

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KOŞULLANDIRMA SİSTEMLERİNİN GELENEKSEL VE MODİFİYE ASFALT
KARIŞIMLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Erol İSKENDER

EYLÜL 2008
TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KOŞULLANDIRMA SİSTEMLERİNİN GELENEKSEL VE MODİFİYE ASFALT
KARIŞIMLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

İnş. Yük. Müh. Erol İSKENDER

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Doktor (İnşaat Mühendisliği)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08.09.2008
Tezin Savunma Tarihi : 25.09.2008**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Atakan AKSOY
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. H. Hulusi ACAR
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU

Enstitü Müdür V. : Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

ÖNSÖZ

Ulaştırma Anabilim Dalında yapmış olduğum “Koşullandırma sistemlerinin geleneksel ve modifiye asfalt karışımlar üzerindeki etkilerinin araştırılması” adlı bu tezin ülke bilimine ve ekonomisine katkıda bulunacağını ummaktayım.

Ülkemizde, asfalt kaplamaların değerlendirilmesinde şu ana kadar kullanılmamış olan bilgisayarlı tomografi tekniğini kullanarak koşullandırma sistemleri ve katkı uygulamalarının etkinliğinin araştırılması konusunda literatürde olan boşluğun doldurulması hedeflenmiştir.

Çalışma konusunu öneren ve bu konuda bana cesaret veren Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Atakan AKSOY’a çalışmam esnasında değerli vakitlerini bana ayırdıkları ve destek ve teşviklerini hiç eksik etmedikleri için teşekkür eder saygılar sunarım.

Laboratuar çalışmaları sırasında her türlü kolaylığı sağlayarak bu çalışmamın gerçekleştirilmesi noktasında katkıları olan Fakültemiz Dekanı Sayın Prof. Dr. Osman BEKTAŞ’a ve Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Ümit UZMAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada örnek hazırlanması sırasında bütün laboratuar imkanlarını seferber eden Doğuş-Polat Ortak Girişimi yetkililerine ve benden yardımlarını esirgemeyen Sayın Necati BUĞAN’a, deneysel çalışmalarım için laboratuar imkanlarını seferber eden Sayın Prof. Dr. Fazıl ÇELİK’e, tecrübelerinden yararlandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ’a, deneylerin yapılmasında katkıları olan İSFALT AŞ yetkililerine sayın Maden Mühendisi Seyi Ali YILDIRIM’a, Teknisyen Servet HAN’a, Araştırma Görevlisi Ufuk KIRBAŞ’a, tomografi çekimi ve değerlendirilmesi sırasında yardımcı olan Doç. Dr. Polat KOŞUCU ve Teknisyen Pınar SUNGUR’a ve her türlü yardımda bulunan yakın arkadaşım İnşaat Yüksek Mühendisi Celaleddin E. ŞENGÜL’e teşekkür ederim.

Bu çalışmamı, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen eşim ve oğluma ithaf ediyorum.

Erol İSKENDER

Trabzon 2008

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SİMGELER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Özgeçmişi.....	3
1.3. Esnek Üstyapılarda Temel Problemler.....	18
1.3.1. Düşük Sıcaklık Çatlamaları.....	18
1.3.2. Yorulma Çatlamaları.....	19
1.3.3. Tekerlek İzi Oluşumu.....	20
1.3.3.1. Yapısal Tekerlek İzi Oluşumu.....	21
1.3.3.2. Sürekli Tekerlek İzi Oluşumu.....	22
1.3.3.3. Yıpranmaya Dayalı Tekerlek İzi Oluşumu.....	22
1.3.3.4. Tekerlek İzi Oluşumunu Etkileyen Etmenler.....	23
1.3.4. Suya Duyarlılık.....	24
1.3.5. Sürtünme Özelliği.....	24
1.4. Sıcak Karışım Asfaltları Değerlendirmede Kullanılan Deneyler.....	25
1.4.1. Yaygın Olarak Kullanılan Tekerlek İzi Deneyleri.....	26
1.4.1.1. Georgia Yüklü Tekerlek Deney Aleti (GLWT).....	26
1.4.1.2. Asfalt Kaplama Deney Aleti (APA).....	27
1.4.1.3. Hamburg Tekerlek İzi Deney Aleti (HWTD).....	28
1.4.1.4. Purdue Üniversitesi Laboratuvar Tekerlek İzi Deney Aleti(PurWheel).....	30
1.4.1.5. Model Mobile Yük Simülatörü (MMLS3).....	31
1.4.1.6. Wessex Kuru Tekerlek İzi Deneyi.....	32
1.4.1.7. Dönel Yüklü Tekerlek Deney Aleti (RLWT).....	33
1.4.2. Suya Duyarlılık Deneyleri.....	33

1.4.2.1.	Kaynayan Su Deneyi.....	34
1.4.2.2.	Suya Batırma Deneyi	34
1.4.2.3.	Lottman Deneyi.....	34
1.4.2.4.	Tunnicliff ve Root Koşullandırması.....	35
1.4.2.5.	Modifiye Lottman Deneyi.....	35
1.4.2.6.	Suya Batırma (Sıkıştırılmış Örnekler) Deneyi.....	36
1.4.2.7.	SHRP Suya Duyarlılık Çalışması.....	36
1.4.2.8.	Net Adsorbsiyon Deneyi.....	36
1.4.2.9.	Çevresel Koşullandırma Sistemleri (ECS).....	37
1.4.2.10.	Diğer Deneyler.....	37
1.4.3.	Asfalt Kaplamaları Değerlendiren Bazı Deneylerin Karşılaştırılması.....	37
1.5.	Asfalt Kaplamalarda Tomografi Uygulamaları.....	39
1.6.	Asfalt Kaplamalarda Katkı Uygulamaları.....	41
1.6.1.	Asfalt Kaplamalarda Kullanılan Katkı Maddeleri.....	42
1.6.2.	Modifikasyon Yöntemleri.....	46
1.6.2.1.	Bitümün Modifikasyonu	46
1.6.2.1.1.	Şantiyede Tesis Kurarak Yapılan Modifiye Bitüm.....	46
1.6.2.1.2.	Hazır Modifiye Bitüm (Piyasadan Sağlanan).....	47
1.6.2.2.	Karışımın Modifikasyonu.....	47
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	49
2.1.	Materyal.....	49
2.1.1.	Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri.....	49
2.1.2.	Agrega Özellikleri.....	50
2.1.3.	Çalışmada Kullanılan Katkı Maddeleri ve Özellikleri.....	50
2.1.3.1.	SBS Katkı Maddesi ve Özellikleri.....	51
2.1.3.2.	Wetfix BE Katkı Maddesi ve Özellikleri.....	54
2.2.	Yöntem.....	55
2.2.1.	Elek Analizi ve Marshall Tasarım Deneyi.....	58
2.2.2.	Koşullandırma Sistemleri	67
2.2.2.1.	Suda Bekletmeli Döngü Hasarı.....	67
2.2.2.2.	Donma-Çözülme Döngü Hasarı.....	68
2.2.2.3.	Donma-Çözülme ve Suda Bekletme Döngü Hasarı.....	69
2.2.3.	Tekrarlı Yük Sünme Deneyi.....	69
2.2.4.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi.....	74

2.2.4.1.	Deneyde Kullanılan Ölçütler.....	75
2.2.4.2.	Deneyin Yapılışı.....	75
2.2.4.3.	Hesaplamalar.....	76
2.2.4.4.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Örneklerine Bilgisayarlı Tomografi Tekniğinin Uygulanması.....	77
2.2.5.	Dolaylı Çekme Deneyi.....	78
2.2.5.1.	Dolaylı Çekme Deneyinde Uygulanan Ölçütler.....	79
2.2.5.2.	Deneyin Yapılışı.....	79
2.2.5.3.	Hesaplamalar.....	81
2.2.6.	Fransız Tekerlek İzi Deneyi.....	81
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	83
3.1.	Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyine Ait Bulgular ve İrdelemeler.....	83
3.2.	Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerine Ait Bulgular ve İrdelemeler.....	90
3.3.	Dolaylı Çekme Deneyine Ait Bulgular ve İrdelemeler.....	95
3.4.	Tekrarlı Yük Sünme Deneyine Ait Bulgular ve İrdelemeler.....	102
3.5.	Fransız Tekerlek İzi Deneyine Ait Bulgular ve İrdelemeler.....	108
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
5.	KAYNAKLAR.....	121
6.	EKLER.....	129
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Laboratuarda asfalt karışımlara uygulanan deneyler, uygulamada aynı anda birçok parametrenin etkimesinden dolayı arazi performans tahmininde yetersiz kalmaktadır. Laboratuarda yapılan sıkıştırma yöntemleri ile arazideki silindir sıkıştırması arasında önemli düzeyde farklılıklar oluşmaktadır. Marshall yönteminin gerçek sıkıştırmayı temsil yeteneği düşük olup, değişik ülkelerde kullanılan dönel sıkıştırmacıların dönme açısı ile ilgili belirsizlikleri bulunmaktadır.

Asfalt kaplamaları değerlendiren hiçbir cihazda yağmur, kar, erime, donma, güneş vs. gibi çevre koşullarını deney anında uygulayabilen özellik bulunmamaktadır. Asfalt karışımları bu bağlamda değerlendirmek için çeşitli koşullandırma sistemleri geliştirilmiş fakat bunların etkinliği konusunda henüz fikir birliği oluşmamıştır.

Bu araştırmada, katkısız, SBS elastomerik türde polimer katkılı, amin bileşimli soyulma önleyici katkılı Marshall briketlerine ve karot örneklerine üç farklı koşullandırma sistemi uygulanarak karışım performansının değerlendirilmesinde kullanılan dolaylı çekme mukavemeti, dolaylı çekme, tekrarlı sünme ve Fransız tekerlek izi deneyleri yapıldı. Karışımlar çatlama direnci ve tekerlek izi oluşumu bağlamında değerlendirildi. Asfalt katkı maddelerinin etkinliği, koşullandırma sistemlerinin karışım performansı üzerindeki etkileri araştırıldı ve laboratuvar ve arazi performansının karşılaştırılması yapıldı. Bilgisayarlı tomografi tekniği ile asfalt kaplamaların boşluk dağılımı ve çatlama şekilleri irdelendi.

Genel olarak, çatlama dolaylı çekme mukavemeti deneyine maruz kalmış örneklerde örneğin merkezinden başladığı, bazı örneklerde boşlukların birleşmesi şeklinde geliştiği, karot örneklerinde boşlukların küçük fakat sayıca çok oldukları, laboratuvar örneklerinin performansının arazi örneklerinininkinden daha iyi olduğu, katkıların karışımların tekerlek izi ve çatlama direncini önemli derecede artırdığı görüldü.

Anahtar Kelimeler: Koşullandırma Sistemleri, Modifiye Asfalt Karışımlar, SBS, Tekerlek İzi, Su Hasarı Önleyici Katkı, Su Hasarı, Bilgisayarlı Tomografi

SUMMARY

Investigation of Effects of Conditioning Systems on Conventional and Modified Asphalt Mixtures

Tests used for evaluation of asphalt mixtures at laboratory are inadequate for prediction of performance because of a lot of parameters act on at the same time. Laboratory compaction methods can not represent road compaction. It is known that Marshall Compaction is not good method simulates in situ compaction. Gyrotory compactors are used by various countries but some doubtfulness available related to gyrotory angle in this test device.

Any device evaluating of asphalt mix does not contain properties of environmental condition as thawing, freeze, rainfall and so forth at the test time. In this context, a variety of conditioning systems have been presented but efficient of these systems is debated.

In this research; literature review interested in indirect tensile, indirect tension strength, repeated creep and French rutting tests, types of pavement distress, conditioning systems, additive types and advantages and disadvantages of some performance tests are presented.

120 Marshall Briquettes and 40 core samples were produced for repeated creep, indirect tension strength and indirect tension tests and 18 specimens were used Marshall Design. Also 8 slabs were produced for French rutting test. Marshall Briquettes were produced same asphalt content with two agent type and non additive. Samples were divided to four groups. Three groups with different conditioning systems and control group were tested. Computed tomography was performed indirect tension strength test samples before and after test.

In general, cracking was started centre of asphalt briquettes and cores. In some samples, cracking was developed combining air voids in samples. That air voids in core samples is smaller and mostly than laboratory samples were observed. Asphalt mixtures prepared laboratory gave better results than cores. Generally modified mixtures reveal more positive results in view of the creep, rutting and cracking manner.

Key Words: Conditioning Systems, Modified Asphalt Mixtures, SBS, Rutting, Anti-Stripping Agent, Moisture Damage, Computed Tomography

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. SBS'ler için deformasyon-zaman ilişkisi (40°C).....	4
Şekil 2. 40°C sünme deneyi sonuçları.....	5
Şekil 3. Sıkıştırma yöntemlerinin elastik deformasyon üzerindeki etkisi.....	5
Şekil 4. Sıkıştırma yöntemlerinin kalıcı deformasyon üzerindeki etkisi.....	6
Şekil 5. Düşük sıcaklıklarda polimer modifikasyonunun etkisi (1).....	7
Şekil 6. Düşük sıcaklıklarda polimer modifikasyonunun etkisi (2).....	7
Şekil 7. 40°C de sünme davranışlarının karşılaştırılması.....	8
Şekil 8. Esneklik modüllerinin sıcaklığa göre karşılaştırılması.....	8
Şekil 9. Şematik LCPC deney düzeneği.....	9
Şekil 10. Asfalt tipi ve agrega gradasyonunun dolaylı çekme mukavemetine etkisi	10
Şekil 11. Asfalt tipi ve agrega gradasyonunun sünme deformasyonu üzerindeki etkisi.....	11
Şekil 12. Yerel hacim fraksiyonlarının ölçümü için kare ağ.....	13
Şekil 13. İki eksenli durumun gösterilmesi, yapısal heterojen malzeme üzerine izotropik basınç: problem ve gerilme dağılışı diyagramı.....	13
Şekil 14. Üç karışımın bölgesel kesit görünüşleri.....	14
Şekil 15. Boşluk sisteminin üç eksenli gösterimi.....	15
Şekil 16. 50 döngüde sıkıştırılan örneklerin yatay X-ışını tomografisi.....	17
Şekil 17. Asfalt ve agregalardan hava boşluklarını ayırt etmek için görüntü.....	17
Şekil 18. 50 döngü ile sıkıştırılmış örneklerin düşey kesitinin optik dijital kamera görüntüsü.....	18
Şekil 19. Termal çatlama örneği.....	19
Şekil 20. Yorulma çatlamlarına örnekler.....	20
Şekil 21. Tekerlek izinde yapısal oturma örneği.....	21
Şekil 22. Tekerlek izi oluşumlarına örnekler.....	22
Şekil 23. Çivili lastiklerin yol üzerindeki hasarları.....	23
Şekil 24. Georgia yüklü tekerlek deney aleti.....	26
Şekil 25. APA deney düzeneği.....	28
Şekil 26. HWTD ve deney örneklerinden görünüm.....	28

Şekil 27.	Şematik Hamburg tekerlek izi deney sonucu.....	29
Şekil 28.	Superfos inşaat tekerlek izi aleti (SCRT).....	30
Şekil 29.	Purdue üniversitesi laboratuvar tekerlek izi deney aleti.....	31
Şekil 30.	MMLS3 deney aleti.....	32
Şekil 31.	Wessex kuru tekerlek izi deney aleti.....	32
Şekil 32.	Dönel yüklü tekerlek deney aleti.....	33
Şekil 33.	XRT görüntüleme şematik gösterimi.....	40
Şekil 34.	XRT görüntülemesiyle üretilen kesit fotoğrafları.....	40
Şekil 35.	Distilasyon kazanı bazı petrol ürünleri.....	41
Şekil 36.	SBS (Kraton D 1101) polimerinden bir görüntü.....	53
Şekil 37.	Bitüm içerisinde SBS'in dağılışı.....	53
Şekil 38.	Kullanılan SBS maddesinin yapısı.....	53
Şekil 39.	Asfaltla kaplanmış SBS moleküllerinin üç boyutlu görünümü.....	54
Şekil 40.	SBR ve SBS Yapıları.....	54
Şekil 41.	Wetfix BE katkısından çeşitli görüntüler.....	56
Şekil 42.	Akış diyagramı.....	57
Şekil 43.	Agrega karışımının tane boyutu dağılımı eğrisi ve şartname limitleri.....	59
Şekil 44.	Marshall deneyinden elde edilen grafikler.....	61
Şekil 45.	Üretilen 4" Marshall briketleri ve aşınma tabakasından alınan karotlar...	62
Şekil 46.	Koşullandırma sırasında dağılan bir karot örneği.....	68
Şekil 47.	Örneklerin donma-çözülme döngüleri.....	68
Şekil 48.	Nottingham asfalt deney aleti (NAT).....	69
Şekil 49.	Şematik NAT sünme deney düzeneği.....	70
Şekil 50.	Şematik tekrarlı yük sünme deneyi.....	70
Şekil 51.	Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı.....	71
Şekil 52.	Log-log ölçekli çizimde a ve b regresyon sabitleri.....	72
Şekil 53.	Kalıcı deformasyon için α ve μ parametreleri.....	73
Şekil 54.	Dolaylı çekme mukavemeti deney düzeneği.....	74
Şekil 55.	Tomografi çekimi sırasında resimler.....	77
Şekil 56.	Dolaylı çekme deneyinde yükün uygulanma ve deformasyon şekli.....	78
Şekil 57.	Dolaylı çekme deneyinden görüntüler.....	80
Şekil 58.	Fransız tekerlek izi deney aleti.....	81
Şekil 59.	Değişik örneklerinin 10°C ve 20°C'deki DÇM değerleri.....	85

Şekil 60.	Farklı karışımların ve karot örneklerinin 10°C'deki ortalama DÇM değerleri.....	87
Şekil 61.	Farklı karışımların ve karot örneklerinin 20°C'deki ortalama DÇM değerleri.....	87
Şekil 62.	Değişik çevresel koşullandırma sistemlerinin 10°C'de karışımlar üzerindeki etkisi.....	88
Şekil 63.	Değişik çevresel koşullandırma sistemlerinin 20°C'de karışımlar üzerindeki etkisi.....	88
Şekil 64.	Karışımların 10°C ve 20°C'deki ortalama DÇM değerlerinin karşılaştırılması.....	89
Şekil 65.	SBS katkılı örneğe ait 2 boyutlu görüntü.....	91
Şekil 66.	14 numaralı SBS katkılı örneğin 2D boşluk dağılımı	92
Şekil 67.	Katkısız örneklerden 2D çatlama örneği.....	92
Şekil 68.	SBS katkılı örneklerden 3D görüntü örnekleri.....	93
Şekil 69.	Dolaylı çekme mukavemeti deney örneklerinin çatlama gelişimi.....	94
Şekil 70.	20°C ve 40°C sıcaklıkta karışımların esneklik modülü değerleri.....	98
Şekil 71.	Koşullandırma türünün esneklik modülü üzerindeki etkisi.....	99
Şekil 72.	Karışım türünün esneklik modülü üzerindeki etkisi.....	100
Şekil 73.	Koşullu ve koşulsuz örneklerin tekrarlı yük sünme deneyi sonuçları.....	104
Şekil 74.	Koşullandırma sisteminin kalıcı deformasyona etkisi.....	106
Şekil 75.	Koşullandırma sistemlerinin karışım türleri üzerindeki etkisi.....	107
Şekil 76.	Tekerlek izi deneyi sonuçları.....	113
Şekil 77.	Su içerisinde ve kuru ortamdaki ortalama tekerlek izi oranları.....	114
Ek Şekil 1.	Dolaylı çekme mukavemeti deneyinden önce ve sonra çekilen tomografi görüntüleri.....	129

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.	HMA'ları değerlendirmede kullanılan deney yöntemleri..... 25
Tablo 2.	Tekerlek izi deneylerinin üstünlük ve sakıncaları..... 38
Tablo 3.	Statik ve tekrarlı yük sünme deneylerinin üstünlük ve sakıncaları..... 39
Tablo 4.	Kaplama uygulamalarında kullanılan modifiyerlerin genel çeşitleri..... 43
Tablo 5.	Asfalt betonunun kıvamı üzerine modifiyerlerin genel etkileri..... 45
Tablo 6.	Bitümlü bağlayıcının özellikleri..... 49
Tablo 7.	Çalışmada kullanılan agregaların özellikleri..... 50
Tablo 8.	Wetfix BE katkısının fiziksel ve kimyasal özellikleri..... 55
Tablo 9.	Yapılan deneyler için üretilen briket ve slab numara tanımlamaları..... 56
Tablo 10.	Tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımları..... 58
Tablo 11.	Karışımın tane boyutu dağılımı, tolerans sınırları ve şartname limitleri..... 58
Tablo 12.	Marshall deney formu..... 60
Tablo 13.	Kullanılan agregaların ve bitümün özgül ağırlıkları..... 60
Tablo 14.	Optimum bitüm içeriğindeki deney sonuçları..... 62
Tablo 15.	Karot örneklerinin özellikleri..... 63
Tablo 16.	Katkısız Marshall briketlerinin özellikleri..... 64
Tablo 17.	SBS katkılı Marshall briketlerinin özellikleri..... 65
Tablo 18.	Wetfix BE katkılı Marshall briketlerinin belirli özellikleri..... 66
Tablo 19.	Tekrarlı sünme deneyinde uygulanan parametreler..... 73
Tablo 20.	Dolaylı çekme deneylerinde uygulanan ölçütler..... 79
Tablo 21.	Dolaylı çekme mukavemeti deneyi sonuçları..... 84
Tablo 22.	Karışımların koşullandırma türlerindeki çekme mukavemeti oranları..... 90
Tablo 23.	20°C ve 40°C'de karışımların esneklik modülleri..... 97
Tablo 24.	Tekrarlı yük sünme deneyi sonuçları..... 103
Tablo 25.	Katkısız kuru örneklerin tekerlek izi deneyi sonucu..... 109
Tablo 26.	Katkısız örneklerin su içerisindeki tekerlek izi deneyi sonucu..... 110
Tablo 27.	SBS katkılı kuru örneklerin tekerlek izi deneyi sonucu..... 111
Tablo 28.	SBS katkılı örneklerin su içerisindeki tekerlek izi deneyi sonucu..... 112

Ek Tablo 1. Marshall deneyi düzeltme faktörleri.....	145
Ek Tablo 2. Marshall deney formu.....	146
Ek Tablo 3. SBS katkıli örneklerin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları.....	147
Ek Tablo 4. Wetfix BE katkıli örneklerin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları	149
Ek Tablo 5. Katkısız örneklerin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları.....	151
Ek Tablo 6. Karot örneklerinin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları.....	153
Ek Tablo 7. SBS katkıli örneklerin 40°C sıcaklıkta dolaylı çekme deneyi sonuçları.....	155
Ek Tablo 8. Wetfix BE katkıli örneklerin 40°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları	157
Ek Tablo 9. Katkısız örneklerin 40°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları.....	159
Ek Tablo 10. Karot örneklerinin 40°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları.....	161
Ek Tablo 11. SBS katkıli örneklerin tekrarlı sünme deneyi sonuçları.....	163
Ek Tablo 12. Wetfix BE katkıli örneklerin tekrarlı sünme deneyi sonuçları.....	164
Ek Tablo 13. Katkısız örneklerin Tekrarlı sünme deney sonuçları.....	165
Ek Tablo 14. Karot örneklerinin tekrarlı sünme deneyi sonuçları.....	166

SİMGELER DİZİNİ

a	:Tekrarlı yük sünme deneyi sonlandırma parametresi
A	:Briketin havadaki ağırlığı
A,m	:Regresyon sabitleri
Ab	:Kaba agreganın su absorpsiyonu
b	:Tekrarlı yük sünme deneyi eğim parametresi
B	:Briketin havadaki ağırlığı
C	:Briketin sudaki ağırlığı
Dp	:Briketin hacim özgül ağırlığı
Dt	:Briketin maksimum teorik özgül ağırlığı
e	:Kalıcı deformasyon (%)
E	:Elastisite modülü (MPa)
Gb	:Bitümün özgül ağırlığı
G_{ef}	:Agreganın efektif özgül ağırlığı
G_{sb}	:Agreganın hacim özgül ağırlığı
h	:Örnek yüksekliği
N	:Tekrarlı yük adedi
P	:Numuneye uygulanan yük (kN)
P_{ba}	:Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak absorbe edilen bitüm
P_{be}	:Agreganın yüzdesi olarak efektif bitüm miktarı
P_f	: Numunenin bozulduğu andaki yük (pound)
S_m	:Karışımın rijitlik modülü
St	: Dolaylı çekme mukavemeti (psi)
t	:Zaman (sn)
t_1	:Yükleme süresi (sn)
v	:Poisson oranı
V	:Briketin hacmi
VMA	:Agregalar arası boşluk yüzdesi
W_a	:Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm
x	:Malzemenin geri dönme yeteneği

α	: Tekrarlı yük sünme deneyi eğim parametresi
β	: Model parametresi
γ	: Poisson oranı
Δh	: Toplam yatay deformasyon
Δv	: Toplam düşey deformasyon
ϵ_c	: Basınç deformasyonu
ϵ_{pn}	: Kalıcı deformasyon
ϵ_t	: Çekme deformasyonu
$\epsilon t(t)$: Sünme deformasyonu (inç/inç)
μ	: Tekrarlı yük sünme deneyi sonlandırma parametresi
σ_t	: Numuneye uygulanan dolaylı çekme gerilmesi değeri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Bitümlü karışımları etkileyen asıl problemler; boyuna profil düzensizlikleri gibi özellikle tekerleğin geçtiği güzergahlarda (tekerlek izleri) enine profil deformasyonu biçiminde kendini gösteren kalıcı deformasyonlar, kaplamanın su hasarı (taşıma kapasitesinin daha da düşmesine sebep olacak muhtemel su girişi) ve taşıma kapasitesini de azaltan çatlama mekanizmalarıdır [1].

Performans azalmasıyla ilişkili olan problemlerden birisi olan kalıcı deformasyon, dünyanın önde gelen çalışma gruplarının vurguladığı başlıca sorundur. Tekerlek izinde oturma, tekrarlı yükler altında üstyapı sisteminin her bir tabakasında oluşan kalıcı deformasyonların zamanla ilerleyen birikiminden oluşmaktadır [2,3].

Asfalt kaplamaların performans analiz süreçlerinde; su hasarı, tekerlek izinde oturma, düşük sıcaklık çatlama, yorulma çatlama, bitümlü bağlayıcının yaşlanması gibi konular başlıca yer tutmaktadır. Laboratuarda; çeşitli çevresel hasar sistemlerinin uygulanmasıyla, seçilen bir performans problemi, belirli yönleri ile birlikte inceleniyor olsa da uygulama koşullarında farklı problemlerin birlikte gelişiyor olması, sorunların değerlendirilmesi konusunu oldukça zorlaştırmaktadır [4].

Kaplama karışımlarının tasarımında, laboratuarda elde edilen sonuçlar ile uygulamadan elde edilen sonuçlar arasında önemli sayılacak düzeyde farklılıkların olduğu bilinmektedir. Laboratuarda, mekanik özellikler bağlamında, uygulamadan daha iyi sonuç elde edildiği, ülkemizde yaygınca kullanılan Marshall sıkıştırma yöntemi ile laboratuarda tasarlanan boşluk düzeyinin üzerinde boşluk düzeylerinin uygulama aşamasında olduğu, yeterli sıkıştırma yapılsa dahi daha yüksek boşluk düzeylerinin varlığı bilinmektedir. Kaplamanın servis ömrü boyunca, özellikle ilk servis sürecinde, daha yüksek boşluk varlığının (pessimum void concept) su hasarı gelişimine ve bununla birlikte plastik deformasyonlara neden olduğu değerlendirilmektedir [5,6].

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de, çeşitli katkıların bitümlü karışımlara katılma biçimi, katılma oranı, katkının türü ve dolayısıyla katkıların efektif ve göreceli etkinliklerinin değerlendirilmesi konuları güncel olup henüz tam olarak aydınlatılamamıştır [7,8].

Bitümlü karışımların tasarlanma aşamasında, kullanılan sıkıştırma düzeneklerinin farklılığı söz konusudur. Araştırmalar, özellikle Marshall sıkıştırma yönteminin, uygulama koşullarını en düşük düzeyde simüle ettiğini göstermektedir. Marshall briketleri üzerinde gerçekleştirilen; çatlama (dolaylı çekme mukavemeti deneyi ile), sünme-plastik deformasyon (statik sünme, tekrarlı sünme, Marshall stabilitesi/akma oranı değerlendirmesi) incelemelerinin farklı sonuçlar verdiği, yanılıcı olabildiği, farklı karışım türleri ve özellikle de katkıların göreceli etkinliklerin değerlendirilmesinde seçilen granülometri türlerine bağlı olarak farklı korelasyonlar oluşturduğu bilinmektedir [4, 9].

Hasarsız bir test yöntemi olan bilgisayarlı tomografi (computed tomography) tekniği asfalt karışımlara uygulanarak, briketlerin çeşitli kesitlerinden yapılan incelemeler ile boşluk dağılımları belirlenebilmektedir [10-20].

Katkıların etkinliğinin tam olarak ortaya konulamaması, özellikle rölatif oranlar arasındaki performans farklılıklarının etkinlik anlamında yansıtılmaması, su hasarı-tekerlek izi ilişkisi hipotezi; köşelilik faktörüne bağlı olarak gelişen iskeletsel hamur yapısı içindeki performans farklılıkları, bu bağlamda özellikle son yıllarda önerilmeye başlayan tomografi yöntemi değerlendirmeleri çalışma kapsamında, çoklu katkı seçenekleri, koşullandırma uygulamaları, farklı yöntemler ile yer almaktadır.

Asfalt kaplamalarda oluşan problemlerin çok çeşitli olabilmesi, çok sayıda termodinamik değişkenin etkimesi dolayısıyla bir problemi seçilen bir yönüyle tek başına değerlendirmek zorlaşmaktadır. Oluşan genel hasarlar; kaplamaya suyun girişi ile ya da donma-çözülme hasarı biçiminde oluşmaktadır. Bu bağlamda; seçilen koşullama sistemi, briketler ya da karotlar üzerinde bir hasar oluşturabilmeli ve oluşan bu hasar, mevcut deneylerle gözlemlenebilir bir mekanik ölçüt ortaya koyabilmelidir. Farklı deney yöntemlerinde ölçülen aynı problem için farklı olabilmektedir ki, bu bir tartışma konusudur.

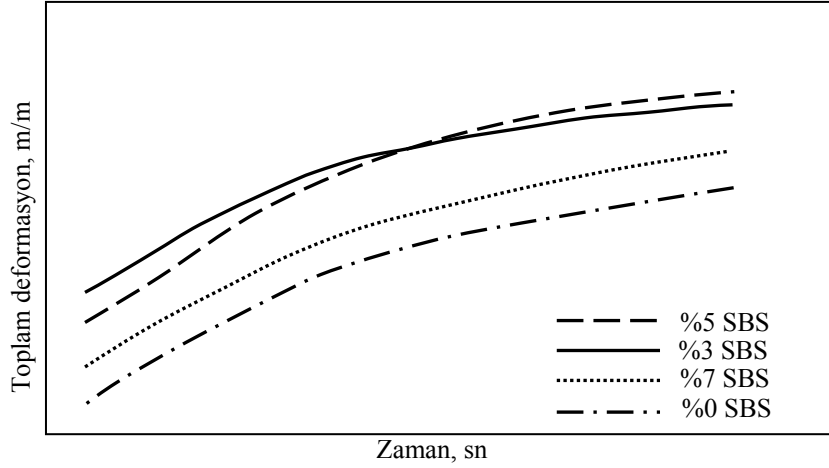
Bu araştırma; birçok örnek üzerinde, tekrarlı su hasarı koşullama sistemlerinin denenmesiyle, polimerli ve aminli karışımlar için gözlemlenebilir bir hasarın oluşup oluşmama durumunun araştırılması amaçlamıştır. Aynı konu, donma-çözülme hasar modeli için de araştırılmıştır. Bu kapsamda, uygulanmasına karar verilen 1. koşullama sistemi (suda bekletme), 2. koşullama sistemi (donma-çözülme) ve süperpoze hasar biçimleri (1. koşullama ve 2. koşullama) uygulanmış ve bu hasar oluşumları seçilen yöntemlerle gözlemlenebilmiştir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında bu çalışmanın ana amacını; asfalt kaplamaların arazi ve laboratuvar performanslarının karşılaştırılması, farklı koşullandırma sistemlerinin uygulanması ve bu koşullandırma sistemleri altında asfalt kaplamaların tekerlek izi ve çatlama direnci yönüyle değerlendirilmesi, konunun farklı katkı maddeleri ile geliştirilmesi, güncel bir konu olan tekerlek izi-su hasarı ilişkisinin dolaylı çekme mukavemeti, dolaylı çekme deneyi, tekrarlı yük sünme deneyi ve Fransız tekerlek izi deneyi ile irdelenmesi ve karışımların boşluk dağılımlarının ve numunelerde deneylerden sonra oluşan hasarların (çatlama ve/veya sıkışma) bilgisayarlı tomografi yöntemiyle değerlendirilmesi oluşturmaktadır.

1.2. Çalışmanın Özgeçmişi

Sünme deney değişkenlerinin incelendiği çalışmada; briket yüksekliğinin üniform bir etkisinin olmadığı, artan enkesit alanı ile rijitliğin azaldığı yönünde bir eğilim olduğu, Marshall briketlerine yapılan deneylerden alınan sonuçların tekrarlanabilirliğinin karot örneklerinden alınan sonuçlarıkinden daha yüksek olduğu, prizmatik briketlerin silindirik briketlerden daha çok dağılabileceği vurgulandı [21].

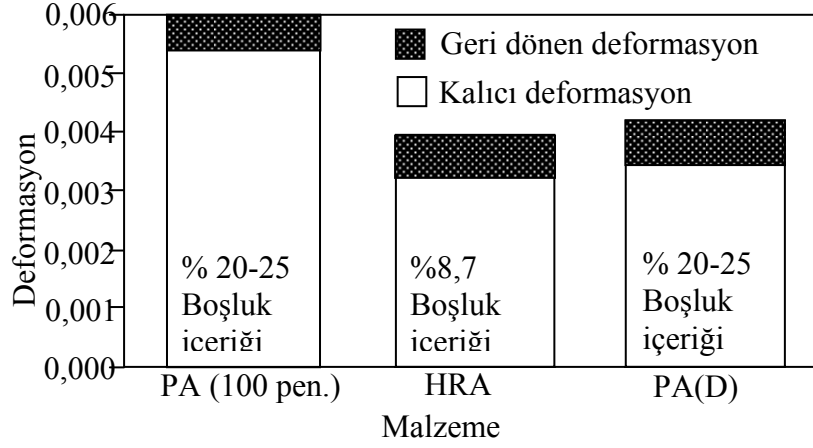
Stiren-bütadiyen-stiren (SBS) polimerlerin çeşitli oranlarıyla modifiye edilmiş bitümleri kullanarak karşılaştırma yapmak için, modifiye edici olarak bilinen etilen vinil asetat (EVA) ile modifiye edilmiş aynı bitümün kullanıldığı, her iki tip bitüme farklı penetrasyon derecelerinde statik ve dinamik sünme deneylerinin 40°C ve 50°C sıcaklıklarda uygulandığı, statik sünme deneyi ile konunun doğasını tahmin etmenin zor olduğu, dinamik sünme deneyinde ise her iki sıcaklıkta yapılan deneyler arasında tatmin edici bir ilişki bulunduğu, benzer şekilde bu sünme deneyinin sonunda toplam kalıcı deformasyonlar ve laboratuvar test izi sahası (LTT) deney sonuçları arasında ilişkinin bulunduğu ve bununda dinamik sünme deneyinin SBS modifiye bitümler için bir gözlemlene deneyi olarak kullanılabilmesi, tekerlek izi ve dinamik sünme deneylerinde SBS modifiye bitümlerinin yükten kurtulduktan sonra iyi elastik geri dönme ve dolayısıyla yüksek derecede tekerlek izi oluşum direnci gösterdiği, polimerlerin karışımın tekerlek izi oluşum direncini artırmasına rağmen statik sünme deneyinde zaman-deformasyon grafiğinde eğrilere yansımadağı belirtilmektedir[22]. Statik sünme deneyi yerine tekrarlı yük sünme deneyinin kullanılmasının daha uygun olduğu, bu deney ile tekerlek izi deneyleri arasında uyumlu bir ilişkinin olduğu vurgulanmaktadır[22-25].



Şekil 1. SBS'ler için deformasyon-zaman ilişkisi (40°C) [22].

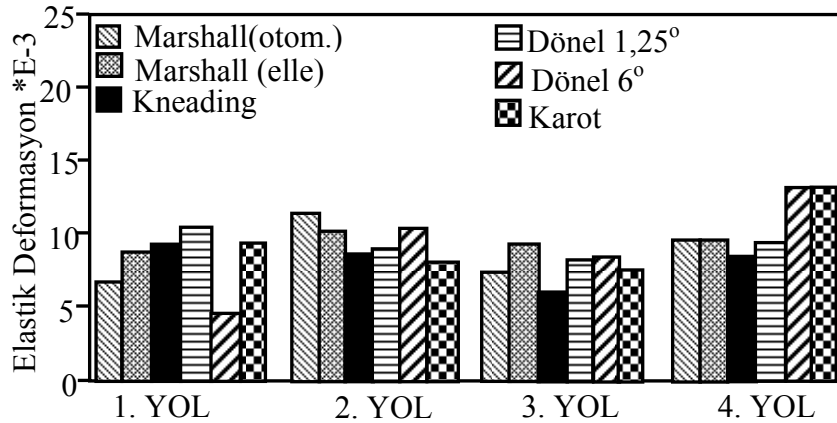
Bitümün modifikasyonu için termoplastik elastomerlerden en yaygın olarak kullanılan Stiren-İsopren-Stiren (SIS) ve SBS blok kopolimerinin kullanıldığı, kalıcı deformasyon direncini tahmin için Marshall deneyi, statik ve dinamik sünme deneylerinin uygulandığı, Marshall stabilitesi ve gerçek tekerlek yükü uygulamasına dayalı tekerlek izi oluşumu arasında bir ilişkinin olmadığı, statik ve dinamik sünme deneylerinde de; modifiye bitümün geleneksel bitümden daha iyi performans gösterdiği, sonuç olarak da, tekerlek izi oluşum direncinin en az on kat arttığı, modifikasyon seviyesine bağlı olarak yorulma direncinin 2,5 ile 4,5 kat arttığı, düşük seviyede modifikasyonda bile SBS modifiye bitümün adezyon özelliğinin dikkate değer bir şekilde arttığı dile getirilmektedir [26].

Bitüm kimyası ile asfalt karışımların düşük sıcaklık davranışı arasındaki ilişkinin irdelendiği çalışmada, dört farklı kaynaktan (Venezuela, Suudi Arabistan, Meksika ve Rusya), beş farklı bitüm ve üç farklı karışım tipinde (yoğun tane boyutu dağılımlı taş mastik ve poroz asfalt) tasarım gerçekleştirildiği, agrega olarak kırılmış granit kullanıldığı, karışımların "Thermal Stress Restraint Specimen Test" deneyine tabi tutulduğu, kırılma sıcaklığı, kırılma gerilmesi, geçiş sıcaklığı (transition temperature) gibi parametrelerin ölçüldüğü ve kırılma sıcaklığının (fracture temperature) yalnızca yaşlanma derecesi tarafından değil bitüm kaynağından da etkilendiği, yaşlanmamış briket için farklı bitümlerden dolayı kırılma sıcaklığındaki maksimum farklılığın yaklaşık 5°C olduğu, aynı bitüm kaynağı için B180'in kırılma sıcaklığının B85'ten yaklaşık 2°C daha düşük olduğu, bitümlerin düşük sıcaklık çatlama direncinin bitümün yumuşama noktasıyla arttığı, yaşlanmanın kırılma sıcaklığında artışa yol açtığı belirtilmektedir [27].

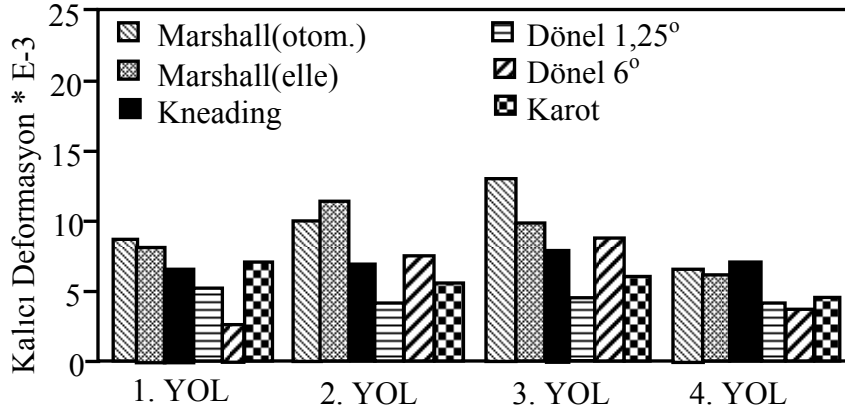


Şekil 2. 40°C sünme deneyi sonuçları [28]. PA (100 Pen): Modifiye edilmemiş poroz asfalt, HRA: Sıcak serilmiş asfalt (hot rolled asphalt), PA (D): Modifiye edilmiş poroz (boşluklu) asfalt.

Marshall otomatik darbeleri, Marshall el kontrolü darbeleri, California yoğurmalı, dönel kaymalı (1,25°), dönel kaymalı (6°) sıkıştırma yöntemlerinin değerlendirildiği çalışmada, briketlere Marshall stabilite, esneklik modülü, statik sünme ve parçacık uyum analizi deneylerinin gerçekleştirildiği, 60°C sıcaklıkta yürütülen statik sünme deneyleri sonucunda dönel kaymalı sıkıştırma (1,25°) yönteminin en büyük elastik deformasyonu ve en küçük kalıcı deformasyon değerini verdiği, Marshall sıkıştırma yöntemlerinin aynı eğilimde olduğu ve otomatik Marshall sıkıştırıcısında hazırlanan briketlerin en büyük kalıcı deformasyonu verdiği, bütün deneyler göz önüne alındığında, sonuç olarak; mühendislik özelliklerini en iyi yansıtan ve uygulama sıkıştırmasına en iyi benzeyen sıkıştırma yönteminin dönel kaymalı sıkıştırma olduğu, otomatik Marshall sıkıştırma yönteminin gerçeği simüle etme yeteneğinin en düşük deney olduğu dile getirilmektedir [29].



Şekil 3. Sıkıştırma yöntemlerinin elastik deformasyon üzerindeki etkisi [29]

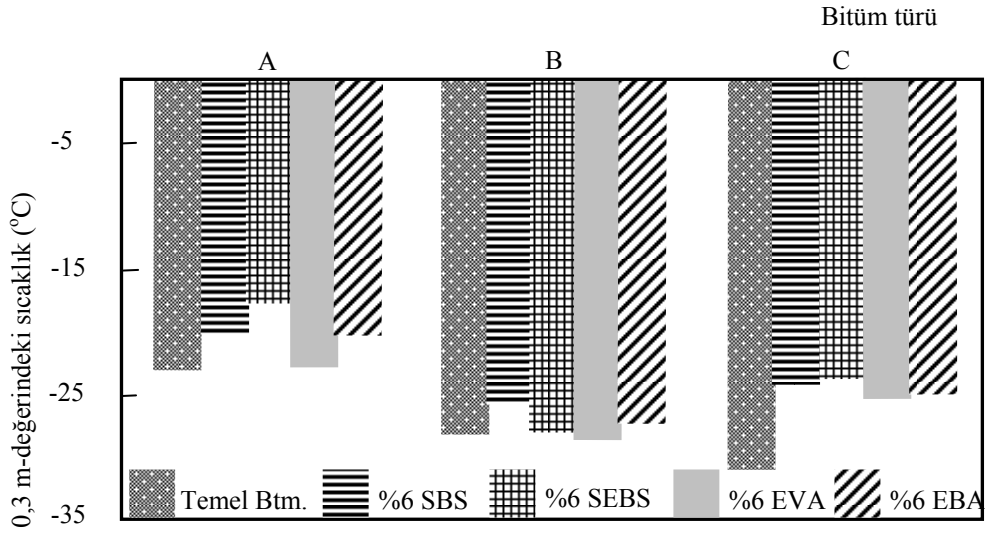


Şekil 4. Sıkıştırma yöntemlerinin kalıcı deformasyon üzerindeki etkisi [29].

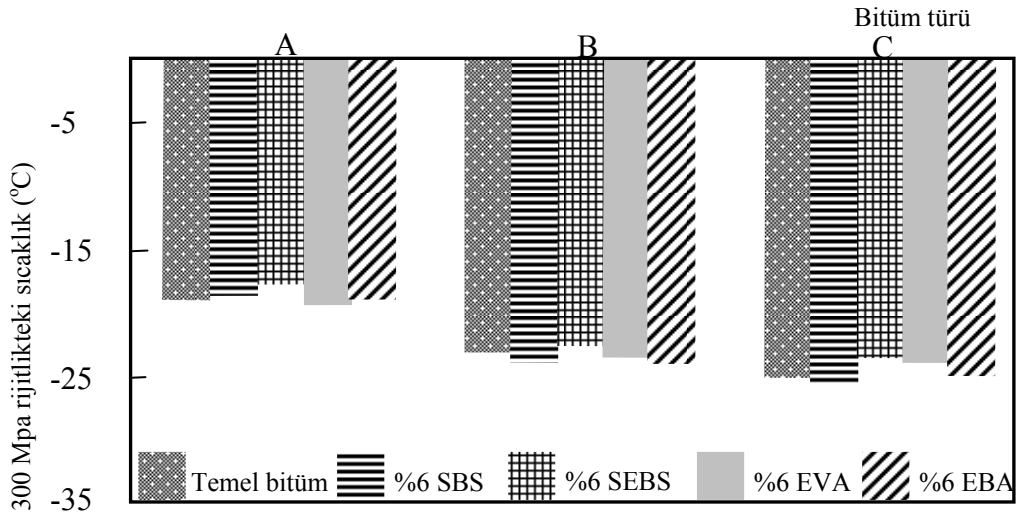
25°C ve 40°C sıcaklıklarda dinamik sünme deneylerinin yapıldığı, deney parametrelerinin çok oluşundan dolayı bu deneylerin kullanımlarının sınırlandırıldığı, dinamik sünme deneyi ile bitüm içeriğindeki çeşitliliklerin boşluk içeriğindeki çeşitliliklerden daha hassas olduğunun açıkça görüldüğü, her iki sıcaklıkta uygulanan yüklerin kırılma yükünün düşük kısmı (%10 ve %15) olarak alındığı, sıcaklık ve uygulanan yükün kalıcı deformasyon davranışı üzerinde boşluk içeriğinin potansiyel etkisini araştırmak için yeterince yüksek olması gerektiği, diğer yandan aşırı uç deney koşullarının plastik kırılmaya ve tekrarlanmayan sonuçlara yol açabildiği şöyle ki yeterli yükün seçimi için bir referans noktası olarak doğrudan doğruya basınç deneyinde kırılma direncinin kullanılması veya yaklaşım olarak alınması ifade edilmektedir[30].

Sıcak karışım asfaltlarda (HMA) en yaygın olarak kullanılan ileri performans deney yöntemlerinin seçildiği, diametral deneylerin kalıcı deformasyonu değerlendirmek için uygun olmadığı, tek eksenli deneylerin kullanılabilmesi, ancak tek eksenli deneylerin de kullanılan yük ve sıcaklık seviyelerinden dolayı performans tahmininde şüphelerin olduğu, üç eksenli deneylerin hücre basıncı içermesi sayesinde gerçeğe daha yakın basınç ve sıcaklıkların uygulanabildiği ifade edilmektedir[31].

Bitümlü karışımların düşük sıcaklıktaki özelliklerine polimer modifikasyonunun etkisinin araştırıldığı çalışmada, %6 SBS, SEBS, EVA ve EBA katkılı üç farklı bitüm kullanıldığı, bu karışımlara -30°C, -25°C, -20°C, -15°C sıcaklıklarda sünme deneylerinin uygulandığı, uygulama sıcaklıkları için polimer modifikasyonunun yararlı etki göstermediği, bitümlü karışımların düşük sıcaklık özelliklerinin büyük ölçüde temel bitüme (bitüm kaynağına) bağlı olduğu vurgulanmaktadır [32].



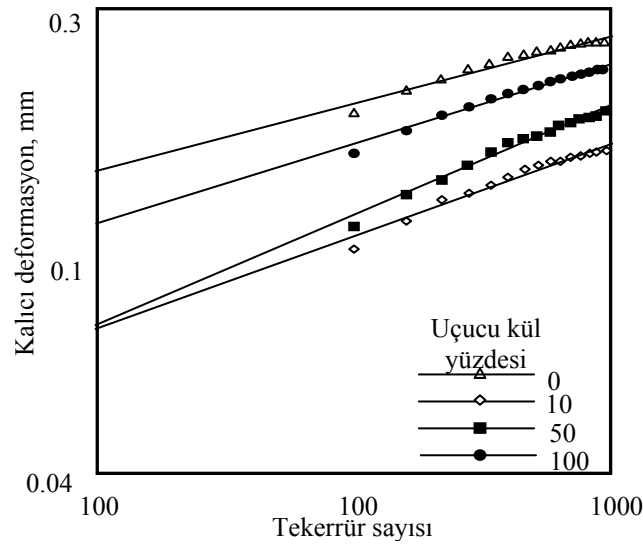
Şekil 5. Düşük sıcaklıklarda polimer modifikasyonunun etkisi (1) [32].



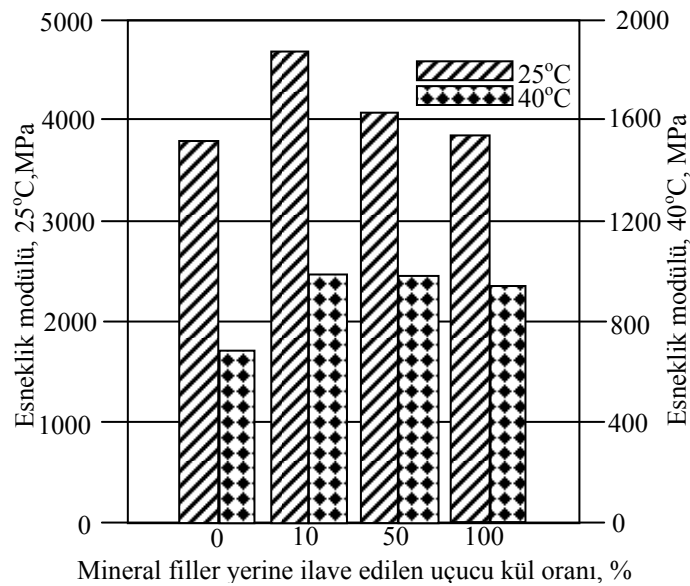
Şekil 6. Düşük sıcaklıklarda polimer modifikasyonunun etkisi (2) [32].

Ürdün kaya petrolü uçucu küllerinin filler yerine %0, %10, %50 ve %100 kullanıldığı çalışmada, Ürdün rafinerisinde üretilen 60-70 penetrasyonlu asfalt çimentosunun kullanıldığı, agrega olarak yine aynı bölgedeki kireç taşının kullanıldığı, optimum asfalt içeriği olarak %4 hava boşluğunu veren %5,25 asfalt içeriğinde her uçucu kül yüzdesi için 30 asfalt betonu örneği hazırlandığı, bu örnekler Marshall stabilitesi, dolaylı çekme mukavemeti, soyulma direnci, esneklik modülü, dinamik sünme, yorulma ve tekerlek izi deneylerinin uygulandığı, 60°C su banyosunda 30dk ve 24 saat bekletilen örnekler yapılan deneyler sonucunda 30dk su banyosunda bekletilen %10 uçucu küllü örneklerin en yüksek Marshall stabilitesini verdikleri, uçucu kül oranı arttıkça Marshall stabilitesinde azalmanın

olduğu, asfalt betonu karışımın soyulma direncinin 60°C'lik suda 24 saat su banyosundan sonra dolaylı çekme mukavemeti deneyi ile değerlendirildiği, uçucu kül oranının artması ile birlikte mukavemetteki ortalama düşüşün azaldığı, 40°C sıcaklıkta 100ms yükleme ve 900ms dinlenme periyodu ve 207kPa yük ile dinamik sünme deneyinin yapıldığı, en düşük kalıcı deformasyonu %10 uçucu küllü karışımın verdiği, 25°C ve 40°C sıcaklıkta uçucu kül modifikasyonlu karışımların esneklik modüllerinin kontrol karışımlara göre arttığı, elde edilen sonuçların Şekil 8'deki gibi olduğu ifade edilmektedir [33].

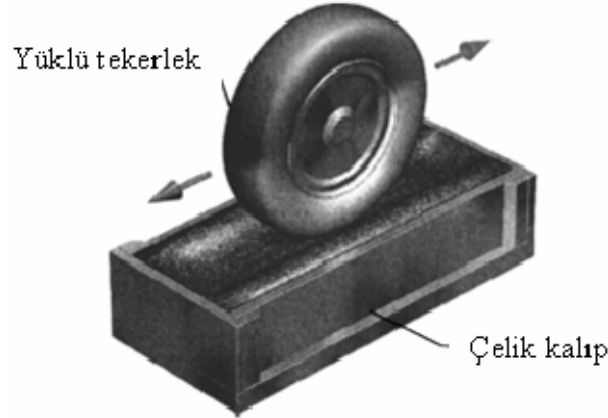


Şekil 7. 40°C de sünme davranışlarının karşılaştırılması[33].



Şekil 8. Esneklik modüllerinin sıcaklığa göre karşılaştırılması[33].

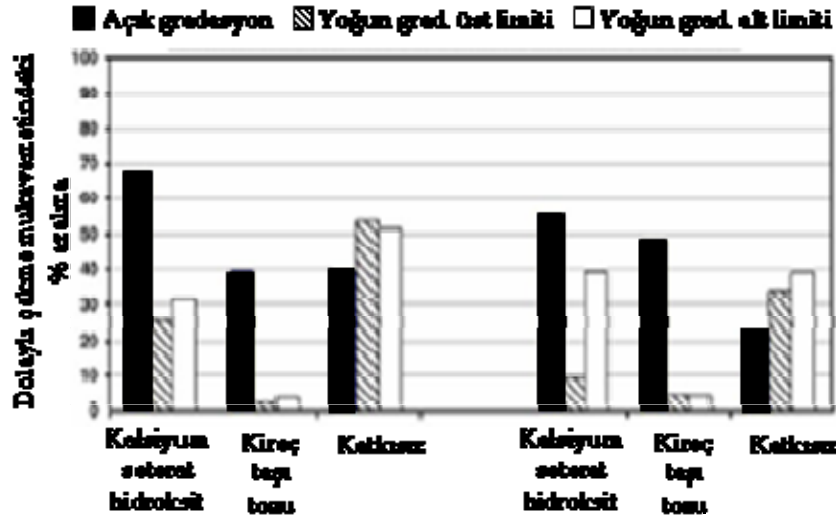
Asfalt karışımların Nottingham asfalt deney aleti (NAT) kullanılarak sünme deneylerinden elde edilen reolojik parametrelerin Fransız tekerlek izi deneyinden (LCPC) (FPRT) elde edilen değerleri tahmin etmek için kullanılıp kullanılmayacağı araştırıldığı çalışmada, sünme deneylerinde, 45°C’de 3600sn yükleme zamanı, 0.1MPa yük, 900sn yüksüz zaman seçildiği, bitüm içeriğinin %2,8’den %6,7’ye ve boşluk oranının da %1,8’den %10,2’ ye kadar değiştiği aşınma, binder ve temel tabakalarının test edildiği, üçüncü yükleme döngüsü sonucunda burger modeli kullanılarak reolojik parametrelerin elde edildiği, LCPC tekerlek izi deneyinin P98-253-1 fransız standartlarına göre 45°C sıcaklık, $1\pm 0,1$ Hz hareket frekansı ve 5000 ± 50 N tekerlek yükü kullanılarak gerçekleştirildiği, sünme deneylerinden elde edilen reolojik parametrelerle karakterize edilen viskoelastik Burger modeli ile 2000 ve 30000 yükleme döngüsü sonucunda elde edilen sonuçlar ile LCPC’den elde edilen tekerlek izi değerlerinin karşılaştırıldığı, bu değerlerin birbirine çok yakın olduğu, bundan dolayı bu parametrelerin tekerlek izini tahmin etmede kullanılabilceği vurgulanmaktadır[34].



Şekil 9. Şematik LCPC deney düzeneği[34].

Sıcak karışım asfaltlarda (HMA) çevresel hasarın tahmini için değerlendirme tekniklerinin etkilerinin araştırıldığı çalışmada, kireç taşıyla oluşturulan üç farklı yoğun gradasyon ve Zarqa petrol rafinerisinden alınan 60/70 ve 80/100 penetrasyon dereceli bitümler ile soyulma önleyici katkı olarak 100 nolu elekten geçen kireçtaşı tozu ve kalsiyum stearat hidroksit $[Ca(C_{17}H_{35}COO)\{OH\}]$ kullanıldığı, briketlerin ASTM D 1559 standardında Marshall sıkıştırıcısıyla hazırlandığı, hem dolaylı çekme mukavemeti veya Marshall stabilitesindeki azalmayı hem de statik sünme deformasyonundaki yüzde artmayı belirlemek ve kaplanmış agrega yüzdesinin görsel değerlendirilmesine

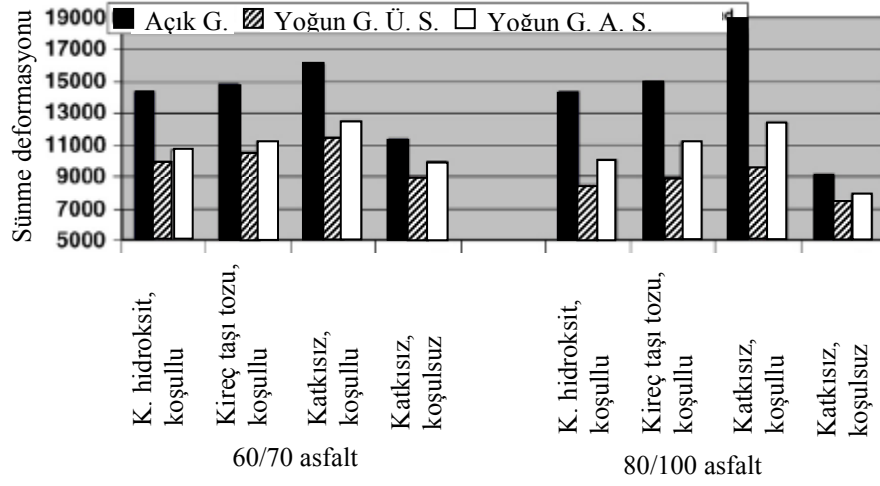
dayandırılmış Teksas kaynama deneyinin (ASTM D 3625) kullanıldığı, su hasarı koşullandırması suya doygunluğun ve hızlandırılmış donma-çözülme döngüsünün sıkıştırılmış karışımlar üzerine etkisinin değerlendirilmesinde kullanıldığı, 30°C sıcaklıkta Üniversal Deneysel Aletinde (UTM) statik sünme deneyi ve dolaylı çekme mukavemeti deneyi (ASTM D 4123) yapıldığı, tahmin edilen çevresel hasarların kullanılan değerlendirme yöntemlerinden önemli derecede etkilendiği, dolaylı çekme mukavemeti, Marshall stabilitesi ve Teksas kaynama deneylerinin HMA'da kullanılan asfalt tipinin soyulma üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesi için uygun olmadığını, statik sünme deneyinin bunun için uygun olduğu ve hatta agrega gradasyonunun soyulma direncine etkisini ayırt edebilen tek deney olduğu ifade edilmektedir[1].



Şekil 10. Asfalt tipi ve agrega gradasyonunun dolaylı çekme mukavemetine etkisi[1].

Sıcak karışım asfaltlarda (HMA) çevresel hasarın sünme davranışı üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada, soyulma önleyici katkıların, agrega gradasyonunun ve asfalt tipinin HMA çevresel hasarı üzerindeki etkisi ve çevresel hasardan önce ve sonraki sünme davranışının değerlendirildiği, iki bitüm tipi ve iki farklı soyulma önleyici katkı kullanıldığı, ASTM sınıflandırma sisteminde üç farklı gradasyon seçildiği, koşullandırma sistemi olarak donma&çözölmeye dayalı su koşullandırması yapıldığı, statik sünme deneyinin uygulandığı, HMA örneklerinin koşullandırılmasının sünme deformasyonunda önemli bir artmaya neden olduğu, hem de agrega gradasyonu, asfalt tipi ve soyulma önleyici katkı türünün sünme deformasyonunu önemli derecede etkilediği, bunun özellikle

koşullu örneklerde daha doğru olduğu, yoğun gradasyonlu agregalar için ASTM sınıflandırması orta veya üst limitleri kullanılarak hazırlanan hem koşullu hem de koşulsuz karışımlar için 80/100 asfalt kullanılarak hazırlanan karışımların sünme deformasyonu 60/70 asfalt kullanılarak hazırlanan karışımların sünme deformasyonundan daha az olduğu, buna karşın, açık gradasyon (%12,5 hava boşluğu) kullanılarak hazırlanan koşullu örneklerde bunun tersi bir eğilim olduğu, soyulma önleyici katkıların çevresel hasarı ve sünme deformasyonunu azaltma etkisi gösterdiği, kalsiyum seterat hidroksit katkılı karışımların kireç taşı tozu katkılı karışımlardan daha az çevresel hasar ve sünme deformasyonu gösterdiği vurgulanmaktadır[35].



Şekil 11. Asfalt tipi ve agrega gradasyonunun sünme deformasyonu üzerindeki etkisi[35].

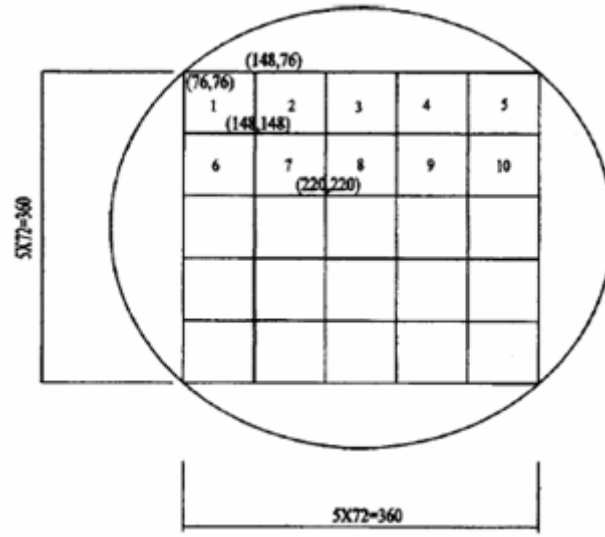
Sıcaklık koşullarının kontrol edilebildiği, farklı yükleme biçimlerinin uygulanabildiği, dolaylı çekme, dolaylı çekme mukavemeti, statik-tekrarlı sünme gibi deneylerin yürütüldüğü asfalt test aletinin (Nottingham Asphalt Tester) varlığı önemli bir katkı oluşturmaktadır. Ancak; sıkıştırılmış özdeş briketlerde (aynı granülometri, aynı sıkıştırma enerjisi, aynı karıştırma sıkıştırma sıcaklığı vb.) agrega köşeliliğine, elekler arası kaçınılmaz geçişlere bağlı olarak, hatta briketlerin bekleme süreleri de dikkate alındığında, yüksek derecede farklılıklar oluşmaktadır. Asfalt test aleti, düşük sıcaklık, orta (moderate temperature) sıcaklık ve yüksek sıcaklık performanslarının değerlendirilmesinde, düşük-orta-yüksek yüklü süreler (rise time) ve yükleme periyotları (pulse time) için yükleme koşulları bağlamında performans incelemesi sağlamaktadır.

Bitümlü bağlayıcıların özellikleri, ham petrol kökenine bağlı olacak biçimde çok farklı bileşimlerde bulunabilmektedir. Aynı penetrasyonda olan iki farklı asfalt çimentosu, reolojik yapı farklılıkları nedeniyle çok farklı performans düzeyleri oluşturmaktadır. Asfalt çimentosu içerisinde, asfaltten içeriğinin varlık düzeyi-değişkenliği, asfalt çimentosunun yaşlanması ve bitümlü karışımlarda çatlama probleminin oluşmasında etkili olmaktadır. Bu bağlamda, asfalt karışımların heterojen karışımlar olarak değerlendirilmesiyle, makro ölçekli sayılacak deneylerin gerçekleştirilmesi ile performans karşılaştırmalarının yapılma zorluğu oluşmaktadır [36-41].

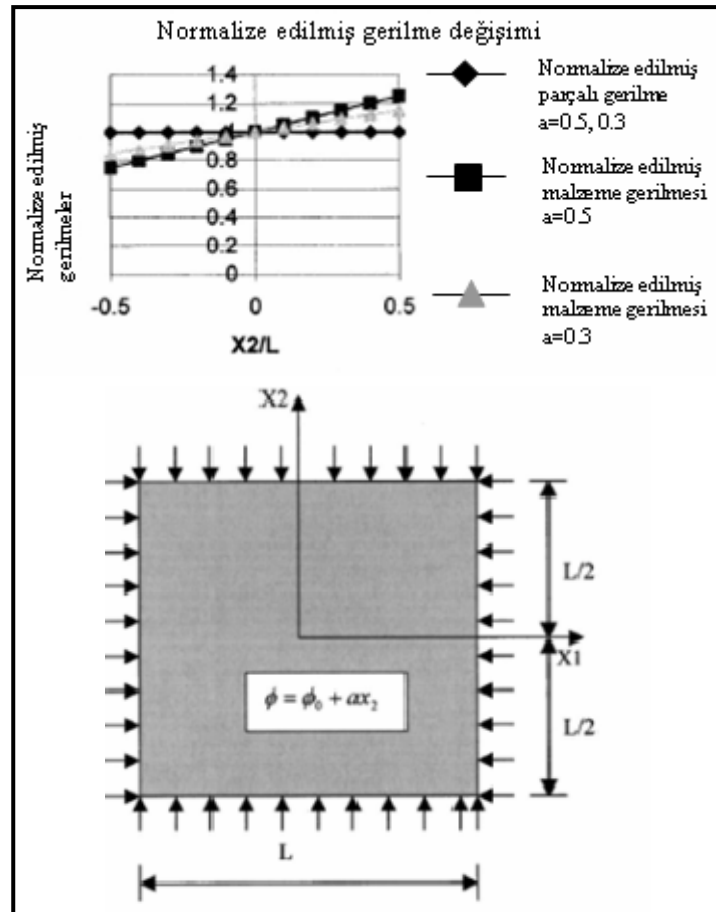
Asfalt karışımlar üzerinde, hasarsız test yöntemleri uygulaması ile daha doğru karşılaştırmaların yapılabileceği düşünülmektedir. Dolaylı çekme ve tekrarlı sünme deneyleri (stabilite değerinin çok düşük seviyelerinde gerçekleştirildiğinde) hasarsız yöntemler olarak mütalaa edilebilir. Ancak, yukarıda ifade edilen faktörler ile birlikte kaçınılmaz olumsuzluklar ortaya çıkmaktadır. Güncel sıkıştırma biçimlerinden, dönme sıkıştırıcı uygulaması ile sorunlar daha iyi değerlendirilmeye başlanmış, ancak dönme açısının etkisi ile birlikte, güncel olan konu değerlendirme aşamasındadır [29].

Hasar mekanizmalarının anlaşılması ve daha kısa süreler içerisinde daha doğru sonuçların alınmasında, bilgisayarlı görüntü analizleri ile kaplamanın değerlendirilmesi ve görüntü değerlendirmelerinin mekaniksel testlere uygulanması ile daha doğru laboratuvar ve arazi performans karşılaştırmalarının yapılabileceği düşünülmektedir.

Asfalt betonunun asfalt bağlayıcı, agrega ve hava boşlukları olmak üzere üç bileşenin heterojen bir karışımı olduğu; üç bileşenin yersel hacim fraksiyonlarının uzaysal olarak değişebildiği, uzaysal gradyandan dolayı karışımın ve karışımı oluşturan bileşenlerin arazi performans değişkenliği üzerinde önemli etkisi olduğu vurgulanmaktadır. Statik yükleme altında, iki bileşenli katı ve hava boşluğunu içeren iki maddeli karışımlar için basitleştirilmiş karışım teorisi uygulandığı, nihai gerilme dağılışı sunulduğu, basitleştirilmiş teori kullanılarak heterojen karışımlar içerisinde bu teorinin etkin gerilme dağılışını nasıl gösterdiğini incelemek üzere basit iki boyutlu ve bir boyutlu analitik çözümlerin elde edildiği, X-ışını tomografi görüntüleme tekniği kullanılarak, yersel boşluk hacmi fraksiyonunun ve onun gradyanının, karışım teorisini anlamak üzere, iki arazi değişkenini tanımlamada kullanılabilirliğinin incelendiği, performans düzeyleri bilinen karışım örnekleri için tanımlanmış boşluk hacmi fraksiyonu ve gradyanının (dağılımı), asfalt betonunun mekanik özelliklerini değerlendirmede, karışım teorisini kullanmak üzere, umut verici bir gelişme olacağı ifade edilmektedir [42].

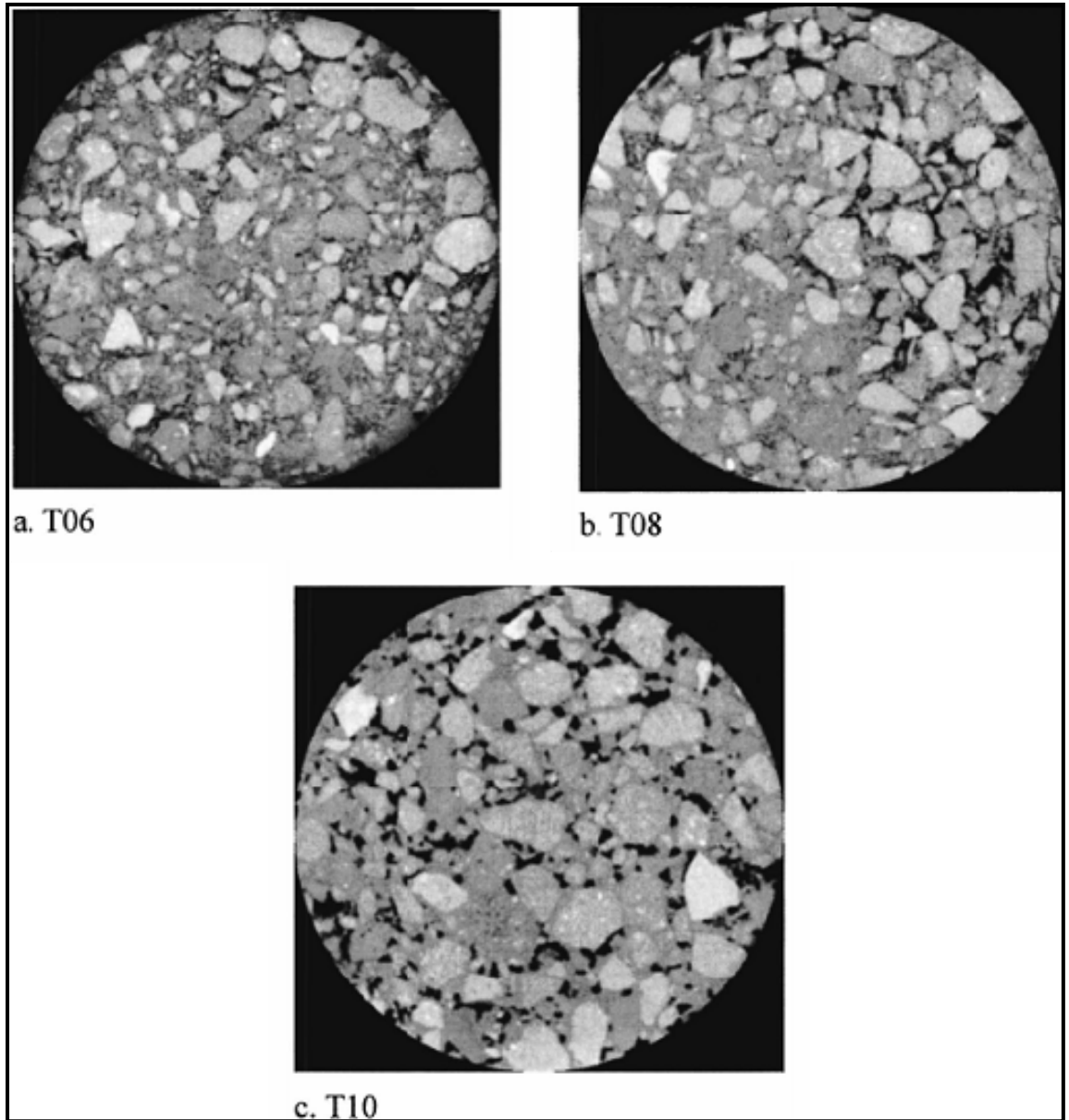


Şekil 12. Yerel hacim fraksiyonlarının ölçümü için kare ağ [42].

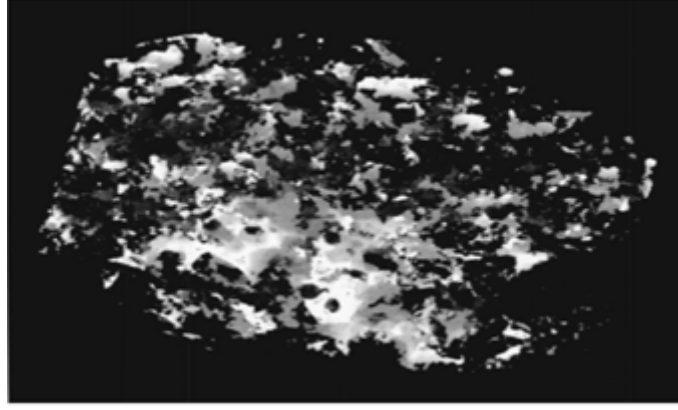


Şekil 13. İki eksenli durumun gösterilmesi, yapısal heterojen malzeme üzerine izotropik basınç: problem ve gerilme dağılışı diyagramı [42]

İki bileşenli katılar ile hava boşlukları arasında, önerilen basitleştirilmiş karışım teorisi, asfalt betonunda boşluk homojensizliğini ve homojen olmayan boşluk dağılımından dolayı oluşan gerilmeleri açıklayabildiği anlaşıldı. Basitleştirilmiş teori kullanılarak, basit iki boyutlu ve bir boyutlu analitik çözümler, asfalt betonunun mekanik davranışını algılamada bakış açısı getirmektedir. Karışım özelliklerini tanımlamada, daha ileri teoriler kullanılarak, agrega ve bağlayıcı arakesitindeki davranış yansıtılabilir [42].



Şekil 14. Üç karışımın bölgesel kesit görünüşleri: (a) T06; (b) T08 ve (c) T10[42].



Şekil 15. T11'in boşluk sisteminin üç eksenli gösterimi[42].

Bilgisayarlı tomografi tekniğinin, polimer katılan asfalt karışımlara uygulandığı araştırmada; kaplama amaçlı olarak Brezilya üretimi bir polimerin asfalt karışımlara katılması sonucu etkilerinin değerlendirildiği, laboratuarda mekanik testler olarak hasarsız test yöntemlerinin seçildiği, silindirik örneklerin üretildiğini, bu amaçla üç farklı karışımın hazırlandığı, karışımlardan her birinin %5.4 oranında RASF içerdiği, karışımlardan birisinin polimer içermediği, diğer ikisinin %7 ve %5 oranlarında SBS içerdiği, Brezilya'da asfaltik kaplamalarda yorulma kaynaklı kusurların bir sonucu olarak çatlama probleminin yaygınca geliştiği, test sonuçlarının polimer katkısının karışımın performansını artırdığı, polimer katkısının boşluk yüzdesini artırdığı, önemli bir sonuç olarak, polimer katılan asfalt karışım örneklerinde çatlak gelişiminin polimer katılmayan örneklerle aynı davranışı gösterdiği vurgulandı [13].

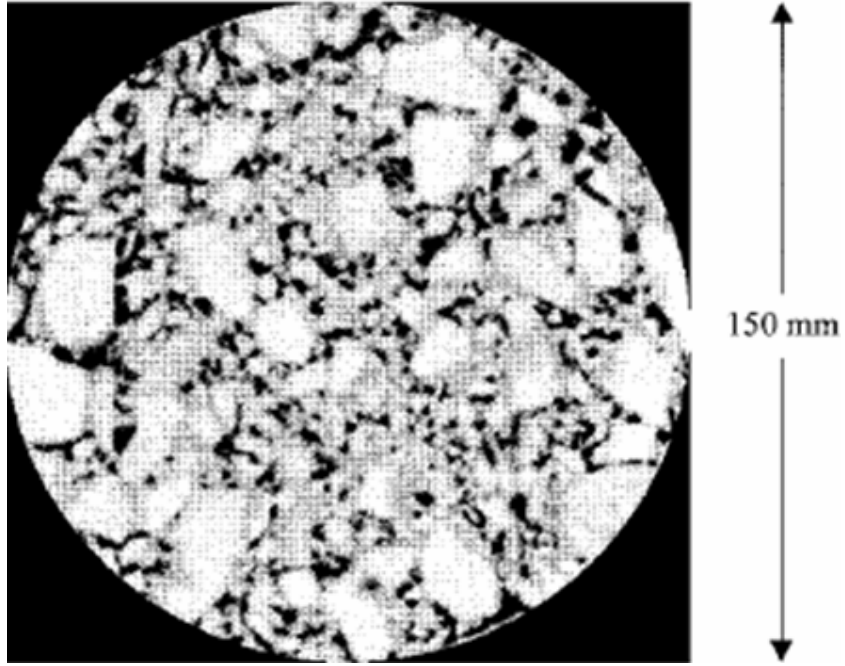
Bilgisayarlı tomografi görüntüleri ile asfalt karışımlarının incelendiği diğer bir araştırmada, karışımlara yorulma deneylerinin uygulandığı, gerilme üreten yorulma testlerinin tekrarlı yükler altında çapsal doğrultuda sıkışma uyguladığı, çatlakların taranması ve takip edilmesi sonucunda, çatlak gelişiminin örneklerdeki orijinal boşluk yörüngelerinden etkilendiği, yaklaşık 900 vuruş altında algılanabilen çatlama oluştuğu, aynı pozisyonlardaki bütün tomografi görüntülerinden, çatlağın örneğin merkez bölgesinden başladığını ve uygulanan yük doğrultusunda geliştiği görüldü [11].

Sıcak karışım asfalt kaplamalarda, içsel direncin değerlendirilmesi amacıyla, deneysel yöntemler ve analiz yöntemleri uygulandı. Sıcak karışımların tasarım, sıkıştırma ve performansı üzerinde içsel yapı analizinin gerçekleştirilmesinin önemi tartışıldı. Sunulan yöntem, iki aşamalı oldu. Birinci aşamada, hacimsel analiz yöntemleri üzerinde duruldu.

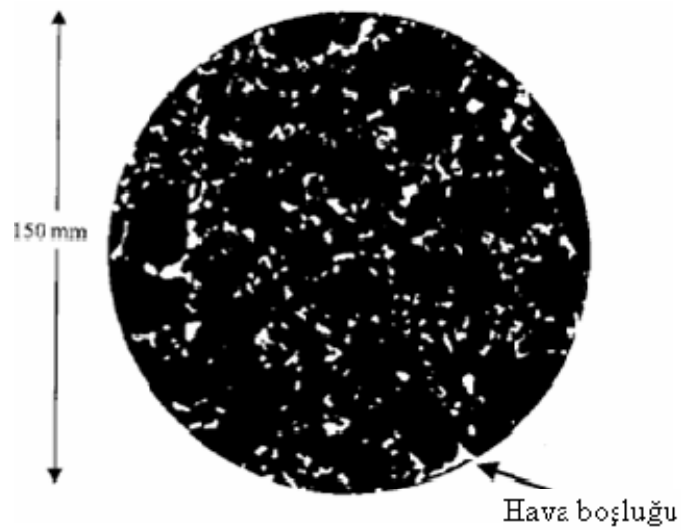
İkinci aşamada ise, görüntüleme yöntemleri uygulandı. Hacimsel analiz yöntemleri; bütünsel anlamda, belli agrega boyutları veya bütün karışım tanımlamaları içerisinde, hava boşluğunun ölçülenmesine dayandırıldı. Bu kavramlar, yoğun gradasyonlu karışımlar, SMA karışımlar ve sıcak karışım asfaltlarda agrega gradasyonu seçimi için Bailey yöntemi içerisinde şimdilerde değerlendirilmektedir. Görüntüleme yöntemleri ile, içsel yapının analizi ile birlikte, agrega iskeleti dağılımı, mineral agrega arası boşluk değerlendirilmektedir. Kameraya bağlı bir mikroskop ile iki boyutlu görüntüler veya X-ışını tomografi sistemi kullanılarak üç boyutlu görüntüler elde edilebilmektedir. Bu ilerlemelerin, darbe modellemesi, tasarım, üretim ve asfalt kaplamaların geleceği ile ilgili araştırmalarda yararlı olacağı düşünülmektedir. Hasarsız test yöntemlerinin de “hasarlı olduğu” düşünülürse, hasarsız görüntüleme yöntemlerinin içsel yapı dağılışının gerçek tanımlamasını vereceği anlaşılmaktadır. Farklı laboratuvar sıkıştırma yöntemleri arasındaki farkların anlaşılmasında, laboratuvar sıkıştırma yöntemlerinin arazi sıkışmasını simüle edebilme yeteneğinin geliştirilmesi noktasında ve sıcak karışım asfaltların geçirimsizliğinin anlaşılmasında da görüntüleme yöntemi yararlı olacaktır. Sıcak karışım asfaltların tasarım süreci, görüntüleme yöntemi ile, optimum ve homojen agrega çatısının ve uyumunun oluştuğu, doğru asfalt film kalınlığının sağlandığı noktalarda yararlı olacaktır. Çünkü mekaniksel değerlendirme süreçlerinde, özdeş örnekler arası varyans azalacak ve daha doğru karşılaştırmalar yapılabilecektir. Rölatif özdeş örnek değişkenliği en aza indirilecektir. Asfalt kaplama kalınlığının artışına bağlı olarak oluşacak segregasyonun gelişiminin anlaşılmasında da yararlı olacaktır [43-44].

Asfalt betonunun içsel yapı tanımlamasının görüntü analizi kullanılarak değerlendirildiği araştırmada; asfalt betonunun performansının agregaların ve bağlantılı olarak boşlukların düzenlenmesiyle ilişkili olduğu, agrega oryantasyonu, agrega gradasyonu ve hava boşluğu dağılımının ölçülmesi gereken parametreler olduğu, bilgisayarlı otomatik görüntü analiz sürecinin bu parametreleri incelemek üzere seçildiği, hava boşluğu dağılımının X-ışını tomografi görüntüleri ile çekildiği, Superpave konik sıkıştırıcı ve laboratuvar örnekleri kullanılarak yeni parametrelerin değerlendirildiği, laboratuvarda agrega iskeleti içerisinde tercih edilen uyumun (orientation) belli bir sıkıştırma enerjisine kadar arttığı, bununla birlikte laboratuvarda agrega yapısının daha rastgele bir uyum içerisinde olabildiği, X-ışını görüntülerinden hesaplanan boşluk yüzdelерinin laboratuvarda ölçülenle karşılaştırıldığı, örneklerdeki boşluk dağılımının üniform olmadığı, konik sıkıştırılan örneklerde daha fazla olarak içsel boşluğun üst ve alt

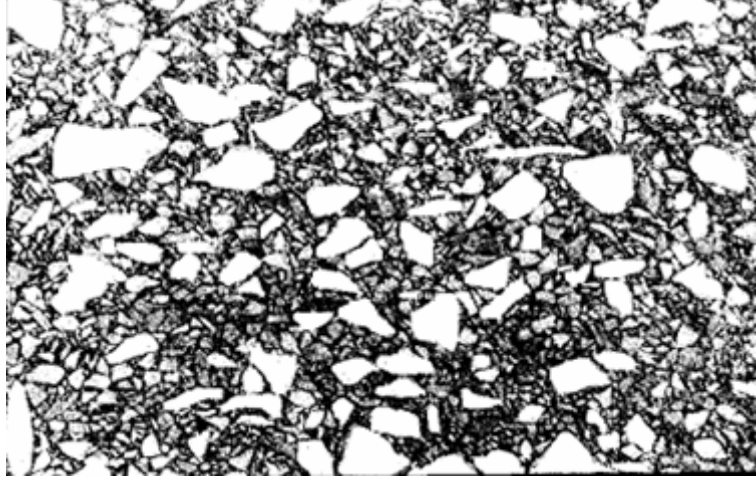
kısımlarda olduğu, konik sıkıştırılan örneklerin daha yüksek döngü sayısında arazide nihai bir agrega uyumuna ulaştığı, buna karşın daha az sayıdaki döngüde karot örneklerdeki boşluk yüzdesine ulaşıldığı, konik sıkıştırılan örneklerin kaba gradasyonlu olanların görüntü analizi ile daha iyi incelenebildiği, sıkıştırma ile gradasyonda değişme olmadığı görüldü [20].



Şekil 16. 50 döngüde sıkıştırılan örneklerin yatay X-ışını tomografisi[20].



Şekil 17. Asfalt ve agregalardan hava boşluklarını (beyaz) ayırt etmek için görüntü [20].



Şekil 18. 50 döngüde sıkıştırılmış örneğin düşey kesit optik dijital kamera görüntüsü[20]

1.3. Esnek Üstyapılarda Temel Problemler

Asfalt kaplamaların performans analiz süreçlerinde; su hasarı, tekerlek izinde oturma, düşük sıcaklık çatlama, yorulma çatlama, bitümlü bağlayıcının yaşlanması gibi konular başlıca yer tutmaktadır. Laboratuarda; çeşitli çevresel hasar sistemlerinin uygulanmasıyla, seçilen bir performans problemi, belirli yönleri ile birlikte inceleniyor olsa da uygulama koşullarında farklı problemlerin birlikte gelişiyor olması, sorunların değerlendirilmesi konusunu oldukça zorlaştırmaktadır[26].

Asfalt kaplamaların performans tahmini, kaplamanın ve temel tabakalarının karmaşık bir yapıya sahip oluşu ve çeşitli çevresel koşullardan dolayı oldukça zordur. Günümüzde, sıcak karışım asfaltların tasarımı ve tekerlek izi, yorulma çatlama, düşük sıcaklık çatlama ve sürtünme özelliklerini kontrol etmek için uluslararası kullanılan bir deney yöntemi yoktur. Uluslararası olarak kullanılan suya duyarlılık (moisture susceptibility) deneyi olmakla birlikte bu deneyler çok etkili bulunmamaktadır. Bu bozulmaların oluşumunu en aza indirmek için bazı ek yöntemlere gereksinim vardır. Performans tahmininde kullanılan yeni deney yöntemleri gerçekleştirmek için halen devam eden çeşitli çalışmalar bulunmaktadır[31].

1.3.1. Düşük Sıcaklık Çatlamaları

Bu mekanizma esas olarak çok soğuk iklime sahip ülkelerde rastlanılmaktadır. Bu

problemler, sıcaklık derecesindeki ani değişmelerden ötürü bitümlü tabakaların engellenmiş büzülmesi ve bu değişmeler sonucu aynı zamanda ortaya çıkması muhtemel olan ve malzemenin mukavemetini aşan çekme gerilmelerinden kaynaklanmaktadır[45].

Termal çatlama problemini en aza indirmek için yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde termal çatlama minimize etmek için en iyi yöntem, düşük sıcaklıklara uygun performans dereceli (PG) bitümlü bağlayıcı seçmektir. Diğer önlemler kaplama yapımı süresince yardımcı olabilir. Örneğin, asfaltı aşırı ısıtmamak. Bu bitümün sertleşmesiyle sonuçlanacak ve termal çatlama teşvik edecektir. Hem de olası oksidasyonu minimize etmek için karışımı düşük boşluk seviyesinde sıkıştırmak önemlidir. Günümüzde termal çatlama için tavsiye edilen belirli bir deney yöntemi yoktur[31].



Şekil 19. Termal çatlama örneği [46].

1.3.2. Yorulma Çatlama ları

Bitümlü tabakaların eğilme durumundaki çekme yorulma mukavemetleri, yapının kendisi yanında karışım ve yapısal tasarıma da bağlıdır. Yorulma çatlama ları, yükten, sıcaklıktaki periyodik (özellikle günlük) değişmelerden ya da bunların her ikisinin birden etkimesinden kaynaklanan gerilmelerden dolayı oluşan çatlama lardır[45].

Sıcak karışım asfalt özelliklerinin yorulma üzerine etkilerini araştırmak için pek çok araştırma yapılmıştır. Yorulma anlamında sıcak karışım asfaltların özellikleri kesinlikle önemlidir fakat yorulmayı kontrol etmeye yardımcı en önemli faktör kaplamanın yapısal olarak sağlam olmasıdır. Klasik olarak, aşağıdan yukarıya doğru yorulma ilkin kaplama yapısı tarafından kontrol edildiğinden, yorulmayı kesin olarak tahmin etmek için yalnız

başına kullanılan hiçbir deney bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yorulma problemini önlemek için tedbirler alınabilir. Bu önlemlerden bazıları: karışımda tekerlek izi oluşturmaksızın müsaade edilebilecek kadar çok bitüm kullanmak, uygun bitüm derecesi seçmek, inşa sırasında asfaltı aşırı ısıtmamak, filler-asfalt oranını düşük tutmak, düşük boşluk seviyesinde asfaltı sıkıştırmak vb. olarak sıralanabilir. Bunlar genel bilgiler olmakla birlikte iyi bir yorulma direncinden emin olmak için genellikle kullanılan yaklaşımlardır. Yorulma kontrolü için daha kesin bir yönteme ihtiyaç vardır fakat günümüzde mevcut değildir[31].



Şekil 20. Yorulma çatlamlarına örnekler [46].

1.3.3. Tekerlek İzi Oluşumu

Sıcaklık ve yükleme süresi bitümlü karışımlar için oldukça hassas bir konudur. Isıtma ile birlikte karıştırılabilme veya geri kazanılabilme yeteneği yanında, bu hassaslık onlara uzun süreli yükleme altında uzama veya gevşeme hareketi için büyük bir potansiyel teşkil etmektedir. Bu durum, bitümlü kaplamalara alt tabakalarda oluşan küçük çaplı hareketleri takip edebilme yetenekleri kazandırmakta fakat yüksek sıcaklıklara ve uzun yükleme zamanlarının etkisine bırakıldığında kalıcı tekerlek izi deformasyonu oluşma riski ortaya çıkmaktadır.

Asfalt betonu kaplamalarda sıkça rastlanan tekerlek izi, ASTM E 867 standardında yük kaynaklı tekerlek izinde oturma; boyuna profilde veya enine yönde geçiş çatlakları şeklinde kendini gösteren problem olarak tanımlanmıştır [47]. Literatürde de tekerlek izi, asfalt beton kaplamaların tekerleklerin geçtiği kısımlarında, trafik yüküne bağlı olarak tekrarlı yüklerden kaynaklanan, kaplama tabakası veya kaplama tabakasının altındaki

tabaka veya tabakalarda meydana gelen küçük miktarlardaki geri dönemeyen deformasyonların birikmesi sonucu yanal hareketlerle meydana gelen yer değiştirmeler veya izler boyunca meydana gelen oluklanmalar olarak ifade edilmektedir [48-50].

Yapısal, sürekli ve yıpranmaya dayalı tekerlek izi oluşumları olmak üzere üç farklı kalıcı deformasyon şeklinden söz edilebilir [51].

1.3.3.1. Yapısal Tekerlek İzi Oluşumu

Bitümlü tabakaların altında bulunan bir veya daha fazla sayıdaki katmanda, yüklerden gelen ve malzeme mukavemetini aşan gerilmelerin etkisiyle oluşan bağımsız deformasyonlardır. Bu durumda, tekerlek izleri geniş olmakta ve kenarlarında tümsekler oluşmamaktadır.



Şekil 21. Tekerlek izinde yapısal oturma örneği

Yapısal tekerlek izi oluşumu genellikle, gerçekteki trafik koşullarına uygun olmayan şekilde tasarlanmış kaplamalarda gözlenmektedir. Bu durum aynı zamanda; uygun olmayan veya yanlış olarak serilmiş malzemelerden, (örnek, yetersiz derecede sıkıştırılmış malzemeler), uygunsuz drenajdan, donma ve erime etkilerine karşı başarısız tasarım yönteminden ve aslında kaplamadaki taban altı zemini ile diğer tabakaların taşıma kapasitesini hizmet ömrü süresince etkileyebilecek her şeyden kaynaklanabilmektedir. En tipik durum; muhtemelen başlangıçta iyi şekilde tasarlanmış fakat trafik koşulları beklenenden daha agresifleşmiş olmasından ötürü problemler yaratan kaplamalardır. Bu durum için başvuru çözümleri güçlendirme olup, bu amaçla mevcut kaplamanın kalıcı

taşıma kapasitesinden sorumlu tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Bu taşıma kapasitesi genellikle, belli bir yük altında yüzey sapmasından yararlanılarak belirlenmektedir.

1.3.3.2. Sürekli Tekerlek İzi Oluşumu

Bu tür tekerlek izi oluşumu yapısal tasarımdan daha çok karışım tasarımı ile ilişkilidir. Konuyla ilintili faktörler, çeşitli bileşenlerin özellikleri, karışım içerisindeki oranları ve serme işlemidir. Bitümlü karışımın iç sürtünmesinin, trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmeleri karşılayamamasından meydana gelmektedir.

Bu tip deformasyonlar çoğunlukla tekerlek-kaplama temasındaki kayma gerilmelerinin yüksek olduğu rampalar ile kavşak yaklaşımları, kurplar ve otobüs duraklarında görülür. Bu şekilde oluşan tekerlek izinin tek çözümü, kaplamanın kazılarak geri kazanım yöntemiyle yeniden serilmesi veya yerine yeni kaplama yapılmasıdır. Ancak mevsim koşullarının uygun olmadığı durumlarda, yüksek yerlerin asfalt freze makinesi ile tıraşlanarak düzeltilmesi de geçici bir çözüm olarak kabul edilebilir.



Şekil 22. Tekerlek izi oluşumlarına örnekler [46].

1.3.3.3. Yıpranmaya Dayalı Tekerlek İzi Oluşumu

Özellikle Kuzey Avrupa Ülkeleri ile bir zamanlar Avrupa'da kullanılan ve çivili lastik olarak tanımlanan lastiklerin oluşturduğu aşınma ile meydana gelen tekerlek izi çeşididir. Kış aylarında kullanılan metal parçalar içeren lastiklerin kaplamayı yıpratması ile oluşmaktadır. Bu durum daha sık İskandinav ülkelerinde görülmekte olup, ele alınması gereken ana parametre agrega sertliğidir.

İlk hasar olayının gözlenmesinin ardından metal parçalı lastiklerin kullanımının kısıtlanması veya yasaklanması ile birlikte, bu mekanizma daha az rastlanılır hale gelmiştir.



Şekil 23. Çivili lastiklerin yol üzerindeki hasarları

Sözü edilen bu üç mekanizma birbirinden bağımsız veya eşzamanlı olarak etkiyebilmektedir.

1.3.3.4. Tekerlek İzi Oluşumunu Etkileyen Etmenler

Tekerlek izinin esas nedeni, aşınma, binder tabakalarının hepsinin ya da birinin stabilite yetersizliği bazen de alttemelin stabilite yetersizliğidir. Gözlemler plastik deformasyona neden olan üstyapı faktörlerinin aşağıdaki gibi olduğunu ortaya çıkarmıştır [52].

- Bitümlü üstyapılarda çok fazla tabaka olması ve çeşitli tabakalardaki iri agreganın çok az kenetlenmesi,
- Karışımda çok düşük oranlarda kırılmış agrega içeriği,
- Uygun olmayan tane boyutu dağılımı,
- Boşluk oranlarının çok küçük olması,
- Boşluk/bağlayıcı doluluk oranının çok yüksek olması (özellikle binder ve yol temeli tabakalarında),
- Bağlayıcıların çok yumuşak olması,
- Binder tabakasında kullanılan maksimum dane çapının, şartname sınırlarının çok altında olması.

Tekerlek izi oluşumu, yolu kullananlar için de ciddi bir güvenlik meselesidir. Su tekerlek izlerinde biriktiğinde, su yastığı olayı için potansiyel oluşturur. Su yastığı olayı, kaplama ile lastik arasında ince bir su tabakası oluşması ve bunun neticesinde lastiğin yüzeyle temasını kaybetmesidir. Bu olay direksiyon hakimiyetinin kaybedilmesiyle sonuçlanabilir. Aynı şekilde şerit değiştirme durumunda da aynı sorun yaşanabilmektedir [53].

1.3.4. Suya Duyarlılık

Suya duyarlılık, asfalt bağlayıcının agregadan soyulmasına neden olarak karışımların sökülmesine ve dağılmasına yol açan tipik bir problemdir. Birkaç yıldır soyulmayı kontrol etmeye yardımcı AASHTO T-283 kullanılmaktadır. Bu deney çok kesin soyulma belirleyici olarak görülmemekte fakat problemi minimize etmede yardımcı bulunmaktadır. Hamburg deneyi karışımların soyulma eğilimini belirleyici olarak gösterilmektedir. İnşa aşaması süresince yapılacak işlemler soyulma potansiyelini en aza indirmede yardımcı olabilir. Sıvı ve kireç soyulma önleyici katkıları kullanılabilir. İyi sıkıştırma ve kuru agrega kullanmak da alınacak önlemler arasındadır [31].

1.3.5. Sürtünme Özelliği

Sürtünme, sıcak karışım asfaltların en önemli özelliklerinden birisidir. Sürtünmeyi yerinde (arazide) ölçmek için iyi deney yöntemleri vardır fakat karışımları sürtünme için laboratuarda değerlendirmede iyi deney yöntemleri bulunmamaktadır. Kullanılan fakat uluslar arası benimsenmeyen çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerin benimsenmeleri için çoğu çalışmanın yerel prosedürlere göre değerlendirilmeleri gerekmektedir. Sürtünmeyi iyileştirmek için tasarım ve inşa sırasında yapılabilecek çeşitli işlemler vardır. Açık gradasyonlu sürtünme tabakası gibi karışım kullanmak ıslak koşullarda sürtünme direncine etkili olarak gösterilmektedir. Kullanılabilecek diğer yöntemler cilalanmaya dirençli agrega kullanmak, aşırı asfalt içermeyen karışımlar kullanmak, kırılmış (köşeli) agregalar kullanmak vb. olarak sıralanabilir. Günümüzde iyi sürtünmeyi elde etmek için geçmiş tecrübeler ve yerel materyaller en iyi bilgilerdir.

1.4. Sıcak Karışım Asfaltları Değerlendirmede Kullanılan Deneyler

Performans deneyleri, laboratuarda hazırlanan karışımların performansını gerçek kaplamaların performansı ile karşılaştırmak ve farklı karışımları değerlendirmek için kullanılmaktadır. Sıcak karışım asfaltlara uygulanan performans deneyleri, karışımların performans parametrelerini karakterize edebilen ve bu parametrelerin kaplamanın ömrünü nasıl değiştirdiğini belirlemede kullanılan deneylerdir[46]. Bu deneyler Tablo 1’de özetlenmektedir.

Tablo1. HMA’ları değerlendirmede kullanılan deney yöntemleri [31, 46].

Performans parametresi	Kullanılan deney yöntemi	Standart
Kalıcı deformasyon (tekerlek izi)	Statik sünme deneyi	AASHTO TP 9
	Tekrarlı yük sünme deneyi	AASHTO TP 7
	Dinamik modül deneyleri	ASTM D 3497
	Gözleme dayalı Hveem yöntemi	AASHTO T 246
	deneyler Marshall yöntemi	AASHTO T 245
	Simülatif deneyler	
Yorulma	Eğilme deneyi	AASHTO TP 8
Çekme dayanımı	Dolaylı çekme deneyi	AASHTO TP 9
	Termal çatlama deneyi	AASHTO TP 10
Rijitlik deneyleri	Çoğu tekrarlı yük deneyleri	
Suya duyarlılık deneyleri	Kaynayan su deneyi	ASTM D3625
	Suya batırma deneyi	AASHTO T182
	Lottman deneyi	NCHRP 246
	Tunnicliff ve Root koşullandırması	NCHRP 274
	Modifiye Lottman deneyi	AASHTO T 283
	Suya batırma (sıkıştırılmış örnekler)	AASHTO T 165
	SHRP suya duyarlılık çalışması	SHRP A-003A
	Adsorpsiyon deneyi	SHRP A-003B
	Çevresel koşullandırma sistemi	AASHTO TP34

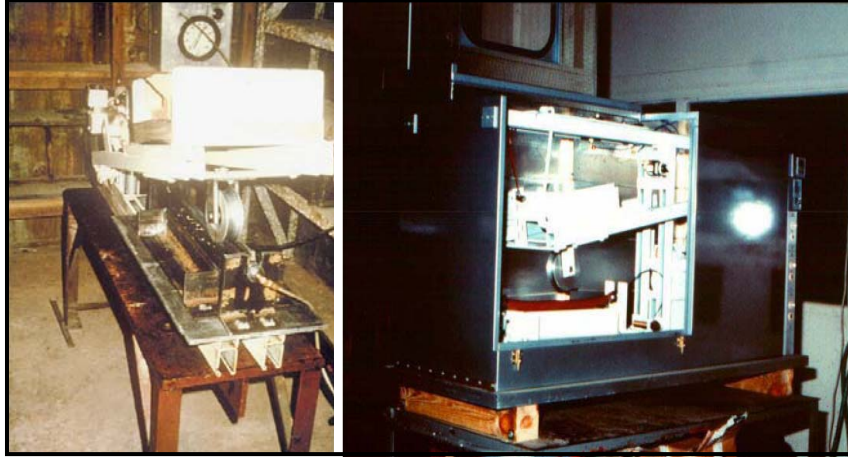
Tablo 1’de adları ve standartları verilen deney yöntemlerinden, simülatif deneyler ve suya duyarlılık deneyleri hakkında bilgilere bu bölümde yer verilecektir. Tekrarlı yük sünme deneyi, dolaylı çekme, dolaylı çekme mukavemeti ve simülatif test yöntemi olan Fransız tekerlek izi deneyleri 2. bölümde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

1.4.1. Yaygın Olarak Kullanılan Tekerlek İzi Deneyleri

Araştırmacılar, kaplamaların servis koşullarını daha iyi temsil amacı ile çeşitli deney aletleri geliştirmişlerdir. Yaygın olarak kullanılan bazı deney aletleri aşağıda sıralanmıştır.

1.4.1.1. Georgia Yüklü Tekerlek Deney Aleti (GLWT)

GLWT 1980in ortalarına doğru Georgia Ulaştırma Bölümü ve Georgia Teknoloji Enstitüsünün ortaklaşa gerçekleştirmiş olduğu araştırma neticesinde geliştirilmiştir. GLWT'nin gelişimi orijinal olarak tasarlanan tekerlek izi aletinin (Wheel-tracking device) modifiye edilmesinden oluşmaktadır [31].



Şekil 24. Georgia yüklü tekerlek deney aleti [54, 55].

Düzeneği geliştirmenin ana amacı randıman oranı yüksek, etkili ve rutin tekerlek izi deneyi geliştirmektir.

GLWT ile HMA kiriş ya da silindirik örnekler üzerinde deney yapılabilir. Kiriş ölçüleri genellikle 125mm genişlikte, 300 mm uzunlukta ve 75mm yükseklikte (5in*12in*3in). Test için kiriş örneklerin sıkıştırılması literatüre göre değişiklik gösterir. Örneğin Lai yüklü ayak (loaded foot) yoğurmalı sıkıştırıcı (kneading compactor) kullandı. Isıtılmış HMA bir kalıba doldurdu. Üzerine, üzerinde yüklerin bulunduğu hareket edebilen dişli çubuk yerleştirmek suretiyle sıkıştırma yaptı [31].

Laboratuarda hazırlanmış silindirik örnekler genellikle 150mm çapında ve 75mm yüksekliğindedir. Silindirik briketler için sıkıştırma metotları yoğurmalı sıkıştırma ve

dönel sıkıştırmayı da içermektedir. Her briket tipi %4-%7 hava boşluğu içeriğine kadar sıkıştırılır. Buna rağmen, bazı çalışmalar %2 kadar düşük hava boşluğu içeriğinde GLWT’de yapılmıştır [31].

GLWT de örneklerin testi genellikle 690 kPa basınçlı pnömatik lineer hortum üzerine 445 N yük uygulamaktan oluşmaktadır. Yük örneğin üzerinde yer alan lineer hortumun üzerine alüminyum tekerlek aracılığı ile iletilir. Örneklerde ileri geri uygulanan sabit yük altında tekerlek izi oluşmaktadır. Deney genellikle 8000 yük döngüsünde yapılır. Bir yük döngüsü tekerleğin hortum üzerinde bir ileri ve bir geri hareketinden oluşmaktadır. Fakat bazı araştırmacılar daha az yük döngüsünün yeterli olabileceğini önermektedirler [31].

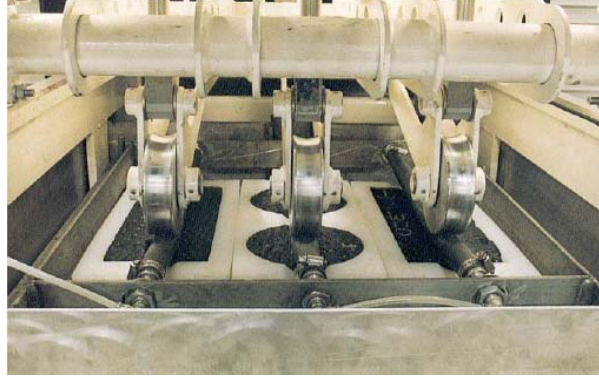
GLWT için test sıcaklıkları 35°C den 60°C ye kadar değişmektedir. 35°C sıcaklık, Georgia’nın yaz aylarındaki hava sıcaklığını ifade etmektedir. Literatürdeki test sıcaklıkları genellikle artma eğilimindedir. 8000 yükleme döngüsünün sonucunda, kalıcı deformasyon (rutting) ölçülür. Tekerlik izi derinliği, örneğin deneyden önceki ve sonraki yüzey profilindeki ortalama farkın tespiti ile elde edilir. Briket kalıbının üzerine yerleştirilen yedi delikli bir mastar ve bir mikrometre tekerlek izi derinliğini ölçmekte kullanılmaktadır [31].

1.4.1.2. Asfalt Kaplama Deney Aleti (APA)

APA, GLWT’nin modifiye edilmiş şeklidir ve ilk kez 1996 yılında Kaplama Teknolojisi (Pavement Technology) tarafından üretildi. APA, HMA karışımların tekerlek izi, yorulma ve su direncini değerlendirmek için kullanılmaktadır. APA, GLWT’nin yeni nesli olduğu için aynı tekerlek izi deney prosedürleri takip edilmektedir. Bir tekerlek basınçlı lineer bir hortum üzerine yüklenir ve tekerlek izi oluşturmak için ileri geri yuvarlanır. GLWT’ye benzer olarak çoğu deneyler 8000 yükleme döngüsünde gerçekleştirilir. GLWT’den farklı olarak örnekler su içerisine batırılmış şekilde de test edilebilir [54].

APA için deney örnekleri hem silindirik hem de kiriş şeklinde olabilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan kiriş örnek sıkıştırma metodu asfalt vibratörlü sıkıştırıcıdır (Asphalt Vibratory Compactor). Fakat bazı araştırmacılar, kirişler için lineer yoğurmalı sıkıştırıcılar kullanılmaktadır. Silindirik briketler için en yaygın olarak kullanılan sıkıştırıcı, dönel sıkıştırmadır (gyratory compactor). Hem %4 hem de %7 hava boşluklarında üretilirken silindirik kiriş örnekler çoğunlukla %7 hava boşluğunda sıkıştırılmaktadır. Deneyler hem de gerçek kaplamadan alınan silindirik veya levha (slab) karotlara da

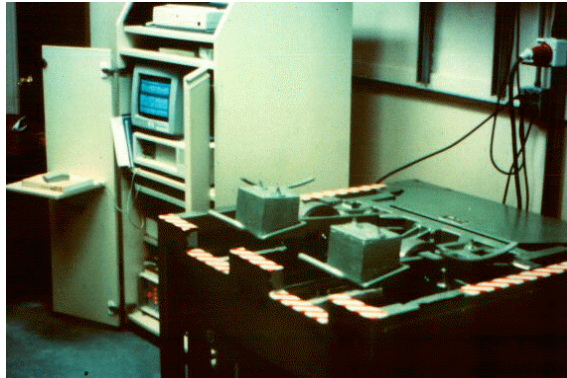
yapılabilmektedir. APA için deney sıcaklığı 40,6 ile 60°C arasındadır. Tekerlek yükü ve hortum basıncı sırasıyla 445 N ve 690 kPa (100 psi) olarak GLWT deki gibi kaldı [55].



Şekil 25. APA deney düzeneği [54].

1.4.1.3. Hamburg Tekerlek İzi Deney Aleti (HWTD)

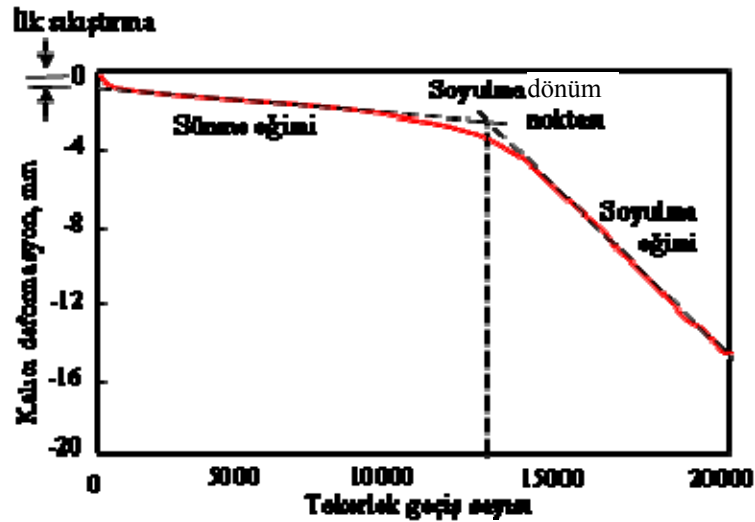
HWTD Hamburg'ta Helmut-Wind tarafından geliştirildi. Tekerlek izi ve soyulmayı değerlendirmek için Almanya'da en çok seyahat edilen yolların bazıları için kullanıldı. HWTD'deki deneyler 260mm genişliğinde, 320mm uzunluğunda ve genellikle 40mm kalınlığındaki (10,2 in*12,6 in*1,6 in) ebatlarda örnekler üretilir. Bu briketler normalde lineer yoğurmalı sıkıştırıcıda (linear kneading compactor) $\%7\pm 1$ hava boşluğu olacak şekilde sıkıştırılır [55].



Şekil 26. HWTD deney cihazından bir görünüm [55].

Hamburg tekerlek izi deneyleri 25°C den 75°C ye kadar değişen sıcaklıklarda su altında yapılabilir. En yaygın olarak kullanılan sıcaklık 50°C'dir. HWTD'de briketlerin

yüklenmesi, 47mm genişliğindeki çelik bir tekerleğin üzerine 705N'luk bir yükün uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Çelik tekerlek sonra levha şeklindeki örnekler üzerinde ileri geri yuvarlanarak deney gerçekleştirilmektedir. Deney numuneleri 20000 geçiş veya 20mm deformasyon meydana gelene kadar yüklenir. Tekerleğin hızı yaklaşık olarak 340mm/sn'dir. HWTD'den elde edilen şematik bir sonuç Şekil 27'de verilmektedir. Sünme eğimi, ilk sıkıştırmadan sonra ve soyulmadan önce (eğer soyulma var ise), deformasyon eğrisinin lineer bölgesinin içinde, deformasyon oranının tersidir. Soyulma eğimi, soyulma başladıktan sonra, deformasyon eğrisinin lineer bölgesinin içinde, deformasyon oranının tersidir. Soyulma eğrilme (büküm) noktası (stripping inflection point) sünme eğimi ve soyulma eğiminin kesiştiği noktadaki tekerlek geçiş sayısıdır. Bu değer hasara neden olan suya karşı HMA briketlerinin nispi direncini tahmin etmede kullanılmaktadır [55].



Şekil 27. Şematik Hamburg tekerlek izi deney sonucu [55].

HWTD'nin küçük bir modifikasyonu Amerika da Superfos Şirketi tarafından yapıldı. Şekil 28'de gösterilen bu alet Superfos Construction Rut Tester (SCRT) olarak adlandırıldı. SCRT'de kullanılan levha şeklindeki numuneler HWTD örnekleri ile aynı ebatlardadır. İki düzenek arasındaki fark yükleme mekanizmasıdır. SCRT 194mm çapında ve 46mm genişliğindeki sert kauçuk tekerlek üzerine 82,6kg'lık düşey yük uygular. Bu yükleme şekli 8,26cm²'lik temas alanına yaklaşık olarak 556mm/sn'lik hızda uygulanan hemen hemen 940kPa'lık basınç uygulamasıyla sonuçlanmaktadır. 45°C den 60°C'ye kadar değişen sıcaklıklar SCRT'de kullanılmaktadır. SCRT'den alınan sonuçlar HWTD

den alınan sonuçlarla benzerdir ve tekerlek izi derinliği, sünme eğimi, soyulma eğimi ve soyulma başlama noktasını içerir [55].



Şekil 28. Superfos inşaat tekerlek izi aleti (SCRT) [55].

HWTD'nin diğer küçük bir modifikasyonu tekerlek izi ve soyulma değerlendirme ekipmanıdır (ERSA). Bu alet Arkansas Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü tarafından geliştirildi. ERSA da silindirik veya kiriş şeklindeki örneklerin testi hem ıslak hem de kuru ortamlarda yapılabilmektedir. 705N yük ile örneği yüklemek için 47mm genişlikteki çelik tekerlek kullanılır ve 20000 yük döngüsü veya 20mm tekerlek izi derinliği olana kadar deneye devam edilir. Bu ölçütlerden biri gerçekleştiğinde deney sonlandırılır [55].

1.4.1.4. Purdue Üniversitesi Laboratuvar Tekerlek İzi Deney Aleti (Pur Wheel)

Purdue Üniversitesi tarafından geliştirilen bu deney düzeneği Pur Wheel olarak adlandırılmaktadır. Şekil 29'da gösterilen Pur Wheel'de hem asfalt kaplamadan kesilen hem de laboratuvar da sıkıştırılan levha örnekler üzerinde deney yapılabilmektedir. Bu örnekler 290mm genişliğinde ve 310mm uzunluğundadır. Kalınlıkları ise test edilen karışımın tipine bağlıdır. Binder ve aşınma tabakaları karışımları sırasıyla 51mm ve 76mm kalınlıkta deneye tabi tutulurken aşınma tabakası karışımları için örnek kalınlığı 38mm'dir.

Laboratuvar briketleri, Purdue Üniversitesi tarafından geliştirilen lineer sıkıştırıcı kullanılarak sıkıştırılır. Bu sıkıştırıcı HWTD'yi temel almaktadır. Aralarındaki en önemli fark Purdue versiyonu daha geniş briketleri sıkıştırabilmektedir. Briketler %6-%8 hava boşluğu içeriğinde sıkıştırılırlar. PURWheel tekerlek izi potansiyeli ve/veya suya karşı

duyarlılığı (moisture sensitivity) değerlendirmek için tasarlandı. Test örneklerine hem kuru hem de ıslak koşullarda deney yapılabilmektedir. Suya karşı duyarlılık ıslak şartlarda 12,7mm tekerlek izi oluşması için yapılan yükleme döngüsü sayısının, kuru koşulda 12,7mm tekerlek izi oluşması için yapılan yükleme döngüsü sayısına oranı olarak tanımlanır. 12,7mm tekerlek izi derinliği iyi ve kötü performanslı karışımlar arasında ayırt edici olarak kullanılmaktadır [31].



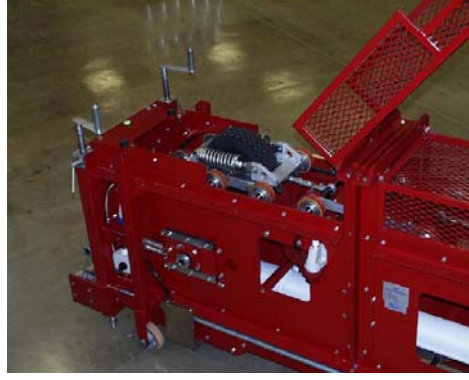
Şekil 29. Purdue üniversitesi laboratuvar tekerlek izi deney aleti[55].

PURWheel'de örneklerin yüklenmesi havalı bir tekerlek kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Numuneye 620 kPa'lık büyük bir temas basıncı (contact pressure) uygulanır. Bu 793 kPa (115psi) ile şişirilmiş tekerlek üzerine 175 kg'lık yük uygulanarak başarılmaktadır. 332 mm/sn yükleme oranı kullanılmaktadır. Deney 20000 tekerlek geçişi veya 20mm tekerlek izi oluşana kadar devam ettirilir. PURWheel HWTD'ye oldukça benzerdir. Fakat Pur Wheel'in ilginç bir özelliği, istenildiğinde tekerleklerin birleştirilebilmesidir. Bu özellik tekerlek izi deneyleri arasında eşsizdir [31].

1.4.1.5. Model Mobile Yük Simülatörü (MMLS3)

MMLS3, HMA karışımların hem laboratuvar hem de arazi deneyleri için Güney Afrika'da geliştirildi. Bu aletin Şekil 30'da gösterilen ilk örneği Texas Mobile Load Simulator(TxMLS) ye benzemektedir. Fakat boyut ve yük farklıdır. MMLS3, örneklerin kuru veya ıslak koşullarda deneyi için kullanılabilir. Sıcaklığın kontrolü için makinenin çevreden yalıtılmış bir odada bulundurulması tavsiye edilmektedir. Kuru deneyler için 50°C - 60°C ve ıslak deneyler içinde 30°C sıcaklıklar kullanılmaktadır.

MMLS örnekleri 1,2m uzunluğunda ve 240mm genişliğindedir. İç basıncı 800kPa'a kadar olan tekerleğin çapı 300mm ve genişliği 80mm'dir ve 690 kPa yük uygulayabilmektedir. MMLS3 deneyi boyunca performans gözlemi su veya çatlama kaynaklı hasarları, tekerlek izi potansiyelini değerlendirmek için yüzey dalgalarının sismik analizini tesbit etmeyi ve enine profilde tekerlek izinde oturmayı içermektedir. Kabul edilebilir performans için tekerlek izi derinliği kriteri günümüzde gelişmektedir [55].



Şekil 30. MMLS3 deney aleti [55].

1.4.1.6. Wessex Kuru Tekerlek İzi Deneyi

Bu deneyde, yüklü bir tekerlek kapalı ve izole edilmiş bir bölümde asfalt örneği üzerinde 45dk hareket eder. Alet 150mm genişlikteki çelik tekerlek yoluyla 12,5mm kalınlıktaki kauçuk değme yüzeyine sahip tekerlek ile 710N (160lb) düşey yük uygular. Dual (ikili) tekerlek aynı anda iki örneğe deney yapma olanağı sağlar [31].



Şekil 31. Wessex kuru tekerlek izi deney aleti [31].

Özel olarak tasarlanmış bilgisayar programı makinenin çalıştırılmasını, tekerlek izi derinliği kayıtlarını, sıcaklığı ve deney boyunca geçen zamanı kontrol edebilmektedir. Bilgisayar arayüzü kullanıcının tekerlek izi-zaman ilişkisi grafiğini çizmeye imkan verir. Yükleme oranı dakikada 52 geçiş olmak üzere 26 yükleme döngüsüdür. Basit ve ucuz olacak şekilde tekerlek izi derinliği tahmini yapmaya olanak tanır. Buna rağmen, uygulamada çok fazla kullanılmamaktadır [31].

1.4.1.7. Dönel Yüklü Tekerlek Deney Aleti (RLWT)

Şekil 32’de gösterilen bu alet Uluslar arası CPN şirketi tarafından geliştirildi. RLWT tekrarlı tekerlek yüklerinin fonksiyonu olarak HMA karışımların plastik deformasyonunu ölçer. RLWT tek yönlü dönen yüklü bir tekerlek kullanır ve çoğu deneyler 16000 yüklemede gerçekleştirilir. RLWT tek tekerlekten oluşur ve tekerleğe 125N yük uygulanır. Yükleme statik yük gibi uygulanır. Örnekler 150mm’lik Gyrotory (dönel) kalıplarda hazırlanabildiği gibi 4 ve 6 inch’lik Marshall kalıplarında da hazırlanabilmektedir. Bazı çalışmalarda APA ve RLWT arasında genel bir korelasyonun olduğu belirtilmektedir. Bu deneyin hemen bu şekli ile benimsenmesi düşünülmemelidir [31].



Şekil 32. Dönel yüklü tekerlek deney aleti [31].

1.4.2. Suya Duyarlılık Deneyleri

Su hasarı, çok çeşitli kaplama bozulmalarıyla sonuçlanan önemli bir problemdir. Birçok araştırma geçmişte ve günümüzde doğrudan bu problem üzerine odaklanmıştır. Birçok deney yöntemi (nicel ve nitel) geliştirildi ve geçmişte sıcak karışım asfaltların suya

duyarlılığını belirlemede kullanıldı. Bu deney yöntemleri ve nasıl yapıldıkları hakkında bilgiler aşağıda sunulmaktadır [31].

1.4.2.1. Kaynayan Su Deneyi

Sıkışmamış HMA karışımı kaynayan suya ilave edilir. ASTM D3625’de 10 dakikalık bir kaynama periyodu belirtilmiştir. Kaynamadan sonra kendi orijinal kaplanmış yüzeyini koruyan agreganın, toplam görünen alanının yüzdesinin 95’in üzerinde mi yoksa altında mı olduğu belirlenir. Bu deney HMA karışımların ilk gözlemlenmelerinde kullanılabilir. Bazı firmalar deneyi, soyulma önleyici katkıları ile üretim yapıldığında kalite kontrol için kullanmaktadırlar. Bu yöntem öznel (ya da nitel) bir deneydir ve hiçbir dayanıklılık analizi içermemektedir. Test öznel olduğu için sonuçların kendi içinde ve laboratuvarlar arası gözlemlenmiş olan değişkenliği çok yüksektir. Ayrıca, ince agregaların soyulmalarının belirlenmesi çok zordur. Bu deney yöntemi kireçten daha çok sıvı soyulma önleyici katkılarda faydalı olmaktadır. Bazı araştırmacılar, sıcak asfalt kaplamaların analizinde Dijital Görüntü Oluşturma (DIP) uygulaması ile kaynamadan önce ve sonra kaplanmış yüzey alanını ölçmek için DIP tekniklerini kullanmaya çalışmaktadırlar.

1.4.2.2. Suyu Batırma Deneyi

Bir HMA karışım örneği, 25°C’deki damıtılmış suya 16 ile 18 saat arasında batırılır. Sonrasında örnek, toplam görülebilir agrega alanının yüzde %95’in altında mı yoksa üstünde mi olduğu su içerisinde gözlenir. Bu yöntem yüksek değişkenli öznel bir deneydir ve hiçbir dayanıklılık testini içermemektedir.

1.4.2.3. Lottman Deneyi

Bu yöntem, Lottman tarafından NCHRP (National Cooperative Highway Research Program 246) kapsamında geliştirildi. 4 inç (102mm) çapında ve 2½ inç (63,5mm) yüksekliğinde 9 örnek beklenen uygulama hava boşluğu içeriğinde sıkıştırılır. Örnekler, üç numuneli üç gruba bölündü. Birinci grup, hiçbir koşullandırma yapılmaksızın kontrol amaçlı ayrılır. İkinci grup örnekleri 30 dakikada boyunca boşlukları (26inç ya da 660mm Hg) vakumlu su ile doygun hale getirilir. Üçüncü grup örnekleri de ikinci grup gibi doygun

hale getirildikten sonra donma (15 saat süreyle 0°F ya da -18°C) çözülme (24 saat süreyle 140°F ya da 60°C) döngüsüne tabi tutulur. Tüm 9 numune 55°F (13°C) ya da 73°F (23°C)'de esneklik modülü (MR) ve/veya dolaylı çekme mukavemeti (ITS) testlerine tabi tutulur. ITS testi için yükleme değeri olarak 0.065 inç/dakika (1.65 mm/dakika) kullanılır. İkinci grup, uygulama performansını dört yıla kadar temsil edebilmektedir. Üçüncü grup, uygulama performansını dört yıldan 12 yıla kadar yansıtabilmektedir. Çekme mukavemeti oranı (TSR) ikinci grup ve üçüncü grup örnekleri için aşağıdaki gibi hesaplanır: $TSR = \frac{\text{Koşullu örneklerin ITS değeri}}{\text{Kontrol örneklerin ITS değeri}}$. Lottman ve Maupin tarafından minimum TSR oranı 0,70 olarak önerilmektedir. Soyulan ve soyulmayan HMA karışımlarının TSR oranlarının 0,70 ile 0,75 arasında değiştiği belirtilmektedir. Lottman prosedürlerinin, sıcak vakumlu su ile doyurulan ve dondurulan örneklerde içsel su basıncı gelişebileceğinden dolayı çok şiddetli olduğu yönünde tartışmalar mevcuttur. Bununla birlikte, Stuart, Parker ve Gharaybeh laboratuvar ve saha sonuçları arasında genellikle iyi bir ilişki buldu. Oregon TSR yerine modül oranlı bu deneyi başarı ile kullandı.

1.4.2.4. Tunncliff ve Root Koşullandırması

Bu yöntem, Tunncliff ve Root tarafından NCHRP 274 projesi ile önerilmektedir. Yöntem, %6-8 hava boşluğunda sıkıştırılmış ve üç örnekle iki gruptan oluşan altı örnek önermektedir. Birinci grup koşullandırılmaksızın kontrol olarak ayrılmaktadır. İkinci grup örneklerde %55-80 suya doygunluk seviyeleri elde edebilmek için yaklaşık 5 dakika boyunca 508mm Hg basınçla vakumlu su uygulanır. %80'den daha fazla doygun olan örnekler elenir. Doygun örnekler 140F (60°C) sıcaklıktaki suda 24 saat bekletilir. Bütün örnekler 77F (25°C) sıcaklıkta dolaylı çekme mukavemeti deneyi ile test edilir. Minimum çekme mukavemeti oranı genellikle 0,7 veya 0,8 olarak alınmaktadır. Donma çözülme döngüsü isteğe bağlı olarak yapılabilir.

1.4.2.5. Modifiye Lottman Deneyi

Bu yöntem Kandhall tarafından önerildi ve 1985 yılında AASHTO tarafından benimsendi. Bu yöntem, Lottman deneyi ve Tunncliff ve Root deneylerinin iyi yönlerini birleştirmektedir. Altı örnek %6-8 hava boşluğu içeriğinde sıkıştırılır. Üç örnekle birinci grup kontrol olarak kullanılır. Üç örnekle diğer grup, vakumlu su ile doyurulur(%55-80).

Ardından, Lottmann tarafından önerilen bir donma ve bir çözülme döngüsü uygulanır. Bütün örnekler 77F (25°C) sıcaklıkta dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanır ve çekme mukavemeti oranı belirlenir. Bu deneyin superpave dahil geniş kabul alanı bulunmaktadır.

1.4.2.6. Suya Batırma (Sıkıştırılmış Örnekler) Deneyi

102mm çapında ve 102mm yüksekliğinde 6 örnek 20,7 MPa basınçlı iki piston ile 2 dakika boyunca yaklaşık %6 hava boşluğu olacak şekilde sıkıştırılır. Birinci grupta üç örnek kontrol olarak ayrılır. İkinci gruptaki örnekler, 120F'da 4 gün veya 140F'da 1 gün su içerisinde bekletilir. Bütün örnekler 77F sıcaklıkta 0,2in/dak yükleme oranında serbest basınç mukavemeti deneyine tabi tutulur. Basınç mukavemetleri belirlenir. Çoğu ajanslar %70 mukavemet aradıklarını ifade etmektedirler.

1.4.2.7. SHRP Suya Duyarlılık Çalışması

SHRP (The Strategic Highway Research Program) sıcak karışım asfaltların suya duyarlılığı ile ilgili iki iki araştırma gerçekleştirdi. SHRP A-003A su hasarını değerlendirmek için gelişmiş bir deney yöntemi ortaya koymayı ve SHRP A-003B, asfalt agrega ilişkisinin temel özelliklerini belirlemeyi amaçladı.

1.4.2.8. Net Adsorbsiyon Deneyi

Net adsorbsiyon deneyi SHRP A-003B projesi altında geliştirildi. Mineral agregalar ve asfalt çimentosu için ilk gözlemlene deneyidir ve adsorpsiyon-desorpsiyon prensibine dayanmaktadır. Asfalt çimentosu ve toluen çözeltisi hazırlanır ve agrega örneklerinin içeren reaksiyon kazanına konulur. İlk çözelti sıcaklığı sabitlenir, 4ml çözelti alınır ve spektrofotometre ile soğurma (emme) belirlenir. Sonra, 4,75mm'den küçük (No.4) agregadan 50gr kazana eklenir ve çözelti karıştırılır, 6,5 saat bekletilir. İkinci 4ml çözelti örneği kazandan alınır ve adsorbsiyon tekrar ölçülür. Adsorbsiyon okumalarındaki fark, asfalt çimentosunun moleküler bileşimine agregaların kimyasal cazibesinden dolayı çözüldüğü alınan asfalt miktarını belirlemede kullanılır. Ardından ikinci çözelti örneği alınır, 575mml su kazana eklenir. Sistem 2 saat karıştırılarak bekletilir. Bu sürenin sonunda

çözültiden son 4ml örnek alınır. Soğurganlıktaki artış, su molekülleri tarafından ayrıştırılan asfalt çimentosu miktarının ölçümüdür.

1.4.2.9. Çevresel Koşullandırma Sistemleri (ECS)

Çevresel koşullandırma sistemi, HMA örneklerinin, gerçek uygulama koşullarını temsil etmek için su içerisinde hızlandırılmış sıcak-soğuk uygulama döngüsünü ve trafiği simüle etmek içinde tekrarlı yüklemeyi içeren SHRP Proje A-003A tarafından geliştirildi. HMA örneklerinin modülleri, boşluk değişimleri ve su permeabiliteleri her koşullandırma döngüsü boyunca gözlenir ve çekme gerilmesi ve soyulma koşullandırmanın sonunda ölçülür. Hem ılıman hem de soğuk iklim koşullandırmaları gerçekleştirilebilir. Modül oranları ve su geçirgenlik oranları her koşullandırma döngüsü tamamlandıktan sonra hesaplanır. AASHTO standardı TP34’de “sıcak ve soğuk iklim koşullarına maruz bırakılan sıkıştırılmış bitümlü karışımların suya duyarlılık özelliklerinin belirlenmesi için standart deney yöntemleri” tanımlanmaktadır. ECS nispeten pahalı fakat çok yönlü bir deney yöntemidir. Bu yöntemin benimsenmesi için gerekli bilgiler henüz mevcut değildir.

1.4.2.10. Diğer Deneyler

Su-buhar duyarlılığı, şişme (kabarma) deneyi, ve film soyulma deneyleri suya duyarlılığı değerlendirmede kullanılmaktadır. Marshall stabilitesi de kullanılan deneyler arasındadır. Deney yöntemlerinin büyük bir çoğunluğu çeşitli ajanslar tarafından kullanılmaktadır. Yine de, hiçbir deneyin diğer deneylere üstünlüğü kanıtlanamamış ve hiçbir deney bütün durumlarda karışımların suya duyarlılığını doğru belirleyememektedir. Bu durum, HMA karışımların, bu deneyler ve kriterler kullanıldığına kabul edilemez olarak sunulabildiğini ve hem de zayıf karışımların bazı durumlarda kullanıma kabul edilebildiğini göstermektedir. Bu deneylerin kullanımı çoğu ülkede soyulma önleyici katkıların kullanımlarının artmasıyla sonuçlanmıştır.

1.4.3. Asfalt Kaplamaları Değerlendiren Bazı Deneylerin Karşılaştırılması

Asfalt kaplamaları değerlendirmede kullanılan deneylerden her biri, deney uygulama koşullarına, deney örnek özelliklerine ve deneylerin kullanım alanlarına göre emsallerine

üstünlük sağlayabilmektedir [56]. Her bir deneyin üstünlük ve sakıncaları Tablo 2 ve Tablo 3'de özetlenmektedir.

Tablo 2. Tekerlek izi deneylerinin üstünlük ve sakıncaları [57].

Deney Yöntemi	Briket veya Karot ölçüleri (inç)	Üstünlükleri	Sakıncaları
APA	Silindirik 6 x 3,5 veya 4,5 veya kiriş	<ul style="list-style-type: none"> Gerçek trafiği ve sıcaklığı simüle eder Modifiye edilmiştir ve GLWT'den daha ileridir. Uygulanması daha kolaydır. Aynı anda 3-6örnek test edilebilir. Amerika'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulama ölçütleri mevcuttur. Silindirik örnekler SGC kullanır. 	<ul style="list-style-type: none"> Yeni sürümleri haricinde pahalıdır.
HWTD	10,2 x 12,6 x 1,6	<ul style="list-style-type: none"> Almanya'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Su hasarını değerlendirebilir. 2 örneği aynı anda test edebilir. 	
Fransız tekerlek izi deney aleti	7,1 x 19,7 x 0,8 ila 3,9	<ul style="list-style-type: none"> Fransa'da başarıyla kullanılmaktadır. İki örnek aynı anda test edilebilir. 	
PUR Wheel	11,4 x 12,2 x 1,3 ila 2,3	<ul style="list-style-type: none"> Örnekler laboratuarda hazırlanabildiği gibi uygulamadan da alınabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> Lineer sıkıştırıcıya ihtiyaç vardır. Mevcut değildir.
MMLS3	47 x 9,5 x kalınlık	<ul style="list-style-type: none"> Örnekler tam ölçekli yükü simüle edebilecek şekilde ölçeklendirilmiştir. 	<ul style="list-style-type: none"> Gereğinden fazla malzemeye ihtiyaç vardır. Rutin kullanımlar için uygun değildir. Laboratuarda örnek hazırlamak için standartlar hazırlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.
RLWT	6 çap x 4,5 yükseklik	<ul style="list-style-type: none"> SGC örnekleri kullanılabilir. APA tekerlek izi derinliği ile uyum göstermektedir. 	<ul style="list-style-type: none"> Deneyle ilgili az veri bulunmaktadır.
Wessex deney aleti	6 çap x 4,5 çap x yükseklik	<ul style="list-style-type: none"> Aynı anda 2 örnek test edilebilmektedir. SGC örnekleri kullanılabilir. 	<ul style="list-style-type: none"> Yaygın olarak kullanılan veya iyi bilinen bir deney değildir. Çok az deney verisi bulunmaktadır.

Tablo 3. Statik ve tekrarlı yük sünme deneylerinin üstünlük ve sakıncaları [57].

Deney yöntemi ve briket boyutu (inç)	Üstünlükleri	Sakıncaları	
Çapsal (diametral) deneyler	Çapsal statik sünme 4 x 2,5	Deneyi gerçekleştirmek kolaydır, deney malzemeleri genellikle tüm laboratuarlarda mevcuttur, briket hazırlamak kolaydır.	Gerilme durumu üniform değildir, büyük ölçüde briketin şekline bağlıdır, kalıcı deformasyon tahmini için uygun değildir.
	Çapsal tekrarlı yük 4 x 2,5	Deneyi gerçekleştirmek kolaydır, briket hazırlamak kolaydır.	Yüksek sıcaklık değişiklikleri, gerilme durumunu ve deney ölçümünü önemli derecede etkiler, tekerlek izini fazla tahmin eder, dinamik deney için donanım karmaşıktır.
Tek eksenli deneyler	Tek eksenli statik sünme 4 x 8 ve diğerleri	Deneyi gerçekleştirmek kolaydır, deney donanım basit ve genellikle mevcuttur, yaygındır ve iyi bilinir, daha çok teknik bilgi mevcuttur.	Performans tahmin yeteneği sorgulanabilir, sınırlı deney sıcaklıkları ve yük seviyeleri uygulama koşullarını yansıtmaz, dinamik yük uygulama koşullarını yansıtmaz, laboratuarda 2:1 oranında briket elde etmek zordur.
	Tek eksenli tekrarlı yük 4 x 8 ve diğerleri	Trafik koşullarına daha iyi benzer.	Donanım daha karmaşıktır, kısıtlı deney sıcaklıkları ve yük seviyeleri uygulama koşullarını yansıtmaz, laboratuarda 2:1 oranında briket elde etmek zordur.
Üç eksenli deneyler	Üç eksenli statik sünme 4 x 8 ve diğerleri	Nispeten basit deneydir ve donanım kolaydır, deney sıcaklığı ve yük seviyeleri uygulama koşullarını daha iyi temsil eder, daha ucuza mal olur.	Üç eksenli bir odacık gerektirir, deney daha karmaşıktır.
	Üç eksenli tekrarlı yük 4 x 8 ve diğerleri	Deney sıcaklığı ve yük seviyeleri uygulama koşullarını daha iyi temsil eder, trafik koşullarını daha iyi temsil eder, çeşitli briket boyutlarıyla uygulanabilir.	Donanım nispeten karmaşık ve pahalıdır, üç eksenli odacık gereklidir.

1.5. Asfalt Kaplamalarda Tomografi Uygulamaları

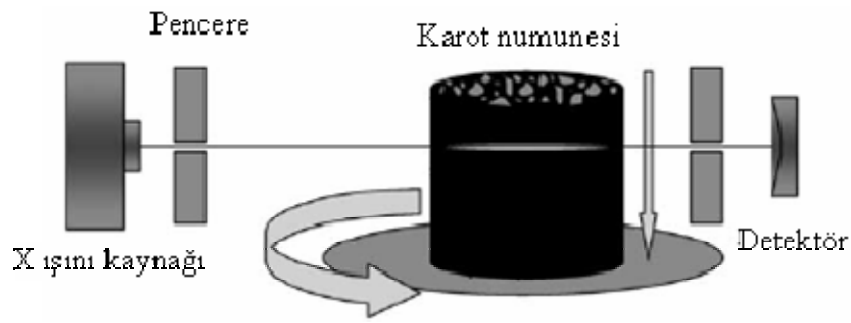
Asfalt karışımlar üzerinde, hasarsız test yöntemleri uygulaması ile daha doğru karşılaştırmaların yapılabileceği düşünülmektedir. Dolaylı çekme ve tekrarlı sünme deneyleri (stabilite değerinin çok düşük seviyelerinde gerçekleştirildiğinde) hasarsız yöntemler olarak mütalaa edilebilir. Güncel sıkıştırma biçimlerinden (gyratory compaction), dönel sıkıştırıcı uygulaması yapılması ile sorunlar daha iyi değerlendirilmeye başlanmış, ancak dönme açısının (angle of gyration) etkisi ile birlikte, güncel olan konu değerlendirme aşamasındadır [29].

Hasar mekanizmalarının anlaşılması ve daha kısa süreler içerisinde daha doğru sonuçların alınmasında, bilgisayarlı görüntü analizleri ile kaplamanın değerlendirilmesi ve

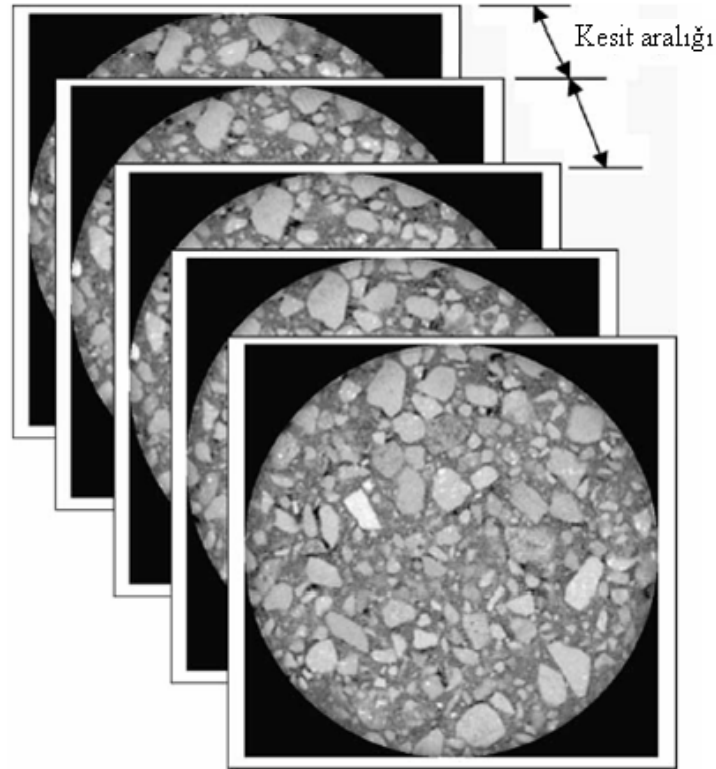
görüntü değerlendirmelerinin mekaniksel testlere uygulanması ile daha doğru laboratuvar ve arazi performans karşılaştırmalarının yapılabileceği düşünülmektedir.

Hasarsız bir test yöntemi olan bilgisayarlı tomografi (computed tomography) tekniği asfalt karışımlara uygulanarak, briketlerin çeşitli kesitlerinden yapılan incelemeler ile boşluk dağılımları belirlenebilmektedir [10-20].

Bilgisayarlı tomografi sisteminin temel uygulanış biçimi Şekil 33’de şematik olarak vurgulanmaktadır. Uygulama ile sıkıştırılmış briket örneklerinin farklı düzeylerinden kesit alınabilmektedir [15].



Şekil 33. XRT görüntüleme şematik gösterimi [15].



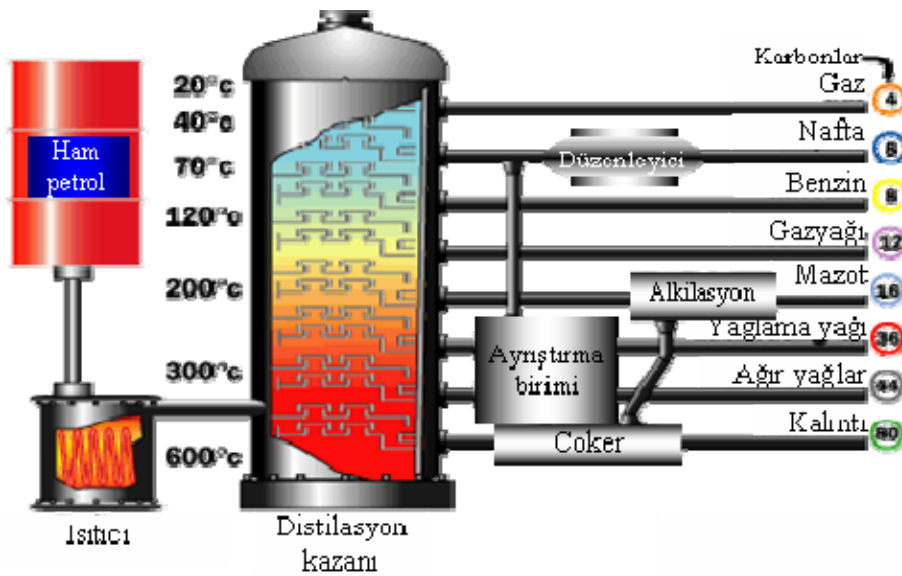
Şekil 34. XRT görüntülemesiyle üretilen kesit fotoğrafları [26].

Tıp alanındaki araştırmalarda kullanılan CT (computed tomography) donanımları, inşaat mühendisliği laboratuvarları amacıyla da kullanılabilir [58].

Örneğe ait tomografi kesit aralıkları istenilen büyüklükte seçilebilir. Değerlendirme aşamasında, iki boyutlu görüntülerden yararlanılabildiği gibi çeşitli programlar yardımı ile üç boyutlu fotoğraflar üretilebilir. Üretilen üç boyutlu fotoğrafın kalitesi, ardışık iki kesit arasındaki mesafenin ne kadar küçük olduğu ve X ışınının şiddet ve dalga boyu ile ilgilidir.

1.6. Asfalt Kaplamalarda Katkı Uygulamaları

Bilindiği gibi asfalt ham petrolün damıtılması sonucu artakalan çökelti maddesinden oluşmaktadır. Ham petrol distile edilerek gazyağı, benzin yağlama yağları, dizel vb. gibi birçok ara veya son ürün olarak piyasaya sürülmektedir. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak gerek bu maddelere olan ihtiyacın artması gerekse rafinerilerdeki damıtma işleminin daha kaliteli şekilde yapılması çökelti maddesinin daha kalitesiz olmasına yol açmıştır. Diğer yandan nüfustaki artışa bağlı olarak artan trafik hacmi ve daha yüksek akslı yüklemelerle birlikte, hem deformasyonu ve çatlamayı önlemek, hem de poroz asfalt, taş mastik asfalt, vb. kullanılmasını sağlayacak yeni yüzeyler geliştirmek yönünde daha yüksek performanslı bağlayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 35. Distilasyon kazanı bazı petrol ürünleri [59].

Karayollarına yönelik dünya çapındaki talep artmakta ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde bazı karayolları büyük iklim koşulları farklılıkları olan güç arazilerde yapılmaktadır. Öte yandan, genel olarak karayolu ağlarını tamamlamış olan sanayileşmiş ülkelerde, asfalt karışımlarına yönelik talepler coğrafi veya iklimsel talepler dışında çeşitli faktörlerden gelmektedir; bakım çalışmaları arasındaki sürenin uzamasına ve daha fazla emniyet ve özellikle karayolu gürültüsü gibi daha az çevresel etkiler [60].

Günümüz kaplamalarının daha hızlı onarılması, daha ince katmanların olması ve onarımlarının daha uzun süre dayanması gerekmektedir. Yarının karayollarının daha uzun ömürlü olması ve ana sorunlar olarak belirlenen deformasyon, termal yorgunluk çatlaması, parçalanma, vaktinden önce sertleşme, çekilme ve akma problemlerine daha az maruz kalması gerekmektedir. Asfalt karışımları, bu problemlerden birçoğu için yeterli nitelikteki bir takım çözümler içerir. Örneğin bitüm içeriğini artırmak veya daha yumuşak bitüm dereceleri kullanmak, düşük çevre ısılarında çatlama direncini artıracaktır. Fakat bu kazanç daha yüksek ısılarda deformasyondaki artış pahasına kazanılmaktadır. Bunun tersine, deformasyon direnci, daha sert bitüm dereceleri kullanılarak veya karışımdaki bitüm içeriği azaltılarak daha iyi hale getirilmekte, ancak bu yaklaşımın neredeyse kaçınılmaz olan dezavantajları düşük ısılarda çatlama ve eskime olmaktadır [60].

Tüm bu gelişmeler ışığında geleneksel (katkısız) bitümle üretilen asfalt kaplamalardan günümüzde beklenen verimin alınamadığı görülmektedir. Bu amaçla asfalt üreticileri ve araştırmacılar, bitüme veya direkt karışıma çeşitli sıvı veya katı katkı maddeleri katarak modifiye bitüm veya modifiye karışımlar elde etme yoluna gitmişlerdir.

Rutin olarak kullanılan veya deneylerde kullanılan çok sayıda modifiyerler bulunmaktadır. Hatta gelecekte modifiye bitümlerin kullanımının artırılması amaçlanmaktadır. Buna rağmen modifiye bitümlerin performansı nasıl etkiledikleri, depolama stabilitesi, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı için protokollerin eksikliği hakkında ciddi endişeler vardır [61].

1.6.1. Asfalt Kaplamalarda Kullanılan Katkı Maddeleri

Asfalt modifiyerler çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler: modifiyerlerin asfaltın özelliklerini değiştirdiği mekanizmalara göre; modifiyerlerin fiziksel doğası ve bileşimine göre veya modifiyerlerin hedef asfaltın eksikliklerini tamamlayıcı veya özelliklerini artırıcılıklarına göre. Basılı literatür ve araştırma çalışmalarına dayandırılarak asfalt

endüstrisinde kullanılan modifiyer tiplerinin listesi Tablo 4’de verilmektedir. Bu bilgiler asfalt modifiyerlerin birçok açıdan farklı olduklarını ortaya koymaktadır. Modifiyerler tamamen dağılan veya asfalt içerisinde eriyen özel maddeler veya katkıları olabilirler veya organikten inorganik malzemeye sıralanabilirler. Bazıları asfalt ile reaksiyon verirken diğerleri de filler olarak katılabilirler. Modifiyerlerin genellikle diğer fiziksel özellikleri olduğu kadar özgül ağırlıkları da farklıdır. Onların oksidasyon ve su etkisi gibi çevresel koşullarda farklı davranması beklenir. Asfalt modifiyerlerdeki bu farklılıklar ile, geçerli AASHTO MP1 sınıflandırması modifiye asfaltların bütün bu çeşitliliklerinin sınıflandırılması için çok basit bir yaklaşım olmaktadır [61].

Tablo 4. Kaplama uygulamalarında kullanılan modifiyerlerin genel çeşitleri [61].

Modifiyer tipi	Sınıf	Bozulma üzerine etkisi					
		PD	F C	LT C	M D	A G	
Fillerler	Karbon siyahı	X				X	
	Mineral	Sönmüş kireç	X				X
		Uçucu kül	X				
		Portland çimentosu	X				
		Egzost tozları (Baghouse fines)	X				
Ekstenderler	Sülfür	X	X	X			
	Ligrin (odun özü)					X	
Polimerler-Elastomerler	Stiren bütadien di-blok (SB)	X		X	X		
	Stiren bütadien triblok/radyal blok (SBS)	X	X	X			
	Stiren isopren (SIS)	X					
	Stiren etilbütillen (SEBS)						
	Stiren bütadien kauçuk lateks (SBR)	X		X			
	Polikloropren lateks	X	X				
	Doğal kauçuk	X					
	Akrilonit bütadien stiren (ABS)	X					
Polimerler-plastomerler	Etilen vinil asetat (EVA)	X	X				
	Etilen proplen dien monomer (EDPM)	X					
	Etilen akrilat (EA)	X					
	Poliisobütillen	X					
	Polietilen (düşük ve yüksek yoğunluklu)	X		X			
	Polipropilen	X					
Kırıntı kauçuk	Farklı yöntemlerle elde edilmiş	X	X	X			
Oksidanlar	Manganez bileşikleri	X					

Tablo 4'ün devamı

Modifiyer tipi	Sınıf	Bozulma üzerine etkisi					
		PD	F C	LT C	M D	A G	
Hidrokarbonlar	Aromatikler			X			
	Naptenikler (naphthenics)						
	Parafinikler			X			
	Vakumlu gaz petroler			X			
	ROSE aşamalı reçineler	X					
	Asfaltlar	DEMEX asfaltları	X				
		SDA asfaltları	X				
		Kaya petrolü				X	X
		Tall yağı					
		Doğal asfaltlar: Trinidad	X	X	X	X	
	Gilsonit	X			X		
Soyulma önleyiciler	Aminler				X		
		Amidoaminler				X	
		Poliaminler				X	
		Poliamidler				X	
		Sönmüş kireç				X	
	Organo-metalikler				X		
Oluşum-köken Process-based	Hava üfleme						
	Buharla damıtılmış						
	Propan de-asfaltit (PPA)						
Fiberler	Polipropilen	X	X	X			
	Polyester	X		X			
	Cam elyaf						
	Çelik	X	X	X			
	Donatı	X	X	X			
	Doğal						
		Selüloz	X				
	Mineral	X					
Antioksidanlar	Karbamatlar			X		X	
		Kurşun			X	X	
		Çinko			X	X	
		Karbon karası, kül	X			X	
		Kalsiyum tuzları				X	
		Sönmüş kireç				X	X
		Fenoller				X	
	Aminler				X	X	

NOT: Tabloda PD: kalıcı deformasyon (tekerlek izi), MD: su hasarı, FC: yorulma çatlaması, AG: oksidatif yaşlanma, LTC: düşük sıcaklık çatlamasını ifade etmektedir.

Farklı katkı tipleri, asfalt betonunun kıvamını ve performansını farklı yönde etkilemektedir. Tablo 5’de modifiyerlerin asfalt betonunun kıvamı üzerindeki etkileri belirtilmektedir.

Tablo 5. Asfalt betonunun kıvamı üzerine modifiyerlerin genel etkileri [62].

Modifiyer tipi	Asfalt çimentosunun kıvamına genel etkisi
Filler	Sertleştirir
Ekstender	Sertleştirir
Kauçuk	*
Polimerler	Plastik
Kombinasyon	*
Fiberler	Sertleştirir
Oksidanlar	Sertleştirir
Antioksidanlar	Yumuşatır
Hidrokarbonlar	*
Soyulma önleyiciler	Yumuşatır

NOT: Bazı maddeler sıcaklık oranına bağlı olarak asfalt çimentosunu hem sertleştirir hem de yumuşatır.

Tablo 4 ve Tablo 5’deki bilgiler ışığında asfalt çimentosunu ve asfalt karışımları modifiye etmek için birçok neden sıralanabilir. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmaktadır [62].

- Düşük servis sıcaklığında daha yumuşak karışımlar elde etmek ve çatlamayı azaltmak
- Yüksek servis sıcaklığında daha sert karışımlar elde etmek ve tekerlek izi oluşumunu azaltmak
- İnşa sıcaklığında viskositeyi azaltmak
- İşlenebilirliği ve sıkışmayı iyileştirmek
- Karışımın stabilitesini ve dayanıklılığını artırmak
- Karışımın aşınma direncini artırmak ve sökölme azaltmak
- Kaplama düşük sıcaklık çatlamalarını azaltmak
- Yumuşak karışımların erken sertleşmesini hızlandırmak
- Karışımların yorulma direncini iyileştirmek
- Asfalt çimentosunu iyileştirmek

- Yaşlanmış asfalt bağlayıcıları gençleştirmek
- Asfalt bağlayıcıları ve karışımları güçlendirmek
- Marjinal agregaların kullanımına izin vermek
- Ekstender olarak asfalt çimentosunun yerine kullanmak
- Agregaların üzerine daha kalın bir asfalt filminin kaplamasına izin vermek
- Asfalt çimentosu ve agregaların soyulmasını azaltmak ve aralarındaki bağı güçlendirmek
- Kusma veya akmayı azaltmak
- Yaşlanma veya oksidasyona karşı direnç sağlamak
- Kaplama tabakalarının yapısal kalınlığını azaltmak
- Kaplamaların hizmet ömrü maliyetini azaltmak

Modifiyerler bu faydalardan yalnızca bir tanesini değil, aynı zamanda birçok faydayı da sağlayabilmektedirler.

Modifiyerler karışıma veya bitüme ilave edilebilmektedirler. Bazı çeşit modifiyerler de filler malzemesiyle yer değiştirme şeklinde kullanılabilirler. Farklı katkı tipleri, farklı oranlarda ve farklı sıcaklıklarda bitüme veya karışıma katılmaktadırlar.

1.6.2. Modifikasyon Yöntemleri

Genel olarak bitümün modifikasyonu ve karışımın modifikasyonundan söz etmek mümkündür. Bitüm ise şantiyelerdeki tesislerde modifiye edilebilmekte veya piyasadan doğrudan temin edilebilmektedir.

1.6.2.1. Bitümün Modifikasyonu

1.6.2.1.1. Şantiyede Tesis Kurarak Yapılan Modifiye Bitüm

Her modifiyer her bitümü modifiye etmede kullanılamaz. Mutlaka bitüm-polimer uyumluluğunun sağlanması gereklidir. Modifiye işlemi sırasında ısı önemli bir faktördür. Hızlı beslenme durumunda bitüm polimerin etrafını sararak modifikasyonu engeller. Özel karıştırma ve ısıtmalı bitüm tanklarına sahip, yine özel parçalayıcı değirmeni olan otomatik kontrollü plantlerin (tesis) kurulması gereklidir. Belirli bir ısının altına düşmeden özel tanklarda depolanmaları gereklidir. Modifiye bitüm konusunda deneyimli, kalifiye

personel istihdamı şarttır. Her şantiyede modifiye bitümle ilgili deneyleri yapabilecek iyi donanımlı laboratuvar kurulması gereklidir. Modifiye bitümün her beçi için deney tekrarı, büyük üretim kayıplarına neden olacaktır. Katkıların modifiye edilecek bitümle uyumu sağlanabilirse ve uygun tesislerde kalifiye personel gözetiminde üretimi yapılabildiği sürece, iyi sonuç vermektedir [63].

Her şantiyede bir tesisin kurulması ile yapılacak modifiye bitüm, maliyeti ve kullanım-üretim güçlüğü ile ülke ekonomisine yük getirecektir. Şu ana kadar yapılan hiçbir bilimsel çalışmada SBS'li modifiye bitümün, katkılarla plentte yapılan modifiyeli karışıma karşı üstünlüğü ispat edilememiştir. Shell gibi dünyanın en büyük SBS üreticisi firmalarından birinin yaptığı çalışmalarda bile; plentte kullanılan katkıların bitüm modifikasyonunda önemli bir yerinin olduğu kabul edilmektedir [63].

1.6.2.1.2. Hazır Modifiye Bitüm (Piyasadan Sağlanan)

Malzeme üretim sorumluluğu üretici firmaya ait olduğu için ve her şantiyede bir tesis kurularak elde edilecek modifiye bitüme göre kalite homojenliği devamlı sağlanabileceğinden, kullanıcının uygulama-kullanma rahatlığı vardır. Geçici olmayan merkezi ve uzman personel yönetimindeki tesisten elde edilecek ürün kalitesinden, her şantiyede kurulacak geçici ve kalifiye personel eksikli bir tesise göre daha fazla emin olunabilir. Hazır modifiye bitümün şantiyeye ulaşımı sıcak yapılmak zorunda ve her koşulda belirli bir sıcaklıkta depolanması gerekmektedir. Kullanıma kadar geçecek sürede gereksiz enerji kayıpları olacaktır. Ayrıca hazır modifiye bitüm fiyatı, gerçek maliyetlerle, (tesis+personel+laboratuvar) hesaplandığından pahalı olmaktadır [63].

1.6.2.2. Karışımın Modifikasyonu

Mikser içerisinde, normal karışım hazırlanırken katkıları ilave edilir ve özel karıştırma tekniğine ihtiyaç yoktur. Geleneksel karışım sıcaklıklarını 5°C -10°C çıkarmak yeterlidir ve bitümle uyumsuzluk sorunu çıkarmazlar. Karışıma katıldıklarından bekleme süresi problemleri yoktur. Herhangi bir tesise ihtiyaç göstermezler. Katkıları asfalt plenti mikserine basit bir tertibatla veya elle direkt olarak konulabilir. Kullanımı kolay olduğu için kalifiye elemana ihtiyaç yoktur. Katkıları modifikasyonda “performans şartnameleri” uygulandığından şantiyede bu amaçla laboratuvar ihtiyacı gerektirmez [63].

Katkıların bitümün içinde erimeyen kısımları, karışımın sıkıştırılması sırasında agregalar arasına sıkışıp boşlukları azaltır, donatı etkisi yapar. Ayrıca, yarı erimiş haldeki katı parçacıklar, agrega aralarını doldurarak bloke eder ve daha yüksek düzeyde yük iletimi sağlar. Katkılarla plentte modifikasyon tekniği ucuz ve kullanımı pratiktir. Son on yıldır yapılan çalışmalar, bu karışımların diğer tekniklerin kullanıldığı her alanda ve ilave olarak sıcak bölgelerde görülen kalıcı deformasyonların çoğunu çözebilecek bir yöntem olduğunu göstermektedir. Yukarıda detaylı değerlendirmesi yapılan her iki yöntemden “katkılarla plentte modifikasyonun” ülkemiz için uygun ve ucuz bir alternatif olduğu görülmektedir [63].

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde çalışmada kullanılan malzemeler, malzemelerin özelliklerini tayin etmede kullanılan deneyler ve malzeme özellikleri ve karışım tasarımına ait bilgiler verilecektir. Ayrıca hazırlanacak karışımlara uygulanacak deneyler ve bu deneylerde kullanılan ölçütler de bu kısımda yer alacaktır.

2.1. Materyal

Asfalt betonu karışımların agrega ve bitümlü bağlayıcı olmak üzere iki ana bileşenden meydana geldiği bilinmektedir. Eğer isteniyorsa karışımın dış etkilere karşı direncini artırmak için belirli katkıları da ilave edilmektedir.

Bu kısımda; araştırmada kullanılan bitüm, agrega ve katkı maddelerine uygulanan deney yöntemleri ve malzeme özellikleri verilmektedir. Malzeme tanımlama deneyleri yapıldıkları standartları ile birlikte sunulmaktadır.

2.1.1. Bitümlü Bağlayıcı ve Özellikleri

KGM Teknik Şartnamesinde 40-50 veya 60-70 penetrasyonlu bitümler önerilirken Avrupa ülkelerinde kullanılan bitüm penetrasyonları genel olarak 50-85 arasında değişmektedir. Çalışmada şartnameye uygun 60-70 penetrasyonlu bitüm kullanıldı.

Tablo 6. Bitümlü bağlayıcının özellikleri

Deney	Yöntem	Birim	Değer
Özgül ağırlık (25°C)	ASTM D-70	gr/cm ³	1.024
Parlama noktası	ASTM D-92	°C	300
Penetrasyon (25°C)	ASTM D-5	0.1 mm	64
Düktilite (25°C)	ASTM D-113	cm	100+
Isıtma kaybı (163°C)		%	0.05
Isıtma kaybı pen. /Orijinal Pen.	ASTM D-5	%	57.8
Isıtma kaybindan sonra düktilite	ASTM D-113	cm	51.5+
Yumuşama noktası	ASTM D-36	°C	55

Asfalt çimentosuna uygulanan deneyler Doğuş-Polat Ortak Girişimi Araklı-İyidere Yolu Doğuş İnşaat AŞ laboratuvarlarında gerçekleştirildi. Standart tanımlama deneyleri ve bitümlü bağlayıcıya ait özellikler Tablo 6'da sunulmakta olan standartlara göre gerçekleştirildi.

2.1.2. Agregat Özellikleri

Agregat üretiminde kullanılan kayalar, Araklı-Dağbaşı İl Yolu 32+750km'deki Sularbaşı taş ocağından alındı. Kayaların taşocağındaki aynı damar üzerinden alınmasına özen gösterildi. Kamyonlarla Dulköy mevkiindeki konkasör tesislerinde taşınan malzeme burada boş konkasörde kırılarak agregatlar üretildi. Agregatlar 19,1mm, 12,7mm, 9,52mm, 4,76mm, 2,00mm, 0,42mm, 0,177mm ve 0,075mm göz açıklıklı eleklerden elenerek depolandı. (3/4"-3/8"), (3/8"-No:4) ve (No:4-0) grubu agregatları ile aşınma tabakası dizaynı yapıldı.

Agregat tanımlama deneyleri, bu deneylerin yapıldığı standart numaraları ve agregat özellikleri Tablo 7'de ifade edilmektedir.

Tablo 7. Çalışmada kullanılan agregatların özellikleri

Agregat özelliği	Deney yöntemi	Değer
Aşınma kaybı (%)	ASTM C-131	9.6
Yassılık (%)	BS 812 (Part 105)	14.7
Soyulma direnci (%)	ASTM D-1664	30-35
Su emme (%)	ASTM C-127	0.85
Hava etkilerine dayanıklılık (%)	ASTM C-88	2.30
Cilalanma değeri	BS 812 (Part 114)	0.60
Plastisite indeksi	TS 1900	N.P.

2.1.3. Çalışmada Kullanılan Katkı Maddeleri ve Özellikleri

Doktora tezi kapsamında SBS (stiren-bütadiyen-stiren) ve Wetfix BE olmak üzere iki farklı katkı maddesi kullanıldı.

2.1.3.1. SBS Katkı Maddesi ve Özellikleri

Ticari adı Kraton D 1101 olan SBS (stiren-bütadiyen-stiren) Şekil 36'da gösterilen toz deterjan görünümüne sahiptir. Gerekli koşulları sağlayarak yapılan modifikasyonda bitüm içerisine Şekil 37'deki gibi homojen olarak dağılmaktadır. Bitüme yeterli oranda katıldığında bitüm içerisinde bir ağ oluşturmakta (Şekil 38, Şekil 39) ve bitüm performansını önemli ölçüde artırmaktadır.

Yalnızca birkaç polimer türü, bitümlerle böyle bir geliştirme sağlayacak şekilde etkileşime girer; bunlar arasında da yalnızca camlaşma noktası düşük olan polimerler, asfalt karışımlarına düşük sıcaklıklarda fazladan esneklik verir ve sıcaklıkla ilgili olumsuz etkenlere karşı koymalarını sağlayacak bir iç yapışkanlık kazandırır. Bu iki özelliği çok verimli ve etkin bir biçimde sağlayan polimerlerden biri, stiren-bütadiyen-stiren blok kopolimer Kraton D'dir [64].

Stiren-bütadien-stiren blok kopolimerlerinin başlıca yapısal özelliği, bütün uçlarından polistiren (plastik) uç-bloklarıyla çevrelenen elastiki çekirdeklere (lineer ya da radyal polibütadien) sahip olmalarıdır. Bu blok yapısı, maddeyi bir lastik haline getirir; ama bu yapı, SBS'den daha çok tanınan, aynı monomerlerden oluşan, ama bunların molekül içerisinde rastlantısal bir biçimde dizilmesiyle kopolimer haline gelen SBR'den farklı özelliklere sahiptir [64].

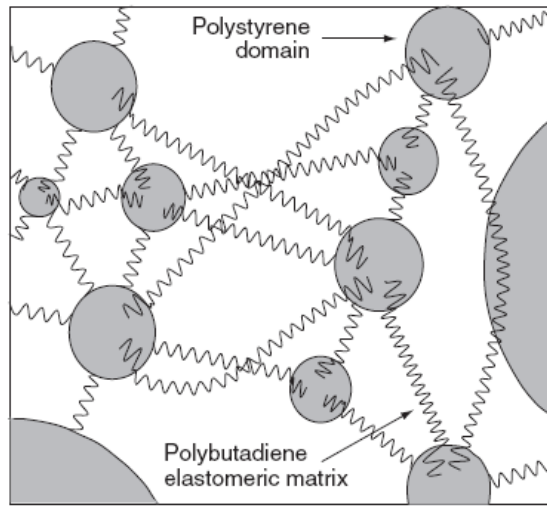


Şekil 36. SBS (Kraton D 1101) polimerinden bir görüntü

Bitüm ve SBS'in hem ortalama çözünürlük parametreleri birbirine yakındır, hem de aromatik bileşikler olan bitümler, kullanım sıcaklıkları 70°C'nin altında olmasına karşın, 160°C'nin üstündeki sıcaklıklarda işlenirler [66].



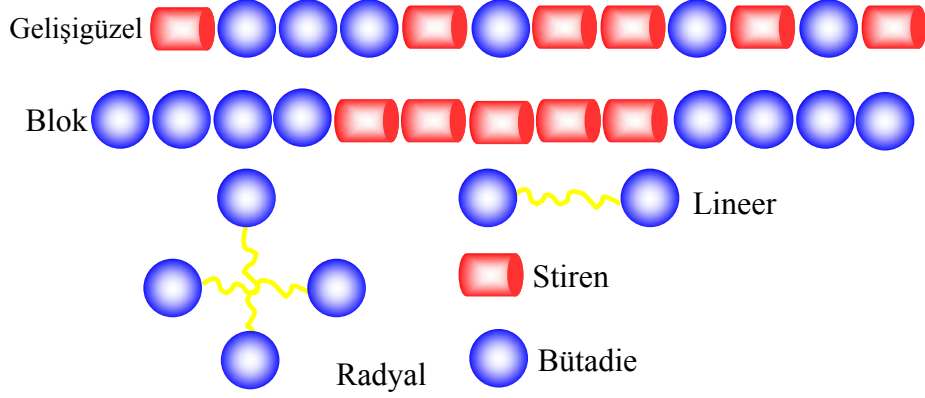
Şekil 37. Bitüm içerisinde SBS'in dağılışı [50].



Şekil 38. Kullanılan SBS maddesinin yapısı [64].



Şekil 39. Asfaltla kaplanmış SBS moleküllerinin üç boyutlu görünümü[65].



Şekil 40. SBR ve SBS Yapıları [64].

Şekil 40'da gösterildiği gibi, SBS'nin (stiren-butadien-stiren) doğrusal veya radyal bir yapısı olabilir. Doğrusal yapıda olanlar öncelikle yol bitümünde, radyal yapıda olanlar ise çatı yapımında kullanılır [60].

Kraton D sıcak bitüme ilave edildiğinde, polimer bitümden maltenleri emer ve başlangıçtaki hacminden dokuz kat fazla şişer. Kütle itibarıyla %4-%6 arasındaki konsantrasyonlarda şişen polimer bitümün hacmindeki ana bileşen haline gelir. Kraton D'nin daha düşük konsantrasyonlarında, polimer ağı sürekli olmayabilir. Ama parçalı formda bile bitümün önemli bir hacmini alır ve asfalt performansında kayda değer iyileştirmeler sağlar. Bitüm soğuduğunda, polistiren uç blokları 100°C altında kütleler oluşturur ve bunlar polibütadienin üç boyutlu ağının fiziksel kesişme noktaları haline gelir. Polistiren uç blokları yapıya güç kazandırır ve polibütadien orta bloku materyale olağanüstü elastikliğini kazandırır. 100°C'nin üzerinde yeniden ısıtıldığında, polistiren uç blokları yumuşar ve malzeme yeniden akar [60].

SBS polimerler, genellikle gözenekli taneler biçiminde üretilir. SBS ile bitümün karıştırılması temelde bir çözme işlemidir. İşlem genellikle 180-190°C arası sıcaklıklarda yapılır ve bu sıcaklıkta saf polimer sıvılaşacak derecede erimez. Polimer, sıcak bitüme temas eder etmez bitümün asfalten içermeyen bileşenlerini soğurmaya başlar. Bunun sonucunda stiren bölgeleri zayıflar ve zamanla tek moleküller, molekül ağından koparak çözeltilmeye karışır. Azami boyutu 1200 mikron olan öğütülmüş SBS'nin kullanılması halinde, aynı koşullarda aynı bitüm içinde tam olarak çözünme süresi 2 saatin altına düşer. SBS'in bu öğütülmüş çeşidi, basit karıştırma gereçlerinin kullanılmasını mümkün kılar. Burada dikkat edilmesi gereken sadece iki nokta vardır: Tozun büyük parçalar halinde atılmaması (bir seferde, aniden çok miktarda tozun eklenmemesi) ve çalkalama esnasında

temas etmeyen bölümlerin bırakılmaması. Eğer buna dikkat edilmezse parçacıklar topak haline gelir ve çözünmesi saatler alacak tek bir büyük parçaya dönüşür [66].

Hangi tip polimer kullanılırsa kullanılsın, çoğu bitüm karıştırma sonrasında iki fazlı bir yapı kazanır. SBS, bitümlerle özellikle de bitümlerin malten fazıyla son derece uyumludur, ama diğer bütün polimerler gibi asfaltlarla uyumlu değildir. Yalnızca düşük miktarda asfaltın içeren bitümler (genel olarak %6'nın altında) kullanıldığında, 140°C'nin üstündeki sıcaklıklarda tek fazlı sistemler elde edilebilir. İki fazlı yapının varlığı yalnızca pratik bir sorundur: Fazlardan biri daha çok asfaltın içerir ve nispeten ağırdır, diğer faz daha çok polimer içerir ve nispeten hafiftir. Karışıma müdahale edilmezse sonuçta fazlar ayrışır. Parçacıkların dağılımını homojen tutmanın yolu, doğal olarak, karışımı çalkalamak ya da yeniden karıştırmaktır. İki ya da tek fazlı sistemlerin performansları, pratik bazı tahminler dışında önceden kestirilemez; şunlardan birinin daha iyi bir performansla sahip olacağı iddia edilemez, çünkü çok sayıda başka faktör de etkili olmaktadır [66].

Merkezi plantte üretilen modifiye bitüm ile hazırlanan sıcak karışım asfalt, laboratuvar koşullarında üretilen modifiye bitüm ile hazırlanan sıcak karışım asfaltlara tekerlek izi açısından önemli bir üstünlük sağlayamamaktadır [51, 63].

Bitümün modifikasyonundan önce, karışımların istenmeyen oksidasyonu gibi ters etkilerden kaçınmak için SBS'nin yapışmamış toz halinde olup olmadığı kontrol edildi. Düşük hızda karıştırma operasyonu ile daha önceden 180°C'ye kadar ısıtılan bitüm içerisine, polimer tozlarının kümeleşmesinden kaçınmak için yavaş yavaş katıldı. SBS eklenmesinden sonra karıştırma hızı artırıldı ve 2 saat daha karıştırmaya devam edildi. Karıştırmadan sonra, 160°C sıcaklıkta 1 saat dinlendirildi. Polimer ve asfalt arasında faz ayrışması gözlenmedi ve briket üretiminde kullanılmak üzere daha küçük kutulara konuldu. Bu yöntemin uygunluğu diğer araştırmacılar tarafından da kanıtlanmıştır [67,68].

2.1.3.2. Wetfix BE Katkı Maddesi ve Özellikleri

Wetfix BE sıvı bir katkıdır ve özellikle iyi ısı stabilitenin gerekli olduğu sıcak karışım asfaltlar için tasarlanmıştır. Wetfix BE, 170°C'ye kadar olan sıcaklıklarda önemli bir işlev kaybı olmaksızın 5 güne kadar sıcak bitüm içerisinde depolanabilir[69].



Şekil 41. Wetfix BE katkısından çeşitli görüntüler

Tablo 8. Wetfix BE katkısının fiziksel ve kimyasal özellikleri [69].

Özellik	Değer
20°C de görünüş	Kahverengi, viskoz sıvı
20°C deki yoğunluk, kg/m ³	980
Bulutlanma noktası, °C	<0
Parlama noktası, °C	>218
Kaynama noktası, °C	>200
Erime noktası, °C	<-20
20°C deki viskozite, mPas	≅ 800
%5 konsantrasyonlu çözeltideki pH değeri	≅ 11
Sudaki çözünürlük	Emülsiyonlaşabilir
Diğer çözücülerdeki çözünürlük	Ethanol ve asetonda çözünebilir

Wetfix BE'nin dozajı kullanılan bitüm ve agreganın tipine bağlıdır. Genellikle bitüme, bitüm ağırlığının %0.2 ile %0,4'ü arasında eklenir[69]. Bu katkı maddesi bitüme, bitümün %0,4'ü oranında katıldı.

2.2. Yöntem

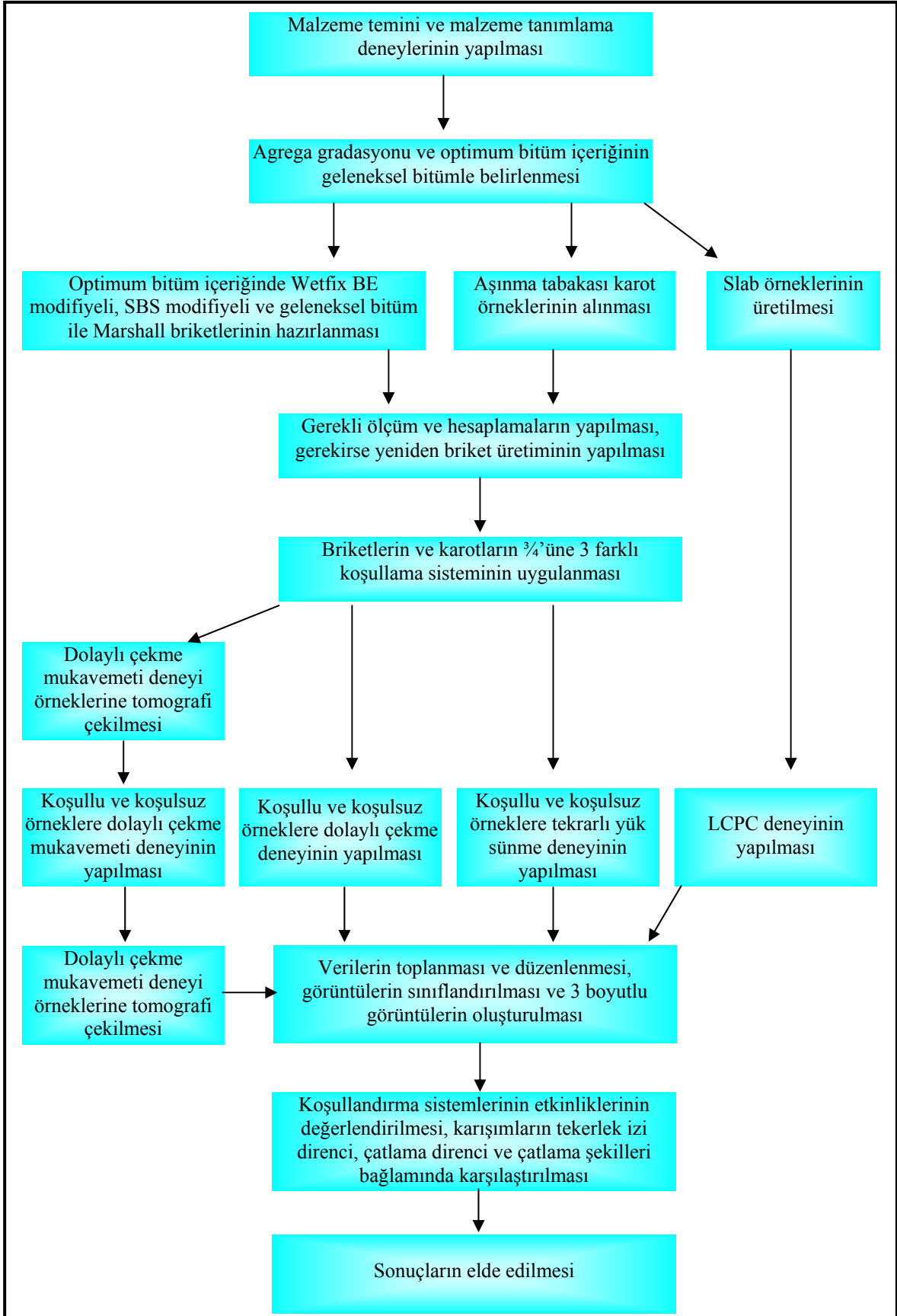
Asfalt kaplamaların arazi ve laboratuvar performanslarının karşılaştırılması, farklı koşullandırma sistemlerinin uygulanması ve bu koşullandırma sistemleri altında karot örnekleri, geleneksel karışımlar ve tekerlek izi önleyici katkı (SBS) ve soyulma önleyici katkı (wetfix BE) asfalt karışımların tekerlek izi ve çatlama direnci yönüyle değerlendirilmesi, güncel bir konu olan tekerlek izi-su hasarı ilişkisinin dolaylı çekme mukavemeti, dolaylı çekme deneyi, tekrarlı yük sünme deneyi ve Fransız tekerlek izi

deneyi ile irdelenmesi ve ülkemizde ilk veya ilkler arasında olan, dolaylı çekme mukavemeti deneyinde kullanılan örneklerdeki boşluk dağılımlarının ve deneyden sonra örneklerde oluşan çatlama gelişiminin bilgisayarlı tomografi yöntemiyle değerlendirilmesi konuları çalışmanın ana amaçlarını oluşturmaktadır.

Araştırmanın amacına ulaşması için, 60/70 penetrasyonlu bitüm ve tek tip yoğun gradasyonlu agrega kullanıldı. Katkısız karışımlar için Marshall tasarım yöntemiyle elde edilen optimum bitüm içeriğinde, geleneksel, SBS ve wetfix BE modifiyeli, 100mm çaplı Marshall briketleri üretildi. Bunlara ek olarak aşınma tabakasından alınan karot örnekleri kullanıldı. Tablo 9’da kullanılan deneyler ve örnek sayıları verilmektedir.

Tablo 9. Yapılan deneyler için üretilen briket ve slab numara tanımlamaları

			Hasarsız	Suda bekletmeli döngü hasarlı	Donma-çözülme döngü hasarlı	Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı
Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi	SBS Katkılı	10°C	1-2-3	4-5-6	7-8-9	10-11-12
		20°C	13-14-15	16-17-18	19-20-21	22-23-24
	Wetfix Katkılı	10°C	1-2-3	4-5-6	7-8-9	10-11-12
		20°C	13-14-15	16-17-18	19-20-21	22-23-24
	Katkısız	10°C	1-2-3	4-5-6	7-8-9	10-11-12
		20°C	13-14-15	16-17-18	19-20-21	22-23-24
	Karot	10°C	1-2-3	4-5-6	7-8-9	10-11-12
		20°C	13-14-15	16-17-18	19-20-21	22-23-24
Dolaylı Çekme Deneyi	SBS Katkılı	20°C	25-26	25-26	25-26	25-26
		40°C	25-26	25-26	25-26	25-26
	Wetfix Katkılı	20°C	25-26	25-26	25-26	25-26
		40°C	25-26	25-26	25-26	25-26
	Katkısız	20°C	25-26	25-26	25-26	25-26
		40°C	25-26	25-26	25-26	25-26
	Karot	20°C	25-26	25-26	25-26	25-26
		40°C	25-26	25-26	25-26	25-26
Tekrarlı Sünme Deneyi	SBS Katkılı	40°C	33-34	35-36	37-38	39-40
	Wetfix Katkılı	40°C	33-34	35-36	37-38	39-40
	Katkısız	40°C	33-34	35-36	37-38	39-40
	Karot	40°C	33-34	35-36	37-38	39-40
FPRT	SBS Katkılı	60°C	41-42	43-44		
	Katkısız	60°C	41-42	43-44		



Şekil 42. Akış diyagramı

2.2.1. Elek Analizi ve Marshall Tasarım Deneyi

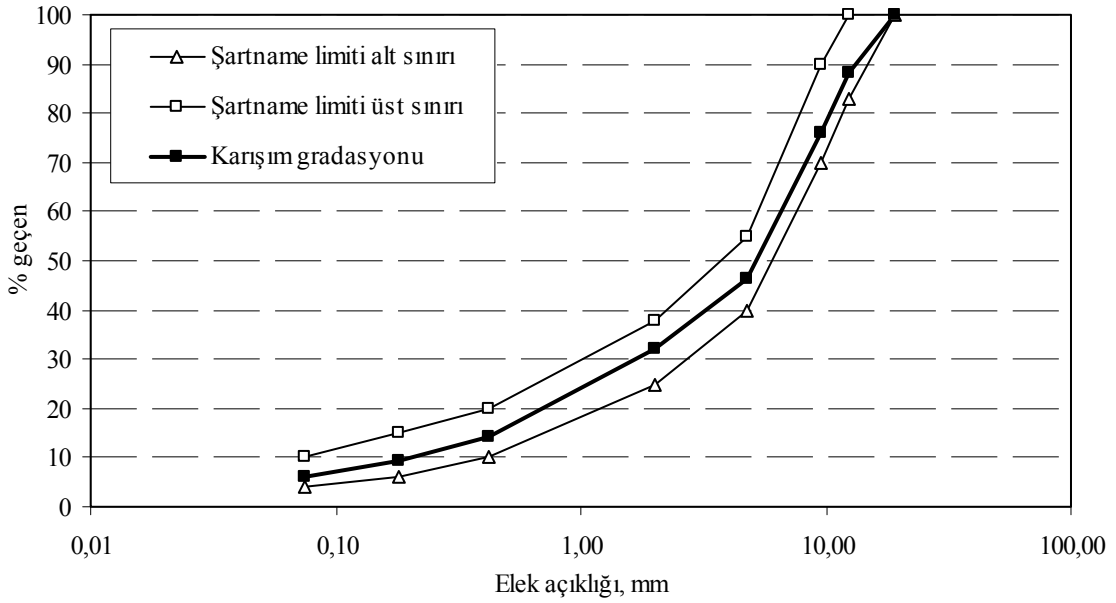
(3/4"-3/8"), (3/8"-No:4) ve (No:4-0) dane boyutunda üretilen üç grup agregadan alınan örneklere elek analizi deneyi yapılmak suretiyle, 15 elek analizi deneyi ortalamaları değerlendirilerek tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımları Tablo 10'da ve karışımın tane boyutu dağılımı, tolerans sınırları ve şartname limitleri de Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 10. Tasarıma esas alınan tane boyutu dağılımları

Elek açıklığı		(19-9,5) mm	(9,5-4,75) mm	(4,75-0) mm
mm	inch	% geçen	% geçen	% geçen
19,1	¾	100		
12,7	½	61,9		
9,52	3/8	22,1	100,0	
4,76	No:4	1,7	5,2	100,0
2,00	No:10	1,6	1,8	69,5
0,42	No:40	1,5	1,6	29,9
0,177	No:80	1,4	1,4	19,3
0,075	No:200	1,3	1,2	11,8

Tablo 11. Karışımın tane boyutu dağılımı, tolerans sınırları ve şartname limitleri

Elek açıklığı		Karışım	Tolerans limitine	Şartname limiti
mm	İnch	% geçen	göre % geçen	% geçen
19	¾	100	100,0	100
12,5	½	88,2	93,2-83,2	83-100
9,5	3/8	75,9	80,9-70,9	70-90
4,75	No:4	46,4	51,4-41,4	40-55
2,00	No:10	32,2	36,2-28,2	25-38
0,425	No:40	14,3	18,3-10,3	10-20
0,180	No:80	9,4	13,4-6,4	6-15
0,075	No:200	6,0	8,0-4,0	4-10



Şekil 43. Agrega karışımının tane boyutu dağılımı eğrisi ve şartname limitleri

Üç grup agreganın dane boyutu dağılımları esas alınarak aşınma tabakası karışım oranları aşağıdaki gibi tespit edildi.

(3/4"-3/8") grubu agreganın ağırlıkça, %31

(3/8"-No:4) grubu agreganın ağırlıkça, %24

(No:4-0) grubu agreganın ağırlıkça, %45

Tablo 12'de verilen karışım gradasyonu esas alınarak Marshall yöntemine göre optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi için;

Kaba agreganın yüzdesi (N0:4 üzeri): 53,6

İnce agreganın yüzdesi (No:4-No:200 arası): 40,4

Filler yüzdesi (No:200'den geçen): 6,0 olarak alındı.

ASTM D-1559 standardı ile yapılan Marshall tasarım deneyinde, asfalt karışımlarının optimum bitüm içeriğinin belirlenmesi bir yaklaşım olarak kabul edilmekte olup, diğer performans deneyleri ve özellikle tekerlek izinde oturma deneyi sonuçları kullanılarak bulunan optimum bitüm içeriğinin doğruluğu değerlendirilmektedir.

%4, %4,5, %5, %5,5, %6 ve %6,5 bitüm içeriklerinde olmak üzere altı grup Marshall briketi üretildi. Her bitüm içeriğinde üç örnek hazırlandı. Toplam 18 briketin Marshall stabilite değerleri ve akma değerleri belirlendi. Hazırlanan briketlere veriler, Tablo 12'de sunulmaktadır.

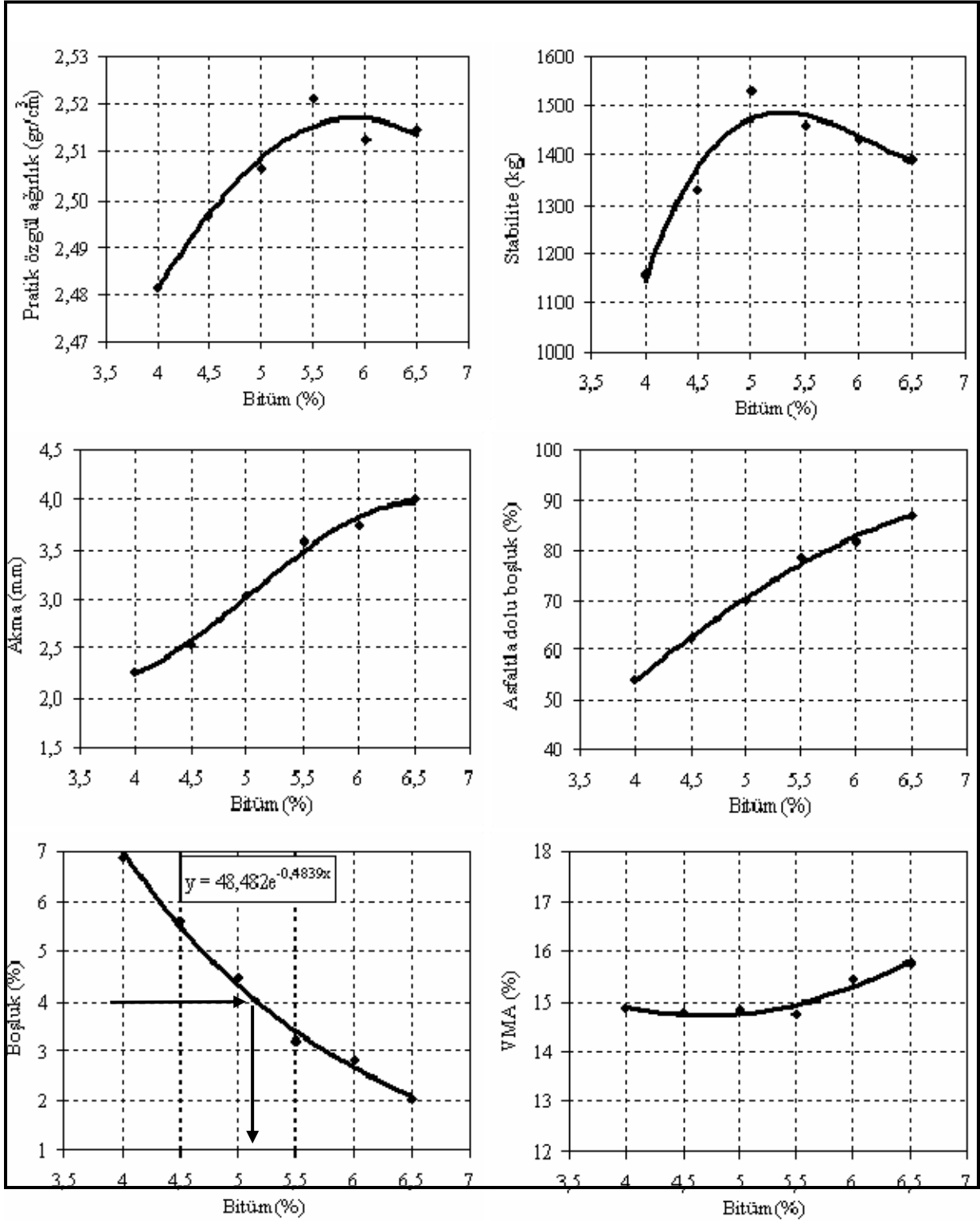
Tablo 12. Marshall deney formu

Briket no	Bitüm		Sıcaklık (°C)	D _p (gr/ cm ³)	D _t (gr/ cm ³)	V _h (%)	VMA (%)	VfA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
	Wa (%)	Wb (gr)								
1	4,0	46,0	140,0	2,478					2,50	1160
2	4,0	46,0	140,0	2,486					2,00	1151
3	4,0	46,0	139,0	2,480					2,30	1164
Ortalama				2,481	2,664	6,86	14,88	53,92	2,27	1158
4	4,5	52,0	140,0	2,496					2,50	1335
5	4,5	52,0	141,0	2,498					2,30	1315
6	4,5	52,0	142,0	2,495					2,80	1335
Ortalama				2,496	2,644	5,57	14,77	62,29	2,53	1328
7	5,0	58,0	141,0	2,507					3,00	1540
8	5,0	58,0	141,0	2,501					2,80	1512
9	5,0	58,0	140,0	2,511					3,30	1540
Ortalama				2,506	2,624	4,47	14,84	69,87	3,03	1531
10	5,5	63,0	140,0	2,528					3,60	1475
11	5,5	63,0	140,0	2,518					3,30	1454
12	5,5	63,0	140,0	2,518					3,80	1448
Ortalama				2,521	2,604	3,19	14,75	78,34	3,57	1459
13	6,0	69,0	141,0	2,508					3,80	1425
14	6,0	69,0	142,0	2,518					3,80	1438
15	6,0	69,0	140,0	2,511					3,60	1428
Ortalama				2,512	2,585	2,82	15,44	81,72	3,73	1430
16	6,5	75,0	140,0	2,508					3,80	1406
17	6,5	75,0	139,0	2,526					4,10	1390
18	6,5	75,0	139,0	2,510					4,10	1375
Ortalama				2,515	2,567	2,03	15,76	87,11	4,00	1391

Tablo 13. Kullanılan agregaların ve bitümün özgül ağırlıkları

Agrega ve bitüm özelliği	Değer (gr/cm ³)
Kaba agrega	2,832
Kaba agrega (zahiri)	2,894
İnce agrega	2,751
İnce agrega (zahiri)	2,889
Filler (zahiri)	2,910
Bitüm özgül ağırlığı	1,019

Tablo 12'den de görüldüğü gibi optimum bitüm içeriğinin tayini için her biri üç briketten oluşan altı sete gerekli analizler yapıldı, ortalama değerler gösterildi ve Şekil 44 hazırlandı.



Şekil 44. Marshall deneyinden elde edilen grafikler

Optimum bitüm içeriği, %4 hava boşluğunu veren bitüm yüzdesi olarak alındı ve %5,15 olarak tespit edildi. Optimum bitüm içeriğindeki deney sonuçları Tablo 14’de özetlenmektedir.

Tablo 14. Optimum bitüm içeriğindeki deney sonuçları

Karışım özelliği	Değer
Optimum bitüm, %	5,15
Boşluk, %	4,00
Pratik yoğunluk, gr/cm ³	2,51
Asfaltla dolu boşluk, %	72
Akma, mm	3,2
VMA, %	14,70
Stabilite, kg	1530

Yapılan tasarıma uygun olarak 40 adet katkısız, 40 adet Wetfix BE katkılı ve 40 adet de SBS katkılı, 4” çaplı Marshall briketleri ve 4 tane katkısız ve 4 tane de SBS katkılı dikdörtgen prizmatik örnek (slab) LCPC tekerlek izi deneyinde kullanılmak üzere üretildi. Araklı-İyidere yolunun belirli noktalarından alınan yaklaşık 150 karot örneğinden, geometrisi düzgün, hasarsız ve özgül ağırlıkları birbirine yakın olan 40 adet seçildi. Briketlerin ve karotların özellikleri Tablo 15- Tablo 18’de belirtilmektedir.



Şekil 45. Üretilen 4” Marshall briketleri ve aşınma tabakasından alınan karotlar

Tablo 15. Karot örneklerinin özellikleri

Karot No	Ort. Yüks. (mm)	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doğgun yüzeyle kuru ağırlık (gr)	Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Max teorik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk (%)	Mineral agregalar arası boşluk (%)	Asfaltla dolu boşluk %
1	66,7	1318,5	787,2	1319,3	2,478	2,618	5,35	15,93	66,44
2	62,4	1220,3	728,3	1221,6	2,474	2,618	5,51	16,07	65,74
3	62,7	1226,0	734,0	1227,1	2,486	2,618	5,03	15,64	67,87
4	60,5	1285,1	768,9	1285,8	2,486	2,618	5,03	15,65	67,85
5	51,3	1010,0	602,0	1010,6	2,472	2,618	5,58	16,13	65,43
6	52,3	1018,4	607,8	1020,0	2,471	2,618	5,62	16,17	65,23
7	65,9	1313,5	786,1	1314,0	2,488	2,618	4,95	15,58	68,20
8	52,0	1060,0	633,0	1060,6	2,479	2,618	5,31	15,89	66,61
9	54,9	1130,0	674,4	1130,6	2,477	2,618	5,38	15,96	66,28
10	57,4	1127,0	674,0	1128,1	2,482	2,618	5,20	15,79	67,10
11	48,5	963,0	575,0	963,3	2,480	2,618	5,26	15,86	66,80
12	61,4	1204,1	717,6	1205,0	2,470	2,618	5,63	16,18	65,20
13	53,0	1062,0	635,9	1062,7	2,488	2,618	4,95	15,58	68,22
14	56,3	1106,5	661,0	1107,4	2,479	2,618	5,32	15,90	66,57
15	57,9	1133,5	675,0	1133,8	2,471	2,618	5,63	16,18	65,22
16	62,9	1235,0	737,2	1235,7	2,477	2,618	5,36	15,94	66,35
17	49,7	985,2	589,5	985,5	2,488	2,618	4,97	15,59	68,15
18	52,5	1022,7	611,2	1025,0	2,471	2,618	5,59	16,15	65,37
19	60,0	1180,6	706,8	1181,4	2,488	2,618	4,98	15,60	68,09
20	55,1	1120,0	669,3	1120,5	2,482	2,618	5,18	15,78	67,18
21	61,7	1217,7	725,9	1218,2	2,473	2,618	5,51	16,08	65,70
22	62,0	1222,2	733,0	1224,5	2,487	2,618	5,01	15,63	67,94
23	56,1	1116,2	668,4	1117,1	2,488	2,618	4,97	15,60	68,11
24	67,9	1329,5	793,6	1330,1	2,478	2,618	5,34	15,92	66,47
25	52,6	1079,0	643,2	1080,1	2,470	2,618	5,66	16,21	65,07
26	54,0	1031,6	615,8	1033,2	2,471	2,618	5,59	16,15	65,37
27	60,3	1191,3	714,1	1192,8	2,489	2,618	4,94	15,56	68,28
28	56,3	1153,1	688,4	1154,4	2,474	2,618	5,48	16,04	65,86
29	50,5	1035,4	619,0	1036,2	2,482	2,618	5,20	15,80	67,09
30	55,4	1140,2	682,3	1141,0	2,486	2,618	5,05	15,66	67,77
31	54,5	1083,4	647,9	1084,5	2,481	2,618	5,21	15,81	67,04
32	44,1	1087,4	653,0	1090,1	2,488	2,618	4,97	15,59	68,13
33	53,1	1052,5	629,0	1053,4	2,480	2,618	5,27	15,86	66,78
34	66,1	1287,1	771,0	1290,3	2,479	2,618	5,32	15,91	66,54
35	56,1	1104,1	659,3	1104,6	2,479	2,618	5,29	15,88	66,70
36	56,9	1121,5	671,8	1123,4	2,483	2,618	5,14	15,74	67,37
37	61,6	1223,6	732,0	1224,3	2,485	2,618	5,06	15,67	67,73
38	55,4	1092,7	654,0	1093,4	2,487	2,618	5,01	15,63	67,96
39	60,5	1198,7	717,2	1199,7	2,484	2,618	5,10	15,71	67,53
40	66,8	1338,7	801,0	1339,7	2,485	2,618	5,07	15,69	67,66

Tablo 16. Katkısız Marshall briketlerinin özellikleri

Karot No	Ort. Yüks. (mm)	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyli kuru ağırlık (gr)	Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Max teorik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk (%)	Mineral agregalar arası boşluk (%)	Asfaltla dolu boşluk (%)
1	60,7	1197,8	723,8	1198,7	2,522	2,618	3,7	14,4	74,7
2	59,6	1203,1	728,2	1203,4	2,532	2,618	3,3	14,1	76,7
3	60,3	1201,5	724,7	1202,2	2,516	2,618	3,9	14,6	73,5
4	59,7	1194,6	722,0	1196,0	2,520	2,618	3,7	14,5	74,3
5	60,1	1203,5	725,6	1204,4	2,514	2,618	4,0	14,7	72,9
6	60,5	1197,5	721,7	1199,0	2,509	2,618	4,2	14,9	72,0
7	60,2	1195,1	724,0	1196,0	2,532	2,618	3,3	14,1	76,7
8	60,5	1199,2	724,0	1200,2	2,518	2,618	3,8	14,6	73,9
9	60,0	1203,2	727,2	1204,3	2,522	2,618	3,7	14,4	74,6
10	60,7	1204,9	729,3	1206,2	2,527	2,618	3,5	14,3	75,6
11	59,7	1204,2	727,7	1204,7	2,525	2,618	3,6	14,3	75,2
12	60,6	1205,1	728,2	1206,6	2,519	2,618	3,8	14,5	74,0
13	60,8	1198,7	724,9	1199,4	2,526	2,618	3,5	14,3	75,5
14	60,7	1198,4	724,8	1199,6	2,524	2,618	3,6	14,4	75,0
15	60,7	1203,0	727,4	1203,9	2,525	2,618	3,6	14,3	75,2
16	60,3	1201,5	725,4	1202,3	2,519	2,618	3,8	14,5	74,1
17	60,3	1196,9	721,1	1197,5	2,512	2,618	4,0	14,8	72,7
18	60,2	1199,6	724,3	1200,0	2,522	2,618	3,7	14,4	74,6
19	59,7	1205,7	728,1	1206,8	2,519	2,618	3,8	14,5	74,0
20	60,9	1202,5	727,3	1203,6	2,525	2,618	3,6	14,3	75,2
21	60,1	1204,5	727,0	1205,6	2,517	2,618	3,9	14,6	73,6
22	60,1	1193,8	719,2	1195,4	2,507	2,618	4,2	14,9	71,6
23	60,5	1197,7	723,0	1198,3	2,520	2,618	3,7	14,5	74,2
24	59,8	1195,4	721,0	1196,2	2,516	2,618	3,9	14,7	73,3
25	60,0	1196,0	723,2	1196,3	2,528	2,618	3,4	14,2	75,9
26	60,6	1201,3	725,5	1201,7	2,523	2,618	3,6	14,4	74,8
27	60,1	1198,6	724,4	1198,9	2,526	2,618	3,5	14,3	75,5
28	60,3	1203,0	728,3	1203,8	2,530	2,618	3,4	14,2	76,3
29	60,3	1199,5	725,4	1199,8	2,528	2,618	3,4	14,2	76,0
30	59,3	1196,3	722,8	1196,5	2,525	2,618	3,5	14,3	75,3
31	60,3	1201,1	726,5	1201,3	2,530	2,618	3,4	14,2	76,2
32	59,3	1202,6	727,4	1202,9	2,529	2,618	3,4	14,2	76,1
33	59,9	1201,5	726,6	1202,8	2,523	2,618	3,6	14,4	74,9
34	59,9	1205,6	729,0	1206,8	2,523	2,618	3,6	14,4	74,9
35	60,1	1200,1	724,4	1200,9	2,519	2,618	3,8	14,6	73,9
36	60,7	1206,3	728,3	1207,4	2,518	2,618	3,8	14,6	73,8
37	61,8	1200,1	726,9	1200,7	2,533	2,618	3,2	14,1	76,9
38	60,8	1201,4	726,8	1202,0	2,528	2,618	3,4	14,2	75,9
39	60,6	1201,0	726,9	1201,6	2,530	2,618	3,4	14,2	76,3
40	61,1	1200,1	723,8	1200,6	2,517	2,618	3,9	14,6	73,6

Tablo 17. SBS katkılı Marshall briketlerinin özellikleri

Karot No	Ort. Yüks. (mm)	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyli kuru ağırlık (gr)	Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Max teorik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk (%)	Mineral agregalar arası boşluk (%)	Asfaltla dolu boşluk (%)
1	60,8	1200,5	724,1	1203,9	2,502	2,618	4,4	15,1	70,7
2	62,3	1195,5	722,6	1198,7	2,511	2,618	4,1	14,8	72,4
3	62,2	1199,8	723,0	1202,3	2,503	2,618	4,4	15,1	70,9
4	61,4	1201,4	725,0	1203,1	2,513	2,618	4,0	14,7	72,8
5	61,5	1195,7	721,8	1198,9	2,506	2,618	4,3	15,0	71,5
6	60,5	1199,8	722,5	1202,0	2,502	2,618	4,4	15,1	70,7
7	62,2	1202,1	727,2	1204,9	2,516	2,618	3,9	14,6	73,5
8	61,3	1195,9	721,3	1198,7	2,505	2,618	4,3	15,0	71,3
9	61,2	1198,3	721,6	1200,4	2,503	2,618	4,4	15,1	70,8
10	60,7	1201,7	726,0	1205,4	2,507	2,618	4,2	15,0	71,6
11	61,3	1200,9	724,8	1204,5	2,503	2,618	4,4	15,1	71,0
12	60,6	1202,8	726,9	1205,6	2,513	2,618	4,0	14,8	72,8
13	62,1	1198,1	722,5	1205,2	2,482	2,618	5,2	15,8	67,1
14	61,2	1195,5	721,3	1196,8	2,514	2,618	4,0	14,7	73,1
15	62,3	1197,9	723,0	1200,8	2,507	2,618	4,2	14,9	71,7
16	61,1	1200,0	724,0	1202,4	2,508	2,618	4,2	14,9	71,9
17	61,9	1194,7	721,0	1197,6	2,507	2,618	4,2	15,0	71,6
18	60,6	1197,0	720,4	1199,1	2,501	2,618	4,5	15,2	70,4
19	61,2	1200,4	723,2	1201,6	2,509	2,618	4,2	14,9	72,1
20	62,2	1198,4	720,7	1200,0	2,500	2,618	4,5	15,2	70,4
21	60,9	1199,4	723,8	1202,4	2,506	2,618	4,3	15,0	71,5
22	62,2	1200,3	724,2	1203,4	2,505	2,618	4,3	15,0	71,2
23	60,5	1200,2	723,0	1202,7	2,502	2,618	4,4	15,1	70,7
24	62,0	1195,4	721,8	1198,4	2,508	2,618	4,2	14,9	71,9
25	61,5	1199,7	724,3	1202,8	2,507	2,618	4,2	14,9	71,7
26	61,6	1198,9	724,1	1201,7	2,510	2,618	4,1	14,8	72,3
27	61,2	1194,7	719,9	1196,9	2,505	2,618	4,3	15,0	71,2
28	61,0	1201,8	725,8	1204,5	2,511	2,618	4,1	14,8	72,3
29	60,4	1198,9	724,2	1200,7	2,516	2,618	3,9	14,6	73,4
30	62,3	1196,5	724,3	1200,6	2,512	2,618	4,0	14,8	72,6
31	60,4	1200,9	724,2	1202,6	2,510	2,618	4,1	14,8	72,3
32	62,2	1197,6	724,5	1201,3	2,512	2,618	4,1	14,8	72,6
33	61,2	1196,6	720,8	1198,9	2,503	2,618	4,4	15,1	70,9
34	60,9	1198,3	722,1	1200,3	2,506	2,618	4,3	15,0	71,4
35	61,4	1200,7	724,6	1204,5	2,502	2,618	4,4	15,1	70,7
36	61,2	1202,6	725,9	1206,2	2,504	2,618	4,4	15,0	71,1
37	60,5	1206,4	728,6	1208,1	2,516	2,618	3,9	14,6	73,4
38	61,7	1196,3	721,2	1199,1	2,503	2,618	4,4	15,1	70,9
39	60,8	1196,2	722,9	1197,5	2,520	2,618	3,7	14,5	74,3
40	61,3	1198,6	723,3	1201,3	2,508	2,618	4,2	14,9	71,8

Tablo 18. Wetfix BE katkılı Marshall briketlerinin belirli özellikleri

Karot No	Ort. Yüks. (mm)	Havadaki ağırlık (gr)	Sudaki ağırlık (gr)	Doygun yüzeyli kuru ağırlık (gr)	Pratik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Max teorik özgül ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk (%)	Mineral agregalar arası boşluk (%)	Asfaltla dolu boşluk (%)
1	60,2	1204,0	729,1	1204,6	2,532	2,618	3,3	14,1	76,7
2	60,9	1207,2	729,6	1207,6	2,526	2,618	3,5	14,3	75,4
3	61,5	1204,3	727,5	1205,3	2,521	2,618	3,7	14,5	74,3
4	61,0	1205,3	729,1	1205,9	2,528	2,618	3,4	14,2	75,9
5	60,1	1204,3	728,7	1204,8	2,530	2,618	3,4	14,2	76,2
6	60,4	1202,9	725,7	1203,2	2,519	2,618	3,8	14,5	74,1
7	61,2	1203,0	723,8	1203,8	2,506	2,618	4,3	15,0	71,5
8	60,3	1201,3	727,3	1202,2	2,530	2,618	3,4	14,2	76,2
9	61,2	1202,0	724,2	1203,0	2,510	2,618	4,1	14,8	72,3
10	61,4	1203,0	723,0	1204,0	2,501	2,618	4,5	15,1	70,5
11	61,3	1197,9	723,0	1198,3	2,520	2,618	3,7	14,5	74,3
12	61,3	1203,3	727,2	1203,8	2,525	2,618	3,6	14,3	75,2
13	60,6	1204,4	727,6	1205,2	2,522	2,618	3,7	14,4	74,6
14	61,2	1204,7	727,0	1205,1	2,520	2,618	3,7	14,5	74,2
15	61,0	1204,7	725,0	1205,6	2,507	2,618	4,2	15,0	71,6
16	60,8	1204,8	724,2	1205,3	2,504	2,618	4,3	15,0	71,1
17	60,9	1204,3	723,9	1205,2	2,502	2,618	4,4	15,1	70,7
18	61,3	1203,1	722,2	1203,5	2,500	2,618	4,5	15,2	70,3
19	61,1	1199,1	720,5	1199,8	2,502	2,618	4,4	15,1	70,7
20	61,6	1200,1	722,4	1201,8	2,503	2,618	4,4	15,1	71,0
21	61,3	1201,6	723,1	1202,3	2,508	2,618	4,2	14,9	71,8
22	60,2	1204,7	729,6	1207,5	2,521	2,618	3,7	14,5	74,4
23	60,3	1201,6	725,6	1204,3	2,510	2,618	4,1	14,8	72,3
24	60,5	1197,4	720,7	1197,9	2,509	2,618	4,2	14,9	72,1
25	61,2	1203,3	724,5	1204,3	2,508	2,618	4,2	14,9	71,8
26	61,6	1207,0	727,0	1208,4	2,507	2,618	4,2	14,9	71,7
27	61,1	1207,0	725,1	1207,2	2,504	2,618	4,4	15,1	71,0
28	60,6	1206,5	727,2	1206,9	2,515	2,618	3,9	14,7	73,2
29	60,8	1198,0	723,2	1199,4	2,516	2,618	3,9	14,6	73,4
30	60,8	1204,5	725,0	1206,5	2,502	2,618	4,4	15,1	70,6
31	60,7	1201,8	726,3	1203,0	2,521	2,618	3,7	14,5	74,4
32	60,9	1201,3	724,2	1202,7	2,511	2,618	4,1	14,8	72,3
33	60,1	1203,9	728,4	1204,6	2,528	2,618	3,4	14,2	75,9
34	61,3	1201,7	723,9	1202,4	2,511	2,618	4,1	14,8	72,5
35	60,5	1199,4	722,5	1200,2	2,511	2,618	4,1	14,8	72,4
36	60,4	1198,4	723,3	1199,3	2,518	2,618	3,8	14,6	73,7
37	61,2	1206,7	727,5	1207,4	2,514	2,618	3,9	14,7	73,1
38	60,6	1208,1	730,0	1208,5	2,525	2,618	3,6	14,3	75,2
39	60,4	1207,4	728,0	1207,9	2,516	2,618	3,9	14,6	73,4
40	61,0	1195,4	718,7	1196,1	2,504	2,618	4,4	15,0	71,1

Laboratuarda hazırlanan kırkar adet katkısız ve katkılı Marshall briketlerine ve uygulama alanından alınan kırk adet karot örneğine çalışma programında belirlenen koşullandırma sistemleri uygulandı. Koşulsuz ve farklı koşullandıma sistemlerine tabi tutulan örneklere dolaylı çekme deneyi, tekrarlı yük sünme deneyi ve dolaylı çekme mukavemeti deneyi yapıldı. Dolaylı çekme mukavemeti deneyinden önce ve sonra bilgisayarlı tomografi çekimleri yapıldı. Katkısız ve SBS katkılı dikdörtgen prizmatik örnekler hazırlanarak Fransız tekerlek izi deneyi yapıldı. Bu başlık altında bu deneylerle ilgili bilgiler ve deneylerde kullanılan ölçütler verilecektir.

2.2.2. Koşullandırma Sistemleri

Araştırma kapsamında üç farklı koşullandırma sistemi kullanıldı. Hasar sistemlerinin katkı seçeneklerine uygunluğu, gözlemlenebilir bir hasar düzeyi oluşturup oluşturmadığı konusunda araştırmalar yapılmıştır. Bu amaçla, briket üretimi sayısı artırılmıştır. Briket üretiminin son derece hassas bir biçimde üretilebilmesinden, karışım süresi ve sıcaklığını da sabitlemekten ötürü, agregaların da kontrollü bir biçimde alınmasından dolayı, briketlerin yoğunluk düzeyleri çok yakın düzeyde kalmıştır. Buna paralel olarak, tekrarlı sünme testleri sonuçları da, örnekler arasında anlamlı bir ilişkinin yakalanabilmesine olanak sağlamıştır.

2.2.2.1. Suda Bekletmeli Döngü Hasarı

Katkısız ve farklı katkılı Marshall briketlerine ve karotlara su hasarı koşullandırma sistemi uygulandı. Bu uygulamada koşullandırılacak örnekler 72 saat süre ile 60°C sıcaklıktaki su banyosunda bekletildi. Örneklerin, koşullandırma sisteminden aynı miktarda etkilenmeleri için tek bir seferde, aralarında yeterince boşluk kalacak şekilde su banyosuna daldırıldı. Koşullandırmanın etkili olduğu kanaatine performans deneylerinin yanı sıra karot örneklerinden bir tanesinin koşullandırma sırasında dağılmasından da varılabilmektedir. Laboratuarda hazırlanan geleneksel bitümle ve modifiye bitümle hazırlanan hiçbir briket koşullandırma etkisiyle dağılmadı.



Şekil 46. Koşullandırma sırasında dağılan karot örneği

2.2.2.2. Donma-Çözülme Döngü Hasarı

Bu sistemde hazırlanan briketler, tomografi görüntüsü alınan yön ve doğrultunun kaybolmaması için, yağlı tebeşirle işaretlenerek ikişerli gruplar halinde -15°C 'ye kadar soğutma yapabilen dondurucu içerisine konuldu. Örneklerin, suyun donması sırasında genişlemesinden dolayı aşırı zarar görmesinin engellenmesi için plastik kaplar kullanıldı. Koşullandırma, 3 gün su içerisinde -15°C 'de (yaklaşık 6 saatte su tamamen buza dönüşüyor), 1 gün oda sıcaklığında (yaklaşık 4 saatte buz çözülüyor) su içerisinde olmak üzere 3 defa tekrarlandı. Buz tamamen çözüldüğünde koşullandırma işlemi bitmeden su kesinlikle boşaltılmadı. Plastik kaba konulan örnekler 12 gün sonra kaptan çıkartıldı. Koşullandırılan örneklerin çözülmesi sırasındaki resimleri belirli aralıklarla çekilerek Şekil 47'da gösterilmektedir.



Şekil 47. Örneklerin donma-çözülme görüntüleri

2.2.2.3. Donma-Çözülme ve Suda Bekletme Döngü Hasarı

Bu hasar sisteminde, donma-çözülme döngü hasarına tabi tutulan örneklere ardından suda bekletme döngüsü uygulanmaktadır.

2.2.3. Tekrarlı Yük Sünme Deneyi

Akma yüklemeye sayısı (flow number) veya tekrarlı sünme deneyi (repeated creep test) olarak ta ifade edilen tekrarlı yük deneyi (repeated load test), kaplama malzemelerinin kalıcı deformasyon özelliklerini belirlemek için deney örneği üzerine birkaç bin yük tekrerrü uygulanması ve deney boyunca oluşan kalıcı deformasyonların yük tekerrürünün bir fonksiyonu olarak kümülatif şekilde kaydedilmesinden ibarettir[70,71].Tekrarlı sünme deneyinin önemli bir özelliği de üçüncül akma noktasının tespit edilebilmesidir [70].

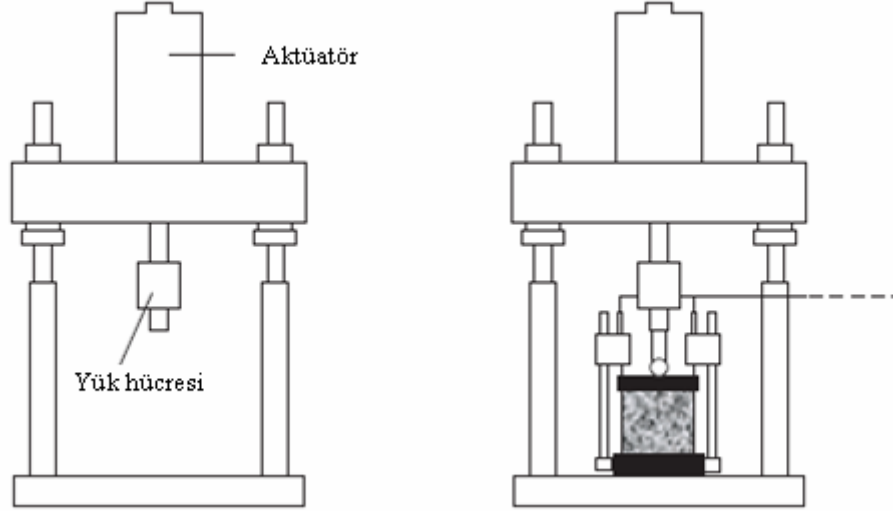
Deneyin yapıldığı Nottingham asfalt deney aleti ve deney düzeneği Şekil 48 ve Şekil 49'da sunulmaktadır. Deney 100mm veya 150mm çaplı silindirik briketlere yapılmaktadır.



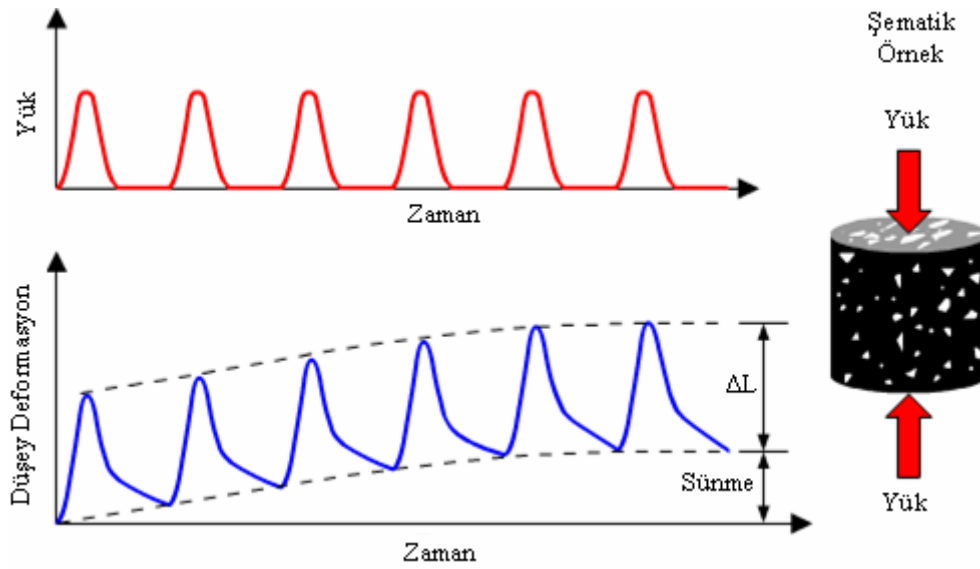
Şekil 48. Nottingham asfalt deney aleti (NAT)

Tekrarlı yük sünme deneyinde Şekil 50'de görüldüğü gibi belirli bir yük, belirlenen periyotta, istenilen süre kadar silindirik deney örneğine uygulanır. Yükleme döngüsü sayısının bir fonksiyonu olarak kümülatif kalıcı deformasyon kaydedilir ve tekerlek izi potansiyelini değerlendirmede kullanılabilir. Deney farklı sıcaklıklar ve değişik yüklemeler

ile yapılabilir. Tekrarlı yük deneyi gerçek kaplamalardaki tekerlek izini statik sünme deneyinden daha iyi temsil etmektedir[31].



Şekil 49. Şematik NAT sünme deney düzeneği [72]



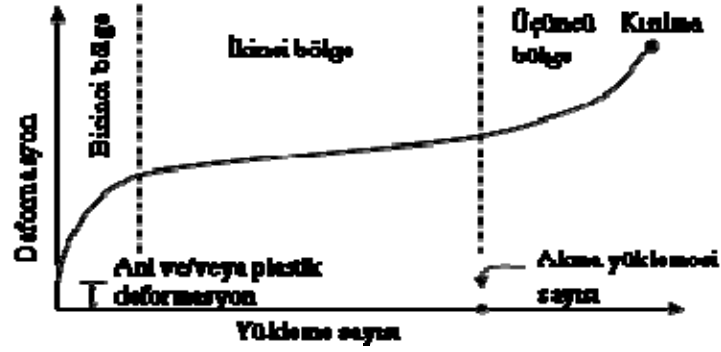
Şekil 50. Şematik tekrarlı yük sünme deneyi [46].

Deneyin yapılışı ve hesaplamalar aşağıdaki gibidir [51].

- Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilen briketlerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edilir.
- Briketler istenen sıcaklıkta ± 1 °C sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinceye kadar beklenir. Eğer briketlerin gerçek sıcaklıkları

ölçülemiyor ise briketler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat bekletildikten sonra deneye tabi tutulur.

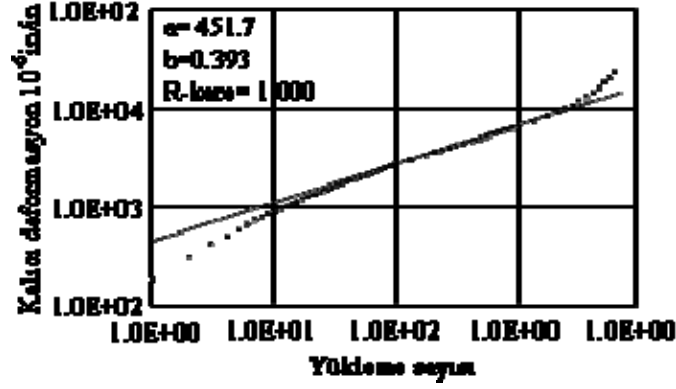
- Sabitlenmiş olan briketin bozulmasına neden olan yükün %5 ile %25 arasındaki basınç yükü uygulanır.
- Yarı sinüzoidal ön hazırlık gerilmesi 1sn'lik periyotta 0,1sn yüklü ve 0,9sn yüksüz olacak şekilde uygulanır.
- Ön hazırlık sonunda geri dönen düşey deformasyon ölçülür ve buradan da elastisite modülü hesaplanır.
- Ön hazırlık yükünün sıfıra inmesi ile, $\pm 2\%$ 'lik hata ile tekrarlı yük uygulanır.
- Tüm yükleme süresince düşey deformasyonlar kaydedilir.
- Tekrarlı yükün ardından, geri dönen deformasyonun ölçülmesi için ilave bir 60 dakika yük uygulanmaksızın düşey yer değiştirmeler ölçülür.
- Her bir briket için deformasyon-yük tekerrür sayısı grafiği çizilerek değerlendirme yapılabilir.



Şekil 51. Asfalt betonunun tekrarlı yük altında sünme davranışı [71].

Tekrarlı yük deneyinden kümülatif kalıcı deformasyon tepkisini ifade eden çeşitli parametreler elde edilebilir. Şekil 52'de kümülatif kalıcı deformasyon ile yük tekerrür sayısı arasındaki ilişki ifade edilmektedir. Kümülatif kalıcı deformasyon eğrisi genellikle üç bölge olarak ifade edilmektedir: birinci, ikinci ve üçüncü bölge. Birinci bölgede kalıcı deformasyon hızlı bir şekilde birikir. Eğer yük kaldırılmazsa malzeme azalan oranda deforme olmaya devam eder. İkinci bölgede kalıcı deformasyondaki artış sabittir. Deformasyon eğrisinin eğimi doğrusal (sabit) olup bu bölgedeki deformasyonlar geri dönüşümsüzdür. Üçüncü bölgede, kalıcı deformasyonun artış hızı tekrar artar ve kalıcı

deformasyon hızla birikir. Üçüncül bölgenin başladığı yükleme sayısı, akma yükleme sayısı (flow number) olarak ifade edilmektedir [71].



Şekil 52. Log-log ölçekli çizimde a ve b regresyon sabitleri [71].

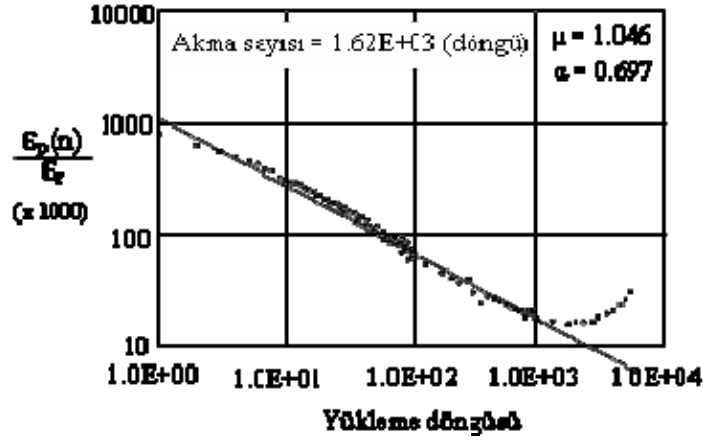
Tekrarlı yük kalıcı deformasyon deneyinden, sonlandırma (intercept)(a , μ) ve eğim (slope)(b , α) parametreleri elde edilebilir. Kalıcı deformasyon özellikleri (α , μ) tahmini tasarım prosedürleri için girdi olarak kullanılmaktadır. Kümülatif kalıcı deformasyon ve yükleme sayısı eğrisinin ikinci bölgesinden elde edilen bütün parametreler üçüncü bölgede göz ardı edilir. Şöyle ki, α , μ , b ve a olarak ifade edilen bu dört parametre deformasyon eğrisinin yalnızca “lineer” olan ikinci bölgesinde kullanılan istatistik bir modelin regresyon sabitleridir. Kalıcı deformasyon ve yükleme sayısı arasındaki logaritmik ölçekli (log&log) ilişki klasik güç modeli ile ifade edilebilmektedir: $\varepsilon_p = aN^b$, burada a ve b malzeme-deney birleşimi koşullarına bağlı regresyon sabitleridir [71].

Şekil 52’de a , $N=1$ iken kalıcı deformasyonu, b yükleme döngüsündeki $[\log(N)]$ değişikliğin bir fonksiyonu olarak kalıcı deformasyondaki değişikliğin oranını ifade etmektedir. Her yük tekrarında kalıcı deformasyonu karakterize etmek için kullanılan matematik modelin alternatif bir şekli;

$$\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial N} = \varepsilon_{pn} = \frac{\partial(aN^b)}{\partial N} \text{ veya } \varepsilon_{pn} = abN^{(b-1)} \quad (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{pn}}{\varepsilon_r} = \left(\frac{ab}{\varepsilon_r} \right) N^{b-1}, \quad \mu = \frac{ab}{\varepsilon_r}, \quad \alpha = 1 - b \text{ olduğundan } \frac{\varepsilon_{pn}}{\varepsilon_r} = \mu N^{-\alpha} \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir. E_{pn} tek bir yük uygulamasından (N. yükleme) sonra oluşan kalıcı deformasyondur. μ , kalıcı deformasyon ve elastik deformasyon arasındaki (örneğin N=1'deki kalıcı deformasyon) oran değerini ifade eden kalıcı deformasyon parametresidir. α , kalıcı deformasyonun artış hızındaki azalmayı temsil eden kalıcı deformasyon parametresidir. Şekil 53 yukarıdaki ilişkiyi ve kalıcı deformasyondaki azalma oranı sabit olduğunda akma noktasının varlığını göstermektedir [71].



Şekil 53. Kalıcı deformasyon için α ve μ parametreleri [71].

Tekrarlı yük sünme deneyi 40°C sıcaklıkta Tablo 19'da verilen parametreler ile yapıldı. Dört seçenekte hazırlanan 32 brikete ikişerli gruplar halinde yapıldı. Bu deneyde, yüksek sıcaklıklarda karışımların deformasyon eğrileri arasındaki uyumun yüksek olmasından (eğriler arasındaki farkın az olması) dolayı [63, 73] ikişerli grupların kullanılmasına karar verildi. Deney parametreleri de geçmiş tecrübelerden [63, 73-75] faydalanılarak belirlendi.

Tablo 19. Tekrarlı sünme deneyinde uygulanan parametreler

Deney ölçütü	Değer
Koşullandırma gerilmesi (kPa.)	10
Koşullandırma gerilmesi uygulama süresi (dak.)	1
Deney yükleme gerilmesi (kPa)	100
Vuruş periyodu (ms)	1000
Yüklü süre (ms)	500
Yüksüz süre (ms)	500
Deneyi sonlandıran vuruş sayısı	64800
Dinlenme süresi (dak.)	15

2.2.4. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Bu yöntem bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti özelliklerinin saptanmasını içerir. Dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların ısı ve yorulma nedeniyle oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder. Deneyin önemi yapılışı ve deneye ait hesaplamalar sırasıyla aşağıda sunulmaktadır [76].

Silindirik asfalt numunesine yüke dik doğrultuda; sabit bir deformasyon altında bozuluncaya kadar bir basınç yükü uygulanır. Deney aşamasında bozulma, uygulanan yükte bir artışın olmadığı ya da en büyük yükün olduğu zaman olarak tanımlanır ve numunenin dayanım göstermiş olduğu en büyük yük dolaylı çekme mukavemeti olarak alınır. Deney aşamasında yatay ve düşey yönde oluşan yer değiştirmeler de saptanır. Bu deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kullanılır. Deney standardı olarak birimler inch ve pound olarak hesaplanır [76].

Dolaylı çekme mukavemeti ve bozulma deformasyonu değerleri, üstyapı tasarımında ve bitümlü karışımın kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu deneyden elde edilen bu değerler karışımın sıcaklık, nem ve farklı dingil yükleri karşısında göstermiş olduğu davranış hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılabilir.



Şekil 54. Dolaylı çekme mukavemeti deney düzeneği

Tüm bu amaçlarla bu deneyin uygulanmasının yanı sıra bitümlü karışımı oluşturan malzemelerin bir yol üstü yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği hakkında bilgi edinmek amacıyla yapılmaktadır.

Bu deneyde, ekipman olarak Marshall Stabilesi Deney Aleti ve Dolaylı Çekme Gerilmesi Deney (ASTM D4123) ekipmanları kullanılır.

Deney numuneleri Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilirler. Deneyde 4" (10cm) çaplı numuneler kullanılıyor ise numune en az 2" (5cm) yüksekliğinde ve $D_{max} < 1"$ (2,5cm) olmalıdır.

2.2.4.1. Deneyde Kullanılan Ölçütler

Dolaylı çekme mukavemeti deneyinin iki farklı sıcaklıkta (0°C ve 20°C) yapılması amaçlandı. Deneme çalışmalarında, 0°C sıcaklıkta karışımların dolaylı çekme mukavemetlerinin çok yüksek çıkması ve deney aletinin bu örnekleri kırmada yetersiz kalmasından dolayı deney sıcaklıkları 10°C ve 20°C olarak belirlendi.

Deney için Marshall Stabilesi Deney Aleti ve Dolaylı Çekme Gerilmesi Deney (ASTM D4123) ekipmanları kullanıldı. Koşulsuz ve üç farklı koşullandırma sistemi ve iki farklı sıcaklıkta toplam sekiz seçenek oluşturuldu. Her bir seçenekte 3 briket veya karota deney yapıldı. Sekiz seçenek üzerinden karışımların ve uygulama performansının değerlendirilmesi bağlamında karotların dolaylı çekme mukavemetleri irdelendi.

Deney cihazının maksimum gücü 27,5 kN olduğundan, bu değerden daha yüksek dayanım gösteren örneklerin mukavemetleri (3 adet) doğru olarak ölçülemedi ve bu örnekler ortalamaya katılmadı.

2.2.4.2. Deneyin Yapılışı

- Numunelerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları belirlendi.
- Numuneler önceden belirlenen gruplar dahilinde 10°C ve 20°C sıcaklıklarda, sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirildi ve 24 saat bekletildi.
- Numuneler deney ekipmanına yerleştirildi.
- Deney otomatik Marshall stabilite deney aleti ve dolaylı çekme gerilmesi deney donanımı (ASTM D 4123) ile başlatıldı. Kullanılan alet dolaylı çekme mukavemeti değerini otomatik olarak belirlemekte ve kN olarak vermektedir.

- Yatay ve düşey deney donanımında bir bozulmanın oluşmaması ve çatlama gelişiminin tomografi yöntemiyle incelenebilmesi için numune tamamen dağılmadan önce deney sonlandırıldı.

2.2.4.3. Hesaplamalar

Dolaylı Çekme Mukavemeti S_t (psi)

$$S_t = \frac{Pf}{h} * 0,156 \quad (3)$$

Poisson's Oranı γ

$$\gamma = \frac{DR * 0,0673 - 0,8954}{DR * (-0,2494) - 0,156} \dots DR = \frac{Y_t}{X_t} \quad (4)$$

Elastisite Modülü (E)

$$E = \frac{Sh}{X_t} * (0,2692 + \gamma * 0,9974) \dots Sh = \frac{P}{X_t} \quad (5)$$

Çekme Deformasyonu ε_t (mikron)

$$\varepsilon_t = \Delta h * \left[\frac{0,03896 + \gamma * 0,1185}{0,0673 + \gamma * 0,2496} \right] \quad (6)$$

Basınç Deformasyonu ε_c (mikron)

$$\varepsilon_c = \Delta v * \left[\frac{-0,1185 - \gamma * 0,03896}{-0,8954 + \gamma * 0,156} \right] \quad (7)$$

2.2.4.4. Dolaylı Çekme Mukavemeti Örneklerine Bilgisayarlı Tomografi Tekniğinin Uygulanması

Hasarsız bir test yöntemi olarak, bilgisayarlı tomografi tekniği asfalt karışımlara uygulandı. Bu teknikle, briketlerin çeşitli kesitlerinden yapılan incelemeler ile boşluk dağılımları belirlenebilmektedir [10-20]. Boşluk dağılımlarının incelenmesi, farklı boşluk dağılım biçimlerinin konuya katılması, farklılıkların anlamlılık düzeylerinin asfalt test aleti ile elde edilecek performans deneyleri ile karşılaştırılması amaçlandı.

Katkı uygulamalarının etkinliğinin yorumlanmasında, tomografi uygulamasının yararlı olacağı düşünülmektedir. Genellikle, katkı uygulamaları ile asfalt çimentosu ve agrega arasındaki uyumluluğun artırılması amaçlanmaktadır. Su hasarı önleyici katkılarla agreganın asfalt çimentosu tarafından ıslatılabilirliği (wettability) artırılmakta yani bitümlü bağlayıcının viskozitesi genellikle azaltılmakta, polimerik katkılarıyla da en genel haliyle yorulma dayanımının artırılması amaçlanmaktadır. Katkı uygulamalarının, aynı koşullar altında, sıkıştırılmış karışımdaki boşluk dağılımları üzerine etkili olacağı düşünülmektedir. Bu bağlamda, tomografi tekniğinden yararlanılma amaçlandı.



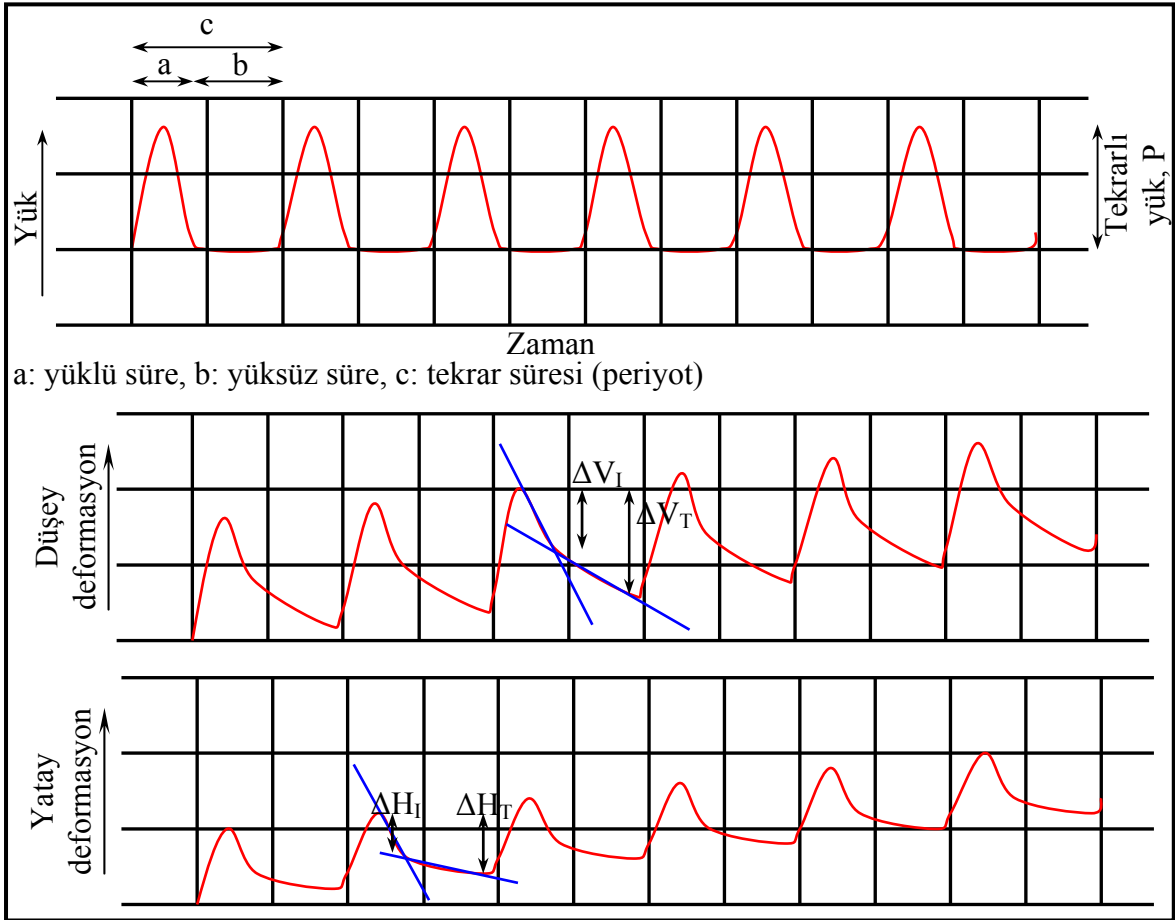
Şekil 55. Tomografi çekimi sırasında resimler

Deneylerde meydana gelen hasarı, hasarın nerede gerçekleştiğini, nasıl oluştuğunu görebilmek için hem deneylerden önce hem de sonra bilgisayarlı tomografi görüntüleri çekildi. 250 mas, 120kw, CTDI vol 52,65 mÖy ve 0,75mm kesit aralıklarıyla görüntüler alındı. Bu görüntüler daha sonra üç boyutlu görüntüleme yapabilen program yardımı ile birleştirilerek yorumlandı.

2.2.5. Dolaylı Çekme Deneyi

Bu yöntemin amacı, tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi yardımıyla laboratuarda hazırlanmış veya karot numunelerinin elastisite modülü değerini belirlemektir. Deney, farklı sıcaklıklar ve yükleme periyotları altında yapılabilmektedir. Deneyde her bir sıcaklık ve yükleme periyodu için numunelere ait elastisite modülü değerleri belirlenir [76].

Elastisite modülü değerleri, malzemelerin rölatif kalitesini değerlendirmesinin yanı sıra kaplama tasarımı, değerlendirme ve analizleri için girdi üretmeye yaramaktadır. Bu deney sayesinde sıcaklık, yükleme miktarı ve süresi gibi etkiler araştırılabilmektedir. Bitümlü karışımların dolaylı çekme gerilmesi deneyi ile elastisite modülü değerlerinin belirlenmesinde numunelere yarı sinüzoidal (haversin) bir formda basınç yükü uygulanması suretiyle yapılır. Deney aleti olarak NAT kullanılır. Şekil 56'da verilen süre-yük eğrisine uygun olarak yapılan deney sonucunda numunenin nihai yatay deformasyonu ölçülür ve bir poisson oranı kabul edilerek numunenin elastisite modülü hesaplanır [76].



Şekil 56. Dolaylı çekme deneyinde yükün uygulanma ve deformasyon şekli

2.2.5.1. Dolaylı Çekme Deneyinde Uygulanan Ölçütler

Tekrarlı yüklemeli dolaylı çekme deneyi, sekiz seçenekteki laboratuvar ve karot numunelerinin elastisite modülü değerini belirlemek için farklı yükleme koşulları altında yapıldı. Deney yapılırken örneklerin doğru yerleştirilmesine, birbirine dik eksenlerin ayarlanmasına, LVDT'lerin düzgün olmasına azami özen gösterildi. Kontrol olarak ta deney sonuç ekranında görülen yük uygulama grafiği ve LVDT 1 ve LVDT 2'den alınan sonuçların çakışması kontrol mekanizması olarak kullanıldı. Deneyin hasarsız bir yöntem olmasından dolayı uygun görülmeyen deneyler tekrarlandı. 20°C ve 40°C'deki deneyler aynı örnekler üzerinde yapıldı. Öncelikle oda sıcaklığına yakın olan 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi yapıldı. Bütün deneylerin aynı deney aletinde yapılmasına özen gösterildi. Deney sırasında çekilen fotoğraflar Şekil 57'de ve deney değişkenleri Tablo 20'de sunulmaktadır.

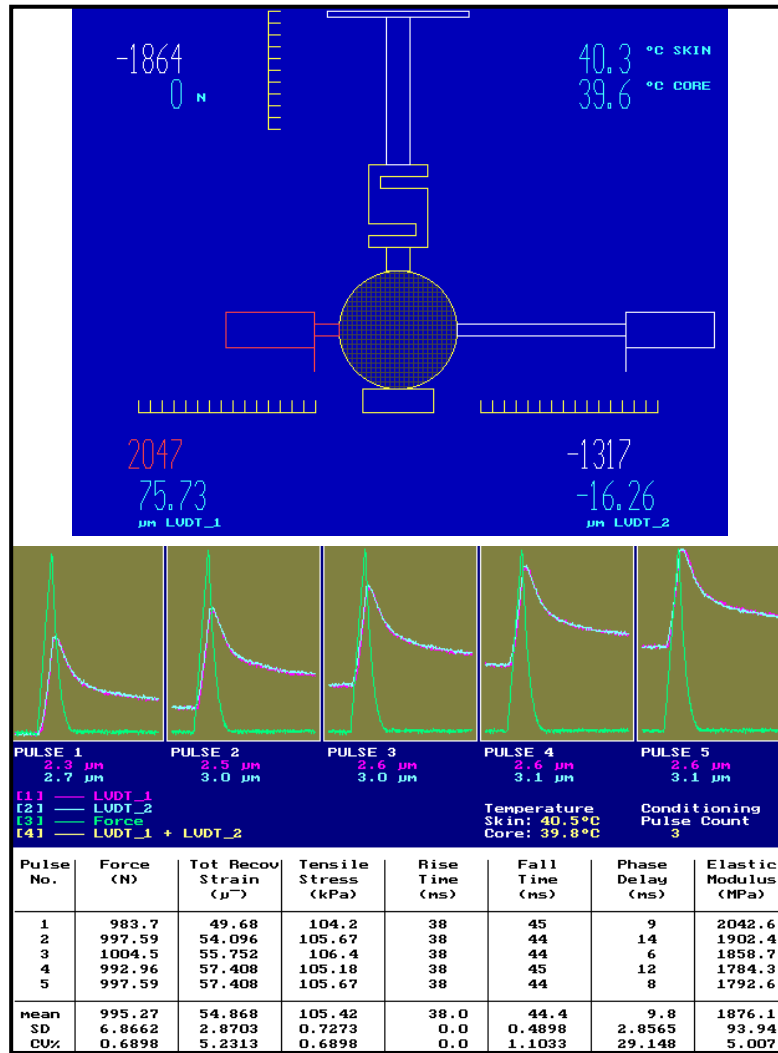
Tablo 20. Dolaylı çekme deneylerinde uygulanan ölçütler

Deney ölçütü	Değer
Örnek çapı (mm)	100
Deney uygulama sıcaklığı (°C)	20-40
Tahmini Poisson oranı	0,35
Deney yükleme periyodu (pulse period) (ms)	2000
Koşullandırma yükleme periyodu (ms)	2000
Koşullandırma yükleme sayısı	3
Yüklü süre (rise time)	40-60-80
Yük (N)	1000

2.2.5.2. Deneyin Yapılışı

- Numuneler sıcaklık kontrollü hücreye yerleştirilerek belirlenen sıcaklığa gelmesi için 24 saat bekletildi.
- 24 saat sonra deney sıcaklığına gelen örnekler deney ekipmanına yerleştirildi.
- Ön hazırlık yüklemesi yapılarak numunenin yerleşmesi sağlandı.
- Örnekler önceden belirlenen parametrelerde beş kez yarı sinüzoidal (haversin) olarak yük uygulandı. Numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar cihaz tarafından otomatik olarak ölçüldü.

- Elastisite modülü değeri için bir numuneye birbirine dik iki eksen doğrultusunda iki defa deney yapıldı. İlk deney tamamlandıktan sonra numune 90° döndürülerek ikinci kez deneye tabii tutuldu. Elastisite modülü değeri olarak iki örneğe uygulanan dört deney sonucunun ortalaması alındı.
- Deneyin tahribatsız olması nedeniyle, bir numuneye birden daha fazla deney yapılması imkanı vardır. Bu nedenle numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için deneye 20°C sıcaklıkta başlandı.



Şekil 57. Dolaylı çekme deneyinden görüntüler

2.2.5.3. Hesaplamalar

Her bir deney sonucu için Elastisite modülü değerleri,

$$E = \frac{P^*(v+0,27)}{h*\Delta h} \quad (8)$$

denklemini ile hesaplanır.

2.2.6. Fransız Tekerlek İzi Deneyi

LCPC olarak bilinen bu deney aleti Fransa'da 30 yılı aşkın bir süredir başarıyla HMA karışımların tekerlek izini önlemek için kullanılmaktadır. FRT aynı anda iki HMA örneğini test edebilmektedir. Örnek boyutları 500mm uzunlukta, 180mm genişlikte ve 20 ila 100mm kalınlıkta olabilmektedir. Numuneler genellikle LCPC Laboratuvar tekerlekli sıkıştırıcıda sıkıştırılmaktadır. Numunelerin yüklenmesi, 87psi ile şişmiş tekerleğe 5000N yük uygulayarak gerçekleştirilmektedir. Deney boyunca pnömomatik tekerlek örneğin ortasından saniyede iki kez geçer. Genellikle aşınma ve binder tabakaları için 60°C ve temel tabakaları için 50°C sıcaklık kullanılmaktadır[55].



Şekil 58. Fransız tekerlek izi deney aleti[55].

FRT'de tekerlek izi derinliği yüzde olarak ifade edilmektedir. Deformasyon, 15 ölçüm sonucunda elde edilen tekerlek izlerinin ortalaması olarak hesaplanır. Bu ölçümler her

örnekten uzunluğu boyunca beş yerden ölçüm yapılmak üzere üç örnek üzerinde yapılmaktadır [55].

Tekerlek izi deneyi, karışımların dingil yüklerinden kaynaklanan kalıcı deformasyonların ve tekerlek izi oluşumu potansiyelinin belirlenmesi amacı ile laboratuvar ortamında hazırlanan karışımlara, Karayolları Genel Müdürlüğünde yapıldı. 180mm genişliğinde, 500mm uzunluğunda ve 50mm kalınlığında hazırlanan katkısız ve SBS katkılı karışımlara kuru ve su içerisinde deney yapıldı. Deneye başlamadan önce 12 saat önce numuneler deney aletine konuldu ve deney 60°C sıcaklıkta yapıldı. Her grup için iki örnek kullanıldı. Tekerlek izi deney sonuçlarının değerlendirilmesi 50000 geçişteki derinliklere göre yapıldı.

3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde, deney sonuçlarının yorumlanması için gerekli şekil ve tabloların sunulması, katkıların uygulanan koşullandırma sistemleri bağlamında deney yöntemlerine göre etkinliğinin araştırılması, karışımların performanslarının değerlendirilmesi ve literatürle ilişkilendirilmesi yapılmaktadır.

3.1. Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyine Ait Bulgular ve İrdemeler

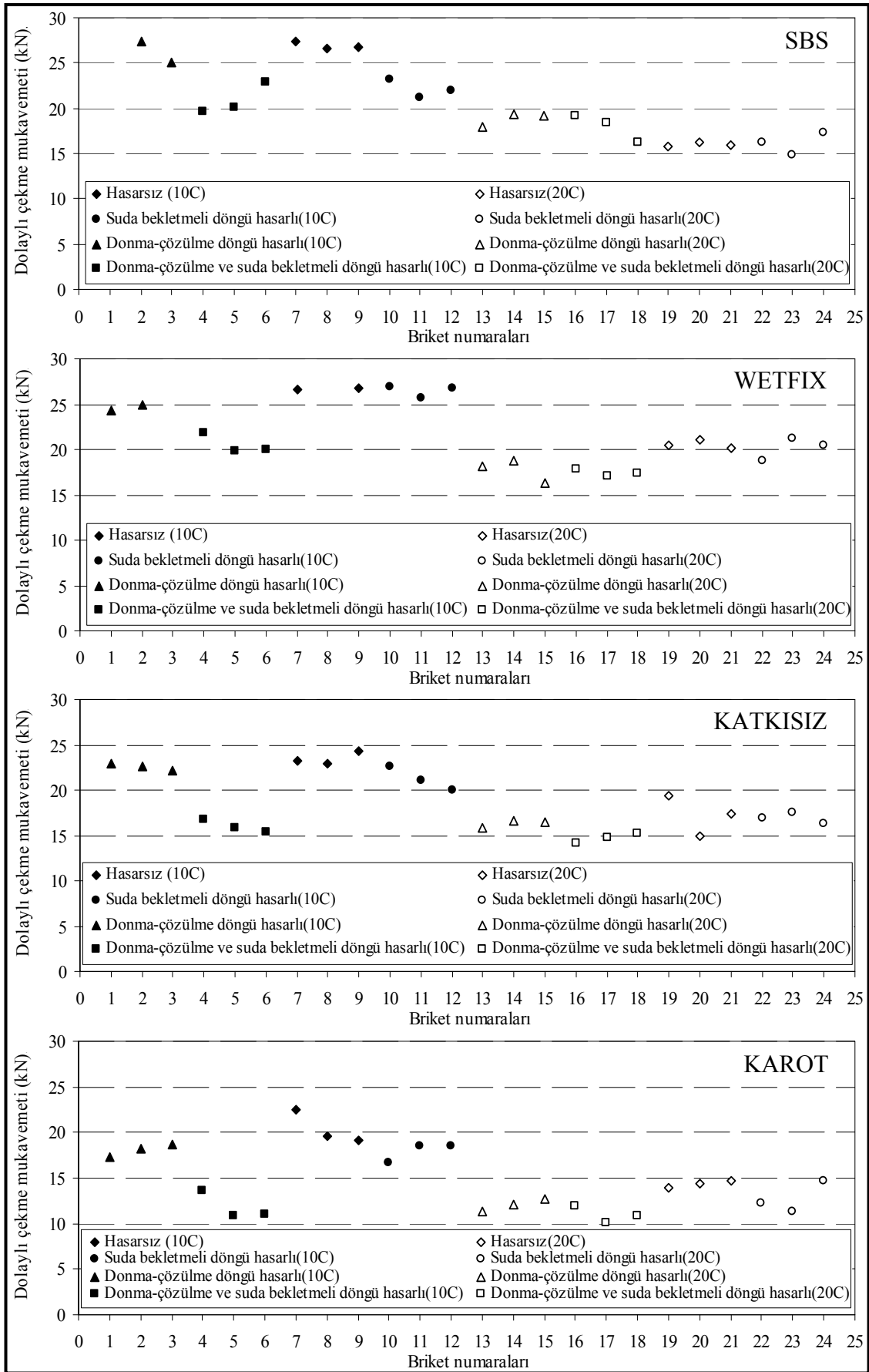
Dolaylı çekme mukavemeti deneyi, asfalt kaplamaların çatlama özelliği ile ilişkili olan, asfalt betonunun çekme özelliğini belirlemede kullanılmaktadır. Bu deney, örneğin çapının iki tarafından basınç yükü uygulayarak üniform çekme gerilmesi oluşturacak şekilde uygulanır [77]. Koşulsuz ve üç değişik koşullandırma sistemi uygulanmış örneklere 10°C ve 20°C sıcaklıkta dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulandı.

Tablo 21'de 10°C ve 20°C sıcaklıklarda; farklı karışımların farklı koşullandırma sistemleri için dolaylı çekme mukavemeti değerleri sunulmaktadır. 10°C'de hasarsız karışımlarda, SBS katkılı karışımlar 26,92kN, wetfix BE katkılı karışımlar 26,69kN, katkısız karışımlar 23,54kN ve karotlar da 20,39kN ortalama dayanım vermektedirler. Suda bekletmeli döngü hasarında bu değerler sırasıyla 22,11kN, 26,39kN, 21,24kN ve 17,91kN olmaktadır. Donma-çözülme döngü hasarında SBS katkılı karışımlar 26,26kN, wetfix BE katkılı karışımlar 2,60kN, katkısız karışımlar 22,52kN ve karotlar da 18,07kN ortalama dayanım vermektedirler. Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarının birlikte uygulandığı örneklerde, SBS katkılı karışımlar 20,85kN, wetfix BE katkılı karışımlar 20,60kN, katkısız karışımlar 15,99kN ve karotlar 11,84kN ortalama dayanım vermektedir. 20°C sıcaklıkta hasarsız karışımlarda, SBS katkılı karışımlar 18,82, wetfix BE katkılı karışımlar 20,53kN, katkısız karışımlar 17,23kN ve karotlar da 14,36kN ortalama dayanım vermektedirler. Suda bekletmeli döngü hasarında bu değerler sırasıyla 16,12kN, 20,15kN, 16,90kN ve 12,77kN olmaktadır. Donma-çözülme döngü hasarında SBS katkılı karışımlar 17,97kN, wetfix BE katkılı karışımlar 17,76kN, katkısız karışımlar 16,30kN ve karotlar da 12,04kN ortalama dayanım vermektedirler. Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarının birlikte uygulandığı örneklerde, SBS katkılı karışımlar 15,95kN, wetfix

BE katkılı karışımlar 17,43kN, katkısız karışımlar 14,72kN ve karotlar 10,91kN ortalama dayanım vermektedir.

Tablo 21. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi sonuçları (kN)

	ÖRNEK NO	SBS	WETFIX BE	KATKISIZ	KAROT	
10°C	Hasarsız	7	27,35	26,55	23,30	22,46
		8	26,60	>27,50	22,97	19,53
		9	26,82	26,82	24,35	19,17
		Ortalama	26,92	26,69	23,54	20,39
	Suda bekletmeli döngü hasarlı	10	23,16	26,85	22,59	16,66
		11	21,20	25,62	21,08	18,58
		12	21,96	26,71	20,04	18,50
		Ortalama	22,11	26,39	21,24	17,91
	Donma-çözülme döngü hasarlı	1	>27,50	24,25	22,94	17,36
		2	27,40	24,95	22,54	18,22
		3	25,12	>27,50	22,08	18,64
		Ortalama	26,26	24,60	22,52	18,07
	Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı	4	19,65	21,92	16,71	13,59
		5	20,07	19,90	15,88	10,88
		6	22,82	19,99	15,39	11,05
Ortalama		20,85	20,60	15,99	11,84	
20°C	Hasarsız	19	15,75	20,40	19,39	13,92
		20	16,17	21,10	14,90	14,46
		21	15,92	20,10	17,39	14,71
		Ortalama	18,82	20,53	17,23	14,36
	Suda bekletmeli döngü hasarlı	22	16,26	18,75	16,85	12,17
		23	14,83	21,30	17,57	11,40
		24	17,27	20,40	16,29	14,73
		Ortalama	16,12	20,15	16,90	12,77
	Donma-çözülme döngü hasarlı	13	17,94	18,11	15,90	11,31
		14	19,40	18,82	16,60	12,13
		15	19,12	16,36	16,40	12,67
		Ortalama	17,97	17,76	16,30	12,04
Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı	16	19,23	17,80	14,10	11,87	
	17	18,37	17,10	14,83	10,06	
	18	16,31	17,40	15,24	10,80	
	Ortalama	15,95	17,43	14,72	10,91	



Şekil 59. Değişik örneklerinin 10°C ve 20°C'deki DÇM değerleri

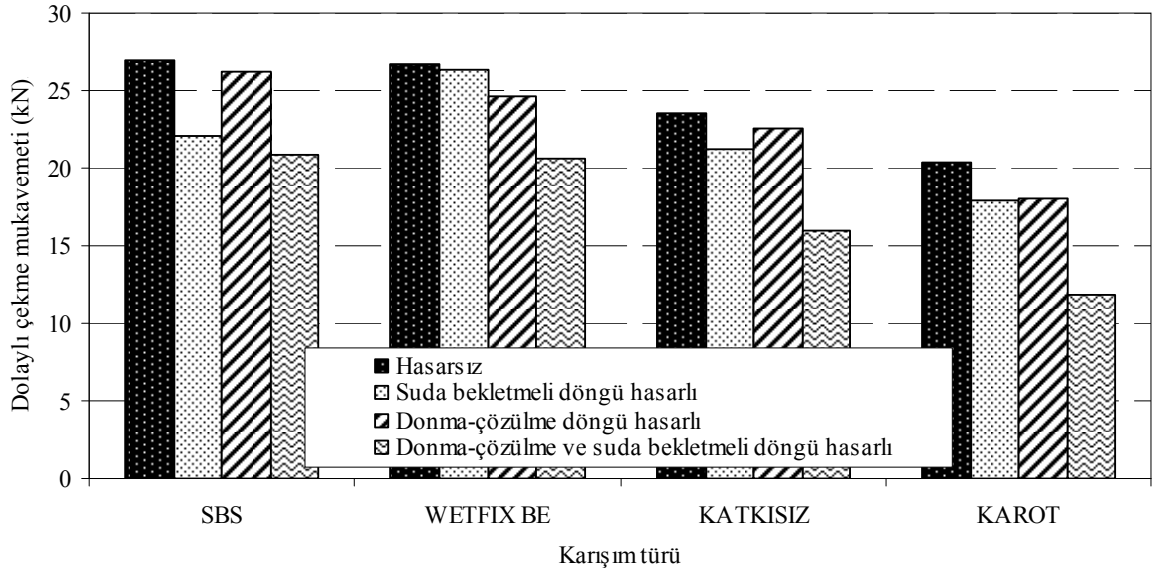
Hasarsız ve koşullu örneklerin ortalamaları alındığında, genel olarak, katkıların etkinliği düşünüldüğünde beklendiği gibi, 10°C sıcaklıkta, SBS (24,035kN)ve wetfix BE (24,57kN) dayanım değerleriyle en yüksek çatlama direnci ortaya koymaktadır. Katkısız karışımlar da (20,82kN) beklendiği üzere, karot örneklerine göre (17,05kN) daha yüksek direnç göstermektedir. 20°C sıcaklıkta hasarsız ve koşullu örneklerin dolaylı çekme mukavemetlerinin ortalamaları, SBS katkılı karışımlar için 17,215kN, wetfix BE katkılı karışımlar için 18,967kN, katkısız karışımlar için 16,29kN ve karotlar için de 12,52kN olmaktadır. Modifiye ve katkısız karışımlar karşılaştırıldığında, katkılar ince agrega ve filler agrega ile bitümün oluşturduğu karışım mastiğinde adezyon dayanımını artırarak özellikle, seçilen granülometri bağlamında (yoğun) adezyon kırılmasından ziyade kohezyon kırılması anlamında oldukça yüksek (10°C’de yaklaşık %18 ve 20°C’de yaklaşık %16,45) bir iyileşme oluşturmaktadır. 20°C sıcaklık koşulu, yorulma dayanımını da, çatlama yönüyle düşünüldüğünde artırmakta, bu bağlamda, seçilen kullanım oranları için, hem su hasarı önleyici hem de tekerlek izi önleyici katkıları olarak, dolaylı anlamda, çatlama direnci yönüyle olumlu fayda ortaya koymaktadır.

Her gruptaki örneklerin ortalama dolaylı çekme mukavemeti değerleri kullanılarak Şekil 60 ve Şekil 61 hazırlandı. 10°C sıcaklıkta, SBS ve Wetfix BE katkılı karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerlerinin birbirine çok yakın olduğu fakat SBS katkılı karışımların çok azda olsa daha yüksek mukavemet gösterdiği, tüm koşullandırma sistemleri için karot örneklerinin en küçük çekme mukavemeti değerini verdiği, bütün karışımların en çok donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarından olumsuz yönde etkilendikleri, suda bekletme ve donma-çözülme döngü hasarı sistemleri karşılaştırıldığında Wetfix BE katkılı karışımların donma-çözülme döngüsünden daha çok olumsuz etkilendiği, diğer bütün karışımların suda bekletmeli döngü hasarından daha çok zarar gördükleri belirlendi.

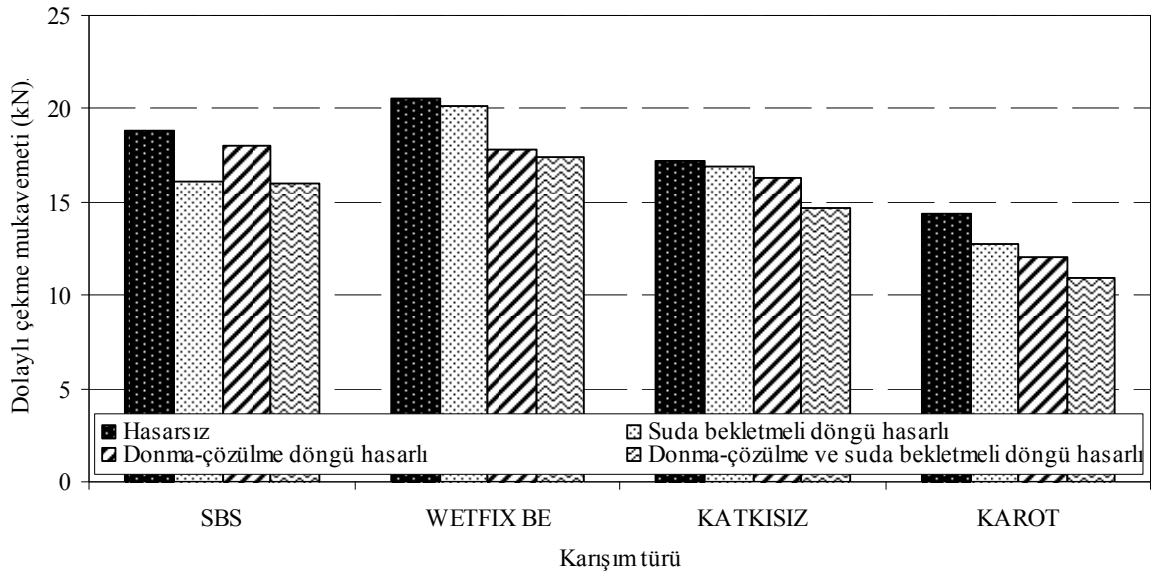
20°C sıcaklıkta, donma-çözülme döngü hasarlı örnekler hariç bütün seçeneklerde Wetfix BE katkılı karışımların en yüksek çekme mukavemeti değerini verdiği, donma-çözülme döngü hasarında ise SBS katkılı karışımların yine daha etkili olduğu, genel olarak değerlendirildiğinde ise en etkili karışımların sırasıyla Wetfix BE katkılı, SBS katkılı, katkısız ve karot örneklerinin olduğu görüldü.

Suda bekletmeli döngü hasarı ve donma-çözülme döngü hasarının ikili değerlendirilmesinde SBS katkılı karışımların suda bekletme döngüsünden daha çok

etkilendiği, diğer karışımların ve karotların ise donma-çözülme döngü hasarından daha fazla etkilendiği anlaşıldı.



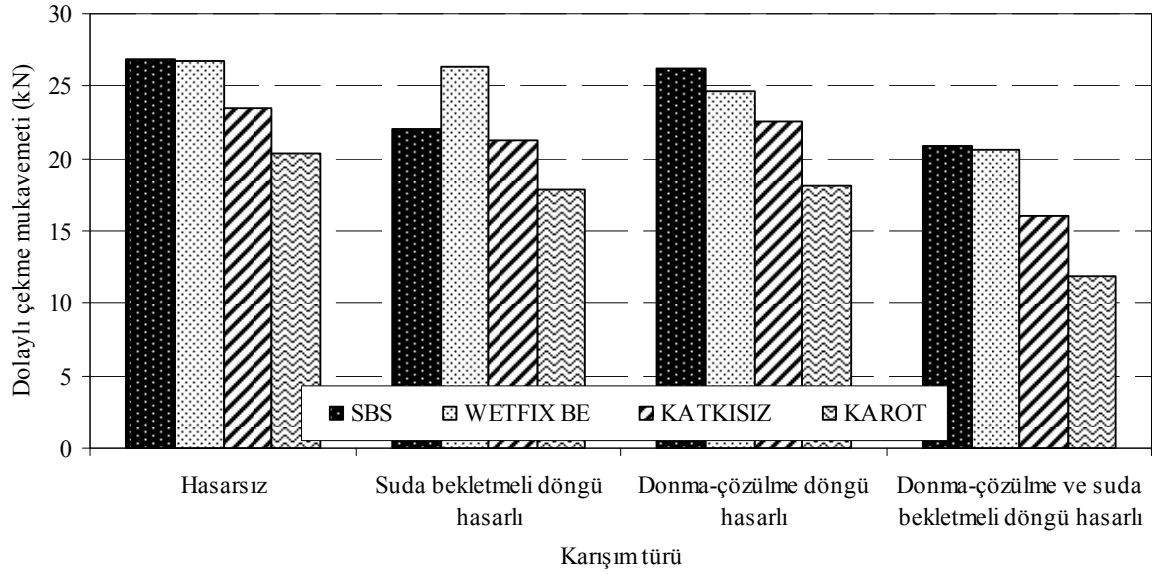
Şekil 60. Farklı karışımların ve karot örneklerinin 10°C'deki ortalama DÇM değerleri



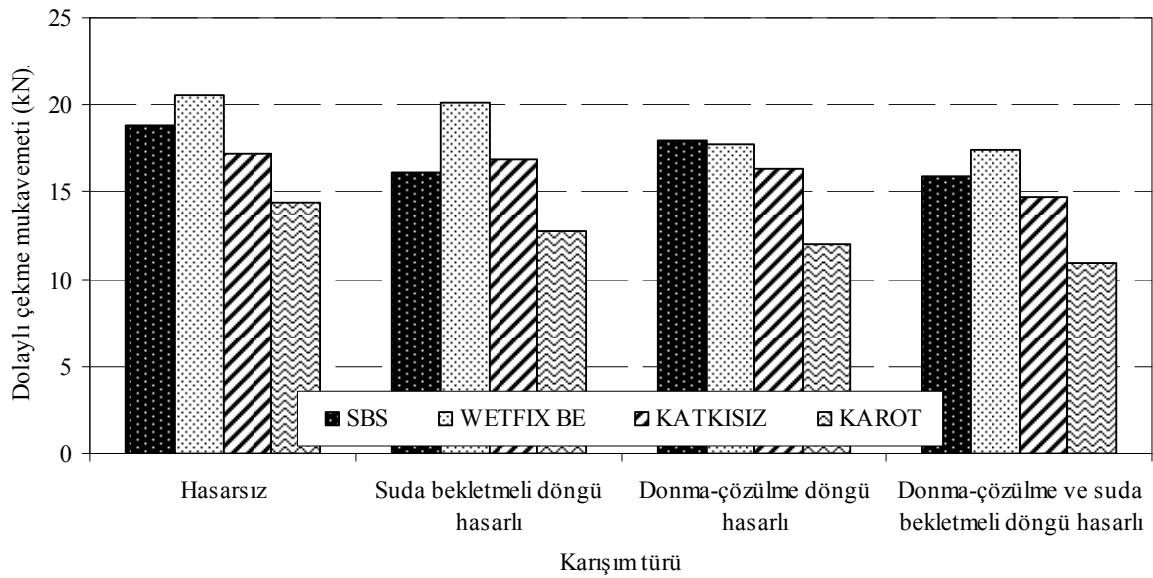
Şekil 61. Farklı karışımların ve karot örneklerinin 20°C'deki ortalama DÇM değerleri

10°C sıcaklıkta, hasarsız, donma-çözülme döngü hasarlı ve donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı koşullandırmalarda en iyi performansı sırasıyla SBS katkılı karışımlar, Wetfix BE katkılı karışımlar, katkısız karışımlar ve karot örnekleri vermektedir.

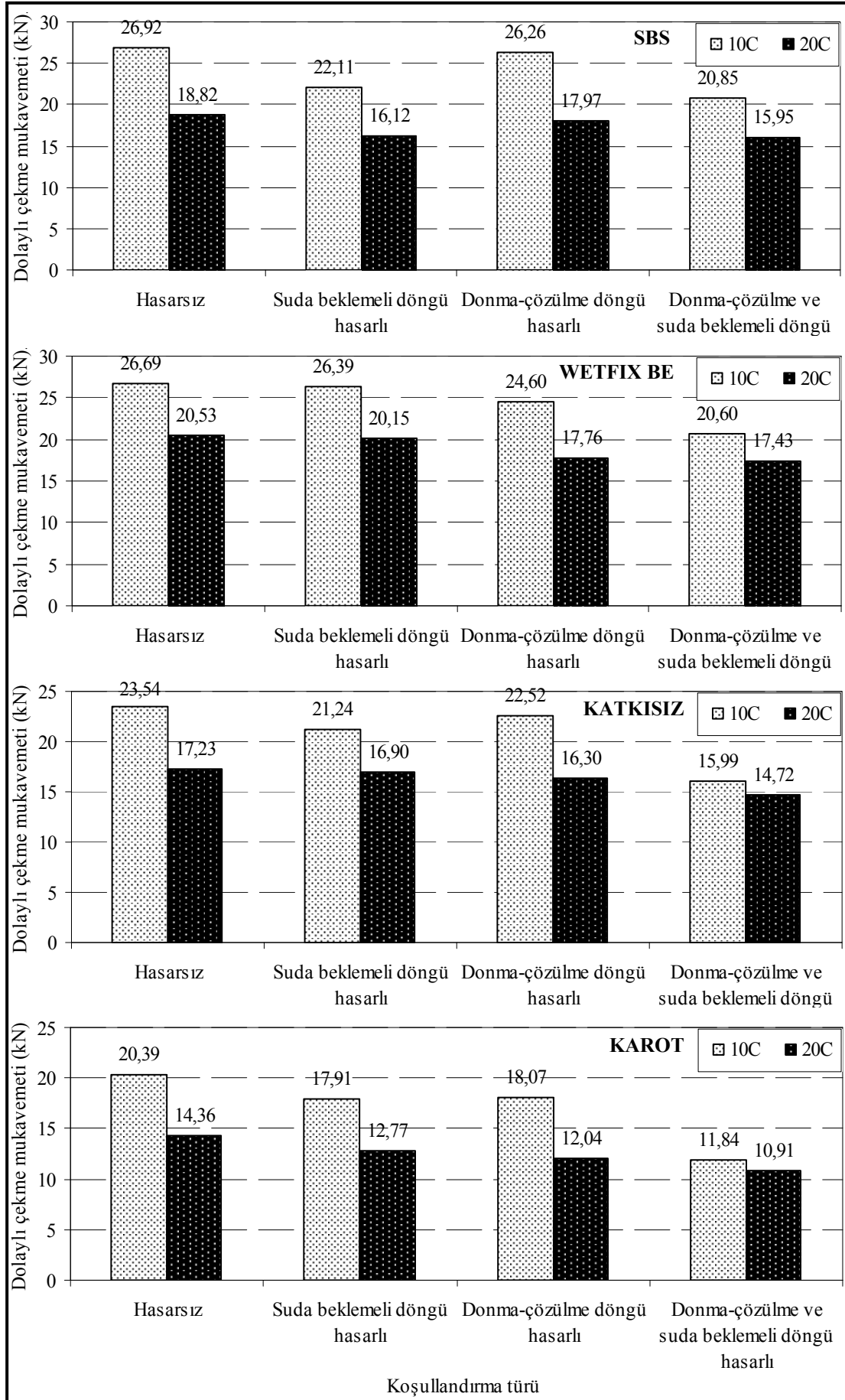
20°C sıcaklıkta donma-çözülme döngü hasarı için aynı sıralama yine geçerli olmaktadır. Diğer seçeneklerde Wetfix BE katkılı karışımlar en yüksek dolaylı çekme mukavemeti değerini vermektedir. Hasarsız ve hasarlı bütün sistemlerde ve her iki sıcaklıkta karot örnekleri en kötü performansı göstermektedirler. Katkılı karışımlar katkısız karışıma göre daha etkili olmaktadır.



Şekil 62. Değişik çevresel koşullandırma sistemlerinin 10°C’de karışımlar üzerindeki etkisi



Şekil 63. Değişik çevresel koşullandırma sistemlerinin 20°C’de karışımlar üzerindeki etkisi



Şekil 64. Karışımların 10°C ve 20°C'deki ortalama DCM değerlerinin karşılaştırılması

Karışımların çekme mukavemeti değerlerinin sıcaklıkla ilişkisinin değerlendirilmesi için hazırlanan Şekil 64'ten, sıcaklığın artmasıyla birlikte karışımların mukavemetinin de önemli derecede azaldığı, 20°C'deki mukavemetler ile 10°C'deki mukavemetler arasında %7 ile %32 fark olduğu görülmektedir. Çekme mukavemeti oranlarına (TSR) (hasarlı örneklerin mukavemeti/hasarsız örneklerin mukavemeti) bakıldığında, yalnızca 10°C sıcaklıktaki katkısız ve karot örnekleri donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarında 0,70 değerinin altında kalmaktadır. Her iki sıcaklıkta bütün koşullama sistemleri için, katkısız karışımların karotlara göre daha yüksek oran oluşturması, laboratuvar ve arazi performans farklılığını yansıtmaktadır.

Tablo 22. Karışımların koşullandırma türlerindeki çekme mukavemeti oranları

Deney sıcaklığı	Koşullandırma Türü	Çekme Mukavemeti Oranı			
		SBS	Wetfix BE	Katkısız	Karot
10°C	Suda bekletmeli döngü hasarlı	0,82	0,99	0,90	0,89
	Donma-çözülme döngü hasarlı	0,97	0,92	0,95	0,88
	Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı	0,77	0,77	0,68	0,58
20°C	Suda bekletmeli döngü hasarlı	0,85	0,98	0,98	0,88
	Donma-çözülme döngü hasarlı	0,95	0,86	0,94	0,83
	Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı	0,84	0,84	0,85	0,76

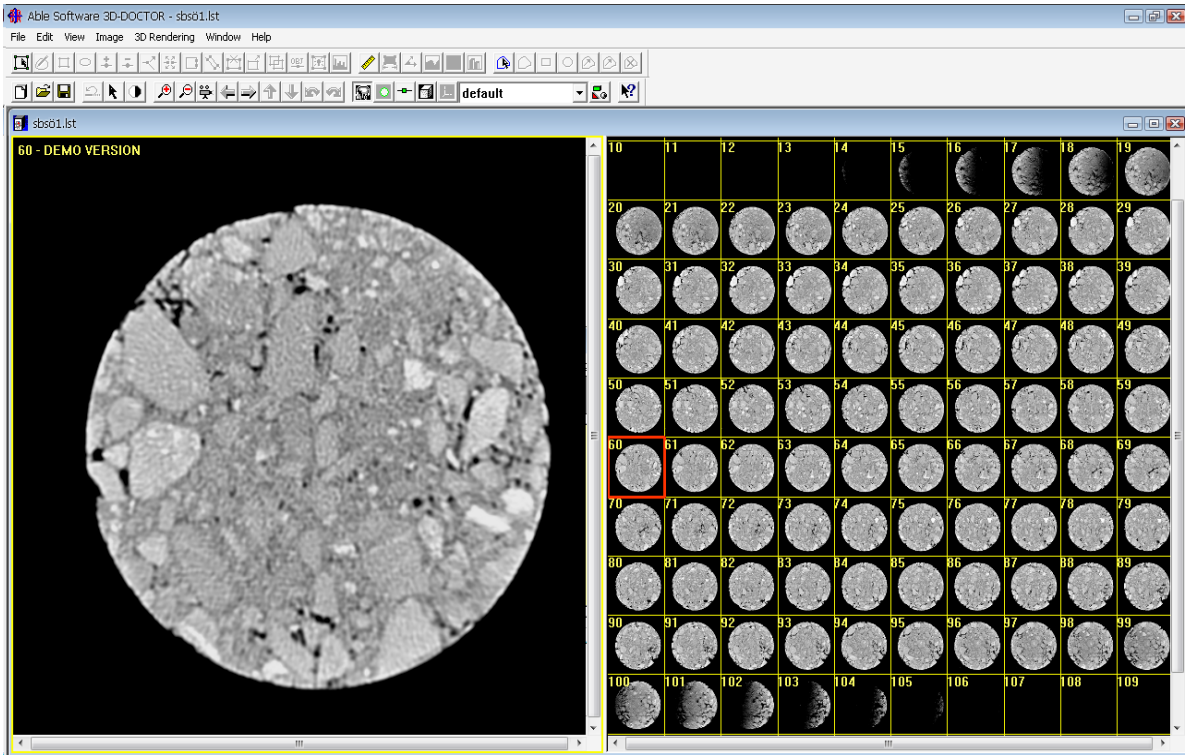
Su hasarı açısından, yağ asitli asfalt kaplama karışımları için çekme mukavemeti oranı kullanımı çelişkili bulunmaktadır[78]. Dolaylı çekme mukavemeti oranı, koşullu olanlara göre kuru örneklerden elde edilen yüksek mukavemetlerden dolayı azalabilir. Asfalt kaplama örneklerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları Marshall Stabilitesi oranlarından daha düşük olarak bulunmaktadır [79]. Agregaların morfolojik özelliklerine göre, sağlam agrega iskeletinin daha iyi içsel dirençle sonuçlandığını göstermektedir. Marshall stabilitesi ve dolaylı çekme mukavemeti gibi geleneksel deneylerin sıcak karışım asfaltların içsel direncini ölçmede yetersiz olduğu düşünülmektedir [80].

3.2. Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerine Ait Bulgular ve İrdemeler

Bilgisayarlı tomografi uygulaması, düşük sıcaklık çatlama probleminin görsel olarak değerlendirilebilmesi, çatlama şekillerinin belirlenebilmesi, boşluk varlığının

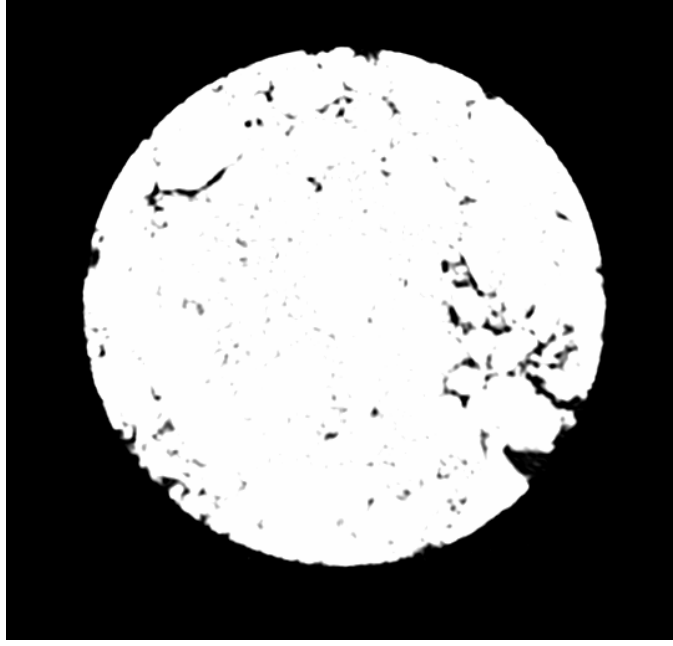
incelenebilmesi ve dağılımının gözlemlenebilmesi amacıyla gerçekleştirildi. Deneylerden önce, çalışmada kullanılan bütün örnekler KTÜ Tıp Fakültesi Farabi Hastanesi'nde tomografi çekildi. Dolaylı çekme deneyinde, örnek üzerinde elastik bölgede çalışıldığından bir hasar oluşmamakta ve görüntülere yansımamaktadır. Tekrarlı yük sünme deneyinde ise örnek üzerinde çatlama çok sıkışma gerçekleşmekte, bunda görsel olarak değerlendirilmesi mümkün olamamaktadır. Bu karşılaştırma ancak görüntü karşılaştırma programları yardımıyla çok uzun ve karmaşık işlemler sonucunda yapılabilmektedir. Bundan dolayı, sadece dolaylı çekme deneyi uygulanan örnekler ikinci (deneyden sonraki) tomografiler çekildi. 10°C sıcaklıktaki dolaylı çekme mukavemeti deneyinde örnekler tamamen dağıldıklarından, 20°C'deki örnekler bilgisayarlı tomografi yöntemiyle değerlendirildi.

Tomografi görüntüleri iki boyutlu veya üç boyutlu olarak değerlendirilebilmektedir. İki boyutlu görüntülerde, bir örneğe ait çok sayıda görüntü arasından (yaklaşık 100 adet) istenilen görüntü seçilerek boşluk dağılımı veya kaba agregaların dağılımı incelenebilmektedir. Şekil 65'te 14 numaralı SBS katkı örneğine ait görüntüler 3D-DOCTOR 4.0.20080731 DEMO programı ile görüntülenerek verilmektedir.

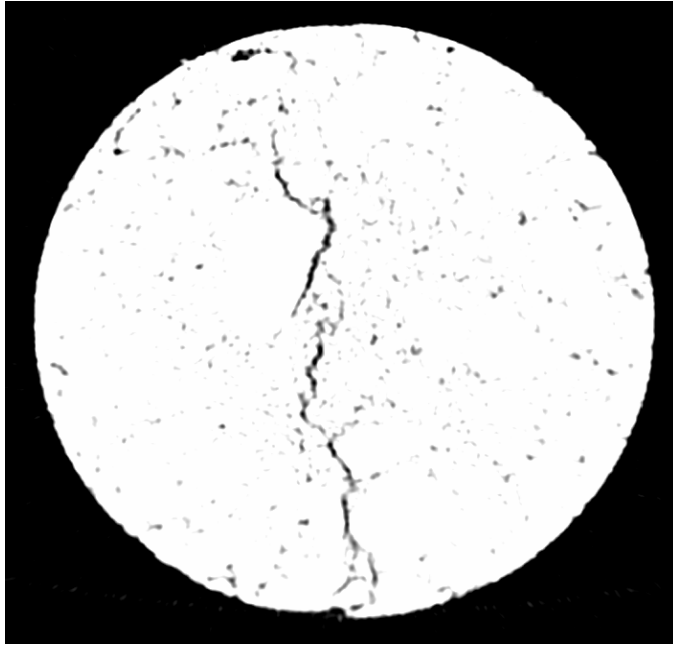


Şekil 65. SBS katkı örneğine ait 2 boyutlu görüntü

2D görüntülerde sadece örnek içerisindeki boşlukları görmek veya örnekler üzerinde deneylerden sonra oluşan çatlamların analizini yapmak mümkün olmaktadır. Şekil 66 ve Şekil 67 sırasıyla bir örnekteki boşlukları (siyah) ve örnekte meydana gelen çatlama göstermektedir.

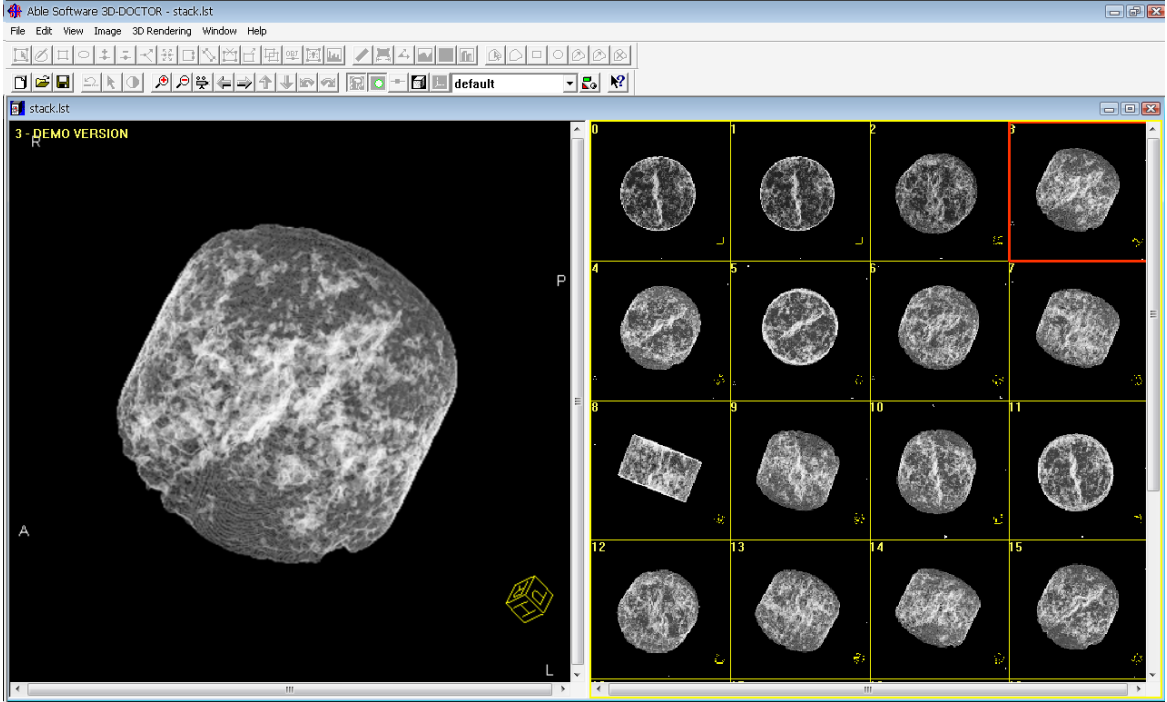


Şekil 66. 14 numaralı SBS katkılı örneğin 2D boşluk dağılımı



Şekil 67. Katkısız örneklerden 2D çatlama örneği

Kaba agregaların asfalt briketleri içerisindeki dağılımı 2D görüntülerden yararlanılarak yapılabilmektedir fakat boşluk dağılımı için 3D görüntüler gerekmektedir. 3D görüntüler KTÜ Tıp Fakültesi Farabi Hastanesi'nde oluşturuldu (Şekil 68).

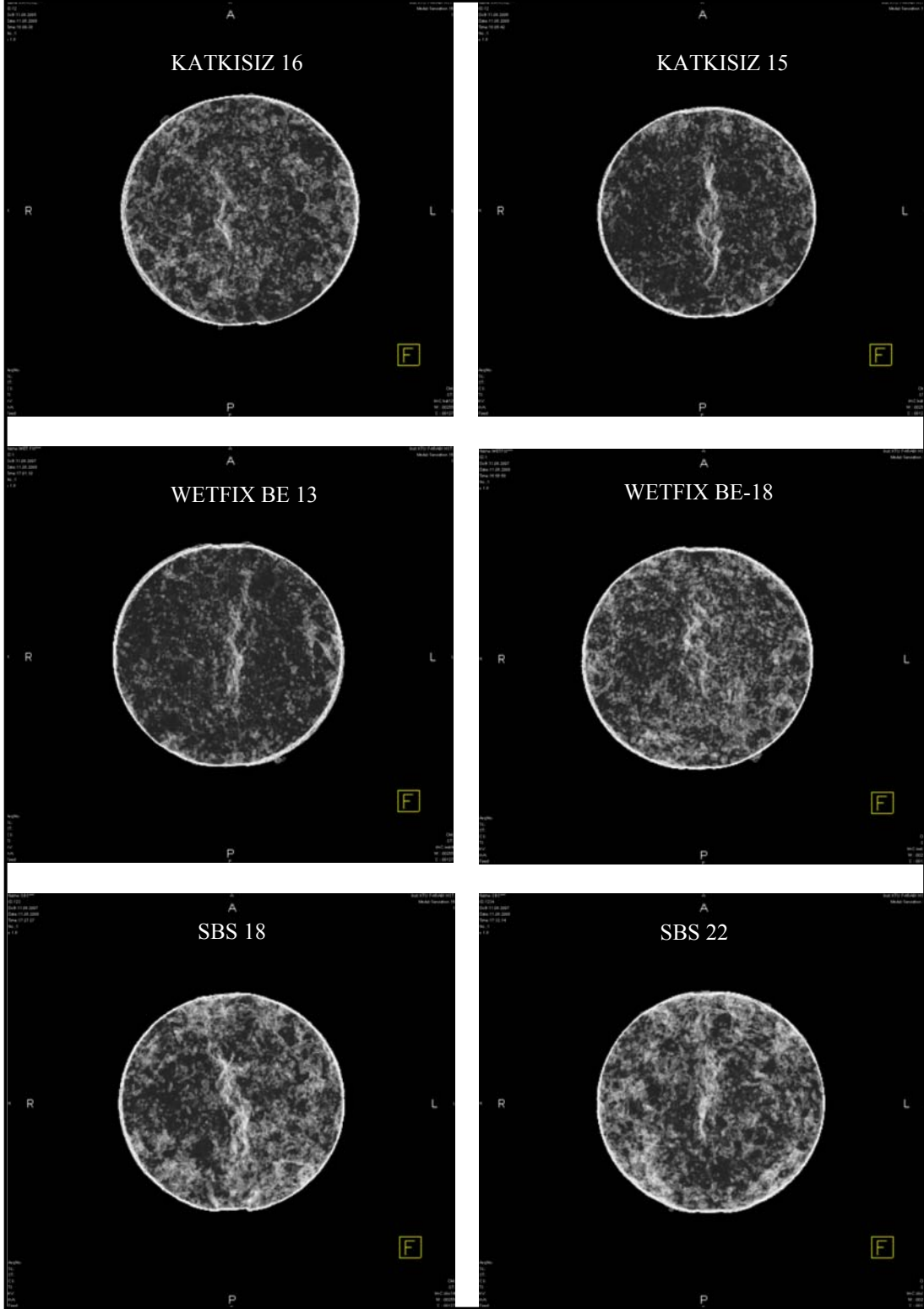


Şekil 68. SBS katkılı örneklerden 3D görüntü örnekleri

3D görüntülerin, sayfa düzlemine indirildiğinde anlaşılabilirliği azalmaktadır. Bu nedenle monitörde titiz incelemeler sonucunda değerlendirmeler yapıldı. Deneyden önce işaretlenen örnekler deneyden sonra da aynı yön ve doğrultuda tomografi cihazına yerleştirildi. 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme mukavemetinde kullanılan örneklerin tamamına hem deneyden önce hem de deneyden sonra tomografi çekilmesine rağmen yalnızca her karışım tipi ve koşullandırma türüne ait birer görüntü örneği Ek Şekil 1'de sunulmaktadır.

Ek Şekil 1 ve monitörden yapılan incelemeler ışığında, kaba agregaların genellikle briketlerin kenarlarında yer aldığı görüldü. Karot örneklerinde benzer bir genelleme yapmak mümkün olamamaktadır. Karot örneklerindeki boşlukların daha küçük fakat sayı olarak daha fazla olduğu görüldü. Özellikle SBS katkılı örneklerin boşluklarının daha büyük olduğu ve birbirleriyle bağlantılı oldukları görüldü. Bu sonuç literatürü destekler

niteliktedir [13]. Boşluk dağılımları genellikle homojene yakın olsa da zaman zaman boşluk kümelerine de rastlanıldı.



Şekil 69. Dolaylı çekme mukavemeti deney örneklerinin çatlama gelişimi

Deneylerden sonraki görüntülerde, çatlamların dolaylı çekme mukavemeti deney düzeneğinin alt ve üst çenesine paralel ve düzlemsele yakın olarak gerçekleştiği görüldü. Bunun, söz konusu deneyin örnek üzerinde makaslama etkisi yapmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çatlamanın boşluk varlığı veya dağılımıyla ilişkisinin daha doğru anlaşılabilmesi için, deney örneğinin noktasal veya çizgisel yükleme yoluyla değil, düzlemsel yükleme yapabilen bir yöntemle ve/veya en zayıf kesitinden zorlayarak kıracak bir yöntemle test edilmesinin daha etkili olacağı düşünülmektedir.

Deneyden sonra tamamen ayrılmamış örnekler üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda, çatlamların örneğin merkezinden başladığı ve yük uygulama doğrultusunda geliştiği açık olarak görüldü. Bu durum literatürde de desteklenmektedir [10]. Bazı örneklerde ise boşlukların birleşmesi şeklinde kendini gösterdi (Şekil 69).

Hasar tanımlanması en zor bozulmalardan birisidir çünkü çeşitli şekillerde olabilmektedir ve farklı değişkenlerden etkilenmektedir. Bu değişkenlerden bazıları agrega, bitüm ve soyulma önleyici katkı gibi asfalt karışımını oluşturan malzemeler ile ilgilidir. Diğerleri hava koşulları, sıkıştırma, hava boşluğu, deney yöntemi, işleme ve katkıların depolanmasıyla ilgilidir. Üstelik soyulma bitümlü bağlayıcıların viskozite/sıcaklık oranına dayalı oransal bir süreçtir. Soyulmanın varlığı agrega ve bitüm arasındaki yüzey gerilmesinin bir fonksiyonudur [1].

Asfalt kaplamalarda agregadan bitümün soyulmasından dolayı genel olarak birçok problem oluşmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için adezyon artırıcı katkıları kullanılmaktadır. Yüzey etkinleştiriciler soyulma önleyici olarak kullanıldıklarında, hem asfalt hem de agreganın fizyokimyasal özelliklerini etkilerler [8, 79].

3.3. Dolaylı Çekme Deneyine Ait Bulgular ve İrdemeler

Asfalt kaplamaların dolaylı çekme modunda ölçülen esneklik modülü, elastik özelliği değerlendirmek için kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümünün en popüler şeklidir. Esneklik modülü diğer bilgiler ile birlikte en uygun tasarım kalınlığını oluşturmak için kullanılan elastik teorilere girdi olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden, kalınlık tasarım prosedürlerinin etkinliği karışımların esneklik modüllerinin ölçümündeki doğruluk derecesi ve hassasiyetle doğrudan ilgilidir. Bu doğruluk derecesi ve hassaslık, esneklik modüllerinin asfalt betonlarının su hasarı, yorulma ve düşük sıcaklık çatlamaını değerlendirmede gösterge olarak kullanıldığı alanlarda da önemlidir [81, 82, 83].

İdeal bir kaplama, araç yüklerinin oluşturduğu gerilmelerden kaynaklanan çatlamları önlemek için düşük sıcaklıkta iyi viskoelastik özelliğe (düşük resilyent modülü) sahip olması gerekir. Aynı şekilde yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyon direnci için yeterli esnekliğe (yüksek resilyent modülü) sahip olmalıdır [84].

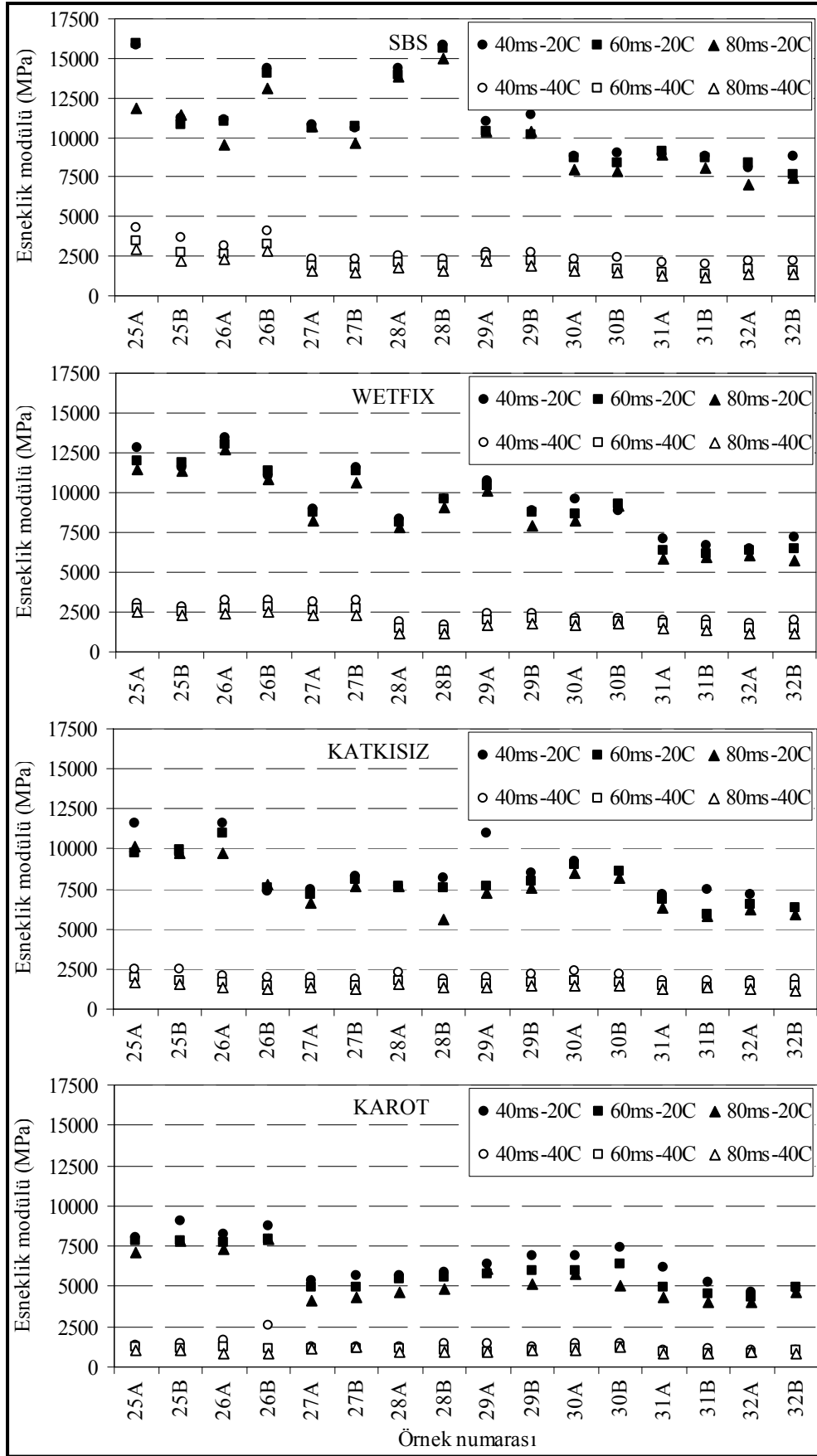
20°C ve 40°C sıcaklıklar için esneklik modülleri seçilen 40ms, 60ms, 80ms yüklü süreler için ayrı ayrı ortalamalar olarak Tablo 23’de verilmektedir.

Bilindiği üzere esneklik modülü, karışımların yük yayma kapasitelerinin en önemli göstergelerindendir. Yüksek sıcaklıkta daha yüksek bir esneklik modülü amaçlanırken, düşük sıcaklıklarda ise daha düşük olan bir esneklik modülü, uygun tasarlanan karışımlar için (AAMAS diyagramları arasında), amaçlanmaktadır. Hasarsız ve koşullandırılmış karışımların esneklik modülü ortalamaları alındığında, 20°C’de, SBS katkılı karışımlar 10754MPa, wetfix BE katkılı karışımlar 9210MPa, katkısız karışımlar 8026MPa ve karotlar 5983MPa, 40°C’de SBS katkılı karışımlar 2211MPa, wetfix BE katkılı karışımlar 2089MPa, katkısız karışımlar 1671MPa ve karot örnekleri de 1137MPa esneklik modülü vermektedir. Yüksek sıcaklıkta, beklendiği gibi modifiye karışımların daha yüksek esneklik modülü vermeleri, yük yayma kapasitelerinin artmasına bağlı olarak, tekerlek izi problemi bağlamında, direnç artışı ortaya koymaktadır. Laboratuvar ve arazi performans farklılıkları, özellikle sıkışma tekniğinden, daha yüksek hava boşluğu oluşumundan, kaçınılamaz olarak kaynaklanmaktadır. Uygulamada, laboratuara göre her zaman oluşan daha düşük performans değerleri düşünüldüğünde, katkıların direnç artışı oluşturduğu anlaşılmaktadır.

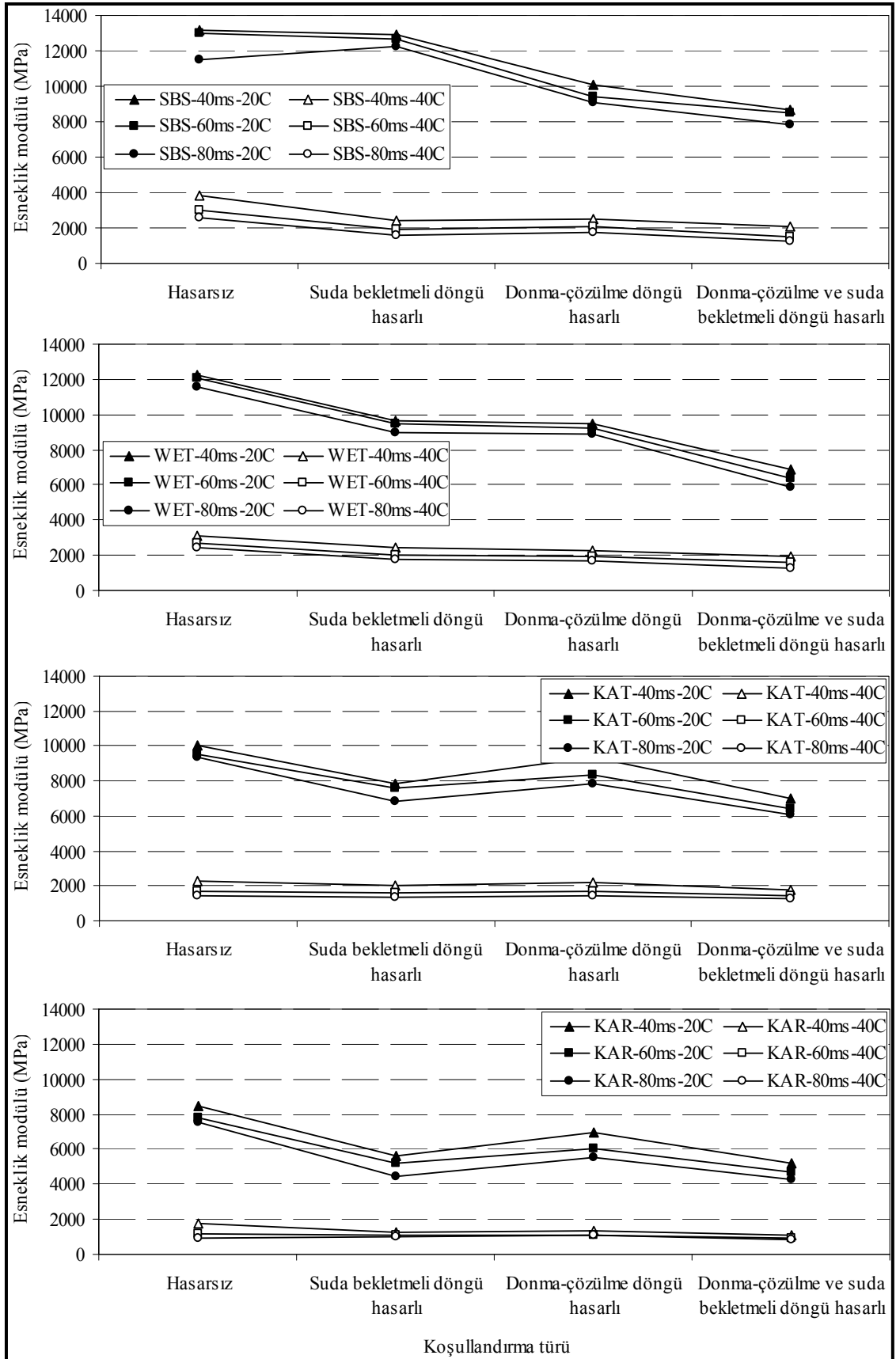
Şekil 70’de deney örneklerinin her biri için 20°C ve 40°C sıcaklıktaki esneklik modülleri sunulmaktadır. Dolaylı çekme deneyinde aynı örneğe birbirine dik iki eksen boyunca deney yapılmaktadır. Yatay eksenindeki rakamlar örnek numaralarını, “A” harfi birinci eksen ve “B” harfi de ikinci eksen ifade etmektedir. Her örnekten iki ölçüm yapılması ve hasarsız bir deney yöntemi olması dolayısıyla, hatalı yapılan veya yanıltıcı sonuç verdiği düşünülen deneylerin yeniden yapılabilmesinden ötürü bu deney ikişer örnekten oluşan gruplara yapıldı. Böylece karşılaştırmalar dört değer ortalaması üzerinden yapıldı. Şekil 70’de, aynı örneğin iki eksenindeki esneklik modüllerinin farklı olabildiği göze çarpmaktadır. Bu farklılığın, kaba agregaların ve boşlukların briket içerisinde homojen olarak dağılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Esneklik modüllerindeki bu değişiklik en az karot örneklerinde gözlemlendi.

Tablo 23. 20°C ve 40°C’de karışımların esneklik modülleri (MPa)

Yüklü süresi (ms)	SBS			WETFIX			KATKISIZ			KAROT				
	40	60	80	40	60	80	40	60	80	40	60	80		
20°C	Hasarsız	25A	15845	15953	11867	12844	11956	11411	11645	9764	10130	8029	7795	7141
		25B	11203	10841	11419	11524	11849	11403	9580	9945	9769	9052	7840	7861
		26A	11160	11045	9530	13438	13020	12691	11577	10958	9690	8196	7753	7345
		26B	14362	14031	13147	11050	11380	10867	7384	7597	7806	8712	7950	7934
		Ort.	13143	12968	11491	12214	12051	11593	10047	9566	9349	8497	7835	7570
	Suda bekletmeli döngü hasarlı	27A	10821	10542	10697	8973	8727	8225	7424	7124	6595	5392	4894	4111
		27B	10614	10658	9662	11557	11340	10648	8237	8045	7622	5633	4918	4331
		28A	14334	13985	13787	8312	8166	7796	7656	7676	7639	5645	5422	4626
		28B	15825	15587	14976	9627	9536	9069	8206	7587	5605	5839	5543	4826
		Ort.	12899	12693	12281	9617	9442	8935	7881	7608	6865	5627	5194	4474
	Donma-çözülme döngü hasarlı	29A	11048	10390	10339	10692	10394	10151	11000	7673	7285	6408	5722	6033
		29B	11375	10217	10339	8842	8716	7878	8512	7955	7514	6928	5939	5103
		30A	8823	8695	7921	9541	8648	8212	9239	9001	8483	6931	6021	5787
		30B	9011	8424	7816	8843	9280	9195	8575	8636	8219	7452	6337	5078
		Ort.	10064	9432	9104	9480	9260	8859	9332	8316	7875	6930	6005	5500
	Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı	31A	8937	9101	8895	7044	6358	5806	7169	6811	6323	6171	4918	4357
31B		8800	8671	8043	6685	6131	5975	7481	5903	5789	5257	4545	4011	
32A		8088	8418	6990	6466	6379	6026	7142	6539	6188	4676	4329	3964	
32B		8810	7701	7438	7202	6481	5742	6361	6332	5892	4819	4987	4611	
Ort.		8659	8473	7841	6849	6337	5887	7038	6396	6048	5231	4695	4236	
40°C	Hasarsız	25A	4268	3420	2966	3049	2741	2483	2492	1942	1634	1354	1219	1043
		25B	3713	2699	2212	2853	2533	2276	2490	1786	1596	1414	1176	994
		26A	3112	2669	2275	3208	2704	2406	2047	1617	1364	1652	1228	824
		26B	4136	3197	2784	3243	2848	2522	1939	1498	1270	2530	1136	861
		Ort.	3807	2996	2559	3088	2707	2422	2242	1711	1466	1737	1190	930
	Suda bekletmeli döngü hasarlı	27A	2328	1886	1588	3164	2631	2342	1951	1587	1351	1217	1138	1094
		27B	2328	1791	1463	3187	2660	2334	1819	1418	1205	1260	1163	1209
		28A	2540	2049	1756	1837	1426	1115	2289	1790	1543	1224	1170	951
		28B	2333	1920	1609	1639	1327	1116	1883	1530	1320	1395	1038	931
		Ort.	2382	1912	1604	2457	2011	1727	1986	1581	1355	1274	1127	1046
	Donma-çözülme döngü hasarlı	29A	2752	2547	2166	2433	2005	1623	1976	1535	1313	1456	945	875
		29B	2683	2189	1895	2377	2062	1719	2136	1688	1456	1193	1075	1039
		30A	2327	1821	1550	2123	1833	1688	2371	1763	1454	1399	1174	1079
		30B	2376	1713	1463	2085	1857	1765	2224	1699	1424	1410	1255	1229
		Ort.	2534	2067	1769	2255	1939	1699	2177	1671	1412	1364	1112	1056
	Donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı	31A	2081	1511	1249	2020	1742	1427	1805	1427	1222	1042	918	774
31B		1950	1381	1121	1944	1623	1351	1747	1330	1325	1123	864	833	
32A		2194	1673	1387	1791	1433	1151	1792	1539	1224	1025	858	931	
32B		2190	1562	1318	1968	1438	1177	1813	1472	1129	1014	993	842	
Ort.		2104	1532	1269	1931	1559	1277	1789	1442	1225	1051	908	845	

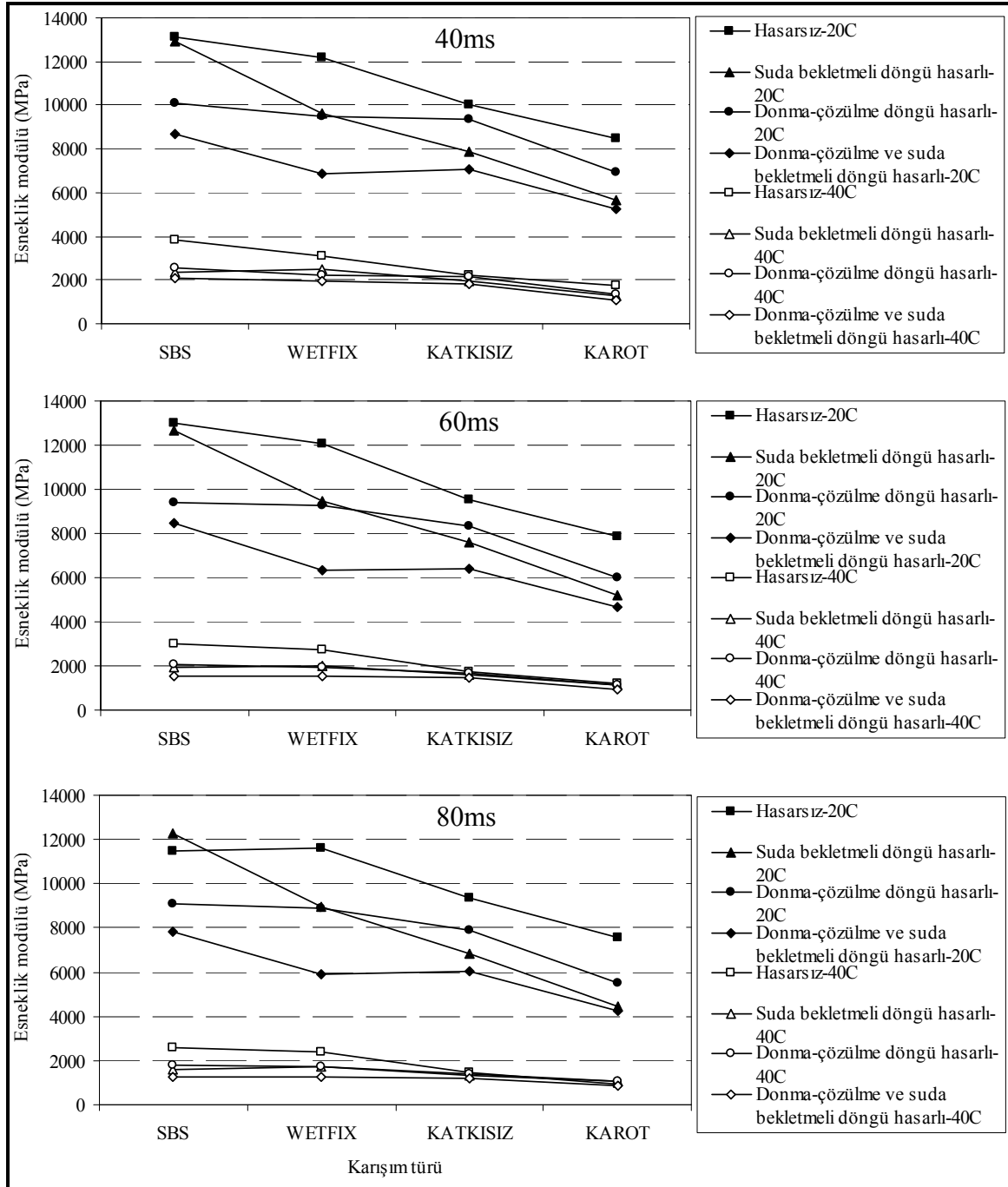


Şekil 70. 20°C ve 40°C sıcaklıkta karışımların esneklik modülü değerleri



Şekil 71. Koşullandırma türünün esneklik modülü üzerindeki etkisi

Şekil 71'e göre, sıcaklığın artmasıyla birlikte bütün karışımların esneklik modüllerinde ciddi bir düşüşün olduğu, aynı karışım içerisinde yüklü sürenin artmasıyla da yine esneklik modülünde azalma olduğu görüldü. Koşullandırma sistemlerinin katkılı ve katkısız karışımların esneklik modüllerini düşürdüğü görüldü. SBS katkılı ve katkısız karışımlar ve karot örnekleri koşullandırma sistemlerine karşı benzer davranışlar gösterdi.



Şekil 72. Karışım türünün esneklik modülü üzerindeki etkisi

Karışımlar en çok donma-çözülme ve suda beklemeli döngü hasarlı koşullandırma sisteminden olumsuz etkilenirken sonra sırasıyla donma-çözülme döngü hasarı ve suda beklemeli döngü hasarından etkilendiler. Hasarsız örnekler her zaman en büyük esneklik modülü değerlerini verdiler. Yalnızca 40°C sıcaklıktaki SBS katkılı örnekler de Wetfix BE katkılı örnekler gibi davrandı. Bu örneklerin suda bekletmeli döngü hasarına göre donma-çözülme döngü hasarından daha fazla etkilendikleri görüldü. Farklı bir ifadeyle, suda bekletmeli döngü hasarı ile donma-çözülme döngü hasarı karşılaştırıldığında, Wetfix BE katkılı karışımlar donma- çözülme döngüsüne karşı daha hassas olurken (daha çok etkilenme) diğer karışımlar (40°C SBS katkılı karışımlar hariç) suda bekletmeli döngü hasarından daha çok etkilendi. 40°C’de SBS modifiyeli karışımlar Wetfix BE modifiyeli karışımlarla aynı tepkiyi verdi.

20°C sıcaklıkta, hasarsız karışımların esneklik modülü ile en şiddetli hasar sistemine (donma-çözülme ve suda beklemeli döngü hasarlı) maruz bırakılan örneklerin esneklik modülleri arasındaki fark 3009MPa ile 5706MPa arasında değişmektedir. Wetfix BE katkılı karışımların esneklik modülleri arasındaki farkın (5706MPa) diğer karışımlara göre daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. 40°C sıcaklıkta, karışımların esneklik modülleri arasındaki en büyük fark 1709MPa (SBS) ve en küçük fark 85MPa (karot) olmaktadır. 20°C sıcaklıkta, hasarsız örneklerde 80ms yüklü sürede ve 40°C sıcaklıkta, suda bekletmeli döngü hasarlı örneklerde bütün yükleme sürelerinde ve donma-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarlı örneklerde 60ms ve 80ms yükleme sürelerinde Wetfix BE katkılı karışımlar, SBS katkılı karışımlardan daha yüksek esneklik modülü değerini verdi. Bunun dışında esneklik modülü büyükten küçüğe doğru sırasıyla SBS katkılı karışımlar, Wetfix BE katkılı karışımlar, katkisiz karışımlar ve karotlar şeklindedir. Burada spesifik bir sonuç olarak, yüksek sıcaklıkta suda bekletmeli döngü hasarında Wetfix BE katkılı karışımlar daha yüksek esneklik modülü gösterirken diğer koşullarda SBS katkılı karışımların esneklik modüllerinin daha yüksek olduğu söylenebilir.

Orta sıcaklıkta (20°C sıcaklıkta), en yüksek esneklik modülü değeri veren SBS’li karışımlar ve en küçük esneklik modülünü veren karotlar dahil bütün karışımlara ne kadar şiddetli koşullandırma yapılırsa yapılsın, 40°C sıcaklıktaki hasarsız örneklerin esneklik modülleri kadar küçük esneklik modülü değerleri elde edilemedi. Buradan çıkarılacak önemli bir sonuç, orta sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda suya dayalı koşullandırma sistemlerinin etkisi, deney uygulama sıcaklığının etkisinden daha düşük olmaktadır. Yani sıcaklık koşullandırma sistemlerinden daha etkili olmaktadır.

On örneğin (100mm çapında ve 40mm yüksekliğinde) iki gruba bölünüp birinci grubun kontrol olarak ayrıldığı ve ikinci grubun üç saat 67 hPa basınçla, %50–%80 doygunluk elde edebilmek için vakumla suya doyurulduğu ve 7 gün 40°C sıcaklıktaki suda bekletildiği çalışmada, bütün örnekler 10°C sıcaklıkta 2 saat korundu. Esneklik modülü (ASTM D4123) ve çekme mukavemeti (EN 12697-23:2003) deneyleri 10°C sıcaklıkta servo-hidrolik deney sistemi kullanılarak yapıldı. Elde edilen esneklik modülü ve çekme mukavemeti oranları (MRR ve TSR) suya duyarlılığı değerlendirmek için kullanıldı. Karışımlar MMR ve TSR değerlerinin %70’de küçük, eşit veya büyük olup olmadığına göre değerlendirildi. Çalışmanın esneklik modülü deneyini içermesinin önemli olduğu vurgulandı çünkü bu deney kaplama malzemelerinin yük dağılım kabiliyetlerinin ölçülmesinde sık olarak kullanılmaktadır. Yöntem modifiye Lottman deneyi gibi diğer deneyleri ile bazı benzerlikler göstermektedir. Dönel sıkıştırma kullanıldı çünkü bu yöntemdeki yoğurma durumundan dolayı arazi sıkıştırmasını darbeli sıkıştırırmalı Marshall yönteminden daha iyi simüle ettiği düşünülmektedir. Sonuçlar aynı örnekteki veriler ile iyi uyum göstermektedir. Deney koşullandırmadan önceki ve sonraki rölatif mukavemete dayanmaktadır. Hem ıslak hem de kuru mukavemetlerin düşük fakat oranların (MMR ve TSR) yüksek olduğu durumlar olabilir. Bu durum karışımları su hasarına karşı dirençli olarak gösterecektir ancak gerçek mukavemet değerleri ağır trafik yükleri için yetersiz olacaktır [85].

3.4. Tekrarlı Yük Sünme Deneyine Ait Bulgular ve İrdellemeler

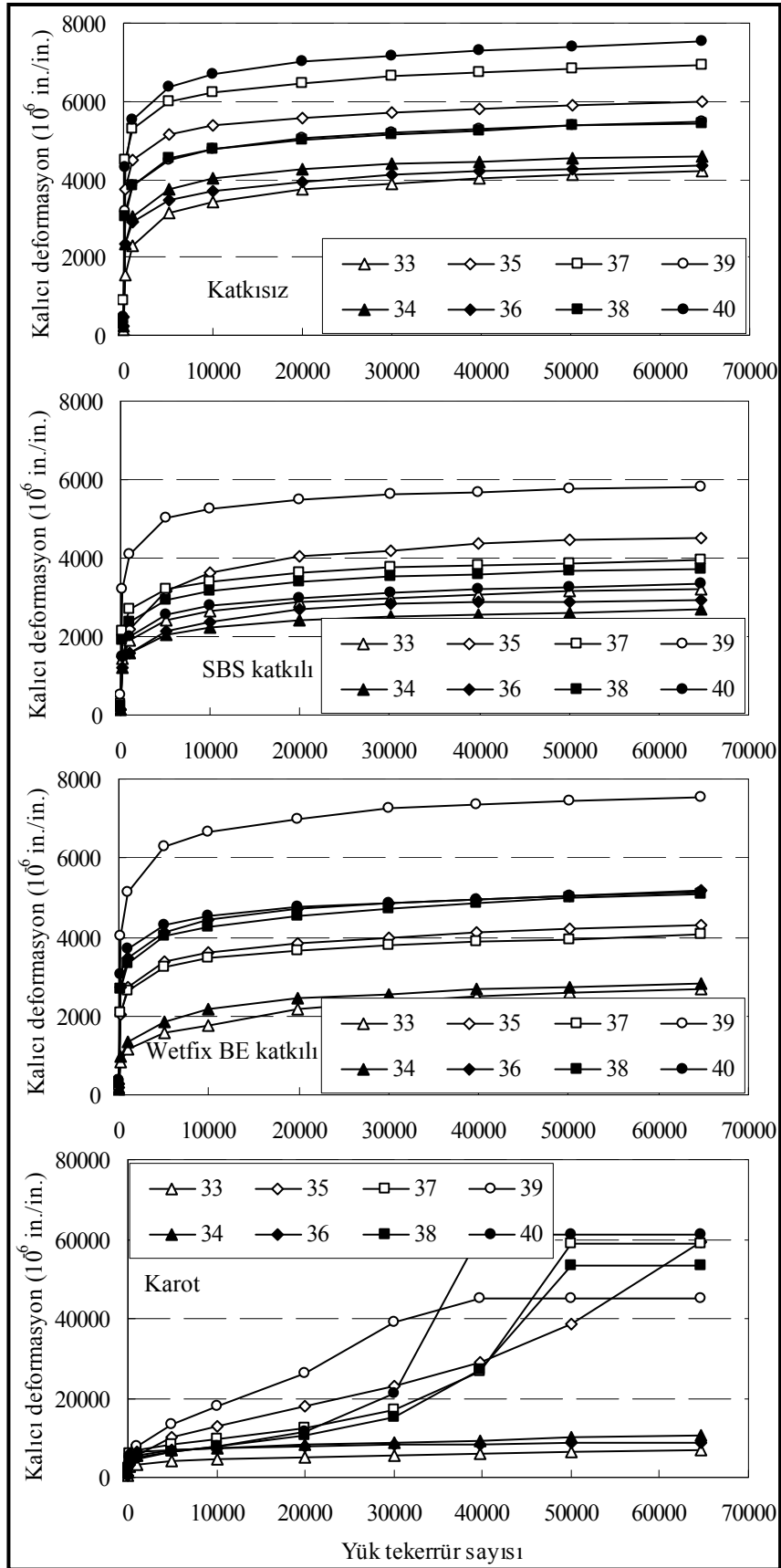
Tekrarlı yük sünme deneyi kalıcı deformasyon davranışını ölçmek için tekerlek izi deneylerine ilginç bir alternatiftir fakat geleneksel yöntem hakkında işlevsel ölçüm yöntemleri gibi çalışıp çalışamayacağı ve farklı karışım türleri arasında ayırt edici olup olmayacağı konusunda şüpheler bulunmaktadır [86]. Tekrarlı yük sünme deneyi kalıcı deformasyonu belirlemek için Marshall örnekleri üzerinde kullanılabilir [5].

Tekrarlı yük sünme deneyleri 40°C sıcaklıkta yapıldı. Koşulsuz ve üç koşullandırma sistemi uygulanan örnekler üzerinde sünme deneyi gerçekleştirildi.

Deneyden elde edilen kalıcı deformasyonlar belirli yüklemeye sayılarında özetlenerek Tablo 24’de verilmektedir. Şekil 73’de her bir karışım ve örnek için ayrı ayrı sunulmaktadır. Aynı koşullandırma türündeki örnekleri için aynı tip semboller kullanıldı.

Tablo 24. Tekrarlı yük sünme deneyi sonuçları

	Yükleme sayısı	Örnek numaraları ve kalıcı deformasyon (10^{-6} inç/inç)							
		33	34	35	36	37	38	39	40
KAROT	1	563	1597	272	2966	2446	1061	320	1017
	251	2651	4857	3236	5837	5961	4211	4973	3906
	1000	3267	5626	5533	6360	6823	5043	7904	4666
	5011	4178	6770	10041	7023	8396	6531	13495	6448
	10000	4692	7417	13048	7366	9641	7779	17774	7936
	19952	5277	8194	17940	7794	12270	10482	26241	11711
	30045	5711	8804	22887	8091	16790	15194	39046	21150
	39810	6079	9349	29126	8361	26641	27021	45251	60980
	50118	6453	9901	38737	8584	58984	53351	45251	60980
	64730	6949	10680	59172	8864	58984	53351	45251	60980
KATKISIZ	1	126	211	459	231	871	273	334	448
	251	1538	2332	3764	2362	4506	3039	3163	4287
	1000	2289	3059	4495	2880	5304	3833	3837	5511
	5011	3147	3726	5138	3447	5981	4518	4483	6374
	10000	3427	4006	5358	3692	6215	4767	4763	6696
	19952	3726	4257	5587	3918	6469	5017	5044	7008
	30045	3899	4382	5716	4096	6622	5156	5199	7179
	39810	4044	4460	5806	4195	6732	5256	5296	7302
	50118	4140	4537	5896	4264	6831	5365	5383	7388
	64730	4227	4605	5965	4373	6928	5435	5481	7531
SBS KATKILI	1	158	153	142	123	292	238	513	161
	251	1458	1224	1495	1195	2141	1896	3230	1501
	1000	1910	1598	2192	1594	2693	2390	4107	2021
	5011	2433	2039	3186	2142	3199	2931	5013	2562
	10000	2654	2221	3641	2388	3418	3155	5274	2796
	19952	2864	2413	4030	2710	3617	3388	5482	2990
	30045	2974	2509	4191	2814	3756	3515	5615	3123
	39810	3065	2557	4380	2881	3835	3583	5670	3205
	50118	3145	2625	4464	2890	3865	3661	5747	3267
	64730	3205	2682	4502	2929	3944	3699	5813	3350
WETFIX BE KATKILI	1	164	152	183	279	212	276	350	376
	251	841	956	2041	2711	2096	2680	4008	3039
	1000	1160	1352	2719	3451	2636	3347	5118	3708
	5011	1585	1862	3358	4134	3217	4015	6272	4297
	10000	1768	2155	3616	4422	3452	4264	6657	4527
	19952	2194	2428	3842	4701	3658	4553	7001	4756
	30045	2348	2523	3997	4836	3792	4733	7241	4860
	39810	2503	2664	4120	4942	3896	4873	7355	4964
	50118	2599	2749	4202	5057	3948	4984	7429	5027
	64730	2696	2825	4315	5163	4051	5104	7544	5141



Şekil 73. Koşullu ve koşulsuz örneklerin tekrarlı yük sünme deneyi sonuçları

Laboratuarda hazırlanan örneklerin hiçbirinde üçüncül deformasyon oluşmazken uygulamayı temsil etmek için kullanılan karot örneklerinin deformasyonunu gösteren eğrilerin çoğunda üçüncül sünme bölgesinin oluştuğu görüldü. Koşullandırma sistemi uygulanan karot örneklerinin biri hariç hepsinde üçüncül sünme bölgesi elde edildi. SBS modifiye bitümle hazırlanan karışımların sonuçlarının birbirine daha yakın olduğu görülmektedir.

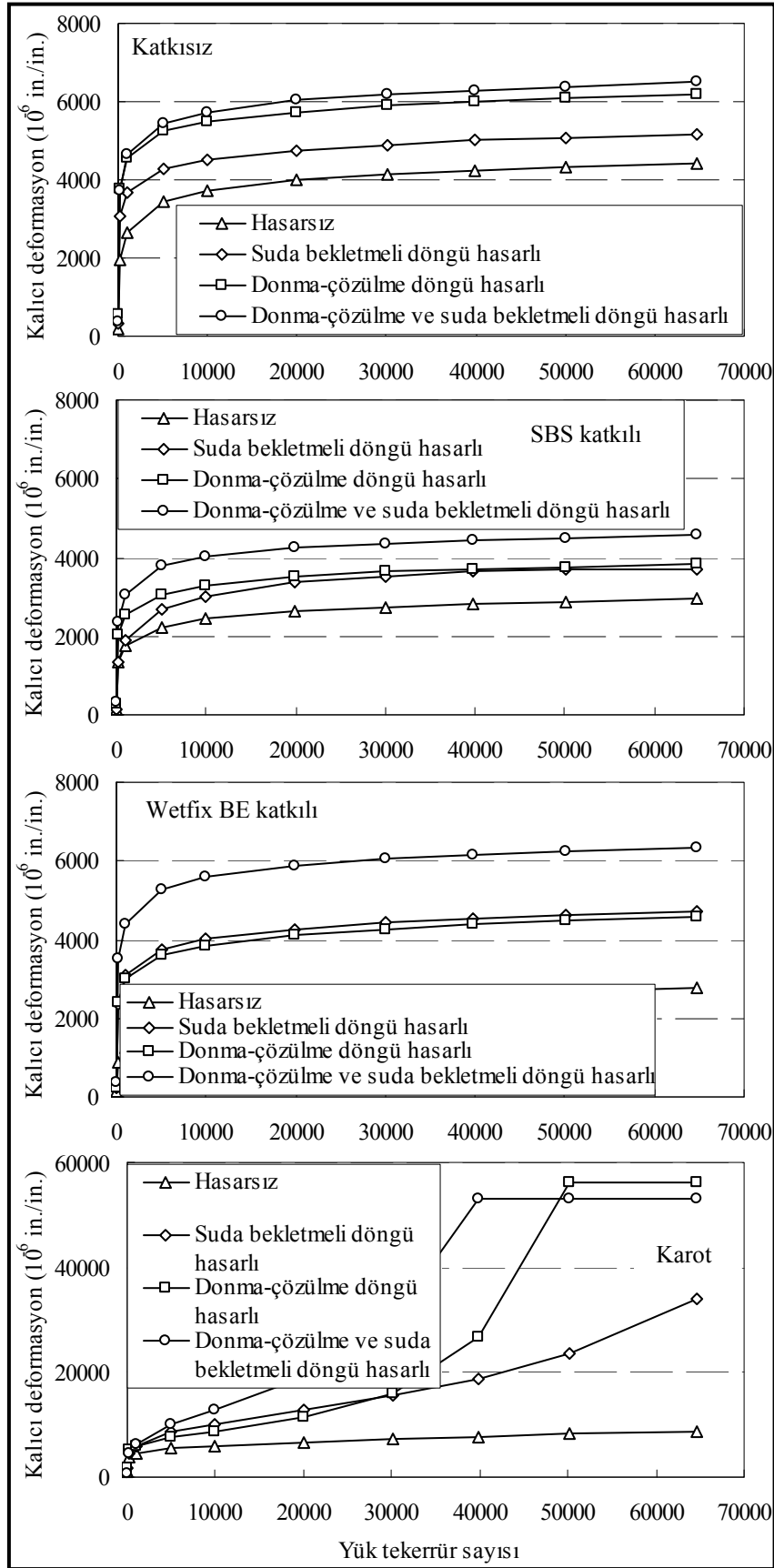
Karışımların her bir koşullandırma sistemindeki kalıcı deformasyonu ortalama değerler kullanılarak Şekil 74'te verildi. Katkısız, SBS katkılı ve karot örnekleri en çok deformasyonu don-çözülme ve suda bekletmeli döngü hasarında verdi. Sonra sırasıyla donma çözülme döngü hasarlı, suda beklemeli döngü hasarlı ve en küçük deformasyonu da hasarsız örnekler verdi. Wetfix BE katkılı örnekler ise suda beklemeli döngü hasarında, donma-çözülme döngü hasarından daha büyük kalıcı deformasyon değeri verdi.

Koşullandırma sistemlerinin karışımların deformasyonu üzerindeki etkisini değerlendirmek için hazırlanan Şekil 75'den görüldüğü gibi, bütün koşullandırma sistemlerinde en kötü performansı (en büyük deformasyon) karot örneklerinin verdiği, en küçük tekerlek izi potansiyelinin de SBS katkılı karışımın verdiği görülmektedir. Katkılı karışımların, katkısız olanlara göre açık bir üstünlük sağladığı görülmektedir.

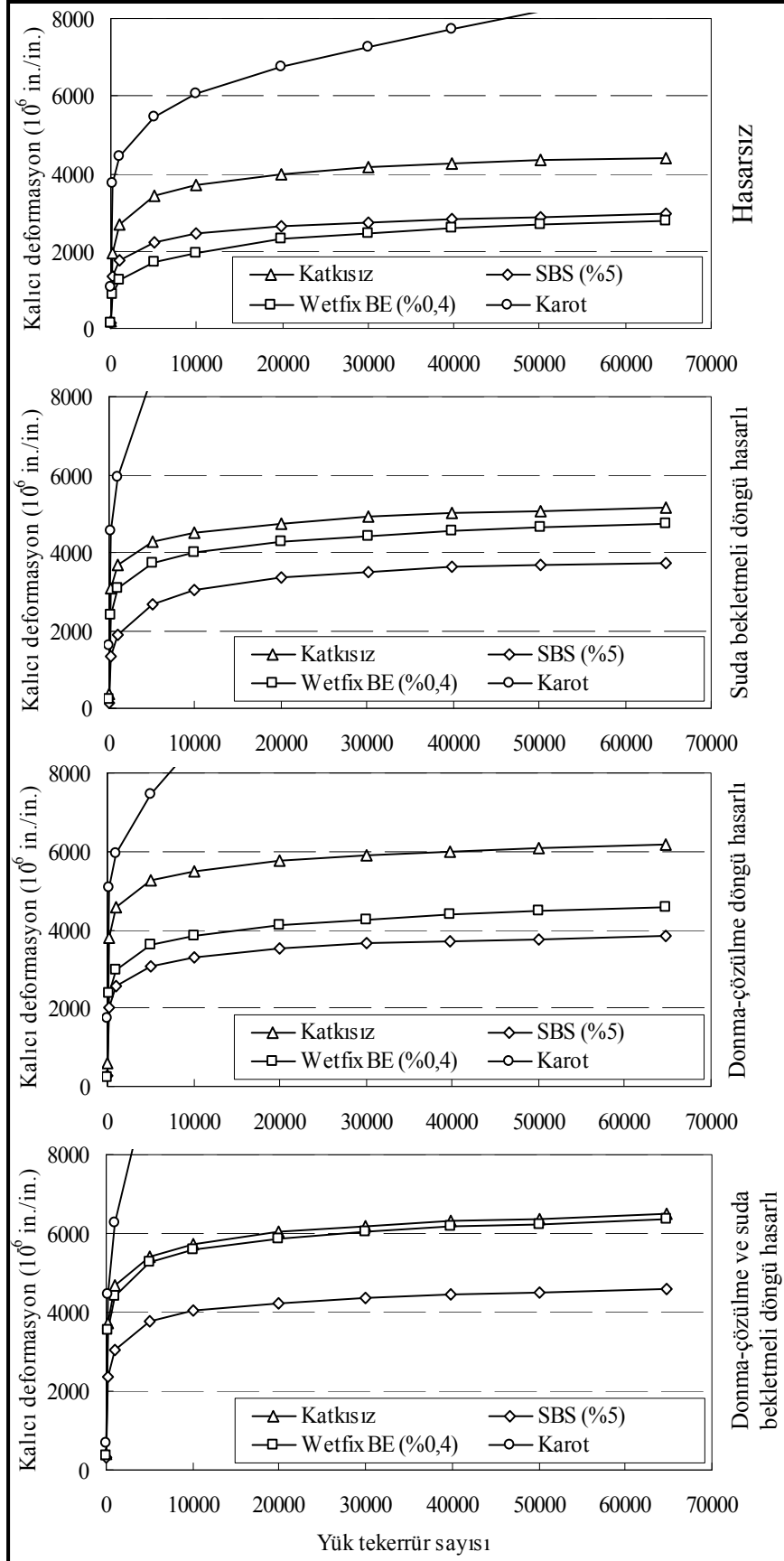
SBS polimer katkıların etkinliği yüksek sıcaklıkta (40°C) hem statik hem de tekrarlı sünme deneylerine açık olarak görüldü. Hazır modifiye bitüm ile hazırlanan karışımlar, laboratuarda hazırlana karışımlara göre biraz daha iyi kalıcı deformasyon direnci gösterdi. Tekrarlı yük sünme deneyi iyi bir tekerle izi belirleyicisi olarak görülmekte ve yoğun gradasyon için tekerlek izi açısından polimer modifiye karışımların daha iyi performans gösterdiği açık olarak ortaya konuldu. Açık olarak görüldü ki 40°C sıcaklıkta bütün geleneksel örnekler dağıldı ve çatlamlar görüldü. Buna rağmen modifiye örnekler bütünlüğünü korudu. SBS modifikasyonu karışımların tekerlek izi direncini artırmada oldukça etkili olmaktadır [72].

Dinamik sünme deneyinin değerlendirilmesi, bu deneyin tekerlek izi potansiyelini değerlendirmede kullanılabileceğini fakat bu durumda sonuçların daha güvenilir bir deneyle doğrulanması gerektiğini göstermektedir [87].

Seçilen yükleme sayıları ele alındığında, hasarsız ve koşullu bütün karışımlar için, SBS ve wetfix BE modifiye karışımlar, tekerlek izi oluşumu açısından, katkısız karışımlara göre yaklaşık 1,3 kat ve karotlara göre yaklaşık 9 kat daha fazla iyileşme oluşturmaktadır.



Şekil 74. Koşullandırma sisteminin kalıcı deformasyona etkisi



Şekil 75. Koşullandırma sistemlerinin karışım türleri üzerindeki etkisi

3.5. Fransız Tekerlek İzi Deneyine Ait Bulgular ve İrdelemeler

LCPC yöntemi, sıcak karışım asfalt kaplamaların tekerlek izini önlemek için Fransa'da başarı ile kullanılmaktadır. Son zamanlarda deney Amerika'da da kullanılmaktadır. Deney aynı anda iki örneği test etmeye uygundur. Araştırmalar gerçek kaplama performansı ile LCPC deney sonuçları arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir [88-89].

Genel olarak, tekerlek izi deneylerinin uygulamadaki tekerlek izleri ile iyi bir korelasyon göstermesine rağmen günümüzde farklı trafik yükleri ve çevresel koşullar altında gerçek tekerlek izi ile tekerlek izi deney sonuçları arasında sayısal bir ilişki bulunmamaktadır. Bundan dolayı tekerlek izi deneyleri, gerçek tekerlek izinin sayısal tahmininde artık kullanılmamaktadır. Bununla birlikte bu deneyler tekerlek izi potansiyelini güvenli bir şekilde tahmin edebilir ve tekerlek izi potansiyeline göre karışımları karşılaştırabilir. Tekerlek izi deneyleri özellikle taşı iskeletli karışımların veya modifiye bitüm içeren karışımların tekerlek izi performansını değerlendirmek için önerilmektedirler. [90].

Marshall sıkıştırıcısıyla hazırlanan silindirik örneklerin kalıcı deformasyon deneyi sonuçları tekerlek izi deneyi sonuçlarıyla karşılaştırıldığı çalışmada 40°C sıcaklıktaki tekrarlı sünme deneyi, yüksek sıcaklıktaki (60°C) LCPC tekerlek izi deney sonuçları ile iyi bir korelasyon göstermedi. Elastomerik modifiye asfalt karışımların performans seviyeleri aynı karışım içi farklı performans yaklaşımlarında farklı olabilmektedir. Gradasyon değişiklikleri, tekerlek izi deney metodunun etkinliğinin değerlendirilmesi açısından sıkıştırma yönteminden daha etkilidir [91].

Deneyler 60°C sıcaklıkta hem kuru ortamda hem de su içerisinde yapıldı. Belirli geçiş sayılarındaki tekerlek izi oluşumu potansiyelleri Şekil 76 ve Şekil 77'de belirtilmektedir. SBS modifiyeli karışımların tekerlek izi oluşumu potansiyelinin değişim aralığı katkısız karışımlarinkine göre daha küçük olmaktadır. Deformasyonlar, sağ tekerlekler, sol tekerlekler ve ortalamalar anlamında değerlendirilebilmektedir. Şekiller irdelendiğinde, sulu ortamda yapılan deneylerin örnek üzerinde olumsuz bir etki bıraktığı, hem katkısız hem de SBS katkılı örneklerde daha çok deformasyona neden olduğu görüldü fakat katkısız karışımlar sol tekerlek ve ortalamalar anlamında su içerisinde, daha düşük tekerlek izi oranı gösterdi. SBS katkılı karışımlar katkısız karışımlara büyük bir üstünlük sağladı. Su içerisindeki SBS katkılı karışımlar bile kuru ortamda yapılan katkısız karışımlardan daha küçük tekerlek izi oluşumu potansiyeli verdi.

Tablo 25. Katkısız kuru örneklerin tekerlek izi deneyi sonucu

DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
Ölçüm N./°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
Sol Numune							
A1	7,82	8,98	9,21	9,71	9,87	10,78	11,55
A2	7,71	10,25	10,74	11,10	11,66	13,08	13,80
A3	7,40	8,64	8,96	9,55	9,75	10,80	11,42
B1	10,81	12,42	13,12	13,15	13,82	15,64	16,22
B2	9,76	12,64	12,91	13,95	14,96	16,45	17,84
B3	10,50	11,77	12,70	13,18	13,96	15,74	16,62
C1	10,34	11,99	12,48	12,71	13,46	15,23	16,17
C2	9,74	13,59	14,31	14,78	15,60	18,06	18,25
C3	10,38	12,92	13,54	13,93	14,69	16,36	17,42
D1	10,54	12,28	12,80	12,92	13,68	15,25	15,84
D2	8,09	11,72	12,46	12,77	13,89	15,91	17,09
D3	8,89	11,31	11,89	12,13	13,13	14,81	15,77
E1	10,15	11,52	11,74	11,82	12,28	13,31	13,97
E2	7,88	10,55	12,04	12,20	12,22	13,54	14,19
E3	6,78	11,50	12,06	12,15	12,71	13,55	14,58
Ortalama	9,12	11,47	12,06	12,40	13,05	14,57	15,38
%TiO	-	2,35	2,94	3,28	3,93	5,45	6,26
Sağ Numune							
E3	10,88	12,02	12,24	12,28	12,69	13,55	14,00
E2	6,86	8,82	9,28	9,82	10,23	11,37	12,03
E1	8,45	9,86	9,90	9,93	10,41	11,11	11,75
D3	11,56	13,06	13,29	13,35	13,94	14,89	15,49
D2	9,29	11,78	12,10	12,38	13,01	14,36	15,26
D1	9,92	11,56	12,03	12,60	12,95	13,99	14,59
C3	11,14	11,56	12,05	12,10	12,69	12,90	14,27
C2	9,14	12,17	12,70	12,83	13,35	14,70	15,19
C1	9,92	12,87	12,90	13,04	13,17	14,51	14,80
B3	8,47	9,46	10,25	10,45	11,56	12,32	12,90
B2	8,85	10,96	11,74	12,25	12,77	14,15	14,99
B1	9,74	11,35	11,73	12,29	12,55	13,64	14,36
A3	7,51	8,99	9,24	9,31	9,89	9,91	11,21
A2	5,19	7,93	8,06	8,39	8,80	9,52	10,70
A1	7,87	9,18	9,74	9,78	10,27	10,79	11,57
Ortalama	8,99	10,77	11,15	11,39	11,89	12,78	13,54
%TiO	-	1,79	2,16	2,40	2,90	3,79	4,55
ORT %TiO	-	2,07	2,55	2,84	3,41	4,62	5,41

Tablo 26. Katkısız örneklerin su içerisindeki tekerlek izi deneyi sonucu

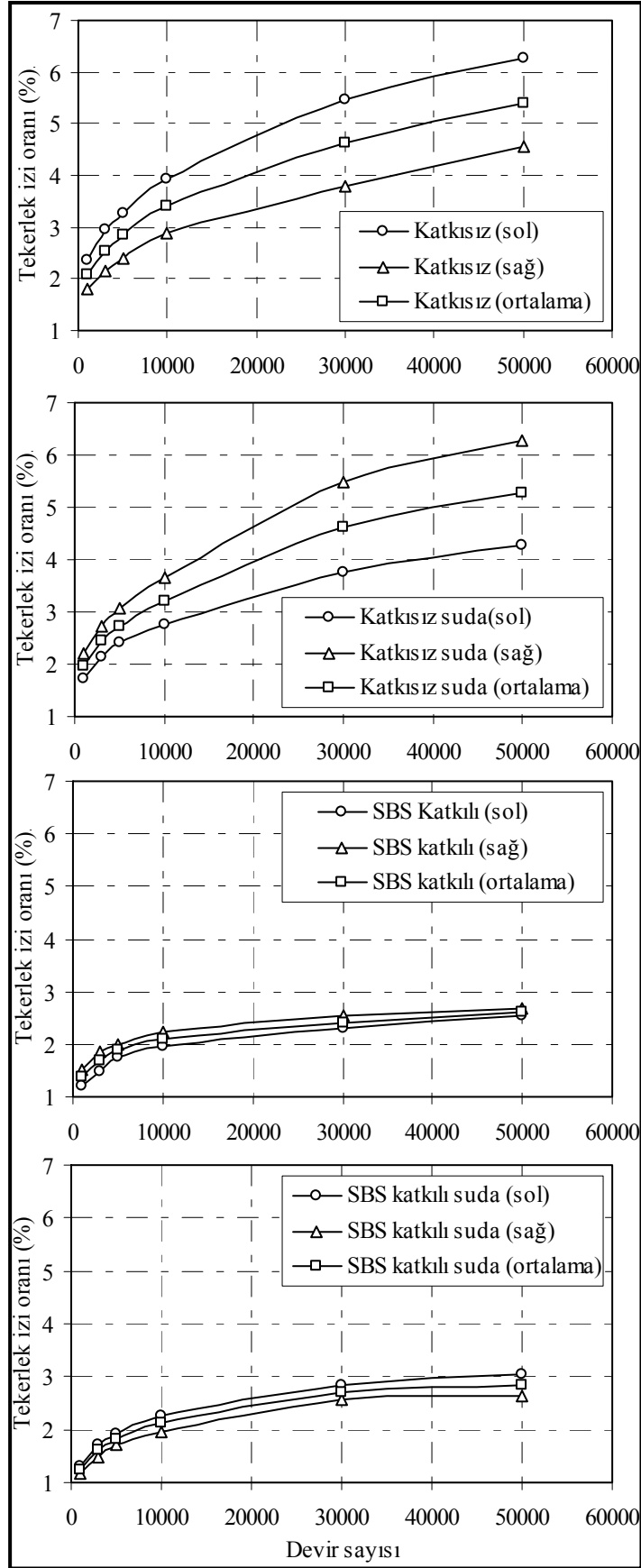
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
Ölçüm N./°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
Sol Numune Dp=2,515 Sıkışma,%=100,0							
A1	7,59	8,78	9,36	9,40	9,45	10,68	10,96
A2	7,73	9,59	9,84	9,90	10,61	11,55	12,12
A3	6,97	8,57	8,65	9,61	9,66	10,20	10,77
B1	9,75	11,18	11,48	11,58	11,98	13,18	13,68
B2	9,68	11,74	12,10	12,50	12,97	14,13	14,83
B3	9,49	11,13	11,70	11,74	12,49	13,43	13,83
C1	10,40	12,17	12,26	12,30	12,93	13,77	14,23
C2	10,00	12,39	12,79	13,14	13,60	14,76	15,32
C3	9,14	11,03	11,97	12,29	12,66	13,58	14,21
D1	8,74	9,76	10,30	10,60	10,64	11,85	12,22
D2	10,45	12,66	13,16	13,57	13,60	15,11	15,69
D3	10,74	12,60	12,97	13,36	13,82	14,56	15,17
E1	7,77	9,12	9,57	9,63	9,75	10,52	11,08
E2	8,94	10,97	11,51	11,76	11,98	13,17	13,41
E3	8,85	10,49	10,89	11,11	11,34	12,20	12,68
Ortalama	9,08	10,81	11,24	11,50	11,83	12,85	13,35
%TİO	-	1,73	2,15	2,42	2,75	3,76	4,26
Sağ Numune Dp=2,505 Sıkışma,%=99,6							
E3	11,44	13,14	13,54	13,56	14,26	15,78	16,61
E2	9,68	12,40	13,07	13,95	14,50	16,36	17,54
E1	10,53	12,53	12,83	12,86	13,56	15,26	16,08
D3	11,80	13,59	13,70	14,44	14,66	16,87	17,48
D2	10,34	13,35	14,11	14,67	15,40	17,90	18,80
D1	11,27	14,00	14,69	15,24	15,67	18,14	18,76
C3	11,31	13,05	13,69	13,75	14,54	16,05	17,49
C2	11,46	14,16	14,75	15,15	15,77	17,85	18,20
C1	10,84	12,90	13,28	13,70	13,93	15,53	16,41
B3	11,17	12,78	13,12	13,38	13,91	15,86	16,83
B2	9,94	12,59	13,27	13,63	14,37	16,45	16,90
B1	9,63	11,22	12,39	12,64	13,32	15,19	15,84
A3	7,08	10,38	10,64	10,83	10,98	12,36	13,31
A2	4,71	6,56	7,19	7,32	8,42	9,84	10,46
A1	7,77	9,17	9,66	9,78	10,36	11,53	12,40
Ortalama	9,93	12,12	12,66	12,99	13,58	15,40	16,21
%TİO	-	2,19	2,73	3,06	3,65	5,47	6,28
ORT %TİO	-	1,96	2,44	2,74	3,20	4,62	5,27

Tablo 27. SBS katkılı kuru örneklerin tekerlek izi deneyi sonucu

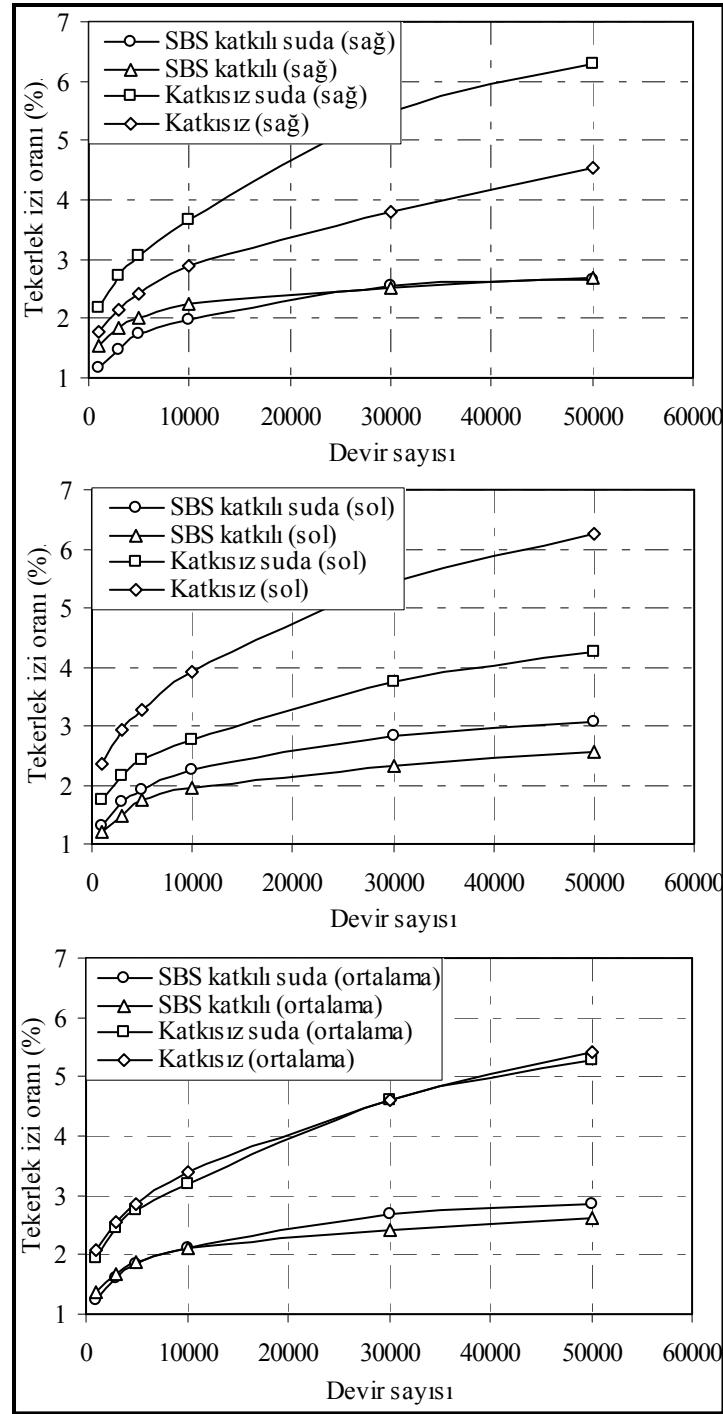
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
Ölçüm N./°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
Sol Numune Dp=2,422 Sıkışma,%=96,3							
A1	6,16	7,45	7,73	7,79	7,93	8,00	8,17
A2	7,08	8,73	8,90	9,17	9,59	9,98	10,22
A3	8,15	9,49	9,62	9,74	9,88	10,01	10,31
B1	8,99	9,19	9,71	10,47	10,87	10,99	11,01
B2	7,66	8,17	8,42	9,58	9,97	10,27	10,28
B3	7,08	7,37	7,72	8,46	8,54	8,96	9,23
C1	7,41	8,53	8,68	8,78	8,92	9,36	9,42
C2	5,98	7,59	7,80	7,89	8,06	9,28	9,71
C3	8,77	10,08	10,16	10,19	10,21	10,31	10,42
D1	6,94	8,15	8,49	8,55	8,82	8,92	9,23
D2	4,77	6,64	6,88	7,17	7,31	7,91	8,48
D3	6,88	8,33	8,53	8,65	8,70	9,40	9,87
E1	3,57	4,76	5,29	5,34	5,41	5,76	5,82
E2	1,99	3,86	4,13	4,22	4,46	4,80	5,08
E3	5,44	6,71	7,14	7,21	7,50	7,64	7,87
Ortalama	6,46	7,67	7,95	8,21	8,41	8,77	9,01
%TiO	-	1,21	1,49	1,76	1,95	2,31	2,55
Sağ Numune Dp=2,427 Sıkışma,%=96,5							
E3	6,64	7,76	8,01	8,10	8,31	8,48	8,56
E2	6,30	8,60	8,77	9,01	9,15	9,70	9,80
E1	8,16	9,29	9,48	9,72	9,77	9,95	10,06
D3	8,21	8,97	9,73	9,86	9,91	10,41	10,43
D2	6,62	7,52	9,14	9,47	9,71	9,98	10,19
D1	9,14	10,65	10,71	10,83	10,90	11,25	11,53
C3	7,60	8,78	8,90	9,14	9,22	9,40	9,85
C2	7,78	9,50	9,89	9,90	10,25	10,37	10,67
C1	9,16	10,31	10,63	10,76	11,04	11,23	11,35
B3	6,38	7,98	8,20	8,45	8,64	8,97	9,03
B2	6,69	8,96	9,08	9,15	9,65	9,84	10,00
B1	5,40	8,39	8,45	8,49	8,93	9,12	9,21
A3	4,67	5,93	6,05	6,10	6,69	7,06	7,10
A2	4,60	6,50	6,79	6,80	7,10	7,42	7,49
A1	4,54	5,77	5,85	6,18	6,41	6,71	6,94
Ortalama	6,79	8,33	8,65	8,80	9,05	9,33	9,48
%TiO	-	1,53	1,85	2,00	2,25	2,53	2,69
ORT %TiO	-	1,37	1,67	1,88	2,10	2,42	2,62

Tablo 28. SBS katkılı örneklerin su içerisindeki tekerlek izi deneyi sonucu

DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
Ölçüm N./°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
Sol Numune Dp=2,438 Sıkışma,%=96,9							
A1	3,75	4,83	5,28	5,98	6,13	6,70	7,52
A2	6,11	7,85	8,60	8,71	8,95	9,98	10,06
A3	7,21	8,16	8,53	8,79	9,13	9,48	9,58
B1	6,33	7,26	7,53	7,62	8,02	8,41	8,51
B2	7,03	8,33	9,18	9,24	9,65	10,22	10,27
B3	6,18	7,60	8,10	8,30	8,49	9,24	9,35
C1	5,93	7,14	7,19	7,26	7,44	7,84	8,04
C2	6,59	8,03	8,58	8,89	8,91	9,14	9,50
C3	7,59	8,54	8,60	8,80	9,50	10,08	10,08
D1	4,84	6,27	6,39	6,64	6,92	7,57	7,79
D2	4,96	6,85	7,13	7,89	8,24	9,11	9,54
D3	7,17	8,38	8,81	8,87	8,94	9,33	10,04
E1	4,84	6,32	6,70	6,81	7,19	7,77	7,82
E2	5,24	6,71	7,35	7,42	7,94	8,67	8,71
E3	6,29	7,43	7,81	7,86	8,46	9,12	9,20
Ortalama	6,00	7,31	7,72	7,94	8,26	8,84	9,07
%TiO	-	1,31	1,71	1,93	2,26	2,84	3,06
Sağ Numune Dp=2,417 Sıkışma,%=96,1							
E3	8,46	9,09	9,18	9,54	9,68	10,13	10,21
E2	6,07	6,38	6,43	6,49	6,95	7,40	7,44
E1	6,43	7,82	7,90	7,95	8,21	8,59	8,73
D3	8,19	8,99	9,00	9,07	9,25	10,58	10,65
D2	7,43	8,72	9,10	9,25	9,53	9,95	9,98
D1	7,46	8,60	8,69	8,71	9,23	9,69	9,74
C3	8,04	8,94	9,18	9,24	9,44	9,79	9,81
C2	6,38	7,70	8,15	8,55	8,79	8,88	8,94
C1	8,42	9,65	9,72	9,90	9,98	10,00	10,34
B3	5,65	6,63	7,10	7,38	7,51	7,86	7,95
B2	3,75	5,64	6,34	6,38	6,92	7,04	7,10
B1	6,09	8,34	8,53	8,77	8,84	9,26	9,27
A3	5,57	6,50	6,80	7,00	7,12	7,44	7,47
A2	4,12	5,56	5,72	6,37	6,45	7,26	7,35
A1	2,58	3,79	5,05	5,92	6,25	9,21	9,22
Ortalama	6,31	7,49	7,79	8,03	8,28	8,87	8,95
%TiO	-	1,18	1,48	1,73	1,97	2,56	2,64
ORT %TiO	-	1,25	1,60	1,83	2,11	2,70	2,85



Şekil 76. Tekerlek izi deneyi sonuçları



Şekil 77. Su içerisinde ve kuru ortamdaki ortalama tekerlek izi oranları

Ana amacını kontrol ve modifiye asfalt karışımların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinin oluşturduğu çalışmada, sıcak karışım asfalt kaplamaların kalıcı deformasyon direnci üzerine geleneksel ve beş modifiye asfalt karışım çalışıldı. Amorf polialfaolefin, selüloz fiber, poliolefin bitümlü selüloz fiber ve stiren bütadien stiren (SBS)

modifiyer olarak kullanıldı. Dolaylı çekme mukavemeti, dolaylı çekme, statik ve tekrarlı sünme ve LCPC tekerlek izi deneyleri farklı yüklemeye koşulları ve sıcaklıklarda kullanıldı. Araştırma LCPC tekerlek izi deneyi ve diğer mekanik deneyler arasındaki ilişkiyi karşılaştırma üzerine odaklandırıldı. LCPC ve tekrarlı sünme deneyi sonuçlarına göre SBS modifiyeli karışımlar tekerlek izi direnci açısından en iyi karışımlar olarak bulundu. Katkılar farklı performans seviyeleri gösterdi fakat geleneksel karışıma göre daha yüksek kalıcı deformasyon direnci ortaya koydu [92].

Günümüzde sıcak karışım asfalt betonunun suya duyarlılığını test etmek için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri ilkin belirli bir asfalt-agrega birleşiminin su hasarı direncinin derecesini belirlemek, farklı tipte ve miktarlarda agregalardan oluşan karışımları karşılaştırmak veya soyulma önleyici katkıların etkinliğini değerlendirmek için geliştirildi. Bütün suya duyarlılık deneyleri koşullandırmadan önce ve sonra tek bir parametrenin değiştirilmesiyle laboratuvardaki su hasarının etkilerini değerlendirmektedir [93].

Su hasarı problemi, Marshall stabilite oranı, dolaylı çekme mukavemeti oranı ve dolaylı çekme (esneklik modülü) deneyleri ile değerlendirilebilir. Asfalt kaplama örneklerinin dolaylı çekme mukavemeti oranları Marshall stabilitesi oranlarından daha düşük olmaktadır. Aynı karışım için farklı oranlar elde edilebilir bu yüzden su hasarı problemi oldukça karmaşık bir problemdir [79].

Fakat önerilen agrega-asfalt bileşimini değerlendiren ve suya duyarlılık potansiyelini veya farklı soyulma önleyici katkıların etkinliğini belirleyen dünyaca kabul gören bir yöntem bulunmamaktadır. Bitümlü karışımların suya duyarlılığını değerlendirmek için daha iyi yöntemler araştırıldı. Şu anda kullanılan metodlar tartışılmaktadır [8].

Performans değerlendirmesinde ilk adım, gerçek yol koşullarıyla iyi ilişkili örnekler için işlevsel ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesidir. İsveç'te yapılan bir çalışma geleneksel Marshall sıkıştırma yönteminin bu yönden uygun olmadığını kanıtladı. Bu yöntemin uygun olmayışı diğer ülkelerdeki çeşitli araştırmacılar tarafından da kanıtlanmıştır. Aynı sıkıştırma derecesinde laboratuvar sıkıştırılmış örnekler, arazide sıkıştırılmış örneklerden genellikle daha iyi mekanik özellikler (dolaylı çekme rijitliği modülü, dinamik sünme deneyi ve dolaylı çekme deneyi) verdi. Laboratuvar ve uygulama arasındaki farklılıklar farklı karışımlar için aynı değildir [86].

Alışılmış deney yöntemleri (Marshall deneyi, tekerlek izi deneyi, tekrarlı yük deneyleri) asfaltın kalıcı deformasyon direncini karakterize etmede yetersizdir. Bu, bu deneylerin diğer uygulamalar, örneğin, verilen bileşim sınırları içerisinde karışım tasarım prosedürü

için uygun olmadığı anlamına gelmemektedir. Bununla birlikte, farklı karışım sınıflarının deformasyon davranışlarının güvenli karşılaştırılması bu deneylerde mümkün değildir [94].

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırma; koşullandırma sistemlerinin geleneksel ve modifiye asfalt karışımlar üzerindeki etkilerinin araştırılması konusuna odaklanmaktadır. Araştırmadan, aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşmak olanaklı gözükmemektedir.

Laboratuvar ve arazi karotları arasında, geleneksel karışımlar için, arazi ve laboratuvar performans farklılığının araştırılması planlanan araştırma amaçlarındandır. Ülkemizde de yaygınca kullanılan Marshall sıkıştırma tasarım yönteminin uygulamadan daha iyi sonuç verdiği bilinen bir durumdur. Bu durum, laboratuvarda düşen çekiç sıkıştırma yöntemi kullanılırken, arazide silindir sıkıştırmasının kullanılması yani sıkıştırma biçimi farklılığından, yoğunluk kontrollü çalışılsa da uygulamada oluşan daha yüksek boşluk varlığından, henüz standartlara giremeyen köşelilik faktöründen, katkılı karışımlarda katıların depolanma stabilitesinden ve reolojik yapı değişmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda, konu, dolaylı çekme mukavemeti, dolaylı çekme ve tekrarlı sünme deneyleri ile incelenmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti deney sonuçları incelendiğinde; seçilen farklı koşullamalar için bu performans farklılığı açıkça görülebilmektedir. Laboratuvar örnekleri, arazi karotlarına göre; hasarsız karışımlar; 10°C'de 1,15 kat, 20°C'de 1,20 kat; suda bekletmeli koşullu karışımlar 10°C'de 1,19 kat 20°C'de 1,32 kat; donma-çözülme koşullu olanlar, 10°C'de 1,25 kat, 20°C'de 1,35 kat; çoklu koşullama sistemli örnekler 10°C'de 1,35 kat 20°C'de 1,35 kat daha yüksek dolaylı çekme mukavemeti yani daha yüksek çatlama direnci oluşturmaktadır. Seçilen koşullama sistemleri incelenirse, uyguladıkları hasar düzeyinde, donma çözülme performans farklılığı daha yüksek düzeyde (10°C'de 1,25, 20°C'de 1,35) kalmaktadır. Bu durumda; çatlama probleminin doğası düşünüldüğünde, hasar biçimiyle uyumlu bir sonuç olarak görülmektedir.

Laboratuvar ve arazi örneklerinin performans farklılığı, dolaylı çekme deneyleri ile değerlendirilmiştir. Dolaylı çekme deneyi ile esneklik modülleri kıyaslandığında; 20°C ve 40°C sıcaklık koşulları için performans farklılığı yani beklenen, laboratuvar örneklerinin daha yüksek direnç düzeyi görülebilmektedir.

Katkısız laboratuvar örneklerinin esneklik modülleri ile arazi karotlarının esneklik modülleri karşılaştırıldığında, hem 20°C hem de 40°C sıcaklık koşullarında, laboratuvar örnekleri daha yüksek esneklik modülü ortaya koymaktadır. Esneklik modülü, asfalt kaplamaların yük yayma kapasitesinin bir ölçütü olarak düşünüldüğünde, hem yorulma

direnci (20°C) hem de yüksek sıcaklık olan 40°C koşulu için tekerlek izi oluşumu direnci bakımından, laboratuvar örnekleri daha yüksek dayanım değeri göstermektedir. Hasarsız ve 3 farklı koşullama sistemi içinde, laboratuvar örnekleri arazi karotlarına göre daha yüksek esneklik modülü göstermektedir. Her iki koşullama sisteminin bir arada uygulandığı üçüncü koşullandırma sisteminde, birinci ve ikinci koşullama sistemlerine göre daha düşük esneklik modüllerinin elde edilmesi, esneklik modülü yaklaşımı ile koşullandırma sistemlerinin etkinliğinin yorumlanabileceğini işaret etmektedir. 20°C sıcaklık koşulu dolaylı çekme deneyi için yorumlandığında, katkısız örnek ile karot esneklik modülü ortalamaları, hasarsız örnekler için 1.21, birinci koşul hasar için 1.46, ikinci koşul hasar için 1.38, üçüncü koşul hasar için 1.52 olmaktadır. Benzer biçimde, 40°C sıcaklık koşulu dolaylı çekme deneyi için yorumlandığında, katkısız örnek ile karot esneklik modülü ortalamaları, hasarsız örnekler için 1.40, birinci koşul hasar için 1.42, ikinci koşul hasar için 1.49, üçüncü koşul hasar için 1.59 olarak hesaplanmaktadır. Yüksek sıcaklıkta, daha yüksek oranların yani daha yüksek laboratuvar performansının buna karşılık daha düşük arazi performansının görülmüş olması, kaplamaların bozulmasında sıcaklık etkisinin önemini açıkça göstermektedir. Su hasarı, kendini yüksek sıcaklıkta, tekerlek izi olarak göstermektedir. Bu bağlamda, özgün bir sonuç olarak da, su hasarı-tekerlek izi ilişkisi hipotezi bu bağlamda desteklenmektedir.

Laboratuvar ve arazi karotlarının performans farklılığı, tekrarlı sünme deneyleri ile de, tekerlek izi oluşumu anlamında karşılaştırılmıştır. Hasarsız örnekler için laboratuvar değeri ile karot değerleri oranlandığında, seçilen yükleme süresi bağlamında 1.99 kat; birinci hasar koşulu için 6.58 kat, ikinci hasar koşulu için 9.08 kat, üçüncü hasar koşulu için 8.16 kat tekerlek izi oluşumu direnci oluşmaktadır. Bu sonuçlar, koşullama sistemleri ile yani kaplamanın su hasarına maruz kalması ile birlikte, tekerlek izi oluşum direncinin daha da azaldığını göstermektedir. Esneklik modülü deneylerinde ulaşılan sonuçlar ile tekerlek izi deneylerinden ulaşılan sonuçlar bu bağlamda birbirini doğrulayıcı yönde gelişmektedir.

Araştırmanın ana amaçlarından birisi de, polimer ve amin katkılı farklı tür katkılı karışımların performansının geleneksel karışımlarla karşılaştırılması olmaktadır. SBS ve WETFIX katkılı modifiye karışımların dolaylı çekme mukavemet değerleri incelendiğinde, hem 10°C sıcaklıkta hem de 20°C sıcaklıkta, katkılı karışımlar daha yüksek dolaylı çekme mukavemeti oluşturmaktadır. Bu durum, katkıların, kaplamanın çatlama direncini iyileştirdiği biçimde, yorumlanmaktadır.

Dolaylı çekme deneyi ile esneklik modülleri karşılaştırıldığında, katkılı karışımlar hem 20°C hem de 40°C sıcaklık değerlerinde, katkısız örneklere göre daha yüksek esneklik modülü oluşturmaktadır. Bu bağlamda, modifiye karışımlar katkısız karışımlara göre, daha fazla yük yayma kapasitesi göstermekte, dolayısıyla yorulma ve tekerlek izi oluşumu dayanımları katkılarla iyileşmektedir. Katkılarının etkinliği, dolaylı çekme deneyi ile ortaya koyulabilmektedir.

Kullanılan koşullandırma sistemleri esneklik modülü üzerinde etkili olmaktadır. Fakat orta sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda suya dayalı koşullandırma sistemlerinin etkisi, deney uygulama sıcaklığının etkisinden daha düşük olmaktadır. Yani deney sıcaklığı, koşullandırma sistemlerinden daha etkili olmaktadır.

Tekrarlı sünme deneyleri, katkılı ve katkısız olarak laboratuvar örnekleri için gerçekleştirilmiştir. 40°C sıcaklıkta gerçekleştirilen tekrarlı sünme deneylerinde, seçilen yükleme sayısı sonucunda, modifiye karışımlar daha yüksek tekerlek izi direnci göstermektedir.

Bilgisayarlı tomografi tekniği, hasarsız bir deney yöntemi olarak karışımların değerlendirilmesinde yararlı olmaktadır. Karışımlardaki kaba agrega dağılımı ve boşluk varlığı ve dağılımı belirlenebilmektedir. Hasarlı deneylerden sonra oluşan hasarlar görülebilmektedir. Tomografi incelemelerinden, karot örneklerindeki boşlukların daha küçük olduğu fakat adet olarak daha fazla olduğu, katkılı karışımlar içerisindeki boşlukların ise daha büyük ve sayıca daha az olduğu görüldü. Dolaylı çekme mukavemeti deneyinde meydana gelen hasarın örneğin merkezinden başladığı ve boşlukları birleştirerek geliştiği sonucuna varıldı.

Mekanik ve deneysel yaklaşımların öne çıktığı günümüzde, yoğun gradasyonlu karışımların, katkısız ve modifiyeli olarak, performans sorgulamalarında, bu araştırmada kullandığımız hasar biçimleri bir çevresel hasar modelleme (ECS) olarak kullanılabilirler.

Bu yönde ileride yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler uygun görülmüştür.

Dolaylı çekme deneyleri sonucunda deney sıcaklığının etkisinin (20°C ve 40°C sıcaklık esas alındığında) koşullandırma türünün etkisinden daha büyük olduğu anlaşıldı. Bu durumun farklı sıcaklıklar için (örneğin 10°C, 20°C, 30°C ve 40°C veya daha sık sıcaklık aralıklarında) araştırılması önemli bir çalışma konusu olarak düşünülmektedir. Bu şekilde kullanılan koşullandırma türünün ve seçilen yüklü sürenin etkisinin ne kadar sıcaklık farkının oluşturduğu etkiye eşit veya yakın bir etki oluşturduğu konusunda bilgi edinilebileceği umulmaktadır.

Çatlamanın boşluk varlığı veya dağılımıyla ilişkisinin daha doğru anlaşılabilmesi için, deney örneğinin noktasal veya çizgisel yükleme yoluyla değil, düzlemsel yükleme yapabilen bir yöntemle ve/veya en zayıf kesitinden zorlayarak kıracak bir yöntemle test edilmesinin daha etkili olacağı düşünülmektedir. Agreganın iskeletinin daha net olarak görüntülenebilmesi için asfalt kaplamalarda kullanılacak bir görüntüleme cihazının kullanılması ve doğru mas değeri ve x ışını dalga boyunun seçilmesi faydalı olacaktır.

5. KAYNAKLAR

1. Abo-Qudais, S., The Effects of Damage Evaluation Techniques on the Prediction of Environmental Damage in Asphalt Mixtures, Building and Environment 42 (2007) 288–296.
2. Matthews, J.M. ve Monismith C.L., The Effect of Aggregate Gradation on the Creep Response of Asphalt Mixtures and Pavement Rutting Estimates, Effects of Aggregate and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1147, Philadelphia, (1992).
3. Abdulshafi, A., Rutting-Review of Existing Models and Some Application to Saudi Arabia, Proceedings of 3rd IRF Middle East Regional Meeting, February 1988, Riyadh, 6, 244-256.
4. Robertus, C. ve Mulder, E.A., Koole RC. SBS Modified Bitumen for Heavy Duty Asphalt Pavements, Second International Conference on Roads and Airfield Pavement Technology, September 1995, Singapore.
5. Brown, S.F., Practical Test Procedures for Mechanical Properties of Bituminous Materials, Proc. Instn. Civ. Engrs Transp., 111 (1995) 289-297.
6. Terrel, RL. ve Al-Swailmi, S., The Role of Pessim Voids Concept in Understanding Moisture Damage to Asphalt Concrete Mixtures, Annual Meeting of the TRB, 1993.
7. Lee, K.W., Prediction and Evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixtures in Pavement Systems, Doctorate thesis, Texas University, Austin, 1982.
8. McGennis, R.B., Machemehl, R.B. ve Kennedy, T.W., Stripping and Moisture Damage in Asphalt Mixtures, Research Report 253-1, Centre for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, The University of Texas, Austin, December 1981.
9. Valkering, C.P., Lancon, DJL., Hilster, E.D. ve Stoker D.A., Rutting Resistance of Asphalt Mixes Containing Non-Conventional and Polymer-Modified Binders. AAPT Conference, 19/21 February 1990, Albuquerque, USA.
10. Delson, B., Laura, M.G. ve Ricardo, T.L., Computed Tomography in The Fatigue Test Analysis of An Asphaltic Mixture, Applied Radiation and Isotopes, 50 (1999) 661-671.
11. Delson, B. ve Ricardo, T.L., Ageing Effect Study on Brazilian Road Trials By Computed Tomography, DGZFP-Proceedings BB 84-CD Poster 8 CT-IP, 2003.

12. Delson, B., Lopes, R.T. ve Laura, M.G., Analysis of The Percentage Voids of Test and Field Specimens Using Computerized Tomography, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research , A 422 (1999) 942-948.
13. Delson, B. ve Lopes, R.T., Laura MG. Computed Tomography: An Evaluation of The Effect of Adding Polymer SBS to Asphaltic Mixtures Used in Paving. Appl Radiat Isot, 53 (2000) 725-729.
14. Masad, E., Jandhyala, V.K., Dasgupta, N., Somadevan, N., Asce, S.M. ve Shashidlar, N., Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes Using X-Ray Computed Tomography, J. Mat. in Civ. Engrg., 14, 2 (2002) 122-129.
15. Wang, L.B., Frost, J.D., Voyiadjis, G.Z. ve Harman, T.P., Quantification of Damage Parameters Using X-Ray Tomography Images. Mechanics of Materials, 35 (2003) 777-790.
16. Linbing, W. ve Wang, Y., Application of Mixture Theory in The Evaluation of Mechanical Properties of Asphalt Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering-Asce, March/April (2004) 167-174.
17. Chang, C.S., Matsushima, T. ve Lee, X., Heterogeneous Strain and Bonded Granular Structure Change in Tri-Axial Specimen Studied by Computer Tomography, Journal of Engineering Mechanics Asce, November (2003) 1295-1307.
18. Eyad, M. ve Joe, B., Implications of Experimental Measurements and Analyses of The Internal Structure of HMA. TRB 83rd Annual Meeting 11-15 January 2004, Washington, D.C.
19. Romero, P. ve Masad, E., Relationship Between The Representative Volume Element and Mechanical Properties of Asphalt Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, January/February (2001) 77-84.
20. Masad, E., Muhunthan, B., Shashidhar, N. ve Harman, T., Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis, Journal of Computing in Civil Engineering, April (1999) 88-95.
21. Hilster, E. ve Van de Loo, P.J., The Creep Test: Influence of Test Parameters, International Colloquium on Plastic Deformability of Bituminous Mixes, Federal Institute of Technology Zurich, September 1977.
22. Walkering, C.P. ve Vonk, W.C., Cariflex TR in Bitumen for Asphalt Mixes: Improved Elastic Recovery and Higher Performance, Thermoplastic Rubbers Technical Manual, Koninklijke Shell Laboratorium, Amsterdam, Netherlands, April 1992.

23. Brown, S.F. ve Gibb, J.M., Validation Experiments for Permanent Deformation Testing of Bituminous Mixtures, Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 65 (1996) 255-299.
24. Zoorob, S.E. ve Suparma, L.B., Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (plastiphalt), Cement&Concrete Composites 22 (2000) 233-242.
25. Hills, J.F., Brien, D. ve De Loo P.J., The Correlation of Rutting and Creep Tests on Asphalt Mixes, Institute of Petroleum, Paper IP 74-001, January 1974.
26. Robertus, C., Mulder, E.A. ve Koole, R.C., SBS- Modified Bitumen for Heavy Duty Asphalt Pavements, Second International Conference on Roads and Airfield Pavement Technology, 27-29 September 1995, Singapore.
27. Isacson, U. ve Zeng, H., Relationship between Bitumen Chemistry and Low Temperature Behaviour of Asphalt, Construction and Building Materials, 11, 2 (1997) 83-91.
28. Brennan, M.J., Meade, J., Hynes, M. ve Murphy, D.J., A Pilot Study of the Performance of Porous Asphalt in Static Creep and Repeated Loading, Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1996.
29. Ziauddin, A.K., Hammad, I., Wahab, A., Asi, I. ve Ramadhan, R., Comparative Study of Asphalt Concrete Laboratory Compaction Methods to Simulate Field Compaction, Construction and Building Materials, 12 (1998) 373-384.
30. Eckmann, B. ve Tanghe, T., Uni-Axial Dynamic Creep Testing of An Sma Importance of Test and Formulation Parameters, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, 2000.
31. Brown, E.R., Kandhall. P. S. ve Zhang, J., Performance Testing for Hot Mix Asphalt, November 2001.
32. Lu, X., Isacson, U. ve Ekblad, J., Influence of Polymer Modification on Low Temperature Behaviour of Bituminous Binders and Mixtures, Performance Testing on Evaluation of Bituminous Materials, 2003, 435-441.
33. Asi, I. ve Assa'ad, A., Effect of Jordanian Oil Shale Fly Ash on Asphalt Mixes, Journal of Materials in Civil Engineering, 17 (2005) 553-559.
34. Szydlo, A. ve Mackiewicz, P., Asphalt Mixes Deformation Sensitivity to Change in Rheological Parameters, Journal Materials in Civil Engineering, 17 (2005) 1-9.
35. Abo-Qudais, S. ve Al-Shweily, H., Effect of Antistripping Additives on Environmental Damage of Bituminous Mixtures, Building and Environment 42 (2007) 2929-2938.

36. Dunning, R.L. ve Mendenhall, R.L., Design of Recycled Asphalt Pavements and Selection of Modifiers, American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication, ASTM, STP 662, 1978.
37. Pendrys, J.P., Biodegradation of Asphalt Cement-20 By Aerobic Bacteria, Applied and Environmental Microbiology, 55 (1989) 1357-1362.
38. Petersen, J.C., Chemical Composition of Asphalts as Related to Asphalt Durability; State of Art, Transportation Research Record, 999 (1984) 13-30.
39. Welborb, J.Y., Physical Properties as Related to Asphalt Durability; State of Art, Transportation Research Record, 999 (1984) 31-36.
40. Atlas, R.M., Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: An Environmental Perspective, Microbiology Review, 45 (1981) 180-209.
41. Noureldin, A.S., Long Term Performance of Asphalt Cement Binders; A Dual View, Physical Properties of Asphalt Cement Binders, ASTM STP 1241, American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1995.
42. Wang, L., Wang, X., Mohammad, L. ve Wang, Y., Application of Mixture Theory in The Evaluation of Mechanical Properties of Asphalt Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, (2004) 167-174.
43. Masad, E. ve Button, J., Implications of Experimental Measurements and Analysis of The Internal Structure of HMA, Transportation Research Board, 83rd Annual Meeting, 11-15 January 2004, Washington DC.
44. Masad, E., Birgisson, B., Al-Omari, A. ve Cooley, A., Analytical Derivation of Permeability and Numerical Simulation of Fluid Flow in Hot-Mix Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, September/October (2004) 487-496.
45. Verstraeten, J., Bituminous Materials with a High Resistance to Flow Rutting, PIARC Technical Committee on flexible roads, TC 8, Belgium, 1994, 19-20
46. [www. training.ce.washington.edu/PGI/](http://www.training.ce.washington.edu/PGI/), 19 Ağustos 2008
47. ASTM E 867, Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems, 2003
48. Brown, S.F. ve Bush, D.I., Dynamic Response of Model Pavement Structure, Transportation Engineering Journal of ASCE, Proc. ASCE, 98, 4 (1972) 1005-1023.
49. Tığdemir, M., Bitümlü Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Parametrik İncelenmesi, Doktora Tezi, S.D.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1999.

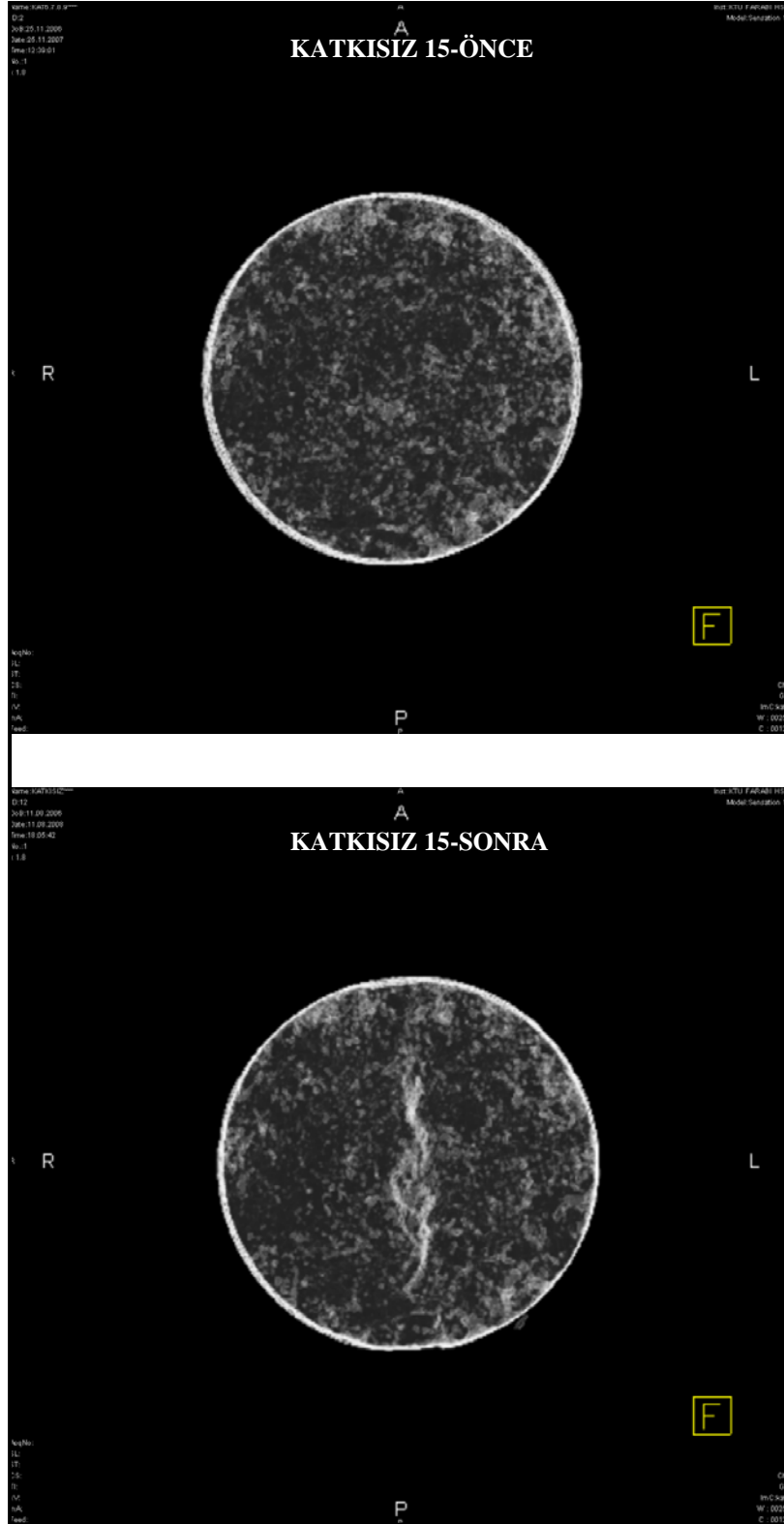
50. Tayfur, S., Taş Mastik Asfalt (SMA) Kaplamalar için Uygun Karışımın Araştırılması ve Bir Hizmet Ömrü Modeli Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
51. İskender, E., Asfalt Kaplamalarda Kalıcı Deformasyon (Tekerlek Izi) Probleminin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2004.
52. Partl, M., Investigation of Bituminous Highway Pavements Subjected to Heavy Traffic Loading, 5th Eurobitume Cong, 1993,16p.
53. Archilla, A.R., Development of A Pavement Rutting Model from Experimental Data, Journal of Transportation Engineering, August (2000) 291-293.
54. Kandhall, P.S. ve Cooley, L.A., Evaluation of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Using Loaded Wheel Tester, Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002.
55. Cooley, L.A., Kandhall, P.S., Buchanan, M.S., Fee, F. ve Epps, A., Loaded Wheel Testers in the United States: State of the Practice, Transportation Research E-Circular, E-C016, July 2000.
56. Aschenbrener, T. B., Comparison of Results Obtained from the French Rutting Tester With Pavements of Known Field Performance. Transportation Research board, 73. Annual Meeting, 9-13 January 1994 Washington, D.C.
57. Transportation Research Circular, New Simple Performance Tests for Asphalt Mixes, E-C068, Transportation Research Board, September 2004.
58. www.coe.montana.edu/ce/home/facilities.html, 4 Ekim 2007.
59. Freudenrich, Craig., How Oil Refining Works, <http://science.howstuffworks.com/oil-refining2.htm>, 11 Haziran 2008.
60. The Asphalt Jungle, A Guide to The Benefits of SBS-Modified Bitumen, Shell Chemicals.
61. Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., ve Anderson, R.M., Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP REPORT 459, Transportation Research Board, Washington D.C. 2001.
62. Terrel, R.L. ve Epps, J.A., Using Additives and Modifiers in Hot Mix Asphalt. National Asphalt Pavement Association, 114, 1988.
63. Upeks Yol Kimyasalları Limited Şti., Karşılaştırmalı Bitümü Modifiye Etme Yöntemleri, 200 .
64. Vonk,W.C. ve Van Gooswilligen, G., Improvement of Paving Grade Bitumens with SBS Polymers, IVth Eurobitume Conference, 4-6 October 1989, Madrid.

65. <http://www.e-asfalto.com/ingles/venezuela.pdf>, 9 Temmuz 2004
66. Vonk, W., Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Block Copolymers: Asphalt Mix Improvers for Severe Climatic Conditions. Lecture Delivered at the CSIR Conference Centre, Pretoria, South Africa, 1998.
67. Gahvari, F., Modeling of The Linear Viscoelastic Response of Polymer Modified Asphalt Binders at Intermediate and High Temperatures, PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, 1996.
68. Lu, X. ve Isacson, U., Chemical and Rheological Characteristics of Styrene-Butadiene-Styrene Polymer-Modified Bitumens. Transportation Research Record 1661, Transportation Research Board, (1999) 83–92.
69. Akzonobel, Safety Data Sheet, 2005.
70. Aren Clevin, M., Investigation of the Properties of Carbon Fiber Modified Asphalt Mixtures, Master of Science in Civil Engineering, Michigan Technological University, 2000.
71. Witczak, M., Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database, NCHRP Report 547, Transportation Research Board, Washington, D.C. 2005.
72. Aksoy A, Iskender E., Comparison of Creep Tests Results on Conventional and SBS Modified Asphalt Mixtures, Journal of ICE Transport, 161 (2008) 185-195.
73. Aksoy, A., İskender, E. ve Ozen, H., Rutting Comparison of Laboratory and Field Samples With Verified Repeated Creep Tests In Asphalt Mixtures, 3rd European pavement and asset management conference, EPAM3, 7-9 July 2008, Coimbra Portugal.
74. Aksoy, A., İskender, E., Tayfur, S. ve Ozen, H., Prevention of Moisture Damage in Asphalt Mixtures, Sixth International Conference on Advances in Civil Engineering, 6-8 October 2004, Bogazici University, Istanbul, Turkey.
75. Sengul, C.E., Aksoy, A. ve Iskender, E., Permanent Deformation Resistance Evaluation with Marshall Quotient Approach, Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering, 11-13 October 2006, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.
76. İsfalt, Asfalt ve Uygulamaları, Yayın No:1, İstanbul, 2001.
77. Anagnos, J.N. ve Kennedy, T.W., Practical Method of Conducting The Indirect Tensile Test. Center of Highway Research, University of Texas at Austin, August 1972.
78. Maupin, G.W., Effectiveness of Anti-Stripping in The Field, Virginia Transportation Research Council, VA 22903-0817 Charlottesville, Edgemont 1995.

79. Aksoy, A., Samlioglu, K., Tayfur, S. ve Ozen, H., Effects of Various Additives on The Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures, Construction and Building Materials, 19 (2005) 11-18.
80. Chen, J-S. ve Liao, M-C., Evaluation of Internal Resistance in Hot Mix Asphalt Concrete, Construction and Building Materials 16 (2002) 313-319.
81. Brown, E.R. ve Foo, K.Y., Evaluation of Variability in Resilient Modulus Test Results, Journal of Testing and Evaluation, 19 (1991) 1-13.
82. Kulash, D.J., Toward Performance-Based Specifications for Bitumen and Asphalt Mixtures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 105 (1994) 187-194.
83. Tian, P., Zaman, M.M. ve Laguros, J.G., Variation of Resilient Modulus of Aggregate Base and Its Influence on Pavement Performance, Journal of Testing and Evaluation, 26 (1998) 329-335.
84. Kerh, T., Wang, Y. ve Lin, Y. Experimental Evaluation of Anti-Stripping Additives Mixing in Road Surface Pavement Materials, American Journal of Applied Sciences, 2, 10 (2005) 1427-1433.
85. Bagampadde, U., Influence of Aggregate Chemical and Mineralogical Composition on Moisture Sensitivity in Bituminous Mixtures, International Journal of Pavement Engineering, 6, 4 (2005).
86. Ulmgren, N., Functional Testing of Asphalt Mixes for Permanent Deformation by Dynamic Creep Test Modification of Method and Round Robin Test, Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1996.
87. Visser, A.T., Long, F., Verhaeghe, A. ve Taute, A., Provisional Validation of The New South African Hot-Mix Asphalt Design Method (Mix Design-1:7-6). Ninth International Conference on Asphalt Pavements, August 2002, Copenhagen, Denmark.
88. Aschenbrener, T., Comparison of Results Obtained from The French Rutting Tester with Pavements of Known Field Performance, Colorado Department of Transportation, Report No: CDOT-DTD-R-92-11, October 1992.
89. Corte, J.F., Brosseaud, Y., Simonceli, J.P. ve Caroff. G., Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Load Configurations, Transportation Research Board 1436 (1994) 28-37.
90. Visser, A.T., Long, F., Verhaeghe, A. ve Taute, A., Provisional Validation of The New South African Hot-Mix Asphalt Design Method (Mix Design-1:7-6). Ninth International Conference on Asphalt Pavements, August 2002, Copenhagen, Denmark.

91. Ozen, H., Aksoy, A., Tayfur, S. ve Celik, F., Laboratory Performance Comparison of The Elastomer-Modified Asphalt Mixtures, Building and Environment, 43 (2008) 1270-1277.
92. Tayfur, S., Ozen, H. ve Aksoy, A., Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers, Construction and Building Materials, 21 (2007) 328–33.
93. Terrel, R.L. ve Al-Swailmi, S., Water Sensitivity of Asphalt Aggregate Mixes: Test Selection, SHRP-A-403, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1994.
94. Jansen Venneboer, J., Van der Heide, J.P.J. ve Molenaar, A.A.A., Asphalt Constructions for Heavy Duty Pavements and Road Widening in the Netherlands, Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1996.

6. EKLER



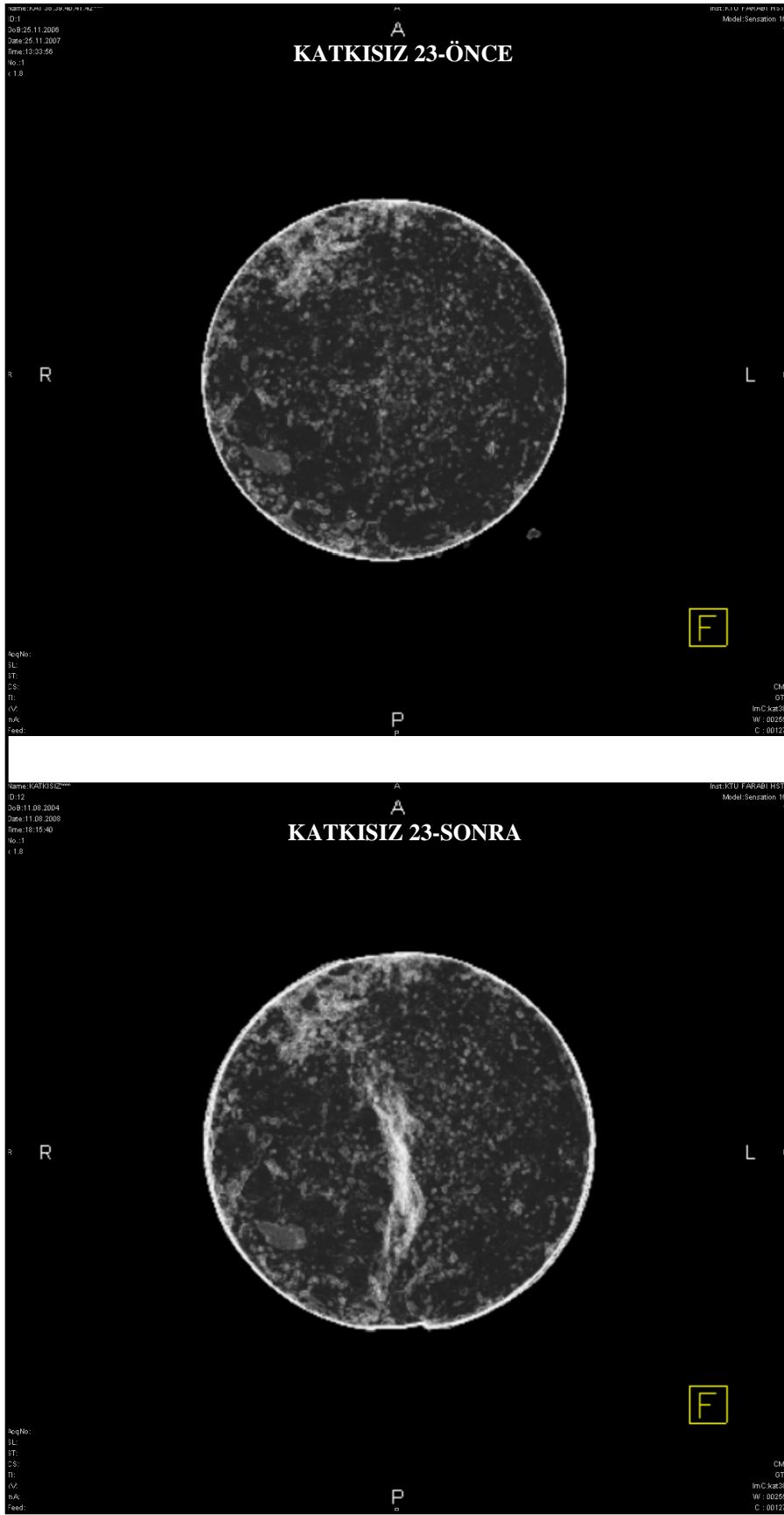
Ek Şekil 1. Dolaylı çekme mukavemeti deneyinden önce ve sonra çekilen tomografi görüntüleri



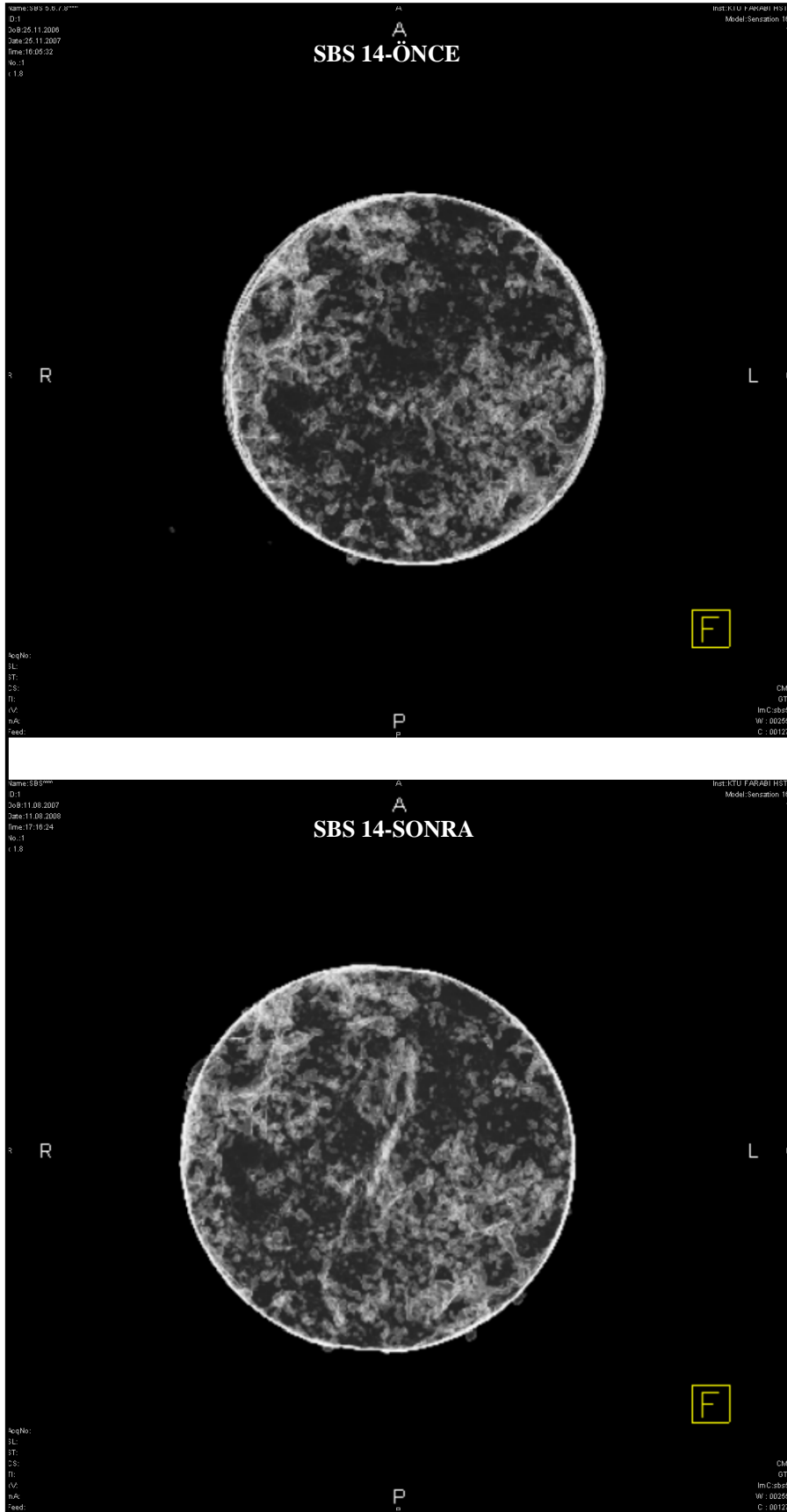
Ek Şekil 1'in devamı



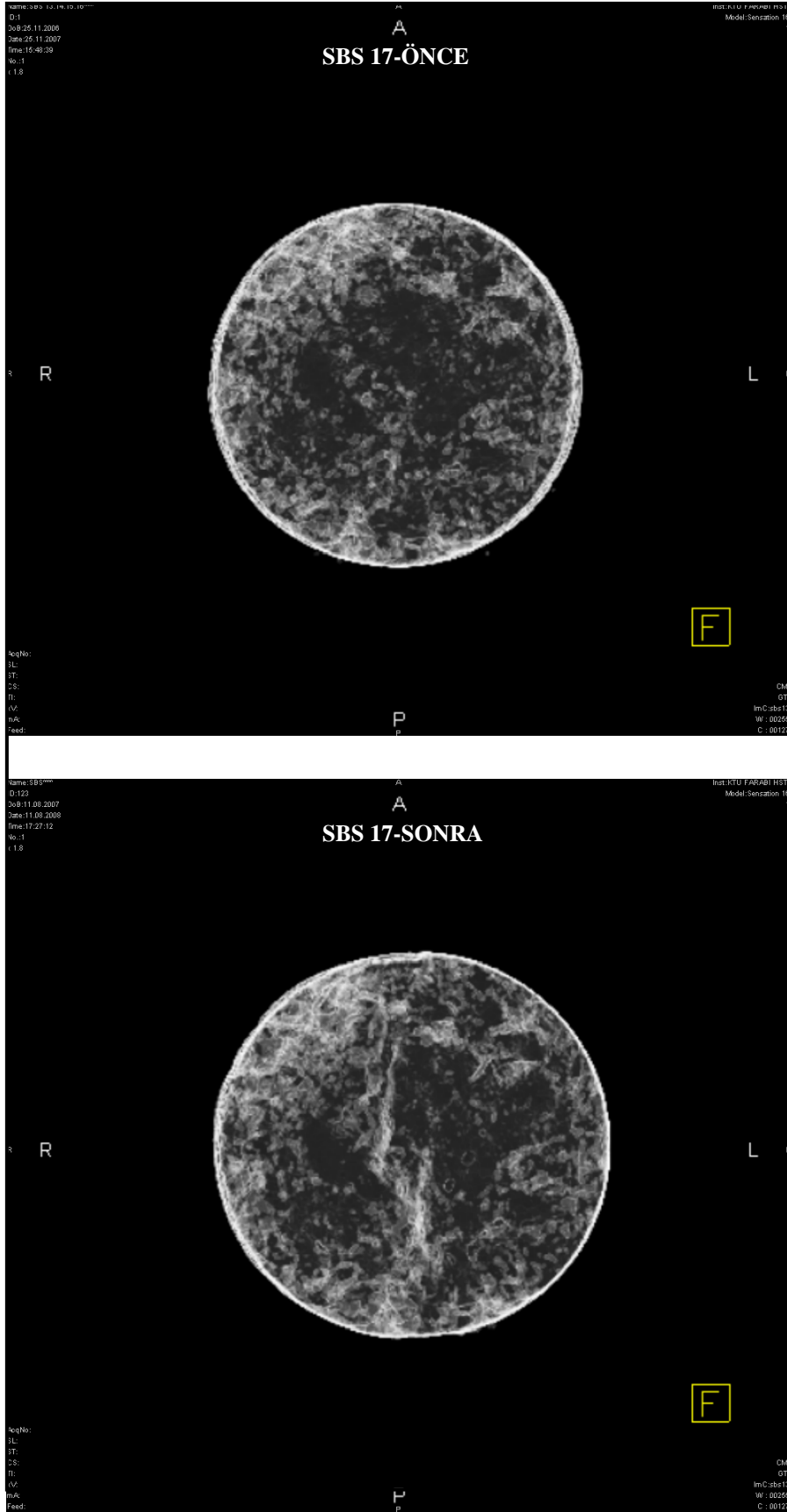
Ek Şekil 1'in devamı



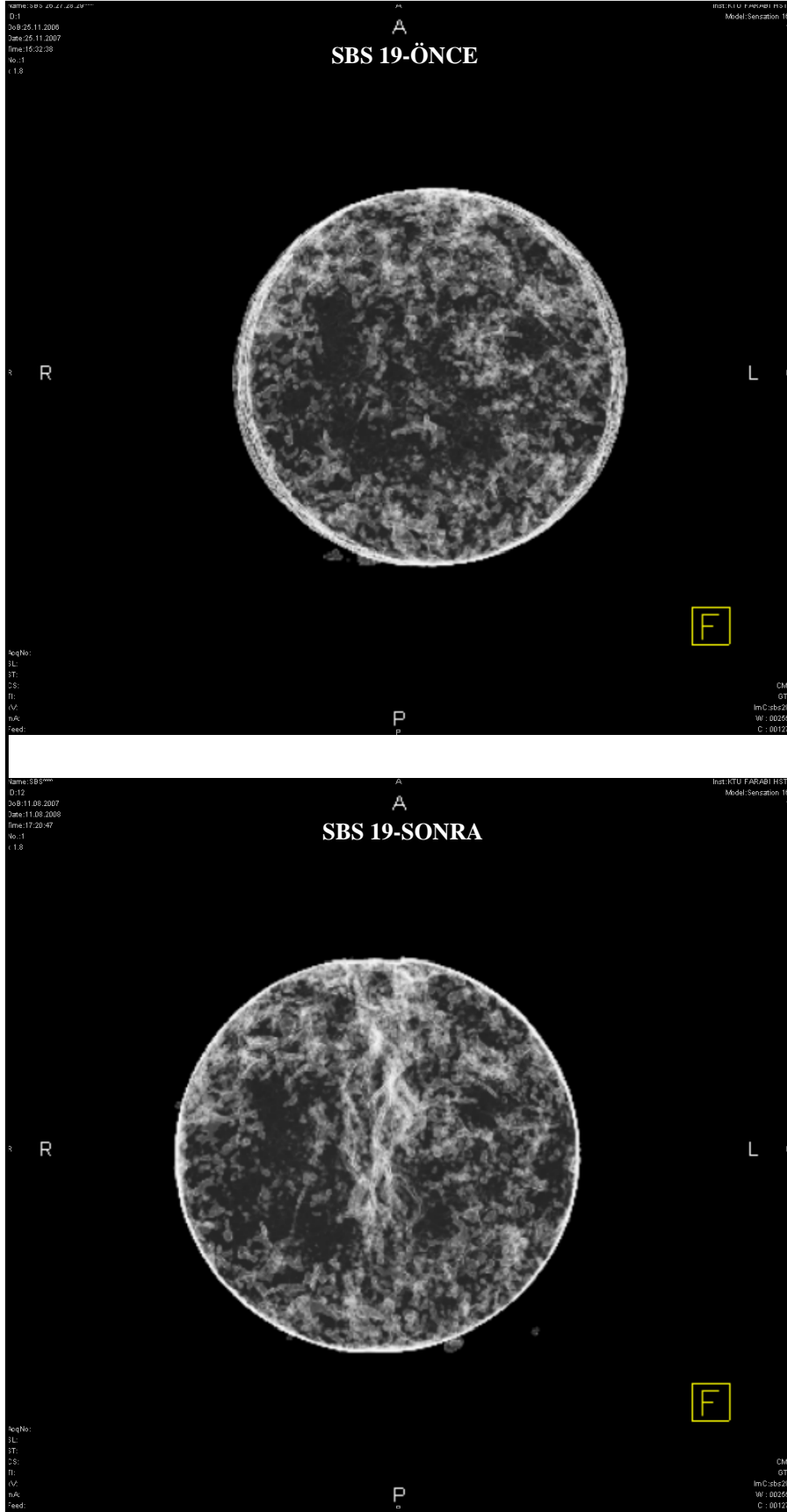
Ek Şekil 1'in devamı



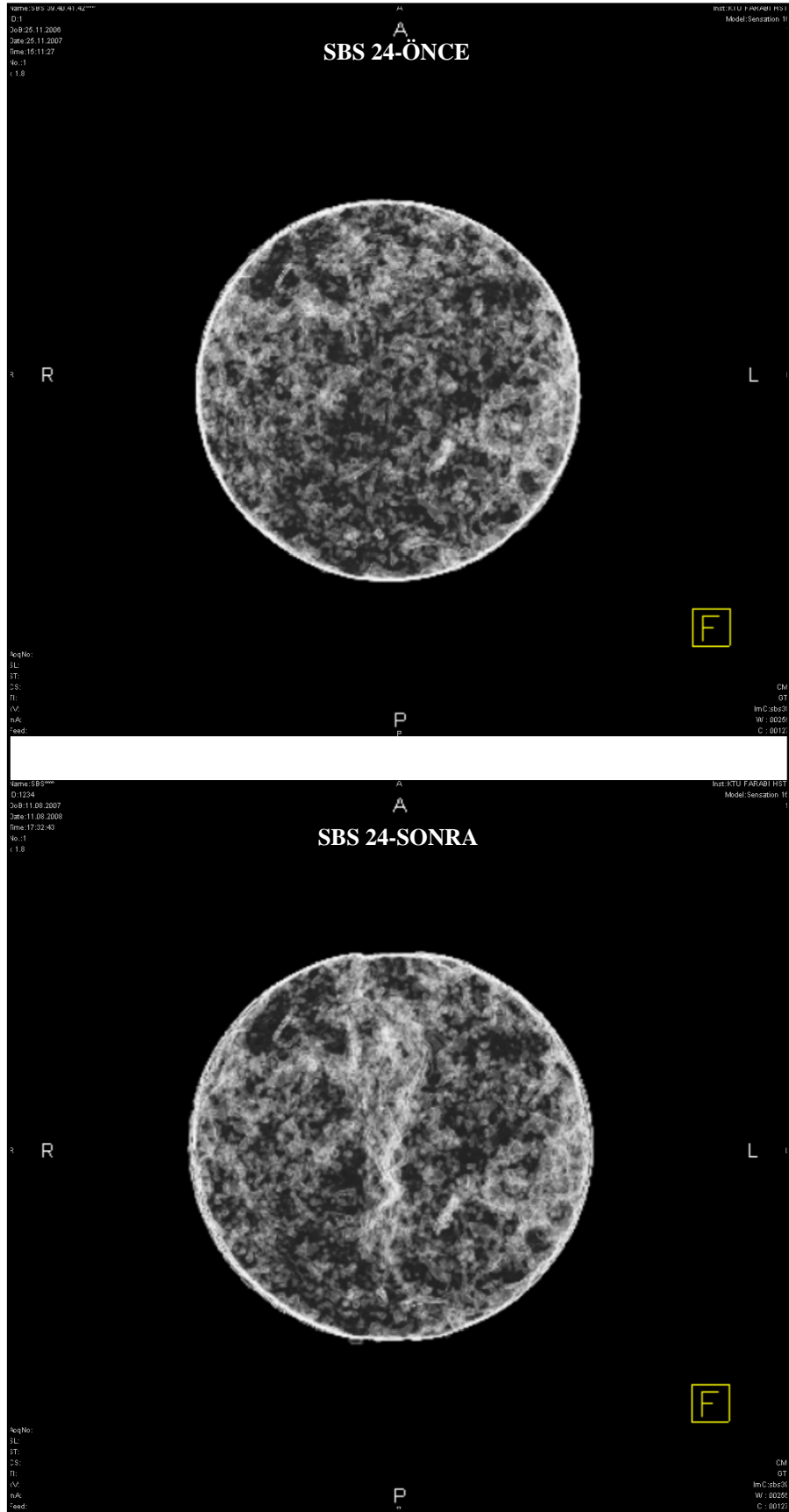
Ek Şekil 1'in devamı



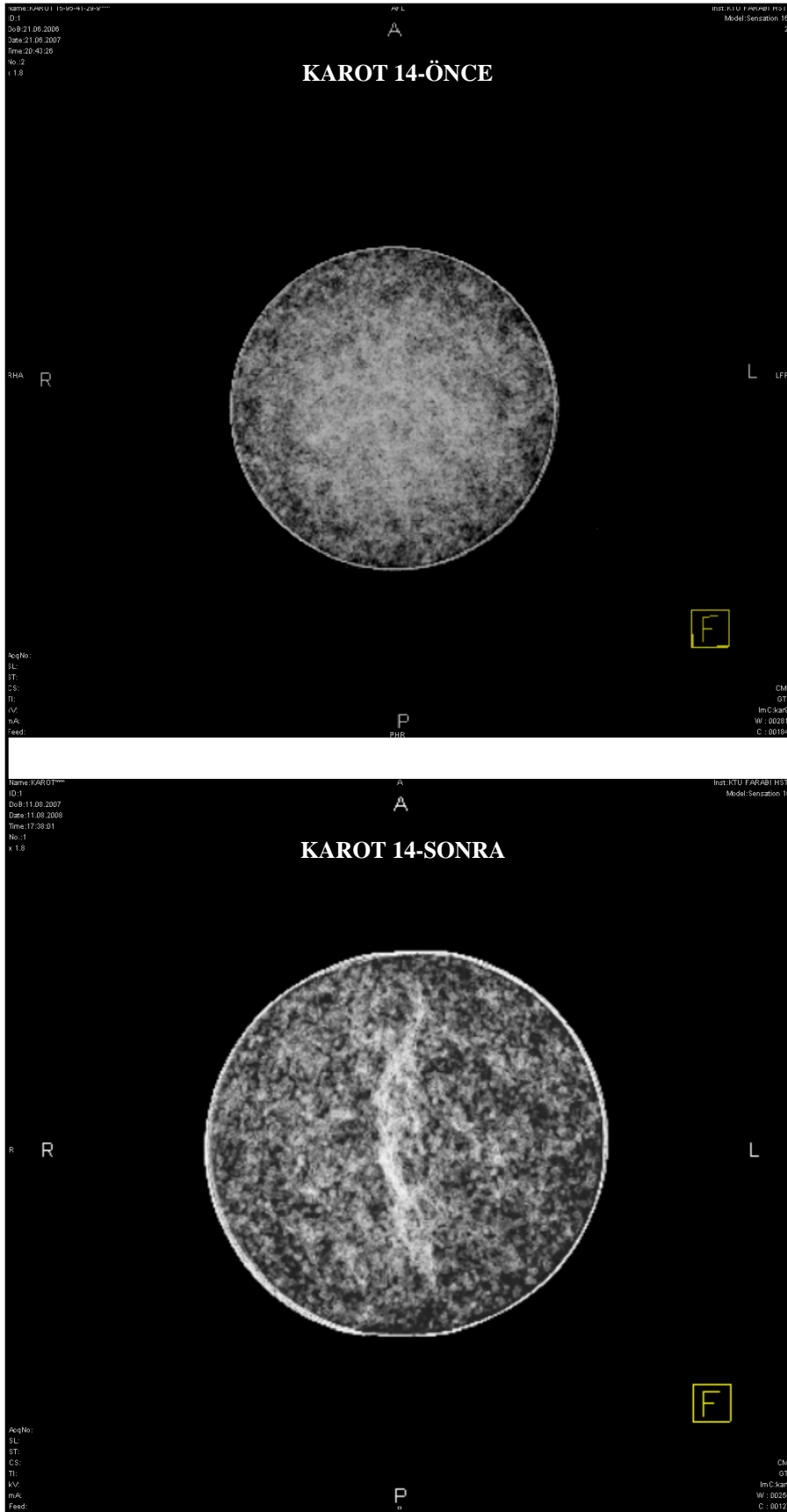
Ek Şekil 1'in devamı



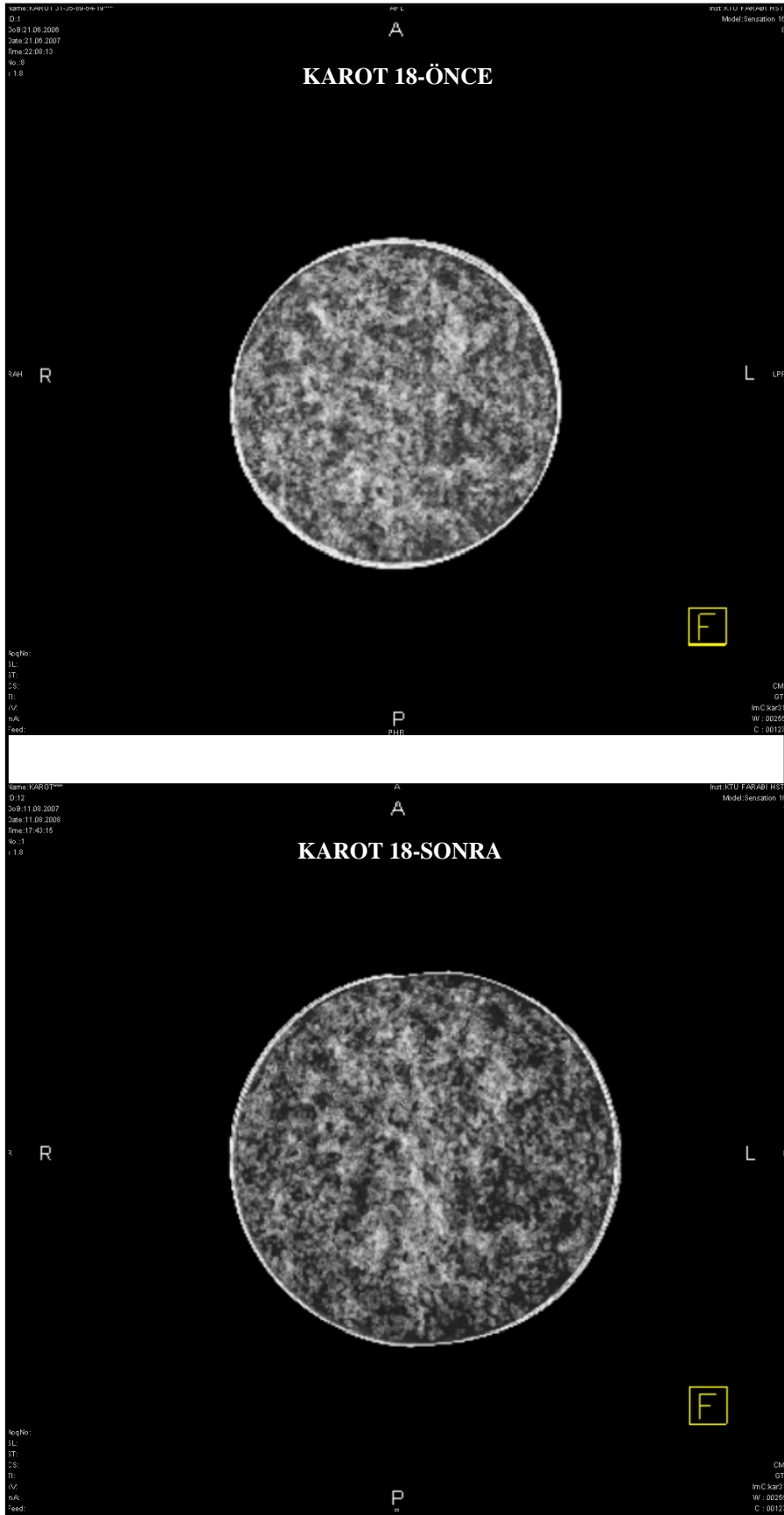
Ek Şekil 1'in devamı



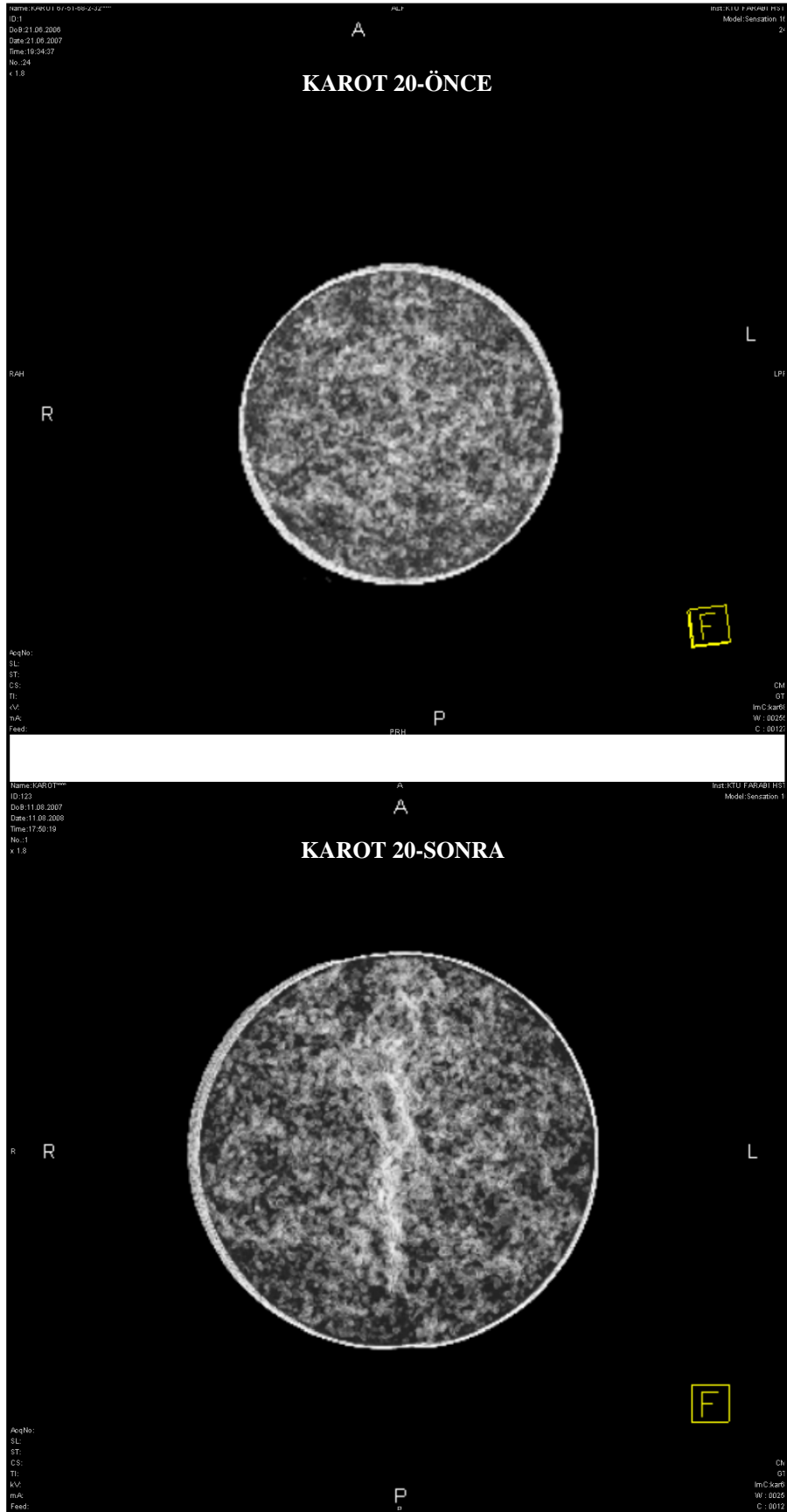
Ek Şekil 1'in devamı



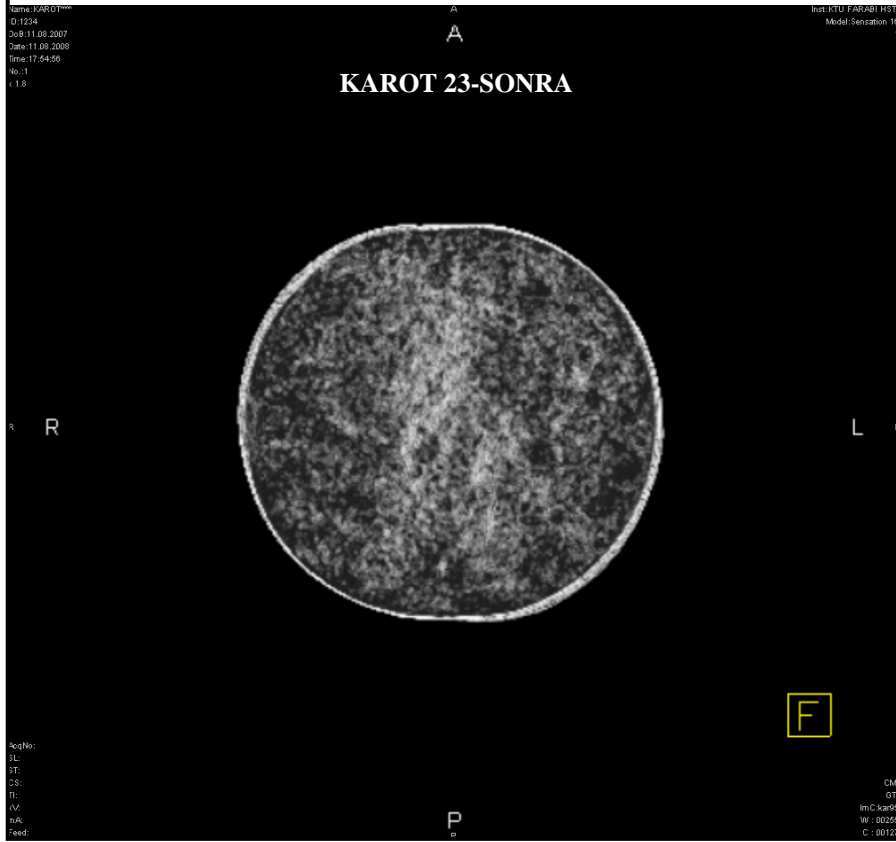
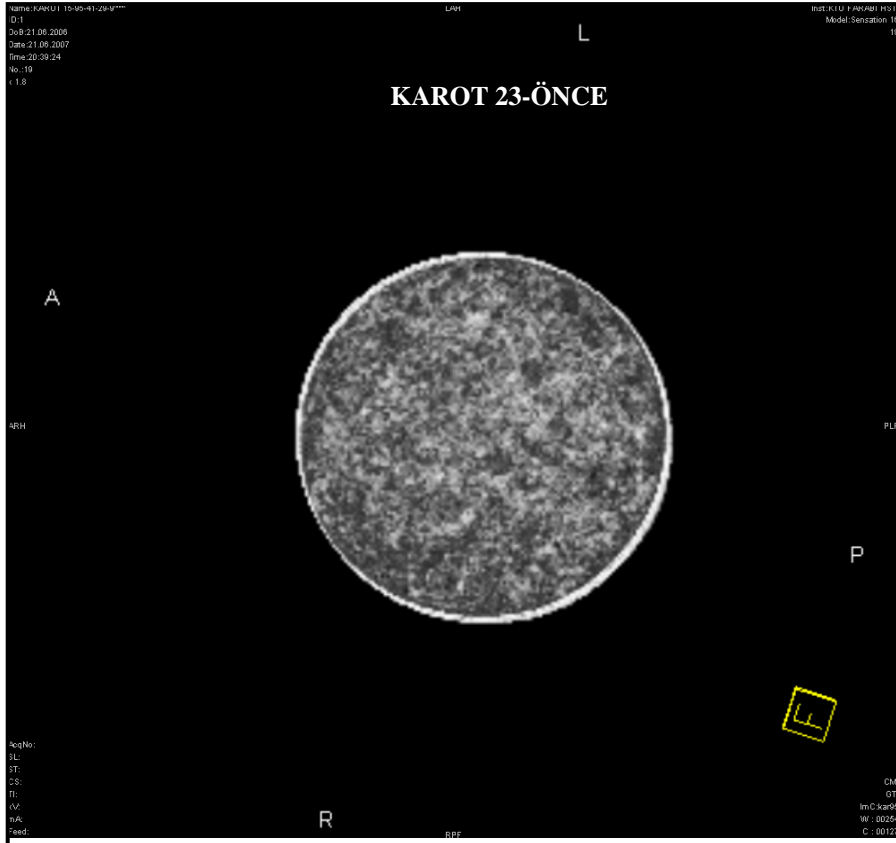
Ek Şekil 1'in devamı



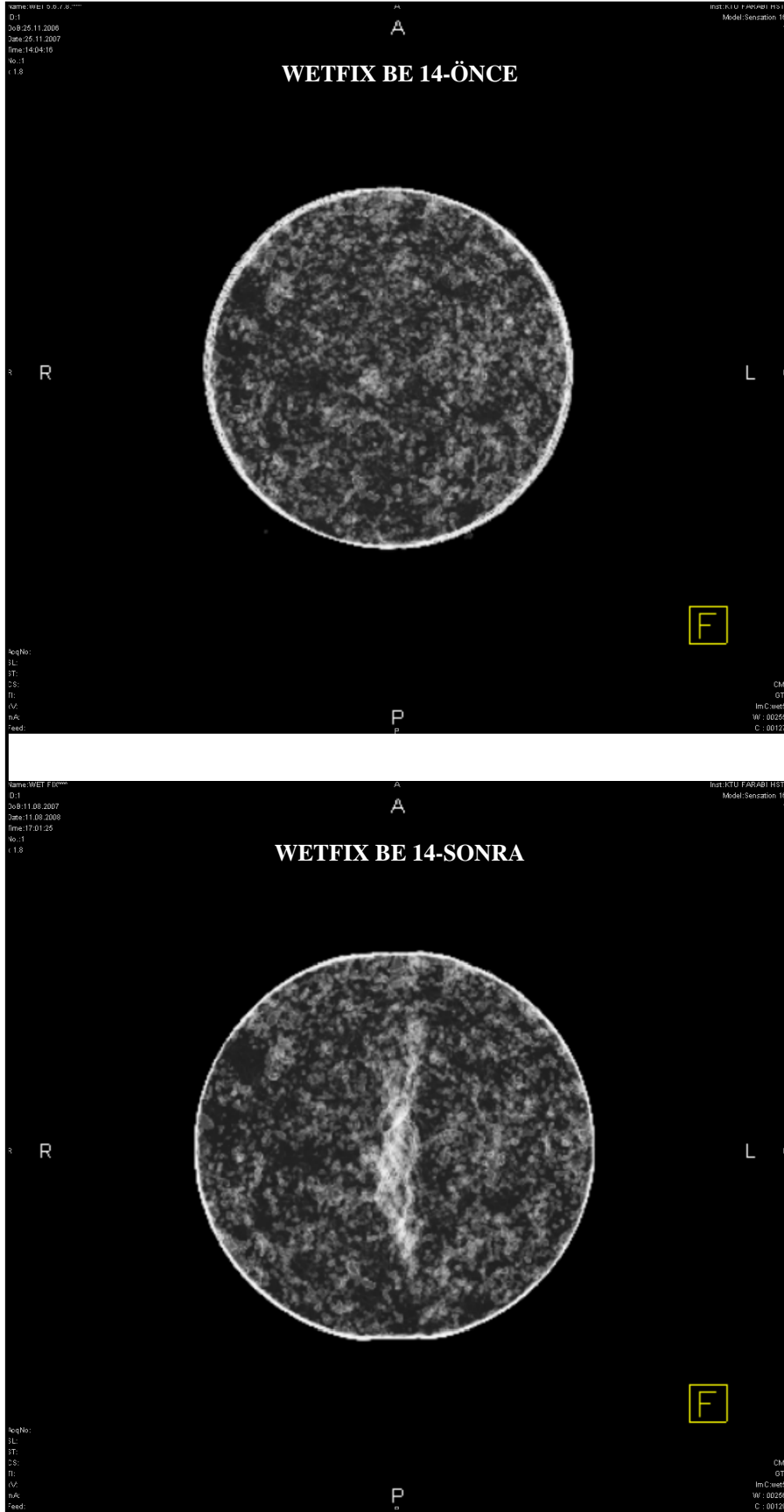
Ek Şekil 1'in devamı



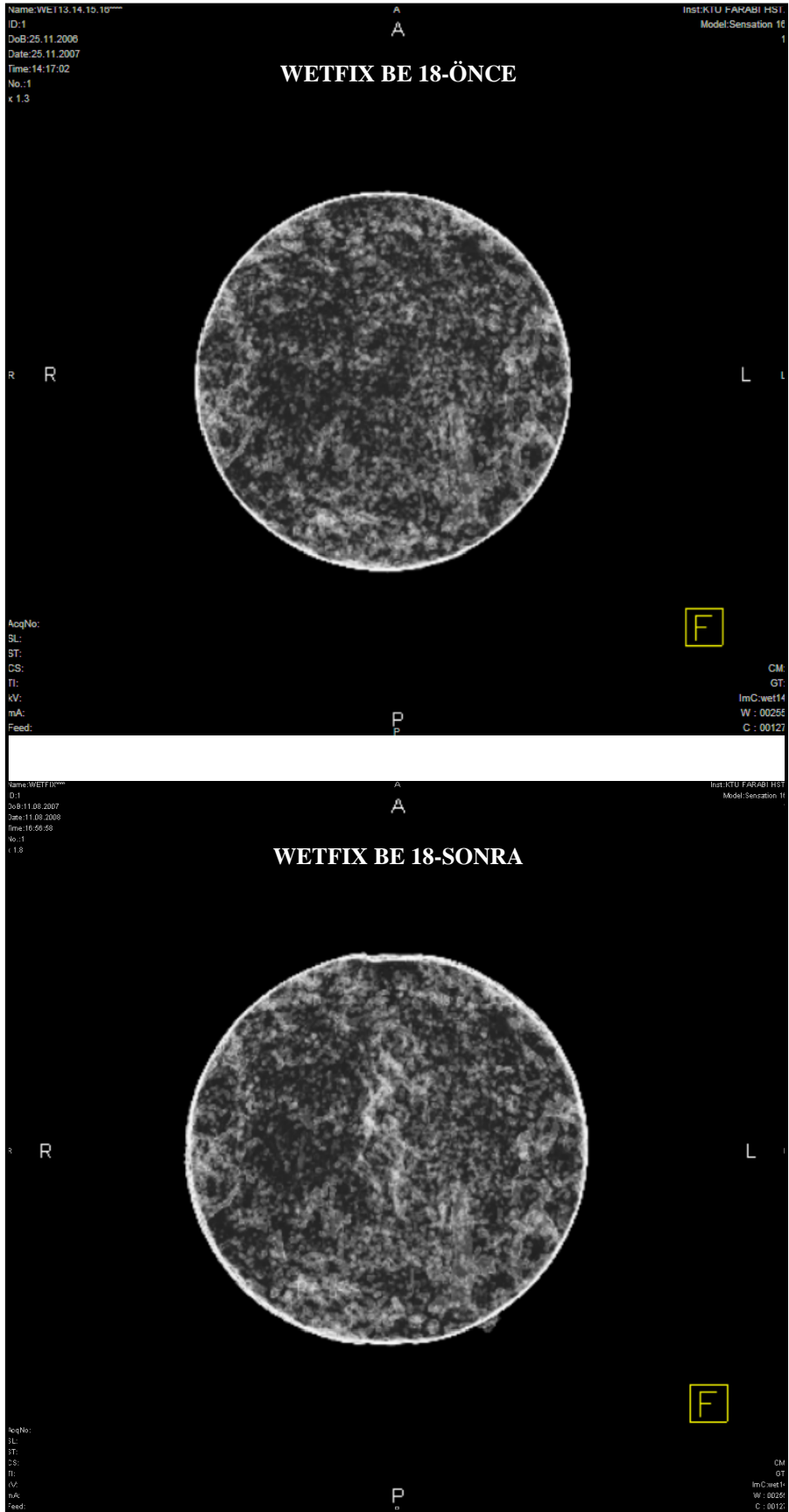
Ek Şekil 1'in devamı



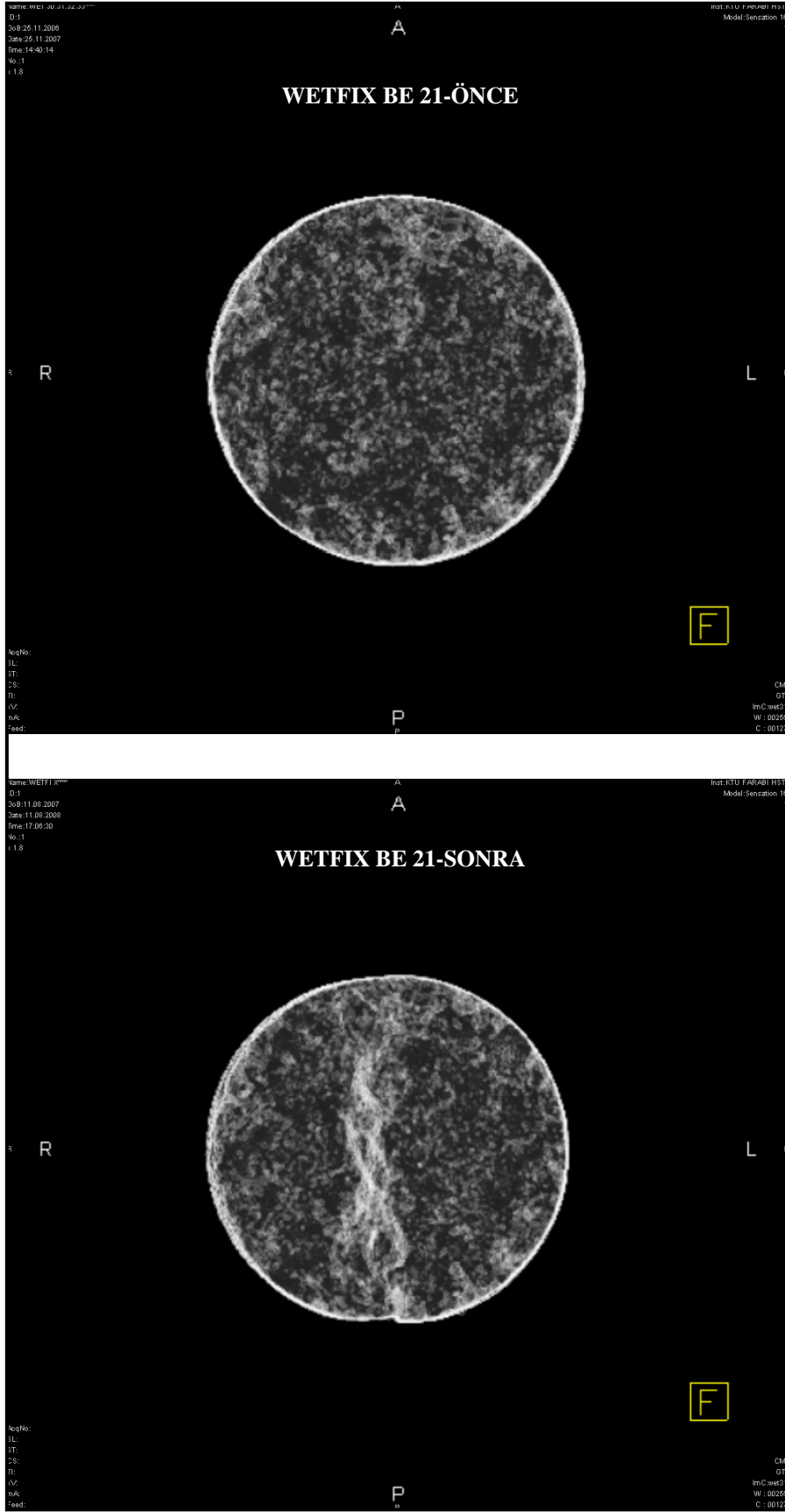
Ek Şekil 1'in devamı



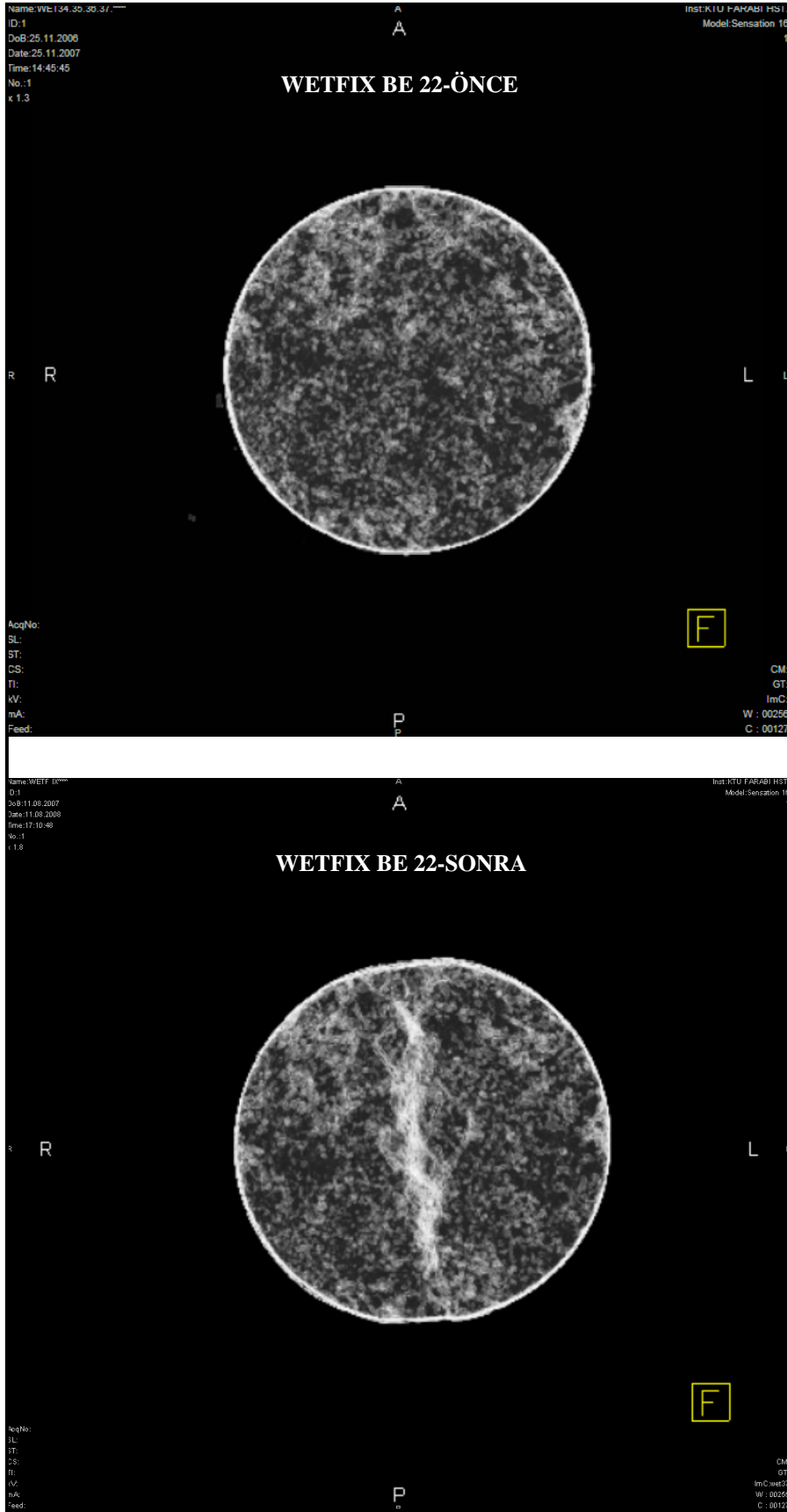
Ek Şekil 1'in devamı



Ek Şekil 1'in devamı



Ek Şekil 1'in devamı



Ek Şekil 1'in devamı

Ek Tablo 1. Marshall deneyi düzeltme faktörleri

Briket yüksekliği	Düzeltilme faktörü	Briket yüksekliği	Düzeltilme faktörü	Briket yüksekliği	Düzeltilme faktörü	Briket yüksekliği	Düzeltilme faktörü
55,0	1,274	58,8	1,137	62,6	1,023	66,4	0,932
55,1	1,271	58,9	1,133	62,7	1,021	66,5	0,930
55,2	1,268	59,0	1,130	62,8	1,018	66,6	0,927
55,3	1,256	59,1	1,127	62,9	1,016	66,7	0,925
55,4	1,253	59,2	1,124	63,0	1,013	66,8	0,922
55,5	1,250	59,3	1,120	63,1	1,011	66,9	0,920
55,6	1,247	59,4	1,117	63,2	1,008	67,0	0,918
55,7	1,243	59,5	1,114	63,3	1,006	67,1	0,915
55,8	1,239	59,6	1,110	63,4	1,003	67,2	0,913
55,9	1,235	59,7	1,107	63,5	1,000	67,3	0,911
56,0	1,231	59,8	1,104	63,6	0,998	67,4	0,908
56,1	1,228	59,9	1,100	63,7	0,995	67,5	0,906
56,2	1,224	60,0	1,097	63,8	0,992	67,6	0,904
56,3	1,220	60,1	1,094	63,9	0,990	67,7	0,901
56,4	1,216	60,2	1,090	64,0	0,988	67,8	0,899
56,5	1,214	60,3	1,088	64,1	0,985	67,9	0,897
56,6	1,210	60,4	1,085	64,2	0,982	68,0	0,894
56,7	1,206	60,5	1,082	64,3	0,980	68,1	0,892
56,8	1,202	60,6	1,079	64,4	0,978	68,2	0,890
56,9	1,198	60,7	1,076	64,5	0,975	68,3	0,888
57,0	1,194	60,8	1,073	64,6	0,972	68,4	0,886
57,1	1,190	60,9	1,070	64,7	0,970	68,5	0,885
57,2	1,187	61,0	1,067	64,8	0,967	68,6	0,883
57,3	1,184	61,1	1,064	64,9	0,965	68,7	0,881
57,4	1,181	61,2	1,062	65,0	0,962	68,8	0,879
57,5	1,178	61,3	1,059	65,1	0,960	68,9	0,877
57,6	1,175	61,4	1,056	65,2	0,957	69,0	0,875
57,7	1,172	61,5	1,053	65,3	0,955	69,1	0,874
57,8	1,169	61,6	1,050	65,4	0,953	69,2	0,872
57,9	1,164	61,7	1,047	65,5	0,951	69,3	0,870
58,0	1,161	61,8	1,044	65,6	0,949	69,4	0,868
58,1	1,158	61,9	1,040	65,7	0,947	69,5	0,866
58,2	1,155	62,0	1,038	65,8	0,945	69,6	0,864
58,3	1,152	62,1	1,036	65,9	0,943	69,7	0,862
58,4	1,149	62,2	1,033	66,0	0,940	69,8	0,860
58,5	1,146	62,3	1,031	66,1	0,938	69,9	0,858
58,6	1,143	62,4	1,028	66,2	0,936	70,0	0,856
58,7	1,140	62,5	1,026	66,3	0,934		

Ek Tablo 2. Marshall deney formu

Briket No	Bitüm %	Bitüm Wb gr	Sıcaklı. °C	Briket Yüksekliği (mm)			Havad. Ağırlık (gr)	Sudaki Ağırlık (gr)	Doy. Yüz. K. Ağırlık (gr)	Hacim B-C (cm ³)	Pratik Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Max Teorik Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Boşluk %	VMA %	Asfaltla Dolu Boşluk %	Akma mm	Stabilite kg	Düzelme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite kg
				H1	H2	H3													
1	4,0	46,0	140,0	63,1	63,2	63,1	1189,5	715,2	1195,2	480,0	2,478					2,50	1151	1,008	1160
2	4,0	46,0	140,0	63,2	63,1	63,2	1196,0	721,1	1202,2	481,1	2,486					2,00	1142	1,008	1151
3	4,0	46,0	139,0	63,1	63,1	63,1	1193,0	724,3	1205,3	481,0	2,480					2,30	1152	1,01	1164
Ortalama											2,481	2,664	6,86	14,88	53,92	2,27			1158
4	4,5	52,0	140,0	62,9	62,8	62,8	1197,0	724,4	1204,0	479,6	2,496					2,50	1311	1,018	1335
5	4,5	52,0	141,0	62,7	62,8	62,6	1198,6	723,7	1203,5	479,8	2,498					2,30	1289	1,02	1315
6	4,5	52,0	142,0	62,8	62,7	62,7	1199,2	725,6	1206,2	480,6	2,495					2,80	1309	1,02	1335
Ortalama											2,496	2,644	5,57	14,77	62,29	2,53			1328
7	5,0	58,0	141,0	62,3	62,3	63,1	1202,3	724,7	1204,2	479,5	2,507					3,00	1495	1,03	1540
8	5,0	58,0	141,0	62,4	62,3	62,2	1204,0	723,5	1204,9	481,4	2,501					2,80	1468	1,03	1512
9	5,0	58,0	140,0	62,5	62,1	62,1	1201,5	725,4	1203,9	478,5	2,511					3,30	1491	1,033	1540
Ortalama											2,506	2,624	4,47	14,84	69,87	3,03			1531
10	5,5	63,0	140,0	61,0	61,1	61,1	1206,9	729,9	1207,4	477,5	2,528					3,60	1385	1,065	1475
11	5,5	63,0	140,0	61,3	61,4	60,5	1204,8	727,1	1205,6	478,5	2,518					3,30	1369	1,062	1454
12	5,5	63,0	140,0	61,5	62,4	62,0	1207,1	730,5	1209,9	479,4	2,518					3,80	1360	1,065	1448
Ortalama											2,521	2,604	3,19	14,75	78,34	3,57			1459
13	6,0	69,0	141,0	60,8	60,7	60,7	1209,1	727,8	1209,9	482,1	2,508					3,80	1322	1,078	1425
14	6,0	69,0	142,0	60,7	60,6	60,7	1209,2	729,6	1209,8	480,2	2,518					3,80	1334	1,078	1438
15	6,0	69,0	140,0	60,5	60,6	60,5	1209,3	728,5	1210,1	481,6	2,511					3,60	1317	1,084	1428
Ortalama											2,512	2,585	2,82	15,44	81,72	3,73			1430
16	6,5	75,0	140,0	60,3	60,3	60,2	1209,9	726,7	1209,1	482,4	2,508					3,80	1289	1,091	1406
17	6,5	75,0	139,0	60,3	60,5	60,3	1215,4	734,7	1215,9	481,2	2,526					4,10	1279	1,087	1390
18	6,5	75,0	139,0	60,2	60,2	60,1	1215,9	731,6	1216,0	484,4	2,510					4,10	1258	1,093	1375
Ortalama											2,515	2,567	2,03	15,76	87,11	4,00			1391

Ek Tablo 3. SBS katkılı örneklerin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (æi)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	1011,4	8,34	101,40	36,4	47,4	6,2	15845
25A-60	959,6	5,96	96,21	56,8	51,4	7,4	15953
25A-80	942,0	5,80	94,44	77,2	53,6	6,4	11867
25B-40	1042,4	9,11	104,51	37,6	45,0	5,2	11203
25B-60	999,9	9,05	100,24	57,4	48,8	5,8	10841
25B-80	993,9	8,50	99,64	77,2	49,4	5,6	11419
26A-40	1040,6	11,04	107,98	38,2	45,4	6,2	11160
26A-60	1004,0	9,11	104,19	58,6	46,4	6,2	11045
26A-80	1006,8	9,22	104,47	79,0	48,2	5,8	9530
26B-40	1017,4	7,84	105,58	37,0	46,2	5,2	14362
26B-60	1018,4	7,18	105,68	59,4	48,2	9,2	14031
26B-80	1011,0	7,29	104,91	78,8	51,4	6,4	13147
27A-40	1009,1	9,72	104,97	38,2	47,6	6,4	10821
27A-60	994,4	9,33	103,43	58,8	48,4	7,0	10542
27A-80	995,7	9,44	103,57	78,8	49,8	9,8	10697
27B-40	992,0	9,44	103,19	38,2	46,8	2,8	10614
27B-60	975,8	9,33	101,50	58,4	47,8	5,6	10658
27B-80	994,4	10,43	103,43	78,4	49,4	3,6	9662
28A-40	1010,5	4,91	105,46	38,0	46,6	6,6	14334
28A-60	1005,4	4,80	104,93	59,4	47,0	4,4	13985
28A-80	1012,8	4,97	105,70	79,4	49,4	4,0	13787
28B-40	1029,5	6,73	107,44	38,0	48,0	6,4	15825
28B-60	995,7	6,40	103,91	58,6	52,8	6,8	15587
28B-80	970,7	6,68	101,31	78,2	53,8	5,8	14976
29A-40	1020,2	9,49	107,53	37,8	46,2	4,0	11048
29A-60	986,9	9,77	104,02	57,4	46,6	3,2	10390
29A-80	1000,3	9,94	105,43	78,0	47,8	3,0	10339
29B-40	1057,3	9,55	111,44	38,6	46,6	3,0	11375
29B-60	1018,4	10,27	107,34	59,2	48,2	1,8	10217
29B-80	1022,1	10,16	107,73	79,4	50,0	2,4	10339
30A-40	976,8	11,04	99,88	37,2	47,0	4,0	8823
30A-60	959,2	10,98	98,08	57,4	48,2	2,6	8695
30A-80	1008,2	12,70	103,09	77,6	50,6	3,6	7921

Ek Tablo 3.'ün devamı

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (æi)	Çekme gerilmesi (kPa)				
30B-40	1032,3	11,43	105,55	38,0	47,4	4,6	9011
30B-60	1011,4	11,98	103,42	59,2	49,8	5,0	8424
30B-80	1013,3	12,92	103,61	78,8	51,4	3,6	7816
31A-40	1014,9	12,23	101,26	37,0	47,0	6,8	8937
31A-60	999,0	9,42	105,68	59,4	48,2	4,2	9101
31A-80	990,0	12,15	106,15	78,8	50,6	4,6	8895
31B-40	998,9	12,00	100,13	38,2	47,4	4,2	8800
31B-60	1002,5	10,56	100,22	58,8	49,8	7,0	8671
31B-80	999,8	12,11	104,29	78,8	51,4	4,6	8043
32A-40	1003,1	10,27	101,20	38,2	49,4	3,6	8088
32A-60	989,0	11,43	104,93	58,4	48,0	6,8	8418
32A-80	1016,1	11,44	101,73	78,4	52,8	7,2	6990
32B-40	1002,6	10,93	100,80	38,0	53,8	6,8	8810
32B-60	987,3	9,88	102,85	59,2	46,2	5,0	7701
32B-80	1018,9	10,86	105,44	78,8	46,6	2,2	7438

Ek Tablo 4. Wetfix BE katkıli örneklerin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon ($\hat{\alpha}$)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	969,4	7,67	100,83	37,8	43,8	7,6	12844
25A-60	956,4	8,11	99,49	57,8	45,6	5,8	11956
25A-80	951,3	8,45	98,96	76,6	47,8	4,8	11411
25B-40	1027,6	9,05	106,90	37,6	46,6	6,0	11524
25B-60	1006,3	8,61	104,68	57,8	47,2	5,0	11849
25B-80	1023,9	9,11	106,51	78,6	49,2	5,6	11403
26A-40	1036,4	7,78	107,11	38,6	46,2	4,6	13438
26A-60	1006,3	7,84	104,00	59,2	47,2	3,4	13020
26A-80	1000,8	7,95	103,43	79,0	49,6	3,0	12691
26B-40	1005,4	9,16	103,91	38,2	47,4	5,0	11050
26B-60	958,7	8,50	99,08	58,2	48,0	4,8	11380
26B-80	951,3	8,83	98,31	78,6	48,0	4,8	10867
27A-40	1025,3	14,02	106,83	37,8	45,6	5,4	8973
27A-60	1006,3	14,35	104,85	58,0	47,0	5,0	8727
27A-80	1017,4	15,68	106,01	78,6	48,6	3,4	8225
27B-40	1057,3	13,03	110,16	39,0	47,4	5,4	11557
27B-60	1026,7	12,97	106,98	59,2	48,2	5,0	11340
27B-80	1022,5	13,63	106,54	79,6	47,8	4,0	10648
28A-40	1018,8	13,63	107,03	38,2	46,6	4,4	8312
28A-60	980,9	13,08	103,04	58,4	47,0	5,6	8166
28A-80	980,5	13,14	103,00	78,6	46,8	5,0	7796
28B-40	1039,7	12,97	109,22	38,2	46,6	6,0	9627
28B-60	1013,7	13,69	106,50	59,0	45,8	4,0	9536
28B-80	1018,8	18,60	107,03	79,2	47,6	2,8	9069
29A-40	1019,8	10,91	106,78	38,2	44,4	3,8	10692
29A-60	999,4	13,30	104,64	58,0	48,0	1,6	10394
29A-80	996,2	14,35	104,30	78,4	49,4	2,0	10151
29B-40	1039,7	12,48	108,86	38,4	46,2	5,2	8842
29B-60	1007,3	12,92	105,47	59,0	45,8	5,0	8716
29B-80	1007,7	13,69	105,52	79,4	48,2	4,4	7878
30A-40	1019,3	11,26	106,73	36,8	45,6	2,4	9541
30A-60	988,3	11,21	103,48	57,8	46,2	3,4	8648
30A-80	990,6	11,92	103,72	77,4	47,0	7,2	8212

Ek Tablo 4.'ün devamı

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (α_i)	Çekme gerilmesi (kPa)				
30B-40	1039,2	12,36	108,81	38,0	45,6	4,8	8843
30B-60	1004,5	11,87	105,18	59,0	47,0	5,8	9280
30B-80	1004,9	12,48	105,23	79,2	47,4	6,4	9195
31A-40	1005,3	11,78	105,73	38,2	47,2	4,5	7044
31A-60	1013,5	11,12	104,76	58,4	49,6	4,3	6358
31A-80	1016,1	12,34	105,05	78,6	47,4	2,7	5806
31B-40	1013,7	10,76	105,34	38,2	48,0	4,9	6685
31B-60	1011,3	11,21	103,63	59,0	48,0	4,3	6131
31B-80	1015,2	12,20	104,40	79,2	45,6	3,0	5975
32A-40	1003,6	11,34	105,61	38,2	47,0	6,4	6466
32A-60	1008,8	11,06	105,18	58,0	48,6	5,6	6379
32A-80	995,6	12,40	104,44	78,4	47,4	2,6	6026
32B-40	1018,1	10,74	104,91	38,4	48,2	5,2	7202
32B-60	1006,1	11,60	104,38	59,0	47,8	4,8	6481
32B-80	1004,4	11,66	103,70	79,4	46,6	2,7	5742

Ek Tablo 5. Katkısız örneklerin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri Dönen			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Deformasyon (æf)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	1010,5	10,32	107,22	38,4	47,6	5,0	11645
25A-60	1010,0	10,71	107,17	59,0	48,2	4,2	9764
25A-80	1012,4	9,00	107,41	79,4	48,6	3,8	10130
25B-40	1011,9	10,71	107,37	39,0	46,4	5,0	9580
25B-60	991,1	10,32	105,16	59,0	47,0	5,6	9945
25B-80	990,6	10,71	105,11	79,0	46,6	5,2	9769
26A-40	1005,9	10,65	105,67	37,2	46,4	6,8	11577
26A-60	980,0	9,16	102,95	58,0	47,2	7,8	10958
26A-80	989,3	8,78	103,92	77,6	47,2	4,6	9690
26B-40	1017,9	13,36	106,93	38,0	47,4	3,6	7384
26B-60	999,9	13,47	105,04	59,2	48,8	6,0	7597
26B-80	999,9	13,86	105,04	78,8	49,0	4,2	7806
27A-40	1023,0	11,92	108,36	37,8	45,8	4,2	7424
27A-60	1000,8	11,87	106,01	58,0	45,8	4,2	7124
27A-80	993,9	12,48	105,27	77,6	47,6	5,2	9595
27B-40	1037,4	9,27	109,88	39,0	47,8	10,6	8237
27B-60	1007,7	9,22	106,75	59,4	48,2	7,6	8045
27B-80	1008,2	9,77	106,79	79,6	48,6	6,8	7622
28A-40	980,5	12,14	103,51	38,6	48,8	4,2	7656
28A-60	943,9	11,92	99,651	57,4	48,8	4,6	7676
28A-80	957,8	12,64	101,11	78,0	49,2	4,2	7639
28B-40	1011,4	10,82	106,78	38,2	47,0	7,0	8206
28B-60	990,6	10,71	104,58	58,6	48,0	4,6	7587
28B-80	1001,7	11,37	105,76	79,0	48,0	3,6	5605
29A-40	1006,8	9,72	106,29	38,0	47,8	6,8	11000
29A-60	989,3	9,44	104,44	58,4	48,0	7,2	7673
29A-80	1001,2	10,16	105,71	79,4	47,4	6,8	7285
29B-40	984,2	11,48	103,9	37,4	44,8	5,0	8512
29B-60	986,0	11,26	104,09	58,6	47,2	2,2	7955
29B-80	997,1	13,03	105,27	78,2	48,4	7,4	7514
30A-40	1021,6	11,21	109,68	38,8	45,2	4,2	9239
30A-60	1004,9	11,76	107,89	59,0	46,4	4,2	9001
30A-80	1004,5	12,81	107,84	78,6	47,0	3,8	8483

Ek Tablo 5.'in devamı

Örnek Tanımı	Toplam Geri Dönen			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Deformasyon (æf)	Çekme gerilmesi (kPa)				
30B-40	1035,0	12,25	111,12	38,4	46,6	5,4	8575
30B-60	995,3	10,87	106,84	58,4	48,0	5,0	8636
30B-80	994,8	11,32	106,79	78,2	49,2	4,0	8219
31A-40	999,7	12,16	103,56	38,6	47,8	3,6	7169
31A-60	998,4	12,50	104,09	58,8	47,4	6,8	6811
31A-80	997,8	12,20	106,00	78,0	47,9	7,2	6323
31B-40	996,3	10,92	105,15	38,2	50,0	6,8	7481
31B-60	999,2	11,38	102,44	58,6	48,9	5,0	5903
31B-80	994,2	12,20	99,43	79,0	47,0	2,2	5789
32A-40	990,3	11,78	101,99	38,2	48,3	7,4	7142
32A-60	991,5	11,38	103,14	58,4	48,1	4,2	6539
32A-80	992,6	10,90	102,66	79,4	47,3	4,2	6188
32B-40	997,8	10,58	104,36	37,4	49,0	3,8	6361
32B-60	998,3	11,33	102,96	58,0	49,1	5,4	6332
32B-80	990,2	11,85	104,17	78,2	47,7	5,0	5892

Ek Tablo 6. Karot örneklerinin 20°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (ϵ)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	1002,5	7,19	107,94	40,3	47,2	5,1	8029
25A-60	998,0	6,10	99,12	59,0	48,0	5,2	7795
25A-80	1004,0	9,69	107,78	78,9	50,7	5,5	7141
25B-40	987,3	8,65	105,58	39,8	49,8	5,4	9052
25B-60	986,0	9,06	100,75	58,1	48,7	5,3	7840
25B-80	986,0	8,81	105,43	81,2	50,0	5,4	7861
26A-40	994,4	7,04	100,17	38,0	52,9	5,7	8196
26A-60	996,7	7,35	100,51	60,3	49,6	5,4	7753
26A-80	1004,2	7,10	103,17	81,5	49,7	5,4	7345
26B-40	999,5	9,70	100,38	39,3	52,0	5,6	8712
26B-60	995,3	6,43	106,96	61,3	49,7	5,4	7950
26B-80	1003,7	6,88	99,51	80,5	49,9	5,4	7934
27A-40	1008,8	6,36	107,36	38,8	51,6	5,6	5392
27A-60	990,5	8,74	99,18	58,4	50,0	5,4	4894
27A-80	999,8	8,47	101,60	78,1	47,9	5,2	4111
27B-40	997,1	8,85	99,30	38,7	50,1	5,4	5633
27B-60	1007,8	9,36	104,93	60,8	50,6	5,5	4918
27B-80	989,3	6,69	98,26	78,8	52,1	5,6	4331
28A-40	1006,5	6,04	98,61	41,5	50,0	5,4	5645
28A-60	1011,0	7,61	105,50	59,3	52,6	5,7	5422
28A-80	1004,7	8,31	99,18	80,9	52,0	5,6	4626
28B-40	992,6	8,47	103,21	41,0	52,6	5,7	5839
28B-60	1007,7	9,98	104,32	60,4	49,6	5,4	5543
28B-80	998,0	7,02	98,03	79,3	52,5	5,7	4826
29A-40	997,7	6,99	98,77	38,2	49,3	5,3	6408
29A-60	996,6	7,96	99,58	59,7	48,3	5,2	5722
29A-80	1003,3	6,62	106,29	79,2	49,3	5,3	6033
29B-40	1002,7	7,47	104,57	41,1	51,8	5,6	6928
29B-60	988,0	8,68	102,05	58,6	53,0	5,7	5939
29B-80	991,4	7,64	107,39	80,1	51,4	5,6	5103
30A-40	997,7	6,38	103,82	40,3	50,3	5,5	6931
30A-60	994,4	6,42	107,64	60,8	48,8	5,3	6021
30A-80	993,0	9,97	107,63	78,6	48,1	5,2	5787

Ek Tablo 6.'nın devamı

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (ϵ_i)	Çekme gerilmesi (kPa)				
30B-40	996,9	6,12	107,55	40,4	52,5	5,7	7452
30B-60	1007,8	9,23	105,37	60,2	52,0	5,6	6337
30B-80	995,3	6,93	102,98	79,1	51,0	5,5	5078
31A-40	986,5	7,82	102,40	41,3	51,0	5,5	6171
31A-60	1003,7	10,00	100,51	58,9	48,9	5,3	4918
31A-80	986,9	6,52	98,60	78,6	52,6	5,7	4357
31B-40	1001,3	7,20	100,10	39,6	51,3	5,6	5257
31B-60	1005,0	8,74	104,78	59,7	52,2	5,6	4545
31B-80	987,1	7,14	105,14	79,3	52,6	5,7	4011
32A-40	1000,6	7,96	107,27	38,2	51,2	5,5	4676
32A-60	997,3	8,16	106,78	59,9	50,4	5,5	4329
32A-80	993,5	6,02	103,84	78,4	52,8	5,7	3964
32B-40	989,1	7,37	102,28	40,6	50,9	5,5	4819
32B-60	1002,0	6,84	108,05	61,5	52,1	5,6	4987
32B-80	1005,8	7,27	106,35	78,3	49,1	5,3	4611

Ek Tablo 7. SBS katkılı örneklerin 40°C sıcaklıkta dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (æi)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	995,3	23,57	103,02	38,0	44,8	8,0	4268
25A-60	1004,5	29,64	103,98	59,2	45,4	7,0	3420
25A-80	1006,3	34,22	104,17	79,6	45,2	7,4	2966
25B-40	1080,9	29,53	111,89	39,4	46,0	8,6	3713
25B-60	1028,6	38,53	106,47	59,4	47,0	5,8	2699
25B-80	1016,5	46,37	105,23	79,6	46,8	6,4	2212
26A-40	1067,4	33,34	110,77	39,2	46,0	7,4	3112
26A-60	1027,2	38,92	106,59	59,8	46,8	7,4	2669
26A-80	1017,0	45,21	105,53	78,8	48,2	6,2	2275
26B-40	1025,3	25,17	106,40	37,4	46,4	8,4	4136
26B-60	992,0	31,41	102,94	57,4	47,6	8,2	3197
26B-80	993,0	36,10	103,03	78,2	47,6	9,0	2784
27A-40	1061,9	46,98	111,92	39,0	45,4	7,0	2328
27A-60	1024,9	55,86	108,02	59,4	47,0	6,6	1886
27A-80	1011,4	65,47	106,61	79,8	46,8	5,6	1588
27B-40	1065,1	47,25	112,27	39,0	46,2	9,2	2328
27B-60	1011,9	58,18	106,65	59,0	45,4	7,6	1791
27B-80	1073,9	45,98	109,81	38,6	45,8	7,8	1463
28A-40	1060,5	41,73	108,44	39,0	45,6	7,0	2540
28A-60	1031,3	50,18	105,46	60,0	46,2	6,2	2049
28A-80	1019,8	57,85	104,27	79,4	47,2	6,8	1756
28B-40	1037,4	53,99	106,07	39,2	45,8	7,2	2333
28B-60	1029,0	63,76	105,22	59,0	46,2	6,0	1920
28B-80	1015,8	81,20	107,15	79,4	46,6	5,8	1609
29A-40	1063,3	52,11	110,61	38,4	46,2	9,0	2752
29A-60	1021,2	68,56	106,22	59,0	45,6	7,4	2547
29A-80	1012,4	82,19	105,31	78,6	46,2	6,0	2166
29B-40	1014,2	53,10	105,50	38,0	42,6	8,6	2683
29B-60	1014,2	74,52	105,50	59,2	44,8	8,2	2189
29B-80	1008,7	91,25	104,92	80,2	44,2	7,6	1895
30A-40	1082,7	50,45	113,00	39,0	45,6	9,4	2327
30A-60	1043,8	63,54	108,94	59,6	45,8	6,4	1821
30A-80	1034,6	75,90	107,97	80,2	45,6	6,6	1550

Ek Tablo 7.'nin devamı

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (æi)	Çekme gerilmesi (kPa)				
30B-40	1107,7	51,89	115,61	39,0	46,2	11,2	2376
30B-60	1053,6	68,72	109,95	59,4	47,0	8,0	1713
30B-80	1038,7	80,21	108,41	79,8	46,8	7,0	1463
31A-40	773,1	76,45	111,30	38,9	46,4	5,0	2081
31A-60	825,8	45,92	113,79	60,7	44,9	5,6	1511
31A-80	1081,8	61,09	111,34	79,3	44,6	7,0	1249
31B-40	1179,0	75,21	110,25	41,4	44,0	5,6	1950
31B-60	1405,8	51,20	112,18	59,4	46,1	4,8	1381
31B-80	1485,0	65,42	105,98	81,0	46,5	5,0	1121
32A-40	703,2	78,00	109,13	41,3	44,6	4,2	2194
32A-60	704,6	57,04	108,88	61,7	46,4	3,8	1673
32A-80	1184,6	68,75	105,15	78,6	44,4	6,6	1387
32B-40	1232,7	82,60	107,27	40,5	46,6	6,0	2190
32B-60	1494,3	63,18	112,33	60,6	45,3	4,8	1562
32B-80	1445,2	79,50	106,10	79,6	45,8	3,8	1318

Ek Tablo 8. Wetfix BE katkılı örneklerin 40°C sıcaklıkta dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri Dönen			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Deformasyon (æi)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	1035,0	34,50	107,84	38,2	45,6	6,4	3049
25A-60	1001,7	37,09	104,37	59,0	44,8	5,4	2742
25A-80	999,0	40,85	104,08	79,0	46,6	5,0	2483
25B-40	1045,7	37,20	108,95	39,4	46,4	6,6	2854
25B-60	1018,8	40,85	106,16	60,0	47,0	6,2	2533
25B-80	1023,5	45,65	106,64	79,8	47,8	6,0	2276
26A-40	1096,6	35,00	115,20	39,8	46,4	6,8	3209
26A-60	1053,6	39,85	110,68	60,2	46,8	5,6	2705
26A-80	1050,8	44,71	110,39	80,0	47,0	5,2	2406
26B-40	1089,7	34,39	114,47	39,8	45,2	4,8	3244
26B-60	1041,1	37,43	109,37	60,4	45,8	4,6	2848
26B-80	1029,9	41,79	108,20	80,6	46,2	4,4	2522
27A-40	1069,3	29,86	112,33	39,6	45,4	5,0	3164
27A-60	1033,7	33,67	108,23	59,2	46,2	4,6	2631
27A-80	1024,4	36,76	107,26	80,0	45,0	5,2	2342
27B-40	1067,4	29,59	111,77	38,4	46,6	6,0	3187
27B-60	1025,8	33,12	107,41	58,6	46,6	5,6	2660
27B-80	1022,1	36,82	107,02	78,2	46,2	5,4	2334
28A-40	1037,4	45,37	108,62	39,2	46,0	5,6	1837
28A-60	1003,6	53,16	105,08	60,0	46,0	5,0	1426
28A-80	998,1	63,04	104,50	79,0	47,2	5,6	1115
28B-40	1065,1	50,84	111,53	38,6	46,2	7,0	1639
28B-60	1024,4	57,19	107,26	59,6	45,8	5,6	1327
28B-80	1023,0	64,58	107,12	79,6	47,0	4,8	1116
29A-40	1047,1	34,06	108,92	38,4	45,0	5,0	2433
29A-60	1031,8	39,58	107,33	60,4	44,0	4,2	2005
29A-80	1018,8	44,38	105,98	80,2	45,4	3,8	1623
29B-40	1092,9	38,97	113,69	39,8	45,6	6,6	2377
29B-60	1046,6	42,06	108,87	60,0	45,6	6,0	2062
29B-80	1042,0	46,92	108,39	80,0	46,8	4,8	1719
30A-40	1018,8	44,38	105,98	80,2	45,4	3,8	2123
30A-60	1044,8	45,10	107,97	60,0	46,4	5,8	1833
30A-80	1029,0	50,51	106,35	80,2	47,4	5,6	1688

Ek Tablo 8.'in devamı

Örnek Tanımı	Yük	Toplam Geri Dönen Deformasyon	Çekme gerilmesi	Yüklü Süre	Düşme Süresi	Faz Gecikmesi	Esneklik Modülü
	(N)	(æi)	(kPa)	(ms)	(ms)	(ms)	(MPa)
30B-40	1087,8	38,25	112,42	39,0	45,6	7,8	2085
30B-60	1044,3	44,99	107,93	60,2	46,2	6,6	1857
30B-80	1031,3	50,01	106,59	80,0	45,8	6,0	1765
31A-40	1008,5	45,90	107,52	41,3	46,8	7,8	2020
31A-60	1018,0	45,73	111,24	61,7	47,0	11,2	1742
31A-80	1011,1	53,41	113,42	78,6	45,2	8,4	1427
31B-40	1005,6	46,60	112,87	40,5	45,8	8,8	1944
31B-60	1004,4	52,10	111,05	60,6	46,2	8,8	1623
31B-80	1016,7	44,89	108,84	79,6	46,2	6,8	1351
32A-40	1004,0	52,99	109,63	41,5	45,8	6,2	1791
32A-60	1001,4	51,69	105,27	59,4	46,8	9,4	1433
32A-80	1012,2	48,48	111,21	78,6	47,0	7,2	1151
32B-40	1017,5	48,60	107,56	40,5	45,2	6,6	1968
32B-60	1007,1	46,42	110,59	60,5	45,8	9,8	1438
32B-80	1005,4	50,31	110,90	79,6	46,2	8,4	1177

Ek Tablo 9. Katkısız örneklerin 40°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (æi)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	1054,9	43,94	111,93	39,4	45,6	8,0	2492
25A-60	1023,9	54,59	108,64	59,2	46,6	6,8	1942
25A-80	1014,7	64,20	107,66	80,0	47,6	7,8	1634
25B-40	931,4	39,08	98,82	36,4	48,8	11,2	2490
25B-60	924,0	51,12	98,04	57,4	49,2	8,4	1786
25B-80	907,3	58,79	96,27	77,2	49,0	8,8	1596
26A-40	1058,2	53,10	111,17	39,2	46,2	8,8	2047
26A-60	1014,2	64,25	106,55	60,0	46,8	6,8	1617
26A-80	1009,1	75,73	106,01	79,8	48,0	6,2	1364
26B-40	1050,3	55,86	110,34	38,0	45,8	9,4	1939
26B-60	1020,2	69,77	107,18	59,0	44,6	7,2	1498
26B-80	1017,9	82,08	106,93	79,6	46,8	6,6	1270
27A-40	995,3	54,87	105,42	38,0	44,4	9,8	1951
27A-60	971,7	69,88	102,92	58,8	45,6	8,4	1587
27A-80	974,4	82,91	103,21	79,0	45,6	7,2	1351
27B-40	1075,3	54,81	113,90	39,2	47,4	9,2	1819
27B-60	1017,9	66,24	107,82	59,6	48,0	7,6	1418
27B-80	1004,9	76,51	106,45	79,2	48,6	7,6	1205
28A-40	1020,2	46,15	107,18	37,8	47,0	7,4	2289
28A-60	1005,9	61,93	105,67	59,0	47,0	7,0	1790
28A-80	1007,3	76,18	105,82	80,8	46,2	5,4	1543
28B-40	1076,2	52,11	113,06	39,8	46,6	10,8	1883
28B-60	1022,5	65,52	107,42	60,0	47,0	9,8	1530
28B-80	1012,4	78,33	106,35	81,2	46,6	6,4	1320
29A-40	1036,4	57,74	109,42	38,4	45,4	9,0	1976
29A-60	1003,1	69,39	105,90	59,2	46,8	8,6	1535
29A-80	1007,3	82,80	106,34	79,4	47,0	6,6	1313
29B-40	1049,4	63,20	110,79	39,6	45,4	11,6	2136
29B-60	1026,2	80,21	108,35	60,0	46,6	9,0	1688
29B-80	1013,7	94,39	107,03	80,4	46,2	7,2	1456
30A-40	1068,4	50,40	112,79	39,0	44,6	7,2	2371
30A-60	1033,7	62,98	109,13	59,2	45,8	6,0	1763
30A-80	1029,0	73,36	108,64	79,6	45,2	5,2	1454

Ek Tablo 9.'un devamı

Örnek Tanımı	Toplam Geri			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Dönen Deformasyon (æi)	Çekme gerilmesi (kPa)				
30B-40	1111,0	64,36	117,29	40,0	45,4	9,0	2224
30B-60	1063,7	76,62	112,31	60,2	45,4	7,2	1699
30B-80	1051,2	88,71	110,99	80,0	46,6	7,0	1424
31A-40	1011,0	76,07	106,24	38,4	47,6	6,4	1805
31A-60	1005,2	45,26	111,22	59,0	45,4	9,0	1427
31A-80	1024,7	61,21	112,01	78,6	47,0	8,6	1222
31B-40	1002,3	75,50	107,60	38,0	46,8	6,6	1747
31B-60	1010,7	51,81	105,05	59,2	46,2	11,6	1330
31B-80	1014,9	65,24	108,45	80,2	45,4	9,0	1325
32A-40	1024,1	77,37	113,64	39,0	45,8	6,6	1792
32A-60	1021,4	57,17	113,85	59,6	45,6	5,6	1539
32A-80	1016,9	68,62	111,76	80,2	46,2	9,2	1224
32B-40	1019,2	82,54	108,50	39,0	47,2	7,6	1813
32B-60	1023,2	62,65	112,21	59,4	45,8	7,8	1427
32B-80	1019,1	79,95	108,87	79,8	46,2	7,0	1129

Ek Tablo 10. Karot örneklerinin 40°C sıcaklıktaki dolaylı çekme deneyi sonuçları

Örnek Tanımı	Toplam Geri Dönen			Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
	Yük (N)	Deformasyon (æ)	Çekme gerilmesi (kPa)				
25A-40	990,3	45,75	106,24	40,9	50,6	5,5	1354
25A-60	1004,4	45,75	98,39	59,6	49,6	5,4	1219
25A-80	991,9	47,51	107,01	79,6	49,5	5,6	1043
25B-40	1011,9	42,21	100,44	40,6	51,3	5,0	1414
25B-60	1011,4	56,33	101,60	59,0	49,9	5,2	1176
25B-80	997,8	52,16	107,51	81,8	47,4	6,5	994
26A-40	1008,1	31,88	99,47	38,2	51,7	4,2	1652
26A-60	990,6	57,73	103,91	61,2	49,8	5,9	1228
26A-80	997,4	50,81	102,81	82,5	50,4	5,9	824
26B-40	999,1	46,61	101,19	39,7	49,8	4,4	2530
26B-60	1001,8	49,64	99,79	62,2	50,0	6,7	1136
26B-80	995,0	50,14	106,62	81,2	49,6	4,5	861
27A-40	991,4	45,18	103,33	39,2	51,9	5,5	1217
27A-60	992,7	56,01	103,07	58,5	51,6	7,0	1138
27A-80	995,0	35,56	98,81	78,8	52,0	4,5	1094
27B-40	1001,3	51,15	104,51	39,0	49,2	6,9	1260
27B-60	1014,9	55,13	107,38	61,4	51,0	6,0	1163
27B-80	1004,4	34,15	103,77	79,1	47,6	6,8	1209
28A-40	1003,7	54,67	109,00	42,4	52,3	6,6	1224
28A-60	998,5	59,85	100,84	59,8	51,8	6,7	1170
28A-80	997,6	32,28	106,93	80,9	48,9	6,9	951
28B-40	998,8	46,05	106,82	41,4	53,0	4,8	1395
28B-60	1006,6	36,59	102,54	61,4	52,4	6,5	1038
28B-80	1006,5	42,27	104,75	80,0	52,4	5,9	931
29A-40	1001,1	33,13	104,67	38,9	48,0	6,4	1456
29A-60	1000,5	38,92	103,13	60,7	49,6	6,8	945
29A-80	991,7	47,16	106,54	79,3	48,5	5,9	875
29B-40	1004,4	54,64	101,64	41,4	48,6	6,8	1193
29B-60	1015,0	55,00	108,67	59,4	47,1	5,8	1075
29B-80	992,6	44,57	104,76	81,0	52,0	4,2	1039
30A-40	1009,8	39,01	105,32	41,3	49,7	5,4	1399
30A-60	1013,1	49,96	108,10	61,7	47,0	4,2	1174
30A-80	1005,8	40,40	107,25	78,6	49,8	6,4	1079

Ek Tablo 10.'un devamı

Örnek Tanımı	Yük (N)	Toplam Geri Dönen Deformasyon (æ)	Çekme gerilmesi (kPa)	Yüklü Süre (ms)	Düşme Süresi (ms)	Faz Gecikmesi (ms)	Esneklik Modülü (MPa)
30B-40	990,6	43,84	107,60	40,5	50,9	5,1	1410
30B-60	1000,9	53,09	102,37	60,6	51,2	4,5	1255
30B-80	1009,0	59,80	100,80	79,6	53,0	6,5	1229
31A-40	1003,6	38,34	103,17	41,5	50,8	5,4	1042
31A-60	995,7	48,31	101,74	59,4	50,0	6,2	918
31A-80	996,4	30,69	101,68	78,6	50,3	4,2	774
31B-40	992,8	47,17	106,03	40,5	47,6	4,8	1123
31B-60	1004,4	48,77	104,29	60,5	53,0	6,6	864
31B-80	1002,9	48,84	100,44	79,6	52,3	5,1	833
32A-40	998,1	60,01	103,44	38,5	49,1	5,4	1025
32A-60	994,9	38,77	100,81	60,4	48,7	5,2	858
32A-80	1012,2	37,83	102,49	78,5	48,9	6,1	931
32B-40	992,0	51,90	102,71	41,3	48,5	6,9	1014
32B-60	992,3	45,47	102,57	61,6	49,0	4,8	993
32B-80	993,7	33,99	108,82	78,9	47,5	4,3	842

Ek Tablo 11. SBS katkı örneklerin tekrarlı sünme deneyi sonuçları

Yükleme sayısı	Örnekler numaraları / kalıcı deformasyonlar (10^{-6} inç/inç)							
	33	34	35	36	37	38	39	40
1	158	153	142	123	292	238	513	161
10	485	440	472	445	889	742	1400	492
30	762	679	738	683	1283	1086	1981	763
50	911	765	880	797	1480	1277	2268	904
100	1140	956	1118	949	1756	1528	2694	1155
150	1279	1052	1278	1053	1924	1683	2930	1276
251	1458	1224	1495	1195	2141	1896	3230	1501
501	1689	1397	1834	1385	2427	2157	3659	1756
754	1820	1512	2032	1508	2584	2303	3943	1888
1000	1910	1598	2192	1594	2693	2390	4107	2021
1505	2051	1694	2437	1736	2822	2545	4359	2154
1995	2122	1780	2607	1821	2931	2651	4600	2266
3004	2272	1905	2863	1953	3040	2777	4807	2378
5011	2433	2039	3186	2142	3199	2931	5013	2562
10000	2654	2221	3641	2388	3418	3155	5274	2796
15058	2774	2346	3869	2606	3547	3301	5383	2898
19952	2864	2413	4030	2710	3617	3388	5482	2990
30045	2974	2509	4191	2814	3756	3515	5615	3123
39810	3065	2557	4380	2881	3835	3583	5670	3205
50118	3145	2625	4464	2890	3865	3661	5747	3267
59948	3205	2673	4483	2919	3935	3709	5791	3319
64730	3205	2682	4502	2929	3944	3699	5813	3350

Ek Tablo 12. Wetfix BE katkılı örneklerin tekrarlı sünme deneyi sonuçları

Yükleme sayısı	Örnekler numaraları / kalıcı deformasyonlar (10^{-6} inç/inç)							
	33	34	35	36	37	38	39	40
1	164	152	183	279	212	276	350	376
10	338	379	610	942	727	946	1441	1109
30	474	530	1001	1461	1152	1491	2213	1699
50	551	635	1237	1750	1374	1798	2595	2035
100	657	777	1579	2173	1679	2165	3198	2472
150	725	862	1784	2413	1893	2393	3540	2709
251	841	956	2041	2711	2096	2680	4008	3039
501	986	1145	2380	3105	2381	3039	4599	3420
754	1082	1268	2575	3298	2544	3207	4935	3595
1000	1160	1352	2719	3451	2636	3347	5118	3708
1505	1266	1456	2863	3624	2809	3526	5424	3873
1995	1353	1551	2977	3740	2901	3656	5641	3997
3004	1479	1692	3163	3923	3054	3815	5919	4142
5011	1585	1862	3358	4134	3217	4015	6272	4297
10000	1768	2155	3616	4422	3452	4264	6657	4527
15058	2039	2287	3750	4547	3575	4424	6865	4652
19952	2194	2428	3842	4701	3658	4553	7001	4756
30045	2348	2523	3997	4836	3792	4733	7241	4860
39810	2503	2664	4120	4942	3896	4873	7355	4964
50118	2599	2749	4202	5057	3948	4984	7429	5027
59948	2657	2806	4264	5134	4020	5074	7523	5120
64730	2696	2825	4315	5163	4051	5104	7544	5141

Ek Tablo 13. Katkısız örneklerin Tekrarlı sünme deney sonuçları

Yükleme sayısı	Örnekler numaraları / kalıcı deformasyonlar (10^{-6} inç/inç)							
	33	34	35	36	37	38	39	40
1	126	211	459	231	871	273	334	448
10	415	703	1470	780	2232	949	1126	1650
30	647	1178	2217	1262	2969	1588	1765	2545
50	821	1440	2605	1515	3356	1921	2118	2983
100	1092	1818	3143	1874	3873	2404	2568	3561
150	1276	2031	3429	2098	4158	2692	2837	3891
251	1538	2332	3764	2362	4506	3039	3163	4287
501	1913	2720	4159	2645	4941	3466	3539	4779
754	2144	2923	4347	2773	5172	3694	3722	5330
1000	2289	3059	4495	2880	5304	3833	3837	5511
1505	2501	3243	4673	3027	5481	4031	4011	5758
1995	2655	3360	4771	3115	5592	4160	4127	5891
3004	2886	3533	4959	3271	5769	4319	4281	6100
5011	3147	3726	5138	3447	5981	4518	4483	6374
10000	3427	4006	5358	3692	6215	4767	4763	6696
15058	3639	4141	5487	3819	6370	4917	4927	6876
19952	3726	4257	5587	3918	6469	5017	5044	7008
30045	3899	4382	5716	4096	6622	5156	5199	7179
39810	4044	4460	5806	4195	6732	5256	5296	7302
50118	4140	4537	5896	4264	6831	5365	5383	7388
59948	4198	4595	5945	4343	6895	5415	5471	7531
64730	4227	4605	5965	4373	6928	5435	5481	7531

Ek Tablo 14. Karot örneklerinin tekrarlı sünme deneyi sonuçları

Yükleme sayısı	Örnekler numaraları / kalıcı deformasyonlar (10^{-6} inç/inç)							
	33	34	35	36	37	38	39	40
1	563	1597	272	2966	2446	1061	320	1017
10	1321	3031	749	4446	4024	2326	1086	1908
30	1752	3674	1235	4985	4739	3004	1947	2663
50	1963	3972	1570	5201	5028	3301	2515	2943
100	2241	4345	2177	5491	5442	3704	3441	3342
150	2423	4591	2591	5659	5672	3943	4081	3595
251	2651	4857	3236	5837	5961	4211	4973	3906
501	2945	5218	4274	6089	6373	4612	6321	4227
754	3125	5455	4984	6238	6641	4871	7213	4422
1000	3267	5626	5533	6360	6823	5043	7904	4666
1505	3476	5901	6427	6500	7139	5330	8996	5053
1995	3628	6081	7111	6621	7388	5569	9845	5332
3004	3874	6383	8286	6799	7787	5960	11256	5756
5011	4178	6770	10041	7023	8396	6531	13495	6448
10000	4692	7417	13048	7366	9641	7779	17774	7936
15058	5032	7856	15550	7608	10849	9067	21710	9609
19952	5277	8194	17940	7794	12270	10482	26241	11711
30045	5711	8804	22887	8091	16790	15194	39046	21150
39810	6079	9349	29126	8361	26641	27021	45251	60980
50118	6453	9901	38737	8584	58984	53351	45251	60980
59948	6780	10420	48337	8789	58984	53351	45251	60980
64730	6949	10680	59172	8864	58984	53351	45251	60980

ÖZGEÇMİŞ

Erol İskender 1979 yılında Trabzon'un Yomra ilçesinde doğdu. 1990 yılında Kömürcü Armutluk İlkokulundan, 1993 yılında Kömürcü İlköğretim Okulundan, 1996 yılında Yomra Lisesinden mezun oldu. 1997 yılında girdiği Üniversite sınavında Karadeniz Teknik Üniversitesi Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2001 Bahar yarıyılı sonunda "İnşaat Mühendisi" unvanıyla bu bölümden bölüm ve fakülte birincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl başvurduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans yapmaya hak kazandı. 2002 yılında Gümüşhane Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün açmış olduğu Araştırma Görevlisi kadrosuna başvurdu ve Ulaştırma Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2004 yılında "İnşaat Yüksek mühendisi" unvanını aldı.

Evli ve bir çocuk babası olan Erol İskender İngilizce bilmekte ve halen Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.