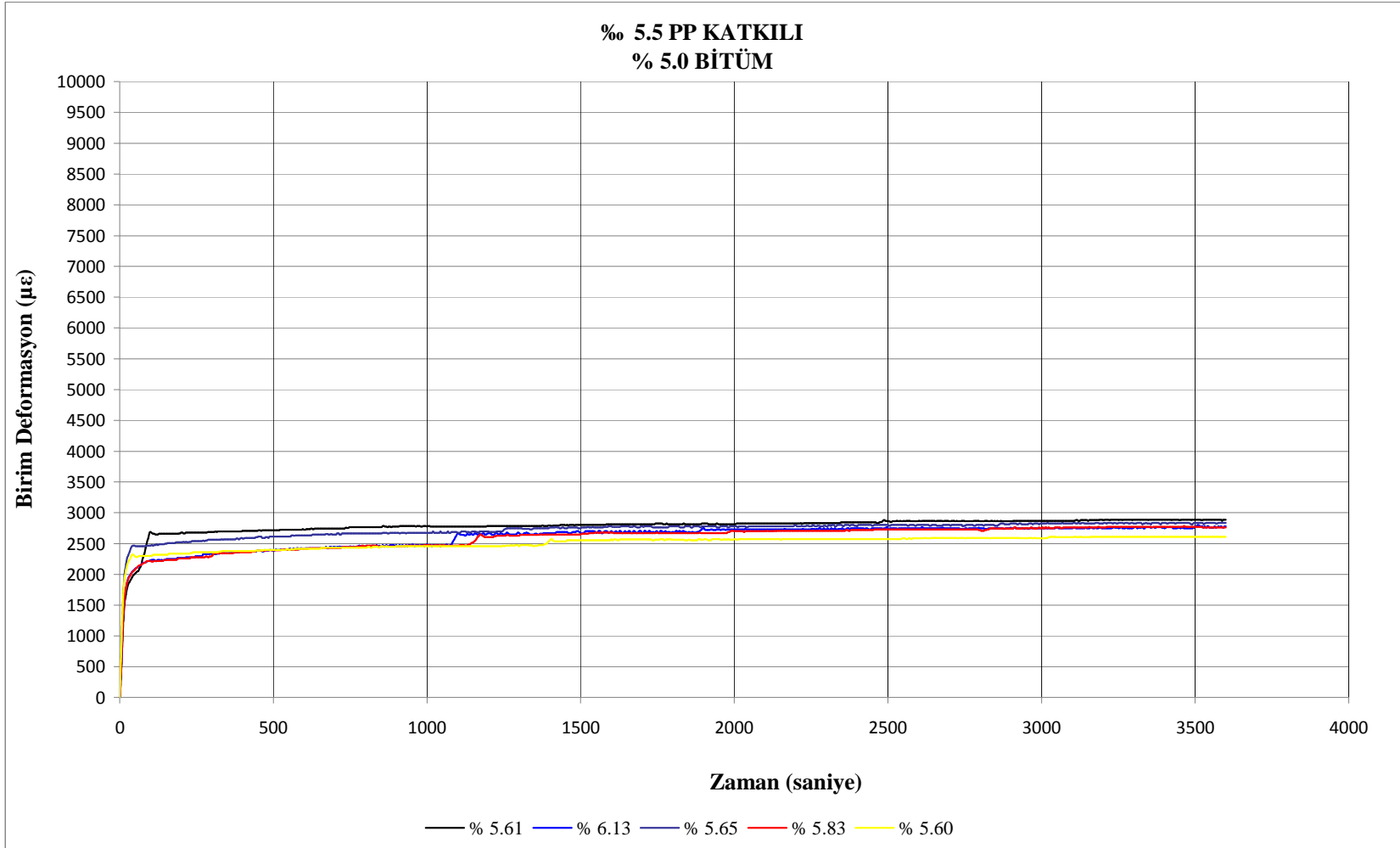
Şekil 6.124. % 40 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

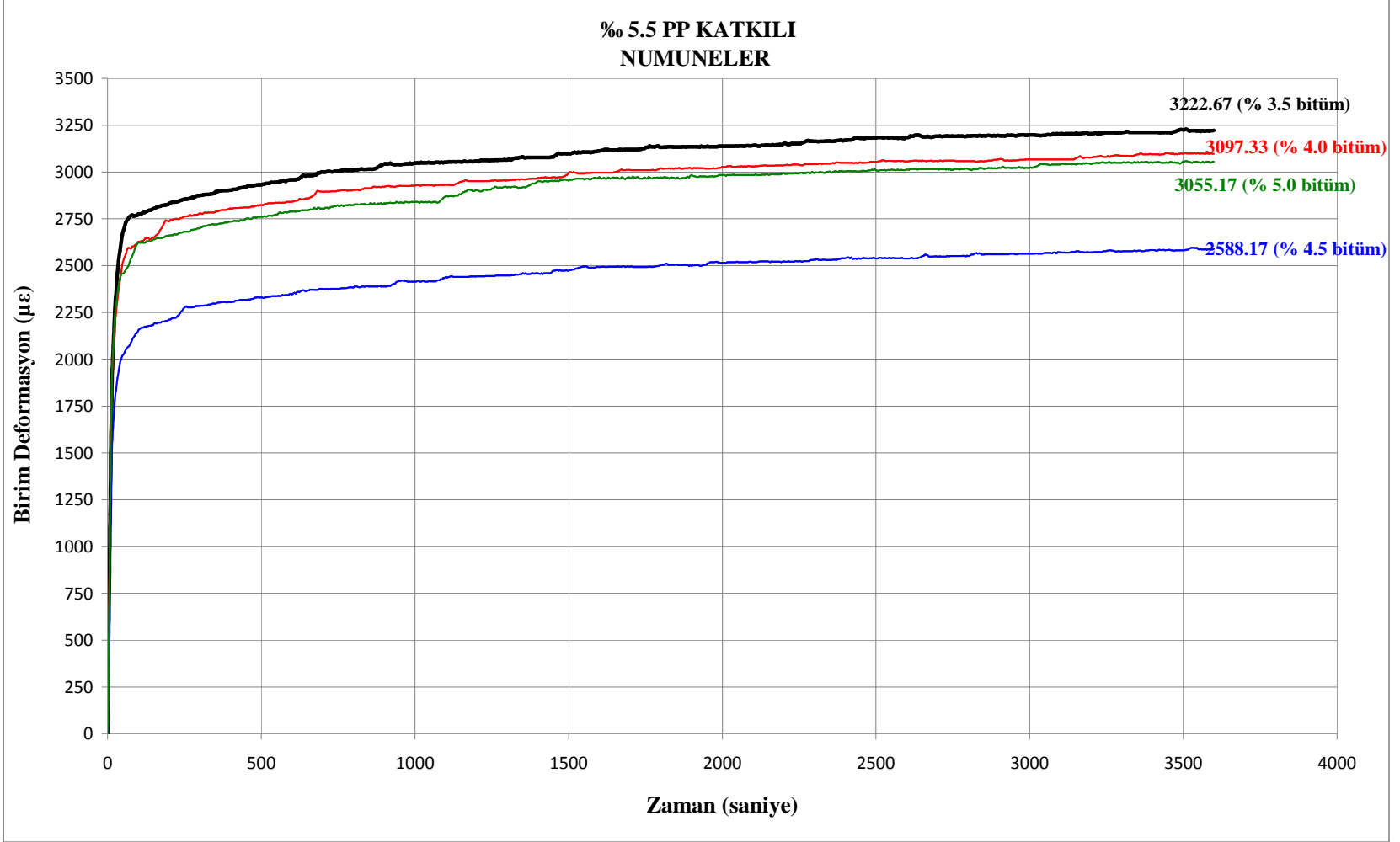
**% 5.5 PP KATKILI
% 4.5 BİTÜM**



Şekil 6.125. % 4.5 bitüm ve % 5.5 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri

Şekil 6.126. %50 bitüm ve %5.5 PP katkılı numunelerin birim deformasyon-zaman grafikleri



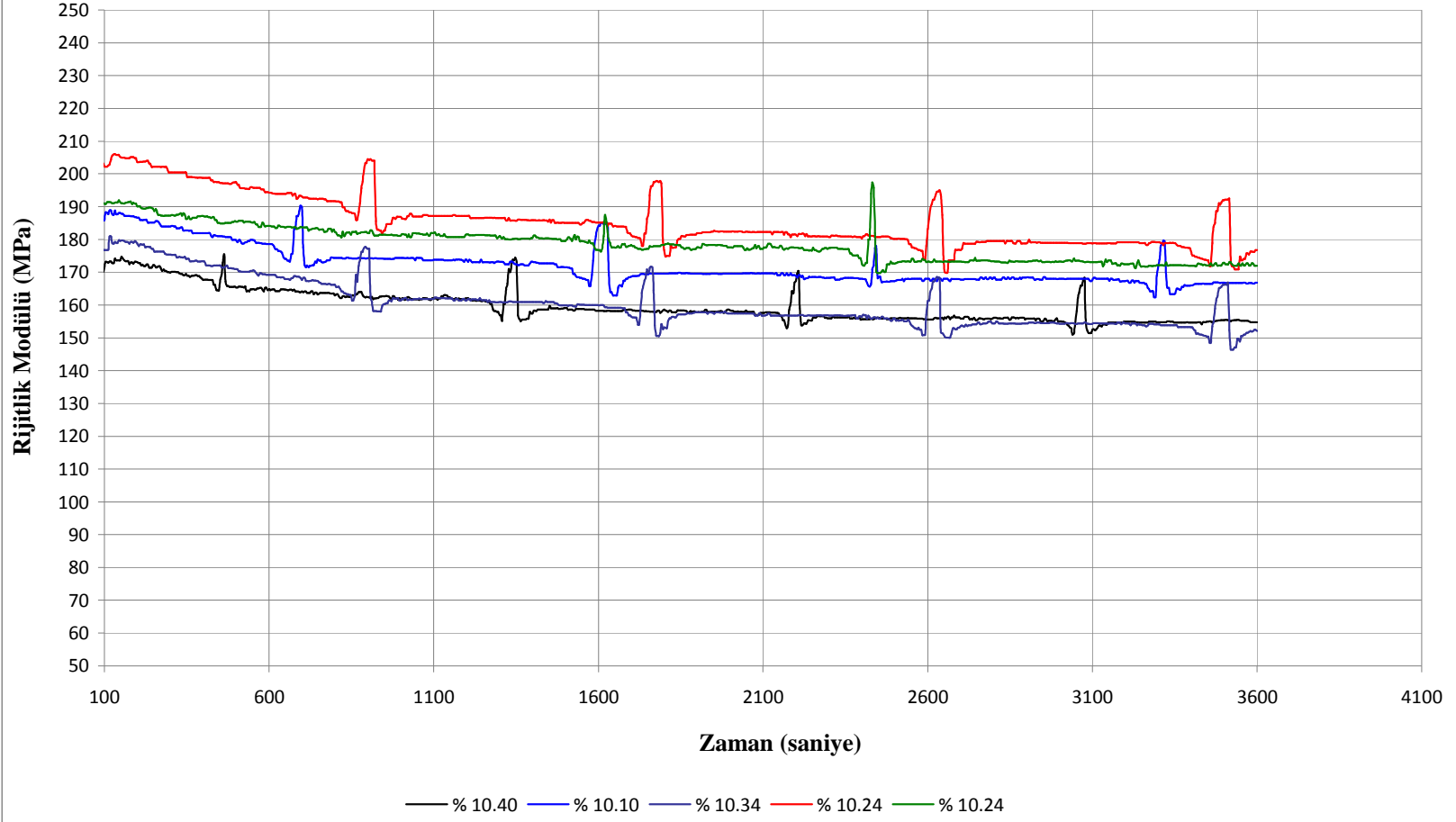


Şekil 6.127. % 5.5 PP katkıli numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.127'deki % 35, % 40, % 45 ve % 50 bitüm katkıli optimum polipropilen katkısına sahip numunelerin birim deformasyon-zaman zarf eğrileri incelendiğinde, optimum polipropilen katkısındaki optimum bitüm muhtevası olarak kabul edilen % 50 bitüm muhtevasında, 70 dakikalık deney sonucunda ortaya çıkan kalıcı birim deformasyon değerinin (ortalama değer) 3055.17 $\mu\epsilon$ olduğu görülmektedir. Bu değer % 35 bitüm muhtevası ile hazırlanmış numunelerin ortalama birim deformasyon değeri olan 3222.67 $\mu\epsilon$ 'dan sadece % 5.20 oranında daha azdır. % 40 bitüm muhtevası ile hazırlanan numunelerden ise sadece % 1.36 oranında azdır. İşin en ilginç yanı ise % 45 bitüm ile hazırlanmış numunelerin birim deformasyon değeri olan 2588.17 $\mu\epsilon$ 'dan % 18 daha fazladır. Bu gerçekten üzerinde durulması gereken bir noktadır. Bu değerlerin yorumlamasında ilk etapta % 45 bitüm muhtevası ile hazırlanmış olan numuneler dikkati çekmektedir. Buna göre % 45 bitüm muhtevasıyla hazırlanan numunelerin % 50 bitüm ile hazırlanmış olan numunelere kıyaslandığında, birim deformasyonlar göz önüne alındığı vakit daha iyi bir mekanik davranış sergiledikleri söylenebilir. Ancak % 45'lik numunelerdeki bitüm ekonomisi sadece % 10'dur. Doğal olarak bunun bir de hava boşluğu, özgül ağırlık, mineral agregadaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk tarafları vardır. İşte tüm bu faktörler göz önüne alındığında “% 35” bitüm muhtevası ile hazırlanmış numunelerin statik sünme deneyindeki birim deformasyon birikimi davranışları son derece dikkat çekicidir. Ortalama hava boşluk değerlerinin % 43 az, ortalama özgül ağırlık değerlerinin % 2.7 az, ortalama mineral agregadaki boşluk değerlerinin % 5.75 az, ortalama asfaltla dolu boşluk değerlerinin ise % 53 daha az olmasına rağmen % 35 bitüm muhtevasına sahip olan bu numunelerin bu denli iyi bir mekanik performans göstermeleri son derece enteresandır. Daha hafif, daha fazla boşluklu ve daha az asfalt oranına sahip olan bu numuneler gerçek bir yeni nesil kaplama dizaynına giden yolda çok büyük bir adımdır. Polipropilen katkısının sağlamış olduğu bu artılar yadsınamaz bir gerçektir. Ekonominin son derece önemli olduğu günümüz dünyasında, bitümlü bağlayıcıdan sağlanan “% 30” oranındaki kazanç, polipropilen modifikasyonu ile ortaya çıkan ekstra maliyetin kat kat üzerinde bir kazançtır.

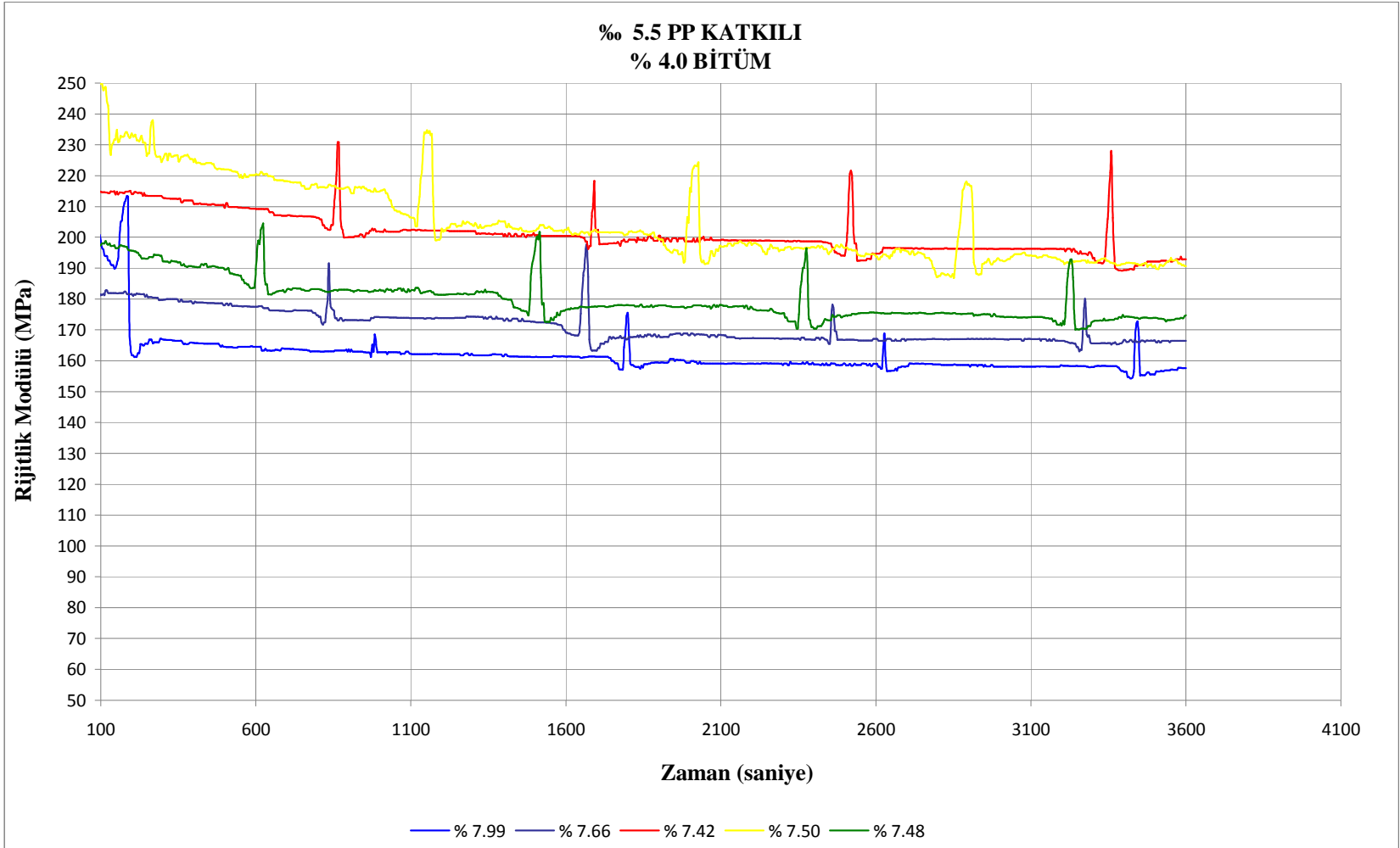
Günümüzde 25 km'ye kadar olan taşımalar için anahtar teslim beton asfaltın ton fiyatı 80 YTL civarındadır. Orta ölçekli bir polipropilen modifikasyonunda geçerli olan polipropilenin kg fiyatı ise 6 YTL'dir. Bu çalışmada bulunan sonuçlar ışığında 1 ton asfalt imalatında yaklaşık olarak 5.23 kg polipropilen gerekmektedir (normal dizayn parametreleri göz önüne alındığında). Dolayısıyla 1 ton asfalt için 31.38 YTL'lik ekstra bir polipropilen maliyeti olmaktadır. Araştırma esaslı bilgi verildiği için kar marjı hesaplanmamıştır. Bitümden yapılan % 30'luk avantaj ise bir ton asfalt maliyetini 56 YTL'ye kadar çekmektedir. Bu 24 YTL'lik kar üzerine 31.38 YTL'lik ekstra polipropilen maliyeti eklendiğinde realize edilmiş bir ton asfalt 87.38 YTL'ye çıkmaktadır. Bu % 9.3'lük bir maliyet artışı doğurmaktadır. Yeniden belirtmek gerekir ki polipropilen modifikasyonunun "sıfır" karla yapıldığı varsayılmaktadır. Bunun ötesinde polipropilenin karışım özelliklerinde neden olduğu iyileşmeler ise parayla ölçülemez bir konumdadır. Ve mevcut ithal modifiye edicilere ve ithal teknolojiye ödenen milyonlarca dolarla karşılaştırıldığında polipropilen modifikasyonunun maliyeti son derece küçük bir miktardadır.

**% 5.5 PP KATKILI
% 3.5 BİTÜM**

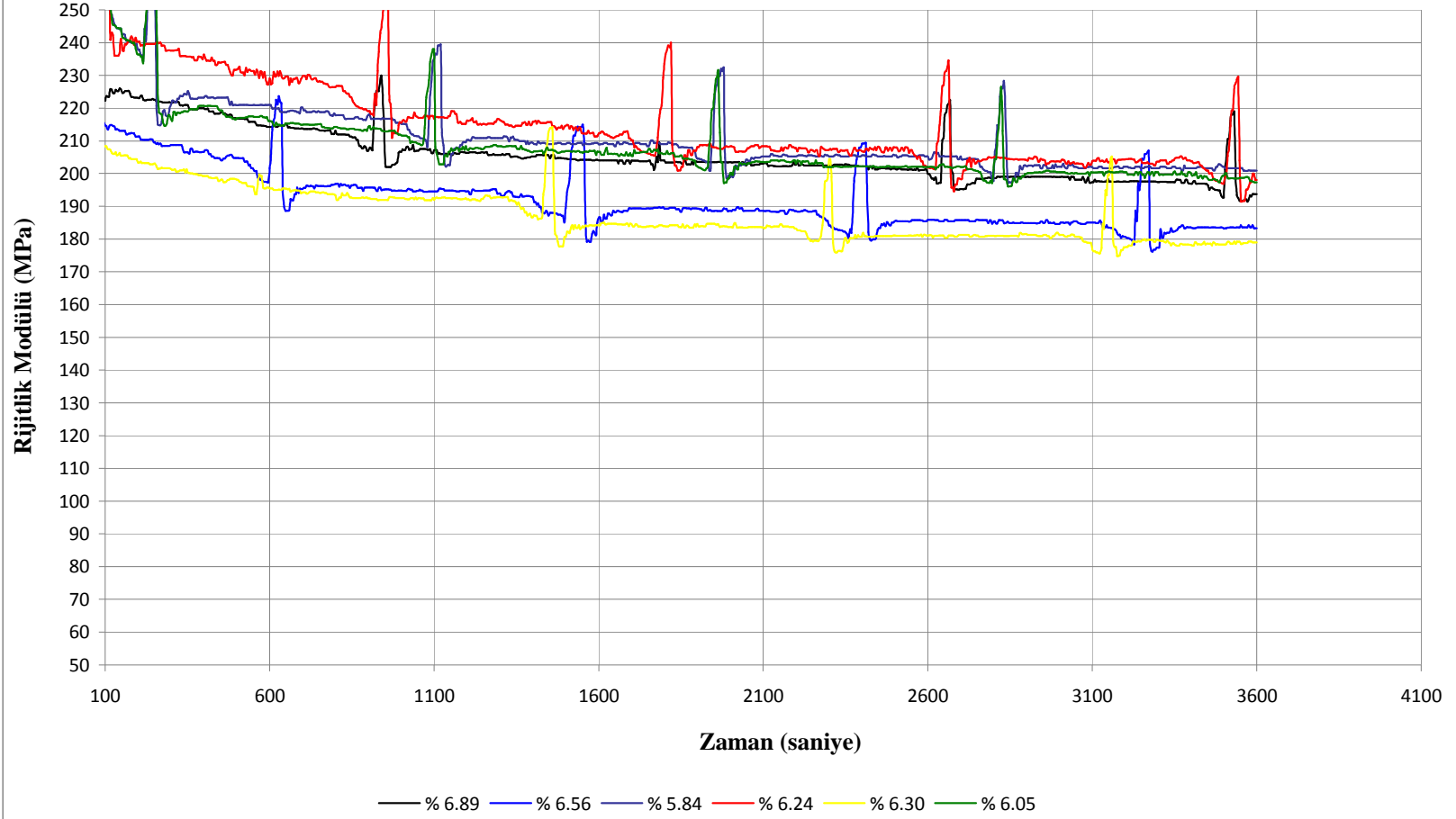


Şekil 6.128. % 3.5 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

Şekil 6.129, %40 bitüm ve %5.5 PP katkıli numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

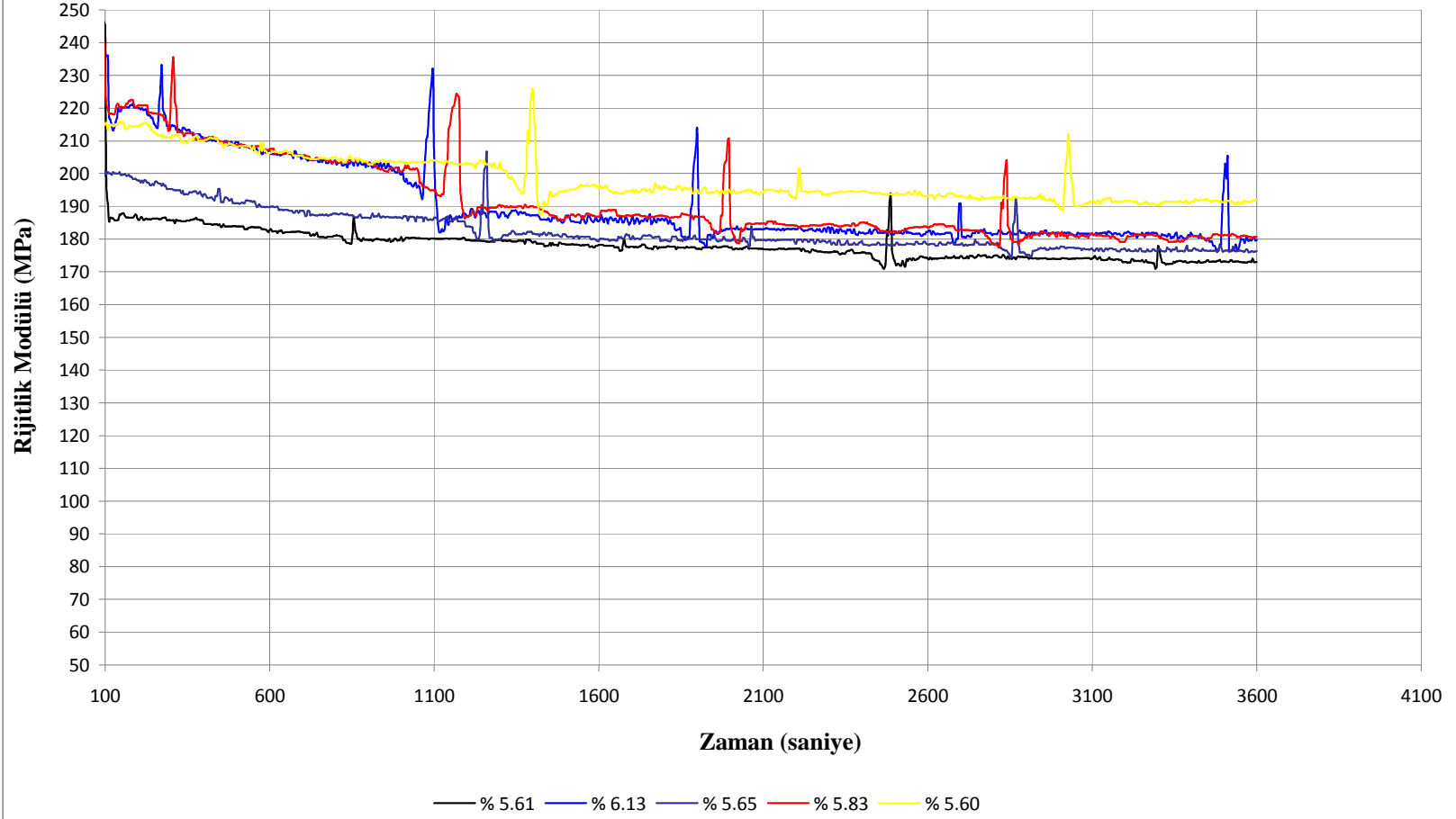


**% 5.5 PP KATKILI
% 4.5 BİTÜM**



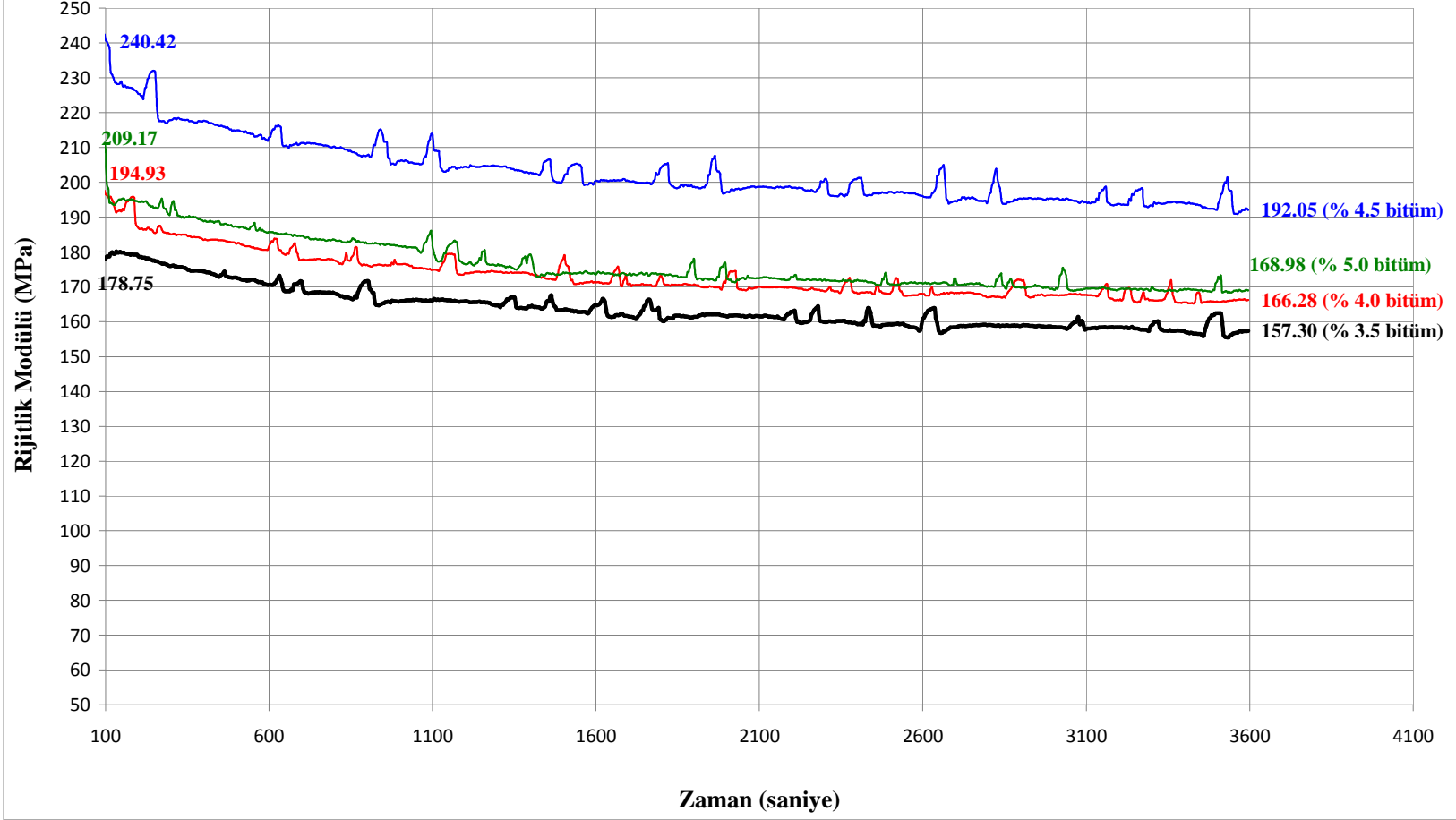
Şekil 6.130. % 45 bitüm ve % 5.5 PP katkılı numunelerin rijidlik modülü-zaman grafikleri

**% 5.5 PP KATKILI
% 5.0 BİTÜM**



Şekil 6.131. % 50 bitüm ve % 5.5 PP katkılu numunelerin rijitlik modülü-zaman grafikleri

**% 5.5 PP KATKILI
NUMUNELER**



Şekil 6.132. % 5.5 PP katkı numunelerinin rijitlik modülü-zaman zarf eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.132 etrafı bir şekilde incelendiğinde, ilk rijitlik modülleri göz önüne alınırsa, ‰ 35 bitüm muhtevası ile hazırlanmış numunelerin rijitlik modüllerinin ‰ 50 bitüm muhtevası ile hazırlanmış numunelerinkine göre % 14.5 oranında daha az olduğu gözlemlenmektedir. Bu değeri ‰ 40 bitüm muhtevalı numuneler için % 6.8 daha az, ‰ 45 bitüm muhtevalı numuneler içinse % 15 daha fazladır. Benzer durum deney sonunda gözlemlenen rijitlik modülü değeri içinde geçerlidir. ‰ 35 bitüm muhtevalı numunelerin rijitlikleri % 6.9 daha az, ‰ 40 bitüm muhtevalı numunelerin rijitlikleri % 1.6 daha az, ‰ 45 bitüme sahip numunelerin rijitlikleri ise % 13.7 daha fazladır. Bu değeri üzerine benzer yorumlar daha önceden yapılmıştır ve burada bir kez daha tekrar edilmeyecektir.

Ekonomik analiz bahsinde son olarak yine % 35, % 40, % 45 ve % 50 bitüm muhtevalı numunelerin Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda çıkan değerleri tartışılacaktır. Marshall deney prosedürü, asfalt karışımların mekanik özellikleri üzerinde, statik sünme deneyleri sonucu elde edilen veriler kadar gerçekçi veriler elde edilmesine sınırlı derece de katkıda bulunsa da, % 35 bitüm muhtevalı numunelerin daha hafif, daha fazla boşluklu ve daha az asfalt oranına sahip oldukları ve “yalancı rijitlik” (pseudo stiffness) da denen “Marshall Oranları”nın ise % 50 bitüm muhtevalı numunelerden neredeyse % 17 oranında yüksek olması sebebiyle son derece yeğ tutulur olduğu açıktır. Böylece % 35’lik optimal-optimum bitüm muhtevası değeri bir kez daha ispatlanmış ve kontrol edilmiştir.

Eğer günümüz şartlarında ekonomi ve kalite her şey demekse, polipropilen modifikasyonu her anlamda istenilen ve özellikle sıcak ve çok sıcak hava şartlarının hüküm sürdüğü iklimlerde kanama, kasma, yorulma çatlamaları ve asfaltın can düşmanı oluklanma problemlerinin çözümüne yönelik son derece önemli adımlardan biridir. Hem de yerli malzeme, yerli teknoloji ve yerli teknikler ile.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yürütülmüş olan tez çalışması neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıdaki paragraflarda verildiği şekilde özetlenebilir.

% 25 ile % 70 arasında değişen oranlarda (% 5 artarak) katkısız bitüm kullanılarak 2 seri Marshall numunesi hazırlanmıştır. Numunelere uygulanan Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçlarına göre optimum bitüm muhtevası % 50 olarak belirlenmiştir.

Optimum bitüm muhtevasının belirlenmesinden sonra optimum polipropilen miktarının bulunması için yapılan çalışmalara geçilmiştir. Katkısız, % 0.5, % 1.0, % 1.5, % 2.0, % 2.5, % 3.0, % 3.5, % 4.0, % 4.5, % 5.0, % 5.5, % 6.0, % 6.5 ve % 7.0 oranında polipropilen katkılı hazırlanan 90 adet numune üzerinde statik sünme deneyi, 90 adet numune üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmıştır. Ayrıca hazırlanan karışımlardan örnekler alınarak bunların stereo mikroskop görüntüleri çekilmiştir. Modifiye edici malzeme olarak M-03 tipi polipropilen kullanılmıştır.

Statik sünme deneylerinin sonunda birim deformasyonun % 6.0 polipropilen katkısına kadar azaldığı görülmüştür. Katkısız numunelerde birim deformasyon 7433.89 $\mu\epsilon$ iken % 6.0 polipropilen katkılı numunelerde 2964.50 $\mu\epsilon$ 'dur. Bu değerler birim deformasyonda % 60'lık bir azalma olduğunu göstermektedir.

Rijitlik modülü-zaman zarf eğrisi grafiklerine bakıldığı zaman ilk ve son rijitlik değerleri, katkısız numunelerde sırasıyla 83.46 MPa ve 67.99 MPa'dır. Bu değerler, % 6.0 polipropilen katkılı numunelerde ise 191.65 ve 169.15 MPa'dır. İlk rijitlik değerleri % 129'luk bir artış gösterirken son rijitlik modülü değerlerinde % 149 büyüme olmuştur.

Birim deformasyonda oluşan azalmalar ve rijitlik modülündeki artışlar, polipropilen katkısının tekerlek izinde meydana gelen oturmalara karşı direnc sağladığını göstermektedir.

% 0.5 polipropilen katkılı numunelerin 70 dakikalık yükleme sonundaki birim deformasyonu ortalama olarak 5944.00 $\mu\epsilon$ 'dur. Bu da demek olmaktadır ki bitüme % 0.5 gibi çok küçük oranda polipropilen eklenmesi, birim

deformasyonun % 20 oranında azalmasına neden olmuştur. Rijitlik değerlerinde de % 23.6'lık bir artış olmuştur.

% 6.0 oranındaki polipropilen katkısından sonraki değerlerde, birim deformasyon yeniden artmaya başlamıştır. Bağlantılı olarak rijitlik modülü değerleri de düşmeye başlamıştır.

% 5.5 katkılı numunelere ait birim deformasyon değeri 3055.17 $\mu\epsilon$, ilk ve son rijitlik modülü değerleri 209.17 MPa ve 168.98 MPa'dır. Bu değerler % 6.0 polipropilen katkılı numunelere ait serilerle karşılaştırıldığında, çok büyük farklılıkların olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum ve modifikasyonun ekonomik boyutu göz önüne alındığında % 5.5 polipropilen muhtevası optimum polipropilen miktarı olarak alınmıştır.

Toplam 90 adet katkısız ve % 0.5, % 1.0, % 1.5, % 2.0, % 2.5, % 3.0, %3.5, % 4.0, % 4.5, % 5.0, % 5.5, % 6.0, % 6.5 ve % 7.0 polipropilen katkılı numuneler üzerinde yapılan Marshall stabilite ve akma deneyleri sonucunda, stabilite değerlerinin % 7.0 polipropilen katkısına kadar % 69 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Sadece % 5.0 değerinden % 5.5 değerine geçişte % 2.7'lik bir düşüş görülmüştür. % 5.5 polipropilen katkısına kadar; birim ağırlığa ait değerler % 2.9 oranında düşüş, hava boşluğu değerleri % 80 oranında artış, asfaltla dolu boşluk değerleri % 16.5 oranında düşüş, mineral agregadaki boşluk değerleri % 16.4 oranında artış ve akma değerleri % 23 oranında düşüş göstermiştir. Marshall oranı değerleri de % 92'lik artış göstermiştir.

Her bir karışımdan alınan ikişer adet numunenin stereo mikroskopi yöntemi ile alınan fotoğraflarına bakıldığında; % 5.5 polipropilen katkısına kadar, polipropilen parçacıklarının regüler bir patern içerisinde bitüm fazında dağılan bir görüntü vermekte oldukları gözlemlenmiştir. % 6.0 polipropilen katkılı numunelerden itibaren ise polipropilen parçacıkları artık kendi içlerinde sürekli bir faz oluşturmaya başlamışlardır (percolation theory). Sanki artık "bitüm", polipropilen parçacıkları arasına serpiştirilmiş bir hal almaya başlamıştır. Bu, polipropilenin bitüm bileşenlerini içersine alarak haddinden fazla şişmesinden kaynaklanmaktadır.

Statik sünme deneyi, Marshall stabilite ve akma deneyi ve stereo mikroskop görüntüleri sonucunda, % 5.5 polipropilen miktarı, optimum polipropilen miktarı

olarak belirlenmiştir. Bu değerin seçilmesinde modifikasyonun ekonomik boyutu, bitümün viskozitesinin artmasından doğan çalışabilirlik zorluğu ve bu işlemlerin şantiyede yapılmasının zorlukları göz önüne alınmıştır. Ayrıca karışımın homojenliği de dikkate alınmış olan başka bir husustur.

Statik sünme deneyleri sırasında, bitümün fiziksel özelliklerini belirleyen çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda katkı miktarının artmasıyla beraber özgül ağırlığın, maksimum katkı miktarına gelindiğinde, % 1.66 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, polipropilenin özgül ağırlığının 910 kg/m^3 olmasından kaynaklanmaktadır. Isınma kaybı değerleri ise modifiye edilmemiş bitümde % 0.0572 iken % 7.0 polipropilen katkılı bitümde % 0.0099'a düşmüştür. Bu kayıp % 82.7'ye tekabül etmektedir. Yumuşama noktası değerleri katkısız bitümde 48.00°C iken % 7.0 polipropilen katkılı bitümde 57.45°C 'a çıkmıştır. Polipropilen katkısı ile parlama ve yanma noktalarında oluşan azalmalar sırasıyla % 32.7 ve % 30 civarındadır. Sıcaklık cinsinden düşünüldüğü zaman parlama noktası katkısız bitümde 327°C 'dan, % 7.0 polipropilen katkılı bitümde 220°C 'a, yanma noktası ise katkısız bitümde 376°C 'dan, % 7.0 polipropilen katkılı bitümde 263°C 'a gerilemiştir. Düktilite değeri ise katkısız bitümde 109 cm iken % 2.5 polipropilen katkılı bitümden itibaren "+150 cm" olmuştur. Son olarak katkısız bitümün penetrasyon değeri 55.4 dmm iken % 7.0 polipropilen katkılı bitümün penetrasyon değeri 40.1 dmm'ye düşmüştür.

Elde edilen deney sonuçlarına bakıldığı zaman şu sonuçlara varılmaktadır: polipropilen katkı miktarı arttıkça bağlayıcı, ısınma kaybı ve sıcaklığa karşı daha az duyarlı hale gelmektedir. Asfalt karışım sertleşme ve yorulmaya karşı direnç kazanmaktadır. Katkı miktarının artması bitümün bağlayıcılık özelliğini de arttırmaktadır. Fakat katkılı bitüm, şantiye ortamında parlama ve yanmaya karşı son derece hassas bir hale gelmektedir.

Optimum polipropilen miktarının % 5.5 olarak belirlenmesinden sonra, bu katkı oranına sahip karışımlara ait optimum bitüm muhtevası bulunmuştur. Bir seri Marshall numunesinden elde edilen değerlere göre optimal-optimum bitüm muhtevası % 53.8 olarak belirlenmiştir. Bu değer, yapılan tüm ekonomik analiz değerlerinde, rasyonel bir yaklaşım gereği olarak % 50 alınmıştır.

Son olarak % 5.5 polipropilen miktarına sahip % 35, % 40, % 45 ve % 50 bitüm içeren karışımlara ait 24 adet numune üzerinde statik sünme deneyi, 24 adet numune üzerinde de Marshall stabilite ve akma deneyleri yapılmıştır. Statik sünme deneyleri sonucunda % 50 bitüme sahip karışımların birim deformasyon değeri 3055.17 µε olarak bulunurken, % 35 için 3222.67 µε bulunmuştur. Aradaki fark sadece % 5.2 oranındadır. Bu fark % 40 bitümle hazırlanan karışımlarda % 1.36'dır. % 45 bitüm içeren karışımların birim deformasyon değeri ise 2588.17 µε'dur. Yani oluşan deformasyonda % 18'lik bir azalma görülmüştür. Benzer yorumlar rijitlik modülü değerleri için de yapılabilmektedir. % 50 bitüm yerine % 35 bitüm kullanıldığında bitümden % 30'luk bir tasarruf yapılabilmektedir.

Ekonomik analiz sonuçları ışığında kar marjı düşünülmeden yapılan hesaplar sonucunda, bitüm modifikasyonunun neden olduğu maliyet ile bitüm tasarrufunun miktarı karşılaştırıldığında, yalnızca % 9.3'lük ekstra bir maliyet oluşmaktadır. Karışım özelliklerindeki iyileşmeler ve dolayısıyla meydana gelebilecek kalıcı deformasyonlardaki azalma göz önüne alındığında % 9.3'lük maliyet artışı çok küçük kalmaktadır.

Sonuç olarak, bitümlerin polipropilen katkı malzemesi ile modifikasyonu sonucu, karışımların Marshall stabilite ve akma değerlerinde bir başka deyişle fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme görülmüştür. Ayrıca sünme deneyi ile elde edilen kalıcı deformasyon değerlerindeki azalma, rijitlik modülü değerlerinde ise artış görülmüştür. Bu, karışımın kalıcı deformasyona karşı mukavemetin arttığını ve servis ömrünün uzadığını göstermektedir.

Polipropilen miktarı ile meydana gelen hava boşluğundaki artışlar, özellikle sıcak ve çok sıcak hava şartlarının hakim olduğu iklimlerde, kanama ve ksuma problemelerine karşı çözüm olmaktadır.

Yapılan polipropilen katkısının, yüksek sıcaklıklar altında, bitümlü sıcak karışım kaplamaların oluklanma yani tekerlek izinde oturmalarına karşı mukavemeti arttırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca statik sünme deneylerinde elde edilmiş bu büyük kazanımlar park alanları, otobüs durakları, trafik ışıkları ve beton asfalttan imal edilmiş olan ve küçük uçakların iniş-kalkış yaptıkları havaalanı apronlarında serimi yapılacak asfalt karışımların uzun yıllar, hiç bozulmadan ve kalıcı deformasyonlara meydan vermeden servis etme kabiliyetini sağlayacaktır.

Ekonomik analiz sonucunda, oluşan modifikasyon maliyetine karşılık bitümden yapılan tasarrufun maliyeti azalttığı görülmüştür. Dolayısıyla çok küçük maliyetler ile çok daha mukavemetli ve uzun ömürlü kaplamalar imal edilebilmektedir.

Bu çalışma yüksek sıcaklıkta ve statik yükleme altında yapılmıştır. Değişik sıcaklık paternleri ve yükleme değerleri için bu deneylerin tekrarlanmasında fayda görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda (0°C'ın altında) veya 60°C gibi yüksek bir sıcaklıkta veya 40°C gibi daha değişik bir sıcaklıkta , polipropilen katkı karışımların nasıl davranış gösterecekleri de araştırılmalıdır. En önemlisi düşük sıcaklıklarda meydana gelen çatlaklara karşı polipropilen katkı karışımların nasıl davranış göstereceği incelenmelidir.

Bu çalışmalar farklı yükleme paternleri ile tekrarlanmalıdır. Farklı önyüklemeye ve yükleme süreleri kullanılmalıdır. Ayrıca önyüklemeye için uygulanan 100 kPa'lık yük ile 60 dakika boyunca uygulanan 500 kPa'lık yük değiştirilmelidir.

Modifiye edici malzeme olarak kullanılan M-03 tipi polipropilenin temin edilmesinin zorlaşmasından dolayı M-06, M-09, M-12, M-19, F tipi veya atık polipropilen de tipleri deneysel çalışmalarda kullanılabilir.

Sonuç olarak tamamen yerli üretim bir modifiye edici olan polipropilen, bitümlü sıcak karışımların modifikasyonunda, yeni nesil bir asfalt karışım imaline doğru giden yolda, son derece uygun bir çözüm aracı olarak ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Papacostas, C.S., Prevedeouros, P.D., *Transportation engineering and planning*, Prentice Hall, New Jersey, A.B.D., 1992.
- [2] Fricker J.D., Whitford R. K., *Fundamentals of transportation engineering*, Prentice Hall, New Jersey, A.B.D., 2005.
- [3] Anonim, *Flexible Pavement*, 2008.
<http://www.britannica.com/eb/art-19290/Flexible-asphalt-based-pavement>
- [4] Terzi, S., *Mermer toz atıkların asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2000.
- [5] Uluğtekin, E., *Creep properties of asphaltic concrete under repeated loading*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [6] Pfeiffer, J.Ph., van Doormal, P.M., “The rheological properties of asphaltic bitumens”, *Journal of Institute of Petroleum*, **22**, 1936.
- [7] Van der Poel, C., “Representation of rheological properties of bitumens over a wide range of temperatures and loading times”, *Second International Conference of Rheology*, Oxford, 331-337, 1953.
- [8] Mack, C., “Deformation mechanism and bearing strength of bituminous pavements”, *HRB*, **33**, 1954.
- [9] Pister, K.S., Monismith, C.L., “Analysis of viscoelastic flexible pavements”, *39th Annual Meeting of the Highway Research Board*, 1960.
- [10] Secor, K.E., Monismith, C.L., “Analysis of triaxial test data on asphaltic concrete using viscoelastic principles”, *40th Annual Meeting of the Highway Research Board*, 1961.
- [11] Hofstra, A., Klomp, A.J., “Permanent deformation of flexible pavements under simulated road traffic conditions”, *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, Londra, 1972.
- [12] Hills, J.F., “The creep of asphalt mixes”, *Journal Institute of Petroleum*, 1973.

- [13] Uzan, J., Sides, A., Perl, M., “Viscoelastoplastic model for predicting performance of asphaltic mixtures”, *Transportation Research Record*, 78-89, 1985.
- [14] Parmar, N.B., Bhatt, R.D., “Study of mastic-asphalt's rheological behaviour under creep and creep-recovery conditions”, *Journal of the Institution of Engineers*, **66**, 164-169, 1986.
- [15] Khandal, P.S., Koehler, W.C., “Effect of rheological properties of asphalts on pavement cracking”, *ASTM Special Technical Publication*, 99-117, 1987.
- [16] Kadar, P., Remtulla, A., “Engineering and rheological properties of modified binder mixes”, *Conference of the Australian Road Research Board*, **16**, 269-280, 1992.
- [17] Negulescu, I.I., Daly, W.H., “Rheology of polymer reinforced asphalts”, *Annual Technical Conference*, **1**, 1175-1181, 1996.
- [18] Marasteanu, M.O., Clyne, T., McGraw, J., Li, X., Velasquez, R., “High-temperature rheological properties of asphalt binders”, *Transportation Research Record*, No: 1901, 52-59, 2005.
- [19] Szydło, A., Mackiewicz, P., “Asphalt mixes deformation sensitivity to change in rheological parameters”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **17**, 1-9, 2005.
- [20] Al-Dulemi, A.M., *An experimental behaviour of asphaltic mixtures under creep loading reference to a specific mix composition*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1988.
- [21] Tunç, A., *Yol malzemeleri ve uygulamaları*, Atlas, İstanbul, Türkiye, 2001.
- [22] Tapkın, H., *Rheological behaviour of bituminous mixtures under different types of compressive loading*, Doktora Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1980.
- [23] Bolk, H.J.N.A., Van de Loo, P.J., *A routine method for the design of stable mixes*, Koninklijke/Shell Laboratorium, Amsterdam, Hollanda.
- [24] Nijboer, L.W., “Einige betrachtungen über das marshall verfahren zur unterzuchung bitüminözer massen”, *Strasse und Autobahn*, **8**, 1957.

- [25] Van der Poel, Co., “A general system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relation to routine test data”, *Journal of Applied Chemistry*, 1954.
- [26] Heukelom, W., Klomp, A.J.G., “Deformation mechanism and bearing strength of bituminous pavements”, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **33**, 1964.
- [27] Heukelom, W., “An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties”, *The Annual Meeting of the AAPT*, Houston, ABD, 1973.
- [28] van der Loo, P.J., “Creep testing a simple tool to judge asphalt mix stability”, *Fourth Annual Meeting of the AAPT*, Virginia, 1974.
- [29] Hills, J.F., Brien, D., van der Loo, P.J., “The correlation of rutting and creep tests on asphalt mixes”, *Journal Institute of Petroleum*, Paper IP 74-001, 1974.
- [30] Van Draat W. E. F., Sommer P., “Ein geröt zur bestimmung der dynamischen elastizitätmoduln von asphalt”, *Strasse und Autobahn*, **6**, 1965.
- [31] Jastrzebski, Z.D., *The nature and properties of engineering materials*, John Wiley and Sons Inc., New York, ABD, 1977.
- [32] de Hilster, E., van der Loo, P.J., “*The creep test: influence of test parameters*”, Koninklijke/Shell-Laboratorium, Amsterdam, Hollanda, 1972.
- [33] Grob, H., “Recommendation for the performance of unconfined, statical creep test on asphalt specimens”, *from Communication No.37*, Colloquim 77, 1977.
- [34] Brien, D., “Research in the design of asphalt”, *The Journal of the Institution of Highway Engineers*, 1977.
- [35] King, G., “Additives in asphalt”, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **68**, 32-69, 1999.
- [36] Thompson, D.C., Hoiberg, A.J., “*Bituminous materials : asphalt tars and pitches*”, Robert Krieger Publishing Co., 1979.

- [37] Terrel, R., Walter, J., “Modified asphalt pavement materials : the European experience”, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **55**, 482, 1986.
- [38] Brule, B., “Polymer modified asphalt cements used in the road construction industry: Basic Principles”, *Transportation Research Record*, No: 1535, 1996.
- [39] Collins, J., “Thermoplastic block copolymers for the enhancement of asphaltic binders in paving applications”, *The Paving and Transportation Conference*, Albuquerque, NM., 1986.
- [40] Australian Asphalt Pavement Association, *National Asphalt Specification*, Kew, Australia, 2004.
- [41] Hicks, R.G., Epps, J.A., “Life cycle cost analysis of asphalt-rubber paving materials”, *The First International Conference on the World of Asphalt Pavements*, Sydney, Australia, 69-88, 2000.
- [42] Bahia, H.U., Perdomo, D., Turner, P., “Applicability of superpave binder testing protocols to modified binders”, *Transportation Research Record*, No: 1586, 16-23, 1997.
- [43] Sargand, S.M., Kim, S.S., “Performance evaluation of polymer modified and unmodified superpave mixes”, *2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Auburn, AL, 2001.
- [44] Sebaaly, P.E., Bazi, G.M., Vivekanathan Y., “Evaluation of new pavement technologies in Nevada”, Nevada University, 2003.
- [45] Newcomb, D., “Limit the strain at the bottom of an asphalt pavement, and what do you get? a perpetual pavement”, *Hot Mix Asphalt Technologies*, 30-2, 2003.
- [46] Partl, M.N., Newman, J.K., “Flexural beam fatigue properties of airfield asphalt mixtures containing styrene-butadiene based polymer modifiers”, *The Sixth International Rilem Symposium*, Zurich, Switzerland, 357-63, 2003.
- [47] Yildirim, Y., “Polymer modified asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, **21**, 66-72, 2007.

- [48] Uluçaylı, M., “Modifiye bitüm ve modifikasyon katkılarının kullanımı”, *2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, 15-29, 1998.
- [49] TADB Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, *Modifiye bitüm ve taş mastik asfalt (sma) teknik şartnamesi*, KGM Yayınları, Ankara, 2003.
- [50] Gülsan İnşaat Sanayi Turizm Nakliyat ve Ticaret A.Ş. , *Modifiye bitüm üretimi ve kullanımı teknik raporu*, KGM Yayınları.
- [51] Beydağı, K., Müftüoğlu, E., “Merkezi plentte pmb üretiminin avantajları”, *3. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi*, Ankara, 73-81, 2000.
- [52] Birliker, R.Y., Ilıcalı, M., Tayfur, S., “Modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların özelliklerinin saptanmasında kullanılan standart olmayan deney yöntemleri”, *2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, 55-66, 1998.
- [53] Ertekin, S.B., *Polyolefin katkıların asfaltların kıvamı ve yumuşama noktasına etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2003
- [54] Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ., Eren, K. ve Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı, *Asfalt ve uygulamaları*, İSFALT, Seçim Ofset, İstanbul, 2001.
- [55] Choquet, F., “Polymer-modified binder”, *Belgian Road Research Center*, Brüksel, 1994.
- [56] Becker, Y., Mendez M. P., Rodriguez Y., “Polymer modified asphalt”, *Vis Technol*, 39-50, 2001.
- [57] Chen, J.S., Liao, M.C., Shiah, M.S., “Asphalt modified by styrene-butadiene-styrene triblock copolymer: morphology and model”, *Journal Materials in Civil Engineering*, 224-9, 2002.
- [58] Roque, R., Birgisson, B., Tia, M., Kim, B., Cui, Z., “*Guidelines for the use of modifiers in superpave mixtures : executive summary and volume 1 of 3 volumes : evaluation of SBS modifier*”, State Job 99052793, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, 2004.
- [59] Witczak, M.W., Hafez, I., Qi, X., “*Laboratory characterization of elvaloy modified asphalt mixtures*”, University of Maryland, 1995.

- [60] Lesage, J., Groz, P.C., “*Un bitume polymere doit-u etre elastique on plastique?*”, Rapport.
- [61] Anonim, *Polimer modifiye bitüm*, 2008.
<http://www.okurmakina.com.tr/ifpolimer.html>
- [62] Anonim, *Polipropilen’in tarihçesi*, 2008.
<http://www.odevsitesi.com>
- [63] Er-Me Taşımacılık Plastik San.Tic.Ltd.Şti, *Polipropilen üretimi*, 2008.
<http://www.er-me.com/hammadde.html>
- [64] DPT, *Polipropilen’in yapısı, petrokimya sanayi özel ihtisas komisyon raporu*, Sınıflama No:338.4766180409561/PETs, DPT, Ankara, 2001.
- [65] Asphalt Research Program Institute Transportation Studies University Of California, *Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes*, Strategic Highway Research Program, SHRP-A-415, Washington, 1994.
- [66] Anonim, *Polipropilen’in kimyasal özellikleri*, 2008.
<http://tr.wikipedia.org/wiki/Polipropilen>
- [67] Polda Tekstil, *Polipropilen’in termal özellikleri*, 2008.
<http://www.polda.com/iurunler.html>
- [68] Astan Plastik, *Polipropilen’in özellikleri*, 2008.
<http://www.astanplastik.com/upoliprop.asp>
- [69] Tapkın, S., “The effect of polypropylene fibers on asphalt performance”, *Building and Environment*, **43**, 1065-1071, 2008.
- [70] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolu teknik şartnamesi-2006*, KGM Yayınları, Ankara, 2006.
- [71] Önal, M.A., Kahramangil M., *Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 1993.
- [72] TS EN 1097, Türk Standartları Enstitüsü, 2000.
- [73] Keçeciler, A.F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A., Gökçe, A.F., *Bitümlü malzemeler laboratuvar el kitabı*, KGM Yayınları, Ankara, 1990.
- [74] Uşar Ü., *Polipropilen fiber katkılı yoğun bitümlü karışımların tekrarlı sünme deneyindeki reolojik davranışlarının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.

- [75] Brown, E.R., Khandal, P.S., Zhang, J., “Performance testing for hot mix asphalt”, *NCAT Report No. 01-05*, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn, AL.