

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YOĞUN GRANÜLOMETRİLİ EMÜLSİYİYE ASFALT BETONU'NDA
ÇİMENTONUN KARIŞIM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

İnş. Yük. Müh. Şeref ORUÇ

127562

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Doktor"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

127562

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.08.2002
Tezin Savunma Tarihi : 31.10.2002

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fazıl ÇELİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Emine AĞAR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Hulusi ACAR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Asım KADIOĞLU

Trabzon 2002

ÖNSÖZ

KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsüne bu doktora çalışmasının gerçekleşmesinde, birlikte çalışmaya başladığımdan itibaren bana yön gösteren, çalışmalarım boyunca hiçbir konuda desteğini esirgemeyen, gerek Doktora Tezi ve gerekse diğer ulaştırma konularında engin birikimi ve tecrübesinden yararlandığım, örnek insan, değerli yönetici hocam Doç. Dr. Fazıl ÇELİK'e saygıyla en içten teşekkür ve şükranlarımı arz ederim.

Bu çalışmaya görüş ve önerileriyle katkı koyan başta sayın Prof. Dr. Emine AĞAR olmak üzere değerli bilim adamları sayın Prof. Dr. Hulusi ACAR, Prof. Dr. Yusuf AYVAZ ve Doç. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU'na içtenlikle teşekkür eder, saygılar sunarım.

Araştırma projesi olarak sunulan bu çalışmaya, kıt olan Devlet olanaklarına rağmen gerekli maddi desteği sağlayarak çalışmanın hayata geçirilmesine katkıda bulunan KTÜ Rektörlüğü'ne teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Çalışma süresince, gerekli olan emülsiyon malzemesini temin ettiğimiz, MAKİMSAN A.Ş. ve laboratuvar yetkililerine teşekkürü bir borç bilirim.

KTÜ Ulaştırma Laboratuvar'ında gerçekleştirilen bu çalışma boyunca, bana destek veren ve yardımcı olan Uzman Ali SEMERCİ'ye, YTÜ Öğretim Elemanı Dr. Halit ÖZEN'e, ve yardımını görüp ismini saymadığım herkese içtenlikle teşekkür ederim.

Beni yetiştirip bu topluma kazandıran ve sabırla destek olan aileme, çalışma süresince ihmal ettiğim eşim ve çocuklarıma en içten sevgiyle, teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Şeref ÖZÜ
EC YÜSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANLARI MERKEZİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Problemin Tanımı ve Çalışmanın Amacı	3
1.3. Konunun Özgeçmişi	5
1.4. Asfalt Emülsiyonları	8
1.4.1. Anyonik Asfalt Emülsiyonları	11
1.4.2. Katyonik Asfalt Emülsiyonları	13
1.4.3. Asfalt Emülsiyonlarının Özellikleri	15
1.4.3.1. Kesilme	15
1.4.3.2. Viskozite	17
1.4.3.3. Yumaklaşma	18
1.4.3.4. Çökme	19
1.4.3.5. Birleşme	20
1.4.4. Asfalt Emülsiyon Uygulamaları	20
1.4.4.1. Yüzeysel Kaplama	21
1.4.4.2. Harç Tipi Asfalt Emülsiyon Kaplama (Slurry Seal)	22
1.4.4.3. Penetrasyon Makadam	22
1.4.4.4. Zemin Stabilizasyonu	23
1.4.4.5. Astar Tabakası	24
1.4.4.6. Yapıştırma Tabakası	24
1.4.4.7. Yama Karışımları ve Onarımlar	25
1.4.4.8. Karartma Tabakası	25

1.4.4.9. Soğuk Plent Karışım Uygulamaları	26
1.5. Soğuk Karışımlar	26
1.5.1. Soğuk Karışım Olarak Asfalt Emülsiyonu Karışımların Faydaları	28
1.5.2. Soğuk Karışımlarda Kullanılan Asfalt Tipleri	30
1.5.3. Soğuk Karışımlarda Tipik Asfalt Sıcaklıkları	32
1.5.4. Soğuk Karışımlar Yönünden Agregaya	33
1.6. Karışım Tasarımında İzlenen Yöntem Ve Karışım Performansının Belirlenmesinde Uygulanan Deney Yöntemleri	36
1.6.1. Asfalt Emülsiyonu Karışımlar İçin Marshall Tasarımı	36
1.6.1.1. Asfalt Emülsiyonu Seçimi	37
1.6.1.2. Asfalt Emülsiyon Miktarının Yaklaşık Tespiti	38
1.6.1.3. Sarılma Deneyi	38
1.6.1.4. Sıkıştırılmadaki Optimum Su İçeriğinin Tespiti	41
1.6.1.5. Karışımdaki Kalıntı Asfalt İçeriği Değişimi	44
1.6.1.6. Yoğunluk-Boşluk Analizleri	44
1.6.1.7. Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenmesi	46
1.6.2. Esneklik Modülü İçin Dolaylı Çekme Deneyi	47
1.6.3. Tek Eksenli Statik Sünme Deney Yöntemi	52
1.6.4. Tekrarlı Sünme Deney Yöntemi	54
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	57
2.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	58
2.1.1. Agregaya	58
2.1.1.2. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyleri	59
2.1.1.3. Aşınma Deneyi	61
2.1.1.4. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (Donma Deneyi)	61
2.1.1.5. Yassılık Deneyi	63
2.1.1.6. Cilalanma Deneyi	64
2.1.1.7. Soyulma Deneyi	65
2.1.1.8. Sulu Ortamda Agregaların pH Değerlendirmesi (pH Deneyi)	66
2.1.1.9. Agregaya Malzemesinin Kimyasal Analizi	67
2.1.2. Çimento	68
2.1.3. Asfalt Emülsiyonu	71
2.1.3.1. Viskozite Deneyi	71

2.1.3.2. Çökme Deneyi	72
2.1.3.3. Depolama Stabilitesi Deneyi	72
2.1.3.4. Partikül Yüğü Deneyi	73
2.1.3.5. Elek Deneyi	73
2.1.3.6. Çimento İle Karıştırma Deneyi	74
2.1.3.7. Hidrojen İyonu Konsantrasyonu (pH) Tespiti	74
2.1.3.8. Destilasyon Kalıntısı	75
2.1.3.9. Kalıntının özgül ağırlığı	75
2.1.3.10. Penetrasyon Deneyi	75
2.1.3.11. Düktilite Deneyi	76
2.1.3.12. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi	77
2.1.3.13. Kalıntının Kül Miktarı	77
2.2. Modifiye Marshall Yöntemine Göre Karışım Tasarımı	78
2.3. Dolaylı Çekme Deneyi	86
2.4. Statik Sünme Deneyi	94
2.5. Tekrarlı Sünme Deneyi	98
2.6. Su Hasarı Deneyi	100
3. BULGULAR VE İRDELEME	102
3.1. Marshall Deneyinden Elde Edilen Bulgular	102
3.2. Dolaylı Çekme Deneyinden Elde Edilen Bulgular	105
3.3. Esneklik Modülü İçin Matematik Model Kurulması	117
3.3.1. Zamana Bağlı Model	117
3.3.2. Sıcaklığa Bağlı Model	120
3.4. Statik Sünme Deneyinden Elde Edilen Bulgular	124
3.5. Statik Sünme Deformasyonu İçin Matematik Model Kurulması	135
3.6. Tekrarlı Sünme Deneyinden Elde Edilen Bulgular	138
3.7. Su Hasarı Deneyinden Elde Edilen Bulgular	139
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	141
5. KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Asfalt emülsiyonu karışımlar, ekonomik, ekolojik ve lojistik yönden çok önemli avantajlar sağlamalarına karşın, önemli performans sakıncaları nedeniyle, henüz, sıcak asfalt betonunun yerini almış değildir.

Asfalt emülsiyonu karışımlar, suyun kolay drene olabilmesi için boşluklu yapılmakta, karışım bünyesindeki su, kesilme/kür olma hızını yavaşlatmakta ve bu yüzden karışım performansı düşük olmaktadır. Bunlara ilaveten, kür olma tamamlanmadan dışardan ilave su girmesi halinde karışımın erozyona uğraması söz konusu olabilmektedir. Bu problemler, asfalt emülsiyonu karışımların yaygın kullanımını engellemekte, ancak, problemlere tatmin edici çözümler araştırılmaktadır.

“Emülsifiye Asfalt Betonu”nu konu alan bu çalışma; yoğun granülometreli sıcak asfalt betonunda kullanılan agregata tasarımı esas alınarak, karışımdaki mineral filler yerine, değişen oranlarda portland çimentosu kullanılmak suretiyle, suyun neden olduğu problemlere çözüm bulmayı ve asfalt emülsiyonu karışım performansını “Sıcak Asfalt Betonu” düzeyine çıkarmayı amaçlamaktadır.

Yapılan ön araştırma neticesinde, çimento ilavesinin çok önemli düzeyde stabilite artışı sağladığı görülmüş, bundan hareketle, konu kapsamlı bir şekilde ele alınarak yoğun agregata granülometrisine sahip karışımda, değişen oranlardaki çimento ilavesinin performans ilişkilerini nasıl etkilediği, öngörülen tasarımlarda elde edilen karışımların sıcaklık hassasiyetlerinin ne şekilde oluştuğu, çimento katkısıyla birlikte değişen oranlardaki kalıntı bitüm içeriklerine bağlı olarak karışım performansındaki değişimin nasıl şekillendiği sorularına bu çalışma kapsamında yanıt bulunmaya çalışılmıştır.

Modifiye Marshall Yöntemine göre hazırlanan numuneler üzerinde, performans deneyleri olarak, Marshall Deneyi, Dolaylı Çekme Deneyi, Su Hasarı Deneyi, Statik Sünme ve Tekrarlı Sünme Deneyleri yapılmıştır. Tüm çalışma kapsamında, 349 adet Marshall briketi üretilmiş ve bu briketler üzerinde toplam 1770 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, asfalt emülsiyonu karışımının yoğun granülometriye sahip agrega bileşeninde %6 oranındaki filler malzemesini, %1 den %6 ya kadar değişen oranlarda, portland çimentosu ile değiştirmek suretiyle karışım numuneleri hazırlanmıştır. Ayrıca, asfalt içeriğinin çimento katkısıyla birlikte karışım davranışı üzerindeki etkisini belirlemek ve karışım tasarımında, çimento oranı ile asfalt içeriği arasında optimal bir yaklaşım ortaya koymak amacıyla üç farklı asfalt içeriği için deneysel çalışma kapsamı geniş tutulmuştur. Modifiye Marshall Yöntemine göre hazırlanan numuneler bir yıllık bir süre boyunca değişik kür sürelerinde Dolaylı Çekme Deneyi'ne tabi tutularak Esneklik Modülü'ndeki değişim, denk koşullarda hazırlanan sıcak karışımla karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Asfalt emülsiyonu karışımının sıcaklık hassasiyetini belirlemek için de değişik asfalt içeriği ve çimento katkı miktarlardaki karışım numunelerinin 5⁰C, 25⁰C ve 40⁰C sıcaklıktaki davranışları Dolaylı Çekme Deneyi ile ortaya konulmuştur. Yine aynı koşullarda değişik çimento miktarlarında hazırlanan soğuk karışım numuneleri üzerinde Statik Sünme ve Tekrarlı Sünme Deneyleri yapılarak tekerlek izi oluşum potansiyelleri sıcak karışımla karşılaştırmalı olarak araştırılmış ve bunlara ilaveten hazırlanan numunelerin çimento miktarına bağlı olarak su hasarına karşı gösterdikleri direnç test edilerek çimento miktarının, soğuk karışım performansını nasıl etkilediği hususları incelenmiştir.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlardan faydalanılarak, esneklik modülü ve statik sünme deformasyonuna ilişkin matematik modeller kurulmuştur. Sıcaklık değişkeni esas alınarak geliştirilen model sayesinde, deney yapılamayan sıcaklıklar için esneklik modülü değerleri hesaplanarak irdelenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kıvanç verici düzeyde olup, sürekli granülometriye sahip çimento katkılı "Emülsifiye Asfalt Betonu"nda yüksek düzeyde performans sağlanmış; asfalt emülsiyonu karışımların en önemli problemlerine tatmin edici bir çözüm elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Asfalt Emülsiyonu, Çimento, Soğuk Asfalt Karışım, Emülsifiye Asfalt Betonu, Mekanik Özellikler

SUMMARY

Effect of Cement on Performance of Dense Graded Emulsified Asphalt Concrete

Asphalt emulsion mixtures have very important economical, environmental and logistic advantages. But, they have not been used in place of hot mix concrete yet because of their performance disadvantages.

Asphalt emulsion mixtures are designed gap graded in order to drainage water easily, which decreases the performance of the mixture. Besides, the mixture can be exposed to erosion in case of additional external water entrance. These problems are preventing use of asphalt emulsion mixture, but, it is researched satisfactory solutions for these.

This study of emulsified asphalt concrete has been focused to solve the problems and present alternative to hot mixture. In this point, dense graded aggregate of hot mixture was selected and specimens of mixture were produced for various ratios of portland cement used instead of mineral filler.

It was seen that adding of cement was provided very important increase of mixture stability after pre-research. In this connection, the subject of this study investigated as more detailed. How dense graded mixture performance is effected with adding various cement ratios, how temperature behavior of mixture is formed and how mixture performance is effected with various ratios of residual bitumen content with cement addition is investigated detailed in this study.

Performance tests as Marshall Test, Indirect Tensile Test, Water Damage Test, Static and Repeated Load Asphalt Creep Tests were carried out on specimens that were produced according to the Modified Marshall Method. In study, 349 Marshall Specimens were produced and 1770 tests were carried out on the specimens.

Specimens of emulsion asphalt mixtures were produced for various ratios of portland cement from %1 to %6 is used instead of %6 mineral filler in dense graded aggregate. In order to determine effect of asphalt content with cement addition on mixture behavior, and to introduce an optimal approach between cement ratio and asphalt content in mixture design, test studies were extended for three asphalt content. Specimens were produced according to Modified Marshall Method were subjected to Indirect Tensile Test for different curing times throughout one year. And change in Resilient Modulus of mixture was investigated comparatively with hot mixture specimens were produced exactly the same aggregate grading and bitumen content equivalent to the residual binder content of the emulsion. To determine temperature sensitivity of various cement modified asphalt emulsion mixtures, specimens were subjected to Indirect Tensile Test for three temperatures (5, 25 and 40⁰C) for each three asphalt contents. Besides, emulsion mixture specimens were produced for various cement levels in the same conditions were subjected to Static and Repeated Asphalt Creep Tests; rutting potentials were investigated and compared with hot mixture specimens. In addition, resistance of specimens to Water Damage was tested depending on cement ratio and how emulsion mixture performance was affected with cement amount was researched.

Mathematical models were established for resilient modulus and static creep deformation using results obtained from experimental studies. Resilient modulus can be estimated for untested temperatures owing to model established for resilient modulus depending on temperature variable.

Results are drawn from this study are satisfactory. High performance is obtained with cement added emulsified asphalt concrete; a satisfactory solution is introduced to the most important problems of asphalt emulsion mixtures.

Key Words: Asphalt Emulsion, Cement, Asphalt Cold Mix, Emulsified Asphalt Concrete, Mechanical Properties

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Asfalt emülsiyonu (su içinde yağ emülsiyonu).....	9
Şekil 2. Emülgatör iyonlarının bitüm küreciğini sarması	10
Şekil 3. Harman (batch) tipi emülsiyon hazırlama tesisi	11
Şekil 4. Anyonik asfalt emülsiyonun şematik yapısı	12
Şekil 5. Katyonik asfalt emülsiyonunun şematik yapısı	14
Şekil 6. Asfalt küreciklerini kaplayan yüklerin agrega yüzeyine doğru hareketi.....	16
Şekil 7. Asfalt emülsiyonlarında yumaklaşma	18
Şekil 8. Asfalt emülsiyonlarında çökme.....	19
Şekil 9. Asfalt emülsiyonlarında birleşme	20
Şekil 10. Agrega türlerine göre silika içeriği yüzdesi	36
Şekil 11. Dolaylı çekme deneyi numune ve yükleme durumu	49
Şekil 12. Dolalı çekme deneyi yükün uygulanması ve deformasyon durumu	50
Şekil 13. Tek eksenli statik sünme deney düzeneği.....	52
Şekil 14. Tekrarlı yük ve uygulama şekli.....	55
Şekil 15. Çalışmada kullanılan agrega granülometrisi	59
Şekil 16. Hacim özgül ağırlık – sıkıştırmadaki su içeriği ilişkisi	80
Şekil 17. Deneyde kullanılan tekrarlı yük uygulaması	99
Şekil 18. Çimento katkı miktarına göre Marshall stabilitesindeki değişim	102
Şekil 19. Çimento katkı miktarına göre akma miktarındaki değişim	103
Şekil 20. Kalıntı bitüm içeriğine göre stabilite değerlerinin değişimi	103
Şekil 21. Kalıntı bitüm içeriğine göre akma miktarının değişimi	104
Şekil 22. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento miktarına göre esneklik modülünün zamanla değişimi	105
Şekil 23. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento miktarına göre esneklik modülünün zamanla değişimi	106
Şekil 24. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento miktarına göre esneklik modülünün zamanla değişimi	106
Şekil 25. Çimento katkısız numunelerin bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi	107

Şekil 26. %1 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi	107
Şekil 27. %2 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi	108
Şekil 28. %3 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi	108
Şekil 29. %4 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi	109
Şekil 30. %5 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi	109
Şekil 31. %6 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi	110
Şekil 32. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık ile esneklik modülü arasındaki ilişki	111
Şekil 33. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık ile esneklik modülü arasındaki ilişki	112
Şekil 34. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık ile esneklik modülü arasındaki ilişki	112
Şekil 35. 5 ⁰ C sıcaklıkta bitüm içeriğine bağlı olarak çimento miktarı ile esneklik modülü arasındaki ilişki	113
Şekil 36. 25 ⁰ C sıcaklıkta bitüm içeriğine bağlı olarak çimento miktarı ile esneklik modülü arasındaki ilişki	113
Şekil 37. 40 ⁰ C sıcaklıkta bitüm içeriğine bağlı olarak çimento miktarı ile esneklik modülü arasındaki ilişki	114
Şekil 38. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişen çimento katkı miktarına bağlı olarak kür süresine göre toplam nem kaybı	115
Şekil 39. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişen çimento katkı miktarına bağlı olarak kür süresine göre toplam nem kaybı	116
Şekil 40. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişen çimento katkı miktarına bağlı olarak kür süresine göre toplam nem kaybı	116
Şekil 41. Zamana bağlı modelde artık değerlerin frekans dağılımı	119
Şekil 42. Zamana bağlı modelde artık değerlerin normal olasılık grafiği.....	119
Şekil 43. Zamana bağlı modelde deneyden ve modelden bulunan değerler	120

Şekil 44. Sıcaklığa bağlı modelde artık değerlerin frekans dağılımı	122
Şekil 45. Sıcaklığa bağlı modelde artık değerlerin normal olasılık grafiği.....	122
Şekil 46. Sıcaklığa bağlı modelde deneyden ve modelden bulunan değerler	123
Şekil 47. Modelden bulunan esneklik modülü değerlerinin AAMAS’de verilen sıcak karışım sınırları ile karşılaştırılması	123
Şekil 48. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre zaman – deformasyon ilişkisi	125
Şekil 49. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre zaman – deformasyon ilişkisi	125
Şekil 50. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre zaman – deformasyon ilişkisi	126
Şekil 51. Çimento katkısız numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman–deformasyon ilişkisi	126
Şekil 52. %1 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman–deformasyon ilişkisi	127
Şekil 53. %2 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman–deformasyon ilişkisi	127
Şekil 54. %3 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman–deformasyon ilişkisi	128
Şekil 55. %4 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman–deformasyon ilişkisi	128
Şekil 56. %5 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman–deformasyon ilişkisi	129
Şekil 57. %6 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman–deformasyon ilişkisi	129
Şekil 58. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre sünme modülünün zamanla değişimi	130
Şekil 59. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre sünme modülünün zamanla değişimi	130
Şekil 60. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre sünme modülünün zamanla değişimi	130
Şekil 61. Çimento katkısız numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi	131

Şekil 62. %1 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi	132
Şekil 63. %2 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi	132
Şekil 64. %3 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi	133
Şekil 65. %4 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi	133
Şekil 66. %5 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi	134
Şekil 67. %6 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi	134
Şekil 68. Statik sünme deformasyonu modelinde artık değerlerin frekans dağılımı	137
Şekil 69. Statik sünme deformasyonu için artık değerlerin normal olasılık grafiği	137
Şekil 70. Statik sünme deformasyonu için deneyden ve modelden bulunan değerler	138
Şekil 71. Çimento miktarına göre yük tekrarı – kalıcı deformasyon ilişkisi.....	139
Şekil 72. Çimento katkı miktarına göre koşullu/koşulsuz esneklik modülü değişimi.....	140

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sıcak ve soğuk karışımlar için gerekli olan enerjinin karşılaştırılması	7
Tablo 2. Asfalt emülsiyonlarının viskozitelerine göre türleri	18
Tablo 3. Soğuk karışımlarda kullanılan asfalt tipleri	31
Tablo 4. Soğuk karışım uygulamasında tipik asfalt sıcaklıkları	32
Tablo 5. Değişik agrega türlerinde silika içeriği yüzdesi	35
Tablo 6. Asfalt emülsiyonu karışımlarda tasarım ölçütleri	47
Tablo 7. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları	58
Tablo 8. DeneYlerde kullanılan agrega karışımının özgül ağırlıkları ve su emmesi	60
Tablo 9. Agreganın aşınma kaybı	61
Tablo 10. Agreganın donma kaybı deney sonuçları	62
Tablo 11. Yassılık indeksi için kullanılan elekler ve malzeme miktarları	63
Tablo 12. Agrega granülometrisinin yassılık indeksi deney sonuçları	64
Tablo 13. Kuvars-silika ve karbonat kökenli agregaların ph bölgeleri	66
Tablo 14. Agrega malzemesinin kimyasal analiz sonuçları	68
Tablo 15. Portland çimentosunun ana bileşenleri	69
Tablo 16. Çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	70
Tablo 17. Çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal analiz sonuçları	71
Tablo 18. Optimum su içeriği için marshall deneyi sonuçları	79
Tablo 19. % 2 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin marshall deneyi sonuçları	81
Tablo 20. % 3 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin marshall deneyi sonuçları	81
Tablo 21. % 4 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin marshall deneyi sonuçları	82
Tablo 22. % 5 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin marshall deneyi sonuçları	82
Tablo 23. kalıntı bitüm içeriğindeki değişime göre marshall deneyi sonuçları	83
Tablo 24. % 4.2 kalıntı bitüm içeriği için değişik çimento katkı oranlarında yoğunluk-boşluk ilişkileri	84

Tablo 25. % 5.2 kalıntı bitüm içeriği için değişik çimento katkı oranlarında yoğunluk-boşluk ilişkileri	85
Tablo 26. % 6.2 kalıntı bitüm içeriği için değişik çimento katkı oranlarında yoğunluk-boşluk ilişkileri	85
Tablo 27. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında esneklik modülleri.....	87
Tablo 28. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında esneklik modülleri	87
Tablo 29. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında esneklik modülleri	88
Tablo 30. %4.2 kalıntı bitüm içeriği ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında elastik deformasyon sonuçları	88
Tablo 31. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında elastik deformasyon sonuçları	89
Tablo 32. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında elastik deformasyon sonuçları	89
Tablo 33. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için esneklik modülleri.....	90
Tablo 34. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için esneklik modülleri.....	90
Tablo 35. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için esneklik modülleri.....	91
Tablo 36. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için elastik deformasyon değerleri	91
Tablo 37. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için elastik deformasyon değerleri	92
Tablo 38. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için elastik deformasyon değerleri	92
Tablo 39. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde zamana bağlı olarak numunelerdeki nem kaybı	93
Tablo 40. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde zamana bağlı olarak numunelerdeki nem kaybı	93
Tablo 41. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde zamana bağlı olarak numunelerdeki nem kaybı	94
Tablo 42. % 4.2 bitüm içeriğinde statik sünme deformasyonu (10^{-6} xmm/mm).....	95
Tablo 43. % 5.2 bitüm içeriğinde statik sünme deformasyonu (10^{-6} xmm/mm)	96

Tablo 44. % 6.2 bitüm içeriğinde statik sünme deformasyonu (10^{-6} xmm/mm)	96
Tablo 45. % 4.2 kalıntı bitüm içeriğinde statik sünme modülleri	97
Tablo 46. % 5.2 kalıntı bitüm içeriğinde statik sünme modülleri	97
Tablo 47. % 6.2 kalıntı bitüm içeriğinde statik sünme modülleri	98
Tablo 48. Değişik çimento katkı oranlarında tekrarlı sünme deformasyonu (10^{-6} xmm/mm)	99
Tablo 49. Değişik çimento katkı oranlarında su hasarı deney sonuçları (esneklik modülü)	101
Tablo 50. Değişik çimento katkı oranlarında su hasarı deney sonuçları (elastik deformasyon) (10^{-6} xmm/mm)	101
Tablo 51. Zamana bağlı modele ilişkin korelasyon matrisi	118
Tablo 52. Zamana bağlı modelin regresyon istatistikleri	118
Tablo 53. Sıcaklığa bağlı modele ilişkin korelasyon matrisi	121
Tablo 54. Sıcaklığa bağlı modelin regresyon istatistikleri	121
Tablo 55. Statik sünme deformasyonu modeline ilişkin korelasyon matrisi	134

SEMBOLLER DİZİNİ

- A : 2.36 mm (No.8) elek üzerinde kalan agrega
a : Kuru agrega ağırlığı
Ag : Havada kurutulmuş agrega miktarı
B : 2.36 mm (No.8) elekten geçip 0.075 mm (No.200) elek üzerinde kalan agrega
b : Havada kurutulmuş agreganın su muhtevası
C : 0.075 mm (No.200) elekten geçen agrega
c : Kuru agrega ağırlığının yüzdesi olarak bitüm muhtevası
d : Emülsiyondaki asfalt yüzdesi
D : Kuru agrega ağırlığına göre kalıntı asfalt yüzdesi
e : Emülsiyondaki su yüzdesi
E_{oq}(t) : t anındaki sünme modülü
Em : Karışımda kullanılan emülsiyon miktarı
F : Düşey pik kuvvet
f : Kuru agrega ağırlığına göre karıştırma anındaki su miktarı
g : Kuru agrega ağırlığına göre sıkıştırma anındaki su miktarı
G : Numunenin hacim özgül ağırlığı
G_b : Asfaltın özgül ağırlığı
G_k : Numunenin kuru hacim ağırlığı
G_s : Suyun özgül ağırlığı
G_{sa} : Agreganın zahiri özgül ağırlığı
HF : Emülsiyona katılan kimyasal (jel)
K : Deney sırasında numunedeki nem yüzdesi
KS : İlave ön karışım suyu
ℓ : Numunenin başlangıçtaki yüksekliği
L : Numunenin tamamen kuru ağırlığı
L1 : Yük uygulaması olmaksızın LVDT'lerin başlangıçtaki sıfır referans deplasmanları
L2_n : n adet vuruş için LVDT'lerin maksimum deplasmanları
L3_n : n+1 adet vuruştan hemen önceki n adet vuruş için nihai deformasyon
MJ : Enerji (Megajoule)
M_R : Esneklik modülü

- M_{Rkuru} : koşullandırma öncesinde numunenin esneklik modülü
 $M_{Ryaş}$: Islak (suya koşullanmış) numunenin esneklik modülü
 MS : Orta hızda kesilen asfalt emülsiyonu
 P : Kuru agrega ağırlığına göre asfalt emülsiyonu
 P : Uygulanan yük
 pH : Hidrojen iyonu konsantrasyonu
 RM_R : Esneklik modül oranı
 RS : Hızlı kesilen asfalt emülsiyonu
 SS : Yavaş kesilen asfalt emülsiyonu
 US : Sıkıştırma öncesi uzaklaştırılan su
 V_h : Numunedeki hava boşlukları yüzdesi
 VMA : Agregalar arası boşluk yüzdesi
 V_R : Poisson oranı
 V_t : Numunedeki toplam boşluk yüzdesi
 X : Numunenin geriye dönüş kabiliyeti
 α_i : Sabit terim
 β_i : Sabit katsayı
 Δ_H : Geri dönen yatay deformasyon
 Δ_r : Deney sonunda geriye dönen düşey deformasyon
 $\Delta v(t)$: t anında düşey yönde oluşan deformasyon (mm)
 σ : Düşey pik gerilme
 σ_c : Numuneye uygulanan basınç gerilmesi
 $\epsilon_c(t)$: t anında tek ekseninde oluşan deformasyon
 ϵ_p : Kalıcı deformasyon
 ϵ_R : Elastik deformasyon

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Her geçen gün gelişerek değişen dünyada, her alanda olduğu gibi karayolu yapımında kullanılan malzeme tiplerinde ve tasarımlarında bir takım yeni teknikler ortaya konulmaktadır.

Çok pahalı olmalarına karşın, sağladıkları yüksek seyahat konforu nedeniyle "Bitümlü Yol Kaplamaları" halen yeğlenmekte ve daha yüksek performans alınabilmesi amacıyla çalışmalar tüm hızıyla devam etmektedir.

Bilindiği gibi, bitümlü karışımlar, kullanılan bağlayıcı tipine ve agreganın ısıtılıp ısıtılmamasına bağlı olarak "Sıcak Karışımlar" ve "Soğuk Karışımlar" olmak üzere ikiye ayrılırlar. Soğuk karışımlarda bağlayıcı olarak, asfalt emülsiyonu veya katbek asfaltı, sıcak karışımlarda ise 140-160⁰C'ye kadar ısıtılmış asfalt çimentosu ve agregası kullanılır.

Agregaların asfalt emülsiyonu ile işlenmesi yıllardır bir çok ülkede uygulanmaktadır. Ancak 1980'li yıllara kadar bu tür karışımlara, yüksek trafik hacimli yolların üstyapısında taşıyıcı bir tabaka olarak bakılmıyordu. 1970'li yılların sonlarında, enerji kaynaklarını korumak ve çevre kirliliğini kontrol etmek için artan baskılar, özellikle A.B.D. de, bu tip malzemelerin potansiyel faydalarından yararlanma çabalarına önayak olmuştur. Sonuçta, emülsiyon üretimi, karışım hesap yöntemleri ve karıştırma ve serme tekniklerindeki gelişmeler, Fransa ve A.B.D. de yol üstyapısında taşıyıcı bir tabaka olarak soğuk karışımların yaygın kullanımına olanak sağlamıştır [1].

Asfalt emülsiyonu karışımlar, ekonomik, ekolojik ve lojistik açıdan çok önemli avantajlara sahiptirler. Çünkü, sıcak karışımlardaki gibi bitümün ve agreganın ısıtılmasına gerek yoktur. Bundan dolayı sıcak karışım için kaçınılmaz olan agregası kurutucularına ve ısıtma sistemlerine gereksinim kalmamaktadır. O nedenle, asfalt emülsiyonu karışımlarda, sıcak karışımların üretimi sırasında ortaya çıkan insan sağlığına ve çevreye zararlı [2,3] gaz yayılmaları oluşmadığı gibi; agregası ısıtılmadığı için duman ve toz yayılması da

oluşmamaktadır. Ayrıca, katbek asfaltlarda olduğu gibi asfalt emülsiyonlarının kıvamını arttırmak için inceltici petrol ürünlerine (çözücü olarak; benzin, gazyağı, yol yağı vb.) de gereksinim yoktur.

Asfalt emülsiyonu soğuk karışımların kullanılmasıyla önemli derecede enerji tasarrufu sağlanabilir: Sıcak karışımların üretiminde bağlayıcı, 140 derecenin üzerinde ısıtılmasının yanında agrega karışımının da kurutulması ve benzer sıcaklıklarda ısıtılması gerekmektedir. Asfalt emülsiyonu karışımlarda ise sadece emülsiyonlaşma işlemi sırasında bitümün ısıtılması ve emülsiyon değirmeninin işletilmesi için enerji gerekmektedir. Bu işlem bir kez yapılmakta, ondan sonra emülsiyon soğuk kullanılabilir. Sıcak karışım plentleri daha komplike olduğundan normalde taşınabilir olarak düşünülmemektedir. Bu da, hem malzemelerin hem de imalatın daha uzun bir mesafe taşınmasını gerektirdiğinden sıcak karışımların taşıma maliyetlerinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. 1 tonluk sıcak karışım imalatı için gereken enerjinin yaklaşık yarısı kullanılarak soğuk karışım elde edildiği bir çok raporda ortaya konulmuştur [4,5,6]. Buna ilaveten, soğuk karışım plenti için yapılan yatırım, daha komplike olan sıcak karışım plentinden çok daha düşüktür.

Asfalt emülsiyonlarının potansiyel faydaları ve diğer ülkelerde bu konudaki teknolojilerin gelişmesi, Ülkemiz'de de bu malzemelerin kullanılması ve değerlendirilmesine ilişkin çalışmalara yönelmeyi gerektirmiştir.

Asfalt emülsiyonu karışımlar, sıcak karışımlara göre bir çok avantaja sahip ise de performans düşüklüğü nedeniyle sıcak karışımlar kadar yaygın kullanılamamıştır. Karışım performansının düşük olması, karışım bünyesinde kalan "su"dan kaynaklanmaktadır. Asfalt emülsiyon karışımlar, suyun kolay drene olabilmesi için boşluklu yapılmakta, ancak, karışım bünyesinde kalan su, kesilme/kür olma hızını yavaşlatmakta ve bu yüzden karışım performansı düşük olmaktadır. Bunlara ilaveten, kür olma tamamlanmadan bünyeye dışardan ilave su girmesi halinde karışımın erozyona uğraması söz konusu olabilmektedir [7]. Bu problemler, asfalt emülsiyonu karışımların yaygın kullanımını engellemekte, ancak, problemlere ilişkin çözümler halen araştırılmaktadır.

“Emülsifiye Asfalt Betonu”nu konu alan bu çalışma ise, bünyedeki suyun kolay drene olabilmesi için boşluklu yapılan asfalt emülsiyonu karışımlarda, yoğun granülometrilili sıcak asfalt betonu aşınma tabakasında kullanılan agrega tasarımı esas alınarak; karışımdaki mineral filler yerine, değişen oranlarda, portland çimentosu kullanılmak suretiyle, suyun neden olduğu problemlere çözüm bulmayı ve asfalt emülsiyonu karışım performansını sıcak asfalt betonu düzeyine çıkarmayı amaçlamıştır.

1.2. Problemin Tanımı ve Çalışmanın Amacı

Yüksek trafik hacimli asfalt yollarda, sağladıkları yüksek performans nedeniyle, yoğun granülometrilili sıcak karışım asfalt betonu kaplamalar kullanılmaktadır. Ekonomik, ekolojik ve lojistik yönden çok önemli avantajlar sağlamalarına rağmen, önemli performans sakıncaları nedeniyle, asfalt emülsiyonu karışımlar, henüz, sıcak asfalt betonunun yerini almış değildir.

Yukarıda vurgulandığı gibi, asfalt emülsiyonu karışımların yüksek performans verememesinin esas nedeni; karışım bünyesinde kalan “su”dan kaynaklanmaktadır. Bu karışımlar, suyun kolay drene olabilmesi için boşluklu yapılmakta, karışım bünyesindeki su, kesilme/kür olma hızını yavaşlatmakta ve bu yüzden karışım performansı düşük olmaktadır. Ayrıca, kür olma tamamlanmadan suya maruz kalması halinde karışım bozulabilmektedir. Karışım bünyesindeki suyun yol açtığı bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla, son yıllarda, boşluklu agrega granülometrisine sahip asfalt emülsiyonu karışımına, normal portland çimentosu katılarak, dar kapsamlı da olsa, bazı çalışmalar yapılmış ve iyi sonuçlar alındığı rapor edilmiştir.

Asfalt Emülsiyonu Soğuk Karışım Performansını, Sıcak Karışım Asfalt Betonu Performansına yaklaştırmayı amaçlayan ve KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvar’ında gerçekleştirilen bu çalışma ise; aşağıda verilen iki temel düşünceden hareketle tasarlanmıştır:

- 1) Yoğun (sürekli) granülometri, yüksek performans sağlamasına rağmen, emülsiyon karışımlarda bünyedeki suyun kolay drene olabilmesi için kullanılmayan “yoğun granülometri”nin kullanılması,
- 2) Asfalt emülsiyonu karışımındaki suyun kolay drene olmasını önleyen yoğun granülometri kullanılması halinde ise, bünyedeki suyun olumsuz etkilerini bertaraf etmek ve performansı arttırmak üzere, su ile reaksiyona giren “çimento”nun filler yerine kullanılması ve ortaya çıkan “hidratasyon ısı”ndan yararlanılması.

Su ve çimentonun hidratasyona girmesinden yararlanılarak yoğun granülometrinin yüksek performans sağlayacağı düşünülmüştür. Bu bağlamda yapılan ön araştırma neticesinde [8], sıcak karışım tasarımında kullanılan yoğun granülometrilik agrega ile hazırlanan asfalt emülsiyonu karışımında çimento ilavesinin çok önemli düzeyde stabilite artışı sağladığı görülmüştür. Bu verilerden hareketle, asfalt emülsiyonu karışımlar kapsamlı bir şekilde ele alınarak yoğun agrega granülometrisine sahip karışımda değişen oranlarda çimento ilavesinin, performans ilişkilerini nasıl etkilediği, öngörülen tasarımlarda elde edilen karışımların sıcaklık hassasiyetlerinin ne şekilde oluştuğu, çimento katkısıyla birlikte değişen oranlardaki kalıntı bitüm içeriklerine bağlı olarak karışım performansındaki değişimin nasıl şekillendiği sorularına bu çalışma kapsamında yanıt bulunmaya çalışılmıştır.

Yoğun granülometrilik agrega ile asfalt emülsiyonu karışım numunesi üretimi, sıcak karışımlar gibi kolay olmamıştır. Çimento (filler) malzemesi, karışımdaki suyu süratle kuruttuğundan homojen sarılmayı sağlayabilmek amacıyla ön karışım suyu ve özel karıştırma teknikleri uygulanmıştır. Karışımı kolaylaştırmak amacıyla, akışkanlık verici özel kimyasalların kullanılması üzerindeki çalışmalar halen sürdürülmektedir.

Çalışmada, asfalt emülsiyonu karışımının yoğun granülometriye sahip agrega bileşeninde % 6 oranındaki filler malzemesini, %1 den %6 ya kadar değişen oranlarda, portland çimentosu ile değiştirmek suretiyle karışım numuneleri hazırlanmıştır. Ayrıca, asfalt içeriğinin çimento katkısıyla birlikte karışım davranışı üzerindeki etkisini belirlemek ve karışım tasarımında, çimento oranı ile asfalt içeriği arasında optimal bir yaklaşım ortaya koymak amacıyla üç farklı asfalt içeriği için deneysel çalışma kapsamı geniş tutulmuştur.

Modifiye Marshall Yöntemine göre hazırlanan numuneler bir yıllık bir süre boyunca değişik kür sürelerinde Dolaylı Çekme Deneyine tabi tutularak Esneklik Modülündeki değişim, denk koşullarda hazırlanan sıcak karışımla karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Asfalt emülsiyonu karışımının sıcaklık hassasiyetini belirlemek için de değişik asfalt içeriği ve çimento katkı miktarlardaki karışım numunelerinin 5°C, 25°C ve 40°C sıcaklıktaki davranışları Dolaylı Çekme Deneyi ile ortaya konulmuştur. Yine aynı koşullarda değişik çimento miktarlarında hazırlanan soğuk karışım numuneleri üzerinde Statik Sünme ve Tekrarlı Sünme Deneyleri yapılarak tekerlek izi oluşum potansiyelleri sıcak karışımla karşılaştırmalı olarak araştırılmış ve bunlara ilaveten hazırlanan numunelerin çimento miktarına bağlı olarak Su Hasarı'na karşı gösterdikleri direnç test edilerek çimento miktarının, soğuk karışım performansını nasıl etkilediği hususları incelenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, sıcak asfalt karışım tasarımına alternatif olabilecek niteliktedir. Çalışmanın, bu konuda literatüre önemli bir katkı sağlayacağı, bundan sonraki çalışmalarını cesaretlendireceği ve yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir.

1.3. Konunun Özgeçmişi

Fikir ve uygulama olarak asfalt karışımlarında çimento kullanılması yeni değildir. Portland çimentosu, ilk olarak bitümlü sıcak karışımlarda, esasen kuru agregadan bağlayıcının soyulmasını önlemek için kullanılmasının yanında ıslak agreganın da bitüm ya da katranla kaplanma değerini artırmak için kullanılmıştır [9].

SCHMİDT, SANTUCCI ve COYNE [10] asfalt emülsiyonu karışımlarda dayanımın yavaş gelişmesini iyileştirmek amacıyla portland çimentosu ve kirecin bu karışımların erken mukavemetine etkileri üzerinde çalıştılar. Agreganın asfalt emülsiyonuna katılacağı sırada çimento agregaya ilave ediliyordu. Bu yolla işlenen karışımların daha hızlı kesildiği, daha hızlı bir şekilde yüksek bir esneklik modülünün geliştiği ve su hasarına karşı daha dirençli olduğu saptandı. Bununla birlikte, yorulma testlerinden; işlenmiş karışımların yorulma direncinin, çimentosuz benzer karışımların yorulma direncinden daha düşük olduğu sonucuna varıldı. Daha önce de TERREL ve

WANG [11] işlenmiş emülsiyon karışımlarında esneklik modülündeki (Mr) gelişme oranının çimento ilavesiyle önemli bir şekilde hızlandığını göstermişlerdi.

Çimento katkılı soğuk asfalt karışımları üzerinde yaptığı araştırma sonuçlarını sunan HEAD [3], çimento ilavesinin karışımın stabilitesi üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğunu ve çimentosuz örneklerin stabilite testlerinden sonra suya daldırıldıktan 24 saat sonra dağıldığını, oysa çimento ile işlenmiş örneklerin bozulmadığını göstermiştir.

SCHMİDT ve arkadaşları laboratuvar çalışmalarının ardından çalışmalarını sahada sürdürdüler. Katkısız ve çimento katkılı olarak inşa ettikleri yoldan 60 gün sonra aldıkları numunelerden çimento katkılı olanların esneklik (resilient) modülü, katkısız olan numunelerden 50 kat daha yüksek çıkmıştır. HEAD de, başarılı bir serme gerçekleştirmiş, fakat, bu çalışmada karışımın herhangi bir mekanik özelliği ölçülmemiştir. Her iki çalışmada da Asfalt Emülsiyonu karışımların lojistik ve ekonomik faydaları savunulmuştur.

DARDAK [12] çimentoyu kum emülsiyon karışımlarında kullanarak stabilitenin iki katına ve hatta bazen üç katına çıktığını ortaya koydu. Bunun sonucunda, normalde 22 cm olan bitümlü tabaka kalınlığının çimento katkılı emülsiyon kullanılmasıyla 12 cm'ye düşmesi sağlandı.

KHWEİR, WINDMİLL ve FORDYCE [13], PANCİNO, ANDRESİ ve MARTİNEZ [14,] SAİNTON ve BOURDELL [15] gibi araştırmacılar normal portland çimentosunun asfalt emülsiyonu karışımlarda önemli derecede iyileşme sağladığını gözlemlemişlerdir.

UEMURA ve NAKAMORİ [16], normal portland çimentosunun asfalt emülsiyonlarında yıllardır Japonya'da kullanılmakta olduğunu, laboratuvar ve sahada yaptıkları çalışmada bu tür karışımların performansının kabullenebilir seviyede ve daha çevreci olduğunu belirtmişlerdir.

Fransa'da yapılan bir çalışmada [4], soğuk karışımların üretim, taşıma, karıştırma, sahaya dağıtma ve serme konuları dikkate alınarak sarfedilen enerji, sıcak karışımlarla

karşılaştırılmıştır. Tablo 1. de verilen “Road Binder and Enerji Saving” adlı bir OECD Yol Ulaştırma Araştırma Raporundaki bu karşılaştırmaya göre “Grave Emulsion” olarak adlandırılan soğuk bir karışımın %50’lik bir enerji tasarrufu sağladığı, sıcak karışım için kullanılan ısı enerjisinin yaklaşık olarak £1.6/t’a mal olduğu ve soğuk karışım için bu değer £0.9/t olduğu, buna göre soğuk karışım kullanıldığında £0.7/t’luk bir tasarruf sağlanacağı rapor edilmiştir.

Tablo 1. Sıcak ve soğuk karışımlar için gerekli olan enerjinin karşılaştırılması

Enerji bileşenleri	Yarı-yoğun gradasyonlu karışım (%3.6 kalan bitüm) Enerji (MJ/t)		Yoğun gradasyonlu karışım (%6 kalan bitüm) Enerji (MJ/t)	
	Soğuk karışım	Sıcak karışım	Soğuk karışım	Sıcak karışım
Malzemeler	110	91	373	105
Karıştırma ve serme	30	270	30	320
Taşıma	53	50	60	53
TOPLAM	193	411	463	478

İngiltere’de Leeds Üniversitesinde yapılan bir laboratuvar çalışmasında HALLAÇ [17], normal portland çimentosunun asfalt emülsiyonu karışımların rijitlik modülü üzerindeki etkisiyle birlikte çimento katkılı, asfalt emülsiyonu yoğun makadam malzemesi üzerinde sabit bir yük altında üç eksenli sünme deneyi yaparak karışımdaki kalıcı deformasyon miktarını araştırmıştır. Bu araştırmada ana test aparatına monte edilebilen üç eksenli basınç deneyi için Hallaç tarafından geliştirilen yanal basınç üreten ve hava ile çalışan radyal basınç ünitesi kullanılmış, katkısız karışımın 4500 saniye tamamlanmadan çöktüğü ve 100. saniyede deformasyonun %1’i geçtiği rapor edilmiştir.

Nottingham Üniversitesinde yapılan bir çalışmada NEEDHAM [18], yoğun granülometrili makadam agregasıyla hazırlanmış asfalt emülsiyonu karışımların rijitlik modülünün zamana bağlı olarak sürekli bir artış gösterdiğini, sıcak karışımda ise dikkate değer bir değişikliğin olmadığını, soğuk karışıma katılan çimento düzeyine bağlı olarak rijitlik modülünde önemli bir artış sağlandığını, sıcak karışımın ise çimentodan

etkilenmediğini kaydetmiştir. Aynı çalışmanın devamında tekrarlı yük altında asfalt emülsiyonu karışımın kalıcı deformasyon dirençleri ölçülmüş, yapılan deneyler sonucunda çimentosuz numunelerin 1000 yük tekrarından sonra bozulduğu, çimento ilavesiyle soğuk karışımın kalıcı deformasyon direncinin ise yükseldiği kaydedilmiştir.

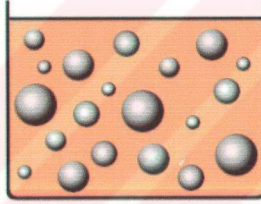
LI ve arkadaşları [19], yaptıkları bir çalışmada, önce kaba agregaya emülsiyon ilave etmişler, sonra ince agrega, çimento, ilave su ve süperplastikleştirici (superplasticizer) malzemelerini çimento harcı şekline gelinceye kadar karıştırmışlar, daha sonrada asfalt kaplı kaba agrega ile bu çimento harcı şeklindeki karışımı üniform bir karışım elde edinceye kadar karıştırmak suretiyle bir karışım hazırlamışlardır. Bu şekilde elde ettikleri karışımın, çimento betonu ile karşılaştırıldığında yorulma ömrünü artırdığı, dayanımı takviye ettiği ve mikroçatlak yayılmasını geciktirdiği, asfalt betonuna göre ise, sıcaklık hassasiyetinin daha düşük ve daha dayanıklı olduğu sonucuna varmışlardır.

İspanya'nın Barselona kentinde, Eylül 2000 tarihinde düzenlenen Eurasphalt&Eurobitüm kongresinde sunulan bir bildiriye POTTİ vd. [20], yavaş kesilen katyonik asfalt emülsiyonları ile yolların inşası ve bakımı konulu bir proje yürüttüklerini deklare etmişler, bu malzemelerin soğuk uygulanması nedeniyle ekonomik ve ekolojik yönden sağladıkları avantajları belirtilerek, beş adım olarak ortaya koydukları hedefleri açıklamışlardır.

1.4. Asfalt Emülsiyonları

Emülsiyon, bir sıvının diğer bir sıvı içerisinde küçük kürecikler halinde dağılması olarak tarif edilebilir. Bu sıvılardan biri diğeri içinde çok küçük kürecikler halinde dağılmıştır. Dispersiyona uğramış olan bu sıvı, *dağılan* veya *iç fazı*, kürecikleri saran sıvı da, *devamlı* ya da *dış fazı* teşkil ederler. Bu dağılım şekline göre emülsiyonlar doğru emülsiyonlar ve ters emülsiyonlar olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar. Su içerisinde bitüm küreciklerinin dağıtılmasına doğru emülsiyon, bitüm içerisinde su küreciklerinin dağıtılmasına ters emülsiyon denilmektedir. Yol kaplamalarında en fazla kullanılan emülsiyon tipi doğru emülsiyon olup, Şekil 1'den de görüleceği gibi, bunlarda bitüm dağılan faz, su da devamlı fazdır [21].

Su içinde yağ diye tanımlanan asfalt emülsiyonları, asfalt küreciklerinin su içinde dağılmasıyla oluşur. Bu küreciklerin çapları genellikle 0.001 ila 0.005 mm arasında değişmektedir. Asfalt emülsiyonlarının ana unsuru olan bitüm, kullanım amacına bağlı olarak emülsiyonda %40 ile %70 arasında bulunmakta, fakat çok nadiren bu değerlerin dışında da kullanılmaktadır. Herhangi bir emülsiyonda bitüm miktarının bir üst sınırı bulunmakta olup bu üst sınır iki faz arasındaki rölatif hacme bağlı bulunmaktadır. Sınır değerine ulaşıldığında, herhangi bir deformasyona uğramaksızın daha fazla bitüm küreciği için yeterli boşluk kalmamaktadır. Bitüm küreciklerinin birbirine yaklaşmasıyla birlikte kürecikler arasında sıkışan su, damlacık haline dönüşmekte; sonuç olarak yağ içinde su emülsiyonu olmaktadır [22,23].



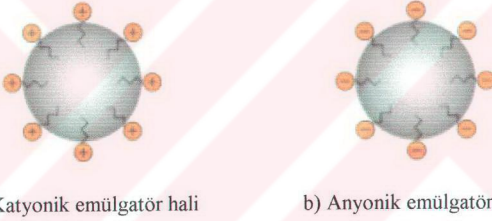
Şekil 1. Asfalt emülsiyonu (su içinde yağ emülsiyonu)

Bitümün su içinde dağılması sadece mekanik bir işlemle (karıştırma) sağlanabilir. Ancak, bu şekilde elde edilen emülsiyonda kısa bir süre sonra asfalt kürecikleri birbirine yapışarak sudan ayrılırlar. Asfalt küreciklerinin birbirine yapışarak sudan ayrılmasını önlemek ve emülsiyon stabilitesini sağlamak amacıyla emülgatör (emulsifier, emülsiyon verici madde) adı verilen bir katkı maddesi kullanılır. Emülgatör, asfalt küreciklerinin çevresini bir film halinde sararak küreciklerin kendi aralarında birleşmesine engel olur.

Emülsiyonun istenen özellikte olmasını sağlamak için emülgatörün çok dikkatli seçilmesi son derece önemlidir. Bitümü emülsifiye etmek için kullanılacak çok çeşitli kimyasal bileşikler bulunmaktadır. Ancak, gerek teknik ve gerekse ekonomik nedenlerden dolayı, sadece birkaç çeşit bileşik yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bileşiklerden bir çoğu, tek başına ya da bir veya birkaç bileşiğin birleştirilmesi ile kullanılabilir.

Ayrıca, bu bileşikler spesifik özellikler elde etmek için çeşitli yöntemlerle modifiye edilebilmektedir. İyi bir emülgatörün emülsiyona istenen özellikleri verebilmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra maliyeti düşük, performansı yüksek, emniyetli ve kullanımı kolay olmalıdır.

Emülgatör, normal olarak uzun bir hidrokarbon zinciri içermekte olup bu zincir anyonik veya katyonik fonksiyon grupları ile sonlandırılmaktadır. Emülgatör iyonunun parafinik kısmı (hidrokarbon zinciri), bitüm küreciğinin (damlacığının) yüzeyine kendi kendini yönlendirir. Böylece iyonik kısım küreciğin yüzeyine yerleşirken, hidrokarbon zinciri bitüme sağlam bir şekilde bağlanır. Böylece, katyonik emülsiyonlar pozitif yüklerle, anyonik emülsiyonlar da negatif yüklerle elektriksel olarak yüklenecektir. Şekil 2’de anyonik ve katyonik emülgatör iyonu ile sarılmış asfalt kürecikleri (zerrecikleri) şematik olarak görülmektedir.

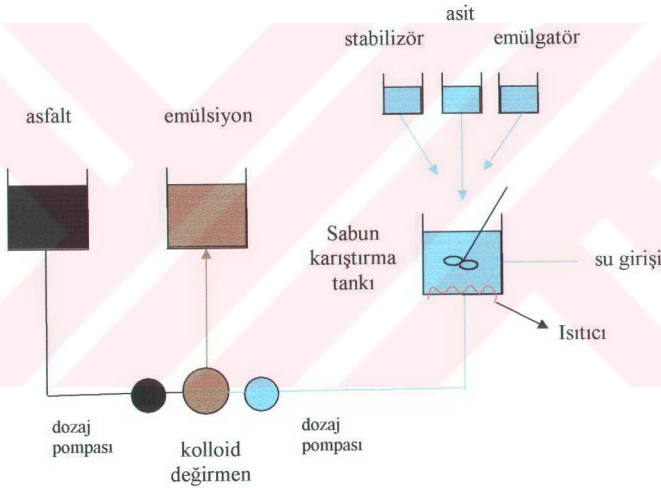


Şekil 2. Emülgatör iyonlarının bitüm küreciğini sarması

Bitümün niteliği, emülsiyonun özellikleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir [24]. Emülsiyonlar, genellikle 100 ila 250 penetrasyon değerine sahip bitümle üretilmektedirler. Bazen iklim koşulları daha sert veya daha yumuşak bir bitüm kullanılmasını gerektirebilir. Koşullar ne olursa olsun stabil bir emülsiyon için bitüm ile emülgatörün uyumu esastır.

Asfalt emülsiyonları, kolloid değirmen içeren harman (batch) tipi veya sürekli tip plantlerde üretilirler. Bir taraftan asfalt türü bağlayıcı ile bazı durumlarda incelticiden oluşan bağlayıcı fazı, diğer taraftan su, emülgatör, asit ya da baz ve çökeltme stabilitesini

artırıcı stabilizör maddelerin oluşturduğu sulu faz pompalarla değirmene sevk edilir. Kolloid değirmenin ana parçaları olan rotor – stator aralığından geçen fazlar, asfalt kürecikleri dağılımı normal dağılıma uyması istenilen emülsiyona dönüşür. Rotor ve stator arasındaki boşluk 0.2 ila 0.6 mm olup, bu boşluk ve çevresel rotor hızı, asfalt küreciklerinin büyüklük dağılımını etkilemektedir. Üretim sırasında emülsiyonun sıcaklığı 85–95°C olmalı, 100⁰C'nin üzerine çıkmamalıdır. Elde edilen emülsiyon soğutulurarak depolanır. Sıcak depolanma, asfalt zerrelerine tuz geçişine imkan vererek viskozite artışına neden olduğundan sakıncalıdır. Şekil 3'te kolloid değirmen kullanılarak emülsiyon üretiminin yapılışı şematik olarak gösterilmiştir [22,23].



Şekil 3. Harman (batch) tipi emülsiyon hazırlama tesisi

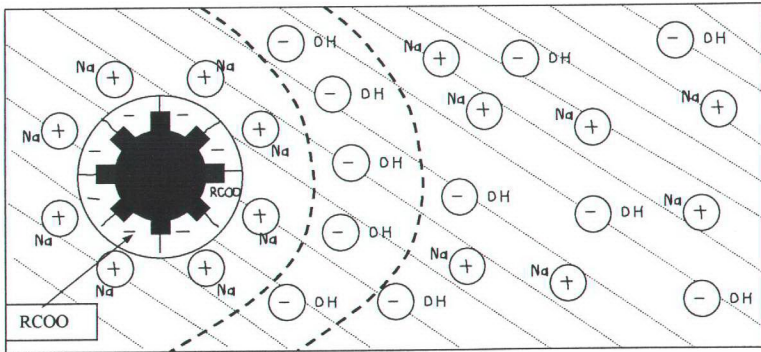
Emülsiyon üretimine başlamadan önce, emülsiyonun kullanılacağı alan ve istenen özellikler açısından uygun bir emülsiyon elde etmek için formülasyon seçilir. Yol inşaatında kullanılan asfalt emülsiyonları, asfalt küreciklerinin etrafını saran emülgatör olarak kullanılan kimyasalların cinsine bağlı olarak anyonik ve katyonik diye sınıflandırılırlar [25].

1.4.1. Anyonik Asfalt Emülsiyonları

Anyonik ismi; böyle bir emülsiyon içine iki elektrot batırıldığında, asfalt küreciklerinin anoda doğru yönelmesinden gelmektedir. Anyonik emülsiyonlar için organik bir asidin sodyum veya potasyum tuzu olan (örneğin reçine) alkali yağ asitleri kullanılır. Bu çeşit sabunlar zayıf bir asitle kuvvetli bir bazdan meydana geldiklerinden, sabunun kalevi karaktere sahip bulunması dolayısıyla “alkali emülsiyonlar” diye de anılırlar [26].

Bu sabunların genel formülü : $R - COO Na$ dır. Bu sabunun su içinde çözülmesiyle iyonlaşma olur; sodyum veya potasyum iyonları pozitif iyonları veya katyonları (Na), moleküllerin kalan kısmı da anyonları (RCOO) meydana getirirler.

Bu sabunlu çözelti içersine asfalt kürecikleri dağıtıldığında RCOO anyonları bu kürecikler tarafından absorbe edilerek bunların etrafında bir kuşak teşkil ederlerken, Na katyonları ise su tarafından absorbe edilerek birinci kuşağın etrafında ikinci bir kuşak meydana getirirler. Böylece asfalt küreciklerini saran iyonlar aynı işaretli yüklere sahip olduklarından birbirlerini iterek birleşme olayına mani olurlar ve bu sayede depolama stabilitesi sağlanmış olur. Anyonik asfalt emülsiyonun genel şematik yapısı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Anyonik asfalt emülsiyonun şematik yapısı

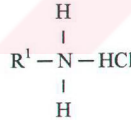
Burada emülsiyonun stabilitesi, sulu çözeltinin pH şının tesiri altında olup bunun optimum değeri 11 ile 12 dir. Eğer emülsiyon içine bir asit (örneğin HCl) ilave edilirse, pH 7 veya daha aşağıya düşerek asfalt zerrelere çökmeye başlar (kesilme başlangıcı). Bu olay mevcut Na katyonlarının asitle nötralizasyonu neticesi şu şekilde meydana gelir: H katyonları asfalt küreciklerinin yüzeyindeki RCOO anyonunu nötrale ederek küreciklerin kaplama kuşağını ortadan kaldırır; elektrostatik itme kesilir ve kürecikler aralarında birleşip kaynaşır [26].

1.4.2. Katyonik Asfalt Emülsiyonları

Kullanılan emülgatörün cinsinden dolayı bu tip bir emülsiyon için iki elektrod batırıldığında asfalt kürecikleri katoda doğru yönelirken bunlara katyonik asfalt emülsiyonları denilmektedir.

Genellikle yağ amini üzerine mineral bir asitin (Hidroklorik, Nitrik, Formik, Asetik) etkimesiyle kvaterner amonyum tuzu veya amin tuzu meydana gelmektedir. Bu amin zayıf bir baz gibi hareket eder; kullanılan asit ise tersine, kuvvetli bir asit olduğundan bunlara "asit emülsiyonları" denmektedir.

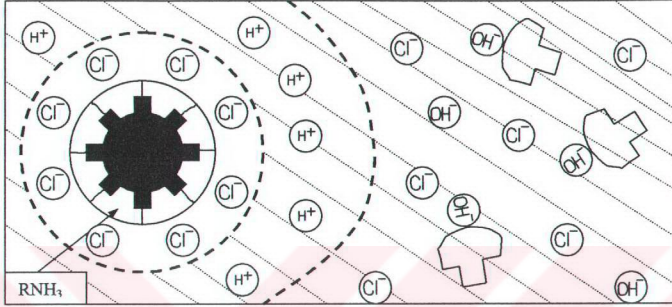
Bu sabunların genel formülü :



Bu emülgatörün su içinde iyonize olmasıyla, klor (Cl) atomu negatif iyon veya anyon, molekülün geri kalan kısmı da pozitif iyon veya katyon haline gelir [26].

Bu sabunlu çözelti içersine asfalt kürecikleri dağıtıldığında RNH_3 katyonları bu kürecikler tarafından (R zincirinin hidrokarbon bağlayıcılara karşı olan afinitesi dolayısıyla) absorbe edilirler. Bu katyonlar her asfalt küreciği etrafında, anyoniklerin tersine, pozitif bir kuşak teşkil etmek üzere yerleşirler. Su tarafından absorbe olan Cl anyonları da birinci kuşağın etrafında ikinci bir kuşak teşkil edecek şekilde gelip

yerleşirler. Aynı işaretle yüklü asfalt küreciklerinin elektrostatik itilmeleri sayesinde depolama stabilitesi sağlanmaktadır. Katyonik emülsiyonun şematik yapısı Şekil 5'te görüldüğü gibidir.



Şekil 5. Katyonik asfalt emülsiyonunun şematik yapısı

Bu stabilize, sulu fazın pH şının tesiri altında bulunmaktadır. Az miktarda asit ilavesi çökeltme mukavemetini artırır; bununla beraber pH genellikle (6-7 arasındadır) oldukça kuvvetli kalmaktadır.

Eğer pH bir baz ilavesiyle yükseltirse (örneğin süktozik ilavesi), bu bazın iyonizasyonundan meydana gelen Na iyonları birinci korucu tabakanın Cl iyonlarını, OH iyonları da RNH₃ katyonik tabakayı nötrale ederek elektrostatik itme kuvveti ve koagülasyon olacaktır. Aynı şekilde çok fazla miktarda asit ilavesi de katyonik kaplama kuşağında fazla Cl anyonları tesiriyle çökeltme meydana getirecektir.

Katyonik asfalt emülsiyonları 1950'li yıllarda endüstriye girmişlerdir ve bir çok çekici özellikler sunmaktadırlar. Bu malzemeler, her tür agrega ile daha iyi adezyon temin ederler. Daha kısa kesilme zamanı özelliğinden dolayı yağışlara karşı daha az hassastırlar. Ayrıca, emülsiyonun viskozitesini önemli derecede değiştirmeksizin su içinde daha fazla bitüm dağıtılabılır [27,7].

1.4.3. Asfalt Emülsiyonlarının Özellikleri

1.4.3.1. Kesilme

Bir asfalt emülsiyonu agregaya ile karıştırıldığında veya bir yol yüzeyine püskürtüldüğünde emülsiyon kesilir, yani asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agregaların üzerine yapışırlar. Bu arada serbest kalan su da buharlaşır. Yol üst yapılarında kullanılan asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre:

- Çabuk kesilen (RS)
- Orta hızda kesilen (MS)
- Yavaş kesilen (SS)

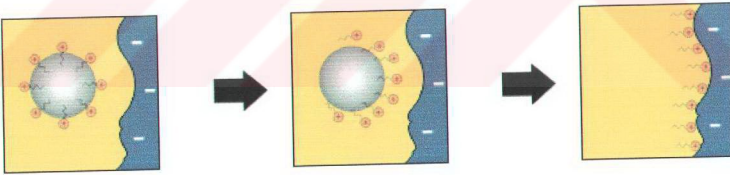
olmak üzere üç tipe ayrılırlar.

Emülsiyon ile yüzeysel (sathi) kaplama uygulamasında, ilk olarak bitüm agregaya sarılır, daha sonra ise bitüm bitüme yapışır. Fakat, karışım türündeki uygulamalarda bu tür kesilme olmaz. Çünkü karışıma devamlı (karıştırma) enerjisi verilir. Kesilme süresini etkileyen faktörlerin başında emülsiyonun pH'ı ve dane boyutları gelir [28,29]. Dane çapları küçüldükçe kesilme indeksi büyür; yani emülsiyon daha geç kesilir. Bir emülsiyon uygulaması, çok büyük bir ölçüde o emülsiyonun kesilme davranışına bağlıdır. Emülsiyonun kesilme davranışını karşılaştırmalı olarak belirlemek için kesilme indeksi deneyi uygulanır [30]. Bu deney, normal olarak kuvars kumu olan ince agregaya ile 100 g emülsiyon ile karıştırılmasını kapsar. Eğer emülsiyonun kesilme indeksi 80'in altında ise hızlı kesilen, 120'nin üzerinde ise yavaş kesilendir.

GAESTEL'e [31] göre anyonik emülsiyonların kesilme mekanizması, iki şekilde gerçekleşmektedir. Birincisinde; kireçtaşı gibi pozitif yüklü kalkerli agregaya ile karıştırıldığında, emülgatörün, agregadaki kalsiyum iyonlarıyla tuz oluşturması sonucu kesilme meydana gelir. İkincisinde; negatif yüklü silisli agregalarla karıştırıldığında, inorganik katyonlar agregaya yüzeyince absorbe edilecek, böylece emülsiyon stabilitesini kaybedecek ve kesilecektir.

WATES ve JAMES'e [32] göre kationik emülsiyonların kesilme mekanizması negatif yüklü olan silisli agregalarla üç şekilde cereyan etmektedir. Birincisi ; emülgatörün ayrılması olarak bilinir. Bu durumda, bitüm/su arayüzeyinden ayrılan emülgatör agregaya yüzeyi tarafından çekilir. Emülgatörün bitüm küreciklerinden ayrılması sonucu bitüm kürecikleri birleşmek suretiyle stabitesini kaybeder ve emülsiyon kesilir. İkincisi ; negatif agregaya yüzeyi tarafından emülgatördeki protonlar çekilir, emülgatör aktivasyonunu kaybeder ve böylece emülsiyonun kesilmesine neden olur. Üçüncüsü ve en önemlisi ise, bitüm küreciklerinin göçü olarak adlandırılır. Burada pozitif yüklü bitüm kürecikleri agregaya yüzeyine doğru çekilirler. Bu sırada surfaktan (kapiler aktif madde) yardımıyla bitüm kürecikleri agregaya yüzeyine yayılırlar.

Emülsiyon, depolama ve taşıma sırasında stabil olmalı, fakat uygulandığı zaman da önceden tespit edilen hızla kesilmelidir. Bu nitelik en kolay biçimde kationik emülsiyonlarla sağlanmaktadır. Çünkü kationik emülsiyonlar çoğu agregaya ile kimyasal reaksiyona girer ve kesilirler. Genellikle agregalar negatif yüklüdürler ve bu yüzden pozitif yüklü emülgatör, emülsiyonun kesilmesine neden olacak agregaya doğru elektrostatik olarak çekilir (Şekil 6). Bununla birlikte emülgatör bu noktada bir adezyon artırıcı olarak görev yapar.



Şekil 6. Asfalt küreciklerini kaplayan yüklerin agregaya yüzeyine doğru hareketi

Kesilme, emülgatör seçimi ve emülgatör içeriğiyle kontrol edilebilir. Kesilmeyi etkileyen diğer faktörler sıcaklık, nemlilik ve bitüm tipidir. Bir anyonik emülsiyon, asidik agregaya ile kullanıldığında kimyasal olarak kesilmez. Su buharlaşır ve emülsiyonun kesilmesine neden olur. Bu çok daha yavaş gelişen bir işlemdir ve adezyon çok zayıftır[21,22, 33].

1.4.3.2. Viskozite

Viskozite, bir sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Emülsiyonun viskozitesi, bitüm içeriği, sıcaklık, bitüm küreciklerinin çapsal dağılımı, emülgatör tipi ve dozajı, katkı malzemesinin tipi ve dozajı ve bitümün ihtiva ettiği tuz olarak belirtilen faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bazı bitümler, diğerlerinden daha yüksek bir viskozite sağlarlar. Bu durum, gaz süzülmesinden (osmosis) dolayı normaldir ve CaCl_2 ilavesiyle ayarlanabilir [21,22,34].

Viskoziteyi ayarlamak için;

- Bitüm içeriği artırılır veya azaltılır
- CaCl_2 ilave edilir veya uzaklaştırılır
- Emülgatör tipi değiştirilir

Viskozite, emülsiyonlar için önemli bir özelliktir. Örneğin yüzeysel kaplama için hızlı kesilen katyonik bir emülsiyon (CRS) kullanıldığında, bu emülsiyon belli bir viskoziteye sahip olmalıdır. Eğer viskozite çok düşük ise, emülsiyon gerekli kalınlıkmayı sağlayamayacak, eğer viskozite çok yüksek ise, o takdirde de emülsiyon alta akmayıp yüzeyde kalacaktır.

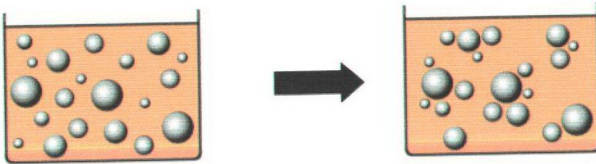
Bir emülsiyonda, kesilme hızını belirten harflerden sonra gelen rakamlar o emülsiyonun viskozitesini göstermektedir. Bu rakam büyüdükçe emülsiyonun viskozitesi de büyür. Küçük "h" harfinin bu rakamların yanına yazılması, emülsiyonda daha sert bir bitüm kullanıldığı anlamına gelir. Ayrıca, burada HF harfleri (High Float: Yüksek Yüzme); agrega taneleri üzerinde daha kalın bir bitüm filmi oluşturmak için emülsiyona katılan kimyasalları (jel) ifade etmektedir. Asfalt emülsiyonlarının viskozitelerine göre türleri Tablo 2'de verilmiştir [23].

Tablo 2. Asfalt Emülsiyonlarının Viskozitelerine Göre Türleri

Emülsiyon Tipi	Çabuk Kesilenler	Orta Hızda Kesilen	Yavaş Kesilenler
Anyonik Asfalt Emülsiyonu	RS-1 RS-2 HFRS-2	MS-1 MS-2 MS-2h HFMS-1 HFMS-2 HFMS-2h HFMS-2s	SS-1 SS-1h
Katyonik Asfalt Emülsiyonu	CRS-1 CRS-2	CMS-2 CMS-2h	CSS-1 CSS-1h

1.4.3.3. Yumaklaşma

Yumaklaşma, asfalt küreciklerinin özelliklerini kaybetmeden birbirlerine doğru yaklaşmasıdır. Çoğunlukla, büyük bir küreciğin etrafının daha küçük kürecikler tarafından çevrelenmesi şeklinde olur. Yumaklaşmış kürecikler, karıştırma ile tekrar ayrılabilirler. Yumaklaşma olayı, Şekil 7'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 7. Asfalt emülsiyonlarında yumaklaşma

1.4.3.4. Çökelme

Bitüm, az da olsa sudan daha yoğun bir malzemedir ve bu yüzden asfalt kürecikleri ağırlıkları dolayısıyla kap tabanına doğru birbirlerine yaklaşarak hareket eğilimi gösterirler. Bitüme çözücü ilave edilerek bunun önüne geçilebilir. Ancak, eğer bitüme fazla miktarda çözücü ilave edilirse, bitümün yoğunluğu sudan daha düşük hale gelebilir ve bu andan itibaren de yüzeye doğru bir yönelme olur. Asfalt küreciklerinin yüzeye çıkması, çökelmenin aksi olup, kaymak bağlama (creaming) olarak tarif edilir. Emülsiyonda meydana gelen çökelme olayı Şekil 8’de şematik olarak verilmiştir.

Aşağıdaki işlemler yapılarak çökelme azaltılabilir:

- Depolama koşullarının iyileştirilmesi; örneğin emülsiyonu daha yüksek bir sıcaklıkta saklamak ve kısa periyotlarda karıştırmak
- Bir çözücü ilavesiyle bitüm yoğunluğunun düşürülmesi
- Dengeleyici (stabilizör) ve emülgatör konsantrasyonları ve tiplerinin değiştirilmesiyle veya pH değişimiyle yumaklaşmanın engellenmesi
- Bitüm içeriğinin artırılması
- Emülsiyon viskozitesinin yükseltilmesi

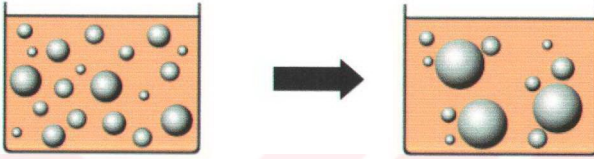


Şekil 8. Asfalt emülsiyonlarında çökelme

Dengeleyici (stabilizör) olarak katyonik asfalt emülsiyonlarında kalsiyum klorür (CaCl_2) diğer bir adıyla tuz kullanılır. Anyonik emülsiyonlarda ise trisoyum polifosfat kullanılır. Bir emülsiyonda dengeleyici kullanılmasının amacı, gaz süzülmesi (osmosis) nedeniyle bitüm küreciklerinin şişmesini önlemek ve emülsiyon stabilitesini yükseltmektir [26,33].

1.4.3.5. Birleşme

Bitüm kürecikleri kaynaştıklarında ve daha geniş parçacıklar halinde şekillendiklerinde, emülsiyon nihai olarak kesilecektir. Bu durum genelde yumaklaşma ile başlamaktadır. Şekil 9'da şematik olarak verilen bu durumun oluşmasında aşağıda belirtilen hususlar etkili olabilmektedir.



Şekil 9. Asfalt emülsiyonlarında birleşme

Birleşmenin meydana gelmesine tesir eden hususlar:

- Yetersiz emülgatör içeriği
- Yanlış emülgatör tipi
- Üretim esnasındaki yanlış sıcaklıklar
- Yanlış depolama sıcaklığı
- Mekanik etki (uzun bir süre boyunca bir pompada dolaştırılması, nakiller)
- Elverişsiz bitüm

1.4.4. Asfalt Emülsiyon Uygulamaları

Asfalt emülsiyonları, halen tüm Dünyada özellikle gelişmiş ülkelerde bir çok alanda sağladıkları avantajlar nedeniyle çok farklı uygulama alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Burada, farklı kesilme karakteristiklerine sahip asfalt emülsiyonları ile gerçekleştirilen uygulamalar özet olarak anlatılmaktadır.

1.4.4.1. Yüzeysel Kaplama

Yüzeysel kaplama, bitümlü malzeme ile mıcırdan (tek boyutlu agregası) oluşan çok ince bir aşınma tabakasıdır. Yüzeysel kaplamada, bağlayıcı madde yol yüzeyine bir asfalt distribütörü ile püskürtülür. Bu işlemi takiben bir agregası tabakası derhal bir mıcır sericisi ile serilir ve daha sonra yüzey mümkün olduğu kadar kısa sürede silindirlenir. Yüzeysel kaplama, tek veya çok (iki hatta daha fazla kat) tabakalar halinde gerçekleştirilmektedir. Bu kaplama, düşük maliyetli kırsal kesim yollarından, yüksek trafik yoğunluğuna maruz kalmış eski aşınma tabakalarına kadar çok çeşitli yollarda granüler temeller veya mevcut asfalt kaplamaları üzerine serilmektedir. Yüzeysel kaplama tabakasının altında güçlü bir temel veya üstyapı kaplaması bulunması son derece önemli olup dikkat edilmelidir [23,35].

Bitüm, katbek veya emülsiyon yüzeysel kaplamada bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Diğer tip bağlayıcılarla karşılaştırıldığında emülsiyonların, aşağıdaki gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır.

- Nemli agregası kullanılabilir
- Yüksek bağlayıcı sıcaklığı gerekmemektedir
- Katbeklerdeki yangın tehlikesi bertaraf edilmiştir
- Uygun kür süresi sağlanmakta olup katbeklerde olduğu gibi çözücülerin buharlaşmasına bağlı değildir.

Gerektiği gibi formüle edilmiş katyonik emülsiyon, ince bir bitüm tabakası oluşturacak şekilde yol yüzeyi üzerine tatbik edilir. Agregalar emülgatör iyonlarını absorbe edeceği için agregası derhal yayılır ve silindirme yapılır. Silindirme işlemi emülsiyonun kesilmesini hızlandırır. Emülsiyon, 30 dakikadan daha kısa bir kesilme süresi zarfında iyi bir yapışma temin edecek şekilde tasarlanarak üretilir. Kullanılan agregası granülometrisi, kökeni ve miktarı ile birlikte bağlayıcı miktarının emülsiyonun kesilme hızını etkilediği ortaya konulmuştur [36]. Genellikle % 65-70 bitüm içeriğine sahip emülsiyonlar kullanılmakta olup bunlar sınırlı bir depolama stabilitesi ve kısa kesilme süresine sahip olacak şekilde tasarlanarak üretilir.

1.4.4.2. Harç Tipi Asfalt Emülsiyon Kaplama (Slurry Seal)

Harç tipi asfalt kaplama, bir teknik olup bu teknikte emülsiyon, ince agrega, su ve mineral filler malzemeleri, özel olarak yapılmış kombine mikser-distribütörler ile arazide karıştırılmaktadır. Yüzey çatlaklarının kapatılması, oksidasyonun durdurulması veya açık yüzeylerin su veya hava geçirmez hale getirilmesi gibi amaçlarla asfalt kaplama yüzeyinin koruyucu ve düzeltici bakımını yapmak için kullanılmaktadır. Harç tipi asfalt kaplama genellikle 3 ila 6 mm kalınlıkta tatbik edilmektedir. Yüzey önce süpürülür ve sonra hafifçe nemlendirilir. Daha sonra karışım, kombine mikser-distribütör ile serilir ve karışımın istenen kıvama gelme işlemi başlar. Karışım kesildiği zaman sağlamlığın ve dayanıklılığın artırılması için bazen silindire sıkıştırma işlemi yapılır.

Normal olarak % 60-65 bitüm içeriğine sahip yavaş ve orta hızda kesilen emülsiyonlar kullanılmaktadır. Agrega miktarına göre hesaplanan % 10-25'lik emülsiyon gerekmektedir. Harç tipi emülsiyonun istenen viskozitede olmasını sağlamak için karıştırma prosesi esnasında bir miktar su eklenmektedir. Tipik olarak karıştırılan su miktarı, kuru agrega ağırlığına göre % 6-15'dir. Agrega ile emülsiyon bağlantısı laboratuarda iyi etüt edilip önceden ayarlanmalıdır.

Yüksek ortam sıcaklığı, hızlı bir şekilde kesilmeyi hızlandırmakta olup bu nedenle harç tipi asfalt emülsiyonu bileşimi, bazı katkı maddelerinin yardımıyla sıcaklığa göre modifiye edilmelidir [21,23,37].

1.4.4.3. Penetrasyon Makadam

Bir hidrokarbon bağlayıcı yardımı ile agrega stabilizasyonu usulüne Penetrasyon Makadam denir. Bu yapım şekli, yeni yapılan yolların üstyapı inşasında, eski yapılmış yolların da onarımında kullanılmaktadır.

Penetrasyon makadam, silindire sıkıştırılıp kenetlenmiş makadam taş kaplama içindeki temas eden taş yüzeyleri arasında bir film tabakası teşekkülü ile tüm bünyeyi stabil kılacak bağlayıcıyı püskürtmekten ibarettir.

Asfalt emülsiyonu, penetrasyon makadam inşası için, bütün diğer bitümlü bağlayıcılara nazaran en uygun olan malzemedir. Emülsiyon akıcılığı sayesinde taşların aralarına girerek yüzeylerinin hemen hemen tamamını kaplar. Sıcak uygulamalı bir bitümlü bağlayıcı kullanılması halinde daha çok miktarda bitüm kullanmak gerekecek ve sıcak bitümün taşlarla temasında aniden soğumasından iyi bir kaplama gerçekleşmeyecektir (boşluklar yeterince dolmayacaktır) [21].

Diğer taraftan kesilmeyi takiben kalıntı asfaltın kıvamlılığı sayesinde belirli bir kohezyon elde edilecektir. Petrol destilatları ile akışkan hale getirilmiş katbek asfaltlar kullanıldığı takdirde çözücünün kaplama içinde kalmasını önlemek amacıyla diğer katların yapılabilmesi için kaplama aralarında uzunca süreler bırakmak gerekecektir; alt katların kür olması çok yavaş olacağından deformasyondan endişe edilebilir. Makadam yolun inşası sırasında sulanması ve rutubetli kalması, emülsiyon tatbikine engel değildir. Bu sulama sayesinde taşlara en iyi sıkışma olanağı verilmekte ve dolayısıyla tüm bünye için en iyi stabilite sağlanmaktadır.

1.4.4.4. Zemin Stabilizasyonu

Emülsiyon ile zemin stabilizasyonu, yolun taşıma kapasitesini arttırmak için yapılan temel takviye işlemidir. Yolda yapılan bu stabilizasyon, çeşitli yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. Kullanılan her yöntem, önceden nemlendirilmiş agregaya yüzeyine asfalt emülsiyonunun iyice sarılması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemlerden biri, yol üzerinde yapılan ve kendi kendine yürüyen bir plentle yapılandır. Bu tip seyyar plentlerde, yol boyunca asfalt emülsiyonu ile agreganın karışması sürekli olarak yapılmaktadır. Çok iyi karışmış ve kaplanmış agregalar böylece yola serilir ve arkasından sıkıştırma işlemi yapılır.

Diğer kullanılan yöntem de döner tip bir mikser kullanılmaktadır. Burada seyyar bir karıştırıcı mevcuttur. Bu da kendi kendine yürüyen bir çekici araca bağlıdır. Karıştırıcıya bağlı döner bıçaklar yol üzerindeki belirli kalıntıdaki malzemeyi kazıyarak bunu asfalt emülsiyonu ile karıştırır. Böylece tamburda kırışan malzeme belirli kalınlık ve katta yola serilir.

Bir üçüncü yöntem ise, greyder bıçağı ile yapılandır. Diğer sistemler kadar etkili değildir, ancak çok basittir. Emülsiyon bir distribütör ile malzeme üzerine tatbik edilir. Greyder hemen arkasından aktarma ve karıştırma işlemlerini yapar ve sonuçta yolu tesviye ederek sıkıştırma işlemi tamamlanır [21].

1.4.4.5. Astar Tabakası

Astar kaplamasında, bir asfalt tabakasından önce yüzeyi hazırlamak için granüler temel tabakası üzerine bir bağlayıcı madde püskürtülmektedir. Bu işlem için ilk başlarda katbek asfaltlar kullanılmaktaydı, ancak son yıllarda emülsiyonlar çok daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu iş için değişik tip emülsiyonlar kullanılmakla birlikte en emin emülsiyonun, geç kesilen (sür stabilize) emülsiyon türü olduğu belirtilmektedir [21].

1.4.4.6. Yapıştırma Tabakası

Yapıştırma tabakası, asfalt emülsiyonunun elle veya makine ile çok ince bir tabakanın püskürtülerek serilmesidir. Bu tabaka, altta bulunan eski tabaka ile yeni serilen asfalt karışım tabakası arasındaki bağlanmayı sağlamak için yapılmaktadır. Yapıştırma tabakası çok ince olmalı ve bütün yüzeyi kaplayacak şekilde dengeli biçimde tatbik edilmelidir. Yapıştırma tabakası için uygulama oranı, püskürtme yapılan yüzeye bağlı olarak 0.25 ile 0.7 lt/m² arasında değişmektedir. Çok fazla yapıştırma tabakası, iki tabaka arasında bir kayma tabakası meydana getirebilecektir; çünkü böyle bir durumda bitüm, bir yağlayıcı olarak davranabilecektir. Yapıştırma tabakasının püskürtülmesini takiben tabakanın üzerine tekrar bir serme işlemi yapılmadan önce, kesilmenin tümüyle tamamlanmasını sağlamak için yeterli zaman bırakılmalıdır. Püskürtme yapılan alan trafiğe kapatılmalıdır. Eğer alanı trafiğe kapatmak mümkün değilse trafiğin yavaş seyretmesi sağlanmalıdır. % 40 ile % 60 bitüm içeriğine sahip yavaş kesilen asfalt emülsiyonları kullanılmaktadır. Gerekli bitüm oranını sağlamak için emülsiyon ya seyreltilmekte veya istenilen bitüm oranında üretilmektedir [21].

1.4.4.7. Yama Karışımları ve Onarımlar

Soğuk emülsiyon karışımları, çukurların veya hasar görmüş alanların yamanması için uygundur. Az miktarda karışım gerekli olduğu zaman, gerekli karışım arazide elle karıştırılarak elde edilebilir. Lokal agregalar genellikle kullanılmakta ve iyi sonuçlar alınmaktadır.

Püskürtme tipi yamama yöntemi ayrıca, çukur onarımı için de kullanılmaktadır. Çukur yüzey seviyesine kadar agrega ile doldurulmakta ve daha sonra agregaya nüfuz edecek asfalt emülsiyonu püskürtülmektedir. Yüzey son olarak ince kum ile örtülmektedir.

Çatlakların doldurulması genellikle, asfalt emülsiyonları kullanılarak yapılmaktadır. Küçük bir çizgi halindeki çatlaklardan 20-30 mm açıklıktaki büyük çatlaklara kadar çeşitli tipte çatlaklar mevcut olup çok çeşitli nedenler çatlak oluşmasına yol açabilmektedir. Çok küçük çatlakların etkin bir şekilde kaplanması oldukça zordur. Büyük çatlaklar, ince kum ile karıştırılmış emülsiyon ile doldurulmaktadır. Ancak, yüzeyden itibaren birkaç mm'lik bir boşluk bırakılır. Bu kısım, karışımın istenen özelliklere gelmesinin ardından saf emülsiyon ile doldurulur. Yüzey, trafik etkisini önlemek için kum ile kaplanmaktadır.

1.4.4.8. Karartma Tabakası

Karartma tabakası, yapıştırma tabakasına benzetilebilir. Bu kaplama tipi, gerek seyreltilerek hazırlanmış ve gerekse imalat çıkışı olarak % 30-40 bitüm içeriğine sahip yavaş kesilen bir emülsiyonun yola tatbik edilerek yapılmasından ibarettir. Püskürtme oranı, genellikle 0.3 ile 0.8 lt/m² arasındadır. Bu miktar bir veya iki seferde serilebilir. Karartma tabakası, oksidasyon, kuruma, çatlak veya yüzey boşlukları gibi sorunları olan eski asfalt yüzeylerini yenilemek için kullanılmaktadır. Emülsiyon kolaylıkla çatlak veya yüzey boşluklarının içine akmakta ve ayrıca yüzeydeki agregaları kaplamaktadır. Bu yöntemin amacı, asfalt yüzeyinin dayanım ömrünü arttırmak ve takviye süresini geciktirmektir. Emülsiyonun püskürtülmesinin ardından yüzeye hafif bir kum serpilerek örtülmesi genellikle tavsiye edilmektedir [21,23].

1.4.4.9. Soğuk Plent Karışım Uygulamaları

Soğuk plent karışımlarında emülsiyon, ısıtılmamış agrega ile karıştırılmaktadır. Çok değişik tiplerde asfalt emülsiyon tipleri bulunduğu için birçok değişik alanda değişik tipteki agregalar kullanılarak soğuk karışım yapmak mümkündür. Bu çalışma kapsamına esas teşkil eden bu asfalt emülsiyonu karışımlar konusu, bundan sonraki bölümde verilen Soğuk Karışımlar bahsinde detaylı olarak ele alınmaktadır.

1.5. Soğuk Karışımlar

Esnek bir kaplama için esas malzeme olan bitümün agrega ile karıştırılması sonucu bitümlü karışımlar elde edilir. Bitüm, esnekliği yanında çevre ve trafik etkilerine karşı gösterdiği performans nedeniyle ideal bir kaplama malzemesidir. Bugün bir çok ülkede kullanılmakta olan sıcak karışımlar, bitümün yeterince akıcı hale getirilebilmesi için 140°C'nin üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılarak aynı sıcaklıklardaki agrega ile karıştırılması sonucu elde edilirler.

Soğuk karışımlar ise, esnek kaplamaların en temel malzemesi olan bitümün akıcı hale getirildiği emülsiyon asfaltı veya katbek asfaltın soğuk halde agrega ile karıştırılması sonucu elde edilirler.

Dünyada bugün asfalt karışımların bir çok çeşidi kullanılmaktadır. Bu karışımlar, yük taşıma kapasitesine, durabilitesine, yüzey yapısına, permabilitesine vb. göre belli gereksinimler doğrultusunda yapılmakta ve geliştirilmektedir [38]. Son yıllarda performans esası üzerinde bir karışım tasarımı yaklaşımını rasyonalize etmek için bir hareketlenme vardır. Bundan kasıt, malzemenin mekanik özelliklerinin tam olarak bilinmesi ve bundan yararlanılarak arzu edilen bir periyotta öngörülen trafik hacmine karşı koyacak bir kaplama tasarımı ortaya koymaktır. Bugünkü uygulamadaki gelişmeler mevcut karışım performansını arttırabilmek yönündedir [18,39,40].

1970'li yılların sonlarında enerji kaynaklarını korumak ve çevre kirliliğini kontrol altına almak için artan baskılar, özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde asfalt emülsiyonlarının potansiyel faydalarından yararlanma çabalarına ön ayak olmuştur.

Ayrıca, uzak bölgelerdeki lojistik avantajları nedeniyle soğuk karışımlar çekici olmuşlardır.

Soğuk karışımlar, ABD de, bir çok Avrupa ülkesinde, İskandinavya'da, Avusturalya ve Yeni Zelanda'da, Güney Afrika ve gelişmekte olan bir çok ülkede sıkça kullanılmaktadır. Bu bölgelerde kullanılan soğuk karışımlar, bir takım kendine özgü koşullarla birlikte üretim ve sermedeki genel prensipler açısından benzerdirler [18].

Avrupa'da geliştirilen ve kullanılmakta olan yöntemler; Grave emülsiyonlar [41-49], the Two Stage Mixing yöntemi [50], the Double Mixing yöntemi [51,52,53] ve the Double Treatment yöntemi [15,54] olup bu yöntemlerde kullanılan malzeme tipleri, karıştırma, serme ve sıkıştırılmalarına ilişkin detaylar ilgili kaynaklarda verilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde ise 1960'lardan beri soğuk karışım kullanılmaktadır. Bazı bölgelerde, ücra yerler (uzaklık) nedeniyle soğuk karışım yol inşaat endüstrisinin gerekli bir parçasıdır. ABD deki soğuk karışım uygulamalarına ilişkin bilgiler, hem ilk uygulanan soğuk karışımların hem de yeniden işlenen soğuk karışımların (cold-mix recycling) üretim ve serilmesindeki hususları tüm yönleriyle açıklayan değişik organizasyonlar tarafından hazırlanmış el kitaplarında mevcuttur [55,56,57,58]. Çalışmamızda da Amerika'da kullanılan [57] "Marshall Method for Emulsified Afalt-Aggregate Cold Mixture Design" yöntemi kullanılmış; bu yöntem detayları bölüm 1.5.5 de açıklanmıştır.

Karıştırma yöntemine göre soğuk karışımlar, plantte karışım (plant-mix) ve yolda karışım (mixed in-place veya road mix) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Plantte karışım (plant-mix) : Bu tür karışımlar, belirli sabit bir plantte karışımın hazırlanarak inşaat sahasına getirilmesi ve geleneksel kaplama ekipmanı ile yola serilmesi ve sıkıştırılması şeklinde elde edilirler.

Yolda karışım (mixed in-place) : Bu tür soğuk karışımlar ise şantiye sahasındaki karıştırma ekipmanında üretim yapılmak suretiyle hazırlanırlar.

1.5.1. Soğuk Karışım Olarak Asfalt Emülsiyonu Karışımların Faydaları

Asfalt emülsiyonu karışımlar, ekonomik, ekolojik ve lojistik açıdan çok önemli avantajlara sahiptirler. Çünkü sıcak karışımlardaki gibi bitümün ve agreganın ısıtılmasına gerek yoktur. Bundan dolayı sıcak karışım için kaçınılmaz olan agrega kurutucularına ve ısıtma sistemlerine gereksinim kalmamaktadır. O nedenle, asfalt emülsiyonu karışımlarda, sıcak karışımların üretimi sırasında ortaya çıkan insan sağlığına ve çevreye zararlı [2] gaz yayılmaları oluşmadığı gibi; agrega ısıtılmadığı için duman ve toz yayılması da oluşmamaktadır. Ayrıca, katbek asfaltlarda olduğu gibi asfalt emülsiyonlarının kıvamını arttırmak için inceltici petrol ürünlerine (çözücü; benzin, gazyağı, yol yağı vb.) de gereksinim yoktur. Kaldı ki; 1 ton asfalt emülsiyonu yerine 1 ton sıvı petrol asfaltı kullanılması halinde 4030 kcal'lik bir enerji kaybı olduğu Fransa'da yapılan bir araştırma [59] sonucu ortaya konulmuştur.

Son zamanlarda İngiltere'de yapılan bir araştırmada, sıcak karışım plantinden yayılan dumanların kabul edilemez olduğu ortaya konulmuştur [60]. İngiltere'de büyük bir taş ocağı şirketi Güney Kıyılarında bulunan ocaklarından birinde sıcak karışım planti kurmayı planlamış, ancak, bölge halkı topladığı bilimsel kanıtlarla bu plana karşı çıkarak taş ocağı şirketini planından geri çekilmeye zorlamış ve başarmıştır [18]. Bölge halkının sağlık konusundaki yaklaşımları hiç şüphesiz gerçekçidir. Bu tür baskılar gelecekte daha da yükselecek; yeni sıcak karışım plantlerinin kurulmasını ve belki de yoğun nüfuslu bölgelere yakın yerlerdeki plantlerin varlığını bile tehdit edecektir. Bu noktada sıcak karışımlar yerine asfalt emülsiyonu karışımlar probleme bir çözüm sunabilecektir.

Asfalt, molekül ağırlıkları farklı hidrokarbonların kompleks bir karışımı olup, yüksek sıcaklıklarda buharlaşan düşük molekül ağırlıklı doymuş hidrokarbonlar ve polisiklik aromatik bileşikler ihtiva etmektedir [61,18]. Sıcak karışımların üretimi, taşınması ve yola serilmesi sırasında asfaltın bu düşük molekül ağırlıklı bileşenlerinden hidrokarbonlar atmosferin kirlenmesine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, özellikle benzo pyrene ve benz antracene olarak bilinen ve aslında bitüm içerisinde düşük konsantrasyondaki bu kimyasalların kuvvetli kanserojen oldukları düşünülmektedir [62]. Bu bileşiklerin, yol çalışanları ve genel olarak insanlar üzerindeki potansiyel zararlı etkilerini belirlemek üzere bir çok çalışma yapılmıştır [63,64,65]. Bunların açığa çıkması,

duman (fumes) formunda ya da uygulama sırasında yalnızca çalışanların derilerine teması şeklinde olabilmektedir. Karışım üretimi ve plenti imal edenler, halen bu dumana yayılmalarını önlemek için sistemler geliştirme gayreti içersindedirler. Bu duman yayılmaları, asfalt emülsiyon karışımları kullanılarak tamamıyla ortadan kaldırılabılır. Çünkü bitüm, sadece emülsiyonlaştırma işlemi sırasında ısıtılmakta, dolayısıyla bu ısıtma sırasında zararlı gazların alınması çok kolay olmaktadır.

Asfalt emülsiyonu karışımların kullanılmasıyla enerji tasarrufu, dolayısıyla ekonomik tasarruf sağlanabilir. Sıcak karışımların üretiminde bağlayıcı 140 derecenin üzerinde ısıtılmasının yanında agrega karışımının da kurutulması ve benzer sıcaklıklarda ısıtılması gerekmektedir. Asfalt emülsiyonu karışımlarda ise sadece emülsiyonlaşma işlemi sırasında bitümün ısıtılması ve emülsiyon değirmeninin işletilmesi için enerji gerekmektedir. Bu işlem bir kez yapılmakta, ondan sonra emülsiyon soğuk kullanılabilen, agrega karışımının da ne kurutulmasına ne de ısıtılmasına gerek kalmamaktadır. Sıcak karışım plentleri daha komplike olduğundan normalde taşınabilir olarak düşünülmemektedir. Bu da, hem malzemelerin hem de imalatın daha uzun bir mesafe taşınmasını gerektirdiğinden sıcak karışımların taşıma maliyetlerinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bir tonluk sıcak karışım imalatı için gereken enerjinin yaklaşık yarısı kullanılarak soğuk karışım elde edildiği bir çok raporda ortaya konulmuştur [4,5,6]. Buna ilaveten, soğuk karışım plenti için yapılan yatırım, daha komplike olan sıcak karışım plentinden çok daha düşüktür [18].

Bazı ülkelerdeki acil bir problem, emülsiyon karışımlar kullanılarak çözülebilmektedir. Eski katranlı yollarda, suyun damıtmasından dolayı çevreye zararlı polisiklik aromatik bileşikler yayılmaktadır [66]. Bununla beraber bu yolların onarımı gerekli olup, çevreye kirlenici yaymayan yöntemler kullanılarak yeniden inşa edilmesi için çalışmalara başlanması gerekmektedir.

Emülsiyon karışımlar, performans açısından da potansiyel iyileştirmeler sunmaktadır. Isıtma işlemi sırasında olabilen [67] ve gevrekleşme ve çatlamaya yol açan oksidasyondan bağlayıcının sertleşmesine kadar olan işlemlerin ve diğer işlemlerin önüne geçilebilir. Latex formundaki polimerlerin sıcak karışımlara katılması mümkün değildir.

soğuk karışıma katılabilmeleri gayet kolay olmaktadır. Fakat bu malzemelerin soğuk karışımlar üzerindeki etkileri henüz tam olarak test edilmiş değildir [18].

Sonuç olarak soğuk karışım, daha uzun mesafelere taşınabilmesi ve kısa mesafeler için yalıtılmış kamyonların kullanımına gerek bırakmaması açısından sıcak karışımlara nazaran lojistik avantajlara sahiptir. Bu yüzden küçük ölçekli tamir işleri için ve ücre bölgelerdeki projeler için çok kullanışlıdır.

1.5.2. Soğuk Karışımlarda Kullanılan Asfalt Tipleri

Soğuk karışımların üretimi ve uygulanması aşamalarında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlardan bir tanesi agreganın yüzey nemliliği olup; bu husus soğuk karışım uygulaması sırasında büyük öneme sahiptir. Asfalt emülsiyonu ile hazırlanan bir soğuk karışımda yüzey nemliliğinin %3 veya daha fazla olması istenir. Bu şekilde oluşturulan karışımların performansı daha yüksek olmaktadır [57]. Katbek asfaltlar ile oluşturulacak soğuk karışımlarda ise yüzey neminin %3'den daha az olması gerekir. Fakat hangi tip karışım olursa olsun aşırı yüzey nemliliği, karıştırma, sıkıştırma ve kür olmada problem oluşturmaktadır. Sadece yavaş kesilen (slow setting) emülsiyonlar ve orta hızda kesilen (medium setting) tipindeki anyonik emülsiyonlar, karışım sırasında nem gerektirirler. Yapılacak soğuk karışım tipine ve kullanılacak agrega granülometrisine göre uygun asfalt tipi seçimi Tablo 3'te verilen ölçütler ışığında yapılır.

Tablo 3'ten de görüleceği gibi soğuk karışımların hazırlanmasında asfalt emülsiyonların orta hızda ve yavaş kesilen tipleri kullanılmaktadır. Aynı durum, katbek asfaltlar için de geçerli olup; bunların da orta hızda ve yavaş kür olan tipleri kullanılmaktadır. Ayrıca, anyonik asfalt emülsiyonlarının HFMS çeşitleri de soğuk karışımlarda kullanılmaktadır. Burada HF harfleri (High Float: Yüksek Yüzme); agrega taneleri üzerinde daha kalın bir bitüm filmi oluşturmak için emülsiyona katılan kimyasalları ifade etmektedir. Diğer mevcut modifikasyonlarla birlikte, bir miktar petrol destilatları içeren anyonik emülsiyonların HFMS tipleri (özellikle HFMS-2s) ve kationiklerin CMS-2 ve CMS-2h tipleri, (karıştırma, serme vb.) ıslak agregaya göre kuru agrega ile çok daha iyi sonuç verirler [57]. Bu verilen bilgilerin yanında, uygun asfalt

tipinin seçiminde; kalıntı asfalt özellikleri, kıvam, kür olma ve/veya kesilme oranı gibi faktörlerin de göz önüne alınması gerekir.

Tablo 3. Soğuk Karışımlarda Kullanılan Asfalt Tipleri

Yapım Tipi	Asfalt Emülsiyonları								Sıvı (katbek) Asfaltlar							
	Anyonik				Katyonik				Orta Hızda Kür Olan (MC)			Yavaş Hızda Kür Olan (SC)				
	MS-2, HFMS-2	MS-2h, HFMS-2h	HFMS-2s	SS-1	SS-1h	CMS-2	CMS-2h	CSS-1	CSS-1h	70	250	800	3000	250	800	3000
Soğuk Serilen Plent-Mix (Plentte Karışım) Temel ve Kaplama																
Açık Granülometreli Agrega	X	X				X	X									
İyi Granülometreli Agrega			X	X	X			X	X		X	X	X	X	X	X
Yama, Yerinde Hazır Kul.				X	X			X	X		X	X			X	
Yama, Stoktan											X	X		X	X	
Mixed-in-Place (Yolda Karışım) Temel ve Kaplama																
Açık Granülometreli Agrega	X	X				X	X					X	X		X	X
İyi Granülometreli Agrega			X	X	X			X	X		X	X		X	X	
Kum			X	X	X			X	X	X	X	X				
Kumlu Zemin			X	X	X			X	X		X	X				
Yama, Yerinde Hazır Kul.			X	X	X			X	X		X	X			X	
Yeniden İşlenen Soğuk Karışım (Soğuk Geri Dönüşüm)																
Tüm Karışımlar	X	X		X	X	X	X	X	X							

1.5.3. Soğuk Karışımlarda Tipik Asfalt Sıcaklıkları

Soğuk karışımlarda, agrega ısıtılmadığı için agrega sıcaklığı hava koşullarıyla sınırlıdır. Uygulama sırasında, asfalt çabucak agrega sıcaklığına ulaşır; çok soğuk agrega, asfaltla karışması sırasında karışım sıcaklığını da düşürecektir. Eğer hava çok aşırı derecede soğuk ise, karışım hazırlamak oldukça zorlaşır. Bu sebeple, çevre sıcaklığının 10°C'nin altında olduğu koşullarda soğuk karışım tatbikatı yapılmamalıdır. Ayrıca, soğuk ve nemli havalarda, katbek asfaltlardaki uçucuların uzaklaşması için ekstra bir işlem gerekebilir.

Soğuk karışımların hazırlanmasında kullanılan asfalt tipine göre, karıştırmadan önceki ve karıştırma sırasındaki asfalt sıcaklıkları Tablo 4'te verilmiştir [57].

Katbek asfaltlı soğuk karışımlarda, uygulama sıcaklığı, bazı durumlarda, malzemenin parlama noktasının üzerine çıkabilir. Bu durumda, bir patlama ve yangın olmasını önlemek için tedbir olarak deneme yapılmalıdır. Ayrıca, karıştırmadan önceki katbek asfaltın maksimum sıcaklığı, buğulanma (fogging) noktasının altında olmalıdır.

Tablo 4. Soğuk Karışım Uygulamasında Tipik Asfalt Sıcaklıkları

Tip ve Derecesi	Karıştırma Boyunca Asfalt Sıcaklığı	Karıştırmadan Önceki Asfalt Sıcaklığı
<u>Asfalt Emülsiyonları</u>		
Anyonik MS-1, MS-2, MS-2h SS-1, SS-1h HFMS-2, HFMS-2h, HFMS-2s	10-70°C (50-160°F)	20-70°C (70-160°F)
Katyonik CMS-2, CMS-2h CSS-1, CSS-1h	10-70°C (50-160°F)	20-70°C (70-160°F)
<u>Katbek Asfaltlar</u>		
MC, SC Asfaltlar		
70	----	20°C ⁺ (65°F ⁺)
250	55-80°C (135-185°F)	40°C ⁺ (105°F ⁺)
800	75-100°C (165-210°F)	55°C ⁺ (135°F ⁺)
3000	80-115°C (175-240°F)	----

1.5.4. Soğuk Karışımlar Yönünden Agregası

Agregası malzemesinin çok geniş bir kombinasyonu; iyi derecelenmiş kırmataşdan siltli kuma kadar (kırmataş, taş, çakıl, kum, kumlu çakıl, cüruf vb) bir çok çeşidi asfalt emülsiyonları veya katbek asfaltlarla soğuk olarak karıştırılabilmektedir.

Agregası granülometrisi, sıcak karışımlarda olduğu gibi soğuk karışımlarda da karışımın özellikleri üzerinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Soğuk karışımlarda, bünyede bulunan suyun drene olabilmesi için karışım boşluklu yapılmakta; bu ise karışım performansının düşmesine neden olmaktadır. ILICALI ve arkadaşları [68], soğuk karışımlarda agregası granülometrisinin optimum bitüm içeriğine etkisi üzerine yaptıkları bir çalışmada, Marshall sonuçlarına göre ince gradasyona sahip agregası karışımının daha kaba olanlara nazaran bitüm ve su içeriği oranı artarken, stabilite değerinin düştüğünü belirtmişlerdir.

Agregası özellikleri, agregayı oluşturan parçacıkların ve bu parçacıkları çevreleyen maddenin bir fonksiyonu olarak değişiklik gösterirler. Minerallerin kimyasal bileşimleri ve ayrışma durumları bilinmelidir. Agregalar, çok farklı ve değişik özellikte olabilir. Bu yüzden karmaşık bir yapılanma gösterirler. Yol agregalarının yüksek nitelikli özelliklere sahip olması ve özellikle kaplama tabakasında cilalanmaya karşı dirençli olması gerekir.

Agregası yüzeyindeki ince partikül maddenin varlığı, sarılma (kaplanma) sürecine olumsuz yönde tesir eder. Bu nedenle, tamamlanmamış kaplanma süreci ile zayıf bağlanma ortaya çıkmaktadır. Bu durum soyulma şeklinde problem oluşturur.

Agregasının mineralojik bileşimi, adezyon mekanizması üzerinde birinci derecede etkilidir. Agregalar da diğer maddeler gibi, yüzey gerilimi ya da yüzey enerjisinden kaynaklanan dengesiz yüzey yüküne sahiptir. Bu mineral yüzeyler, karşıt polaritede bir sıvıyla kaplandığı zaman enerjilerini vererek adezif bağ teşkil ederler. En fazla enerjiyi boşaltan agregası daha fazla kuvvetli bir bağ oluşturur.

Agregalar, genel olarak hidrofobik (su sevmeyen) ve hidrofilik (su seven) olarak iki kısımda incelenmekte; hidrofobik agregalarının sudan çok bitümlü malzemeye karşı bir

çekim içerisinde iken, hidrofilik agregaların suya karşı daha büyük bir yatkınlık içerisinde olduğu; asidik tip agregaların hidrofilik, bazik tip agregaların hidrofobik olarak bilindiği ve bazik kayaların, genellikle asidik kayalardan daha fazla adezyon oluşturduğu belirtilmektedir [69,70].

Diğer yandan agregalar, alkalın tipleri kireçtaşı ve mermer, asidik tipleri granit ve kuvarsit olmak üzere alkalın ve asidik diye de sınıflandırılmaktadır. Özellikle asfalt emülsiyonu karışımlar açısından bu sınıflandırma çok daha büyük bir öneme sahiptir. Bilindiği gibi asfalt emülsiyonları, emülsiyon küreciklerini kaplayan emülgatör tipine (pozitif veya negatif yüklü) göre anyonik veya katyonik olarak sınıflandırılırlar. Emülsiyonlardaki bu çeşitlilik, kullanılacak agrega malzemesinin niteliği dikkate alınarak bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Herhangi bir agreganın yapışma özellikleri konusundaki önemli bir faktör agreganın silika (SiO_2) içeriğidir. Sık karşılaşılan bazı agregaların silika içerikleri Tablo 5'te verilmiş; diyagram olarak da Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu diyagram sayesinde agrega yüzeyindeki pozitif ve negatif yükler hakkında kabaca bir bilgi sahibi olunabilir. Ayrıca, düşük silika içeren agregaların bitüme daha iyi yapışma özelliği verdiği yönünde yaygın bir kanı vardır. Bu durum bitümün naftanik içermesi ile açıklanabilir. Naftanik asitlerde bir karboksilik asit grubu $-\text{COOH}$ ve yapı olarak bitüme benzeyen bir hidrokarbon parçası bulunmaktadır. Böyle bir molekül, alkalın agregası ile temasa geçtiğinde karboksilik asit elemanı, hidrokarbon elemanı dışarıya yönelecek şekilde yüzey üzerine absorbe edilecektir. Bu durum, bağlayıcının ortamda su bulunması durumunda dahi agregaya yapışmasını mümkün kılacak şekilde agrega yüzeyini değiştirecektir [71].

Asidik agregalar, genellikle yüzeyleri negatif yüklü ve yüksek oranda silika içerirler. Bazik agregalar ise, yüzeyleri pozitif yüklü olup karbonat içerirler. Agregadaki asidik bileşik (SiO_2 ve CO_2) oranının bazik bileşime (Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) oranının agreganın hidrofilik doğasının bir ölçüsü olduğu belirtilmektedir. Asidik veya hidrofilik kayalarda asidik bileşim oranı %50'den fazladır. Herhangi bir agreganın bitüme yapışma özellikleri konusundaki önemli bir faktörü agreganın silika (SiO_2) içeriği oluşturmaktadır. Yüksek silika içeren agregaların hidrofilik eğilimde olduğu ve daha kolay

soyulduğu, düşük silika içeren veya hiç içermeyen agregaların ise hiç soyulmadığı ve hidrofobik nitelikte olduğu kabul edilmektedir [72-77].

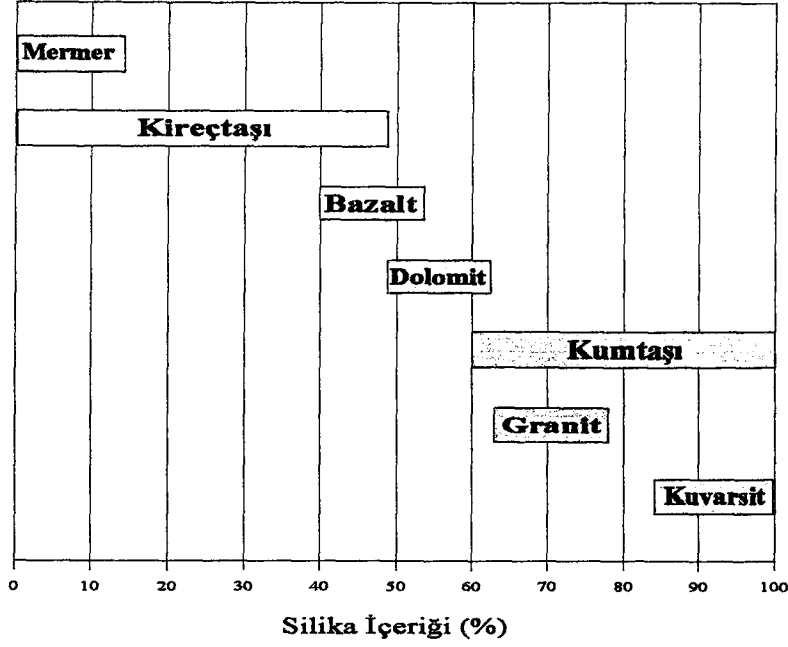
Tablo 5. Değişik Agregat Türlerinde Silika İçeriği Yüzdesi

Kayaç Türü	SiO ₂ İçeriği (%)
Mermer	0-14
Kireçtaşı	0-49
Bazalt	40-53
Diyorit	49-63
Kumtaşı	60-100
Granit	65-78
Kuarsit	86-100

Yol inşasında kullanılan bir çok agreganın yüzeyinde negatif yüklerin çoğunlukta olması nedeniyle katyonik emülsiyonların kullanılması anyoniklerden daha elverişlidir. Katyonik asfalt emülsiyonları her tür agregat ile daha iyi adezyon temin ederler.

Yüksek pH değerinde tüm agregalar, negatif yüklenme eğiliminde olmalarına rağmen, daha asidik agregalar, daha geniş bir pH dağılımına sahip su içerisinde, alkaline agregalara nazaran daha fazla negatif yüklü yüzeyler geliştirirler. Agregalar nadiren saf bir mineral içerirler ve saf bir mineral bile hem alkaline hem de asidik bileşimlere sahip olabilir. Şekil 10'da verilen diyagramdan görüleceği gibi, eğer agregalar silika içeriğine göre düzenlenirse, o zaman en yüksek silika içeriğine sahip olan agregalar, su içerisinde negatif yüklü bir yüzey oluşumu için güçlü bir eğilim göstermekle birlikte en asidik olanlardır [21,78].

Bir çok agregat kil parçacıkları da içerebilir; bunlar çok küçük miktarlarda olsa bile kesilme hızını yükseltecektir.



Şekil 10. Agregat türlerine göre silika içeriği yüzdesi

1.6. Karışım Tasarımında İzlenen Yöntem Ve Karışım Performansının Belirlenmesinde Uygulanan Deney Yöntemleri

Asfalt emülsiyonu karışımlarda tasarım yöntemi olarak tüm dünya ülkelerince kabul edilmiş genel bir yöntem yoktur. Ancak, genellikle ya Marshall [79] veya Hveem [80] yöntemleri ya da bunların modifiye edilmiş versiyonları kullanılmaktadır.

1.6.1. Asfalt Emülsiyonu Karışımlar İçin Marshall Tasarımı

Bu araştırmada, soğuk karışım tasarımında bağlayıcı olarak asfalt emülsiyonu kullanıldığından, soğuk karışım tasarımında izlenen yöntem olarak Asphalt Institute [57] tarafından sunulan Asfalt Emülsiyonu-Agregat Soğuk Karışım Tasarımı İçin Marshall Yöntemi (Marshall Method for Emulsified Asphalt-Aggregate Cold Mixture Design) kullanılmıştır.

Bu tasarım yönteminin ana hatları aşağıdaki gibi verilebilir:

- Agregat kalite deneyleri
- Asfalt emülsiyonu kalite deneyleri

- Asfalt emülsiyon tipi ve yaklaşık miktarı
- Karıştırma ve sıkıştırmadaki su içeriği
- Kalıntı asfalt (esas bağlayıcı) içeriğinin değişimi
- Optimum asfalt içeriğinin seçimi. Optimum asfalt içeriği; kaplama karışımının tüm tasarım ölçütlerini en tatmin edici şekilde sağlayan emülsifiye asfalt yüzdesi (oranı) olarak seçilir.

Granüler malzemenin ekonomik olarak stabil hale getirilmesi, uygun miktarda kalıntı asfalt kullanılarak sağlanmalıdır. Bunun amacı; aşırı kalıcı deformasyon veya yorulma çatlakları oluşmayacak şekilde, tekrarlı yük uygulamalarına karşı koyarak gerekli dayanımı veya stabiliteyi sağlamak ve neme karşı yeterince duyarsız karışım elde etmektir.

1.6.1.1. Asfalt Emülsiyonu Seçimi

Belirli bir proje dahilinde kullanılacak asfalt emülsiyonunun türü ve derecesinin seçimi, emülsiyonun kullanılacak agregayı yeterli derecede kaplama yeteneği dikkate alınarak yapılır. Bu seçime etki eden bazı faktörler şunlardır:

- Agreganın tipi
- Agreganın granülometrisi ve ince agrega özellikleri
- Agreganın su içeriği
- Yapım alanındaki mevcut su

Çoğu kez mevcut agrega için birden fazla asfalt emülsiyonu tipi kabul edilebilir; asfalt tipi seçimi karışım tasarımları arasında yapılan karşılaştırma sonucu belirlenen karışım özelliklerine dayanmalıdır. Karışım tasarımı sırasında ilave faktörler değerlendirilemez, fakat yapım sırasında değerlendirilmesi gereken bazı faktörler şunlardır:

- Yapım sırasında beklenen hava koşulları
- Karıştırma yönteminin tipi
- Yapım ekipmanının seçimi ve sahada kullanılan yöntem

1.6.1.2. Asfalt Emülsiyon Miktarının Yaklaşık Tespiti

Yoğun granülometrilili agrega ile hazırlanacak deneme karışımlar için asfalt emülsiyon miktarı Merkezkaç Gazyağı Eşdeğerlilik Testi (C.K.E.) yapılarak tahmini olarak belirlenir. Eğer C.K.E. deney ekipmanı mevcut değilse bu durumda asfalt emülsiyonu miktarı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$P = (0.05A+0.1B+0.1C)x(0.7) \quad (1)$$

Burada;

- P : Kuru agrega ağırlığına göre asfalt emülsiyonu (%)
A : 2.36 mm (No.8) elek üzerinde kalan agrega (%)
B : 2.36 mm (No.8) elekten geçip 0.075 mm (No.200) elek üzerinde kalan agrega (%)
C : 0.075 mm (No.200) elekten geçen agrega (%)

1.6.1.3. Sarılma Deneyi

Karışım tasarımında kullanılacak asfalt emülsiyonu seçiminin değerlendirilmesinde öncelikli olarak sarılma testi yapılır. Formülle belirlenen bitüm içeriğinde agregayla bir karışım yapılır, agregaya sarılma toplam agrega yüzey alanının bir yüzdesi olarak tahmin edilir. Asfalt emülsiyonun agregaya sarılma yeteneği, agrega yüzeyindeki ön ıslaklık derecesine bağlı olarak etkilenmektedir. Bu durum agrega granülometrisinde 200 nolu elekten geçen malzeme yüzdesi fazla olduğu zaman daha belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Yani böyle bir durumda yetersiz ön karışım suyu, asfaltın topaklaşmasına ve yetersiz bir sarılmaya neden olmaktadır. Bunun için sarılma deneyi değişik su içeriklerinde yapılır. Sarılma deneyinde istenilen sonucu sağlayamayan asfalt emülsiyonu değerlendirmeye alınmaz. Sarılma deneyi için işlem sırasına ilişkin detaylar aşağıdaki gibidir:

1. Proje için düşünülen asfalt emülsiyon örnekleri hazırlanır.
2. Sınıflandırılmış agrega malzemesini temsil eden örnekler hazırlanır.

3. Agrega 25.0 mm (1 inch), 19.0 mm (¾ inch), 12.5 mm (½ inch), 9.5 mm (3/8 inch), 4.75 mm (No:4) elek sınıflarına ayrılabilir kadar doğal hava şartlarında kurutulmalıdır. 4.75 mm (No:4) elekten geçen sınıf rahatça elenebilecek duruma gelene kadar kurutulmalıdır. Yalnız, kurutma sıcaklığı 60 °C den fazla olmamalıdır yani partiküllerin çatlamasına sebebiyet verilmemelidir. Isıtma esnasında agrega, kabuklanmayı veya katı topak oluşumunu engellemek için düzenli olarak karıştırılmalıdır.
4. Doğal hava koşullarındaki malzemenin nem oranı şartnameye uygun olarak belirlenir.
5. Doğal hava koşullarındaki sınıflandırılmış agregalardan yeterli sayıda deney karışım grupları hazırlanmalı. Bu grupların ağırlığı yaklaşık 1200 gr olmalıdır. Bu gruplar tüm kütleyi temsil eden granülometriye benzer olarak 25.0 mm (1 inch), 19.0 mm (¾ inch), 12.5 mm (½ inch), 9.5 mm (3/8 inch), ve 4.75 mm (No:4) elekten geçen malzemeden hazırlanmalıdır.
6. Agrega karışım gruplarından biri mekanik karıştırıcının kabına koyulur. Doğal nem yüzdesinden fazla, kuru agrega ağırlığına oranla belirlenen nem yüzdesi için gerekli su ilave edilir. Su ince bir akım ile ilave edilmeli ve su tamamıyla karışımaya kadar karıştırma devam edilmelidir (yaklaşık 60 saniye). Bu başlangıç suyu seçimi aşağıdaki ölçütler dikkate alınarak belirlenmelidir.
 - Orta hızda kesilen olan (HFMS, CMS ve diğer çözücü içerenler) asfalt emülsiyonlarıyla yapılan deneme karışımlarda, başlangıçta hiç su ilave edilmeksizin karışım hazırlanabilir (örneğin doğal nem koşullarında).
 - Yavaş kesilen (SS ve CSS) asfalt emülsiyonları, uygun karışım oluşturmak için çoğu zaman yüksek su içeriği gerektirdiğinden sarılma testine yaklaşık % 3 ilave su ile başlanır. Kil içeren agregalar, asfalt emülsiyonu ilave edilmeden önce bir kaba konulup ağzı kapatılarak minimum 15 saat bekletilir.
7. Daha önce belirtildiği şekilde hesaplanan asfalt emülsiyonu miktarı mevcut karışıma ilave edilir. Asfaltın ince agrega ile topaklaşma eğilimini minimize etmek

için emülsiyon, agregaya ince bir akım ile ilave edilmelidir. Mekanik karıştırıcıda bir dakika karıştırma süresi genellikle tatmin edicidir. Ancak; asfalt–filler karışımının, kaba agregadan ayrışımı gözleniyor ise, karıştırma 30 saniyeye düşürülmelidir. Eğer karışım elle yapılıyorsa, asfaltın tam ve etkili bir şekilde yayılması sağlanmalıdır.

8. İlave (ön karışım) su yüzdesi; agregadaki nem miktarı ve 4. adımda belirtildiği şekilde ek su miktarı dikkate alınarak hesaplanır.

Örneğin;

Normal hava şartlarında agreganın nem oranı = % 0.5

Asfalt emülsiyonu ilave edilmeden önce eklenen su yüzdesi = % 3

Asfalt emülsiyonu ile karıştırılmadan önce toplam ön karışım suyu = %3.5

9. Hazırlanan karışım bir elektrikli fan ile havada kurumaya bırakılır. Kuru agrega ağırlığına oranla % 1'lik ilave su artışları ile (6). (7). (8). adımlar tekrarlanarak yeni numuneler hazırlanır. Çok sulu olan veya durduğu yerde segregasyona uğrayan karışımlar kabul edilemez. Buna karar vermek için 10. maddede belirtilen şekilde hareket edilir.

10. Asfaltla sarılmış toplam agrega yüzey görünümü bakılarak incelenir. Karışıma ilave edilen her bir ön karışım suyu için agrega yüzeyinin ne kadar sarıldığı tahmin edilir. Toplam agrega yüzeyinin % 50'den fazlasının asfaltla sarıldığı durum kabul edilir. (Kabul etmek gerekir ki; sıcak karışımlardaki gibi yüzde yüz sarılma arzu edilir. Fakat, bu gerekli değildir. Yüzde yüz sarılmayı sağlayacak asfalt miktarı, haddinden fazla asfalt içeriğine neden olabilir). Herhangi bir su içeriğinde % 50 sarılma sağlanamaz ise emülsiyon kullanılmaz. Eğer sarılma sınırdan görülüyorsa karışım, tüm karışım tasarım yöntemi dahilinde değerlendirilir.

11. Orta hızda kesilen (HFMS, CMS ve diğer çözücü içeren) asfalt emülsiyonları için asfalt emülsiyonunun optimum yayılmasını sağlayacak gerekli ön karışım suyu kullanılır. Bazı durumlarda aşırı ön karışım suyu asfaltın agregadan soyulmasına sebebiyet verebilir. Bu olay oluşur ise, sadece %50 sarılmayı sağlayacak kadar su kullanılmalıdır. Sonradan yapılan tüm karışımlar, soyulma olmaksızın maksimum

sarılmayı sağlayacak su içeriğinde yapılmalıdır. (Bazı agrega ve asfalt emülsiyonları karışımdaki su içeriğindeki değişimden önemli bir şekilde etkilenmezler. Böyle durumlarda karışımın sıkıştırma için belirlenen optimum veya daha fazla su içeriğinde yapılmasına izin verilebilir).

12. Yavaş kesilen (SS ve CSS) asfalt emülsiyonu karışımlarda ön karışım suyu artırıldığında daha yüksek sarılma sağlanır. Belirli bir noktada asfaltın optimum yayılması için yeterli su mevcuttur. İlave artımlar sarılmayı iyileştirmez. Bu durum karıştırma için gerekli ön karışım suyunun yeterli olduğunu işaret eder. Tüm karışım tasarımı için bu ön karışım suyu içeriği esas alınır.

1.6.1.4. Sıkıştırmadaki Optimum Su İçeriğinin Tespiti

Karışımın özellikleri sıkıştırılan numunenin yoğunluğu ile yakından ilgilidir. Bu yüzden, arzu edilen karışım özelliklerinin maksimize edilebilmesi için sıkıştırmadaki su miktarının optimize edilmesi gerekir. Öngörülen bir proje kapsamında düşünülen her tip ve derecedeki asfalt emülsiyonu ve agrega tipi için bu yapılmalıdır.

Karışımın tasarım yöntemi, sıkıştırılmış karışımın özelliklerinin değerlendirilmesinde standart Marshall numunelerinden yararlanır. Elverişli ve kabul edilebilir sonuçlar elde etmek için sıkıştırmadaki her su içeriği için üçer adet numune (briket) hazırlanır.

Deney numunelerinin hazırlanması ve optimum su içeriğinin belirlenmesinde takip edilen işlem basamakları aşağıdaki gibidir:

1. Numune sayısı. Sıkıştırmanın değerlendirilmesi için her bir sıkıştırma su içeriği için üçer numune hazırlanır. Genellikle sıkıştırmadaki stabilite (yoğunluk) – su içeriği eğrisini (grafığını) belirlemek için su içeriğinin yüzdelik diliminde üç artış yeterlidir.

2. Marshall numune kalıbı ve sıkıştırma aletlerinin hazırlanması. Numune kalıbı ve sıkıştırma aletinin (tokmağının) yüzeyi titizlikle temizlenmelidir. Karışım kalıba dökülmeden önce kalıbın alt yüzeyine mumlu kağıt yerleştirilmelidir.
3. Agreganın hazırlanması. Her bir numune için yaklaşık 1.2 kg agrega karışımı belirlenen agrega sınıflarından oluşturulur. Karışım yapılmadan önce agrega karışımı 22.2 ± 1.7 °C sıcaklıktaki iyi havalandırılan fırında muhafaza edilir.
4. Hesaplamalar. Sıkıştırmadaki agrega miktarı, asfalt emülsiyonu miktarı, ilave ön karışım suyu ve sıkıştırma yapılmadan önce kurutulması gereken su miktarı aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır.

a) Havada kurutulmuş agrega miktarı (gr):

$$Ag = \frac{a}{100 - b} \times 100 \quad (2)$$

b) Asfalt emülsiyonu miktarı (gr):

$$Em = \frac{a \times c}{d} \quad (3)$$

c) İlave ön karışım suyu (gr):

$$KS = \frac{a}{100} \times \left(f - b - \frac{e \times c}{d} \right) \quad (4)$$

d) Sıkıştırmadan önce uzaklaştırılması (kurtulması) gereken su (gr):

$$US = a \times \left(\frac{f - g}{100} \right) \quad (5)$$

Burada;

- a : Kuru agrega ağırlığı (gr)
- b : Havada kurutulmuş agreganın su içeriği (%)
- c : Kuru agrega ağırlığının yüzdesi olarak bitüm içeriği (%)
- d : Emülsiyondaki asfalt yüzdesi
- e : Emülsiyondaki su yüzdesi
- f : Kuru agrega ağırlığına göre karıştırma anındaki su miktarı (%)
- g : Kuru agrega ağırlığına göre sıkıştırma anındaki su miktarı (%)

5. Ön karışım suyunun karışıma ilave edilmesi. Doğal nem yüzdesindeki agrega mekanik karıştırıcıya konulur. Sarılma testinden elde edilen optimum ön karışım suyuna ilave edilecek toplam serbest su miktarı hesaplanır. Derecelendirilmiş kap vasıtasıyla ilave edilecek su miktarı ölçülür. Suyun sıcaklığı 22.2 ± 1.7 °C'de olmalıdır. Su yavaş bir akım ile agrega karışımına ilave edilir ve karıştırma işlemi 1 ± 0.5 dakika kadar ya da suyun tüm agregaya tamamen dağılması sağlanıncaya kadar devam edilir. Kil içeren agrega en az 15 saat kapalı bir kapta bekletilir. Asfalt emülsiyonun olduğu kap içindeki ile tartılır ve kaydedilir. Karışım esnasında nemli agregaya ince bir akıntı ile asfalt emülsiyonu ilave edilir. Bu işleme gerekli asfalt emülsiyonu katılana kadar devam edilir. Bir dakika karıştırma süresi mekanik karıştırıcılar için yeterli olabilir. Aşırı karıştırma asfaltın agregadan soyulmasına sebep olabilir ve bundan kaçınılmalıdır.
6. Maksimum yoğunluk elde etmek için karışımdaki su içeriği havalandırma ile azaltılmalı. Eğer sıkıştırmada istenilen su içeriği karıştırmadaki etkili su içeriğinden farklı (az) ise havalandırma gereklidir (kurutma için). Bu kurutma işlemi bir fan yardımı ile yapılabilir. Hesaplanan gerekli su kaybı tamamlanıncaya kadar her 10 ± 0.5 dakikada karışım tartılarak harekete devam edilir. Böylece karışım sıkıştırmaya hazırdır. Burada bir hususun bilinmesinde yarar vardır; eğer agreganın sarılması, sarılma testinde belirlendiği gibi karıştırma sırasında ilave bir suya ihtiyaç göstermiyorsa, agrega istenilen sıkıştırma suyu içeriğinde karıştırılabilir, emülsiyon ilave edilir ve karışım derhal sıkıştırılabilir.
7. Numunenin sıkıştırılması. Modifiye Marshall deneyine tabi tutulacak numuneler için standart Marshall kalıpları kullanılır. Kalıbın alt kısmına mumlu kağıt yerleştirilir ve karışım kalıba konulur. Belli aralıklarda küçük bir spatula ile kenarlara 15 ve iç kenarlara 10 darbe vurularak yerleştirme yapılır. Karışımın segregasyona uğramamasına dikkat edilir. En üste de bir mumlu kağıt konur. Sonra kalıp tokmaktama aletine yerleştirilir. 50 darbe vurulur. Daha sonra kalıp ters çevrilir ve 50 darbe daha uygulanır. Sıkıştırılan numunenin alt ve üstündeki kağıtlar alınır.

8. Numunelerin kür edilmesi. Sıkıştırılmış numuneler kalıpla beraber oda sıcaklığında kalıbın her iki tarafı da havalandırılacak şekilde 1 gün küre bırakılır. Kalıptan çıkarılan numunelerin hacim özgül ağırlıkları belirlenir.
9. Sıkıştırmadaki akışkanlar ile kuru yoğunluk arasındaki ilişkiyi gösteren bir çizim yapılır. En yüksek yoğunluğu veren akışkan içeriği sıkıştırma için optimumdur.

1.6.1.5. Karışımındaki Kalıntı Asfalt İçeriği Değişimi

Belirli bir agregaya ve asfalt emülsiyonu kombinasyonu için optimum asfalt kalıntısı (emülsiyon içerisindeki esas bağlayıcı asfalt) içeriğinin hesaplanmasında önceden karıştırma ve sıkıştırma için belirlenmiş optimum su içeriği kullanılır.

Optimum bitüm içeriğini belirlemek için Formül (1)'e göre yaklaşık olarak belirlenen kalıntı asfalt içeriği değerinin altında ve üstünde %1'lik artışlarla değişik bitüm içeriklerinde Marshall numuneleri hazırlanır. Her bir asfalt içeriği için 6 numune hazırlanır. Deney numunelerinin hazırlanışı optimum su içeriğinin tespitinde anlatıldığı gibi yapılır, buna ilaveten, kalıptan çıkarılan numuneler 38⁰C deki etüvde bir gün daha küre bırakılır. Değişik bitüm içeriğindeki numuneler hazırlanırken dikkat edilmesi gereken bir husus şudur; kalıntı asfalt miktarının arttırmak için karışımda kullanılacak emülsiyon miktarının arttırılması gerekmektedir. Bu da aynı zamanda karışım bünyesine emülsiyon sayesinde daha fazla su girmesi anlamına gelir. Bu yüzden, emülsiyondan gelen su, hesap edilerek karışıma ilave edilen ön karışım suyunun aynı oranda azaltılması gerekir.

1.6.1.6. Yoğunluk-Boşluk Analizleri

Marshall stabilite testlerinden önce kür edilmiş numunelerin özgül ağırlıklarının belirlenmesi ve yoğunluk-boşluk analizlerinin yapılması amacıyla havada ve sudaki ağırlıkları belirlenir. Ayrıca ölçülmüş stabilite değerlerinin düzeltilmesi için numune yükseklikleri ölçülerek kaydedilir.

Stabilite ve akma değerleri belirlenmek üzere numuneler, Marshall deneyine tabi tutularak sonuçlar kaydedilir. Kırılmış numuneler parçalanarak kayıpsız olarak darası belli geniş kaplar içinde 93 ± 6 °C deki etüve konulur. 24 saat sonra etüvden çıkarılan numuneler tartılır ve kuru ağırlıkları kaydedilir. Bu tartım ve tespitlerden sonra numunelere ilişkin yoğunluk ve boşluk analizleri aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır.

$$G = \frac{A}{B - C} \quad (6)$$

$$G_k = G \times \frac{(100 + D)}{(100 + D + K)} \quad (7)$$

$$K = \frac{A - L}{L} \times (100 + D) \quad (8)$$

$$VMA = \left[\left(\frac{100 + D + K}{G} - \frac{100}{G_{sa}} \right) \div \left(\frac{100 + D + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad (9)$$

$$V_t = \left[\left(\frac{100 + D + K}{G} - \frac{100}{G_{sa}} - \frac{D}{G_b} \right) \div \left(\frac{100 + D + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad (10)$$

$$V_h = V_t - \left[\left(\frac{K \times 100}{G_s} \right) \div \left(\frac{100 + D + K}{G} \right) \right] \quad (11)$$

Burada;

- G : Numunenin hacim özgül ağırlığı
- A : Numunenin havadaki ağırlığı
- B : Numunenin doygun yüzey kuru ağırlığı
- C : Numunenin sudaki ağırlığı
- G_k : Numunenin kuru hacim ağırlığı
- D : Kuru agrega ağırlığına göre kalıntı asfalt yüzdesi
- K : Deney sırasında numunedeki nem yüzdesi

- L : Numunenin tamamen kuru ağırlığı
 VMA : Agregalar arası boşluk yüzdesi
 G_{sa} : Agregalar karışımının zahiri özgül ağırlığı
 V_t : Numunedeki toplam boşluk yüzdesi
 G_b : Asfaltın özgül ağırlığı
 V_h : Numunedeki hava boşlukları yüzdesi
 G_s : Suyun özgül ağırlığı

1.6.1.7. Optimum Asfalt İçeriğinin Belirlenmesi

Marshall deneyine tabi tutulan numunelerin kuru ve ıslak stabilite değerleriyle birlikte yoğunluk, boşluk ve nem içeriğine ilişkin veriler hazırlanır. Karışımın, ıslak mevsim koşulları sırasında trafik yüklerine karşı yeterli direnci gösterebilmesi için ıslak koşulda denendiği zaman yeterli bir stabilite sağlaması gerekir. Bariz şekilde hatalı olduğu gözlenen sonuçlar değerlendirmeye alınmadan gerekli ortalamalar alınır. Aşağıda verilen grafik çizimleri yapılır.

- 1) Kalıntı asfalt içeriği-kuru ve ıslak stabilite grafiği.
- 2) Kalıntı asfalt içeriği-stabilite kaybı yüzdesi ((kuru stabilite-ıslak stabilite)x 100/kuru stabilite) grafiği.
- 3) Kalıntı asfalt içeriği-kuru yoğunluk (neme göre düzeltilmiş) grafiği.
- 4) Kalıntı asfalt içeriği-absorbe olan nem yüzdesi grafiği.
- 5) Kalıntı asfalt içeriği-toplam boşluk yüzdesi (hava artı nem) grafiği.

Optimum kalıntı asfalt içeriği, yukarıda sözü edilen grafikler ışığında yapılan değerlendirme sonucunda belirlenir. Islak stabilite grafiğinde maksimum değeri sağlayan asfalt içeriği optimum asfalt içeriği olarak seçilir, fakat, bu optimum asfalt içeriği düzeyine bağlı olarak yukarı ya da aşağı ayarlanır. Eğer ıslak stabilitenin pik (maksimum) değerindeki kalıntı asfalt içeriği, nem absorpsiyonu, kayıp stabilite yüzdesi, toplam boşluk ve agregalar sarılma için yeterli ise optimum asfalt içeriği olarak seçilir. Eğer bu değer Tablo 6'da verilen tasarım ölçütlerini sağlamıyorsa karışım yetersizdir ve kabul edilmez.

Tablo 6. Asfalt emülsiyonu karışımlarda tasarım ölçütleri

Deney	Minimum	Maksimum
Stabilite, kg, 22.2 ⁰ C	222.4	---
Stabilite kaybı, %, (suya daldırma ve vakumdan sonra)	---	50

Eğer kalıntı asfalt içeriği ile ıslak stabilite ya da diğer özellikler arasında bir pik nokta oluşmuyorsa, Marshall stabilitesi, kayıp stabilite yüzdesi ve kuru yoğunlukla birlikte özellikle suyun numuneler üzerindeki etkileri dikkate alınarak optimum asfalt içeriği belirlenme yoluna gidilmelidir.

1.6.2. Esneklik Modülü İçin Dolaylı Çekme Deneyi

Elastik malzemelerde modül (elastik ya da Young modülü), gerilmenin deformasyona oranı olarak tanımlanır. Burada, deformasyon yükleme zamanının bir fonksiyonu değildir. Bununla birlikte viskoelastik malzemeler test edildiğinde, aynı bağlantı kullanılır, fakat kısa yükleme zamanı, uzun yükleme zamanına göre daha yüksek bir modül değeri verdiği için deneyin yükleme süresi tanımlanmalıdır. Asfalt karışımlar viskoelastik malzemeler olması nedeniyle böyle karışımların gerilme-şekil değiştirme karakteristikleri, yani tanımlanan modülleri zaman bağımlıdır. Zamana bağlı olan modül değeri elastisite modülü olarak tanımlanıp, eğer yükleme zamanı kısa ise esneklik modülü olarak adlandırılır [81-84].

Literatür incelemesi, esneklik modülünün, asfalt karışımların karakterize edilmesinde kullanılan idealize edilmiş en yaygın modül olduğunu göstermektedir. Esneklik modülü, kısa bir zaman aralığında dinamik bir yükleme yapıldığında uygulanan gerilmenin geri dönen şekil değiştirmeye oranı olarak ifade edilir. Viskoelastik bir malzeme kısa bir süre yüklendiği zaman elastikmiş gibi cevap verir. Daha ileri literatür incelemesi, şu anda esneklik modülünün direkt basınç deneyi [83,84], dolaylı çekme deneyi [85], burulma deneyi ve direkt çekme-basınç deneyi gibi farklı yöntemler

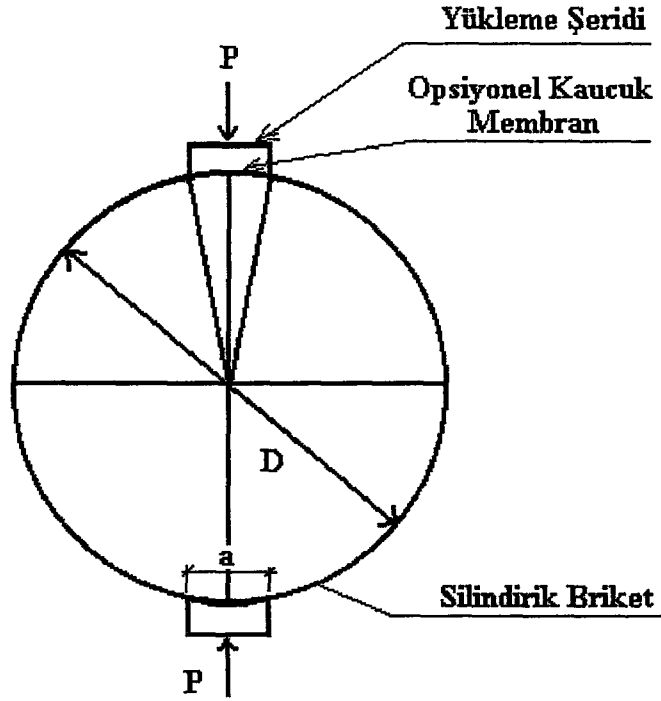
kullanılarak belirlendiğini göstermektedir. Ancak, bu yöntemlerden son ikisi komplike, zaman alıcı ve pahalı iken direkt basınç deneyi ve dolaylı çekme deney yöntemleri daha sadedir. Ayrıca dolaylı çekme deney yöntemi, kolay oluşu ve deney için Marshall numunesi gerektirmesinin yanında, direkt basınç deneyine göre karışımdaki bağlayıcı etkisine karşı daha duyarlıdır [81].

Son yıllarda, ampirik yaklaşımdan daha çok elastik teoriye dayanan mekaniksel yaklaşıma doğru giden bir süreçte esnek kaplamalar konusunda değişme söz konusudur [86]. AASHTO, 1986 yılında ileri sürdüğü tabakalı elastik teori formundaki mekanik yaklaşımı kullanmaktadır. Bitümlü karışımların esneklik modülünün değerlendirilmesinde ASTM D 4123 gerilme-şekil değiştirme bağıntılarını ortaya koyan en popüler deney yöntemidir.

Esneklik modülü değerleri, malzemelerin rölatif kalitesini değerlendirmesinin yanı sıra kaplama tasarımı veya değerlendirme ve analizleri için girdi üretmeye yaramaktadır. Bu deney sayesinde sıcaklık, yükleme hızı ve süresi gibi etkiler araştırılmaktadır. Deney tahribatsız olduğu için bir numune üzerinde sıcaklık veya nem koşullarını değerlendirmek amacıyla deneyler tekrarlanabilir [87,88,89].

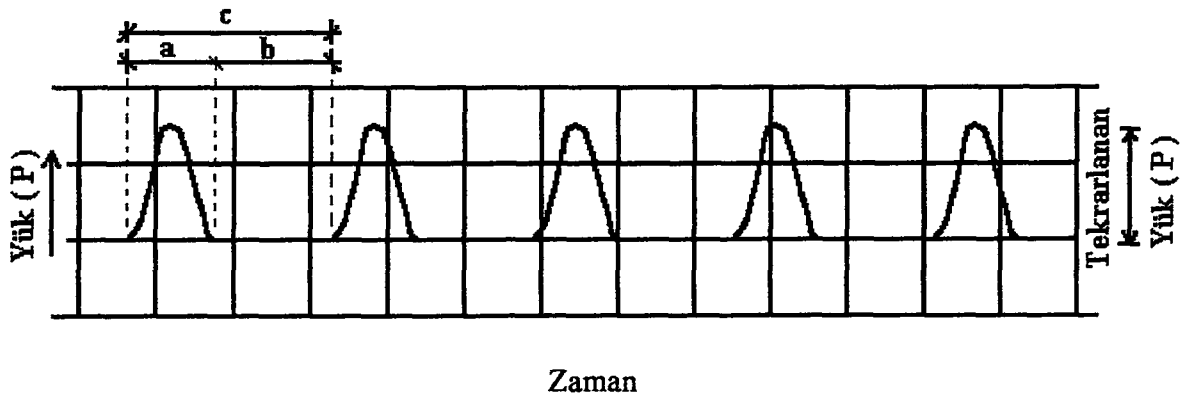
Bu çalışmada, SCHMİDT [85] tarafından geliştirilen ve detayları ASTM D 4123-82 de verilen [90], esneklik modülü için dolaylı çekme deneyi, standart deney yöntemi kullanılmıştır.

Dolaylı çekme deneyi ile esneklik modülü değerlerinin tespit edilmesinde, Marshall numunelerine yarı sinüzoidal (haversin) bir formda basınç yükü uygulanır. Şekil 11'de görüldüğü gibi, yük, silindirik numune üzerine düşey olarak uygulanır.



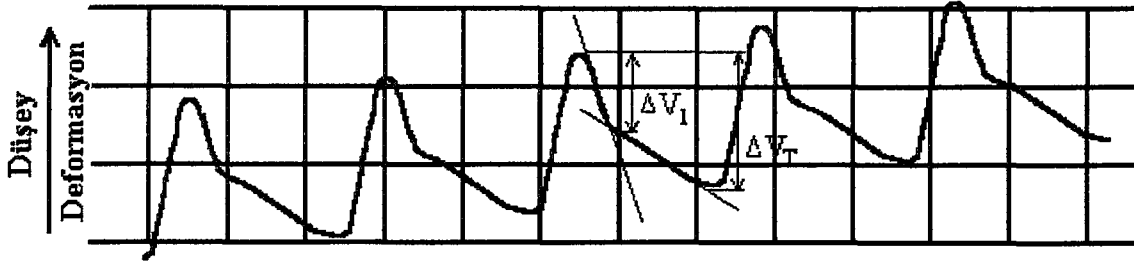
Şekil 11. Dolaylı Çekme Deneyi numune ve yükleme durumu

Deney, Şekil 12'de verilen süre-yük eğrisine uygun olarak yapıldıktan sonra numunenin nihai yatay deformasyonu ölçülür ve bir poisson oranı kabul edilerek numunenin esneklik modülü hesaplanır.

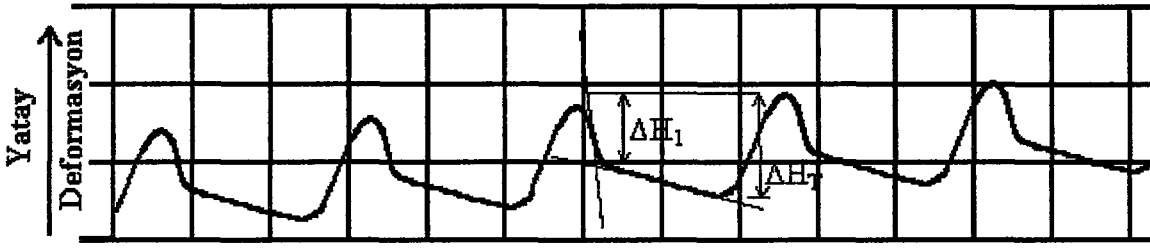


$a = \text{Yüklü süre}$ $b = \text{Yüksüz süre}$ $c = \text{Tekrar süresi (Periyot)}$

(a) Yük - Zaman



(b) Düsey deformasyon – Süre ilişkisi



(c) Yatay deformasyon – Süre ilişkisi

Şekil 12. Dolaylı Çekme Deneyi yükün uygulanması ve deformasyon durumu

Numuneler sıcaklık kontrollü hücreye yerleştirilerek belirlenen sıcaklığa gelmesi için 24 saat beklenir. Numunelerin istenilen sıcaklığa gelip gelmediği kukla numune içerisine yerleştirilen bir derece ile tespit edilir. Numuneler deney ekipmanına yerleştirilir. Ön hazırlık yüklemesi yapılarak numunenin yerleşmesi yapılır.

Numuneye dolaylı çekme mukavemeti değerinin % 10'u ile % 50'si arasında değişen bir yük belirlenen bir periyot boyunca beş kez yarı sinüzoidal (haversin) olarak uygulanır ve numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçülür. Deney aşamasında yük tekerrüründe 0.33, 0.5 ve 1 Hz'lik frekansların uygulanması önerilmektedir.

Esneklik modülü değeri için bir numuneye iki defa deney uygulanır. İlk deney tamamlandıktan sonra numune 90° çevrildikten sonra ikinci kez deneye tabi tutulur ve esneklik modülü değeri olarak iki deney sonucunun ortalaması alınır.

Deneyin tahribatsız olması nedeniyle, bir numuneye birden fazla deney yapılması imkanı vardır. Bu nedenle numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için en düşük sıcaklıklarda, en kısa yükleme süresi ve en düşük yük ile başlanmalıdır.

Esneklik modülü, uygulanan yük, kabul edilen veya hesaplanan poisson oranı ve numune yüksekliğine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$M_R = \frac{P}{\epsilon \Delta H} (V_R + 0.27) \quad (12)$$

Burada;

- M_R : Esneklik modülü (MPa)
- P : Uygulanan yük (N)
- V_R : Poisson oranı
- l : Numune yüksekliği (mm)
- ΔH : Geri dönen yatay deformasyon (mm)

Karışımın su hasarına karşı gösterdiği direncin belirlenmesi için kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bitümlü karışımların soyulma potansiyelinin değerlendirilmesinde kullanılan deney yöntemlerinde amaç çeşitli suya karşı koşullandırmalar sonucunda malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimi yansıtmaktır. Sonuçta elde edilen oransal ifadelerle soyulma hasarının nicel bir ölçüsü ortaya konulmuş olur. Bu çalışmada, suya maruz bırakılmış (koşullu) numunelerden elde edilen esneklik modülü değerlerinin, suya maruz bırakılmadan önceki (koşulsuz) esneklik modülü değerlerine oranlamasını esas alan yöntem kullanılmıştır [91,73,75].

$$RM_R = M_{R_{\text{yaş}}} / M_{R_{\text{kuru}}} \quad (13)$$

Burada;

- RM_R : Esneklik modül oranı
- $M_{R_{\text{yaş}}}$: Islak (suya koşullanmış) numunenin esneklik modülü
- $M_{R_{\text{kuru}}}$: koşullandırma öncesinde numunenin esneklik modülü

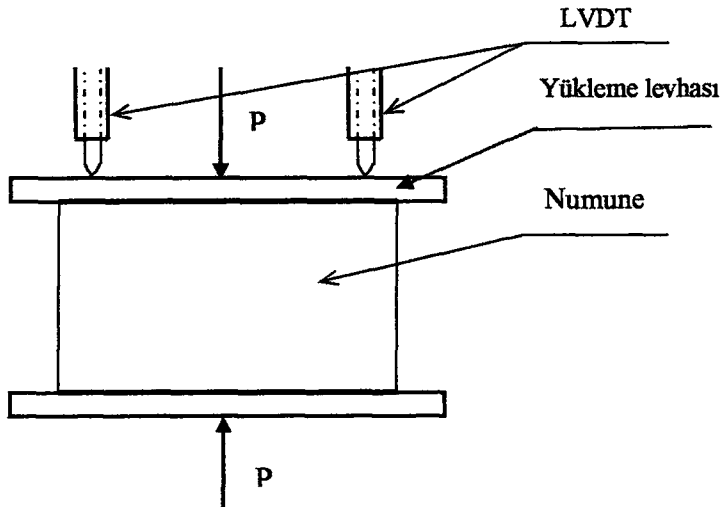
1.6.3. Tek Eksenli Statik Sünme Deney Yöntemi

Bu deney, yoğun granülometrilik asfalt karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değerlerinin belirlenmesini kapsar. Tek Eksenli Basınç Deneyi, asfalt betonu karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dirençlerini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Sünme modülü, numunelerin değerlendirilmesi yanında üstyapı tasarımında ve değerlendirme modellerinde kullanılabilir. Deney, sıcaklık etkisinin, yük büyüklüğünün, bağlayıcı içeriğinin ve sünme yükleme zamanının etkisinin değerlendirilmesinde de kullanılabilir.

Sünme modülü, karışımın fiziksel özellikleri ile birlikte değerlendirilirse karışımın karakterize edilmesine de yardımcı olabilir, ayrıca verilen bir trafik ve çevre koşulları altında karışımın bir karayolu malzemesi olarak uygunluğu hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir.

Tek eksenli statik sünme modülü için deney ekipmanı ve yükleme biçimi Şekil 13'te verildiği gibidir.



Şekil 13. Tek Eksenli Statik Sünme Deney düzeneği

Bu deneyden elde edilen sünme modülü değeri, elastik teori veya nonelastik teori yardımıyla ısı ve dingil yüklerine maruz bulunan asfalt betonu karışımların, düşük sıcaklıklardaki çatlama potansiyeli veya tekerlek izinin hesaplanması ve rijitliğin tahmininde kullanılabilir [92,93].

Belirli bir süre boyunca, sabit büyüklükte bir yük, sıkıştırılmış silindirik numune üzerine uygulanır. Numunenin tek eksen boyunca deformasyonları ölçülür ve yükün üzerinde bulunduğu sürenin herhangi bir parçası için bir basınç sünme modülü hesaplanır. Numune üzerine uygulanan yükün kaldırılmasından sonra, belirli bir süre içinde geri dönen deformasyon ölçülür.

Deneye tabi tutulacak numunelerin hacim ağırlıkları tespit edildikten sonra numuneler, denemek istenilen sıcaklıkta, sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinceye kadar bekletilir. Eğer numunelerin gerçek sıcaklıkları ölçülemiyor ise numuneler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat bekletildikten sonra deneye tabi tutulurlar.

Deney ekipmanına yerleştirilen numuneler, numunelerin bozulmasına neden olan yükün %5 ile %25 arasındaki sabit basınç yükü ile yüklenirler. Yarı sinüzoidal ön hazırlık gerilmesi 1 sn'lik periyotta 0.1 rise time (yükli süre), 0.9 rest time (dinlenme süresi) olacak şekilde uygulanır. Ön hazırlık yüklemesi sonunda geri dönen düşey deformasyon ölçülür ve buradan da esneklik modülü hesaplanır. Ön hazırlık yükünün sıfıra inmesi ile $\pm 2\%$ 'lik hata ile sabitlenmiş yük uygulanır. Tüm yükleme süresince düşey deformasyonlar kaydedilir. Yük 60 dakika ± 15 sn boyunca tatbik edilir. Sabit yükün 60 dk. boyunca uygulanmasının ardından geri dönen deformasyon ölçülmesi için ilave bir 60 dakika da yük uygulanmaksızın düşey yer değiştirmeler ölçülür.

Her numunenin 1., 10., 100., 1000. ve 3600. sn deki Sünme Modülü değerleri hesaplanır. Farklı karışım tasarımları arasında değerlendirme yapmak için ilave olarak deformasyon-süre ilişkisini gösteren eğri de çizilebilir. Tek eksenli statik sünme modülü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E_{cq}(t) = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c(t)} \quad (14)$$

Burada;

$E_{cq}(t)$: t anındaki sünme modülü (MPa)

σ_c : Numuneye uygulanan basınç gerilmesi (MPa)

$\varepsilon_c(t)$: t anında tek ekseninde oluşan deformasyon (mm/mm)

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\Delta v(t)}{l} \quad (15)$$

Olup burada;

l : Numune yüksekliği (mm)

$\Delta v(t)$: t anında düşey yönde oluşan deformasyon (mm)

$$X = \frac{\Delta r}{\Delta v h} \quad (16)$$

Burada;

X : Numunenin geriye dönüş yeteneği

Δr : Deney sonunda geriye dönen düşey deformasyon (yük uygulamasının ardından tatbik edilen ikinci 3600 sn sonundaki deformasyon)

$\Delta v(t)$: 3600 sn boyunca uygulanan yüklü süre sonundaki deformasyon

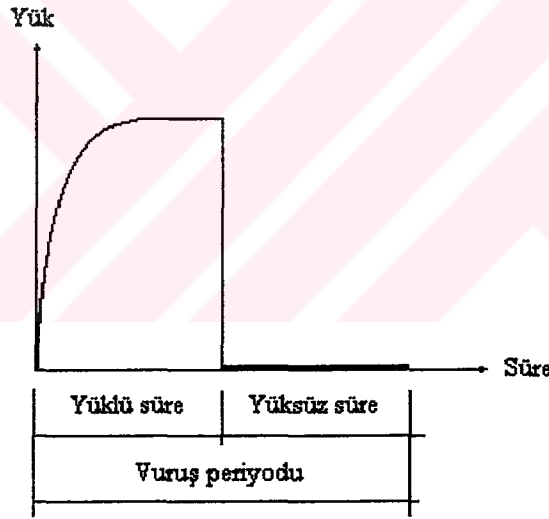
1.6.4. Tekrarlı Sünme Deney Yöntemi

Asfalt betonu karışımlarda tekerlek izi oluşumu genel olarak, tek boyutlu yoğunlaşma (sıkışma) ve plastik akmalardır. Asfalt karışımların biçim değişimleri ve tekerlek izi oluşumları trafik altında oluşan sıkışmalardan daha ziyade, karışımın kayma mukavemetindeki kayıp ve kayma mukavemeti ile ilişkilidir. Ayrıca karışım tasarımında, arazide yapılacak uygulamanın mühendislik ve inşaa kurallarına uygun olarak yapılacağı düşünüldüğünden, trafik altında oluşacak olan yoğunlaşmalar dikkate alınmaz [94].

Bu deney, asfalt karışımların tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır [92,95]. Bu deneyde, belirli bir vuruş periyodu içerisinde numuneler, tek eksenli tekrarlanan basınç yüküne maruz bırakılır ve her bir yük tekrarından sonra numune içerisinde oluşan kalıcı deformasyonlar ölçülür.

Deney ekipmanı, statik sünme deneyinde olduğu gibi; aksenal yükleme ekipmanı, sıcaklık hücresi, deformasyon ölçüm ekipmanı, yük ölçüm ekipmanı ve kayıt ekipmanıdır. Bu deneyde kullanılan deney düzeneği ve numunelerin deney düzeneğine yerleştirilmesi bölüm 1.6.3'te anlatıldığı şekildedir.

Tekrarlı sünme deneyinde, silindirik numuneye tek eksenli tekrarlı basınç yükünün her bir yük tekrarına ilişkin uygulanma biçimi Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Tekrarlı yük ve uygulama şekli

Her bir yük tekrarından sonra numunede meydana gelen deformasyonlar aşağıdaki gibi hesaplanır [93]:

$$\epsilon_p = (L_{3n} - L_1)/\ell \quad (17)$$

$$\epsilon_R = (L_{2n} - L_{3n})/(\ell - (L_{3n} - L_1)) \quad (18)$$

$$M_R = \sigma/\epsilon_R \quad (19)$$

$$\sigma = F/A \quad (20)$$

Burada;

ϵ_p : Kalıcı deformasyon

ϵ_R : Elastik deformasyon

M_R : Esneklik modülü

ℓ : Numunenin başlangıçtaki yüksekliği

L1 : Yük uygulaması olmaksızın LVDT'lerin başlangıçtaki sıfır referans deplasmanları

L2_n : n adet vuruş için LVDT'lerin maksimum deplasmanları

L3_n : n+1 adet vuruştan hemen önceki n adet vuruş için nihai deformasyon

σ : Düşey pik gerilme

F : Düşey pik kuvvet

A : Numunenin enine kesiti

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu araştırmada, yoğun granülometrilili sıcak asfalt betonu karışımında kullanılan agrega tasarımı esas alınarak; mineral filler yerine %1 den %6 ya kadar değişen oranlarda değişen oranlarda portland çimento kullanılmak suretiyle çok sayıda Marshall numunesi, asfalt emülsiyonu karışımlar için Modifiye Marshall Yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, asfalt içeriğinin çimento katkısıyla birlikte karışım davranışı üzerindeki etkisini belirlemek ve karışım tasarımı, çimento oranı ile asfalt içeriği arasında optimal bir yaklaşım ortaya koymak amacıyla üç farklı asfalt içeriği için deneysel çalışma kapsamı genişletilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde performans deneyleri olarak aşağıda verilen deneyler yapılmıştır. Bu bölümde, aşağıda verilen ana başlıklar altında yapılan çalışmalar sunulmuştur:

- Çalışmada kullanılan malzemeler ve özellikleri

- Agrega
- Çimento
- Asfalt emülsiyonu

- Karışım tasarımı

- Karışımlara uygulanan deneyler

- Marshall Deneyi
- Dolaylı Çekme Deneyi
- Su Hasarı Deneyi
- Statik Sünme Deneyi
- Tekrarlı Sünme Deneyi

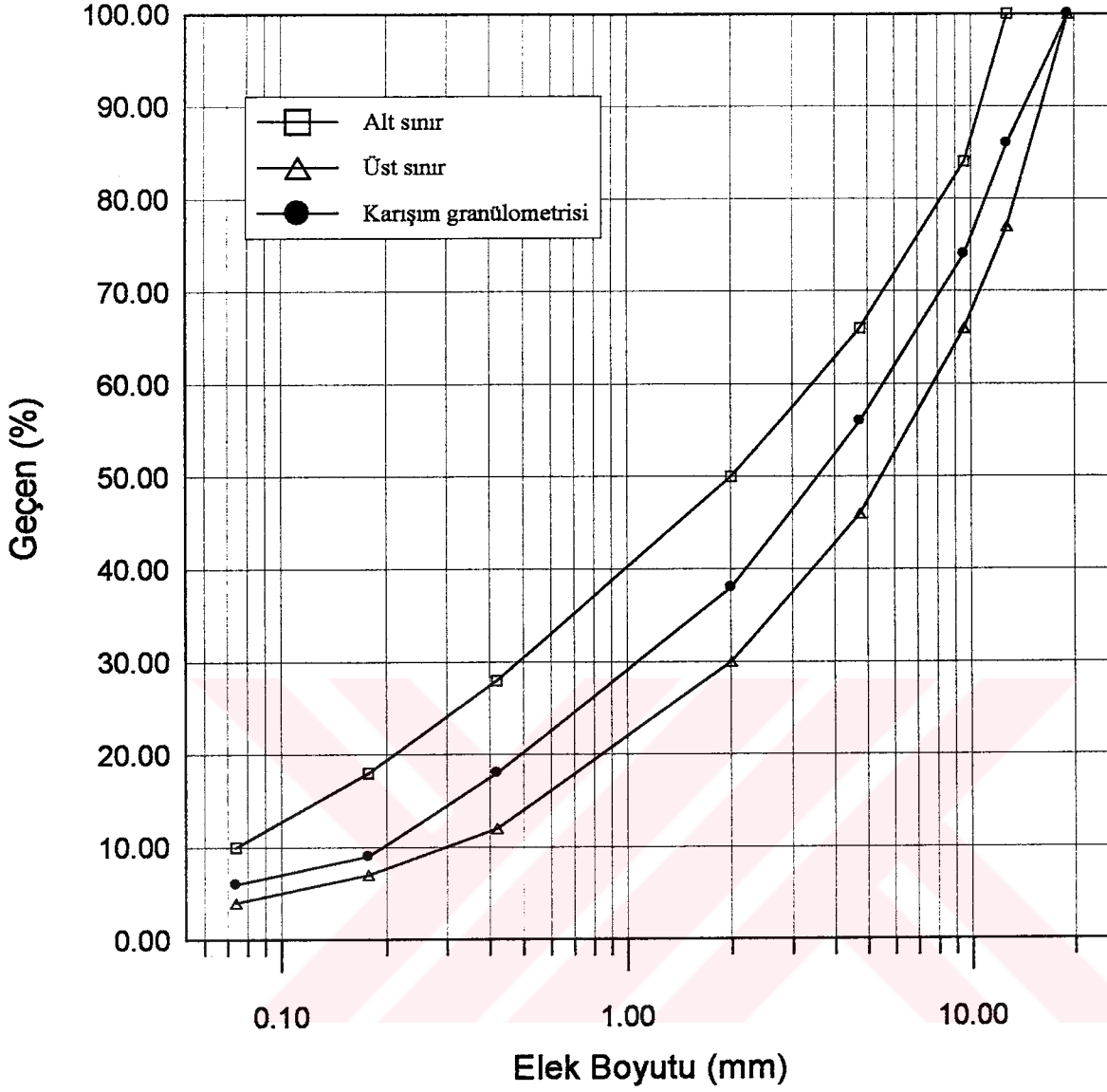
2.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1. Agregası

Çalışmada kullanılan agrega, Trabzon İli Maçka yakınlarındaki Meryemana Kalker Taşocağından alınmıştır. Asfalt emülsiyonu karışım numunelerinin hazırlanmasında, Yollar Fenni Şartnamesi [96] Aşınma Tabakası Tip-2 olarak belirtilen granülometri sınırları arasında kalan agrega karışımı kullanılmıştır. Taşocağından alınan agrega malzemesi öngörülen granülometri için elemeye tabi tutulmuş; bir numunede kullanılacak malzeme miktarlarına ilişkin her bir elek üzerinde kalan miktarlar Tablo 7’de verilen şekilde belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan tüm deneylerde kullanılan karışım numuneleri, Şekil 15’te verilen bu yoğun agrega granülometrisi kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo 7. Karışımlarda kullanılan agrega granülometrisi ve şartname sınırları

Elek Boyutu		Şartname Sınırları Toplam Geçen	Karışım Granülometrisi Toplam Geçen	Elek Üzerinde Kalan	Bir Numune İçin Kullanılan Miktar
Inch	mm	%	%	%	Gr
(3/4)"	19.1	100	100	0	0
(1/2)"	12.7	77-100	86	14	154
(3/8)"	9.5	66-84	74	12	132
No.4	4.76	46-66	56	18	198
No.10	2.00	30-50	38	18	198
No.40	0.42	12-28	18	20	220
No.80	0.177	7-18	9	9	99
No.200	0.074	4-10	6	3	33
TAVA	-	-	0	6	66



Şekil 15. Çalışmada kullanılan agrega granülometrisi

2.1.1.2. Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyleri

Bir agreganın özgül ağırlığı, o agreganın birim hacmindeki ağırlığının aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Mineral agrega gözenekli olup suyu ve asfaltı değişik ölçülerde absorbe edebilmektedir. Danenin hacim tanımlamasına bağlı olarak zahiri özgül ağırlık, hacim özgül ağırlık ve efektif özgül ağırlık olmak üzere üç tip özgül ağırlık türü vardır [80,97].

Hacim Özgül Ağırlık, geçirimsiz ve geçirimli tüm boşluklarla birlikte katı dane hacmini kapsar.

Zahiri Özgül Ağırlık, geçirimsiz boşluklarla birlikte katı dane hacmini kapsar.

Efektif Özgül Ağırlık ise, asfalt absorbe (emme) eden boşluklar dışındaki tüm dane hacmini kapsar.

Bu deneyler sayesinde agreganın hacim-ağırlık ilişkileri ve suya hassasiyeti, bitümlü karışımdaki boşluk yüzdesi, karışımın teorik özgül ağırlığı ve karışımdaki asfaltla dolu boşluk yüzdesi tespit edilir.

Çalışmada, asfalt emülsiyonu karışım tasarımı için esas alınan agrega malzemesinin doğal nem oranı 0.34 olarak belirlendikten sonra, kaba agrega, ince agrega ve mineral filler malzemeleri ayrı ayrı özgül ağırlık deneylerine tabi tutuldu. ASTM C 127, ASTM C 128 ve BS 812 standartlarına göre gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 8'de topluca özet olarak verilmiştir.

Tablo 8. Deneylerde kullanılan agrega karışımının özgül ağırlıkları ve su emmesi

Agrega Boyutu	Özellik	Deney Sonucu
Kaba Agreg	Hacim Özgül Ağırlık	2.698
	Zahiri Özgül Ağırlık	2.714
	Su Emme Yüzdesi	0.33
İnce Agreg	Hacim Özgül Ağırlık	2.683
	Zahiri Özgül Ağırlık	2.735
	Su Emme Yüzdesi	0.62
Filler	Zahiri Özgül Ağırlık	2.743

2.1.1.3. Aşınma Deneyi

Agregalar, asfalt kaplama karışımlarının üretilmesi, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması sırasında kırılma ve aşınmaya maruz kalırlar. Ayrıca trafik yükü de yoldaki agreganın aşınmasına sebep olur. Aşınma deneyi, agreganın aşınma ve darbelenme etkilerine karşı dayanıklılığını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu aşınma ve çarpma etkileri, numunenin granülometrisine bağlı olarak seçilen sayıdaki çelik kürelerin dönen bir silindir içine konulmasıyla oluşturulur. Makine kullanılan malzeme sınıfına göre uygun sayıda döndürüldükten sonra içindekiler çıkarılır ve agrega elenerek aşınan kısım % kayıp olarak bulunur. ASTM C 131 standardına [97] göre yapılan deneyden elde edilen sonuçlar Tablo 9'da özet olarak verilmiştir. Beton asfalt kaplama agregaları için kabul edilen maksimum aşınma kaybı %30 dur [96].

Tablo 9. Agreganın aşınma kaybı

A	Numunenin ilk ağırlığı	5000.6
B	Numunenin son ağırlığı	3926.8
$100 \times (A-B)/A$	Aşınma kaybı	21.57

2.1.1.4. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi (Donma Deneyi)

Hava tesirleri altında kalan agregalar, donma ve çözülme olayları sonucunda granülometrik olarak bozulmaya uğrarlar. Agreganın granülometrisinin bozulması, yolun bozulmasına neden olur. O nedenle yol yapımında kullanılan agregaların donma ve çözülmeye karşı istenen sağlamlıkta olması gerekmektedir.

Bu deney yöntemi, doygun sodyum sülfat (Na_2SO_4) veya magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltileri kullanılarak agregaların hava tesirleriyle donarak ufalanmaya karşı dirençleri hakkında, laboratuvarında kısa süre içinde bir karar verebilmek amacı ile uygulanan hızlandırılmış bir deneydir.

Deney için sodyum sülfat çözeltisi kullanıldı. Buharlaşmayı önlemek için ağzı kapalı bir kaptaki 48 saat sabit sıcaklıkta bekletilen çözeltinin özgül ağırlığı belirlendi. Burada dikkat edilecek bir husus, sodyum sülfat çözeltisi özgül ağırlığının 1.151 ila 1.174 arasında olması gerektiğidir.

Deneyde kullanılan agrega, 63, 50, 37.5, 25, 19, 12.5, 4.75 ve 2 mm'lik eleklerden elenerek elekler arasında kalan malzeme yıkandıktan sonra 110°C'lik etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutuldu. Her elek üzerinde kalan numuneden, esas numunenin %5'inden az olmayacak şekilde standardına uygun olarak gerekli miktarda malzemeler alındıktan sonra ASTM C 88 standardına uygun olarak deneye tabi tutuldu [25,98]. Donma kaybı, numunenin deneyden önceki ağırlığı ile deneyden sonraki ağırlıkları farkının ilk ağırlığa oranı olarak belirlendi. Bu kayıp yüzdeleri esas granülometri ile çarpılmak suretiyle düzeltilmiş kayıp yüzdeleri bulundu. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir. Ağır trafikli yollarda aşınma tabakası için kullanılacak agreganın donma kaybı maksimum % 10 olmalıdır.

Tablo 10. Agreganın donma kaybı deney sonuçları

Elek No	Numune Granülometrisi		Düzeltilmiş Her Elek Üzerinde % Kalan	Deneyden Önceki Numune Ağırlığı (gr)	Deneyden Sonraki Ağırlık (gr)	Deney Sonrası Kayıp (gr)	Düzeltilmiş Kayıp (%)
	% Geçen	Her Elek Üzerinde % Kalan					
		B	$C=100 \times B/A$	D	E	$F=D-E$	$G=F \times C/D$
¾"	100						
½"	85.8	14.2	21.7	676	642.1	33.9	1.09
3/8"	79.3	6.5	9.9	330	315.2	14.8	0.44
No.4	55.8	23.5	36.0	302	297.3	4.7	0.56
No.10	34.6	21.2	32.4	100	98.9	1.1	0.35
Toplam, A = 65.4			100	Numunenin Toplam Donma Kaybı			2.44

2.1.1.5. Yassılık Deneyi

Bu deney yöntemine göre bir agrega malzemesinin yassı kabul edilebilmesi için deneye alınan herhangi bir agrega danesinin kalınlığının, nominal boyutunun 0.6'sından küçük olması gerekir. Yassı danelerden oluşan bir yapı, trafik yükü altında stabil değildir. Yassı daneler yük altında kolaylıkla kırılır ve karışımın mukavemeti düşer.

BS 812 standardına göre yapılan deney ile agrega malzemesinin yassılık indeksi belirlenir [97]. Yassılık indeksi, yassı danelerin ayrılması ile bulunan ağırlığın deneye alınan toplam numune ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir. Deney, 63 mm'den küçük 6.3 mm'den küçük agrega malzemesine uygulanır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan agrega granülometrisine göre, deneyde kullanılan elekler ve bu eleklerle göre belirlenen malzeme miktarları Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. Yassılık indeksinin belirlenmesinde kullanılan elekler ve malzeme miktarları

Elek Açıklığı (Inch)	Elekler Arası Kalan (%)	Her Elek Üzerinde Düzeltilmiş Kalan (%)	Deney İçin Kullanılan Miktar (gr)
3/4-1/2	14	33.3	1080
1/2-3/8	12	28.6	550
3/8-1/4	16	38.1	300

Elekler arası kalan malzeme miktarları alınarak denenmiş ve her elek için yassı dane ağırlığı belirlenmiştir. Her elek üzerinde kalan malzeme için yassı dane yüzdesi, deneyde bulunan yassı malzeme ağırlığının deneye alınan malzeme ağırlığına oranlanmasıyla elde edildi. Her eleğe ait yassı dane yüzdesi, o elek için düzeltilmiş granülometri yüzdesi ile çarpılmak suretiyle gerçek yüzdelere bulundu. Bu düzeltilmiş yüzlerin toplamı, malzemenin yassılık indeksi olarak belirlendi. Deney sonuçları Tablo

12'de topluca verilmiştir. Yassılık indeksi, ağır trafikli yollarda aşınma tabakası için maksimum % 30 olmalıdır.

Tablo 12. Agrega granülometrisinin yassılık indeksi deney sonuçları

Elek No	Her Elek Üzerinde Kalan (%)	Düzeltilmiş Her Elek Üzerinde Kalan (%)	Deneye Alınan Numune Ağırlığı (gr)	Yassı Numune Ağırlığı (gr)	Yassı Dane Yüzdesi (%)	Düzeltilmiş Yassı Dane Yüzdesi (%)
	K	$M=100 \times K/L$	N	P	$R=100 \times P/N$	$S=R \times M$
3/4"-1/2"	14	33.3	1080	4.39	0.41	13.65
1/2"-3/8"	12	28.6	550	1.12	0.20	5.72
3/8"-1/4"	16	38.1	300	0.21	0.07	2.67
Toplam, L = 42		100	Agrega Malzemesinin Toplam Yassılık İndeksi			22.04

2.1.1.6. Cilalanma Deneyi

Bu deneyin amacı, kaplama tabakasında kullanılan agreganın, trafik yükleri altında sürtünme sonucu aşınarak ne dereceye kadar aşınacağını, yol koşullarına benzer şekilde laboratuarda kısa sürede tespit etmektir. Yol kaplamasının, cilalanmaya karşı mukavemeti düşük agregadan yapılması, yolun kaymaya karşı direncini düşürür. Dolayısıyla taşıtların, özellikle yağışlı havalarda kaymasına neden olur. Agreganın cilalanma değeri ile kaymaya karşı direnç arasındaki ilişki, trafik koşullarına, kaplama tipine ve diğer bazı faktörlere bağlı olarak değişir. Cilalanma deneyi iki aşamadan ibarettir.

1. Deney için hazırlanan numuneler, hızlandırılmış cilalanma makinesinde cilalanma işlemine tabi tutulur.

2. Cilalanan numunelerin, sürtünme aleti ile cilalanma değerleri bulunur.

BS 812 standardına [97] uygun olarak yapılan deneyde öncelikle cilalanma değeri belirlenecek olan agrega malzemesinin, 9.5 mm ile 8 mm elekler arasında kalan kısmından, yassı ve uzun olmayan agregalar alınarak deney numuneleri hazırlandı. Hazırlanan numuneler cilalanma işlemine tabi tutularak numunelerin cilalanması sağlandı. Cilalanan numunelerin cilalanma değerinin bulunması için numuneler sürtünme aletine yerleştirilerek sürtünmeleri sağlanmış ve cilalanma değerleri kaydedilmiştir. Standardına uygun olarak gerçekleştirilen deney sonucunda agreganın cilalanma değeri 0.47 olarak bulunmuştur.

2.1.1.7. Soyulma Deneyi

Soyulma, öncelikli olarak suyun etkisiyle asfalt çimentosu kohezyon kuvvetinin azalması ya da asfalt çimentosu ile agrega arasındaki adeziv bağın bir bozulmasıdır [91]. Bilindiği gibi, agrega bağlayıcı ile tamamen sarılmış ise soyulma daha zor olacaktır. Bir asfalt kaplamasının ömrü, büyük ölçüde agreganın yapışma yeteneğine bağlıdır. Özellikle su sever agregalarla yapılan kaplamalarda, su ve trafik koşulları altında agrega ile asfalt arasındaki bağlantı kesilir, dolayısıyla kaplama kısa sürede bozularak elden çıkar. Bu bakımdan, penetrasyonu düşük (viskozitesi yüksek) yani bağlayıcılık özelliği yüksek bağlayıcılarla ve soyulmaya karşı direnci yüksek agregalarla yapılan kaplamalar soyulmaya karşı daha dayanıklı olurlar.

Bu deney yöntemi, agrega yüzeyindeki bitüm filminin, suyun varlığında tutulmasını belirlemek için agreganın kaplanma ve statik olarak suya daldırma yöntemini kapsar. Yöntem, sıvı petrol asfaltlarına, asfalt emülsiyonlarına, asfalt çimentolarına ve katranlara uygulanabilir.

Karışım tasarımında kullanılan agrega malzemesinin, soyulma direncini belirlemek için 9.5 mm'lik elekten geçen ve 4.76 mm'lik elek üzerinde kalan kısmından 100 gr alınarak saf su ile iyice yıkandıktan sonra 110⁰C'lik etüvde sabit ağırlığa kadar kurutuldu. Böylece hazırlanmış olan agrega malzemesi, tüm karışım tasarımlarında kullanılacak olan CSS-1 tipindeki katyonik asfalt emülsiyonu ile soyulma deneyine tabi tutuldu. Yöntem koşullarına [97] uygun şekilde gerçekleştirilen deneyde, gözle yapılan inceleme sonunda, soyulmamış agrega yüzeyinin bütün yüzeye oranı, agreganın soyulmaya karşı direnci 0.60 olarak belirlendi.

2.1.1.8. Sulu Ortamda Agregaların pH Değerlendirmesi (pH Deneyi)

Agregaların, alkalın tipleri kireçtaşı ve mermer, asidik tipleri granit ve kuvarsit olmak üzere alkalın ve asidik diye de sınıflandırıldığı, özellikle asfalt emülsiyonu karışımlar açısından bu sınıflandırmanın daha da büyük bir öneme sahip olduğu daha önce vurgulanmıştı. Agregata türüne bağlı olmaksızın pH değerinin 9'dan büyük olması durumunda, soyulma davranışının önemli olduğu belirtilmiştir [99]. Bu durum, arakesite bitümün karbosilik asit elemanlarını nötralize ederek agregata bağının hidrolizine neden olur. Alkalın pH değeri, asidik agregalarda bile kalsit ve dolomit gibi minerallerin ve çözünebilir tuzların yıkanıp gitmesine neden olur [100]. Labib, pH bölgelerine göre hem kuvars-silikat kökenli kayaçların hem de alkali suyun ve karbonat kayaçların yüzey kimyasını incelemiş; kuvars-silika kökenli agregalarda pH değerinin 9'dan büyük olması durumunda silika yüzey tabakalarının çözülmesiyle soyulmaya neden olduğunu göstermiştir. Alkalın pH değerinde, yüzey hidroksit formasyonu organiklerin yüzeyden çözülmesine neden olur. Bu yüzden bitüm agregata bağının kırılması pH değerine bağlıdır [99]. Kuvars-silika ve karbonat kökenli agregaların pH bölgelerine göre değerlendirilmesi Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Kuvars-silika ve karbonat kökenli agregaların pH bölgeleri

Agrega	Bölge 1	Bölge 2	Bölge 3
Kuvars-Silika Kökenli	pH: 0-1.5 Proton emilmesi pozitif yüzey yükü, kuvars çözülmesi beklenmemekte	pH: 1.5-8.5 Proton emilmesi ve hidroksil iyonları dengede, kuvars çözülmesi beklenmemekte	pH>8.5 Hidroksil formasyonu ve silika yüzeyinin çözülmesi ile soyulma
Karbonat Kökenli	pH: 0-6 Asidik koşullarda proton emilmesi ve kalsiyum iyonlarının çözülmesi. Örneğin karbosilik asitin varlığıyla agreganın kendi bünyesinde kohezyon kırılması ve soyulma	pH: 6-9.5 Proton-hidroksit denge bölgesi	pH>9.5 Yüzey hidroksitlerinin çözülmesi ile soyulma. Agregada çözülebilirlik yok

Deney için kırılarak hazırlanmış agrega malzemesinin 200 nolu elekten geçen kısmından belirli bir miktar alınarak saf su içersine konuldu. Kap içersindeki su ve agrega malzemesi çalkalanarak Üç gün boyunca beklemeye bırakıldı. Bu süre sonunda, agrega malzemesinin pH değeri 7.42 olarak belirlendi. Kalsitik agreganın bulunan pH değeri, Tablo 13'te verilen sınıflandırmaya göre ikinci bölgede; yani proton-hidroksit denge bölgesinde kalmaktadır.

2.1.1.9. Agrega Malzemesinin Kimyasal Analizi

Agregalar, kimyasal yapıları bakımından silisli agregalar, alüminosilikatlı agregalar ve kalsiyum karbonatlı agregalar olmak üzere üç gruba ayrılabilir [101].

Silisli agregalar : Silis (SiO_2) içeren taşlardan bir kısmı çimento ile birlikte kullanıldığında alkali reaksiyonu denilen bir reaksiyon yapar. Agreganın alkaliye duyarlı olan silisli bileşenleri çimentonun oluşturduğu alkali ortamda yumuşar ve çözülür. İçinde aktif silis bulunan opal mineralini içeren kumtaşı ve çakmaktaşı gibi taşlar, obsidyen gibi doğal camlar ve doğal cam içeren taşlar, camlar, riyolit, dasit ve andezit bu tür taşlardır. Bileşimi magnezyum silikat hidrate olan serpantin su emdiğinde şiştiğinden serpantinli taşlar da agrega olarak uygun değildir.

Alüminosilikatlı agregalar : Bunlar alüminyum ve silik ile, sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum bileşiminden oluşan mineraller içerir. Bu minerallere iyi bir örnek granitte bol miktarda bulunan feldspattır. Bu mineral havanın ve özellikle CO_2 içeren suların etkisiyle ayrışarak kile dönüşür. Bu dönüşüm nedeniyle agrega yüzeyinde oluşan bu kil tabakası nedeniyle çimento agregaya iyi yapışamaz. Feldspatın bütün türleri böyle ayrışmamakla birlikte granit gibi agregalar kırıldıktan sonra fazla bekletilmeden (3 ay içinde) kullanılır.

Kalsiyum karbonatlı agregalar : Kalkerli agregalar da denen bu agregalar asitlere karşı dayanıksızdır. Atmosferde ve su içinde bulunabilecek sülfürik asit, karbonik asit gibi asitlerden etkilenir. Kalkerli agregalarda ayrıca çimentoyla reaksiyon yapabilen bazı karbonatlı bileşenler de bulunabilir.

Agrega malzemesinin kimyasal özellikleri, TS 687 standardına göre Trabzon Çimento Fabrikası'nda yapılan deneyler sonucunda belirlendi. Buna göre agrega malzemesine ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Agrega malzemesinin kimyasal analiz sonuçları

Bileşen	Miktar (%)
SiO ₂ (Silisyum dioksit, Toplam)	16.67
Al ₂ O ₃ (Alüminyum oksit)	3.88
Fe ₂ O ₃ (Demir oksit)	1.64
CaO (Kalsiyum oksit)	41.17
MgO (Magnezyum oksit)	1.76
SO ₃ (Kükürttri oksit)	0.14
Kırdırma Kaybı	32.84
Na ₂ O (Sodyum oksit)	0.61
K ₂ O (Potasyum oksit)	0.65
Toplam	99.36

2.1.2. Çimento

Çimento bir hidrolik bağlayıcıdır. Yani su ile reaksiyonu sonucu sertleşir ve sertleştikten sonra suyla temas edecek olursa yumuşamaz [101,102]. Günümüzde bir çok çimento türü olup bunlar; portland çimentoları, puzolanik katkıli portland çimentoları ve diğer çimentolar olmak üzere üç ana grupta toplanabilir.

Portland çimentosu üretiminde kullanılan maddeler dört grupta toplanabilir. Bunlar; kireçli (CaO) maddeler, silisli (SiO₂) maddeler, alüminli (killi) (Al₂O₃) maddeler ve demirli (Fe₂O₃) maddelerdir [101,103]. Doğadaki taşların bir çoğunun bileşiminde bu maddelerin tümü az ya da çok bulunmakta ise de uygun miktarlarda bulunmamaktadır. O nedenle çimento üretiminde uygun bileşimli taş kullanılması yerine kireç, silis, kil ve

demir bakımından zengin maddelerin ayrı ayrı sağlanıp uygun oranlarda karıştırılması yoluna gidilir.

Portland çimentosunun hammaddesi kireçtaşı, yani kalker, kil, silis kumu, demir filizi ve alçı taşı yani jips dir. Bu maddelerin saf olmaması nedeniyle bileşimde bir miktar da MgO, K₂O, Na₂O ve bazı diğer maddeler bulunur. Görüldüğü gibi çimento çeşitli oksitlerden oluşmaktadır. Portland çimentosunda CaO önemli bir yer tutmakta ve SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ile birlikte çimentonun yaklaşık %90-95'ini oluşturmaktadır.

Çimento üretiminde, pişirme sırasında bu oksitler eriyerek birleşir ve çeşitli katı eriyikler oluştururlar. Çimento bileşimindeki 20 dolayındaki katı eriyikten dört tanesi çok önemli olup, Tablo 15'te verilen bu bileşenler çimentonun ana bileşenleri olarak adlandırılırlar [101,104].

Tablo 15. Portland çimentosunun ana bileşenleri

Ana Bileşenin Adı	Kimyasal Bileşimi	Simgesi
Trikalsiyum silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Dikalsiyum silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Trikalsiyum alüminat	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetrakalsiyum alüminoferrit	3CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Çimento bileşiminde yer alan ana bileşenler dışında yer alan diğer maddelere tali bileşenler denir. Bunlar, serbest kireç, asitte çözünmeyen mineraller, ısıtılınca buharlaşan bazı maddeler ile magnezyumoksit (MgO), sülfid (SO₃) ve alkaliler (K₂O, Na₂O) dir. Uçabilir maddeler, çimentonun kızdırılmasıyla yani 1000⁰C'nin üstünde ısıtılmasıyla kaybolan CO₂ ve su gibi maddelerdir. Kızdırma sonucu kaybolan bu maddelere kızdırma kaybı adı verilir.

Çimentonun suyla karıştırılmasıyla elde edilen bileşime çimento hamuru, bu karışım içinde meydana gelen çimento-su reaksiyonuna ise hidratasyon denir. Çimento

hamuru hidratasyon sonucu önce katılaşır yani plastikliğini kaybeder. Buna imentounun priz yapması denir. Çimento hamuru daha sonra hidratasyonun ilerlemesiyle sağlamlaşarak mukavemet kazanır.

Çimento bileşenlerinden C_3S , suyla temas ettiğinde hızla reaksiyona girer. Bu hızlı reaksiyondan dolayı açığa önemli miktarda ısı çıkar. Ayrıca, imento hamuru kısa sürede mukavemet kazanır. Bu reaksiyonlar bir hafta sonunda büyük ölçüde tamamlanır. C_2S 'ın hidratasyonu da imento hamurunun sağlamlaşmasına katkıda bulunur. Ancak, C_3S 'ın ki kadar hızla gelişmez ve dolayısıyla açığa fazla ısı çıkmaz. Buna karşılık mukavemet artışı uzun bir süre (örneğin aylarca) devam edebilir. C_3A 'nın hidratasyonunun imento hamurunun mukavemetine katkısı yok denecek kadar azdır. Ayrıca, C_3A 'nın hidratasyon ürünleri sülfatların etkisine dayanıksızdır. Ancak, C_3A suyla çok hızlı reaksiyon yapar ve bu arada açığa çok fazla miktarda ısı çıkar. Hızlı reaksiyon nedeniyle imento hamuru çok kısa bir sürede katılaşabilir. C_4AF suyla çok hızlı bir şekilde reaksiyona girer, hidratasyon ısısı yüksektir. Ancak, imento hamurunun mukavemetine katkısı yok denecek kadar azdır [101,104].

Çalışmada, filler malzemesi yerine kullanılan imento, Trabzon imentodan temin edilen P 42.5 tipi Portland çimentosudur. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri, Trabzon imento Fabrikası'nda yapılan deneyler sonucunda belirlendi. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 16'da, kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 17'de verilmiştir.

Tablo 16. Çalışmada kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler	Deney Sonucu
Özgöl Ağırlık (gr/cm^3)	3.108
İncelik (Blaine, cm^2/gr)	2914
Mekanik Özellikler	
7 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm^2)	33.2
28 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm^2)	43.1

Tablo 17. Çalışmada kullanılan çimentonun kimyasal analiz sonuçları

Bileşen	Miktar (%)
SiO ₂ (Silisyum dioksit, Toplam)	20.60
Al ₂ O ₃ (Alüminyum oksit)	6.33
Fe ₂ O ₃ (Demir oksit)	3.01
CaO (Kalsiyum oksit)	61.44
MgO (Magnezyum oksit)	3.11
SO ₃ (Kükürttri oksit)	2.89
Kırdırma Kaybı	1.35
Na ₂ O (Sodyum oksit)	0.19
K ₂ O (Potasyum oksit)	1.03
Toplam	99.95

2.1.3. Asfalt Emülsiyonu

Karışımlarda bağlayıcı olarak kullanılmak üzere, soğuk karışım tasarım ölçütleri ışığında, MAKİMSAN A.Ş. tarafından üretilen Katyonik Asfalt Emülsiyonu (CSS-1) temin edilmiştir. Emülsiyon özelliklerinin belirlenmesi için bir çok deney yöntemi geliştirilmiştir. Karışımda kullanılacak olan asfalt emülsiyonunun özelliklerini belirlemek ve kullanılabilirliğine karar verebilmek için şartnamelerde aranan standart deney yöntemleri uygulanmıştır.

2.1.3.1. Viskozite Deneyi

Viskozite, herhangi bir sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Bitüm emülsiyonlarında viskozite, normal olarak belirli bir miktar emülsiyonun kalibre edilmiş bir delikten akma süresi olarak ölçülmektedir. Saybolt Furol, Engler, Redwood ve STV olmak üzere değişik viskozite aletleri vardır. Bu viskozimetrelerin hepsi de aynı ilkeye göre çalışmakta olup elde edilen sonuçlar genellikle çevrilebilmektedir. Bu çalışmada, Soybolt Furol Viskozimetresi kullanılmıştır.

Deney için 160 mikrometre elekten süzülen numune, viskozimetre tüpüne konularak istenilen sıcaklığa getirilir. Tüpün altındaki mantar çekilir, numunenin olduğu kap işaretli yerine doluncaya kadar geçen süre saniye cinsinden saybolt viskozitesini verir. TS 117 standardına [105] göre gerçekleştirilen deneyde, 25⁰C’de saybolt furol viskozitesi 22 (sn) olarak bulunmuştur.

2.1.3.2. Çökme Deneyi

Emülsiyondaki bitüm kürecikleri depolama esnasında dibe doğru çökme eğilimi göstermekte ve bu durum emülsiyon numunesinin üst kısmında daha düşük bitüm içeriği olmasına yol açmaktadır. Bu deney ile, belirli bir zaman boyunca silindirik bir kap içerisine bırakılan emülsiyon numunesinin çökme derecesi belirlenir. Çökme, bir asfalt emülsiyonunun belirli deney koşulları altında, 5 gün süre ile bekletilmesi sonunda emülsiyonda oluşan ve sonucu ağırlıkça yüzde olarak belirtilen çökmedir.

Deney için iki cam silindirden her birine 500'er ml emülsiyon numunesi konulduktan sonra silindirlerin ağzı kapatılarak laboratuvar koşullarında 5 gün süreyle beklemeye bırakıldı. Bu süre sonunda kaplardaki numunelerin üstünden ve altından 55'er ml olarak alınan kısımlar, 50'şer g olarak tartılıp darası alınmış 600'er ml lik cam beherlere konularak buharlaşma kalıntıları belirlendi. Geriye kalan asfalt emülsiyon numunelerinin 390'ar ml si sifonla çekilerek atıldı. Silindirlerin dibinde kalan kısımlardan alınan 50'şer g'lık numunelerin de buharlaşma kalıntısı belirlendi. TS 132 standardına [106] göre yapılan deneyde, silindirlerin dip kısımlarından alınan numunelerin buharlaşma kalıntısı ortalamasından (%), silindirlerin üst kısımlarından alınan numunelerin buharlaşma kalıntısı ortalaması (%) çıkarılarak, çökme 0.1 olarak belirlendi.

2.1.3.3. Depolama Stabilitesi Deneyi

Asfalt emülsiyonlarının depolanma stabilitesi, bir asfalt emülsiyonunun belirli koşullar altında depolanması halinde dispersiyonunu homojen olarak korumasıdır. Bu deney, bir asfalt emülsiyonunun depolanma stabilitesi oldukça kısa bir sürede tespit etmek bakımından çok yararlıdır. Yöntem, dispersiyonun sürekliliğinin zaman ile bağlantısı için

bir ölçektir, fakat emülsiyonun kullanışı ile ilgili diğer stabilite özellikleri için bir ölçek olarak kullanılamaz.

Bu deney ile, depolanma koşullarında 24 saat bekletilen malzemenin üstünden ve dibinden alınan numunelerin asfalt miktarları arasındaki fark belirlenir. Deney sonucu, üst ve alt seviyeler için hesaplanan asfalt kalıntı yüzdeleri arasındaki fark olarak belirtilir. TS 132 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deney sonucunda kullanılan emülsiyonun depolama stabilitesi 0.03 olarak belirlendi.

2.1.3.4. Partikül Yükü Deneyi

Asfalt emülsiyonlarının partikül yükü, belirli deney koşulları altında tespit edilen ve polarite cinsinden tanımlanan partikül yüküdür. Deney sonucu, asfalt tabakasının oluştuğu elektrodun polaritesini pozitif veya negatif olarak belirlemek sureti ile gösterilir.

TS 132 standardına göre yapılan deneyde, öncelikle denenecek emülsiyon numunesi 250 ml'lik behere konularak, doğru akım kaynağına bağlı olan temiz ve kuru elektrotlar emülsiyon içersine daldırıldı. Gerekli akım uygulaması sonunda emülsiyondan çıkarılan elektrotlar akar su altında yavaşça yıkandıktan sonra elektrotlar üzerinde biriken asfalt, göz ile incelendi ve negatif elektrot üzerinde çok belirgin bir asfalt tabakasının oluştuğu gözlemlendi. Böylelikle, negatif elektrot üzerinde toplanan asfalt küreciklerinin pozitif yüklü oldukları; emülsiyonun katyonik olduğu tespit edildi.

2.1.3.5. Elek Deneyi

Elek deneyi, bir asfalt emülsiyonunun belirli bir deney koşulları altında belirli bir elekten geçirilmesinden sonra, elek üzerinde kalan kısmının saptanması amacı ile yapılan ve sonucu ağırlıkça yüzde olarak belirtilen bir deneydir.

Deney için 1000 g asfalt emülsiyonu uygun bir kaba konularak 75 mm çaplı 800 µm lik elekten süzüldü. Bu süzüntü berrak geçinceye kadar damıtık su ile yıkandıktan sonra elek ve elek altına konulan kap birlikte 105°C olan etüve konularak 2 saat bekletildi.

Etüvden çıkarılan malzemeler soğutulduktan sonra elek üzerinde kalan kısmın deneye alınan numune ağırlığına oranı yüzde cinsinden 0.01 olarak bulundu.

2.1.3.6. Çimento İle Karıştırma Deneyi

Çimento ile karıştırma, bir asfalt emülsiyonunun belirli deney koşulları altında portland çimentosu ile karıştırılması sonunda oluşan kesilmenin saptanması amacı ile yapılan ve sonucu ağırlıkça yüzde olarak belirtilen bir deneydir. Bu deney, yavaş kesilen emülsiyonlar için kullanılmaktadır. Deney, emülsiyonun agrega ve emülgatör arasındaki kimyasal tepkimelere dayanma stabilitesini ölçmek için kullanılmaktadır.

Deney için, damıtık su ile seyreltilerek bitüm içeriği % 55'e getirilen emülsiyondan 100 ml tartılarak alındıktan sonra, 180 µm lik elekten elenen 50 g çimento ile karıştırıldı. 1 dakikalık karıştırma süresi sonunda 150 ml damıtık su ilave edilerek karıştırma 3 dakika daha sürdürüldü. Karışım darası alınmış 1.4 mm lik elekten süzöldükten sonra karıştırma kabı içersinde hiç malzeme kalmayınca kadar bir çok kez yıkandı. Elek, darası alınmış yayvan bir kap içine konularak 163⁰C sıcaklıkta değişmez ağırlığa kadar kurutularak tartıldı. Deney sonucu, elekte kalan miktarın, deneye alınan emülsiyon miktarına oranı kesilen emülsiyon yüzdesi olarak bulundu. TS 132 standardına uygun olarak gerçekleştirilen ve iki kez tekrarlanan deney sonucunda, emülsiyonun kesilme yüzdesi 0.61 olarak bulundu.

2.1.3.7. Hidrojen İyonu Konsantrasyonu (pH) Tespiti

Bu deney, katyonik asfalt emülsiyonlarına uygulanan bir deneydir [25]. pH, bir çözeltinin asitlik ve bazlılığının bir ölçüsüdür. Asidik bir çözeltinin pH değeri 0 ile 7 arasında, bazik bir çözeltinin ise 7 ile 14 arasında değişir. pH değeri 7 olan bir çözelti "nötr" olarak tanımlanır. Saf su nötr'dür.

Deney için uygun bir tampon çözelti hazırlanarak elektrotlar tampon çözelti içersine daldırıldı. pH metrenin göstergesi tampon çözeltinin pH'ına göre ayarlandıktan sonra çözeltiden çıkarılan elektrotlar damıtık su ile yıkandı. Ardından elektrotlar

emülsiyon içersine daldırıldı ve göstergeden 5.37 değeri okundu. Bu değeri, emülsiyonun pH değerini göstermektedir.

2.1.3.8. Destilasyon Kalıntısı

Destilasyon kalıntısı, asfalt emülsiyonlarının özel bir imbik içersinde ve belirli bir sıcaklıkta destile edilmesi sonucunda elde edilen ve miktarı orijinal numunenin ağırlığına göre yüzde olarak verilen kalıntıdır.

TS 132 standardına uygun olarak gerçekleştirilen deneyde özet olarak; diğer aparatlarıyla birlikte darası alınmış imbik içersine 200 g emülsiyon konulduktan sonra imbik ısıtıldı ve sıcaklık 260°C'ye çıkarılarak 15 dakika bu sıcaklıkta tutuldu. İlk ısıtmanın başladığı andan itibaren 66 dakika içersinde destilasyon işlemi tamamlandı. Isıtma işlemi sonunda imbik bütün parçalarıyla birlikte tartıldı, kalıntı miktarının, deneye alınan numune ağırlığına oranı yüzde olarak hesaplandı. Buna göre destilasyon kalıntısı % 63 olarak bulundu.

2.1.3.9. Kalıntının özgül ağırlığı

Kalıntının özgül ağırlığı, kalıntının 25°C sıcaklıkta belli hacimdeki ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki saf suyun ağırlığına oranıdır. TS 1087 standardına [107] uygun olarak piknometre ile gerçekleştirilen deney sonucunda, kalıntı asfaltın özgül ağırlığı 1.021 olarak bulundu.

2.1.3.10. Penetrasyon Deneyi

Destilasyon sonucu elde edilen kalıntı asfalt çimentosunun kıvamını belirlemek için penetrasyon deneyi yapılır. Penetrasyon, standart bir iğnenin belirli bir yük altında ve belirli bir süre içinde, asfalt numunesi içersine düşey olarak batma derinliğinin 0.1 mm cinsinden değeridir. Penetrasyon birimi santimetrenin yüzde biridir. Deney sonunda okunan değeri 100 ise, asfaltın penetrasyonu 100 demektir; iğne asfaltın içersine 1 cm

batmış anlamına gelir. Penetrasyon değeri kıvamlılıkla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe asfalt yumuşar.

Bitümün niteliği, emülsiyonun özellikleri üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Emülsiyonlar, genellikle 100 ila 250 penetrasyon değerine sahip bitümle üretilmektedirler. Bazen iklim koşulları daha sert veya daha yumuşak bir bitüm kullanılmasını gerektirebilir.

Deney için, asfalt kalıntısının konulduğu numune kabı, 25⁰C sıcaklıktaki su dolu bir kap içersine konularak, düzgün bir yere konulmuş ve göstergesi sıfıra getirilmiş olan penetrasyon cihazının tablasına yerleştirildi. 100 gram yük ile yüklenen iğne, numune yüzeyine degecek şekilde ayarlandıktan sonra 5 saniye süreyle serbest bırakıldı ve bu süre sonunda penetrasyon değeri göstergeden okundu. Kap kenarından ve birbirinden 1 cm uzaklıkta arka arkaya 3 batma yapıldı. Burada dikkat edilecek husus her batmadan sonra iğnenin uygun bir çözücü ile temizlenip kurulanması gerekir. Kalıntı asfaltın penetrasyon değeri 3 batma miktarının ortalaması alınıp 125 olarak bulundu.

2.1.3.11. Düktilite Deneyi

Düktilite, uzama veya çekilebilme anlamına gelmektedir. Asfalt çimentolarının önemli özelliklerinden biridir. Uzama yeteneği fazla olan asfalt çimentoları, düktilite değeri daha düşük olan asfalt çimentolarına göre daha üstün bir bağlama yeteneğine sahiptirler. Diğer yandan çok yüksek düktilite değerine sahip olan asfaltlar ise, ısı değişimlerine karşı fazla duyarlık gösterirler. Bu nedenle, çeşitli asfaltların düktilite değerleri sınırlandırılmıştır.

Kalıntı asfaltın düktilitesi, standart kalıpta kalıntıdan hazırlanmış bir numunenin belirli deney koşulları altında kopmaksızın uzayabildiği miktarın cm cinsinden değeridir.

TS 119 standardına [108] göre deney için, kalıntı asfalt çimentosu ısıtılarak akıcı hale getirilerek 280 µm elekten süzülükten sonra vazelinlenmiş olan düktilite kalıbına dökülmek suretiyle 3 adet düktilite numunesi hazırlandı. Yaklaşık 40 dakika oda sıcaklığında ve 30 dakika da 25⁰C'lik su banyosunda bekletilen numunelerin fazla kısımları ısıtılmış bir spatula ile kesilerek düzeltildikten sonra 25⁰C'lik su banyosunda 1.5

saat daha bekletildi. Levhadan ayrılan ve kalıp yan parçaları çıkarılan numuneler çabucak düktilite cihazına konularak dakikada 5 cm'lik bir hızla kopuncaya kadar çekilmeye bırakıldı. Numunelerin koptuğu an cihaz kenarındaki cetvelden uzama miktarları cm cinsinden okundu ve bu üç numunenin ortalaması alınarak asfalt kalıntısının düktilitesi 64 (cm) olarak bulundu.

2.1.3.12. Trikloretilende Çözünürlük Deneyi

Kalıntının trikloretilendeki çözünürlüğü, kalıntının belirli deney koşulları altında trikloretile içersinde çözünebilen kısmının ağırlıkça yüzdesidir.

TS 1090 standardına [109] göre yapılan deneyde, öncelikle deneyde kullanılacak olan kroze deney için hazır hale getirildikten sonra yaklaşık 2 g numune, darası alınmış bir erlene konulup tartıldıktan sonra üzerine 100 cm³ çözücü azar azar ilave edilip karıştırılarak numunenin çözülmesi sağlandı ve erlenin ağzı kapatılarak 15 dakika bekletildi. Daha sonra Gooch krozesi süzme hunisine yerleştirilerek krozenin dibindeki asbest tabaka bir miktar çözücü ile ıslatıldıktan sonra süzüntü renksiz geçinceye kadar çözücü ile yıkanır. Kroze süzme hunisinden çıkarılarak 110⁰C'lik etüvde yaklaşık 30 dakika bekletildikten sonra soğutularak tartıldı. Deney sonucu, çözünmeyen madde miktarı, numune ağırlığına oranlanarak, çözünmeyen madde yüzdesi 1 olarak bulundu. Bu sonuç, kalıntı numunesinin % 99 çözüldüğünü göstermektedir.

2.1.3.13. Kalıntının Kül Miktarı

Kalıntının kül miktarı, kalıntının belirli deney koşulları altında kor haline gelinceye kadar ısıtılması sonunda geride kalan kısmının, ilk ağırlığına göre yüzdesidir.

TS 135 standardına [110] göre gerçekleştirilen deneyde, kroze konulan numune, bitüm yanmaya başlayınca kadar yavaşça ısıtıldı ve kolay uçucu maddelerin hepsi yanıp bittikten sonra kroze de oluşan serbest karbon ve kömürleşen madde, tamamen yanıp kayboluncaya kadar kızdırıldı ve soğutularak tartıldı. Elde edilen kül ağırlığı, numune ağırlığına oranlanarak yüzde cinsinden 0.5 olarak bulundu.

2.2. Modifiye Marshall Yöntemine Göre Karışım Tasarımı

Asfalt emülsiyonu karışımlar genel olarak agrega, emülsiyon ve su olmak üzere üç malzemenin belirli oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanır. Karışımın özellikleri sıkıştırılmış numunelerin yoğunluğu ile yakından ilgilidir. Bu yüzden karışımdan beklenen özelliklerin en üst düzeyde sağlanabilmesi için sıkıştırmadaki suyun optimum olması gerekir. Bununla birlikte karışımın hazırlanmasında öncelikli olarak karışıma ilave edilecek asfalt emülsiyonu miktarının tespit edilmesi gerekmektedir. Yoğun granülometreli agrega ile hazırlanacak deneme karışımları için asfalt emülsiyon miktarı Merkezkaç Gazyağı Eşdeğerlilik Testi (C.K.E.) ile tahmini olarak belirlenir. Eğer C.K.E. deney ekipmanı mevcut değilse, Formül (1)'de verilen ampirik bağıntı ile hesaplanabileceği bölüm 1.6.1.3. de verilmiştir.

Agrega granülometrisini esas alan ve (1) bağıntısı kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda, başlangıçta karışıma ilave edilecek emülsiyon miktarı % 6.685 olarak bulunmuştur. Buna göre sarılma testi sırasında karışıma ilave edilecek emülsiyon içerisindeki esas bağlayıcı asfalt miktarı % 4.2 olarak bulunur. Asfalt emülsiyonunun agregaya sarılma yeteneği, agrega yüzeyindeki ön ıslaklık derecesine bağlı olarak etkilenmektedir. Bu durum agrega granülometrisinde 200 nolu elekten geçen malzeme yüzdesi fazla olduğu zaman daha belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunun için, agrega ağırlığına göre % 2.5 ön karışım suyu ile başlanarak, % 0.5 artımlarla % 4 oranına kadar değişik miktarlarda ön karışım suyu ilave edilmek suretiyle sarılma deneyi yapılmıştır. Yapılan denemeler sonunda en uygun ön karışım suyunun, agregadaki nem oranı dahil % 3.5 olduğuna karar verilmiştir.

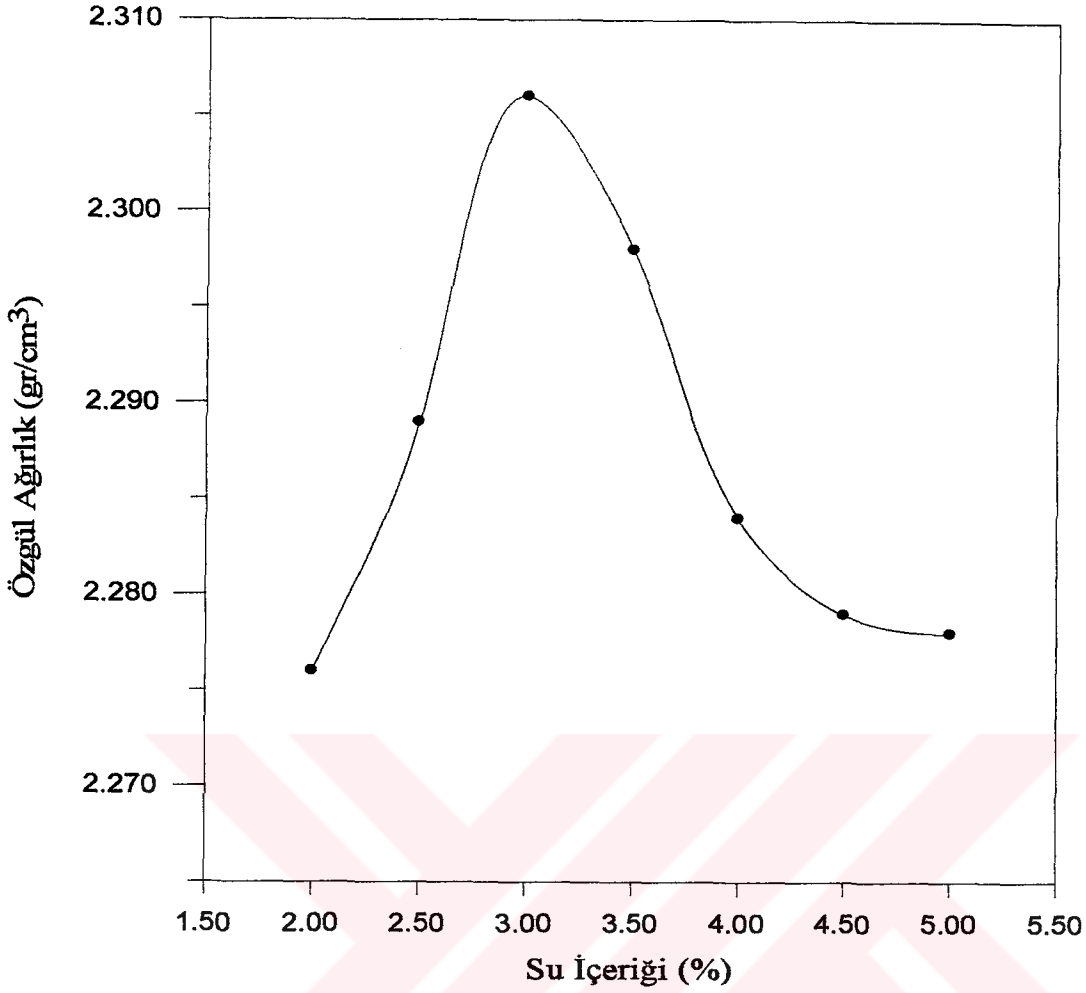
Sarılma deneyi ile belirlenen ön karışım (ilave) suyu ve emülsiyondan gelen suyla birlikte karışım bünyesinde bir numune için toplam % 5.97 karışım suyu olduğu belirlendi. Karışımın özellikleri sıkıştırılan numunenin yoğunluğu ile yakından ilgilidir. Bu yüzden, istenilen karışım özelliklerinin maksimize edilebilmesi için sıkıştırmadaki su miktarının optimize edilmesi gerekir. Sıkıştırmadaki optimum su içeriğini belirlemek amacıyla belirlenen ön karışım suyuyla sabit bitüm yüzdesinde (% 4.2) karıştırılan numuneler, farklı sıkıştırma suyu yüzdelерinde sıkıştırılmıştır. Her sıkıştırma suyu içeriği için üçer numunedен oluşan Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Karışımlarda kullanılan

emülsiyon miktarı ve sıkıştırmadaki su miktarları, bölüm 1.6.1.5. de verilen Formül (2), (3), (4) ve (5) yardımıyla hesaplanmıştır. Bu bağıntılarda, $a=1100$ g, $b=0.34$, $c=4.2$, $d=63$, $e=37$ olarak alınmış, hesaplanan gerekli su kaybı tamamlanıncaya kadar fan yardımıyla numunelerin kurutulması sağlanmıştır. Marshall karışım numuneleri, her bir yüzeyine 50 standart tokmak darbesi vurularak sıkıştırılmış ve kalıpla beraber oda sıcaklığında kalıbın her iki tarafı da havalandırılacak şekilde 1 gün küre bırakılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, gerekli ölçüm ve tartım işlemlerinden sonra 2. gün 22°C de Marshall stabilite deneyine tabi tutulmuş, elde edilen sonuçlar Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. Optimum su içeriği için Marshall deneyi sonuçları

Kalıntı Bitüm (%)	Emülsiyon Miktarı (gr)	Sıkıştırma Suyu İçeriği (%)	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
4.2	73.3	2	2.276	528	2.56
4.2	73.3	2.5	2.289	621	2.73
4.2	73.3	3	2.306	930	3.32
4.2	73.3	3.5	2.298	812	3.62
4.2	73.3	4	2.284	766	3.47
4.2	73.3	4.5	2.279	478	4.29
4.2	73.3	5	2.278	470	4.08

Tablo 18’de görülen hacim özgül ağırlık değerlerinden elde edilen grafik Şekil 16 de verilmektedir. Bu Tablo ve Grafikten de görüleceği gibi en iyi sıkışmanın ve en yüksek stabilite değerinin elde edildiği su içeriği % 3 olarak bulunmuştur.



Şekil 16. Hacim özgül ağırlık – sıkıştırmadaki su içeriği ilişkisi

Çimento katkısının sıkıştırmadaki optimum su içeriğine etkisini araştırmak amacıyla, karışımın agrega bileşeninde mineral filler yerine % 1 den % 6 ya kadar değişen oranlarda çimento katılarak, % 4.2 kalıntı bitüm içeriğinde, dört farklı sıkıştırma suyu içeriğinde Marshall numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler 3. gün sonunda 22⁰C de Marshall deneyine tabi tutulmuştur. Ancak, % 3 su içeriğinde ve %6 çimento ilavesiyle hazırlanan numuneler, 22⁰C de kırılmadığı için 60⁰C de denenmiştir. Deneyler sırasında oda sıcaklığı yaklaşık 29⁰C olarak kaydedilmiş olup numuneler bu koşullarda kür edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar su içeriklerine göre sırasıyla Tablo 19 – 22 de verilmiştir.

Tablo 19. % 2 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin Marshall deneyi sonuçları

Kalıntı Bitüm (%)	Sıkıştırma Suyu İçeriği (%)	Filler – Çimento Oranı (%)	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
4.2	2	6 – 0	2.279	571	2.67
4.2	2	5 – 1	2.292	923	2.71
4.2	2	4 – 2	2.288	1237	2.46
4.2	2	3 – 3	2.293	1342	2.11
4.2	2	2 – 4	2.287	1586	1.93
4.2	2	1 – 5	2.291	1807	2.04
4.2	2	0 - 6	2.294	1861	1.58

Tablo 20. % 3 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin Marshall deneyi sonuçları

Kalıntı Bitüm (%)	Sıkıştırma Suyu İçeriği (%)	Filler – Çimento Oranı (%)	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
4.2	3	6 – 0	2.313	813	3.34
4.2	3	5 – 1	2.321	1273	3.28
4.2	3	4 – 2	2.330	1439	3.07
4.2	3	3 – 3	2.336	1656	2.64
4.2	3	2 – 4	2.335	1973	2.25
4.2	3	1 – 5	2.338	2266	2.06
4.2	3	0 - 6	2.341	(60 ⁰ C) 1422	2.14

Tablo 21. % 4 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin Marshall deneyi sonuçları

Kalıntı Bitüm (%)	Sıkıştırma Suyu İçeriği (%)	Filler – Çimento Oranı (%)	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
4.2	4	6 – 0	2.287	745	4.18
4.2	4	5 – 1	2.296	1052	4.06
4.2	4	4 – 2	2.302	1211	3.68
4.2	4	3 – 3	2.307	1507	2.43
4.2	4	2 – 4	2.293	1648	2.49
4.2	4	1 – 5	2.305	1859	2.15
4.2	4	0 - 6	2.312	2031	1.92

Tablo 22. % 5 su içeriğinde değişen oranlarda filler – çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin Marshall deneyi sonuçları

Kalıntı Bitüm (%)	Sıkıştırma Suyu İçeriği (%)	Filler – Çimento Oranı (%)	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
4.2	5	6 – 0	2.281	506	5.21
4.2	5	5 – 1	2.303	824	4.35
4.2	5	4 – 2	2.298	1115	3.36
4.2	5	3 – 3	2.314	1243	2.85
4.2	5	2 – 4	2.279	1642	2.63
4.2	5	1 – 5	2.287	1784	2.37
4.2	5	0 - 6	2.310	1938	2.04

Yukarıda verilen tablolardan da görüleceği gibi, genel olarak en iyi sıkışma % 3 su içeriğinde sağlanmış ve en yüksek stabilite değerleri bu sıkıştırma suyu içeriğine sahip

karışımlardan elde edilmiştir. Bundan sonra karışım performansını belirlemek üzere yapılacak olan deneyler için hazırlanan tüm numuneler için optimum sıkıştırma suyunun %3 olarak alınmasına karar verilmiştir.

En yüksek stabilite değerlerinin elde edildiği mineral filler yerine tamamen % 6 çimento katkı miktarına sahip karışımda, kalıntı bitüm içeriğinin etkisini gözlemlemek amacıyla değişik bitüm miktarlarında hazırlanan numuneler Marshall deneyine tabi tutulmuştur. Kalıntı bitüm içeriğinin artırılması için karışıma ilave edilen emülsiyon miktarı arttırılmakta, dolayısıyla karışıma giren su miktarı da artmaktadır. Bu yüzden, her bitüm yüzdesi için emülsiyondan gelen su miktarı hesap edilerek karışıma ilave edilen ön karışım suyu aynı oranda ayarlanmıştır. Hazırlanan numuneler 3 gün boyunca kür edilmiş ve 60°C de denenmiştir. Emülsiyondaki kalıntı asfalt ile % 5.2 bitüm içeriğinde elde edilen sıcak karışım numuneleri de Marshall deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 23 de topluca özetlenmiştir.

Tablo 23. Kalıntı bitüm içeriğindeki değişime göre Marshall deneyi sonuçları

Kalıntı Bitüm (%)	Sıkıştırma Suyu İçeriği (%)	Emülsiyon Miktarı (gr)	Hacim Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
3.2	3	55.87	2.334	2170	1.98
3.7	3	64.60	2.335	1846	2.39
4.2	3	73.33	2.341	1563	2.35
4.7	3	82.06	2.345	1230	2.56
5.2	3	90.79	2.343	1108	2.84
5.7	3	99.52	2.349	925	3.06
6.2	3	108.25	2.355	726	3.27
6.7	3	116.98	2.360	567	3.85
Sıcak Karışım					
5.2	---	---	2.406	914	3.67

Tablo 23'ten de görüleceği gibi, kalıntı bitüm içeriği arttıkça, karışımın stabilite değerleri azalmakta, akma değerleri ise artmaktadır. Ayrıca, karışıma ilave edilen çimento miktarına bağlı olarak karışım stabilitesinin arttığı bundan önceki tablolarda (bkz. Tablo 19 – 22) gözlenmişti. Dolayısıyla, asfalt emülsiyonu karışımlarda bitüm miktarı azaldıkça ve çimento katkı miktarı arttıkça karışımların rijitleştiği gözlenmiştir. Karışıma ilave edilen çimento miktarındaki değişimin esneklik modülü ve sünme modülü üzerindeki etkilerini ortaya koymak ve bu değişik çimento katkılarında bitüm içeriğinin etkilerini gözlemlemek amacıyla üç ayrı (%4.2, %5.2 ve %6.2) kalıntı bitüm içeriği kullanılmasına karar verilmiştir.

Üç farklı kalıntı bitüm içeriğinde ve değişen oranlarda çimento katkısıyla hazırlanan numunelere ilişkin yoğunluk-boşluk analizleri bölüm 1.6.1.7'de verilen formüller yardımıyla yapılarak elde edilen sonuçlar Tablo 24, 25 ve 26 da özetlenmiştir. Asfalt emülsiyonu karışımın ile sıcak karışım arasında bir karşılaştırma yapmak amacıyla %5.2 bitüm içeriğinde Marshall yöntemine göre sıcak karışım numuneleri üretilmiştir. Sıcak karışım numuneleri, çalışmada kullanılan asfalt emülsiyonundan elde edilen kalıntı asfalt ile hazırlanmıştır. Sıcak karışım numunelerine ilişkin yoğunluk-boşluk analizlerinden elde edilen sonuçlar da Tablo 25 içersinde yer almaktadır.

Tablo 24. % 4.2 kalıntı bitüm içeriği için değişik çimento katkı oranlarında yoğunluk-boşluk ilişkileri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Kuru Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	VMA (%)	Toplam Boşluk (%)	Hava Boşluğu (%)
4.2	0	2.310	2.306	18.926	9.834	7.915
	1	2.328	2.324	18.139	9.515	7.073
	2	2.333	2.311	18.654	9.532	7.288
	3	2.342	2.315	18.143	9.164	7.013
	4	2.333	2.311	18.647	9.525	7.395
	5	2.340	2.321	18.304	9.143	7.161
	6	2.341	2.316	18.489	9.349	7.320

Tablo 25. % 5.2 kalıntı bitüm içeriği için değişik çimento katkı oranlarında yoğunluk-boşluk ilişkileri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Kuru Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	VMA (%)	Toplam Boşluk (%)	Hava Boşluğu (%)
5.2	0	2.327	2.312	18.559	8.191	6.222
	1	2.342	2.323	18.985	7.737	5.380
	2	2.345	2.324	18.947	7.694	5.211
	3	2.339	2.328	19.202	7.987	5.763
	4	2.340	2.317	19.194	7.975	5.679
	5	2.341	2.321	19.210	8.021	5.743
	6	2.343	2.322	19.144	7.919	5.529
Sıcak Karışım						
5.2	---	2.406	---	15.07	---	4.105

Tablo 26. % 6.2 kalıntı bitüm içeriği için değişik çimento katkı oranlarında yoğunluk-boşluk ilişkileri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Kuru Hacim Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	VMA (%)	Toplam Boşluk (%)	Hava Boşluğu (%)
6.2	0	2.334	2.314	19.868	6.603	4.526
	1	2.346	2.321	19.930	6.647	3.907
	2	2.340	2.315	20.031	6.793	4.325
	3	2.338	2.313	20.088	6.860	4.357
	4	2.341	2.311	20.086	6.874	4.375
	5	2.345	2.317	19.957	6.707	3.949
	6	2.355	2.326	19.537	5.985	3.633

2.3. Dolaylı Çekme Deneyi

Deney için asfalt emülsiyonu karışım numuneleri, %3 sıkıştırma suyu içeriğinde ve %1 den %6 ya kadar değişen çimento katkılarında hazırlanmıştır. Ayrıca, %4.2, %5.2 ve %6.2 olmak üzere üç farklı bitüm içeriğinde hazırlanan numuneler üzerinde ASTM D-4123-82 standardına uygun olarak Dolaylı Çekme Deneyi yapılmıştır. Farklı çimento ve bitüm içeriğine sahip numuneler, çevre koşullarında küre bırakılmış, bir yıllık bir süre boyunca, 3. günden başlayarak değişik kür sürelerinde 25⁰C de deneye tabi tutulmuştur. Deney için hazırlanan numunelerin zamana bağlı olarak nem kayıpları da belirlenmiştir. Bir karşılaştırma yapmak için emülsiyondaki kalıntı asfalt ile %5.2 bitüm içeriğinde hazırlanan sıcak karışım numuneleri aynı koşullarda deneyler yapılmıştır.

Asfalt emülsiyonu karışımının sıcaklık hassasiyetlerini belirlemek amacıyla üç değişik bitüm içeriğinde ve değişik çimento katkılarında benzer koşullarda hazırlanan kür edilen numuneler, 28 gün sonunda üç farklı sıcaklıkta denenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda (40⁰C) aşırı düşey deformasyonların olması nedeniyle güvenilir olmadığı ve 60⁰C sıcaklıkta yapılan deneylerin tam kesin olmadığı belirtilmektedir [111,112]. Bu doğrultuda deneyler 5, 25 ve 40⁰C sıcaklıkta yapılmıştır.

Bu bölümde numuneler üzerinde yapılan tüm deneylerde, yüksek yoğunluklu trafiği temsilen yükleme periyodu 1000 ms, yüksek taşıt hızlarını temsilen yükleme hızı 40 ms olarak seçilmiş, numunelere üzerine 650 N yük tatbik edilmiştir.

Değişik bitüm içeriklerinde üretilen farklı çimento katkılarına sahip numuneler üzerinde bir yıllık süre boyunca değişik kür sürelerinde yapılan deneylerden elde edilen Esneklik Modülüne ilişkin sonuçlar bitüm içeriğine göre sırasıyla Tablo 27, 28 ve 29 da verilmiştir. Aynı şekilde numunelerin, bitüm içeriği, çimento miktarı ve kür süresine bağlı olarak elastik deformasyon karakteristikleri ise sırasıyla Tablo 30, 31 ve 32 de verilmiştir. Sıcak karışım numunelerinden elde edilen esneklik modülü değerleri Tablo 28 de, elastik deformasyon değerleri ise Tablo 31 içersinde verilmiştir.

Tablo 27. % 4.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında esneklik modülleri

Kür Süresi (gün)	Esneklik Modülü (Mpa)						
	Filler Malzemesi Yerine Karışıma İlave Edilen Çimento Miktarı (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
3	238.6	1860.4	3880.9	7063.8	12089	13571	14525
7	437.7	2347.1	4809.2	10585	12325	14103	14875
14	609.1	3856.6	5783.0	9899.8	13826	15124	15665
21	640.9	3885.3	6114.2	12991	14663	16812	17312
28	783.4	4840.8	6829.0	11299	14161	17006	18493
60	758.2	5267.3	7121.1	13345	14284	16519	17237
120	847.5	5274.1	7803.5	13212	15593	16341	18843
365	2143.2	7657.8	10388	14147	17435	18949	20673

Tablo 28. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında esneklik modülleri

Kür Süresi (gün)	Esneklik Modülü (Mpa)							Sıcak Karışım
	Soğuk Karışımda Filler Malzemesi Yerine Karışıma İlave Edilen Çimento Miktarı (%)							
	0	1	2	3	4	5	6	
3	150.6	770.6	2556.8	4818.8	6848.2	10873	12910	2716.3
7	283.4	1082.5	3255.3	6461.7	8744.8	12206	14253	
14	445.1	1779.4	3871.0	7366.4	9798.5	12269	15251	
21	490.4	2169.2	4312.7	8186.1	10044	13019	15742	
28	625.3	1940.1	4693.2	8242.4	10959	13790	15641	2782.1
60	640.2	2271.6	5439.4	9611.2	9850.3	13526	17075	
120	712.5	2486.2	5687.1	10365	11265	14182	17824	
365	1637.8	4245.1	7547.9	10827	13537	16025	18766	2844.5

Tablo 29. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında esneklik modülleri

Kür Süresi (gün)	Esneklik Modülü (Mpa)						
	Filler Malzemesi Yerine Karışıma İlave Edilen Çimento Miktarı (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
3	127.4	470.1	882.9	1879.8	3166.5	4253.4	6030.8
7	169.0	841.9	1252.1	2785.7	4585.0	5932.2	7714.3
14	417.9	1060.5	1378.7	3261.4	5528.4	6806.7	8762.7
21	469.4	1247.7	1657.9	3646.8	6412.2	6967.9	8910.3
28	487.6	1464.5	2191.6	3996.3	6262.9	8176.8	9462.7
60	490.2	1513.5	2284.5	4063.5	7349.1	8291.3	9864.4
120	664.1	1676.1	2679.2	4181.2	7216.4	8145.1	10826
365	1225.8	3008.6	3815.9	5878.7	8538.6	10234	11892

Tablo 30. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında elastik deformasyon sonuçları (mm/mm) $\times 10^{-6}$

Kür Süresi (gün)	Elastik Deformasyon ($\mu\epsilon$)						
	Filler Malzemesi Yerine Karışıma İlave Edilen Çimento Miktarı (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
3	168.99	21.50	11.50	5.63	5.38	3.15	2.92
7	93.10	17.55	10.03	5.58	4.68	2.97	2.83
14	68.19	13.99	8.72	4.45	3.93	3.12	3.01
21	66.87	10.88	7.60	3.01	3.34	3.04	2.96
28	61.50	10.34	6.81	3.87	3.46	3.01	2.79
60	62.11	10.44	6.24	3.22	3.12	3.17	3.26
120	58.60	10.36	5.93	3.18	2.98	3.32	3.24
365	36.17	7.52	4.91	3.16	2.81	2.75	2.59

İC. YÜSEK ÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tablo 31. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında elastik deformasyon sonuçları

Kür Süresi (gün)	Elastik Deformasyon ($\mu\epsilon$)							
	Soğuk Karışımda Filler Malzemesi Yerine Karışıma İlave Edilen Çimento Miktarı (%)							Sıcak Karışım
	0	1	2	3	4	5	6	
3	273.69	50.79	15.67	8.12	6.18	5.05	4.50	26.28
7	139.62	37.84	11.50	6.19	5.76	4.44	3.81	
14	130.52	28.07	9.11	5.65	4.41	3.73	3.19	
21	88.96	22.97	8.53	5.52	4.36	3.34	3.08	
28	82.40	23.61	8.26	5.33	4.25	3.18	3.04	26.04
60	82.19	21.58	7.92	5.21	4.19	3.39	2.96	
120	71.33	19.30	7.35	5.16	3.92	3.11	2.82	
365	52.91	15.57	6.19	4.85	3.66	2.86	2.48	25.57

Tablo 32. %6.2 Kalıntı bitüm içeriğinde ve değişik oranlarda portland çimentosu katkılarında elastik deformasyon sonuçları

Kür Süresi (gün)	Elastik Deformasyon ($\mu\epsilon$)							
	Filler Malzemesi Yerine Karışıma İlave Edilen Çimento Miktarı (%)							Sıcak Karışım
	0	1	2	3	4	5	6	
3	311.55	130.25	62.60	27.73	15.70	9.56	8.20	
7	239.55	69.95	44.27	17.59	8.83	7.98	6.19	
14	134.22	46.23	34.99	14.52	8.59	6.76	5.89	
21	92.53	43.67	31.20	12.95	8.15	6.25	5.29	
28	86.79	38.64	23.57	11.96	8.34	5.28	4.76	
60	88.35	35.17	22.72	11.64	6.92	5.22	4.62	
120	86.29	32.79	21.84	10.82	7.20	5.22	4.48	
365	69.34	28.48	16.21	8.79	6.38	4.51	3.85	

Değişik çimento katkılarında üretilen numuneler, 28 günlük kür süresi sonunda 5, 25 ve 40°C sıcaklıkta denenmiş ve elde edilen sonuçlar bitüm içeriğine göre sırasıyla esneklik modülü değerleri için Tablo 33, 34 ve 35 de, elastik deformasyon değerleri için ise Tablo 36, 37 ve 38 de verilmiştir.

Tablo 33. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için esneklik modülleri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Esneklik Modülü (Mpa)		
		Deney Sıcaklığı		
		5 ⁰ C	25 ⁰ C	40 ⁰ C
4.2	0	3765.2	783.4	227.4
	1	7616.5	4840.8	2174.5
	2	8437.0	6829.0	3706.5
	3	12596	11299	8357.1
	4	17266	14161	9960.6
	5	18899	17006	13393
	6	20910	18493	15519

Tablo 34. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için esneklik modülleri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Esneklik Modülü (Mpa)		
		Deney Sıcaklığı		
		5 ⁰ C	25 ⁰ C	40 ⁰ C
5.2	0	3556.7	625.3	319.4
	1	5258.6	1940.1	835.2
	2	7230.5	4693.2	2551.9
	3	10413	8242.4	5883.8
	4	13350	10959	7768.8
	5	16349	13790	10548
	6	17679	15641	11991
Sıcak Karışım				
5.2	---	8635.6	2782.1	847.4

Tablo 35. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için esneklik modülleri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Esneklik Modülü, (Mpa)		
		Deney Sıcaklığı		
		5 ⁰ C	25 ⁰ C	40 ⁰ C
6.2	0	2947.4	487.9	173.1
	1	3820.9	1464.5	535.2
	2	4729.6	2191.6	1131.3
	3	6934.3	3996.3	2119.5
	4	9565.1	6262.9	3918.2
	5	11029	8176.8	5501.4
	6	12240	9462.7	6696.7

Tablo 36. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için elastik deformasyon değerleri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Elastik Deformasyon, ($\mu\epsilon$)		
		Deney Sıcaklığı		
		5 ⁰ C	25 ⁰ C	40 ⁰ C
4.2	0	15.96	61.50	213.78
	1	7.26	10.34	24.04
	2	6.55	6.81	14.49
	3	4.64	3.87	6.13
	4	2.91	3.46	5.15
	5	2.74	3.01	4.56
	6	2.67	2.79	3.34

Tablo 37. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için elastik deformasyon değerleri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Elastik Deformasyon, ($\mu\epsilon$)		
		Deney Sıcaklığı		
		5 ⁰ C	25 ⁰ C	40 ⁰ C
5.2	0	14.05	82.40	173.10
	1	9.11	23.61	68.59
	2	6.99	8.26	16.67
	3	4.78	5.33	7.84
	4	3.53	4.25	6.64
	5	3.05	3.18	4.78
	6	2.63	3.04	4.29
Sıcak Karışım				
5.2	---	10.71	26.04	57.16

Tablo 38. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde farklı sıcaklık için elastik deformasyon değerleri

Kalıntı Bitüm (%)	Çimento Miktarı (%)	Elastik Deformasyon ($\mu\epsilon$)		
		Deney Sıcaklığı		
		5 ⁰ C	25 ⁰ C	40 ⁰ C
6.2	0	18.69	86.79	270.75
	1	14.02	38.64	171.08
	2	12.63	23.57	59.25
	3	8.36	11.96	35.31
	4	5.82	8.34	13.05
	5	4.60	5.28	10.42
	6	4.35	4.76	7.63

Değişik çimento katkı yüzdelere sahip asfalt emülsiyonu numunelerin, kür süresine bağlı olarak zamanla kaybettikleri nem miktarları belirlenmiştir. Nem kaybı, ilk ağırlıkla tartım yapılan kür süresindeki ağırlık farkının, ilk ağırlığa oranı olarak belirlenmiş olup, üç değişik bitüm içeriği için yapılan gözlemler sırasıyla Tablo 39, 40 ve 41 de verilmiştir.

Tablo 39. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde zamana bağlı olarak numunelerdeki nem kaybı

Kür Süresi (gün)	Toplam Nem Kaybı (%)						
	Çimento Katkı Miktarı (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
3	0.135	0.110	0.095	0.076	0.053	0.036	0.034
12	0.487	0.358	0.312	0.241	0.143	0.158	0.112
21	0.619	0.493	0.398	0.288	0.252	0.251	0.189
30	0.694	0.596	0.512	0.345	0.335	0.310	0.246
60	0.762	0.738	0.645	0.508	0.443	0.447	0.435
90	0.749	0.723	0.637	0.492	0.435	0.441	0.429

Tablo 40. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde zamana bağlı olarak numunelerdeki nem kaybı

Kür Süresi (gün)	Toplam Nem Kaybı (%)						
	Çimento Katkı Miktarı (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
3	0.115	0.086	0.079	0.038	0.027	0.022	0.014
12	0.366	0.311	0.287	0.271	0.226	0.134	0.121
21	0.495	0.491	0.432	0.428	0.388	0.258	0.265
30	0.592	0.547	0.486	0.484	0.451	0.317	0.344
60	0.644	0.575	0.499	0.540	0.514	0.376	0.419
90	0.633	0.566	0.478	0.529	0.505	0.371	0.413

Tablo 41. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde zamana bağlı olarak numunelerdeki nem kaybı

Kür Süresi (gün)	Toplam Nem Kaybı (%)						
	Çimento Katkı Miktarı (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
3	0.098	0.082	0.067	0.044	0.028	0.016	0.009
12	0.310	0.279	0.248	0.222	0.147	0.130	0.118
21	0.414	0.398	0.351	0.309	0.258	0.249	0.257
30	0.516	0.471	0.447	0.413	0.323	0.308	0.341
60	0.575	0.521	0.530	0.524	0.394	0.379	0.418
90	0.566	0.513	0.523	0.516	0.388	0.372	0.412

2.4. Statik Sünme Deneyi

Asfalt emülsiyonu karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı göstereceği performansı değerlendirmek amacıyla Tek Eksenli Statik Sünme Deneyi yapılmıştır. Deney için mineral filler yerine değişik oranlarda çimento (%1 den %6 ya kadar) kullanılarak üç farklı kalıntı bitüm içeriğinde (%4.2, %5.2 ve %6.2) hazırlanan numuneler, çevre koşullarında 28 günlük kür süresinin ardından deneye tabi tutulmuştur. Ayrıca, karşılaştırma yapmak için %5.2 bitüm içeriğinde hazırlanan geleneksel sıcak karışım numuneleri üzerinde de deney yapılmıştır. Deneyler, Bölüm 1.6.3.'de anlatıldığı şekilde tatbik edilmiştir.

Kür süresi sonunda numuneler, 25°C sıcaklıkta, 3600 sn boyunca 150 kPa'lık basınç yüküne maruz bırakılmış ve 3600 sn boyunca oluşan deformasyonlar ölçülerek kaydedilmiştir. 3600 sn yüklü sürenin ardından numuneler, 3600 sn boyunca da yüksüz bırakılmış ve bu süre sonunda geriye dönen deformasyon miktarları ölçülmüştür. Ayrıca her numune için ölçülen deformasyon değerlerine ilişkin Sünme Modülü değerleri de hesaplanmıştır.

Numuneler üzerine uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon değerlerine ilişkin sonuçlar, kalıntı bitüm içeriğine göre sırasıyla Tablo 42, 43 ve 44 de özet olarak topluca verilmiştir. Sıcak karışım numunelerinden elde edilen deney sonuçları ise Tablo 43 içersinde verilmiştir.

Numunelerin ölçülen deformasyon değerleri doğrultusunda hesaplanan Sünme Modülü değerlerine ilişkin sonuçlar da yine kalıntı bitüm içeriğine göre sırasıyla Tablo 45, 46 ve 47 de verilmiştir. Sıcak karışım numunelerine ilişkin hesaplanan Sünme Modülü değerleri ise Tablo 46 içersinde yer almaktadır.

Tablo 42. % 4.2 bitüm içeriğinde statik sünme deformasyonu (10^{-6} xmm/mm)

Süre (sn)	Statik Sünme Deformasyonu						
	Çimento Katkı Oranları (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
1	984	778	661	592	629	583	516
3	1063	954	872	778	812	716	630
10	1237	1152	1138	936	894	822	707
30	1385	1333	1232	1144	1059	983	840
100	1569	1416	1387	1318	1136	1025	880
1000	2089	1858	1749	1560	1218	1107	907
3600	2399	2043	1956	1604	1272	1153	925
GD	1788	1499	1429	1117	876	792	688

GD : Geri Dönen Deformasyon

Tablo 43. % 5.2 bitüm içeriğinde statik sünme deformasyonu (10^{-6} xmm/mm)

Süre (sn)	Statik Sünme Deformasyonu							
	Çimento Katkı Oranları (%)							Sıcak Karışım
	0	1	2	3	4	5	6	
1	1012	885	783	734	689	608	545	761
3	1259	1041	994	882	865	743	582	943
10	1686	1360	1240	1129	1040	848	698	1264
30	2040	1625	1341	1243	1186	944	795	1486
100	2432	1899	1573	1441	1367	1015	842	1735
1000	3331	2316	1906	1615	1503	1211	929	2151
3600	3677	2476	2145	1688	1542	1282	967	2349
GD	3111	1960	1647	1249	1068	853	640	2023
GD : Geri Dönen Deformasyon								

Tablo 44. % 6.2 bitüm içeriğinde statik sünme deformasyonu (10^{-6} xmm/mm)

Süre (sn)	Statik Sünme Deformasyonu							
	Çimento Katkı Oranları (%)							Sıcak Karışım
	0	1	2	3	4	5	6	
1	1170	926	889	842	756	684	658	
3	1530	1130	1072	998	923	861	813	
10	2120	1453	1325	1190	1086	988	926	
30	2663	1803	1582	1325	1246	1166	1044	
100	3345	2189	1866	1499	1393	1297	1159	
1000	4831	2842	2309	1816	1638	1374	1236	
3600	5828	3126	2522	1964	1699	1405	1266	
GD	5259	2612	1982	1760	1293	952	884	
GD : Geri Dönen Deformasyon								

Tablo 45. % 4.2 kalıntı bitüm içeriğinde statik sünme modülleri

Süre (sn)	Statik Sünme Modülü (MPa)						
	Çimento Katkı Oranları (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
1	159.6	204.4	243.6	270.3	252.8	267.6	309.6
3	147.7	166.7	184.6	205.7	195.8	217.9	254.0
10	126.9	138.0	141.5	170.9	177.9	189.8	226.3
30	113.4	119.3	130.7	139.9	150.1	158.7	190.5
100	100.1	112.3	116.1	121.4	140.0	152.2	181.8
1000	75.2	85.6	92.1	102.6	130.5	140.9	176.4
3600	65.4	77.8	82.3	99.8	125.0	135.3	173.0

Tablo 46. % 5.2 kalıntı bitüm içeriğinde statik sünme modülleri

Süre (sn)	Statik Sünme Modülü (MPa)							Sıcak Karışım
	Çimento Katkı Oranları (%)							
	0	1	2	3	4	5	6	
1	154.2	178.5	203.1	213.9	223.5	263.0	295.4	208.9
3	123.9	151.8	160.0	178.0	178.1	215.3	276.6	168.6
10	92.5	116.2	128.2	139.1	148.1	188.6	230.7	125.8
30	76.5	97.2	118.6	126.3	129.8	169.5	207.7	107.1
100	64.1	83.2	101.1	109.0	112.7	157.6	191.2	91.6
1000	46.8	68.2	83.4	97.2	102.5	132.1	173.3	73.9
3600	42.4	63.8	74.1	93.0	99.9	124.8	166.5	67.7

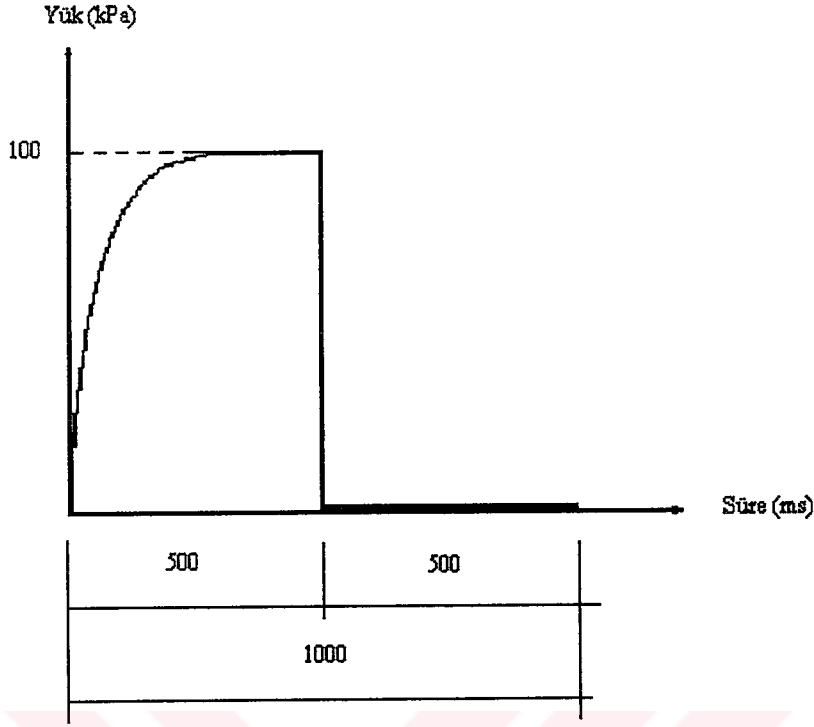
Tablo 47. % 6.2 kalıntı bitüm içeriğinde statik sünme modülleri

Süre (sn)	Statik Sünme Modülü (MPa)						
	Çimento Katkı Oranları (%)						
	0	1	2	3	4	5	6
1	135.0	169.5	180.0	190.0	212.9	232.5	241.6
3	103.3	138.9	149.3	160.3	174.4	184.7	195.6
10	74.5	108.1	120.8	134.5	148.3	160.9	171.7
30	59.3	87.1	101.1	120.8	129.2	136.4	152.3
100	47.2	71.7	85.7	106.7	115.6	122.6	137.2
1000	32.7	55.2	69.3	88.1	98.3	115.7	128.6
3600	27.1	50.2	63.4	81.5	94.8	113.2	125.6

2.5. Tekrarlı Sünme Deneyi

Bu deney, tekrarlı yükler altında asfalt karışımların tekerlek izi oluşumu kalıcı deformasyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır [95]. Deney için değişik çimento katkı oranlarında %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde hazırlanan numuneler çevre koşullarında 28 günlük kür süresinin ardından deneye tabi tutulmuşlardır. Numuneler, 25⁰C sıcaklıkta, 1000 ms vuruş periyodu boyunca 500 ms yüklü, 500 ms yüksüz olmak üzere 100 kPa'lık tek eksenli basınç yüküne 12.5 saat (45 000 yük tekrarı) boyunca maruz bırakılmıştır. Deneylerde tekrarlı yükün bir vuruş periyodu için uygulaması Şekil 17 de verilmiştir.

Deneylerde, uygulanan her yük tekrarından sonra numune içersinde oluşan kalıcı deformasyonlar ölçülerek kaydedilmiştir. Asfalt emülsiyonu karışım numuneleriyle aynı bitüm içeriğinde hazırlanan sıcak karışım numuneleri de aynı koşullarda denenmiş, elde edilen sonuçlar Tablo 48 de özet olarak topluca verilmiştir.



Şekil 17. Deneyde kullanılan tekrarlı yük uygulaması

Tablo 48. Değişik çimento katkı oranlarında tekrarlı sünme deformasyonu (10^{-6} mm/mm)

Yük Tekerrür Sayısı	Tekrarlı Sünme Deformasyonu ($\mu\epsilon$)							
	Çimento Katkı Oranları (%)							Sıcak Karışım
	0	1	2	3	4	5	6	
1	424	650	572	352	276	159	167	429
5	921	1024	956	537	411	274	298	684
10	1291	1245	1145	684	565	318	332	877
50	2390	1646	1497	891	628	441	488	1212
100	2971	1752	1605	1014	709	503	536	1529
501	4572	2121	1785	1165	822	600	635	2043
1000	5474	2656	1949	1217	874	636	674	2754
5011	8946	3167	2148	1296	966	707	751	3861
10000	12275	3413	2384	1328	983	733	782	4515
44100	çöktü	4216	2502	1412	1055	787	839	5426

2.6. Su Hasarı Deneyi

Su hassasiyeti ve soyulma arasında yakın bir ilişki vardır. Soyulma, öncelikli olarak suyun etkisiyle asfalt çimentosu kohezyon kuvvetinin azalması ya da asfalt çimentosu ile agrega arasındaki adeziv bağın bir bozulmasıdır. Asfalt emülsiyonu karışımlarda, bünyede bulunan su nedeniyle karışımın kür olma tamamlanmadan suya maruz kalması durumunda bozulabileceği dikkate alındığında bu deneyin önemi daha da artmaktadır. Su hasarının değerlendirilmesinde kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bu çalışmada, suya maruz bırakılmış (koşullu) numunelerden elde edilen esneklik modülü değerlerinin, suya maruz bırakılmadan önceki (koşulsuz) esneklik modülü değerlerine oranlanmasını esas alan yöntem kullanılmıştır [91].

Deneyleerde kullanılmak üzere %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde, her çimento yüzdesinde üçer adet numune hazırlanmış ve üç gün boyunca çevre koşullarında küre bırakılmıştır. Asfalt emülsiyonu karışımların erken yaşta suya maruz kalmaları durumunda bozulabileceklerinden yola çıkarak; çimentonun, bu durumdaki etkisini gözlemlemek amacıyla üçüncü gün sonunda numuneler 50⁰C sıcaklıktaki suya maruz bırakılmak suretiyle koşullandırılmıştır. Ancak, asfalt emülsiyonu çimento katkısız numuneler, suya maruz bırakıldıktan sonra (6. saat sonunda) dağılmıştır. Çimento katkılı numunelerin 24 saat boyunca koşullandırılmasına devam edilmiş, bu süre sonunda sudan çıkarılan numuneler 24 saat 25⁰C'lik ısı kabininde bekletildikten sonra esneklik modülü için deneye tabi tutulmuştur.

Deneyleerde yükleme periyodu 1000 ms, vuruş hızı ise 40 ms olarak alınmıştır. Asfalt emülsiyonu karışım numuneleriyle aynı bitüm içeriğine sahip geleneksel sıcak karışım numuneleri de aynı deney koşullarında denenmiştir. Deneyleerden elde edilen esneklik modüllerine ilişkin sonuçlar Tablo 49 da, elastik deformasyon değerlerine ilişkin sonuçları ise Tablo 50 de özet olarak topluca verilmiştir.

Tablo 49. Değişik çimento katkı oranlarında su hasarı deney sonuçları
(esneklik modülü)

Çimento Katkı Miktarı (%)	Esneklik Modülü (Mpa)		
	Kuru Koşul (Koşulsuz)	Islak Koşul (Koşullu)	Oran
0	202.9	--	--
1	913.0	281.0	0.31
2	2700.3	1243.6	0.46
3	4608.4	3917.2	0.85
4	7964.4	7238.1	0.91
5	8891.7	8146.9	0.92
6	9509.0	8938.5	0.94
Sıcak Karışım	2633.2	2396.2	0.91

Tablo 50. Değişik çimento katkı oranlarında su hasarı deney sonuçları
(elastik deformasyon) (10^{-6} mm/mm)

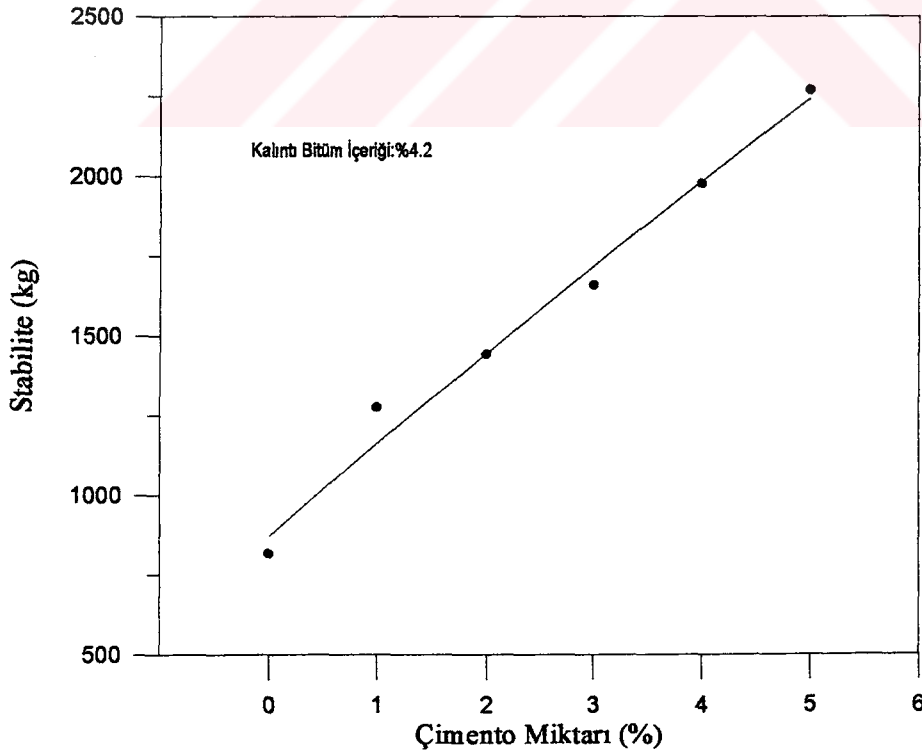
Çimento Katkı Miktarı (%)	Elastik Deformasyon ($\mu\epsilon$)		
	Kuru Koşul (Koşulsuz)	Islak Koşul (Koşullu)	Oran
0	187.26	--	--
1	47.83	142.94	2.99
2	15.13	32.90	2.17
3	8.83	10.44	1.18
4	5.30	5.74	1.08
5	4.56	4.89	1.07
6	4.26	4.57	1.07
Sıcak Karışım	26.11	28.54	1.09

3. BULGULAR VE İRDELEME

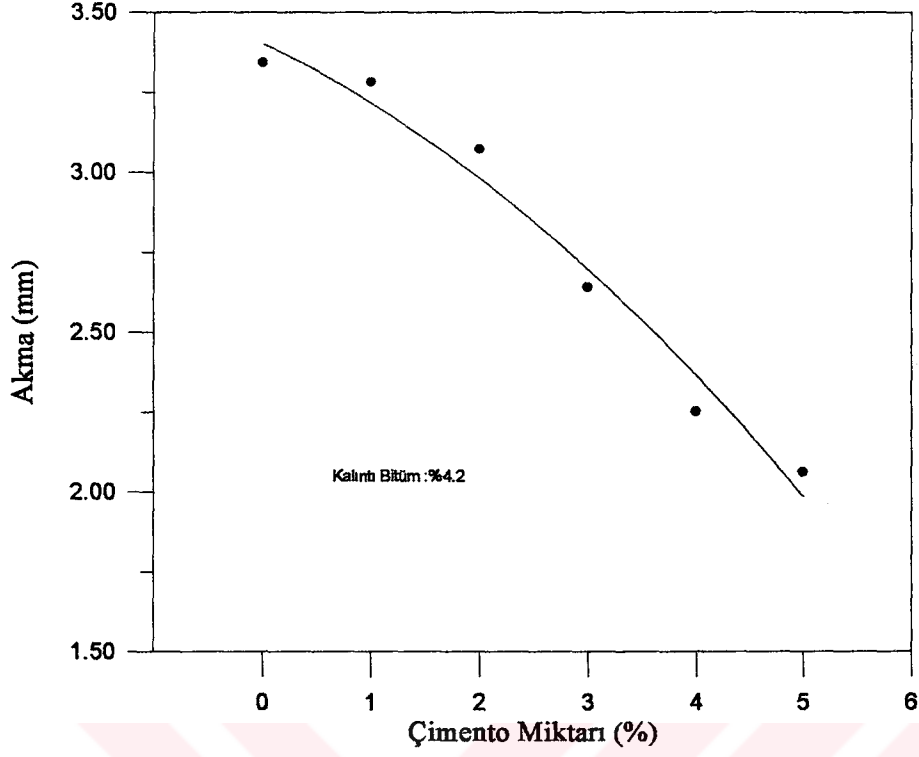
Bu bölümde, çeşitli değişkenlere göre uygulanan performans deneylerinden elde edilen bulgular grafik olarak verilmekte ve bu grafikler doğrultusunda deney sonuçlarına ilişkin irdeleme ve değerlendirmeler yapılmaktadır.

3.1. Marshall Deneyinden Elde Edilen Bulgular

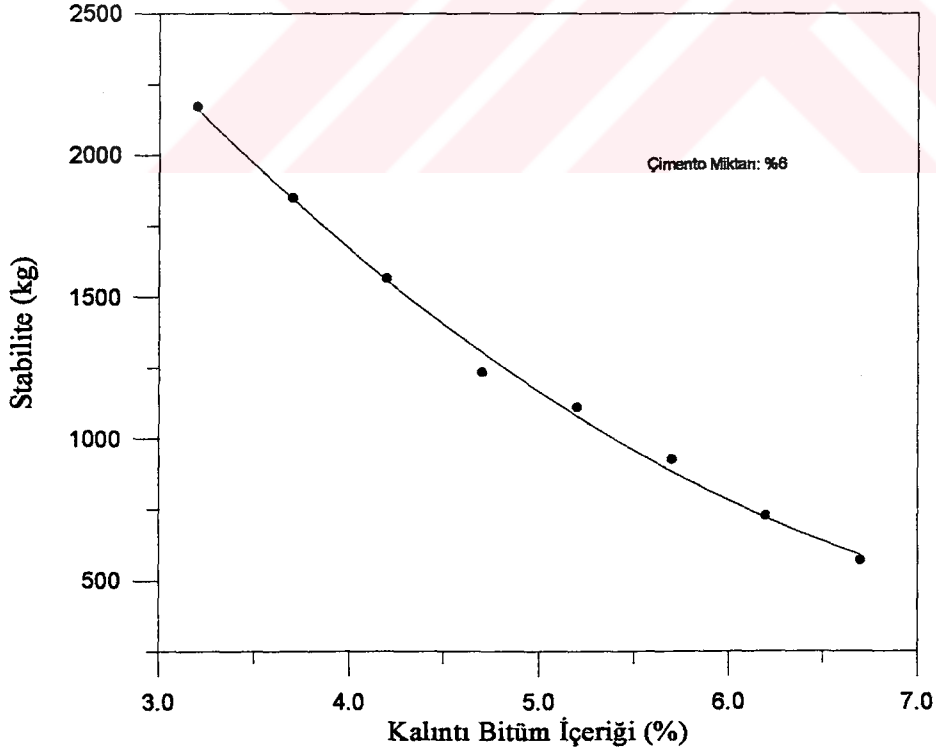
Çimento katkı miktarının, stabilite ve akma değerleri üzerindeki etkisini ortaya koymak için %3 su içeriğinde ve %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde hazırlanarak 3 günlük kür süresinin ardından oda sıcaklığında denenen numunelerden elde edilen sonuçlar Şekil 18 ve 19 da verilmiştir. Asfalt emülsiyonu karışımında, kalıntı bitüm içeriğindeki değişimin etkisini gözlemlemek üzere, %6 çimento katkı miktarında hazırlanarak 60°C de Marshall deneyine tabi tutulan numunelerden elde edilen stabilite ve akma değerlerine ilişkin veriler ise Şekil 20 ve 21 de verilmiştir.



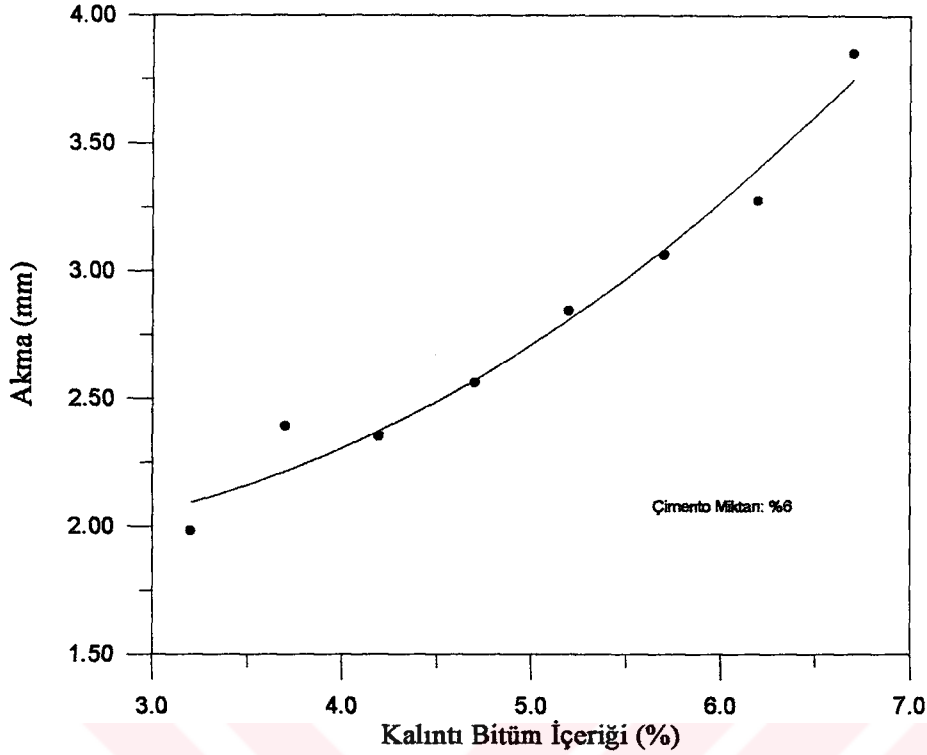
Şekil 18. Çimento katkı miktarına göre Marshall stabilitesindeki değişim



Şekil 19. Çimento katkı miktarına göre akma miktarındaki değişim



Şekil 20. Kalıntı bitüm içeriğine göre stabilite değerlerinin değişimi



Şekil 21. Kalıntı bitüm içeriğine göre akma miktarının değişimi

Şekil 18 ve 19 da verilen grafiklerden de görüleceği gibi, karışıma ilave edilen çimento miktarındaki artışa bağlı olarak stabilite değerlerinde doğrusal bir artış gözlenmiştir. Akma değerlerinde ise, çimento katkısındaki artışa bağlı olarak düşme olduğu görülmüştür. Bu veriler, çimento artışına bağlı olarak karışımın rijitleşme eğilimine girdiği anlamına gelmektedir.

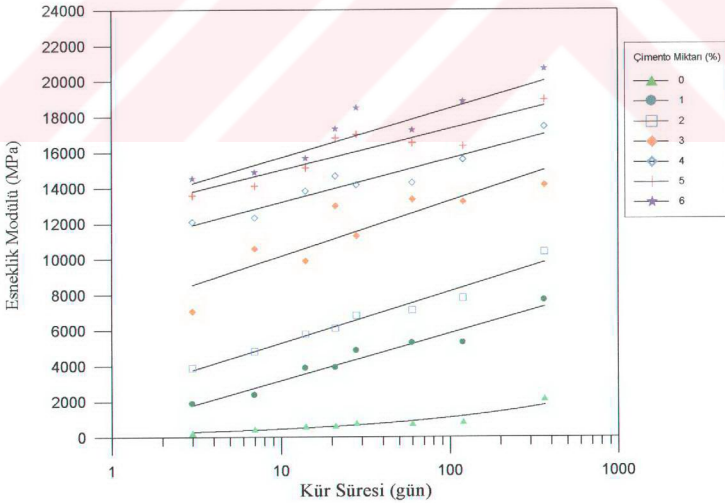
Şekil 20 ve 21 de verilen eğrilerden, kalıntı bitüm içeriği arttıkça, stabilite değerlerinin bir pik nokta yapmadan sürekli olarak düştüğü, akma değerlerinin ise, bitüm miktarına bağlı olarak düzgün şekilde arttığı anlaşılmaktadır.

Akma, beton asfaltların plastiklik ve esneklik özelliklerini yansıtan bir değerdir. Marshall numunelerinin kırıldığı yüke tekabül eden deformasyonu temsil eden akmanın değeri sıkışmış karışımların iç sürtünmesinin bir ölçüsüdür ve akma değeri ile iç sürtünme arasında doğrusal ters bir ilişki vardır. Yollar Fenni Şartnamesinde sıcak asfalt betonu için akma değeri, en düşük 2 mm, en yüksek 4 mm ile sınırlandırılmıştır. Şartnamelerdeki en yüksek akma değeri, karışımın plastikliğini ve kullanılabilir en yüksek bağlayıcı yüzdesini, en alt değeri ise karışımın gevrekliğini ve dayanıklılığını kontrol eder [70].

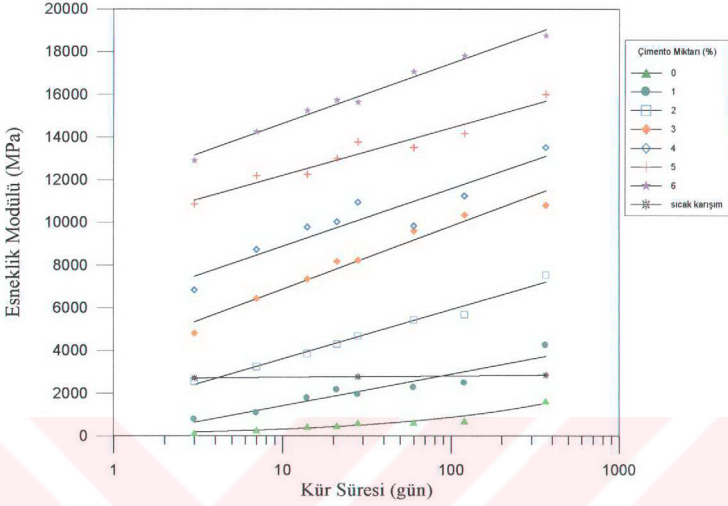
3.2. Dolaylı Çekme Deneyinden Elde Edilen Bulgular

Bir yıl boyunca değişik kür sürelerinde 25⁰C sıcaklıkta gerçekleştirilen Dolaylı Çekme Deneyi'nden elde edilen sonuçlar, kalıntı bitüm içeriğine göre sırasıyla Şekil 22, 23 ve 24 de grafik olarak verilmiştir. Sıcak karışım numunelerine ilişkin sonuçları ise Şekil 23 de; aynı bitüm içeriğindeki soğuk karışım numuneleri ile birlikte verilmiştir. Bu şekillerde kür süresini gösteren yatay eksen logaritmik olarak seçilmiştir. Bunun sebebi numunelerdeki esneklik modülü artışının, bir yıllık bir süre göz önüne alındığında ilk haftalardaki artışın çimento miktarına bağlı olarak ne kadar hızlı geliştiğinin daha iyi görülebilmesi içindir.

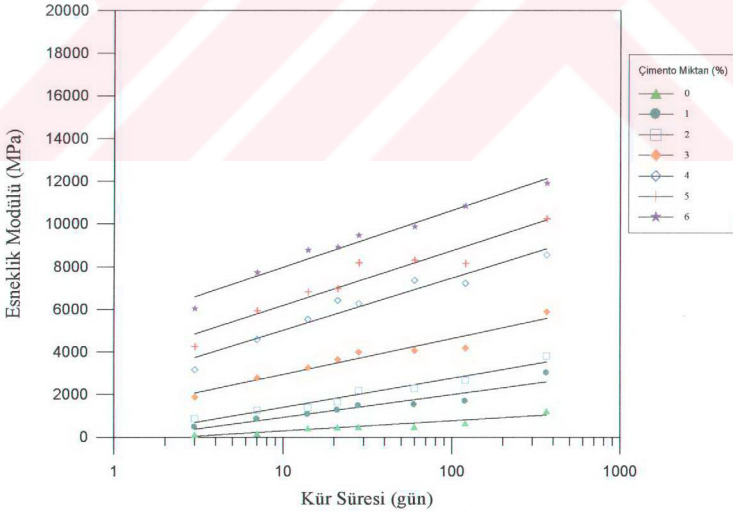
Kalıntı bitüm içeriğine bağlı olarak her çimento yüzdesinde esneklik modülü ile kür süresi arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler de, çimento katkı miktarına göre sırasıyla Şekil 25-31 de verilmiştir. Bu grafiklerde ise, kür süresini gösteren yatay eksen bu kez normal ölçekte alınmıştır. Şekillerden de görüleceği üzere, her çimento katkısı için, bitüm içeriğindeki değişimin karışım davranışı üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.



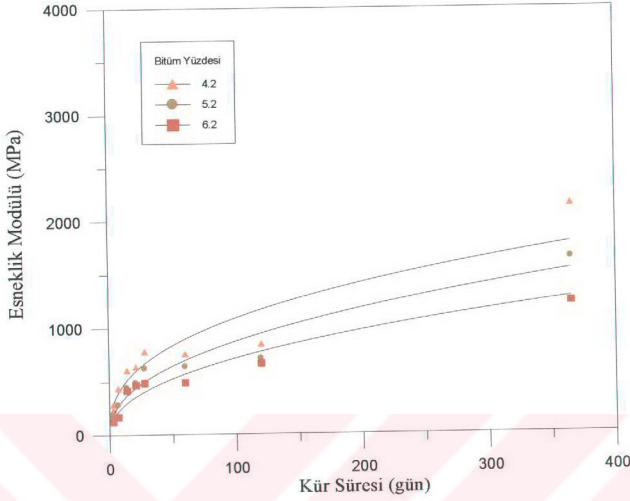
Şekil 22. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento miktarına göre esneklik modülünün zamanla değişimi



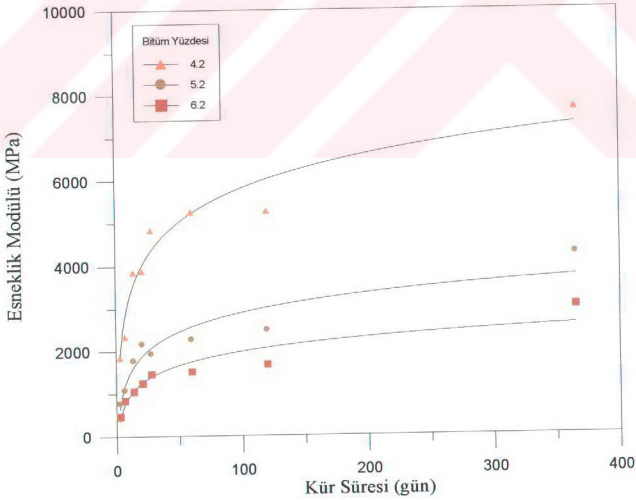
Şekil 23. %5.2 kalınlı bitüm içeriğinde çimento miktarına göre esneklik modülünün zamanla değişimi



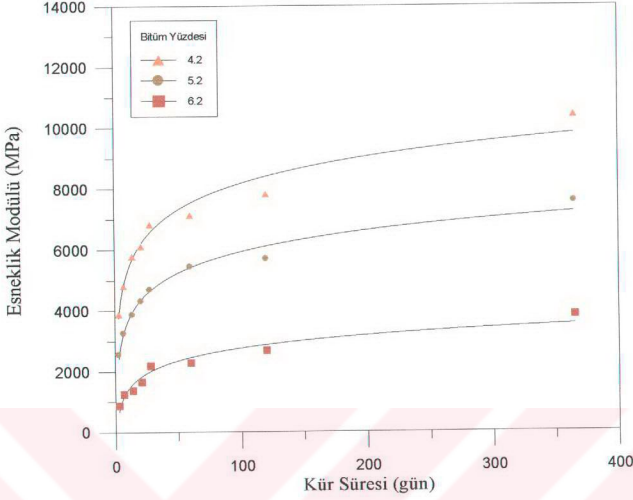
Şekil 24. %6.2 kalınlı bitüm içeriğinde çimento miktarına göre esneklik modülünün zamanla değişimi



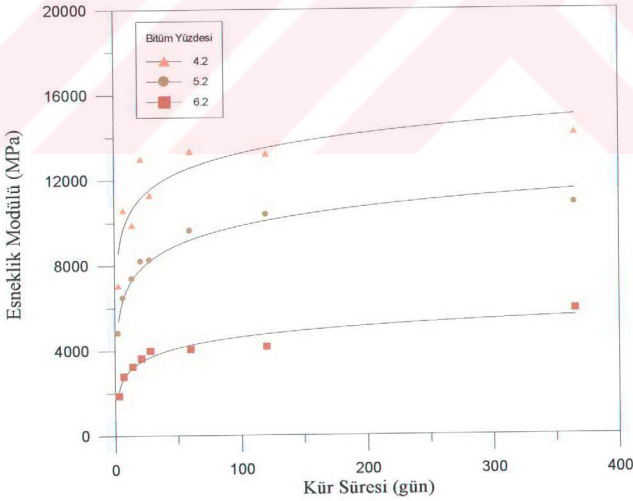
Şekil 25. Çimento katkısız numunelerin bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi



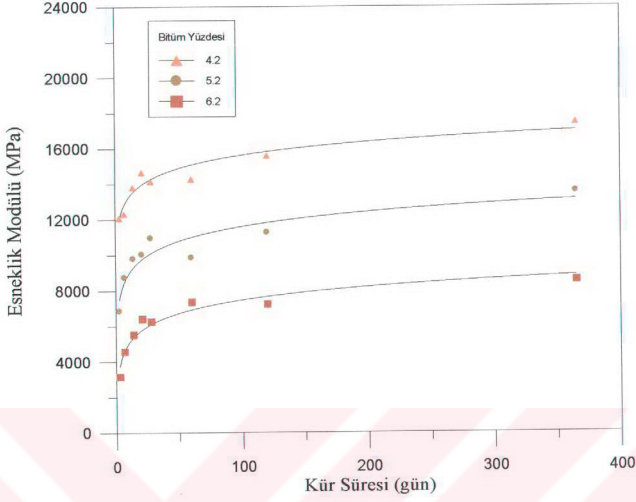
Şekil 26. %1 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi



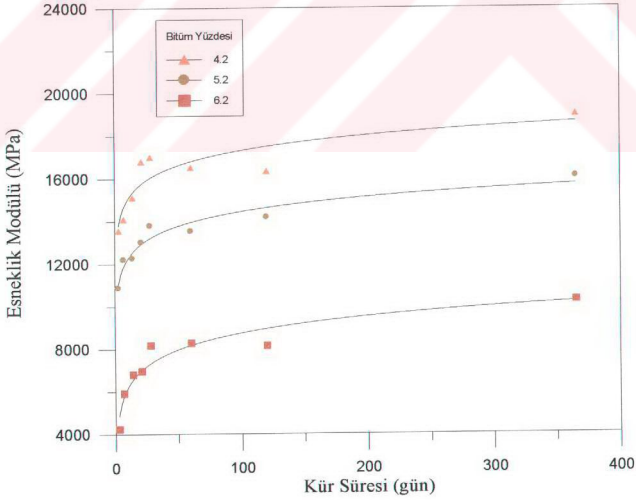
Şekil 27. %2 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi



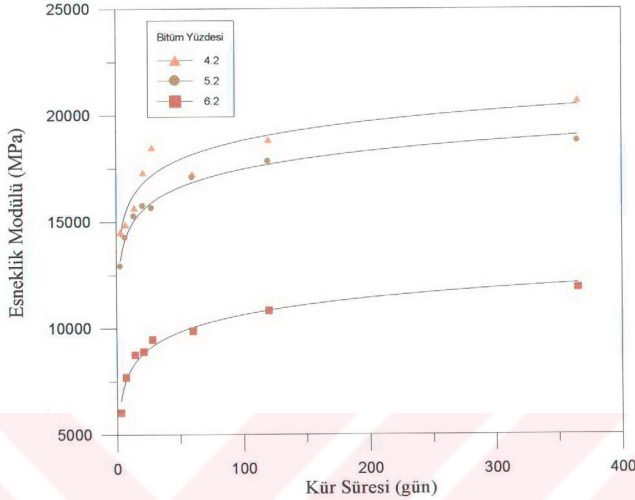
Şekil 28. %3 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi



Şekil 29. %4 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi



Şekil 30. %5 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi



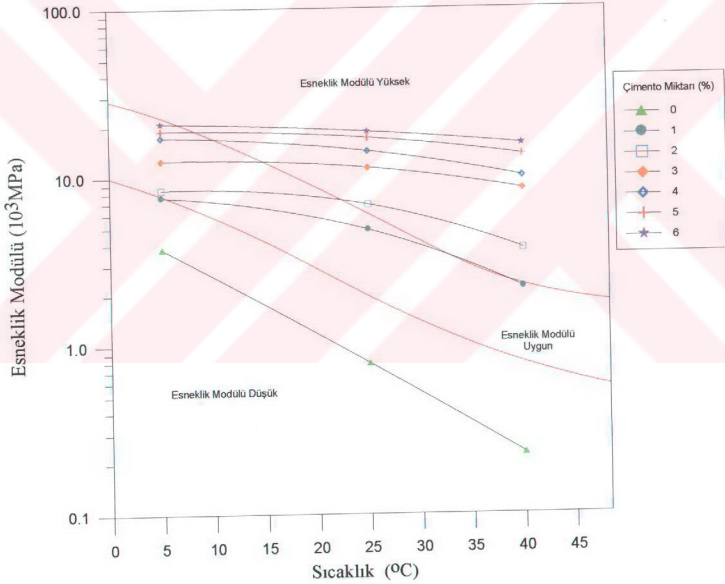
Şekil 31. %6 çimento katkısında bitüm içeriğine göre esneklik modülünün zamanla değişimi

Yukarıda verilen şekillerden görüleceği gibi asfalt emülsiyonu karışım numuneleri zamana bağlı olarak bir yıl boyunca sürekli bir artış göstermektedirler. Numunelerin kür süresine bağlı olarak gerçekleşen bu artış, ilk haftalar içerisinde hızlı bir şekilde olmakta, ilerleyen aylarda giderek daha az olmakla birlikte bir yıl boyunca devam etmektedir. Karışıma ilave edilen çimento miktarına bağlı olarak, numunelerde daha 3. günden itibaren çok hızlı bir esneklik modülü artışı olmakta, bu artış ilerleyen aylarda daha az olmakla birlikte yine bir yıl boyunca devam etmektedir. Karışımındaki bitüm miktarından bağımsız olarak, en yüksek esneklik modülü artışı, hem ilk günlerde hem de bir yıl sonunda %6 çimento katkısında elde edilmiştir. Diğer yandan sıcak karışım numunelerinde ise, zamana bağlı olarak dikkate değer bir artış olmadığı gözlenmiştir.

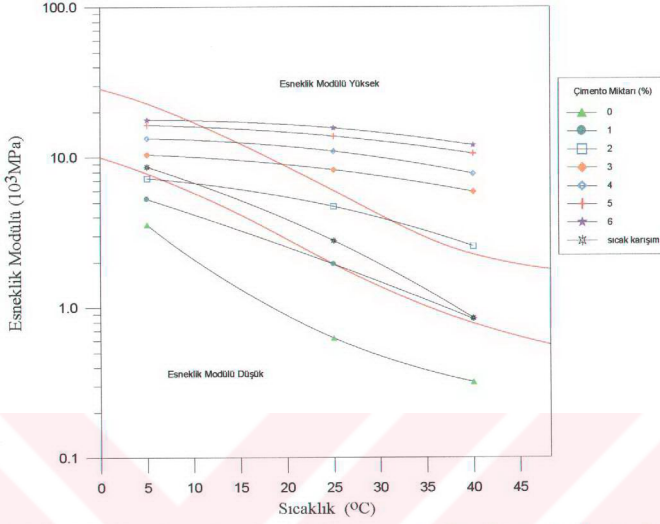
Üç farklı bitüm içeriğine sahip asfalt emülsiyonu karışımlarda, çimento katkı düzeyinden bağımsız olarak, karışımındaki bitüm içeriği arttıkça, karışımların hem ilk günlerdeki esneklik modülleri, hem de bir yıl sonundaki esneklik modüllerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu durumda, bitüm miktarı arttıkça, buna bağlı olarak asfalt emülsiyonu karışımının esneklik modülünün düştüğü (yumuşadığı), karışıma ilave edilen çimento katkı

miktarı artırıldığında ise, katkı miktarına bağlı olarak esneklik modülünün arttığı; yani karışımın rijitleştiği anlaşılmaktadır.

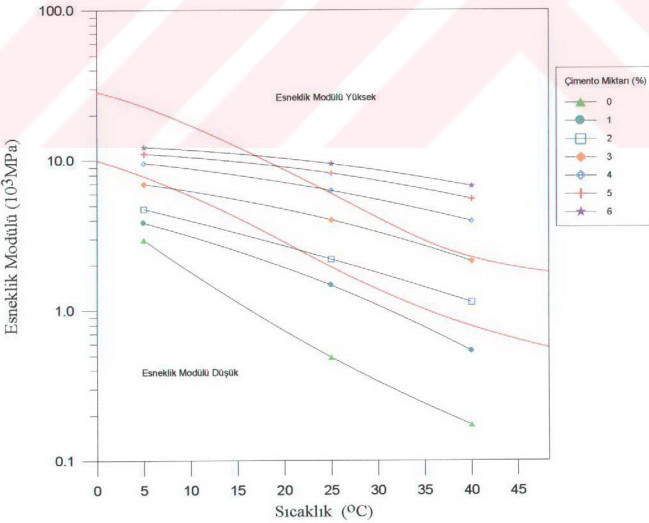
Asfalt emülsiyonu karışımların sıcaklık hassasiyetini belirlemek amacıyla aynı koşullarda, yine değişik çimento katkılarında üç değişik bitüm içeriğinde üretilen ve 28 gün boyunca kür edilen numuneler üç farklı sıcaklıkta (5, 25 ve 40°C) denenmiştir. Bu deneylerden elde edilen bulgular, AAMAS'de [94] sıcak karışımlar için esneklik modülü sınırlarını gösteren nomoğraf üzerine işlenerek bitüm içeriğine göre sırasıyla Şekil 32-34'de verilmiştir. Ayrıca, deney yapılan her sıcaklık derecesinde, çimento miktarına göre esneklik modülündeki değişimi ortaya koyan ilişkiler Şekil 35-37'de verilmiştir.



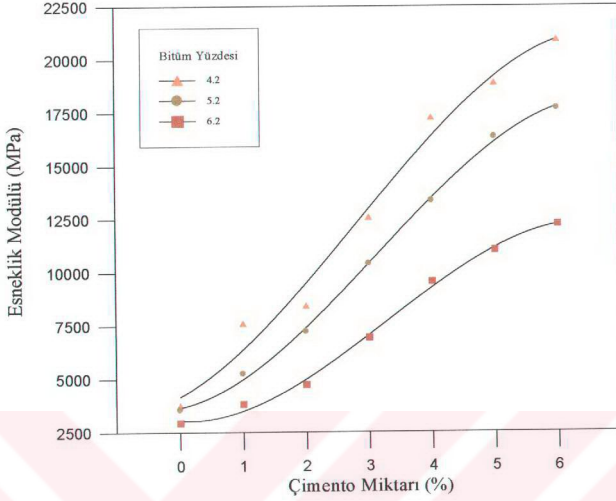
Şekil 32. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık ile esneklik modülü arasındaki ilişki



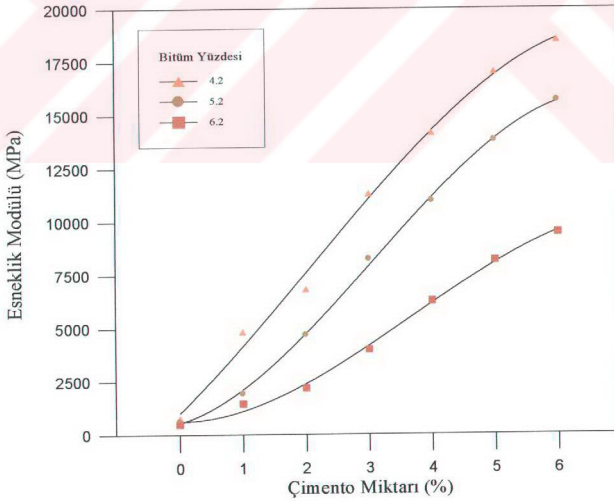
Şekil 33. %5.2 kalınlı bitüm içeriğinde çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık ile esneklik modülü arasındaki ilişki



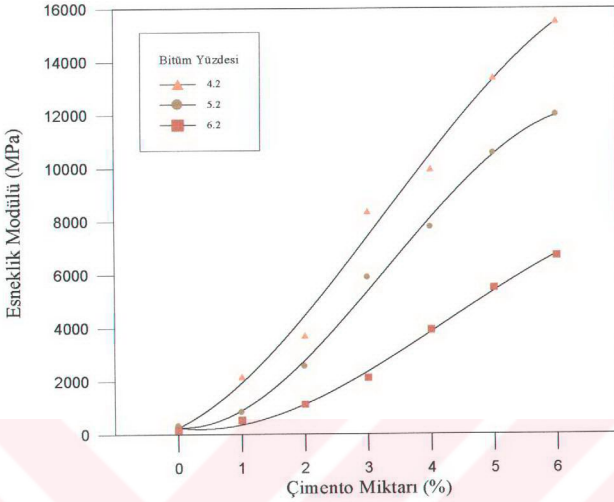
Şekil 34. %6.2 kalınlı bitüm içeriğinde çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık ile esneklik modülü arasındaki ilişki



Şekil 35. 5°C sıcaklıkta bitüm içeriğine bağlı olarak çimento miktarı ile esneklik modülü arasındaki ilişki



Şekil 36. 25°C sıcaklıkta bitüm içeriğine bağlı olarak çimento miktarı ile esneklik modülü arasındaki ilişki



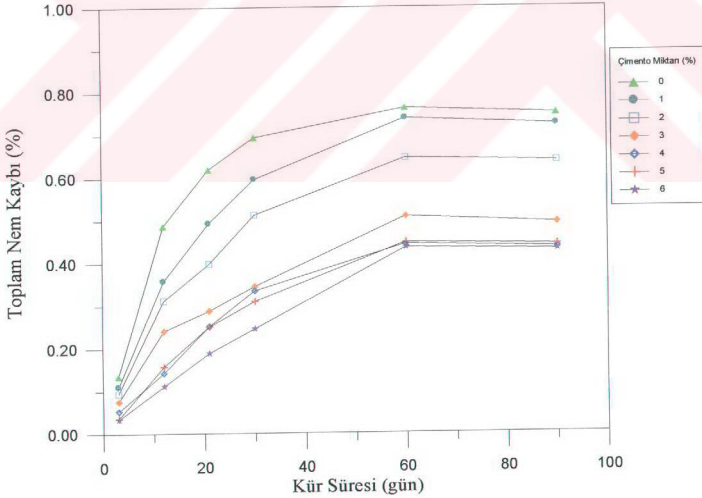
Şekil 37. 40°C sıcaklıkta bitüm içeriğine bağlı olarak çimento miktarı ile esneklik modülü arasındaki ilişki

Şekil 33’de, katkısız sıcak karışımın, sıcaklık hassasiyeti çok açık bir biçimde görülmekte olup; esneklik modülünün, sıcaklık arttıkça üstel eğri konumuna uygun olarak süratle azaldığı görülmektedir. Asphalt emülsiyonu karışımlarda ise, Şekil 32 – 34’den izlenebileceği gibi; katkısız ve düşük çimento katkılı asphalt emülsiyonu karışımlarda da benzer bir durum görülmesine rağmen çimento oranı arttıkça esneklik modülü de artmakta; sıcaklık karşısındaki düşüş ise oldukça az olmaktadır. Sonuç olarak Emülsifiye Asphalt Betonu’nda çimento oranı, Esneklik Modülünü arttırmakta ve sıcaklığa duyarlılığı azaltmaktadır. Asphalt emülsiyon karışımının yüksek çimento katkılarındaki esneklik modülü değerleri, AAMAS’de [94] sıcak karışımlar için verilen nomoğrafta 5°C’deki esneklik modülü sınırları (yaklaşık, 7.7×10^3 ila 23×10^3 MPa) arasında kalmaktadır. Sıcaklık arttıkça, sınırlar aşılsa da, bu durum bir avantaj olarak görülmektedir. Çünkü, yüksek sıcaklıklarda esneklik modülü düşük olan sıcak karışımların, ağır trafik yükü altında tekerlek izi oluşma riskinin yüksek olduğu bilinmektedir. Bitümlü karışımların performansı ile ilgili kritik koşullar 30°C – 60°C arasındaki yüksek servis sıcaklıkları ile 5°C’nin altındaki düşük servis sıcaklıklarıdır. Yüksek sıcaklıktaki sorunlar deformasyon ve yağlanma, düşük sıcaklıklardaki ise çatlama ve yüzeyin aşınmasıdır.

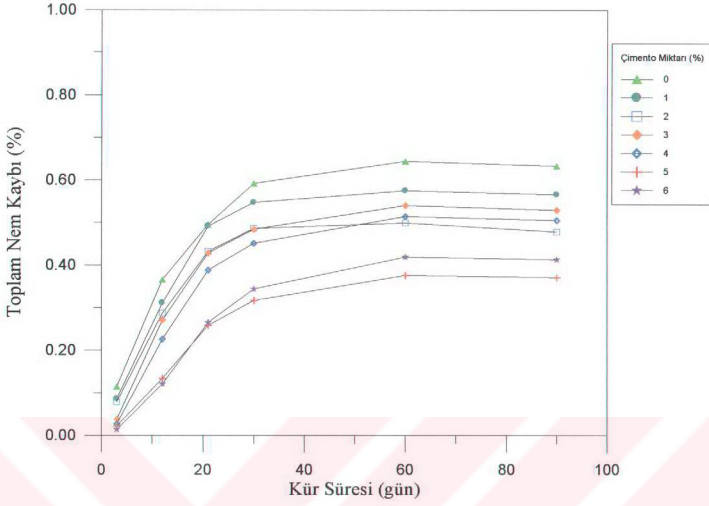
Yine Şekil 32 – 34’de verilen eğriler incelendiğinde, asfalt emülsiyonu karışımlarda bitüm içeriğinin de, çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu; çimento katkı miktarının artmasıyla birlikte karışımın sıcaklık hassasiyetinin azaldığı, çimento katkı miktarına bağlı olarak bitüm içeriğinin, sıcaklık hassasiyetini artırdığı gözlenmiştir.

Şekil 35 – 37’den görüleceği gibi, her üç sıcaklıkta da, çimento miktarına bağlı olarak esneklik modülünün bitüm içeriğine göre değiştiği görülmektedir. Çimento miktarı arttıkça, bitüm içeriğinden kaynaklanan değişimin daha belirgin olduğu eğrilerden izlenebilmektedir.

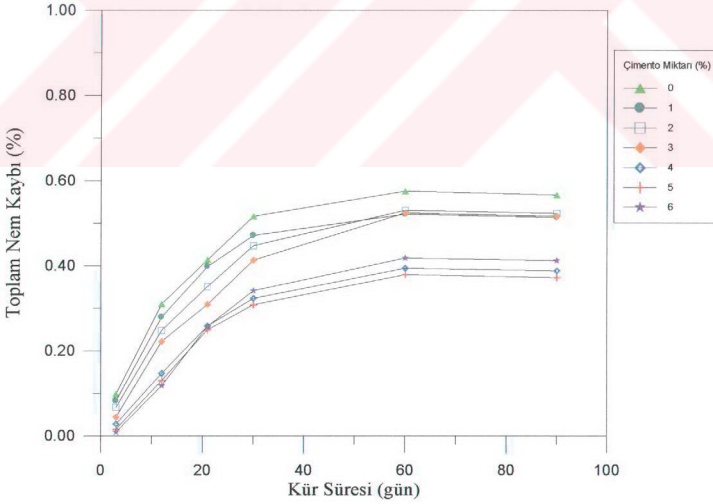
Çalışmada, asfalt emülsiyonu karışım numunelerinin, çimento katkı miktarına bağlı olarak zamanla nem kayıpları da belirlenmiştir. Üç değişik bitüm içeriği için kür süresine göre yüzde olarak belirlenen toplam nem kaybına ilişkin bulgular sırasıyla Şekil 38, 39 ve 40 da verilmiştir.



Şekil 38. %4.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişen çimento katkı miktarına bağlı olarak kür süresine göre toplam nem kaybı



Şekil 39. %5.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişen çimento katkı miktarına bağlı olarak kür süresine göre toplam nem kaybı



Şekil 40. %6.2 kalıntı bitüm içeriğinde değişen çimento katkı miktarına bağlı olarak kür süresine göre toplam nem kaybı

Yukarıda verilen nem kaybına ilişkin grafiklerden de görüleceği gibi, numunelerin üretiminden itibaren ilk iki-üç hafta içerisinde bünyeden önemli bir su çıkışı olmakta, ilerleyen haftalarda yavaşlamakta ve 60 günlük kür süresi sonunda su çıkışı durmaktadır. 90 günlük ölçümlerde ise, numunelerin havadan nem kaptığı gözlenmiştir. Bu süre boyunca numunelerin kaldığı ortamın nem oranı ortalama %73 olarak kaydedilmiştir.

Çimento artışına bağlı olarak nem çıkışının, genel olarak, daha yavaş geliştiği ve nihai olarak daha az olduğu söylenebilir. Bu da, çimentonun bünyedeki suyla hidratasyona girerek mevcut suyu kullandığı anlamına gelmektedir. Ancak, çimento miktarı ile nem kaybı arasında tamamen doğrusal bir ilişki olduğu ortaya çıkmış değildir. Ayrıca, bitüm içeriği arttıkça, nem çıkışının yavaşladığı ve daha az olduğu grafiklerden görülmektedir. Karışım bünyesindeki nem tamamen kaybolmamaktadır. Nem kaybı, kür süresine bağlı olarak esneklik modülündeki artışla birlikte değerlendirildiğinde, numunelerdeki modül artışının, nem kaybı durduktan sonra da devam ettiği görülmüştür.

3.3. Esneklik Modülü İçin Matematik Model Kurulması

3.3.1. Zamana Bağlı Model

Üç ayrı bitüm içeriği ve her bitüm içeriği için çimentosuz ve 6 farklı çimento içeriğinde hazırlanarak 1 yıl boyunca değişik kür sürelerinde emülsifiye asfalt numunelerine uygulanan Dolaylı Çekme Deneyinden elde edilen sonuçlardan faydalanılarak Esneklik Modülünün bulunmasını esas alan matematik model kurulmuştur.

Numunelerin kür süresine bağlı olarak esneklik modüllerindeki değişimi gösteren deney sonuçları Şekil 22 – 31 de verilmiştir. Bu şekillerde verilen eğriler incelendiğinde aşağıdaki şekilde bir matematiksel ilişkinin var olduğu anlaşılmaktadır.

$$M_{R(Z)} = \alpha_1 + (\beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2) * \ln(X_3) + \beta_3 * X_1 + \beta_4 * X_2 \quad (21)$$

Burada;

$M_{R(Z)}$: Esneklik Modülü (MPa)

X_1 : Bitüm içeriği (%)

X_2 : Çimento katkı oranı (%)

X_3 : Kür süresi (gün)

$\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: Sabit terim ve katsayılar

Bağımlı değişken esneklik modülü ($M_{R(z)}$) ile bağımsız değişkenler olan bitüm içeriği, çimento miktarı ve kür süresi arasındaki korelasyon matrisi Tablo 51’de verilmiştir. Matematik model çalışmasında STATISTICA paket programı kullanılmış ve Quasi-Newton yöntemine göre çözüm yapılarak modeldeki sabitler ve regresyon analizine ilişkin istatistikler Tablo 52’de verilen şekilde bulunmuştur.

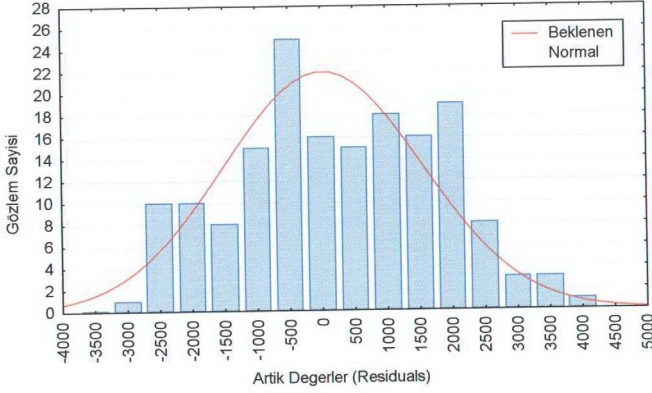
Tablo 51. Zamana bağlı modele ilişkin korelasyon matrisi

Değişkenler	Esneklik Modülü	Bitüm Miktarı	Çimento Katkı Oranı	Kür Süresi
Esneklik Modülü	1.00			
Bitüm Miktarı	-0.42	1.00		
Çimento Katkı Oranı	0.83	0.00	1.00	
Kür Süresi	0.20	0.00	0.00	1.00

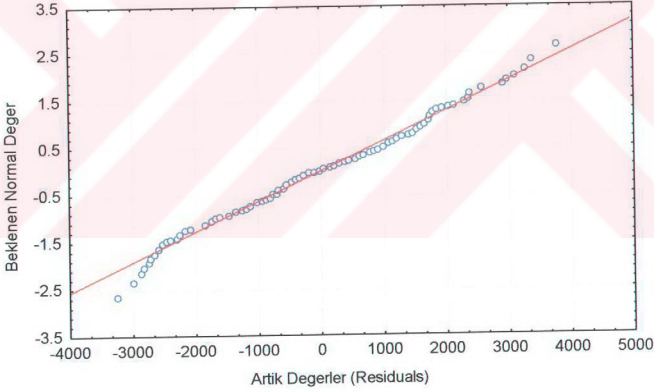
Tablo 52. Zamana bağlı modelin regresyon istatistikleri

N=168	α_1	β_1	β_2	β_3	β_4
Bulunan Sabit	15509.05	84.43554	150.1182	-3181.90	1829.078
Standart Hata	796.97	27.74877	40.5102	174.40	148.658
t(163)	19.46	3.04286	3.7057	-18.24	12.304
p-düzey	0.00	.00273	.0003	0.00	.000

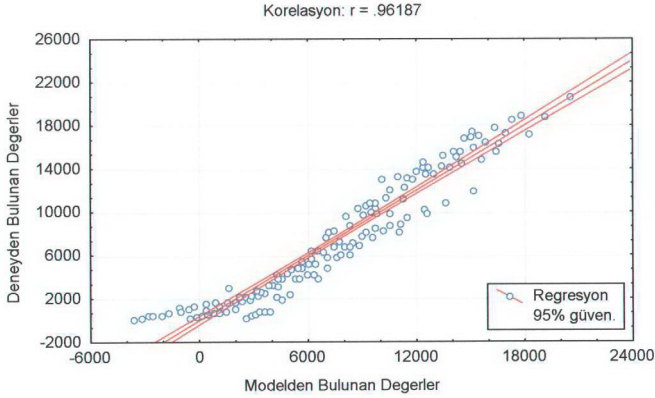
Korelasyon katsayısı $r = 0.96187$ olarak bulunmuş olup, pozitif yönde iyi bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen grafikler Şekil 41-43’de verilmiştir.



Şekil 41. Zamana bağlı modelde artık değerlerin frekans dağılımı



Şekil 42. Zamana bağlı modelde artık değerlerin normal olasılık grafiği



Şekil 43. Zamana bağlı modelde deneyden ve modelden bulunan değerler

3.3.2. Sıcaklığa Bağlı Model

Farklı bitüm içeriği ve çimento katkı oranlarında hazırlanarak, 28 günlük kür süresi sonunda, üç ayrı (5, 25 ve 40°C) sıcaklıkta Dolaylı Çekme Deneyine tabi tutulan numunelerden elde edilen deney sonuçlarından faydalanılarak, değişik sıcaklıklardaki Esneklik Modülünün hesaplanabilmesi için bir matematik model kurulmuştur.

Şekil 32-37'de verilen deney sonuçlarına ilişkin çizimler incelendiğinde aşağıdaki gibi bir matematiksel ilişkinin var olduğu anlaşılmaktadır.

$$M_{R(S)} = \alpha_2 + \beta_5 * X_1 + \beta_6 * X_2 + \beta_7 * X_4 \quad (22)$$

Burada;

$M_{R(S)}$: Esneklik Modülü (MPa)

X_1 : Bitüm içeriği (%)

X_2 : Çimento katkı oranı (%)

X_4 : Sıcaklık (°C)

$\alpha_2, \beta_5, \beta_6, \beta_7$: Sabit terim ve katsayılar

Bağımlı değişken esneklik modülü ($M_{R(S)}$) ile bağımsız değişkenler olan bitüm içeriği, çimento miktarı ve sıcaklık arasındaki korelasyon matrisi Tablo 53'de verilmiştir.

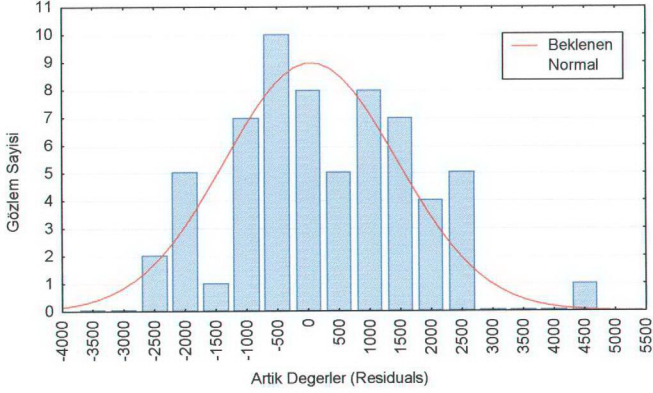
Tablo 53. Sıcaklığa bağlı modele ilişkin korelasyon matrisi

Değişkenler	Esneklik Modülü	Bitüm Miktarı	Çimento Katkı Oranı	Sıcaklık
Esneklik Modülü	1.00			
Bitüm Miktarı	-0.39	1.00		
Çimento Katkı Oranı	0.81	0.00	1.00	
Sıcaklık	-0.35	0.00	0.00	1.00

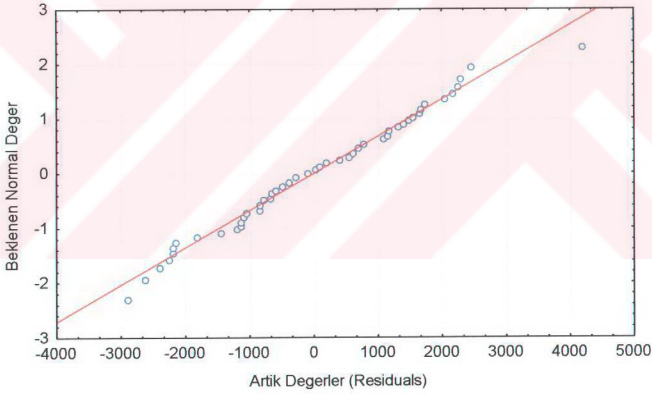
Korelasyon katsayısı $r = 0.967$ olarak bulunmuş olup, Quasi-Newton yöntemine göre yapılan regresyon analizinden elde edilen katsayılar ve analize ilişkin istatistikler Tablo 54'de, grafikler ise Şekil 44-46'da verilmiştir.

Tablo 54. Sıcaklığa bağlı modelin regresyon istatistikleri

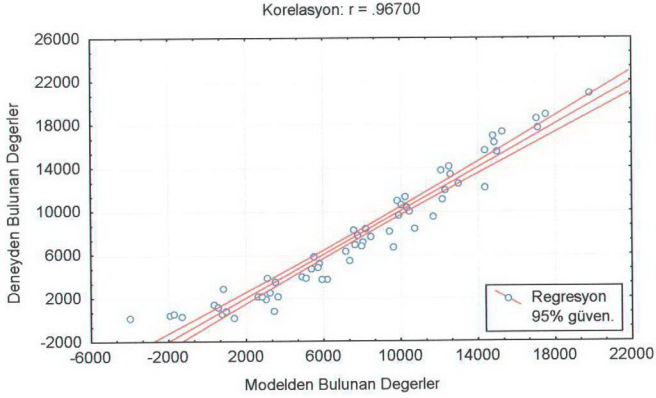
N=63	α_2	β_5	β_6	β_7
Bulunan Sabit	18137.92	-2687.04	2267.312	-137.202
Standart Hata	1264.46	227.20	92.756	12.939
t(59)	14.34	-11.83	24.444	-10.604
p-düzey	.00	.00	0.000	.000



Şekil 44. Sıcaklığa bağlı modelde artık değerlerin frekans dağılımı

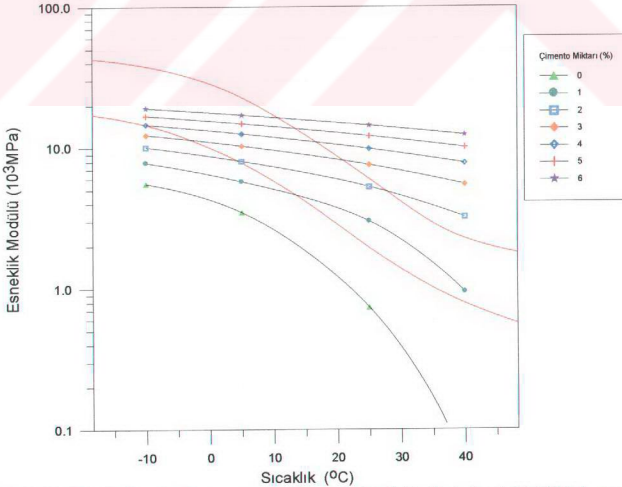


Şekil 45. Sıcaklığa bağlı modelde artık değerlerin normal olasılık grafiği



Şekil 46. Sıcaklığa bağlı modelde deneysel ve modelden bulunan değerler

Laboratuvar ekipmanının yetersiz oluşu nedeniyle deney yapılamayan 0°C 'nin altındaki sıcaklıklar için model sayesinde esneklik modülünün tahmin edilebilmesine olanak bulunmuştur. %5.2 bitüm içeriğinde -10°C ile 5, 25 ve 40°C için modelden hesaplanan esneklik modül değerleri, AAMAS'de sıcak karışımlar için esneklik modülü sınırlarını gösteren nomogram üzerine işlenerek Şekil 47'de verilmiştir.



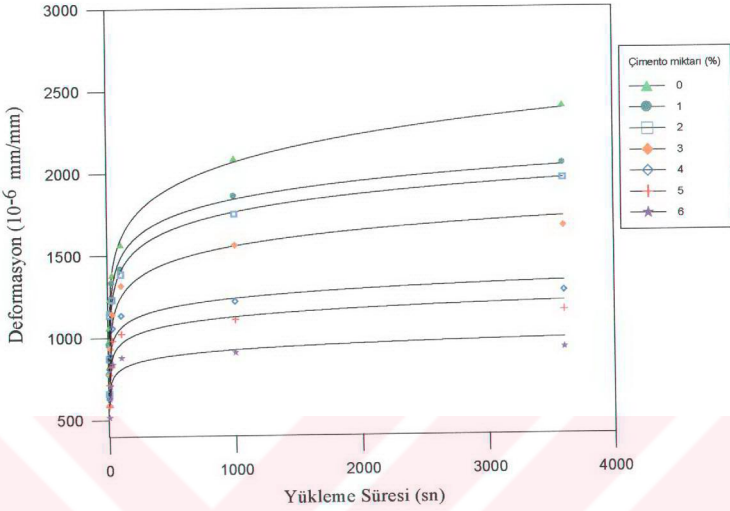
Şekil 47. Modelden bulunan esneklik modülü değerlerinin AAMAS'de verilen sıcak karışım sınırları ile karşılaştırılması

Şekil 47’de verilen grafikten de görüleceği gibi, modelden hesaplanan esneklik modülü değerlerine ilişkin eğriler, deney sonuçlarına ilişkin eğrilere gayet uygun nitelikte bulunmuştur. %5.2 bitüm içeriği için matematik modelden elde edilen -10°C ’deki esneklik modülü değerlerine göre; asfalt emülsiyonu karışımların %4 çimento katkısına kadar AAMAS’de [94] verilen sınırların dışında kaldığı, %4, 5 ve 6 çimento katkı oranlarında ise sınırlar içersinde kaldığı görülmüştür. Ancak, daha düşük sıcaklıklarda, bu çimento katkı oranlarının çatlama ve yüzey aşınması gibi problemlere yol açıp açmayacağı araştırılmalıdır.

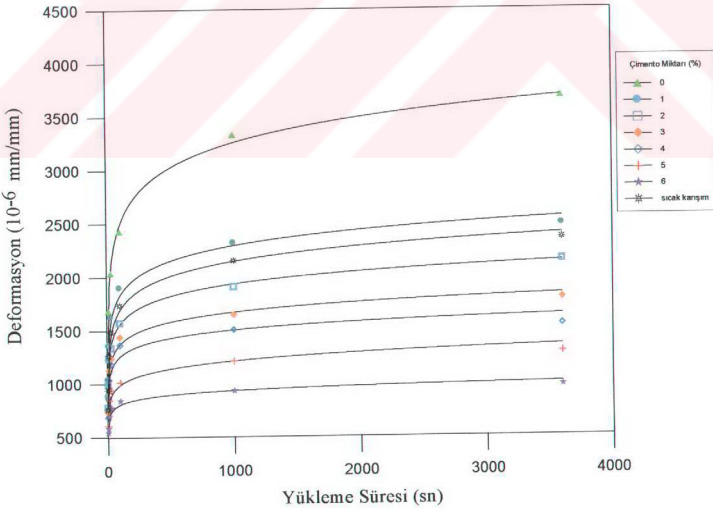
3.4. Statik Sünme Deneyinden Elde Edilen Bulgular

Deney için, değişen çimento oranlarında üç farklı bitüm içeriğinde hazırlanarak çevre koşullarında 28 gün boyunca kür edilen numuneler, 25°C sıcaklıkta ve Bölüm 2.4. verilen koşullarda deneye tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen Sünme Deformasyonuna ilişkin sonuçlar grafik haline getirilerek, kalıntı bitüm içeriğine göre sırasıyla Şekil 48, 49 ve 50’de verilmiştir. Bunlara ilaveten, her çimento katkı miktarı için bitüm içeriğindeki değişimin Sünme Deformasyonu üzerindeki etkisini gözlemek amacıyla da Şekil 51 – 57’de verilen grafikler çizilmiştir.

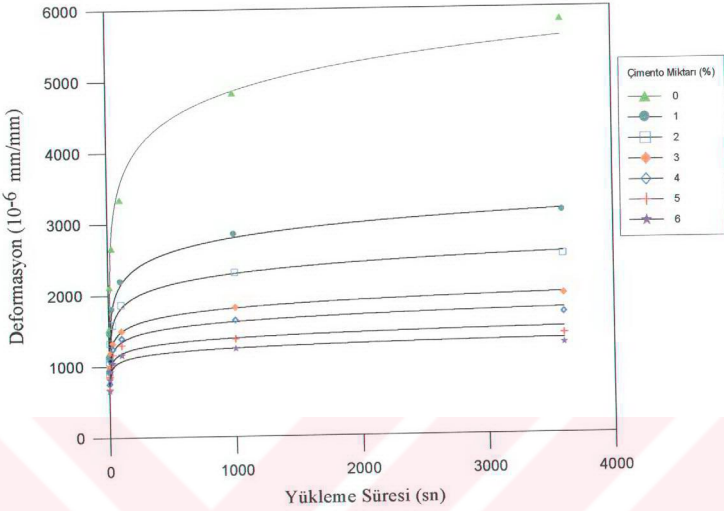
Ayrıca, deneyler sonucu elde edilen deformasyon değerlerine göre hesaplanan Sünme Modülü değerlerine ilişkin grafikler ise, kalıntı bitüm içeriği yüzdesine göre sırasıyla Şekil 58, 59 ve 60’da verilmiştir. Kalıntı bitüm içeriğinin, Sünme Modülü üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için her çimento katkı miktarına ait grafikler çizilmiş olup Şekil 61 – 67’de verilmiştir.



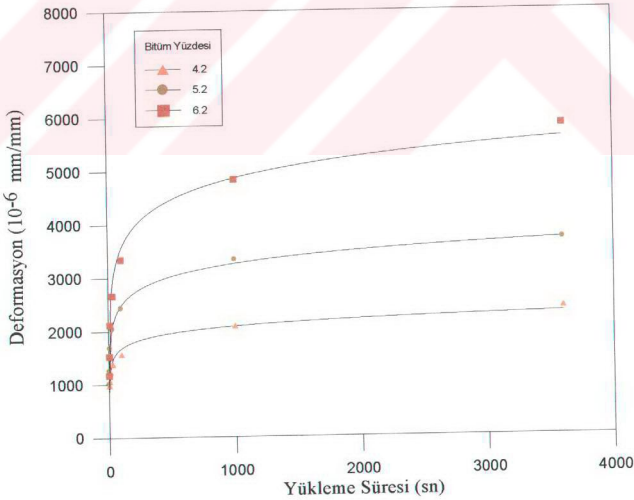
Şekil 48. %4.2 kalınlı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre zaman – deformasyon ilişkisi



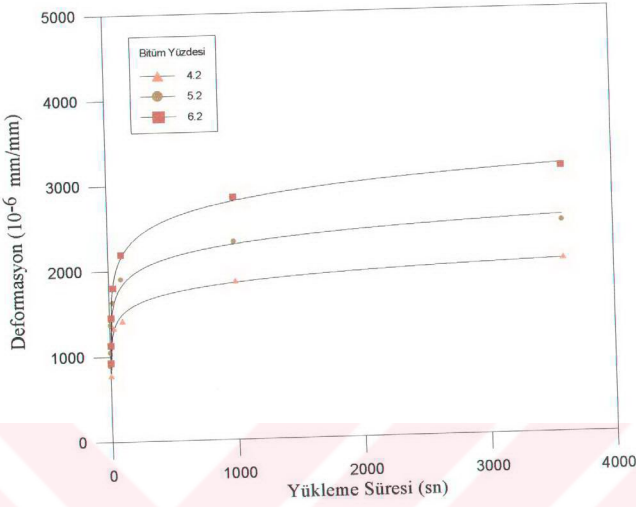
Şekil 49. %5.2 kalınlı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre zaman – deformasyon ilişkisi



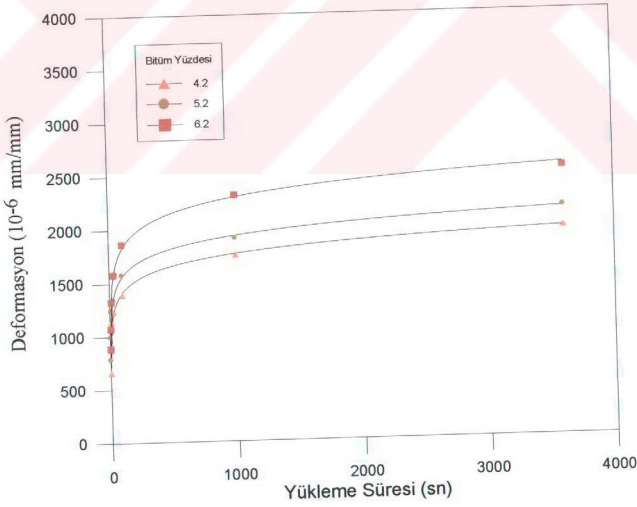
Şekil 50. %6.2 kalınlı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre zaman - deformasyon ilişkisi



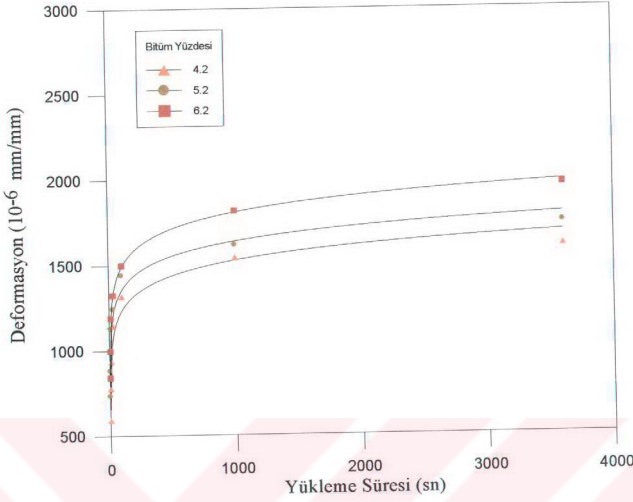
Şekil 51. Çimento katkısız numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman - deformasyon ilişkisi



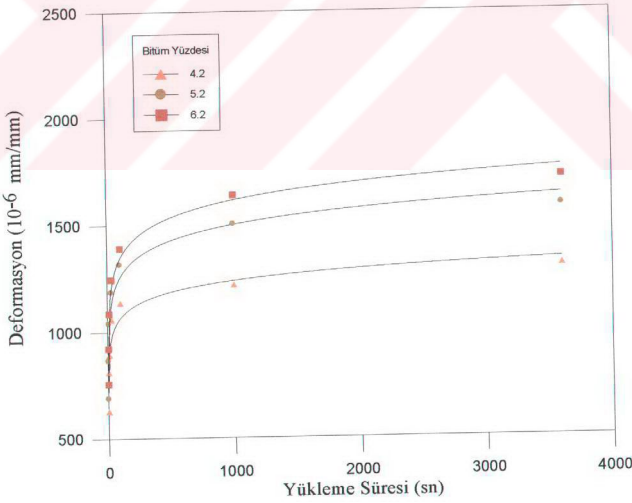
Şekil 52. %1 çimento katkı numunelerinin farklı bitüm içeriği için zaman-deformasyon ilişkisi



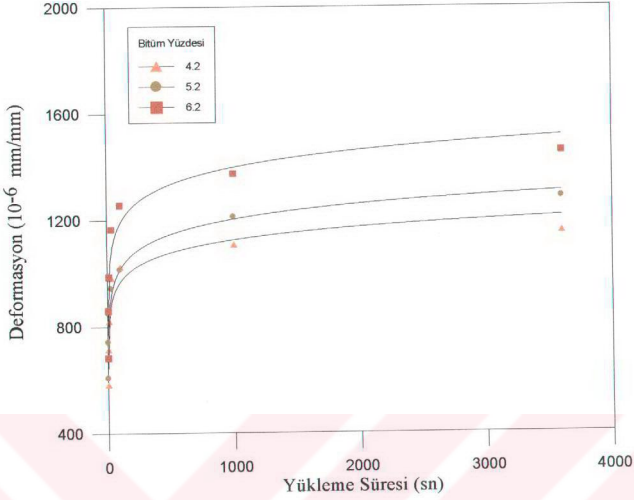
Şekil 53. %2 çimento katkı numunelerinin farklı bitüm içeriği için zaman-deformasyon ilişkisi



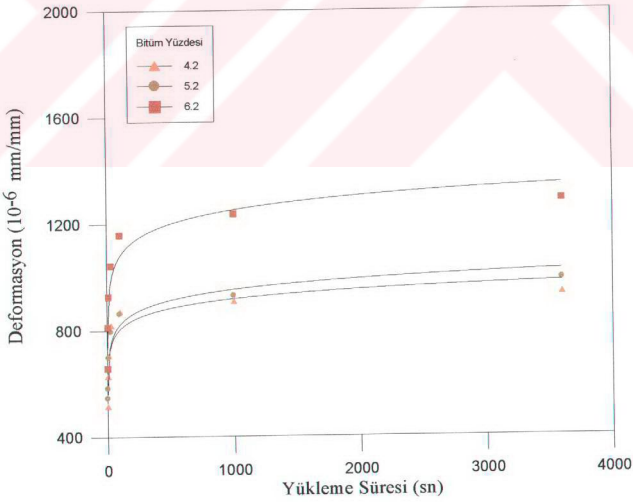
Şekil 54. %3 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman-deformasyon ilişkisi



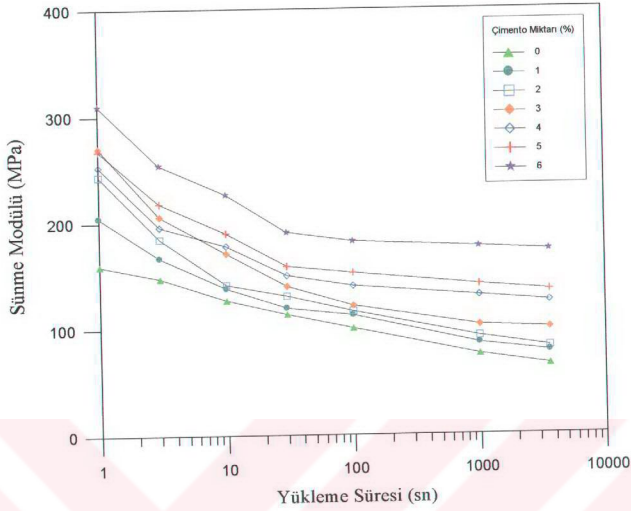
Şekil 55. %4 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman-deformasyon ilişkisi



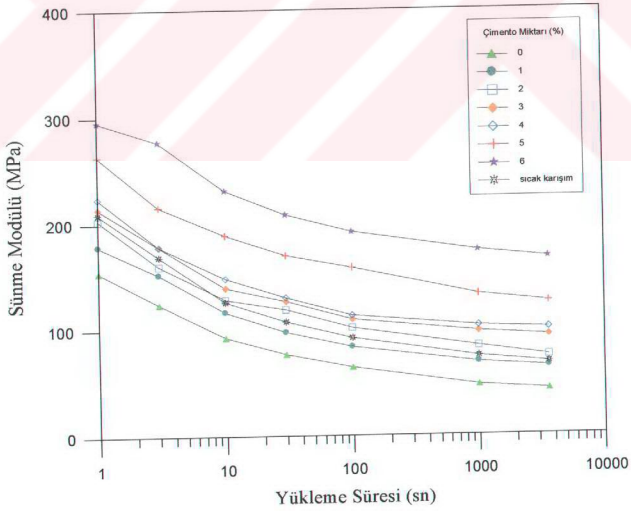
Şekil 56. %5 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman-deformasyon ilişkisi



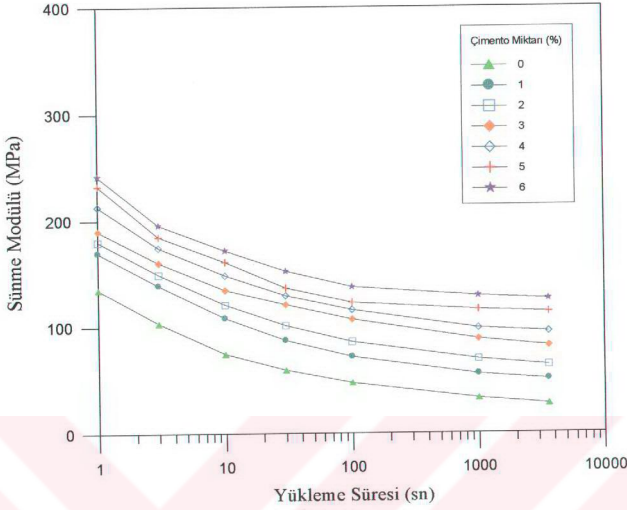
Şekil 57. %6 çimento katkılı numunelerin farklı bitüm içeriği için zaman-deformasyon ilişkisi



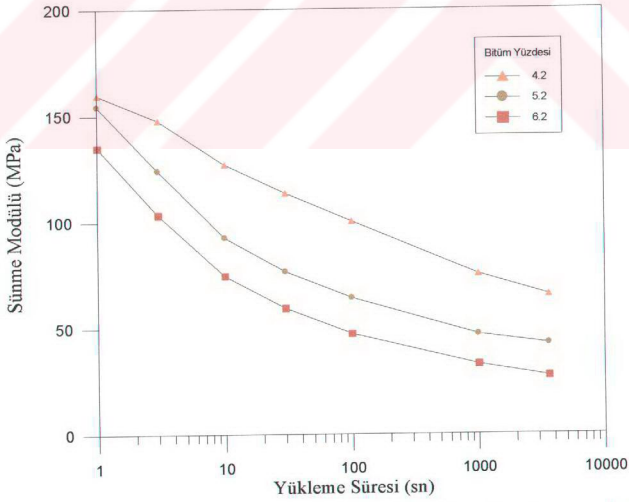
Şekil 58. %4.2 kalınlı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre sünme modülünün zamanla değişimi



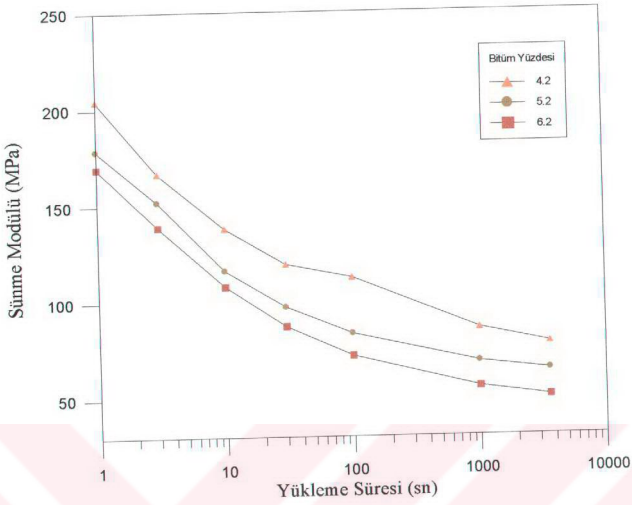
Şekil 59. %5.2 kalınlı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre sünme modülünün zamanla değişimi



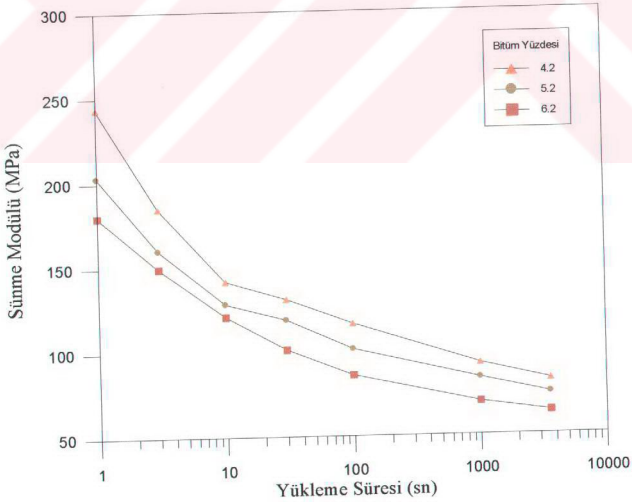
Şekil 60. %6.2 kalınlı bitüm içeriğinde değişik çimento miktarlarına göre sünme modülünün zamanla değişimi



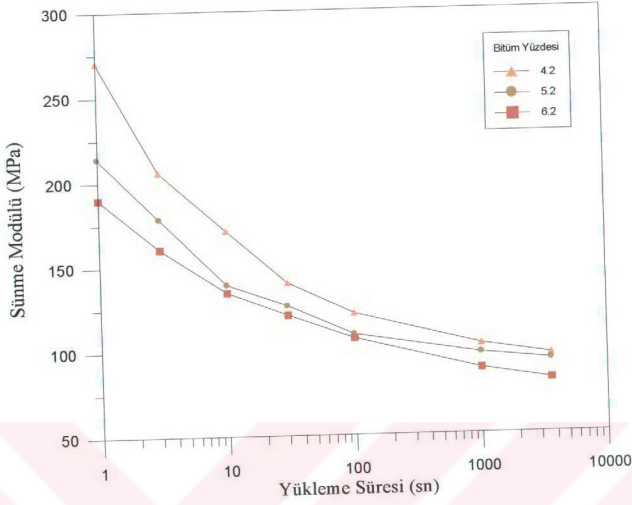
Şekil 61. Çimento katkısız numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yüklenme süresince değişimi



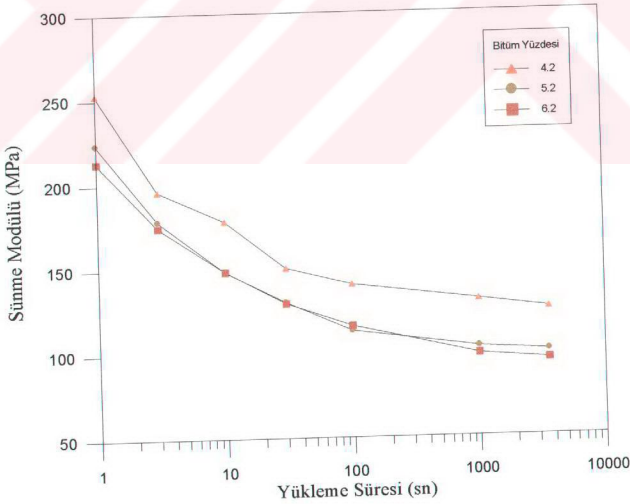
Şekil 62. %1 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yüklenme süresince değişimi



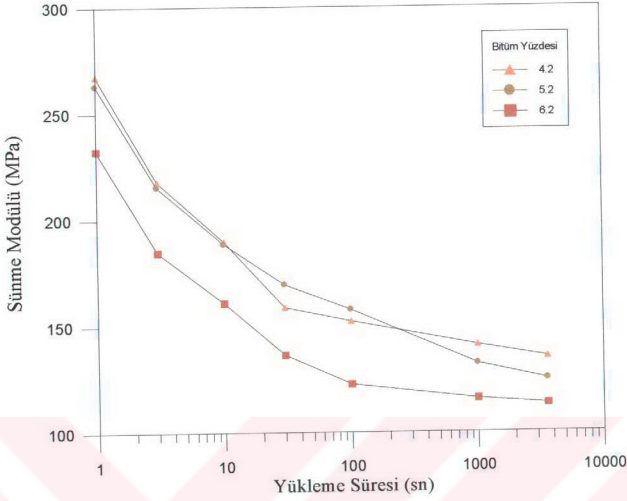
Şekil 63. %2 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yüklenme süresince değişimi



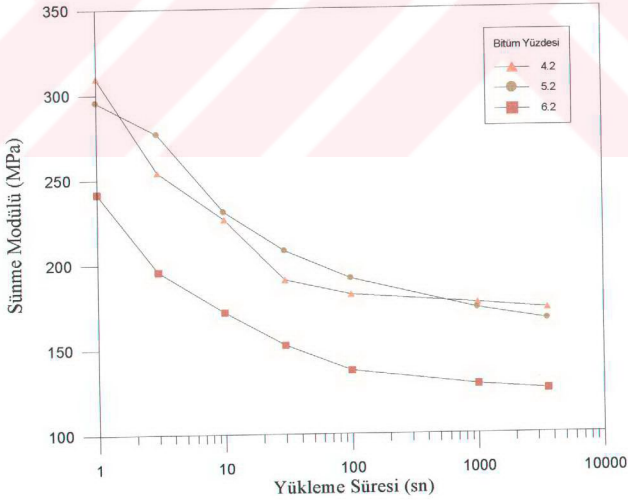
Şekil 64. %3 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi



Şekil 65. %4 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yükleme süresince değişimi



Şekil 66. %5 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yüklenme süresince değişimi



Şekil 67. %6 çimento katkılı numunelerde bitüm içeriğine göre sünme modülünün yüklenme süresince değişimi

Yukarıda verilen şekillerden de görüleceği gibi, yük uygulamasının ardından numunelerde ani bir deformasyon artışı meydana gelmekte, belirli bir süre sonra ise deformasyon oluşma hızı düşmektedir. Ani deformasyon artışı, çimento katkı miktarı arttıkça düşmekte ve yük uygulama süresi boyunca aradaki fark az bir miktar daha artarak devam etmektedir. Dolayısıyla, asfalt emülsiyonu karışımlarda çimento miktarındaki artış ile tekerlek izi oluşma riski arasında ters bir orantı olduğu gözlenmiştir. Yani, çimento miktarı arttıkça, meydana gelen deformasyon azalmakta; başka bir deyişle, tekerlek izi oluşma riski düşmektedir.

Sıcak karışımın tekerlek izi oluşma riskinin ise %2 çimento yüzdesindeki soğuk karışımdan dahi daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca, her çimento katkı miktarında, üç ayrı bitüm içeriği için verilen sonuçlardan da görüleceği gibi, karışımdaki kalıntı bitüm içeriği arttıkça, numunelerde meydana gelen deformasyon artmaktadır. Dolayısıyla, bitüm içeriği arttıkça, her çimento yüzdesi için, karışımın tekerlek izi oluşma riski de artmaktadır.

3.5. Statik Sünme Deformasyonu İçin Matematik Model Kurulması

Değişen oranlardaki bitüm içeriği ve çimento katkı oranlarında hazırlanarak, 28 günlük kür süresi sonunda Statik Sünme Deneyine tabi tutulan numunelerden elde edilen deney sonuçlarından faydalanılarak, Statik Sünme Deformasyonunun bulunmasını esas alan bir matematik model kurulmuştur. Korelasyon matrisi Tablo 55'de verilmiştir.

Tablo 55. Statik sünme deformasyonu modeline ilişkin korelasyon matrisi

Değişkenler	Statik Sünme Deformasyonu	Bitüm Miktarı	Çimento Katkı Oranı	Yükleme Süresi
Statik Sünme Deformasyonu	1.00			
Bitüm Miktarı	.26	1.00		
Çimento Katkı Oranı	-.58	-.00	1.00	
Yükleme Süresi	.46	-.00	.00	1.00

Şekil 48-57'de verilen deney sonuçlarına ilişkin çizimler incelendiğinde aşağıdaki gibi bir matematiksel ilişkinin var olduğu anlaşılmaktadır.

$$\epsilon_c = \alpha_3 + (\beta_8 * X_1 + \beta_9 * X_2) * \ln(X_5) + \beta_{10} * X_2 + \beta_{11} * X_1 \quad (23)$$

Burada;

ϵ_c : Statik sünme deformasyonu (mm/mm)

X_1 : Bitüm içeriği (%)

X_2 : Çimento katkı oranı (%)

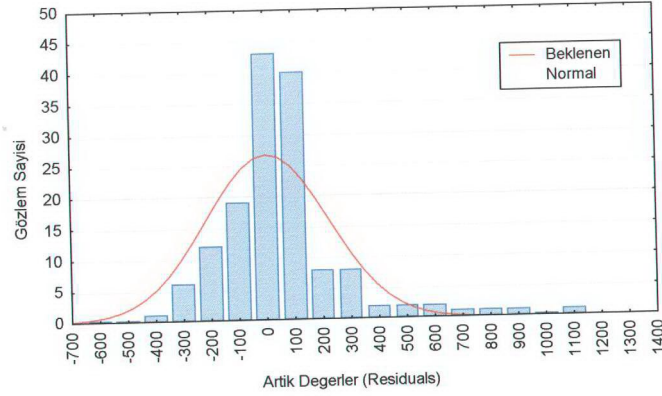
X_5 : Yükleme süresi (sn)

$\alpha_3, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}$: Sabit terim ve katsayılar

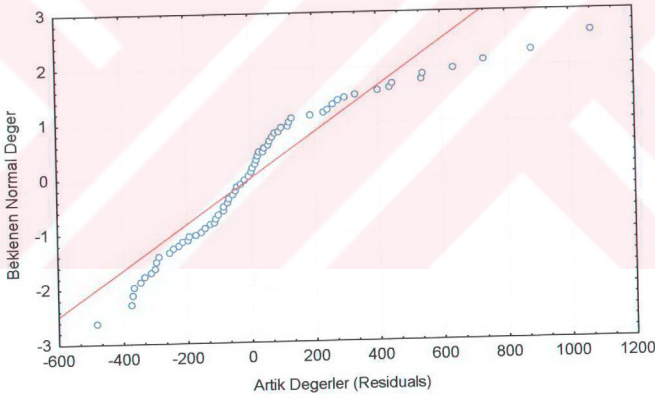
Yapılan regresyon analizi sonunda, β_{11} katsayısının anlamlılık düzeyine ilişkin elde edilen değer ($p=25$), yaygın olarak kullanılan $p<0.05$ değerinin çok üzerinde bulunduğundan, gri terim modelden çıkarılmıştır. Modelin geri kalan kısmı için yapılan regresyon analizinden elde edilen sabitler ve regresyon analizine ilişkin istatistikler Tablo 57'de, grafikler ise Şekil 67-69'da verilmiştir.

Tablo 56. Statik sünme deformasyonu modeline ilişkin regresyon istatistikleri

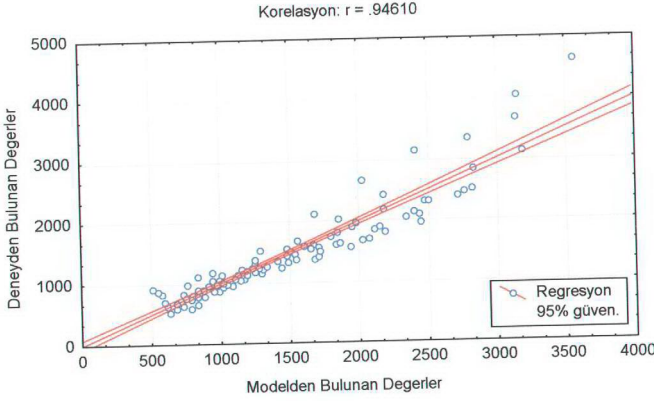
N=147	α_3	β_8	β_9	β_{10}
Bulunan Sabit	936.1844	51.69820	-39.1412	-50.7525
Standart Hata	53.1140	2.09497	3.1264	15.0420
t(143)	17.6260	24.67734	-12.5195	-3.3740
p-düzey	0.0000	0.00000	.0000	.0010



Şekil 68. Statik sünme deformasyonu modelinde artık değerlerin frekans dağılımı



Şekil 69. Statik sünme deformasyonu için artık değerlerin normal olasılık grafiği

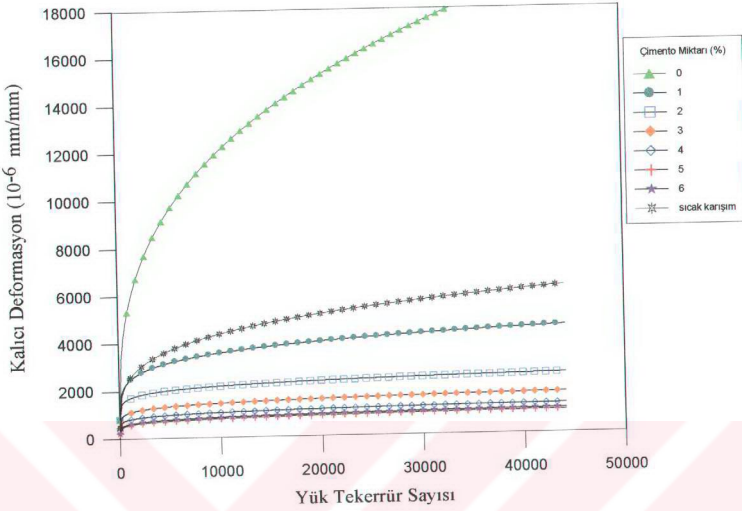


Şekil 70. Statik sünme deformasyonu için deneyden ve modelden bulunan değerler

3.6. Tekrarlı Sünme Deneyinden Elde Edilen Bulgular

Tekrarlı yükler altında karışımların tekerlek izi oluşumu kalıcı deformasyon karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanan bu deney için, değişik çimento katkı miktarlarında hazırlanan numuneler, 28 günlük kür süresinin ardından 12.5 saat (45 000 yük tekrarı) boyunca deneye tabi tutulmuştur. Her yük tekrarının ardından numune içersinde oluşan kalıcı deformasyonlar kaydedilerek Şekil 61 de verilen grafik çizilmiştir. Sıcak karışım numunelerine ilişkin eğri de aynı grafik içersinde yer almaktadır.

Şekil 71 de verilen grafikten de görüleceği gibi, çimento katkısız asfalt emülsiyonu karışım numuneleri 30 000 yük tekrarından sonra çökmüştür. Çimento katkılı numunelerde ise, çimento katkı miktarına bağlı olarak kalıcı deformasyon direncinde artış gözlenmiştir. Başka bir deyişle, genel olarak çimento katkı miktarı arttıkça, kalıcı deformasyon direnci de artmaktadır. Diğer yandan sıcak karışım numunelerinin kalıcı deformasyon direnci, çimento katkılı tüm soğuk karışımlardan daha düşük çıkmıştır.

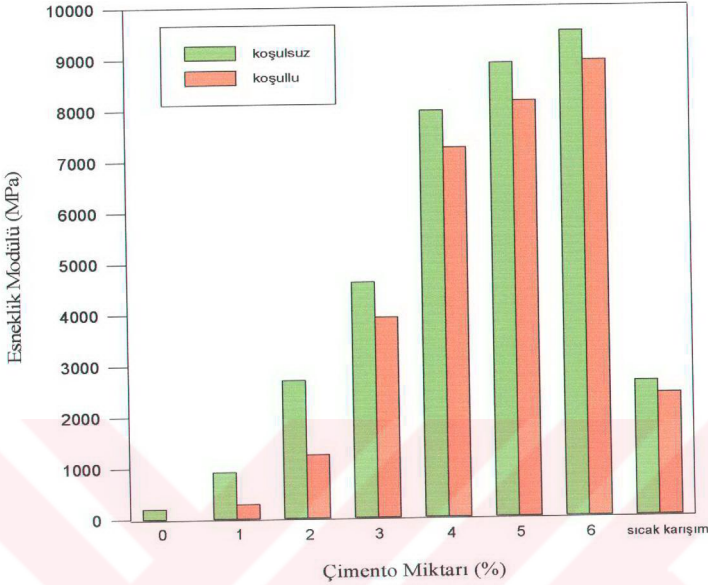


Şekil 71. Çimento miktarına göre yük tekrarı – kalıcı deformasyon ilişkisi

Asfalt emülsiyonu karışım numunelerinin, sıcak karışıma nazaran daha fazla boşluğa sahip olduğu saptanmıştır. Buna rağmen çimento katkılı emülsiyon karışımların, kalıcı deformasyon dirençleri, sıcak karışıma nazaran daha yüksek çıkmıştır. Bu da çimentonun ikinci bir bağlayıcı olarak işlev gördüğünü ortaya koymaktadır.

3.7. Su Hasarı Deneyinden Elde Edilen Bulgular

Bu deney için hazırlanan numuneler, Bölüm 2.6. belirtilen koşullarda deneye tabi tutulmuştur. Değişik çimento katkılarında hazırlanan numuneler, önce kuru koşulda deneye tabi tutulmuş, sonra suya koşullandırma işlemi yapılarak tekrar denenmiştir. Sıcak karışım numuneleri de aynı şekilde denendikten sonra elde edilen koşullu ve koşulsuz esneklik modül değerleri (koşullu/koşulsuz) birbirine oranlanmak suretiyle numunelerdeki esneklik modülü kayıpları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 72 de görülmektedir.



Şekil 72. Çimento katkı miktarına göre koşullu/koşulsuz esneklik modülü değişimi

Yukarıda verilen şekilden de görüleceği gibi, hiç çimento içermeyen numuneler, koşullandırmanın 6. saatinde, dağılmıştır. Ancak, çimento katkılı numuneler ise, çimento katkı miktarına bağlı olarak, erken yaşta bile su hasarına karşı çok büyük bir direnç göstermişlerdir. Gerçi, %1 ve %2 çimento katkılarında önemli kayıplar gözlenmiştir. Ancak, diğer çimento katkı yüzdelerinde, %3 çimento katkı miktarından başlayarak esneklik modülü oranının (M_{Ryag}/M_{Rkuru}) % 85'in üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan sıcak karışım numunelerinin de, su hasarına karşı önemli bir kayba uğramadığı ve % 4 çimento katkı miktarındaki asfalt emülsiyonu karışıma denk bir direnç (%91) gösterdiği kaydedilmiştir. % 5 ve % 6 çimento katkı düzeylerinde ise, su hasarına karşı direncin, sıcak karışımdan daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yoğun granülometrilili agrega tasarımı esas alınarak; mineral filler yerine çimento kullanılmak suretiyle geliştirilen Emülsifiye Asfalt Betonu'nun, Sıcak Asfalt Betonu'na alternatif olabilme özelliklerini araştırmak amacıyla girilen bu çalışmada, Marshall Deneyi, Dolaylı Çekme Deneyi, Statik Sünme Deneyi, Tekrarlı Sünme Deneyi ve Su Hasarı Deneyleri yapılmıştır. Deneylelerden elde edilen sonuçlara göre, Asfalt Emülsiyonu Karışımların en önemli sakıncalarından; dayanımın düşük olması ve yavaş gelişmesi yanında kür olma tamamlanmadan karışımın suya maruz kalması durumunda bozulabilmesi problemlerine, çimento katkısı sayesinde tatmin edici düzeyde iyileştirmeler sağlandığı gözlenmiştir. Çimento katkısız asfalt emülsiyonu karışımı ve katkısız sıcak karışım ile karşılaştırmalı olarak yapılan deneysel çalışma sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Asfalt Emülsiyonu Karışımlarda, çimento katkı miktarına bağlı olarak Marshall stabilite değerlerinde önemli artışlar sağlandığı gözlenmiştir. Mineral filler yerine %6 çimento katkısıyla hazırlanarak 3 günlük kür süresinin ardından 60⁰C de Marshall Deneyine tabi tutulan numunelerde, kalıntı bitüm içeriğindeki azalmaya bağlı olarak stabilite değerlerinin sürekli olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca, aynı koşullarda denenen % 5.2 bitüm içeriğindeki sıcak karışımın stabilite değerlerine göre, aynı oranda kalıntı bitüm içeriğine sahip % 6 çimento katkılı numunelerin stabilite değerleri, 3 günlük küre rağmen daha yüksek çıkmıştır. Marshall sonuçlarına göre, çimento katkı miktarı arttıkça ve kalıntı bitüm içeriği azaldıkça asfalt emülsiyonu karışım sertleşmektedir.
2. Asfalt emülsiyonu karışıma ilave edilen çimento miktarına bağlı olarak esneklik modülünde önemli artışlar sağlanmıştır. Numunelerin kür süresine bağlı olarak gerçekleşen bu artış, ilk haftalar içerisinde hızlı bir şekilde olmakta, ilerleyen aylarda giderek daha az olmakla birlikte, bir yıl boyunca devam etmektedir. %3 çimento katkı yüzdesindeki karışımın bile, daha üçüncü gün sonunda sıcak karışımdan çok daha yüksek bir esneklik modül değerine ulaştığı, çimento katkı düzeyine bağlı olarak dayanımın sürekli olarak arttığı, bir yıl sonunda %6 çimento

yüzdesine sahip karışımın en yüksek esneklik modülü değerine ulaştığı, sıcak karışımında ise dikkate değer bir değişimin olmadığı kaydedildi.

Çimento katkısız asfalt emülsiyonu karışımlar, üretildikleri ilk günlerde çok düşük dayanım göstermekte, bir yıllık bir kür süresine rağmen sıcak karışımlar düzeyine çıkamamaktadırlar. Oysa, çimento katkısıyla, bu sorun tamamen ortadan kalkmakta; karışımın daha ilk günlerinden itibaren %2 çimento katkı düzeyinden başlayarak diğer ilave artımlara bağlı olarak daha yüksek esneklik modülüne ulaşmaktadır. Çimento katkısının, asfalt emülsiyonu karışımların erken dayanımlarının düşük olması probleminde çözüm olduğu ortaya konulmuştur.

3. Üç farklı bitüm içeriğine sahip asfalt emülsiyonu karışımlarda, çimento katkı düzeyinden bağımsız olarak, karışımdaki bitüm içeriği arttıkça, karışımların hem ilk günlerdeki esneklik modülleri, hem de bir yıl sonundaki esneklik modüllerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu durumda, bitüm miktarı arttıkça, buna bağlı olarak asfalt emülsiyonu karışımın esneklik modülünün düştüğü (yumuşadığı), karışıma ilave edilen çimento katkı miktarı arttırıldığında ise, katkı miktarına bağlı olarak karışım rijitliğinin arttığı, ancak, esnek kaplama sınırlarını aşmadığı ortaya çıkmıştır.
4. 5, 25 ve 40°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre, sıcaklık arttıkça esneklik modülü değerlerinde azalma olmaktadır. Bu azalma, sıcak karışım asfalt betonunda oldukça fazla olmasına rağmen emülsifiye asfalt betonu numunelerinde çimento katkı miktarı arttıkça, azalmaktadır. Başka bir deyişle; sıcak karışım asfalt betonu, sıcaklığa karşı çok duyarlı iken çimento katkılı emülsifiye asfalt betonu sıcaklığa karşı fazla duyarlı değildir.

Asfalt emülsiyonu karışımlarda bitüm içeriğinin de, çimento katkı miktarına bağlı olarak sıcaklık davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu; çimento katkı miktarının artmasıyla birlikte karışımın sıcaklık hassasiyetinin azaldığı, çimento katkı miktarına bağlı olarak bitüm içeriğinin, sıcaklık hassasiyetini artırdığı gözlenmiştir.

Esneklik Modülünün tahmin edilebilmesi için geliştirilen matematik modeller sayesinde öngörülen bitüm ve çimento katkı oranları ve farklı kür süreleri ve de farklı sıcaklıklar için esneklik modülünün hesaplanabilmesine olanak sağlanmıştır. Laboratuardaki ekipman eksikliği nedeniyle deney yapılamayan 0°C'nin altındaki sıcaklıklar için, kurulan matematik model sayesinde, esneklik modülü değerleri tahmin edilerek irdelenmiştir. %5.2 bitüm içeriği için matematik modelden elde edilen -10°C'deki esneklik modülü değerlerine göre; asfalt emülsiyonu karışımların %4 çimento katkısına kadar AAMAS'de sıcak karışımlar için verilen sınırların dışında kaldığı, %4, 5 ve 6 çimento katkı oranlarında ise sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. Ancak, daha düşük sıcaklıklarda, bu çimento katkı oranlarının çatlama ve yüzey aşınması gibi problemlere yol açıp açmayacağı araştırılmalıdır.

5. Emülsifiye Asfalt Numunelerinin üretiminden itibaren ilk iki-üç hafta içerisinde bünyeden önemli bir su çıkışı olmakta, ilerleyen haftalarda yavaşlamakta ve 60 günlük kür süresi sonunda su çıkışı durmaktadır. 90 günlük ölçümlerde ise, numunelerin havadan nem kaptığı gözlenmiştir. Genel olarak, çimento artışına bağlı olarak nem çıkışının daha yavaş geliştiği ve nihai olarak daha az olduğu söylenebilir. Bu da, çimentonun bünyedeki suyla hidrasyona girerek mevcut suyu kullandığı anlamına gelmektedir. Ancak, çimento miktarı ile nem kaybı arasında tamamen doğrusal bir ilişki olduğu ortaya çıkmış değildir. Ayrıca, bitüm içeriği arttıkça, nem çıkışının yavaşladığı ve daha az olduğu gözlenmiştir. Karışım bünyesindeki nem tamamen kaybolmamaktadır. Nem kaybı, kür süresine bağlı olarak esneklik modülündeki artışla birlikte değerlendirildiğinde, numunelerdeki modül artışının, nem kaybı durduktan sonra da devam ettiği görülmüştür.
6. Statik sünme deneyinde, yük uygulamasının ardından emülsifiye asfalt numunelerinde ani bir deformasyon artışı meydana gelmekte, belirli bir süre sonra ise deformasyon oluşma hızı azalmaktadır. Karışımdaki çimento miktarı arttıkça, numunelerde meydana gelen deformasyon azalmakta, dolayısıyla çimento katkı miktarı artarken tekerlek izi oluşma riski düşmektedir. Diğer yandan karışımdaki kalıntı bitüm içeriği arttıkça, numunelerde meydana gelen deformasyon artmakta; karışımın tekerlek izi oluşma riski de artmaktadır. Sıcak karışımın tekerlek izi

oluşma riskinin ise %2 çimento yüzdesindeki soğuk karışımdan dahi daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

7. Statik sünme deney verilerinden yararlanılarak, farklı bitüm ve çimento oranlarındaki karışımların değerlendirilmesine yönelik matematik model kurulmuştur.
8. Tekrarlı sünme deneyinde, çimento katkısız emülsifiye asfalt karışım numuneleri 30000 yük tekrarından sonra çökmüştür. Çimento katkılı numunelerde ise, çimento katkı miktarına bağlı olarak kalıcı deformasyon direncinde artış olduğu; başka bir deyişle çimento katkı miktarı arttıkça, kalıcı deformasyon direncinin de genel olarak arttığı gözlenmiştir. Diğer yandan, sıcak karışımın kalıcı deformasyon direnci, çimento katkılı tüm soğuk karışımlarinkinden daha düşük çıkmıştır. Çimento katkılı emülsifiye asfalt karışım numunelerinin, sıcak karışma nazaran daha fazla boşluğa sahip olmasına rağmen, kalıcı deformasyon dirençleri daha yüksek çıkmıştır. Bu da, çimentonun ikinci bir bağlayıcı olarak işlev gördüğünü göstermektedir.

Yüksek sıcaklıklarda, sıcak karışımın esneklik modülü düşük çıkmakta, dolayısıyla ağır trafik yükü altında tekerlek izi oluşum potansiyeli yüksek olmaktadır. Çimento katkılı asfalt emülsiyonu karışımların ise, yüksek sıcaklıkta esneklik modülü yüksek çıkmakta ve tekerlek izi oluşma riski çimento katkı miktarına bağlı olarak düşmektedir. Çok düşük çimento katkı düzeylerinde bile, sıcak karışımdan daha düşük tekerlek izi oluşma riski ortaya çıkmıştır. Bu durumda, çimento katkılı emülsifiye asfalt betonunun, özellikle sıcak iklimlerde tekerlek izi oluşma riski yüksek olan sıcak karışımlar yerine iyi bir alternatif olacağı açıktır.

9. Su hasarı deney verilerine göre hiç çimento içermeyen emülsifiye asfalt karışım numuneleri koşullandırmanın 6. saatinde dağılırken, çimento katkılı numuneler erken yaşta bile su hasarına karşı çok büyük bir direnç göstermiştir. Sadece 3 günlük kür süresi sonunda %3 -%6 çimento katkı düzeyleri için sırasıyla esneklik modülü oranı; ($M_{R_{yaş}}/M_{R_{kuru}}$) 0.85, 0.91, 0.92 ve 0.94 olarak tespit edilmiş, sıcak karışım için ise bu oran, 0.91 olarak bulunmuştur. Asfalt emülsiyonu karışımlarda,

normal bitüm içeriklerinde, bitümün agregaya yüzeyini tamamen saramadığı dikkate alınır, çimento katkısıyla birlikte çok yüksek oranda su hasarına karşı direnç sağlandığı ortaya çıkmaktadır.

Bütün bu sonuçlar, çimento katkısının, Emülsifiye Asfalt Betonu'nda çok iyi bir performans sağladığını ve Emülsifiye Asfalt Betonu'nun Sıcak Karışım Asfalt Betonu'na alternatif olabileceğini göstermektedir. Asfalt emülsiyonlarının sağladığı büyük avantajlar dikkate alındığında bu sonucun çok önemli olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, konu üzerinde daha çok çalışılması ve bir çok ince ayarın yapılması gerekmektedir. Şöyle ki:

- a) Yoğun granülometri esas alınarak ve filler yerine belli oranlarda çimento kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada, asfalt emülsiyonu ısıtılmadan; oda sıcaklığında çalışılmıştır. Emülsiyonun 60-70°C ısıtılmasının sonuçları araştırılmalıdır.
- b) Emülsifiye Asfalt Betonu'nun performansında "karıştırma" çok büyük bir önem arz etmektedir. Karıştırmayı sıcak karışım gibi gerçekleştirmek hiçbir sonuç vermemektedir. Emülsifiye Asfalt Betonu üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri; karıştırma sırasında emülsiyonun ince bir iplik (sızıntı) halinde agregaya yedire yedire katılmasıdır. Çalışmada, ancak el ile karıştırma olanağı bulunabilmiştir. Karıştırmanın mikser ile yapılması ve mikser emülsiyonu ince bir sızıntı halinde verecek bir tertibatın geliştirilmesi gerekmektedir.
- c) Çalışmada, fillerin yerini alacak çimento oranı, agregaya katılarak karışım yapılmıştır. Çimentonun, emülsiyonun suyunu süratle kuruttuğu ve ön karışım suyuna gereksinim duyulduğu gözlenmiştir. Bu itibarla, çimentonun, emülsiyon verildikten sonra azar azar homojen bir şekilde verilerek karışımın sürdürülmesi sonuçları araştırılmalıdır.
- d) Emülsifiye Asfalt Betonu'nun karışımını ve sarılmayı kolaylaştıracak kimyasal katkı maddeleri üzerinde çalışılmalıdır.

- e) Değişik çimento katkıları için 28 günlük kür süresinde 60⁰C'de Marshall Deneyinden elde edilecek akma değerlerinin, sıcak asfalt betonu için öngörülen akma sınırlarını aşp aşmadığı karşılaştırılmalıdır.
- f) Laboratuvar ekipmanının yetersizliği nedeniyle yapılamayan yorulma ve eğilme deneyleri yapılarak sonuçlar irdelenmelidir.
- g) Değişik sıkıştırma enerjisinin etkileri üzerinde çalışılmalıdır.
- h) Modifiye Asfalt Emülsiyonu'nun karışım performansı üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.
- i) Çimento katkılı emülsifiye asfalt karışımlar üzerinde optimum bitüm içeriğini esas alan tasarım çalışmaları yapılmalı; çimento katkı miktarına bağlı olarak kullanılacak bitüm içeriklerini seçenек olarak sunabilecek tasarımlar geliştirilmelidir.

5. KAYNAKLAR

1. Leech, D., Cold Mix Bituminous Materials for Use in the Structural Layers of Roads, TRL, Project Report 75 – E112A/HM, Berkshire, (1994).
2. Van Gorkum, F., Lubbers, H.E., Priston, R.A.G., Roos, H., Exposure to PAC in Bituminous Road Construction, Eurobitume, 1993, Sweden, 430-436.
3. Head, R.W., An Informal Report of Cold Mix Research Using Emulsified Asphalt as a Binder, Proc. of the AAPT, Vol. 43, 1974, pp. 110-131.
4. OECD, Road Binder and Energy Savings, A Road Transport Research Report, Paris, 1984.
5. The Asphalt Institute, Energy Requirements for Road Pavements, Asphalt Institute Report – Misc – 75-3, 1993.
6. U.S. Environmental Protection Agency, Air Quality and Energy Conservation Benefits from Using Emulsions to Replace Asphalt Cutbacks in Certain Paving Operations, U.S.E.P.A., 1978.
7. Bituminous Emulsion for Highway Pavements, NHPRC Synthesis of Highway Practice No.30, T.R.B., Washington, D.C., 1975.
8. Oruç, Ş. ve Çelik, F., Asfalt Emülsiyonlu Karışımlarda Kireç ve Çimento Kullanımının Soğuk Karışım Değişkenlerinden Optimum Su ve Bitüm Muhtevası Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Asfalt'2000-3.Ulusal Asfalt Sempozyumu, Kasım 2000, Ankara, Bildiriler Kitabı.
9. Bituminous Materials in Road Construction, U.K. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England, 1969.
10. Schmidt, R.J., Santucci, L.E. and Coyne L.D., Performance Characteristics of Cement Modified Asphalt Emulsion Mixes, Proc. of the AAPT, Vol. 42, 1973, pp. 300-319.
11. Terrel, R.L. and Wang, C.K., Early Curing Behavior of Cement Modified Asphalt Emulsion Mixtures, Proc. of the AAPT, Vol. 40, 1971, pp. 108-125.
12. Dardak, H., Performance of Different Mixes of Sand Emulsion in Indonesia, First Congress on Emulsion, Paris, 1993, pp. 4-12-042/01-05.

13. Khweir, K., Windmill, A., Fordyce, D., The Potential of stone filled Emulsions Asphalt, Eurobitume, 1993, Sweden, pp. 681-685.
14. Poncino, H., Andresi, R., Martinez, F., A Laboratory and Field Study of Factors Affecting the Behavior of Emulsified Asphalt Mixes, First World Congress on Emulsions, 1993, Paris, pp 4-40-100/01-06.
15. Sainton, A., Bourdrel, D., Cold Double Treatment Process of Road Materials with Portland Cement and Asphalt Emulsions, Eurobitume, 1993, Sweden, pp 293-297.
16. Uemura, T., Nakamori, Y., Stabilisation Process of Cement Asphalt Emulsion in Japan, First World Congress on Emulsions, 1993, Paris, pp 4-13-16/01-06.
17. Hallaç, M.C., Laboratory Performance and engineering Properties of Bituminous Emulsions Mixes, Internal Report, Civil Engineering Department, The University of Leeds, Leeds, 1997.
18. Needham, D., Developments in Bitumen Emulsion Mixtures for Roads", PhD thesis, University of Nottingham, Nottingham, May 1996.
19. Li, G., Zhao, Y., Pang, S.S., Huang, W., Experimental Study of Cement-Asphalt Emulsion Composite, Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 5, 1998, pp 635-641.
20. Potti, J.J., Eckmann, B., Brûlé, B., Fabre, J-C., Such, C., Leal-Calderon, F., Fuente, J., Slow Setting Cationic Bituminous Emulsions for Construction and Maintenance of Roads (Optel), Eurasphalt & Eurobitume Congress, September 2000, Barcelona (Spain).
21. Karayolları Vakfı (KAV), Bitüm Emülsiyonları ve Yoldaki Uygulamaları, KAV Asfalt Kitapları, 1992.
22. Akzo Nobel Asphalt Applications, Bitumen Emulsion Technical Bulletin, Akzo Nobel, Stockholm, Sweden.
23. AEMA (Asphalt Emulsion Manufacturers Association), A Basic Asphalt Emulsion Manual, Asphalt Institute Manual Series No. 19, Third Edition, USA.
24. Calderón, F.L., Potti, J.J., Centre de Recherche, P.P., Study of Breaking Mechanisms & Cohesion Built-up on Bituminous Emulsions, Eurasphalt & Eurobitume Congress, September 2000, Barcelona (Spain).

25. Keçeciler, A.F., Gümrükçüoğlu, A., Akkol, G., Gökçe, A.F., Bitümlü Malzemeler Laboratuar El Kitabı, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Yayın No. 239, Ankara, 1990.
26. Urgan, S., Asfalt Emülsiyonları ve Bunların Teknik Uygulamaları, Karayolları Teknik Bülten, No. 32, 1971.
27. Hallaç, M.C., Normal Portland Çimentosunun (NPÇ) Asfalt Emülsiyonlu Karışımların (AEK) Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi, Asfalt'98 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Aralık 1998, Ankara, 105-117.
28. Eckman, B., Van Nieuwenhuyze, K., Tanghe, T., Verlhac, P., Prediction of Emulsion Properties from Binder/Emulsifier Characteristics, Eurasphalt & Eurobitume Congress, September 2000, Barcelona (Spain).
29. Ballie, M., Arrachard, E., Poirier, J-E., Bitumen Emulsion Formulation: Use of Chemicals versus droplet size distribution to control Viscosity and Cohesion Kinetics, 2nd World Congress on Emulsion, September 1997, Bordeaux, France, paper 2-1-367.
30. Syndicate des Fabricants d'Emulsions Routieres de Bitume, Les Emulsions de Bitume, Paris, 1976.
31. Gaestel, C., The Breaking Mechanism of Cationic Bitumen Emulsions, Sci Road and Building Material Group, 1968, pp 221-224.
32. Wates, J.M., James, A.D., Zeta-Potential Measurements on Bitumen Emulsions and Road Agregates, First World Congress on Emulsion, 1993, Paris, pp 1-40-089/01-06.
33. Akzo Nobel Asphalt Applications, Bitumen Emulsifiers Technical Bulletin, Akzo Nobel Chemicals, Stockholm, Sweden.
34. James, A., Solving Emulsion Viscosity Problems by the Choice of Emulsifier, Presented at 24th AEMA Meeting, March 1997, Cancun, Mexico, Akzo Nobel Chemicals.
35. Transport and Road Research Laboratory, Recommendations for Road Surface Dressing, HMSO, Road Note 39, 2nd Edition, 1981.
36. Stroup-Gardiner, M., Newcomb, D.E., Epps, J.A., Paulsen, G.L., Laboratory Test Methods and Field Correlations for Predicting the Performance of Chip Seals, Asphalt Emulsions, ASTM STP 1079, H. W. Muncy, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 2-19.

37. Baker, R.F., Asphalt Emulsion Slurry Seal and Wheelpath Inlay, Asphalt Emulsions, ASTM STP 1079, H. W. Muncy, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 65-79.
38. Venton, J., Specifying Blacktop, IHIE Short Report, Highways and Transportation, No. 8, Vol. 37, Aug 1990, pp 16-19.
39. Brown, S.F., Dawson, A.R., Two Stage Mechanistic Approach to Asphalt Pavement Design, Proc. 7 th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, Vol. 1, 1992, pp 16-34.
40. Brown, S.F., Preston, J.N., Cooper, K.E. Application of New Concepts in Asphalt Mix Design, Journal of AAPT, Vol. 60, 1991, pp 264-286.
41. Brennan, M.J., Huet, M., Lafon, J.F., Paute, J.L., Towards Understanding the Behavior of Grave Emulsions by Means of Laboratory Study, Asphalt Emulsions, ASTM STP 1079, H. W. Muncy, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 20-35.
42. SFERB, Emulsions – General Information Applications, SFERB, 1991, pp. 174-196.
43. Bardesi, A., From Stabilization with Emulsion to Gravel Emulsion, First World Congress on Emulsion, Paris, 1993, pp 4-13-206/01-06.
44. Killeen, J., Flynn, E., Brennan, M.J., Cold Mix Macadams Experience in Ireland, Eurobitume, 1993, Sweden, pp 620-622.
45. Brennan, M.J., Coppinger, D.M., A Pilot Study of the Use of Grave-Emulsion for Road Strengthening, An Foras Forbartha Teoranta, 1986.
46. Commission de Normalisation, Graves-émulsion : Définition – Classification – Caractéristiques – Fabrication – Mise en œuvre, NFP 98-121, 1993.
47. Brown, S.F., Snaith, M.S. The Permanent Deformation Characteristics of a Dense Bitumen Macadam Subjected to Repeated Loading, Proc. of AAPT, Vol. 43, 1974, pp 224-248.
48. LCPC, Simple Compression Test for Asphalt Mixes, LCPC, 1979.
49. Lafon, J.F., Goyon, V., Samanos, J., Chaignon, F., In-situ Performance of Cold Mixes – The French Experience, First World Congress on Emulsion, 1993, Paris, pp 4-12-227/01-08.

50. VÄG 94, Swedish Standard, 1994, p 67.
51. Maheas, R., Process for the Manufacture of Stockable Dense Road Asphalts, US Patent Number 4,978,393, 1990.
52. Serfass, J.P., Bertrand, M., Villegle, Mahe, B., Cold Mixing Improved by Double Coating, First World Congress on Emulsion, Paris, 1993, pp 4-12-203/06-09.
53. Serfass, J.P., Bertaud, M., Mahe, B., New Type of Asphalt Cold Mix, Eurobitume, 1993, Sweden, pp 570-573.
54. Chaignon, F., Road Applications of a Special Composite Binder Bitumen/Cement, First World Congress on Emulsion, 1993, Paris, pp 4-1-337/01-16.
55. AEMA, Tentative Guide Specifications #201.00 Cold Mix Emulsified Asphalt Basecourse, AEMA, Washington, USA.
56. The Asphalt Institute, Asphalt Cold-Mix Recycling, Asphalt Institute Manual Series No. 21 (MS-21), First Edition, USA, 1983.
57. The Asphalt Institute, Asphalt Cold Mix Manual, Asphalt Institute Manual Series No. 14 (MS-14), Third Edition, USA, 1989.
58. The Asphalt Institute Emulsified Asphalt Bases, Construction Leaflet 18, 1976.
59. Yollar Türk Milli Komitesi, Yol Üstyapılarında Kullanılan Asfalt Emülsiyonları ve Sıvı Petrol Asfaltlarının Teknik ve Ekonomik Yönden Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi, YTMK, Ankara, 1995.
60. Hunt, G.R., A Cleaner Fight -2. Cardiff Versus Redland, Chemistry in Britain, Nov. 1995, pp 875-877.
61. Malkoç, G., Asfalt Çimentosunun Kimyasal Yapısı, Modifikasyona Etkisi ve Bu Kapsamda Ülkemiz Ürünlerinin Değerlendirilmesi, Asfalt'2000-3. Asfalt Sempozyumu, Kasım 2000, Ankara.
62. Morgan, P., Mulder, A., The Shell Bitumen Industrial Handbook, Shell Bitumen, ISBN-0-95 16625-1-1, 1995.

63. Lien, J.E., Survey of Occupational Exposures of Asphalt Workers, Eurobitume, 1993, Sweden, pp 457-461.
64. Jorgensen, T., Jebens, A., Ruud, O.E., Emission Monitoring from Two Types of Drum Mix Plants, Eurobitume, 1993, Sweden, pp 453-456.
65. Bradt, H.C.A., Beverwijk, C.D.M., Harrison, T., Health Aspects of Hot Bitumen Application, Eurobitume, 1993, Sweden, pp 437-442.
66. Hiersche, E.U., Charif, K., Systemized Mix Design for Ready to Pave Cold Mix Asphalt, First World Congress on Emulsion, 1993, Paris, pp 4-30-130/01-12.
67. James, A.D., Stewart, D., The Use of Fatty Amine Derivatives to Slow Down the Age-hardening Process in Bitumen, International Symposium – Chemistry of Bitumens, 1991, Rome.
68. Ilıcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Soğuk Karışımlarda Agrega Gradasyonunun Optimum Bitüm Muhtevasına Etkisi, 2. Asfalt Sempozyumu, Aralık 1998, Ankara, Bildiriler Kitabı, 85-94.
69. Uluçaylı, M., Yollarda Pürüzlülük Sorunu, Asfalt'2000-3. Asfalt Sempozyumu, Kasım 2000, Ankara.
70. Umar, F., Ağar, E., Yol Üstyapısı, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, Sayı 1451, Dördüncü Baskı, İstanbul, 1991.
71. Department of Transport, Specification For Highway Work, HMSO, London, 1992.
72. Aksoy, A., Asfalt Kaplamalarda Kireçtaşı Petrografisi-Soyulma İlişkisi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2001.
73. Lee, K.W., Prediction and Evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixture in Pavement Systems, Doctor of Philosophy, Austin, Texas University, December 1982.
74. Highway Research Board, Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures, Bibliography 17, Publication 332, 1954.
75. The Asphalt Institute, Cause and Prevention of Stripping in Asphalt Pavements, Educational Series – 10, Second Edition, Maryland 20740.

76. Akili, W., The Effect of Moisture on Laboratory-Prepared Asphalt Mixtures, *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA Vol. 21, No. 1, January 1993, pp 73-83.
77. Hughes, I., Lamb, D.R., Pordes, O., Adhesion in Bitumen Macadam, *J. App. Chem.*, 1960.
78. Akzo Nobel Asphalt Applications, Adhesion Promoters Technical Bulletin, Akzo Nobel Chemicals, Stockholm, Sweden.
79. American Society for Testing Materials, ASTM Designation D 1559, Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus.
80. The Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types, Manual Series-2 (MS-2), Sixth Edition, 1984.
81. Hınıslioğlu, S., An Investigation on the Marshall and Resilient Characteristics of Asphalt Concrete with Bituminous Binder Modified with High Density Polyethylene, Doctorate Thesis, İ.T.Ü., Institute of Science and Technology, İstanbul, 1998.
82. Yao, Z., Monismith, C.L., Behavior of Asphalt Mixtures with Carbon Black Reinforcement, Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, Clearwater, Florida, February 17-19, 1986, p. 564-587
83. Papazian, H.S., The Response of Linear Viscoelastic Materials in the Frequency Domain with Emphasis on Asphalt Concrete Proceedings, International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, 1962, p. 454-463.
84. Kallas, B.F., Riley, J.C., Mechanical Properties of Asphalt Pavement Materials, Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1967, p. 932.
85. Schmidt, R.J., A Practical Method for Measuring the Resilient Modulus of Asphalt Treated Mixes, Highway Research Record No. 404, Highway Research Board, Washington, D.C., 1972, p. 22-32.
86. Brown, E.R., Foo, K.Y., Evaluation of Variability in Resilient Modulus Test Results (ASTM D 4123), *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 19, No. 1, January 1991, pp. 1-13.

87. Majidzadeh, K., Herin, M., Modes of Failure and Strength of Asphalt Films Subjected to Tensile Stresses, Highway Research Record, No. 67, 1965, pp. 98.
88. Kulash, D.J., Toward Performance – Based Specifications for Bitumen and Asphalt Mixtures, Proceedings of Institution of Civil Engineering Transport, 105, August 1994, pp. 187-194.
89. Tian, P., Zaman, M.M., Joakim, G., Laguros, G., Variation of Resilient Modulus of Aggregate Base and Its Influence on Pavement Performance, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 26, No. 4, July 1998, pp. 329-335.
90. American Society for Testing Materials Standards; ASTM Designation D 4123-82, Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, ASTM, 1987.
91. Stuart, K. D., Evaluation of Procedures Used to Predict Moisture Damage in Asphalt Mixtures, Report No. FHWA-RD-86-090, Federal Highway Administration, Washington, D. C., 1986.
92. Özen, H., Bitümlü Karışım Değişkenlerinin Performans Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Hizmet Ömrü Tahmini İçin Bir Model Kurulması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999.
93. ELE-UMATTA, Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens Reference and Operating Manual, Hertfordshire, England, ELE – 1994.
94. Von Quintus, H. Scherocman J., Hughes, C., Kennedy, T., NCHRP Report 338, Asphalt – Aggregate Mixture Analysis System (AAMAS), TRB, National Research Council, Washington D. C., 1991.
95. Alderson, A., UMATTA Testing Equipment Trial Course, England, 1995.
96. Karayolları Genel Müdürlüğü, Yollar Fenni Şartnamesi, KGM Matbaası, Yayın No. 170/2, 1989.
97. Önal, M.A., Kahramangil, M., Bitümlü Karışımlar Laboratuar El Kitabı, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1993.
98. Demirel, Z., Kadioğlu, M., Aray, S., Orhan, F., Alp, A., Toprak ve Stabilizasyon laboratuvarı El Kitabı, KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, 1991.

99. Labib, M., End of Phase II Report, Evaluation of Donor Acceptor Properties of Asphalt and Aggregate Materials and Relationship to Asphalt Composite Performance, SHRP, Washington D.C., 1991.
100. Jaieson, I.L., Jones, D.R., Moulthrop, J.S., Advances in the Understanding of Aggregate Binder Adhesion and Resistance to Stripping, Highways and Transportation, January 1993, pp. 6-19.
101. Cimilli, T., Yapı Malzemesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon, 1986.
102. Kosmatka, S.H., Panarese, W.C., Design and Control of Concrete Mixtures, 13th Edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1988.
103. Benayyat, İ., Portland Çimentosu Üretim Tekniğine Giriş, Makine Mühendisleri Odası, Yayın No. 63, Ankara, 1971.
104. Read, J.M., Hardening of Cement, Project Report Submitted to the Department of Materials Engineering, University College of Swansea, 1992.
105. TS 117, Saybold Viskozite Deneyi İçin Metot, T.S.E., Ankara, Nisan 1964.
106. TS 132, Asfalt Emülsiyonlarının Deney Metotları, T.S.E., Ankara, Mart 1978.
107. TS 1087, Bitümlü Maddelerde Özgül Ağırlık Tayini (Hidrometre, Piknometre ve Su İçinde Tartma Metotları ile), T.S.E., Ankara, Şubat 1972.
108. TS 119, Bitümlü Maddelerin Düktilite Deneyi İçin Metot, T.S.E., Ankara, Nisan 1964.
109. TS 1090, Bitümlü Maddelerin Organik Çözücülerdeki Çözünürlüklerinin Tayini Metodu, T.S.E., Ankara, Şubat 1972.
110. TS 135, Organik Madde veya Kül Deneyi İçin Metot, T.S.E., Ankara, Nisan 1964.
111. Monismith, C.L., Deacon, J.A., Craus, J., Tangella, S.C.S., Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures, Strategic Highway Research Program, National Research Council, SHRP-A/IR-90-011, California, 1990.
112. Aktharhusein, A., Tayebali, A., Deacon, J.A., Monismith, C.L., Comparasion of Axial and Diametral Resilient Stiffnes of Asphalt-Aggregate Mixes, Transportation Research Record, TRR 1492, TRB, Washington D.C., 1995, p. 135-143.

ÖZGEÇMİŞ

Şeref ORUÇ, 1970 yılında Bayburt'ta doğdu, Yüzbaşı Şehit Agâh İlkokulu, Bayburt Ortaokulu ve Bayburt Ticaret Lisesi'nden mezun oldu. 1990 yılında, KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. Öğrenimi sırasında onur ve yüksek onur alma başarılarını göstererek 1994 yılında İnşaat Mühendisi oldu. Aynı yıl KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 1995 yılında KTÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Ulaştırma Anabilim Dalı'nda açılan sınavı kazanarak Araştırma Görevlisi olarak atandı. 1997 yılında yüksek lisans diploması aldıktan sonra, 1998 yılında aynı üniversitede doktora çalışmalarına başladı. Evli ve iki çocuk babası olan ORUÇ, halen aynı üniversitede görev yapmakta ve İngilizce bilmektedir.

EC YÜKSEKÖĞRETİM ENSTİTÜSÜ
BODRUMULU ENSTİTÜSÜ
BODRUMULU ENSTİTÜSÜ