

**POLİPROPİLEN FİBER KATKILI YOĞUN BİTÜMLÜ  
KARIŞIMLARIN TEKRARLI SÜNME DENEYİNDEKİ  
REOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Ün UŞAR

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos-2007

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ün UŞAR'ın "Polipropilen Fiber Katkılı Yoğun Bitümlü Karışımların Tekrarlı Sünme Deneyindeki Reolojik Davranışlarının İncelenmesi" başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 23.07.2007 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof.Dr. AHMET TUNCAN	.....
Üye	: Doç.Dr. YÜCEL GÜNEY	.....
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 KATKILI YOĞUN BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN TEKRARLI SÜNME DENEYİNDEKİ REOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Ün UŞAR

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN  
2007, 165 sayfa

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada trafik hacimlerinde belirgin artışlar görülmektedir. Bu sebepten dolayı başta Amerika ve Kanada olmak üzere Avrupa ülkelerinde bu artan trafik hacimlerini karşılayabilmek için daha kaliteli ve dayanıklı olan beton yol yapımı hızlanmıştır. Ancak asfalt yollardan vazgeçilememesinden dolayı, bitümlü sıcak karışımların daha dayanıklı olabilmeleri için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, polipropilen, kauçuk, lastik gibi kimyasal katkılarla bitümlü sıcak karışımların iyileştirilmesi işlemleri yapılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, ilk olarak katkısız ve polipropilen katkılı olarak hazırlanan çeşitli numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deney ile katkısız karışımlar için optimum bitüm muhtevası, polipropilen katkılı numuneler için hem optimum polipropilen tipi ve katkı oranı ile optimum bitüm muhtevası belirlenmiştir. İkinci olarak, belirlenen optimum değerlerde hazırlanan katkısız ve polipropilen katkılı karışımlar üzerinde tekrarlı sünme deneyi uygulanmıştır.

Marshall stabilite deneyinin sonucunda katkısız hazırlanan karışımlar için optimum bitüm muhtevası %5 olarak bulunmuştur. Çeşitli polipropilen tipi ve katkı oranlarında hazırlanan karışımlar için ise optimum polipropilen tipi M-03 ile katkı oranı %03 ve optimum bitüm muhtevası %5 olarak belirlenmiştir. Marshall deneyleri sonucunda yapılan polipropilen katkısının numunelerin stabilitesinde %12 ile %40 oranında artışlar sağladığı görülmüştür.

Yapılan sünme deneylerinden elde edilen veriler sonucunda polipropilen katkısının numunelerin ömürlerini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Ayrıca uygulanan yük ile yükleme ve bekleme sürelerinin de numunelerin ömürleri üzerinde önemli etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bitüm, Tekrarlı Sünme Deneyi, Polipropilen Fiber, Modifiye Bitüm, Marshall Deneyi

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### INVESTIGATION OF RHEOLOGICAL BEHAVIOURS OF DENSE BITUMINOUS MIXTURES WITH POLYPROPYLENE FIBER IN REPEATED CREEP TEST

Ün UŞAR

Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Civil Engineering Program

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN  
2007, 165 pages

In recent years, traffic volumes are apparently increased in our country and world. Because of this, manufacturing of rigid pavements, which is better and stronger, showed an increase especially in USA and Canada and in other European countries. Because of the fact that asphaltic pavements are really important in the pavement engineering, many researches are carried out in the case of strengthening hot bituminous mixtures. For this purpose, modification of bituminous hot mixes was started with chemical additives such as polypropylene, rubber, waste rubbers etc.

In this thesis, first, Marshall test is conducted on various pure mixes and polypropylene fiber additive mixes. In this test, optimum bitumen content for pure mixes; optimum polypropylene fiber type, addition content and optimum bitumen content for polypropylene fiber additive mixes are determined. Second, repeated creep test is conducted on all mixes that are prepared with optimum values.

Marshall test showed that the optimum bitumen content is %5 for pure mixes. Marshall test also showed that optimum polypropylene fiber type is M-03, addition content is %03 and optimum bitumen content is %5 for polypropylene fiber additive mixes. Between %12 and %40 increases are observed on additive mixes at the end of the Marshall tests.

It is shown that polypropylene fibers increased service life of samples seriously. In addition, it is observed that there are important effects of loading force, loading and rest times on service life of samples.

**Keywords:** Bitumen, Repeated Creep Test, Polypropylene Fiber, Modified Bitumen, Marshall Test

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında bana yol gösteren, yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen Ulaştırma Bilim Dalı Başkanı Sayın Yard. Doç. Dr. Serkan TAPKIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezin laboratuvar çalışmalarının tam olarak gerçekleştirilebilmesi için destek olan tez danışmanım ve İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanımız Sayın Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, laboratuvar çalışmalarım sırasında yardımlarını eksik etmeyen Sayın Nurettin Duman ve Sayın Adnan Kılıç'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.

Ün UŞAR  
Ağustos-2007

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Genel Bakış .....	1
1.2. Tezin Amacı .....	2
<b>2. YOL ÜST YAPILARI</b> .....	<b>4</b>
2.1. Yol Üstyapıları Hakkında Genel Bilgiler .....	4
2.1.1. Rijit (Beton) kaplamalar .....	4
2.1.2. Esnek kaplamalar .....	5
2.1.3. Kompozit kaplamalar .....	7
2.2. Esnek Kaplamaların Tabakaları Hakkında Genel Bilgiler .....	7
2.2.1. Sıkıştırılmış zemin .....	7
2.2.2. Alttemel tabakası .....	7
2.2.3. Temel tabakası .....	7
2.2.4. Kaplama tabakası .....	8
2.3. Bitümlü Kaplamalardaki Bozulmalar .....	8
2.3.1. Şekil değiştirmeler .....	9
2.3.2. Çatlamlar .....	12
2.3.3. Ayrışmalar .....	14
<b>3. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR, AGREGALAR VE POLİMERLER</b> .....	<b>17</b>
3.1. Bitümlü Bağlayıcılar Hakkında Genel Bilgiler .....	17
3.1.1. Bitümlü bağlayıcılar .....	17

3.1.2. Bitümlerin kimyasal yapısı ve özellikleri .....	23
3.1.3. Asfalt katılıklarının sınıflandırılması .....	26
3.2. Agregalar Hakkında Genel Bilgiler .....	27
3.2.1. Agregaların sınıflandırılması .....	27
3.2.2. Bitümlü kaplamalar yönünden agregalar .....	29
3.2.3. Agregaların fiziksel özellikleri .....	29
3.2.4. Agregaların özelliklerinin değerlendirilmesi .....	29
3.3. Bitüm, Agregalar ve Bitüm/Agregalar Karışımlarına Uygulanan Deneyler .....	31
3.3.1. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler .....	31
3.3.2. Agregalara uygulanan deneyler .....	31
3.3.2. Bitüm ve agregalar karışımlarına uygulanan deneyler .....	32
3.4. Bitümlü Kaplamalardan Beklenen Özellikler .....	33
3.4.1. Stabilite .....	33
3.4.2. Durabilite .....	33
3.4.3. Geçirimsizlik .....	33
3.4.4. İşlenebilirlik .....	34
3.4.5. Esneklik .....	34
3.4.6. Yorulmaya karşı direnç .....	34
3.4.7. Kayma direnci .....	34
3.5. Polimerler ve Bitümlerin Polimer Modifikasyonu .....	37
3.5.1. Polimerler hakkında genel bilgiler .....	37
3.5.2. Polipropilen hakkında genel bilgiler .....	38
3.5.3. Bitümlerin polimer modifikasyonu .....	43
<b>4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ</b> .....	<b>50</b>
4.1. Genel Bilgiler .....	50
4.2. Bitümün ve Bitümlü Karışımların Reolojik Karakteristikleri .....	51
4.2.1. Elastik malzemeler .....	51
4.2.2. Viskoz malzemeler .....	52
4.2.3. Viskoelastik malzemeler .....	53
4.3. Rijitlik Kavramı .....	56
4.3.1. Rijitlik modülü .....	56

4.3.2. Bitüm test veri abağı (Bitumen Test Data Chart-BTDC) .....	59
4.3.3. Penetrasyon indisi .....	61
4.4. Sünme Davranışı .....	61
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR</b>	<b>67</b>
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri .....	67
5.1.1. Bitüm .....	67
5.1.2. Agregas .....	73
5.1.3. Polipropilen fiber .....	77
5.2. Marshall Deneyi .....	78
5.2.1. Katkısız Marshall numunelerinin hazırlanması .....	79
5.2.2. Polipropilen katkılı Marshall numunelerinin hazırlanması .....	80
5.2.3. Marshall deneyinin yapılması .....	82
5.2.4. Marshall deneyinin sonuçları .....	82
5.2.5. Optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi .....	104
5.3. Sünme Deneyi .....	127
5.3.1. UMATTA test aleti .....	128
5.3.2. Sünme deneyinin yapılışı .....	132
5.3.3. Sünme deneyinin sonuçları .....	139
<b>6. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER</b>	<b>151</b>
6.1. Marshall Deneyinin İncelenmesi .....	151
6.1.1. Stabilite değerlerinin incelenmesi .....	151
6.1.2. Bitüm ekonomisi açısından inceleme .....	152
6.1.3. Marshall deneyi ile ilgili sonuçlar .....	153
6.2. Sünme Deneyinin İncelenmesi .....	154
6.2.1. Katkısız deneme numunelerinin karşılaştırılması .....	154
6.2.2. Optimum katkısız numunelerin karşılaştırılması .....	156
6.2.3. Optimum PP katkılı numunelerin karşılaştırılması .....	157
6.2.4. Katkısız ve optimum PP katkılı numunelerin karşılaştırılması .....	159
6.3. Genel Sonuçlar ve Öneriler .....	160
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>163</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Rijit kaplama kesiti .....	4
2.2. Esnek kaplama kesiti .....	6
3.1. Petrolün türevleri ve asfaltın üretimi .....	19
3.2. Sıvı asfalt türleri .....	20
3.3. Bitümlü malzemelerin sınıflandırılması .....	22
3.4. PI değerinin saptanması (Pfeiffer-Van Doormal) .....	25
3.5. Agrega gradasyon tipleri .....	27
3.6. Polipropilen'in yapısında bulunan atomların dizilişi .....	40
3.7. İzotaktik polimer atomlarının dizilişi .....	40
3.8. Sindiyotaktik polimer atomlarının dizilişi .....	41
3.9. Ataktik polimer atomlarının dizilişi .....	41
4.1. Elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi .....	51
4.2. Viskoz malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi .....	52
4.3. Malzemelerin reolojik modellemesi .....	53
4.4. Maxwell modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi .....	54
4.5. Kelvin modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi .....	55
4.6. Burger modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi .....	56
4.7. Bitümlerin rijitlik modülünün tespiti (Van der Poel) .....	57
4.8. Bitümlerin rijitlik modüllerinin değişimi .....	59
4.9. Bitüm test veri grafiği (Bitumen Test Data Chart-BTDC) .....	60
4.10. Sünme grafiği .....	62
4.11. Elastik, viskoz ve viskoelastik malzemelerin zamana bağlı sünme davranışları .....	62
4.12. Tipik sünme davranışı ve evreleri .....	63
4.13. Gerilme, deformasyon ve rijitliğin zamana bağlı değişimi .....	64
4.14. Marshall deneyi ile sünme deneyi arasındaki ilişki .....	65
4.15. Marshall deneyi ile tekerlek izi deneyi arasındaki ilişki .....	65
4.16. Sünme deneyi ile tekerlek izi deneyi arasındaki ilişki .....	66
5.1. (a) Penetrasyon deney aleti ve (b) deney numuneleri .....	68
5.2. (a) Yumuşama noktası deney aleti ve (b) deney numuneleri .....	69

5.3. (a) Düktilite deneyi numuneleri ve (b) deney aleti .....	70
5.4. (a) Parlama ve yanma noktası deney numunesi ve (b) deney aleti .....	71
5.5. (a) İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi numuneleri ve (b) deney aleti .....	72
5.6. Bitümün özgül ağırlığı deneyi numuneleri .....	73
5.7. Agregaların granülometri eğrisi .....	74
5.8. M-03 tipi polipropilen .....	78
5.9. M-09 tipi polipropilen .....	78
5.10. Atık polipropilen .....	78
5.11. (a) Kullanılan agregalar ve (b) sıcak karışımın hazırlanması .....	80
5.12. (a) Marshall tokmağı (b) Marshall numuneleri ve (c) tokmaktan .....	80
çıkan numuneler .....	80
5.13. Katkılı bitümün karıştırıldığı mikser .....	81
5.14. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri) .....	105
5.15. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri) .....	105
5.16. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri) .....	106
5.17. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri) .....	106
5.18. Akma-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri) .....	107
5.19. VMA-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri) .....	107
5.20. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri) .....	108
5.21. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri) .....	108
5.22. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri) .....	109
5.23. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri) .....	109
5.24. Akma-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri) .....	110
5.25. VMA-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri) .....	110
5.26. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03) .....	111
5.27. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03) .....	112
5.28. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03) .....	112
5.29. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri .....	113
%03) .....	113
5.30. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03) .....	113
5.31. VMA-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03) .....	114
5.32. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%04.5) .....	115

5.33. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%04.5) .....	115
5.34. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%04.5) .....	116
5.35. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli .....	
seri-%04.5) .....	116
5.36. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%04.5) .....	117
5.37. VMA-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%04.5) .....	117
5.38. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06) .....	118
5.39. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06) .....	118
5.40. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06) .....	119
5.41. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06) .....	119
5.42. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06) .....	120
5.43. VMA-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06) .....	120
5.44. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03) .....	121
5.45. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03) .....	121
5.46. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03) .....	122
5.47. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03) .....	122
5.48. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03) .....	123
5.49. VMA-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03) .....	123
5.50. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkıli seri-%03) .....	124
5.51. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkıli seri-%03) .....	124
5.52. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkıli seri-%03) .....	125
5.53. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkıli seri-%03) .....	125
5.54. Akma-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkıli seri-%03) .....	126
5.55. VMA-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkıli seri-%03) .....	126
5.56. (a) UMATTA test cihazı (b) CDAS sistemi ve hava deposu .....	129
5.57. Deformasyon eğimi-vuruş sayısı grafiği .....	129
5.58. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği .....	129
5.59. Uygulanan yük-vuruş sayısı grafiği .....	130
5.60. Anlık modül-vuruş sayısı grafiği .....	130
5.61. Anlık deformasyon-vuruş sayısı grafiği .....	130
5.62. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği .....	131
5.63. Sıcaklık-vuruş sayısı grafiği .....	131

5.64. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (01540515-02540520) .....	140
5.65. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (01540515-02540520) .....	140
5.66. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (04250515-05550515) .....	141
5.67. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (04250515-05550515) .....	141
5.68. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (07110515-08210515-09510515) .....	142
5.69. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (07110515-08210515-09510515) .....	142
5.70. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (11510515-12510515- 13510515-26510515) .....	143
5.71. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (11510515-12510515- 13510515-26510515) .....	143
5.72. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (14510510-15510510- 16510510-27510510) .....	144
5.73. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (14510510-15510510- 16510510-27510510) .....	144
5.74. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (17510505-18510505- 19510505-28510505) .....	145
5.75. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (17510505-18510505- 19510505-28510505) .....	145
5.76. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (20510520-21510520- 22510520-29510520) .....	146
5.77. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (20510520-21510520- 22510520-29510520) .....	146
5.78. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (41520515-42520515-43520515) .....	147
5.79. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (41520515-42520515-43520515) .....	147
5.80. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (44520510-45520510-46520510) .....	148
5.81. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (44520510-45520510-46520510) .....	148
5.82. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (47520505-48520505-49520505) .....	149
5.83. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (47520505-48520505-49520505) .....	149
5.84. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (50520520-51520520-52520520) .....	150
5.85. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (50520520-51520520-52520520) .....	150
6.1. Stabilité değerlerinin karşılaştırılması .....	151

6.2. Optimum bitümde katkısız seriler ile M-03 (%03) stabilite .....	
değerlerinin karşılaştırılması .....	152
6.3. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyonlarının .....	
karşılaştırılması (04 vs. 05) .....	154
6.4. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyon eğimi ve .....	
sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (04 vs. 05) .....	154
6.5. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyonlarının .....	
karşılaştırılması (07 vs. 08 vs. 09) .....	155
6.6. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyon eğimi ve .....	
sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (07 vs. 08 vs. 09) .....	155
6.7. Optimum katkısız numunelerin 30.dk deformasyonlarının .....	
karşılaştırılması (17 vs. 14 vs. 12 vs. 21) .....	156
6.8. Optimum katkısız numunelerin 30.dk deformasyon eğimi ve .....	
sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (17 vs. 14 vs. 12 vs. 21) .....	156
6.9. Optimum PP katkılı numunelerin 120.dk deformasyonlarının .....	
karşılaştırılması (48 vs. 44 vs. 42 vs. 52) .....	157
6.10. Optimum PP katkılı numunelerin 120.dk deformasyon eğimi ve .....	
sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (48 vs. 44 vs. 42 vs. 52) .....	158
6.11. Katkısız ve optimum PP katkılı numunelerin 30.dk .....	
deformasyonlarının karşılaştırılması (12 vs. 42) .....	159
6.12. Katkısız ve optimum PP katkılı numunelerin 30.dk deformasyon .....	
eğimi ve sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (12 vs. 42) .....	159

## ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. Sünme deneyinde uygulanan yükleme ve bekleme süreleri .....	3
3.1. Asfalt çimentolarının sınıflandırılması .....	26
3.2. Düşük stabilite sebep ve etkileri .....	34
3.3. Düşük durabilite sebep ve etkileri .....	35
3.4. Karışımları geçirimli yapan sebep ve etkiler .....	35
3.5. İşlenebilirlik problemlerinin sebep ve etkileri .....	35
3.6. Zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri .....	36
3.7. Düşük kayma direncinin sebep ve etkileri .....	36
3.8. Polimerler .....	37
3.9. Çalışmada kullanılan polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri .....	42
3.10. Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması .....	47
3.11. Bitüm modifikasyon tipleri .....	49
5.1. Kullanılan bitümün şartname limitleri .....	67
5.2. Penetrasyon deneyi sonuçları .....	68
5.3. Yumuşama noktası deneyi sonuçları .....	69
5.4. Düktilite deneyi sonuçları .....	70
5.5. Parlama ve yanma noktası deneyi sonuçları .....	71
5.6. İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi sonuçları .....	72
5.7. Bitümün özgül ağırlık deneyi sonuçları (Katkısız Bitüm) .....	73
5.8. Bitümün özgül ağırlık deneyi sonuçları (Polipropilen Katkılı Bitüm) .....	73
5.9. Aşınma tabakası Tip-2 için agrega gradasyonu ve şartname limitleri .....	74
5.10. Kaba agreganın özgül ağırlıkları ve su absorpsiyonu .....	75
5.11. İnce agreganın özgül ağırlıkları ve su absorpsiyonu .....	76
5.12. Fillerin özgül ağırlığı .....	77
5.13. Marshall deney sonuçları (Optimum 1. seri) .....	83
5.14. Marshall deney sonuçları (Optimum 2. seri) .....	86
5.15. Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%o 3) .....	89
5.16. Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%o 4.5) .....	92
5.17. Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%o 6) .....	95
5.18. Marshall deney sonuçları (M-09 tipi polipropilen katkı-%o 3) .....	98

5.19. Marshall deney sonuçları (Atık polipropilen katkı-%o 3) .....	101
5.20. Asfalt betonu dizayn kriterleri .....	104
5.21. İsimlendirme sistemine ait örnekler .....	128
5.22. Sünme numunelerinin formları (Katkısız Deneme No:01-02-04- 05-07-08-09) .....	134
5.23. Sünme numunelerinin formları (Katkısız Optimum No:11-12-13-26 ve 14-15-16-27) .....	135
5.24. Sünme numunelerinin formları (Katkısız Optimum No:17-18-19-28 ve 20-21-22-29) .....	136
5.25. Sünme numunelerinin formları (Optimum PP Katkılı No:41-42-43 ve 44-45-46) .....	137
5.26. Sünme numunelerinin formları (Optimum PP Katkılı No:47-48-49 ve 50-51-52) .....	138

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Genel Bakış

Son yıllarda ülkemizde ve dünyada trafik hacimlerinde belirgin artışlar görülmektedir. Başta Amerika ve Kanada olmak üzere Avrupa ülkelerinde bu artan trafik hacimlerini karşılayabilmek ve kaplamaların servis ömrünü artırabilmek için daha kaliteli ve daha dayanıklı olan rijit yol kaplamalarının (beton yol) yapımı yoğunlaşmaya başlamıştır. Özellikle 1960-1970 yılları arasında Amerika ve Kanada’ da beton yol yapımı hızlanmıştır.

Kaplanmış yollar, araçlar ve insanlar açısından emniyet ve sürüş konforu, trafik açısından ise dayanıklı bir yüzey şeklinde tasarlanır. Bütün bunlar sağlandığı takdirde yolların ekonomik gelişmeye katkısı daha büyük olur. Dayanıklı asfalt yol ihtiyacının esasını ise kaplama tabakalarının tasarımı ile kullanılacak bitümlü karışımın yapısı belirler. Bitümlü bağlayıcılar, kaliteli yol kaplamalarının ayrılmaz bir parçasıdır. Bunlar genelde karışım ağırlığının %5-6’sını, hacmin ise %15’inden daha azını teşkil etmekle beraber asfalt karışımda önemli rol oynarlar.

Bununla birlikte, esnek yol kaplamalarından da (asfalt yol) vazgeçilememesinden dolayı asfalt yolların iyileştirilmesi ve bu bitümlü sıcak karışımların mevcut yol ve hava koşullarına karşı daha dayanıklı olmaları üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır. Bu amaç ile polipropilen, kauçuk, sülfür, atık plastikler, kullanılmış araba lastikleri vb. kimyasal maddeler yardımıyla bitümlü karışımların modifikasyonu uygulanmaya başlanmıştır.

Bu yapılan modifikasyonlarda, başta hava ve yol şartlarına karşı dayanıklılık olmak üzere, üretim ve bakım maliyetlerini düşürmek de diğer bir amaçtır. Esnek kaplamalar kendilerinden beklenen fonksiyonları yerine getirebilmeleri için kalıcı deformasyonlar, yorulma çatlakları, düşük ısı çatlakları, su etkisiyle bitüm soyulması ve düşük durabilite gibi kusurlara karşı dayanıklı olmalıdırlar. Bu nedenle, kullanılmakta olan bitümlerin özelliklerini modifiye ederek gerek bağlayıcının gerekse karışımın performansı artırılmaya çalışılmaktadır.

## 1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, bitümlerin modifikasyonunda kullanılan maddelerden termoplastik polimer olan polipropilen fiberlerin yoğun bitümlü sıcak karışımlara olan etkilerinin araştırılmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda üç ana bölüm halinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan ilki çalışmada kullanılacak olan bitüm, agrega ve polipropilen fiber gibi malzemelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyleri kapsamaktadır. Bunlar bitüm için penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, parlama ve yanma noktası, ince film halinde ısıtma kaybı ve özgül ağırlık deneyleridir. Agregalar için ise özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Laboratuar çalışmalarının ikinci bölümü ise Marshall deneyi yardımıyla hazırlanacak olan katkısız ve katkılı numunelerin optimum bitüm muhtevalarının, stabilite ve akma değerlerinin tespit edilmesidir. Bunun için, iki seri katkısız karışım, M-03 tipi polipropilen fiberin ağırlıkça %03, %04.5 ve %06 katkı oranlarında karışım, M-09 tipi polipropilen fiberin %03 oranında ve atık polipropilenin %03 oranında karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlara ASTM D1559-76'ya göre Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanmıştır.

Yapılan Marshall deneylerinin sonucunda bütün karışımlar için Stabilite-bitüm içeriği, birim ağırlık-bitüm içeriği, boşluk oranı-bitüm içeriği, asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği, akma-bitüm içeriği ve VMA-bitüm içeriği grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler yardımıyla karışımların her biri için optimum bitüm muhtevaları tespit edilmiş, bu katkılı karışımlardan en uygun olanı seçilerek bunlar üzerinde sünme deneyleri yapılmıştır.

Çalışmaların son bölümü olarak katkısız ve en uygun katkı tipinde tekrar hazırlanan karışımlar üzerinde UMATTA test aleti yardımıyla tekrarlı sünme deneyi uygulanmıştır. Marshall dizayn yöntemiyle hazırlanan numunelerin UMATTA aleti ile farklı yükleme ve bekleme sürelerinde, sabit sıcaklık ve sabit yük altındaki sünme davranışları incelenmiştir.

Bu çalışmalarda her yükleme ve bekleme süreleri için üçer adet numune hazırlanarak bunların ortalamaları alınmıştır. Numunelere uygulanan yük  $500 \text{ kPa} = 73 \text{ psi} = 5 \text{ kg/cm}^2$  dir. Deney sıcaklığı olarak  $45^\circ\text{C}$  seçilmiştir. Numunelere

farklı yükleme süresi ve farklı dinlenme süreleri uygulanmıştır. Bu yüklemeler Çizelge 1.1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.1.** Sünme deneyinde uygulanan yükleme ve dinlenme süreleri

	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>#4</b>
<b>Yükleme Süresi</b>	500 ms	500 ms	500 ms	500 ms
<b>Dinlenme Süresi</b>	500 ms	1000 ms	1500 ms	2000 ms

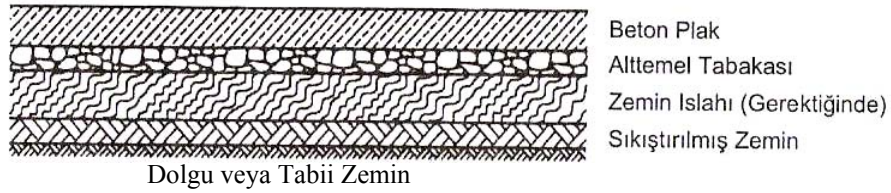
## 2. YOL ÜSTYAPILARI

Yol ve havaalanı kaplamaları (üstyapıları), rijit (beton), esnek ve kompozit olmak üzere üç farklı şekilde imal edilmektedirler.

### 2.1. Yol Üstyapıları Hakkında Genel Bilgiler

#### 2.1.1. Rijit (Beton) kaplamalar

Beton kaplamalar, trafik hacminin fazla olduğu ve taşıt trafiğinin ağır olduğu karayollarında ve havaalanlarında gerekli sürüş konforu ve emniyetini sağlamak amacıyla yapılan yüksek standartlı rijit üstyapılardır. Beton kaplamalar, yeterli mukavemete sahip zeminler üzerine belirli bir kalınlıkta serilen granüler alt temel tabakası ile donatısız, kısmen donatılı veya sürekli donatılı beton plaklardan meydana gelir [1]. Rijit kaplama kesiti Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Rijit kaplama kesiti [1]

Beton kaplamaların esnek kaplamalara nazaran bazı avantajları vardır. Bunlar [1];

- Mekanik özellikleri (mukavemet, yorulma mukavemeti vb.) daha yüksek olduğundan daha ince imal edilir ve daha uzun ömürlüdür.
- Bakım ve onarım ihtiyaçları son derece azdır.
- Çimento ülkemizde üretilebildiğinden dolayı dışa bağımlı değildir.
- Enerji tüketimi daha azdır.
- 5°C'nin üstündeki sıcaklıklarda ve rutubetli havalarda inşa edilebildiklerinden dolayı inşaat mevsimi daha uzundur.
- Betonun üretimi daha kolay ve kontrolü nispeten daha azdır.
- Yağışlı havalarda daha fazla kayma direncine sahiptir.

- Gece görüşü daha iyidir.

Buna karşın beton kaplamaların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar [1];

- Yapım maliyeti çok yüksektir.
- Onarım süreleri çok uzundur ve onarım sırasında trafiğe kapatılmalıdır.
- Derzler sürüş konforunun azalmasına ve teker gürültüsüne neden olmaktadır.
- Beton kaplamaların inşaatı nispeten daha zordur.
- Kademeli inşaatı uygun değildir.
- Derz dolgularının onarım ihtiyacı fazla ve maliyetleri de yüksektir.

Bu avantaj ve dezavantajlara rağmen rijit kaplamaların, trafik hacmi yüksek yollarda ve havaalanlarında yapımı kaçınılmazdır.

20 yıl proje ömrü içinde 8.2 ton standart dingil yükü sayısının 60 ile 75 milyondan fazla olduğu veya yolun trafiğe açıldığında tek yöndeki günlük ticari vasıtaların sayısı 5000'den fazla olduğu yollarda ve büyük yolcu uçaklarının yıllık 5000'den fazla kalkış yaptığı havaalanlarında beton kaplama yapılması kaçınılmazdır. Bu nedenle, gelecekte ülkemizde beton kaplamaların kullanımının artması ve yaygınlaşması beklenmelidir [1].

### **2.1.2. Esnek kaplamalar**

Esnek kaplamalar, taşıtlar için gerekli performansa (sürüş konforu ve emniyeti) ve taşıtların yarattığı gerilmelere karşı yeterince stabiliteye sahip olacak şekilde farklı özelliklere sahip tabakalardan imal edilen çok tabakalı esnek bir yapıdır.

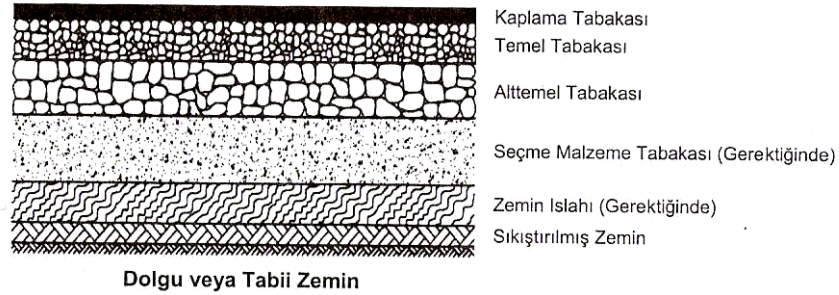
Esnek kaplamaları genel olarak iki kısma ayırabiliriz;

- 1. Düşük standartlı kaplamalar**
  - a. Sathi kaplamalar**
  - b. Makadam temeller (veya yollar)**
  - c. Koruyucu satıh tabakaları**

## 2. Yüksek standartlı kaplamalar

### a. Bitümlü sıcak karışımlar

Düşük standartlı kaplamalar, trafik hacminin düşük olduğu (günlük ağır taşı trafiği 500'den az) yollarda ekonomik olup yeterli performansı sağlayabilmektedirler. Ancak yüksek standartlı karayolu ve otoyollarda ise bitümlü sıcak karışım kaplamalar yapılmalıdır. Esnek kaplama kesiti Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Esnek kaplama kesiti [1]

Esnek üstyapılar rijit üstyapılara nazaran aşağıdaki avantajlara sahiptirler [1];

- Daha ekonomik, daha çabuk ve daha kolay inşa edilirler.
- Bakım ve onarım işleri daha kolay ve çabuk yapılır.
- Beton yollardaki gibi kür için beklenmediğinden dolayı trafiğe çabuk açılabilir.
- Kademeli olarak yapılabildiklerinden ötürü artan trafik karşısında kaplamanın kalitesi ve kalınlığı istenildiği zaman artırılabilir.

Esnek üstyapıların dezavantajları ise şunlardır [1];

- Rutin bakım masrafları yüksektir.
- Yorulma mukavemeti düşüktür.
- Asfalt bağlayıcı (bitüm) petrolden üretildiğinden dışa bağımlıdır.
- Bağlayıcı olan bitümün zamanla fonksiyonlarını (sertleşme, soyulma vb.) yitirdiğinden kaplamada kusurlar oluşur.
- Bitümlü sıcak karışımların özellikle yağışlı havalardaki sürtünme dirençleri oldukça düşüktür.

Ülkemizde gerek kentiçi gerekse kentdışı yollardaki trafik hacmi henüz rijit kaplamaların yapımını zorunlu kılmadığından dolayı esnek kaplamalar hala önemini korumaktadır.

### **2.1.3. Kompozit kaplamalar**

Kompozit kaplamalar trafiğin etkisiyle zarar görmüş beton kaplamaların üzerine bitümlü sıcak karışım kaplama yapılarak ya da bozulmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplama yapılmasıyla imal edilir.

## **2.2. Esnek Kaplamaların Tabakaları Hakkında Genel Bilgiler**

### **2.2.1. Sıkıştırılmış zemin**

Yol kaplamasının yapılacağı zeminin, üzerine gelecek yükleri sorunsuz bir şekilde taşıyabilmesi için yeterince mukavemetli olmalı ve bunu sağlamak için de bitkisel toprak alınıp, yerine seçme temel malzemesi konularak gerekli miktarda sıkıştırma yapılmalıdır. Kaplamanın oturacağı zemin belli bir taşıma gücüne sahip olmalı ve zeminin hacim değiştirmesi (oturma, şişme, kabarma vb.) kaplamayı olumsuz yönde etkilememelidir [1].

### **2.2.2. Alttemel tabakası**

Zeminlerde oluşabilecek şişme-büzülme ve don kabarması gibi hacimsel değişimleri önlemek, yol kaplamasının altında gerekli drenajı sağlamak ve kaplamanın taşıma gücünü artırmak gibi sebeplerden dolayı yol kaplamalarının en altına bir alttemel tabakası 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 yapılır [1].

### **2.2.3. Temel tabakası**

Temel tabakası, kaplamaya ve banketlere temel teşkil etmek üzere granüler malzemelerden bağlayıcılı ve bağlayıcısız olmak üzere farklı kalınlıklarda ve farklı tabakalar halinde imal edilir. Temel tabakası kaplamalar için gerekli stabiliteyi ve yeterli drenajı sağlamakla yükümlüdür. Eğer temel tabakasının

yüksek stabiliteli olması gerekiyorsa bitüm veya çimento ile stabilize edilmelidir [1].

#### **2.2.4. Kaplama tabakası**

Esnek kaplamaların en üst tabakasını oluşturan kaplama tabakası, taşıtlara sürüş konforu ve emniyet sağlaması, ayrıca üzerine gelen yükleri alt tabakalara iletmesi amacıyla yapılırlar. Yüksek standartlı yollarda kaplama tabakası aşınma ve binder olmak üzere iki tabaka halinde bitümlü sıcak karışımlar ile imal edilmektedir [1].

### **2.3. Bitümlü Kaplamalardaki Bozulmalar <sup>(1)</sup>**

Asfalt betonu kaplamalardaki bozulmaları şekil değiştirme, kırılma (çatlama) ve ayrışma olmak üzere üç ana grupta toplamak mümkündür.

Bu bozulmaların genel nedenlerini ise temel, alt temel ve tabii zeminin taşıma gücü yetersizliği, trafiğin aşındırıcı etkileri, iklim koşulları ve asfalt betonunun malzeme özellikleri olarak sıralayabiliriz.

Asfalt betonunda oluşan bozulmaları ise aşağıdaki nedenlere bağlamak mümkündür.

#### **a) Uygun olmayan malzeme kullanılması**

- İyi seçilmemiş ve iyi kontrol edilmemiş granülometri
- Karışımda yüksek oranda yuvarlak malzeme kullanılması
- Çürük agrega kullanılması
- Kirli agrega kullanılması
- Cilalanma direnci düşük agrega kullanılması

#### **b) Asfalt betonu karışımının hatalı hazırlanması**

- Asfalt yüzdesinin yanlış belirlenmesi
- Filler yüzdesinin yanlış belirlenmesi
- Granülometrinin mevcut standartlarda belirlenmiş değerlere uymaması
- Yetersiz karıştırma
- Yetersiz sıcaklık kontrolü

---

<sup>(1)</sup> Bu bölüm “Ağar, E. ve Umar, F., *Yol Üst Yapısı*, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1991” den yararlanılarak hazırlanmıştır.

c) Asfalt betonu kaplama imalatının hatalı olması

- Yetersiz sıkıştırma
- Aşırı sıkıştırma
- Serme ve sıkıştırma sıcaklığının düşük olması
- Yapım sırasında meydana gelen segregasyon
- Astar veya yapıştırma tabakasının gerekli özenle imal edilmemesi [2]

### 2.3.1. Şekil değiştirmeler

Karayollarımızda sıklıkla görülen bozulmalardan birisi olan şekil değiştirmeler, genel anlamda, kaplama yüzeyinin orijinal kotuna göre değişikliğe uğramasıdır. Şekil değiştirmeler, alt tabakaların (temel, alttemel ve tabii zemin) bağlı hareketlerinden meydana gelebildiği gibi, esnek kaplamanın stabilitesinin yetersizliğinden de oluşabilmektedir.

Yük altında meydana gelen deformasyonlar, elastik deformasyonlar ve plastik deformasyonlar olmak üzere ikiye ayrılır. Kaplamanın stabilitesi yüksek olduğu sürece oluşan toplam deformasyon az olacağı gibi bu deformasyonun elastik kısmı fazla, plastik kısmı çok azdır. Stabilitenin düşük olması durumunda ise durum tersine döner. Sadece plastik deformasyonların oluşması halinde ise stabiliteden söz edilemez.

Yüksek sıcaklıklar asfaltın termoplastik özelliklerinden dolayı stabiliteyi düşürür. Yük tekerrürü ise plastik deformasyonların artmasına neden olur. Yani, plastik deformasyonların sıcaklık etkisi ve yük tekerrürü şekil değiştirmeleri oluşturur.

Şekil değiştirmeleri oturmalar, yerel çökmeler, tekerlek izi oluşması, ondülasyonlar, kabarmalar, yığılmalar ve lastik deseni oluşması olarak 7 farklı bölümde inceleyebiliriz [2].

#### A. Oturmalar

Bitümlü tabakalara ait olmayan bozulmalardan olup, alt tabakalarda oluşan bozulmaların yüzeye yansımalarıdır. Oturmalar aşağıdaki nedenlere bağlanabilir:

- a) Alt tabaka (granüler temel ve alttemel) kalınlıklarının yetersizliği nedeni ile bu tabakalarda oluşan oturmalar,

- b) Tabanda oluşan oturmalara,
- c) Banketlerden gelmesi gereken desteğin az olmasına,
- d) Yeraltı su seviyesinin yüksek olmasına,
- e) Drenaj yetersizliğine,
- f) Kil yükselmesine (kilin tabandan granüler alt temel ve temele yükselerek bu tabakaları kirletmesine) bağlıdır.

Bu tip bozulmalar ancak alt tabakaların yeterli olarak projelendirilmesi ve şartnamelere uygun şekilde imal edilmeleri ile önlenebilir [2].

### **B. Yerel çökmeler**

Oturmalardan farkı, küçük ve dairesel alanlar (0.5- 2.5 m yarıçaplı) halinde ortaya çıkmalarıdır. Yerel çökmeler aşağıdaki nedenlerden dolayı oluşur;

- a) Yüzey tabakasının bir noktada yetersiz sıkışması,
- b) Temel veya alt temelin bir noktada yetersiz sıkışması,
- c) Belli bir noktada su toplanması (drenaj yetersizliği),
- d) Belli bir noktada kil yükselmesi,
- e) Rijitlik kazanmış temelin bir noktada ayrışmaya uğraması.

Bu tip bozulmalar drenaj ve kil yükselmesine karşı alınacak önlemlerin yanı sıra yapım sırasında yeterli kontrol ve özenli işçilik ile de bertaraf edilebilir [2].

### **C. Tekerlek izi**

Asfalt betonu kaplamalarda en sık görülen, gerek teknik gerekse ekonomik açıdan çok önemli kabul edilen bozulma tipidir. Tekerlek izi oluşması özellikle ülkemiz gibi problemlili araziye sahip, trafiği ağır ve sıcak ülkelerde problem olmaktadır. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir kısmında ya da sadece bitümlü tabakalarda oluşan deformasyonların birikiminden doğar. Tekerlek izi oluşmasını meydana getiren nedenleri, alt tabakalara ve bitümlü tabakalara bağlı nedenler olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür.

Alt tabakalara bağlı nedenler, alt tabakaların kalınlıklarının yetersiz olmaları ve alt tabakanın veya tabanın konsolidasyona (oturmaya) maruz kalmalarıdır. Bitümlü tabakalara bağlı nedenleri ise karışım stabilitesinin yetersiz

oluşu, aşınma tabakasının yetersiz sıkışması ve ağır trafik altında aşınma tabakasının aşırı sıkışması olarak sıralayabiliriz [2].

#### **D. Ondülasyonlar**

Bu tip deformasyonlar; yaya geçişleri, kavşaklar, otobüs durakları, aşırı eğimli vb. kesimlerde ondülasyon (veya dalgalanma) şeklinde görülür. Asfalt betonu karışımların stabilite yetersizliğine bağlı bozulmalardır. Yalnızca bitümlü tabakalar içinde oluşur. Alt tabakalarla ilgili değildir. Ondülasyonların önlenmesi için yüksek stabiliteli karışımlar kullanılması gerekir. Bu tip deformasyonlar bölgesel olduklarından dolayı kusurlu kesimler kazılıp atıldıktan sonra yerine uygun bir karışım konulup sıkıştırılarak tamir edilmeleri mümkündür [1,2].

#### **E. Kabarmalar**

Tabanın veya üstyapının şişmesi ile oluşan yerel bozulmalardır. Ana nedeni don etkisidir. Ancak şişme potansiyeli yüksek killi tabanlar da kaplamada kabarmaya yol açabilirler. Kabarmaların önlenmesi için üstyapı projelendirilmesinde don etkisi dikkate alınmalı, şişme potansiyeli olan tabanlarda üstyapı inşa edilmeden drenaj, stabilizasyon gibi önlemler düşünülmelidir [2].

#### **F. Yığılma**

Asfalt betonu kaplamanın üst kısmının sıcak havalarda tekerleklerin mekanik etkisi ile ötelenerek, yol eksenine dik ya da paralel olarak yığılması olarak tanımlanır. Özellikle temeli rijit (beton) veya yarı rijit (çimento stabilizasyonu) olan asfalt betonu kaplamalarda görülür. Stabilite yetersizlikleri, yüksek sıcaklıklara ve tabakalar arasında kullanılan yapıştırıcı (emülsiyon) malzemenin çok az veya çok fazla kullanılmasına bağlıdır. Yığılmaların önlenmesi yüksek stabiliteli karışım ve penetrasyon değeri düşük bağlayıcı kullanmakla mümkündür [2].

## **G. Lastik deseni oluşması**

Taşıtların lastik desenlerinin kaplama yüzeyine çıkartma yapıştırılmış gibi çıkmasıdır. Desen oluşmasını tam anlamıyla bir bozulma olarak nitelendirmek güçtür. Fakat meydana geldiği bölgede bir problem olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Ağır taşıtların uzun süreli park etmelerinden oluşursa, stabilite yetersizliğine bağlanabilir. Eğer hareketli taşıtlar oluşturuyorsa, o kesimde kasma olduğunu ifade eder. Lastik deseni oluşmasının önlenmesi için yüksek stabiliteli karışımlar dizayn etmek ve kusmayı önleyici önlemler almak gerekmektedir [2].

### **2.3.2. Çatlamlar**

Asfalt betonunda oluşan çatlamları, trafik etkisine bağlı olan çatlamlar ve trafik etkisine bağlı olmayan çatlamlar olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür.

Trafik etkisine bağlı çatlamlar ya ağır dingil yüklerinin tek veya birkaç defa geçmesi sonucunda, ya da fazla sayıda geçmesi sonucunda oluşur ki bu ikincisine "yorulma" çatlakları denir.

Birinci durumda ağır trafik yükünün oluşturduğu gerilme eğilme-çekme direncini aşmaktadır. Yorulmada ise direnç aşılmamakta, fakat dingil yüklerinin doğurduğu kalıcı deformasyonlar, tekrar sayısının fazla olmasından dolayı birikime maruz kalmaktadır.

Ağır dingil yüklerinden hariç, taşıtların ani hızlanma ve yavaşlamaları da çatlamlara yol açabilmektedir. Çatlamlar trafik yüklerine bağlı olmaksızın sıcaklık ve nem değişimi ile de oluşabilirler. Bu etkiler tek başlarına veya dingil yükleri ile birleşerek kaplamayı çatlatabilirler.

Kaplamalarda çok çeşitli çatlama tipleri gözlemlenebilir. Bunlar tiplerine göre aşağıdaki şekilde incelenebilirler [2].

### **A. Timsah sırtı çatlaklar**

Kaplamanın birbirine irtibatlı bloklar halinde çatlamasıdır. Kümes teli çatlaklar olarak da adlandırılırlar. Aşırı dingil yükleri veya diğer tabakalarda oluşan hacim değişiklikleri bu tip çatlamlara yol açabilir [2].

## **B. Büzülme çatlakları**

Timsah sırtı çatlamlar şeklinde ortaya çıkan çatlamlardandır. Timsah sırtı ve yorulma çatlaklarından farkı, blokların büyük olması ve çatlakların çıkış noktalarında daha önce oluşmuş çatlaklarla dik açı oluşturmasıdır. Çatlakların genişliği oluşma zamanı hakkında fikir verir, dolayısıyla en geniş çatlaklar ilk oluşan çatlaklardır. Büzülme çatlakları asfalt betonunun kendi içindeki mekanizmalar ya da temel veya tabandaki hacim değişimleri sonucunda oluşur [2].

## **C. Kenar çatlakları**

Kaplama kenarından yaklaşık 30 cm içeride ve yol eksenine paralel olarak oluşur. Genellikle banketlerin yeteri kadar yanal destek sağlamadığı kesimlerde görülür. Kenar çatlakları, drenaj yetersizliği, don, üstyapı ile banket arasında büyük nem farkı bulunması (banketlerin aniden kuruması) nedeni ile de oluşabilir. Kaplama kenarına çok yakın yoğun bitki örtüsü ve ağaçlar da yol gövdesinden su çekmek sureti ile bu tip çatlamlara yol açabilir [2].

## **D. Derz çatlakları**

İki şerit arasında oluşan çatlaklardır. Yapım hatalarından oluşabilir. İkinci şerit dökülürken yeterli bindirmenin yapılmaması zamanla iki şeridin birbirinden ayrılmasına yol açar. Oluşan çatlaklar, geçirimsizliği azalttığı gibi ayrışmalara da zemin hazırlar. Derz çatlakları kaplama ile banket arasında da oluşabilmektedir [2].

## **E. Enine çatlaklar**

Yol eksenine dik olarak oluşan çatlaklardır. Diğer tip çatlaklara yol açan nedenler (yetersiz üstyapı kalınlığı, yetersiz drenaj v.b) enine çatlakları oluşturabilir. Bu nedenler dışında enine çatlaklar, sericinin uzun süren duraklamalarla çalışması ve sıcaklıktaki ani düşmelerinin kaplamalarda oluşturduğu gerilmeler nedeni ile meydana gelmektedir [2].

## F. Yansıma çatlakları

Genellikle rijit kaplamalar üzerine takviye tabakası olarak serilen asfalt betonu kaplamalarda görülür. Alttaki beton kaplamasının enine ve boyuna derzlerinde ve eğer varsa diğer çatlakları üste yansır. Çimento veya kireç stabilizasyonlu temeller üzerine inşa edilen kaplamalarda da yansıma çatlakları oluşabilir. Alt tabakalarda daha önce oluşmuş çatlakların üste yansıması olarak ortaya çıktığından, enine, boyuna, blok veya köşegen şekil alabilirler [2].

### 2.3.3. Ayrışmalar

Agrega danelerinin iklim ve trafiğin mekanik etkisi ile kaplamadan koparak ayrılmasıdır. Ayrışma, asfalt betonu kaplamalı karayollarımızda çok sık görülen bir bozulmadır. Ayrışmaya yol açan nedenler:

- a) Bağlayıcının (asfaltın) mekanik etkiyle kopması,
- b) Karışımın kötü kalitede olması,
  - Düşük asfalt yüzdesi
  - Çok az veya çok fazla filler yüzdesi
  - Kirli ve zayıf agrega kullanılması.
- c) Yüzey tabakasının ince olması,
- d) Granüler alttemel ve temele tabandan kil yükselmesi,
- e) Drenaj yetersizliği,
- f) Yetersiz sıkıştırma,
- g) Nemli ve soğuk havada yapım,
- h) Plentte (karışımın hazırlandığı santral) asfaltın aşırı ısıtılması,
- i) Yapım sırasında segregasyon oluşması,
- j) Ayrışmayı kolaylaştıracak derecede kusma oluşması,
- k) Kimyasal maddelerin (özellikle tuz ve yağların) etkisi,
- l) Yüzey tabakasının alt tabakaya iyi yapışmaması olarak sıralanabilirler.

Bu nedenlerin hiçbiri tek başına ayrışmayı başlatmaz. Ayrışma bunlardan bir kaçının bir arada bulunması halinde trafiğin mekanik etkisiyle başlar. Ayrışma olayı zamanla artar. Kaplamanın ömrünü kısaltır ve yolun seyir konforuyla seyir güvenliğini azaltır. Başlıca ayrışma tipleri aşağıda sıralanmıştır [2].

### **A. Folluk tipi oyuklar**

Takriben 25-75 cm çapında dairesel, folluğu andıran oyuklardır. Yukarıda sayılan nedenlerden ilk altısı bu tip bozulmaların oluşumunda önemli rol oynar. Folluk tipi oyuklar kaliteli bağlayıcı ve karışım kullanılması, trafiğin gerektirdiği üstyapının inşaası, drenaj, özenli yapım ve özellikle yeterli sıkıştırma ile nlenebilir [2].

### **B. Sklmeler**

Yüzeyden alta doğru ya da kenardan içe doğru agregaların zamanla yüzeyden koparak ayrılmasıdır [2].

### **C. Tabaka halinde sklmeler**

Yüzey tabakasının ince olması, alt tabaka ile yüzey tabakası arasında yapıştırma tabakası kullanılmaması ve yapıştırmanın yetersiz olması nedeni ile oluşan bozulmalardır. Daha ziyade derz çatlakları civarında oluşur [2].

### **D. Soyulma**

Agrega danelerini saran ince asfalt filminin su, kil ve trafiğin mekanik etkisi ile agregadan ayrılması ve dolayısıyla agregada danelerinin çıplak kalması durumudur. Soyulma, sürekli gronlometrili, pratik anlamda geçirimsiz kaplamalarda çok az grldğinden, bitümlü sıcak karışım kaplamalı karayollarımızda bugün için büyük bir sorun olmamakla birlikte, son yıllarda yapılan double yollarımızın çoğu sathi kaplama olduklarından dolayı soyulma faktörü kısa süre içerisinde kendisini gösterecektir [2].

### **E. Kayganlık**

Kaplamanın taşıtların aşındırma etkisi ya da kuma nedeni ile kayma direncinin azalması, başka bir deyişle, sürtünme katsayısının düşmesidir. Özellikle kaplamanın ıslak olması halinde ve yüksek hızlarda seyir güvenliğini büyük lde azaltması nedeni ile önemli bir bozulma tipidir. Kayganlık daha ziyade yüzeydeki agregaların cilalanması ile oluşur. Ancak kuma gösteren kesimlerde kaygan olabilir [2].

## **F. Cilalanma**

Agregaların aşınarak pürüzlülüklerini kaybetmesidir. Özellikle kalker bazlı agregalar, başlangıçta köşeli ve pürüzlü olsalar da taşıtların aşındırma etkisiyle pürüzlülüklerini kaybederek cilalı bir hal alırlar. Kaplama ile taşıtların lastikleri arasındaki sürtünme katsayısı, özellikle kaplamanın ıslak olması halinde düşer ve 60-80 km/saat'ten yüksek hızlarda kaymalara neden olabilir [2].

## **G. Kuma**

Karışım içindeki bitümün sıcaklık etkisi ile yükselerek yüzeye çıkması ve yüzeyde oldukça kalın bir asfalt filmi oluşturması durumudur. Kuma sonucu yüzeydeki agregalar tamamen bitüm filmi ile kaplandığından sürtünme katsayısı düşmektedir.

Kuma daha çok bitüm yüzdesi yüksek karışımlarda ve sıcak havalarda ortaya çıkar. Çok ağır dingil yükleri altında da bitüm yüzeye çıkabilir. Bitüm yüzdesi optimumda olmasıyla beraber, karışımdaki boşluk yüzdesi çok düşükse, sıcak havalarda genişleyen ve dolduracak boşluk bulamayan bitüm yine yüzeye çıkma eğilimi gösterecektir. Çok kalın serilen astar veya yapıştırma tabakaları da kumaya sebep olabilir. Karayollarımızda bakım görmüş kesimlerde sık görülen kuma, bağlayıcı ve boşluk yüzdeleri konusunda dikkatli olmak sureti ile önlenabilir [2].

### 3. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR, AGREGALAR VE POLİMERLER

#### 3.1. Bitümlü Bağlayıcılar Hakkında Genel Bilgiler

##### 3.1.1. Bitümlü bağlayıcılar

Bitümlü karışımlar, şartnamelerde belirtilen standart agrega miktarının ve gerekli bitümlü bağlayıcıların karıştırılmasıyla imal edilirler. Bitümlü karışımların kohezyonu bitümlü malzemeler tarafından sağlanırken agrega ise karışımın içsel sürtünme direncinden ve stabilitesinden sorumludur. Ayrıca bitümlü bağlayıcılar agrega danelerini birbirine bağlayarak trafik yükleri altında dağılmalarını önlemekte, yarattıkları düzgün yüzeyler ile sürüş konforu sağlamakta, kohezyonları ile karışımın stabilitesini artırmakta ve karışımın boşluklarını doldurarak geçirimsizliğini sağlamaktadırlar. Bitümlü karışımlar ağırlıkça en fazla %5-7 ve hacimce en fazla %13-15 oranlarında bitümden oluşmaktadırlar [1].

Bitümlü bağlayıcılar ile ilgili başlıca terimler şunlardır [1];

- **Bitüm:** Likit, yarı katı ve katı halde bulunan, karbondisülfid ( $C_2S$ ) içerisinde tamamen çözünebilir, hidrokarbonlardan oluşmuş organik kökenli maddelerdir. Yol kaplamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcılar, bitkisel kökenli kömürden elde edilen katranlar veya hayvansal kökenli petrolden elde edilen asfaltlardır.
- **Katran:** Katlıkları sıvıdan yarı katıya kadar değişen ve kömürün damıtılması sonucu elde edilen bitümlü malzemelerdir. Doğal olarak da elde edilebilmektedirler.
- **Asfalt:** Renkleri siyahtan koyu kahverengiye kadar ve katlıkları katıdan yarı katıya kadar değişebilen, ısıtılarak veya çözücü katılarak sıvılaştırılabilir ve tabii halde veya petrolün damıtılmasından elde edilen bitümlü malzemelerdir.
- **Asfalt Çimentosu:** Esnek kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılan ve 40 ile 300 penetrasyon arasında değişebilen katılığa sahip bitümlü malzemelerdir. Doğal asfaltın işlenmesi veya petrolün rafine edilmesi ile elde edilir. Asfalt çimentosu (AC), katı asfalt,

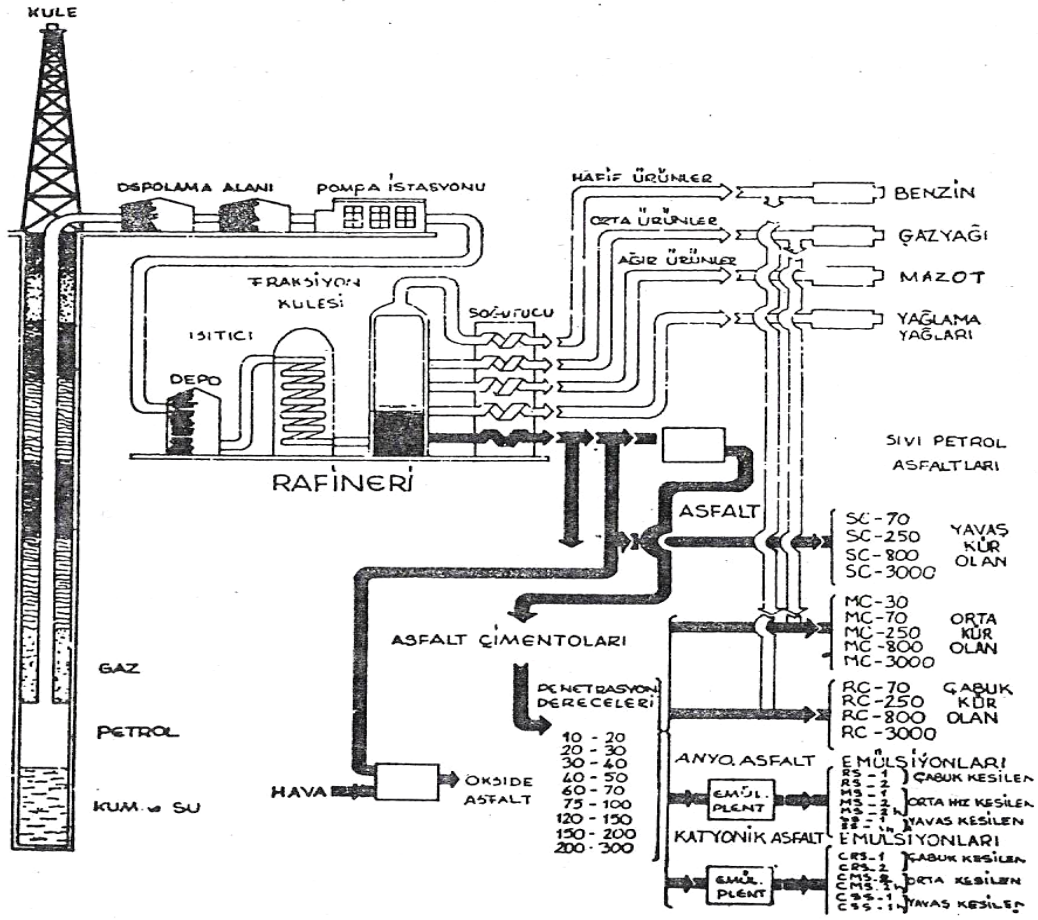
penetrasyon asfaltı (Pen.AC) veya kısaca asfalt olarak adlandırılmaktadır.

- **Doğal Asfalt:** Doğal petrolün yeryüzüne çıkması ve zamanla destile olmasından yani bünyesindeki uçucu maddelerin uçması sonucu meydana gelen asfalttır.

Doğal asfaltın türleri;

- **Göl Asfaltı:** Orta Amerika'da Karaib Adalarında bulunan Trinidad (%56 bitüm) ve Bermuda (%95 Bitüm) bölgelerinde göl halinde bulunur.
- **Gilsonit:** Pratik olarak saf doğal asfalt olup çok sert olduklarından yol inşaatlarında kullanılamaz.
- **Kaya Asfaltı:** Çok poroz kayaların absorbe ettiği petrolün zamanla uçucu maddelerinin kaybı sonucu oluşur. Bu tip kayalarda %20'ye varan asfalt bulunmaktadır. Ülkemizde Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde çok sık rastlanmakla beraber özel bir şekilde işlenmesi gerektiğinden ve doğuracağı ekstra maliyetten dolayı kullanılmamaktadır.
- **Petrol Asfaltı:** Rafineride petrolün destilasyonu ile elde edilir.

Petrolün destilasyonu Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Petrolün türevleri ve asfalt üretimi [3]

Yukarıdaki şekilde belirtilmiş olan bazı kavramlar aşağıda detaylı biçimde anlatılmaktadır.

### • Destilasyon

Petrolün türevlerine ayrıştırılması işlemidir. Bu işlem;

- Ayrıştırma–Damıtma Metodu (Fractional Distillation Process)
- Çözme–Eksatre Metodu (Solvent Extraction Process)

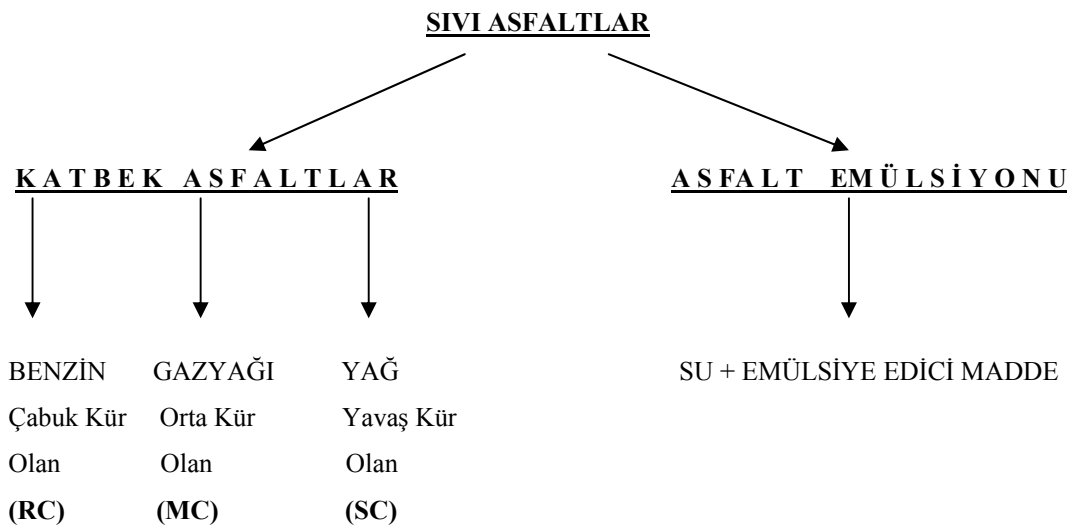
olmak üzere rafinerilerde iki farklı şekilde yapılır.

“Ayrıştırma–Damıtma metodunda ham petrol, türevlerinin her birinin sahip olduğu değişik kaynama noktalarına kadar ısıtılıp buharlaştırılır ve daha sonra ayrı ayrı yoğunlaştırılarak petrol ürünleri elde edilir. Petrolün türevleri nafta’dan madeni yağlara kadar kaynama noktaları artarak farklılık gösterir. Bunun için önce en düşük kaynama noktasına sahip olan nafta buharlaştırılıp ayrı bir tanka alınır ve burada yoğunlaştırılır. Daha sonra ısı artırılır ve benzin

buharlaştırılıp ayrı bir tanka alınır ve burada yoğunlaştırılır. Daha sonra bu işlem tekrarlanıp diğer türevlere de uygulanarak devam edilir. En altta kalan bakiye maddelerden fuel-oil ayrıştırılarak asfalt elde edilir. Bu metot ile normal atmosferik basınç altında damıtma (destilasyon) yapıldığı gibi ayrıştırma tankında vakum ile basınç düşürülüp kaynama noktaları daha da aşağıya çekilerek damıtma yapılabilmektedir” [1].

“Çözme–Eksatre metodunda uygun bir çözücü (örneğin propan) ile ham petroldeki kısımlar eritilip parafinli yağlı kısımlar petrolden uzaklaştırılır. Daha sonra “ayrıştırma–damıtma” işlemi ile petrolün türevleri elde edilir. Bu metot daha çok düşük asfalt içerikli petroler için uygundur” [1].

- **Okside Asfalt:** Asfaltın ısıtılıp içerisine hava üflenmesi sonucunda üretilir. Bu tip asfaltlar tecrit amaçlı işler için uygun olup yol inşaatında kullanılmamalıdır. Çünkü normal destile edilmiş asfaltlara nazaran daha katı yani daha düşük penetrasyonludur. Fakat ısıya duyarlılıkları daha azdır [1].
- **Termal Asfalt:** Petrolden daha çok benzin elde edebilmek amacıyla ham petrolün kimyasal değişikliğe uğratılması ile elde edilir. Normal destile asfaltlara nazaran durabilitesi daha düşük olduğundan yol inşaatında kullanılmamalıdır [1].
- **Sıvı Asfalt:** Yol inşaatında astar ve yapıştırma tabakalarında püskürtme şeklinde kullanılmak üzere uygun katkılar vasıtasıyla sıvılaştırılmış olan asfaltlardır [1]. Sıvı asfalt türleri Şekil 3.2’de görülmektedir.

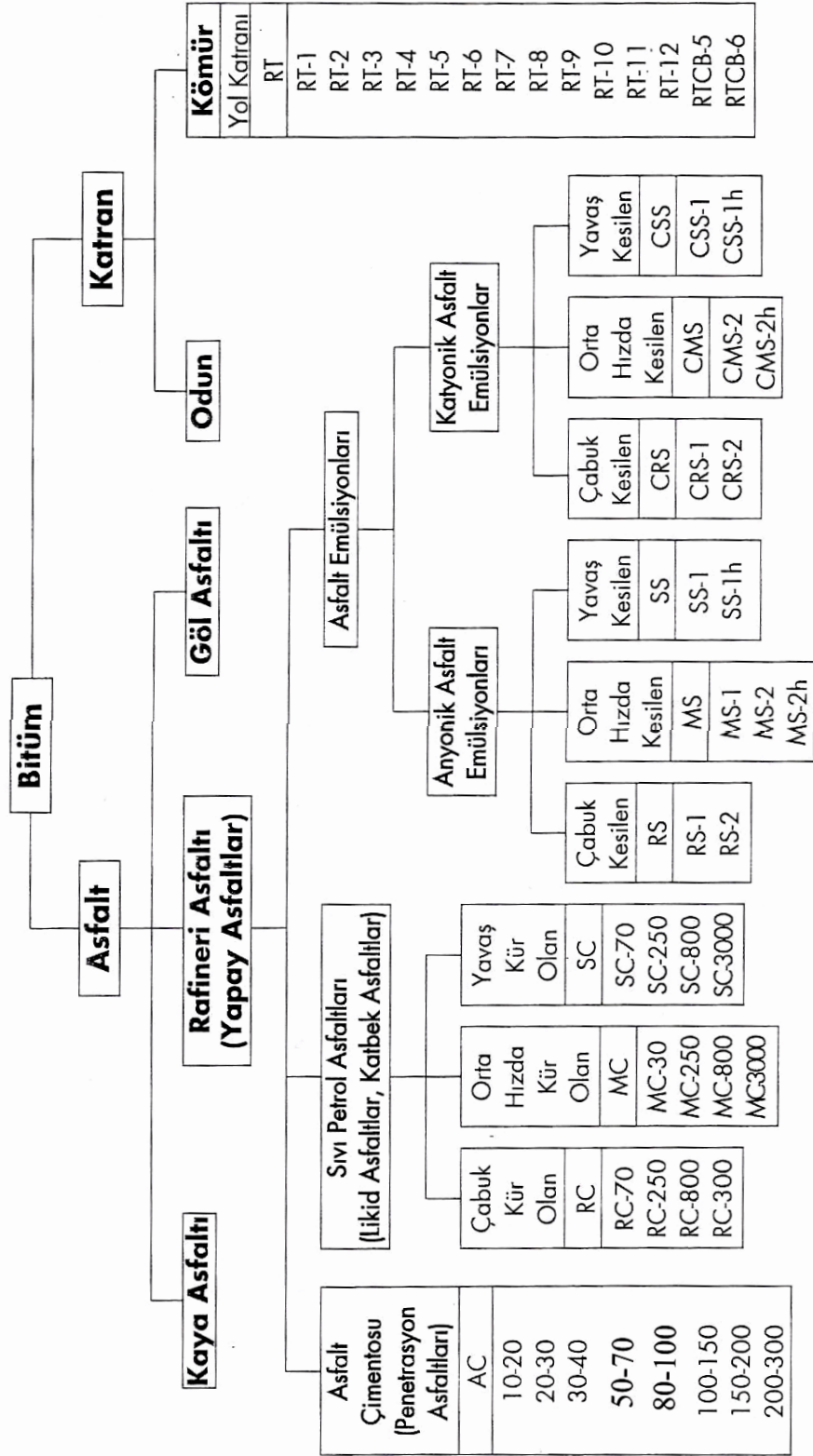


Şekil 3.2. Sıvı asfalt türleri [1]

- **Katbek Asfalt:** “Katı asfaltların yüksek ısı derecelerine kadar ısıtıldıktan sonra sıvılaştırılması yerine asfalt çimentosuna benzin, gazyağı veya madeni yağ gibi çözücüler katarak elde edilen sıvı (yani likit) asfaltlardır. Kür (kesilme) süresine göre üç ayrı tipte imal edilirler. Viskozlukları (akmaya karşı dirençleri) ise çözücü miktarı ile ayarlanır. Katbek asfaltın çözücü miktarı arttıkça viskozluğu azalacaktır. Benzin gazyağına nazaran daha iyi çözücü olmakla beraber daha çabuk uçarak katbek asfalt daha çabuk kür olacak yani daha çabuk sertleşecektir. Dolayısıyla katbek asfaltın sahip olduğu çözücünün uçarak katı asfalt haline dönüşmesine kür olma denilir” [1].

- **Emülsiyon Asfalt (veya Asfalt Emülsiyonu):** “Asfalt çimentosunun çok küçük parçacıklar (0.1–0.5 mikron) halinde parçalanıp suda koloidal halde dağıtılması sonucu akıcı hale getirilmesi ile elde edilir. Emülsiyon asfaltın taşınma, boşaltma, çalkalanma ve depolama sırasında çökme ile birbirine yapışarak sudan ayrılmasını önlemek için emülsiyon maddeler (gliserin, sabun hammaddesi vb.) katılır” [1].

Bitümlü malzemelerin genel bir sınıflandırılması Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3. Bitümlü malzemelerin sınıflandırılması [4]

### 3.1.2. Bitümlerin kimyasal yapısı ve özellikleri

Bitümler çok karmaşık bir kimyasal yapıya sahip olmaları nedeniyle mühendislik özellikleri daha çok fiziksel özellikleri ile belirlenir.

Organik temelli olan bitüm ve katranlar, yüksek moleküllü hidrokarbonlar olarak tanımlanabilir. Ayrıca, genel olarak saf bitümlerin daha çok alifatik, katranlarınsa aromatik bünyeli oldukları kabul edilmiştir.

Bitüm termoplastik bir malzeme olup, ısıya karşı duyarlıdır ve özellikleri değişkendir.

Bitümün yaklaşık bileşenleri aşağıdaki gibidir;

- Karbon : %82–88
- Hidrojen : %8–11
- Nitrojen : %0–1
- Sülfür : %1–6
- Oksijen : %0–1.5
- Çok az miktarda metaller ( oksit, tuz veya metal içeren organik bileşikler halinde ) [5]

### **Isı duyarlılığı - penetrasyon indisi (PI)**

Bitümlerin hepsi sığa maruz kaldıklarında termoplastik olarak viskoelastik davranış sergilerler. Bitümleri ısıttığımızda yumuşayacak ve soğuttüğümüzde ise sertleşeceklerdir. Viskozitenin (akmaya karşı direnç) ısıya bağlı olarak nasıl değiştiğini anlatan birçok anlatım bulunmaktadır. Bunlardan en bilineni, Pfeiffer ve Van Doormaal'in geliştirdiğidir [4].

$$\text{Log}P = AT + K \quad (3.1)$$

Burada;

A=Isıya Duyarlılık Parametresi

P=Penetrasyon Değeri

K=Sabit

T=Sıcaklık

A değeri 0.015 ile 0.06 arasında değişmektedir ve bu da ısı duyarlılığında fark edilebilir bir değişim olabileceğini göstermektedir. Pfeiffer ve Van Doormaal ısı duyarlılığının yol bitümleri için yaklaşık olarak sıfır değerini verecek bir ifade geliştirmişlerdir [4].

Penetrasyon değeri ısıya bağılı olarak değışen bir kavramdır. Bunun matematiksel ifadesi (3.2)'deki gibidir.

$$P_t = P_{25} e^{A(t-25)} \quad (3.2)$$

Burada;

$P_t$ : t sıcaklığındaki penetrasyon değeri

$P_{25}$ : 25°C'deki penetrasyon değeri (standart penetrasyon değeri)

A: Isıya duyarlılık parametresi

Penetrasyon değeri yumuşama noktası sıcaklığında yaklaşık 800 olduğu kabul edilmektedir. Gerekli matematiksel dönüşümler yapıldığında (3.3) elde edilir.

$$A = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{RB} - 25} \quad (3.3)$$

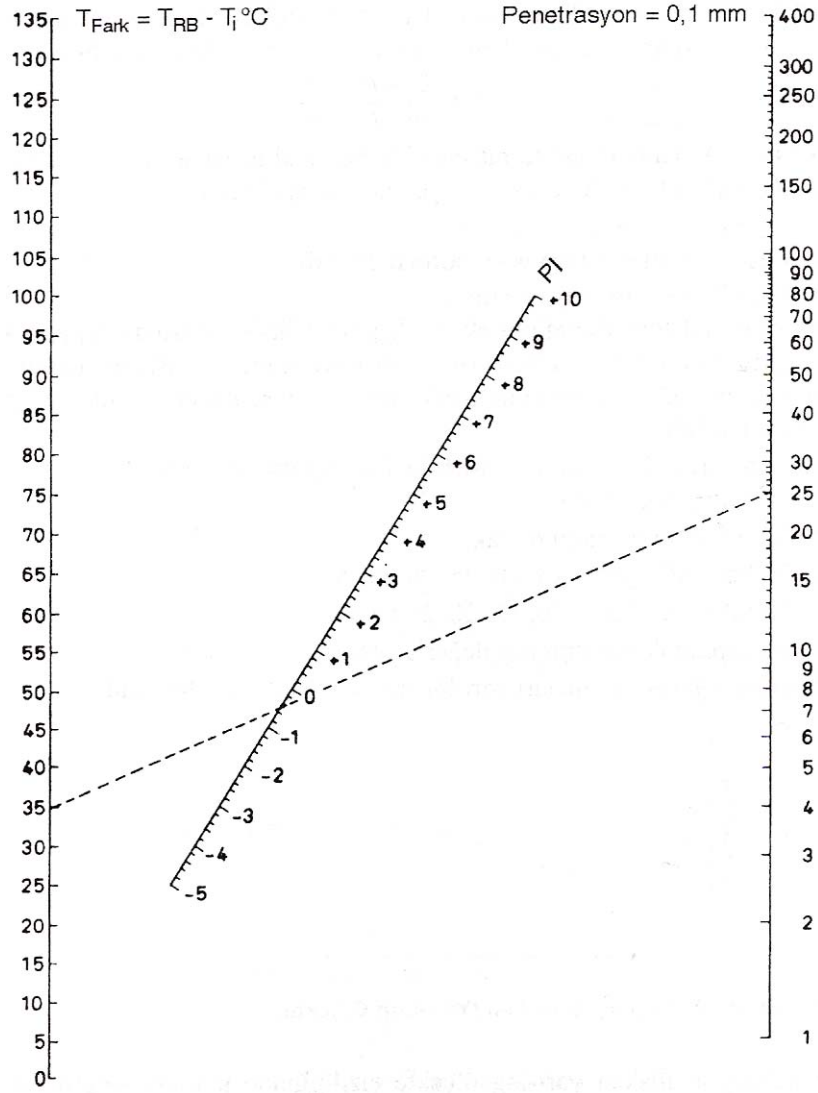
Bitümlerin ısıya duyarlılıkları *penetrasyon indisi (PI)* ile tanımlanır. A katsayısı ile PI arasındaki ilişki (3.4)'teki gibidir.

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (3.4)$$

Genel olarak, PI değeri -3 ile +8 arasında değışir. Katranlar ve termal asfaltlar ısıya çok duyarlı, ayrıştırma-damıtma metoduyla rafine edilmiş asfaltlar ısıya normal duyarlı ve okside asfaltlar ise ısıya az duyarlıdır [1].

Bitümler; eğer  $PI < -2$  ise ısıya çok duyarlı,  $-2 < PI < +2$  ise ısıya normal duyarlı ve  $PI > +2$  ise ısıya az duyarlıdır.

Preiffer ve Van Doormal, PI değeri bulunabilmesi için bir monogram geliştirmişlerdir. Bu monogram yardımıyla yumuşama noktası sıcaklığı ( $T_{RB}$ -Bilya-Halka) ve standart penetrasyon değeri bilirse PI değeri rahatlıkla bulunabilmektedir. PI değeri için kullanılan abak Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. PI değerinin saptanması (Preiffer-Van Doormal) [1]

Ayrıca bitümlerin ısıya duyarlılıklarında penetrasyon oranı denilen bir kavram bulunmaktadır. Penetrasyon oranı, bitümlerin ısıya duyarlılıkları için iyi bir gösterge olup (3.5) ile belirlenir. Bu oran ne kadar küçük ise ısıya olan duyarlılık o kadar azdır.

$$PR=(\text{Penetration Ratio})=\frac{\text{Penetrasyon}(200\text{gr}, 60\text{sn}, 4^{\circ}\text{C})}{\text{Std.Penetrasyon}(100\text{gr}, 5\text{sn}, 25^{\circ}\text{C})} \quad (3.5)$$

### 3.1.3. Asfalt katılıklarının sınıflandırılması

Asfalt çimentolarının (katı asfaltları) katılıkları, penetrasyon ve viskozite değerlerine göre Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Asfalt çimentolarının sınıflandırılması

<b>Penetrasyon Sınıflaması</b>	<b>Viskozite Sınıflaması</b>
40–50 Penetrasyon AC	AC–40
60–70 Penetrasyon AC	AC–20
85–100 Penetrasyon AC	AC–10
120–150 Penetrasyon AC	AC–5
200–300 Penetrasyon AC	AC–2.5

Ülkemizde genellikle 85/100 penetrasyon asfalt çimentoları kullanılmaktadır. Ancak sıcak bölgelerde ve ağır taşıt trafiğinin yüksek olduğu yollarda 60/70 penetrasyon asfalt çimentoları kullanılması özellikle asfalt karışımındaki bitümün bu etkiler altında özelliğini kaybetmemesi açısından önemlidir.

### 3.2. Agregalar Hakkında Genel Bilgiler

Bitümlü karışımların iki ana bileşeninden birisi de agregalardır. Üstyapının ağırlıkça ve hacimce önemli bir kısmını oluşturan agrega, yola etkiyen yüklerin oluşturduğu gerilmelerin karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bakımdan agregaların özellikleri çok önemlidir ve üstyapının projelendirilmesinde dikkate alınmalıdır [4].

#### 3.2.1. Agregaların sınıflandırılması

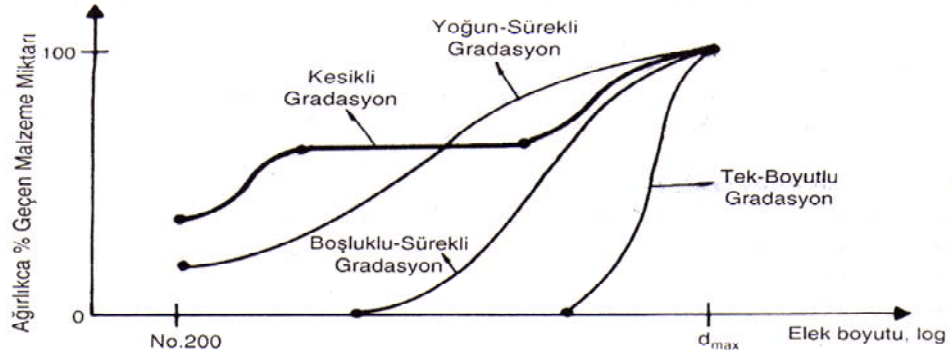
Agregaları birçok şekilde sınıflandırmak mümkündür. Agregalar için yapılan sınıflandırma çeşitleri aşağıda belirtilmiştir.

##### a) Mineralojik sınıflandırma

- Püskürük (mağmatik)
- Tortul (sedimanter)
- Metamorfik (başkalaşım)

##### b) Gradasyon sınıflandırması

Agregaların gradasyonlarına göre sınıflandırılması Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Agrega gradasyon tipleri [1]

##### c) Boyutlarına göre sınıflandırma

- Kaba agrega: #4 numaralı eleğin üzerinde kalan agregalar
- İnce agrega: #4 numaralı elek ile #200 numaralı elek arasında kalan agregalar
- Filler: #200 numaralı eleğin altına kalan agregalar (taş tozu)

#### **d) Yüzey yapısı sınıflandırması**

- Çok pürüzlü
- Pürüzlü
- Düzgün
- Cilalı

#### **e) Biçim sınıflandırması**

Agrega danelerinin biçimleri yol kaplamalarında kullanılan karışımların sıkışma direnci, işlenebilirlik, yoğunluk, stabilite, içsel sürtünme açısı, kayma mukavemeti ve CBR gibi özelliklerine etki eder. Agregada daneleri biçim olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar.

2 Boyutlu olarak;

- Yuvarlak
- Yarı-yuvarlak
- Yarı-açısal (yarı köşeli)
- Açısal (köşeli)

3 Boyutlu olarak;

- Küresel
- Kübik
- Yassı
- İnce-uzun

#### **f) Porozite sınıflandırması**

- Poroz değil
- Az poroz
- Çok poroz

### 3.2.2. Bitümlü kaplamalar yönünden agrega

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agreganın kökeni ne olursa olsun, her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellikleri sağlaması gerekir. Yol yapımında, istenen özellikleri sağlayan agrega çeşidi kullanılmalıdır.

### 3.2.3. Agregaların fiziksel özellikleri

Agregaların stabilite, durabilite ve adezyon gibi fiziksel özellikleri yol üstyapılarının tüm özelliklerini doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir ve bu nedenledir ki bu özellikler dikkatle incelenmelidir.

**a) Stabilite:** “Agregaların stabilitesi, trafik yüklerinden veya zeminin hacim değiştirmesinden dolayı oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır” [1].

**b) Durabilite (Dayanıklılık):** “Agrega danelerinin trafik ve çevre etkilerinin aşındırmasına karşı dirençli olmaları gerekir. Agregada danelerinin durabilitesi kırılma, aşınma ve parçalanmalara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır” [1].

**c) Adezyon (Yapışma):** “Yol kaplamalarında kullanılan bütün malzemeler su ile temastadırlar. Bu yüzden, bitümle kaplanmış agrega parçalarının su etkisiyle soyulmaması için agrega ile bitüm arasındaki adezyonun (bağ kuvvetinin) yüksek olması gerekmektedir” [1].

### 3.2.4 Agregada özelliklerinin değerlendirilmesi

“Bitümlü sıcak karışım imalatında kullanılacak agregaların seçiminde malzemenin elde edilebilirliği, maliyeti ve kalitesi dikkate alınmalıdır. Agregaların bitümlü kaplama yapımı için uygun olup olmadığı aşağıdaki fiziksel özellikleri dikkate alınarak belirlenir” [6];

- Maksimum dane boyutu ve gradasyonu
- Temiz olup olmaması
- Sağlamlığı
- Dane şekli
- Danelerin yüzey yapısı
- Gözenekliliği

- Soyulmaya karşı direnci

Daneler arası sürtünme, sıkıtırılmı agrega kütlesinin yk taşıma kapasitesini etkileyen en önemli faktördür. Daneler arası sürtünme;

- Danenin yüzey yapısına ve Őekline
- Maksimum dane boyutuna
- Gradasyona
- Agregalar arası boluĝa
- Agreganın saĝlamlıĝına baĝlıdır [6].

### **3.3. Bitüm, Agrega ve Bitüm/Agrega Karışımlarına Uygulanan Deneyler**

#### **3.3.1. Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler**

Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler, yol kaplamalarında kullanılacak olan bitümlerin fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi ve bu özelliklerinin teknik şartnamelerdeki standartlara uygun olup olmadığının anlaşılması amacıyla yapılmaktadırlar.

Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler genel olarak şu şekildedir.

- Penetrasyon
- Yumuşama noktası
- Düktilite (Sünme)
- İnce film halinde ısıtma kaybı
- Isıtma kaybı
- Parlama ve yanma noktası
- Leke
- Çözünürlük
- Özgül ağırlık

#### **3.3.2. Agregalara uygulanan deneyler**

“Yol inşaatında kullanılacak agregaların özelliklerinin belirlenmesi için hazırlanacak ince kaya kesitlerinin mikroskopik incelemesi sonucunda, ana minerallerin tanınması, dokusunun ve minerallerinin ne dereceye kadar ayrılmaya uğramış olduğunun bilinmesi gibi petrografik özelliklerin saptanmasına gerek yoktur. Bu nedenle deneyler doğrudan doğruya yolda kullanılan halleriyle agregalara uygulanacak şekle sokulmuştur” [3].

Agregaların karayolu üstyapısında kullanılabilmesi için, bunların aşınmaya ve donmaya karşı dirençlerinin, özgül ağırlık, su absorpsiyonu, soyulma değerlerinin, elek analizleri ve dane şekillerinin, sürtünme etkileriyle oluşacak cilalanmaya karşı olan dirençlerinin bilinmesi yeterlidir.

“Bu deneylerin agregaların değerlendirilmesinde güvenilir olabilmesi için alınan numunelerin çok özenle alınmış temsili numuneler olmaları gerekmektedir. Aksi halde yanlış bilgiler elde edilecektir” [4].

Agregalara uygulanan deneyler;

- Elek analizi
- Los Angeles aşınma deneyi
- Sağlamlık deneyi
- Yassılık indeki deneyi
- Kırılmışlık yüzdesi deneyi
- Soyulma deneyi
- Cilalanma deneyi
- Yapışma deneyi
- Özgül ağırlık deneyi

### **3.3.3. Bitüm ve agrega karışımlarına uygulanan deneyler**

Yol kaplamalarında kullanılacak olan bitümlü sıcak karışımların, yola serilmiş, silindirajı yapılmış asfalt kaplamaların veya laboratuvar ortamında hazırlanan asfalt numunelerin bitüm miktarı, granülometrik bileşimi ve stabilite/akma değerlerinin belirlenebilmesi için uygulanan deneyler aşağıda sıralanmıştır.

- Santrifüj metodu ile bitüm yüzdesi tayini
- Soksalet metodu ile bitüm yüzdesi tayini
- Marshall stabilite ve akma deneyi

### **3.4. Bitümlü Kaplamalardan Beklenen Özellikler**

Bitümlü sıcak karışımlar, agregası ve bitümün her ikisinin de belirli sıcaklıklarda ısıtılıp homojen olarak karıştırılıp kaplanması ile imal edilir. Agregaların bünyesindeki suyun giderilmesi ve bitümün işlenebilir ve kullanılabilir hale getirilmesi için hem agregası hem de asfalt 170°C civarına kadar ısıtılır. Bu nedenle bu tür karışımlara bitümlü sıcak karışım (BSK) denilmektedir.

Agregası asfalt karışımların yol kaplaması olarak kullanılabilmesi için bazı belirli koşulları sağlaması gerekir. Karışımların dizaynları sırasında aşağıdaki özellikleri dikkate alınmaktadır [6,7].

#### **3.4.1. Stabilité**

“Asfalt kaplamanın stabilitesi, trafik yüklerine, ötelenme ve tekerlek izleri oluşmayacak şekilde direnç gösterme yeteneğidir. Stabilité trafik yüklerini karşılayacak kadar yüksek olmalıdır. Ancak çok yüksek stabilite, çok sert bir karışım anlamına gelir ve bu tür kaplamalar trafik yükleri altında oluşan defleksiyonlara uyamayıp çatlarlar. Bu yüzden düşük stabilite gibi çok yüksek stabilite de zararlıdır” [6].

#### **3.4.2. Durabilite**

“Bir karışımın durabilitesi karışımdaki asfaltın özelliklerinin değişmesine (oksidasyon vs.), agreganın kırılmasına ve asfaltın agregası yüzeyinden soyulmasına karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Yüksek durabilite; yüksek bitüm miktarı, yoğun gradasyonlu soyulma direnci yüksek agregası kullanarak ve karışımı en yüksek geçirimsizlik verecek şekilde dizayn ederek elde edilebilir” [6].

#### **3.4.3. Geçirimsizlik**

“Geçirimsizlik, asfalt kaplamanın hava veya su geçişine olan direnci olarak tanımlanır. Geçirimsizlik, karışımdaki hava boşluğu %'si ile belirlenir. Karışımdaki boşlukların birbiri ile bağlantılı olması ve boşlukların yüzeyle irtibatlı olması geçirimsizliği etkileyen başlıca faktörlerdir” [6].

#### 3.4.4. İşlenebilirlik

“İşlenebilirlik, karışımın karıştırılması ve sıkıştırılmasındaki kolaylıktır. Çok fazla kaba agregaya varsa kolay işlenir olmazlar. Çok fazla filler de işlenebilirliği düşürür. Ancak işlenebilirliği en iyi karışımlar yumuşak karışımlardır ve bunlarında trafik yükleri altında deforme olmaları kolaydır” [6].

#### 3.4.5. Esneklik

“Esneklik üstyapının taban zeminindeki geçici oturma ve hareketlere karşı, çatlamaya neden olmadan uyum gösterebilmesidir. Bitüm yüzdesi yüksek, açık gradasyonlu karışımlar bitüm yüzdesi düşük yoğun gradasyonlu karışımlara göre daha esnektirler. Ancak bazen esneklik yüksek iken stabilite düşük olabilmektedir” [6].

#### 3.4.6. Yorulmaya karşı direnç

“Bir üstyapının yorulmaya karşı direnci trafik yükleri altında oluşan tekrarlanan eğilmeye karşı direncidir. Karışımdaki boşluk yüzdesi ve asfaltın viskozitesi yorulmaya karşı direnç üzerinde çok etkilidir. Yetersiz sıkışma, yüksek boşluk yüzdesi, asfaltın yaşlanması ve sertleşmesi yorulma direncini azaltır” [6].

#### 3.4.7. Kayma direnci

“Asfalt kaplama yüzeylerinde, özellikle yağışlı havalarda araç tekerleğinin kaymasına karşı oluşan dirence kayma direnci denir. Kayma direncinin yüksek olması için agregaya hem sert ve pürüzlü olmalı hem de asfalt kaplama yüzeyi pürüzlü olmalıdır” [6]. Bu özellikler Çizelge 3.2’den 3.7’ye görülmektedir.

**Çizelge 3.2.** Düşük stabilite sebep ve etkileri [6]

DÜŞÜK STABİLİTE	
Sebep	Etki
Yüksek asfalt yüzdesi	Oluklanma, tekerlek izinde oturma, kasma
Karışımda fazla kum yüzdesi	Sıkıştırma sırasında ve sonrasında yumuşaklık, sıkıştırma zorluğu
Yuvarlak agregaya, kırılmamış veya az kırılmış agregaya yüzeyi	Tekerlek izinde oturma

**Çizelge 3.3.** Düşük durabilite sebep ve etkileri [6]

<b>DÜŞÜK DURABİLİTE</b>	
<b>Sebep</b>	<b>Etki</b>
Düşük asfalt yüzdesi	Kuru bir görünüş, agregaların sökülmesi
Yetersiz sıkışma ve dizayn hatasından dolayı yüksek boşluk yüzdesi	Kırılma ve ayrışmaya neden olan asfaltın erken yaşlanması
Soyulmaya karşı hassas agrega kullanımı	Asfaltın agregadan soyulması ve agregaların sökülmesi

**Çizelge 3.4.** Karışımları geçirimli yapan sebep ve etkiler [6]

<b>GEÇİRİMLİLİK</b>	
<b>Sebep</b>	<b>Etki</b>
Düşük asfalt yüzdesi	İnce asfalt filmi erken yaşlanmaya ve sökülmeye neden olur.
Karışım dizaynında yüksek boşluk yüzdesi	Su ve hava kolaylıkla karışım içine girer, oksidasyona ve agregaların ayrışmasına neden olur.

**Çizelge 3.5.** İşlenebilirlik problemlerinin sebep ve etkileri [6]

<b>İŞLENEBİLİRLİK PROBLEMLERİ</b>	
<b>Sebep</b>	<b>Etki</b>
Çok büyük dane boyutu	Pürüzlü bir yüzey, serim zorluğu
Çok fazla kaba agrega	Sıkıştırma zorluğu
Çok düşük karışım sıcaklığı	Kaplanmamış agrega, düşük durabilite, pürüzlü bir yüzey, sıkıştırma zorluğu
Çok fazla ara boyutlu malzeme	Karışımın silindir altında ötelenmesi, sıkışma zorluğu
Düşük filler yüzdesi	Yumuşak karışım, yüksek geçirgenlik
Yüksek filler yüzdesi	Karışım çok kuru görünür, durabil olmaz ve işlenmesi çok zor olur.

**Çizelge 3.6.** Zayıf yorulma direncinin sebep ve etkileri [6]

<b>ZAYIF YORULMA DİRENCİ</b>	
<b>Sebep</b>	<b>Etki</b>
Düşük asfalt yüzdesi	Yorulma çatlakları
Yüksek dizayn boşluğu	Asfaltın çok erken yaşlanmasını takiben yorulma çatlakları
Yetersiz sıkıştırma	Asfaltın çok erken yaşlanmasını takiben yorulma çatlakları
Yetersiz üstyapı kalınlığı	Aşırı eğilmeyi takiben yorulma çatlakları

**Çizelge 3.7.** Düşük kayma direncinin sebep ve etkileri [6]

<b>DÜŞÜK KAYMA DİRENCİ</b>	
<b>Sebep</b>	<b>Etki</b>
Fazla asfalt yüzdesi	Kusma, düşük kayma direnci
Agrega gradasyonunun kötü olması	Çok düzgün yüzeyli kaplama, suyun yüzeyden drene olamaması
Agrega cilalanma değerinin düşük olması	Düşük kayma direnci

### 3.5. Polimerler ve Bitümlerin Polimer Modifikasyonu

#### 3.5.1. Polimerler hakkında genel bilgiler

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 70000–80000 hatta 200000–300000 olabilmektedir.

Bir çeşit polimer olan polipropilenler sıklıkla betonun güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Polipropilen üç boyutlu bir güçlendirme sağlamaktadır. Bölgesel olarak betonda yerleştirildiğinde üç boyutlu güçlendirme sağlar. Amerika’da asfaltın modifiyesinde de kullanılmaktadır [7]. Değişik polimer tipleri ve sınıfları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Polimerler [8]

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

### 3.5.2. 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 getirmeğe çalışmıştır. 1909'da Baekeland, temel maddesi fenol-formaldehit olan ilk organik plastik olan bakaliti bulmuştur. 1915'te, selüloitten daha zor tutuşabilen selüloz asetat üretimi başarılıdır. Daha sonra art 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 etmeğe çalışılıyordu. 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” [9].

#### b) Polipropilen'in üretimi

İlk polipropileni Profesör Giulio Natta 1954 yılında İspanya'da üretmiştir. Natta, polietilen endüstrisi için kullanılan katalizörleri propilen gazına uygulayarak polipropilen'i elde etmiştir. Polipropilenin ticari üretimi ilk kez 1957

yılında başlamıştır ve o günden itibaren polipropilen kullanımı hızlı bir şekilde artış göstermiştir.

Polipropilen, yüksek saflıktaki propilen gazının basınç altında katalizör yardımıyla polimerizasyonu sonucu oluşur. Kristal yapılı, 0.902 ile 0.904 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluklu bu polimer termoplastiklerin en hafiflerinden birisidir.

Polipropilen üretimi 3 tip işlemle gerçekleşir [10];

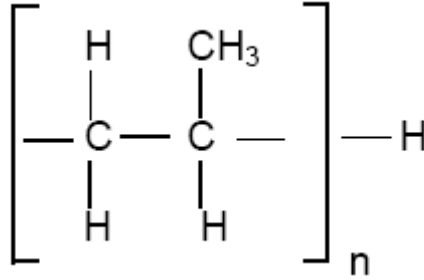
- Gaz faz üretim sistemi
- Hacim faz üretim sistemi
- Sıvı-katı faz üretim sistemi

“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 hazırlama için birden fazla polimer kullanılır” [10].

“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” [10].

### c) Polipropilen'in yapısı

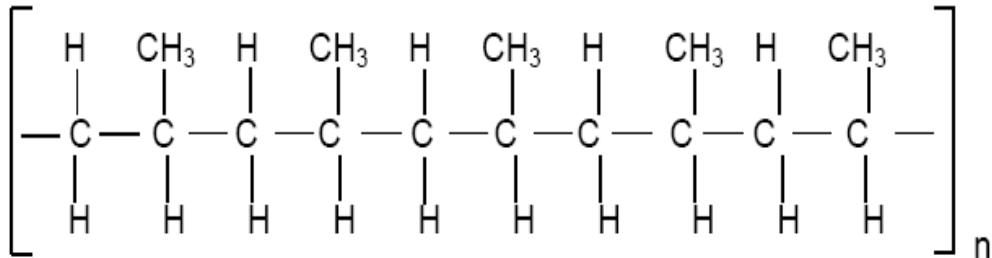
Monomer propilenin atomik yapısı  $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$  şeklindedir. Ziegler-Natta katalizörleri olarak bilinen  $\text{TiCl}_3$  katalizörü etkisinde aradaki çift bağ açılarak açık kalan uçlara  $\text{CH}_3$  ve H atomlarının bağlanması sonucu polimer oluşur. Oluşan zincirin sonuna 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 [11].



Şekil 3.6. Polipropilen'in yapısında bulunan atomların dizilişi

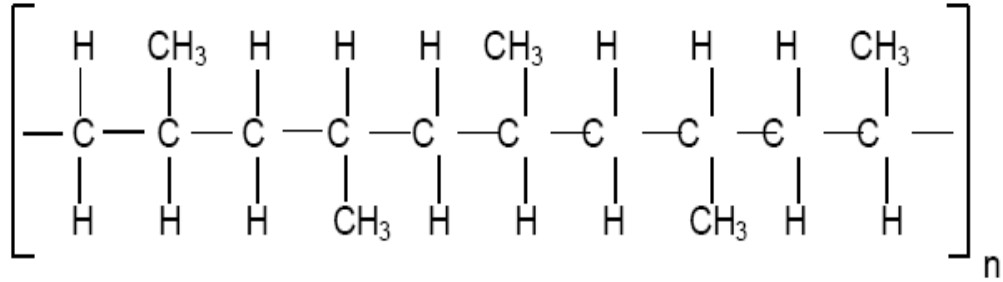
Polipropilenin yapısındaki atomlar Şekil 3.6'da gösterildiği gibi diziliş 5000 ile 10000 ünitelerden oluşur. Polimerizasyon esnasında üç tür polimer oluşur. Bu polimerler;

- **İzotaktik polimer:** Tüm  $\text{CH}_3$  molekülleri üç boyutlu düzeyde tek tarafa sıralanır. Alt düzlemde H atomları bulunur. Kristal yapıda bir polimerdir. İzotaktik polimer atomların dizilişi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



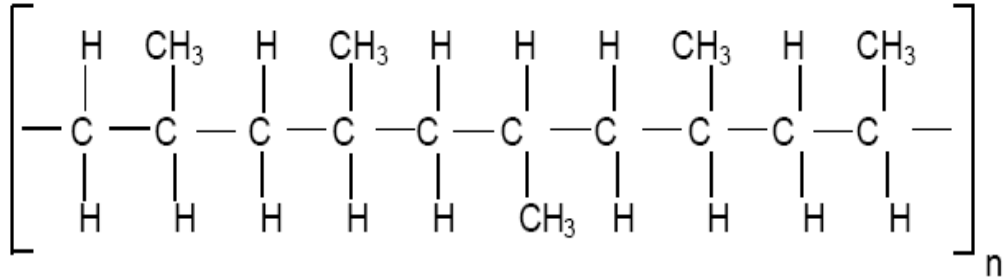
Şekil 3.7. İzotaktik polimer atomlarının dizilişi

- **Sindiyotaktik polimer:** CH<sub>3</sub> 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 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Sindiyotaktik polimer atomlarının dizilişi

- **Ataktik polimer:** CH<sub>3</sub> molekülleri üç boyutlu düzeyde her iki tarafta da gelişigüzel yerleşmiştir. Amorf yapıda bir polimerdir. Heptan ve heksanda çözünür. Ataktik polimer atomların dizilişi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Ataktik polimer atomlarının dizilişi

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 [11].

#### d) Polipropilen'in özellikleri

##### • Kimyasal 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” [12].

##### • Fiziksel özellikleri

Çizelge 3.9'da kullanılan fiberlerin fiziksel özellikleri görülmektedir.

**Çizelge 3.9.** Çalışmada kullanılan polipropilen fiberlerin fiziksel özellikleri [13]

Karakteristikler	Değer	Standart
Homojenliği	100% Polipropilen	-
Renk	Şeffaf	-
Uzunluk, mm	3 - 50	-
Erime sıcaklığı, °C	160	-
Özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	910	ASTM D-792
Yanma noktası, °C	590	-
Alkali dayanımı %	99.5	-
Su emme, %	0.01-0.02	ASTM D-570
Nem tutma	< 0.1%	-
Kopma dayanımı, MPa	31-41	ASTM D-638
Uzama, %	≥ 33	ASTM D-638
Kopmadaki uzama değeri, %	100-600	ASTM D-638
Çekme dayanımı, MPa	31-37	ASTM D-638
Basma dayanımı, MPa	37-55	ASTM D-695
Eğilme dayanımı, MPa	41-55	ASTM D-790
Çekme modülü, MPa	1137-1551	ASTM D-638
Eğilme modülü, 73 °F, MPa	1172-1723	ASTM D-790
Sertlik	R80-R102	ASTM D-785
Isıl genleşme, lineer, m/m/°C	0.031-0.039	ASTM D-696

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 [12].

Buna karşın bazı dezavantajlara sahiptir. Örneğin, UV ışını dayanımı azdır, yüksek termal genleşme gösterir, kırılmandır. Dış hava şartlarına dayanımı azdır, hızlı oksitlenmeye açıktır. Yanıcı olup, klor içeren çözücüler ile etkileşime girer [12].

Polipropilenin özellikleri molekül ağırlığına bağılı olarak da değışmektedir. Molekül ağırlığı yüksek olan yumuşak, düşük molekül ağırlığı olan polipropilen ise sert ve kırılmandır. Yüksek molekül ağırlığı olan polimerin ergime direnci yüksektir. Düşük molekül ağırlığına sahip polimer ise daha akıcıdır ve yapısal özellikleri daha iyidir [11].

“Polipropilen yarı şeffaf beyaz katı bir maddedir. 121°C’ye kadar sıcaklıklarda uzun süre kullanılabilir. Erime noktası 165-175°C arasında değışmektedir. Soğuk organik çözenlerde çözünmez, sıcak çözenlerde yumuşar. Birçok bükülmeden sonra dahi sertliğini korur. Antioksidan katılmadığı zaman ısı ve ışığın etkisi ile bozular. Kolay bir şekilde renklendirilemez. İyi bir elektriksel dirence sahiptir. Düşük su absorpsiyonu ve geçirgenliği vardır. -9.4°C’nin altında kırılğan faza geçer. 60°C’ye kadar kuvvetli asitlere ve bazlara dayanıklıdır. Uygun şekilde modifiye edildiğinde iyi bir ısı dayanımına sahiptir” [14].

#### • Termal Özellikler

“Polipropilen fiberler 150°C civarında yumuşar ve 160–170°C arasında erir. Yüksek derecelerde (120°C altında) polipropilen hemen hemen tüm mekanik özelliklerini muhafaza eder. Polipropilen yaygın olarak kullanılan tüm fiberlerden daha düşük ısı iletkenliğine sahiptir” [15].

Bugün Dünya’da 150’den fazla polipropilen türü bulunmaktadır. Bu geniş tür dağılımının bulunması yaygın bir kullanım alanını da beraberinde getirmektedir.

#### 3.5.3. Bitümlerin polimer modifikasyonu

Modifiye bitümler, normal bitüme kimyasal katkıları eklenerek, bitümün kimyasal yapısının ve/veya fiziksel ve mekanik özelliklerinin değıştirilmesi ile

hazırlanırlar. Polimer modifiye bitümler ya işyerinden uzakta merkezi bir plantte ya da özel mobil ünitelerde kullanımdan önce şantiyede üretilirler [16,17].

Modifiye bitüm, kullanılan polimerin erime noktasının üzerinde bir sıcaklıkta bitüm ve polimerin, fazların (bitüm-polimer) tamamen karışımını sağlayacak uygun karıştırıcı ile homojen olarak karıştırılması sonucu üretilir.

Belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılmış bitüm içerisine katkı malzemesi belirlenen oranda katılarak karıştırılır ve genellikle bu karışım bir değirmenden geçirilerek fazların karışması ve homojenlik sağlanır [16,17].

#### **a) Polimer modifikasyonunun nedenleri, amaçları ve sonuçları**

Bitümlü bağlayıcı ve karışımların modifiye edilmesine karşı duyulan ilgi belirli birtakım sebeplerden dolayı artmıştır. Bu sebeplerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

1. Petrol ve bitüm fiyatlarındaki artış eğilimi
2. Maliyetlerin yüksekliği daha ince kaplamalara yol açmış ve bu da yol kaplamalarının kalitesini düşürmüştür.
3. Trafik hacimlerindeki artışlar
4. Yapılması gereken onarımların vaktinde yapılamaması
5. Endüstriyel atıkların yeniden kullanılabilmesi ihtiyacı

Bitüme polimer ilavesinin amacı, bitümün viskoelastik davranışını değiştirmek ve özellikle, düşük sıcaklıklardaki davranışına zarar vermeden, sıcaklığa karşı hassasiyetini azaltmaktır [7,8].

Modifiye bitüm yol kaplamalarının yorulma çatlaklarına, yüksek sıcaklıklara ve oluklanmaya karşı mukavemetini arttırmaktadır.

Modifiye bitümlerin ve karışımların kullanım amaçları ve faydaları şunlardır [16];

- Düşük sıcaklıklar için daha yumuşak karışımlar elde etmek ve çatlakları azaltmak
- Yüksek sıcaklıklarda daha sert karışımlar elde etmek ve tekerlek izinde oturmayı azaltmak
- Yapım sıcaklıklarında viskoziteyi düşürmek

- İşlenebilirliği ve kompaksiyonu iyileştirmek
- Karışımın dayanımını ve stabilitesini artırmak
- Karışımın aşınma dayanımını iyileştirmek ve agrega kopmasını azaltmak
- Karışımın yorulma dayanımını iyileştirmek
- Yaşlanmış asfalt bağlayıcıyı tekrar gençleştirmek
- Asfalt bağlayıcının ömrünü uzatmak
- Agrega üzerinde daha kalın bir asfalt filmi oluşturmak
- Yapışmayı artırmak ve bitümün agrega yüzeyinden soyulmasını azaltmak
- Kusmayı azaltmak
- Yaşlanmaya ya da oksidasyona karşı dayanımı artırmak
- Kaplamanın ömür-döngü maliyetini azaltmak
- Kaplamaların genel performansını geliştirmek

## **b) Bitüm modifiyesinde kullanılan polimerlerin sınıflandırılması**

### **• Elastomerler**

“Elastomerler; bitümlü karışımın ağır yükler altında kırılmadan esneyebilmesini sağlayan polimer katkı maddeleridir. Elastomerler, bitümlü karışımlara daneli halde veya sıvı hidrokarbona çözelti halinde katılabilmektedir. Bitüm modifikasyonunda kullanılan başlıca elastomerler, doğal kauçuk (NR), polibütadien (BR), isobütadien-isopren kauçuk (IIR), polikloropren (CR), stiren-bütadien kauçuk (SBR) ve stiren bütadien-stiren blok kopolimer (SBS) olarak verilebilir” [18].

Elastomer katılardan en çok kullanılanı SBS blok kopolimerleridir. Bunun en önemli sebebi SBS’in yüksek sıcaklıklarda doğal termoplastik davranış göstermesi ve düşük sıcaklıklarda elastomerik ağ şeklinde fiziksel çapraz zincir davranışı göstererek, sürekli ağ sağlayabilme yeteneğinin oluşudur [18].

- **Plastomerler (Termoplastikler)**

“Plastomerler (termoplastikler), mekanik açıdan bitümü sert hale getiren ve böylece bitümlü karışımın fazla esnemenen büyük yüklere dayanabilmesini sağlayan polimer katkı maddeleridir” [18].

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 artırırlar. Ancak EVA hariç bu gruptaki polimerler bitümün düşük sıcaklıktaki performansını iyileştirmemektedir. Bunun için düşük sıcaklıkların (<-10°C) olmadığı bölgelerde kullanılmaları uygun olur [18].

Plastomerlerin en çok kullanılanı EVA’dır. Bunun en önemli sebebi EVA’nın; bitüm içerisinde kolaylıkla dağılabilmesi, genellikle normal karıştırma ve uygulama sıcaklıklarında bitümle iyi uyum gösterebilmesi ve düşük sıcaklıklarda da bitümün performansını iyileştirebilmesidir [18].

- **Termosetler (Sıcakta sertleşen)**

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 bitüm bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılabilmelerine rağmen, çok yüksek olan maliyetleri nedeniyle tercih edilmemektedirler [18].

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 3.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.10. Bitüm katkı maddelerinin sınıflandırılması [4]

TİP	ÖRNEKLER	Modifiyerlerin Bitümün Kıvamına Genel Etkisi
1-Filler	Mineral Fillerler: -Taş Tozu - Kireç - Portland Çimentosu - Uçucu Kül	Sertleştirme
2-Extender	Sülfür Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
3-Kauçuklar (Elastomerler) a) Doğal lateks b) Yapay lateks c) Blok kopolimer d) İşlenmiş Kauçuk	Doğal Kauçuk Stiren bütadien-stiren veya SBS Stiren bütadien kauçuk veya SBR Dönüştürülmüş kauçuk	*
4-Plastikler (Plastomerler)	Poliyeten Polipropilen Etilen vinil asetat veya EVA Polivinil klorid veya PVC	Sertleştirme
5- Polimer Kombinasyonları	3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	*
6- Fiberler	Doğal: - Asbest - Taş yünü Yapay: - 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

\* Bazı malzemeler sıcaklığa bağlı olarak bitümü sertleştirir veya yumuşatır.

### **c) Bitüm modifikasyonunda kullanılan polimerlerin özellikleri**

Bitüm katkı maddelerinde olması gereken bazı özellikler aşağıda sıralanmıştır [4,18].

- Kolay ulaşılabilirlerdir.
- Asfalt karışımının sıcaklığında özelliklerini kaybetmemelidirler.
- Asfalta homojen olarak karışmalıdır.
- Maliyetleri ekonomik olmalıdır.
- Bitüme katıldıktan sonra depolama, uygulama ve servis sırasındaki özelliklerini sürdürmelidir.
- Düşük sıcaklıklarda karışımın fazla kırılğan ve sert olmasını engellemelidir.

### **d) Bitümün modifiye yöntemleri**

Bitümün modifiye işlemleri genel olarak iki şekilde yapılabilmektedir.

Bunlar;

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

Bitümlerin modifikasyon tipleri Çizelge 3.11'de gösterilmektedir.

**Çizelge 3.11.** Bitüm modifikasyon tipleri [4]

<b>Modifikasyon Tipleri</b>	<b>Örnekler</b>
I. Polimer olmayan katkıyla modifikasyon 1. Fillerler 2. Soyulma önleyici katkıları 3. Ekstenderler 4. Anti-oksidanlar 5. Organo-metal bileşimleri 6. Diğerleri	Kil, karbon siyahı, uçucu kül Organik aminler ve amidler Ligrin, sülfür Çinko antioksidanlar, Kurşun antioksidanlar, fenolikler, aminler Organo mangan bileşimleri Organo karbon bileşimleri
II. Polimer modifikasyon 1. Plastikler a. Termoplastikler b. Termosetler 2. Elastomerler a. Doğal kauçuklar b. Yapay elastomerler 3. İşlenmiş kauçuklar 4. Fiberler*	Polietilen (PE), Polipropilen (PP) Polivinil klorid (PVC), Polistren (PS), Etilen vinil asetat (EVA) Epoksi reçineler Sentetik-butodien kopolimer (SBR), Stran-butodianstran kopolimer (SBS), Etilen-proplendien kopolimer (EPDM) İsobüten-isopren kopolimer (IIR) Polyester, fiberler, Polipropan fiberler
III. Kimyasal reaksiyon modifikasyonu	Katkı reaksiyonu (bitüm+monomer) Volkanizasyon (Bitüm+sülfür), Nitrosasyon reaksiyonu (bitüm+nitrik asit)

## 4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ

### 4.1. Genel Bilgiler

Bitümlü karışımların reolojik özellikleri, dünyadaki birçok yol mühendisi tarafından uzun yıllardır detaylı bir şekilde incelenmektedir. Özellikle Pfeiffer ve Van Doormal'in 1936 yılında bitüm ve bitümlü karışımların reolojik özellikleri üzerine yaptığı çalışmalardan sonra birçok araştırmacı bu konu üzerinde yoğunlaşmışlardır [19].

1953 yılında Van der Poel'in yaptığı çalışmalar açıklamasından sonra bitüm ve bitümlü karışımların reolojisi üzerine 1953'te Mack, 1955'te Van der Poel, 1959'da Rader, Wood ve Geotz, 1960'da Pister ve Monismith yoğun çalışmalar yapmışlar ve sonuçlarını yayınlamışlardır. Bu çalışmalar uzun yıllar boyunca günümüze kadar yapılmaya devam etmiştir [19].

Yapılan çalışmalar neticesinde araştırmacılar, bitümlü karışımların reolojik özelliklerinin, karışımda bulunan malzemelerin bireysel ve birbirleriyle olan ilişkilerine bağlı olduğu konusunda ortak karara varmışlardır. Sonuç olarak aşağıda sıralanan faktörlerin bitüm ve bitümlü karışımların reolojisi üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Bunlar [19,20];

- Bitüm miktarı ve tipi
- Agregada gradasyonu ve tipi
- Karışım sıcaklığı
- Karışım kompozisyonu
- Karışım hazırlanma süresi ve yükü
- Viskozite

Sıralanan bu faktörler tek başlarına belirtilmiş olsa da bu faktörlerin her zaman birbirleriyle bağlantılı oldukları tartışmasızdır. Fakat bitüm ve bitümlü karışımların doğasından dolayı, yapılan birçok çalışmaya rağmen hala bu faktörlerin birbirleriyle nasıl bir etkileşime sahip oldukları bilinmemektedir.

## 4.2. Bitümlü ve Bitümlü Karışımların Reolojik Karakteristikleri

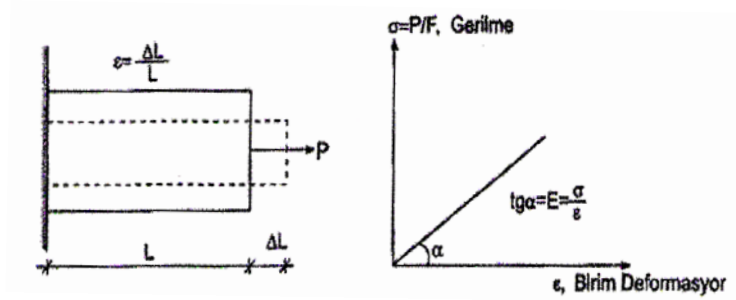
Reoloji kelime anlamı olarak, malzemelerin yük altındaki davranışlarını inceleme bilimidir. Ancak reoloji bilimi, malzemeleri incelerken sadece yüke değil ayrıca yükleme süresine de bağlı olarak analizler yapar. Bitümler de reolojik açıdan incelenebilecek malzemelerdir ve bundan dolayı gerilme-deformasyon ilişkileri hem uygulanan yükün miktarına hem de yükün uygulandığı süreye bağlıdır.

Mühendislikte kullanılan malzemeler gerilme-deformasyon ilişkisi yönünden üç gruba ayrılır. Bunlar;

- Elastik malzemeler
- Viskoz malzemeler
- Visko-elastik malzemeler

### 4.2.1. Elastik malzemeler

Elastik malzemelere bir yük uygulandığı zaman, malzemenin deformasyonu uygulanan yükün miktarı ile orantılı olarak artar. Uygulanan yük kaldırıldığında ise oluşmuş olan deformasyon da tamamen ortadan kalkar. Elastik malzemelerin gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi [1]

Elastik malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi (4.1) ile belirlenir.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad \text{veya} \quad (4.1)$$

$$\tau = G\gamma \quad (4.2)$$

Burada;

σ: Gerilme, kg/cm<sup>2</sup>

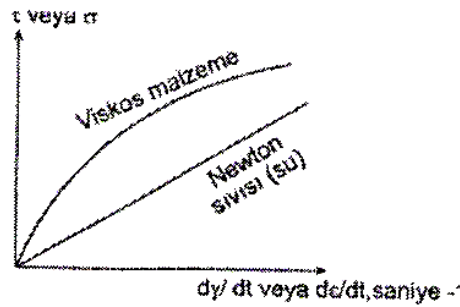
- $\tau$  : Kayma gerilmesi,  $\text{kg/cm}^2$   
 E: Elastisite modülü,  $\text{kg/cm}^2$   
 G: Kayma modülü,  $\text{kg/cm}^2$   
 $\epsilon$ : Eksenel birim deformasyon  
 $\gamma$  : Kayma birim deformasyonu

#### 4.2.2. Viskoz malzemeler

Viskoz malzemelerin özelliklerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz.

- Viskoz malzeme bir yüke maruz kaldığında deformasyona uğramaya başlar ve yük uygulandığı sürece deformasyon artmaya devam eder.
- Uygulanan yük ne kadar fazla ise deformasyon da o kadar fazladır. Yükleme süresi uzadığındaysa deformasyon da o ölçüde uzamaktadır.
- Elastik malzemelerin tersine, uygulanan yük kalktığında deformasyon ortadan kaybolmaz. Deformasyon kalıcıdır ve elastik deformasyon söz konusu değildir.

Viskoz malzemelerin bu özelliklerinden dolayı gerilme-deformasyon ilişkisi (4.3) ve (4.4) ile belirlenir. Gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Viskoz malzemelerde gerilme-deformasyon ilişkisi [1]

$$\sigma = \lambda \frac{d\epsilon}{dt} \quad (4.3)$$

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (4.4)$$

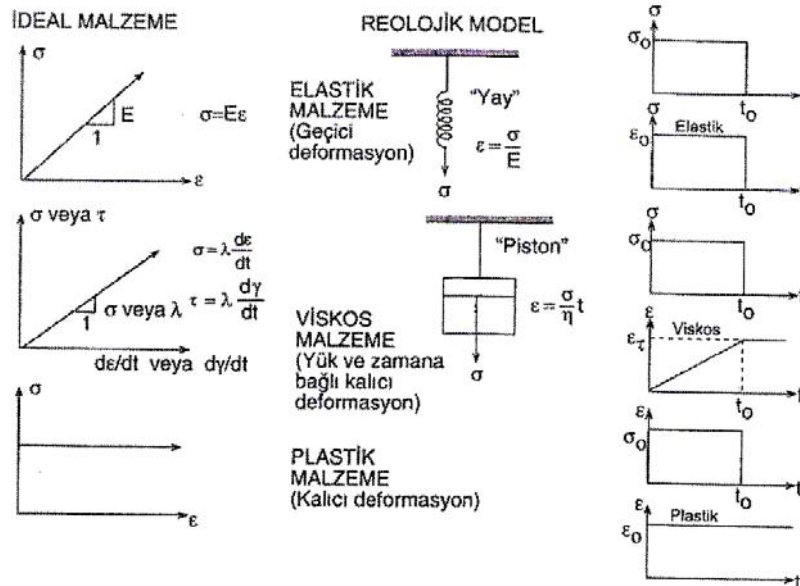
Burada;

- $\sigma$ : Normal gerilme  
 $\tau$ : Kayma gerilmesi  
 $\lambda$ : Çekme veya basınç gerilmesinde viskozluk  
 $\eta$ : Kayma gerilmesinde viskozluk  
 $d\epsilon$  veya  $d\gamma$ : Birim deformasyon  
 $dt$ : Kuvvetin birim uygulanma süresi

#### 4.2.3. Viskoelastik malzemeler

Viskoelastik malzemeler ne elastik malzemeler gibidirler ne de viskoz malzemeler gibidirler. Viskoelastik malzemeler, hızlı yüklemeye maruz kaldıklarında elastik malzemeler gibi davranış gösterirler. Yavaş bir yüklemeye maruz kaldıklarında ise viskoz malzemeler gibi davranırlar. Bununla birlikte, ne hızlı ne de yavaş bir yüklemeye tabi tutulduklarında ise elastik ve viskoz özelliklerin birleşimi şeklinde bir davranış gösterirler.

Viskoelastik malzemelerin modellenmesinde elastik davranış için yay, viskoz davranış için ise piston kullanılmaktadır. Elastik ve viskoz malzemelerin çeşitli modellemeleriyle viskoelastik malzemelerin zaman bağlı davranışları açıklanabilir. Malzemelerin reolojik modellemesi Şekil 4.3'te görülmektedir.



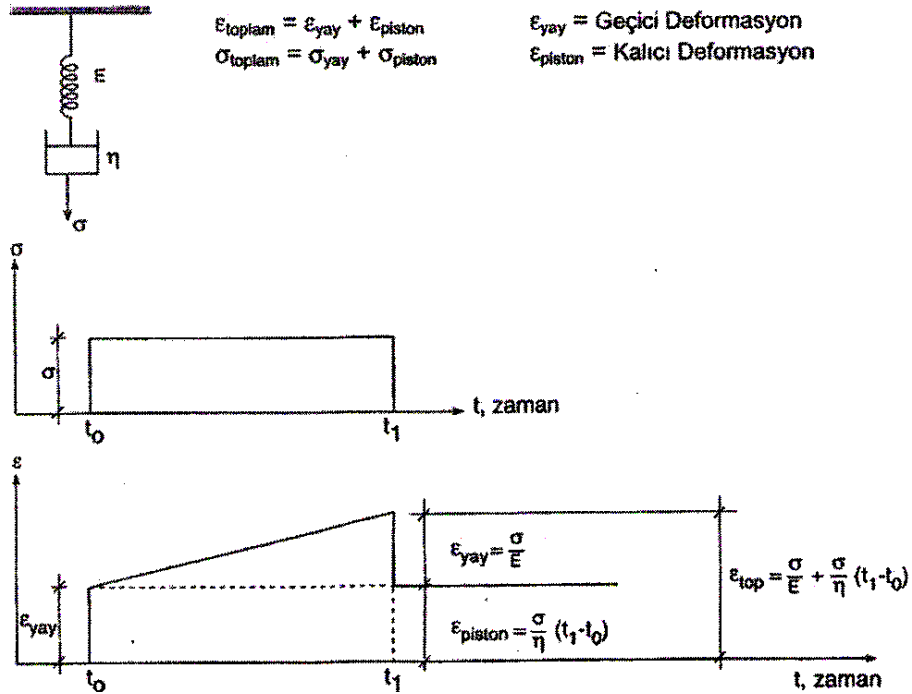
Şekil 4.3. Malzemelerin reolojik modellemesi [1]

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

- 1) Maxwell Modeli
- 2) Kelvin (Voigt) Modeli
- 3) Burger Modeli

### 1) Maxwell Modeli

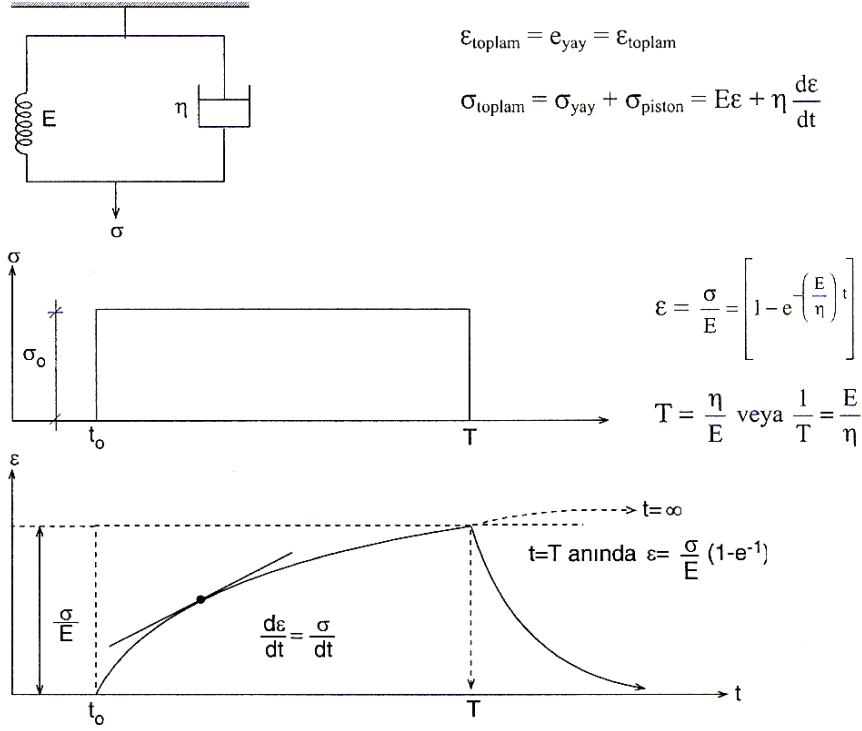
Bu modelde elastik ve viskoz elemanlar seri bağlanmış bir şekilde ele alınmaktadır. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi  $t$  süresince gerilmeye maruz kalan malzeme, önce  $t_0$  anında yaydan dolayı ani bir deformasyon yapar ve deformasyon pistondan dolayı doğrusal bir artış gösterir.  $t_1$  anında yükün kalkmasıyla yaydan dolayı oluşan deformasyon birden ortadan kalkarken pistondan ötürü oluşan deformasyon ise sabit kalmaktadır. Plastik malzemelerin çoğu bu davranışı sergilerler. Isıtıldıklarında plastik duruma gelen bitümlere de yük uygulanırsa bu davranışı gösterirler. Maxwell modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Maxwell modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi [1]

## 2) Kelvin (Voigt) Modeli

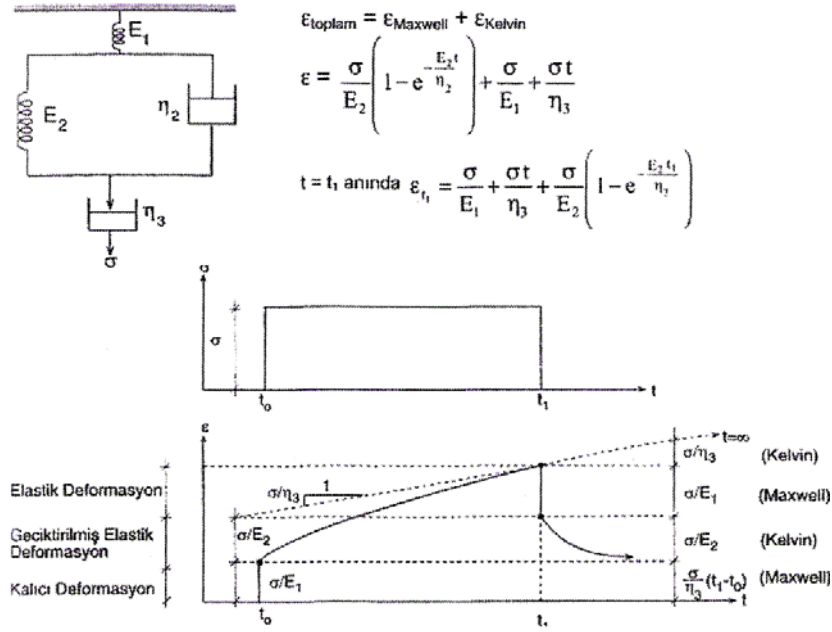
Kelvin modelinde elastik ve viskoz elemanlar paralel olarak ele alınırlar. Kelvin modelinde malzemeye yük uygulandığında deformasyon miktarı azar azar artar ve yük kalktığı anda ise deformasyon sistemde bulunan yayın etkisiyle hızla azalır. Gerilme  $t=0$  anında piston tarafından ve  $t=\infty$  anında yay tarafından karşılanır. Kelvin modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kelvin modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi [1]

## 3) Burger Modeli

Burger modelinde Maxwell ve Kelvin modelleri birlikte bir seri olarak dikkate alınmaktadır. Bu modelde, malzemeye yük uygulandığında ani bir deformasyon meydana gelir ve pistonun etkisiyle deformasyon artar. Uygulanan yük ortadan kalktığı zaman  $E_1$  yayından dolayı elastik deformasyon ortadan kalkar, piston ve yayın ( $E_2$  ve  $\eta_2$ ) etkisiyle viskoz deformasyon kalıcı deformasyona ( $\eta_3$ ) kadar azalır. Burger modelinde gerilme-deformasyon ilişkisi Şekil 4.6'da verilmiştir.



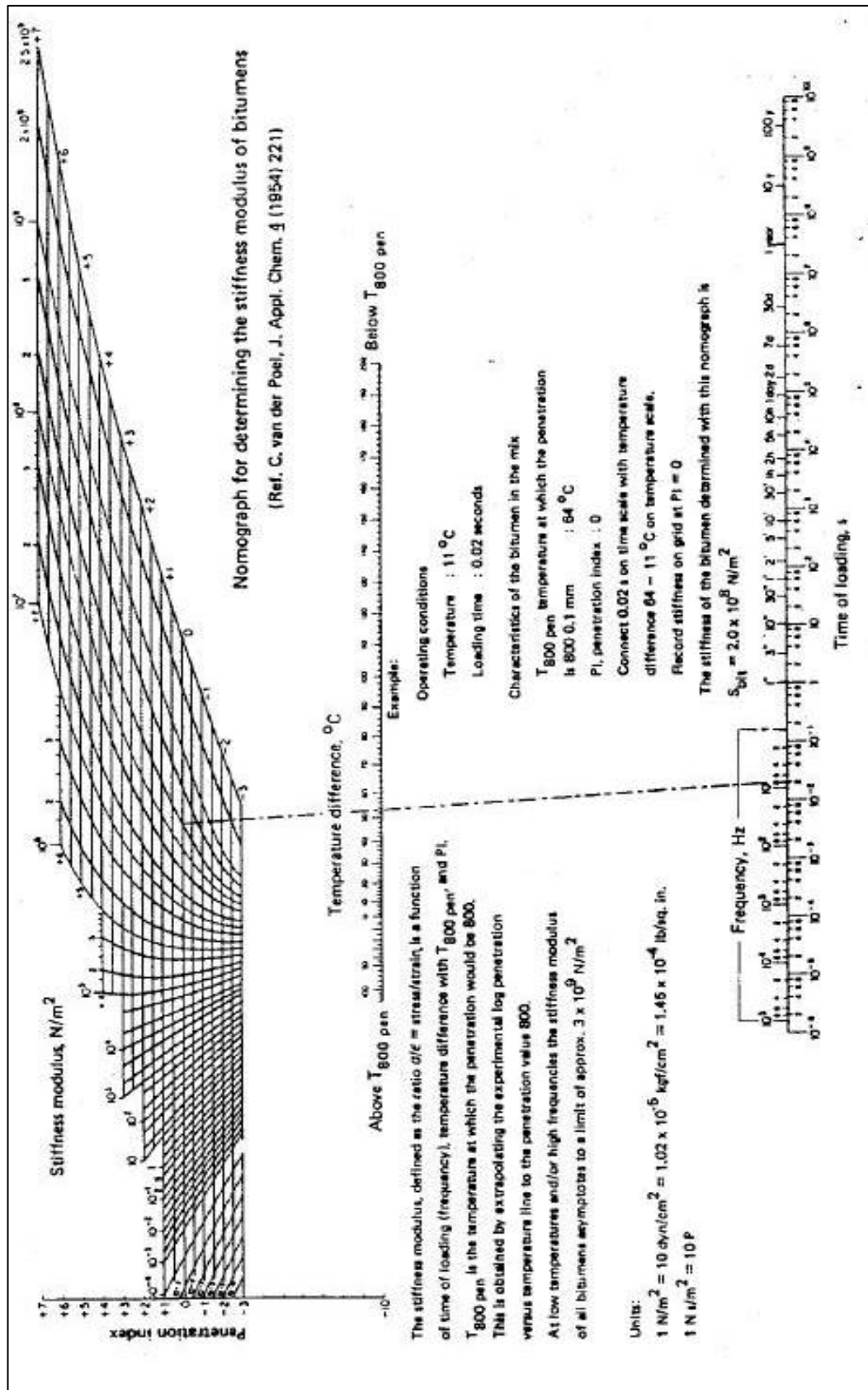
### 4.3. Rijitlik Kavramı

#### 4.3.1. Rijitlik Modülü

Bitümlerin gerilme-deformasyon ilişkileri Bölüm 4.2.3'te anlatılan modellerle kesin olarak ifade edilememektedir. Bu nedenle bitümlerin yük altındaki davranışlarını belirleyebilmek için Van der Poel [21] "rijitlik modülü" kavramını geliştirilmiştir. Van der Poel rijitlik modülünün tanımlanması için gerekli olan bütün fiziksel faktörleri bir araya toplayan bir sistem ortaya koymuştur. Bunun sonucunda ise rijitliğin belirlenebilmesi için gerilme, zaman ve sıcaklığa bağlı olarak geliştirdiği Şekil 4.7'deki nomografi oluşturmuştur.

Bitümlerin rijitlik modülleri sıcaklık ve yükleme süresine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle rijitlik modülü, "bitümlerin sahip olduğu viskoelastik ve termoplastik özelliklerini birlikte yansıtmalıdır. Bitüm yüksek ısılarda ve uzun yükleme sürelerinde viskoz davranış gösterirken düşük ısılarda ve hızlı yüklemelerde elastik bir malzeme gibi davranış gösterir. Isının ve yükleme sürelerinin ara değerlerinde ise viskoelastik davranış gösterir" [1].

Bitümlerin rijitlik modülünün hesaplanması için gerekli olan abak Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Bitümlerin ritlik modülünün tespiti (Van der Poel) [21]

Bitümlerin rijitlik modülü gerilmenin deformasyona oranı ile belirlenir. Burada rijitlik modülü yükleme tipine, yükleme frekansına ve sıcaklığa bağlı olan bir denklem ile ifade edilir. Denklem (4.5) bitümün rijitlik modülünü ifade etmektedir.

$$(S)_{t,T} = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right)_{t,T} \quad (4.5)$$

Burada;

S: Rijitlik modülü, psi veya kg/cm<sup>2</sup>

t: Yükleme süresi, saniye veya dakika

T: Sıcaklık, °C

$\sigma$ : Gerilme, psi veya kg/cm<sup>2</sup>

$\varepsilon$ : Birim deformasyon

1957 yılında Nijboer, Marshall testi için rijitlik modülünü tekrar belirlemiştir. Nijboer'e göre, "Marshall testleri sırasında meydana gelen gerilme ve deformasyonlar çok karmaşıktır" [22]. Nijboer, bu karmaşıklığın üstesinden gelebilmek için uygulanan yükün malzemenin kesit alanına homojen bir şekilde dağıldığını öngörmüştür [22]. Denklem (4.6) Nijboer'in bu düşünce ile geliştirdiği eşitliği göstermektedir [23].

$$S = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P}{A} / \frac{F}{d} = 1.5748 \frac{P}{F} \quad (4.6)$$

Burada;

S: Nijboer rijitlik modülü, kg/cm<sup>2</sup>

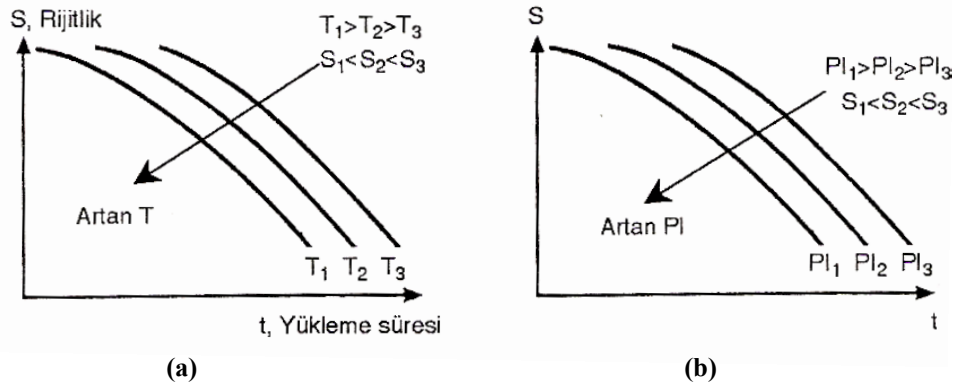
P: Marshall stabilitesi, kg

A: Marshall briketinin kesit alanı, (6.35 cm x 10.16 cm=64.516 cm<sup>2</sup>)

F: Marshall akma değeri, mm

d: Marshall briketinin yüksekliği, (10.16 cm)

"Marshall testlerinde yükleme süresi 3-4 saniye civarındadır ve bu süre gerçek trafik koşullarıyla karşılaştırıldığında çok uzun bir süredir. Bu nedenle (4.6) yardımıyla elde edilen rijitlik modülü ile gerçek yükleme süresinde yani gerçek trafik koşullarındaki rijitlik modülü değerleri aynı olmayacaktır" [23].



Şekil 4.8. Bitümlerin rijitlik modüllerinin değişimi [1]

Şekil 4.8’de görülebileceği gibi bitümlerin rijitlik modülü yükleme süresi, sıcaklık ve penetrasyon indisi arttıkça (yani ısıya duyarlılık azaldıkça) azalmaktadır.

“Bitümün sıcaklığı ve yük uygulanma süresi arttıkça rijitlik modülü önemli derecede azalmaktadır. Bu nedenle, düşük ısılarda bitümlü kaplamaların rijitliği artarak neredeyse hiç kalıcı deformasyon oluşmaz. Fakat yüksek ısılarda ve uzun yükleme sürelerinde rijitlik modülü çok düşük olacağından kaplamalarda kalıcı deformasyonlar meydana gelecektir. Ayrıca bitümlerin penetrasyon indisi arttıkça ısıya karşı duyarlılıkları azalacağından kaplamalar daha rijit davranış gösterirler” [1].

#### 4.3.2. Bitüm test veri abağı (Bitumen Test Data Chart-BTDC)

Penetrasyon ve viskozite kavramları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ve penetrasyon için referans sıcaklık olan  $T_{800}$  ve ısıya duyarlılık parametresi A ile tanımlanabilirler.

$$\log \frac{pen}{800} = A(T - T_{800}) \quad (4.7)$$

$$\frac{-5.42(\eta/13000)}{8.5 + (\eta/13000)} = A(T - T_{800}) \quad (4.8)$$

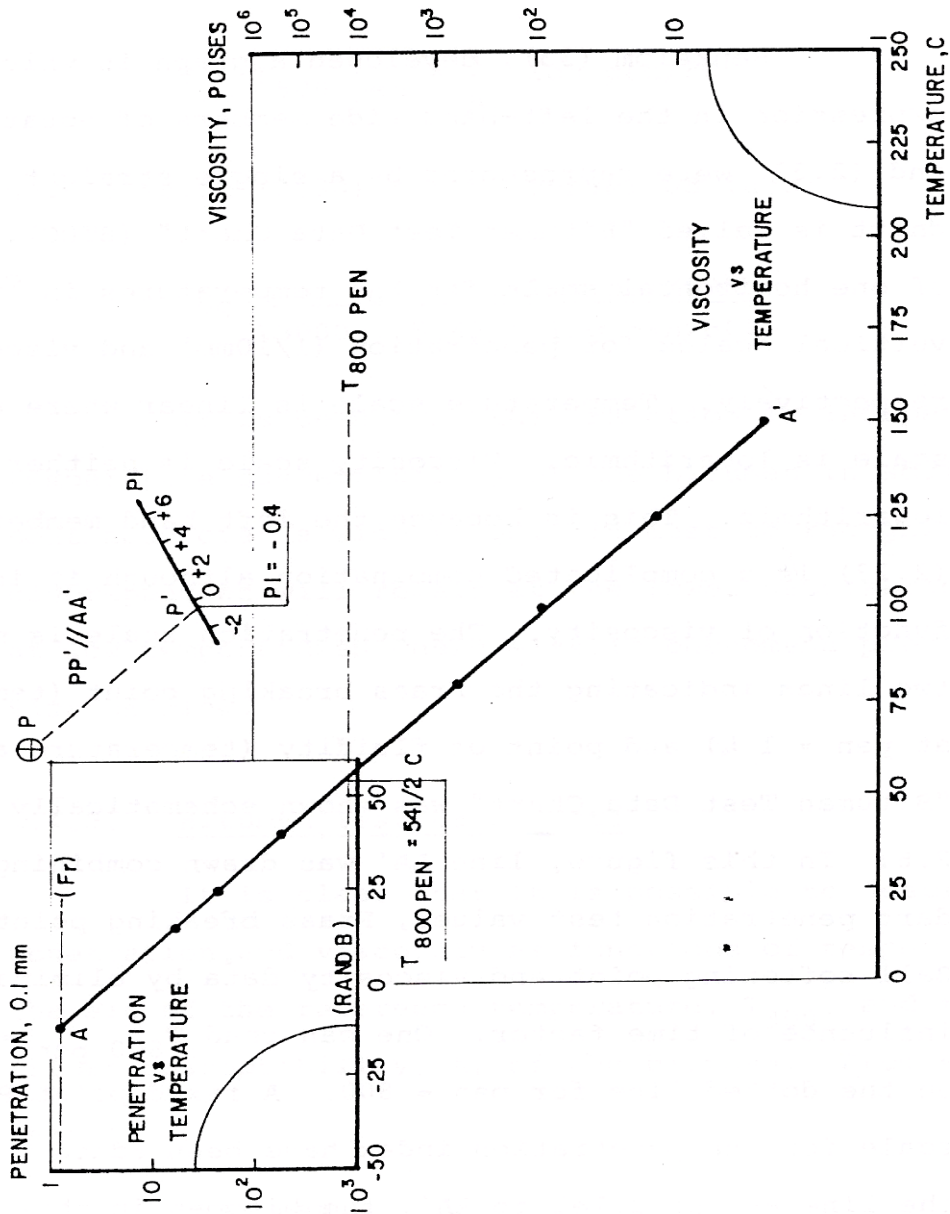
Burada;

T: Penetrasyon sıcaklığı, °C,  $T_{800}$ : 800 penetrasyonda yumuşama noktası sıcaklığı

$\eta$ : Viskozite

A: Isıya duyarlılık parametresi

Heukelom [24] bu iki denklemin sol taraflarında bulunan bölümlerin düz bir çizgi olarak belirlendiği bir abak geliştirmiştir. Bu abağa “Bitüm Test Veri Abağı (Bitumen Test Data Chart-BTDC) adını vermiştir. Bu abak sıcaklık, penetrasyon, penetrasyon indisi ve viskozite gibi faktörlerin bir arada değerlendirildiği bir grafikdir. Bu grafik düşük penetrasyon indisi özelliklerine sahip bitümlerin karakteristiklerini belirlemede rahatlıkla kullanılabilir [24]. Bitüm test veri grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Bitüm test veri grafiği (Bitumen Test Data Chart-BTDC) [24]

### 4.3.3. Penetrasyon indisi (PI)

Penetrasyon indisi bitümlü karışımların rijitliğinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Bilindiği gibi sıcaklık arttıkça bitümler yumuşamaya başlarlar ve penetrasyon değerleri artmaya başlar.

Penetrasyon indisi ile ilgili detaylı bilgiler Bölüm 3.1.2’de verildiği için burada daha fazla bilgi verilmeyecektir.

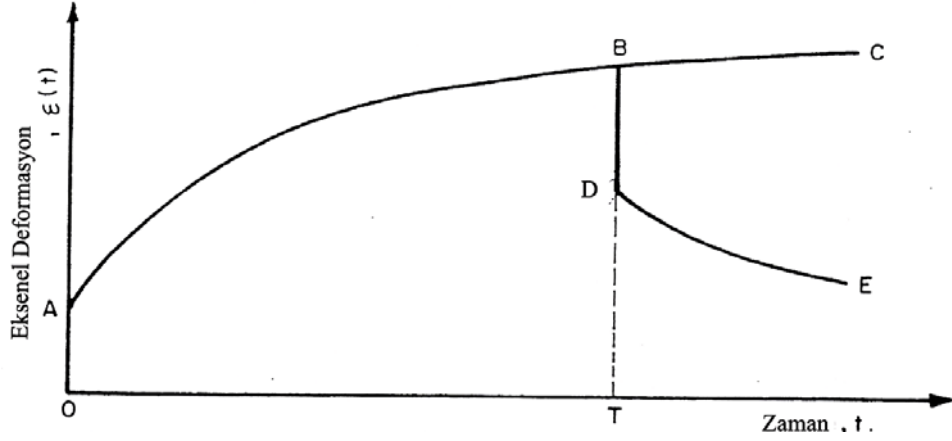
### 4.4. Sünme Davranışı

Sünme, Jastrzebski tarafından “bir malzemenin sabit bir gerilme altındaki yavaş ve sürekli olan deformasyonu” olarak tanımlanmıştır [25]. Diğer bir deyişle, sünme, yük uygulanan bir malzemenin zamana bağlı olan deformasyon karakteristikleri olarak tanımlanabilir.

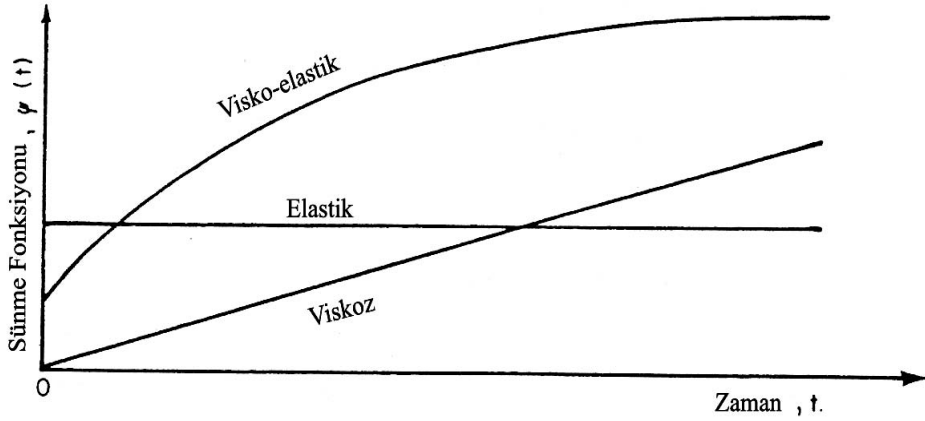
Viskoelastik malzemeler örneğin plastikler, elastik karakteristiklerine ek olarak bir de akma davranışı gösterirler. Bu akma davranışı sünme olarak tanımlanır. Viskoelastik bir malzemenin tipik zaman-deformasyona bağlı grafiği Şekil 4.10’da görülmektedir. Yük uygulanmadan hemen önce herhangi bir deformasyon oluşmaz iken yükün uygulanmasıyla birlikte ani olarak bir deformasyon görülecektir. Bununla birlikte, gerilme belirli bir değere sabitlendikten sonra gerilme değerleri zamanla artmaya devam edecektir. Bazı malzemelerde Şekil 4.10’daki ABC eğrisi bir zaman sonra sabit bir hal alacak ve sıfır eğimle kırılmaya kadar gidecektir. Ancak bazı malzemelerde ise bu eğri sabit bir eğimle artmaya devam edecektir [23].

$t=T$  gibi bir sürede uygulanan yük kaldırıldığında ise elastik malzemelerde deformasyon tamamen ortadan kalkacaktır. Ancak viskoelastik malzemelerde ise Şekil 4.10’daki BDE eğrisine benzeyen bir geri kazanma evresi oluşacaktır.

Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12 tipik sünme davranışının grafiklerini göstermektedir.



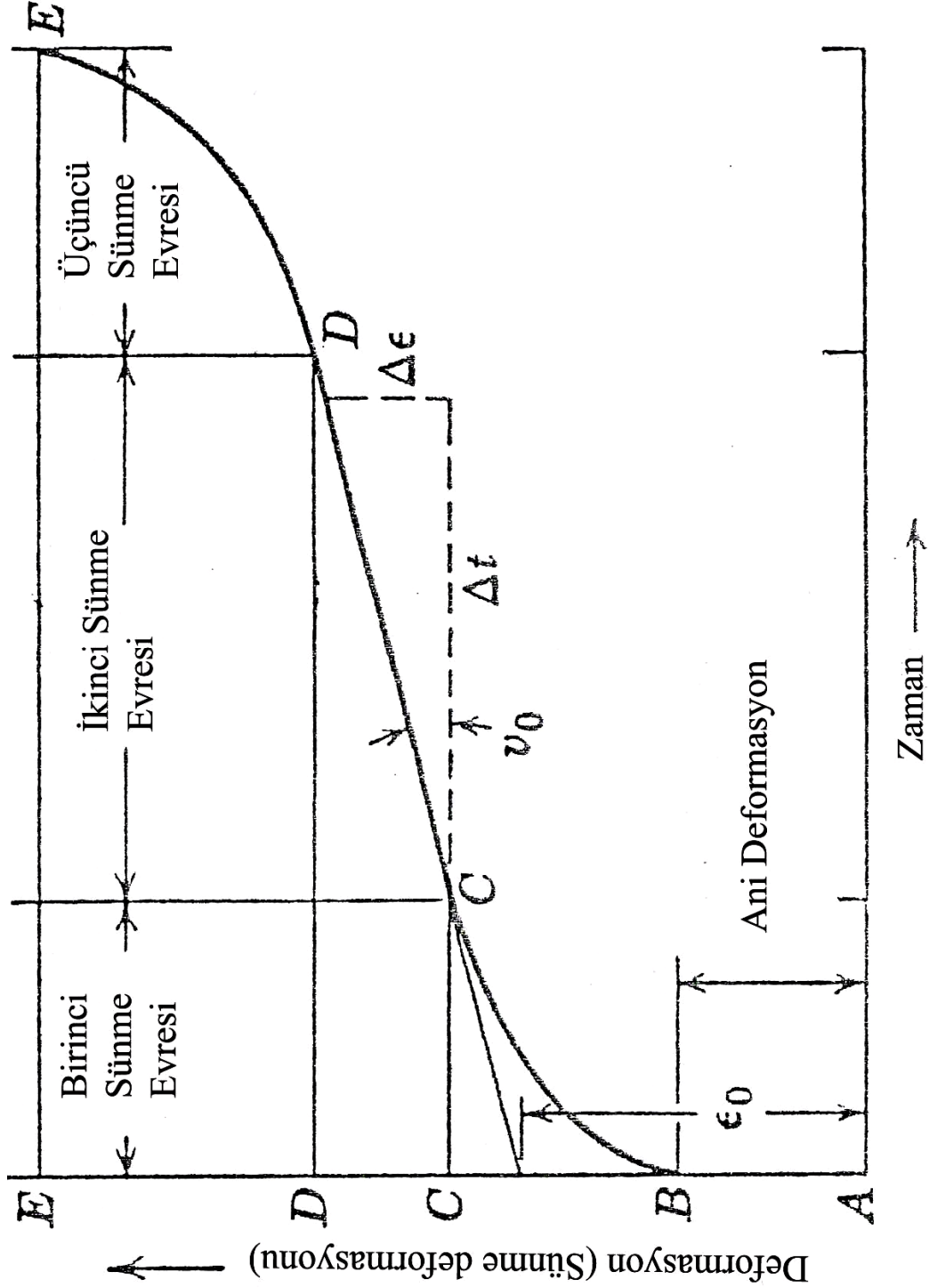
Şekil 4.10. Sünme grafiği [23]



Şekil 4.11. Elastik, viskoz ve viskoelastik malzemelerin zamana bağlı sünme davranışları [23]

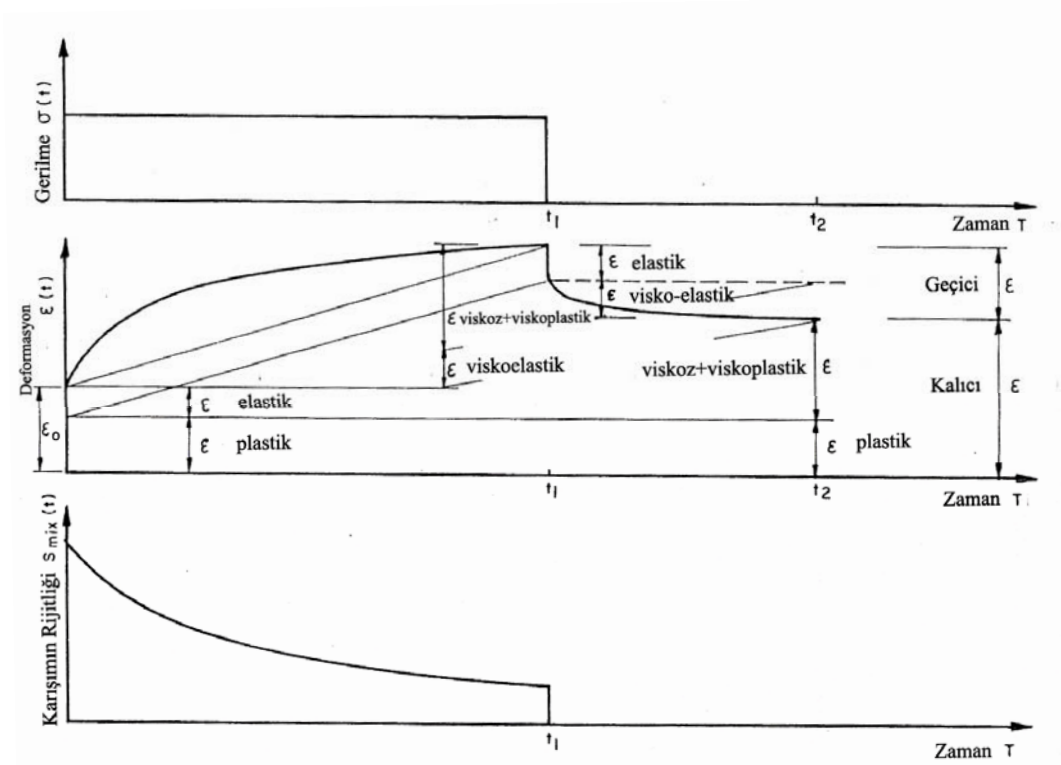
Şekil 4.12'de viskoelastik bir karışımın kopma oluncaya kadarki yüklenmesiyle meydana gelecek olan sünme davranışı görülmektedir. Burada ilk olarak yükün uygulanmasıyla birlikte ani olarak bir deformasyon oluşmaktadır. Bunun temel nedeni ise yük uygulandığı zaman, karışımın içerisindeki boşluklardan bir kısmının sıkışmasıdır. Bu ani deformasyonu takiben tatbik edilen sabit yük altında numune sıkışmaya ve deformasyona uğramaya başlar. Bu süreçte birincil sünme evresi (Primary Creep) denilen bölüm meydana gelir. Bu evrede yük altındaki numunenin deformasyonu ikincil sünme evresi (Secondary Creep) adı verilen bölüme gelene kadar artarak devam eder. İkincil sünme evresinde ise bazı malzemelerde sıfır eğim ile deformasyon sünmenin üçüncü ve son evresine kadar sabit kalır, bazı malzemelerde ise sabit bir eğimle artan bir deformasyon görülür. Üçüncü (Tertiary Creep) ve sünme grafiğinin son evresi olan bu bölümde ise artık numune kırılmaya başlamaktadır. Numunenin mukavemeti bu bölümde

gittikçe azalmaya başlar. Bu nedenle bu son bölümde tekrar hızla artan bir sünme grafiği görülür. Bu evrede deformasyonlar çok yüksek değerlere çıkmaya başlar ve numunenin kırılmasıyla sünme son bulur.



Şekil 4.12. Tipik sünme davranışı ve evreleri [20]

Şekil 4.13'te ise gerilme, deformasyon ve rijitliğin zamana bağlı olarak değişimi detaylı bir şekilde görülmektedir.



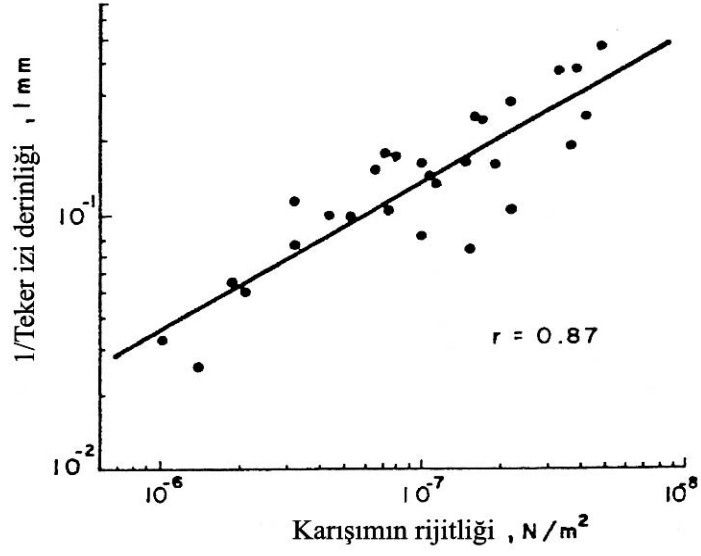
Şekil 4.13. Gerilme, deformasyon ve rijitliğin zamana bağlı değişimi [23]

Uzun yıllardan bu yana birçok bilim adamı bitümlü karışımların reolojik özelliklerini çeşitli deneylerle incelemişlerdir. Zamanla ortaya çıkan daha kaliteli kaplamaların yapılması isteği araştırmacıları daha detaylı çalışmalara yöneltmiştir. Yıllardır yapılan dizaynların hepsi elastik teoriye göre yani bitümün elastik bir malzeme olduğu teorisi üzerine yapılmıştır. Ancak zamanla bunun böyle olmadığı anlaşılmıştır. Özellikle 1970'lerin başında Shell laboratuvarlarında bitümlü karışımların dizaynı üzerine çok detaylı çalışmalar başlatılmıştır.

Brian [26] 1977 yılında 27 tane "Rolled Asphalt" tipinde karışım hazırlamıştır. Bunları hazırlamasının nedeni, Marshall testi, tekerlek izi deneyi ve sünme deneyi sonuçlarını birbirleriyle karşılaştırmaktır [23]. Bu deneylerin sonucunda şu grafikleri elde etmiştir.

- $Q_m$  (Marshall Oranı=Stabilite/Akma) ile sünme deneyi arasındaki ilişki (Şekil 4.14)





Şekil 4.16. Sünme deneyi ile tekerlek izi deneyi arasındaki ilişki [26]

Brian [26]'ın yaptığı bu çalışma ve çizilen bu grafikler sonucunda birbirleriyle en yakın sonuçlar Marshall deneyi ile Sünme deneyi arasında görülmüştür ( $r=0.96$ ). Diğer karşılaştırmalarda ise grafiklerden de görülebildiği üzere sırasıyla  $r=0.93$  ve  $r=0.87$  değerleri tespit edilmiştir. Bunun sonucu olarak sünme deneylerinde kullanılacak olan numunelerin Marshall yöntemiyle hazırlanmasının çok daha yararlı olacağı görüşüne varılmıştır [26].

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

### 5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

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

#### 5.1.1. Bitüm

Deneysel çalışmalarda bağlayıcı malzeme olarak AC 60/70 yani diğer bir deyişle 60/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Kullanılan bitümün şartname limitleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Kullanılan bitümün şartname limitleri [16,27]

Özellik	Standart	Birim	Değer
Penetrasyon, 25°C	ASTM D 5-73	1/10 mm	60-70
Yumuşama Noktası	ASTM D 36-76	°C	43-51
Düktilite, 25°C	ASTM D 113-79	cm	+100
Parlama Noktası	ASTM D 92-78	°C	min. 230
Yanma Noktası	ASTM D 92-78	°C	min. 270
İnce Film Halinde Isıtma Kaybı	ASTM D 6-80	%	maks. 0.8
Özgül Ağırlık, 25°C	ASTM D 70-76	kg/m <sup>3</sup>	1036

Bu çalışmada iki seri deney yapılmıştır. Bunlardan birincisi katkısız bitüm numunelerine yapılan deneyler, diğeri ise optimum bitüm ve optimum polipropilen katkılı olarak hazırlanan bitüm numunelerine yapılan deneylerdir. Deney sonuçları aynı çizelge içerisinde birlikte verilecektir.

#### A) Penetrasyon deneyi

Bitümlerin sertlik ya da kıvamlılıklarının belirlenmesi amacıyla yapılır. Bu deneyde 100 gr ağırlığındaki standart bir iğnenin 5 saniye süresince 25°C’deki bitüm numunesine batma miktarı ölçülür. Bir numuneden 3 farklı okuma alınarak bunların ortalaması penetrasyon değeri olarak belirlenir. Bu batma miktarı 0.1 mm

cinsinden bulunur. Penetrasyon değeri kıvamlilikla ters orantılıdır. Penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşar.

Penetrasyon deneyi sonuçları Çizelge 5.2’de, penetrasyon deney aleti ve numuneleri Şekil 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Penetrasyon deneyi sonuçları

<i>1/10 mm</i>	#1	#2	#3	#4	#5
<b>Katkısız Bitüm</b>	100-99-86	99-94-103	85-83-80	93-97-96	82-83-87
<b>Katkılı Bitüm</b>	62-68-67	72-76-74	61-61-63	68-65-67	72-73-69



(a)

(b)

Şekil 5.1. (a) Penetrasyon deney aleti ve (b) deney numuneleri

## B) Yumuşama noktası deneyi

Bitümlerin sıcaklığa karşı olan duyarlılıklarını ölçmek için yapılan bir deneydir. Diğer bir deyişle bitümün akmaya başladığı sıcaklık yumuşama noktasıdır. Yüzük-bilya yöntemiyle yapılır. Standart kalınlık ve çapta bir bilyanın içerisine bitüm numunesi yerleştirilir ve yine standart çap ve ağırlıktaki bir bilya

numune üzerine konulur. 5°C sıcaklıktaki suyun içine yerleştirilirler ve sıcaklık dakikada 5°C artacak şekilde ayarlanır. Aynı anda iki numune ile deney yapılır ve sıcaklığın etkisiyle yumuşayan numunelerin alt plakaya değdiği andaki sıcaklık yumuşama noktası olarak belirlenir.

Yumuşama noktası deneyi sonuçları Çizelge 5.3'te ve yumuşama noktası deney aleti Şekil 5.2'de verilmiştir.

**Çizelge 5.3.** Yumuşama noktası deneyi sonuçları

°C	#1	#2	#3	#4
<b>Katkısız Bitüm</b>	48.2	48.3	49.2	50.2
<b>Katlı Bitüm</b>	55.0	55.1	55.0	55.1



(a)



(b)

**Şekil 5.2.** (a) Yumuşama noktası deney aleti ve (b) deney numuneleri

### C) Düktilite deneyi

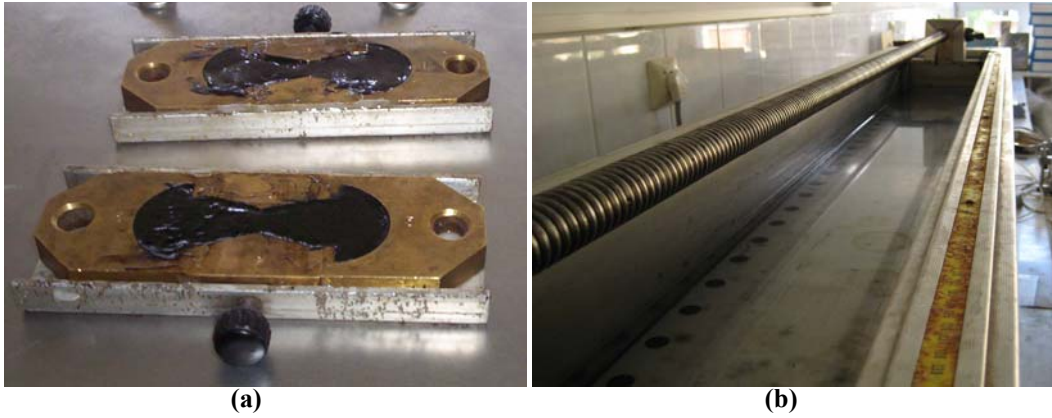
Düktilitenin kelime anlamı uzama veya çekilebilme demektir. Düktilite değeri yüksek olana bitümler, düşük düktiliteye sahip bitümlere göre daha fazla bağlama yeteneğine sahiptirler. Standart bir kalıp içerisine konulan bitüm

numunesi 25°C sıcaklıktaki suyun içerisinde dakikada 5 cm hızla çekilir. Numunenin koptuğu andaki değeri bitümün duktilite değerini verir. 100'ün üzerinde çıkan değerler +100 olarak belirtilirler.

Duktilite deneyi sonuçları Çizelge 5.4'te ve deney aleti Şekil 5.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.4. Duktilite deneyi sonuçları

<i>cm</i>	#1	#2	#3
<b>Katkısız Bitüm</b>	+100	+100	+100
<b>Katkılı Bitüm</b>	+100	+100	+100



Şekil 5.3. (a) Duktilite deneyi numuneleri ve (b) deney aleti

#### D) Parlama ve yanma noktası deneyi (Cleveland Kabı)

Parlama noktası, ısıtılan bitüm numunesinin üstündeki buharın alev ile temasında ilk parladığı andaki sıcaklık “parlama noktası sıcaklığı” ve 5 saniye süre ile yanmaya devam ettiği sıcaklık ise “yanma noktası sıcaklığı”dır. Bu sıcaklıklar bitümün arazide depolama sırasında güvenli bir biçimde ısıtılabilceği sıcaklıklardır. Bitüm numunesi akıcı kıvama gelene kadar ısıtılır ve deney kabına dökülür. İlk olarak sıcaklık dakikada 14-17°C artacak biçimde artırılır. Tahmini parlama noktası sıcaklığına 28°C yaklaşıldığı andan itibaren ise dakikada ortalama 5.5°C artacak şekilde olmalıdır. Numune üzerinde parlama ve yanma görüldüğü sıcaklıklar bitümün “parlama ve yanma” sıcaklıklarıdır.

Parlama ve yanma noktası deneyi sonuçları Çizelge 5.5'te ve deney aleti Şekil 5.4'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.5. Parlama ve yanma noktası deneyi sonuçları

°C	Parlama Noktası	Yanma Noktası
Katkısız Bitüm	329	373
Katkılı Bitüm	341	376



Şekil 5.4. (a) Parlama ve yanma noktası deney numunesi ve (b) deney aleti

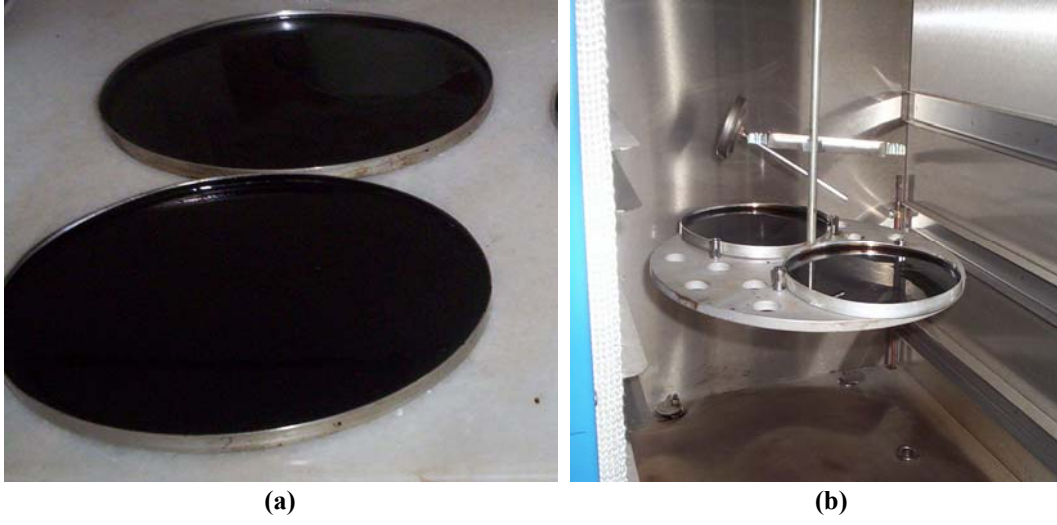
#### E) İnce film halinde ısıtma kaybı

Bitümün yüksek sıcaklıkta uzun süre kalması sonucu yaşlanmasını örneklemek amacıyla yapılan bir deneydir. Deneyde amaç, bu işlem sırasında bitümde oluşacak olan kütle kaybının belirlenmesidir. Yaklaşık olarak 50.72 gr bitüm numunesi deney kaplarına yerleştirilir. Bu miktar standart deney kabında 3.2 mm'lik bir yüksekliği kaplayacak miktardaki bitüme denk gelmektedir. Numuneler sıcaklığı 163°C'ye getirilmiş fırında 5 saat 15 dakika boyunca dakikada 5-6 devir yapacak şekilde döndürülür. Deneyden önce ve bu sürenin sonunda numuneler tartılır, kütle kayıpları hesaplanır.

Deney sonuçları Çizelge 5.6'da, deney aleti ve numuneleri Şekil 5.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi sonuçları

gr	#1		#2		#3		#4	
	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra
Katkısız Bitüm	76.748	76.721	76.772	76.762	76.585	76.584	76.545	76.523
Katkılı Bitüm	76.488	76.448	76.516	76.477	76.835	76.791	76.673	76.628



Şekil 5.5. (a) İnce film halinde ısıtma kaybı deneyi numuneleri ve (b) deney aleti

#### F) Özgül ağırlık

Karışım hesaplarında kullanılacak olan bitümün özgül ağırlığı piknometre yöntemiyle belirlenmiştir. Bu yöntemde, boş piknometre ağırlığı, saf su ile dolu piknometre ağırlığı, yarısına kadar bitüm ile dolu piknometre ağırlığı ve yarısı bitüm geri kalanı saf su ile dolu piknometrenin ağırlığı belirlenir. Denklem (5.1) kullanılarak bitümün özgül ağırlığı hesaplanır.

$$\text{Özgül ağırlık} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)} \quad (5.1)$$

Burada;

- a: Boş piknometre ağırlığı, gr      b: Saf su ile dolu piknometre ağırlığı, gr  
c: Yarısına kadar bitüm dolu piknometre ağırlığı, gr  
d: Yarısı bitüm + geri kalanı saf su dolu piknometre ağırlığı, gr

Özgül ağırlık deney sonuçları Çizelge 5.7 ve 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Bitümün özgül ağırlık deneyi sonuçları (Katkısız Bitüm)

gr	#1	#2
a	25.376	25.640
b	74.942	75.474
c	52.458	53.776
d	75.697	76.278
Özgül Ağırlık	1029 kg/m <sup>3</sup>	1029 kg/m <sup>3</sup>
Özgül Ağırlık	1029 kg/m <sup>3</sup>	

**Çizelge 5.8.** Bitümün özgül ağırlık deneyi sonuçları (Polipropilen Katkılı Bitüm)

<i>gr</i>	#1	#2
a	25.376	25.640
b	74.942	75.474
c	54.752	55.283
d	75.595	75.850
Özgül Ağırlık	1023 kg/m <sup>3</sup>	1013 kg/m <sup>3</sup>
Özgül Ağırlık	1018 kg/m <sup>3</sup>	



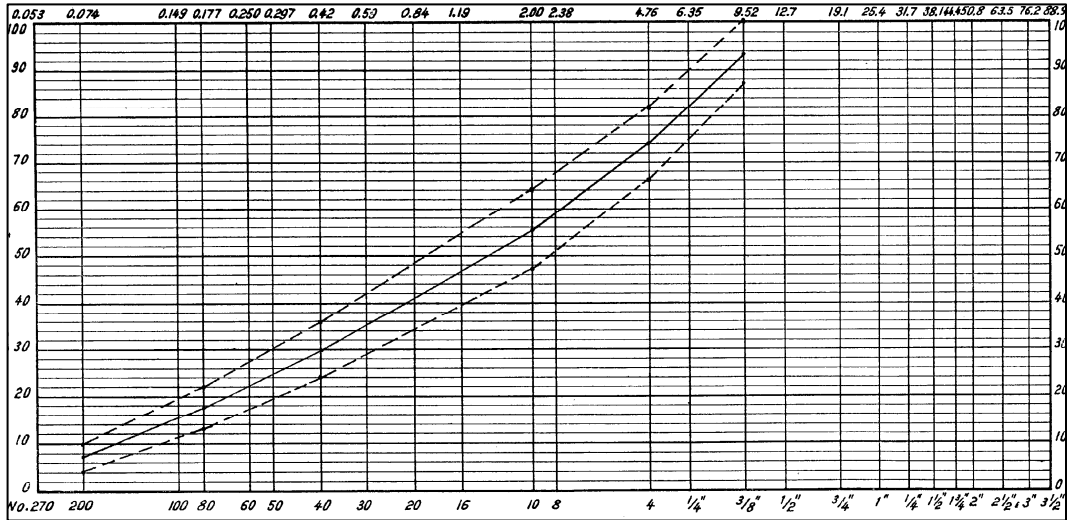
**Şekil 5.6.** Bitümün özgül ağırlığı deneyi numuneleri

### 5.1.2. Agregat

Bu çalışmada kullanılan kırmataş agregalar Eskişehir Güçlü Hazır Beton Santrali'nden temin edilmiştir. Hazırlanacak olan karışımlarda Karayolu Teknik Şartnamesi'nde belirlenmiş olan “Aşınma Tabakası için Tip-2” gradasyonu kullanılmıştır [27]. Deneylerde kullanılacak olan agregalar Çizelge 5.9'da belirtilen agregat gradasyonuna göre elenmiştir. Karışımlarda toplam 1100 gr agregat kullanılmıştır. Agregat gradasyon değerleri ve her elek için kullanılan agregat miktarları Çizelge 5.9'da, kullanılan agregalara ait granülometri eğrisi Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.9. Aşınma tabakası Tip-2 için agrega gradasyonu ve şartname limitleri [27]

Elek Boyutu (mm)	Şartname Limitleri	% Geçen	% Kalan	Ağırlık (gr)
12.7	100	0	0	
9.52	80-100	10.0	10.0	110.0
4.76	55-72	26.5	36.5	291.5
2.00	36-53	19.0	55.5	209.0
0.42	16-28	22.5	78.0	247.5
0.177	8-16	10.0	88.0	110.0
0.074	4-10	5.0	93.0	55.0
Pan		7.0		77.0
			Toplam 1100 gr agrega kullanılmıştır.	



Şekil 5.7. Agregaların granülometri eğrisi

Karışım hesaplarının yapılabilmesi için deneylerde kullanılan agregaların özgül ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla kaba agrega, ince agrega ve fillerin özgül ağırlıkları tespit edilmiştir.

Agreganın özgül ağırlığı, "o agreganın birim hacimdeki ağırlığının, aynı hacimde ve 25°C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Agregaların hacim tanımlamasına bağlı olarak zahiri özgül ağırlık, hacim özgül ağırlık ve yaş hacim özgül ağırlığı olmak üzere üç tane özgül ağırlığı vardır.

### A) Kaba agreganın özgül ağırlığının ve su absorpsiyonunun tespiti

Özgül ağırlığın tespiti için No.4 (4.75mm) eleğin üzerinde kalan agregalardan yani kaba agregalardan temsili olarak 2-2.5 kg alınır. Bir kaba konulan kaba agrega 24 saat su içerisinde bekletilir ve bu süre sonunda iyice kurutulur ve doygun yüzey ağırlığı tartılır. Bunun ardından agregalar bir tel sepete konularak sudaki ağırlığı alınır.

$$\text{Hacim özgül ağırlık} = \frac{A}{B - C} \quad (5.2)$$

$$\text{Yaş hacim özgül ağırlık} = \frac{B}{B - C} \quad (5.3)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{A}{A - C} \quad (5.4)$$

$$\text{Abs. \% 'si} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (5.5)$$

Kaba agreganın özgül ağırlık deneyine ait sonuçlar Çizelge 5.10'da verilmiştir.

**Çizelge 5.10.** Kaba agreganın özgül ağırlıkları ve su absorpsiyonu

A	Kuru malzemenin havadaki ağırlığı, gr	2494.0
B	Doygun yüzey kuru malzemenin ağırlığı, gr	2503.6
C	Sudaki ağırlık, gr	1582.0
Hacim özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>		2703
Yaş hacim özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>		2714
Zahiri özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>		2730
Absorpsiyon yüzdesi, %		0.385

### B) İnce agreganın özgül ağırlığının ve su absorpsiyonunun tespiti

İnce agreganın özgül ağırlığının tespiti için en az 1000 gr ince agrega numunesi alınır ve 200 nolu elekte yıkanarak 24 saat su içerisinde bekletilir. Bu numuneler doygun yüzey kuru hale gelinceye kadar sıcak hava akımına tutulur. Numunelerin serbestçe dökülebildiği anda ince agrega numunesi doygun yüzey kuru hale gelmiş demektir. Bu numuneden yaklaşık 500 gr alınarak piknometreye konular ve tartılır. Piknometre içindeki numune üzeri kapanacak kadar su konularak piknometre çalkalanarak hava kabarcıkları çıkarılır. Daha sonra

piknometrenin kalan kısmı suyla doldurulur ve 25°C'deki su banyosunda bekletildikten sonra tartılır. Son olarak ise piknometreden çıkarılan ince agrega bir tepsiye konularak 110°C'de kurutulur ve tartılır. İnce agreganın özgül ağırlık deneyine ait sonuçlar Çizelge 5.11'de verilmiştir.

$$\text{Hacim özgül ağırlık} = \frac{E}{B + C - A - D} \quad (5.6)$$

$$\text{Yaş hacim özgül ağırlık} = \frac{C - A}{B + C - A - D} \quad (5.7)$$

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{E}{B + E - D} \quad (5.8)$$

$$\text{Abs. \% 'si} = \frac{C - A - E}{E} \times 100 \quad (5.9)$$

**Çizelge 5.11.** İnce agreganın özgül ağırlıkları ve su absorpsiyonu

		#1	#2	Ortalama
A	Piknometre ağırlığı, gr	181.021	175.380	
B	Piknometre+su ağırlığı, gr	1177.210	1171.230	
C	Piknometre+doğgun yüzey numune ağırlığı, gr	616.790	575.790	
D	Piknometre+su+numune ağırlığı, gr	1448.840	1421.640	
E	Kuru numune ağırlığı, gr	426.970	392.840	
	Hacim özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	2601	2619	2610
	Yaş hacim özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	2655	2669	2662
	Zahiri özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	2749	2758	2750
	Absorpsiyon yüzdesi, %	2.061	1.927	1.994

### C) Fillerin özgül ağırlığının tespiti

Fillerin sadece zahiri özgül ağırlığı hesaplanmaktadır. İlk olarak piknometrenin boş ağırlığı ve su ile dolu ağırlığı ölçülür. Daha sonra filler malzemesi şişenin üçte biri dolacak kadar piknometrenin içine konular. Ağzı kapatılan piknometre şişesi bir vakum desikatörde basınca maruz bırakılarak içerisindeki hava alınır ve bu işlem sonunda piknometre tartılır. Fillerin özgül ağırlık deneyine ait sonuçlar Çizelge 5.12'de verilmiştir.

$$\text{Zahiri özgül ağırlık} = \frac{A}{A + B - C} \quad (5.10)$$

**Çizelge 5.12.** Fillerin özgül ağırlığı

		#1	#2	Ortalama
A	Kuru numune ağırlığı, gr	25.15	25.09	
B	Piknometre+su ağırlığı, gr	139.93	139.93	
C	Piknometre+su+numune ağırlığı, gr	156.07	156.02	
	Zahiri özgül ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	2791	2788	2790

### 5.1.3. Polipropilen Fiber

Deneysel çalışmalardaki katkı malzemesi olarak polipropilen fiberler kullanılmıştır. Polipropilen fiberlerin üç farklı tipi değişik oranlarda karışımlara katılmışlardır. Fiber tipleri ve karışımlara katılma oranları aşağıda sıralanmıştır.

1. M-03 tipi Polipropilen fiber
  - a. %0 3.0
  - b. %0 4.5
  - c. %0 6.0
2. M-09 tipi Polipropilen fiber
  - a. %0 3.0
3. Atık Polipropilen fiber
  - a. %0 3.0

Karışımlarda kullanılan polipropilen fiber tipleri olan M-03, M-09 ve Atık Polipropilen fiberler sırasıyla Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



**Şekil 5.8.** M-03 tipi polipropilen



**Şekil 5.9.** M-09 tipi polipropilen



**Şekil 5.10.** Atık polipropilen

## **5.2. Marshall Deneyi**

Bu metot, Marshall stabilite ve akma deney aleti yardımıyla bitümlü sıcak karışımlar ile hazırlanan silindirik numunelerin yanıl yüzeylerine yükleme yapılması ile plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsar. Ülkemiz karayollarında bitümlü sıcak karışımlara uygulanan stabilite deneyi “Marshall stabilite ve akma” deneyidir. Bu deney esas olarak bir serbest basınç deneyi olup numuneye yük uygulandığı sırada numune tamamen sınırlanmaz.

### 5.2.1. Katkısız Marshall numunelerinin hazırlanması

Deneylede kullanılacak numunelerin hazırlanmasında ASTM D 1559-76 [28] standardı kullanılmıştır. İlk olarak hazırlanacak olan bitümlü sıcak karışımlarda kullanılacak olan agregalar Çizelge 5.9'da belirtilmiş olan eleklerden elenerek depolanır. Karışımlarda toplam 1100 gr agregaya kullanılmıştır ve her elekten Çizelge 5.9'daki gradasyona göre gerekli miktarlarda tartılarak tepsilere alınır. Agregalar 170°C sıcaklığa ayarlanmış fırında 24 saat kurumaya bırakılır.

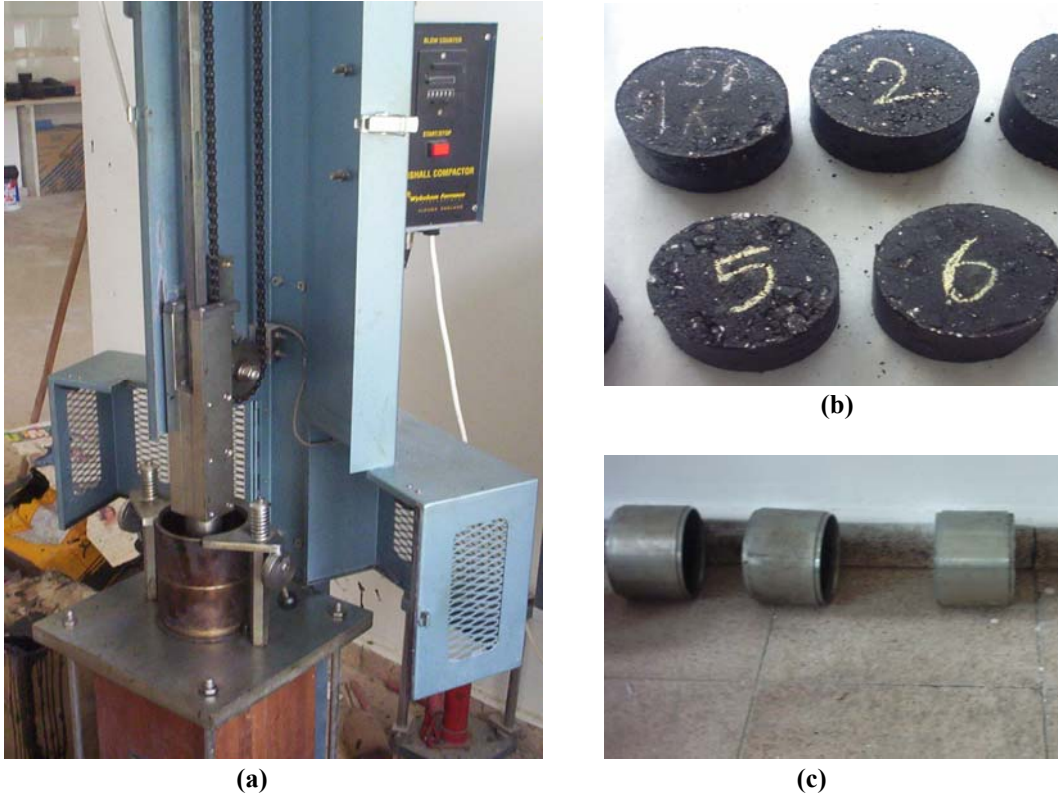
Karışımlarda kullanılacak olan bitüm deneyden önce 170°C sıcaklığa getirilir. Karışımların hazırlanmasında kullanılacak olan karıştırma kabı, karıştırıcı vb. diğer malzemeler de karışım yapılmadan önce ısıtılmalıdır. Bunun nedeni ise malzemelerin birbirine iyi karışmasını sağlamaktır. Karıştırma kabına önce agregalar ve ardından gerekli miktarda bitüm eklenerek karışım hazırlanır. Karıştırma süresi en az 2 dakika olmalıdır ve sürekli bir ısıtma sağlanmalıdır.

Optimum bitüm muhtevasının hesaplanması için hazırlanan karışımların hepsinde agregaya ağırlığının yüzdesi cinsinden %3.5'tan %7.0'ye kadar ve 0.5'lik artışlar olan sekiz adet bitüm muhtevası kullanılmıştır. Karışımlar için özellikle %3.5 bitüm değeri düşük, %6.5 ve %7.0 değerleri ise çok yüksek değerler olmasına karşın elde edilecek sonuçların daha tutarlı ve kesin olmaları açısından bu şekilde geniş bir aralık kullanılmıştır.

Karıştırma işleminin tamamlanmasının ardından hazırlanan karışım 101.6 mm çapında ve 76.2 mm yüksekliğindeki kalıba üç aşamada ve her aşamada 20-25 adet şişleme yapılarak doldurulur. Kalıbın altına ve üstüne yağlı kağıtlar konulur. Hazırlanan bu kalıp Marshall tokmağına yerleştirilir ve her iki yüzüne 50'şer vuruş yapılarak sıkıştırılır. Marshall tokmağı serbest düşüş yapmaktadır, ağırlığı 4536 gr ve düşüş yüksekliği ise 457.2 mm'dir. Kalıplar en az yarım saatlik bir soğumaya bırakılırlar ve bu sürenin ardından kalıptan çıkarılırlar. Numuneler Marshall stabilite ve akma deneyi yapılmadan önce en az 24 saat oda sıcaklığında bekletilir ve yükseklikleri, havada ve suda ağırlıkları alınarak Marshall deney formlarına yazılırlar. Bütün karışımlarda her karışım türünden 3'er adet numune hazırlanmıştır. Ayrıca katkısız olarak hazırlanan karışımlardan 2 seri hazırlanmış ve deneyler sonucunda bulunan optimum bitüm muhtevası değerlerinin ortalaması alınmıştır. Şekil 5.11 ve 5.12'de deney prosedürü görülmektedir.



Şekil 5.11. (a) Kullanılan agregalar ve (b) sıcak karışımın hazırlanması



Şekil 5.12. (a) Marshall tokmağı (b) Marshall numuneleri ve (c) tokmaktan çıkan numuneler

### 5.2.2. Polipropilen katkılı Marshall numunelerinin hazırlanması

DeneySEL çalışmaların amacı olan polipropilen fiberlerin karışımlar üzerindeki etkilerinin incelenmesi için hazırlanacak numuneler Bölüm 5.2.1’de anlatıldığı şekilde yapılmışlardır. Burada katkı olarak polipropilen fiberler bitüme eklenerek bir karışım hazırlanmıştır. Bitüm katkı maddesi olarak Bölüm 5.1.3’te anlatılan üç çeşit polipropilen kullanılmıştır. Katkı oranları ise agrega ağırlığı

cinsinden %03, %04.5 ve %06 olarak belirlenmiştir. Ancak ilk olarak her polipropilen fiber katkısı için %03 katkı oranı ile deneyler yapılmış ve en uygun fiber tipi M-03 tipi polipropilen olarak belirlenmiştir. Bu belirlemede, katkının bitümle homojen karışıp karışmaması, hazırlanan karışımın çalışılabilirliği ve Marshall deneyinin sonucunda elde edilen stabilite ve akma değerleri göz önünde tutulmuştur.

En uygun polipropilen fiber tipi belirlendikten sonra M-03 tipi için %03'ün yanında %04.5 ve %06 fiber oranlarında da deneyler yapılarak optimum fiber tipi ile birlikte optimum fiber oranı belirlenmeye çalışılmıştır. En optimum olarak %03 oranda M-03 tipi polipropilen fiber belirlenmiştir.

Katkılı bitümün hazırlanmasında ilk olarak gerekli miktarda polipropilen fiber tartılır. Daha önceden ısıtılmış ve akıcı duruma gelmiş olan bitüme fiberler yavaş yavaş eklenerek, fiberlerin homojen olarak karışması sağlanmıştır. Bütün fiberlerin eklenmesinin ardından karışımın sıcaklığı 160-170°C'de sabit tutulmuştur. Hazırlanan bu karışım yaklaşık olarak 2 saat süresince dakikada 500-700 devir yapacak şekilde ayarlanan mikser ile sürekli olarak karıştırılmıştır. Bunun amacı bitüme eklenen fiberlerin karışım içerisinde homojen olarak dağılması ve tam olarak karışmasını sağlamaktır. Bu sürenin sonunda karışımların hazırlanması işlemine katkısız numunelerdeki gibi devam edilmiştir. Kullanılan mikser Şekil 5.13'te görülmektedir.



Şekil 5.13. Katkılı bitümün karıştırıldığı mikser

### 5.2.3. Marshall deneyinin yapılması

Hazırlanan numuneler Marshall stabilite ve akma deneyi için öncelikle 60°C'deki su banyosuna yerleştirilir. Bunun nedeni ise bitümün yumuşama noktası sıcaklığı civarında deneyi gerçekleştirmektir. Bunun için numuneler 30 dakika su banyosunda bekletilir. Su banyosundan çıkarılan numuneler havluyla hemen kurularak, Marshall deney aletine yerleştirilirler.

Marshall aletinin yükleme kafası numuneye 50.8 mm/dakika olacak şekilde bir yük uygulamaktadır. Numune yerleştirilip, yük uygulanmaya başlandıktan bir süre sonra maksimum stabiliteye ulaşılır ve buradan sonra stabilite ve akma göstergeleri sabitlenir. Bu stabilite ve akma değerleri Marshall deney formlarına yazılır. Bu şekilde bütün numunelerin stabilite ve akma değerleri elde edilir. Bütün bu deney işlemleri, yani su banyosundan çıkarılıp deneyin sonuna kadar olan işlemler 30 saniyelik bir süre içerisinde gerçekleştirilmelidir. Aksi takdirde numuneler soğuyacak ve stabilite değeri daha yüksek, akma değeri daha düşük çıkacaktır. Son olarak da numunelerin yüksekliğine bağlı olarak stabilite düzeltme tablosuna göre stabilite düzeltmesi yapılarak Marshall stabilitesi elde edilir. Akma değerlerinde ise herhangi bir düzeltme yapılmasına gerek yoktur.

### 5.2.4. Marshall deneyinin sonuçları

Marshall deney formlarının doldurulmasında ve hazırlanan karışımların optimum bitüm muhtevasının belirlenmesinde kullanılacak olan “maksimum teorik özgül ağırlık” değeri (5.11) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Maksimum Teorik Özgül Ağırlık} = \frac{\%P_{Kaba} + \%P_{İnce} + \%P_{Filler} + \%P_{Bitüm}}{\frac{\%P_{Kaba}}{SG_{Kaba}} + \frac{\%P_{İnce}}{SG_{İnce}} + \frac{\%P_{Filler}}{SG_{Filler}} + \frac{\%P_{Bitüm}}{SG_{Bitüm}}} \quad (5.11)$$

Katkısız olarak hazırlanan 2 seri karışım, M-03 tipi polipropilenin %03, %04.5 ve %06 katkı oranları, M-09 tipi polipropilenin %03 katkı oranı ve atık polipropilenin %03 katkı oranında yapılan Marshall deneylerinin sonuçları Çizelge 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 ve 5.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.13. Marshall deney sonuçları (Optimum 1. seri)

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA					
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ								
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ								
AC	AC	BİRİKET	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE		AKMA					
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	e	g	h	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel		Düzeltilmiş	Düzeltilmiş			
a	b	c	d	e	f	e	e	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+)																					
1	3.500	3.382	60.000	1133.000	655.700	477.300	2374	2599	7.801	83.188	9.011	16.812	46.402	8.660	2374	1336.000	1.10	1469.600	2.881	11.343		
2	3.500	3.382	60.000	1134.800	655.800	479.000	2369	2599	7.786	83.025	9.190	16.975	45.864	8.839	2369	1278.000	1.10	1405.800	2.243	8.831		
3	3.500	3.382	60.000	1130.400	652.200	478.200	2364	2599	7.768	82.841	9.391	17.159	45.273	9.041	2364	1201.000	1.10	1321.100	2.001	7.878		
Ort.							2369	2599	7.785	83.018	9.197	16.982	45.847	8.847	2369				1398.833		2.375	

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA					
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ								
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ								
AC	AC	BİRİKET	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE		AKMA					
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	e	g	h	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel		Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş		
a	b	c	d	e	f	e	e	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+)																					
4	4.000	3.846	60.000	1139.000	664.000	475.000	2398	2580	8.963	83.630	7.408	16.370	54.750	7.055	2398	1326.000	1.10	1438.600	2.804	11.039		
5	4.000	3.846	60.000	1137.300	665.000	472.300	2408	2580	9.001	83.982	7.017	16.018	56.191	6.663	2408	1304.000	1.10	1454.400	2.303	9.067		
6	4.000	3.846	59.000	1140.300	669.000	471.500	2419	2580	9.041	84.361	6.597	15.639	57.813	6.241	2419	1489.000	1.13	1682.570	2.611	10.280		
Ort.							2408	2580	9.001	83.991	7.007	16.009	56.251	6.653	2408				1525.190		2.573	

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA					
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ								
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ								
AC	AC	BİRİKET	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE		AKMA					
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	e	g	h	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel		Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş		
a	b	c	d	e	f	e	e	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+)																					
7	4.500	4.306	59.000	1142.100	674.800	467.300	2444	2561	10.228	84.831	4.941	15.169	67.427	4.583	2444	1342.000	1.13	1516.460	2.662	10.480		
8	4.500	4.306	59.000	1141.400	672.100	469.300	2432	2561	10.178	84.418	5.404	15.382	65.319	5.048	2432	1410.000	1.13	1593.300	2.339	9.209		
9	4.500	4.306	59.000	1144.200	675.300	468.700	2441	2561	10.216	84.753	5.051	15.267	66.918	4.693	2441	1395.000	1.13	1576.350	2.803	11.035		
Ort.							2439	2561	10.207	84.661	5.132	15.339	66.555	4.775	2439				1562.037		2.601	



Çizelge 5.13. (Devam) Marshall deney sonuçları (Optimum 1. seri)

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA							
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK		Düzeltilmiş		1/100 "							
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOSLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		Düzeltilmiş		1/100 "							
AC	BİRİKET	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK	AGREGA	HAVA BOSLUĞU	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA						
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>						
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına a/(100+a)						d/(d+e)		b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-l+j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.		s/0,254		
19	6.500	6.103	59.000	1138.000	673.800	464.200	2432	14.541	83.493	1.966	16.507	88.089	1.614	2452	720.000	1.13	813.600	5.347	21.051
20	6.500	6.103	60.000	1154.400	680.000	474.400	2433	14.433	82.875	2.692	17.125	84.283	2.342	2433	775.000	1.10	852.500	5.706	22.465
21	6.500	6.103	59.000	1149.800	670.000	479.800	2396	14.214	81.616	4.170	18.384	77.316	3.826	2396	769.000	1.13	868.970	5.173	20.366
Ort.							2427	14.396	82.662	2.943	17.338	83.229	2.594	2427			845.023	5.409	

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA							
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK		Düzeltilmiş		1/100 "							
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOSLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		Düzeltilmiş		1/100 "							
AC	BİRİKET	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK	AGREGA	HAVA BOSLUĞU	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA						
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>						
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına a/(100+a)						d/(d+e)		b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-l+j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.		s/0,254		
22	7.000	6.542	60.000	1168.200	686.100	482.100	2423	15.406	82.141	2.453	17.859	86.262	2.107	2423	675.000	1.10	742.500	6.140	24.173
23	7.000	6.542	62.000	1185.000	690.200	494.800	2395	15.226	81.184	3.590	18.816	80.919	3.248	2395	663.000	1.04	689.520	7.155	28.169
24	7.000	6.542	61.000	1163.000	682.500	480.500	2420	15.388	82.048	2.564	17.952	85.716	2.218	2420	678.000	1.07	725.460	7.390	29.094
Ort.							2413	15.340	81.791	2.869	18.209	84.299	2.324	2413			719.160	6.895	

Çizelge 5.14. Marshall deney sonuçları (Optimum 2. seri)

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA			
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup>					AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>					DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ						
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>					HACİM (Toplama Göre) %					BOŞLUK ORANI (%)			DENEYSEL				DÜZELTİMİŞ		
AC	AC	BİRİKET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	HACİM	AGIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	AGREGA	HAVA BOŞLUĞU	AGREGA	ASTIFALTA DOLU	TOPLAM KARIŞIM	BİRİM AĞIRLIK	DENEYSEL	DÜZELTİMİŞ	FAKTÖRÜ	DÜZELTİMİŞ	FAKTÖRÜ	AKMA
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d-e	g	f	e	i	j	k	l	m	o	p	q	r	s	r	s/0,254
a	b	c	d	e	d-e	g	f	e	i	j	k	l	m	o	p	q	r	s	r	s/0,254
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre									b*g/(SG <sub>ast</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	
25	3.500	3.382	60.000	1132,600	659,200	473,400	2392	2599	7,862	83,844	8,294	16,156	48,666	7,940	2392	1467,000	1,10	1613,700	1,844	7,260
26	3.500	3.382	61.000	1136,500	638,500	478,000	2378	2599	7,814	83,323	8,863	16,677	46,833	8,512	2378	1192,000	1,07	1275,440	1,959	7,713
27	3.500	3.382	61.000	1131,700	636,000	475,700	2379	2599	7,818	83,372	8,810	16,628	47,019	8,458	2379	1294,000	1,07	1384,380	2,553	10,051
Ort.						2383	2599		7,831	83,513	8,656	16,487	47,512	8,303				1424,573		2,119

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA			
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup>					AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>					DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ						
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>					HACİM (Toplama Göre) %					BOŞLUK ORANI (%)			DENEYSEL				DÜZELTİMİŞ		
AC	AC	BİRİKET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	HACİM	AGIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	AGREGA	HAVA BOŞLUĞU	AGREGA	ASTIFALTA DOLU	TOPLAM KARIŞIM	BİRİM AĞIRLIK	DENEYSEL	DÜZELTİMİŞ	FAKTÖRÜ	DÜZELTİMİŞ	FAKTÖRÜ	AKMA
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d-e	g	f	e	i	j	k	l	m	o	p	q	r	s	r	s/0,254
a	b	c	d	e	d-e	g	f	e	i	j	k	l	m	o	p	q	r	s	r	s/0,254
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre									b*g/(SG <sub>ast</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	
28	4.000	3.846	59.000	1133,100	665,800	467,300	2425	2580	9,063	84,367	6,369	15,433	38,727	6,013	2425	1470,000	1,13	1661,100	2,137	8,413
29	4.000	3.846	60.000	1135,000	663,300	471,700	2406	2580	8,994	83,919	7,087	16,081	55,928	6,733	2406	1353,000	1,10	1488,300	4,193	16,508
30	4.000	3.846	60.000	1133,400	663,000	470,400	2409	2580	9,006	84,032	6,962	15,968	56,400	6,607	2409	1309,000	1,10	1439,900	1,971	7,760
Ort.						2413	2580		9,021	84,173	6,806	15,927	57,018	6,451				1529,767		2,767

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA			
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup>					AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>					DENEYSEL			DÜZELTİMİŞ						
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>					HACİM (Toplama Göre) %					BOŞLUK ORANI (%)			DENEYSEL				DÜZELTİMİŞ		
AC	AC	BİRİKET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	HACİM	AGIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	AGREGA	HAVA BOŞLUĞU	AGREGA	ASTIFALTA DOLU	TOPLAM KARIŞIM	BİRİM AĞIRLIK	DENEYSEL	DÜZELTİMİŞ	FAKTÖRÜ	DÜZELTİMİŞ	FAKTÖRÜ	AKMA
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d-e	g	f	e	i	j	k	l	m	o	p	q	r	s	r	s/0,254
a	b	c	d	e	d-e	g	f	e	i	j	k	l	m	o	p	q	r	s	r	s/0,254
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre									b*g/(SG <sub>ast</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-k	100-l	100-m	100-n	100-p	100-q	100-r	100-s	100-t	
31	4.500	4.306	58.000	1121,700	666,500	453,200	2464	2561	10,312	85,531	4,157	14,469	71,270	3,796	2464	1317,000	1,16	1759,720	3,812	15,008
32	4.500	4.306	59.000	1137,200	684,700	472,300	2449	2561	10,249	85,007	4,744	14,993	68,338	4,385	2449	1400,000	1,13	1582,000	2,369	9,327
33	4.500	4.306	59.000	1138,700	673,600	465,100	2448	2561	10,246	84,979	4,776	15,021	68,208	4,417	2448	1414,000	1,13	1597,820	2,205	8,681
Ort.						2454	2561		10,269	85,172	4,559	14,828	69,279	4,199				1646,513		2,795



Çizelge 5.14. (Devam) Marshall deney sonuçları (Optimum 2. seri)

BİRKEF NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																		
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																		
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																		
AC %	AC %	BİRKEF YÜKSEKLİĞİ (mm)	HACİM Suda	ÖZGÜL AĞIRLIK (Teorik)	HACİM Asfalt	HAVA BOŞLUĞU Agrega	BOŞLUK ORANI (%) Asfaltla Dolu	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	DENEYSEL Düzeltilmiş	FAKTÖRÜ	DENEYSEL Düzeltilmiş	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	DENEYSEL Düzeltilmiş	FAKTÖRÜ	AKMA L/100 "				
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+a)					d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/1 * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.	s	t		
43	6.500	6.103	59.000	1160.900	685.600	475.300	2442	14.487	83.184	2.329	16.816	86.150	1.978	2442	780.000	1.13	881.400	5.662	22.291
44	6.500	6.103	60.000	1170.500	690.800	479.700	2440	14.473	83.103	2.425	16.897	85.651	2.074	2440	705.000	1.10	775.500	6.089	23.972
45	6.500	6.103	59.000	1154.400	681.200	473.200	2440	14.470	83.085	2.445	16.915	85.546	2.094	2440	717.000	1.13	810.210	5.645	22.224
Ort.							2441	14.476	83.124	2.399	16.876	85.783	2.049	2441			822.370		5.799

BİRKEF NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																		
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																		
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																		
AC %	AC %	BİRKEF YÜKSEKLİĞİ (mm)	HACİM Suda	ÖZGÜL AĞIRLIK (Teorik)	HACİM Asfalt	HAVA BOŞLUĞU Agrega	BOŞLUK ORANI (%) Asfaltla Dolu	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	DENEYSEL Düzeltilmiş	FAKTÖRÜ	DENEYSEL Düzeltilmiş	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	DENEYSEL Düzeltilmiş	FAKTÖRÜ	AKMA L/100 "				
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+a)					d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/1 * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.	s	t		
46	7.000	6.542	59.000	1162.000	683.000	479.000	2426	15.423	82.234	2.343	17.766	86.811	1.996	2426	672.000	1.13	759.360	7.275	28.642
47	7.000	6.542	59.000	1163.500	686.400	477.100	2439	15.504	82.668	1.828	17.332	89.435	1.479	2439	667.000	1.13	753.710	6.986	27.504
48	7.000	6.542	61.000	1166.400	682.500	483.900	2410	15.325	81.709	2.966	18.291	83.784	2.621	2410	705.000	1.07	754.350	7.408	29.165
Ort.							2425	15.417	82.204	2.379	17.796	86.683	2.032	2425			755.807		7.223

Çizelge 5.15. Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0,3)

BİRKEET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																	
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																	
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																	
AC	AC	BİRKEET	AĞIRLIK (gr)		HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	mm	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre			d-e			d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h		p * Düzeltilme F.		s	s/0,254
1	3,500	3,382	60,000	1126,600	648,000	478,600	2354	7,736	82,494	9,771	17,506	44,189	9,422	1372,000	1,10	1509,200	2,248	8,850
2	3,500	3,382	60,000	1134,600	651,300	483,300	2348	7,715	82,271	10,014	17,729	43,517	9,666	1465,000	1,10	1611,500	3,115	12,264
3	3,500	3,382	60,000	1132,200	652,300	479,900	2359	7,753	82,679	9,568	17,321	44,762	9,219	1443,000	1,10	1587,300	2,596	10,220
Ort.						2354	2599	7,735	82,481	9,784	17,519	44,156	9,436			1569,333		2,653

BİRKEET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																	
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																	
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																	
AC	AC	BİRKEET	AĞIRLIK (gr)		HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	mm	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre			d-e			d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h		p * Düzeltilme F.		s	s/0,254
4	4,000	3,846	60,000	1136,800	661,900	474,900	2394	8,947	83,486	7,567	16,514	54,179	7,215	1635,000	1,10	1798,500	2,896	11,402
5	4,000	3,846	60,000	1136,600	662,200	474,400	2396	8,955	83,559	7,486	16,441	54,468	7,133	1730,000	1,10	1903,000	3,102	12,213
6	4,000	3,846	60,000	1138,100	661,500	476,600	2388	8,926	83,283	7,791	16,717	53,392	7,440	1703,000	1,10	1873,300	2,958	11,646
Ort.						2393	2580	8,943	83,443	7,615	16,557	54,013	7,263			1838,267		2,985

BİRKEET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																	
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																	
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																	
AC	AC	BİRKEET	AĞIRLIK (gr)		HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA		
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	mm	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre			d-e			d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h		p * Düzeltilme F.		s	s/0,254
7	4,500	4,306	60,000	1131,200	661,700	469,500	2409	10,083	83,628	6,289	16,372	61,585	5,936	1681,000	1,10	1849,100	3,688	14,520
8	4,500	4,306	60,000	1131,500	673,400	478,100	2408	10,079	83,597	6,324	16,403	61,448	5,971	1625,000	1,10	1787,500	3,156	12,425
9	4,500	4,306	59,000	1143,500	671,700	471,800	2424	10,143	84,125	5,732	15,875	63,892	5,377	1745,000	1,13	1971,850	2,763	10,878
Ort.						2414	2561	10,102	83,783	6,115	16,217	62,309	5,761			1869,483		3,202

Çizelge 5.15. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkılı-%0 3)

BİRKEET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCİ AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										
	AC			BİRKEET			HACİM			ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA						
	%	a	b	%	c	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	e	f	d	e	f	g	h	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu Agregası	100-j	i/l * 100	m	n	o	p	q	r	s	t	
10	5.000	4.762	59.000	59.000	4.762	1140.600	669.600	471.000	2422	2543	11.207	83.654	5.139	16.346	68.559	4.786	2422	1421.000	1.13	1605.750	2.916	11.480									
11	5.000	4.762	59.000	59.000	4.762	1150.700	679.400	471.300	2442	2543	11.299	84.341	4.360	15.659	72.155	4.004	2442	1557.000	1.13	1759.410	4.251	16.736									
12	5.000	4.762	58.000	58.000	4.762	1141.800	675.400	466.400	2448	2543	11.329	84.568	4.103	15.432	73.413	3.746	2448	1547.000	1.16	1794.520	3.945	15.531									
Ort.									2437	2543	11.278	84.188	4.534	15.812	71.376	4.179	2437														
Ort.																															

BİRKEET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCİ AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>											
	AC			BİRKEET			HACİM			ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA							
	%	a	b	%	c	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	e	f	d	e	f	g	h	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu Agregası	100-j	i/l * 100	m	n	o	p	q	r	s	t		
13	5.500	5.213	59.000	59.000	5.213	1152.100	682.300	469.800	2452	2526	12.424	84.312	3.264	15.688	79.195	2.908	2452	1250.000	1.13	1412.500	3.879	15.272										
14	5.500	5.213	59.000	59.000	5.213	1152.700	682.900	469.800	2454	2526	12.431	84.556	3.214	15.644	79.438	2.858	2454	1259.000	1.13	1400.070	4.562	17.961										
15	5.500	5.213	59.000	59.000	5.213	1154.600	684.300	470.300	2455	2526	12.438	84.405	3.157	15.595	79.756	2.801	2455	1248.000	1.13	1410.240	3.863	15.209										
Ort.									2454	2526	12.431	84.357	3.212	15.643	79.470	2.856	2454															
Ort.																																

BİRKEET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCİ AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>												
	AC			BİRKEET			HACİM			ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA								
	%	a	b	%	c	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	e	f	d	e	f	g	h	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu Agregası	100-j	i/l * 100	m	n	o	p	q	r	s	t			
16	6.000	5.660	58.000	58.000	5.660	1141.000	674.900	466.100	2448	2509	13.466	83.765	2.769	16.235	83.945	2.415	2448	1049.000	1.16	1216.840	4.357	17.154											
17	6.000	5.660	59.000	59.000	5.660	1153.400	682.100	471.300	2447	2509	13.462	83.741	2.797	16.259	82.799	2.443	2447	1187.000	1.13	1339.050	4.724	18.598											
18	6.000	5.660	59.000	59.000	5.660	1156.900	683.700	472.600	2447	2509	13.459	83.721	2.820	16.279	82.676	2.467	2447	1056.000	1.13	1193.280	4.406	17.346											
Ort.									2447	2509	13.462	83.743	2.795	16.257	82.807	2.442	2447																
Ort.																																	

**Çizelge 5.15. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0 3)**

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA											
İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		Düzeltilmiş		1/100 "											
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOSLUK ORANI (%)		Düzeltilmiş		s											
AC	BİRİKET	HACİM		HACİM (Toplama Göre) %		BOSLUK ORANI (%)		Düzeltilmiş		s											
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	cm <sup>3</sup>	gr	Asfalt	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Düzeltilmiş	Faktörü	r										
a	b	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m										
Agrega Ağırlığına a/(100+a)	Göre	d(e)	d/(d-e)	b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-h)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/1 * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.										
19	6.500	6.103	60.000	1150.500	678.000	472.500	2435	2492	14.442	82.927	2.650	17.073	84.593	2.280	2435	1002.000	1.10	1102.200	4.794	18.874	
20	6.500	6.103	60.000	1158.200	682.700	475.500	2436	2492	14.447	82.956	2.597	17.044	84.763	2.247	2436	912.000	1.10	1003.200	6.256	24.650	
21	6.500	6.103	60.000	1167.000	688.000	479.000	2436	2492	14.451	82.975	2.574	17.025	84.880	2.224	2436	906.000	1.10	996.600	5.588	22.000	
Ort.							2436	2492	14.447	82.953	2.601	17.047	84.745	2.250	2436			1034.000		5.546	

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA											
İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		Düzeltilmiş		1/100 "											
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOSLUK ORANI (%)		Düzeltilmiş		s											
AC	BİRİKET	HACİM		HACİM (Toplama Göre) %		BOSLUK ORANI (%)		Düzeltilmiş		s											
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	cm <sup>3</sup>	gr	Asfalt	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Düzeltilmiş	Faktörü	r										
a	b	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m										
Agrega Ağırlığına a/(100+a)	Göre	d(e)	d/(d-e)	b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-h)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/1 * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.										
22	7.000	6.542	61.000	1170.000	686.500	483.500	2420	2475	15.385	82.029	2.586	17.971	85.610	2.240	2420	762.000	1.07	815.340	6.970	27.441	
23	7.000	6.542	60.000	1169.500	686.500	483.000	2421	2475	15.394	82.079	2.527	17.921	85.900	2.181	2421	845.000	1.10	929.500	6.609	26.020	
24	7.000	6.542	60.000	1171.400	687.700	483.700	2422	2475	15.397	82.093	2.510	17.907	85.984	2.163	2422	765.000	1.10	841.500	6.961	27.406	
Ort.							2421	2475	15.392	82.067	2.541	17.933	85.831	2.195	2421			862.113		6.847	

Çizelge 5.16. Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0 4.5)

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																					
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																					
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																					
	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karışım (Teorik)	Hava Boşluğu (mm)	HACİM (Toplama Göre) %	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu (100-h)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	Toplam Karışım	BOSLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Deneysel	Düzeltilmiş	Faktörü	AKMA	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	
1	3,500	3,382	60,000	1126,400	646,500	479,900	2347	2599	7,714	82,255	10,031	17,745	43,470	9,684	2347	1442,000	1,10	1586,200	1,10	1586,200	4,877	19,201
2	3,500	3,382	60,000	1130,500	651,500	479,000	2360	2599	7,756	82,710	9,534	17,290	44,859	9,185	2360	1519,000	1,10	1670,900	1,10	1670,900	3,449	13,579
3	3,500	3,382	61,000	1133,100	650,100	483,000	2346	2599	7,710	82,214	10,077	17,786	43,346	9,730	2346	1523,000	1,07	1629,610	1,07	1629,610	2,455	9,665
Ort.						2351		2599	7,726	82,393	9,881	17,607	43,892	9,533	2351			1628,903				3,594

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																					
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																					
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																					
	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karışım (Teorik)	Hava Boşluğu (mm)	HACİM (Toplama Göre) %	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu (100-h)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	Toplam Karışım	BOSLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Deneysel	Düzeltilmiş	Faktörü	AKMA	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	
4	4,000	3,846	60,000	1138,100	660,000	478,100	2380	2580	8,898	83,022	8,081	16,978	32,406	7,730	2380	1765,000	1,10	1939,300	1,10	1939,300	3,024	11,906
5	4,000	3,846	60,000	1137,200	660,200	477,000	2384	2580	8,911	83,147	7,942	16,853	32,876	7,591	2384	1757,000	1,10	1932,700	1,10	1932,700	3,275	12,894
6	4,000	3,846	60,000	1137,100	658,200	478,900	2374	2580	8,875	82,810	8,315	17,190	31,629	7,965	2374	1612,000	1,10	1773,200	1,10	1773,200	2,831	11,146
Ort.						2380		2580	8,895	82,993	8,112	17,007	32,304	7,762	2380			1881,733				3,043

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																					
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																					
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																					
	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karışım (Teorik)	Hava Boşluğu (mm)	HACİM (Toplama Göre) %	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu (100-h)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	Toplam Karışım	BOSLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Deneysel	Düzeltilmiş	Faktörü	AKMA	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	
7	4,500	4,306	60,000	1143,000	665,400	477,600	2393	2561	10,015	83,067	6,918	16,933	39,147	6,567	2393	1718,000	1,10	1889,800	1,10	1889,800	2,999	11,807
8	4,500	4,306	60,000	1144,200	664,400	479,800	2385	2561	9,980	82,773	7,247	17,227	37,931	6,898	2385	1580,000	1,10	1738,000	1,10	1738,000	3,077	12,114
9	4,500	4,306	60,000	1146,000	666,000	480,000	2388	2561	9,991	82,869	7,140	17,151	38,322	6,790	2388	1818,000	1,10	1999,800	1,10	1999,800	3,647	14,338
Ort.						2388		2561	9,995	82,903	7,102	17,097	38,467	6,752	2388			1875,867				3,241

Çizelge 5.16. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0.4.5)

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																																							
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																																							
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																																							
BİRKEET NO	AC %	BİRKEET %	YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA																					
				Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p		q	r																			
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s/0.254																					
Agrega Ağırlığına a(100+)				HACİM				ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )				HACİM (Toplama Göre) %				BOŞLUK ORANI (%)				BİRİM AĞIRLIK				STABİLİTE (kg)				AKMA											
Göre				d-e				d(d-e)				b*g/(SC <sub>AST</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>				100-i				i/l * 100				100-100g/h				g				p * Düzeltme F.				s			
10	5.000	4.762	60.000	1149.500	673.300	476.200	2414	2543	11.171	83.386	5.443	16.614	67.238	5.091	2414	1791.000	1.10	1970.100	3.446	13.567																			
11	5.000	4.762	60.000	1151.200	673.000	478.200	2407	2543	11.141	83.160	5.699	16.840	66.156	5.348	2407	1670.000	1.10	1837.000	3.001	11.815																			
12	5.000	4.762	59.000	1149.900	674.900	475.000	2421	2543	11.203	83.626	5.171	16.574	68.418	4.818	2421	1853.000	1.13	2093.890	3.281	12.917																			
Ort.						2414	2543	11.171	83.391	5.438	16.609	67.271	5.086	2414		1966.997			3.243																				

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																																							
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																																							
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																																							
BİRKEET NO	AC %	BİRKEET %	YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA																					
				Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p		q	r																			
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s/0.254																					
Agrega Ağırlığına a(100+)				HACİM				ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )				HACİM (Toplama Göre) %				BOŞLUK ORANI (%)				BİRİM AĞIRLIK				STABİLİTE (kg)				AKMA											
Göre				d-e				d(d-e)				b*g/(SC <sub>AST</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>				100-i				i/l * 100				100-100g/h				g				p * Düzeltme F.				s			
13	5.500	5.213	59.000	1146.500	678.200	468.300	2448	2526	12.404	84.171	3.426	15.829	78.358	3.071	2448	1505.000	1.13	1698.390	3.445	13.563																			
14	5.500	5.213	60.000	1156.400	677.900	478.500	2417	2526	12.244	83.088	4.668	16.912	72.397	4.318	2417	1271.000	1.10	1398.100	3.458	13.614																			
15	5.500	5.213	60.000	1155.600	676.100	479.500	2410	2526	12.210	82.857	4.933	17.143	71.224	4.583	2410	1186.000	1.10	1304.600	4.712	18.551																			
Ort.						2425	2526	12.286	83.372	4.342	16.628	73.993	3.991	2425		1467.080			3.872																				

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																																							
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																																							
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																																							
BİRKEET NO	AC %	BİRKEET %	YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA																					
				Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p		q	r																			
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s/0.254																					
Agrega Ağırlığına a(100+)				HACİM				ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )				HACİM (Toplama Göre) %				BOŞLUK ORANI (%)				BİRİM AĞIRLIK				STABİLİTE (kg)				AKMA											
Göre				d-e				d(d-e)				b*g/(SC <sub>AST</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>				100-i				i/l * 100				100-100g/h				g				p * Düzeltme F.				s			
16	6.000	5.660	60.000	1159.500	681.100	478.400	2424	2509	13.332	82.935	3.733	17.065	78.127	3.383	2424	1144.000	1.10	1238.400	4.564	17.969																			
17	6.000	5.660	60.000	1159.900	680.200	479.700	2418	2509	13.301	82.739	3.960	17.261	77.056	3.611	2418	1126.000	1.10	1238.600	3.255	12.815																			
18	6.000	5.660	60.000	1165.600	682.600	483.000	2413	2509	13.275	82.577	4.148	17.423	76.193	3.799	2413	1144.000	1.10	1238.400	4.069	16.020																			
Ort.						2418	2509	13.303	82.750	3.947	17.250	77.125	3.598	2418		1231.800			3.963																				

Çizelge 5.16. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0.4.5)

KABA AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA							
İNCE AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		BOŞLUK ORANI (%)		Deneysel		Düzeltilmiş							
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		Hava Boşluğu		Asfaltta Dolu		Toplam Karışım		Düzeltilmiş							
AC	BİRİKTİ	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK	HACİM	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	AKMA						
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	i	j	k	l	m	p	q	r	s						
a	b	e	d	f	h	g	100-i	100-j	i/1 * 100	100-100g/h	p * Düzeltilme F.	s/0.254	t						
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre				d-e		d/(d-e)	b*g/(SC <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>												
19	6.500	6.103	1165,100	683,300	481,800	2418	2492	14,343	82,359	3,298	17,641	81,305	2,950	2418	1090,000	1,10	1199,000	4,353	17,138
20	6.500	6.103	1160,700	680,100	480,600	2415	2492	14,325	82,253	3,423	17,747	80,714	3,076	2415	1058,000	1,10	1163,800	3,475	13,681
21	6.500	6.103	1168,200	682,500	485,700	2405	2492	14,266	81,915	3,819	18,085	78,882	3,474	2405	1005,000	1,07	1075,350	3,700	14,567
Ort.						2413	2492	14,311	82,175	3,513	17,825	80,300	3,167	2413			1146,050		3,843

KABA AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA							
İNCE AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		BOŞLUK ORANI (%)		Deneysel		Düzeltilmiş							
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		Hava Boşluğu		Asfaltta Dolu		Toplam Karışım		Düzeltilmiş							
AC	BİRİKTİ	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK	HACİM	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Deneysel	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	AKMA						
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	i	j	k	l	m	p	q	r	s						
a	b	e	d	f	h	g	100-i	100-j	i/1 * 100	100-100g/h	p * Düzeltilme F.	s/0.254	t						
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre				d-e		d/(d-e)	b*g/(SC <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>												
22	7.000	6.542	1172,200	686,200	486,000	2412	2475	15,334	81,761	2,905	18,239	84,073	2,560	2412	904,000	1,07	967,280	4,661	18,350
23	7.000	6.542	1174,700	686,400	488,300	2406	2475	15,295	81,549	3,156	18,451	82,894	2,812	2406	896,000	1,07	958,720	4,077	16,031
24	7.000	6.542	1170,600	684,600	486,000	2409	2475	15,313	81,649	3,037	18,351	83,448	2,693	2409	938,000	1,07	1003,660	5,033	19,815
Ort.						2409	2475	15,314	81,653	3,033	18,347	83,472	2,688	2409			976,533		4,590

Çizelge 5.17. Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0,6)

BİRİKTİR NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>												AKMA							
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>												Düzeltilmiş							
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>												p							
AC	AC	BİRİKTİR	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	e	d	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre					d-e	d/(d-e)		b*g/(SG <sub>ast</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g		p * Düzeltilme F.			s	t	u
1	3.500	3.382	61.000	1130.800	643.200	487.600	2319	2599	7.621	81.273	11.106	18.727	40.697	10.763	2319	1384.000	1.07	1480.880	3.399	13.382
2	3.500	3.382	61.000	1129.200	644.900	484.300	2332	2599	7.662	81.711	10.627	18.289	41.896	10.282	2332	1558.000	1.07	1667.060	2.883	11.350
3	3.500	3.382	61.000	1127.300	643.800	483.500	2332	2599	7.662	81.708	10.650	18.292	41.889	10.285	2332	1603.000	1.07	1717.350	2.657	10.461
Ort.							2327	2599	7.649	81.564	10.787	18.436	41.494	10.443	2327			1621.763		2.980

BİRİKTİR NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>												AKMA							
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>												Düzeltilmiş							
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>												p							
AC	AC	BİRİKTİR	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	e	d	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre					d-e	d/(d-e)		b*g/(SG <sub>ast</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g		p * Düzeltilme F.			s	t	u
4	4.000	3.846	61.000	1139.800	654.800	485.000	2330	2580	8.784	81.363	9.253	18.037	48.700	8.907	2350	1641.000	1.07	1735.870	2.518	9.913
5	4.000	3.846	60.000	1136.200	659.900	476.300	2383	2580	8.916	83.196	7.887	16.804	53.062	7.536	2385	1946.000	1.10	2140.600	2.592	10.205
6	4.000	3.846	62.000	1142.900	650.800	492.100	2322	2580	8.681	81.000	10.319	19.000	45.689	9.977	2322	1466.000	1.04	1524.640	2.932	11.543
Ort.							2353	2580	8.794	82.053	9.153	17.947	49.150	8.807	2353			1807.037		2.681

BİRİKTİR NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>												AKMA							
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>												Düzeltilmiş							
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>												p							
AC	AC	BİRİKTİR	AĞIRLIK (gr)		HACİM		ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	cm <sup>3</sup>	f	e	d	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre					d-e	d/(d-e)		b*g/(SG <sub>ast</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g		p * Düzeltilme F.			s	t	u
7	4.500	4.306	62.000	1146.000	654.000	492.000	2329	2561	9.748	80.847	9.405	19.153	50.895	9.064	2329	1669.000	1.04	1735.760	3.112	12.232
8	4.500	4.306	61.000	1140.100	659.500	480.600	2372	2561	9.928	82.339	7.733	17.661	56.212	7.386	2372	1821.000	1.07	1948.470	3.573	14.067
9	4.500	4.306	62.000	1141.300	647.500	493.800	2311	2561	9.672	80.222	10.105	19.778	48.905	9.767	2311	1410.000	1.04	1466.400	3.796	14.945
Ort.							2338	2561	9.782	81.156	9.081	18.864	52.004	8.739	2338			1716.877		3.494

Çizelge 5.17. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0 6)

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		Asfalt		Hava Boşluğu		Agrega		Deneysel		Düzeltilmiş			
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Teorik)		Karişım (Teorik)		i		j		k		l		m		n	
AC	BİRİKET	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karişım	Karişım (Teorik)	H	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d-e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
a	b	d	e	d-e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre																			
10	5.000	4.762	61.000	1148,800	659,600	489,200	2348	10,867	81,121	8,012	18,879	57,562	7,670	2348	1612,000	1,07	1724,840	5,369	21,138
11	5.000	4.762	61.000	1144,500	654,800	489,700	2337	10,816	80,735	8,450	19,265	56,140	8,109	2337	1589,000	1,07	1700,230	3,323	15,083
12	5.000	4.762	62.000	1148,900	658,500	490,400	2343	10,842	80,929	8,229	19,071	56,850	7,887	2343	1671,000	1,04	1737,840	3,609	14,209
Ort.							2343	10,842	80,928	8,230	19,072	56,851	7,889	2343			1720,970	4,100	

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		Asfalt		Hava Boşluğu		Agrega		Deneysel		Düzeltilmiş			
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Teorik)		Karişım (Teorik)		i		j		k		l		m		n	
AC	BİRİKET	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karişım	Karişım (Teorik)	H	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d-e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
a	b	d	e	d-e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre																			
13	5.500	5.213	39.000	1135,700	668,900	466,800	2433	12,326	83,646	4,028	16,354	75,369	3,675	2433	1517,000	1,13	1714,210	3,050	12,008
14	5.500	5.213	60.000	1162,800	678,700	484,100	2402	12,169	82,381	5,250	17,419	69,863	4,901	2402	1658,000	1,10	1801,800	2,957	11,563
15	5.500	5.213	61.000	1158,600	671,600	487,000	2379	12,053	81,793	6,154	18,207	66,200	5,809	2379	1429,000	1,07	1529,030	3,725	14,665
Ort.							2405	12,183	82,673	5,144	17,327	70,477	4,795	2405			1681,680	3,237	

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK		STABİLİTE (kg)		AKMA			
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		Asfalt		Hava Boşluğu		Agrega		Deneysel		Düzeltilmiş			
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Teorik)		Karişım (Teorik)		i		j		k		l		m		n	
AC	BİRİKET	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karişım	Karişım (Teorik)	H	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d-e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
a	b	d	e	d-e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre																			
16	6.000	5.660	61.000	1163,500	676,200	487,300	2388	13,134	81,701	5,165	18,299	71,775	4,820	2388	1386,000	1,07	1483,020	3,288	12,945
17	6.000	5.660	61.000	1158,800	673,000	485,800	2385	13,121	81,622	5,256	18,378	71,398	4,912	2385	1486,000	1,07	1590,020	3,792	14,929
18	6.000	5.660	62.000	1161,300	671,000	490,300	2369	13,029	81,048	5,923	18,952	68,746	5,581	2369	1165,000	1,04	1211,600	3,964	15,606
Ort.							2381	13,095	81,457	5,448	18,343	70,640	5,104	2381			1428,213	3,681	

Çizelge 5.17. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-03 tipi polipropilen katkı-%0 6)

KABA AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA						
İNCE AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		DENEYSEL DÜZELTME		L/100 "						
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		DENEYSEL DÜZELTME		S						
AC	BİRİKT	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Düzeltilmiş	r					
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	cm <sup>3</sup>	Karışım (Teorik)	i	j	k	l	m	q	F					
a	b	d	e	g	h	j	k	l	m	n	p					
Agrega	Agrega	Suda	f	g	h	j	k	l	m	n	p					
a(100+)	a(100+)	e	f	d(d-e)	h	j	k	l	m	n	p					
Göre	Göre	e	f	d(d-e)	h	j	k	l	m	n	p					
		e	f	d(d-e)	h	j	k	l	m	n	p					
19	6.500	6.103	1167,400	678,600	2388	2492	4.495	18,660	75,913	4.151	2388	1368,000	1.07	1463,760	3.654	14.307
20	6.500	6.103	1162,500	675,300	2387	2492	4.560	18,716	75,634	4.217	2387	1164,000	1.07	1245,480	3.462	13.650
21	6.500	6.103	1162,700	680,100	2492	2492	3.657	17,947	79,622	3.311	2409	1300,000	1.10	1430,000	3.745	14.744
Ort.					2395	2492	4.237	18,441	77,056	3.893	2395			1379,747		3.614

KABA AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2730 kg/m <sup>3</sup>		BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		1029 kg/m <sup>3</sup>		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA						
İNCE AREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2750 kg/m <sup>3</sup>		AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2757 kg/m <sup>3</sup>		DENEYSEL DÜZELTME		L/100 "						
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:		2790 kg/m <sup>3</sup>		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		DENEYSEL DÜZELTME		S						
AC	BİRİKT	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	Düzeltilmiş	r					
%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	cm <sup>3</sup>	Karışım (Teorik)	i	j	k	l	m	q	F					
a	b	d	e	g	h	j	k	l	m	n	p					
Agrega	Agrega	Suda	f	g	h	j	k	l	m	n	p					
a(100+)	a(100+)	e	f	d(d-e)	h	j	k	l	m	n	p					
Göre	Göre	e	f	d(d-e)	h	j	k	l	m	n	p					
		e	f	d(d-e)	h	j	k	l	m	n	p					
22	7.000	6.542	1179,500	683,300	2378	2475	4.286	19,402	77,909	3.946	2378	1207,000	1.04	1255,280	6.104	24.031
23	7.000	6.542	1173,500	679,100	2374	2475	4.449	19,539	77,232	4.109	2374	1184,000	1.04	1231,360	5.045	19.862
24	7.000	6.542	1168,600	676,200	2373	2475	4.461	19,550	77,180	4.122	2373	1182,000	1.07	1264,740	3.965	15.610
Ort.					2375	2475	4.399	19,497	77,440	4.059	2375			1250,460		5.038

Çizelge 5.18. Marshall deney sonuçları (M-09 tipi polipropilen katkı-%0.3)

BİRKEET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCİ AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										
	AC			BİRKEET			HACİM			ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA						
	a	b	%	a	b	%	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z		
1	3.500	3.382	60.000	1127.000	651.000	476.200	2367	2599	7.779	82.953	9.268	17.047	45.634	8.917	1717.000	1.10	1888.700	2.516	9.906												
2	3.500	3.382	60.000	1132.900	653.000	479.900	2361	2599	7.758	82.730	9.512	17.270	44.923	9.163	1715.000	1.10	1884.300	2.833	11.154												
3	3.500	3.382	60.000	1131.500	652.500	479.000	2362	2599	7.763	82.783	9.454	17.217	45.090	9.104	1699.000	1.10	1868.900	2.858	11.252												
Ort.							2363	2599	7.767	82.822	9.411	17.178	45.215	9.062			2363														
	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCİ AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										
	AC			BİRKEET			HACİM			ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA						
	a	b	%	a	b	%	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z		
4	4.000	3.846	39.000	1131.900	668.000	463.900	2440	2580	9.120	85.097	5.783	14.903	61.195	5.424	1865.000	1.13	2105.190	2.374	9.346												
5	4.000	3.846	60.000	1141.900	663.800	478.100	2388	2580	8.927	83.299	7.774	16.701	53.433	7.422	1766.000	1.10	1942.600	4.045	15.925												
6	4.000	3.846	60.000	1136.800	660.300	476.500	2386	2580	8.917	83.205	7.877	16.795	53.096	7.526	1874.000	1.10	2061.400	3.087	12.154												
Ort.							2405	2580	8.988	83.867	7.145	16.133	55.915	6.791			2405														
	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCİ AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										
	AC			BİRKEET			HACİM			ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			BİRİM AĞIRLIK			STABİLİTE (kg)			AKMA						
	a	b	%	a	b	%	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z		
7	4.500	4.306	39.000	1140.000	671.400	468.600	2433	2561	10.181	84.440	5.379	15.560	65.431	5.023	2026.000	1.13	2289.380	2.664	10.488												
8	4.500	4.306	39.000	1141.100	669.900	471.200	2422	2561	10.134	84.055	5.810	15.945	65.560	5.435	1907.000	1.13	2154.910	2.708	10.661												
9	4.500	4.306	39.000	1144.400	672.200	472.200	2424	2561	10.142	84.120	5.738	15.880	63.867	5.383	1910.000	1.13	2188.300	3.110	12.244												
Ort.							2426	2561	10.152	84.205	5.642	15.795	64.286	5.287			2426														

Çizelge 5.18. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-09 tipi polipropilen katkılı-%0 3)

BİRKEET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										STABİLİTE (kg)				AKMA						
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup>					AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>					Deneysel		Düzeltilmiş								
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>					HACİM (Toplama Göre) %					Düzeltilme Faktörü		Düzeltilme Faktörü								
AC	AC	BİRKEET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Deneysel	Düzeltilme	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	mm	mm	
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	U	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	U	
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre	Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre				d(e)	d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.				s	r	
10	5.000	4.762	59.000	1148,300	677,700	470,600	2440	2543	11,292	84,290	4,418	15,710	71,879	4,062	1812,000	1,13	2047,560	3,141	12,366		
11	5.000	4.762	59.000	1150,900	680,200	470,700	2445	2543	11,315	84,463	4,222	15,337	72,828	3,865	1842,000	1,13	2081,460	5,719	22,516		
12	5.000	4.762	59.000	1150,100	680,100	470,000	2447	2543	11,324	84,350	4,146	15,470	73,201	3,789	1765,000	1,13	1994,450	2,863	11,272		
Ort.						2444	2543		11,310	84,428	4,262	15,372	72,656	3,905			2041,157		3,908		
BİRKEET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										STABİLİTE (kg)				AKMA						
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup>					AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>					Deneysel		Düzeltilmiş								
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>					HACİM (Toplama Göre) %					Düzeltilme Faktörü		Düzeltilme Faktörü								
AC	AC	BİRKEET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Deneysel	Düzeltilme	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	mm	mm	
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	U	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	U	
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre	Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre				d(e)	d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.				s	r	
13	5.500	5.213	61.000	1152,100	667,400	484,700	2377	2526	12,042	81,720	6,238	18,280	65,877	5,893	1120,000	1,07	1198,400	2,986	11,756		
14	5.500	5.213	61.000	1154,200	670,900	483,300	2388	2526	12,099	82,106	5,795	17,994	67,616	5,448	1182,000	1,07	1264,740	3,164	12,437		
15	5.500	5.213	61.000	1154,800	672,200	482,600	2393	2526	12,123	82,268	5,609	17,732	68,368	5,262	1127,000	1,07	1205,890	3,906	15,378		
Ort.						2386	2526		12,088	82,031	5,880	17,969	67,287	5,534			1223,010		3,552		
BİRKEET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										STABİLİTE (kg)				AKMA						
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup>					AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>					Deneysel		Düzeltilmiş								
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>					HACİM (Toplama Göre) %					Düzeltilme Faktörü		Düzeltilme Faktörü								
AC	AC	BİRKEET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Deneysel	Düzeltilme	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş	mm	mm	
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	U	
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	U	
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre	Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre				d(e)	d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.				s	r	
16	6.000	5.660	61.000	1161,000	673,800	487,200	2383	2509	13,109	81,342	5,349	18,458	71,019	5,005	1009,000	1,07	1079,650	3,325	13,091		
17	6.000	5.660	61.000	1157,600	671,200	486,400	2380	2509	13,092	81,437	5,471	18,563	70,526	5,128	1137,000	1,07	1216,590	5,841	22,986		
18	6.000	5.660	60.000	1148,500	666,500	482,000	2383	2509	13,107	81,554	5,358	18,466	70,983	5,014	1053,000	1,10	1158,300	5,391	22,012		
Ort.						2382	2509		13,103	81,505	5,393	18,495	70,843	5,049			1151,507		4,919		

Çizelge 5.18. (Devam) Marshall deney sonuçları (M-09 tipi polipropilen katkı-%0 3)

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup> İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup> FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																			
BİRKEET NO	AC %	BİRKEET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)		HACİM cm <sup>3</sup>	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA					
			Havada	Suda		Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu Agregası	Asfaltta Dolu Toplam Karışım	Deneysel	Düzeltilmiş		Düzeltilmiş Faktörü	Düzeltilmiş			
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre						d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-h)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g		p * Düzeltilme F.	s/0.254		
19	6.500	6.103	1162,200	673,200	489,000	2377	2492	14,097	80,944	4,959	19,056	73,976	4,617	2377	999,000	1,07	1068,950	3,844	15,134
20	6.500	6.103	1162,000	673,900	488,100	2381	2492	14,120	81,079	4,800	18,921	74,650	4,458	2381	995,000	1,07	1064,650	3,714	14,622
21	6.500	6.103	1159,100	672,900	486,200	2384	2492	14,140	81,193	4,667	18,807	75,186	4,324	2384	1080,000	1,07	1135,600	3,428	13,496
Ort.						2380	2492	14,119	81,072	4,809	18,928	74,598	4,466	2380			1096,393	3,662	

KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup> İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup> FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																			
BİRKEET NO	AC %	BİRKEET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)		HACİM cm <sup>3</sup>	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA					
			Havada	Suda		Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu Agregası	Asfaltta Dolu Toplam Karışım	Deneysel	Düzeltilmiş		Düzeltilmiş Faktörü	Düzeltilmiş			
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre						d/(d-e)		b*g/(SC <sub>asf</sub> )	(100-h)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g		p * Düzeltilme F.	s/0.254		
22	7.000	6.542	1160,300	672,900	487,400	2381	2475	15,135	80,698	4,167	19,302	78,413	3,826	2381	928,000	1,07	992,960	3,673	14,461
23	7.000	6.542	1168,300	677,300	491,000	2379	2475	15,128	80,659	4,213	19,341	78,215	3,873	2379	949,000	1,07	1015,430	3,758	14,795
24	7.000	6.542	1176,600	682,600	494,000	2382	2475	15,143	80,739	4,119	19,261	78,616	3,778	2382	992,000	1,07	1061,440	5,647	22,232
Ort.						2381	2475	15,135	80,699	4,166	19,301	78,415	3,826	2381			1023,277	4,359	

Çizelge 5.19. Marshall deney sonuçları (Atık polipropilen katkı-%0 3)

BİRKEET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>											BİRİM AĞIRLIK				STABİLİTE (kg)			AKMA	
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>											BOŞLUK ORANI (%)				Düzeltilmiş				L/100 "
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>											HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALTA DOLU TOPLAM KARIŞIM				Düzeltilmiş				
	AC	AC	BİRKEET	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	AĞREGA	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALT DOLU TOPLAM KARIŞIM	ASFALT	AĞREGA	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALT DOLU TOPLAM KARIŞIM	DENEYSEL	DÜZELTME	FAKTÖRÜ	DÜZELTİLMİŞ		
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+)				d-e	d(d-e)			b*g/(SC <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h		p * Düzeltilme F.		s/0.254			
1	3.500	3.382	59.000	1113,700	641,600	2360	2599	7,757	82,722	9,520	17,278	44,898	9,171	1300,000	1,13	1469,000	2,619	10,311		
2	3.500	3.382	59.000	1118,800	645,300	2363	2599	7,765	82,805	9,430	17,195	45,158	9,081	1325,000	1,13	1497,250	5,171	20,358		
3	3.500	3.382	61.000	1145,700	659,900	2358	2599	7,750	82,649	9,601	17,351	44,668	9,252	1306,000	1,07	1397,420	2,516	9,906		
Ort.						2361	2599	7,758	82,725	9,517	17,275	44,908	9,168			1454,557		3,435		

BİRKEET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>											BİRİM AĞIRLIK				STABİLİTE (kg)			AKMA	
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>											BOŞLUK ORANI (%)				Düzeltilmiş				L/100 "
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>											HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALTA DOLU TOPLAM KARIŞIM				Düzeltilmiş				
	AC	AC	BİRKEET	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	AĞREGA	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALT DOLU TOPLAM KARIŞIM	ASFALT	AĞREGA	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALT DOLU TOPLAM KARIŞIM	DENEYSEL	DÜZELTME	FAKTÖRÜ	DÜZELTİLMİŞ		
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+)				d-e	d(d-e)			b*g/(SC <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h		p * Düzeltilme F.		s/0.254			
4	4.000	3.846	60.000	1139,100	660,700	2381	2580	8,900	83,043	8,058	16,957	52,483	7,707	1228,000	1,10	1350,800	3,421	13,469		
5	4.000	3.846	60.000	1137,600	660,200	2383	2580	8,907	83,107	7,986	16,893	52,724	7,656	1247,000	1,10	1371,700	4,624	18,205		
6	4.000	3.846	60.000	1133,600	655,900	2373	2580	8,870	82,765	8,367	17,237	51,457	8,018	1326,000	1,10	1458,600	3,016	11,874		
Ort.						2379	2580	8,892	82,971	8,137	17,029	52,222	7,787			1393,700		3,687		

BİRKEET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>											BİRİM AĞIRLIK				STABİLİTE (kg)			AKMA	
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>											BOŞLUK ORANI (%)				Düzeltilmiş				L/100 "
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>											HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALTA DOLU TOPLAM KARIŞIM				Düzeltilmiş				
	AC	AC	BİRKEET	AĞIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	AĞREGA	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALT DOLU TOPLAM KARIŞIM	ASFALT	AĞREGA	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA ASFALT DOLU TOPLAM KARIŞIM	DENEYSEL	DÜZELTME	FAKTÖRÜ	DÜZELTİLMİŞ		
%	%	YÜKSEKLİĞİ (mm)	Havada	Suda	d(e)	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	p	q	r	s	r		
Agrega Ağırlığına Göre	a(100+)				d-e	d(d-e)			b*g/(SC <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SC <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h		p * Düzeltilme F.		s/0.254			
7	4.500	4.306	59.000	1143,600	669,900	2414	2561	10,103	83,795	6,102	16,205	62,345	5,748	1382,000	1,13	1561,660	5,651	22,248		
8	4.500	4.306	59.000	1135,600	662,300	2399	2561	10,041	83,279	6,680	16,721	60,049	6,329	1385,000	1,13	1452,050	3,133	12,335		
9	4.500	4.306	60.000	1157,900	676,800	2407	2561	10,072	83,558	6,390	16,462	61,182	6,038	1350,000	1,10	1463,000	5,062	19,929		
Ort.						2407	2561	10,072	83,557	6,391	16,463	61,192	6,038			1492,237		4,615		

Çizelge 5.19. (Devam) Marshall deney sonuçları (Atık polipropilen katkı-%0 3)

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																		
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																		
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																		
AC %	BİRİKET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	HACİM (Toplama Göre) %	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	BOSLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	DENEYSEL	DÜZELTME	FAKTÖRÜ	AKMA
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre						d/(d-e)		b*g/(SG <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-k	100-l	100-m	100-n	g	p	q	r	s	t
10	5,000	4,762	60,000	1149,700	675,900	473,800	2427	2543	11,229	83,823	4,948	69,416	4,594	2427	1242,000	1,10	1566,200	4,300	16,929
11	5,000	4,762	59,000	1157,500	670,900	466,400	2438	2543	11,284	84,255	4,481	71,577	4,125	2438	1352,000	1,13	1527,760	3,462	13,650
12	5,000	4,762	59,000	1157,100	682,400	474,700	2438	2543	11,280	84,203	4,517	71,406	4,162	2438	1345,000	1,13	1519,850	3,060	12,047
Ort.						2434	2543		11,265	84,087	4,649	70,800	4,294	2434			1471,270		3,607

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																		
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																		
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																		
AC %	BİRİKET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	HACİM (Toplama Göre) %	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	BOSLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	DENEYSEL	DÜZELTME	FAKTÖRÜ	AKMA
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre						d/(d-e)		b*g/(SG <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-k	100-l	100-m	100-n	g	p	q	r	s	t
13	5,500	5,213	59,000	1151,100	681,400	469,700	2451	2526	12,416	84,256	3,327	78,865	2,972	2451	1199,000	1,13	1354,870	3,279	12,909
14	5,500	5,213	58,000	1141,500	676,600	464,900	2455	2526	12,440	84,416	3,144	79,826	2,788	2455	1149,000	1,16	1332,840	4,040	15,906
15	5,500	5,213	59,000	1149,000	681,100	467,900	2456	2526	12,441	84,426	3,133	79,886	2,776	2456	1001,000	1,13	1151,130	3,922	15,441
Ort.						2454	2526		12,432	84,366	3,201	79,526	2,845	2454			1272,947		3,747

BİRİKET NO	KABA AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>																		
	İNCE AĞREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AĞREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>																		
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																		
AC %	BİRİKET	AGIRLIK (gr)	HACİM	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	HACİM (Toplama Göre) %	HAVA BOŞLUĞU AĞREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	AGREGA	BOSLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	DENEYSEL	DÜZELTME	FAKTÖRÜ	AKMA
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre						d/(d-e)		b*g/(SG <sub>asf</sub> ) (100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-k	100-l	100-m	100-n	g	p	q	r	s	t
16	6,000	5,660	59,000	1157,500	685,800	471,700	2454	2509	13,498	83,968	2,534	84,196	2,179	2454	864,000	1,13	976,320	4,217	16,602
17	6,000	5,660	58,000	1130,800	669,600	461,200	2452	2509	13,487	83,898	2,614	83,764	2,260	2452	842,000	1,16	976,720	4,743	18,681
18	6,000	5,660	59,000	1161,200	687,000	474,200	2449	2509	13,470	83,792	2,758	83,109	2,384	2449	855,000	1,13	966,150	4,658	18,260
Ort.						2452	2509		13,485	83,886	2,629	83,690	2,275	2452			973,063		4,533

Çizelge 5.19. (Devam) Marshall deney sonuçları (Atık polipropilen katkı-%0 3)

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup> İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup> FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																			
BİRKEET NO	AC %	BİRKEET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)		HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA					
			Havada	Suda		Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım		Deneysel	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre					d-e	d/(d-e)		b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.		s/0,254		
19	6,500	6,103	60,000	60,000	482,900	2434	2492	14,438	82,905	2,657	17,095	84,437	2,307	2434	748,000	1,10	822,800	5,314	20,921
20	6,500	6,103	60,000	60,000	474,500	2439	2492	14,464	83,052	2,485	16,948	85,341	2,134	2439	723,000	1,10	795,300	5,314	20,921
21	6,500	6,103	60,000	60,000	484,300	2429	2492	14,408	82,728	2,864	17,272	83,417	2,515	2429	789,000	1,10	867,900	6,545	25,768
Ort.						2434	2492	14,437	82,895	2,669	17,105	84,405	2,319	2434			828,667	5,724	

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup> İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup> FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>																			
BİRKEET NO	AC %	BİRKEET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)		HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )		HACİM (Toplama Göre) %		BOŞLUK ORANI (%)		BİRİM AĞIRLIK (kg)		AKMA					
			Havada	Suda		Karışım	Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Agrega	Asfaltta Dolu	Toplam Karışım		Deneysel	Düzeltilmiş	Düzeltilmiş		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Agrega Ağırlığına a/(100+a) Göre					d-e	d/(d-e)		b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g	p * Düzeltilme F.		s/0,254		
22	7,000	6,542	60,000	60,000	479,200	2421	2475	15,394	82,079	2,327	17,921	85,900	2,180	2421	668,000	1,10	734,800	7,921	31,185
23	7,000	6,542	61,000	61,000	487,600	2417	2475	15,364	81,917	2,720	18,083	84,959	2,374	2417	679,000	1,07	726,530	6,743	26,547
24	7,000	6,542	60,000	60,000	480,600	2417	2475	15,569	81,946	2,685	18,054	85,128	2,339	2417	650,000	1,10	715,000	6,917	27,232
Ort.						2418	2475	15,576	81,981	2,644	18,019	85,339	2,298	2418			725,443	7,194	

### 5.2.5. Optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi

Marshall deneylerinin yapılma amacı, sünme deneyinde kullanılacak olan optimum katkısız ve optimum polipropilen katkılı numunelerin belirlenebilmesidir. Bu amaç doğrultusunda hazırlanan bütün karışımların optimum bitüm muhtevaları belirlenerek bunlar arasından katkısız ve polipropilen katkılı numunelerin optimum olanları sünme deneyleri için seçilmiştir.

Optimum numunelerin seçiminde çeşitli kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Stabilite değerlerindeki artışlar, akma değerlerindeki azalmalar, karışım hazırlanırken eklenen katkı tiplerinin karışıma homojen olarak yayılıp yayılmaması, deney sonuçlarının tutarlılığı ve hazırlanan karışımın çalışılabilirliği gibi faktörler dikkate alınarak en uygun karışım seçilmiştir.

Optimum bitüm muhtevasının hesaplanabilmesi için 2 yöntem bulunmaktadır. Birinci yöntemde, maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık ve şartname limitlerinin ortalamasındaki boşluk oranı değerlerini veren bitüm muhtevaları çizilen grafikler yardımıyla belirlenir ve ortalamaları alınır. İkinci yöntemde ise bu değerlere ek olarak asfaltla dolu boşluk değerinin şartname ortalamasına denk gelen bitüm muhtevası da ortalamaya katılır. Bu şekilde belirlenen iki farklı bitüm muhtevasının ortalaması alınarak hazırlanan karışım için optimum bitüm muhtevası belirlenmiş olur.

Ayrıca çizilen grafiklere ek olarak bitüm muhtevasının belirlenmesinde kullanılmayan ancak şartname limitleri ile karşılaştırmak için akma ve VMA değerlerinin de grafikleri çizilir.

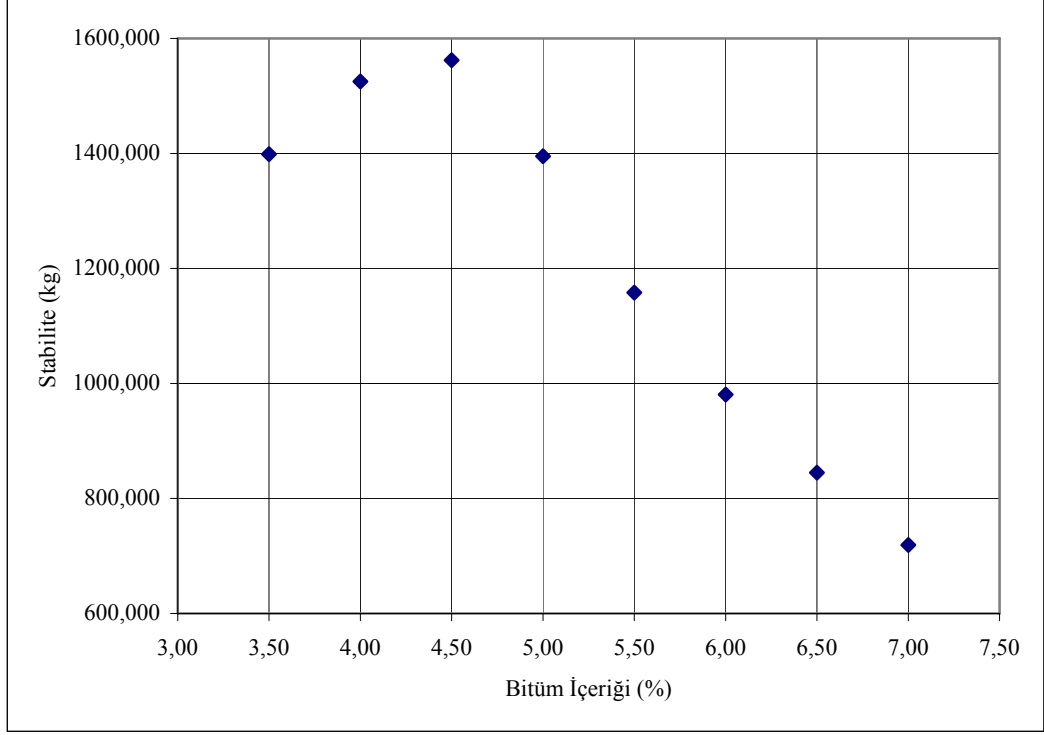
Optimum bitüm muhtevasının hesaplanmasında kullanılacak olan “Asfalt Betonunun Dizayn Kriterleri” Çizelge 5.20’de gösterilmiştir. Asfalt betonunun dizayn kriterleri “Karayolu Teknik Şartnamesi-2006”dan alınmıştır.

**Çizelge 5.20.** Asfalt betonunun dizayn kriterleri [27]

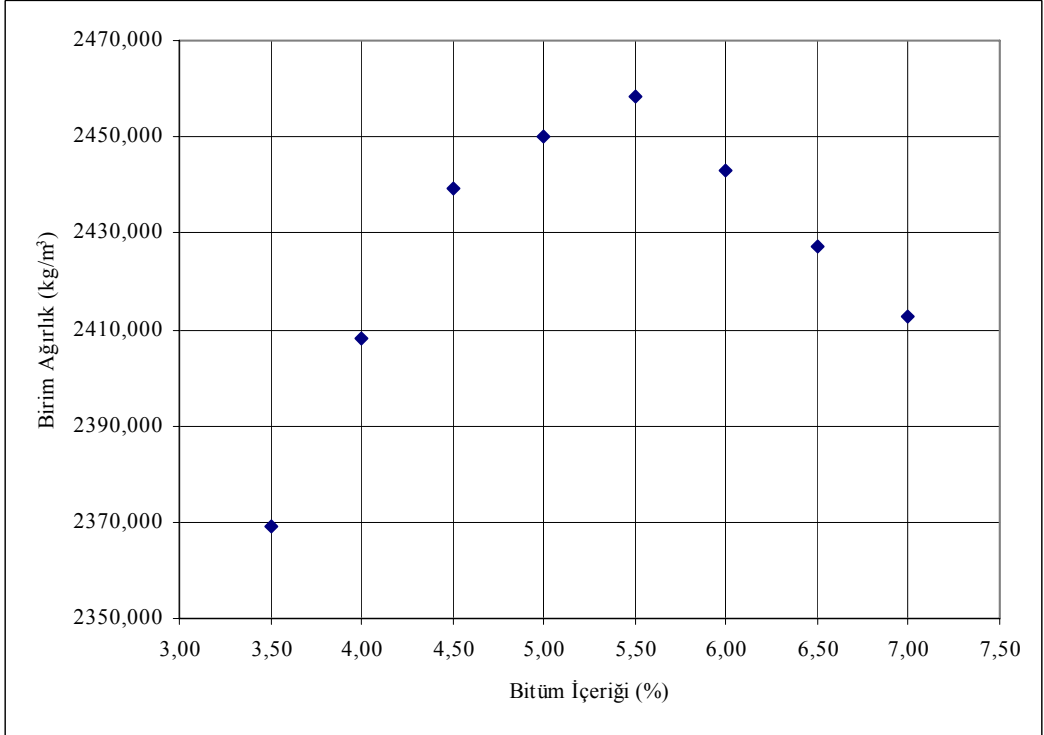
	Minimum	Maksimum
Marshall stabilitesi, kg	900	-
Boşluk, %	3	5
Asfaltla dolu boşluk, $V_f$ , %	65	75
Agregalar arası boşluk, VMA, %	14	-
Akma, mm	2	4
Filler/bitüm oranı	-	1.5
Bitüm (ağırlıkça, 100’e)	4.0	7.0

**A) Katkısız 1. serinin optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi**

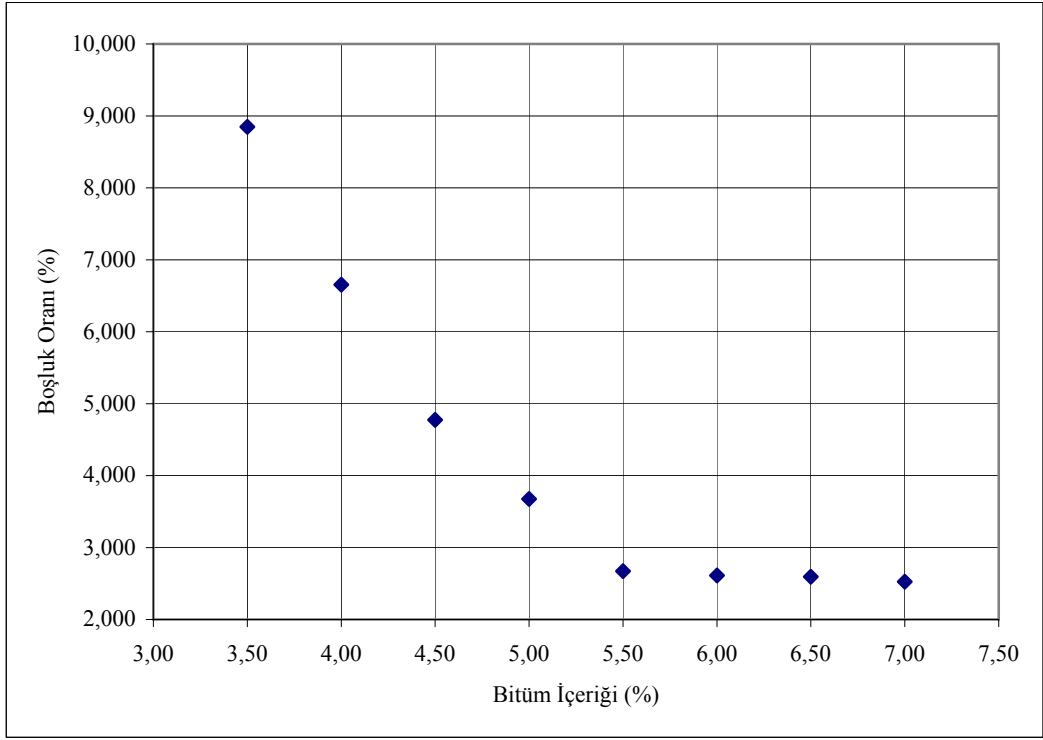
Hesaplamalar Şekil 5.14-Şekil 5.19 yardımıyla yapılmıştır.



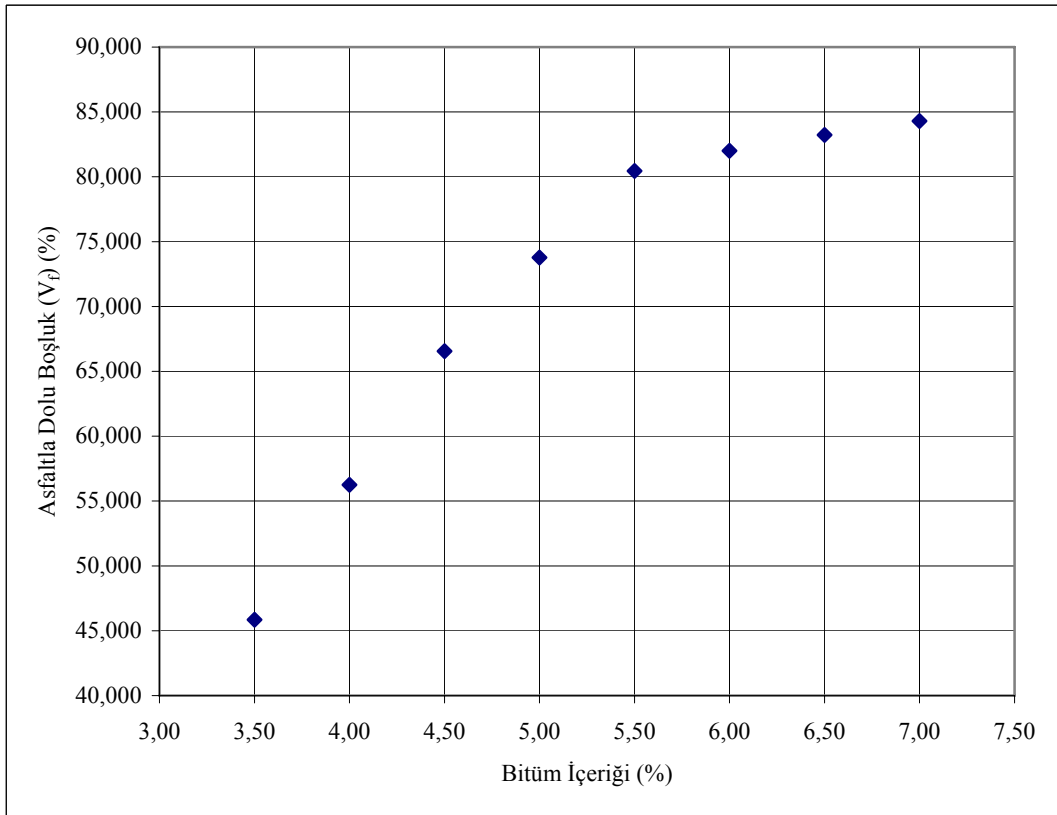
**Şekil 5.14.** Stabilite-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri)



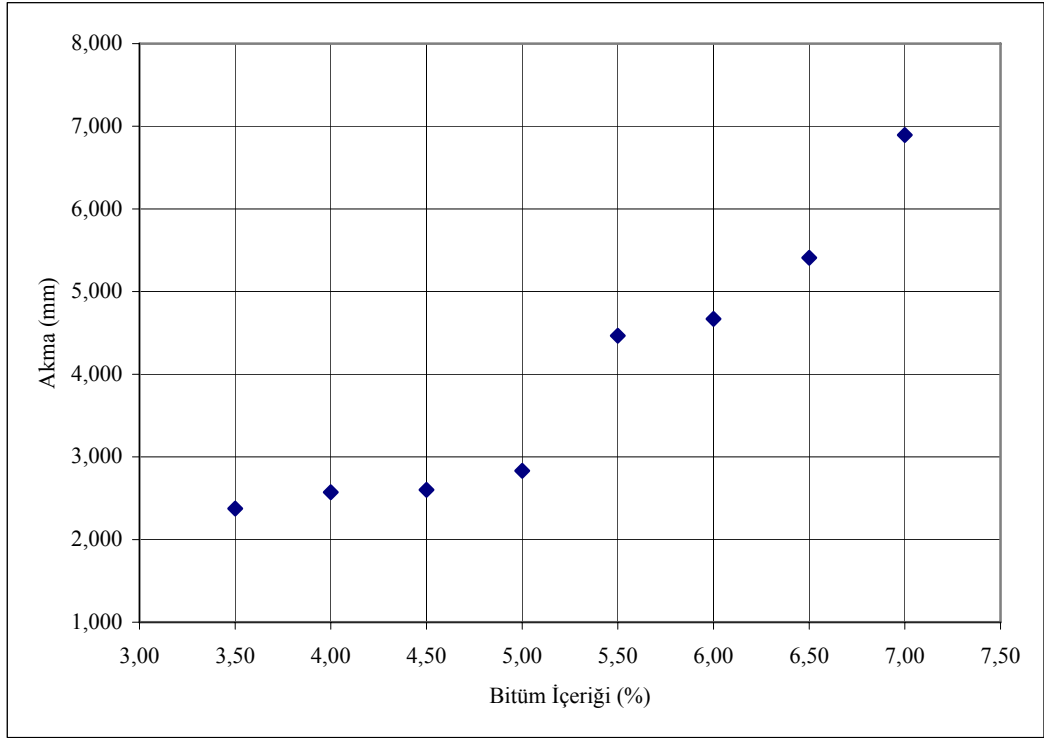
**Şekil 5.15.** Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri)



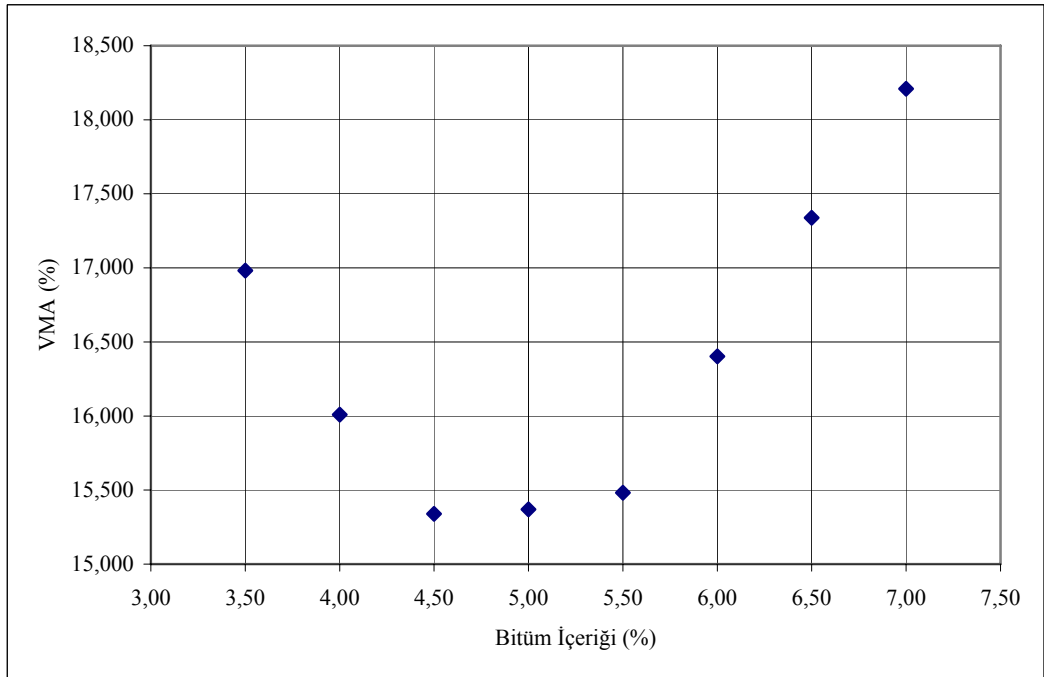
Şekil 5.16. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri)



Şekil 5.17. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri)



**Şekil 5.18.** Akma-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri)



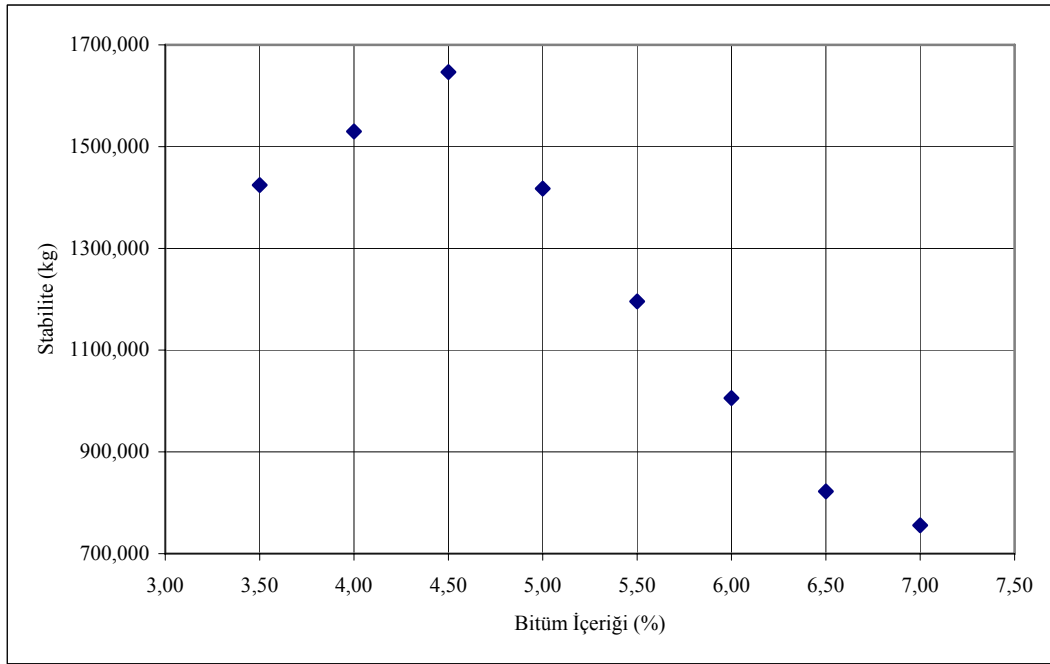
**Şekil 5.19.** VMA-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 1.seri)

Çizilen bu grafiklerden maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri sırasıyla 4.20, 5.50, 4.80 ve

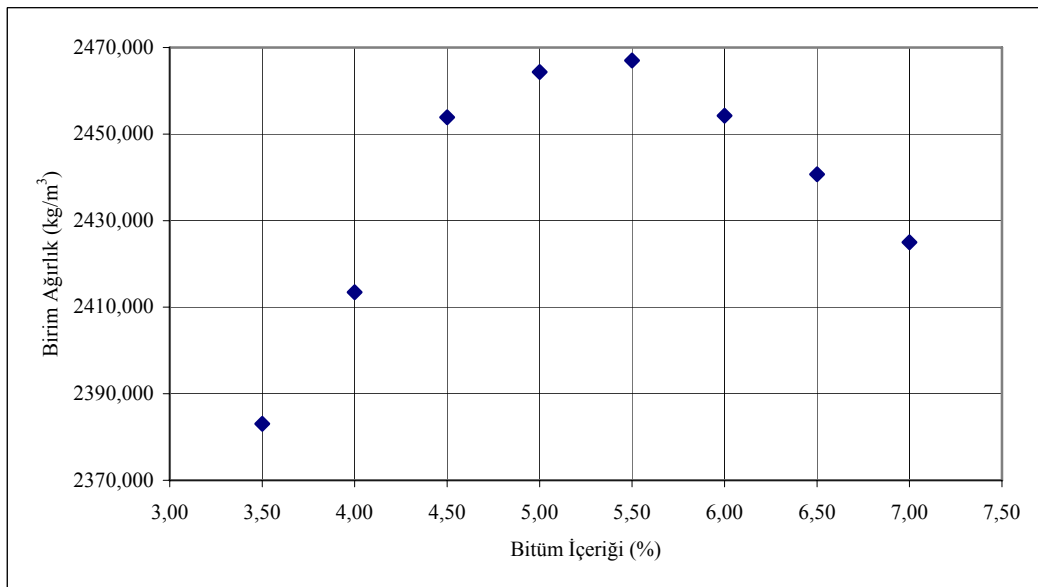
4.70 olarak belirlenmiştir. Birinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.83 ve ikinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.80 bulunmuştur. Bu iki değerin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası 4.82 olarak bulunmuştur.

## B) Katkısız 2. serinin optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi

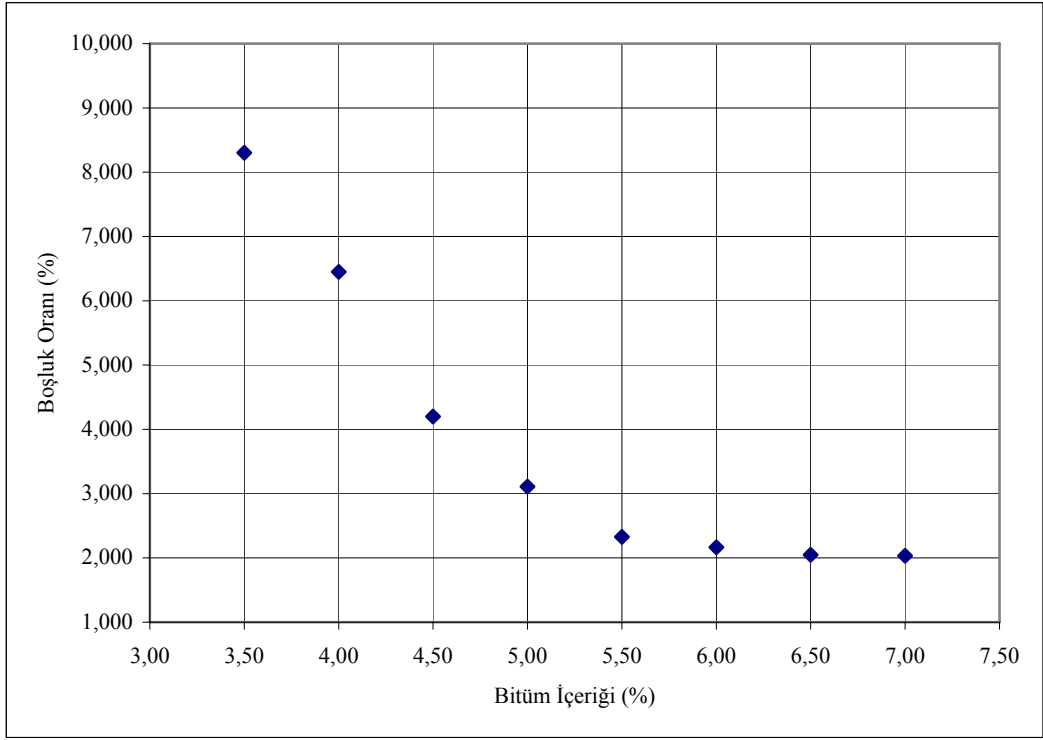
Hesaplamalar Şekil 5.20-Şekil 5.25 yardımıyla yapılmıştır.



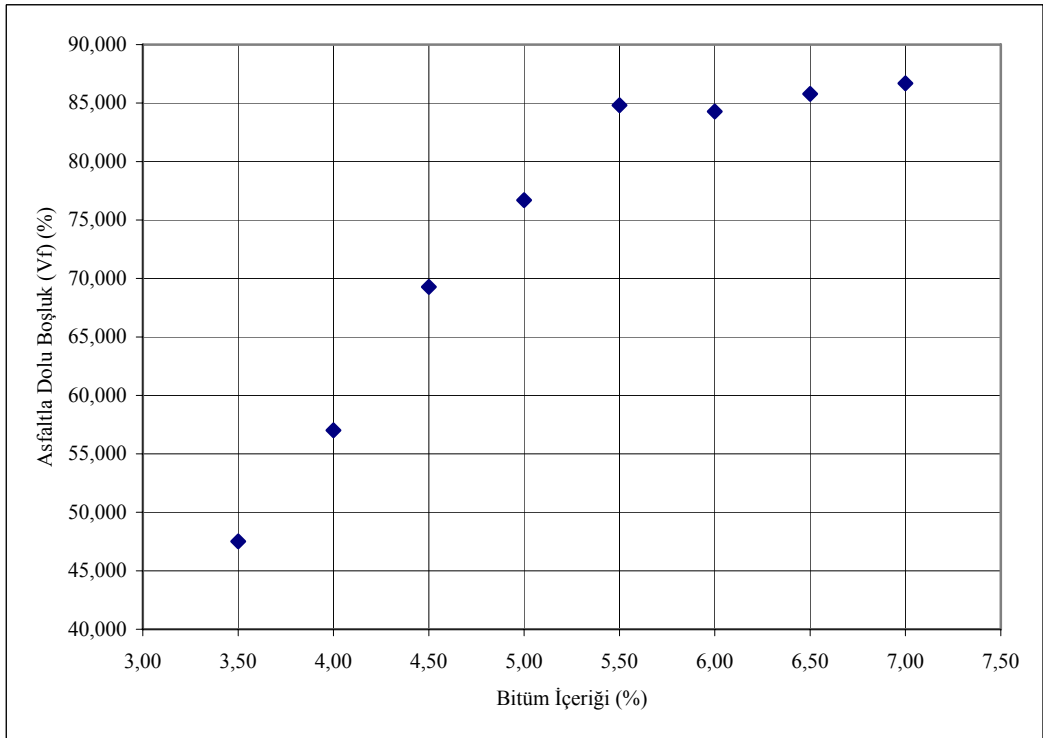
Şekil 5.20. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri)



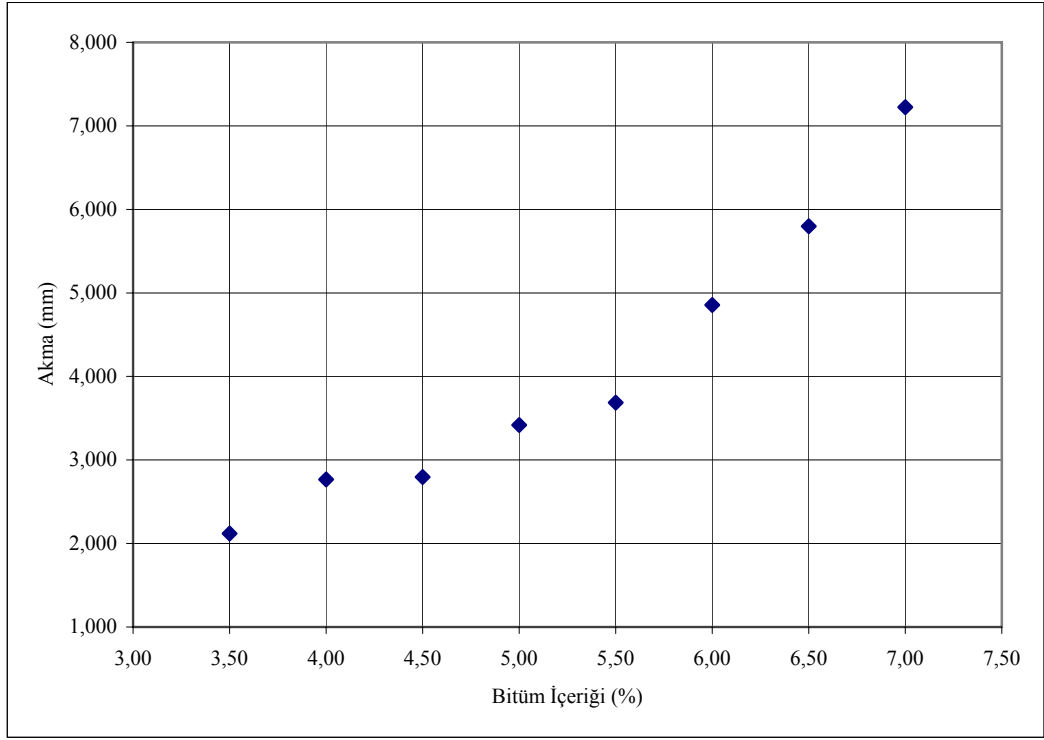
Şekil 5.21. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri)



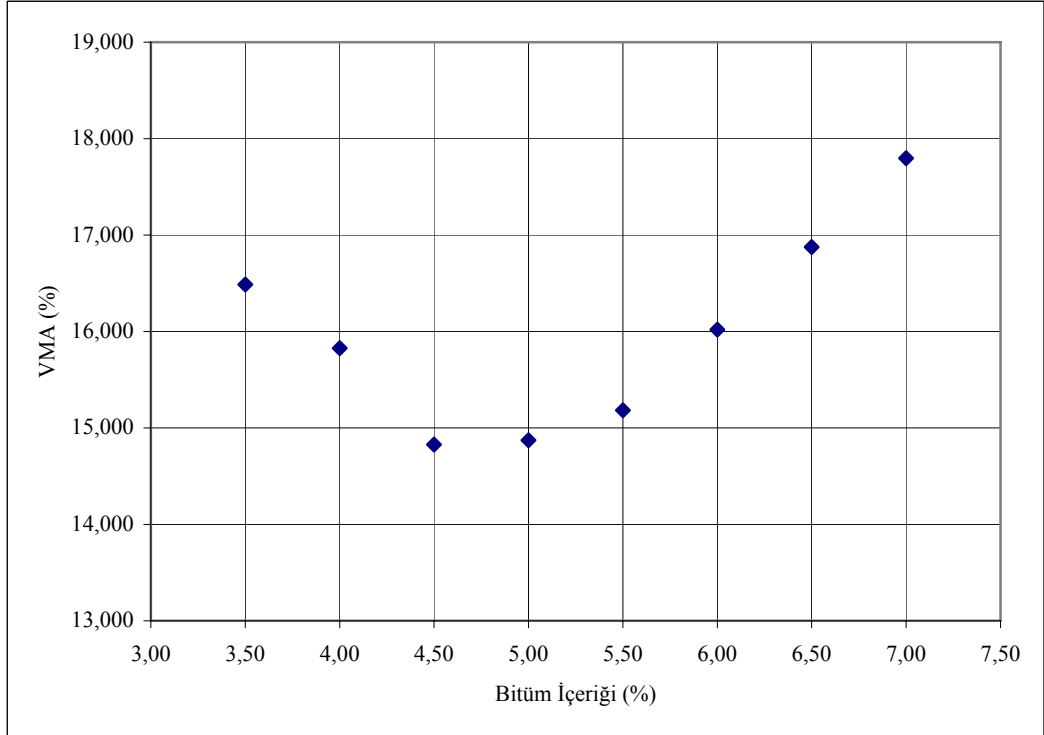
Şekil 5.22. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri)



Şekil 5.23. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri)



Şekil 5.24. Akma-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri)



Şekil 5.25. VMA-bitüm içeriği grafiği (Katkısız 2.seri)

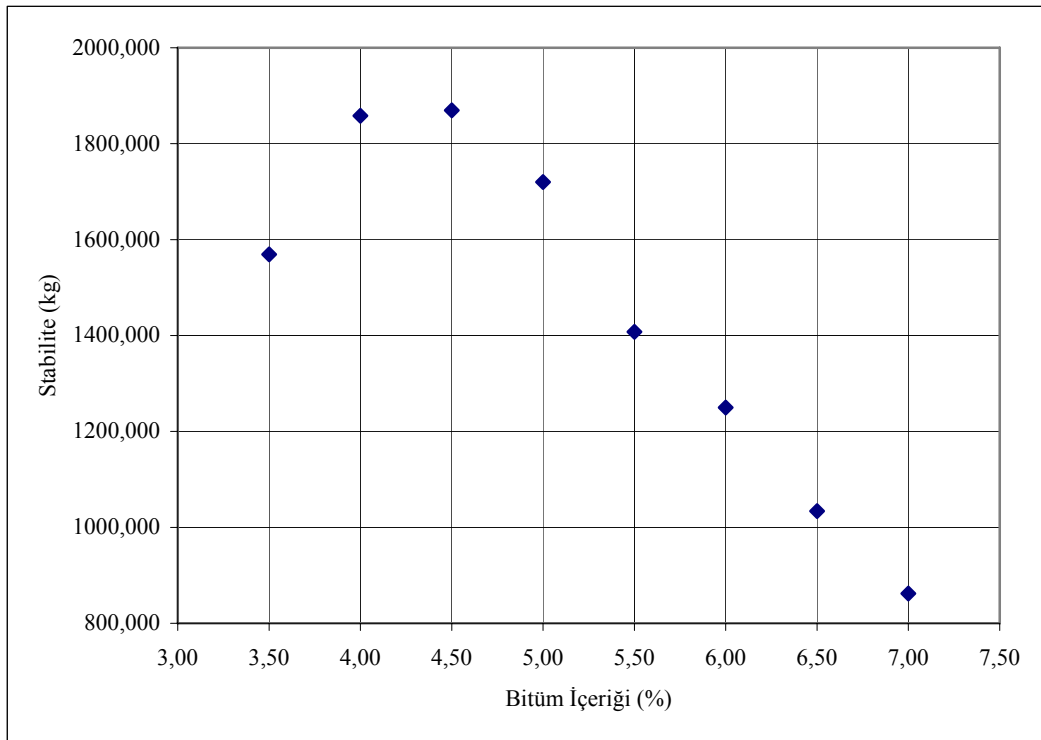
Katkısız 2.serinin çizilen grafiklerinden maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri sırasıyla 4.40,

5.50, 4.60 ve 4.60 olarak belirlenmiştir. Birinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.83 ve ikinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.78 bulunmuştur. Bu iki değerin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası 4.81 olarak bulunmuştur.

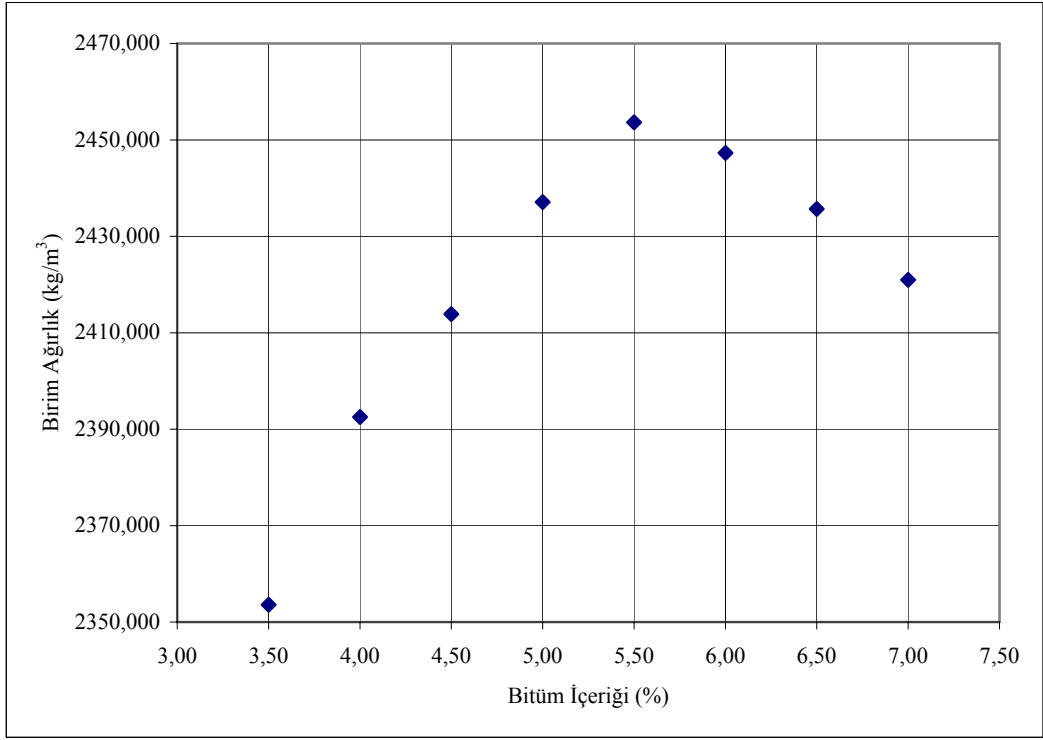
Katkısız karışımların yapılan 2 seri deneyleri sonucunda optimum bitüm muhtevası ilk seride 4.82 ve ikinci seride ise 4.81 bulunmuştur. Bu iki değerin ortalaması alınarak ve uygulanabilir bir optimum bitüm muhtevası seçebilmek amacıyla optimum bitüm muhtevası %5.00 bitüm olarak seçilmiştir.

### C) M-03 tipi %03 PP katkıli serinin optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi

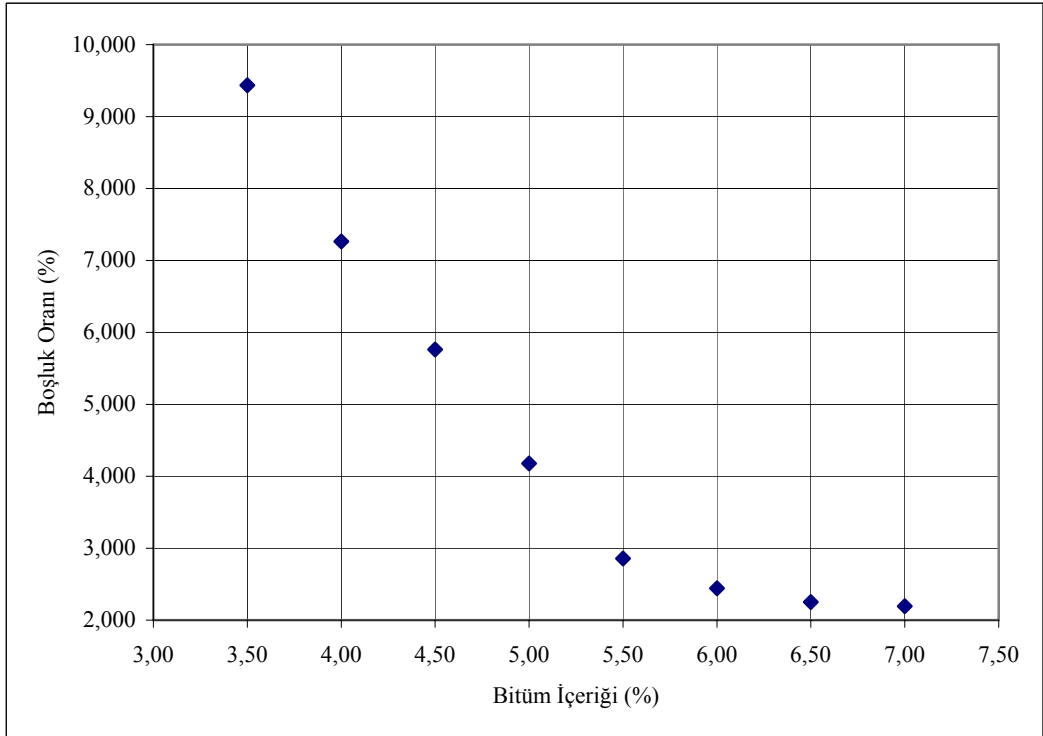
Hesaplamalar Şekil 5.26-Şekil 5.31 yardımıyla yapılmıştır.



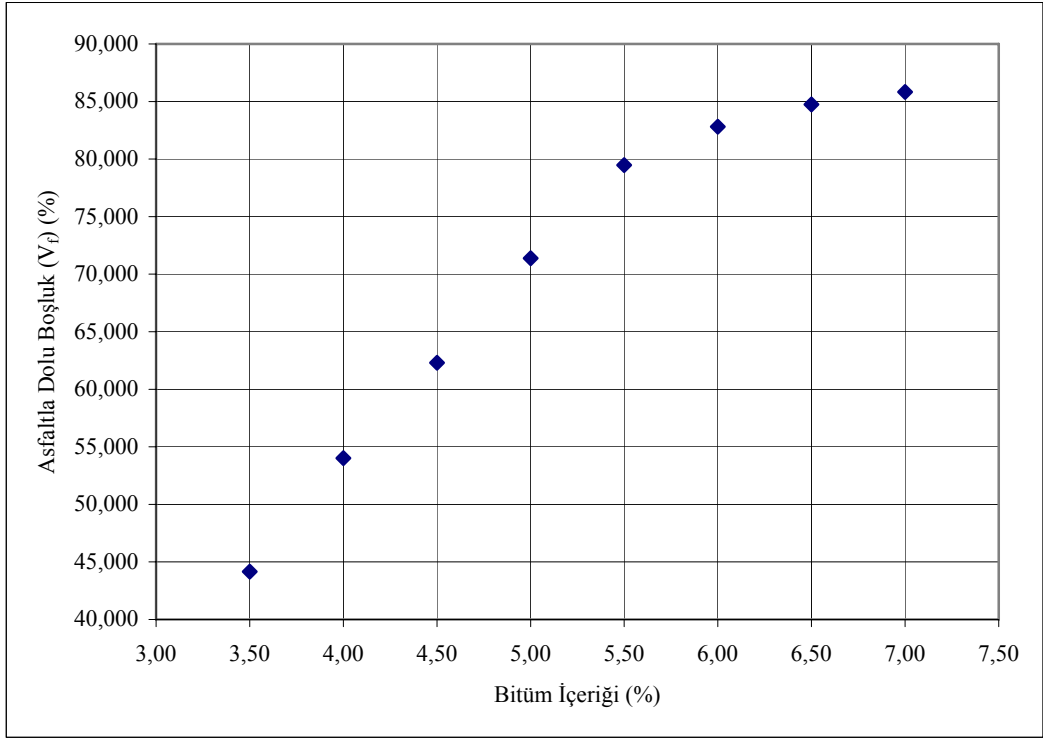
Şekil 5.26. Stabilitite-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03)



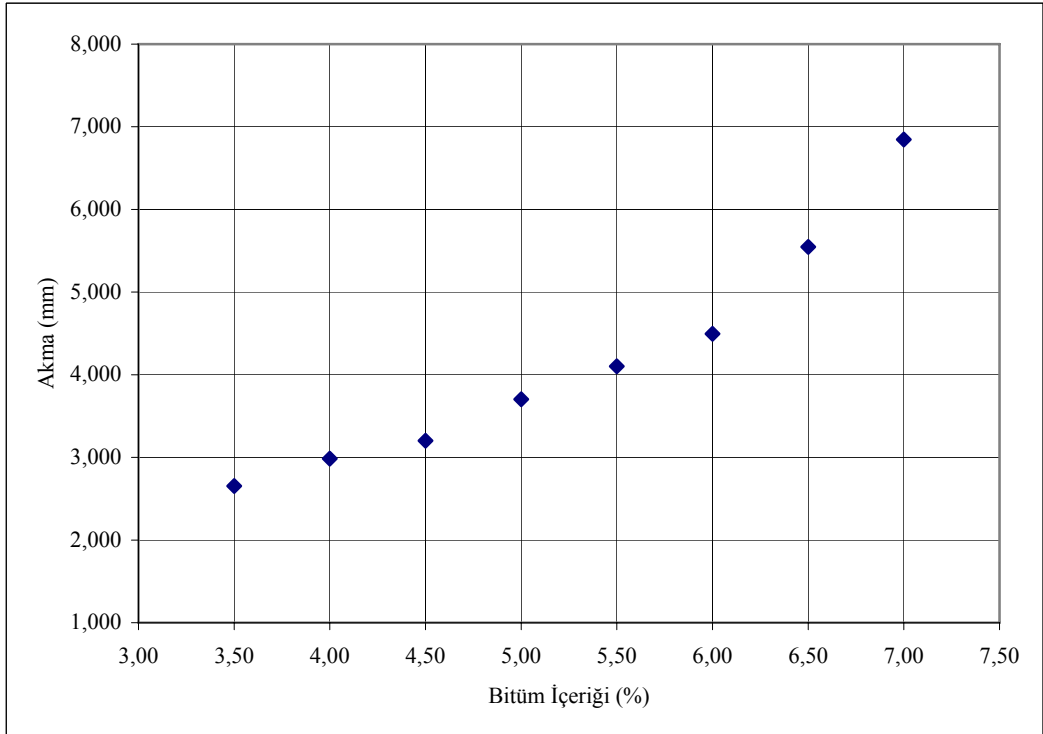
Şekil 5.27. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03)



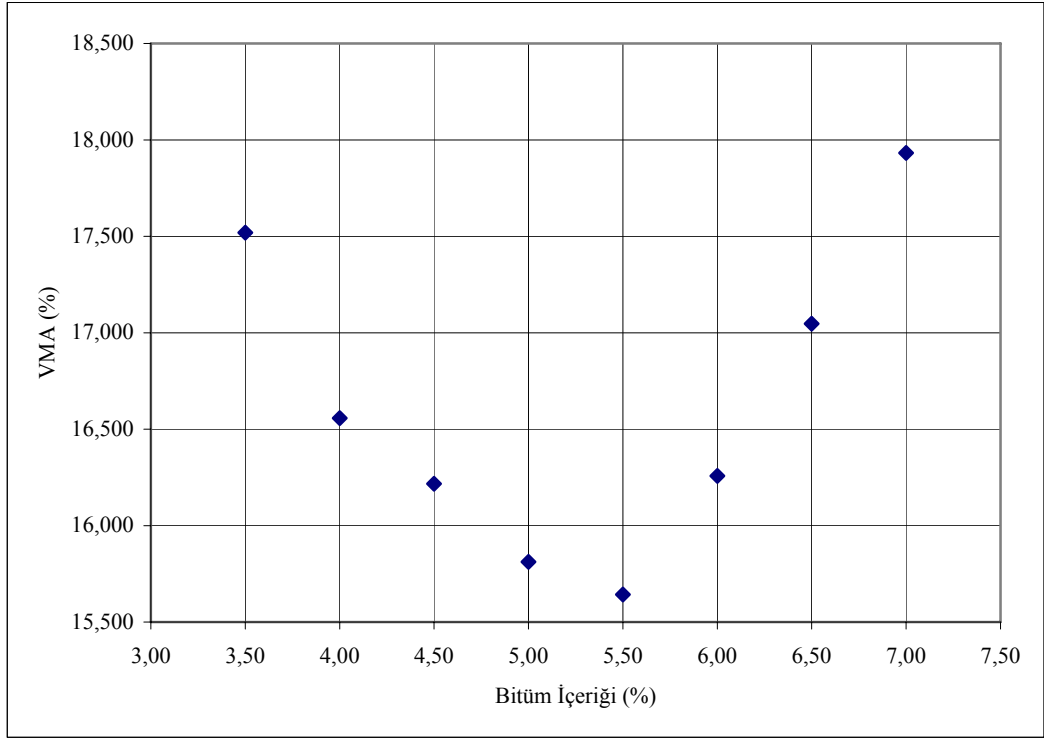
Şekil 5.28. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03)



Şekil 5.29. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03)



Şekil 5.30. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03)

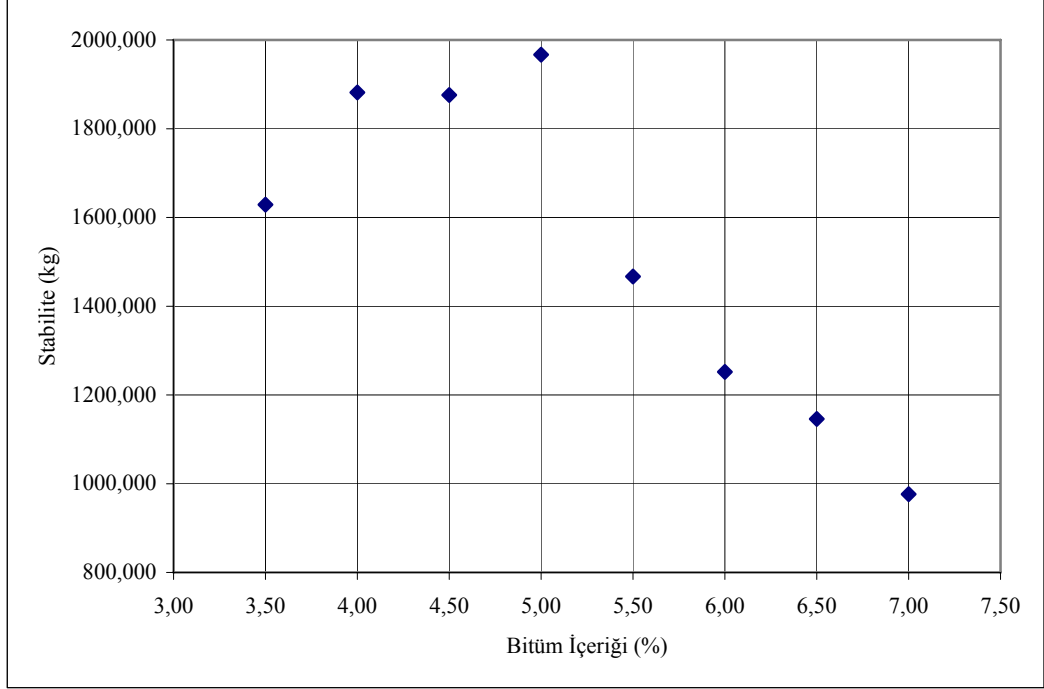


**Şekil 5.31.** VMA-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%03)

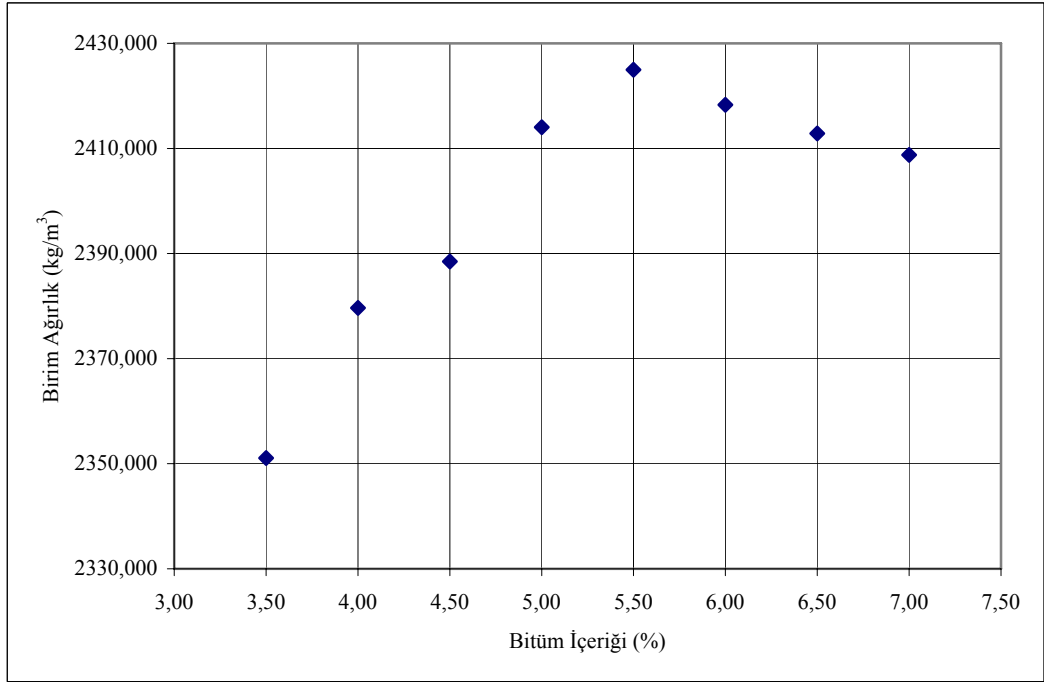
M-03 tipi polipropilenin %03 katkıli serisinin grafiklerinden maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri sırasıyla 4.20, 5.70, 5.00 ve 4.90 olarak belirlenmiştir. Birinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.97 ve ikinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.95 bulunmuştur. Bu iki değerlerin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası 4.96 olarak belirlenmiştir. Bu değer 5.00 olarak seçilmiştir.

**D) M-03 tipi %04.5 PP katkı serinin optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi**

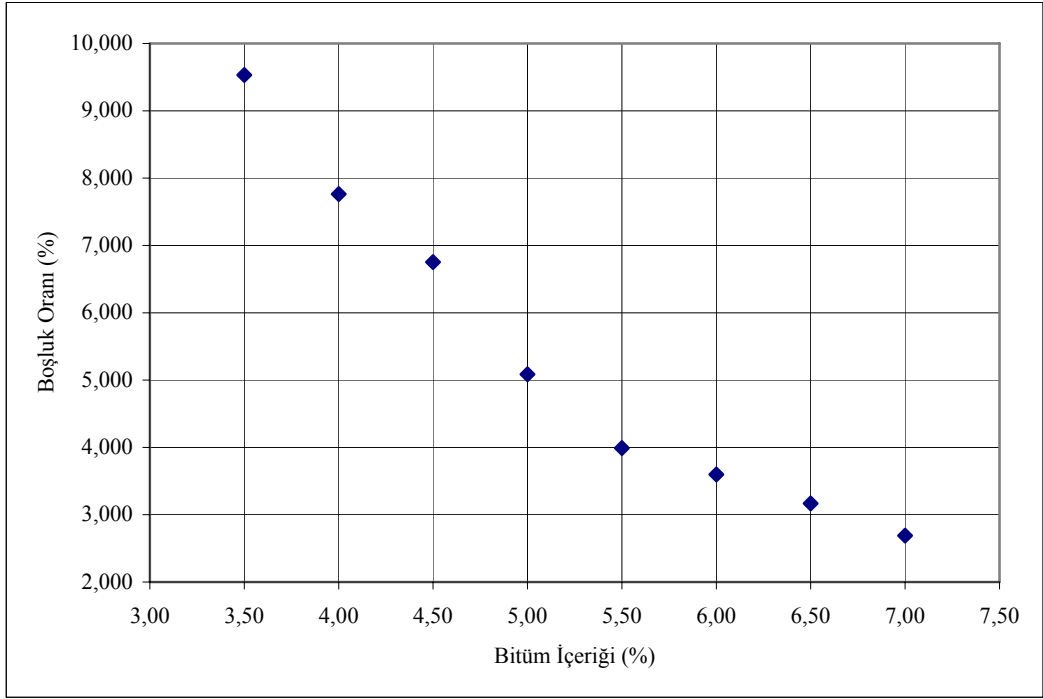
Hesaplamalar Şekil 5.32-Şekil 5.37 yardımıyla yapılmıştır.



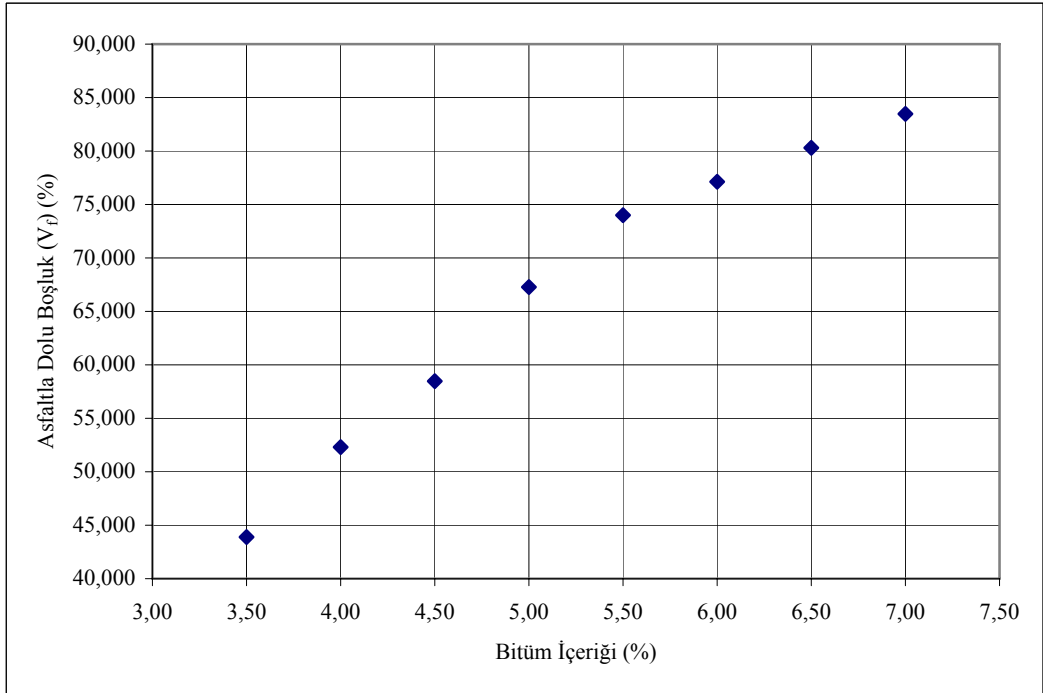
**Şekil 5.32.** Stabilite-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkı seri-%04.5)



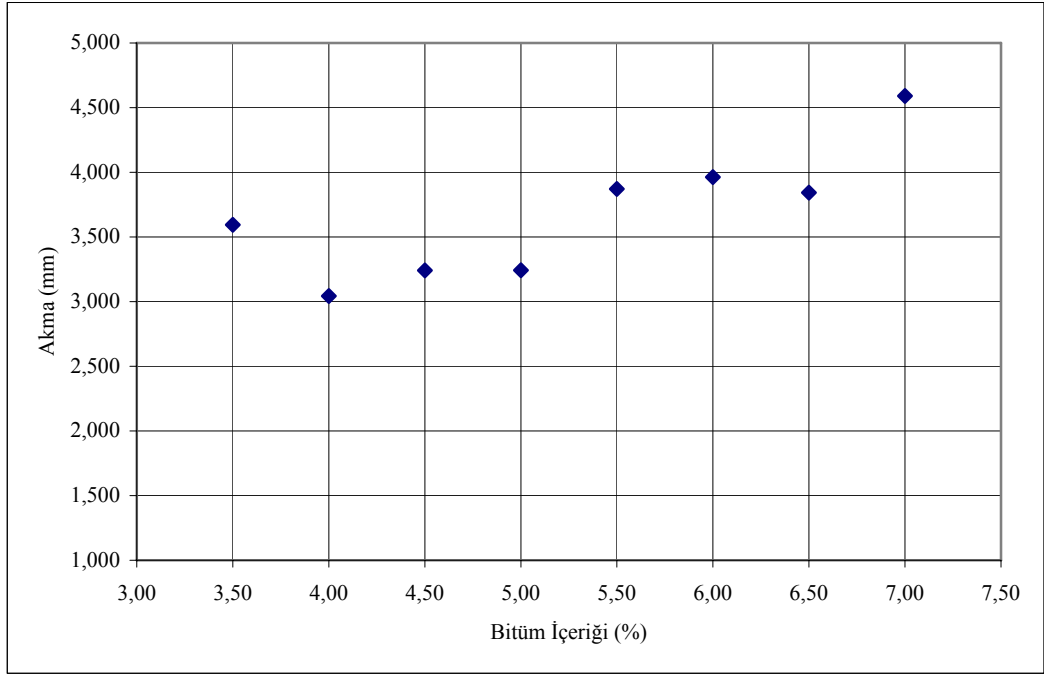
**Şekil 5.33.** Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkı seri-%04.5)



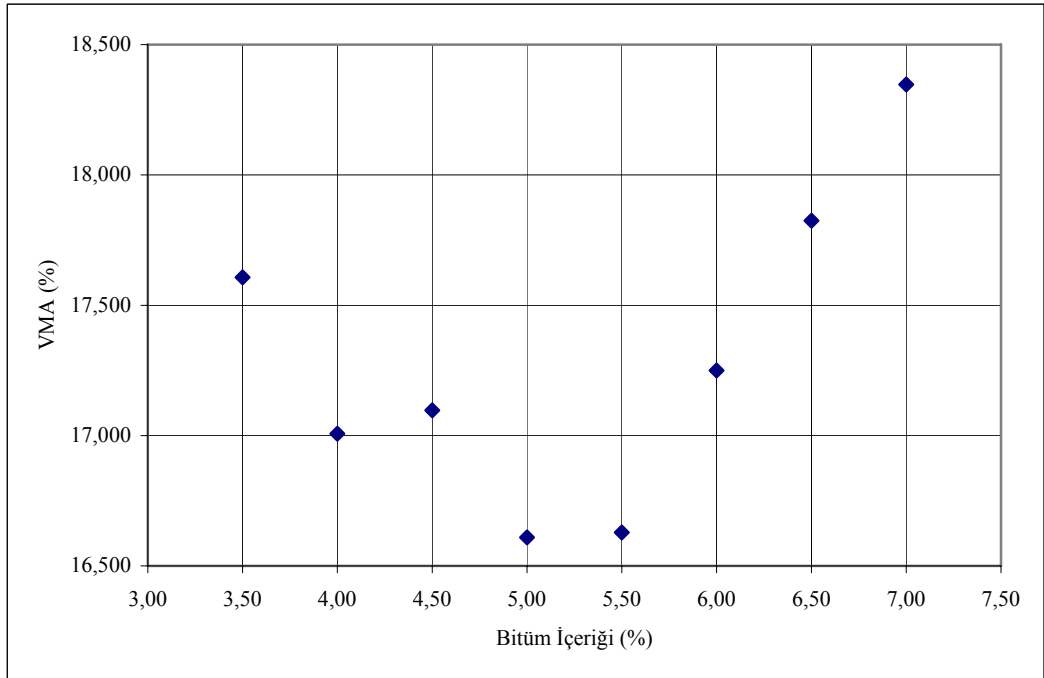
Şekil 5.34. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%o4.5)



Şekil 5.35. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%o4.5)



Şekil 5.36. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%4.5)



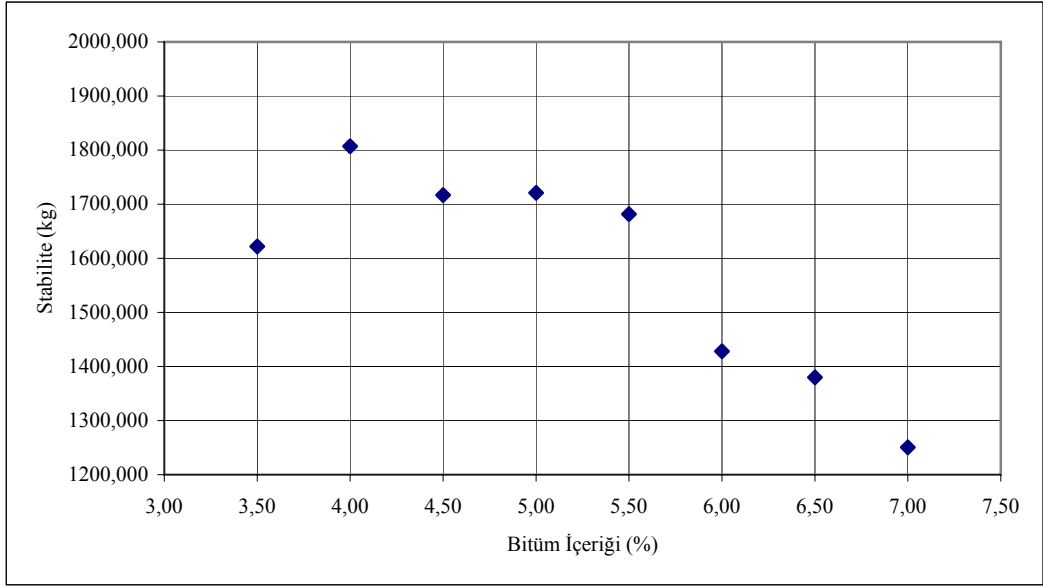
Şekil 5.37. VMA-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%4.5)

M-03 tipi polipropilenin %4.5 katkıli serisinin grafiklerinden maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri sırasıyla 4.70, 5.80, 5.60 ve 5.30 olarak belirlenmiştir. Birinci yöntemle

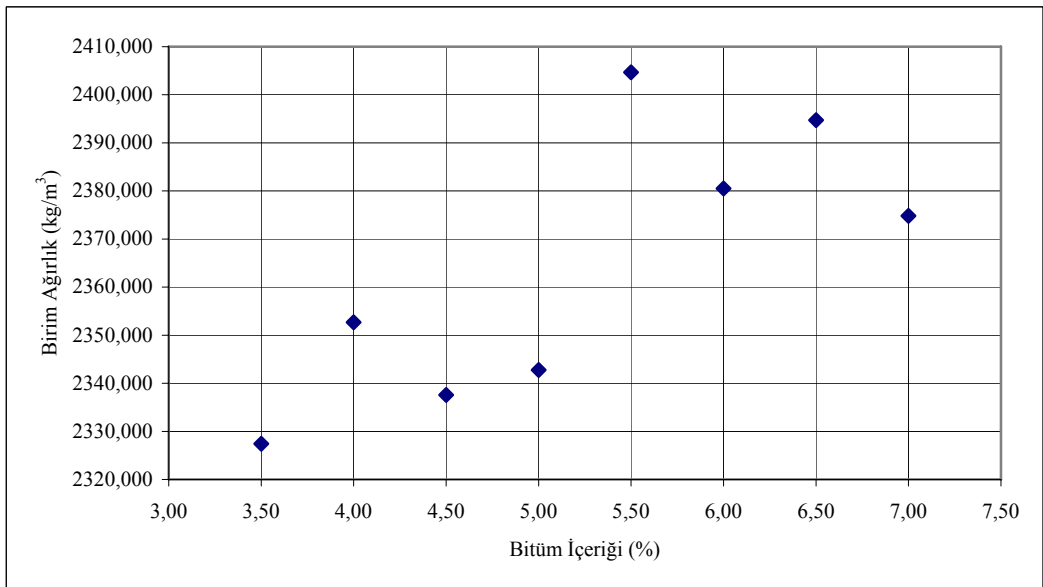
hesaplanan optimum bitüm muhtevası 5.37 ve ikinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 5.35 bulunmuştur. Bu iki değerin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası 5.36 olarak belirlenmiştir.

### E) M-03 tipi %06.0 PP katkıli serinin optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi

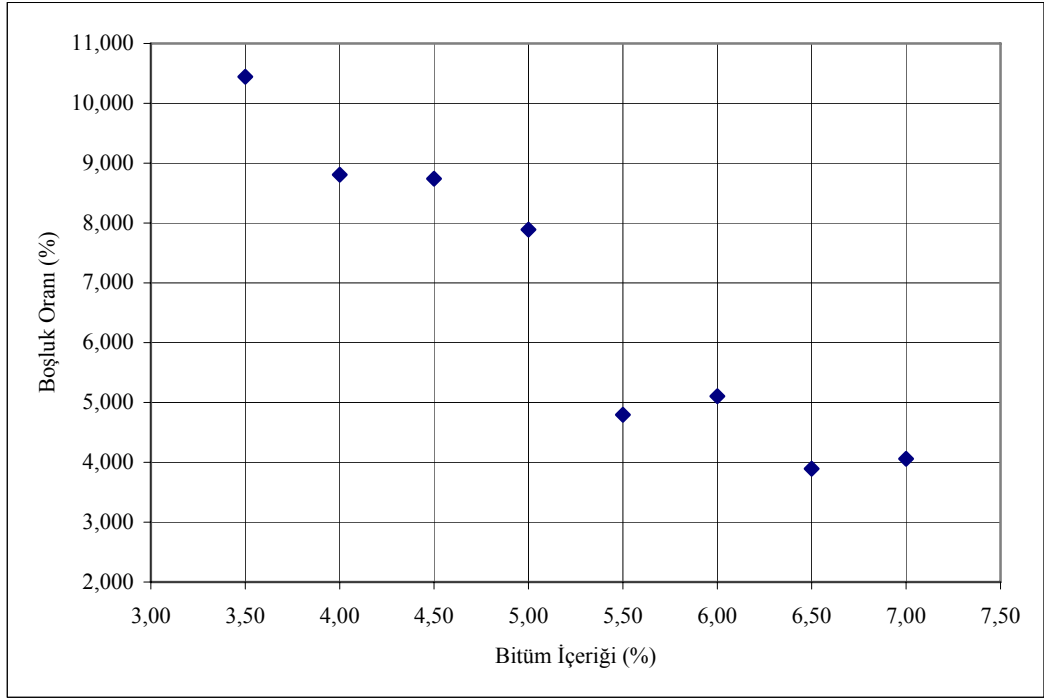
Hesaplamalar Şekil 5.38-Şekil 5.43 yardımıyla yapılmıştır.



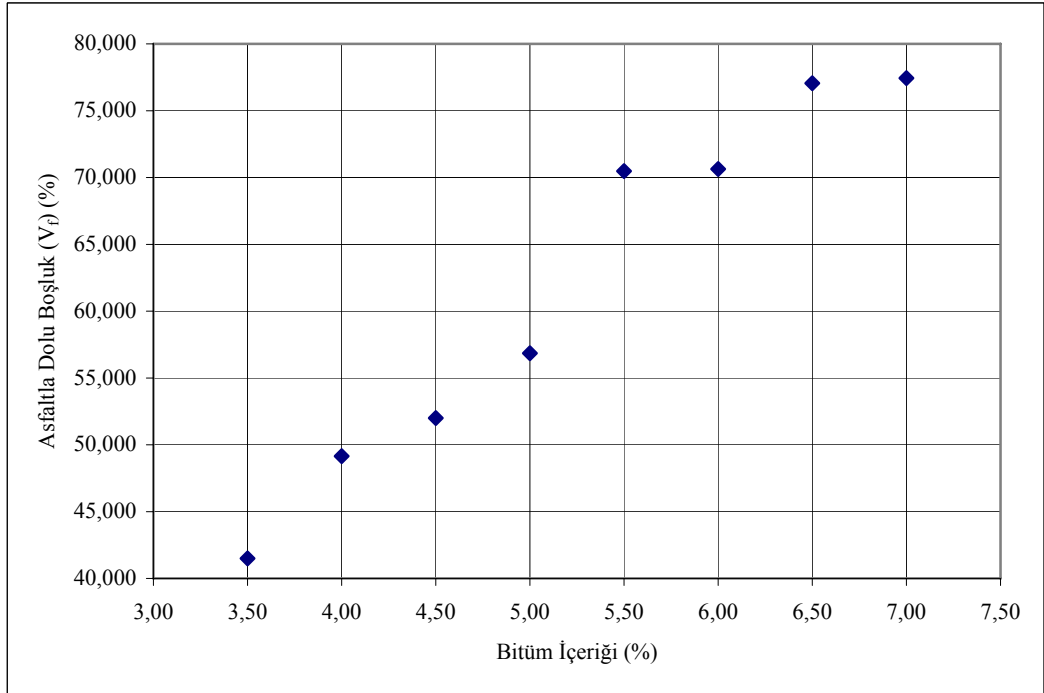
Şekil 5.38. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06.0)



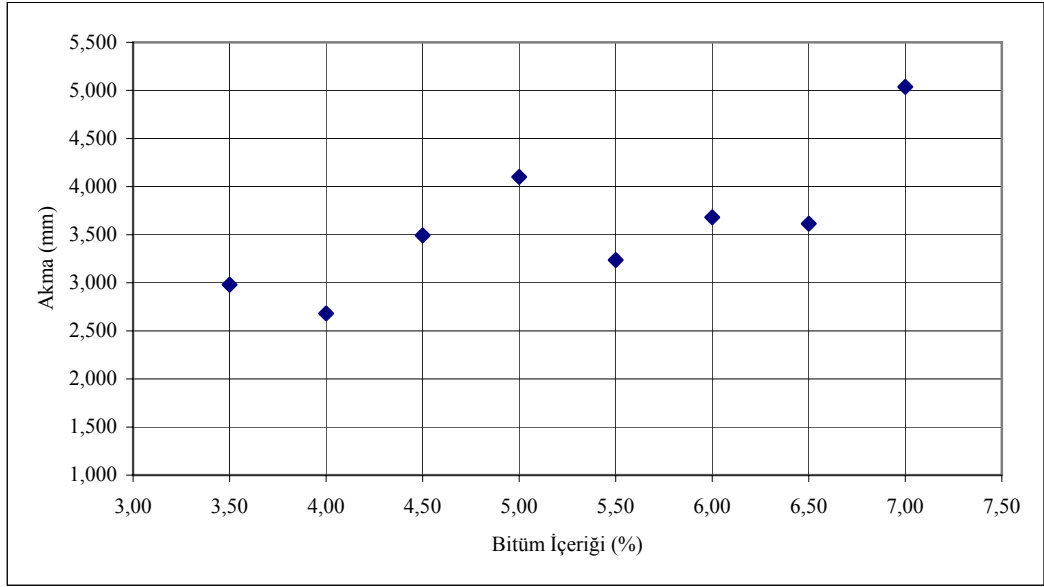
Şekil 5.39. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06.0)



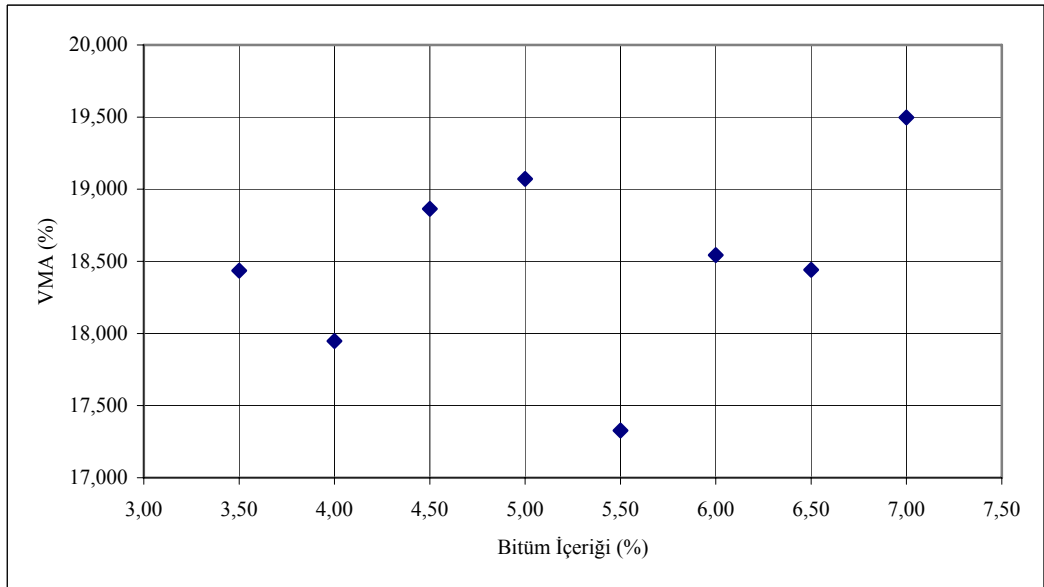
Şekil 5.40. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%o6.0)



Şekil 5.41. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%o6.0)



Şekil 5.42. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06.0)

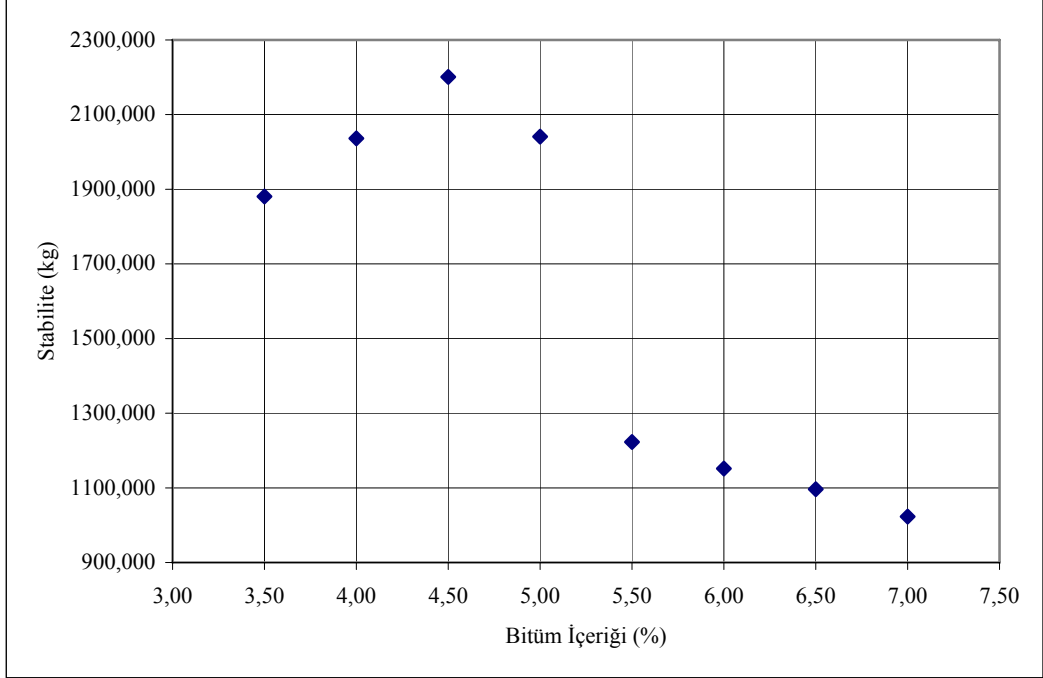


Şekil 5.43. VMA-bitüm içeriği grafiği (M-03 tipi PP katkıli seri-%06.0)

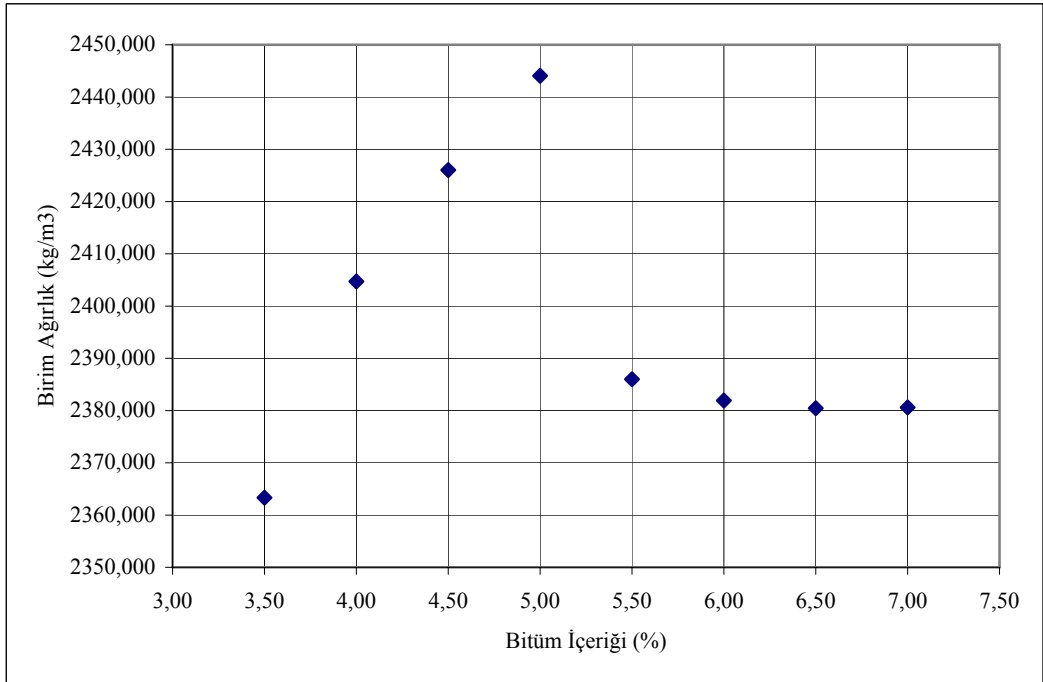
M-03 tipi polipropilenin %06.0 katkıli serisinin grafiklerinden maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri sırasıyla 4.40, 6.60, 6.30 ve 5.90 olarak belirlenmiştir. Birinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 5.77 ve ikinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 5.80 bulunmuştur. Bu iki değerlerin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası 5.79 olarak belirlenmiştir.

**F) M-09 tipi %03.0 PP katkıli serinin optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi**

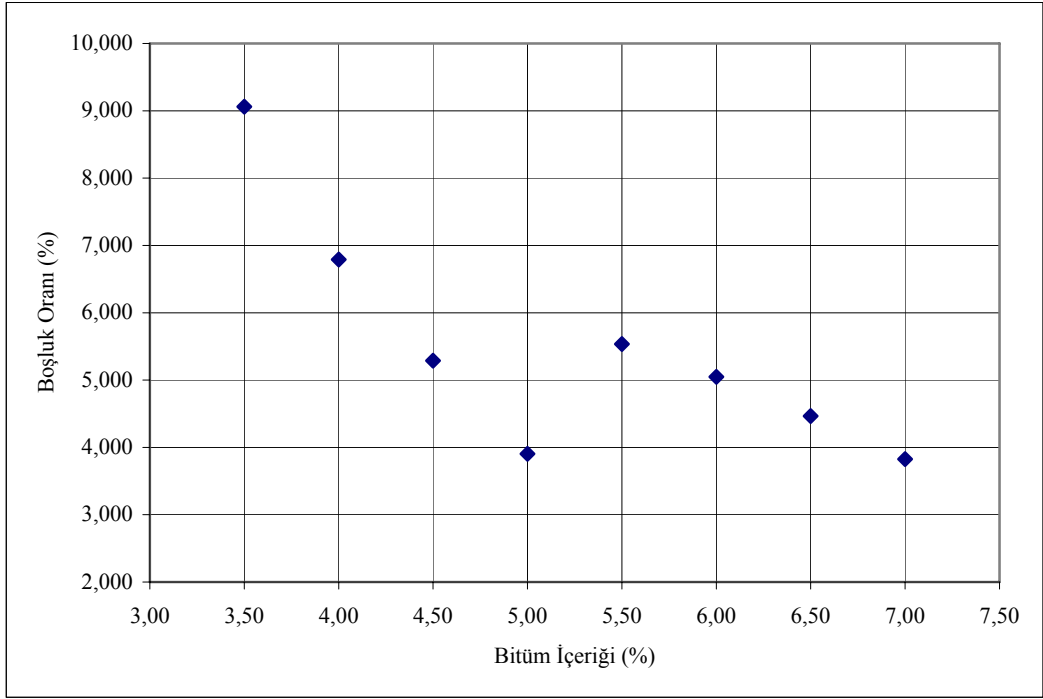
Hesaplamalar Şekil 5.44-Şekil 5.49 yardımıyla yapılmıştır.



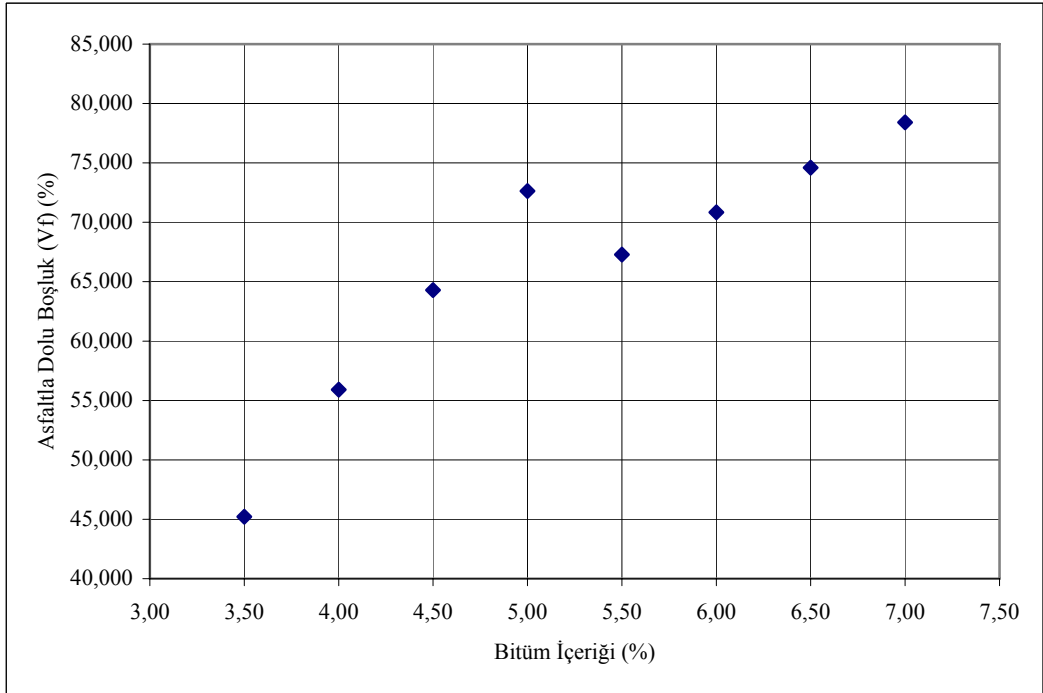
**Şekil 5.44.** Stabilite-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03.0)



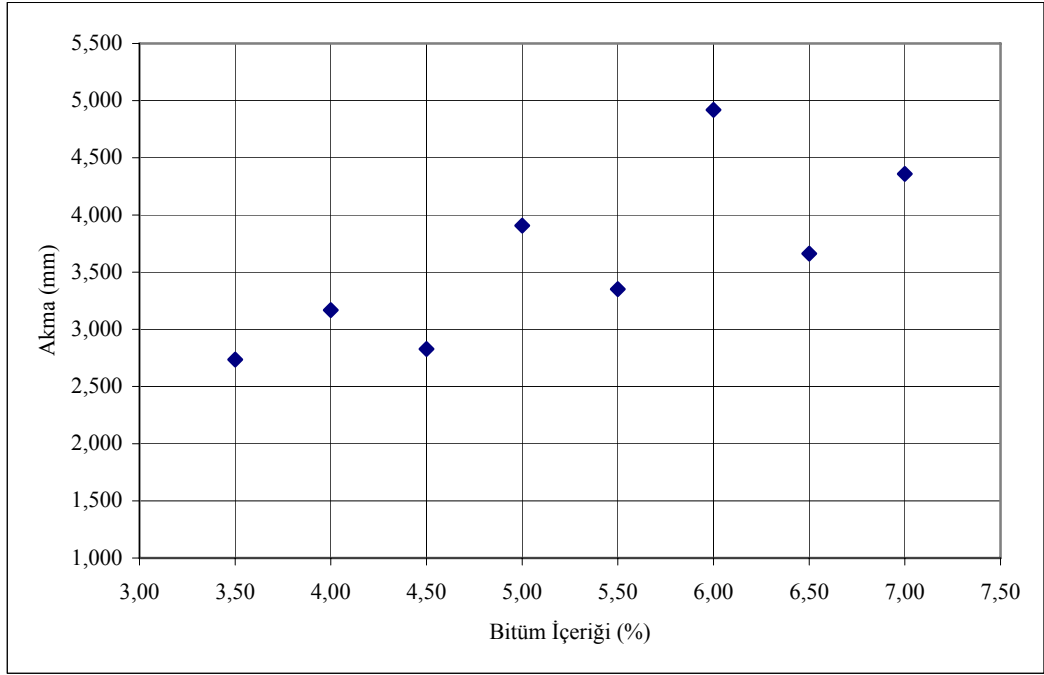
**Şekil 5.45.** Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%03.0)



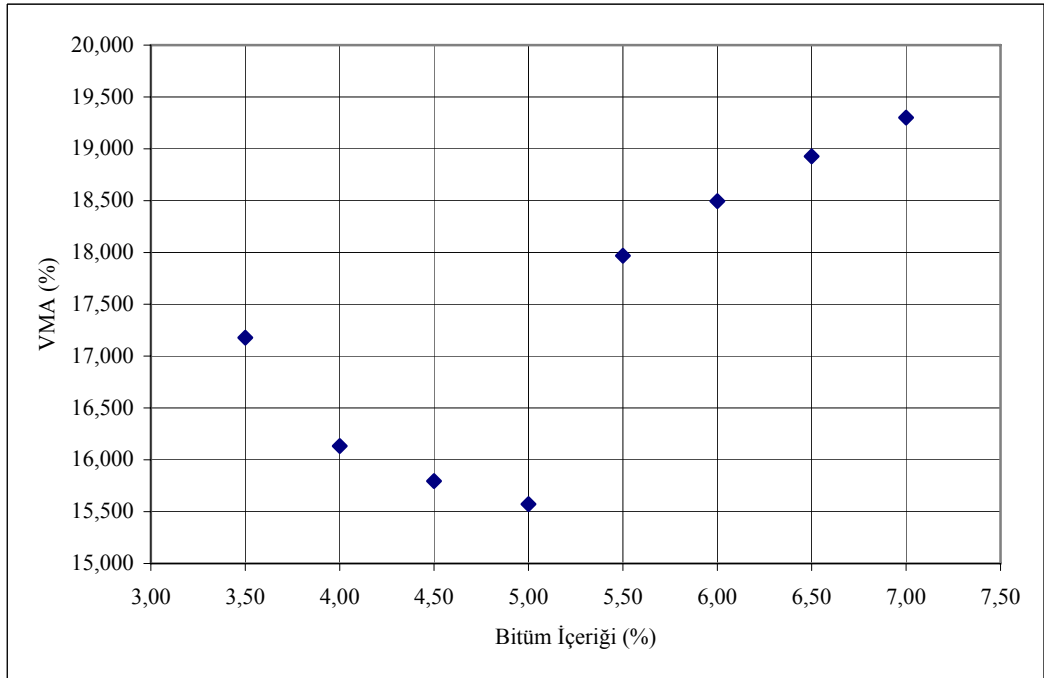
Şekil 5.46. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%o3.0)



Şekil 5.47. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%o3.0)



Şekil 5.48. Akma-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%3.0)



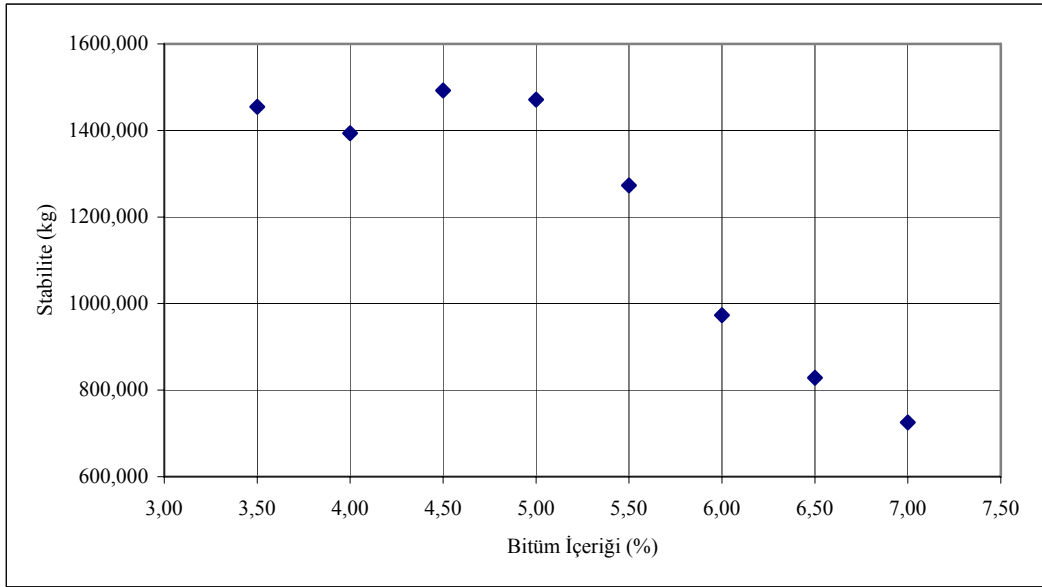
Şekil 5.49. VMA-bitüm içeriği grafiği (M-09 tipi PP katkıli seri-%3.0)

M-09 tipi polipropilenin %3.0 katkıli serisinin grafiklerinden maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri sırasıyla 4.20, 4.60, (hesaplanamadı) ve 5.30 olarak belirlenmiştir.

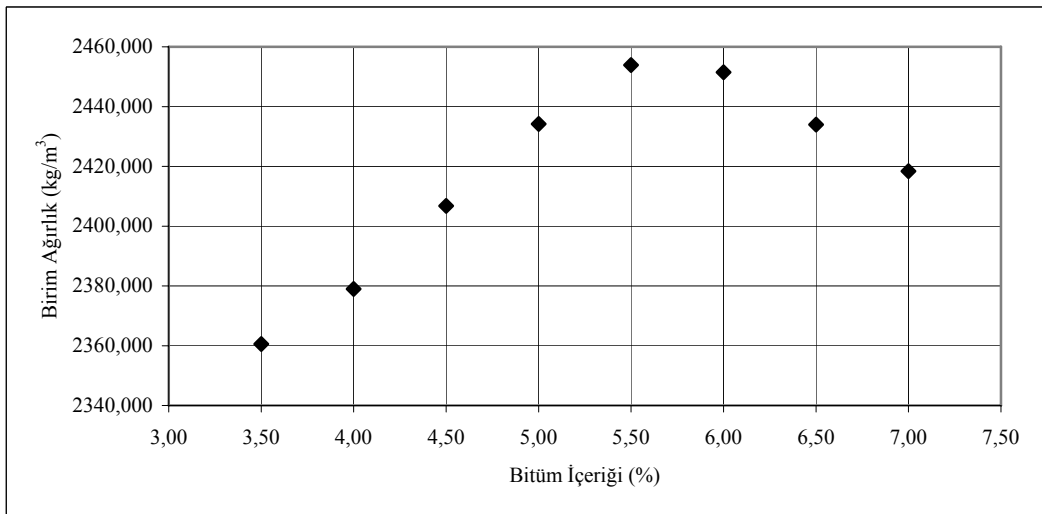
Boşluk oranı değeri %4'lük şartname ortalaması grafikte okunamadığı için hesaplamalarda boşluk oranı dikkate alınmamıştır. Birinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.40 ve ikinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 4.70 bulunmuştur. Bu iki değerin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası 4.60 olarak belirlenmiştir.

### G) Atık %03.0 PP katkı serinin optimum bitüm muhtevasının belirlenmesi

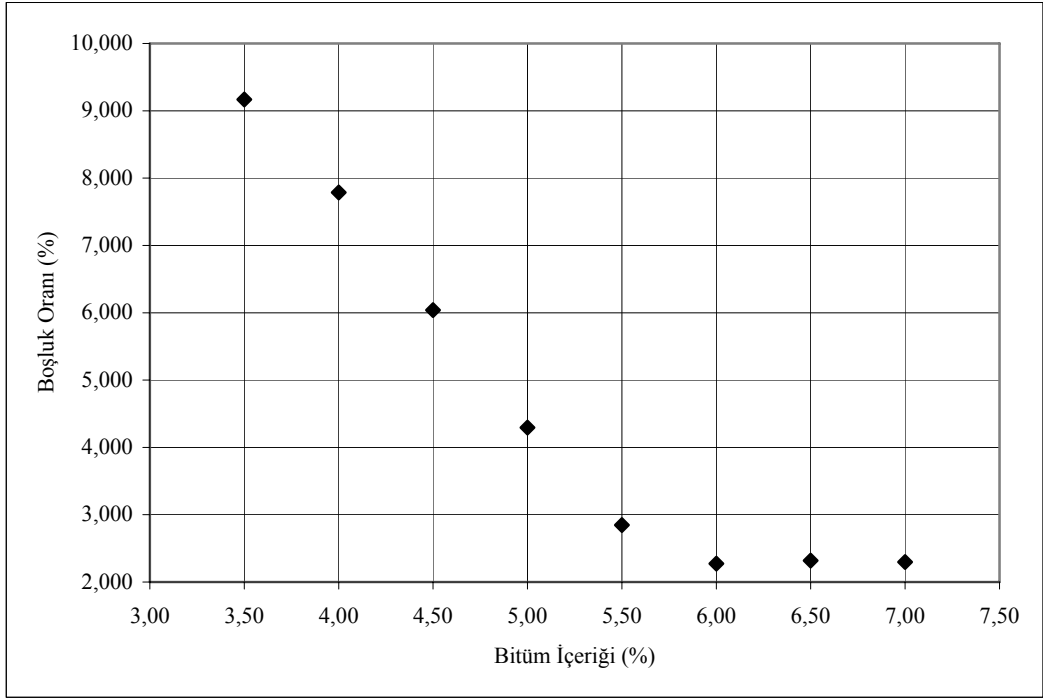
Hesaplamalar Şekil 5.50-Şekil 5.59 yardımıyla yapılmıştır.



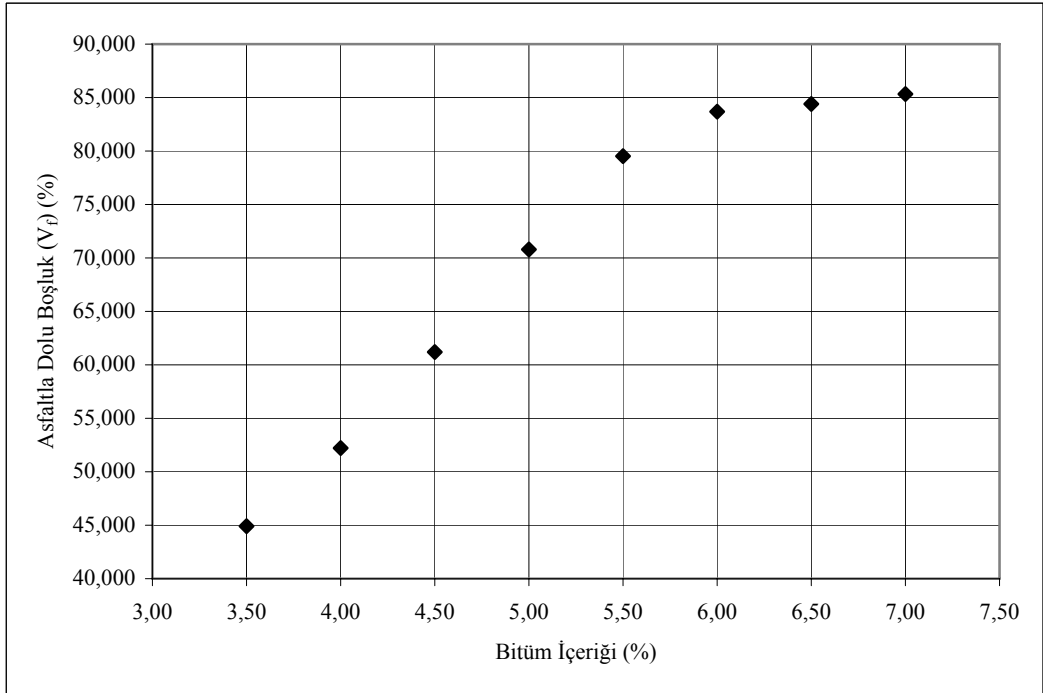
Şekil 5.50. Stabilite-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkı seri-%03.0)



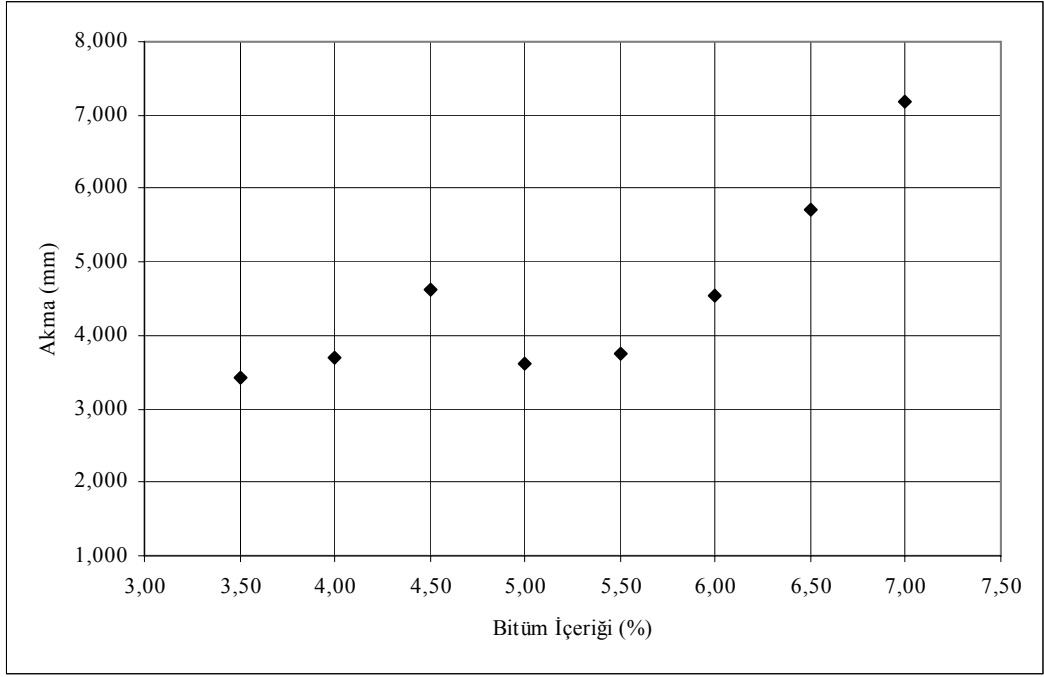
Şekil 5.51. Birim ağırlık-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkı seri-%03.0)



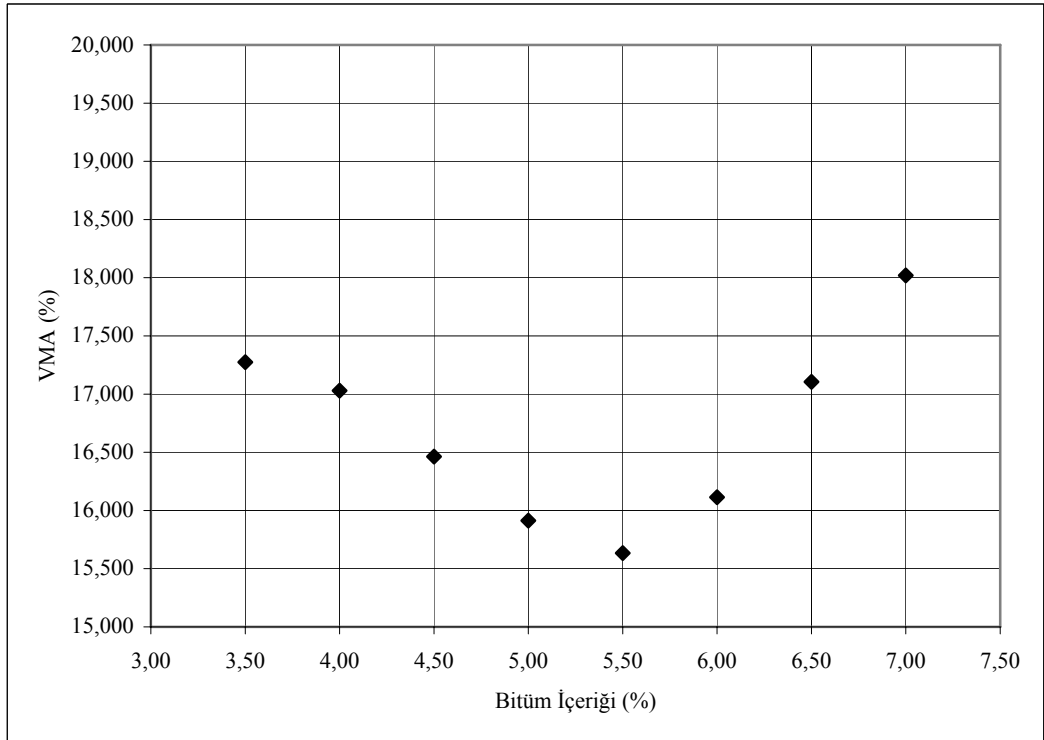
Şekil 5.52. Boşluk oranı-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkılı seri-%03.0)



Şekil 5.53. Asfaltla dolu boşluk-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkılı seri-%03.0)



Şekil 5.54. Akma-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkılı seri-%o3.0)



Şekil 5.55. VMA-bitüm içeriği grafiği (Atık PP katkılı seri-%o3.0)

Atık polipropilenin %o3.0 katkılı serisinin grafiklerinden maksimum stabilite, maksimum birim ağırlık, boşluk oranı ve asfaltla dolu boşluk oranı değerleri sırasıyla 4.70, 5.70, 5.10 ve 4.90 olarak belirlenmiştir. Birinci yöntemle

hesaplanan optimum bitüm muhtevası 5.17 ve ikinci yöntemle hesaplanan optimum bitüm muhtevası 5.10 bulunmuştur. Bu iki değerin ortalaması alınarak optimum bitüm muhtevası 5.14 olarak belirlenmiştir.

Yapılan bütün deneylerin ve hesaplamaların sonucunda hazırlanan tüm karışımlar için optimum bitüm muhtevaları belirlenmiştir. Ancak optimum katkı tipi ve katkı oranının belirlenmesinde karışımların homojen olarak hazırlanabilirliği, fiberlerin karışıma katılabilmesi, çıkan verilerin tutarlılığı ve stabilite değerleri göz önünde tutulmuştur.

Bu şekilde yapılan çalışmaların sonucunda en uygun karışım tipi olarak M-03 tipi polipropilen katkının %03 oranı ve %5 bitüm muhtevası belirlenmiş ve seçilmiştir. Bundan sonraki yapılacak sünme deneyleri için bu karışım kullanılmıştır.

Ayrıca, katkısız karışımlar için yapılan iki seri sonucunda %5 bitüm muhtevası optimum olarak belirlenmiş ve sünme deneylerinin katkısız karışımlarında bu değer kullanılmıştır.

### **5.3. Sünme Deneyi**

Çalışmanın son bölümü olan sünme deneyinde kullanılacak olan numuneler Marshall metodu ile hazırlanmıştır. Hazırlanan bütün numunelerin alt ve üst yüzleri eğelenerek düz bir yüzey elde edilmiştir. Bu işlemin ardından bütün numunelerin yükseklikleri ile havada ve suda ağırlıkları alınarak deney formlarına yazılmıştır.

Deneylerde kullanılmak üzere 7 adet deneme numunesi, 16 adet katkısız numune ve 12 adet M-03 tipi %03 polipropilen katkılı numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler kullanılan bilgisayar programının maksimum 8 haneye kadar olan isimlendirmeleri kabul etmesinden dolayı 8 haneden oluşan ve her basamağın çeşitli faktörleri belirttiği bir isimlendirme sistemi hazırlanmıştır. İlk iki basamak numunenin numarasını, üçüncü basamak uygulanan yükü, dördüncü basamak ise hangi tip karışım olduğunu göstermektedir. Beş ve altınca basamaklar yükleme sürelerini, yedi ve sekizinci basamaklar ise bekleme sürelerini göstermektedir.

Deneyde kullanılan üç tip yük vardır. Üçüncü basamağa gelen yük numaraları 1=100 kPa, 2=207 kPa ve 5=500 kPa'dır. Dördüncü basamakta, 1=Katkısız optimum karışım, 2=PP katkılı optimum karışım, 3=%3.5 bitüm, 4=%4 bitüm ve 5=%4.5 bitümlü karışımları göstermektedir. Bu isimlendirmeler ile ilgili örnek Çizelge 5.21'de verilmiştir.

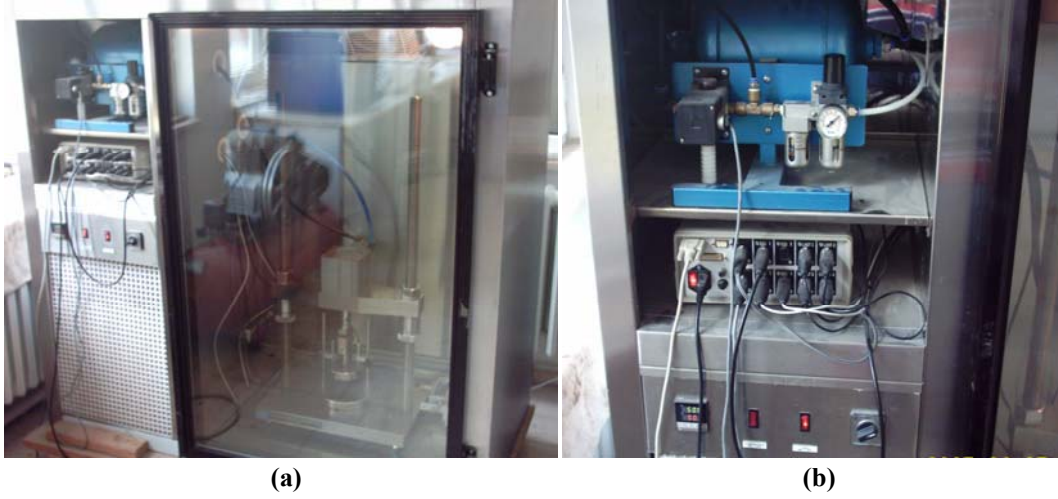
**Çizelge 5.21.** İsimlendirme sistemine ait örnekler

	Numune	Uygulanan Yük	Karışım Tipi	Yükleme Süresi	Bekleme Süresi
<b>11510515</b>	11	500 kPa	Opt. Katkısız	500 ms	1500 ms
<b>50520520</b>	50	500 kPa	Opt. Katkılı	500 ms	2000 ms
<b>04250515</b>	04	207 kPa	%4.5 Bitüm	500 ms	1500 ms

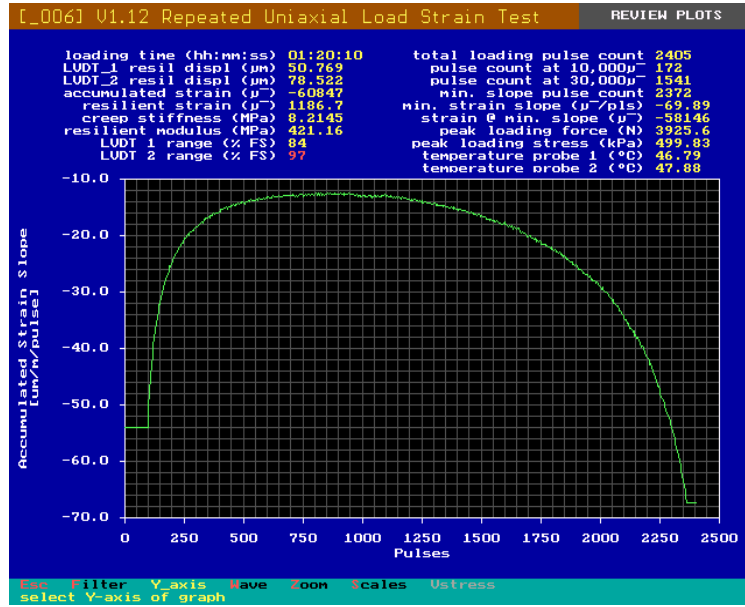
### 5.3.1. UMATTA test aleti

Sünme deneylerinde “Universal Materials Testing Apparatus” yani kısa UMATTA test aleti kullanılmıştır. Ortalama 8 atm basınç ile çalışan ve bunu sağlaması için kullanılan bir hava kompresörü bulunmaktadır. Yüklem kafası ile kompresör arasında kullanılacak olan havanın depolandığı bir bölüm bulunmaktadır. Yüklem sistemi sıcaklığı ayarlanabilen bir inkubatorün içinde bulunmaktadır. Deney işlemleri burada yapılmaktadır. Ayrıca numuneler deneyden 1 gün önce buraya yerleştirilerek istenen deney sıcaklığına gelmeleri sağlanır.

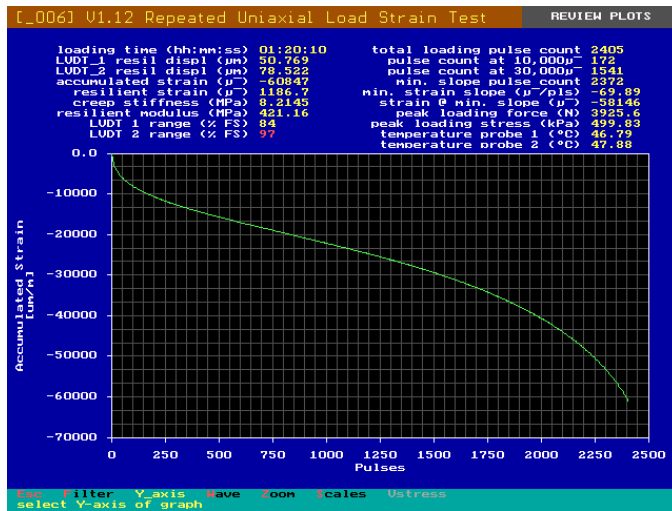
Maksimum 700 kPa'lık bir yüklem sistemi bulunmaktadır. Ayrıca deformasyonların ölçülebilmesi için iki adet LVDT adı verilen deformasyon okuyucular bulunmaktadır. Bütün bu cihazlar CDAS (Control and Data Acquisition System) adı verilen genel sisteme ve bu sistem de bilgisayara bağlı bulunmaktadır. Bu sistem sayesinde deney sırasında elde edilen tüm veriler bilgisayara aktarılmaktadır. Deney ile ilgili tüm veriler deney sırasında bilgisayardan grafik olarak görülebilmektedir. UMATTA test cihazının ve deney sırasında elde edilen grafiklerin örnekleri Şekil 5.56, 5.57, 5.58, 5.59, 5.60, 5.61, 5.62 ve 5.63'te gösterilmiştir.



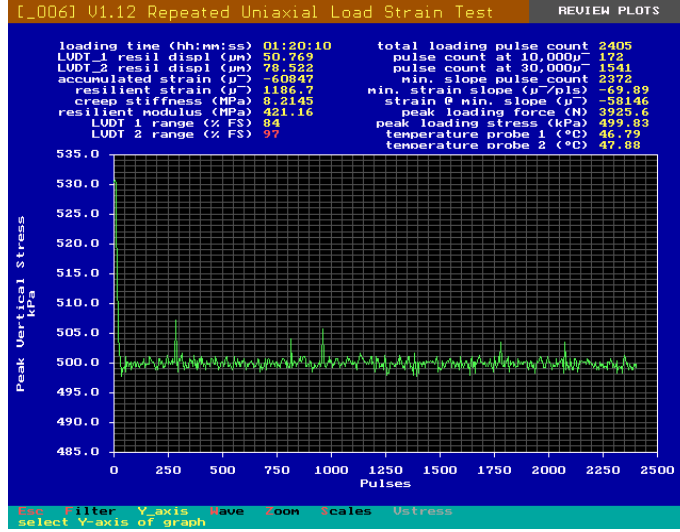
Şekil 5.56. (a) UMATTA test cihazı (b) CDAS sistemi ve hava deposu



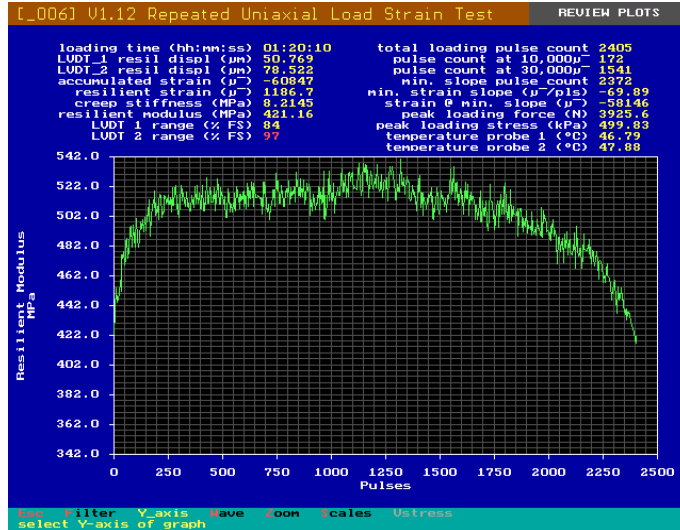
Şekil 5.57. Deformasyon eğimi-vuruş sayısı grafiği



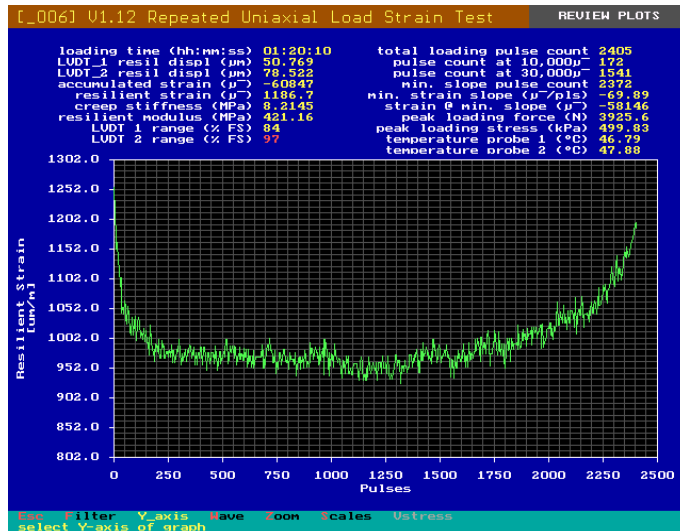
Şekil 5.58. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği



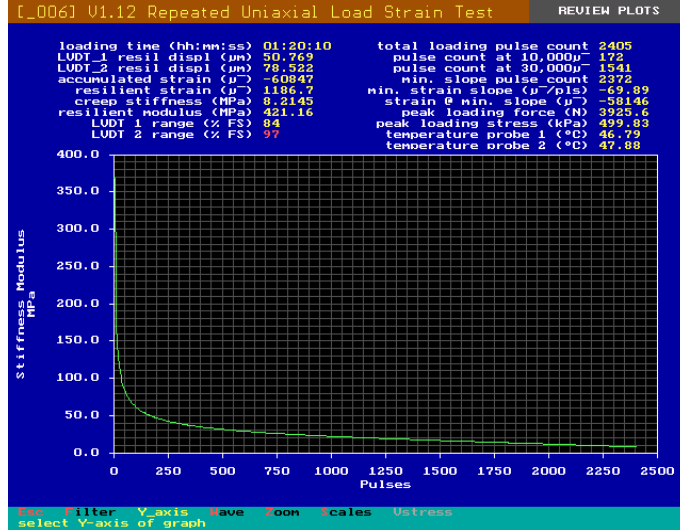
Şekil 5.59. Uygulanan yük-vuruş sayısı grafiği



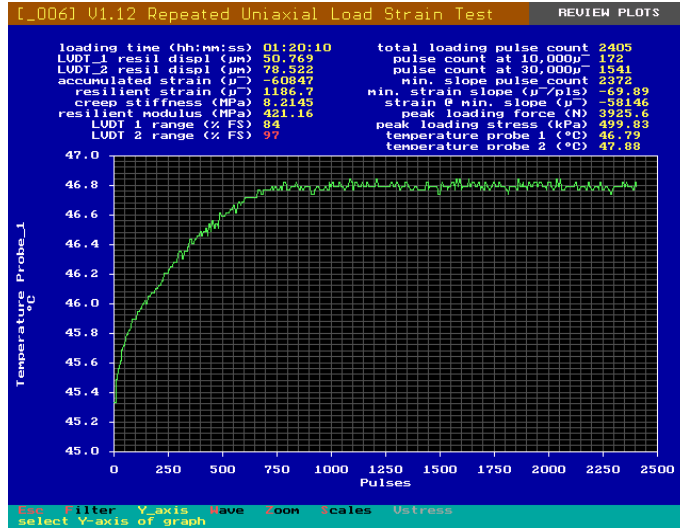
Şekil 5.60. Anlık modül-vuruş sayısı grafiği



Şekil 5.61. Anlık deformasyon-vuruş sayısı grafiği



Şekil 5.62. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği



Şekil 5.63. Sıcaklık-vuruş sayısı grafiği

Yukarıdaki bu grafikler bazı formüller yardımıyla hesaplanıp, çizilmektedir. Bu formüller aşağıda gösterilmiştir.

$$\varepsilon_p = (L3_n - L1) / h \quad (5.12)$$

$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / (h - (L3_n - L1)) \quad (5.13)$$

$$E_r = \frac{\sigma}{\varepsilon_r} \quad (5.14)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.15)$$

Burada;

n: Vuruş sayısı,  $\epsilon_p$ : Kalıcı eksenel deformasyon,  $\epsilon_r$ : Anlık eksenel deformasyon

$E_r$ : Anlık modül, h: Deney başlangıcındaki numune yüksekliği

L1: LVDT'nin çalışma aralığı, L2<sub>n</sub>: n'inci vuruştaki maksimum yer değiştirme

L3<sub>n</sub>: n ile n+1'inci vuruştan sonraki son yer değiştirme okuması

$\sigma$ : Uygulanan maksimum gerilme, F: Uygulanan maksimum kuvvet

A: Numunenin en kesit alanı

### 5.3.2. Sünme deneyinin yapılışı

Sünme deneyinde kullanılacak olan numunelerin öncelikler yükseklikleri, havada ve suda ağırlıkları alınır ve deney formuna yazılır. Numune, sıcaklığı ayarlanmış olan inkubatöre 1 gün önceden yerleştirilir. Deneyden önce numune yükleme bölümüne yerleştirilir. Ardından LVDT'ler ayarlanır ve sıfırlanırlar. Bilgisayardaki yazılım ile deney verileri girilerek deney başlatılır. Numune yıkılana kadar veya istenen bir anda deney bitirilebilir. Deneyin bitiminden sonra yazılımdan deney verilerini içeren "csv" uzantılı Excel dosyası alınır. Bu Excel dosyasının içinde deney ile ilgili tüm veriler ve deney sırasındaki hesaplanan veriler bulunmaktadır. Bu dosya ile Bölüm 5.3.3'te gösterilecek olan Deformasyon-vuruş sayısı, sünme rijitliği-vuruş sayısı grafikleri çizilecektir.

Deneyde kullanılan numunelere ait deney formları Çizelge 5.22, 23, 24, 25 ve 26'da verilmiştir.

Bölüm 4.4'te de anlatıldığı ve Şekil 5.58'teki örnekte de görüleceği üzere sünme deneyine maruz bırakılan numuneler tipik sünme grafiğine uygun davranışlar göstermişlerdir. Yükün uygulanmasıyla birlikte ilk olarak ani bir deformasyon meydana gelmiştir. Bu ani deformasyonun nedeni numune içerisindeki boşlukların aniden gelen yük ile sıkışmasından kaynaklanmaktadır. Bu ilk bölümde deformasyon hızı fazla ancak azalan bir eğri şeklindedir. Bu ilk sünme evresini takiben artık agregalar direkt olarak birbirleriyle temasa geçerler. İkinci sünme evresi adı verilen bu evrede deformasyonlar yavaş bir şekilde artmaktadır. Yükün uygulanmasıyla artık numunenin yapısı bozulmakta ve dayanımı düşmektedir. Bundan dolayı son ve üçüncü sünme evresi denilen son

bölümde ise deformasyonlar hızla artmaktadır. Bu deformasyon artışı numunenin parçalanmasına kadar devam eder ve son olarak numune parçalanır.

**Çizelge 5.22.** Sünme numunelerinin formları (Katksız Deneme No:01-02-04-05-07-08-09)

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>									
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>									
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	Karışım (g)	Karışım (Teorik) (h)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Asfalt (i)	Agrega (j)	Hava Boşluğu (k)	BOŞLUK ORANI (%)	Asfaltla Dolu (m)	Toplam Karışım (n)	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	o			
	a	b	c	d	e	f	g	h	d/(d-e)	b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	1/1 * 100	100-100g/h	g				
1	4.000	3.846	59.000	1138.400	670.000	468.400	2430.401	2579.900	9.084	84.763	6.152	15.237	59.621	5.795	2430.401					
2	4.000	3.846	59.000	1133.300	669.400	463.900	2442.983	2579.900	9.131	85.202	5.667	14.798	61.707	5.307	2442.983					
Ort.							2436.692	2579.900	9.108	84.983	5.910	15.017	60.664	5.551	2436.692					
BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>									
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>									
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	Karışım (g)	Karışım (Teorik) (h)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Asfalt (i)	Agrega (j)	Hava Boşluğu (k)	BOŞLUK ORANI (%)	Asfaltla Dolu (m)	Toplam Karışım (n)	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	o			
	a	b	c	d	e	f	g	h	d/(d-e)	b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	1/1 * 100	100-100g/h	g				
4	4.500	4.306	59.000	1150.000	677.800	472.200	2435.409	2561.428	10.192	84.532	5.277	15.468	65.888	4.920	2435.409					
5	4.500	4.306	59.000	1151.800	679.200	472.600	2437.156	2561.428	10.199	84.592	5.209	15.408	66.195	4.852	2437.156					
Ort.							2436.282	2561.428	10.195	84.562	5.243	15.438	66.041	4.886	2436.282					
BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2730 kg/m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 1029 kg/m <sup>3</sup>										İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2750 kg/m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2757 kg/m <sup>3</sup>									
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>										FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI: 2790 kg/m <sup>3</sup>									
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	Karışım (g)	Karışım (Teorik) (h)	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	Asfalt (i)	Agrega (j)	Hava Boşluğu (k)	BOŞLUK ORANI (%)	Asfaltla Dolu (m)	Toplam Karışım (n)	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	o			
	a	b	c	d	e	f	g	h	d/(d-e)	b*g/(SG <sub>asf</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	1/1 * 100	100-100g/h	g				
7	5.000	4.762	59.000	1152.700	684.600	468.100	2462.508	2543.391	11.396	85.065	3.539	14.935	76.303	3.180	2462.508					
8	5.000	4.762	59.000	1152.300	684.500	467.800	2463.232	2543.391	11.399	85.090	3.511	14.910	76.453	3.152	2463.232					
9	5.000	4.762	59.000	1151.200	684.300	466.900	2465.624	2543.391	11.410	85.173	3.417	14.827	76.954	3.058	2465.624					
Ort.							2463.788	2543.391	11.402	85.109	3.489	14.891	76.570	3.130	2463.788					

**Çizelge 5.23.** Sünme numunelerinin formları (Katksız Optimum No:11-12-13-26 ve 14-15-16-27)

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			1029			kg / m <sup>3</sup>				
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			2750			kg / m <sup>3</sup>				
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			HACİM (Toplama Göre) %			2790			kg / m <sup>3</sup>				
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	HAVADA	SUDA	HACİM (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	AGREGA	HAVA BOŞLUĞU	BOŞLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	o	
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)		b*g/(S <sub>gr</sub> f)	(100-b)*g/S <sub>gr</sub>	100-i-j	100-j	1/1 * 100	100-100g/h	
11	5.000	4.762	58.000	1142.400	678.300	464.100	2543.391	11.391	85.032	3.577	14.968	76.102	3.218	2461.538
12	5.000	4.762	58.000	1146.200	680.300	465.900	2543.391	11.385	84.985	3.630	15.015	75.824	3.271	2460.185
13	5.000	4.762	58.000	1145.000	679.800	465.200	2543.391	11.390	85.024	3.586	14.976	76.055	3.227	2461.307
26	5.000	4.762	58.000	1141.700	676.700	465.000	2543.391	11.362	84.815	3.823	15.185	74.826	3.465	2455.269
Ort.							2543.391	11.382	84.964	3.634	15.036	75.702	3.295	2459.575

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			1029			kg / m <sup>3</sup>				
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			2750			kg / m <sup>3</sup>				
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI :			HACİM (Toplama Göre) %			2790			kg / m <sup>3</sup>				
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	HAVADA	SUDA	HACİM (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	KARIŞIM (Teorik)	ASFALT	AGREGA	HAVA BOŞLUĞU	BOŞLUK ORANI (%)	BİRİM AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	o	
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)		b*g/(S <sub>gr</sub> f)	(100-b)*g/S <sub>gr</sub>	100-i-j	100-j	1/1 * 100	100-100g/h	
14	5.000	4.762	58.000	1144.600	680.000	464.600	2543.391	11.401	85.104	3.495	14.896	76.535	3.136	2463.625
15	5.000	4.762	59.000	1147.800	679.600	468.200	2543.391	11.345	84.685	3.970	15.315	74.079	3.612	2451.516
16	5.000	4.762	58.000	1148.400	682.100	466.300	2543.391	11.397	85.075	3.528	14.925	76.362	3.169	2462.792
27	5.000	4.762	58.000	1147.600	681.200	466.400	2543.391	11.387	84.997	3.616	15.003	75.898	3.257	2460.549
Ort.							2543.391	11.382	84.965	3.632	15.035	75.719	3.294	2459.621

**Çizelge 5.24.** Sünme numunelerinin formları (Katksız Optimum No:17-18-19-28 ve 20-21-22-29)

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		1029		kg / m <sup>3</sup>		Birim Ağırlık ( kg/m <sup>3</sup> )
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :										AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		2757		kg / m <sup>3</sup>		
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI :										ÖZGÜL AĞIRLIK ( Teorik )		HACİM ( Toplama Göre ) %		BOŞLUK ORANI ( % )		
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ ( mm )	AGIRLIK ( gr )	HACİM ( cm <sup>3</sup> )	Karışım	Karışım	Teorik	Asfalt	Asfalt	Hava Boşluğu	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o			
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)		b*g/(SG <sub>air</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	l/1 * 100	100-100g/h	g			
17	5.000	4.762	59.000	1149.100	682.900	466.200	2543.391	11.406	85.145	3.448	14.855	76.786	3.089	2464.822			
18	5.000	4.762	59.000	1148.200	681.000	467.200	2543.391	11.373	84.896	3.731	15.104	75.300	3.372	2457.620			
19	5.000	4.762	58.000	1147.300	681.400	466.100	2543.391	11.393	85.045	3.562	14.955	76.181	3.203	2461.918			
28	5.000	4.762	58.000	1149.900	683.300	466.600	2543.391	11.405	85.131	3.464	14.869	76.702	3.103	2464.423			
Ort.						2462.196	2543.391	11.394	85.054	3.531	14.946	76.242	3.192	2462.196			

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :										BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		1029		kg / m <sup>3</sup>		Birim Ağırlık ( kg/m <sup>3</sup> )
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI :										AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI :		2757		kg / m <sup>3</sup>		
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI :										ÖZGÜL AĞIRLIK ( Teorik )		HACİM ( Toplama Göre ) %		BOŞLUK ORANI ( % )		
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ ( mm )	AGIRLIK ( gr )	HACİM ( cm <sup>3</sup> )	Karışım	Karışım	Teorik	Asfalt	Asfalt	Hava Boşluğu	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o			
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)		b*g/(SG <sub>air</sub> )	(100-b)*g/SG <sub>agr</sub>	100-i-j	100-j	l/1 * 100	100-100g/h	g			
20	5.000	4.762	58.000	1147.100	682.600	464.500	2543.391	11.428	85.308	3.264	14.692	77.785	2.904	2469.537			
21	5.000	4.762	58.000	1141.200	677.300	463.900	2543.391	11.384	84.979	3.637	15.021	75.788	3.278	2460.013			
22	5.000	4.762	59.000	1149.200	683.100	466.100	2543.391	11.410	85.171	3.419	14.829	76.942	3.060	2465.565			
29	5.000	4.762	58.000	1140.900	676.800	464.100	2543.391	11.376	84.920	3.704	15.080	75.440	3.345	2458.306			
Ort.						2463.355	2543.391	11.400	85.094	3.506	14.906	76.489	3.147	2463.355			

**Çizelge 5.25.** Sünme numunelerinin formları (Optimum PP Katkılı No:41-42-43 ve 44-45-46)

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			1029			kg / m <sup>3</sup>				
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			2757			kg / m <sup>3</sup>				
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			Birim Ağırlık				
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr) Havada	HACİM cm <sup>3</sup> Suda	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> ) Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım	( kg/m <sup>3</sup> )
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)		b*g/(S <sub>GASİ</sub> )	(100-b)*g/S <sub>Gagr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g
41	5.000	4.762	59.000	1152.000	677.800	474.200	2429.355	11.242	83.920	4.838	16.080	69.914	4.484	2429.355
42	5.000	4.762	60.000	1151.100	675.400	475.700	2419.802	11.198	83.590	5.212	16.410	68.239	4.859	2419.802
43	5.000	4.762	60.000	1151.200	675.900	475.300	2422.049	11.209	83.668	5.124	16.332	68.627	4.771	2422.049
Ort.							2423.735	11.216	83.726	5.058	16.274	68.927	4.705	2423.735

BİRİKET NO	KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			BİTÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			1029			kg / m <sup>3</sup>				
	İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			2757			kg / m <sup>3</sup>				
	FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI:			HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			Birim Ağırlık				
	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr) Havada	HACİM cm <sup>3</sup> Suda	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> ) Karışım (Teorik)	Asfalt	Agrega	Hava Boşluğu	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım	Asfaltla Dolu	Toplam Karışım	( kg/m <sup>3</sup> )
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)		b*g/(S <sub>GASİ</sub> )	(100-b)*g/S <sub>Gagr</sub>	100-i-j	100-j	i/l * 100	100-100g/h	g
44	5.000	4.762	59.000	1152.000	677.800	474.200	2429.355	11.242	83.920	4.838	16.080	69.914	4.484	2429.355
45	5.000	4.762	60.000	1151.100	675.400	475.700	2419.802	11.198	83.590	5.212	16.410	68.239	4.859	2419.802
46	5.000	4.762	60.000	1151.200	675.900	475.300	2422.049	11.209	83.668	5.124	16.332	68.627	4.771	2422.049
Ort.							2423.735	11.216	83.726	5.058	16.274	68.927	4.705	2423.735

**Çizelge 5.26.** Sünme numunelerinin formları (Optimum PP Katkılı No:47-48-49 ve 50-51-52)

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2730 kg / m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 1029 kg / m <sup>3</sup>														
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2750 kg / m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2757 kg / m <sup>3</sup>														
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2790 kg / m <sup>3</sup>														
BİRİKET NO	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	
							Havada	Suda	Suda	Hava Boşluğu	Agrega	Asfalt		Asfaltla Dolu
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)	Karışım	Karışım (Teorik)	b*g/(SG <sub>asf</sub> )	100-i-j	100-j	1/1 * 100	100-100g/h	g
47	5.000	4.762	59.000	1148.000	676.000	472.000	2543.391	11.256	84.018	4.726	15.982	70.427	4.372	2432.203
48	5.000	4.762	60.000	1151.100	675.400	475.700	2543.391	11.198	83.590	5.212	16.410	68.239	4.859	2419.802
49	5.000	4.762	60.000	1151.200	675.900	475.300	2543.391	11.209	83.668	5.124	16.332	68.627	4.771	2422.049
Ort.						2424.685	2543.391	11.221	83.759	5.021	16.241	69.098	4.667	2424.685

KABA AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2730 kg / m <sup>3</sup> BITÜM ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 1029 kg / m <sup>3</sup>														
İNCE AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2750 kg / m <sup>3</sup> AGREGANIN ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2757 kg / m <sup>3</sup>														
FİLLER ÖZGÜL AĞIRLIĞI : 2790 kg / m <sup>3</sup>														
BİRİKET NO	AC %	AC %	BİRİKET YÜKSEKLİĞİ (mm)	AĞIRLIK (gr)	HACİM (cm <sup>3</sup> )	ÖZGÜL AĞIRLIK (kg/m <sup>3</sup> )	HACİM (Toplama Göre) %			BOŞLUK ORANI (%)			Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	
							Havada	Suda	Suda	Hava Boşluğu	Agrega	Asfalt		Asfaltla Dolu
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
Agrega Ağırlığına Göre	a/(100+a)				d-e	d/(d-e)	Karışım	Karışım (Teorik)	b*g/(SG <sub>asf</sub> )	100-i-j	100-j	1/1 * 100	100-100g/h	g
50	5.000	4.762	59.000	1152.000	677.800	474.200	2429.355	11.242	83.920	4.838	16.080	69.914	4.484	2429.355
51	5.000	4.762	60.000	1151.100	675.400	475.700	2543.391	11.198	83.590	5.212	16.410	68.239	4.859	2419.802
52	5.000	4.762	60.000	1151.200	675.900	475.300	2543.391	11.209	83.668	5.124	16.332	68.627	4.771	2422.049
Ort.						2423.735	2543.391	11.216	83.726	5.058	16.274	68.927	4.705	2423.735

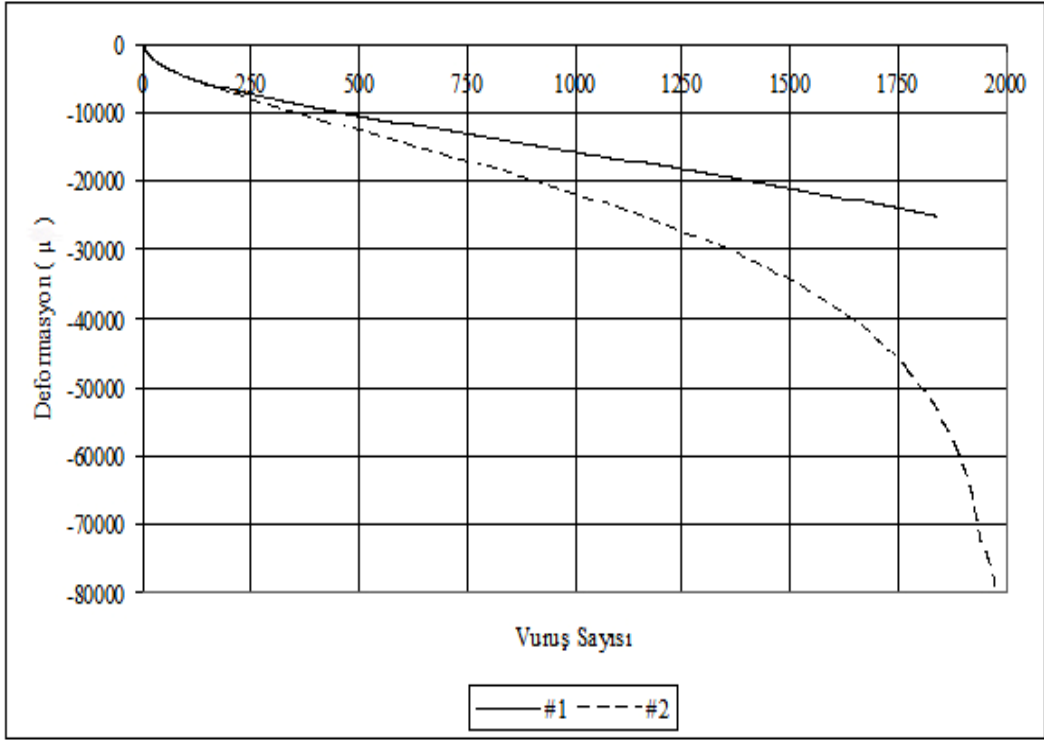
### 5.3.3. Sünme deneyinin sonuçları

İlk olarak yapılan deneme amaçlı numuneler ile test aletinin farklı yüklerdeki stabilitesi yani deney aletinin düzgün çalışıp çalışmadığı kontrol edilmiştir. Katkısız olarak hazırlanan numunelerle yapılan bu denemelerde ayrıca farklı yükleme-bekleme sürelerinin ve farklı yüklerin numunelerin davranışları üzerindeki araştırılmıştır.

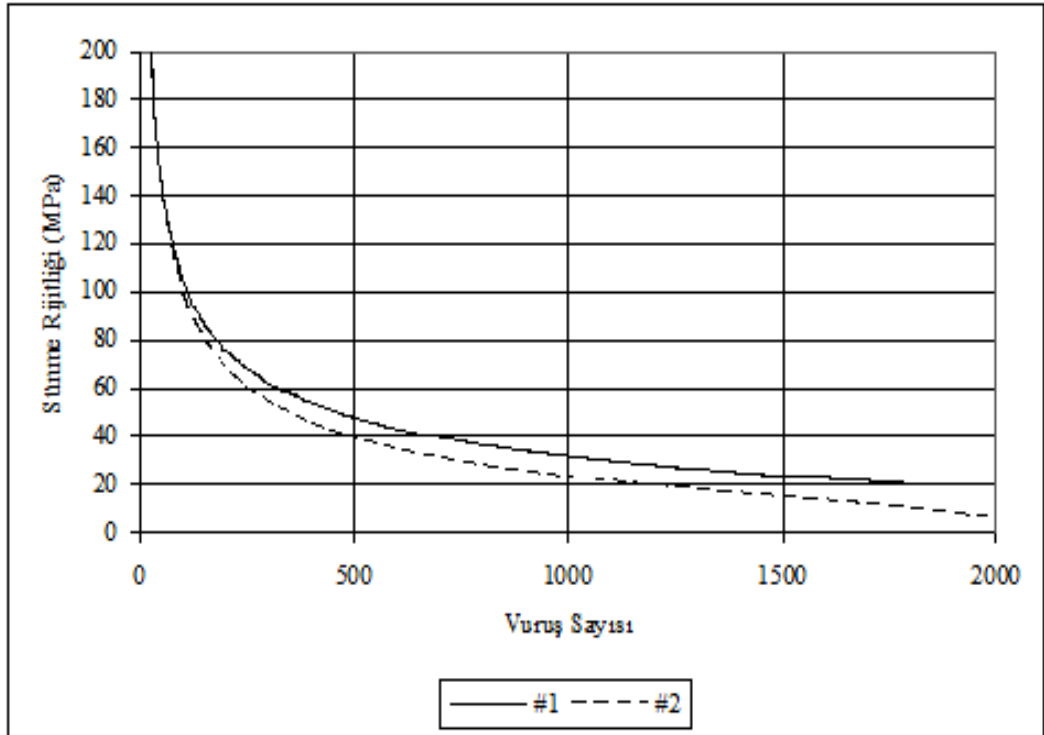
İkinci olarak, belirlenen optimum bitüm muhtevasında hazırlanan katkısız numunelere sabit yükleme sürelerinde ancak farklı bekleme sürelerinde sünme deneyleri uygulanmıştır. Son olarak da optimum olarak belirlenen M-03 tipi polipropilenin %03 oranında katılması ve %5 bitüm ile hazırlanan numunelere aynı deney uygulanmıştır.

Bu amaçla deney sonucunda elde edilen “csv” dosyaları yardımıyla deformasyon-vuruş sayısı ve sünme rijitliği-vuruş sayısı grafikleri, her seri için birlikte çizilerek karşılaştırma yapılmıştır.

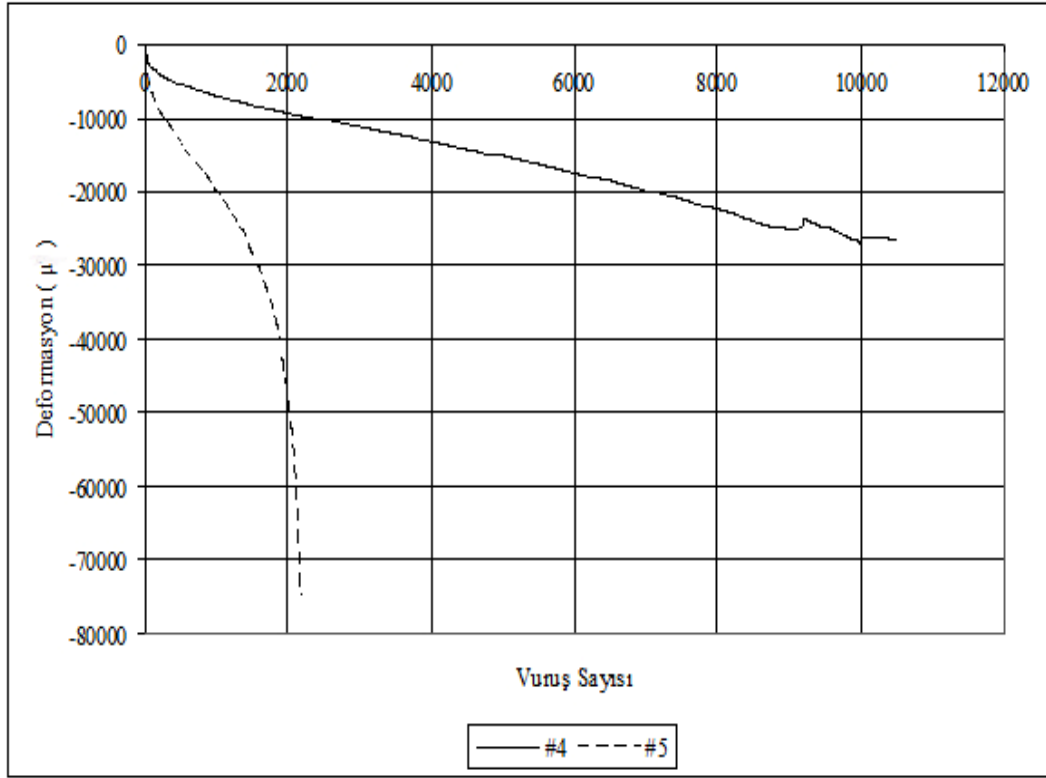
Sünme deneylerinin sonucunda elde edilen grafikler Şekil 5.64'ten 5.85'e kadar gösterilmiştir.



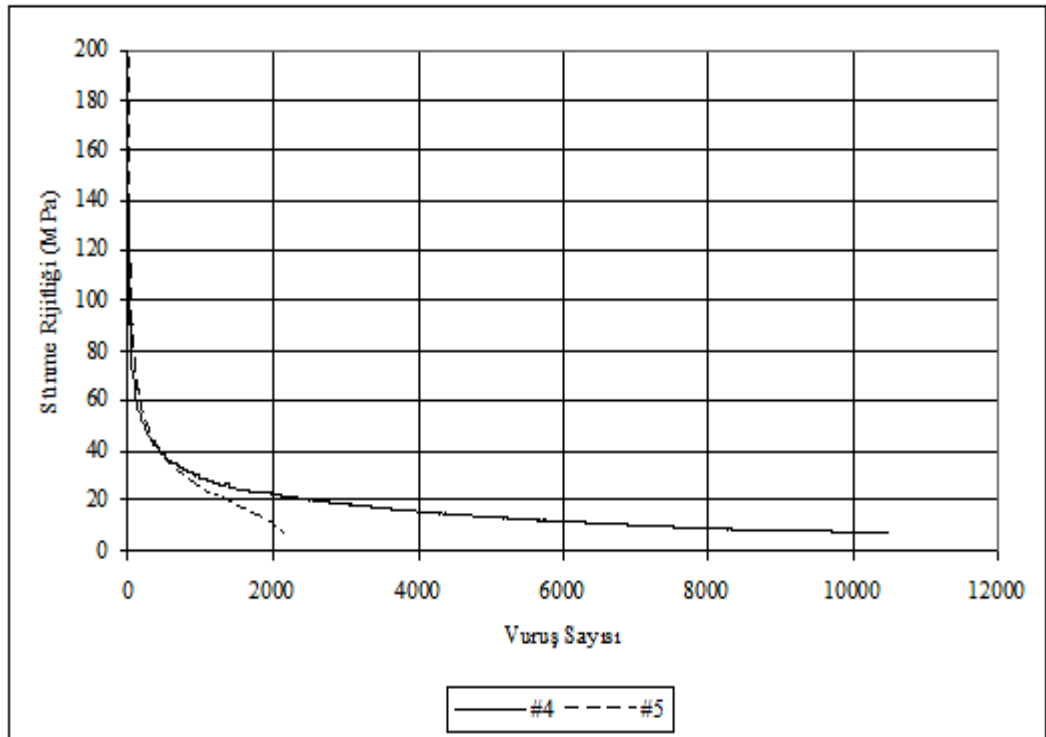
Şekil 5.64. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (01540515-02540520)



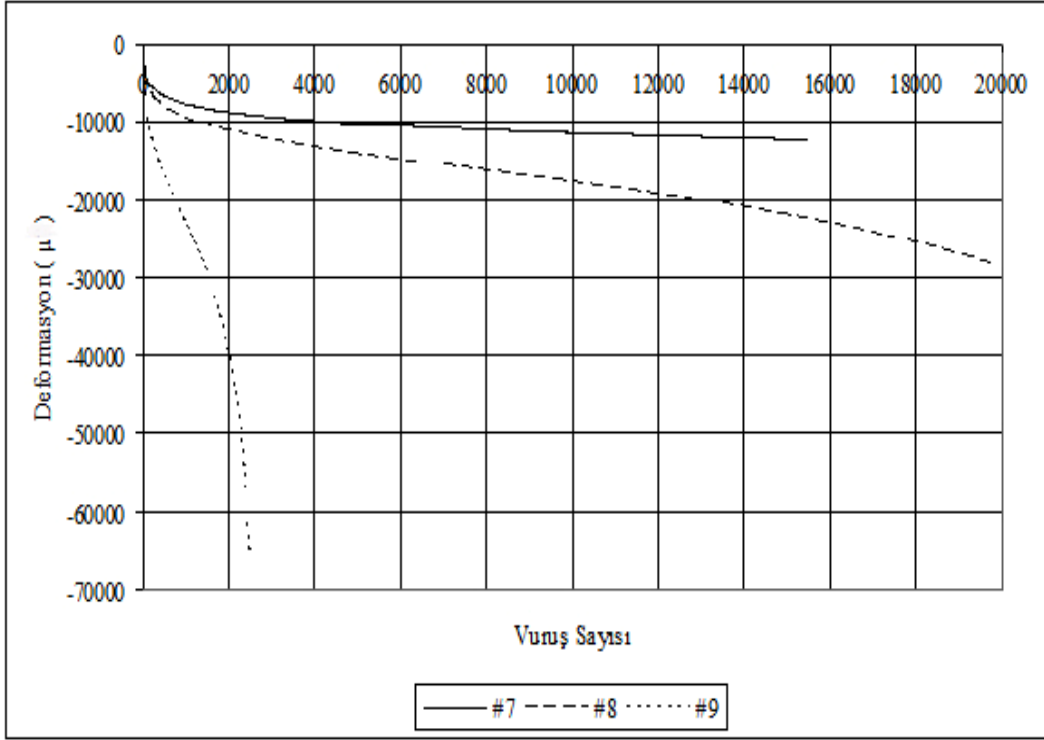
Şekil 5.65. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (01540515-02540520)



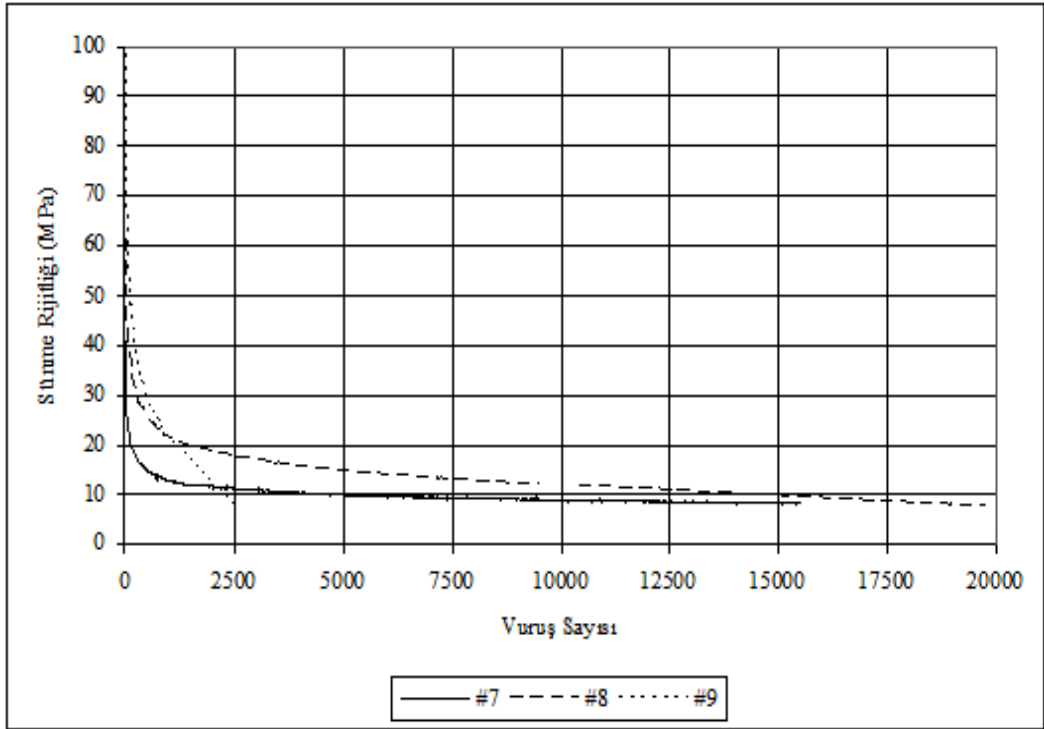
Şekil 5.66. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (04250515-05550515)



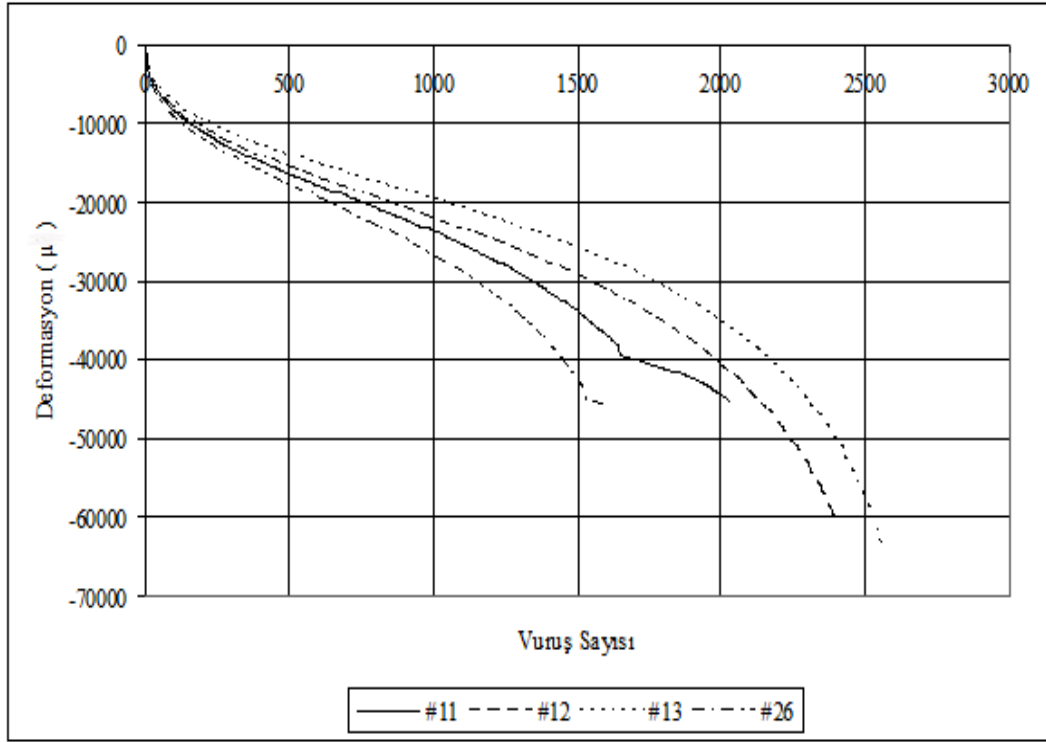
Şekil 5.67. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (04250515-05550515)



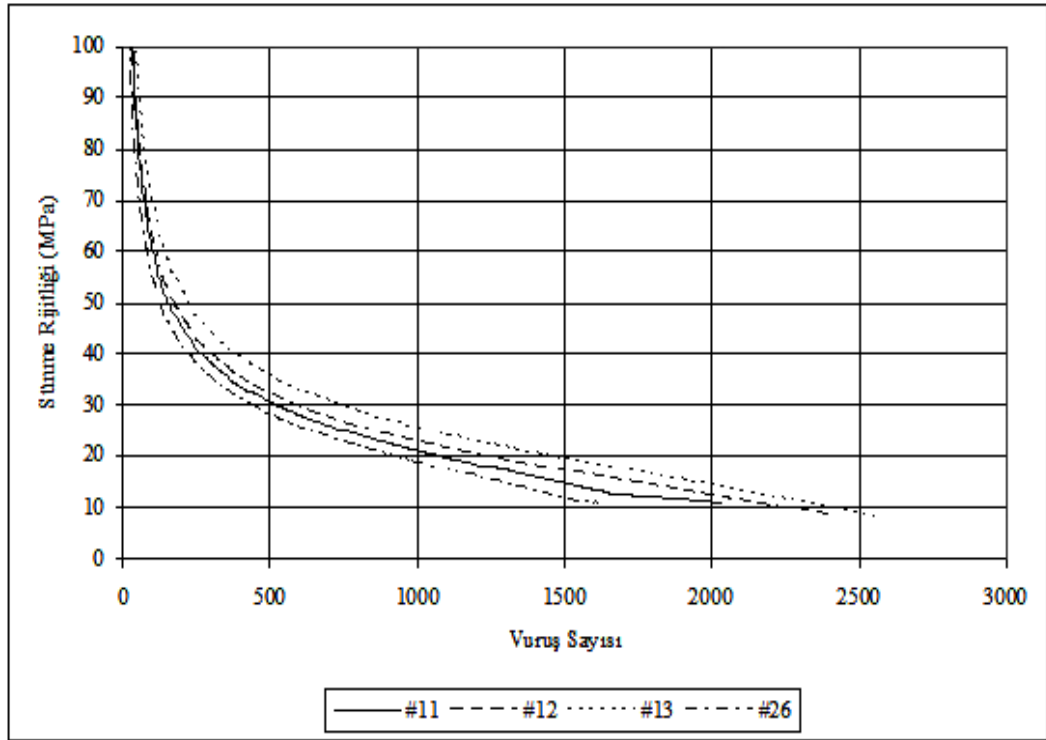
Şekil 5.68. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (07110515-08210515-09510515)



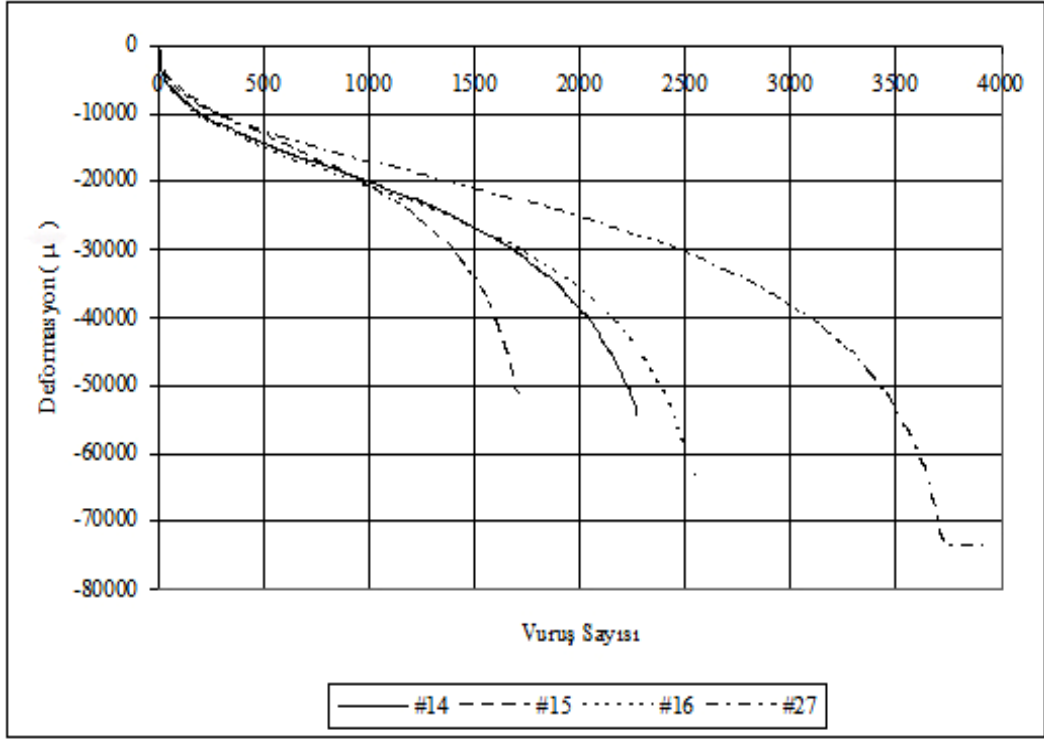
Şekil 5.69. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (07110515-08210515-09510515)



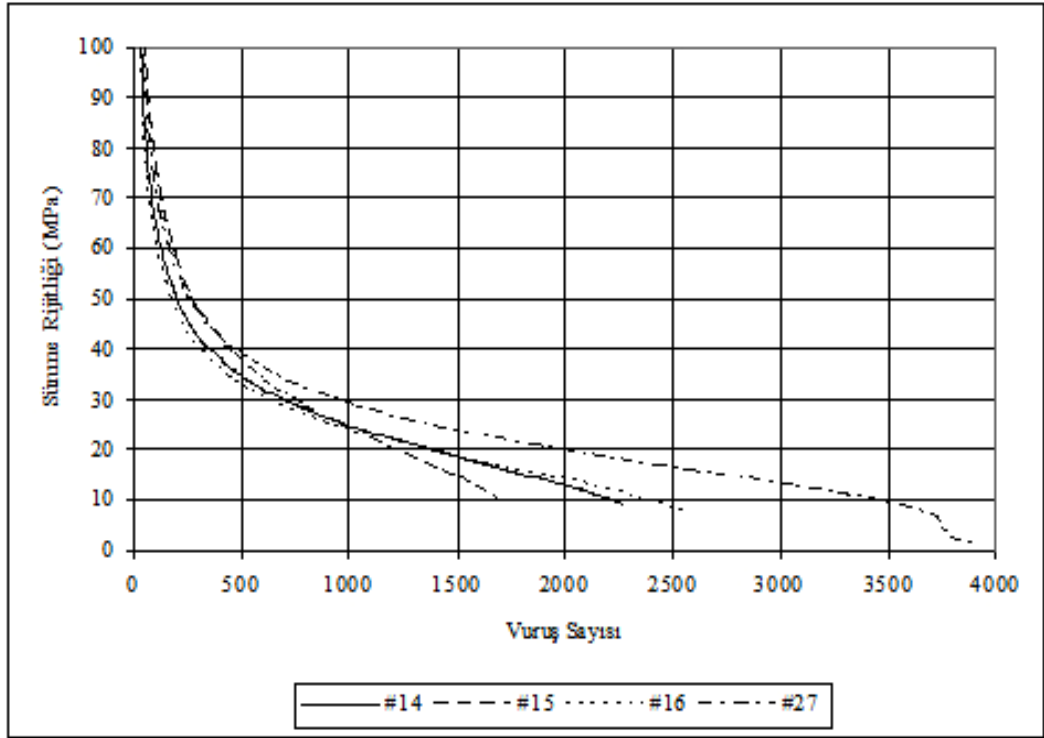
Şekil 5.70. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (11510515-12510515-13510515-26510515)



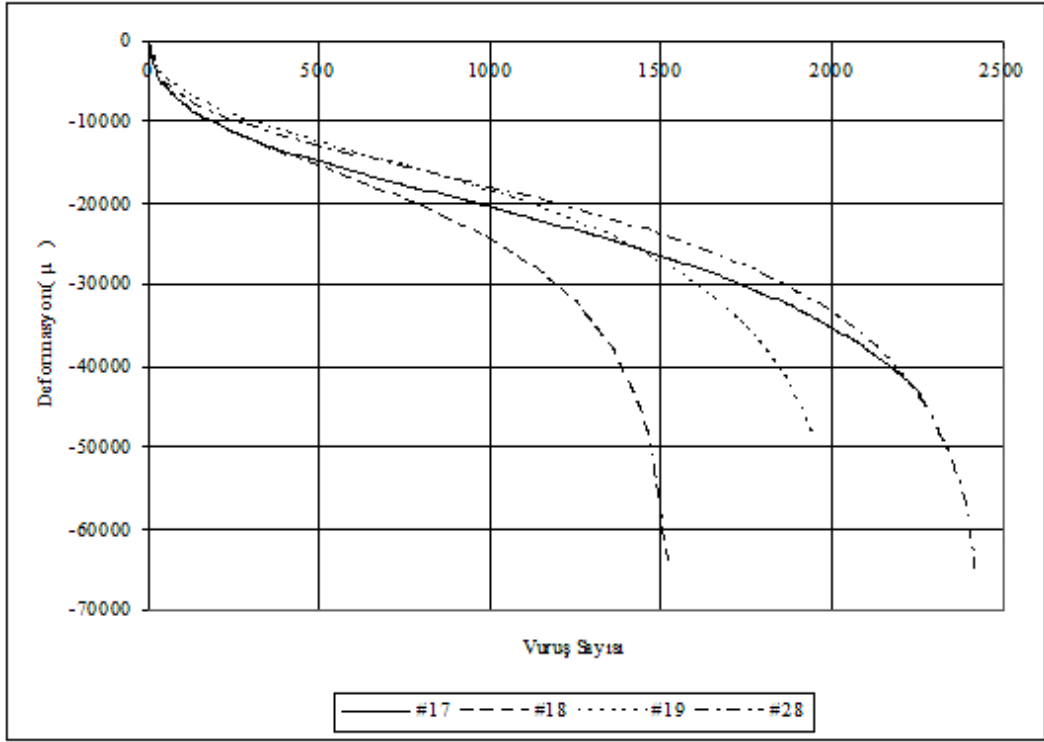
Şekil 5.71. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (11510515-12510515-13510515-26510515)



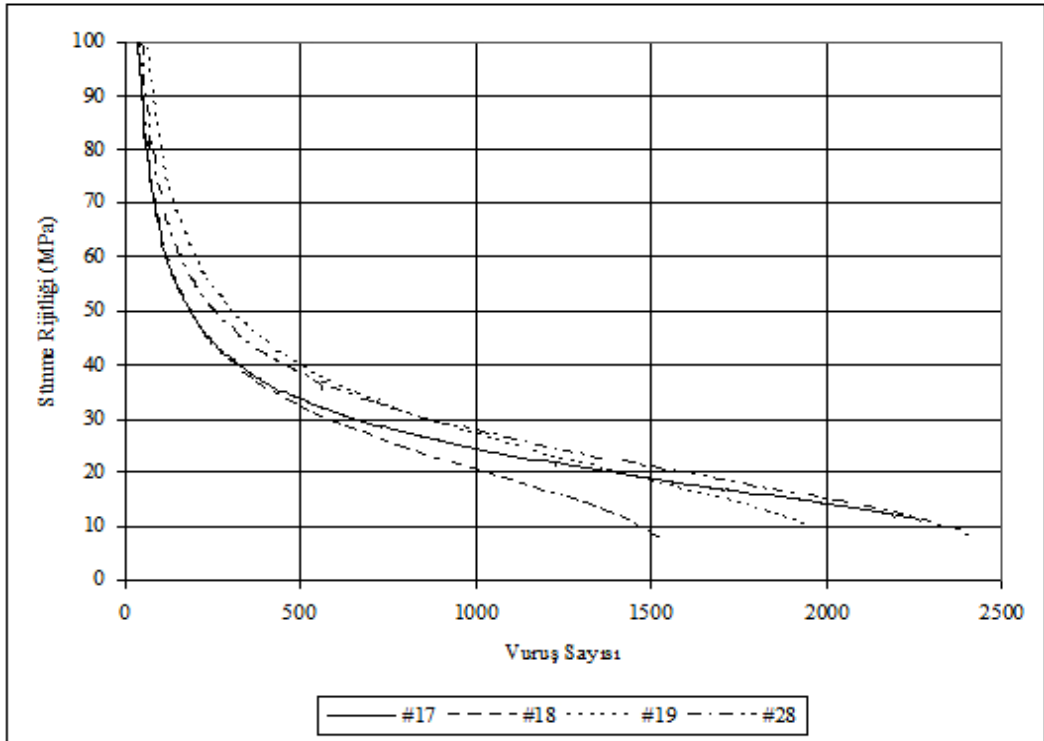
Şekil 5.72. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (14510510-15510510-16510510-27510510)



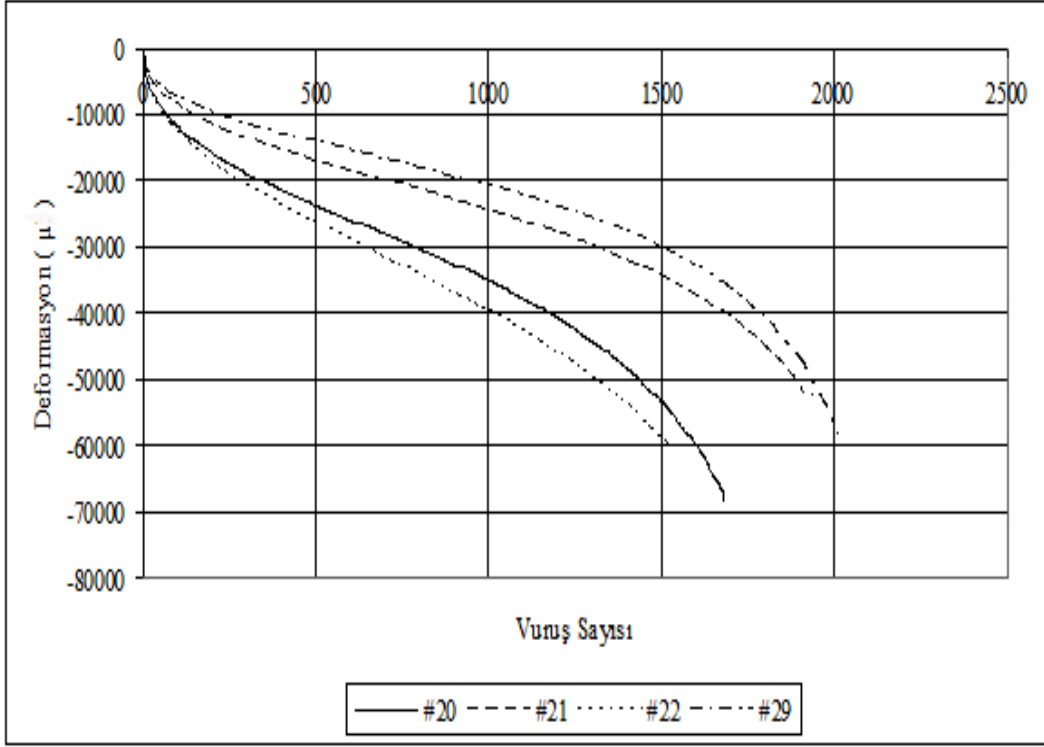
Şekil 5.73. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (14510510-15510510-16510510-27510510)



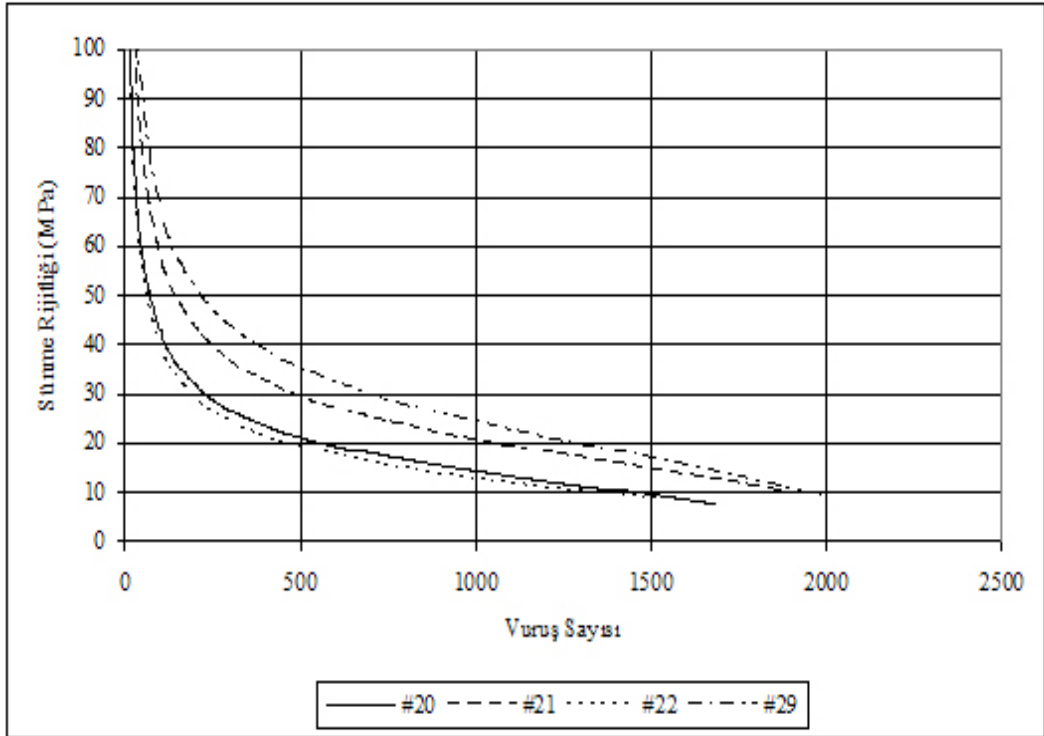
Şekil 5.74. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (17510505-18510505-19510505-28510505)



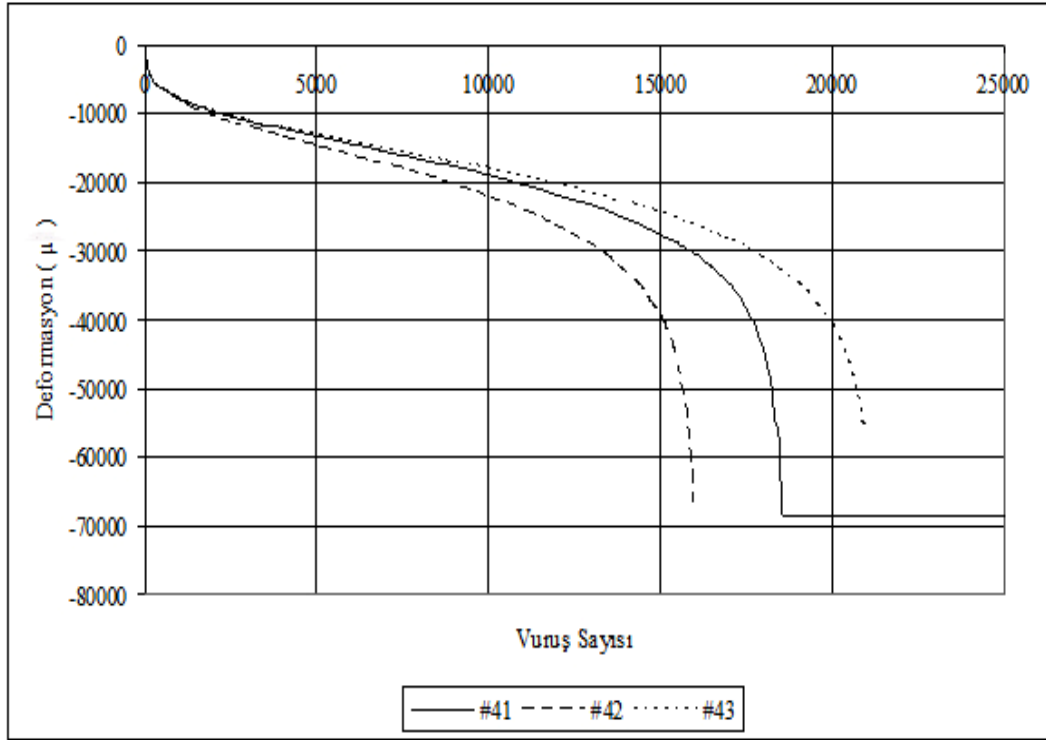
Şekil 5.75. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (17510505-18510505-19510505-28510505)



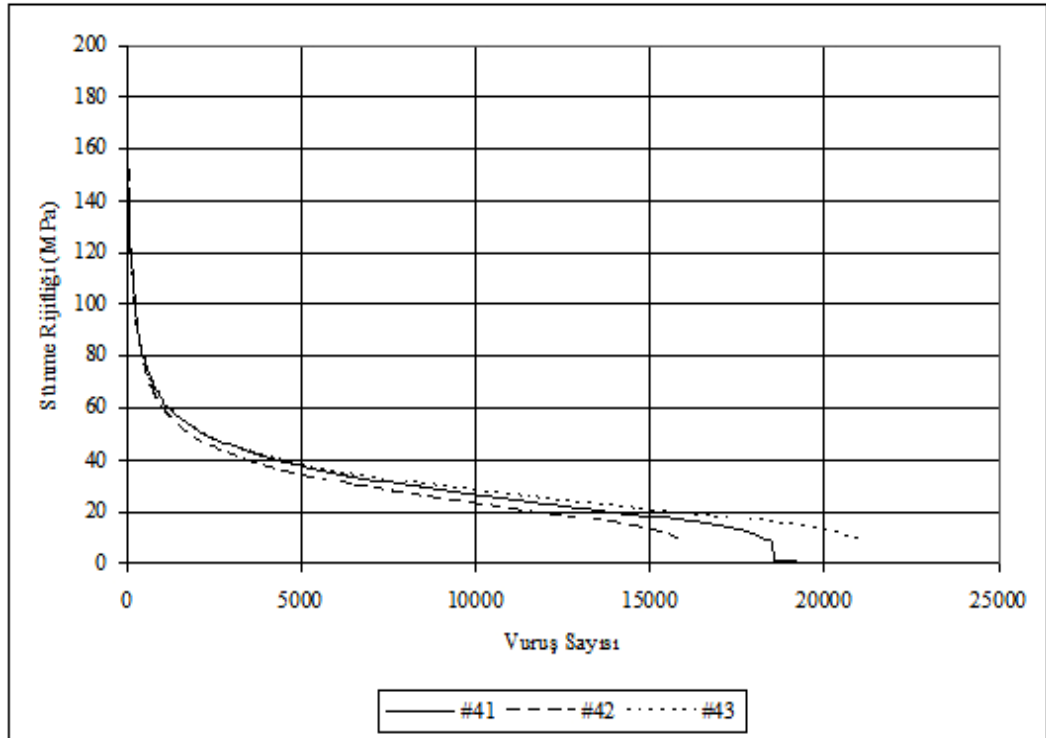
Şekil 5.76. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (20510520-21510520-22510520-29510520)



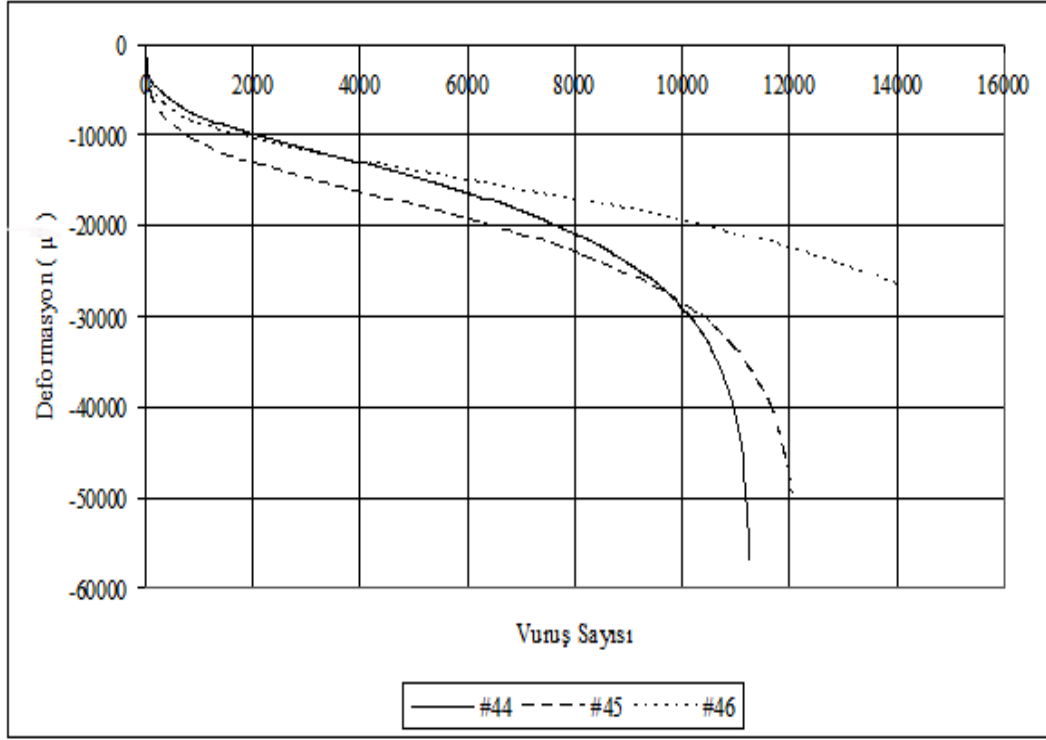
Şekil 5.77. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (20510520-21510520-22510520-29510520)



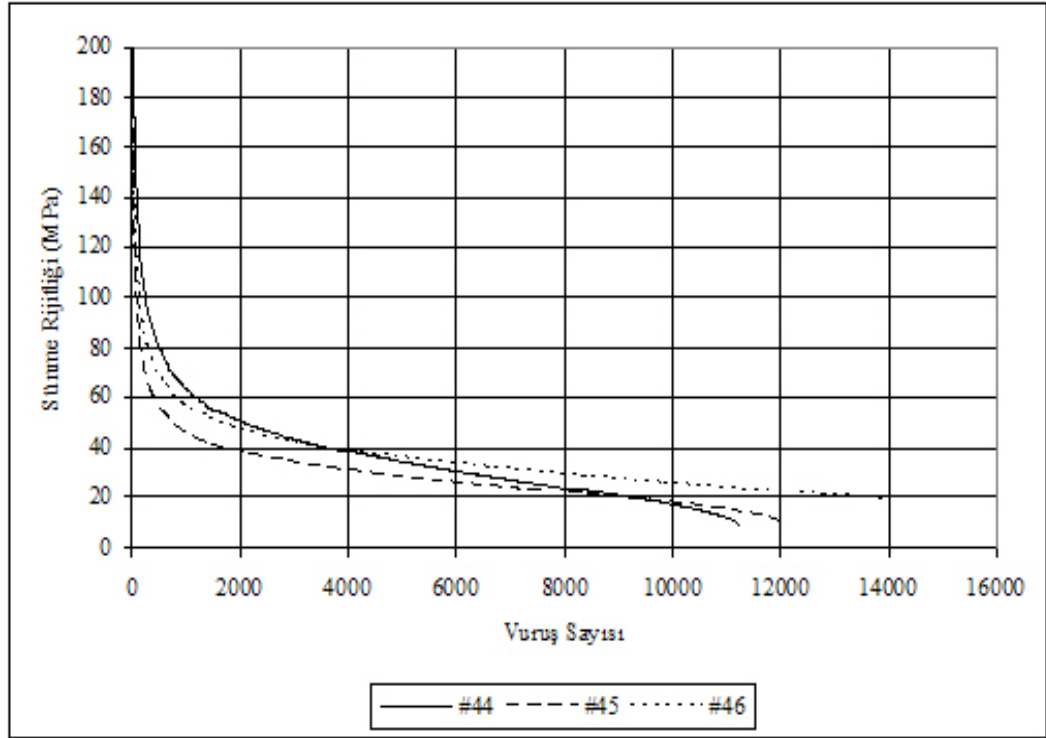
Şekil 5.78. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (41520515-42520515-43520515)



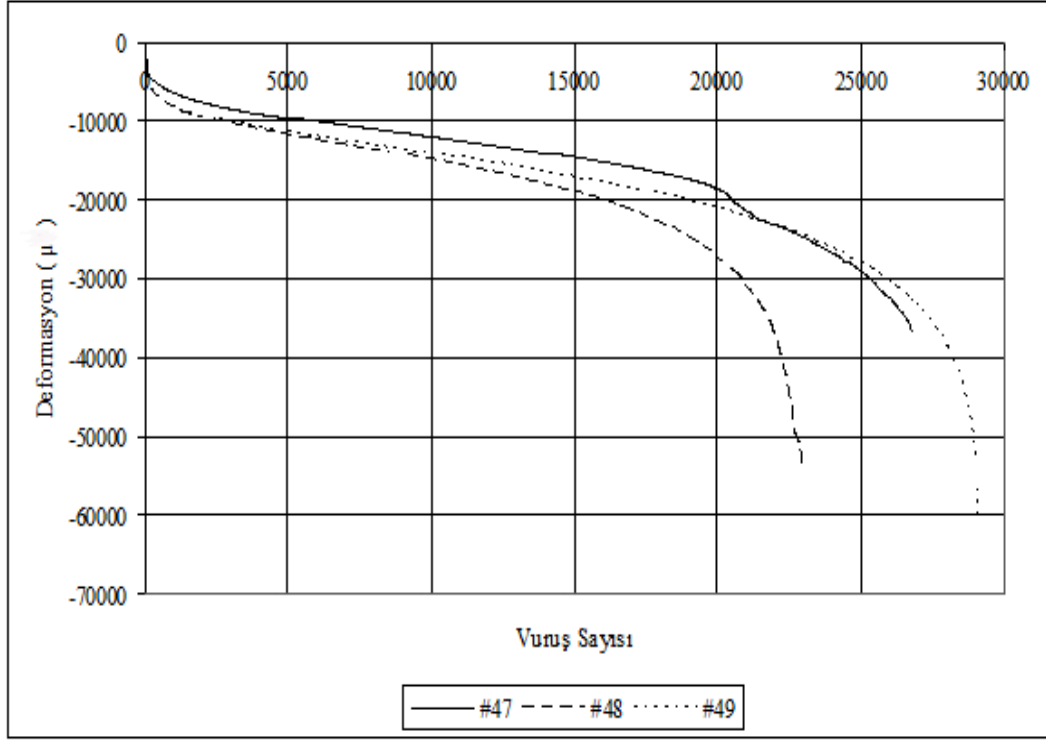
Şekil 5.79. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (41520515-42520515-43520515)



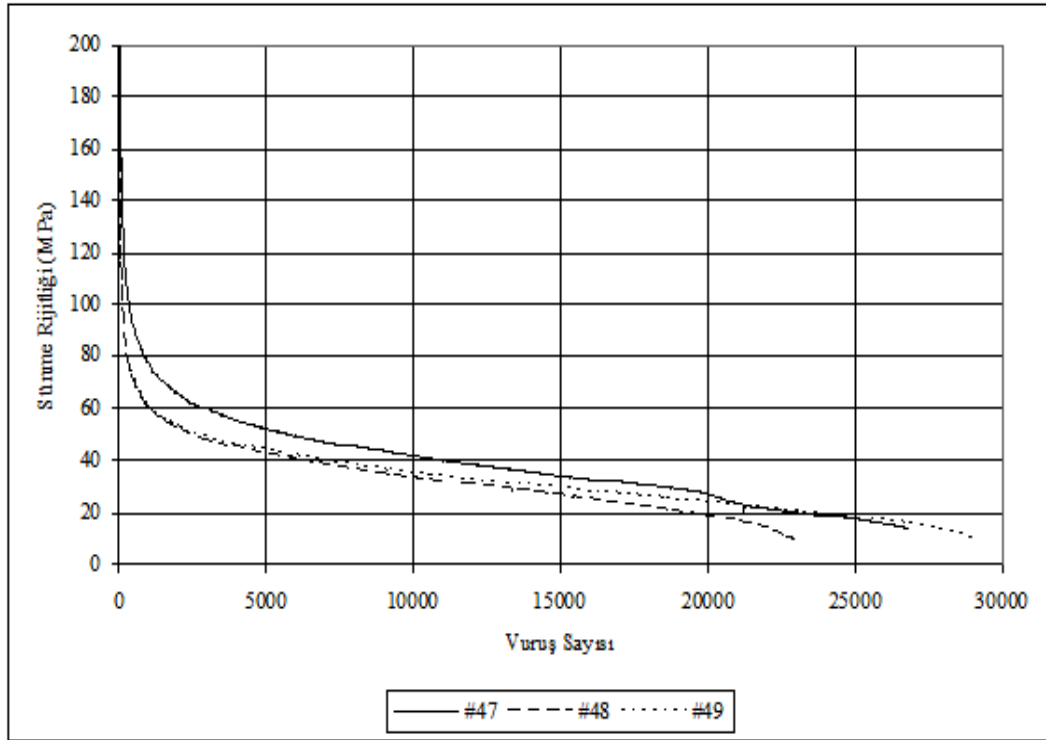
Şekil 5.80. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (44520510-45520510-46520510)



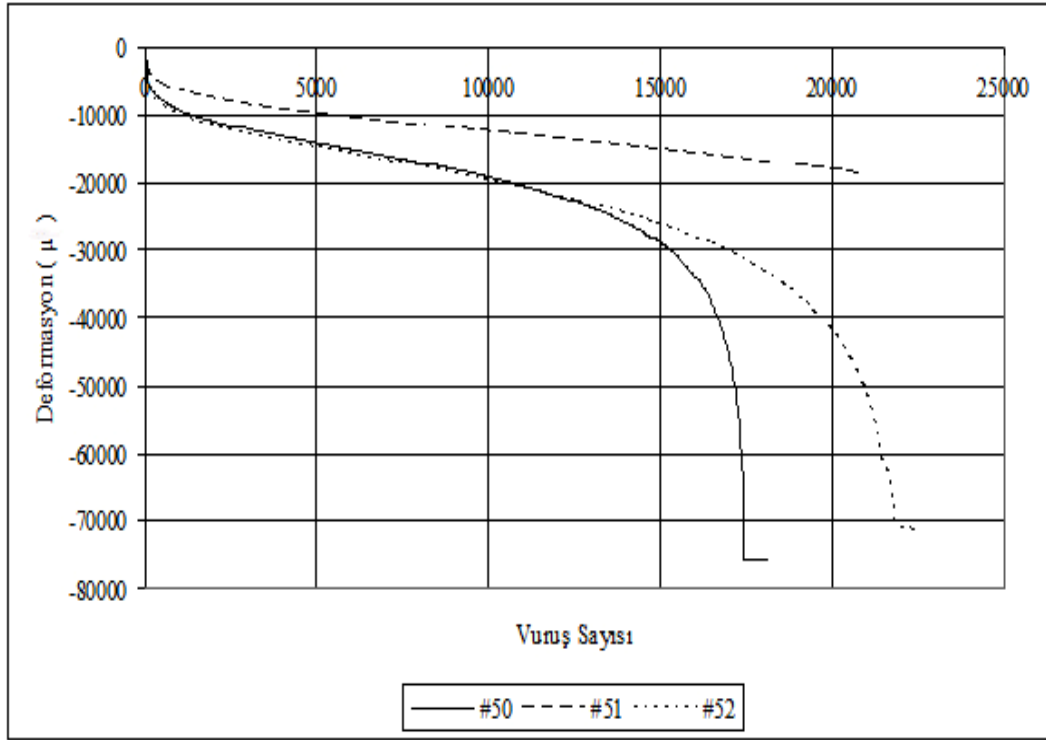
Şekil 5.81. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (44520510-45520510-46520510)



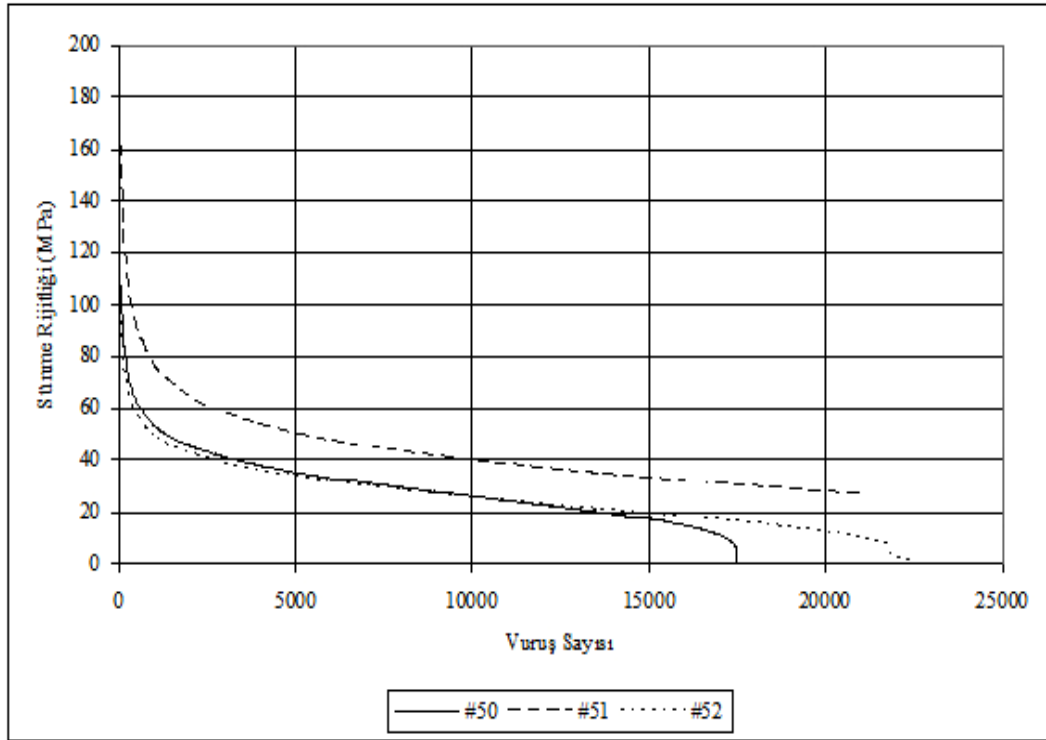
Şekil 5.82. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (47520505-48520505-49520505)



Şekil 5.83. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (47520505-48520505-49520505)



Şekil 5.84. Deformasyon-vuruş sayısı grafiği (50520520-51520520-52520520)



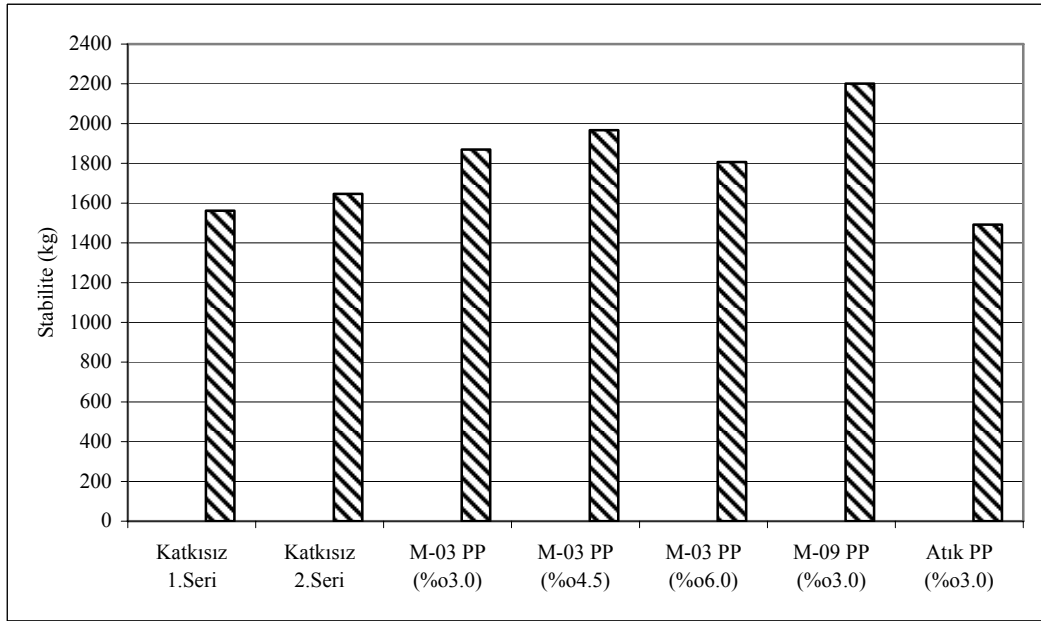
Şekil 5.85. Sünme rijitliği-vuruş sayısı grafiği (50520520-51520520-52520520)

## 6. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1. Marshall Deneyinin İncelenmesi

#### 6.1.1. Stabilite değerlerinin incelenmesi

Yapılan Marshall deneyleri sonucu her bir karışım için elde edilen maksimum stabilite değerleri Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Stabilite değerlerinin karşılaştırılması

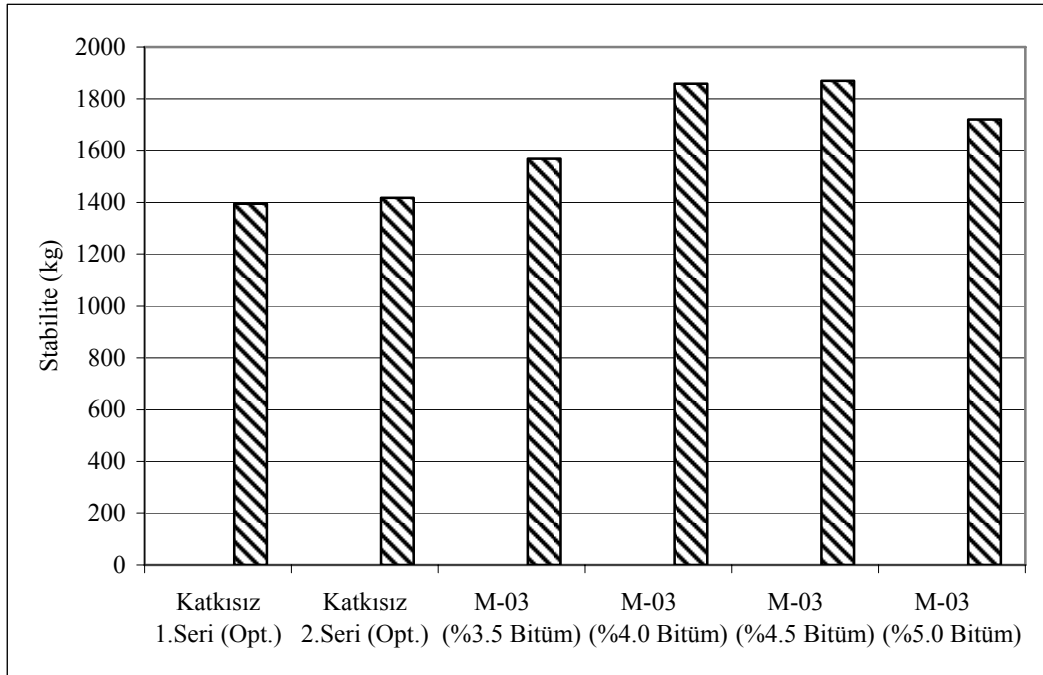
Şekil 6.1’de görüldüğü üzere katkısız hazırlanan iki serinin stabilite değerleri ortalama 1600 kg’dır. Bununla birlikte, katkılı numunelerin stabilite değerlerine bakıldığında, atık polipropilen dışında bütün serilerde stabilite değerlerinde artışlar görülmüştür. Bu artışlar %12 ile %40 arasında değişmektedir. En yüksek stabilite değerine M-09 tipi polipropilen katkının %03 oranında katılması ile ulaşılmıştır. Ancak M-03 tipi polipropilenin %03 katkı oranı dışındaki diğer karışımların stabiliteleri yüksek çıkmalarına rağmen Bölüm 5.2.5’te çizilen grafiklerden de görülebileceği üzere akma, birim ağırlık vb. diğer faktörler birbirleriyle tutarsız çıkmışlardır. M-09 karışımında en yüksek stabiliteye ulaşılmıştır. Ancak bu karışım, karışımın hazırlanmasındaki güçlükler,

çalışılabilirliğin zorluğu ve deney verilerinin tutarsızlığı gibi nedenlerden dolayı uygun karışım özelliklerine sahip değildir. Buna benzer olarak M-03 (%04.5), M-03 (%06) ve atık polipropilen için de aynı olumsuz koşullar orta çıkmıştır.

Bu nedenle, sonuç olarak, optimum katkı tipi ve oranı olarak M-03 tipi polipropilenin %03 katkı oranı seçilmiştir.

### 6.1.2. Bitüm ekonomisi açısından inceleme

Karışımlara eklenen katkıların stabiliteyi artırmasının yanında yapılan bu çalışmaların bir amacı da bitümün kullanılma oranını düşürebilmek ve bitümden kazanç sağlayabilmektir. Bu nedenle katkısız hazırlanan iki serinin ve optimum olarak seçilen M-03 tipi %03 katkılı serinin karşılaştırılması Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Optimum bitümde katkısız seriler ile M-03 (%03) stabilite değerlerinin karşılaştırılması

Bu karşılaştırma bitümden kazanç sağlanıp sağlanamayacağını belirleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Bunun için katkısız hazırlanan iki serinin optimum bitümdeki stabilite değerleri ile M-03 tipi polipropilen ve %03 katkı oranının optimum bitüm ve altındaki yani %5 bitüm ve altındaki stabilite değerleri karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu karşılaştırmadan da görüleceği gibi katkısız numunelerin optimum bitümdeki stabilite değerleri 1400 kg civarında iken M-03 tipi polipropilenin %5 bitüm ve altındaki stabilite değerleri 1570 kg ile 1870 kg arasında değişmektedir.

Sonuç olarak, stabilite değerlerini dikkate aldığımızda M-03 tipi polipropilen katkısı %03 oranında asfalt karışımına kattığımızda, katkısız hazırlanan numunelerin optimum bitüm muhtevasında elde edilen stabilite değerlerinin daha yükseklerine %3.5 bitüm de dahi ulaşılabilir. Böylece bu tip karışımlar hazırlanırken bitüm muhtevalarını düşürerek kullanılan bitümden kazanç sağlamak mümkün olacaktır. Ancak %3.5 bitüm değerinin düşük bir değer olması ve bu bitüm muhtevasında karışımın hazırlanması zor olacağından %4 veya %4.5 gibi bitüm muhtevaları çok tutarlı ve iyi sonuçlar verecektir.

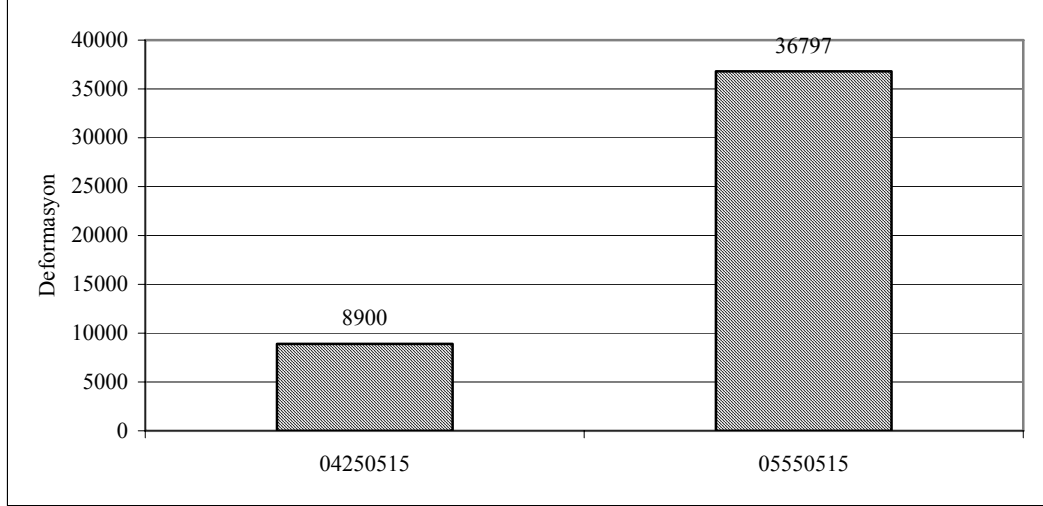
### **6.1.3. Marshall deneyi ile ilgili sonuçlar**

Yapılan deneyler, hesaplamalar ve incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkmıştır.

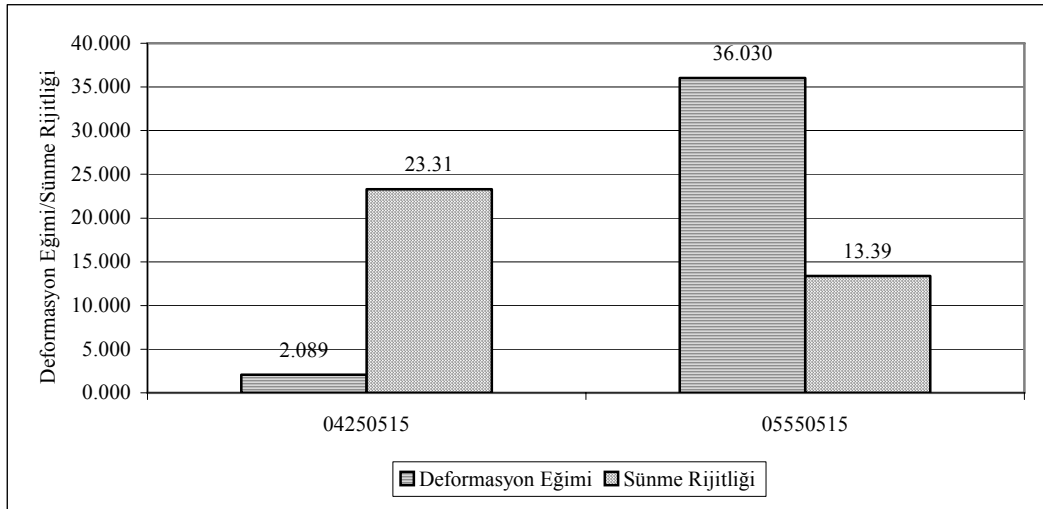
- Katkısız numuneler ile yapılan Marshall deneyleri sonucunda optimum bitüm muhtevası %5 bitüm olarak hesaplanmıştır.
- Karışımlara katılan polipropilen fiberlerin stabilite değerlerinde önemli ölçüde artışlar sağladığı görülmüştür.
- Katkılı seriler arasında en yüksek stabilite değerine M-09 tipi polipropilenin %03 katkı oranında ulaşılmıştır. Ancak bu sonucun böyle çıkmasındaki en önemli etken bu katkı tipinin karışıma homojen karışmamasıdır. Bu neden bazı numunelerin olduğundan daha dayanıklı, bazılarının ise daha dayanıksız çıkmasına sebep olmuştur.
- Atık tipi polipropilen seriler arasında en olumsuz sonuçları veren karışım olmuştur. Bunun en önemli nedeni ise bu katkı tipinin laboratuvar koşullarında bitüm ile homojen karışımını sağlamanın zorluğudur. Bu atık polipropilenler çalışma sıcaklığında 3 saatlik bir süre sonunda dahi tam olarak erimemiş ve dolayısıyla bitüm içerisinde homojen olarak dağılamamıştır.

## 6.2. Sünme Deneyinin İncelenmesi

### 6.2.1. Katkısız deneme numunelerinin karşılaştırılması



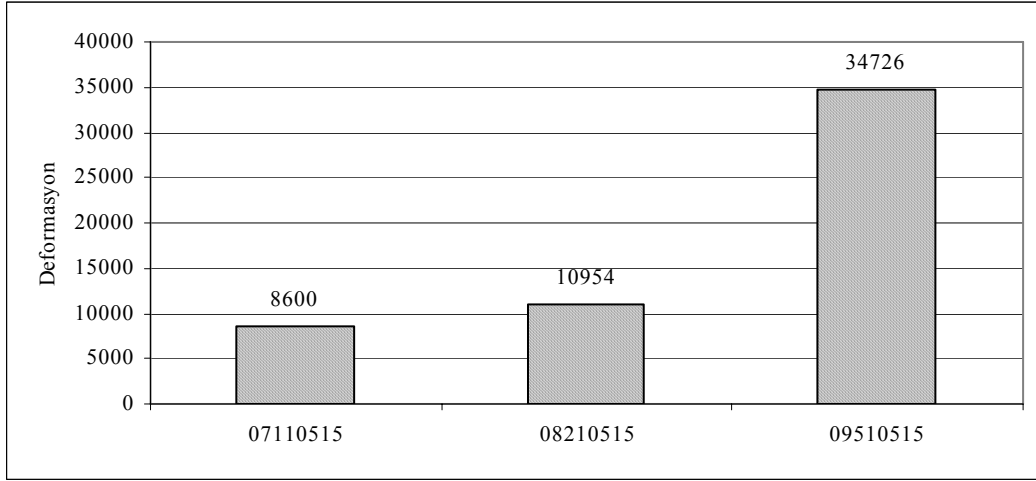
Şekil 6.3. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyonlarının karşılaştırılması (04 vs. 05)



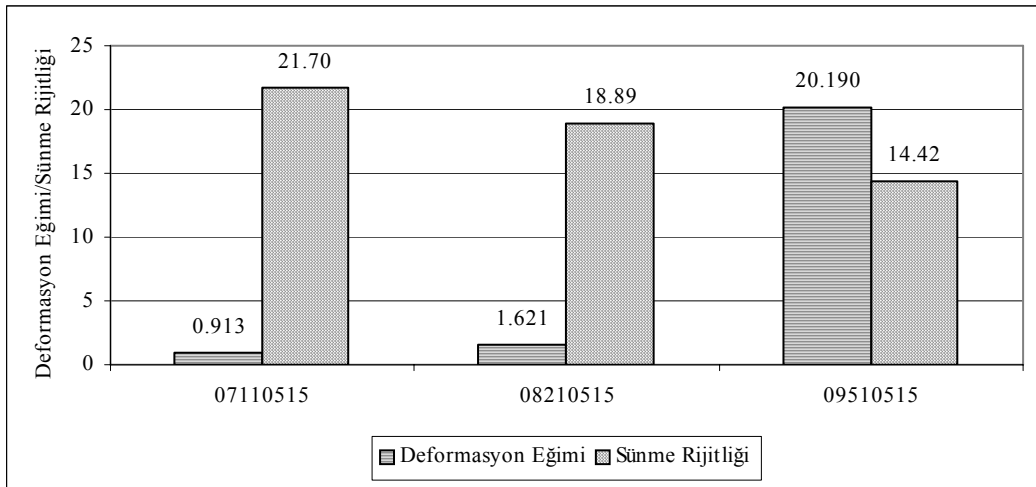
Şekil 6.4. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyon eğimi ve sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (04 vs. 05)

Katkısız olarak hazırlanan numuneler, hem test cihazının denenmesi hem de ilk karşılaştırmaların yapılabilmesi için hazırlanmıştır. Şekil 6.3. ve 6.4'te aynı özelliklerde ancak 207 kPa ve 500 kPa ile yükleme yapılan numunelerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekil 6.3'te görüldüğü üzere numunelerin 60.dakika sonundaki deformasyon değerleri arasında önemli derecede fark

bulunmaktadır. 207 kPa ile yüklenen numunenin deformasyon değeri 8900  $\mu\epsilon$  iken 500 kPa ile yüklenen numunenin deformasyon değeri 36797  $\mu\epsilon$  olarak görülmektedir. Buradan yaklaşık olarak 2.5 kat artan yükü miktarının deformasyon üzerindeki önemli etkisi belirlenmiş olur. Şekil 6.4'te deformasyon eğimi ve sünme rijitlikleri görülmektedir. Aynı süre sonundaki değerler göz önüne alındığında deformasyon eğimi değerlerinin 500 kPa yük için daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu da numunenin parçalanmaya yani yıkıma daha yakın olduğu anlamını taşımaktadır. Ayrıca sünme rijitliği değerlerine de bakılacak olursa, 60.dakika sonunda 500 kPa yük altında kalan numunenin rijitlik değeri yani diğer bir ifadeyle sağlamlığı beklendiği gibi daha düşük görülmektedir.



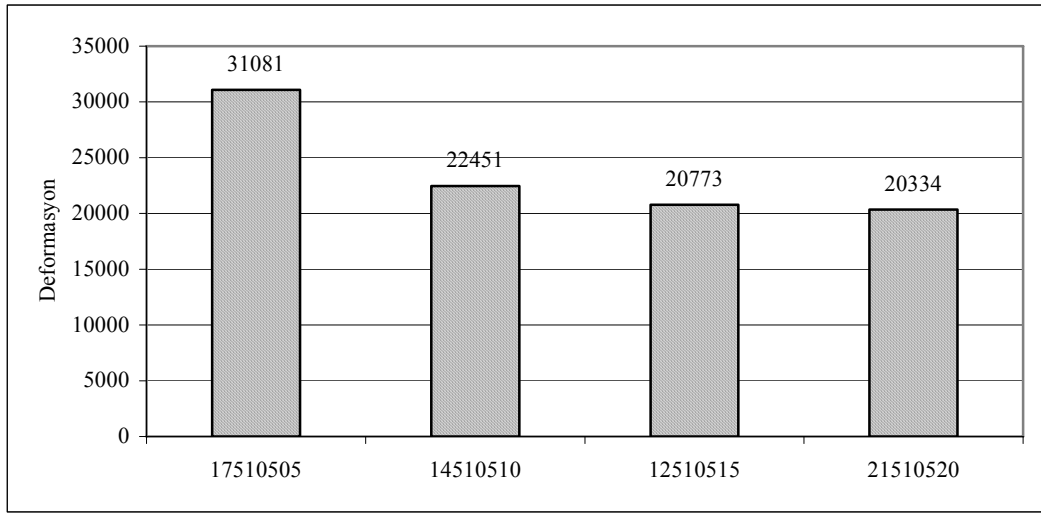
Şekil 6.5. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyonlarının karşılaştırılması (07 vs. 08 vs. 09)



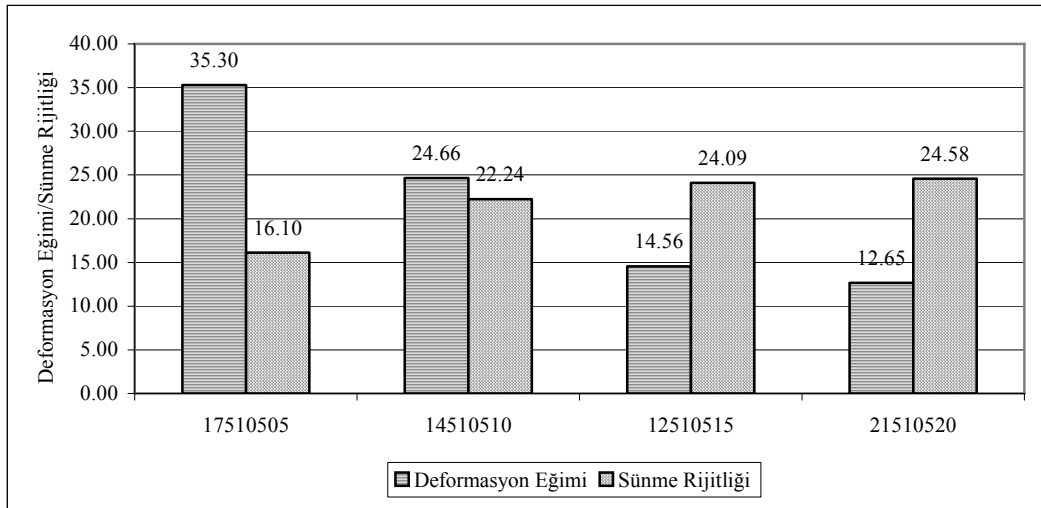
Şekil 6.6. Katkısız deneme numunelerinin 60.dk deformasyon eğimi ve sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (07 vs. 08 vs. 09)

Şekil 6.5. ve 6.6'da da deformasyon, deformasyon oranı ve sünme rijitliklerinin karşılaştırılması görülmektedir. Bu deneylerde 100 kPa, 207 kPa ve 500 kPa yük değerlerinin numuneler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deformasyon değerleri uygulanan yük arttıkça artmıştır. Deformasyon eğimi değerleri artan yük ile artmış ve sünme rijitlikleri artan yük ile azalmıştır.

### 6.2.2. Optimum katkısız numunelerin karşılaştırılması



Şekil 6.7. Optimum katkısız numunelerin 30.dk deformasyonlarının karşılaştırılması (17 vs. 14 vs. 12 vs. 21)

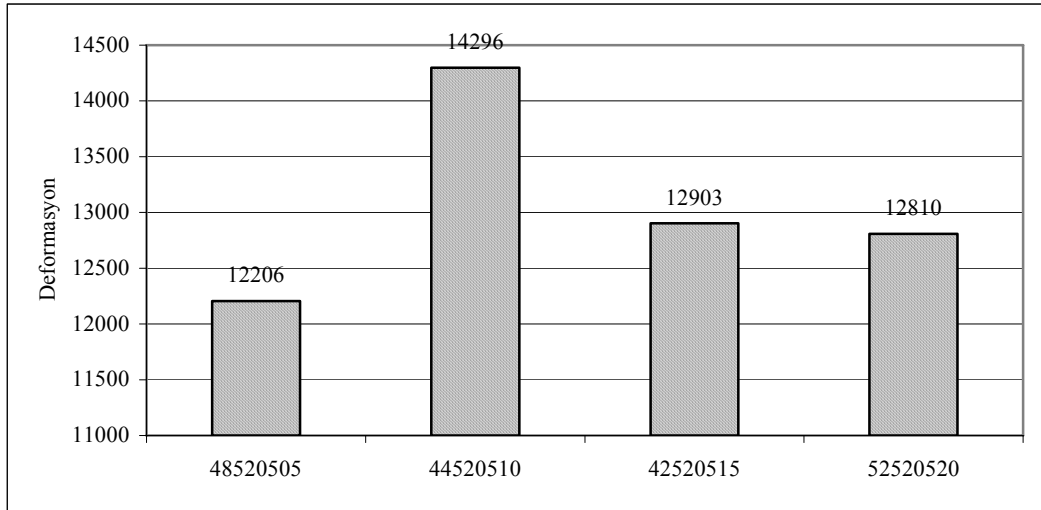


Şekil 6.8. Optimum katkısız numunelerin 30.dk deformasyon eğimi ve sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (17 vs. 14 vs. 12 vs. 21)

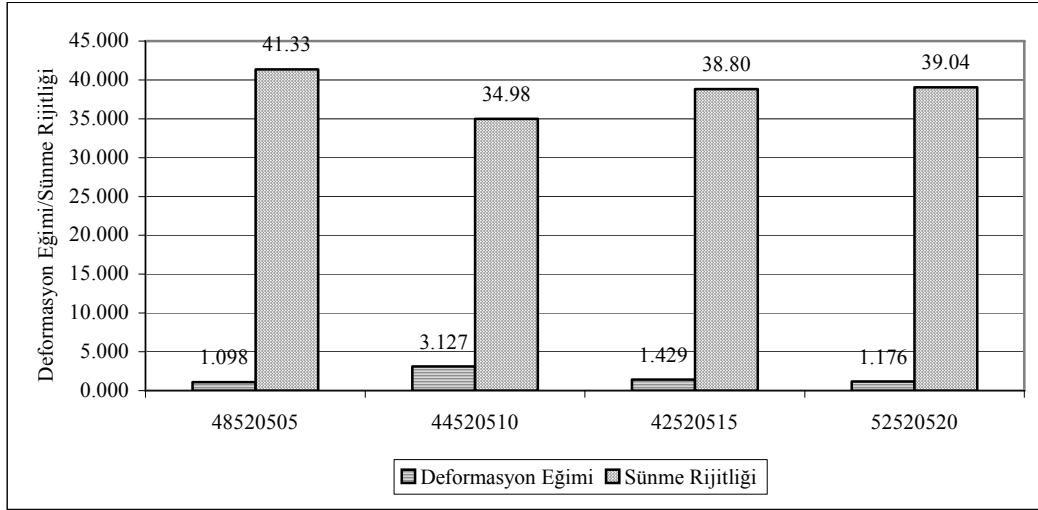
Yapılan Marshall deneyinin sonucunda belirlenen optimum bitüm muhtevasında yani %5 bitüm muhtevasında hazırlanan katkısız numunelerin karşılaştırılması Şekil 6.7. ve 6.8’de görülmektedir. Şekil 6.7’de numunelerin 30.dakika sonundaki deformasyon değerleri verilmiştir. Hazırlanan bu numunelerin hepsi ayın özelliklerdedir. Sadece 500 ms yükleme süresi sonundaki bekleme süreleri ile oynanmıştır. Bekleme süreleri sırasıyla 500 ms, 1000 ms, 1500 ms ve 2000 ms olarak seçilmiştir. Uygulanan yükün azalan tekerrür sürelerinde numunelerin deformasyonlarında da azalmalar görülmüştür.

Deformasyon eğimleri de yükün bekleme süresinin azalmasıyla birlikte azalmış ve yıkıma daha uzak bir davranış sergilemişlerdir. Yükün daha az sıklıkla uygulanmış olmasından dolayı sünme rijitlikleri değerleri de 500 ms’den 2000 ms bekleme süresine kadar artarak devam etmiştir.

### 6.2.3. Optimum PP katkılı numunelerin karşılaştırılması



Şekil 6.9. Optimum PP katkılı numunelerin 120.dk deformasyonlarının karşılaştırılması (48 vs. 44 vs. 42 vs. 52)



**Şekil 6.10.** Optimum PP katkılı numunelerin 120.dk deformasyon eğimi ve sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (48 vs. 44 vs. 42 vs. 52)

Marshall deneylerinin sonucunda belirlenmiş olan M-03 tipi polipropilenin %03 oranında ve %5 oranında bitüm ile hazırlanan numunelerin sünme deneyi karşılaştırmaları Şekil 6.9. ve 6.10'da gösterilmektedir.

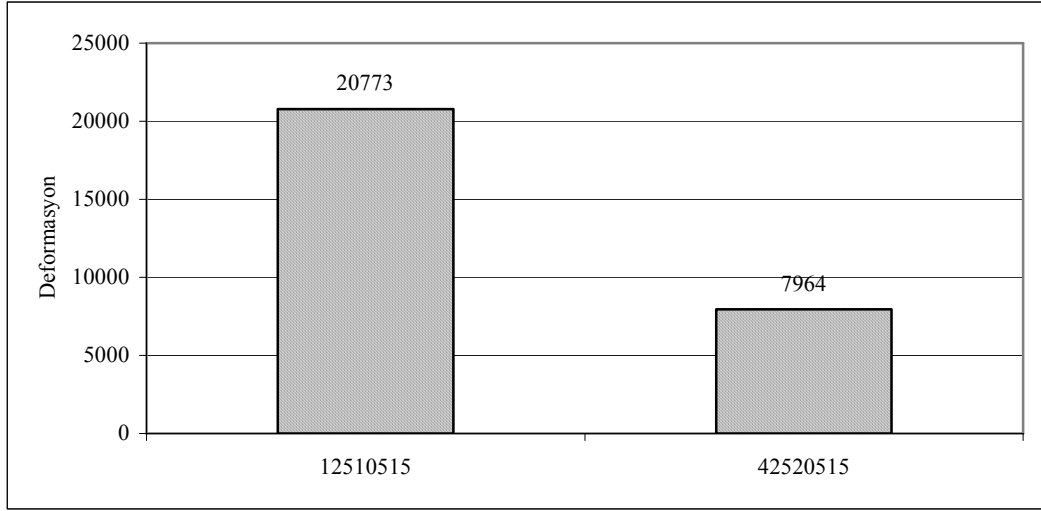
Polipropilen katkılı numunelerde de kendi aralarında incelendiğinde diğer katkısız numunelerdeki gibi davranış görülmüştür. Ancak 500 ms yükleme süresi ve 500 ms bekleme süresindeki yükleme tipinde diğer numunelere göre değişik bir davranış görülmüştür. Polipropilenin de katılması ile iyice sertleşen numune, 500-500 gibi hızlı bir yükleme altında diğer numunelere göre daha dayanıklı bir davranış göstermiştir. Bu davranışı numunenin tokluğu ile açıklamak mümkün olabilir. Yani belli bir yükleme süresinden sonra numune artık daha dayanıklı bir numune gibi davranmaktadır.

Deformasyon değerlerine bakıldığında 1000, 1500 ve 2000 ms bekleme sürelerinde numuneler normal davranış sergileyerek deformasyonları azalmıştır. Ancak 500 ms bekleme süresindeki numunenin deformasyon değeri hepsinden daha düşük çıkmıştır.

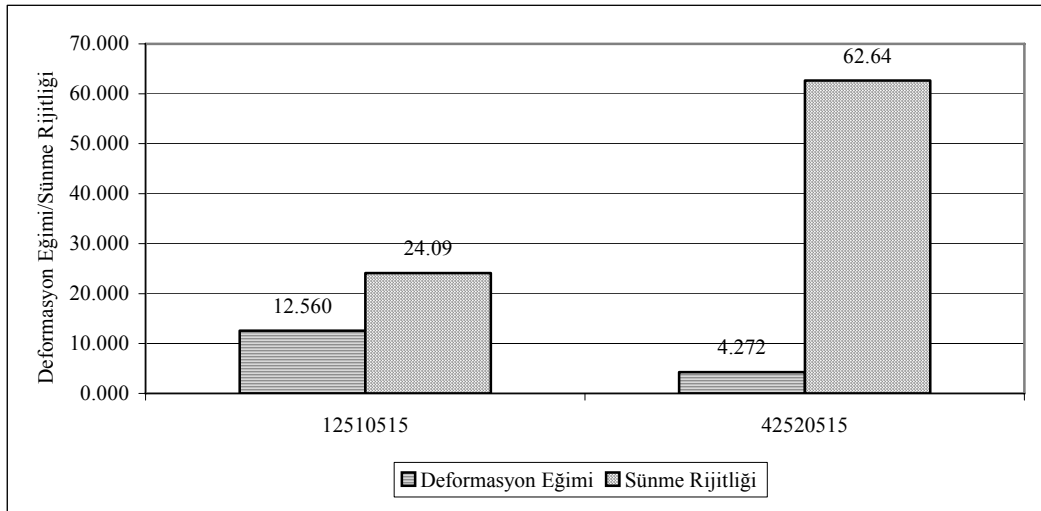
Deformasyon eğimi değerleri ve sünme rijitlikleri değerlerinde de aynı davranış görülmüştür. 500 ms bekleme süresi dışındaki numunelerin deformasyon eğimleri bekleme süreleri artarken normal olarak düşmüşlerdir. Ancak en düşük değer yine 500 ms bekleme süresindeki numunede görülmüştür. Sünme rijitliği

değerleri de bekleme süreleri artarken artmıştır. Yine 500 ms bekleme süresi için en yüksek değer elde edilmiştir.

#### 6.2.4. Katkısız ve optimum PP katkıli numunelerin karşılaştırılması



Şekil 6.11. Katkısız ve optimum PP katkıli numunelerin 30.dk deformasyonlarının karşılaştırılması (12 vs. 42)



Şekil 6.12. Katkısız ve optimum PP katkıli numunelerin 30.dk deformasyon eğimi ve sünme rijitliklerinin karşılaştırılması (12 vs. 42)

Son olarak yapılacak olan karşılaştırma optimum bitüm muhtevasında hazırlanan katkısız numune ile optimum polipropilen katkıli numunenin

karşılaştırılmasıdır. Bütün numunelerde birbirlerin yakın davranışlar görüldüğü için sadece iki örnek numunenin karşılaştırılması verilmiştir. Bu numunelerin yükleme-bekleme süreleri ve diğer özellikleri aynıdır. Sadece birisi katkısız diğeri ise polipropilen katkılıdır.

Şekil 6.11’de görülebildiği gibi 30.dakika sonunda katkısız numunenin deformasyon değeri 20773  $\mu\epsilon$  iken katkılı numunenin deformasyon değeri 7964  $\mu\epsilon$  değerindedir. Bu da numuneye eklenen polipropilen katkının numunenin deformasyonuna önemli katkıda bulunduğunu göstermektedir. Şekil 6.12’de deformasyon eğimi ve sünme rijitlikleri görülmektedir. Polipropilen katkılı numunenin deformasyon eğimi beklendiği gibi katkısız numunenin deformasyon eğimi değerinden daha düşük çıkmıştır. Yani yıkıma katkısız numuneye göre daha uzak bir davranış sergilemiştir. Sünme rijitliği değerlerine bakılacak olursa, katkılı numunenin 30.dakika sonundaki rijitlik değeri 62.64 MPa ve katkısız numunenin rijitlik değeri 24.09 MPa’dır. Bu da numunelere polipropilen katkı eklemenin rijitlik değerlerine ciddi derecede pozitif bir etkisi olduğunu göstermektedir.

### 6.3. Genel Sonuçlar ve Öneriler

- Hazırlanan katkısız ve çeşitli tip ve oranlardaki polipropilen katkılı numunelerin Marshall stabilite ve akma deneyi sonuçları incelenmiştir. Katkısız numuneler için optimum bitüm muhtevası belirlenmeye çalışılmış ve optimum bitüm muhtevası %5 bitüm olarak bulunmuştur.
- Katkılı numuneler ile yapılan Marshall stabilite ve akma deneyi sonucunda en uygun polipropilen tipi, karışımın homojenliği, çalışılabilirlik ve stabilite değerleri göz önünde bulundurularak M-03 tipi olarak belirlenmiştir. M-03’ün %03 oranında karışımlara katılmasının da optimum bir katkı oranı olduğu bulunmuştur.
- Yine M-03 tipi polipropilen katkılı karışımların optimum bitüm muhtevası da %5 bitüm olarak belirlenmiştir.
- Karışımlara optimum olarak belirlenen M-03 tipi polipropilenin katılması stabilite değerlerini %20 civarında arttırmıştır. Bu da bitümlü

sıcak karışımlara %03 oranında katkı katmanın kaplamaların stabilitesini artıracakını ve dolayısıyla servis ömrünün uzayacağını göstermektedir. Ayrıca sıcak bölgelerde polipropilen fiber kullanımında asfalt kaplamanın kusması önlenir.

- Yapılan sünme deneyleri sonucunda birçok karşılaştırma yapılmıştır. Uygulanan yükün miktarının artması katkısız ve optimum da hazırlanan numunelerin deformasyonlarını ve deformasyon eğimlerini artırmış ve sünme rijitliklerini düşürmüştür. Buradan kaplamaların üstünden geçeceği trafik ağırlığının yol kaplamasının ömründe önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Numunelere uygulanan yükleme ve bekleme süreleri de karışımların deformasyon ve deformasyon eğimlerini etkilemiştir. Artan bekleme sürelerinde deformasyon ve eğimleri düşmüş, rijitlik değeri ise yükselmiştir. Böylece kaplamadan geçecek olan taşıt trafik tekerrürünün yolun ömrüne etkisi görülmüştür.
- Katkılı numunelerin optimumdan daha düşük bitüm muhtevalarında bulunan stabilite değerleri katkısız numunelerin optimumdaki stabilite değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç göz önünde tutulduğunda, ekonomik açıdan, daha az bitüm kullanarak aynı stabilite de karışımlar elde etmek mümkün olacaktır. Bu da kullanılan bitümün azalmasına ve maliyette düşmelere sebep olacaktır.
- Polipropilen katkılı numuneler için de aynı davranışlar görülmüştür. Sadece 500 ms yükleme ve 500 ms bekleme süresinde katkılı numuneler bütün numunelere göre daha dayanıklı bir davranış sergilemişlerdir. Bu da numunelerin belli bir tekerrür süresinden sonra tokluğunda katkısıyla daha dayanıklı davranış sergilediğini göstermektedir.
- Sonuç olarak, karışımlara polipropilen katkının optimumda eklenmesiyle karışımların hem Marshall stabilite ve akma değerlerinde hem de sünme deneyi ile bulunan servis ömürleri artmıştır. Bu şekilde yapılacak olan bitümlü sıcak karışım yolların servis ömürleri

uzatacağına ve böylece ekonomik açıdan da fayda sağlayacağı gösterilmiştir.

- Ayrıca bulunan sonuçların ve incelemelerin ışığı altında, yapılan polipropilen katkısının yüksek sıcaklıklarda bitümlü sıcak karışım kaplamaların oluklanma veya diğer bir deyişle tekerlek izinde kalıcı deformasyonlara karşı da daha mukavemetli olduğu sonucuna varılmıştır.
- Yapılan polipropilen katkısının taşıt trafiği altında kaplamalarda oluşacak olan viskoz deformasyonları yani kalıcı deformasyonları azaltacağı görülmüştür.
- Yapılan bu çalışma yüksek sıcaklıkta ve tekrarlı yükte yapılmıştır. Yüksek sıcaklıkta polipropilen katkısının karışımların sünme ve yorulma [13] davranışlarına etkisi genel olarak bilinmektedir. Ancak düşük sıcaklıklarda (-10 ile 0 arası ) polipropilen katkılı karışımların nasıl davranış gösterecekleri de incelenerek tam bir bilgi edinmek gerekmektedir.
- Ayrıca polipropilen katkılı karışımların statik yük altındaki davranışları bilinmemektedir. Bu amaçla ileride, polipropilen katkılı karışımların statik yük altındaki davranışları da incelenmeli ve tekrarlı yük ile karşılaştırılmaları yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Tunç, A., *Yol malzemeleri ve uygulamaları*, Atlas, İstanbul, 2001
- [2] Açar, E. ve Umar, F., *Yol üstyapısı*, İTÜ İnş.Fak.Matbaası, İstanbul,1991
- [3] Keçeciler, A.F., Akkol, G., Gümrükçüoğlu, A. ve Gökçe, A.F., *Bitümlü malzemeler laboratuar el kitabı*, Yayın No:239, KGM Yayınları, Ankara, 1988
- [4] 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
- [5] Vonk, W., “*SBS modifiye bitüm ile yol performansının arttırılması*”, 3.Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 2000
- [6] Önal, M.A. ve Kahramangil, M., *Bitümlü karışımlar laboratuar el kitabı*, KGM Yayınları, Ankara, 1993
- [7] Tapkın, S., *Improved asphalt aggregate mix properties by portland cement modification*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1998
- [8] Uluçaylı, M., “*Modifiye bitüm ve modifikasyon katkılarının kullanımı*”, 2.Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara, 1998
- [9] Anonim, *Polipropilen'in tarihçesi*, 2006.  
<http://www.odevsitesi.com>
- [10] Er-Me Taşımacılık Plastik San.Tic.Ltd.Şti, *Polipropilen üretimi*, 2007.  
<http://www.er-me.com/hammadde.html>
- [11] DPT, *Polipropilen'in yapısı*, Petrokimya Sanayi Özel İhtisas Komisyon Raporu, Sınıflama No:338.4766180409561/PETs, DPT, Ankara, 2001
- [12] Anonim, *Polipropilen'in kimyasal özellikleri*, 2007.  
<http://tr.wikipedia.org/wiki/Polipropilen>
- [13] Tapkın, S., “*The effect of polypropylene fibers on asphalt performance*”, Building and Environment, Elsevier, 2007  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.02.011>
- [14] Astan Plastik, *Polipropilen'in özellikleri*, 2007.  
<http://www.astanplastik.com/upoliprop.asp>

- [15] Polda Tekstil, *Polipropilen'in termal özellikleri*, 2007.  
<http://www.polda.com/iurunler.html>
- [16] Orhan, F., *Bitümlü karışımlar laboratuvarı çalışmaları*, KGM Yayınları, Ankara, 2006
- [17] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Modifiye bitüm ve taş mastik asfalt (SMA) teknik şartnamesi*, KGM Yayınları, Ankara, 2003
- [18] Ertekin, S.B., *Polyolefin katkıların asfaltların kıvamı ve yumuşama noktasına etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2003
- [19] 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
- [20] Uluğtekin, E., *Creep properties of asphaltic concrete under repeated loading*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999
- [21] Van der Poel, Co., *"A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data"*, Journal of Applied Chemistry, 1954
- [22] Nijboer, L.W., *"Einige betrachtungen über das marshall verfahren zur unterzuchung bitüminözer massen"*, Strasse und Autobahn 8, 1957
- [23] Tapkın, H., *Rheological behaviour of bituminous mixtures under different types of compressive loading*, Doktora Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1980
- [24] Heukelom, W., *"An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties"*, Paper presented at the Annual Meeting of the AAPT, Houston, ABD, 1973
- [25] Jastrzebski, Z.D., *The nature and properties of engineering materials*, John Wiley and Sons Inc., New York, ABD, 1977
- [26] Brian, D., *"Research in the design of asphalt"*, The Highway Engineer, The Journal of the Institution of Highway Engineers, 1977
- [27] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Karayolu teknik şartnamesi-2006*, KGM Yayınları, Ankara, 2006

[28] American Society for Testing and Materials D1559-76, *Standart test method for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*