

**ÖĞÜTÜLMÜŞ ARAÇ LASTİĞİNİN BİTÜMLÜ SICAK
KARIŞIMLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İnş. Müh. Hakan ÇOLAK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Baha Vural KÖK
KASIM-2010**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÖĞÜTÜLMÜŞ ARAÇ LASTİĞİNİN BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Hakan ÇOLAK

(98115101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 Kasım 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Kasım 2010

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Baha Vural KÖK (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Necati KULOĞLU (F.Ü)

Doç. Dr. Ömer KELEŞOĞLU (F.Ü)

KASIM-2010

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmayı bana önererek yoğun iş temposuna rağmen seminerin her aşamasında ilgisini esirgemeyen, bana her konuda yardımcı olan, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım hocalarım, Sayın Prof. Dr. Necati KULOĞLU ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Baha Vural KÖK 'e teşekkür eder, saygılar sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca üzerimde emeği olan, Ulaştırma Anabilim Dalındaki hocalarım başta olmak üzere tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda olan, bana güven veren ve desteklerini her zaman hissettiren başta annem ve babam olmak üzere aileme ve çalışmalarım sırasında bana destek olan eşime minnettar olduğumu belirtirim.

Hakan ÇOLAK
ELAZIĞ 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLOLAR LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ	1
2. KARAYOLU ULAŞIMI ve KARAYOLLARININ YAPISI	3
2.1. Ulaşımın Tanımı	3
2.2. Ulaştırmanın Fonksiyonları	3
2.3. Karayollarının Sınıflandırması	4
2.4. Karayollarının Yapısı	5
2.5. Karayolu Üstyapı Tipleri	6
2.5.1. Esnek Üstyapı	6
2.5.2. Rijit Üstyapı	7
2.6. Yol Üstyapı Seçiminde Etkili Olan Faktörler	8
2.6.1. Trafik	8
2.6.2. İklim	9
2.6.3. Maliyet	9
2.6.4. Güvenlik ve Konfor	10
3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR ve ÖZELİKLERİ	11
3.1. Agregalar	11
3.2. Bitümlü Bağlayıcılar	13
3.3. Bitümlü Karışımların Sınıflandırılması	14
3.3.1. Soğuk Karışımlar	14
3.3.2. Sıcak Karışımlar	15
3.4. Bitümlü Karışımlardan Beklenen Fiziksel ve Mekanik Özellikler	16
3.4.1. Stabilité	16
3.4.2. Esneklik	17
3.4.3. Dayanıklılık (Durabilite)	"18
3.4.4. Geçirimsizlik	19
3.4.5. Yorulma Mukavemeti	19
3.4.6. Kayma Direnci	19
3.4.7. İşlenebilirlik	20
4. ATIK YÖNETİMİ ve ATIK LASTİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	21
4.1. Atıkların Yönetimi	21
4.2. Atık Lastikler	22
4.3. Atık Lastiklerin Yeniden Değerlendirilmesi	25
4.3.1. Tekrar Kaplama	26
4.3.2. Doğrudan Değerlendirme	26
4.3.3. Parçalayıp ve Öğütürek Değerlendirme	27

4.3.4.	Termik Değerlendirme	29
4.4.	Kauçuk/Lastik Üretimi	29
4.4.1.	Doğal Kauçuk	31
4.4.2.	Sentetik Kauçuk	31
4.5.	Atık Lastikleri Parçalama Yöntemleri	32
4.5.1.	Mekanik Parçalama Yöntemi	32
4.5.2.	Nitrojenle Parçalama Yöntemi	34
4.6.	Atık Lastiklerin Bitümlü Kaplamalarda Kullanılması ve Yapılan Çalışmalar ..	34
5.	ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER	38
5.1.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler	38
5.1.1.	Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)	38
5.1.2.	Yumuşama Noktası Deneyi (TS 118 EN 1427)	39
5.1.3.	Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi	39
5.1.4.	Dönel Viskozimetre Deneyi	42
5.2.	Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler	43
5.2.1.	Dinamik Sünme Deneyi	43
5.2.2.	İndirek Çekme Tekrarlı Yorulma Deneyi	46
5.2.3.	İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deneyi	47
6.	DENEYSSEL ÇALIŞMA	49
6.1.	Bitüm Numuneleri Üzerindeki Deneysel Çalışmalar	49
6.1.1.	Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi	49
6.1.2.	Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması	53
6.1.3.	Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları	55
6.1.3.1.	Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları	55
6.1.3.2.	Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları	60
6.1.3.3.	Geleneksel Bağlayıcı Deney Sonuçları	61
6.1.3.4.	Bağlayıcı Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi	62
6.2.	Bitümlü Sıcak Karışım Numuneleri Üzerindeki Deneysel Çalışmalar	63
6.2.1.	Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi	63
6.2.2.	Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması	64
6.2.3.	Dinamik Sünme Deney Sonuçları	65
6.2.4.	İndirek Çekme Tekrarlı Yorulma Test Sonuçları	68
6.2.5.	İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları	70
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	72
	KAYNAKLAR	74
	ÖZGEÇMİŞ.....	78

ÖZET

Bu çalışmada öğütme yöntemi ile atık araç lastiklerinden geri dönüştürülmüş kauçuk (CR), bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda olmak üzere iki şekilde değerlendirilmiştir. İlk olarak öğütülmüş kauçukla modifiye edilen bitüm, dinamik kesme reometresi, dönel viskozimetre ve geleneksel bağlayıcı deneyleri ile değerlendirilmiştir. Daha sonra öğütülmüş kauçuk modifiyeli bitüm içeren sıcak karışımlar, kalıcı deformasyon, yorulma karakteristikleri ve rijitlik modülleri bakımından değerlendirilmiştir. Stiren-butadien-stiren (SBS) bitümlü karışımların performansını iyileştirmede yaygın olarak kullanılan bir modifiye polimeri olduğundan, öğütülmüş kauçuk modifiyeli bitüm ve sıcak karışımların özellikleri, değişik oranlarda SBS ile modifiye edilmiş bitüm ve sıcak karışımların özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Reolojik bağlayıcı deney sonuçları, SBS modifiyeli bağlayıcı ile aynı performansı yakalayabilmek için CR oranının özellikle düşük frekanslarda SBS oranından çok yüksek değerlerde olması gerektiğini göstermiştir. Buna karşın CR modifiyeli bağlayıcı aynı kompleks modülünde SBS modifiyeli bağlayıcıdan, daha fazla elastik davranışa işaret eden düşük faz açısı sergilemiştir. Superpave şartnamesine uygun olarak kabul edilebilir işlenebilme ve pompalanabilme açısından SBS ve CR oranlarının sırasıyla %6,7 ve %10,5 değerinden düşük olması gerektiği tespit edilmiştir. Geleneksel bağlayıcı deneylerinde katkı oranının artması ile CR ve SBS modifiyeli bağlayıcıların daha düşük sıcaklık hassasiyeti sergiledikleri ve bu davranışın SBS modifiyeli bağlayıcılarda daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Dinamik sünme testi, SBS oranından iki kat fazla CR oranının aynı performansı yakaladığını göstermiştir. Yorulma deneyinde %8 CR modifikasyonu %2,3,4 SBS modifikasyonundan daha iyi sonuçlar, ayrıca %8 CR modifiyeli karışımlar kontrol karışımlarından %50 daha yüksek rijitlik modülleri vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık Lastik Kauçuğu, SBS, Modifikasyon, Reoloji, Mekanik Özellikler.

SUMMARY

In this study the use of crumb rubber (CR) recycled from waste tires using an ambient grinding process was evaluated at two stages as in bitumen and hot mixture. First, bitumen modified with crumb rubber was evaluated by rotational viscometry (RV), dynamic shear rheometry (DSR) and conventional binder tests. Hot asphalt mixtures including crumb-rubber-modified bitumen were then evaluated by determining the permanent and fatigue characteristics and stiffness moduli of control and modified mixtures. Because styrene-butadiene-styrene (SBS) is a polymer modifier that is widely used in bitumen to improve the performance properties of hot-mix asphalt, the properties of the crumb-rubber-modified bitumen and asphalt mixtures were compared to different contents of SBS-modified-bitumen and asphalt mixtures. The rheological binder tests showed that to achieve the same performance, as with SBS-modified binders, the CR-modified binders must be used at much higher contents than SBS, particularly at low frequency. However, the CR-modified binder displayed a lower phase angle than the SBS-modified binder at the same complex modulus at low frequency, indicating an increased elastic response. For acceptable workability and pumpability according to Superpave specifications, it was determined that the SBS and CR contents must be lower than 6.7% and 10.5% by weight, respectively. In conventional binder tests, it was determined that both SBS- and CR-modified binders exhibit less temperature susceptibility with increased additive content. However, this trend was more pronounced for the SBS-modified binder. The dynamic creep tests showed that a crumb-rubber content twice that of the SBS content in the hot asphalt mixtures provided the same performance. An 8%-CR modification exhibited better results than 2%, 3%, or 4% SBS modifications in the fatigue test. Furthermore, 8% CR modified mixtures displayed 50% higher stiffness modulus values than the control mixture.

Key Words: Crumb Rubber, SBS, Modification, Rheology, Mechanical Properties.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil.2.1. Tipik karayolu enkesiti	6
Şekil 4.1. Atık lastik stoklarından görüntü	23
Şekil 4.2. Atık lastik stoklarından görüntü	24
Şekil 4.3. Atık lastik deposunda meydana gelen yangından bir görüntü	25
Şekil 4.4. Bütün lastiklerin şev korumasında kullanılması	26
Şekil 4.5. Kullanılmış araç lastiklerinin duvar arkası dolgusunda kullanılması	27
Şekil 4.6. Kullanılmış araç lastiklerinin yol gövdesinde kullanılması	28
Şekil 4.7. Araç lastiklerinin yapısı	30
Şekil 4.8. Lastiğin mekanik olarak parçalanması	33
Şekil 4.9. Lastik parçalama tesisleri	33
Şekil 5.1. Penetrasyon deney aleti	38
Şekil 5.2. Yumuşama noktası deney aleti	39
Şekil 5.3. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi	40
Şekil 5.4. DSR Deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri	41
Şekil 5.5. Bitümün viskoelastik özelliği	41
Şekil 5.6. Viskozite değerleri ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi	43
Şekil 5.7. Brookfield DV-III ultra dönel viskozimetresi	43
Şekil 5.8. Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi	44
Şekil 5.9. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi	45
Şekil 5.10. Dinamik sünme deney düzeneği	45
Şekil 5.11. İndirek çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği	47
Şekil 5.12. İndirek çekme rijitlik modülü deney düzeneği	48
Şekil 6.1. Atık lastik öğütme süreci	51
Şekil 6.2. Atık lastik kauçuğu SEM görüntüleri	52
Şekil 6.3. Karıştırma milleri ve etkileri	53
Şekil 6.4. Çalışmada kullanılan karıştırma mili	54
Şekil 6.5. Modifiye bitüm karıştırma cihazı	54
Şekil 6.6. CRM bağlayıcıların kompleks modülü-frekans ilişkisi	55
Şekil 6.7. SBS modifiyeli bağlayıcıların kompleks modülü-frekans ilişkisi	56

Şekil 6.8. CRM bağlayıcılarının modifikasyon indisi- frekans ilişkisi	56
Şekil 6.9. SBS modifiyeli bağlayıcılarının modifikasyon indisi- frekans ilişkisi	57
Şekil 6.10. Modifiyeli bağlayıcıların kompleks modüllerinin katkı oranı ile değişimi	58
Şekil 6.11. CR oranına karşılık SBS oranındaki değişim	59
Şekil 6.12. Modifiyeli bağlayıcıların kompleks modülüne karşılık faz açılarında meydana gelen değişim	60
Şekil 6.13. Bağlayıcıların katkı oranı ile viskozitelerinde meydana gelen değişim	61
Şekil 6.14. Bağlayıcıların katkı oranı- penetrasyon indeksi ilişkisi	62
Şekil 6.15. CRM karışımlarının toplam şekil değiştirme- darbe sayısı ilişkisi	66
Şekil 6.16. SBS karışımlarının toplam şekil değiştirme- darbe sayısı ilişkisi	66
Şekil 6.17. Karışımların katkı oranı- akma sayısı ilişkisi	67
Şekil 6.18. CRM karışımların yük tekrarı – deformasyon ilişkisi	68
Şekil 6.19. SBS karışımların yük tekrarı – deformasyon ilişkisi	69
Şekil 6.20. Karışım tipleri ve kırılmaya neden olan yükleme sayısı ilişkisi	70
Şekil 6.21. Karışım tipleri-rijitlik modülü ilişkisi	71

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Atık lastikten elde edilen ürünlerin yüzdesel değerleri	27
Tablo 4.2. Bazı ülkelerde kullanılmış araç lastiklerinin yönetimi	29
Tablo 4.3. Araç lastiği üretiminde kullanılan tipik malzemeler	31
Tablo 6.1. Bağlayıcının özellikleri	50
Tablo 6.2. Geleneksel bağlayıcı deney sonuçları	61
Tablo 6.3. Bağlayıcı deney sonuçlarına göre CR oranı ile SBS oranı arasındaki ilişki	63
Tablo 6.4. Agreganın fiziksel özellikleri	63
Tablo 6.5. Agregada gradasyonu	64
Tablo 6.6. Karışım numunelerinin fiziksel özellikleri	65
Tablo 6.7. Numunelerin toplam şekil değiştirme yüzdeleri	67

KISALTMALAR

CR	: Dönüştürülmüş kauçuk, Crumb rubber
SBS	: Stiren butadien stiren
BSK	: Bitümlü sıcak karışım
CBR	: Cis polibütadien kauçuğu
SBR	: Stiren butadien kauçuğu
DSR	: Dinamik kesme reometresi
CRM	: Atık lastik kauçuğu modifiyeli
LVDT	: Yatay deformasyonu ölçen sensör

SEMBOLLER LİSTESİ

σ	: Maksimum düşey gerilme
ω	: Frekans
ϵ_c	: Toplam eksenel birim şekil değiştirme
E_c	: Sünme rijitliği
$L3_n$	: n darbe sayısındaki deplasman
$L1$	: Başlangıç referans deplasmanı
N_f	: Yorulma ömrü
ϵ_o	: Başlangıç şekil değiştirmesi
S_o	: Karışımın başlangıç rijitliği
S_m	: Rijitlik modülü
R	: Poisson oranı
S_m	: Rijitlik modülü
W_{kuru}	: Havadaki kuru ağırlık
W_{suda}	: Sudaki ağırlık
W_{doygun}	: Havadaki doygun ağırlık

1. GİRİŞ

Artan trafik hacmi ve daha ağır dingil yükü altındaki bitümlü karışımların kötü performansı, katkılı bağlayıcıların artan kullanımına ve gelişimine yol açmıştır. Modifiye edilmiş asfalt malzemelerinin olduğu yol kaplama çalışmasının gelişimi, pek çok ülkede çevresel kaygıları azaltan adımlardan biri olmuştur. Modifiye edilmiş bağlayıcı maddeler genellikle düşük sıcaklık hassasiyeti gösterirler ve karışımın performansını olumlu yönde etkilerler [1].

Bitüm, yol kaplama uygulamaları için elverişli mekanik/reolojik özelliklere sahip viskoelastik bir malzemedir [2]. Bununla birlikte, artan trafik hacimleri ve araç yükleri nedeniyle, bitümlü sıcak karışımların (BSK), bilhassa tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlara ve termal çatlamalara karşı direncinin arttırılarak geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Bu amaçla, bitümün mekanik özelliklerini geliştirmek için geri dönüştürmeden geçmemiş polimerlerin kullanımı, yoluna gidilmiştir [3,4].

Türkiye'deki şehirlerarası ve şehir içi yollarda kaplama olarak kullanılan yoğun gradasyonlu asfalt betonu karışımlar, malzeme kalitesi ve seçiminin hatalı oluşu, karışım tasarımının yetersiz oluşu ve yapım aşamalarındaki hatalar nedeni ile beklenen performans ömrünü gösterememektedir. Bunların yanısıra otomotiv sanayisinde meydana gelen gelişmeler sonucu geleneksel kaplamalar yeteri kadar ihtiyaca yanıt veremediğinden Avrupa ve A.B.D'de yeni arayışlara gidilmiştir. Bu kapsamda, mevcut kaplama karışımlarının özelliklerinin çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilmesi, performans özelliklerini dikkate alındığı yeni tasarım yöntemlerinin geliştirilmesi ve geleneksel kaplama karışımlarının yanısıra agrega gradasyonunun değiştirildiği yeni kaplama tiplerinin uygulanması metotları denemiştir [5].

Büyük bir çoğunluğunu karayollarında kullanılan araçların oluşturduğu, atık lastiklerle ilgili problemler her geçen gün hızla çoğalmaktadır. Ömrünü tamamlamış taşıt lastikleri, günümüzde çok fazla olmasının yanında, değersiz bir atık özelliği arz etmektedir. Ayrıca; çevre kirliliğine neden olarak, insan sağlığı ve doğal dengeyi olumsuz bir yönde etkilemektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmanın en etkin yollarından biri; atık lastiklerinin yeniden işlenmek suretiyle, endüstride farklı uygulamalarda kullanılması gösterilebilir. Tüm bir lastiğin, çeşitli endüstriyel işlemlerden geçirilerek, farklı boyut ve geometrilerde alternatif bir malzeme olarak kullanımı; başta ABD olmak üzere, birçok

gelişmiş ülkede atık lastiklerin yönetimi ile ilgili sorunların azalmasına büyük ölçüde katkıda bulunmuştur [6].

Türkiye’de ulaşımın yüzde 95’i karayoluyla yapılmaktadır. Bununla beraber ülkemizde, milyonlarca araçtan elde edilen atık lastiğin büyük bir çoğunluğu; yasadışı yollarla çöp, deniz, nehir ve uygunsuz yerlere atılmaktadır. Atık lastiklerin çok az bir bölümü ise, çimento veya tuğla üretim fabrikalarında pişirme işlerinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Fakat bu uygulamalarda da, fabrikaların baca filtrelerinde biriken tozların filtrelerin ömrünü kısaltması nedeniyle, atık lastikler genellikle doğaya bırakılarak veya açık havada yakılmak suretiyle çok büyük çevre sorunlarına yol açmaktadır. Atık lastikler yanıcı madde olmaları sebebiyle, depolanması işleminde özel güvenlik tedbirlerinin alınması gerekmektedir. Ancak bu durumda da depolama maliyetleri artmaktadır [7-8].

Türkiye’de her yıl meydana gelen 110.000 ton atık lastiğin yeniden değerlendirilmesine yönelik, bazı potansiyel uygulama önerileri literatürde mevcuttur. Kullanılmış atık lastiklerin; sönümleyici ve darbe önleyici eleman olarak kullanımı (tarım, oyun yeri salıncağı, iskelelerde gemi tamponu olarak v.s), malzeme olarak değerlendirilmesi (lastik kaplama, kauçuk haline getirme v.s), enerji geri kazanımında kullanımı (çimento fabrikası ve ısı santrallerinde yakıt olarak), hammaddesel değerlendirme (petrole benzer yağlar ve kimyasal maddeler elde edilmesi), deprem etkisine karşı yığma yapıların güçlendirilmesi ve sismik yalıtım amaçlı kullanımı, başlıca önerilen potansiyel uygulama çeşitleri arasında sayılabilir. [6, 9-10].

2. KARAYOLU ULAŞIMI ve KARAYOLLARININ YAPISI

2.1. Ulaşımın Tanımı

Bir fayda sağlamak amacıyla kişinin ve eşyanın ekonomik, hızlı ve güvenli olarak yerlerinin değiştirilmesi işlemine ulaşım denir [11]. Ulaştırma sistemleri: karayolu, denizyolu, havayolu ve demiryolu olarak sınıflandırılabilir. Karayolu ulaştırmasının, ülkemizde ve tüm dünyada ulaşım talebinin karşılanmasında önemli yeri vardır. Günümüzde hızlı nüfus artışı, ekonomik kalkınmayla beraber, yaşam standartlarının yükselmesi ülkelerdeki ulaşım talebini arttırmıştır. Bu artış bir yandan mevcut ulaştırma yapılarının bakım ve onarım giderlerini düşürmeye yönelik çalışmaları, diğer yandan da yeni ve en ekonomik ulaştırma sistemlerinin hayata geçirilebilmesi yönündeki çalışmaların yapılmasını zorunlu hale getirmiştir [14].

Toplum, ulaştırma ile dar çerçevesinden çıkarak dış alemle irtibat kurmaya başlar. Zamanla statiklikten kurtulmak suretiyle dinamik bir toplum haline gelir. Dünya görüşü, değer yargıları ve yaşam biçimi değişimler meydana gelir. Bilgi ve görgünün artmasıyla yeniliklere gereksinim ihtiyacı doğar. Sosyal, siyasal, kültürel ve ekonomik aktivite büyük bir hız kazanır ve gelişmişlik düzeyi artar. Dolayısıyla, hem ekonomik kalkınma, hem de sosyal, siyasal ve kültürel gelişmenin temelinde ulaştırma yatar [12].

2.2. Ulaştırmanın Fonksiyonları

Ulaştırma;

- Mal ve hizmetleri gerektiği yer ve zamanda kullanıma imkan tanır.
- Doğal kaynakların etkili biçimde kullanımına yardımcı olur.
- Farklı endüstri kollarının tek merkezde toplanmasını etkisiz kılarak, bölgesel uzmanlaşmanın gelişmesine yardımcı olur.
- Büyük miktarda üretim yapılarak, verimliliğin artmasına ve üretim maliyetlerinin azalmasına önemli bir katkıda bulunur.
- Çeşitli malların tüketici kullanımına hızlı ve etkili biçimde sunulması suretiyle ticareti geliştirir.
- Belirli bir pazardaki mal ve hizmetlerin düşük fiyat ve yüksek kalite düzeyinin korunabilmesi için rekabet gücünü destekler.

- Kültürel, sosyal ve boş zamanları değerlendirmek suretiyle topluma hareketlilik getirir.
- Devletlerin kendilerini savunmalarına katkıda bulunur.
- Bir devletin kültürel, sosyal ve politik bütünlüğünün sağlanması katkıda bulunur [13].

2.3. Karayollarının Sınıflandırması

5539 sayılı Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Kuruluş ve Görevleri Hakkında Kanunun 15. Maddesine göre Karayolları Genel Müdürlüğü'ne ait yollar 3 sınıfa ayrılmış ve aşağıda belirtilen şekilde tanımlanmıştır.

Otoyollar:  zerinde erişme kontrolünün uygulandığı devlet yolları otoyol olarak adlandırılır. Genellikle otoyollar ücretlidir. Erişme kontrollü karayolu, özellikle transit trafiğin işlediği, belirli yerler ve şartlar dıőında karayoluna giriş ve çıkışın yasaklandığı, yaya, hayvan ve motorsuz taşıtlar ile araçların giremediği ancak izin verilen motorlu taşıtların yararlanma imkanı bulduğu, trafiğin özel kontrole tabi tutulduğu karayoludur.

Devlet yolları:  nemli bölge ve il merkezlerinin deniz, hava ve demiryolu istasyonu, iskele, liman ve alanlarını birbirine bağlayan birinci derecede ana yolları devlet yolu olarak tanımlanmaktadır.

 l yolları: Bir il sınırı içinde bulunan ikinci derece öneme haiz olan ve şehir, kasaba, il e ve bucak gibi belli baőlı yerleşim merkezlerini birbirlerine ve il merkezine ve komőu illerdeki yakın il e merkezlerine, devlet yollarına, demiryolu istasyonlarına, limanlara, hava alanlarına ve kamu ihtiyacının gerektirdiği diğer yerlere bağlayan yollardır [22,23].

Bu üç sınıfa ait yol ağları kamu yararı, milli savunma ihtiyaçları ve bu ağların gelişmesine tesir eden ekonomik faktörler gözönünde tutulmak suretiyle Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından yapılacak tespit ve Ulaştırma Bakanının onay vermesi halinde uygulanır. Düzeltmeler, deęiőtirmeler ve eklemeler de yine aynı usul ve esaslara bağlı olarak yapılır [22,23].

2.4. Karayollarının Yapısı

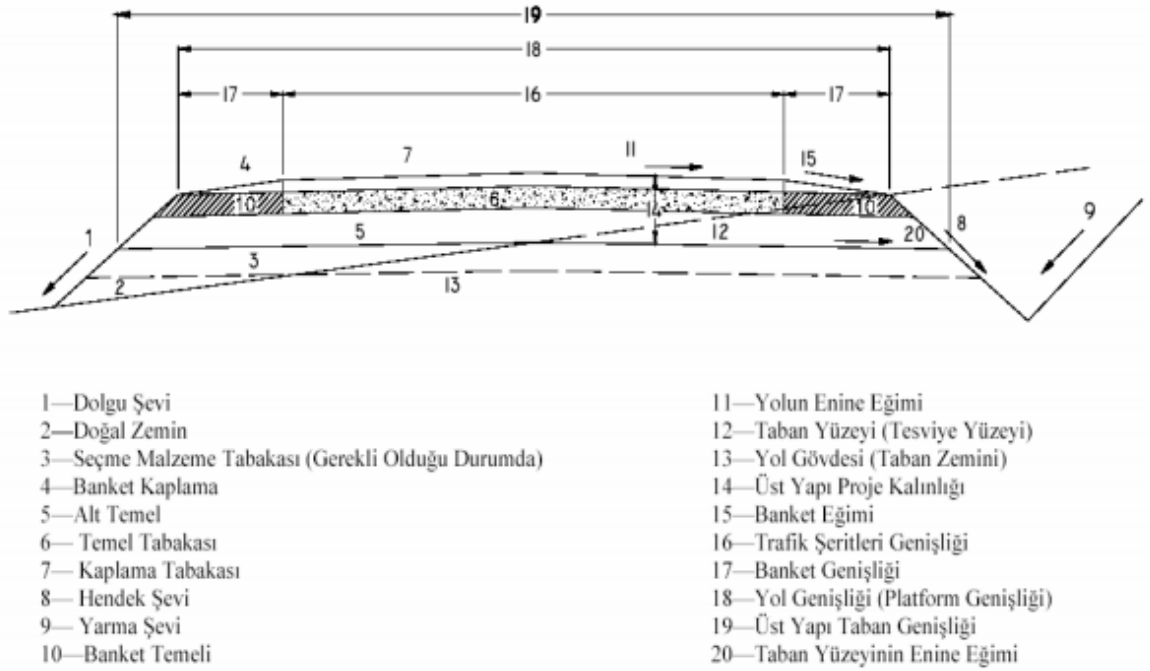
Karayolu yapısını; görevi, yapım sırası ve özellikleri bakımından alt ve üstyapı olarak iki ayrı bölüme ayırabiliriz.

Karayolu Alt yapısı: Toprak işi sonunda, yolun projesindeki belirlenen kot ve enkesit şekline getirilmiş durumuna başka bir ifade ile yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki bölgeye altyapı adı verilir. Altyapı; yolun dolgu olacak kesimlerinde dışarıdan getirilen toprak ile oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zeminden oluşur. Menfez, drenaj sistemleri ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı kapsamına girer. Yolun esas taşıyıcı bölümü altyapıdır. Fakat yolun taşıyıcılık görevini iyi şekilde yapabilmesi için üzerine başka tabakaların da inşaa olunması gereklidir. [14,18,19].

Üstyapıdan gelen yükleri daha geniş bir alana yaymak, az da olsa yolu dış etkilere korumak ve düzgün bir yüzey elde etmek yol altyapısının başlıca görevleri arasındadır. Altyapı bu görevleri yerine getirebilmesi için; trafik yüklerine, don ve su etkilerine karşı dayanıklı bir şekilde inşaa edilmesi gerekir. Altyapıyı meydana getirirken; sağlam olmayan çürük zemin ve bitkisel toprak kullanılmamasına özen gösterilmelidir. Bu nedenle alt yapıyı oluşturacak olan zeminin, özelliklerinin çok iyi etüt edilerek belirlenmesi gerekmektedir [20].

Karayolu Üst yapısı : Yolun, trafik yüklerini taşımak ve bu yükü taban zemininin taşıma gücünü aşmayacak şekilde taban yüzeyine dağıtmak üstyapının görevidir. Yol üst yapısı, alt yapı üzerine inşaa olunan, alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşmaktadır. [20]. Her türlü oto korkuluk yapımı, düşey ve yatay işaretleme de karayolu anlayışında üst yapı kapsamına girmektedir [14]. Doğal zeminden oluşturulan altyapı üzerine serilen ve genelde kırmataş, kum, çakıl, kil gibi malzemelerden ibaret tabakaya alt temel (temel altı) tabakası adı verilir. Trafiğin doğrudan temas etmediği, kaplama tabakası ile temel altı tabakası arasındaki, doğal kum, çakıl, ve kil gibi malzemelerden meydana gelen tabaka ise temel tabakası olarak adlandırılır [14]. Değişik hava şartlarında üzerinden geçen trafik yüklerini tahrip olmadan altyapıya aktarmak ve aynı zamanda sürüş emniyeti ile konforu sağlamak yol üst yapısının en önemli görevidir [15].

Karayolu yapısına ait tipik bir enkesit Şekil 2.1’de verilmiştir [17].



Şekil 2.1. Tipik karayolu enkesiti [17].

2.5. Karayolu Üstyapı Tipleri

Yol üst yapıları esnek ve rijit olmak üzere iki şekilde inşaa edilirler. Bu adlandırmalar kaplama tabakasının cinsine göre yapılmaktadır.

2.5.1. Esnek Üstyapı

Karayolu ve havaalanı üstyapıları bir çok ülkede olduğu gibi ülkemizde de çoğunlukla esnek üstyapı olarak projelendirilerek uygulanmaktadır. Türkiye’de uygulanan esnek kaplama çeşitlerini; bitümlü sathi kaplama, soğuk karışım asfalt kaplama ve bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama olarak sıralandırılabilir. Esnek kaplamalar içerisinde en yüksek dayanımı, bitümlü sıcak karışımlar göstermektedir. Bitümlü sıcak karışımlar, uygun miktarda bitüm ve uygun gradasyona sahip agreganın ısıtılıp karıştırılması sonucu elde edilirler [16].

Temel altı (alt temel) tabakası tesviye yüzeyi üzerine serilen ve genellikle kum, çakıl, taş kırığı, yüksek fırın cürufu gibi taneli malzemelerden (granüler malzeme) inşaa olunur. Bu tabaka su ve don etkilerine karşı tampon vazifesi görür.

Kaplama tabakası altında yer alan temel tabakası; sıkıştırılmış, bağlayıcısız yada bir bağlayıcı madde ile işlem görmüş, belirli granülometrideki malzemeden oluşur. Üst yapının yük taşıma kabiliyetini arttırmak esas görevidir. Ayrıca trafik hareketlerinden meydana gelecek kayma gerilmelerine karşı koyabilecek, drenaja yardımcı olabilecek ve don olaylarına karşı da koruma sağlayabilecek özellikte olmalıdır. Bu tabakalarda kullanılan agregaların yüksek stabiliteli, yoğun gradasyonlu olmalarına, drenaj için yeterince boşluklu gradasyona, yüksek CBR ve içsel sürtünme açılarına sahip olmalarına özen gösterilmelidir. Ayrıca bu tabakalarda kullanılacak malzemelerin filler oranı düşük, kübik, açısız şekilli, pürüzlü yüzeylere sahip, ancak yassı ve ince uzun daneler ihtiva etmeyen, don duyarlılığı düşük agregalardan oluşmalıdır [25].

Yol kaplaması, taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlayarak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yol alt yapısına sızabilecek suya karşı geçirimsizlik sağlamak üzere temel tabakası üzerine inşaa edilen bir tabakadır. Aşınma tabakası, trafiğin ve iklim koşullarının aşındırıcı etkilerine maruz kalmaktadır. Trafik yoğunluğunun ve ağır taşıt trafiğinin fazla olması durumunda, aşınma tabakasının altına binder tabakası inşa edilir.

2.5.2. Rijit Üstyapı

Oldukça yüksek eğilme direncine sahip ve Portland çimentosundan oluşan tek tabakalı beton plak yardımı ile yükleri taban zeminine dağıtan üst yapı tipidir. Rijit üstyapılar, taban zeminini üzerine oturan beton plakalardan meydana gelir. Sürekli donatının kullanılmadığı beton yollarda, enine ve boyuna genleşme derzleri konulur. Beton kaplama ile taban zeminini arasında kaplama altı tabakası yapılmak suretiyle, don, pompaj, şişme-büzülme olaylarına karşı önlem alınmış olur. Beton plağın elastisite modülü taban zemininkinden büyük olması nedeniyle beton yollar, elastik zemine oturan bir kiriş gibi çalışır. Trafik yüklerini esnek üstyapıya nazaran daha geniş alana yayarak, taban zeminine iletir. Taban zemininin çeşitli sebeplerle çökmesiyle, taban zemininin deformasyonuna uyamayan rijit beton plak, bu kısımlarda kiriş gibi çalışmaya başlayıp, betonun düşük olan çekme basıncının aşılması sonucunda kaplamada kırılmalar oluşur. Tek veya iki tabaka halinde dökülen bir üstyapı tipi olup, gerektiğinde granüler bir kaplama altı tabakası olarak da kullanılabilirler. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen güçlü tekil yükleri tabana iletirken tabanın deforme olmasını engellemektir [17].

2.6. Yol Üstyapı Seçiminde Etkili Olan Faktörler

Günümüzde, motorlu taşıt trafiğindeki sürekli artışlar ve yol yapım malzemelerinin sağlanmasındaki güçlükler karşısında, verilen uğraşlar, yeni karayolu yapmaktan ziyade, mevcut karayolu üstyapılarının, gelecekteki yoğun ve ağır trafiğe cevap verebilecek şekilde yenilenmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Gerek yeni karayolu yapımında, gerekse üstyapı yenileme çalışmalarında üstyapı tipinin seçimi büyük önem arz etmektedir. Zira, karayollarında üstyapı tipi belirlenmesi, farklı ve çok sayıdaki kriterlere dayandırılması gereken kapsamlı bir konudur. Seçim yapılırken, nihai karar aşamasında, üstyapı tipleri teknik ve ekonomik yönden karşılaştırılmalı ve ülke koşulları da dikkate alınmalıdır. Karayollarında, kaplama tabakası çimento betonundan oluşan rijit üstyapı, yarı rijit üstyapı ve kaplama tabakası asfalt betonu olan esnek üstyapı olmak üzere değişik tipte üstyapılar kullanılır [17].

2.6.1. Trafik

Karayolu üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları ve hareketlerinden kaynaklanan düşey ve yatay kuvvetleri, dingil sayılarına göre değişen büyüklüklerde dingil ve tekerlek bandajları aracılığı ile üstyapıya iletilmektedir. Üstyapı tabakalarında meydana gelen gerilme ve deformasyonların şiddeti, o yolun üzerinden geçen taşıtın ağırlığına, tekerlek özelliklerine ve hareket hızlarına bağlıdır. Yolun hizmet ömrü ise yüklerin tekerrürüyle direkt alakalıdır.

Karayolu üzerinde seyreden taşıtlar değişik ağırlıkta ve farklı etki derecesine sahip olduklarından projelendirmeye esas olarak 8,2 ton'luk standart dingil yükü alınmaktadır. Dingil yükleri dingil eşdeğerlik faktörleri yardımıyla standart dingil yüküne dönüştürülmektedir. Proje hizmet ömrü boyunca standart dingil yükünün toplam tekerrürü $T_{8.2}$ olmak üzere trafik gruplarının belirlenmesinde ülkemiz karayollarında seyreden taşıtların tipleri ve ağırlıkları dikkate alınmaktadır.

Trafik hacmi ve trafiğin yıllık artış oranı yüksek olan, trafik içindeki ağır taşıt oranı fazla olan ve taban zemininin taşıma gücü düşük olan yollarda rijit üstyapılar daha iyi performans gösterirler. Trafik ve trafik artışlarının düşük olması halinde, kademeli inşaata elverişli olması sebebiyle esnek üstyapıyla gelişen trafiğe çözüm aramak daha uygundur.

Eğimin ve trafiği fazla olan yollarda rijit üstyapılar daha uygundur. Yol üzerindeki seyir hızının 80km/saat' den 50km/saat' e inmesi zemin deformasyonlarının %17 artmasına neden olmaktadır. Özellikle yokuş yukarı eğimli şeritlerde tekerlek izi oluşumunun hızlanıyor olmasını, bu şeritlerde seyreden trafiğin hızının nispeten düşük olmasına bağlanmaktadır. Bu durumda, genel olarak trafiğin sıkışmasını önleyici ve dolayısıyla trafik hızını arttırıcı önlemlerin, zaman ve enerji tasarrufu sağlamasının yanında yol yıpranmasının azalmasına olumlu yönde bir etkisinin de olduğu anlaşılmaktadır. Şehir içi trafiğinin durup, hareket ettiği kavşak ağzlarında, bitümlü karışım kaplamalarda dalgalanma-yığılmalar ya da çatlama ve oyuklar oluştuğu ancak bu kısımlara beton kaplama yapılması durumunda gayet güzel neticelerin alındığı görülmüştür [17,27].

2.6.2. İklim

Yol altyapısı, don çözülmesinin meydana geldiği ilkbahar mevsimi ile yağışın fazla miktarda olduğu sonbahar mevsimi başlarında özellikle çatlaklardan içeri giren sular nedeniyle kolay deforme olur. Kaplama tabakasını oluşturan asfalt ise yazın sıcaklıklarla beraber ısınma sonucu en düşük taşıma gücüne sahiptir. Mevsimler arası büyük ısı farkları bulunan, kara ikliminin hüküm sürdüğü bölgelerde, asfalt betonunun viskoelastik davranışlı bir malzeme olması nedeniyle, yaz mevsiminde tekerlek izi oluşmasına direnç gösteren, kışın ise çatlamayan bir bitümlü karışımın formüle edilmesi henüz ekonomik olarak başarılabilmiş değildir. Bu tip bölgelerde rijit üstyapıların seçilmesi daha uygun olacaktır. Bitümlü kaplamaların tatbik edileceği zeminin kuru veya en fazla %2 oranında rutubetli olması gerekir. Ancak bu husus, yağışlı bölgelerde bitümlü kaplamaların uygulama süresinde kısalmalara neden olmaktadır. Bitümlü kaplamaların bu özelliğine karşılık beton kaplamalar nemli zeminler üzerinde yapılabilir [27].

2.6.3. Maliyet

Üstyapı tipi seçiminde en önemli kriter, seçilecek kaplama tipinin, belirlenen proje ömrü içindeki hesaplanan toplam maliyetidir. Bu ise ilk inşaat maliyeti, proje ömrü boyunca yolda yapılacak bakımların maliyeti ve bakım işlemleri nedeniyle kullanıcı açısından meydana gelecek gecikme maliyetlerinin toplamıdır [27].

Betonun rijitliği sebebiyle beton yollarda üstyapı kalınlığı azaltılabilmek mümkün olabilmektedir. Bu da agrega tüketimi bakımından beton yollara avantajlı kılmaktadır. Ayrıca betonda kullanılan agrega, bitümlü kaplamalarda kullanılan kadar kaliteli agrega olması gerekmez. Beton içinde dayanımı ve kalıcılığı artıran endüstriyel atık maddelerin kullanılması, çimento miktarının azaltılmasına olanak tanımaktadır.

Malzemelerin taşınma maliyetlerine bakıldığında, bitüm malzemesinin rafineriden nakliyesi, çok sayıda sık aralıklı fabrikalardan temin edilebilen çimento malzemesi nakline göre çok daha uzun mesafe gerektirmektedir.

Beton yol kaplamalarının kalifiye işçi gereksinimi bitümlü kaplamalara oranla daha fazla olması nedeniyle işçilik giderleri bitümlü yollara göre daha fazladır.

İnşaat ekipmanı maliyeti bakımından, makinelerin yıpranma payı, işletme ve bakım masrafları dikkate alındığında, asfalt betonu karışımları için kurutma ve yeniden ısıtma gibi ek üniteler isteyen pahalı plantler gerekmektedir. Beton yollarda ise genellikle hazır beton kullanılabilmektedir [27].

Bakım maliyetleri bakımından, rijit üstyapılar 30–40 yıllık hizmet süreleri dikkate alınarak projelendirilirler. Beton yollarda, yüzey yenileme ve takviye işlemlerine ihtiyaç duyulmaz. Projelendirme ve yapım işlemlerinin doğru biçimde gerçekleştirilmesi halinde, beton yollar tüm hizmet ömürleri boyunca az miktarda bakım ve onarım gerektirirler. Esnek üstyapılarda genellikle ilk 5 yıldan sonra küçük onarımlar ve yüzey dolgularına ihtiyaç duyulabilir. 10. yıldan sonra yol yüzeyinde yenileme ve pürüzlendirme gerekmektedir [27].

2.6.4. Güvenlik ve Konfor

Her iki kaplama çeşidinde de gerekli kriterler gözetilerek yapıldıkları takdirde, güvenli ve konforlu bir seyir imkânı sağlanabilmektedir. Beton yollar renklerinin açık olması nedeniyle gece kolay görülür ve sürücüyü yormaz. Ancak güneşli havalarda yansıma yapması sebebiyle gözlerde kamaşmaya neden olur. Bitümlü kaplamaların ise gece görüş mesafesi kısadır. Asfalt kaplamalarda meydana gelebilen oluklaşma ve yığılma-dalgalanmalar, suyu gölleştirerek özellikle soğuk iklimlerde seyir güvenliğini tehlikeye düşürebilmektedir. Bitümün sıcak havalarda ısınmayla beraber yüzeye çıkması da tehlike oluşturur [28].

3. BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR ve ÖZELİKLERİ

Bitümlü karışımlar, agrega ve uygun oranda karıştırılan bitümlü bağlayıcılardan elde edilmektedir. Bitümlü karışımlarda kohezyon, bitümlü malzemeler tarafından sağlanırken, agregalar karışımın içsel sürtünme direncini ve stabilitesini sağlamaktadır [25].

3.1. Agregalar

Bitümlü karışımların iki ana malzemesinden biri olan agrega, yol kaplamasının stabilitesinden sorumlu olduğu kadar miktar olarak da önemli bir paya sahiptir. Çünkü bitümlü sıcak karışımların %90-95'i ve hacimce %80-85'i, agregadan oluşmaktadır. Genel tanımlamayla agrega; kum, çakıl, kırma taş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerin bağlayıcı bir ortamda (bitümlü bir karışım, portland çimentosu betonu, harç, mastik vb.) bir araya getirilmiş biçimine agrega denir [25,29].

Agregalar kökenlerine göre “Doğal Agregalar” ve “Sunî (yapay) Agregalar” olmak üzere iki kısma ayrılabilir [30]. Doğal agregalar, kum ve çakıl gibi granüler malzemelerden meydana gelir. Yol inşaatında kullanılan taş ve agrega malzemesi, doğal kayalardan faydalanılarak da elde edilebilir. Doğal kayalar büyük bloklar veya bunları kırmak suretiyle elde edilen malzeme (çakıl) şeklinde değerlendirilir [30]. Endüstriyel işlemler sonucu elde edilen yapay agregalar cüruf, klinker, çimento olmak üzere üç kısma ayrılabilir. Klinker; fırınların bir atığı olup, küllerin eriyerek topak haline dönüşmesiyle oluşur. Klinker çok değişken bir malzemedir. Bu sebeple her iş için ayrı hazırlanmış şartnamelere uygun klinkerler asfalt kaplama yapımında kullanılabilirler. Çimento ise ilave edildiği bitümlü karışımında sadece filler olarak görev görür. Çimentoların filler olarak kullanımlarının nedeni, bağlayıcı özelliğinden yararlanmak için değildir. Çimento standart granülometrik bileşimleri, saflıkları ve bitümlü bağlayıcılarla herhangi bir reaksiyona girmedikleri için filler olarak değerlendirmeye çok uygundur [29]. Cürufklar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık maddelerdir. Kimyasal yapıları ve özellikleri, elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ana ürün türüne ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık arz eder. Örneğin yüksek fırın cürufklarının kendi başına bağlayıcı özelliğine karşılık, nikel ve bakır cürufklarının yalnızca puzolanik özellikleri mevcuttur [30].

Bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar; granülometrisi, maksimum dane boyutu, dane yüzey dokusu ve gözenekliliği ile kazanacağı adezyonla karışımın stabilitesinin arttırmasına yol açar. Ayrıca bitümlü karışımlarda kullanılan agregalar, bitümlü tabakaların daha çok gerilme taşıması ve trafiğin aşındırıcı etkisine daha çok maruz kalması nedeniyle temel tabakasında kullanılan agregalara göre daha üstün niteliklere sahip olması gereklidir. Kullanılacak agreganın kökeni ne olursa olsun kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özellik ve standartları sağlaması gerekir [25,29].

Farklı boyutlardaki agregalar, kaplama karışımlarına farklı nitelikler sağlarlar. Bu sebeple, boyutlarına göre kaba (iri) agrega, ince agrega ve mineral filler olmak üzere üç farklı grupta tasnif edilen agreganın, ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Kaba agrega, agrega karışımının 4.75 mm'lik (No.4) elek üzerinde kalan kısmı olup kırılmış, elenmiş, taş, çakıl veya elenmiş çakıl ile bunların karışımından ibarettir. Kaba agrega temiz, pürüzlü, sağlam ve dayanıklı danelerden oluşmalıdır. Kaba agrega içinde yumuşak ve dayanıksız parçalar, kil, organik ve diğer maddeler ihtiva etmelidir [31]. Bitümlü karışımındaki kaba agrega, karışım içerisinde bir iskelet yapı oluşturarak, karışımın akmaya karşı direncinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu işlem dane şekli ve dokusu ile de yakinen alakalıdır. Kaba agrega oranı %55 olan asfalt betonu kaplamalar, kaba agrega oranı %25 olan asfalt betonu kaplamalardan çok daha fazla deformasyon oluşmaktadır [32,31].

İnce agrega, agrega karışımının 4.75 mm'lik (No.4) elekten geçerek, 0.075 mm'lik (No.200) elek üzerinde kalan kısmından ibaret olup kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşur. İnce agrega, kaba agreganın meydana getirdiği iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar. İnce agreganın yüzey dokusu, deformasyon direncine etkisi bakımından önemlidir. Örneğin, pürüzsüz bir çakıl kumu, kırma malzeme veya cürufa göre daha düşük bir deformasyon direnci gösterirler. Cilalı yüzeyli agregaların asfaltla kaplanması, kolay olmasına rağmen adezyonunun düşük olması nedeniyle kolaylıkla soyulabilmektedirler [30].

Mineral filler genel anlamı ile tamamı 0.600 mm'lik (No.30) elekten geçen, ağırlıkça en az %70'i 0.075 mm'lik (No.200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Mineral filler, toplam agreganın çok küçük bir yüzdesini oluşturmasına karşılık, karışımın özelliklerinin düzeltilmesinde göstermiş olduğu etkileri çok önemlidir. 0.075 mm'lik elekten geçen her malzeme mineral filler görevi görmez. Mineral fillerin 0.075 mm'lik elekten geçen bölümü düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı ve aynı zamanda 0.001 mm'den ince boyutlu daneleri de içermesi gerekmektedir. Dane biçimi de, mineral

fillerin etkinliğinde önemli rol oynamaktadır. Köşeli daneler yassı, düz ve uzun danelere tercih edilir. İstenmeyen biçimdeki danelerin yüzdesinin artması fillerin niteliğinin azalmasına neden olur. Filler kimyasal açıdan atıl durumda olmalı yani bitümlü malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Ayrıca, bitümlü karışımın oluşturulduğu sıcaklıkta bir değişikliğe uğramayarak, bağlayıcıya karşı iyi bir yüzey adezyonu göstermelidir. Kalker tozu, portland çimentosu ve silisli malzeme tozu sıklıkla tercih edilen mineral filler malzemeleridir [33-36].

Gerek kaplamanın stabilitesine olan büyük katkısı gerekse çok büyük miktarda ihtiyaç duyulmasından ötürü agrega önemli bir yol malzemesidir. Esnek ve rijit kaplamalarda kullanılan agregalarda aranan nitelikler birbirine benzerler. Fakat kaplamanın tipine, kullanım amacına ve trafik hacmine göre agregalardan beklenen özelliklerde değişiklik gösterebilir. Örneğin, rijit kaplamalarda kullanılan alt temelin amacı pompaj etkisini ve don kabarmalarını önlemek, drenaj vb. amaçları sağlaması iken esnek kaplamaların temel ve alttemel tabakalarının amacı buna ilaveten trafik yükünü zemine emniyetle yayabilmesi için yük taşımadan da sorumlu olmasıdır. Bu nedenle söz konusu tabakalarda kullanılacak agregaların gradasyon- yoğunluk, dayanıklılık, dane şekli, yüzey yapısı, plastisite ve permabilite gibi özellikleri istenen şartları sağlaması gerekir [24].

3.2. Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı yahut da bunların her ikisinin bir kombinasyonudur. Bitüm çoğunlukla bunların (Doğal ve pirojenik kökenli hidrokarbonların) gaz, sıvı, yarı katı veya katı halde olabilen metal dışı türevleriyle bir arada bulunan, yapıştırıcı özelliğe sahip ve karbon disülfürde (C_2S) tamamen çözünen madde olarak da tanımlanabilirler [29,31,32].

Bitümlü bağlayıcıların esas özelliği, adından da anlaşıldığı gibi, agrega parçacıkları birbirine veya agrega ile yol yüzeyi altındaki temel tabakasını yapıştırmaktır. Bitümlü bağlayıcılar, agrega danelerini birbirine bağlamak suretiyle trafik yükleri altında deforme olarak dağılmasını önlemekte, oluşturdukları düzgün yüzeyler sayesinde sürüş konforu sağlamakta, kohezyonu ile de karışımın stabilitesini artırmaktadır. Bitümlü bağlayıcılar karışımda ağırlıkça en fazla %5-7 ve hacimce en fazla %13-15 gibi küçük oranlarda kullanılmasına karşılık, esnek kaplamalar için önemli bir yol malzemesidir [25,37].

Bitümlü bağlayıcılar, sıvı, yarı katı ve katı halde bulunurlar. Yarıkatı ve katı durumundakiler, ısıtılmak suretiyle sıvı hale getirip kullanmak mümkündür. Sıvı halden de tekrar önceki haline dönüşürken yapışkanlıkları sayesinde kohezyon ve adezyon gibi iki önemli özellik gösterirler. Adezyon, yapışma, kohezyon ise çatlama ve ayrılma olmaksızın şekil değiştirme özelliği olarak tanımlanabilir [31,32,37,38].

3.3. Bitümlü Karışımların Sınıflandırılması

Bitümlü karışımlar, karışımda kullanılan agreganın ısıtılarak veya ısıtılmadan kullanılmasına bağlı olarak ‘Sıcak Karışımlar’ ve ‘Soğuk Karışımlar’ olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Ayrıca karışımlar yapıldıkları yere göre yolda ve plentte karışım olmak üzere ikiye ayrılırlar.

3.3.1. Soğuk Karışımlar

Asfalt emülsiyonunun veya katbek asfaltın, soğuk agregaya ile soğuk halde ya da agregaya yüzeyindeki nemin kurummasına yetecek sıcaklıkta karıştırılması ile elde edilen karışımlar soğuk karışımlar olarak adlandırılır. Soğuk karışımlar kendi içinde ikiye ayrılırlar:

- Yarı Yoğun Granülometrilik Soğuk Karışımlar : Esası asfalt çimentosu olan asfalt emülsiyonlu yarı yoğun soğuk karışımlarda boşluk oranı %12’den azdır. İlk dayanımları az olmasına karşılık, zamanla dayanımları artış gösterir.
- Açık Granülometrilik Soğuk Karışımlar : Boşluk oranı %12’den fazla olan bitümlü karışımlardır. Mukavemetleri çok yüksektir. Ekonomik açıdan uygun olup tekerlek altında deforme olmazlar [31,39,40].

Soğuk bitümlü karışımlar, genel olarak kış mevsiminde acil onarım isteyen işlerde veya asfalt plentin olmadığı veya ekonomik olmadığı durumlarda, çok az miktarda bitümlü karışım gereken yerlerde tercih edilirler. Soğuk bitümlü karışımlar hem pahalı hem de düşük stabiliteli karışımlar olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmamaktadır [24].

3.3.2. Sıcak Karışımlar

Bitümlü sıcak karışımlar, agregata, bitüm ve hava olmak üzere üç fazlı bir yapıdan oluşmaktadır. Agregata katı fazı, bitüm sıvı fazı ve boşluklar gaz fazını oluştururlar. Sıvı fazı oluşturan bitüm viskoelastik ve termoplastik bir malzemedir. Viskoelastik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi yükleme zamanı ile değişkenlik gösterir. Viskoelastik malzemeler yüksek hızlı yükleme durumunda, elastik davranış ve yüksek mukavemet gösterirken, düşük hızlı yüklemelerde viskoz davranış ve düşük mukavemet gösterirler. Termoplastik malzemelerde ise gerilme-şekil değiştirme davranışı sıcaklıkla ilişkili olarak değişmektedir. Termoplastik malzemeler yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet, düşük sıcaklıklarda ise yüksek mukavemet gösterirler. Bitüm'ün bu özellikleri, bitümlü sıcak karışımlara yansımak suretiyle karışımın mekanik özellikleri üzerinde önemli etki gösterir. BSK'ların en önemli mekanik özellikleri, rijitlik, çekme dayanımı, kalıcı deformasyonlar - tekerlek izi oluşumu ve yorulma davranışlarıdır [26].

Bitümlü karışımlar, bir asfalt plentinde agregata ile asfalt bağlayıcının sıcak olarak karıştırılarak yola nakledilmesini müteakip sıcak olarak sıkıştırılmasıyla imal edilirler. Bitümlü sıcak karışımlar; aşınma, binder, bitümlü temel tabakalarında kullanılır. Sıcaklık artışı ile birlikte bitüm agregataya püskürtülerek karıştırılır. Meydana gelen karışım soğuduğunda oldukça katı ve dayanıklı bir yapıya oluşur. Trafik yüklerinin yarattığı gerilmelere ve çevresel etkilere en fazla maruz kalmalarından ötürü temel ve alttemel tabakalarına göre stabil ve durabil olmalıdırlar. Bu tabakalar ayrıca taşıtlar için düzgün pürüzsüz yüzeyleri ile sürüş konforunu ve sürtünme dirençleriyle sürüş emniyetini sağlamalı, trafiğin ve çevrenin aşındırma etkilerine, deformasyonlara karşı direnç göstermelidir. Bu tip kaplamalar teker yükleri altında elastik olarak esneme özelliği göstermelidir. Kalıcı deformasyon yapmadan yükleri, alt tabakalara ve zemine emniyetle iletmelidir [21,24].

Yüksek standartlı karayolları, otoyollar ve havaalanlarında uygulanacak esnek kaplamalar için bitümlü sıcak karışımlar (asfalt betonu) kullanılmaktadır. Bu karışımlar bütün dünyada uygulanan yol üst yapılarında geniş bir şekilde uygulanmaktadır.

Karışımında kullanılan agregata granülometrisi sınıflarına göre dört gruba ayrılırlar:

- Açık Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Bu karışımlarda ince agrega miktarının çok az olması sebebiyle, boşluk oranı çoktur. Bu karışımlardaki boşluk oranı %12'den fazladır. Makadam tipi kaplamalar bu sınıfa girer.
- Kesikli Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Ara boyutlu malzeme çok az veya hiç bulunmamaktadır. Boşluk oranı %8 ila %12 arasında olan bu tür karışımlar, pürüzlü bir yüzey verirler ve tekerlek izine karşı yüksek direnç gösterirler.
- Yoğun Granülometrilili Sıcak Karışımlar: Agrega granülometrisi düşük boşluk verecek şekilde süreklilik arz eder. Bunlar boşluk oranı %8'den az olan bitümlü karışımlardır. Bitümlü temel ve asfalt betonu bu sınıfa girer.
- Harç Tipi Karışımlar: İnce malzeme oranı fazla olup, kaba agrega, ince malzeme bitüm karışımı içinde dağılmış halde bulunur. Bu tür karışımlarda boşluk oranı çok azdır. Bitüm yüzdesi çok yüksek olmasından ötürü, penetrasyonu düşük (viskozitesi yüksek) asfalt kullanılır. Beton ve çelik köprüler üzerinde de kullanılan mastik asfalt ve gussasfalt bu tür karışımlara örnek olarak verilebilir [31].

3.4. Bitümlü Karışımlardan Beklenen Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Fiziksel ve mekanik özelliklerin tümünü tam olarak sağlayabilecek bitümlü karışım elde etmek bugün itibariyle hemen hemen mümkün değildir. Ancak karışımların yapılabilmesi ve uygulamada ideal bitümlü kaplamaların oluşturulabilmesi için bu özelliklerin çok iyi bilinmesi gerekir [30].

3.4.1. Stabilité

Taşıtlardan gelen sürekli dinamik yükler, uzun süreli statik yükler ile hızlanan veya yavaşlayan tekerlek etkileri altında oluşan basınç, çekme, kesme kuvveti (makaslama) ve sökülmeğe karşı bitümlü kaplamanın gösterdiği direnç stabilite olarak tanımlanmaktadır. Stabilité trafik yüklerini karşılayacak düzeyde yüksek olmalıdır. Stabilitenin yetersiz olması durumunda yolda çökme, ondülasyon ve akmalalar oluşur. Yani bitümlü karışımın stabilitesi ne kadar düşük olursa trafik yükleri altında meydana gelebilecek deformasyonda o kadar fazla olacaktır. Ancak çok düşük stabilite kadar çok yüksek stabilitenin de o kadar zararı vardır. Çünkü çok yüksek stabiliteli (yani çok sert, rijit veya gevrek) bitümlü

karışımlar gerilmelere maruz kaldığında fleksibil davranış göstermeyerek kaplamada çatlakların meydana gelmesine neden olmaktadır.

Bitümlü malzemenin, yapılan deneyler sonucu stabiliteye en çok %20 oranında katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Esas olarak stabiliteyi sağlayan mekanik kenetlenmedir. Mekanik kenetlenme, agreganın granülometrisinin uygun, sürtünme yüzeylerinin fazla ve pürüzlü olmasıyla doğru orantılıdır. Eleme ve kırılma işlemi doğru şekilde yapılan agreganın yüzeyleri uyumlu ve pürüzlülüğü daha fazla olur. Karışımlardaki kohezyon kuvveti bitümlü malzeme ile daneler arasındadır. Bitümlü malzemenin fazla olması kohezyon kuvvetini arttırmasına karşılık, belli bir miktardan fazlası yağlama etkisi göstererek danelerin birbiri üzerinden kaymasına neden olacaktır. Bu da mekanik kenetlenmeyi, dolayısıyla stabiliteyi azaltır. Bu sebeple deneylerle optimum bitüm miktarının belirlenmesi gerekir.

Her yolun üstyapısının ihtiyacı olan trafik yüklerine eşdeğer bir stabiliteyi temin etmek için, mekanik kenetlenmeyi maksimum yapacak mineral agregası, düşük penetrasyonlu optimum bitümlü malzeme ve serme sıkıştırma tekniğinin doğru biçimde uygulanması yeterli olmaktadır.

Düşük stabilitenin sebep ve etkileri aşağıda sıralanmaktadır:

- Asfalt oranının yüksek olması; oluklaşma, tekerlek izinde oturma ve kismaya,
- Karışımda kum oranının yüksek olması; sıkıştırma esnasında ve inşaat sonrasında yumuşaklık, sıkıştırma gücüne,
- Yuvarlak, kırılmamış veya az kırılmış agregası yüzeyi de; tekerlek izinde oturmaya neden olmaktadır [30].

3.4.2. Esneklik

Esneklik, yolun alt tabakasında meydana gelen çökmelerden dolayı, bitümlü kaplama tabakalarına geçecek genel deformasyona, bitümlü tabakaların çatlama ve kırılmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Sıcak karışım tabakaların, yük altında, tabandan ve üstten gelecek kuvvetlerin etkisiyle bozulma, dağılma ve kırılma göstermeden direnimi, esneklik özelliği olarak ifade edilebilir. Bir başka deyişle, esneklik kaplamanın yorulmaya karşı direncini kaybetmemesidir.

Mineral fillerin ve asfalt çimentosunun oranı, asfalt çimentosunun kıvamı, düktilitesi ve sıcaklığa karşı duyarlılığı, esnekliğe etki etmektedir.

Belli bir esneklikteki sıcak karışım tabakaları, kendisini örten alt ve üst tabakaların esnekliğiyle uyuşması da önemlidir. Farklı esneklikler, dengesiz kuvvet dağılımlarına yol açarak, enine ve boyuna kırılmaları neden olur. Esnek kaplamaların tekerlek yüklerinin oluşturduğu her noktadaki değişik basınçlara bozulmadan dayanabilmesi için yük altında kendiliğinden sıkışabilen yol altyapısındaki hareketlere ve homojenlik arz etmeyen elastik deformasyonlara da uyum sağlaması gerekir. Sıcak karışımlarda uygun esneklik özelliği yeterli boşluk ve bitümlü malzeme miktarının fazlalığıyla doğru orantılıdır. Kalın tabakalarda esneklik; ekonomiklik de göz önünde bulundurularak boşluğun arttırılmasıyla, ince tabakalarda ise bitümün arttırılmasıyla temin edilir. Özellikle aşınma tabakalarında bitüm yüzdesinin üst limite yakın olmasının istenmesinin bir sebebi de esnekliktir.

Asfalt çimentosunun viskozitesi de esnekliğe etki eden bir başka etkidir. Sıcak iklimli bölgelerde düşük viskoziteli asfalt çimentolarıyla yapılan kaplamalarda kışın sert ve soğuk geçen bölgelerde kırılmalar meydana gelir. Bu sebeple kaplamanın yapıldığı bölge şartlarına uygun asfalt çimentosu uygulaması çok önemlidir [30].

3.4.3. Dayanıklılık (Durabilite)

Bitümlü bir kaplamanın dayanıklılığı, trafik, su, hava ve sıcaklık değişikliklerinin etkilerine karşı gösterdiği dirençle ifade edilir. Bu dış etkiler sebebiyle, kaplamanın iç bünyesinde oksidasyon, polimerizasyon ve gazlaşma meydana gelir. Başka bir ifadeyle karışımın durabilitesi, karışımdaki asfalt özelliklerinin değişmesine, agreganın kırılmasına ve asfaltın agregaya yüzeyinden soyulmasına karşı gösterilen dirençtir.

Düşük durabilitenin sebep ve etkileri aşağıdaki gibidir.

- Asfalt oranının düşük olması, kuru bir görünüş ve agregaların sökülmesine,
- Yetersiz sıkışma ve boşluk yüzdesinin yüksek değerde olması, asfaltın erken yaşlanarak kırılması ve ayrışmasına,
- Soyulmaya karşı dirençli agregaya kullanılması, asfaltın agregadan soyulmasına ve agregaların sökülmesine yol açmaktadır [30].

3.4.4. Geçirimsizlik

Bitümlü karışımlarda geçirimsizlik, kaplamanın içine hava ve suyun geçmesinin bir ölçüsüdür. Kaplamalardaki boşluk miktarı ile boşlukların irtibatı, kaplamanın üstünden altına kadar su, hava ve su buharının nüfuz etmesi için gerekli koridorları oluşturmaktır. Karışım kaplamalarının dış etkilerle maruz üst tabakalarının az geçirimli, alt tabakalarının ise geçirgen olmaları arzulanır. Geçirimsizlik azaldıkça hava ve suyun tesiri ile asfaltın yaşlanması hızlanır, soyulma mukavemeti düşer ve donma-çözülme tekerrürü ile agreganın parçalanmasına neden olur.

Bitümlü temel tabakalarında boşluk oranı %5-9, binder tabakasında %4-6 ve aşınma tabakasında ise %3-5 arasında olmasının arzu edilme nedeni geçirimsizliği sağlamak ve yoğunluğun artması içindir. Ancak kaplama yüzeyinin geçirimsizliğinin artması, kayma direnci yani sürüş emniyetinde azalmalara neden olur.

3.4.5. Yorulma Mukavemeti

Bitümlü sıcak karışımların yorulma mukavemeti, kaplamada çatlamlar oluşmadan tekrarlanan yükler etkisinde eğilmeye (kalıcı olmayan deformasyonların oluşmasına) izin verme yeteneği olarak ifade edilir. Yani kaplamanın çekme mukavemeti altındaki gerilmelere karşı çatlamadan ne kadar süre direnç gösterebileceğinin belirlenmesi gerekir. Bir başka ifadeyle, kaplamanın sahip olduğu çekme mukavemetinin altında etkiyen trafik yüklerinin maksimum tekerrür sayısına isabet eden mukavemet değeridir.

Yorulma mukavemeti; rijitlik (yüksek sıcaklıklarda), yoğunluk, kaplama kalınlığı arttıkça, asfalt penetrasyonu ve eğilme gerilmesi azaldıkça artış göstermektedir.

3.4.6. Kayma Direnci

Araçların frenleme esnasında emniyetle durabilmesi ve kurplarda merkezkaç kuvvetinden ötürü savrulmaması için tekerlek ile kaplama arasında gerekli sürtünme kuvveti kayma direnci olarak ifade edilir. Kayma direnci genel olarak; düşük asfalt miktarı, cilalanma direnci yüksek agrega, kırmataş ve pürüzlü yüzeyli agrega, açık ve kaba granülometrilili karışımla beraber artmaktadır. Kaplamanın yüzey düzgünlüğü arttıkça sürüş

konforu artmakta fakat kayma direnci önemli ölçüde düşmektedir. Agreg a boyutunun kayma direnci üzerinde çok önemli etkisinin olmadığı yol testlerinde görölmektedir. Optimum asfalt miktarından daha fazla kullanılacak asfalt, hem stabiliteyi düşürür hem de terleme-kusma olayı sonucu kaplama yüzeyine çıkan asfaltın meydana getirdiğı film tabakası ile kayma direncini azaltır [30].

3.4.7. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın serme ve sıkıştırma sırasında gösterdiği iş kolaylığının ölçüsü olarak tanımlanır. İşlenebilirlik genel olarak; kaba agreg a miktarı ve maksimum dane boyutu arttıkça, kırmataş agreg a kullanıldıkça, agreg a yüzeyinin pürüzlülüğü ve kırılmışlık oranı arttıkça, karışım ısısı azaldıkça, asfalt penetrasyonu düştükçe (katılaştıkça), asfaltın viskozluğu artıkça, filler miktarı aşırı arttıkça, ara boyutlu malzeme miktarı aşırı arttıkça azalmaktadır. Bazı hallerde iyi derecelenerek ayarlanmış karışım, yeterli silindirme yapıldığı halde bağlayıcı yetersizliği nedeniyle istenilen yoğunlukta elde edilememektedir. Bu durum asfalt çimentosu oranının karışımın işlenebilirliği üzerindeki rolünü açıkça ortaya koymaktadır [30].

4. ATIK YÖNETİMİ ve ATIK LASTİKLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Atıkların Yönetimi

Üretim ve kullanım faaliyetleri neticesinde ortaya çıkan, insan ve çevre sağlığı açısından zarar oluşturacak biçimde doğrudan veya dolaylı biçimde alıcı ortama verilmesi sakıncalı olan her türlü maddeye atık denilmektedir [42].

Ülkemizde, sanayileşme ve doğal kaynakların bilinçsiz kullanımı sonucunda oluşan çevre kirliliğinin etkisi son yıllarda daha fazla hissedilmeye başlamıştır. Gelişmiş dünya ülkeleri, daha önceleri meydana getirdikleri atıkların bir miktarını kendi ülkelerinde kullanıp, arta kalanları az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelere göndermekte idi. Bu doğrultuda, biriken atıkların sadece ülkeler arasında hareket gördüğünü fakat, dünya kaynakları açısından zararın devam ettiği fark edilince, atıkların uygun yöntemlerle ve kendi ülkelerinde geri kazanılması ya da bertarafı için çalışmalara başlamışlardır [41].

Atık Yönetimi, evsel, tıbbi, tehlikeli ve tehlikesiz atıkların minimize edilmesi, kaynağında ayrı toplanması, ara depolanması, gerekli olduğu durumda atıklar için aktarma merkezleri oluşturulması, atıkların taşınması, geri kazanılması, bertarafı, geri kazanım ve bertaraf tesislerinin işletilmesi ile kapatma, kapatma sonrası bakım, izleme-kontrol süreçlerini kapsayan bir yönetim biçimidir [43].

Çevre üzerinde büyük bir baskı oluşturan ve gün geçtikçe artan atık sorununun tamamıyla çözümü için tek bir açıdan yaklaşım yeterli olmamaktadır. Ancak tüm yöntemlerin kombinasyonu ile etkin bir atık yönetimi sağlamak mümkündür. Uluslar arası düzeyde kabul gören bu yaklaşım, “Entegre Atık Yönetimi” anlayışının benimsenmesine yol açmıştır. Entegre atık yönetiminde, atık yönetiminin tüm unsurları bir bütün olarak değerlendirilerek hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirliğin sağlanması hedeflenir. Bu kapsamda, entegre atık yönetiminin yalnızca tek bir atık çeşidine veya tek bir kaynağa yönelik olması beklenemez. Verimli ve entegre bir atık yönetim sistemi başlıca aşağıdaki özellikleri taşımalıdır.

Bütüncül bir sistem olmalıdır: Entegre atık yönetimi bir yerleşim merkezinde oluşan atığın bileşimini oluşturan bütün maddeleri ve üretim kaynaklarını kapsayacak şekilde planlanmalıdır.

Ekonomik değer oluşturabilmeli: Katı atık sistemiyle elde edilecek ekonomik değerler, geri kazanılabilir malzeme, kompost ve atıktan türeyen biyogaz (düzenli depolama ve anaerobik kompost) ve benzeri kaynaklı girdilerdir. Bunlardan sağlanacak gelir, piyasa şartları ve yapılacak yatırımın maliyeti ile yakından ilgilidir. Bu nedenle planlama aşamasında ekonomik analizin çok iyi yapılması gereklidir.

Esnek olmalı: Entegre atık yönetim sistemi, çevresel, mekânsal ve atık özelliklerinde zamana bağlı olarak oluşabilecek çeşitli değişikliklere uyum sağlayabilecek esneklikte olmalıdır. Bölgesel planlama yapılmalıdır: Planlamanın verimli olması, toplanacak atık miktarına bağlıdır. Atık oluşum miktarı ise öncelikle nüfusla doğru orantılıdır. Bu sebeple Büyükşehirler dışındaki yerleşim alanlarında bölgesel planlamalar yapılmalıdır. Bazı araştırmacılar entegre bir yönetime bağlı nüfusun 500.000 kişiden az olmamasını önermektedir [43].

4.2. Atık Lastikler

Çevre açısından oldukça dayanıklı yüksek molekül yapılı polimerlerden oluşan doğal ve sentetik kauçuklardan üretilen araç lastikleri, faydalı ömürlerini tamamlamaları ile, çevreden zor kalkacak “atık lastikler” sorununu oluşurmaktadır. Doğada zor ayrışır olmaları, atık lastiklerin önemli bir çevre problemi oluşurmalarının asıl nedeni değildir. Ayrışmaları zor da olsa atıklar, tabiatta sonunda ortadan kaldırılabilir. Buna yakma ile destek de olunabilmektedir. Ancak, üretilen atık lastiklerin çok fazla miktarlarda olması bu atıkların giderilmesinin önündeki en önemli engeli tekil etmektedir. Miktarın çokluğu nedeniyle bir çok giderme, uzaklaştırma ve geri kazanarak yararlanma şekli uygulanmış ve geliştirilmiştir [44].

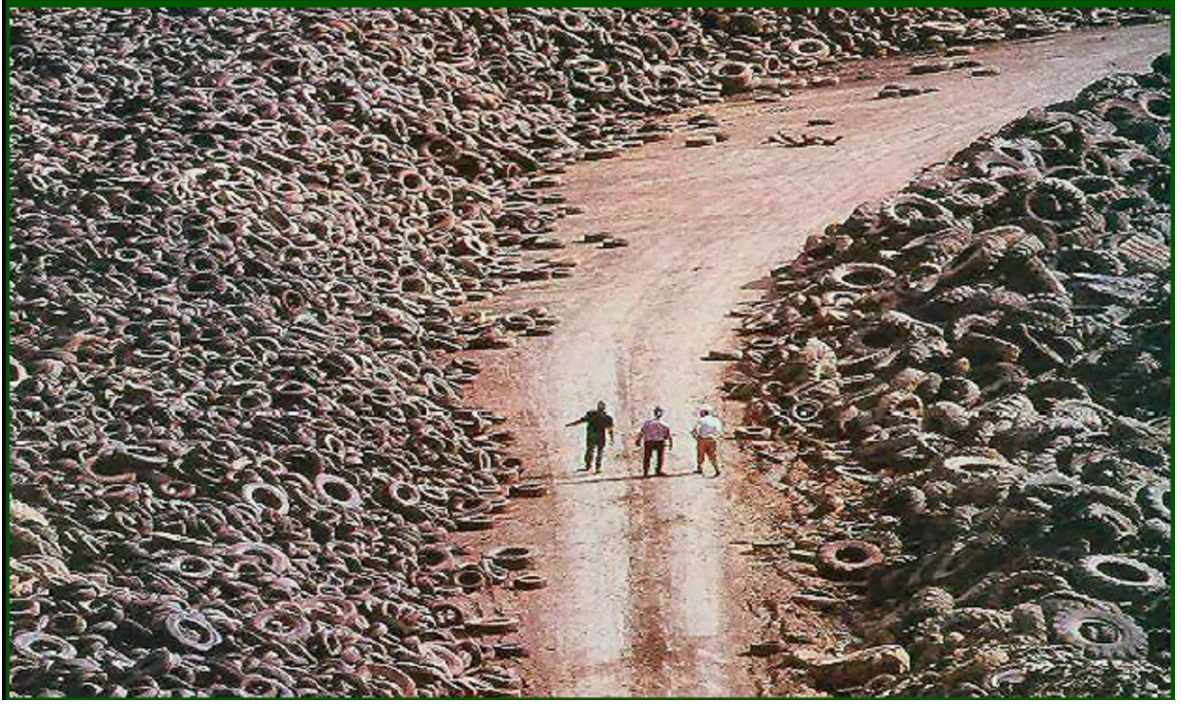
Büyük bir çoğunluğunu karayollarında kullanılan araçların oluşturduğu, atık lastiklerle ilgili sorunlar her geçen gün hızla çoğalmaktadır. Ömrünü tamamlamış taşıt lastikleri, günümüzde çok fazla olmasının yanında, değersiz bir atık konumundadırlar. Ayrıca; çevre kirliliğine sebebiyet vererek, insan sağlığı ile doğal dengeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sorunları ortadan kaldırmanın en etkin yollarından biri; atık lastiklerin yeniden işlenmek suretiyle, endüstride farklı uygulamalarda kullanılması olarak gösterilmektedir. Tüm bir lastiğin, çeşitli endüstriyel işlemlerden geçirilerek, farklı boyut

ve geometrilerde alternatif bir malzeme olarak kullanımı; başta ABD olmak üzere, birçok gelişmiş ülkede atık lastiklerin yönetimi ile ilgili sorunları önemli ölçüde azaltmıştır [45].

Ulaşımın yüzde 95'inin karayoluyla yapıldığı ülkemizde, milyonlarca araçtan elde edilen atık lastiğinin büyük bir kısmı; yasadışı yollarla çöp, deniz ve nehirlerle bırakılmaktadır. Atık lastiklerin çok az bir kısmı ise, çimento veya tuğla üretim fabrikalarında pişirme işlerinde yakıt malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ancak bu uygulamalarda da, fabrikaların baca filitrelerinde biriken tozlar, filtrelerin ömürlerinde kısaltmaya neden olduğu yönünde bir görüş hakimdir. Bu sebeple, atık lastiklerin gerek doğaya atılması, gerekse açık havada yakılması çok büyük çevre sorunları oluşturmaktadır. Atık lastikler yanıcı madde olmaları nedeniyle, atık lastiklerin depolanması işleminde özel güvenlik tedbirlerinin alınması zorunluluğu ortaya çıkmakta ve bu durumda da depolama maliyetleri artmaktadır [45,46]. Şekil 4.1 ve Şekil 4,2'de atık lastik depolarından bir görünüm verilmiştir.



Şekil 4.1. Atık lastik stoklarından görüntü [49].



Şekil 4.2. Atık lastik stoklarından görüntü [49].

Günümüzde hızla artış gösteren taşıt sayısı, atık araç lastiklerinin sayısında artışa neden olmuştur. Bu durum, çevre kirliliği ve ekolojik dengenin bozulması gibi önemli sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenlerden dolayı lastik tamir haneleri, kaplamacılar, oto sanayicileri, lastik satış noktaları gibi yerlerde biriken atık lastiklerden dolayı çevre bilinci sağlanarak ve o çevreyle uyumlu olan taşıma sistemleri kurularak, bu atık lastiklerin geri kazanımı ve geri dönüşümü bir zorunluluk haline getirilmelidir. Belediyeler tarafından belli bölgelerde yapılan atık lastik depolarında meydana gelen yangınlar (Şekil 4.3) ve sivrisineklerin lastikler içinde yuva yaparak çoğalmaları çevre açısından ciddi bir sorun oluşturmakla kalmayıp, doğaya bırakılan atık otomobil lastiklerinin kendiliğinden yok olması da mümkün gözükmemektedir [50]. Bugün ülkemizde her aracın, yılda ortalama 4 adet lastiğinin değiştirildiği kabul edilirse, 48 milyon adet kullanılmış araç lastiği yol kenarlarına, denizlere, köprü altlarına, baraj, göl ve göletlere, ırmaklara dolayısıyla doğal çevreye bırakılacak demektir [51].



Şekil 4.3. Atık lastik deposunda meydana gelen yangından bir görüntü

4.3. Atık Lastiklerin Yeniden Değerlendirilmesi

Türkiye’de her yıl oluşan 110.000 ton atık lastiğin yeniden değerlendirilmesine yönelik, bazı potansiyel uygulama önerileri literatürde mevcuttur. Kullanılmış atık lastiklerin; sönümleyici eleman olarak kullanımı (tarım, oyun yeri salıncağı, iskelelerde gemi tamponu olarak v.s), malzeme olarak değerlendirilmesi (lastik kaplama, kauçuk haline getirme v.s), enerji geri kazanımında kullanımı (çimento fabrikası ve ısı santrallerinde yakıt olarak), hammaddesel değerlendirme (petrole benzer yağlar ve kimyasal maddeler elde edilmesi), depreme karşı yığma yapıları güçlendirmek ve sismik yalıtım amaçlı kullanımı başlıca önerilen potansiyel uygulamalar arasında yer alır [6, 47,48].

Hurda lastiklerin geri dönüşüm yöntemleri günümüzde giderek çeşitlenerek yaygınlık kazanmaktadır. Hurda lastiklerin geri kazanılması bütün halden-toz hale kadar, çeşitli boyutlar için yapılmaktadır.

4.3.1. Tekrar Kaplama

Tekrar kaplanmış lastikler yeni lastiklerle aynı güvenlik ve performans özelliği gösterirler. Lastiklerin tekrar kaplanması, depolama sahalarındaki kullanım alanının artması yanında daha birçok avantajı bulunmaktadır. Yeni lastik üretimi için kullanılan yağ korunur ve hem satıcı hem de üretici için ekonomik faydalar sağlar. Bu lastikler yeni lastiklerle karşılaştırıldığında aynı mesafe yolu katederken, maliyet olarak da %50 daha ucuzdur. Sonuç olarak, eğer kullanılmış lastikler tekrar kaplarsa, lastik yığınlarının yanma riskinin önlenmesine yardımcı olur. Genellikle uçak ve kamyonlarda kaplanmış lastikler yaygın olarak kullanılmaktadır [53,54].

4.3.2. Doğrudan Değerlendirme

Lastiklerin doğrudan tekrar kullanılmasının diğer basit metotları arasında; oyun yeri salıncağı, gemi tamponu yapımı, motorlu spor alanları, deniz kıyısında gemi yanaşma noktaları, toprak erozyonu önlemede, zeminin su oymasına karşı köprü ayaklarının kaplanması, araç park alanları, deniz kıyısında dalga kırıcı olarak ve şev korumasında (Şekil 4.4) kullanılması sayılabilir. Balık habitatları için bir ortam yaratır, gelgit ve fırtına olaylarının su altı alanına çevrimini sağlayarak doğal ortamına dönmesine yardımcı olurlar [53].



Şekil 4.4. Bütün lastiklerin şev korumasında kullanılması

4.3.3. Parçalayıp ve Öğüterek Değerlendirme

Bu yöntemde lastiği oluşturan kauçuk, çelik ve lifler ayrıştırılır ve hepsi malzeme olarak ayrı ayrı yeniden değerlendirilir. Bir atık otomobil lastiğinin yaklaşık ağırlığı 9,1 kg'dır. Atık lastiğin yaklaşık olarak %35'i doğal ve %65' sentetik olan geri kazanılabilir kauçuktan meydana gelmektedir. Bir kamyon lastiği yaklaşık 18,2 kg ağırlığında olup, bu ağırlığın %60 ile %70'i geri kazanılabilir kauçuk ihtiva etmektedir. Atık lastiklerden kazanılabilecek temel ürünlerin yüzdesel değerleri Tablo 4.1'de verilmektedir [53].

Tablo 4.1. Atık lastikten elde edilen ürünlerin yüzdesel değerleri

Ürün	Kamyon lastiği(%)	Endüstriyel araç lastikleri (%)	Otomobil lastiği (%)
Kırıntı kauçuk	70	78	70
Çelik	27	15	15
Elyaf ve diğer katkıları	3	7	15

İri parçalar haline getirilen atık lastikler çöp depo yerinde sızıntı suyu toplama tabakası teşkili ve duvar arkası dolgularında (Şekil 4.5) kullanılabilir. Şekil 4.5



Şekil 4.5. Kullanılmış araç lastiklerinin duvar arkası dolgusunda kullanılması

Kırıntı ve toz haldeki kullanım alanları çok daha geniş olup, aşağıda sıralanmıştır: Otomobil Endüstrisinde: Kayışlar, oto fren balatasında bağlayıcı, oto tamponları, araba kaportasında sızdırmazlık contaları, araç içi paspaslar, contalar, darbe absorblayıcılar, teker arkasında çamur/su sıçramasını önleyen lastik perdeler, gemi raspa malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Spor Alanları Yüzeylerinde: Atletizm parkuru, golf ilk vuruş alanları, kreş oyun alanları, rekreasyon alanları, çim bowling alanları, tekne içinde kaymayı önleyici yüzey, okul spor alanları, yüzme havuzu çevresi ve bahçe içi yollar, tenis ve basketbol sahaları, yürüyüş parkurlarında kullanılmaktadır .

İnşaatlarda ve İnşaat Malzemesi Üretiminde: Tutkallar ve izolasyon sıvıları, teneke içi reçine kaplaması, halı tabanı, genel döküm kalıp ürünleri, baraj, depo, havuz, atık bertaraf sahası ve çatı sızdırmazları ve örtüleri, paspaslar, bina zemin kaplamaları, contalar, kümes hayvanı altlıkları, kaymayı engelleyici yüzey malzemesi, inşaat boyası, zemin yükseltme, çatı kiremitleri, vibrasyon gidericilerde kullanılmaktadır.

Zemin ve Asfalt Uygulamaları: Drenaj boruları, civa ve metalik yüzeyler için filtreleyici malzeme, poroz sulama boruları, demiryolu ray bağlantıları, karayolu inşası (Şekil 4.6) ve tamiri, asfalt yol çatlakları kapama malzemesi, karayollarda lastik katkılı asfalt, toprak iyileştirici ve zemin örtüsü, at yarış pisti malzemesi, toprakaltı drenajı, trafikte araç ve insan geçiş barikat alanlarında atık lastikler değerlendirilmektedir [44].



Şekil.4.6. Kullanılmış araç lastiklerinin yol gövdesinde kullanılması [49].

4.3.4. Termik Değerlendirme

Lastiğin 25.000 kJ/kg enerji değeri vardır ve bu kaliteli bir kömüre eşdeğerdir. Bazı işletmelerdeki yakma ünitelerinde lastikler bütün olarak veya parçalanmış olarak yakılırlar. Avrupa, Kanada, Japonya ve Amerika'daki birçok işletmede bütün veya parçalanmış lastikler çimento ocaklarında yakıt olarak kullanılmaktadır. Çimento üretimi için 1450°C sıcaklık gereklidir. Aynı zamanda çimento ocakları coğrafik koşullarından dolayı da kullanım için uygundur. Çünkü hem ocaklar hem de lastik istifleri, merkezi yerleşimden uzaktır.

Elektrik üretiminde kullanma, eski lastiklerin değerlendirilmesi için diğer bir olasılıktır. Almanya'daki bir tesiste yılda yaklaşık olarak 50.000 ton lastik yakılarak merkezi ısınma, proses buharı ve civardaki konut ve endüstri için elektrik üretilmektedir. Lastikler 1300°C'de yakılır ve yanma prosesi sonucu olarak cüruf, çinko içeriği fazla olan toz ve kireçtaşı oluşur. Bunlara da geri kazanım ve tekrar kullanma için ilave işlemler uygulanır [53].

Bahsedilen atık yönetimlerine göre ülkelerin bertaraf yöntemleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Bazı ülkelerde kullanılmış araç lastiklerinin yönetimi [44].

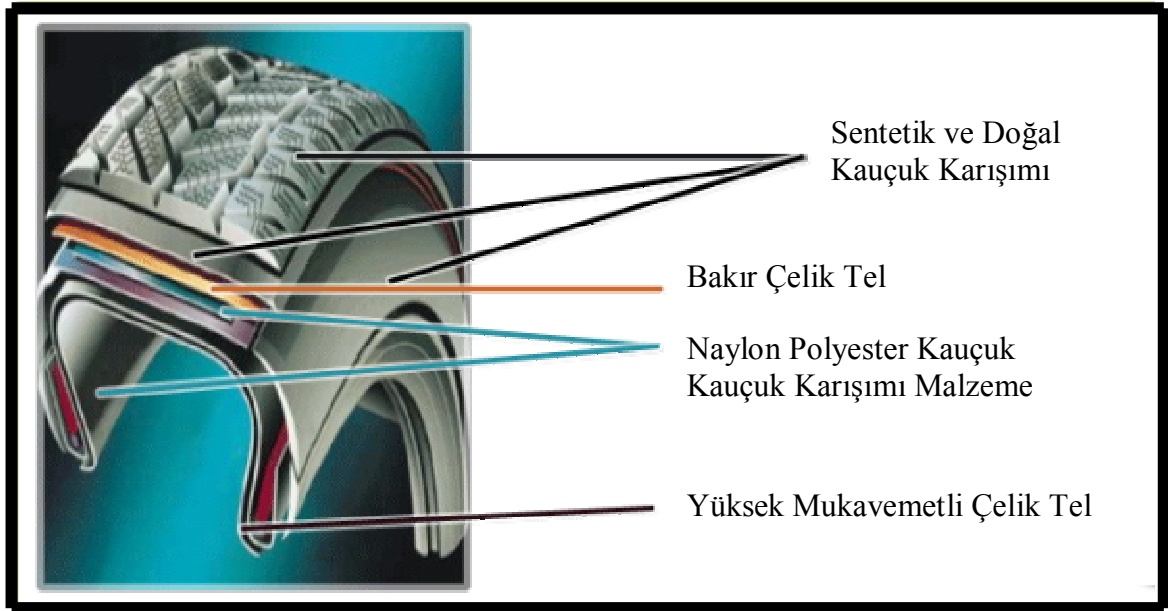
Bertaraf Yöntemi	Fransa 1996	Almanya 1996	İtalya 1996	İngiltere 1996	Belçika 1996	Hollanda 1996	İsveç 1996	ABD 1994
Yeniden Kaplama (%)	20	17,5	22	31	20	60	5	0
Geri Kazanma (%)	16	11,5	12	16	10	12	12,5	28
Enerji Elde Edilmesi (%)	15	46,5	23	27	30	28	64	72
Atık Deposuna(%)	45	4	40	23	5	0	5	0
İhracat (%)	4	16	2	2,5	25	0	7	0

4.4. Kauçuk/Lastik Üretimi

Lastik, bileşiminde, 200'den fazla hammadde içeren yüksek teknolojiye karmaşık bir üründür. Bu hammaddeleri beş grupta toplamak mümkündür. Buna göre:

- Doğal kauçuk: ağır vasıta lastiklerinin sırt deseninin temel bileşeni ,
- Sentetik kauçuk: otomobil lastiklerinin sırt deseninin temel unsuru ,
- Karbon karası ve silika: özellikle aşınmaya karşı direnci artırmak için güçlendirici ,
- Çelik ve polyester teller: çelik kuşak ve koruyucu kuşakları oluşturan teller ,
- Lastiğe değişik özellikler vermek amacıyla üretim safhasında kullanılan gerekli diğer kimyasallar.

Lastik yapısının (Şekil 4.7) karmaşıklığı, çok sayıda bileşenin bir arada kullanılmasından çok, lastik yapı, malzeme ve sırt deseni seçimi sırasında çok sayıdaki olasılıktan kaynaklanmaktadır [52].



Şekil 4.7. Araç lastiklerinin yapısı [41].

Lastik üretiminde kullanılan materyaller (Tablo 4.3) olağanüstü güçlüdür. Seyir sırasında binlerce kilometre uzunluğundaki asfalt ve asfalt olmayan yollardaki sürtünmelere dayanacak özellik ve şekilde imal edilirler. Oto lastikleri; üzerine gelen darbelere dayanımlı ve titreşim ile darbeleri büyük ölçüde sönümleyip yutan, esnek ve elastiki bir yapıya sahiptir. Oto lastikleri ayrıca sesi absorplama özelliğine sahiptir [50].

Tablo 4.3. Araç lastiği üretiminde kullanılan tipik malzemeler [41].

Ürün Cinsi	Kamyon Lastikleri	Araba Lastikleri
Kauçuk	% 70	% 70
Çelik	% 27	% 15
Lif ve Diğer Atıkları	% 3	% 15

4.4.1. Doğal Kauçuk

Doğal kauçuk, kauçuk ağacı deneni *Hevea brasiliensis* den oluşan sütümsü bir akışkan sıvıdan imal edilir. Doğal kauçuk, % 30-40 lastik (cis-1,4 polyisoprene), %2 reçine, % 60-65 su ve % 2-5 lipid ve proteinden oluşmaktadır. 2003 yılında dünyada 8,06 milyon ton üretilmiş ve 7,87 milyon ton tüketilmiştir. 2003 yılı itibariyle dünyada en çok doğal kauçuk üreten ilk beş ülke, bin ton olarak; Tayland: 2873, Endonezya: 1792, Malezya:986, Hindistan: 707 ve Çin: 478 şeklinde sıralanmıştır. Ülkemiz doğal kauçuk tüketimi 2003 yılı için 107 bin ton olarak gerçekleşmiştir. Dünyada doğal kauçuğu en çok tüketen ülkelerin başında ise, bin ton olarak; Çin: 1455, ABD: 1079, Japonya: 784, Hindistan: 716 ve Kore Cumhuriyeti: 333 bin tonla gelmektedir.

4.4.2. Sentetik Kauçuk

Sentetik kauçukların tasnifi aşağıdaki şekilde yapılmaktadır.

- Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR)
- Cis Polibütadien Kauçuğu (CBR)
- Sentetik Lateks
- Diğer Sentetik Kauçuklar [44].

Stiren Bütadien Kauçuğu (SBR): Stiren ve bütadien'den soğuk olarak emülsiyon polimerizasyonu ile elde edilen ve %22,5-%24,5 bağlı stiren içeren bir kopolimer olup genel maksat kauçuğudur. SBR, yüksek sıcaklığa, yağ ve çözücülere karşı çok mukavemetlidir. Fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla karbon siyahı ve diğer dolgu maddeleri ilave edilir. SBR, bütün sentetik kauçuklar üretim ve tüketiminin yaklaşık %60'ını oluşturur. Polibütadien Kauçuğu, soğuğa ve aşınmaya karşı dayanıklı olmasına karşılık özellikle ıslak yollarda kayma direnci düşüktür. Bu nedenle tek başına fazla

miktarda kullanılmamaktadır. Genel olarak SBR ile karıştırılarak karakteristikleri iyileştirilir ve binek otomobil lastiklerinde kullanılır [44].

Cis Polibütadien Kauçuğu (CBR) : Butadien 1,3 monomerinin kobalt katalizörlüğünde özel şartlarda polimerizasyonu ile elde edilen sentetik kauçuk türüdür. CBR kauçukların en önemli özelliği, yüksek elastikiyeti olup, kolay işlenebilirler. Tabii kauçuktan daha fazla olan esneklik kabiliyetini geniş bir sıcaklık aralığında muhafaza eder. İnert gazları çok iyi geçirir. Kaymaya karşı mukavemeti düşüktür.

Sentetik Lateks: Stiren ve butadien'in emülsiyon polimerizasyonu ile elde edilen ve içerisinde yüksek miktarda bağlı stiren bulunan bir kopolimerdir. Fabrikadan çıktıktan sonra içine hiçbir katkı maddesi ilave edilmemiş ve hiçbir işlemde geçirilmemiş olan kauçuğa ham kauçuk denir. İçine kükürt başta olmak üzere gerekli katkı maddeleri ilave edildikten sonra preste pişirilmiş kauçuğa vulkanize olmuş kauçuk denilir [44].

4.5. Atık Lastikleri Parçalama Yöntemleri

Atık lastiklerin boyutlarının küçültülmesinde uygulanan yöntemleri; kullanılan makine ve makine gruplarının çalışma teknolojileri yönünden, mekanik parçalama yöntemi ve nitrojenle parçalama yöntemi olarak iki temel gruba ayırmak mümkündür [8].

4.5.1. Mekanik Parçalama Yöntemi

Atık lastiklerin parçalanarak boyutlarının küçültülmesi işlemi tamamıyla mekanik prensiplere göre yapılmaktadır. Atık lastikler, birinci aşamada genellikle 5cm boyutunda parçalanır. Bu işlemle, atık lastiğin hacmi düşürülerek, depolama hacminin yanında, taşıma maliyetleri de azaltılmış olur. Bu işlemin en önemli faydası, ufaltılmış lastiklerin standart yükleyiciler ile yüklenebilmesidir. Ön parçalama işleminde kullanılan makinelerin büyük bölümü, düşük devirlerde karşılıklı olarak dönen iki milden oluşmaktadır. Bu tip sistemlerde, millerde oluşan yüksek tork sayesinde her türlü atık lastik kolaylıkla parçalanabilmektedir. Atık lastik içerisindeki çelik teller, parçalayıcı ve öğütücü makinelerdeki yırtılma ve aşınmanın %70'ni oluşturması nedeniyle, atık lastikleri

parçalama işlemi başlamadan önce, çelik tel kısımlarının ayrıştırılması gereklidir [8]. Şekil 4.8 ve 4.9'de lastik öğütme tesisinden görüntüler verilmiştir.



Şekil 4.8. Lastiğin mekanik olarak parçalanması [41].



Şekil 4.9. Lastik parçalama tesisleri [49].

Atık lastikler ön parçalayıcıda 5 cm boyutunda kesildikten sonra, çapı 10 mm'den daha küçük olan granül haline getirilecek şekilde öğütülür. Granül hale geldikten sonra, manyetik bir sistem kullanılarak atık lastiğin içerisindeki çelik teller, sallama, rüzgâr elekleri yardımıyla ise elyaflar ayıklanmaktadır. Bazı uygulamalarda kullanılmak üzere;

tane çapı daha küçük olan lastikler elde etmek maksadıyla, ardışık öğütme işlemi de uygulanabilmektedir [53].

4.5.2. Nitrojenle Parçalama Yöntemi

Nitrojenle parçalama yönteminde, atık lastiği parçalama işlemi düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Gevrek yani kırılğan hale getirilen lastik, daha sonra mekanik olarak parçalanmaktadır. Nitrojenle parçalama yöntemiyle lastik geri kazanımı işleminde, lastik veya lastik parçacıkları -80°C'nin altında soğutulmakta ve lastiğe cam gibi kırılğanlık özelliği verilmektedir. Soğutma işlemi uygulanmasını müteakip, lastiği ezerek veya kırarak lastik boyutu küçültme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu tür boyut küçültme işleminde ortam sıcaklığında yapılan boyut küçültme işlemine kıyasla, daha az enerjiye ve daha az makineye ihtiyaç duyulmaktadır. Nitrojenle parçalama yönteminin bir diğer avantajı da, atık lastik içersinde bulunan çelik ve elyaf kısmın ayrışma kolaylığı ile bunun sonucunda daha temiz bir ürün elde edilebilmesidir. Ancak sıvı azot fiyatının yüksek olması, bu sistemin dezavantajlı yanlarından biri olarak ortaya çıkmaktadır [8].

4.6. Atık Lastiklerin Bitümlü Kaplamalarda Kullanılması ve Yapılan Çalışmalar

Asfalt betonu kaplamaların performanslarının iyileştirilmesi çalışmalarında çok farklı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Katkı maddeleriyle modifiye edilen bitümlü karışımların performansları incelenerek, katkıların kazandırdıkları özellikler belirlenmeye çalışılmaktadır. Modifikasyon işlemi genel olarak, katkı maddesinin bitüme katılarak modifiye bitüm elde edilmesi veya katkı maddesinin doğrudan karışıma ilave edilmesi suretiyle modifiye karışım elde edilmesi şeklinde yapılmaktadır [55]. Bitümlü sıcak karışımların özelliklerini iyileştirmek için kullanılan önemli katkı maddelerinden biri kauçuktur. Kauçuğun asfalt karışımlarda kullanılabilirliği kullanılmış araç lastiklerinin içindeki kauçuğun geri kazanımını ön plana çıkarmıştır. Bu şekilde hem atık olan bir malzeme değerlendirilmiş hemde esnek kaplamanın özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır.

Hamzah ve ekibi, 80/100 penetrasyonlu saf bitümün ve parçalanmış atık lastikle modifiye edilmiş bitümün reolojik özelliklerini Dinamik Kesme Reometresi'nden (DSR) ile incelemiş ve ayrıca bu bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların rijitlik modüllerini incelemiştir. Karışım numuneleri yoğurmalı sıkıştırıcı ile hazırlanmıştır. Bu

yaklaşım ile bitümün kompleks modülü ve karışımın sertliği arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta öğütülmüş araç lastiği ilavesinin orijinal bitümün $G^*/\sin\delta$ değerini artırdığını ve dolayısıyla daha uzun bir yorulma ömrü sunduğunu ve araç lastiği modifiyeli bağlayıcının yaşlanmadan daha az etkilendiği karışım numunelerinde ise öğütülmüş araç lastiği modifiyeli karışımların %24 daha yüksek marshall stabilitesi %56 da yüksek sünme rijitliği değeri verdiği ve daha düşük ısı hassasiyeti gösterdiği belirtilmiştir [56].

Navarro ve ekibi, ağırlıkça %9 atık lastik kauçuğu ile modifiye edilmiş bitümün, kullanım ve işleme (örneğin pompalama, karıştırma, sıkıştırma vb.) sıcaklıklarındaki davranışını ele almıştır. Çalışmada, kauçuk parçacığı boyutunun bir fonksiyonu olarak, atık lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş bitümlerin (CTRMBs) mekanik özellikleri ve depolama dayanıklılığı araştırılmıştır. Öğütülmüş araç lastiği kauçuğunun bitüme eklenmesinin, yüksek servis sıcaklıklarında hem lineer viskoelastisiteyi ve viskoziteyi artırdığı hem de düşük sıcaklıklarda depolama stabilitesini azalttığı belirtilmiştir. Netice olarak, atık lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş bitüm, hem tekerlek izlerine, hem de yorulma çatlamlarına karşı direncini arttıran, gelişmiş mekanik özellikler sergilediği belirtilmiştir. Ayrıca çözünmeyen, küresel olmayan parçacıkların varlığı, yüksek sıcaklıklarda gözlenen akış davranışını etkilemektedir. Sağlanan deneysel sonuçlardan, üretim işlemleri sırasında 0.35 mm'den küçük kauçuk parçacıklarının ve modifiye işleminde yüksek karıştırma hızlarının kullanılması tavsiye edilmektedir [57].

Cooper, geleneksel bitümlü sıcak karışım, geri kazanılmış asfalt kaplamalar (RAP) ve öğütülmüş kauçuk (CR) içeren karışımların laboratuvar performansını araştırmıştır. Bu çalışmaya, Louisiana'da yaygın olarak kullanılan kalın taneli doğal kum ve silisli kalker agregalar dahil edilerek, toplam altı karışımın kıyaslı laboratuvar değerlendirmeleri incelenmiştir. Öğütülmüş kauçuk hem yaş proses olarak bitüm modifikasyonunda hem de kuru proses olarak direk karışıma ilave edilmiştir. Kauçuk oranı bağlayıcı ağırlığının %10'u olarak kullanılmıştır. Bağlayıcılar üzerinde fiziksel ve reolojik testler uygulanmıştır. Bitümlü karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma davranışlarının belirlenmesi için yarı dairesel eğilme, dinamik modül, dinamik sünme ve modifiye edilmiş Lottman testleri uygulanmıştır. Sonuçta %40 oranında PG 64-22 seviyesinde geri dönüştürülmüş asfalt çimentosu ve %10 öğütülmüş kauçuk karışımının PG 70-28 gibi davrandığı, öğütülmüş kauçuk ilavesinin karışımların nem hassasiyetini azalttığını, bu

karışımların iyi bir kırılma direnci sergilediğini, 54 °C'ye kadar lineer-viskoelastik bölgede kalabildiğini ve tekerlek izine karşı çok yüksek bir direnç gösterdiği belirtilmiştir [58].

Wayne ve Magdy, bitümün öğütülmüş araç lastiği kauçuğu ile modifikasyonunda sıcaklık, süre karıştırma hızı ve katkı oranının etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta düşük sıcaklıklarda polimerizasyonun uzun sürdüğü yüksek sıcaklıklarda ise çok kısa sürdüğü, karıştırma süresinde ise bir başlangıç periyodunun olduğu bundan sonra ise stabil bir yapı oluştuğu, bu başlangıç periyodunun ise kauçuğun kökeni ve boyutuyla ilgili olduğu, büyük dane boyutlu kauçuklarda yüksek karıştırma hızının bu parçacıkların boyutunu küçülttüğü ve böylece modifikasyon sürecini stabilize etmeye yardımcı olduğu ve yüksek kauçuk oranının etkileşim şartlarını istenilen kompleks modül ve faz açısı bakımından düşük kauçuk oranına göre daha fazla iyileştirmedeği belirtilmiştir [59].

Arabani ve ekibi, lastik lifi örgüsünün, asfalt kaplamasını takviye etmedeki kullanımı ortaya koymuş ve bunu kesin bir biçimde gözlemlemiştir. Çalışmada, lastik lifi örgüsüyle takviye edilmiş asfalt kaplamasının çatlama potansiyeli değerlendirilmiştir. Sonuçlar lastik lifi örgüsü takviyesinin bakım ve rehabilitasyon maliyetlerini düşürürken, asfalt kaplamasının çatlamaya karşı direncini önemli ölçüde arttırdığını ve hizmet ömrünü yükselttiğini göstermiştir [60].

Dantas ve ekibi atık lastik kauçuğunu kuru proses olarak yani mineral agrega olarak karışıma ilave ederek bu karışımların rijitlik ve yorulma ömürlerini incelemiştir. Kauçuk oranı %2-%3,6 aralığında seçilmiştir. [61]. İyi bir karşılaştırma yapabilmek için kauçuk içermeyen saf karışım ve ıslak proses ile üretilmiş karışım numuneleri de hazırlanmıştır. Sonuçta kuru proses ile modifiye edilen karışımların saf karışımlara göre önemli ölçüde mekanik özelliklerde bir artış sağladığı tespit edilmiştir.

Pereira ve ekibi yaptığı çalışmada, biri laboratuvar da diğeri rafineride olmak üzere iki farklı şekilde üretilmiş asfalt kauçuk bağlayıcı maddesiyle üretilmiş bitümlü sıcak karışımları incelemiştir. Çalışmada yoğun ve açık gradasyonlu karışımların yorulma ve kalıcı deformasyon davranışları incelenmiştir. Sonuçta rafineride hazırlanmış bağlayıcı ile üretilen karışımların tekerlek izi dirençlerinin, laboratuvar da hazırlanmış bağlayıcı ile üretilen karışımların ise yorulma ömürlerinin yüksek olduğu belirtilmiştir [62].

Cao, atık lastik kirliliğini en aza indirmek ve asfalt karışımlarının özelliklerini ıslah etmek üzere laboratuvar da, kuru proses ile geri dönüştürülmüş lastik kauçuğuyla modifiye edilmiş asfalt karışımlarının özelliklerini araştırmıştır. Farklı kauçuk miktarlarına sahip (toplam karışımın ağırlığı itibarıyla %1, %2 ve %3) üç tip asfalt karışımının ve kauçuksuz bir kontrol karışımının testleri gerçekleştirilmiştir. 60 °C'de tekerlek izi ve, 10 °C'de dolaylı çekme deney sonuçlarına göre kuru

proses ile lastik kauçuğunun ilavesi, asfalt karışımlarının mühendislik özelliklerini iyileştirdiği ve yüksek sıcaklıkta kalıcı deformasyona karşı direnci düşük sıcaklıkta çatlak oluşumuna karşı direnci artırdığı belirtilmiştir [63].

Dantas ve ekibi atık lastik kauçuğu gradasyonunun kauçuk asfalt özelliklerini etkileyen en önemli değişkenlerden biri olduğuna dikkat çekmiş ve yaptıkları çalışmada atık lastik kauçuğu gradasyonunun penetrasyon, döner vizkozite (Brookfield viskometresi kullanılarak), sertlik ve yumuşama noktası üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Test numuneleri, 50/70 penetrasyonlu saf bir asfaltla, ve temelde eski lastikleri ortam sıcaklığında yırtma ve ezmeye dayanan öğütme süreciyle elde edilmiş parça kauçukla üretilmiştir. Karıştırma süresi 60 dakika ve karıştırma sıcaklığı 170 °C olarak seçilmiştir. Sonuçlar döner vizkozite ve sertliğin, parça kauçuktan en çok etkilenen özellikler olduğunu göstermiştir. Ayrıca kauçuk parçacıklarının yüzey alanının artmasının yani küçük boyuttaki parçacıkların viskoziteyi artırdığı, iri parçacıkların ise daha çok sertliği etkilediği belirtilmiştir [64].

5. ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER

5.1. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deneyler

5.1.1. Penetrasyon Deneyi (TS 118 EN 1426)

Penetrasyon deneyi, bitümün sertliğini veya kıvamını belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde kat ettiği düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır (TS 118 EN 1426, 2002). Penetrasyonun birimi 10⁻¹mm.dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır. Penetrasyon deney aleti Şekil 5.1.'de gösterilmiştir. Isıya karşı duyarlılığın bir göstergesi olan Penetrasyon indisi (PI) Formül 5.1 ile hesaplanmaktadır.

$$PI = \frac{1952 - 500 * \log(Pen_{25}) - 20 * SP}{50 * \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (5.1)$$

Burada, Pen₂₅, bitümün 25⁰C'deki penetrasyon değerini, SP ise bitümün yumuşama noktası değerini göstermektedir. Bitümlü bağlayıcıların sıcaklığa karşı duyarlılıkları arttıkça PI değerleri azalmaktadır.



Şekil 5.1. Penetrasyon deney aleti

5.1.2. Yumuşama Noktası Deneyi (TS 118 EN 1427)

Bitümün yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilmekte ve bitüm üzerine standart bir bilye bırakılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve deney boyunca sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü malzemenin tabana değdiği anda termometrenin gösterdiği değerdir. Otomatik yumuşama noktası deney aleti Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Yumuşama noktası deney aleti

5.1.3. Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

Dinamik kayma reometresi (DSR) orta ve yüksek servis sıcaklıklarında bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özelliğini karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu deney ile kaplama ömrünün ilk dönemleri için yüksek servis sıcaklıklarında tekerlek izi oluşumuna karşı dayanım değerlendirilebilmektedir. DSR aynı zamanda servis ömrünün ilerleyen dönemlerinde orta servis sıcaklıklarında yorulma çatlak oluşumuna karşı dayanımın belirlenmesini sağlamaktadır. DSR deneyinde bitümlü bağlayıcıların viskoelastik özellikleri, uygulanan sinüsoidal gerilmelere karşı bitümlü bağlayıcının davranışının değerlendirilmesi sonucu belirlenmektedir. DSR deneyini belirten AASHTO TP5 standart deney yöntemine göre ince bitümlü bağlayıcı numunesinin sabit bir sıcaklıkta

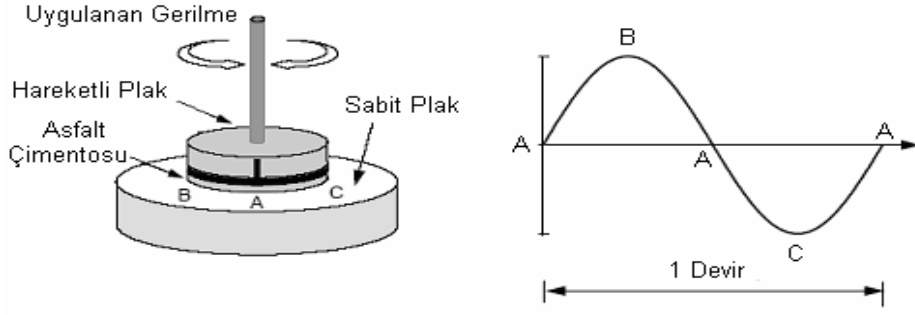
tutulan iki metal paralel plak arasına sandviç şeklinde yerleştirilmesi gerekmektedir. Plaklardan biri sinüsoidal hareket ederken diğeri sabit tutulmaktadır. Deney boyunca saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta 10 devir yapılmaktadır. Dinamik kayma reometresi deneyinde numunenin sinüsoidal gerilmelere karşı davranışı değerlendirilmekte ve bitümlü bağlayıcının kompleks kayma modülü ve faz açısı hesaplanmaktadır.

Bu çalışmada Şekil 5.3.'te görülen Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi kullanılmıştır.



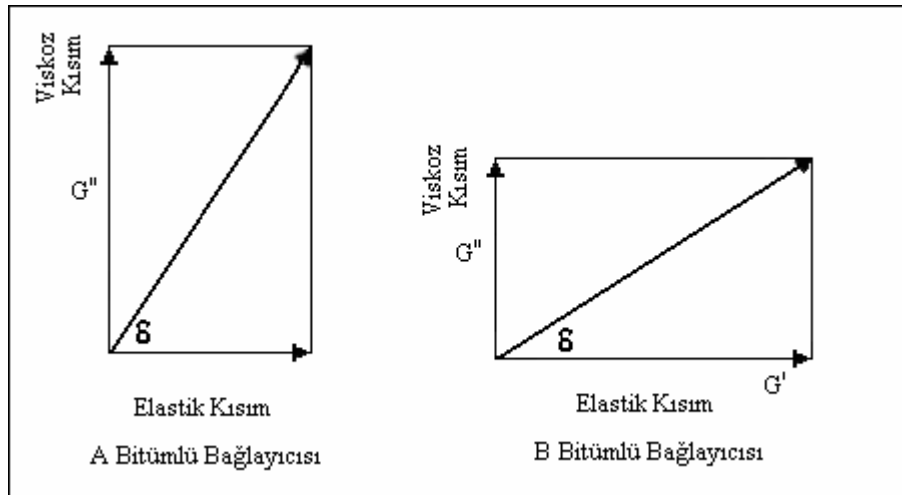
Şekil 5.3. Bohlin DSR II dinamik kayma reometresi

DSR deneyinde bitümlü bağlayıcılara uygulanan salınım (sinüsoidal) gerilmeleri ile bitümlü bağlayıcı numunelerinin davranışı değerlendirilmektedir. Deneyde sabit bir sıcaklıkta tutulan iki paralel metal plak arasına ince bir bitümlü bağlayıcı numunesi yerleştirilmektedir. Plaklardan biri sinüsoidal hareket ederken diğeri sabit tutulmaktadır. Deneyde saniyede 10 radyanlık sabit bir frekansta (ω) birbirini takip eden 10 devir yapılmaktadır. Tam bir DSR yükleme devri Şekil 5.4.'de görülmektedir. DSR motoru tork uyguladığında hareketli üst plak A noktasından B noktasına gitmekte geri dönerek A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır.



Şekil 5.4. DSR Deneyinde numunelere uygulanan deformasyon yönleri

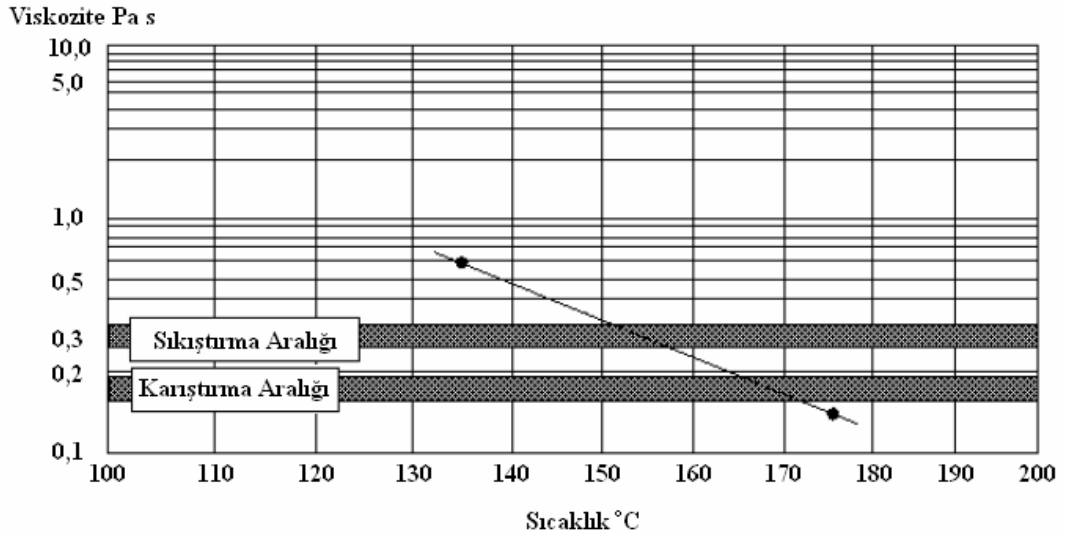
Kompleks modülüne bağlı olarak faz açısının değişimi grafiksel olarak Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Burada yatay eksen, elastik kısmı ifade ederken dikey eksen ise viskoz kısmı ifade etmektedir. Ancak normal kaplama ısısı ve normal yükleme durumlarında bitüm hem elastik hem de viskoz davranış sergilemektedir. Bitümün viskoelastik özelliği sahip olması ve her bir bitümün birbirinden farklı olması nedeniyle A ve B numaralı bitümlü bağlayıcıların yük altındaki viskoz ve elastik bileşenleri de birbirinden farklı olmaktadır. Şekilden görülebileceği gibi viskoelastik özellik hem G^* ’a hem de δ ’a bağlıdır.



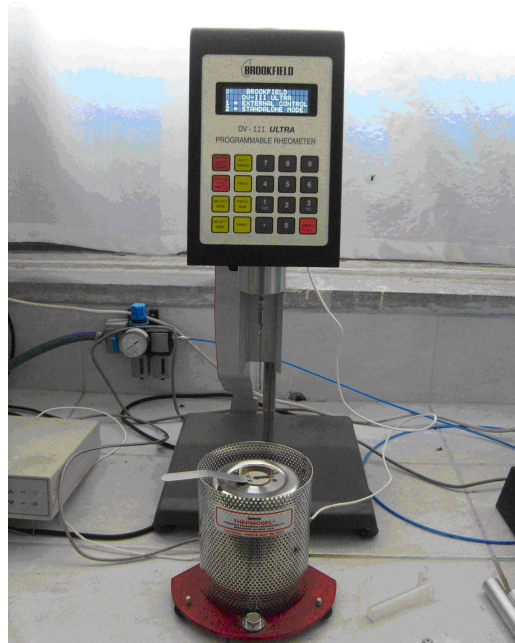
Şekil 5.5. Bitümün viskoelastik özelliği

5.1.4. Dönel Viskozimetre Deneyi

Dönel viskozimetre deneyi bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliğini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki bağlayıcı viskoziteleri, bitümlü bağlayıcıların pompalama ve karıştırma sırasında yeterli derecede akışkan olup olmadıklarını belirlemek amacıyla belirlenmektedir. Bu nedenle dönel viskozimetre deneyi yaşlandırılmamış bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. Superpave şartnamesine göre 135°C sıcaklıkta ölçülen dönel viskozite değerinin 3 Pa.s'yi (3000 cP) aşmaması gerekmektedir. Dönel viskozite değeri, bir milin sabit bir sıcaklıkta bağlayıcı numunesi içinde kendi etrafında dönüş hızını sabit tutacak burulma kuvvetinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. Dönel viskozimetre aynı zamanda bitümlü sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını seçmek amacıyla viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık aralıklarını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Karıştırma ve sıkıştırma sırasında işlenebilirlik bakımından gerekli viskozite değerlerin sağlayan sıcaklık aralıklarını belirlenebilmesi için dönel viskozimetre deneyinin iki farklı sıcaklıkta yapılması gerekmektedir. Asfalt enstitüsü, bu amaçla ilk deneyin 135°C'de ikincisinin ise 165°C sıcaklıkta yapılması gerektiğini belirtmiştir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları çizilen viskozite-sıcaklık grafiğinden belirlenmektedir. Tipik bir viskozite-sıcaklık grafiği Şekil 5.6'da görülmektedir. Buna göre karıştırma için 170 ± 20 cP, sıkıştırma için 280 ± 30 cP viskozite değerlerine karşılık gelen sıcaklık değerlerinin kullanılması öngörülmüştür. Çalışmada kullanılan Brookfield DV-III Ultra viskozimetresi Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.6. Viskozite değerleri ile karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesi



Şekil 5.7. Brookfield DV-III ultra dönel viskozimetresi

5.2. Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Uygulanan Deneyler

5.2.1. Dinamik Sünme Deneyi

Bu deneyde sabit bir değerdeki yük, silindirik numunenin yatay yüzüne belirli periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır. Dinamik sünme deneyinde yük tekrar sayısının bir fonksiyonu olarak ölçülen toplam kalıcı deformasyon, tekerlek izi potansiyeli ile

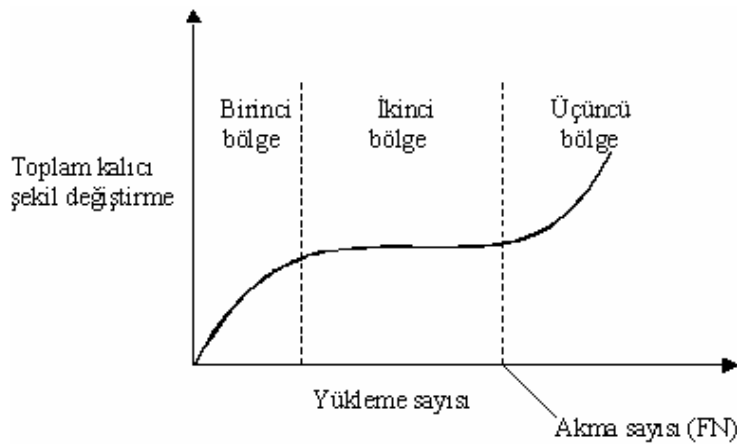
ilişkilendirilebilmektedir. Deney, farklı sıcaklık ve yüklemelerde yapılabilmektedir. Bu deney ile ayrıca belli bir poisson oranı kabul ederek ve yatay deformasyonun ölçülmesi ile rezilans modülü de tespit edilebilmektedir. Dinamik sünme deneyinde genellikle yük tekrar sayısı ve toplam kalıcı şekil değiştirme eğrisi (Şekil 5.8) sonuç olarak verilmektedir. Burada akma sayısı üçüncü bölgenin başladığı yük tekrar sayısı olarak tekerlek izi potansiyeli ile ilişkilendirilmektedir. Yapılan çalışmada beş deney arasından dinamik sünme deneyinin arazide ölçülen tekerlek izi derinliği ile çok iyi korelasyon verdiği belirtilmiştir [65]. Şekil 5.9’da yük zaman ve deformasyon zaman arasındaki ilişki görülmektedir.

Dinamik sünme deneyinde toplam eksenel birim şekil değiştirme ε_c ve sünme rijitliği E_c aşağıdaki formüllerden hesaplanmaktadır.

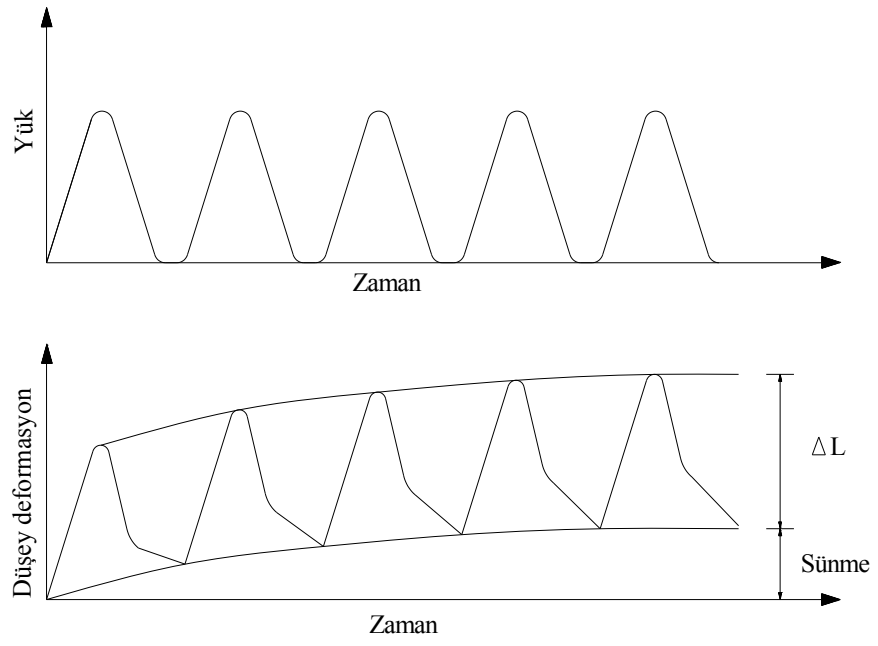
$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (5.2)$$

$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (5.3)$$

Burada $L3_n$, n darbe sayısındaki deplasman (mm), $L1$, başlangıç referans deplasmanı (mm), G , numunenin başlangıç yüksekliği (mm), σ , maksimum düşey gerilmedir (kPa). Çalışmada Şekil 5.10’daki test düzeneğine sahip UTM cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.8. Yük tekrar sayısı-şekil değiştirme ilişkisi



Şekil 5.9. Yük-zaman ve deformasyon-zaman ilişkisi



Şekil 5.10. Dinamik sünme deney düzeneği

5.2.2. İndirek Çekme Tekrarlı Yorulma Deneyi

Yollardaki bitümlü malzemeler her taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalırlar. Bu, malzemenin rijitliğinde azalmayla sonuçlanan çok küçük hasarlara neden olur. Bu hasarların birikmesi ile uzun sürede malzeme bozulmaktadır. Yorulma dayanımı, asfalt betonunun tekrarlı trafik yüklerine, dolayısıyla tekrarlı eğilme yüklemesine kırılmadan karşı koyabilme yeteneğidir. Yorulma, genel olarak asfalt betonu kullanılan üstyapılarda tekrarlı yükleme ile ilerleyen bir çatlak formudur. Yorulma çatlağı trafik yüklerinin belirli bir tekerrür sayısından sonra yavaş yavaş meydana gelmektedir. İnce kaplama veya zayıf alt tabakalar olması halinde ağır trafik yükleri altında aşırı defleksiyonlar oluşur. Bu defleksiyonlar kaplama altındaki yanal çekme gerilmelerini artırarak yorulma çatlaklarını doğurmaktadır.

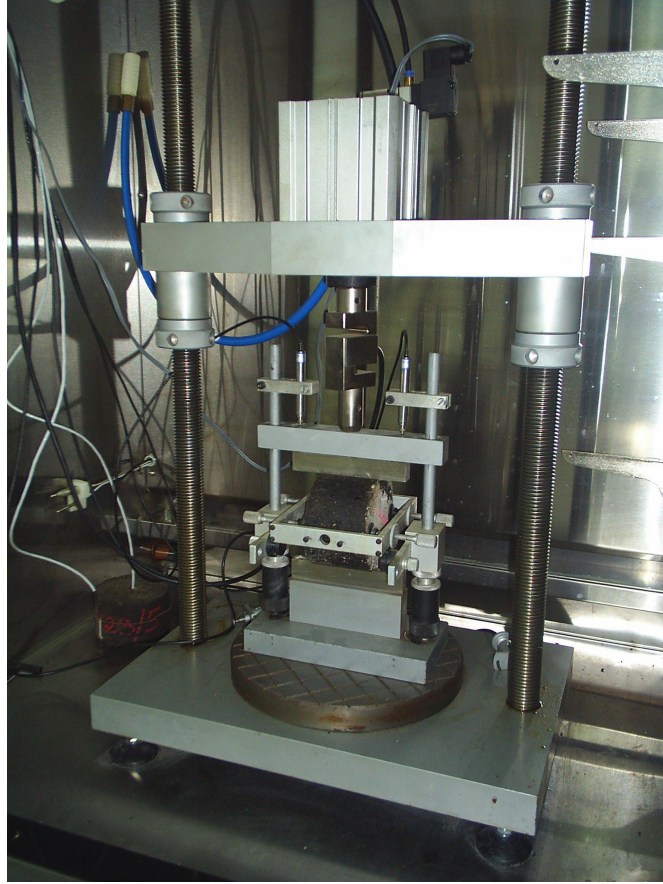
Üst yapı performansında en önemli özellik olarak BSK'ların yorulma davranışı kabul edilmektedir. BSK'ların sıkışması, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik dereceleri diğer deneylere göre, yorulma davranışının incelenmesi ile daha açık bir şekilde belirlenebilmektedir. Kaliforniya Ulaştırma Bölümünde yapılan bir çalışmada, %5 asfalt % 5 hava boşluğunda imal edilmiş bitümlü sıcak karışımlarda hava boşluğunun %1 artması yorulma ömrünü %30, asfalt içeriğinin ise hedeflenen değerden %1 az olmasının yorulma ömrünü %12 azalttığı belirtilmiştir [66].

Yorulma karakteristikleri genel olarak başlangıç gerilmesi yada birim şekil değiştirmesi ile bozulmaya neden olan yükleme adedi arasındaki ilişki olarak açıklanabilir. BSK'ların yorulma karakteristikleri genellikle gerilme yada şekil değiştirme kontrollü olmak üzere, tekrarlı eğilme kırışi, direk çekme ve diametral deneylerle belirlenmektedir. BSK'ların yorulma davranışı logaritmik eksenlerde gerilme yada şekil değiştirmenin bozulmaya neden olan yük tekrar sayısı arasındaki eğim olarak karakterize edilebilmekte ve bu ilişki formül 5.4'deki gibi tanımlanabilmektedir.

$$N_f = a \left(\frac{1}{\epsilon_o} \right)^b \left(\frac{1}{S_o} \right)^c \quad (5.4)$$

Burada N_f , yorulma ömrü (yük tekrar sayısı) ϵ_o , başlangıç şekil değiştirmesi, S_o karışımın başlangıç rijitliği, a, b, c , deneysel olarak belirlenen katsayılarıdır. Gerilme kontrollü deneyde gerilme sabit kalmakta şekil değiştirme yük tekrarı ile artmaktadır. Şekil

değiştirme kontrollü deneyde şekil değiştirme sabit kalmakta gerilme ise azalmaktadır. Gerilme kontrollü deneyde bozulma, numunenin kırılması olarak tarif edilirken, şekil değiştirme kontrollü deneylerde bozulma, rijitlikte %50 azalmanın olması olarak tarif edilir. Yorulma çatlağı, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesi olarak iki aşamaya ayrılabilir. Çalışmada Şekil 5.11'deki test düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 5.11. İndirek çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği

5.2.3. İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deneyi

İndirek çekme modunda ölçülen rijitlik modülü, elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şeklidir. Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden biridir.

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirek çekme, burulma deneyleri uygulanmaktadır. Bütün deney metotları, viskoelastik bir

malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Diametral deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Direk basınç deneyindeki asfalt karışımlarında agregalar arasındaki kenetlenme ve bağlayıcının rijitliği söz konusu olurken, çekme deneyinde agrega kenetlenmesi daha az öneme sahiptir [67].

Bu deney BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız bir deney olup rijitlik modülü (S_m , MPa) Formül 5.5 ile hesaplanmaktadır.

$$S_m = F(R + 0,27) / LH \quad (5.5)$$

Burada F , maksimum dikey yük (N); H , 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm); L , ortalama numune kalınlığı (mm); R ise poisson oranıdır (0,35). Çalışmada Şekil 5.12'deki deney düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 5.12. İndirek çekme rijitlik modülü deney düzeneği

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada atık lastik kauçuğunun hem bitüm hem de sıcak karışım modifikasyonundaki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla ilk önce çalışmada kullanılacak malzemelerin karakteristikleri ve şartnamelere uygunluğu tespit edilmiştir. Çalışma temel olarak iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde değişik oranlarda atık lastik kauçuğu içeren bitümler üzerinde geleneksel deneyler olan penetrsayon, yumuşama noktası, özgül ağırlık deneyleri ve reolojik deneyler olan dinamik kesme reometresi, dönel viskozimetre deneyleri uygulanmış, elde edilen sonuçlar saf bitüm ve değişik oranlarda SBS içeren bitümlerin aynı özellikleri ile karşılaştırılmıştır. İkinci bölümde ise atık lastik kauçuğu ve SBS modifiyeli bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışım numuneleri ve modifiyesiz bağlayıcı ile hazırlanmış numuneler üzerinde indirek çekme rijitlik modülü, indirek çekme tekrarlı yorulma ve dinamik sünme deneyleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

6.1. Bitüm Numuneleri Üzerindeki DeneySEL Çalışmalar

6.1.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bağlayıcıya ait özellikler Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Bağlayıcının özellikleri

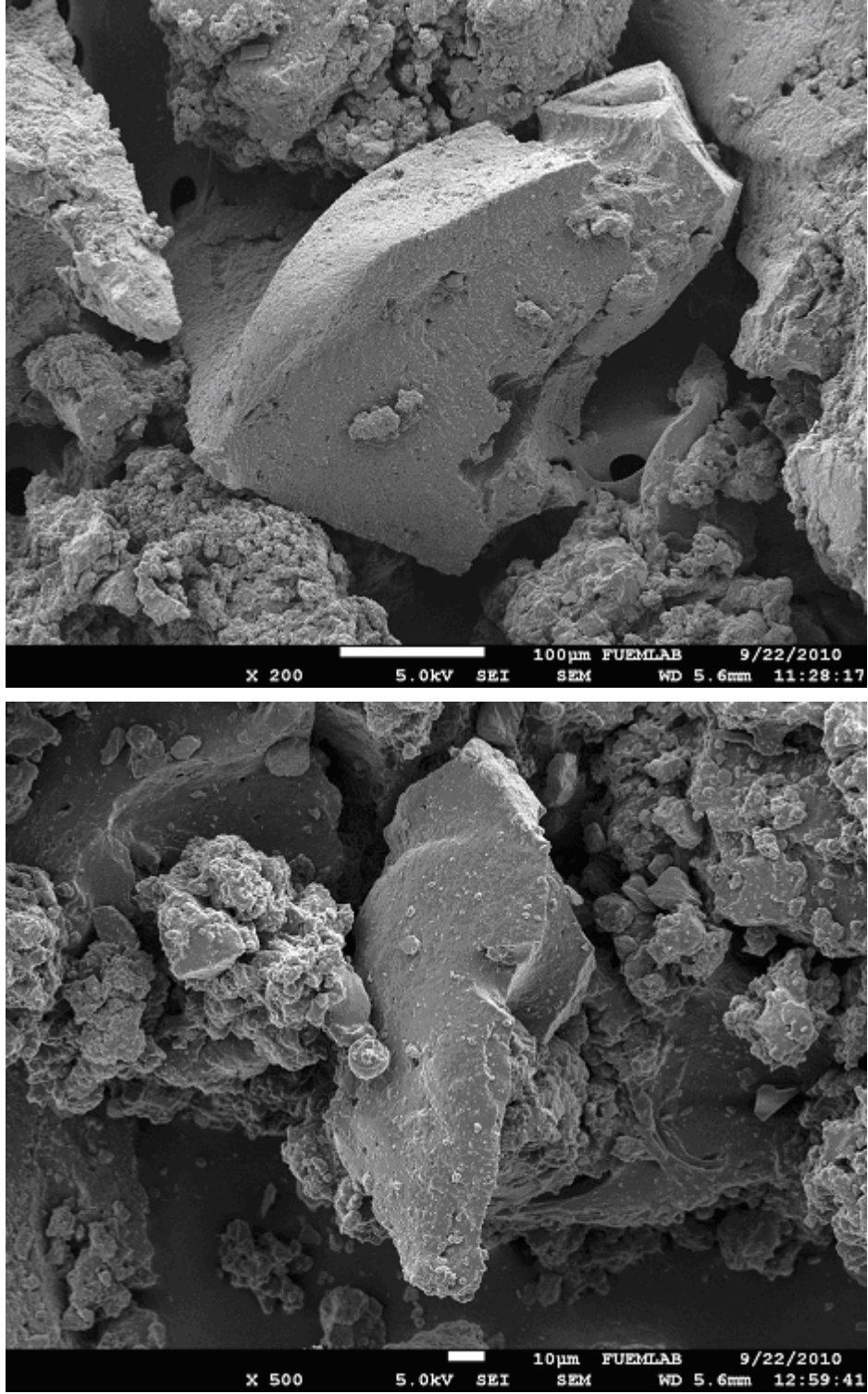
Özellikler	Standart	B 160/220
Penetrasyon (0,1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	192
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	41,5
Penetrasyon indeksi (PI)		0,365
Özül ağırlık		1,013
Viskozite (cP, 135°C)	ASTM D4402	250
Viskozite (cP, 165°C)	ASTM D4402	100
Karıştırma sıcaklığı (°C)		145
Sıkıştırma sıcaklığı (°C)		130

Bitüm modifikasyonunda kullanılan atık lastik kauçuğu Samsun Akın Plastik firmasından temin edilmiş olup üretim sürecine ait görüntüler Şekil 6.1’de verilmiştir. Atık lastik kauçuğu mekanik parçalama yöntemi ile elde edilmiştir. Parçalama işlemi öncesinde topuk teli denen kalın tel, çekme yöntemi ile lastikten ayrılmakta daha sonra döner bıçaklı sistemle çalışan 4 makineden küçültmek suretiyle parçalama işlemi gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada lastik 4’e bölünüp, Snider denilen makine ile el büyüklüğünde parçalara ayrılmaktadır. Daha sonraki aşamalarda sırasıyla 20, 12 ve 6mm’lik eleklerden geçecek şekilde parçalara ayrılmaktadır. Parçalama işlemi gerçekleştirildikten sonra mıknatıs yardımı ile diğer tel parçacıkları, öğütülmüş lastik parçacıkları içinden ayıklanmaktadır. Daha sonra yine değirmenler vasıtasıyla çok küçük boyutlara (0,3 mm çapında) parçalanmaktadır.

Bitüm modifikasyonunda kullanılan bir diğer katkı maddesi olan SBS (KRATON D1101) Shell Bitumen şirketince üretilmiştir.



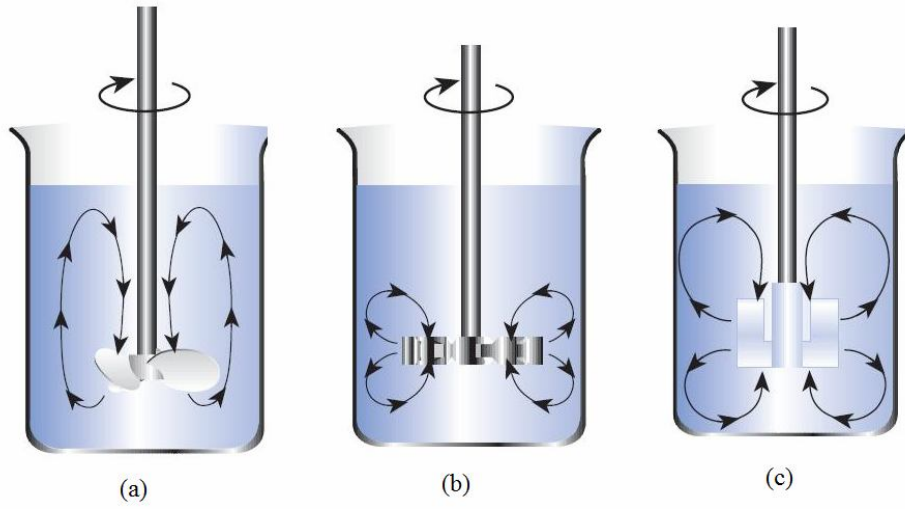
Şekil 6.1. Atık lastik öğütme süreci



Şekil 6.2. Atık lastik kauçuğu SEM görüntüleri

6.1.2. Modifiye Bağlayıcıların Hazırlanması

Modifiye bağlayıcının laboratuvarında üretimi için firmalar tarafından geliştirilen değişik karıştırma milleri bulunmaktadır. Bu millerden bazılarının yapısı ve kap içindeki karıştırma etkileri Şekil 6.3’de verilmiştir. Bu çalışmada kap içinde Şekil 6.3 (a)’daki etkiyi yapan Şekil 6.4’deki karıştırma mili kullanılmıştır. Atık lastik kauçuğu ve SBS katkıli modifiye bitümler, saf bitüm akışkan hale gelip karıştırma kabına aktarıldıktan sonra katkının belirlenen içerikte yavaş yavaş ilave edilip, 800 devir/dakika hıza sahip karıştırıcıda (Şekil 6.5) 185°C sabit sıcaklıkta 2 saat süre ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan modifiye bitümler küçük kaplara boşaltılmış, kaplar alüminyum folyo ile kaplanmış ve deneylerde kullanılmak üzere saklanmıştır.



Şekil 6.3. Karıştırma milleri ve etkileri



Şekil 6.4. Çalışmada kullanılan karıştırma mili

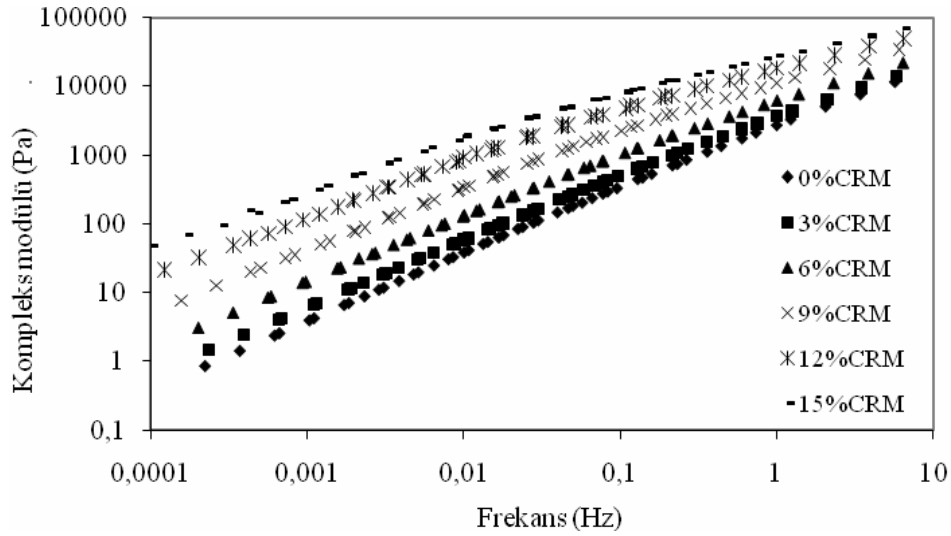


Şekil 6.5. Modifiye bitüm karıştırma cihazı

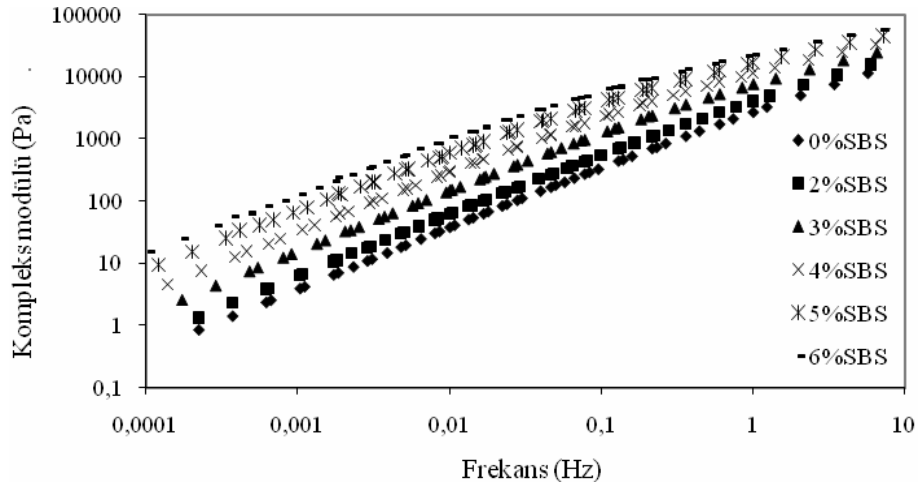
6.1.3. Bağlayıcılar Üzerinde Uygulanan Deney Sonuçları

6.1.3.1. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

Superpave sistemine göre, arazi şartlarına uygun sıcaklıklarda 1,59 devir/saniye (Hz) hızla numuneler DSR deneyine tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada ise 0,01 Hz ile 1 Hz frekans ve 40 °C ile 80 °C sıcaklık aralığında saf ve modifiye bitümler üzerinde DSR deneyi uygulanarak katkıların bağlayıcının reolojik davranışı üzerindeki etkisi daha geniş bir aralıkta değerlendirilmeye çalışılmıştır. Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de sırasıyla atık lastik kauçuğu (CRM) ve SBS modifiyeli bağlayıcıların kompleks modülü- frekans ilişkisine ait, farklı sıcaklıklardaki değerlerin 50 °C referans değerine indirgenmesi ile elde edilen master eğrileri verilmiştir.

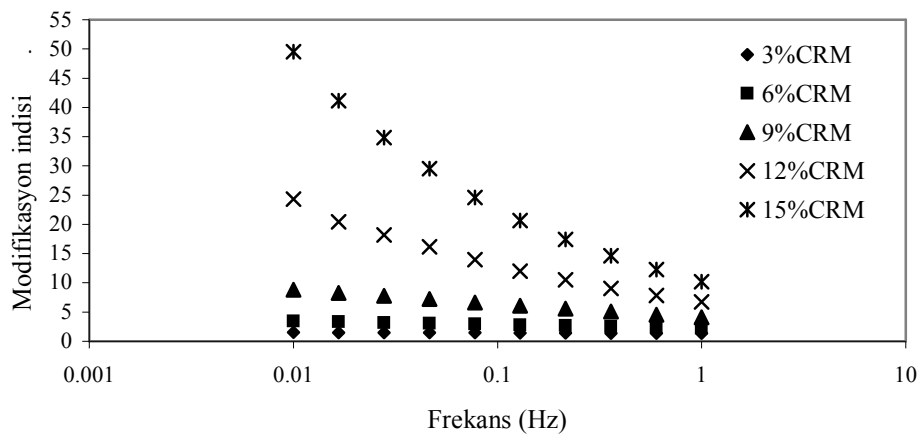


Şekil 6.6. CRM bağlayıcıların kompleks modülü-frekans ilişkisi

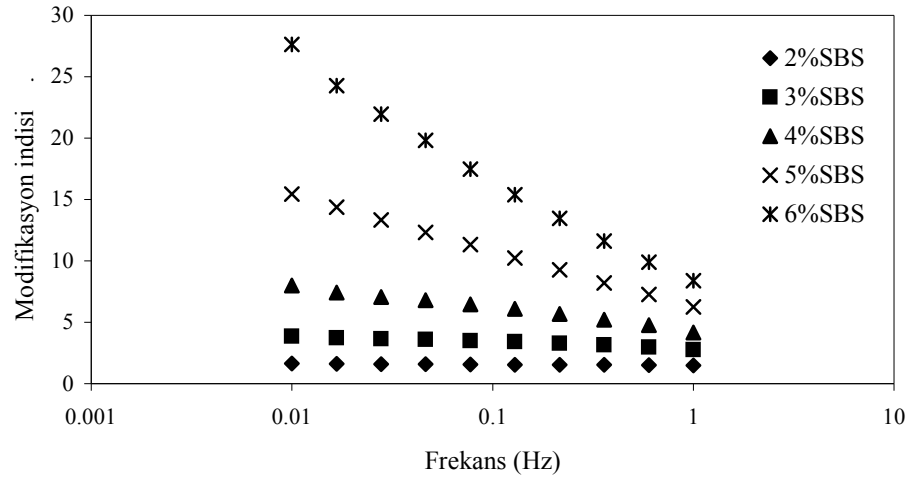


Şekil 6.7. SBS modifiyeli bağlayıcıların kompleks modülü-frekans ilişkisi

Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de atık lastik kauçuğu ve SBS modifiyeli bağlayıcılarının kompleks modüllerinde frekansın etkisi ile meydana gelen değişimin benzer olduğu görülmektedir. Her iki bağlayıcının da kompleks modülleri frekansın artması ile artmaktadır. Modifiyeli bağlayıcıların kompleks modüllerinin saf bağlayıcının kompleks modülüne bölünmesi ile elde edilen modifikasyon indisleri, 50 °C referans sıcaklığı için Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da verilmiştir.

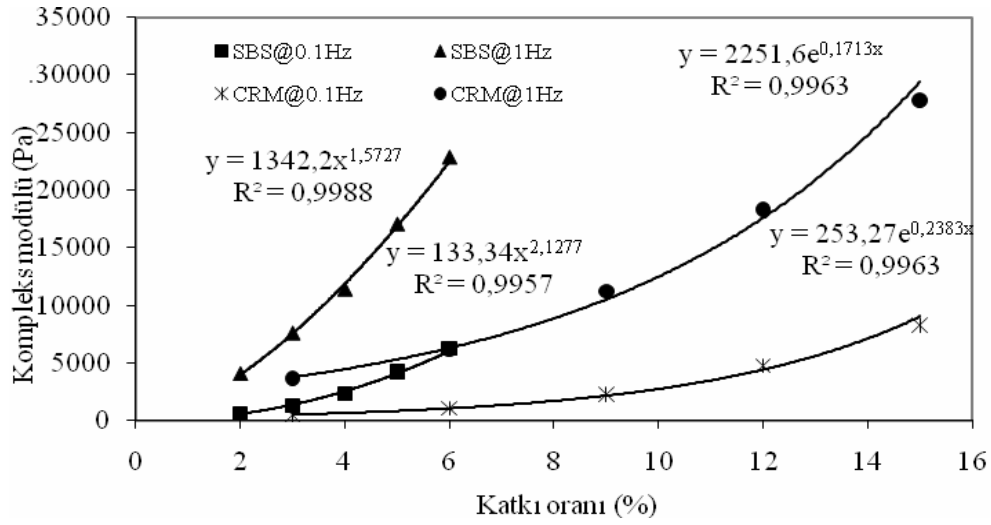


Şekil 6.8. CRM bağlayıcılarının modifikasyon indisi- frekans ilişkisi



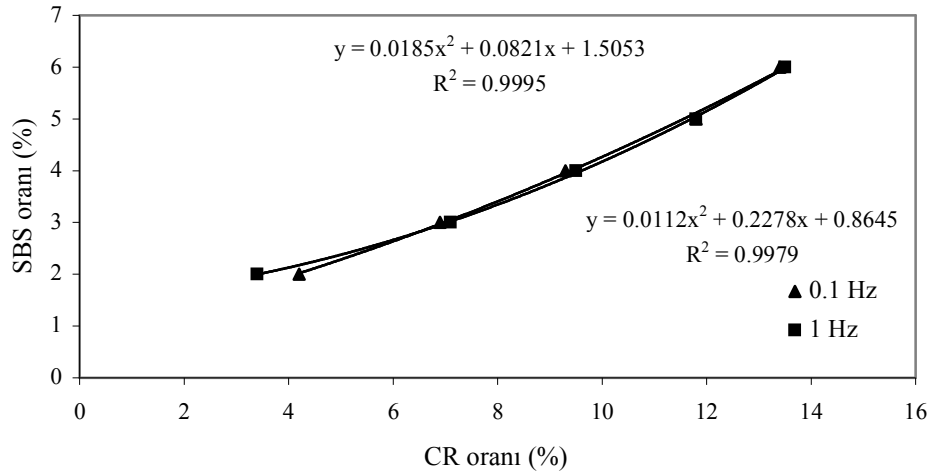
Şekil 6.9. SBS modifiyeli bağlayıcılarının modifikasyon indisi- frekans ilişkisi

Frekansın kompleks modülü üzerindeki etkisi Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'de açıkça görülmektedir. %5 SBS modifiyeli bağlayıcının kompleks modülü saf bağlayıcının değerlerinden 0,01 Hz frekansta 15 kat, 1 Hz frekansta ise 6 kat daha fazladır. %12 atık lastik kauçuğu modifikasyonunda ise bu değerler 24 kat ve 6 kat olmaktadır. Farklı katkı maddelerinin iyileştirme etkisi yüksek sıcaklıkta birbirine yaklaşmaktadır. Modifikasyon indislerinin %4 SBS ve %9 CR içeriğinden sonra önemli ölçüde değişmesi bu oranların yüksek performans davranışına geçiş için bir eşik olduğu düşünülebilir. Şekil 6.10'da 0,1 Hz ve 1 Hz frekansta katkı oranı ile kompleks modüllerinde meydana gelen değişim verilmiştir. Buradaki değerler master eğrilerinden alınmıştır.



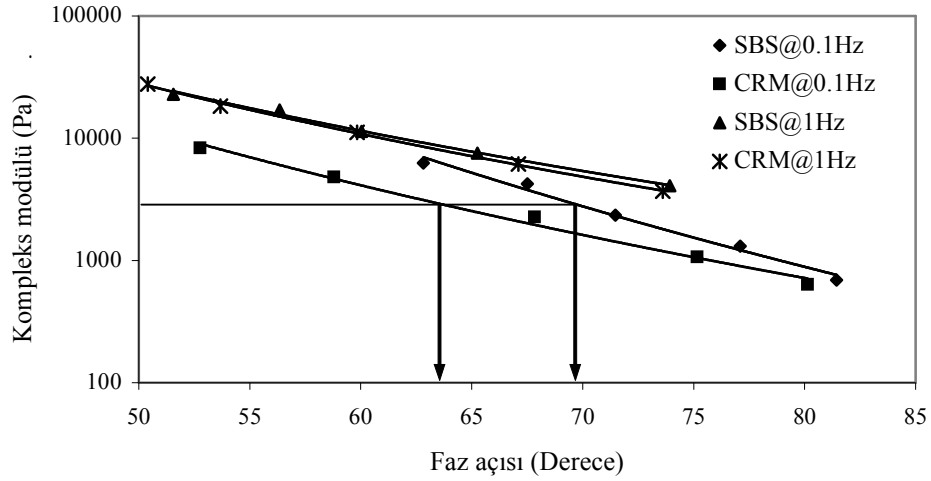
Şekil 6.10. Modifiyeli bağlayıcıların kompleks modüllerinin katkı oranı ile değişimi

Kompleks modülleri katkı oranının artması ile birlikte artmaktadır. Kompleks modüllerindeki bu artış oranı SBS modifikasyonunda üs CR modifikasyonunda ise üstel olmaktadır. Bu da CR katkısının kompleks modülü üzerindeki iyileştirme etkisinin yüksek oranlarda daha belirgin olduğuna işaret etmektedir. Şekildeki eğrilerin eğimi frekansın azalması ile azalmaktadır. Bu azalma oranları ise SBS ve CR modifiyeli bağlayıcılarda benzerlik göstermektedir. Fakat SBS ile aynı performansı temin edecek CR içeriğinin özellikle düşük frekansta çok yüksek değerler olması gerektiği tespit edilmiştir. Şekil 6.11’de 0,1 Hz ve 1 Hz frekansta aynı kompleks modülü değerlerini veren CR ve SBS içeriği arasındaki ilişki verilmiştir. Yüksek korelasyona sahip bu eğriler, kompleks modülü değerleri dikkate alındığında hangi CR içeriğinin SBS modifikasyonu ile eşit olduğunu tespit etme imkanı sağlamaktadır. Örnek olarak %3 SBS modifikasyonu ile elde edilen kompleks modülü değeri 0,1 Hz frekansta 6,9 CR içeriği ve 1 Hz frekansta 7,1 CR içeriği ile elde edilebilmektedir. %5 SBS modifikasyonu için bu değerler 0,1 Hz frekansta 11,8 ve 1 Hz frekansta 11,9 CR içeriği olmaktadır. 0,1 Hz ve 1 Hz eğrilerinin birbirine çok yakın olması SBS ve CR modifikasyonunun frekans değişimine verdiği tepkinin kompleks modülleri açısından benzer olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.11. CR oranına karşılık SBS oranındaki değişim

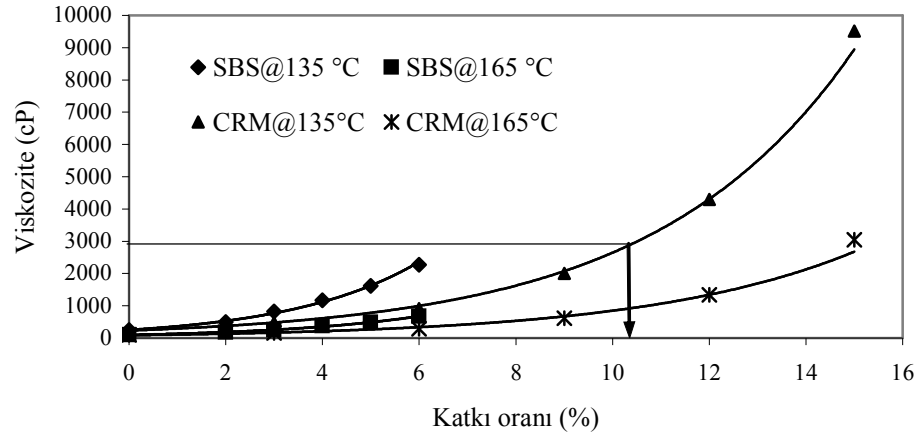
Modifiyeli bağlayıcıların kompleks modülüne karşın faz açılarında meydana gelen değişim Şekil 6.12’de verilmiştir. Burada çizilen her eğri farklı katkı oranlarını gösteren beş nokta ile çizilmiştir. Faz açıları katkı oranının artması ile artmaktadır. SBS ve CR modifiyeli bağlayıcıların kompleks modülündeki değişim hem düşük hemde yüksek frekansta benzer iken, kompleks modülü ve faz açısı arasındaki değişim sadece yüksek frekansta benzer buna karşın düşük frekansta önemli değişiklikler göstermektedir. Düşük frekansta (0,1 Hz) 3 kPa kompleks modülü değerini veren SBS modifiyeli bağlayıcının faz açısı değeri $69,8^\circ$ iken aynı kompleks modülündeki CR modifiyeli bağlayıcının faz açısı $63,5^\circ$ olmaktadır. Taşıt yüklerinin daha etkin olduğu düşük frekans durumunda meydana gelen bu faz açısı düşüşü, elastik tepkinin artışına ve dolayısıyla deformasyonlara karşı potansiyel bir dirence işaret etmektedir. CR ve SBS modifiyeli bağlayıcıların faz açıları arasında meydana gelen bu fark, katkı oranının yüksek olduğu yüksek kompleks modülü değerlerinde artmaktadır.



Şekil 6.12. Modifiyeli bağlayıcıların kompleks modülüne karşılık faz açılarında meydana gelen değişim

6.1.3.2. Dönel Viskosimetre Deney Sonuçları

Bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C’de katkı oranı ile viskozitelerinde meydana gelen değişim Şekil 6.13’de verilmiştir. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin katkı oranı ile birlikte önemli derecede arttığı, özellikle yüksek CR içeriğinde önemli bir sertleştirme etkisi olduğu tespit edilmiştir. CR modifiyeli bağlayıcıların viskozite eğrilerinin eğiminin %10 CR içeriğinden sonra önemli derecede arttığı görülmektedir. SBS modifikasyonunun %6,7 ve CR modifikasyonunun %10,5 oranında olması durumunda bu bağlayıcıların viskozite değerlerinin 3000 cP değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu oranların üzerindeki modifikasyon, bağlayıcının Superpave sartnamesine göre işlenebilme ve pompalanabilme özellikleri açısından uygun olmamaktadır. 3000 cP viskozite değerine sahip %6,7 SBS ve %10,5 CR modifiyeli bağlayıcıların 1 Hz frekanstaki kompleks modüllerine bakıldığında, CR modifiyeli bağlayıcının kompleks modülü değerinin SBS modifiyeli bağlayıcınınkinden iki kat daha az olduğu görülmektedir. Bu da %10 oranının üzerindeki CR modifikasyonunun polimerik bir modifikasyondan çok fiziksel (filler tipi) bir modifikasyon olduğuna işaret etmektedir. Kompleks modülünü beklediği kadar artırmadan viskozitede meydana gelen bu artış modifikasyonda çözülmeyen parçacıkların varlığına işaret etmektedir.



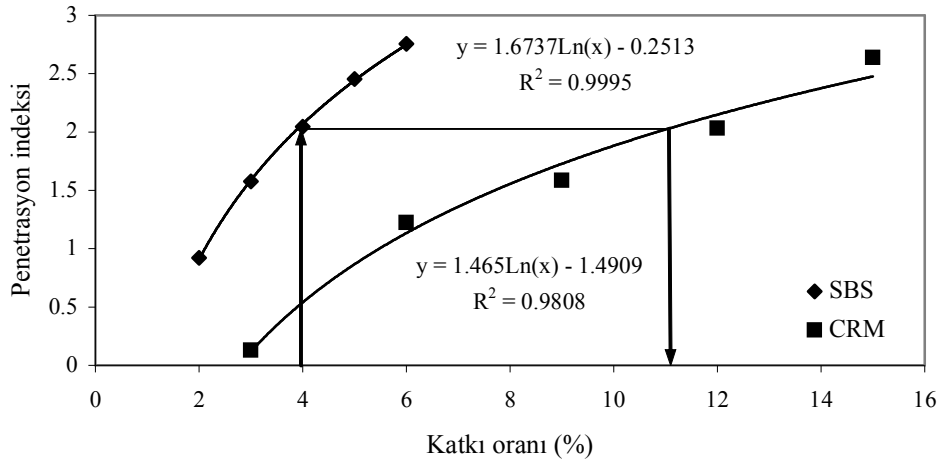
Şekil 6.13. Bağlayıcıların katkı oranı ile viskozitelerinde meydana gelen değişim

6.1.3.3. Geleneksel Bağlayıcı Deney Sonuçları

Saf ve modifiyeli bağlayıcılar üzerinde penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 6.2’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere katkı oranlarının artması ile penetrasyon değerleri azalmakta yumuşama noktası değerleri ise artmaktadır. Bu davranış SBS modifiyeli bağlayıcılarda daha belirgindir. Penetrasyon indisi değerlerinin katkı oranı ile artması bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılıklarının azalmasına işaret etmektedir. Bu durum Şekil 6.14’de de görülmektedir. Ancak katkı oranı ile PI değerlerinde meydana gelen artış eğiminin SBS modifikasyonunda daha fazla dolayısıyla ısıya karşı daha az duyarlı olduğu görülmektedir. Şekil 6.14’de %4 SBS modifiyeli bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin %12 CR modifikasyonu ile elde edileceği tespit edilmiştir.

Tablo 6.2. Geleneksel bağlayıcı deney sonuçları

Özellikler	Saf	SBS oranı (%)					CR oranı (%)				
		2	3	4	5	6	3	6	9	12	15
Penetrasyon	192	128	97	82	64	53	116	100	81	62	53
Yum.nok (°C)	41,5	47,8	53,8	58,2	62,7	68,6	46,4	52,0	56,3	62,2	67,9
PI	0,365	0,922	1,576	2,047	2,219	2,755	0,130	1,222	1,585	2,032	2,637



Şekil 6.14. Bağlayıcıların katkı oranı- penetrasyon indeksi ilişkisi

6.1.3.4. Bağlayıcı Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirmesi

Bağlayıcı deneylerinin sonunda CR ve SBS modifiyeli bağlayıcılar arasında genel bir değerlendirme yapılmış ve sonuçlar Tablo 6.3’de verilmiştir. Bu tablo değişik bağlayıcı deney sonuçlarına göre değişik oranlardaki SBS modifikasyonu ile aynı sonuçları veren CR oranını göstermektedir. Sonuçta her bir deneyin SBS modifikasyonu ile aynı performansı sağlayacak birbirinden farklı oranlarda CR oranı gerektirdiği tespit edilmiştir. SBS modifikasyonu ile aynı performansı sergileyecek CR oranlarının en fazla PI sonuçları, en az CR oranının ise 165 °C’deki viskozite deney sonuçları için gerekli olduğu görülmektedir. Kompleks modülü değerlerine göre düşük ve yüksek frekansta SBS modifikasyonu ile aynı sonucu verecek gerekli CR oranları arasında önemli fark yok iken düşük ve yüksek frekanstaki faz açısı değerlerine göre gerekli CR oranları arasında bir fark olduğu tespit edilmiştir. Faz açısı sonuçlarına göre düşük frekansta daha az CR oranının gerekmesi elastik davranışa işaret etmektedir.

Tablo 6.3. Bağlayıcı deney sonuçlarına göre CR oranı ile SBS oranı arasındaki ilişki

SBS oranı (%)	CR oranı (%)									
	PI	Viskozite 135°C	Viskozite 165°C	G* 0.1 Hz	G* 1 Hz	δ 0.1 Hz	δ 1 Hz	Yum. noktası	Penetrasyon	Ortalama
2	5,2	3,2	3,2	4,2	3,5	2,6	3,0	3,7	2,0	3,40
3	8,1	5,2	4,7	6,9	7,1	4,7	6,5	7,3	6,2	6,30
4	11,2	6,7	6,5	9,3	9,5	7,3	8,9	9,9	8,7	8,66
5	14,7	8,0	7,6	11,8	11,9	9,0	10,9	12,8	11,9	10,94
6	18,1	9,4	9,0	13,4	13,4	10,9	13,8	15,4	12,5	13,16

6.2. Bitümlü Sıcak Karışım Numuneleri Üzerindeki Deneysel Çalışmalar

6.2.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Bitümlü sıcak karışım numunelerinin üretiminde daha önce özellikleri tespit edilen saf bağlayıcı (B 160/220), atık lastik kauçuğu ve SBS modifiyeli B 160/220 bağlayıcıları kullanılmıştır. Agregaya olarak Elazığ Karayazı bölgesinden temin edilen kırmataş kalker kullanılmıştır. Agregaya ait fiziksel özellikler ve karışımlarda kullanılan agregaya gradasyonu sırasıyla Tablo 6.4 ve Tablo 6.5’de verilmiştir.

Tablo 6.4. Agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler		Kaba	İnce	Filler
Aşınma Kaybı, % (Los Angeles)	ASTM D131	29		
Yassı, uzun dane, %	ASTM D4791	2		
Donma kaybı, % (Na ₂ SO ₄)	ASTM C 88	4,5		
Özgül Ağırlık, gr / cm ³	ASTM C127	2,613		
Özgül Ağırlık, gr / cm ³	ASTM C128		2,622	
Özgül Ağırlık, gr / cm ³	ASTM D854			2,711

Tablo 6.5. Agrega gradasyonu

Elek (mm)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
% Geçen	100	95	88	65	39	24	18	14	9,5	5

6.2.2. Bitümlü Sıcak Karışım Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan bitümlü sıcak karışım numuneleri Marshall metoduna göre hazırlanmıştır. İlk etapta hiçbir katkı içermeyen kontrol numuneleri için gerekli optimum bağlayıcı oranı tespit edilmiştir. Bu amaçla farklı bitüm muhtevalarında üçer adet Marshall numuneleri, 101,6 mm çapındaki kalıplarda her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak hazırlanmıştır. Öncelikle numunelerin üç ayrı yerden yükseklikleri ölçülmüş, havadaki kuru ağırlıkları (W_{kuru}), sudaki ağırlıkları (W_{suda}), havadaki doymuş ağırlıkları ($W_{doymuş}$) ve sıkıştırılmamış gevşek karışımın ASTM D 2041 standardına göre teorik özgül ağırlıkları ölçülerek, numunelerin pratik özgül ağırlıkları (D_p), asfaltla dolu boşluk oranları (V_{fa}), boşluk oranları (V_h) ve agregalar arasındaki boşluk oranları (V_{ma}) tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler Marshall deney aletinde kırılarak Marshall stabilite ve akma değerleri tespit edilmiştir. Kontrol numunesi için optimum bitüm içeriği %5 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, bağlayıcı oranının değişiminden meydana gelecek etkileri dikkate almamak amacıyla atık lastik kauçuğu ve SBS modifiyeli karışım numuneleri için de kullanılmıştır. Karışım numunelerinin hazırlanmasında bağlayıcıların viskozite değerlerinden elde edilen karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına dikkat edilmiştir. Karıştırma sıcaklıkları için şartname [69] kriteri olan 170 cP ve sıkıştırma sıcaklığı için 280 cP viskozite değerleri tespit edilmiştir. Kontrol ve modifiyeli bağlayıcıların fiziksel özellikleri Tablo 6.6'da verilmiştir.

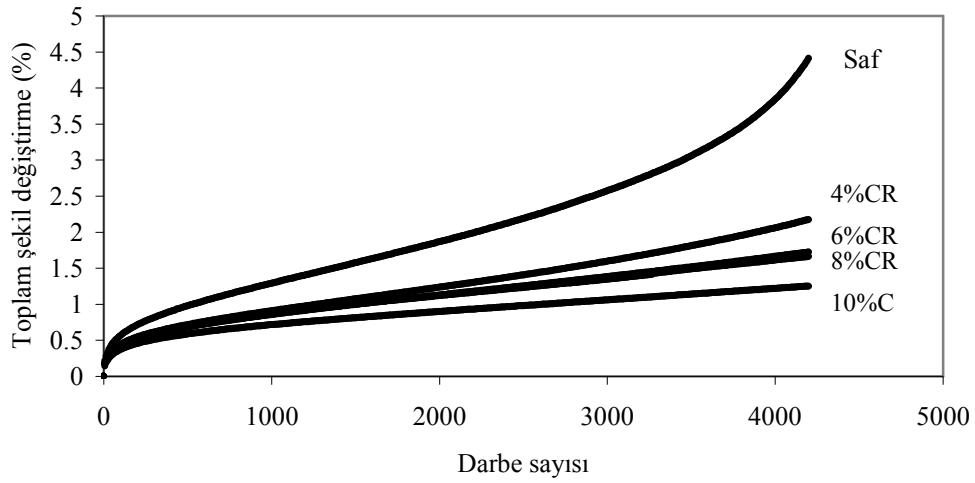
Tablo 6.6. Karışım numunelerinin fiziksel özellikleri

Karışım tipi	Karıştırma sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma sıcaklığı (°C)	Vh (%)	Vma (%)	Vf (%)	Stabilite (kN)	Akma (mm)
Saf	145	130	4,07	14,90	72,64	17,1	2,89
4%CR	168	154	4,17	15,33	72,76	17,3	2,73
6%CR	178	165	4,16	15,30	72,78	18,4	2,68
8%CR	191	178	4,14	15,27	72,85	19,0	2,71
10%CR	202	189	4,12	15,23	72,94	19,2	2,64
2%SBS	165	151	4,08	15,00	72,75	17,6	2,92
3%SBS	174	162	4,09	15,01	72,74	18,2	2,68
4%SBS	185	173	4,13	15,06	72,52	19,3	2,87
5%SBS	191	179	4,10	15,05	72,72	21,3	3,04

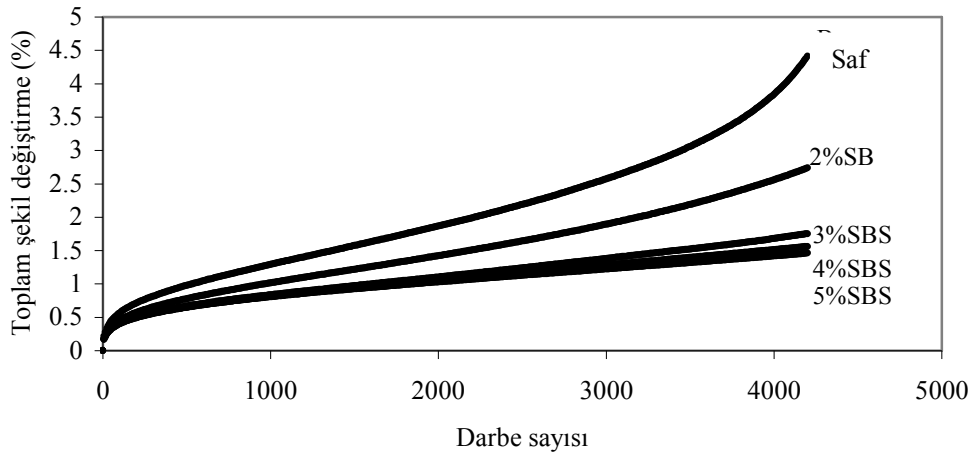
Tablo 6.6’de karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarına uygun olarak hazırlanan numunelerin hacimsel özellikler açısından çok önemli farklılıklar göstermediği ve deneylerde bu numuneler arasında yapılacak karşılaştırmaların uygun olacağı ve numuneler arasında deney sonuçlarındaki farklılıkların, kullanılan katkıların etkisini ortaya çıkaracağı öngörülmektedir.

6.2.3. Dinamik Sünme Deney Sonuçları

Dinamik sünme deneyi genel olarak 40 °C de 1 saat ve 100 kPa gerilme altında yapılmaktadır. Ancak bu şartlar altında bitümlü sıcak karışım numunelerinin kalıcı deformasyon potansiyelinin incelenmesinin tam olarak mümkün olmadığı belirtilmiştir [68]. Bu çalışmada da ilk etapta kontrol numunesi üzerinde 40 °C de 100 kPa gerilme seviyesinden başlayarak dinamik sünme deneyi uygulanmış, ancak 500 kPa gerilme seviyesinde dahi numunelerin deformasyon eğrilerinin üçüncü bölüme tam olarak geçtiklerinin tespit edilemediği başka bir ifade ile deformasyon- yük tekrarı eğrisinin eğiminin minimum değere yani akma sayısının tespit edildiği değere net bir şekilde ulaşmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeple deney sıcaklığı 50 °C’ye çıkarılmıştır. Yükleme periyodu 1000 ms ve yük etki süresi ise 500 ms olarak seçilmiştir. Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 de sırasıyla CR modifiyeli ve SBS modifiyeli numunelerin şekil değiştirme ve yük tekrarı arasındaki ilişkiler verilmiştir.



Şekil 6.15. CRM karışımlarının toplam şekil değiştirme- darbe sayısı ilişkisi



Şekil 6.16. SBS karışımlarının toplam şekil değiştirme- darbe sayısı ilişkisi

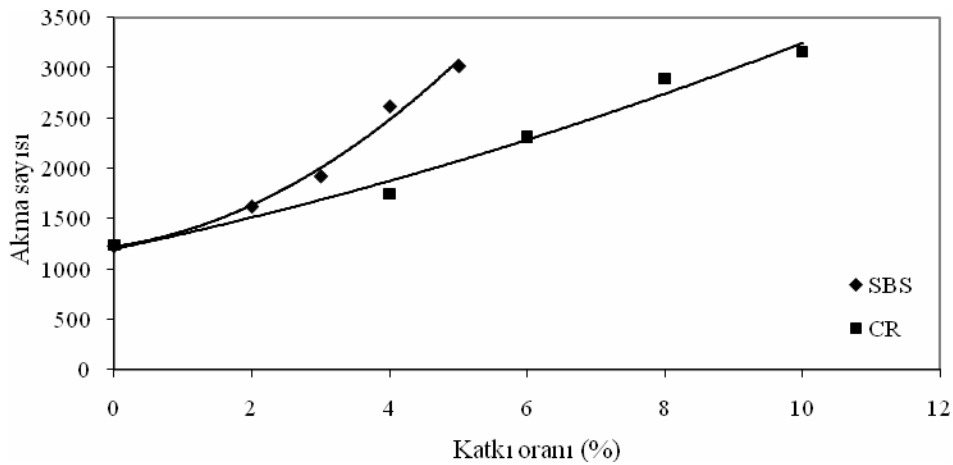
Deneylerde yük tekrarı sayısı 4200 olarak seçilmiştir. Bu tekrar sayısından önce bütün numunelerin üçüncü bölgeye geçtikleri görülmüştür. Numunelerdeki toplam şekil değiştirmelerde, katkı oranlarının artması ile kalıcı deformasyonlara karşı bir dirence ve daha uzun servis ömrüne işaret eden bir azalışın olduğu görülmektedir. Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 karşılaştırıldığında %2-3-4-5 SBS modifiyeli karışımların sırasıyla %4-6-8-10 CR modifiyeli karışımlarla şekil değiştirme yönünden benzer performans sergilediği görülmektedir. Numunelerin 4200. darbedeki toplam şekil değiştirme değerleri Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.7. Numunelerin toplam şekil değıştirme yüzdeleri

	Saf	SBS oranı (%)				CR oranı (%)			
		2	3	4	5	4	6	8	10
Toplam şekil Değıştirme (%)	4,409	2,737	1,751	1,560	1,461	2,173	1,721	1,660	1,252

Şekil değıştirme yüzdesi değeri açısından %3 SBS modifikasyonu ile %6 CR modifikasyonu arasında büyük bir benzerlik olduğu görölmektedir.

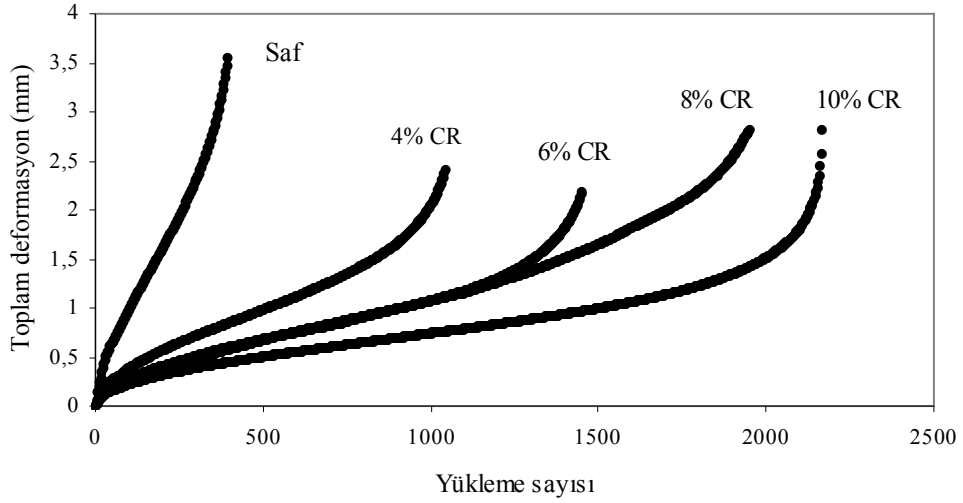
Bir başka karşılaştırma numunelerin akma sayıları arasında yapılmış ve Şekil 6.17’de verilmiştir. SBS modifiyeli karışımların akma sayılarına ilişkin eğrisinin eğiminin CR modifiyeli karışımlarınkinden daha fazla olduğu görölmektedir. Akma sayısı tekerlek izi potansyeline işaret ettiğinden aynı katkı oranında SBS modifiyeli karışımların CR modifiyeli karışımlara göre yüksek tekerlek yüklerine deforme olmadan daha uzun süre direnç göstereceğı açıktır. Ancak SBS oranına göre daha yüksek CR oranlarında, CR modifiyeli karışımlarında SBS kadar iyi performans gösterebileceğı görölmektedir. Şekilden görüldüğü üzere SBS modifikasyonu ile aynı performansı sağlayacak CR gereksinimi SBS içeriğinin artması ile artmaktadır. Uygulanan deney şartlarında %5 SBS modifikasyonu ile aynı performansı %10 CR modifikasyonu ile elde edildiğı ve bu karışımların da kontrol numunesine göre 2,5 kat daha fazla akma sayısı değeriine sahip olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar CR gereksiniminin SBS oranından iki kat fazla olsa da bu katkıların ekonomik maliyetleri göz önüne alındığında CR modifikasyonunun ciddi ekonomik faydalar sağlayacağı anlaşılmaktadır.



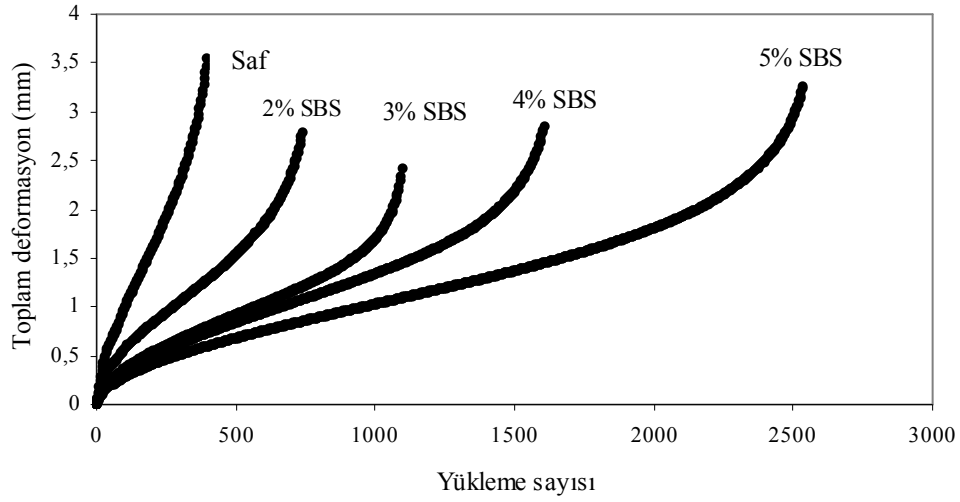
Şekil 6.17. Karışımların katkı oranı- akma sayısı ilişkisi

6.2.4. İndirek Çekme Tekrarlı Yorulma Test Sonuçları

Bu deneyde numunelerin çap doğrultusu yük eksenine paralel olacak şekilde yerleştirilmekte ve yine aynı doğrultuda düşey deformasyonu ölçecek iki adet LVDT yerleştirilmektedir. Deney gerilme kontrollü olarak 25 °C’de yapılmıştır. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce 6 saat test sıcaklığında bekletilmiştir. Gerilme seviyesi 270 kPa yük etki süresi 0,1 saniye ve yükleme periyodu 1,5 saniye olarak seçilmiştir. Bilgisayar kontrollü olarak çalışan cihazda yük tekrar sayısına bağlı olarak meydana gelen düşey deformasyonlar tespit edilmiştir. Deney, numuneler kırılıncaya kadar devam ettirilmiştir. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da atık lastik kauçuğu ve SBS modifiyeli numunelerin yük tekrar sayısı ve toplam deformasyon ilişkisine ait örnekler verilmiştir.



Şekil 6.18. CRM karışımların yük tekrarı – deformasyon ilişkisi



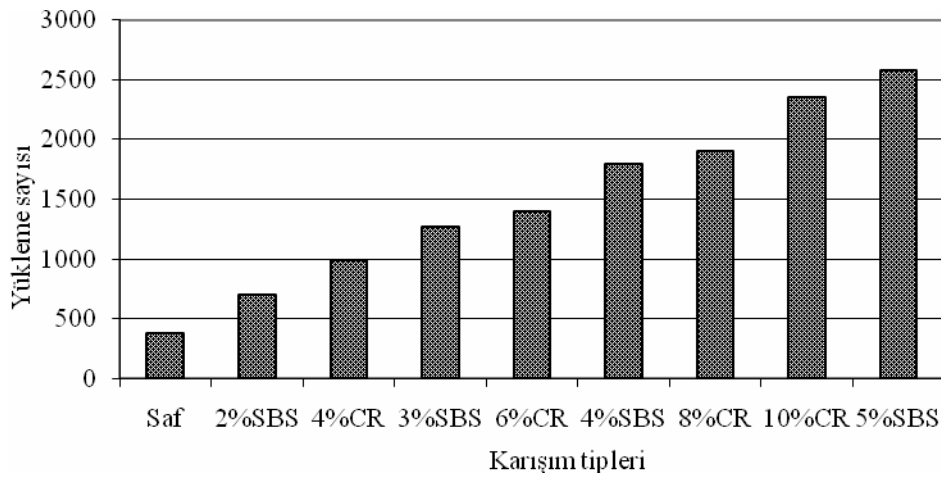
Şekil 6.19. SBS karışımların yük tekrarı – deformasyon ilişkisi

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da görüldüğü eğriler üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde numunelerdeki hava boşluğu nedeniyle yük etkisiyle bir sıkışma meydana gelmekte ve deformasyon hızlı bir şekilde artmaktadır. İkinci bölümde deformasyon artış hızı lineer olarak devam etmekte ve üçüncü bölümde ise çatlak oluşumu ile birlikte deformasyon hızı tekrar artmaktadır. %10 CR modifiyeli karışım hariç genel olarak CR ve SBS modifiyeli karışımların çatlak ilerleme davranışının benzer olduğu söylenebilir. Modifiyeli karışımlar içinde %10 CR modifiyeli karışımın çatlak ilerleme hızının yüksek olmasına bu karışım içinde çözülmeyen bir durumda bulunan atık lastik kauçuğu parçacıklarının neden olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan %6 ve %8 CR modifiyeli karışımların çatlak başlangıcına kadar benzer davranış sergilediği ancak %8 CR numunesinin çatlak ilerleme hızının daha düşük olduğu dolayısıyla %6 CR numunesine göre daha esnek davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla yorulma deneyi sonuçlarına göre etkili atık lastik kauçuğu oranının ağırlıkça %8 olduğu belirlenmiştir. Kırılmaya neden olan yük tekrar sayıları Şekil 6.20’de verilmiştir. Burada değerler küçükten büyüğe doğru sıralandığından grafiğin yatay ekseninden numunelerin performansları karşılaştırılabilmektedir. Buradaki değerler üç deney sonucunun ortalamasıdır. Şekil 6.20’de görüldüğü üzere;

%4 CR numunesi %2 SBS numunesinden,

%6 CR numunesi %2 ve %3 SBS numunesinden,

%8 CR ve % 10 CR numunesi ise %2,%3 ve %4 SBS numunesinden daha iyi sonuç vermektedir. Ancak hiçbir CR modifikasyonu %5 SBS modifikasyonunun performansını yakalayamamıştır. Daha önce belirtildiği üzere etkili oran olduğu düşünülen %8 CR modifikasyonu katkısız karışım numunesine göre 5 kat daha fazla yük tekrar sayısı vermiştir.

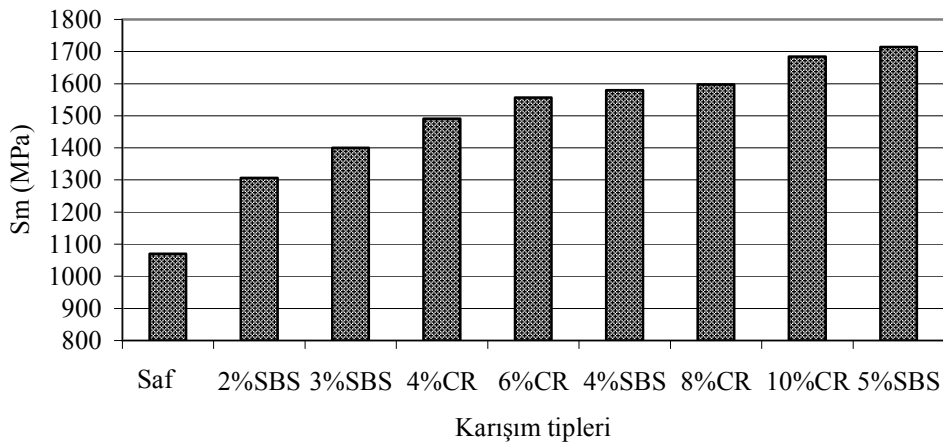


Şekil 6.20. Karışım tipleri ve kırılmaya neden olan yükleme sayısı ilişkisi

6.2.5. İndirek Çekme Rijitlik Modülü Deney Sonuçları

Deney, 25°C sıcaklıkta deformasyon kontrollü olarak yapılmıştır. Maksimum deformasyon 6 µm, yükleme periyodu 3 sn, yük etki süresi 0,124 sn olarak alınmıştır. Deneye başlamadan önce numuneler 6 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler yükleme başlıkları arasına yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçecek sensörler (LVDT) ayarlanmış, numune yüksekliği, çapı ve poisson oranı (0,35) bilgisayara girilmiş, kabin içinde, referans numunesinin içinde ve yanında bulunan sıcaklık ölçen sensörlerin aynı değeri göstermesinden sonra deneye başlanmıştır. Yükleme başlığı pnömatik olarak çalışan cihaz, ilk önce numunede 6 µm deformasyon oluşturacak yük değerini ayarlamak için 5 adet deneme yüklemesi yapmaktadır. Deneme yüklemesinden sonra gerekli olan yükü ayarlayan cihaz, gerçek yüklemeleri yapmakta ve her darbede 6 µm deformasyon

oluşması için gerekli yük değerini kaydetmektedir. Sonuçta 5 yüklemenin ortalama değerini ve standart sapmaları vermektedir. Deneylerde standart sapması %10'dan fazla olan numuneler iptal edilmiştir. Deneyde her bir karışım tipi için üçer numune test edilmiş ve herbir numunenin üç ayrı yerinden yükleme yapılmıştır. Şekil 6.21'de numunelerin rijitlik modülü değerleri verilmiştir. Burada da değerler küçükten büyüğe doğru sıralanmış ve sonuçta numunelerin bu sıralamaya göre aldığı yerlerin yorulma deneyindekinden çok farklı olmadığı tespit edilmiştir. %8 CR numunesi %4 SBS numunesiyle benzer performans sergilemiş ve bu karışımlar katkısız karışıma göre %50 daha fazla rijitlik modülü değeri vermişlerdir. Bu deney metodunda katkıların etkisi diğer metotlardaki kadar yüksek olmamaktadır. %8 CR modifiyeli karışımın rijitlik modülü saf karışıma göre 1,5 kat artarken dinamik sünme rijitliği değeri 2,3 kat yorulma deneyindeki yük tekrar sayısı ise 5 kat arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.21. Karışım tipleri-rijitlik modülü ilişkisi

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

Dinamik kesme reometresi deney sonuçlarına göre; %5 SBS modifiyeli bağlayıcının kompleks modülü saf bağlayıcının değerlerinden 0,01 Hz frekansta 15 kat, 1 Hz frekansta ise 6 kat daha fazla olduğu, %12 atık lastik kauçuğu modifikasyonunda ise bu değerlerin 24 kat ve 6 kat olduğu tespit edilmiştir. Farklı katkı maddelerinin iyileştirme etkisi yüksek sıcaklıkta birbirine yaklaşmıştır. Aynı yüksek kompleks modülü seviyesinde atık lastik kauçuğu modifikasyonunun SBS modifikasyonundan daha düşük faz açısı değerlerine dalayısıyla daha yüksek elastik kabiliyete sahip olduğu belirlenmiştir.

Dönel viskozimetre deney sonuçlarından; SBS modifikasyonunun %6,7 ve atık lastik kauçuğu modifikasyonunun %10,5 oranında olması durumunda bu bağlayıcıların viskozite değerlerinin 3000 cP değerine ulaştığı tespit edilmiştir

Geleneksel bağlayıcı deney sonuçlarına göre; katkı oranlarının artması ile penetrasyon değerleri azaldığı yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı, bu davranışın SBS modifiyeli bağlayıcılarda daha belirgin olduğu, penetrasyon indisi değerlerine göre SBS modifikasyonunun ısıya karşı daha az duyarlı olduğu tespit edilmiştir.

Dinamik sünme deneyinde akma sayısı değerlerine göre aynı katkı oranında SBS modifiyeli karışımların atık lastik kauçuğu modifiyeli karışımlara göre yüksek tekerlek yüklerine deforme olmadan daha uzun süre direnç göstereceği, ancak SBS oranına göre daha yüksek atık lastik kauçuğu oranlarındaki karışımların da SBS kadar iyi performans gösterebileceği tespit edilmiştir

İndirek çekme tekrarlı yorulma deney sonuçlarına göre; %10 atık lastik kauçuğu modifiyeli karışımın çatlak ilerleme hızının yüksek olduğu, diğer taraftan %6 ve %8 CR modifiyeli karışımların çatlak başlangıcına kadar benzer davranış sergilediği ancak %8 CR numunesinin çatlak ilerleme hızının daha düşük olduğu ve hiçbir atık lastik kauçuğu modifikasyonunun %5 SBS modifikasyonunun performansını yakalayamadığı tespit edilmiştir.

İndirek çekme rijitlik modülü deneyinde katkıların etkisinin diğer metotlardaki kadar yüksek olmadığı görülmüştür. %8 atık lastik kauçuğu numunesinin %4 SBS numunesiyle benzer performans sergilediği ve bu karışımların katkısız karışıma göre %50 daha fazla rijitlik modülü değeri verdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada atık lastik kauçuğunun bitüm ve bitümlü sıcak karışımlar üzerindeki etkisi incelenmiş bağlayıcı ve karışımların iyileştirilmiş özellikleri açısından yaygın olarak kullanılan SBS modifikasyonuna alternatif olacağı tespit edilmiştir. Atık ve çevre konusunda sorun olan bir malzemenin bu yönde değerlendirilmesinin çok önemli ekonomik kazanç sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca atık lastik kauçuğu ile modifiye edilecek bitüm ve bitümlü sıcak karışımların düşük sıcaklık performanslarının ve geniş ölçekte boyut etkisinin incelenmesi, bu katkı malzemesinin tam olarak değerlendirilmesine katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Brown, S.F., Rowlett, R.D. and Boucher, J.L.** 1990. Asphalt Modification. Proc Conf US SHRP Highway Res Program: Sharing Benefits, ICE pp. 181-203.
- [2] **Akmal, N., and Usmani, AM.** 1999. Application of Asphalt-Containing Materials. Polym News;24:136-40.
- [3] **Adedeji, A., Grunfelder, T., Bates, FS., Macosko, CW., and Stroup-Gardiner, M.** 1996. Newcomb DE. Asphalt Modified by SBS Triblock Copolymer: Structures and Properties. Polym Eng Sci;36:1707-23.
- [4] **Lu, X., and Isacson, U.** 2001. Modification of Road Bitumens With Thermoplastic Polymers. Polym Test;20:77-86.
- [5] **Çetin, A., Tuncan, A., ve Tuncan, M.** 1998. Lastik Atıkların Asfalt Betonu Kaplamaların Mekanik Özelliklerine Etkisi, II. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, 139-155, Ankara.
- [6] **Gönüllü, M.T.** 2004. Atık Lastiklerin Yönetimi, Katı Atık Geri Dönüşüm Teknolojileri Semineri, 9 Haziran, İSO, İstanbul.
- [7] **TMMOB,** Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Lastik Sanayi ve Petlas, Sektörel Rapor Dizisi, Ankara, 6 Aralık 1994.
- [8] **Yeşilata, B., Bulut, H., Turgut, P., ve Demir, F.** 2007. Atık Taşıt Lastiklerinin Geri Kazanımı ve Yalıtım Amaçlı Kullanımı, MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi.
- [9] **Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu (KSÖİK).** 2006. Araç Lastiği Çalışma Grubu Raporu, Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Ankara.
- [10] **Özden, B., ve Türer, A.** 2005. Ucuz Araba Lastiği Yastığı (ALY) Kullanarak Sismik İzolasyon, YDGA2005: Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştay Bildirileri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kültür Kongre Merkezi, Ankara, sy: 1-8.
- [11] **Bek, A.** 2007. 2004 Yılında İstanbul-Ankara Devlet Yolunda Meydana Gelen Ölümlü, Yaralanmalı Trafik Kazalarının Hava Durumu, Yol Satış Durumu ve Yoldaki Yön Durumuna Bağlı Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [12] **Çelik, F.** 2001. Ulaştırma-Toplumsal Kalkınma İlişkisi ve Türkiye'nin Ulaştırma Politikaları, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Ankara Şubesi III Ulaşım ve Trafik Kongresi-Sergisi, Ankara.
- [13] **Camkesen (Öcal), N.** 1998. Trafik Kaza Analizleri ve Kaza Tahmin Modelleri, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Somunkıran, E.T.** 2005. Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [15] **Kuloğlu, N.** 2010. Esnek Yol Kaplamaları Ders Notları.
- [16] **Kök, V.B., ve Yılmaz, M.** 2008. Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpave Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Dergisi Cilt 23, No:4, 811-819.
- [17] **Ağar, E., Süttaş, İ., ve Öztaş, G.** 1998. Beton Yollar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

- [18] **Yıldırım, B., ve Şiş, A.** 2001. Şartname Sınırlarındaki Agrega Granülometrisinin Asfalt Betonunun Fiziksel Özelliklerine ve Optimum Bitüm Oranına Etkisi, Fırat üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13, 2, 95-100.
- [19] **Erel, A.** 1978. Düşey Dinamik Dingil Yükleri Altındaki Demiryolu Yapısında Taban Zeminlerinin Taşıma Güçlerine Bağlı Olarak Minimum Balast Kalınlığının Hesaplanması, *Doktora tezi*, İstanbul.
- [20] **Umar, F., ve Yayla, N.** 1994. Yol İnşaatı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [21] **Kuloğlu, N.** 2001. “Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Rijitliğine Etki Eden Parametreler”, Turk J. Engin Environ Sci, 25, TÜBİTAK.
- [22] Demiryolu Çağı, <http://www.med.ege.tr/hanci/trafik2.html>, 2005.
- [23] **Zavar, S.** 2006. Türkiye’de Karayolu Stratejileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [24] **Gürer, C.** 2005. Atık Mermer Parçalarının Yol Kaplamasında Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [25] **Tunç, A.** 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Evi, ISBN:975-6574-003, İstanbul Temmuz 2001.
- [26] **Kök, V.B.** 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [27] **Macit, S.** 2009. Beton Yol İnşaatında Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanılması Üzerine Bir Araştırma *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [28] **Karpuz, O.** 2008. Beton Yol Karışımındaki İnce Agreganın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [29] **Keçeciler, A.F., Gümrükçüoğlu, A., Akkol, G., ve Gökçe, A.F.** 1988. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [30] **Macit, S.** 2003. Reverber Fırın Cürufunun Sıcak Karışım Asfalt Betonunda Kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [31] **Oruç, Ş.** 1997. Torul Kalker Taşocağı Agregalarının Asfalt Betonu İçerisindeki Performansının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [32] **Ağar, E., ve Umar, F.** 1985. Yol Üstyapısı, 3. Baskı İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [33] **Yollar Fenni Şartnamesi.** 1994. Yayın No.170/2 Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara.
- [34] **Guirguis, H.R., Daoud, O.E.K., and Hamdani, S.K.** 1982. Asphalt Concrete Mixtures Made With Cement-Coated Aggregates, Transportation Research Record, 843, 1190, 80-85.
- [35] **Griffith, J.M., and Kallas, B.F.** 1958. Influence of Fine Aggregate on Asphaltic Concrete Paving Mixtures, Proc., HRB, 219-255.
- [36] **Ishai, I., and Kallas, B.F.** 1973. Effect of The Filler on Aggregate-Bitumen Adhesion Properties in Bituminous Mixtures, Proc., AAPT, 42.
- [37] **Bituminous Materials In Road Construction.** 1969. U.K. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England.

- [38] **Yoder, E.J., and Witczak, M.W.** 1975. Principles of Pavement Design, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, Tronto.
- [39] **Atmaca, F.** 2002. Sönmemiş Kirecin (CaO) Asfalt Emülsiyonlu Yoğun Karışım Asfalt Betonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [40] **Karpuz, O.** 2000. Asfalt Emülsiyonu İle Hazırlanan Soğuk Karışımların Stabilitelerinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [41] Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Geri Dönüşümü, [www.Turkorecycling.com / omrunu-tamamlamis-lastiklerin-geri-donusumu](http://www.Turkorecycling.com/omrunu-tamamlamis-lastiklerin-geri-donusumu) karbonkredisi - turko - karbon –siyahi - proje.asp, 20 Mayıs 2010.
- [42] Atık Yönetimi, www.cevreonline.com/atik2/atikyonnedir, 21 Mayıs 2010.
- [43] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Atık Yönetimi Eylem Planı (2008-2012) <http://www.atikyonetimi.cevreorman.gov.tr/>, 27 Eylül 2010.
- [44] **Gönüllü, M.T.** 2004. Atık Lastiklerin Yönetimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği, İstanbul, Mayıs.
- [45] **TMMOB.** 1994. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Lastik Sanayi ve Petlas, Sektörel Rapor Dizisi, Ankara 6 Aralık 1994.
- [46] Bursa Çevre Merkezi (BCM), Lastiklerin Geri Kazanımı, Tarihinde <http://www.bcm.org.tr/pdf/lastiklerin%20geri%20kazanimi.pdf>, 03 Ağustos 2007.
- [47] **Kimya Sanayi Özel İhtisas Komisyonu (KSÖİK).** 2006. Araç Lastiği Çalışma Grubu Raporu, Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007-2013), Ankara.
- [48] **Özden, B., ve Türer, A.** 2005. Ucuz Araba Lastiği Yastığı (ALY) Kullanarak Sismik İzolasyon, YDGA2005: Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı Bildirileri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kültür Kongre Merkezi, Ankara, sy: 1-8.
- [49] **Emiroğlu, M.** Lastik Kauçuk Katkılı Beton, Yüksek Lisans Semineri, Fırat Üniversitesi Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, <http://duzce.edu.tr/~mehmetemiroglu/Belgeler/Tire%20Rubber.pdf>, 22 Ekim 2010.
- [50] **Yeşilata, B., Bulut, H., Turgut, P., ve Demir, F.** 2007. Atık Taşıt Lastiklerinin Depolanmasına Yönelik Çevresel Sorunların İrdelenmesi, MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi Temmuz 2007.
- [51] **Gültekin, S.** Atıklar, <http://www.ekolojimagazin.com>, 14. Sayı Nisan - Haziran 2007, 04.Ekim 2010.
- [52] <http://www.michelin.com.tr/>, 29 Eylül 2010.
- [53] **Sugözü, İ., ve Mutlu, İ.** 2009. Atık Taşıt Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 1, No: 1, 35-46.
- [54] **Eren, A.** Dönüştürülen Lastikler, http://turcek.org.tr/files/File/Donusturulen%20Lastikler_Kasim2005, 07 Ekim 2010.
- [55] **Deniz, T.M., Sönmez, İ., Yıldırım, S.A., Eren, B.K.,** Kullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi, www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/3208.pdf, 11.Ekim 2010.
- [56] **Hamzah, M.O., Mohamed A.A., and Ismail, H.** 2006. Laboratory Investigation of The Properties of a Newly Developed Crumb Rubber Modified (CRI1) Asphalt Mixtures Emirates Journal for Engineering Research, 11(2), 67-72.

- [57] **Navarro, F.J., Partal, P., Martí'nez-Boza, F., and Gallegos, C.** 2004. Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens Fuel 83, 2041–2049.
- [58] **Cooper, B.S.** 2008. Jr., Characterization of HMA Mixtures Containing High Recycled Asphalt Pavement Content With Crumb Rubber Additives, B.S.C.E. Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana 1980, December 2008.
- [59] **Wayne, J., and Magdy, A.** 2006. Crumb Rubber in Performance-Graded Asphalt Binder., University of Nebraska – Lincoln, North Dakota State University, November 2006.
- [60] **Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M., and Sasani, A.R.** 2009. The Effect of Waste Tire Thread Mesh on the Dynamic Behaviour of Asphalt Mixtures. Construction and Building Materials, 24; 6, 1060-1068.
- [61] **Silvrano, A.D.N., Márcio M.D.F., Luiz G.R.M., Paulo P., and Pais, C.J.** 2005. The Use Of Crumb Rubber In Asphalt Mixtures Using The Dry Process, International Symposium on Pavement Recycling, March 14-16.
- [62] **Pereira, A.A. P., Pais, C.J., and Triches, G.** 2006. Performance of Wet Process Method Alternatives: Terminal or Continuous Blend, Asphalt Rubber, 545-562.
- [63] **Weidong, C.** 2007. Study on Properties of Recycled Tire Rubber Modified Asphalt Mixtures Using Dry Process. Construction and Building Materials 21, 1011–1015.
- [64] **Silvrano A.D.N., Márcio M.F., Pais, C.J., and Paulo A.A.P.** 2006. Influence of Crumb Rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties. Asphalt Rubber, 679-692.
- [65] **Kaloush, KE., and Witczak, MW.** 2002. Tertiary Flow Characteristics of Asphalt Mixtures. Journal of Associated Asphalt Paving Technolist, 71:278–306.
- [66] **Harvey, J.T., Deacon, J.A., Tsai, B., and Monismith, C.L.** 1995. Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California, California Department of Transportation, Report no: RTA-65W485-2.
- [67] **Hınıshoğlu, S.** 1998. An investigation on the Marshall and Resilient Characteristics of Asphalt Concrete With Bituminous Binder Modified With High Density Polyethylene, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [68] **Khodaii, A., Mehrara, A.** 2009. Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test. Construction and Building Materials 23, 2586–2592.
- [69] **Zaniewski, J. P., Pumphrey, M. E.** 2004. Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, p. 107.

ÖZGEÇMİŞ

Hakan ÇOLAK, 1974 yılında Elazığ’da doğdu. 1991 yılında Elazığ Mehmet Akif Ersoy Lisesinden mezun oldu. 1992-1994 yılları arasında Ege üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümünde lisans eğitimi alırken bu eğitim yarıda bırakarak, 1994-1998 yılları arasında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi aldı ve bu bölümünden 69,58/100 not ortalaması ile mezun oldu. 1998 yılında İller Bankası 17.Bölge (TRABZON) Müdürlüğünde İnşaat Mühendisi olarak göreve başladı. Halen İnşaat Mühendisi olarak İller Bankası 17. Bölge Müdürlüğünde Etüt Proje, İçmesuyu, Kanalizasyon ve Derin Deniz Deşarjı İnşaatlarında Kontrol Mühendisliği görevini sürdürmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.