YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASFALT BETONU KARIŞIMLARINDA POLİMER KATKI MALZEMESİ (CARIFLEX TR-1101) ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İnşaat Müh. Konuralp SAVAŞER

93743

F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa ILICALI

M. Ilicali
E. AGAR
Leman Bayraktar

İSTANBUL, 2000

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ		iv
ÇİZELGE LİSTESİ		vi
ÖNSÖZ		viii
ÖZET		ix
ABSTRACT		x
1.	KARAYOLU ÜSTYAPISI VE ÜSTYAPIYA GELEN ETKİLER	1
1.1	Karayolu Üstyapısı	1
1.1.1	Kaplama	1
1.1.2	Temel	5
1.1.3	Alttemel	8
1.2	Karayolu Üstyapısına Gelen Etkiler	10
1.2.1	Trafik etkileri	10
1.2.2	İklim etkileri	12
1.3	Üstyapının Zorlanması	12
1.4	Bitümlü Karışımlarda Yorulma	13
1.4.1	Yorulma deney yöntemleri	15
2.	BİTÜMLÜ KARIŞIMLARDA KULLANILAN MALZEMELER	19
2.1	Bağlayıcılar (Bitüm)	19
2.1.1	Asfalt	19
2.1.2	Katran	24
2.2	Agregalar	24
2.2.1	Doğal agregalar	25
2.2.2	Yapay agregalar	29
2.2.3	Bitümlü kaplamalar yönünden agrega	29
3.	BİTÜMLÜ BAĞLAYICI VE KARIŞIMLARDA KULLANILAN KATKI MADDELERİ	31
3.1	Sitrenik Blok Kopolimer Esaslı Katkı Maddeleri -Cariflex TR-1101	34
3.2	Cariflex TR-1101' in İşlev Görme Şekli	36
3.3	Cariflex TR-1101 Katkılı Bağlayıcıların Laboratuar ve Arazi Performansları	37

4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER 45
4.1 Bitümlü Karışımların Performanslarının Değerlendirilmesi 45
4.2 Çalışmada Uygulanan Deneyler 46
4.2.1 Dolaylı çekme mukavemeti deneyi 46
4.2.2 Dolaylı çekme deneyi 50
4.2.3 Statik sünme deneyi 53
4.2.4 Tekrarlı sünme deneyi 58
5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER ve DENEY SONUÇLARI 60
5.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler 60
5.2 Çalışmada Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar 61
5.2.1 Dolaylı çekme mukavemeti deneyinden elde edilen sonuçlar 62
5.2.2 Dolaylı çekme deneyinden elde edilen sonuçlar 63
5.2.3 Statik sünme deneyinden elde edilen sonuçlar 66
5.2.4 Tekrarlı (dinamik)sünme deneyinden elde edilen sonuçlar 70
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 72
6.1 Dolaylı çekme mukavemeti deneyine ait değerlendirme 72
6.2 Dolaylı çekme deneyine ait değerlendirme 73
6.3 Statik sünme deneyine ait değerlendirme 80
6.4 Tekrarlı (dinamik) sünme deneyine ait değerlendirme 82
7. SONUÇ ve ÖNERİLER 84
KAYNAKLAR 87
EKLER 89
ÖZGEÇMİŞ 93

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 1.1	Karayolu üstyapısı enkesiti	2
Şekil 1.2	Esnek üstyapılarda yük ekseninde oluşan gerilmeler	10
Şekil 1.3	Üstyapıda oluşan deformasyonlar	13
Şekil 1.4	Gerilme durumları	14
Şekil 2.1	Karayolu malzemesi olarak bitüm çeşitleri	20
Şekil 3.1	Üç boyutlu SBS yapısı	37
Şekil 3.2	Düktilite geri kazanımı	41
Şekil 3.3	Fraass kırılma ısısı – Cariflex TR-1101 miktarı ilişkisi	42
Şekil 3.4	Yumuşama noktası – Cariflex TR-1101 miktarı ilişkisi	42
Şekil 3.5	Tekerlek tur sayısı - Cariflex TR-1101 miktarı ilişkisi	43
Şekil 3.6	Elastik geri kazanım miktarları	43
Şekil 3.7	Akustik deney sonuçları	44
Şekil 4.1	Numuneye yükün uygulanma şekli	50
Şekil 4.2	Uygulanan yük ve deformasyon şekilleri	51
Şekil 4.3	Karışımların rijitliklerinin uygunluğu	54
Şekil 4.4	Tek eksenli basınç	55
Şekil 4.5	Sünme modülü nomoğrafi	59
Şekil 4.6	Tekrarlı yük uygulama şekli	59
Şekil 5.1	Agrega gradasyon eğrisi	61
Şekil 5.2	Katkılı ve katkısız karışımların dolaylı çekme mukavemeti	62
Şekil 5.3	Dolaylı çekme deneyi akış diyagramı	64
Şekil 5.4	5°C sıcaklık için katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü - yükleme periyodu ilişkileri	66
Şekil 5.5	25°C sıcaklık için katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü - yükleme periyodu ilişkileri	67
Şekil 5.6	40°C sıcaklık için katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü - yükleme periyodu ilişkileri	67
Şekil 5.7	Sünme (kalıcı) deformasyonu – süre ilişkisi	69
Şekil 5.8	Sünme modülü – süre ilişkisi	69
Şekil 5.9	Tekrarlı yük ve uygulama şekli	70

Şekil 5.10 Yük tekerrürü – sünme deformasyonu ilişkisi..... 71
Şekil 6.1 Katkılı ve katkısız karışımların dolaylı çekme mukavemeti (%)..... 72
Şekil 6.2 2000ms yükleme periyodu ve 60ms yükleme hızı için elastisite modülü – sıcaklık ilişkisi..... 73
Şekil 6.3 Yükleme periyodundaki değişimin, elastisite modülü üzerinde olan etkisinin sıcaklıkla değişimi (%)..... 76
Şekil 6.4 Yükleme hızındaki değişimin, elastisite modülü üzerinde olan etkisinin sıcaklıkla değişimi (%)..... 77
Şekil 6.5 Sıcaklık değişiminin, elastisite modülü üzerinde olan etkisinin yükleme hızı ile değişimi (%)..... 78
Şekil 6.6 Katkılı ve katkısız karışımların rijitliklerinin uygunluğu..... 79
Şekil 6. 7 Sünme (kalıcı) deformasyonu (%) artışları..... 81
Şekil 6. 8 Sünme (kalıcı) deformasyonu % geri dönüş miktarları 81
Şekil 6.9 Sünme modülü değerlerinin uygunluğu..... 82
Şekil 6.10 Kalıcı (sünme) deformasyon oranları (%)..... 83

ÇİZELGE LİSTESİ

		Sayfa
Çizelge 1.1	Aşınma tabakası için granülometri değerleri	3
Çizelge 1.2	Asfalt betonu kaba agrega özellikleri	4
Çizelge 1.3	Asfalt betonu ince agrega özellikleri	4
Çizelge 1.4	Mineral fillerin granülometi limitleri	5
Çizelge 1.5	Asfalt betonu karışımı tasarım kriterleri	5
Çizelge 1.6	Asfalt betonu otoyol tasarım kriterleri	6
Çizelge 1.7	Kaba agreganın fiziksel özellikleri	7
Çizelge 1.8	İnce agreganın fiziksel özellikleri	8
Çizelge 1.9	Alttemel tabakası granülometri limitleri	9
Çizelge 1.10	Alttemel malzemelerinin fiziksel özellikleri	9
Çizelge 1.11	Yorulma deney karakteristikleri	18
Çizelge 2.1	Yol agrega grupları	28
Çizelge 3.1	Katkı maddelerinin genel sınıflandırılması	35
Çizelge 5.1	Agrega gradasyonu	60
Çizelge 5.2	Dolaylı çekme mukavemeti	62
Çizelge 5.3	Yükleme periyodu ve yükleme hızı	63
Çizelge 5.4	1000 ms yükleme periyodu için deformasyon ve elastisite modülü değerleri	65
Çizelge 5.5	2000 ms yükleme periyodu için deformasyon ve elastisite modülü değerleri	65
Çizelge 5.6	3000 ms yükleme periyodu için deformasyon ve elastisite modülü değerleri	65
Çizelge 5.7	Sünme (kalıcı) deformasyonu ve sünme modülü değerleri	68
Çizelge 5.8	İlk ve ikinci saat sonundaki sünme (kalıcı) deformasyon değerleri	68
Çizelge 5.9	Gözlenen kalıcı deformasyon	70
Çizelge 6.1	2000ms yükleme periyodu ve 60ms yükleme hızı için 5°C, 25°C, 40°C sıcaklıklardaki elastisite modülü değerleri	73
Çizelge 6.2	Yükleme periyodunun katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü üzerindeki etkisi (%)	74

Çizelge 6.3 Yükleme hızının katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü üzerindeki etkisi (%) 75
Çizelge 6.4 Sıcaklığın katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü üzerindeki etkisi (%) 75
Çizelge 6.5 Sünme deformasyonu % artımları 80
Çizelge 6.6 Tekrarlı sünme deneyi sonucu (%) deformasyon 82
Çizelge 7.1 Katkılı ve katkısız karışımların genel değerlendirmesi 86

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmam süresince daima desteğini gördüğüm; bilgi, deneyim ve birikimleri ile sürekli yol gösterici olan kıymetli insan Tez Danışmanım Doç. Dr. Mustafa ILICALI' ya,

Bu tezi hazırladığım süre boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve büyük yardımlarını gördüğüm Araştırma Görevlisi Halit ÖZEN' e,

Tezin, deneysel çalışmalarının gerçekleştirebilmesinde tüm imkanlarından faydalandığım İstanbul Büyükşehir Belediyesi – İstanbul Asfalt Fabrikaları A.Ş.' nin Genel Müdür Yardımcısı İnş. Yük. Müh. Süreyya TAYFUR' a ve tüm laboratuar çalışanlarına,

Desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen değerli ailem ve sevgili eşime,

En içten teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Konuralp SAVAŞER

ÖZET

İkibinli yıllara gelmiş olduğumuz günümüzde; sürekli gelişmekte olan teknoloji ve artan gelir düzeyleri ulaşım talebinde büyük bir artışa neden olmaktadır. Ülkemiz şartlarında ulaşım konusunda en büyük yük karayollarına düşmektedir. Karayollarında da gerek teknolojik gelişmelere paralel olarak artan ağır taşıt yükü etkileri gerekse olumsuz çevre şartları, istenen hizmet düzeyinin beklenenden daha önce altında kalınmasına sebep olmaktadır. Özelikle karayolu üstyapısında meydana gelen erken bozulmalar, üstyapının performansının artırılmasına yönelik çalışmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Bu çalışmaların önemli bir kısmını da asfalt karışımlarında katkı malzemelerinin kullanılması oluşturmaktadır.

Bu tezde, üstyapıda kullanılan malzemeler ve karışım performansının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemler ile ilgili detaylı bir literatür çalışması yapılmıştır. Ayrıca, yine bu bölümde ülkemizde kullanılmakta olan polimer katkı malzemelerinden biri Cariflex TR-1101 ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Literatür çalışmasını takiben; 1994 yılında Edirne – Kınalı Otoyolu Lalapaşa Kavşağı kesiminde uygulaması yapılmış olan polimer katkılı sıcak asfalt karışımı tabakasından alınan karot numuneler üzerinde katkılı karışımın uzun dönemli performansı değerlendirilmiştir.

Katkılı karışımın uzun dönemli (5 yıl) performansının değerlendirilmesi amacıyla, yukarıda belirtilen kesimden alınan katkılı ve katkısız karot numuneleri üzerinde dolaylı çekme mukavemeti, dolaylı çekme, statik sünme ve tekrarlı sünme deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen verilere dayanarak karışım performanslarının önemli göstergelerinden olan elastisite ve sünme modülleri tespit edilmiş ve bu değerlerin yükleme periyodu, yükleme hızı ve sıcaklık gibi değişkenlerden nasıl etkilendikleri belirlenmiştir.

ABSTRACT

By the end of the century, the continuous developments in technology and increase in income levels result as an overall growing demand on transportation. Highways are the most remarkable systems from transportation point of view under domestic circumstances. Both the increase in heavy traffic loads caused by technological developments and negative external conditions affect the highways so badly that the expected service lives may not be achieved. Especially the early deformations in asphaltic overlays led the studies to be focused on increasing the performance of asphaltic overlay layers. Usage of modifiers in asphaltic mixtures form an important part of these studies.

The materials which are used in asphaltic mixtures and evaluation methods of mixture performance form the first part of this thesis. In addition you may find detailed information regarding one of the polymer modifiers which is being used in our country Cariflex TR-1101. Following the literature search, a long term performance evaluation was carried out on core specimens provided from Edirne – Kınalı Highway Lalapaşa junction, where polymer modified asphalt mixture was applied.

Indirect tensile, indirect tensile strength, static creep and dynamic creep tests were performed on core specimens in order to evaluate the long term performance (5 years) of the mixture. Elasticity and resilient moduli of the mixtures have been calculated by using the results of the tests, which help us to make a proper evaluation. Moreover the effects of loading period, rise time and temperature on these moduli are also presented in this thesis.

1.KARAYOLU ÜSTYAPISI ve ÜSTYAPIYA GELEN ETKİLER

1.1 Karayolu Üstyapısı

Trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacı ile altyapı üzerine yerleştirilen alt temel, temel, kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısı üstyapı olarak adlandırılır. Şekil 1.1' de tipik bir üstyapı kesiti verilmiştir.

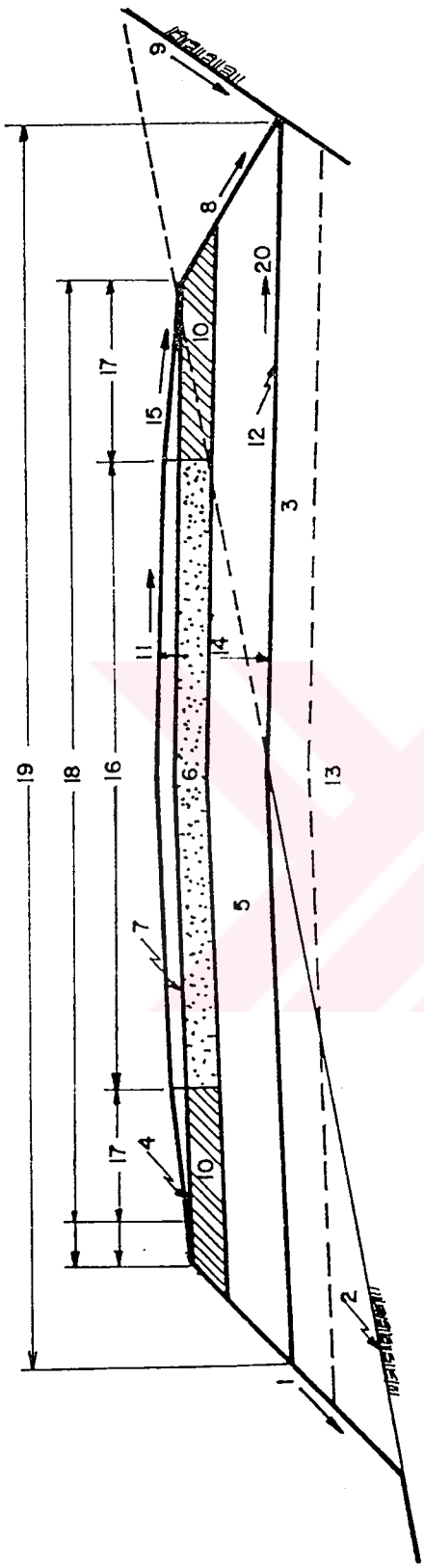
1.1.1 Kaplama

Kaplama tabakası, üstyapının trafik yüklerinden doğrudan doğruya etkilenen en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek düzeyde olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olmalıdır. Kaplama tabakasının; trafiğin aşındırma etkisine karşı koymak, temel tabakasına iletilen basınç ve kayma gerilmelerini azaltmak, yüzey sularının temel tabakasına geçmesini önlemek, düzgün ve emniyetli bir sürüş sağlamak ve yolu kalıcı deformasyonlara karşı korumak gibi işlevleri vardır.

Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemenin türlerine, niteliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olmak üzere iki ana kategoriye ayrılırlar. Bitümlü kaplama tabakalarını kapsayan esnek üstyapı tabakaları da yapım ve çalışma ilkeleri yönünden sathi kaplamalar ve bitümlü karışımlarla oluşturulan esnek üstyapılar olmak üzere iki grupta toplanırlar.

- **Asfalt betonu**

Günlük ticari trafik sayısı 500'den büyük yollarda kullanılan beton asfalt, çok dikkatli şekilde oranları saptanmış olan iri agrega, ince agrega ve filler ile asfalt çimentosunun sabit karıştırma tesislerinde sıcaklık, nem ve bileşim bakımından çok sıkı bir kontrol altında sıkıştırılmasıyla elde edilir. En gelişmiş kaplama tipi olan beton asfalt kaplamalar trafiği ağır yollarda, otoyollarda, havaalanı pistlerinde her tür iklim koşullarında geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır. Yüksek dirençlerine karşın maliyetleri de yüksektir. Asfalt betonu genel anlamı ile aşınma tabakasını, binder tabakasını ya da bunların her ikisini



Şekil 1.1 Karayolu üstyapısı enkesiti

birden kapsar. Trafiğin aşındırma ve iklimin ayrıştırma etkilerine karşı koyan en üst tabakaya aşınma tabakası denilmektedir. Aşınma tabakası ile temel tabakası arasında geçiş olmak üzere bir veya birkaç tabaka yapılır ki buna da binder tabakası denilmektedir. Asfalt betonu aşınma tabakasında kullanılacak olan agregada aranılan granülometri limitleri Çizelge 1.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Aşınma tabakası için granülometri değerleri

Elek Analizi		Tip A	Tip B	Tip C	Tip D	Tip E	Tip F
mm	inç						
19	¾	100	100	100			
12,5	½	89-100	84-100	81-100	100	100	100
9,5	3/8	80-95	75-91	71-87	87-100	84-100	80-100
4,75	No 4	64-81	57-75	52-70	66-82	60-77	55-72
2	No10	48-65	42-59	36-53	47-64	41-58	36-53
0,425	No40	26-40	22-35	17-30	24-36	20-32	16-28
0,18	No80	15-26	12-22	09-19	13-22	11-19	08-10
0,075	No200	04-10	04-10	04-10	04-10	04-10	04-10

Asfalt betonu imalinde kaba agrega; kırılmış, elenmiş taş, çakıl veya elenmiş çakıl veya bunların karışımını 4.76 mm'lik (No. 4) elek üzerinde kalan kısmı olup, temiz, pürüzlü,sağlam ve dayanıklı danelerden oluşmalıdır. Kaba agregada aranan, fiziksel özellikler ve şartname sınırları Çizelge 1.2' de verilmiştir.

4.75 mm'lik (No 4) elekten geçip 0.075 mm'lik elek üzerinde kalan malzeme olarak tanımlanan ince agrega, kırılmış taş, çakıl veya kum ile bunların karışımından oluşur, ince agrega temiz, sağlam ve dayanıklı olmalıdır. Aranan özellikler Çizelge 1.3' de verilmiştir.

Asfalt betonunu oluşturan mineral filler ise, genel anlamı ile tamamı 0.600 mm (No.30) elekten geçip, ağırlıkça en az % 70'i 0.075 mm (No.200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır. Kaba ve ince agrega karışımının granülometrisi 0.600 mm (No30) elekten geçen malzeme miktarı yönünden yetersiz ise agrega karışımına mineral filler eklenir. Taş tozu, mermer tozu, Portland çimentosu, sönmüş kireç ve benzeri maddelerden oluşan mineral filler: kil, toprak, organik ve zararlı madde içermemelidir. Plastisite indeksi de

4'den büyük olmamalıdır. Mineral filler granülometri limitleri Çizelge 1.4' de verilmiştir (AASHTO M17-70).

Çizelge 1.2 Asfalt betonu kaba agrega özellikleri

Deney Adı	Deney Yöntemi			Sınırlamala	
	AASHTO	ASTM	TS	Binder	Aşınma T.
Los Angeles Aşınma(%)	T-96	C-131	3694	<35	<35
Na_2SO_4 Sağlamlık(%)	T-104	C-88	3655	<12	<10
Yassılık İndeksi(%)		BS 812		<35	<35
Soyulma Mukavemeti(%)		Nicholson Yöntemi		>50	>50
Cilalanma Değeri		BS 812			0,5
Su Absorbsiyonu(%)		C-127	3526	<2,5	<2,5

Çizelge 1.3 Asfalt betonu ince agrega özellikleri

Özellikler	Deney Yöntemi	Sınırlamalar	
		Binder Tabakası	Aşınma Tabakası
Plastisite İndeksi Maksimum %	TS 1900	2	2
Organik madde Miktarı maksimum %	TS 3673	0,5	Müsaade Edilmeyecek

Agrega karışımına eklenen mineral fillerinin 0.075 mm (No.200) elek üzerinde kalan kısmı ince agrega olarak kabul edilir.

Asfalt betonu aşınma ve binder tabakalarının yapımı için agregaya ilave edilecek bitümlü bağlayıcı olarak asfalt çimentoları kullanılır. Karışımda kullanılacak asfalt çimentolarına uygulanan deneylerde alınan sonuçlar Çizelge 1.7 de verilen değerlerle karşılaştırılmalıdır.

Asfalt betonu karışımlarının tasarımında Çizelge 1.5' de verilen tasarım kriterleri esas alınır. Otoyollarında uygulanacak asfalt betonu karışımlarının tasarımında ise Çizelge1.6' da verilen kriterler esas alınmalıdır.

Çizelge 1.4 Mineral fillerin granülometi limitleri

Elek Boyutu	% geçen
0,600 mm (No.30)	100
0,300 mm (No.50)	95-100
0,075 mm (No.200)	70-100

Çizelge1.5 Asfalt betonu karışımı tasarım kriterleri

Özellikler	Binder		Aşınma	
	min.	max.	min.	max.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	50	-	50	-
Marshall Stabilitesi(kg)	600	-	750	-
Boşluk(%)	4	6	3	5
Asfaltla dolu Boşluk(%)	65	75	75	85
Akma(mm)	2,5	4,6	2,5	4,6
Asfalt çimentosu(%) (Ağırlıkça)	3,5	6,5	4	7

1.1.2 Temel

Kaplama tabakasının hemen altına yerleştirilen, daneli veya uygun bir bağlayıcı ile işlem görmüş malzemeden oluşan bir tabakadır. Temel tabakasının başlıca görevi kaplama tabakasına destek olarak üstyapının yük taşıma kabiliyetini arttırmaktır. Trafik yüklerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilmeli ve yüksek nem oranında dengede kalabilmeli, ayrıca drenaja yardımcı olmalı ve don etkisine karşı da ek bir koruma sağlayabilmelidir.

Çizelge 1.6 Asfalt betonu otoyol tasarım kriterleri

Özellikler	Binder		Aşınma	
	min.	max.	min.	max.
Briket yapımında uygulanacak darbe sayısı	75	-	75	-
Marshall Stabilitesi(kg)	750	-	900	-
Boşluk(%)	4	6	3	5
Asfaltla dolu boşluk(%)	65	75	75	85
Filler/Bitüm oranı	-	1,4	-	1,5
Akma (mm)	2	4	2	4
Suya daldırılmış numunelerin stabilitesinin orijinal stabiliteye oranı (%)	70	-	70	-

Temel tabakasında kullanılacak agregalar ve tanımları aşağıdaki gibidir:

- Kaba agrega olarak kullanılacak doğal veya üretilmiş malzemeler: (2.00 mm elek üstü)
- Çakıl: Gelişigüzel şekil ve boylarda su etkisi ile yuvarlanmış veya aşınmış halde bulunan doğal agrega.
- Kırılmış Çakıl: Kırılma sonunda elde edilmesi istenen maksimum dane boyutunun en az 1.5 katı daha büyük boyutlu çakılın kırılmasıyla elde edilen agrega.
- Teras Çakılı: Doğal yataklar halinde bulunan kum, silt ile karışık çakıl.(Kalite itibariyle alttemel ve çok düşük trafikli yollarda temel olarak kullanılabilir.)
- Kırma Taş: Kalker, dolomit bazalt, metamorfik, kuvarsit veya benzeri kayaların kırılmasıyla oluşan agrega.
- Kırılmış Cüruf: Birim ağırlığı 1100 kg/cm^3 den az olmayan, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun kırılmasıyla elde edilen agrega.

Temel yapımında kullanılacak kaba agregada aranılan özellikler Çizelge 1.7' de verilmiştir.

Çizelge 1.7 Kaba agreganın fiziksel özellikleri

Deney Adı	Deney Yöntemi			Sınırlamalar
	AASHTO	ASTM	TS	
Na_2SO_4 Sağlamlık(%)	T-104	C-88	3655	Kayıp<15
Los Angeles Aşınma(%)	T-96		3694	Aşınma<40
0,075 mm den Geçen max(%)				1
Kil Toprakları(%)				Bulunmayacak
Kömür veya benzeri (%)				En çok 0,25
Yumuşak ve dayanıksız Malzeme (%)				En çok 2,0
Diğer zararlı malzemeler(%)				En çok 1,0

İnce agrega olarak kullanılacak doğal ve üretilmiş malzemeler ile tanımları aşağıda verilmiştir (2.00 mm elek altı):

- Doğal kum: 2 mm ile 0.075 mm elekler arasında kalan ve taşların doğal yollarla dağılmasından meydana gelen malzeme.
- İnce Çakıl: İnce boyutlu çakıl daneleri.
- Taş Tozu: Taş ocaklarından kırım esnasında elde edilen ince malzeme.
- Cüruf Kumu: Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun elenmesi ve cürufun granülasyonu ile elde edilir.

Temel yapımında kullanılacak ince agregada aranılacak özellikler Çizelge 1.8' de verilmiştir.

Çizelge 1.8 İnce agreganın fiziksel özellikleri

Deney Adı	Deney Yöntemi			Sınırlamalar
	AASHTO	ASTM	TS	
Likit Limit (LL)	T-89	D-423	1900	LL<25
Plastisite İndeksi (PI)	T-90	D-424		PI<6
Zararlı Maddeler				
Organik Madde			3673	Bulunmayacak
Kil Toprakları	T-21			Bulunmayacak
Kömür veya benzeri (%)				1
Diğer zararlı malzemeler(%)				1

Temel tabakası, ya yalnız agrega ile ya da bağlayıcı ile işlem görmüş agrega ile oluşturularak Granüler Temel Tabakası, Plent Miks Temel Tabakası, Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakası, Sıcak Bitümlü Temel Tabakası gibi tiplerde inşa edilebilir.

1.1.3 Alttemel

Alttemel, trafik yüklerinin taban zemini üzerine yayılmasını sağlamak, ince daneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek ve ayrıca su ve don tesirlerine karşı tampon bölge görevi yapmak üzere; belirli bir granülometride hazırlanan agreganın su ile karıştırılarak tesviye yüzeyine serilmesi ile oluşturulan tabakadır.

Alttemel yapımında kullanılacak kum, çakıl, kırmataş ve benzeri malzemede tayin edilecek granülometri (AASHTO T-27 ve T-11 e göre) Çizelge 1.9'da verilen limitlere uygun olmalıdır.

Malzemenin 0.075 mm eleği geçen kısmı 0.425 mm eleği geçen kısmının 2/3 ünden fazla olmamalıdır. Alttemel yapımında kullanılacak olan malzemede aranan fiziksel özellikler ise Çizelge1.10' da verilmiştir

Alttemel malzemesi, tesviyesi tamamlanmış taban üzerine, sıkışmış kalınlığı 20 cm'i geçmeyecek şekilde tabakalar halinde serilip sıkıştırılır. Ancak, sıkıştırma makinelerinin

kapasitelerinin büyük olması halinde tabaka kalınlığı 30 cm'ye kadar arttırılabilir. Alttemel kalınlığının bu değerlerden fazla olması durumunda, birden fazla tabakalar halinde inşa yapa durumu belirir ki, bu durumda tabaka kalınlıkları eşit alınır. Her tabaka üzerine yenisi serilmeden istenen yoğunluğa getirecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Alttemel malzemesinin serilmesi ve tesviye edilmesi esnasında, bulunan optimum su içeriği (AASHTO, T-99 veya T-180 yöntemi ile) ± 2 tolerans limitleri dahilinde uygulanır. Sıkıştırmada, statik çizgisel yükü 30 kg/cm' den büyük olan düz bandajlı vibrasyonlu silindirler ve lastik başına düşen yükü 3500 kg' dan az olmayan lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılır.

Çizelge 1.9 Alttemel tabakası granülometri limitleri

Elek Açıklığı		% Geçen
mm	inç	
75	3	100
37,5	1 ½	85-100
9,5	3/8	45-100
4,75	No 4	22-85
0,425	No 40	07-40
0,075	No 200	00-12

Çizelge 1.10 Alttemel malzemelerinin fiziksel özellikleri

Deney Adı	Deney Yöntemi			Sınırlamalar
	AASHTO	ASTM	TS	
Na2SO4 Sağlamlık(%)	T-104	C-88		Kayıp<%25
Los Angeles Aşınma(%)	T-96		3694	Aşınma<%50
Likit Limit	T-89	D-423	1900	LL<25
Plastisite İndeksi	T-90	D-424	1900	PI<6
CBR	T-193	D-1883	1900	CBR>30

1.2 Karayolu Üstyapısına Gelen Etkiler

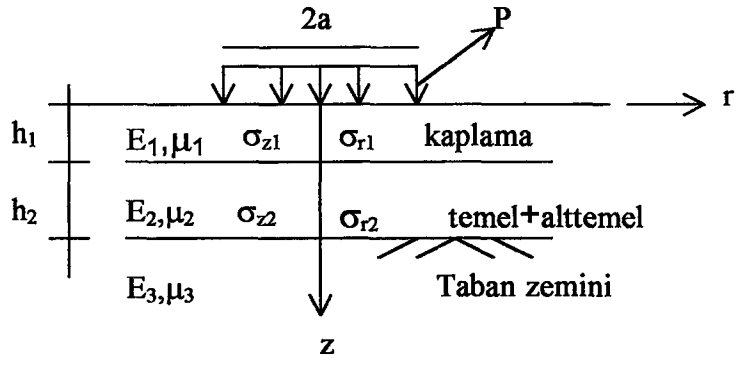
Karayolu üstyapısına gelen etkiler, trafik ve iklim etkileri olarak iki ana başlık altında toplanabilir.

1.2.1 Trafik etkileri

Karayolu üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları, dingil sayılarına göre değişen büyüklüklerde, tekerlek bandajları aracılığı ile kaplama yüzeyine iletilmektedir. Taşıtların hızlanma ve frenleme evrelerinde bandaj ile kaplama arasındaki sürtünmeye bağlı olarak oluşan yatay yükler de üstyapıya etkimektedir. Dingil yükleri, üstyapının kalınlığının tespitinde göz önüne alınan en önemli faktörlerden biridir.

Tekerlek bandajından üstyapıya etki eden yatay ve düşey yükler, üstyapı tabakalarında basınç, çekme, eğilme ve kayma gerilmeleri doğurmaktadır. Gerilmelerin şiddeti, dingil yükü, lastik iç basıncı, taşıtın hızı ve bandajın üzerindeki yiv ve setlerin biçimlerine bağlı olarak değişir. Bir lastik tekerlekli bandaj, kendisine gelen tekil yükün şiddetine bağlı olarak asfalt kaplama üzerinde bir değme alanı oluşturur. Bandaja etkiyen tekil yükün değeri ne olursa olsun, bandaj değme alanının bir daire ve bu daire üzerindeki gerilme dağılışının da üniform olduğu kabul edilir (Ilıcalı, 1988).

Trafik etkisi altında, esnek üstyapılarda yük ekseninde oluşan gerilmeler Şekil 1.2' de verilmiştir (Yoder ve Witczak, 1975).



Şekil 1.2 Esnek üstyapılarda yük ekseninde oluşan gerilmeler

Q =tekerlek yükü

P = $Q/(\pi * a^2)$

2a =tekerleğin iz genişliği

σ_r =yatay gerilme

σ_z =düşey gerilme

Bir üstyapının bozulması ya kaplama tabakası ile temel tabakası arakesitindeki aşırı çekme (σ_{r1}) veya taban zeminindeki aşırı basınç (σ_{z2}) gerilmelerinin etkisiyle meydana gelir. Üstyapı tabakalarının boyutlandırılmasında (σ_z) ve (σ_r) gerilme değerlerinin kritik gerilme değerlerinin altında olmasına dikkat edilmelidir. Şayet (σ_{r1}) çekme gerilmeleri aşırı ise kaplama ile temel tabakaları ara kesitinde çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar yol üst yüzeyine doğru yayılır. (σ_{z2}) gerilmelerinin çok yüksek olması durumunda ise taban zeminindeki farklı oturmalar sonucu kaplama tabakasında büyük çekme gerilmeleri oluşur. Esnek üstyapı tabakalarında oluşan bu gerilmelerin hesabında, ideal koşullara dayanan çok tabakalı lineer elastik teoriden yararlanılır. Bir karayolu üstyapı tabakası hiçbir zaman teorinin kabul ettiği elastik, homojen, izotrop özeliklere sahip değilse de, teorik yöntemle dingil yüklerinin ve dingil düzenlerinin üstyapı kalınlığına ne şekilde etkidiğini anlamak mümkündür.

Üstyapının tabakalarında oluşan radyal, düşey ve kayma gerilme ve deformasyonları her bir tabakanın kalınlığı elastisite modülü ve poisson oranına bağlı olarak, lineer elastik teoriye dayanan tabakalı sistem yöntemlerinin herhangi biriyle hesaplanabilir. Bu hesap yöntemlerinde gözönünde bulundurulması gereken bir husus da, bitümlü kaplama tabakasının rijitlik modülünün, viskoelastik davranıştan dolayı sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olarak değişimidir.

Rijitlik modülü değerleri bitümlü karışımlar için, yüksek sıcaklıklarda ve uzun yükleme sürelerinde küçük aksi hallerde büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu özelikle ilgili olarak Van der Poel tarafından geliştirilmiş olan ifade aşağıdaki gibidir (Yüce, 1977).

$$S(t, T) = \sigma / \varepsilon \qquad (1.1)$$

S = Rijitlik; kg/cm^2 veya $lb/inç^2$

σ = Eksenel gerilme; kg/cm^2 veya lb/inç^2

ε = Eksenel birim deformasyon; cm/cm veya inç/inç

t = Yükleme süresi (hızı); saniye, dakika, saat vb

T = Sıcaklık; $^{\circ}$C veya $^{\circ}$F

Kısa süreli yüklemeler ve düşük sıcaklıklarda bitümlü karışımlar elastik davranış göstermektedir. Yükleme süreleri ve sıcaklığa bağlı olarak, karayolu üstyapısında kaplama ve bazen temel tabakasında rijitlik modülü 70 – 280 000 kg/cm^2 arasında değişmektedir.

1.2.2 İklim etkileri

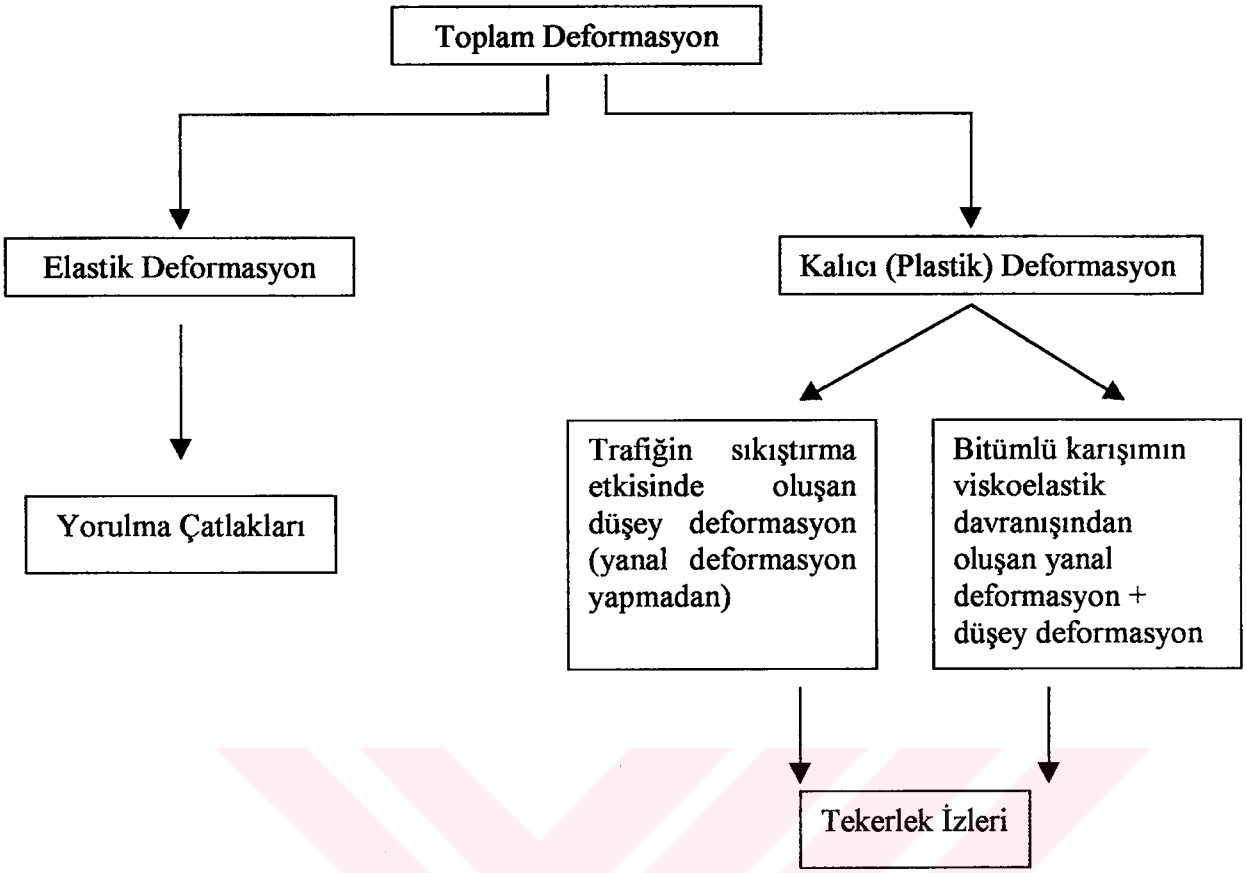
Bitümlü kaplama tabakası sıcaklık düşmelerinde tepkisini büzülme eğilimi olarak gösterir. Buna karşılık temel tabakası ile kaplama tabakası arasındaki sürtünmeden dolayı bir direnç oluşur ve sonuçta kaplama tabakasında çekme gerilmeleri meydana gelir. Bitümlü karışımlarda mineral agreganın hacimsel genleşme katsayısının bitümünkinden küçük olması sebebiyle de ısı düşmelerinde agrega daneleri arasındaki bitüm film tabakalarında çekme gerilmeleri meydana gelir (Umar ve Ağar, 1985). Isı düşmeleri ayrıca zemin ve zemin suyunu etkileyerek zemin boşluklarındaki suyun soğuyarak önce buz kristalleri ve mercekleri oluşturmasına, daha sonra da don kabarmasına sebep olmaktadır. Don kabarması olayı sonucunda da kaplama tabakasında çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

1.3 Üstyapının Zorlanması

Esnek üstyapıların zorlanması statik ve dinamik (yük tekrarı) yük etkisinde olmaktadır.

Karayolu üstyapısında, bitümlü karışımdan oluşan kaplama tabakasına gelen yüklerin tekrarlanması sonucu oluşan deformasyonlar sınırsız olarak artmaktadır. Tekrarlı dingil yükü olarak da adlandırabileceğimiz yük tekrarlarının asfalt kaplamalar üzerindeki etkileri malzemenin yorulma mukavemeti açısından incelenmektedir. Yorulma direnimi üzerine yapılan çalışmalarda laboratuar ortamında üretilen bitümlü karışım numunelere arazi koşullarına benzer şekilde gerilme ve deformasyonlar uygulanmaktadır.

Üstyapıda oluşan deformasyonlar Şekil 1.3' de verilmiştir

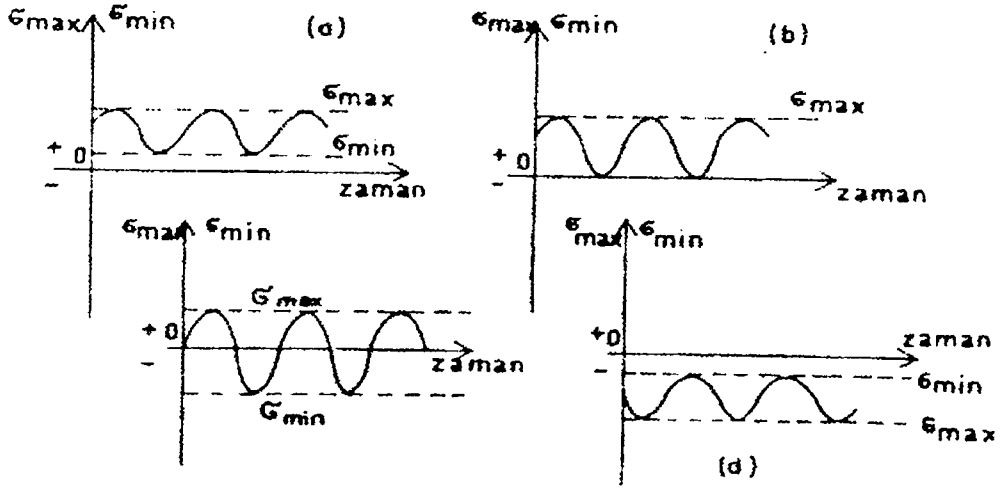


Şekil 1.3 Üstyapıda oluşan deformasyonlar

1.4 Bitümlü Karışımlarda Yorulma

Tekrarlı zorlamalar altında malzemenin mukavemeti azalır, çekme mukavemetinin çok altındaki gerilmeler kırılma oluşturabilir, buna neden yorulma olayıdır (Onaran, 1997). Yapı malzemesi, statik yük etkisi dışında oluşan dinamik yük etkisinden dolayı farklı şiddet ve tipte (basınç ve çekme) gerilmeler ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu durum nedeniyle yapı malzemesinin herhangi bir kesitine ait bir noktada σ_{min} ile σ_{max} arasında değişen gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan bu gerilmelerin muhtemel durumları sinüzoidal bir yükleme durumuna göre Şekil 1.4'de gösterilmiştir. Bu şekil üzerinde çekme gerilmeleri (+) işaretli olarak gösterilmiştir. Bu duruma göre (a) da malzeme yalnız değişken çekme gerilmeleri etkisi altındadır. (b) de cisim yine çekme gerilmelerinin tesiri altında ise de burada σ_{min} sıfıra eşittir. (c) halinde ise $-\sigma_{max}=\sigma_{min}$ dır. Yani malzemeye aynı değerde maksimum çekme ve basınç gerilmesi arasında değişen gerilmeler tesir etmektedir. Yorulma da bu sonuncu durum özel bir hal olup buna alternatif gerilme hali

denir. (d) de ise malzeme yalnız değişken basınç gerilmelerinin tesiri altındadır (Postacıoğlu, 1981).



Şekil 1.4 Gerilme durumları

Bitümlü karışım olarak imal edilen, trafik ve çevresel etkiler altındaki kaplama ve bitümlü temel tabakasında oluşan yorulma olayı ise taşıt yüklerinin tekrarı neticesinde ortaya çıkmaktadır. Heukelom ve Klomp yorulmayı; "çevresel etkiler sonucunda sürekli değişimlerin yığışımlı olarak toplanıp, uygulanan gerilmenin, gerilme dayanımına eşit olmasını sağlayan durum" olarak tanımlamışlardır. Deacon ise yorulmayı "malzemede şartlara bağlı olarak sürekli olarak ilerleyen lokal ve sürekli gerilmelerdir ki, belirli nokta veya noktalarda değişken gerilmeler ve deformasyonlar oluşturur ve yeterli yüklemelerden sonra çatlak veya komple bir kırığa sebep olur" diye tanımlamıştır. Araştırmacılar yorgunluk olgusunu, asfaltlı sistemlerde çatlakların başlaması ve büyümesi olarak; yorgunluk ömrünü ise başlangıç sürecini kritik ölçülerdeki bir veya birkaç çatlağa çeviren tekrarlı yük devinimi olarak tarif etmişlerdir. Ilıcalı ise Malzemedeki yorulmayı; "tekrarlı ve değişen yükler altında malzeme içinde yer yer yapı değişikliklerinin ve çatlakların oluşması, bu etkilerin giderek malzeme mukavemetini de aşarak kırılmaya neden olması " olarak tanımlamaktadır (Yüce, 1972; Ilıcalı 1988). Harvey vd ise yorulmayı "karışımın bozulmaksızın tekrarlı yüklere karşı koyma yeteneği" olarak tanımlamaktadır (Harvey v.d., 1997).

1.4.1 Yorulma deney yöntemleri

Bitümlü karışımlara uygulanan yorulma deneylerindeki ana düşünce, numuneye tekrarlı yüklemeler altında elastik olmayan deformasyona izin vermektir. Karayolu üstyapı tabakaları; trafik yükleri altında yoğunluklarının artması, kayma kuvvetlerinin oluşması ve taban zemininde oturmalar meydana gelmesi sonucunda elastik olmayan deformasyonların etkisinde kalarak deforme olabilmektedirler. Tüm bunlar ile birlikte projesine ve inşa yöntemlerine uygun olarak yapılan üstyapılarda kalıcı deformasyonlar çok az olmakta ve ayrıca bu deformasyonlar er veya geç (tabanda olan oturmalarla birlikte oluşan) durmaktadır.

Bazı laboratuar deneylerinde tersinir gerilme uygulanmaktadır. Bu da kümülatif deformasyonları azaltmakta veya bitirmekte ve arazideki trafik yükleri altındaki gerilme durumunu daha iyi temsil etmektedir. Diğer dairesel ve bazı eksenel tip deneylerde ve mesnetli eğilme deneylerinde bu yapılamamaktadır.

Laboratuar yorulma deneylerinde, tek vuruşlu yüklemeden daha çok üstyapı üzerinde yuvarlanan tekerlek yükü tarafından uygulanan üç sürekli yükleme vuruşunun uygulanması tercih edilir. Kritik bölge olan asfalt betonu tabakanın tabanı, tekerlek yaklaşırken basınç gerilmelerine; sonra tekerlek bu nokta üzerinden uzaklaşırken çekme gerilmelerinin etkisinde kalmakta ve sonuçta tekerlek uzakta iken basınç gerilmelerinin etkisinde kalmaktadır. Tabakanın tabanındaki ilk basınç deformasyonunun büyüklüğü çekme deformasyonunun yaklaşık yedide birine eşittir (Raithby vd., 1972). Bu basınç gerilmelerinin olmaması durumunda yorulma ömründe yaklaşık %10-15'lik bir artma meydana geldiği görülmektedir (Barksdale, 1977).

Çizelge 1.11'de üç nokta yükleme, orta nokta yükleme, konsol eğilmeli, burulmalı konsol, tek eksenli, dairesel ve mesnetli eğilme durumları için yorulma deneylerinin temel karakteristikleri hakkında bir özet verilmiştir. Bu karakteristikleri ise yük konfigürasyonu, gerilme dağılımı, yük dalgasının şekli, yük frekansı, kalıcı deformasyonun oluşumu, gerilme durumu ve üniform gerilme zonunun görünümüdür. Bu çizelgeden tekrarlı dairesel yükleme deneyi ile diğerlerin farklılığı açıkça görülmektedir. Dairesel deney tek eksenli bir gerilme durumuna sahip iken diğer deneyler eksenel olmayan gerilme durumuna sahiptirler.

Burkulmalı konsol deneyi sürekli sinüzoidal yükleme şekline sahiptir. Eğilmeli deneyler tipik olarak kalıcı deformasyonları elimine eden tersinir yüklü veya yüksüz çeşitli vuruş şekillerinde (üçgensel, dairesel, v.d.) yapılırlar. Eksenel deneylerde dinlenme periyotlu veya peryodsuz sinüzoidal veya yarı sinüzoidal vuruşlar kullanılır. Dönen konsol ve eksenel deneylerde eğilmeli ve dairesel deneylere nazaran daha yüksek frekanslar kullanılmıştır. Üstyapı içerisinde dinlenme periyodu her bir yük vuruşunun uygulanmasından sonra oluşur. Sürekli yükleme modeli (dinlenme periyotsuz) daha kısa yorulma ömrü vermektedir. Bu nedenle de laboratuar deneyleri daha hızlı bir şekilde tamamlanabilmektedir.

Asfalt betonunun yorulma davranışının ölçümünde kullanılan yöntemlerin genel sınıflandırması;

1. Basit Eğilme (Simple Flexure): Yorulma ömrü, gerilme/deformasyon ilişkisi basit eğilme, üç nokta veya orta nokta yükleme konfigürasyonundaki kirişlerin sinüzoidal veya tek vuruşlu yüklerin etkisinde bırakılması şeklinde geliştirilmiştir. Dönen konsol kirişler ve trapezoidal konsol kirişlerde sadece sinüzoidal yük uygulaması yapılır.

2. Mesnetli Eğilme (Supported Flexure): Yorulma ömrü ve gerilme/deformasyon ile doğrudan ilişkili olan bu deney yönteminde kirişler veya plaklar arazideki yükleme modu ve gerilme durumunu temsil edecek şekilde mesnetlenirler.

3. Doğrudan Eksenel (Direct Axial): Bu deney de yükler, vuruşlu veya sinüzoidal olarak eksenel olamayacak şekilde tersinir gerilmeli veya gerilmesiz olarak uygulanmaktadır.

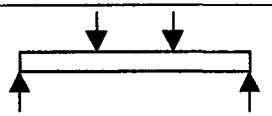
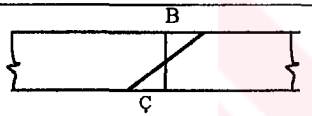
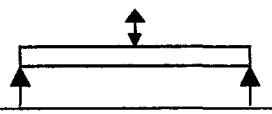
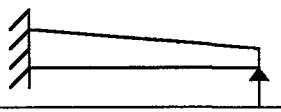
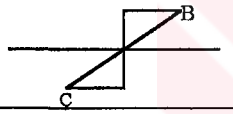
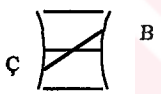
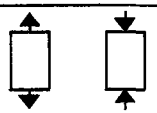
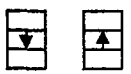
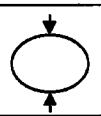
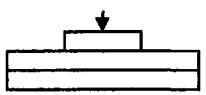
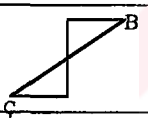
4. Dairesel (Diametral): Bu deney silindirik numunelere ekseni doğrultusunda vuruş uygulanması şeklinde yapılmaktadır.

5. Üç Eksenli (Triaxial): Bu deney sınırlamalarla, doğrudan eksenel deneylere benzer şekilde uygulanmaktadır.

6. Kırılma (Bozulma) Deneyi (Fracture): Yorulma ömrünü tahmin etmek için bozulma mekanizması prensiplerinin kullanıldığı deneylerdir.

7. Teker-İzi Deneyi (Wheel-Tracking): Tam ölçekli ve laboratuar olmak üzere iki şekilde düzenlenmiş olan bu deney, çatlama miktarı, yük tekrar sayısı ve ölçümler ve/veya gerilmelerin kaydedilmesi ile doğrudan ilişkili deneylerdir. Tam ölçekli deneyler için doğrusal ve dairesel yolların her ikisi de kullanılmaktadır.

Çizelge 1.11 Yorulma Deney karakteristikleri

Deney	Yükleme Durumu	Gerilme Durumu	Dalga Tipi	Yükleme Frekansı	Performans Deformasyouna İzin Var mı?	Gerilme Durumu	Kırılma Oluşuyor mu?
Üç Noktalı Eğilme			Yarı Sinüzoidal	1-1,67	hayır	Tek Eksenli	evet
Orta Noktalı Eğilme			Sin, Üçgensel Diktörtgensel	1:100	hayır	Tek Eksenli	hayır
Konsol			Sin, Üçgensel Diktörtgensel	25(Bonnot) 1:100 (Van Dijk)	hayır	Tek Eksenli	hayır
Dönen Konsol				16.67	hayır	Tek Eksenli	evet
Eksenel				8.33-25.0	hayır	Tek Eksenli	evet
Dairesel				1.0	evet	İki Eksenli	hayır
Destekli Eğilme			Yarı Sinüzoidal	0.75	evet	Tek Eksenli	hayır

2. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARDA KULLANILAN MALZEMELER

Sıcak bitümlü karışımlar üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler; bağlayıcı (bitüm), agrega ve karışımın özeliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan katkı maddeleridir.

2.1 Bağlayıcılar (Bitüm)

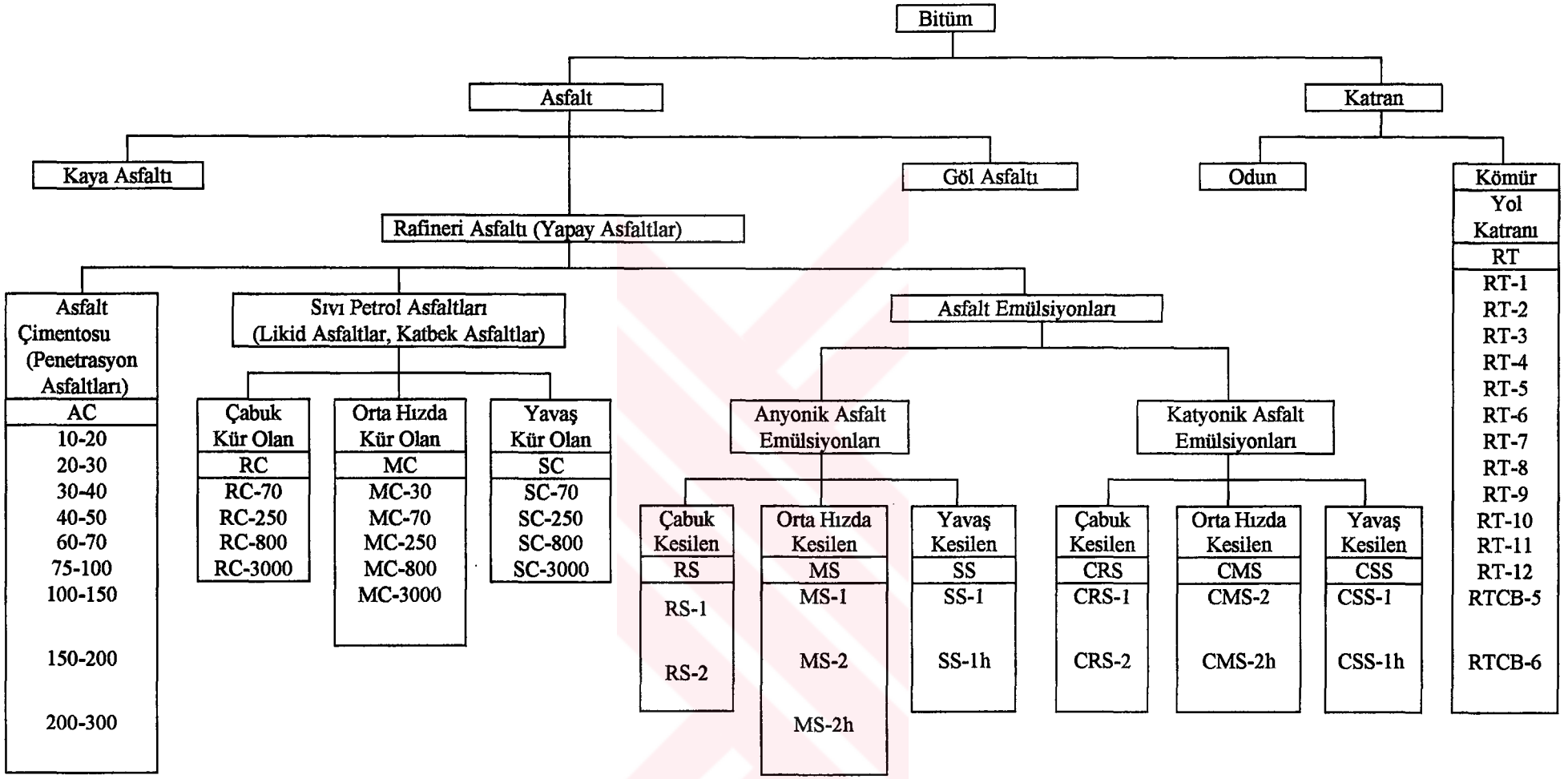
Doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya pirojenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle meydana gelen ergime sonucu oluşan) hidrokarbonların bir karışımı veya bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup çok defa bunların gaz, sıvı, yarı-katı veya katı halde olabilen, metal dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbondisülfürde tamamen çözülen madde olarak tanımlanan (Keçeciler vd., 1988) bitüm, bitümlü sıcak karışımlarda bağlayıcı görevini üstlenmektedir. Karayolu malzemesi olarak kullanılan bitüm çeşitleri Şekil 2.1' de gösterilmiştir.

Bitümlü bağlayıcılar esas olarak iki kısma ayrılırlar: asfaltlar ve katranlar. Çeşitli tip bitümlü bağlayıcılar arasında kökenleri ve hazırlanma yöntemlerine göre önemli farklar vardır.

2.1.1Asfalt

Asfalt, kırılması güç anlamına gelen bir kelime olup Akad' cadan Sphalo ve Asphaltu kelimelerinden türemiştir.

Koyu kahverenginden - siyaha kadar değişen, kuvvetli bağlayıcı özelliği olan, kıvamlılık bakımından katı, yarı-katı veya sıvı halde olabilen, doğal halde bulunan veya ham petrolün arıtılmasından elde edilen ve başlıca hidrokarbonlardan oluşan bir maddedir. Asfaltlar, kökenlerine göre doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olarak iki gruba ayrılabilir. Ancak doğal asfaltları da çok defa kullanılabilir hale getirmek için bir takım işlemlerden geçirmek gerekir.



Şekil 2.1 Karayolu malzemesi olarak bitüm çeşitleri

- **Doğal asfaltlar**

Doğal asfaltlar doğada genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar. Trinidat adasında bir asfalt gölü vardır. Bu göl yaklaşık 100 metre derinlikte olup geniş bir alanı kaplamaktır. Buradan elde edilen asfaltın içinde %35 kadar mineral malzeme bulunur. Bunun gibi Amerika' da Los Angeles yakınlarında La Brea' da da buna benzer doğal asfalt vardır. Çok rastlanan bir doğal asfalt şekli de kaya asfaltlarıdır; daha çok kumtaşı, kalker, kil vb. mineral maddeler ile %2-3 civarında asfaltın karışımından oluşmuşlardır.

- **Yapay asfaltlar**

Yapay asfaltlar ham petrolün arıtılması ile elde edilirler. Petrol kuyularından çıkarılan petrol rafineriye gelir, buradan pompalar ile tanklara boşaltılır. Oradan ısıtma kulelerine gönderilerek sıcaklığı artırılan ham petrol daha sonra damıtma kulelerine gelir. Kolay uçucu olan kısımlar bu kulelerin üst kısmından çıkar ve soğutucularda yoğunlaşarak ayrılır. Bunlar hafif ürünleri oluştururlar. Daha az uçucu olanlar aynı şekilde orta ürünleri, en ağır olanlar ise ağır ürünleri meydana getirirler.

Başlıca asfaltı içeren kalıntılar ise kulenin dibinde birikir. Bu şekilde ham petrol başlıca beş kısma ayrılmış olur.

1.Benzin (Gazolin)
2.Gaz Yağı (Kerosen)
3.Dizel Yağları (Mazot)
4.Yağlama Yağları
5.Ağır Kalıntı Maddeleri

Kalıntı maddelerinin daha ileri derecede damıtılması sonucunda farklı petrol ürünleri elde edilmektedir (Keçeciler vd., 1988).

- **Asfalt çimentoları (AC)**

Damıtma kulelerinin en altında kalan ağır kalıntı maddelerinin daha ileri derecede damıtılması sonucu SC sınıfı (yavaş hızda kür olan) yol yağları elde edilir ve geriye asfalt

çimentosu kalır. Şartların değiştirilmesi ile istenilen penetrasyonda asfalt çimentosu elde edilir.

Yol üstyapılarında kullanılan asfalt çimentoları, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bitümlü kaplamalarda kullanılmak üzere hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır. Akıcı hale gelebilmesi için ısıtılması gereken asfalt çimentosu AC sembolü ile gösterilir. Asfalt çimentoları penetrasyon derecelerine göre sınıflandırılırlar. Asfalt çimentosunun kıvamlılığını belirleyen penetrasyonu 10-300 arasında değişir.

Asfalt çimentoları penetrasyon derecelerine göre şu sınıflara ayrılırlar:

10-20 Penetrasyonlu AC
20-30 Penetrasyonlu AC
30-40 Penetrasyonlu AC
40-50 Penetrasyonlu AC
60-70 Penetrasyonlu AC
75-100 Penetrasyonlu AC
120-150 Penetrasyonlu AC
200-300 Penetrasyonlu AC

- **Okside asfalt**

Arıtma işlemi sonunda elde edilen kalıntı içerisinden hava geçirerek yarı katı asfaltlara yeni özelikler kazandırılabilir. Bu iş için normal damıtma, kalıntı henüz sıvı iken kesilir. Bu sıvı kalıntı ayrı bir tanka alınır ve yüksek sıcaklıkta tutularak içinden hava geçirilir. Böylece çok sert olan okside asfaltlar elde edilir.

Okside asfaltlar genellikle kaplamalarda kullanılmazlar. Daha özel amaçlar için yalıtım işlerinde, elektrik, otomobil ve boya sanayiinde kullanılırlar (Keçeciler vd., 1988).

- **Sıvı petrol asfaltları**

Sıvı petrol asfaltları; çabuk kür olan RC sınıfı, orta hızda kür olan MC sınıfı ve yavaş kür olan SC sınıfı olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar. Ayrıca her sınıf da kendi arasında kinematik viskozite değerlerine göre tiplere ayrılır.

RC sınıfı sıvı petrol asfaltı elde etmek için asfalt çimentosu, kaynama noktası düşük yani kolay uçan bir çözücü (benzin, nafta) ile; MC sınıfı sıvı petrol asfaltı elde etmek için asfalt çimentosu orta derecede uçucu bir çözücü ile (gaz yağı) ve SC sınıfı sıvı petrol asfaltı elde etmek için asfalt çimentosu ağır yağlarla karıştırılır (Keçeciler vd., 1988).

- **Asfalt Emülsiyonları**

Genel olarak emülsiyon, bir biri içinde çözünemeyen iki sıvıdan birinin diğeri içerisinde küçük küre tanecikleri halinde homojen olarak dağılmasıdır.

Asfalt emülsiyonları da asfalt çimentosu küreciklerinin su içinde dağılmasından oluşur. Ancak bu şekilde yapılan emülsiyon uzun ömürlü olmaz ve kısa bir süre sonra asfalt kürecikleri birbirlerine yapışarak sudan ayrılırlar. Bu durumu önlemek amacıyla bazı katkı maddeleri kullanılır. Bu katkı maddelerine emülgatör (emülsiyon verici madde) denir.

Yol üstyapısında kullanılan asfalt emülsiyonları emülgatörün cinsine bağlı olarak ikiye ayrılır:

1-Anyonik asfalt emülsiyonları,
2-Katyonik asfalt emülsiyonları.

Bir asfalt emülsiyonu agrega ile karıştırıldığı veya bir yolun yüzeyine püskürtüldüğünde emülsiyon kesilir, yani asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agreganın üzerine yapışırlar. Bu arada serbest kalan su da buharlaşır. Yol üstyapılarında kullanılan asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre:

1.Çabuk kesilen (RS)
2.Orta hızda kesilen (MS)
3.Yavaş kesilen (SS) asfalt emülsiyonları olarak üçe ayrılırlar (Keçeciler vd., 1988).

Asfalt emülsiyonları belli başlı olarak;

1-Sathi kaplamalarda,
2-Karışım kaplamalarda,
3-Harç kaplamalarda,
4-Yama ve tamir işlerinde,
5-Penetrasyon makadam yol kaplamalarında, kullanılmaktadır (KAV, 1992).

2.1.2 Katran

Katran, başlıca kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde kuru kuruya damıtılmasından elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Genellikle, katran bu şekli ile değil, arıtıldıktan sonra kullanılır. Yol kaplamalarında bağlayıcı olarak kullanılan katranın kömür kökenli olması tercih edilir.

RT sembolü ile gösterilen yol katranları kıvamlılıklarına göre RT-1, RT-2, RT-3, RT-4, RT-5, RT-6, RT-7, RT-8, RT-9, RT-10, RT-11, RT-12 ve RTCB-5, RTCB-6 olmak üzere 14 sınıfa ayrılırlar. Burada da sıvı petrol asfaltları sınıflandırmasında olduğu gibi numaralar büyüdükçe kıvamlılık artar.

Asfalt emülsiyonunda olduğu gibi katranlar da su ile karıştırılarak katran emülsiyonları yapılabilir.

2.2 Agregalar

Bitümlü karışımların ikinci esas bileşeni olan agreganın en geniş tanımı şöyledir: Kum, çakıl kırma taş, cüruf ve diğer mineral bileşiklerin bağlayıcı bir ortamda, bitümlü bir karışım, portland çimentosu betonu, harç, makadam, mastik vb. şekilde biraraya gelmeleri ve bu malzemelerin bağlayıcısız kullanılmak üzere (örneğin demiryollarında balast malzemesi gibi) bir araya getirilmiş şeklidir (Keçeciler vd., 1988). The British Standard Glossary of Highway ise agregayı "Asfalt, asfalt-makadam ve beton gibi karışımların ana yapısını teşkil eden ve aktif olmayan mineral parçaları" olarak tanımlamakta ve kaba ile ince agregalar arasında ayırım yapmamaktadır.

Yol üstyapısının gerek ağırlıkça gerekse hacimce önemli bir kısmını oluşturan ve yola etkiyen yüklerin meydana getirdiği gerilmelerin taşınmasında önemli rol oynayan agregalar orijinlerine göre doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

2.2.1 Doğal agregalar

Doğal olarak oluşmuş kayalardan fiziksel yolla doğrudan doğruya elde edilirler. Doğal agreganın hammaddesi olan kayaların birçok farklı tipleri vardır, fakat bunların tümü de değişik yapıda bir araya gelmiş olan mineral dane ve kristallerden oluşmuşlardır. Doğal kayalar orijinlerine göre magmatik, tortul (sedimenter) ve metamorfik olarak üçe ayrılırlar.

- **Magmatik kayalar**

Bu grup kayalar, yeryüzünün derinliklerinden yüzeye fışkırmış olan magmanın soğuyup kristalleşmesi sonucu meydana gelir. Magma, yerkabuğunun derinliklerinde bulunan çok sıcak, viskoz ve kompleks bileşimli doğal eriyiklerdir. Bünyelerinde silikatlar, sülfürler, oksitler, uçucu elemanlar vb. vardır. Magmanın çeşitli derinliklerinde soğuma hızının farklı olması sonucunda, kristalleşmeye başlayan minerallerle, henüz sıvı halinde olan magma arasında ve yeni teşekkül etmiş bir mineralle, önceden oluşmuş mineraller arasında reaksiyonlar meydana gelir. Bütün bu karmaşık olayların sonucunda pek çok magmatik taş cinsi ortaya çıkar.

Bu grup kayalar, dünyanın kabuğunu oluşturan bütün kaya kitlesinin kaynağı olarak kabul edilebilir. Magmatik kayaların bileşimi, dane çapı ve dokusu, erimiş kayanın soğuması esnasındaki mevcut şartlara göre büyük ölçüde değişir. Magmatik kayalar, yalnız bileşim ve dane büyüklüğü bakımından değil, doku açısından da değişiklikler gösterirler. Kayayı oluşturan kristaller, mozaik şeklinde veya içiçe girmiş olarak, veya bir mineralin büyük kristallerinin diğer bir mineralin küçük kristal topluluklarının içinde bulunduğu hallerde görülebilir.

Yol agregalarının kaba dokulu olması istenmez, çünkü bu cins dokuya sahip kayalar gevrek olduklarından, silindir altında kolayca kırılabilirler. Çok ince dokulu kaya da aynı şekilde arzu edilmez, zira bunlar agrega yapımı için kırıldığında kaba ve keskin köşeli parçalar oluşur. Orta büyüklükte dokuya sahip birçok magmatik kaya, kristallerin içiçe

karışması sebebiyle en iyi yol agregası olabilme özeliklerine sahiptirler. Bütün magmatik kayalar atmosfer etkisi ile ve yapısındaki minerallerin, kimyasal değişimi ile ayrışmaya başlarlar. Tamamen ayrışmış kayada bozulma olasılığı yoktur. Halbuki yarı ayrışmış kaya agrega olarak kullanıldığında zamanla özeliklerini kaybedebilirler. Çok ayrışmış bir kayayı, üzerindeki yama şeklindeki lekelerden ve yumuşak halinden tanımak mümkündür, bazen de görünüşte sağlam olan bir kayanın, petrolojik analize tabi tutulduğu zaman kısmen ayrışmış olduğu görülür.

- **Tortul Kayalar**

Değişik kayaların parçalanması, aşınması ve dağılan parçaların katı ya da eriyik halde rüzgar, su gibi etkilerle sürüklenmesi deniz veya göl dibi gibi sedimantasyon havzalarında tortulaşması ve daha sonra bunların katılaşması ile meydana gelen taşlara denir. Tortul kayaların başlıca özeliği tabakalı olmaları ve içlerinde fosil ve canlıların izlerinin bulunabilmesidir. Oluşum tarzlarına göre üçe ayrılırlar;

a. Klasik tortul kayalar: Yer kabuğunda mevcut taşların çeşitli nedenlerle ufalanıp parçalanması ve sonra bu parçaların su ve rüzgar gibi etkenlerle çukur yerlerdeki sular içinde birikmesi ve parçaların çimentolaşması (diyajenetik) ile oluşur (örneğin kum taşı, konglomera, kalker, marn). Ayrıca parçalar birbirleriyle birleşmemiş halde bulunarak doğrudan doğruya agrega ocakları teşkil edebilir (kum, çakıl ocakları gibi).

b. Kimyasal tortul kayalar: Çözülebilen minerallerin, çözeltideki suyunun uçması, çöktürücü bir maddenin karışması ile çözeltiden ayrılıp çökmeleri sonucunda oluşurlar. Bu grupta bulunan kayalar daha ziyade kayanın kimyasal bileşimine dayanarak karbonatlı (kalkerli), silisli, demirli, fosfatlı ve tuzlu olmak üzere gruplara ayrılırlar.

c. Organik tortul kayalar: Bunların oluşumunda esas rolü canlılar oynar. Organik tortul kayalar karbonatlı (organik kalkerler), silisli (diatomit, radiolarit) veya karbonik (kömürler) olabilir.

- **Metamorfik Kayalar**

Magmatik ve tortul kayaların yüksek ısı, yüksek basınç, su buharı ve türlü bileşimdeki gazların etkisi veya mekanik olarak şekil değiştirme ile değişik bir yapı-doku ve mineralojik bileşim kazanması sonucunda oluşur. Metamorfizma sonucunda ya taşın mineralleri kristal şeklini değiştirir, ya da eski minerallerin yerine yeni mineraller oluşur. Bütün bu hallerde taşın kimyasal bileşimi aynı kalabilir veya madde ilavesi, madde eksilmesi olabilir. Örnek olarak mermer verilebilir. Önemli bir basınç etkisi olmaksızın, yalnızca ısı ile dönüşen kayalara "termik metamorfik kayalar" denir. Termik metamorfizma, hemen hemen daima kayanın ilk halinden daha katı ve daha sağlam hale gelmesine neden olur. Basit yapıya sahip kayalar ise yeniden kristalleşirler.

Kumtaşları kuvarsite, kalkerler ise mermere dönüşür. Daha kompleks yapıya sahip magmatik veya karışık bünyeli tortul kayalar, metamorfizma sonucu öyle önemli minralojik değişimlere uğrarlar ki orijinal kayanın karakteristikleri kaybolur ve meydana gelen yeni kayaya Hornfels denir. Bu cins kayalar, minerallerin içiçe geçmiş bulunmalarından yol inşaatı için elverişlidirler. Yol inşaatında kullanılma bakımından kayalar, hemen her zaman termik metamorfizma sonucu daha iyi özeliklere sahip olmaktadırlar. Bazı Hornfels cinsleri bu bakımdan en iyi yol yapım agregaları arasında yer almaktadır (Kumbasar vd, 1970). Yalnızca basınç etkisiyle başkalaşmış olan kayalar (dinamik metamorfizma) oldukça azdır. Zira büyük bir çoğunlukla basınç ısı ile beraber etkir ve böylece tabakalı yapıya sahip bölgesel (Rejyonal) metamorfik kayalar meydana gelir. Gnays ve Granülit' te bu tabakalar düzensiz, büyük aralıklı, Arduvez ve Şistte ise tabakalaşma daha yakındır. Ancak gerek silindir altında ezilmeye müsait olduklarından, gerekse kolayca parçalanabildiklerinden agrega olarak kullanılabilmeleri uygun değildir.

Yol yapımında kullanılan doğal agreganın hammaddesi olan doğal kaya ile ilgili olarak yukarıda verilen bilgilerde de görülebileceği gibi petrografik yapılara bağlı olarak farklı birçok kaya ismi geçmektedir. Petrologlarca bulunan ve değişik isimler verilen yüzlerce kaya türü; yol yapımında, benzer özeliklerine göre (bileşim, dane büyüklükleri, doku) 10 gruba ayrılmaktadır (B.S.812). Bu sınıflandırmadaki başlıca özelikler Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Yol agregaları grupları

BAZALT GRUBU	
Andezit	Mag.Nöt.F
Bazalt	Mag.Baz.F
Bazik Porfirit	Mag.Nöt.M
Diyabaz	Mag.Baz.M
Dolerit	Mag.Baz.M.
Epidiyorit	To.B.
Hornblend-Şist	To.B.
Lamprofir	Mag. Baz.
Kuvartz-dolerit	Mag.Baz.M.
Silipit	Mag.Baz.F
Teşenit	Mag. Baz.
Teralit	Mag. Baz.
ÇAKMAKTAŞI GRUBU	
Silistaşı (çert)	To.Si.
Çakmaktaşı	To.Si.
GABRO GRUBU	
Diyorit	Mag.Or.C
Gnayn	Met.B.
Gabro	Mag.Baz.C
Hornblend	Mag.Ü.
Norit	Mag.Baz.C
Peridodit	Mag.Ü.
Pikrit	Mag.Ü.
Serpantin	-
GRANİT GRUBU	
Gnays	Met.B.
Granit	Mag.As.C
Granodiyorit	Mag.As.C
Granülit	Met.B.
Pegmatit	-
Kuvartz-diyorit	Mag.Or.C.
Siyenit	Mag.Or.C.

KUMTAŞI GRUBU	
Aglomera	To.
Arkoz	To.Si.
Breş	To.
Konglomera	To.
Grovak	To.Si.
İnce çakıl	To.Si.
Kumtaşı	To.Si
Tüf	To.
HORNFELS GRUBU	
Mermer hariç bütün basınç sonucu değişmiş kayalar	Met. Ter.
KİREÇTAŞI GRUBU	To.Kal
Dolomit	To.Kal
Kireçtaşı	To.Kal
Mermer	Met. Ter
PORFİR GRUBU	
Aplit	-
Dasit	Mag.As.F
Felsit	Mag.As.M
Granofir	Mag.As.M
Keratofir	Mag.Or.F
Mikrogranit	Mag.As.M
Porfir	Mag.Or.M
Kuvartz- porfirit	Mag.Or.M
Riyolit	Mag.As.F
Trakit	Mag.Or.F
KUVARSİT GRUBU	
Ganister	-
Kuvarsitik kumtaşı	To.Si
Yeniden kristalleşmiş kuvarsit	Met. Ter.
ŞİST GRUBU	
Fillit	Met. B.
Şist	Met. B.
Kayrak Arduvaz	Met. B1.

Mag.= Magmatik	Or.= Orta	Baz.= Bazik	
To.=Tortul	U.= Ultrabazik		
Met.=Metamorfik	C.= İri dokulu	F.= İnce dokulu	Ca.= Kalkerli
As.=Asit	M.= Orta dokulu	B.= Bölgesel Ter.= Termik	Si.= Silisli

Doğal agregalar, karayolu üstyapısında yukarıda açıklanan kaya türlerinin ya doğal etkilerle parçalanması ve sürüklenmesi sonucu oluşan çakıl ve kum; ya da dere, teras ve taş ocaklarından çıkartılarak konkasörlerde istenilen boyutlara küçültülebilen kırmataş şeklinde kullanılır.

2.2.2 Yapay agregalar

Endüstriyel işlemler sonucu elde edilen bu gruba cüruf, klinker ve çimento girmektedir. Cüruf; demir-çelik endüstrisinde atık madde olarak yüksek fırınlardan elde edilir. Klinker, fırınların bir artığı olup küllerin eriyerek topaklar haline gelmesinden oluşur fakat çok değişebilen bir malzeme olduğu için asfaltta kullanılabilecek olanlarının mutlaka bu amaç için üretilmiş olması ve şartnamelere uygun olması gerekir.

Çimento, ilave edildiği karışımlarda ancak filler olarak iş görür. Çimentonun standart granülometrik bileşimi, saf olması ve bitümlü bağlayıcılarla herhangi bir reaksiyona girmemesi gibi özelikleri nedeniyle filler olarak kullanılmaya elverişlidir.

2.2.3 Bitümlü kaplamalar yönünden agrega

Bitümlü kaplamalarda kullanılacak agreganın kökeni ne olursa olsun (magmatik, sedimanter, metamorfik), her kaplama tipi için şartnamelerde verilen fiziksel özeliklerin sağlanması gerekir. Ancak istenen tüm koşulları sağlayan bir agrega yol yapımında kullanılmalıdır.

Agregalar, boyutlarına göre üç grupta incelenirler (Keçeciler vd., 1988):

a. Kaba agrega (4,75mm elek üzerinde kalan)
b. İnce agrega (4,75mm elekten geçip 75μm' lik elek üzerinde kalan)
c. Mineral filler (75μm' lik elekten geçen)

Yukarıda sayılan üç grup malzemenin her biri bitümlü karışımın ayrı ayrı özeliklerini kontrol eder. Bitümlü karışımdaki iri agrega yüzdesi %40-50' ye çıkarılırsa iri agrega karışımın mekanik direncini artıran bir iskelet oluşturur, böylece karışımın direncinde önemli bir artış hissedilir (Umar ve Ağar, 1985). İnce agrega ise iri agreganın oluşturduğu

iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışımın elde edilmesini sağlar. Bu arada ince agreganın yüzey dokusu da önemlidir. Örneğin; pürüzsüz bir çakıl kumu daha düşük bir deformasyon direnci sağlar. Mineral filler toplam agreganın çok küçük bir yüzdesini oluşturmasına karşın, karışımın özeliklerinin düzenlenmesinde rol oynar. Mineral filler, 0,74mm' lik elekten geçen agrega malzemesidir. Ancak 0,74mm' den daha ince olan bütün malzemeler filler ödevini görmezler. Mineral filler düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı ve aynı zamanda 0,001 mm' den ince daneleri de içermelidir. Danelerin şekli de önemlidir, yassı düz ve uzun danelerin yüzdesinin artması fillerin özeliğini düşürür. Filler bitümlü malzeme ile reaksiyona girmemelidir. Mineral filler; taş tozu, mermer tozu, portland çimentosu, sönmüş kireç veya benzeri maddelerde oluşacak kil, toprak, organik ve zararlı madde kapsamayacaktır. Mineral fillerin plastisite indeksi 4' den büyük olmamalıdır (KGM , 1986).

3. BİTÜMLÜ BAĞLAYICI ve KARIŞIMLARDA KULLANILAN KATKI MADDELERİ

Bitümlü karışımların performanslarının iyileştirilmesi amacıyla günümüzde birçok değişik malzeme katkı maddeleri olarak kullanılmaktadır. Bu katkı malzemeleri ile esnek üstyapı karışımlarında kullanılan bitüm, asfalt çimentosu, emülsiyonlar ve katbekler modifiye edilmektedir.

Asfalt bağlayıcılarının veya karışımlarının modifiye edilmesi kavramı her ne kadar çok yeni bir kavram olmasa da, özelikle 1973 yılındaki Arap petrol ambargosunu takip eden yıllarda bu konudaki çalışmalar ham madde kaynaklarının ve temin şekillerinin değişmesi ile beraber hız kazanmıştır. Bu tarihe kadar hammaddesini tek kaynaktan temin eden rafineriler, birden fazla farklı kaynaktan hammadde temin etme zorunluluğu ile karşılaşmış ve bunun sonucunda da üstyapıda kullanılacak asfalt çimentosu ile ilgili şartnamelere uygun üretiminde sıkıntılar yaşamışlardır. Sonuç olarak, asfalt çimentosunun istenilen niteliklere uygun üretimi amacıyla modifikasyon çalışmalarına hız verilmiştir (Terrel vd, 1989).

Bitümlü bağlayıcılar veya karışımlarda katkı maddesi kullanımı ile ilgili çalışmaların artmasının sebeplerini şöyle sıralayabiliriz:

a. Ham petrol ve buna bağlı olarak bitüm fiyatlarında artış olma riski her zaman mevcuttur.
b. Yol inşaatlarındaki yüksek maliyetler daha ince kaplama tabakaları inşaası sonucunu doğurmuş fakat buna bağlı olarak da yolların hizmet ömürlerinde düşmeler gözlenmiştir.
c. Taşıt teknolojisindeki ilerlemeye paralel olarak trafik etkileri daha ağırlaşmış; üstyapılar daha fazla yük, daha büyük hacim ve daha yüksek lastik basınçları etkisinde kalmaya başlamışlardır.
d. Yola yakıt dökülmesi gibi özel durumlara karşı önlem alma gereklilikleri ortaya çıkmıştır.
e. Maddi kaynak sıkıntılarından dolayı yapılması gereken rutin üstyapı bakımları zamanında gerçekleştirilememiştir.

f. Özelikle son yıllarda artan çevre bilincine paralel olarak lastik, cam ve kül gibi endüstriyel atıkların yeniden kullanılması fikri önem kazanmıştır (Terrel vd, 1989).

Günümüzde birçok katkı maddesi ticari olarak piyasada bulunabilmektedir, ancak bunların hepsi bitümlü karışımlarda hedeflenen iyileştirmeyi sağlama yeteneğine sahip değildirler. Katkı maddesi olarak piyasada bulunan malzemelerin bir kısmı, sadece diğer sanayi kollarının atıkları iken bazıları da muhtelif sanayi kollarında yan ürün olarak üretilmekte ve bitümlü karışımlarda bir takım fiziksel ve kimyasal değişimlere sebep olmaktadır. Bunların ötesinde, asıl olarak asfalt çimentosu modifikasyonunda kullanılmak üzere tasarlanmış ve tüm özelikleri detaylı olarak açıklanmış katkı maddeleri amaçlanan iyileştirmeyi sağlayabilmektedir.

Bitümlü karışımlarda katkı maddeleri ile modifikasyon işlemi iki türlü yapılabilmektedir:

a. Katkı maddesinin bitüme katılarak modifiye bitüm elde edilmesi.
b. Katkı maddesinin bitümlü karışıma ilave edilerek "modifiye karışım" elde edilmesi. Bu işlem asfalt plentinde gerçekleştirilir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüm çeşitli standart test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişmelerin tespit edilmesi mümkün olabilmektedir. Böylece, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirmesi yapılabilmektedir. Ancak, bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlem için genellikle ilave ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır.

Karışımın modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ilave karıştırma ekipmanı gerekmemekte, depolama, taşıma v.s. gibi sorunlarla karşılaşılmamakta, ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi pratik olmamaktadır.

Karışımlara yönelik deneylerden elde edilen veriler üstyapı performansı değerlendirmesinde bağlayıcılara uygulanan deneylerden daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Buna karşın karışımlara yönelik deneylerin gerçekleştirilebilmesi için gereken test ekipmanları daha karmaşıktır ve deney prosedür ile süreleri daha uzundur.

Çizelge 3.1' de genel sınıflandırılması verilen asfalt katkı maddeleri on ana başlık altında toplanabilir:

1.Filler Grubu: Mineral fillerler, agregaların kırılması ve elenmesi işlemleri sırasında ortaya çıkan mineral tozlar ve uçucu kül, portland çimentosu kireçten oluşur. Tam manasıyla mineral filler olmamakla beraber, son zamanlarda sülfür ve karbon siyahı da bağlayıcı özeliklerinden dolayı filler grubu içinde anılmaktadır. Bu malzemeler, bitümlü sıcak karışımlarda boşlukları doldurmanın yanı sıra karışımın güçlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadırlar.

2. Uzatıcı (Extender) Grubu: Sülfür ve lignin (odun özü) gibi bazı malzemeler karışım içinde kısmi yer değiştirme sonucu asfalt çimentosu üzerinde uzatıcı etki göstermektedirler. Buradaki asıl gaye asfalt çimentosunun maliyeti daha düşük bir malzeme ile yer değiştirmesini sağlamak fakat bunu yaparken de asfalt çimentosu ile yapışma özeliğine sahip bir malzeme kullanmaktır. Bazı uzatıcı katkı maddeleri aynı zamanda oksidasyon oranını da düşürmektedir.

3. Kauçuk Grubu: Kauçuk grubu (elastomerler) katkı maddeleri doğal ve sentetik kauçukları kapsamaktadır. Lateks ve tekerleklerden elde edilen iyileştirilmiş kauçuk gibi çok farklı formları içermektedir. Bu malzemeler oda sıcaklığında gerilip tekrar bırakıldıklarında ilk şekil ve ebatlarına geri dönerler. Kauçuk ve plastik malzemeler polimer ana başlığı altında toplanabilirler.

4. Plastik Grubu: Plastik terimi genel olarak gerilme altında akan polimerik malzemeleri ifade etmektedir. Plastik grubu, fillerleri ve stabilizerleri de içeren son ürünleri ve homojen polimerik başlangıç malzemelerini kapsar. Bu grup malzemeler çoğunlukla termoset özelik gösterirler yani ısıtılabilir ve gerilme ile akarlar, fakat ısı ile tekrar yumuşatılamazlar.

5. Bileşim Grubu (Kombinasyonlar): Modifiye asfalt çimentosunda elde edilmek istenen özel karakteristiklere birden fazla polimerin beraber kullanılmasıyla ulaşılabilir. Bazı durumlarda tek katkı maddesi yeterli olmaz, fakat burada dikkat edilmesi gereken husus uyumsuzluklar hatta tersine reaksiyonlardır.

6. Fiberler: Doğal, sentetik ve çelik fiberler uzun zamandır bitümlü sıcak karışımlarda kullanılmaktadır. Çoğunlukla kullanım şekli, bağlayıcı veya karışıma çok ince ve kısa fiber parçacıklarının, kimyasal özeliklerine, formuna ve elde edilmek istenen özeliklere bağlı olarak karıştırılması şeklindedir. Fiberler karışımı güçlendirmekle beraber agregayı saran bitüm film tabakasının daha kalın bir film halinde kullanılmasına olanak verirler.

7. Oksidan Grubu: Bu grubu katalizör olarak tanımlamak mümkündür, zira ilave edildiği bağlayıcının sertleşmesini hızlandırıcı etkiye sahiptirler. Oksidan grubu katkı malzemeleri çoğunlukla tekerlek izi oluşumunu engellemek amacıyla kullanılırlar.

8. Antioksidan Grubu: Bu katkı grubunun ana kullanılma gayesi, asfalt çimentosundaki oksidatif sertleşmeyi geciktirmektir. Yol kaplamalarında, inşaat aşamasından hizmet ömrü sonuna kadar sürekli bir yaşlanma süreci yaşanır. Oksidasyon, asfalt çimentosunu sertleştirerek zaman içinde gevrek bir hale getirir. Bu oluşumu yavaşlatmak amacıyla küçük miktarlarda antioksidan katkılar kullanmaktadır.

9. Hidrokarbon Grubu: Bu grup katkıların asfalt çimentosu veya karışımına ilave edilmesiyle asfalt çimentosunun yumuşatılması ve gençleştirilmesi hedeflenmektedir.

10. Soyulma Önleyiciler Grubu: Her asfalt çimentosu agrega kombinasyonu amaçlanan performansı sergileyemez ve soyulma problemleri ile karşılaşılabilir. İşte bu gibi durumlarda, su etkisi altında olan yol kesimlerinde asfalt çimentosu ile bağlayıcı arasındaki adezyonu artırmak için bir takım kimyasal maddeler kullanılabilir. Bağlayıcıya, karışıma veya agregaya kireç veya aminler gibi kimyasal maddelerin eklenmesi ile soyulma problemi ortadan kaldırılmaya çalışılır.

3.1 Sitrenik Blok Kopolimer Esaslı Katkı Maddeleri (Cariflex TR-1101)

Cariflex TR-1101, lineer bir sitrin-bütadin-sitrin (SBS) blok kopolimeridir ve kauçuklar grubuna dahildir. Termoplastik elastomer (TPE) veya sitrenik blok kopolimerler 1960' lı yıllarda bulunmuştur. Bunlar son derece aktif ve etkili olan, geniş bir elastomer aralığı üretecek şekilde farklı biçimlerde değiştirilebilen lityum alkil başlatıcılar kullanılmak suretiyle aniyonik polimerizasyon yoluyla yapılmıştır.

Çizelge 3.1 Katkı maddelerinin genel sınıflandırılması

TİP		ÖZELLİKLER	Modifiyerlerin Asfalt Çimentosunun Kıvamına Genel Etkisi
1- Filler		• Mineral Filler : Taş tozu Kireç Portland çimentosu Uçucu kül • Karbon siyahı • Sülfür	Sertleştirme
2- Uzatıcı (Extender)		• Sülfür • Lignin (Odun özü)	Sertleştirme
3- Kauçuk a) Doğal lateks b) Yapay lateks c) Blok copolymer d) İşlenmiş kauçuk	POLİMERLER	• Doğal kauçuk • Strene -butadien veya SBR • Strene-butadien-Strene veya SBS • Dönüştürülmüş kauçuk	*
4-Plastik		• Polietilen • Polipropilen • Etil-vinil-asetat, EVA • Polivinil klorid, PVC	Sertleştirme
5- Bileşim		• 3 ve 4'deki polimerlerin karışımı	*
6- Fiber		• Doğal : Asbest Taş yünü • Yapay : Polipropilen Polyester Fiberglas	Sertleştirme
7- Oksidan		• Manganez tuzu	Sertleştirme
8- Antioksidan		• Kurşun karışımları • Karbon • Kalsiyum tuzu	Yumuşatma
9- Hidrokarbon		• Yeniden kullanma ve gençleştirme yağları • Sertleştirme ve doğal asfaltlar	Yumuşama Veya Setleştirme
10- Soyulma önleyici		• Aminler • Kireç	Yumuşatma

*Bazı malzemeler, sıcaklık sırasına bağlı olarak asfalt çimentosunu sertleştirir yada yumuşatır

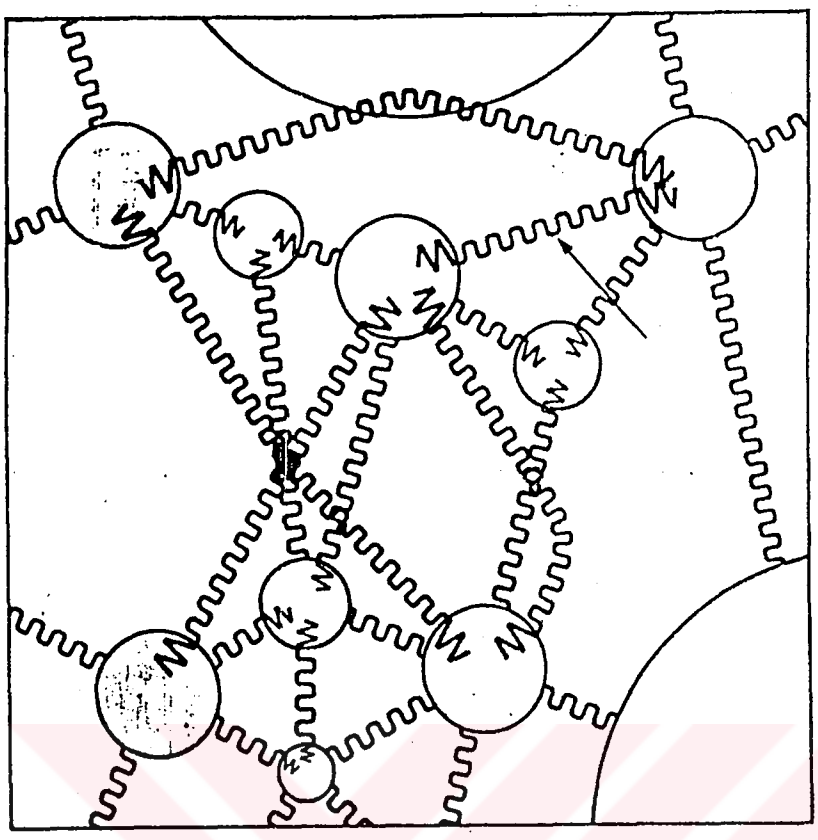
Kimyasal olarak birleştirilmiş üç ana sitrenik blok kopolimer grubu vardır. SBS, SIS, SE/BS; bu zincirin her iki ucunda sert termoplastik polisitren ve blokların kapattığı orta blokta yüksek derecede esnekliğe sahip kauçuk yapı yer almaktadır.

3.2 Cariflex TR-1101' in İşlev Görme Şekli

Cariflex TR-1101 sıcak bitüme ilave edildiğinde, polimer bitümden maltenleri absorblar ve başlangıçtaki hacminden dokuz kat fazla şişer. Kütle itibarı ile %4 ile %6 arasındaki konsantrasyonlarda, şişen polimer bitümün hacmindeki ana bileşen haline gelir. Cariflex TR-1101' in düşük konsantrasyonlarında polimer ağı sürekli olmayabilir; ama parçalı formda dahi bitümün önemli bir hacmini alır ve asfalt performansında kayda değer gelişmeler sağlar.

Bu tip polimerlerde kauçuk bir orta kısım (polibütadin), rijit polisitrin uç blokları arasında yer almaktadır. Bitüme karıştırıldığı zaman, uçlardaki rijit polisitrin bloklar polisitrin bölgeleri oluşturup orta kısımdaki polibütadin zincirini üç boyutlu bir şebeke yapısı halinde birbirine bağlar. Şekil 3.1' de üç boyutlu SBS yapısı verilmiştir. Bu şebeke oluşumu sonucunda ise modifiye bağlayıcı elastisite değerinde artışlar meydana gelir. Modifiye bağlayıcının ısıtılması ile polisitrin blokları yavaş yavaş ayrışıp bitümlü karışımın karıştırılma ve sıkıştırılma işlemlerine olanak sağlar. Tekrar soğuma ile birlikte polimer matrisi bir kez daha oluşur ve karışımın hizmet ömrü boyunca özelikleri üzerinde iyileştirmeler sağlar.

Polimer modifikasyonunda sıkça karşılaşılan problemlerden biri de bitümün iç yapısında ortaya çıkan bozulmadır. Bu bozulma sonucunda faz ayrışımı meydana gelir ve bitüm ile modifiyer ayrışır. Çalışmada kullanılmış olan katkı maddesinde ise bu problem ile karşılaşılmamış, katkı maddesi homojen bir yapıda kalmıştır. Özelikle karışımın stoklanma aşamasında kendini gösteren bu problemin yaşanmadığı, 140°C' de yedi gün boyunca stokda bekletilen malzemenin en alt ve en üst kesimlerinden alınan numunelerin aynı yumuşama noktalarını vermesiyle kanıtlanmıştır. Şayet modifiye karışımda bir uyumsuzluk meydana gelmiş olsaydı, katkı maddesi stokdaki karışımın üst kesimlerinde yoğunlaşacaktır.



Şekil 3.1 Üç boyutlu SBS yapısı

3.3 Cariflex TR-1101 Katkılı Bağlayıcıların Laboratuar ve Arazi Performansları

Standart ampirik testler – penetrasyon ve yumuşama noktası – bu tip modifiye bağlayıcıların özeliklerini uygun şekilde ölçmemektedir, çünkü bu testlerden hiçbiri anahtar parametre olan elastik geri kazanımı ölçmez. Buna karşın, Avrupa' da giderek yaygınlık kazanan ve Almanya' nın polimer modifiye bitümlerin spesifikasyonunun bir parçası olarak benimsediği testlerden biri düktilite geri kazanım testidir.

Bu testte 3 cm uzunluğunda bir test örneği 13°C' de 20 ila 50cm' ye kadar uzatılıp iki parça halinde kesilir. Bir saat sonra elastik geri kazanması, uygulanan basıncın yüzdesi olarak okunur. Şekil 3.2' deki sonuçlar, 50 cm' ye uzatıldığında SBS ilavesinin bitümün geri kazanımında, polimer ağın sürekli olmadığı %3' de dahi önemli ölçüde iyileştiğini göstermektedir.

Şekil 3.3' de gösterilen Fraass kırılma noktası ısısındaki azalmanın da gösterdiği gibi, düşük ısılarda gerek kohezif güç, gerekse esneklik daha iyi hale gelmiştir.

Şekil 3.4' de, bitüme Cariflex TR-1101 ilave edilmesiyle elde edilen yumuşama noktasındaki artış gösterilmiştir. Yumuşama noktasında %4 ile %6 arasındaki belirgin artış, bu konsantrasyon düzeyinde bitümde sürekli bir üç boyutlu polimer ağı oluşturulduğunu göstermektedir.

Sürekli yükleme kullanılarak gerçekleştirilen Marshall testleri ve statik testler, malzemelerin elastik olarak hareket etmesine imkan vermemekte, bu nedenle SBS modifiye asfaltın deformasyon dirençlerini olduğundan düşük göstermektedir.

Bitümlü karışım performansının en iyi ölçümü, tekerlek izi ve dinamik sünme testleri gibi simülasyona dayalı testler ile elde edilir. Shell Laboratuarları' nda (Amsterdam) asfalt betonu karışımları, 3.25m dış çap ve 0.7m genişlikteki dairesel bir test yolunda değerlendirilmiştir. Bu laboratuarda, sıcaklık 60 °C' ye kadar, tekerlek yükleri 20 kN' a kadar ve hız da 16 km/sa' e kadar uygulanabilir. Tüm bu koşullar altında tekerlek izi oluşumu tekerlek turlarının sayısının bir fonksiyonu olarak kaydedilir. Yoğun asfalt betonu kaplamalar, çimento ile stabilize edilmiş taban katmanları üzerine 70mm kalınlığında geleneksel ve Cariflex TR-1101 ile modifiye edilmiş bitümler kullanılarak test edilmiştir. Şekil 3.5' de verilen sonuçlar 10mm deformasyonu gerçekleştirmek için gereken tekerlek tur sayısını göstermektedir. Bitüme %3 oranında Cariflex TR-1101 ilave dilmesiyle bu miktarda deformasyon oluşması için gereken tekerlek tur sayısının 10 kat arttığı görülmektedir. Katkı yüzdesinin artırılması halinde elde edilen sonuçlar daha da çarpıcıdır.

Arazi koşullarını iyi temsil eden ve simülasyon olarak değerlendirilebilecek bir yöntem de dinamik sünme testidir. Genellikle 40 veya 50°C' de yapılan bu testte 0.1 MN/m^2 basınç 0.2 saniye süreyle uygulanır ve bunu 1.8 saniyelik dinlenme periyodu izler, bu yükleme boşaltma çevrimi 1800 kez yani 1 saat süreyle tekrarlanır.

Şekil 3.6' da verilen dinamik sünme sonuçları, testin son yük uygulamasındaki geri kazanma yüzdesini göstermektedir.

Agrega ile bitüm arasındaki yapışmayı ve bitümün kohezyonunu ölçmek üzere Butt-Joint testi gerçekleştirilmiştir. Bu testte, 0.1mm' lik bitüm tarafından bir arada tutulan iki agrega parçasını birbirinden ayırmak için gereken en fazla güç kaydedilmiştir. %3 SBS oranında, aynı nüfuzdaki geleneksel bitüme yakın değerler alınmış, fakat SBS oranı %4-6 mertebesine getirildiğinde oluşan sürekli polimer ağı yapışma gücündeki artışı beklenen değerlerin üzerine çıkarmıştır.

Shell Araştırma Laboratuar' ında (Amsterdam), gerek geleneksel bağlayıcılı gerekse Cariflex TR-1101 ilave edilerek hazırlanmış karışımların sınırlı soğumadaki düşük ısı tepkileri incelenmiştir. Akustik emisyon tekniği ile test edilen örneklerle bağlantılı son derece hassas mikrofonlar "olay" adı verilen ve asfalt betonundaki bitüm soğuduğunda meydana gelen çatlama başlangıcı ve/veya yayılmasına işaret eden şok dalgalarını algılar. Şekil 3.7' de modifiye edilmiş bitümlerin geleneksel bitümlere oranla daha yüksek performans gösterdikleri açıkça görülmektedir.

Cariflex TR-1101 arazi uygulamaları

Her ne kadar laboratuar çalışmaları performans açısından önemli veriler ortaya çıkarsa da, gerçek arazi koşullarında yapılan uygulamalardan elde edilen sonuçlar, performans değerlendirmesinde büyük öneme sahiptir. Aşağıda dört ayrı yerde yapılmış olan arazi uygulamalarından bahsedilmiştir.

St. Quentin Köprüsü – Fransa

katkı malzemesinin ilk tam ölçekli yol uygulaması, Mart 1976' da Fransa' da St. Quentin Köprüsü' nde gerçekleştirilmiştir. 600m uzunluğundaki köprü, kasabayı çevreleyen ve yüksek trafik yoğunluğuna sahip çevreyolu üzerinde yer almaktadır. Cariflex TR-1101 katkılı bitümlü karışım, 7cm kalınlığında asfalt betonu aşınma tabakası olarak serilmiş ve 9 yıllık kullanım sonrası alınan karot numuneleri test edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; modifiye bağlayıcı özelikleri açısından önemli herhangi değişikliğe uğramamış ve testlerdeki ısı ve yükleme süresinden önemli ölçüde etkilenmemiştir. Karışım ise mekanik özeliklerini ve özelikle yorulma direnimini korumuştur. 1994 yılında, köprü zemini hala mükemmel bir yapı durumuna sahiptir.

Almanya' daki uygulamalar

SBS türü katkı malzemeleri Almanya' da 1980' li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. 1981 yılında, yoğun trafiğe sahip olan Leiman B3 yolunda Cariflex TR-1101 katkılı bitümlü karışım kullanılmış ve 10 yıllık bir zaman zarfında özeliklerini önemli ölçüde muhafaza etmiştir. Hamburg' da bir köprü ve daha ağır araç trafiğine sahip A8 Otobanı – Drakensteiner Tepesi kesimi gibi birçok yerde uygulamalar başarı ile gerçekleştirilmiştir.

İngiltere' deki uygulamalar

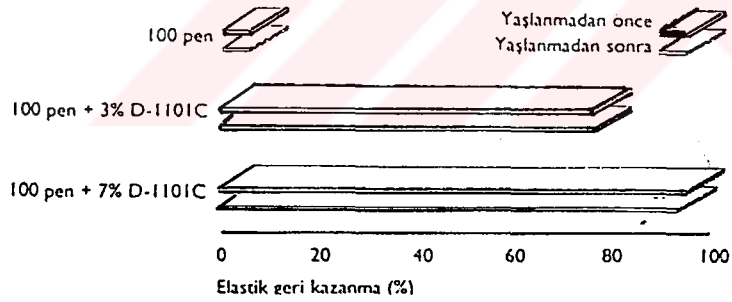
%7 Cariflex TR-1101 ile modifiye edilmiş bitümlü karışımlar İngiltere' de 1986 yılından başlayarak, İskoçya' daki Strathclyde gibi en kuzeydeki yerlerden, Kant gibi en güneydeki bölgelere kadar yaklaşık 1.000.000m^2 sıcak ları ile döşenmiştir.

Çimentolu temel tabakaları üzerine serilen bitümlü karışımlarda ortaya çıkan yansıma çatlakları, SBS katkılı asfaltların olası faydalarını gündeme getirmiş ve Suffolk Bölgesi – A45 Bury St Edmunds çevre yolunda, 1990-1991 kışında Cariflex TR-1101 katkılı bitümlü karışımları kullanılarak 6km' lik bir uygulama yapılmıştır. Kaplama tabakasının inşaatı süresince meydana gelen hava sıcaklığı değişimleri ve düşük ısılar, modifiye karışımın uygulanması işlemlerinde geleneksel karışımlardan farklı problemler meydana getirmemiştir. Kaplama yapılan alanın %60' ında hem 50mm kalınlığındaki temel tabakasına, hem de yine 50mm kalınlığındaki aşınma tabakasına %7 oranında Cariflex TR-1101 ilave edilmiştir. Kalan %40' lık bölümde ise 60mm kalınlığındaki SBS katkılı temel tabakası üzerine 50mm kalınlığında geleneksel aşınma tabakası serilmiştir.

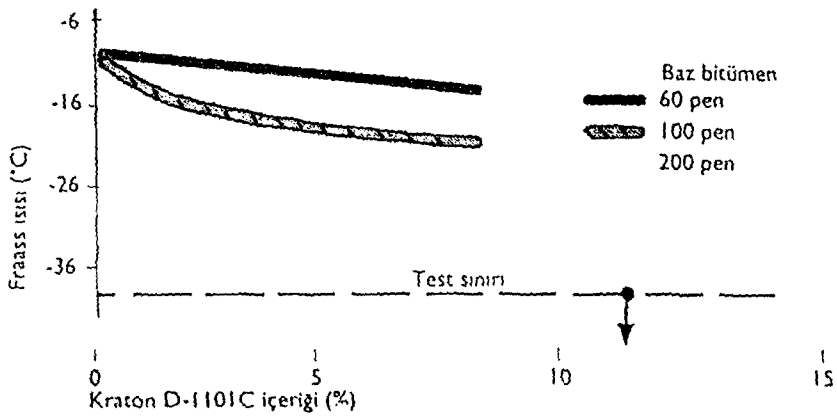
1991 yılında, Londra yakınlarındaki M25 çevre yolunun 23. ve 24. Kavşakları arasındaki kesimin yaşını göstermeye başladı düşünülmüş ve genişletme çalışmaları yapılıncaya dek onarım çalışmalarını asgariye indirmek için 90mm kalınlığında bitümlü kaplama yapılmasına karara verilmiştir. Daha önce, beş yıllık bir süre zarfında Hertfordshire' daki A10 Hoddesdon kavşağında tatmin edici bir performans sergilediği için, burada da yansıma çatlaklarını engellemek amacıyla Cariflex TR-1101 katkılı bitümlü karışımların kullanılmasına karar verilmiştir.

Amerika' daki uygulamalar

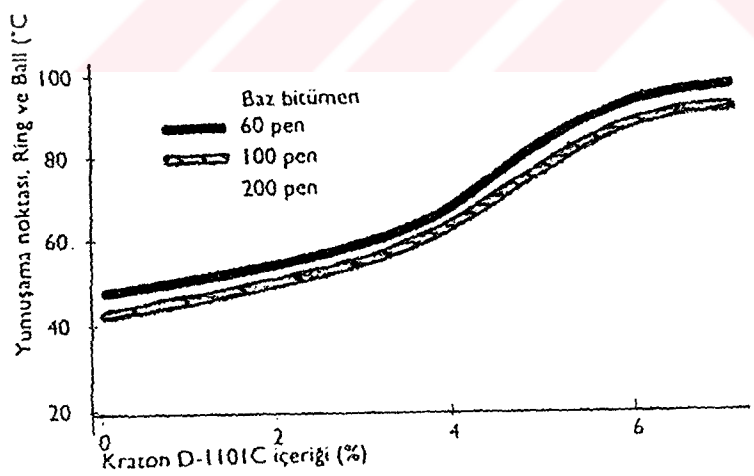
Ortalama sıcaklığın en sıcak ayda 40°C, en soğuk ayda ise 0°C olduğu Mojave Çölü'ndeki otoyol, yüksek miktarda ticari taşıt trafiği de eklenince Cariflex TR-1101 katkı malzemesi için zor bir deney niteliği kazanmıştır. Yolda timsah sırtı çatlakların yanı sıra enine ve boyuna doğrultuda çatlaklar meydana gelmiştir. Olumsuz etkilere tamamen açık olan bu ortamda SBS etkililiğini değerlendirmek üzere, California Ulaştırma Dairesi Otoyol 40' da 1987 Aralık ayında bir arazi denemesi gerçekleştirdi. Yalnızca bir yıl sonra geleneksel bağlayıcılı , asgari trafiğin geçtiği en sol şeritte önemli ölçüde sertleşme görüldü; iki yıl sonra çatlamalar belirmeye başladı ve dört yıl sonra bu kesitte ciddi yorulma ve yansıma çatlakları gözlemlendi. Buna karşın, trafik yoğunluğunun daha fazla olduğu diğer şeritlerde, bağlayıcılarda çok az miktarda sertleşme meydana geldi ve test kesitlerinde herhangi çatlama, akma ve deformasyon işaretine rastlanmadı.



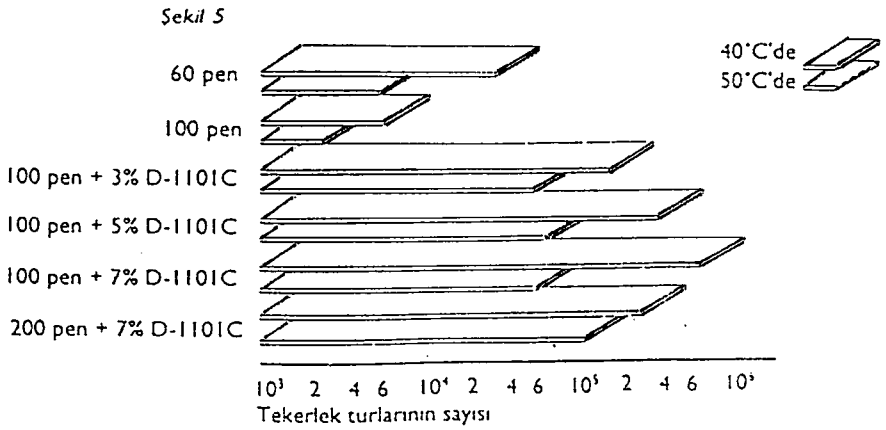
Şekil 3.2 Düktilite geri kazanımı



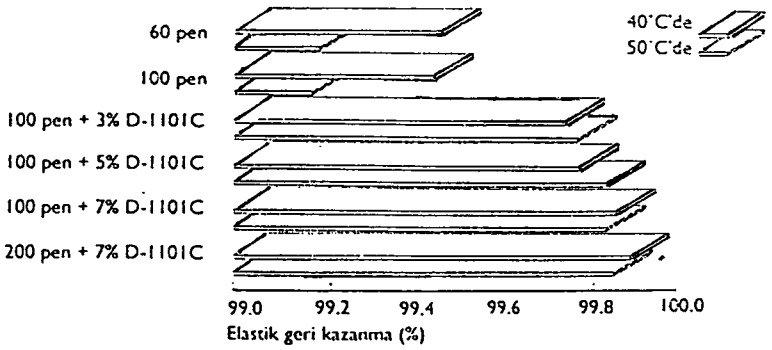
Şekil 3.3 Fraass kırılma ısısı – Cariflex TR-1101 miktarı ilişkisi



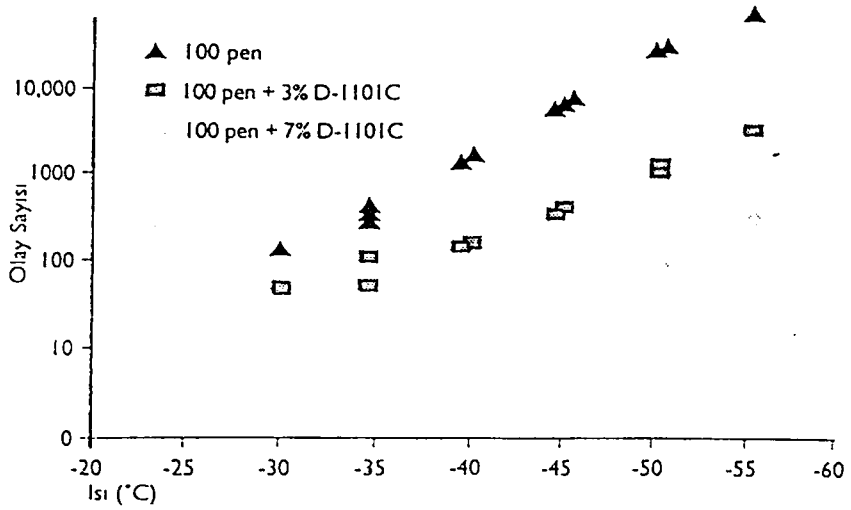
Şekil 3.4 Yumuşama noktası – Cariflex TR-1101 miktarı ilişkisi



Şekil 3.5 Tekerlek tur sayısı – Cariflex TR-1101 miktarı ilişkisi



Şekil 3.6 Elastik geri kazanım miktarları



Şekil 3.7 Akustik deney sonuçları

4. BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve ÇALIŞMADA UYGULANAN DENEYLER

Bu bölümde, bitümlü karışımların performanslarının değerlendirilmesi ile ilgili detaylı bir açıklama yapıldıktan sonra, karışımın performansını değerlendirmek için bu çalışma kapsamında uygulanan deneyler ve değerlendirilmeleri verilmektedir.

4.1 Bitümlü Karışımların Performanslarının Değerlendirilmesi

Karayolu üstyapısı için iki önemli kavram; yapısal tasarım ve karışım tasarımıdır. Yapısal tasarımda amaç, bitümlü bağlayıcılı tabakanın tabanında oluşan ve asfalt betonu içerisinde çatlamalara sebep olan çekme gerilmelerine ve taban zemini üzerinde oluşan ve basınç deformasyonlarına dayanıklı bir üstyapı tasarlamaktır (Scung, 1993). Karışım tasarımdaki amaç ise, karışımın optimize edilmesi ve yapısal tasarım için gerekli verilerin mantıklı ve doğru tahminidir. Bu tip değerlendirme yöntemleri matematiksel yöntemlerle de desteklenmelidir.

Isısal (veya düşük sıcaklık) çatlakları, yorulma çatlakları ve tekerlek izi (veya kalıcı deformasyon) durumları bitümlü bağlayıcılı üstyapılarda karşılaşılan tehlikeli durumlardır ve çoğu çalışmada bitümlü bağlayıcılı üstyapıların performansının ölçülmesi bu üç duruma göre değerlendirilir.

Nem bozulmaları, kopmalar, sürtünme katsayısındaki azalma gibi sürüş güvenliğini azaltacak başka tehlikeli durumlar da vardır, ancak günümüze değin yapılmış olan çalışmaların çoğu yukarıda ifade edilen üç tehlikeli durum için yapılmıştır. Tüm bunlara rağmen yük ve çevre şartları bakımından üstyapının performansı veya servis yeteneği indeksindeki azalma ;

- yorulma çatlakları
- ısısal çatlaklar
- kalıcı deformasyon ve
- nem bozulması nedenleriyle de olmaktadır.

Üstyapı performansı üzerinde ciddi bir etkiye sahip bir diğer olay da bitümlü karışımın sertleşmesi veya yaşlanmasıdır. Ayrıca yüzey bozulmaları, kopmalar, yüzey sürtünmesindeki azalma gibi etkenlerin de değerlendirilmesi üstyapı performansı açısından önemlidir.

AASHO' da 20°C (68°F)'deki elastisite modülü ile karışım değerlendirilmektedir (AASHO, 1993), fakat bu değer tek başına karışımın stabilite, durabilite gibi özelliklerinin değerlendirilmesinde yeterli değildir. Bu nedenle üstyapıda oluşan bozulma durumlarını değerlendirmek için farklı malzeme özellikleri ve deney şartları gereklidir.

4.2 Çalışmada Uygulanan Deneyler

Bu çalışmada, bitümlü karışımların performanslarının tespit edilmesi için gerçekleştirilmiş olan deneyler şunlardır:

- Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi
- Dolaylı Çekme Deneyi
- Statik Sünme Deneyi
- Dinamik Sünme Deneyi (Tekrarlı Sünme)

4.2.1 Dolaylı çekme mukavemeti deneyi

Bu yöntem, bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti özelliklerinin tespitini içerir ve dolaylı çekme mukavemeti bitümlü karışımların ısısal ve yorulmadan dolayı oluşan çekme gerilmelerini karakterize eder.

Bu deney sonucunda bulunan dolaylı çekme mukavemeti değeri ve bozulma deformasyonu, bitümlü karışımların yorulma çatlaklarının oluşma potansiyeli ve karışımın optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde kullanılır. Deney standardı olarak birimler inch ve pound olarak hesaplanır. Deneyde standart olarak verilen uzunluk birimi inch' in yanı sıra, bilgi edinilmesi amacıyla parantez içerisinde cm olarak karşılıkları da verilmiştir.

- Deneyin Özeti

Deneyde; sabit bir deformasyon altında, silindirik asfalt numunesine Şekil 4.1' de verilen şekilde bir basınç yükü, numune bozuluncaya dek uygulanır. Deney aşamasında bozulma; uygulanan yükte bir artışın olmadığı veya en büyük yükün oluştuğu zaman olarak tanımlanır ve numunenin dayanım göstermiş olduğu en büyük yük dolaylı çekme mukavemeti olarak alınır. Deney aşamasında yatay ve düşey yönde oluşan yer değiştirmeler de tespit edilir.

Önemi ve Kullanımı

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

Tüm bu amaçlar ile kullanılmasının yanı sıra bitümlü karışımda kullanılan malzemelerin bir yol üstyapı malzemesi olarak kullanılabilirliği hakkında bilgi edinmek amacıyla da kullanılmaktadır.

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

-Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilirler. Deneyde 4″ (10 cm) çaplı numuneler kullanılıyor ise numunenin min 2″ (5 cm) yüksekliğinde ve Dmax (maksimum dane çapı) <1" (2.5 cm) olmalıdır.

-Deneyin Yapılışı

- Numunelerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edilir.

- Numuneler istenen sıcaklıkta ± 1 °C sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinceye kadar beklenir. Eğer numunelerin gerçek sıcaklıkları ölçülemiyor ise numuneler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat boyunca bekletildikten sonra deneye tabii tutulurlar.

- Numuneler deney ekipmanına yerleştirilir.

- Ön hazırlık amacıyla numunelere yarı sinüzoidal yük uygulanır ve numunelerin yük doğrultusuna dik eksenleri işaretlenir.

- Ön hazırlık deney sonucunda yatay eksen boyunca oluşan deformasyonlar ölçülür ve numunelerin elastisite modülleri tespit edilir.

- Deney esnasında numuneye yük doğrultusuna dik doğrultuda sabitlenmiş deformasyon uygulanır. Deformasyon miktarı 25 °C sıcaklık ve daha üzerindeki sıcaklıklarda dakikada 2″ (5 cm) ve 10 °C ve daha düşük sıcaklıklarda ise dakikada 0.5″ ve 0.65″ (1.27 ve 1.65 cm) olacak şekilde yük uygulanır.

- Deney esnasında numuneye uygulanan yük ve yatay ve düşey doğrultuda oluşan deformasyonlar yükleme zamanının tamamında kaydedilir. Yatay ve düşey deney ekipmanında bir bozulmanın oluşmaması için numunenin kırılmasından önce deneyin durdurulması önerilir.

-Hesaplamalar

$$St = \frac{Pf}{h} * 0{,}156 \qquad (4{,}1)$$

St = Dolaylı Çekme Mukavemeti (psi)
Pf = Numunenin bozulduğu andaki yük (pound)
h = Numune yüksekliği (inch)

Poisson's Oranı γ

$$\gamma = \frac{DR * 0{,}0673 - 0{,}8954}{DR * (-0{,}2494) - 0{,}156} \tag{4,2}$$

$$DR = \frac{Yt}{Xt} \tag{4,3}$$

Yt= Düşey deformasyon

Xt= Yatay deformasyon

Elastisite Modülü (E)

$$E = \frac{Sh}{Xt} * (0{,}2692 + \gamma * 0{,}9974) \tag{4,4}$$

$$Sh = \frac{P}{Xt} \tag{4,5}$$

Çekme Deformasyonu εt (mikron)

$$\varepsilon t = \Delta h * \left[\frac{0{,}03896 + \gamma * 0{,}1185}{0{,}0673 + \gamma * 0{,}2496} \right] \tag{4,6}$$

Δh=Toplam yatay deformasyon

Basınç Deformasyonu εc (mikron)

$$\varepsilon = \Delta v * \left[\frac{-0{,}1185 - \gamma * 0{,}03896}{-0{,}8954 + \gamma * 0{,}156} \right] \tag{4,7}$$

Δv=Toplam düşey deformasyon

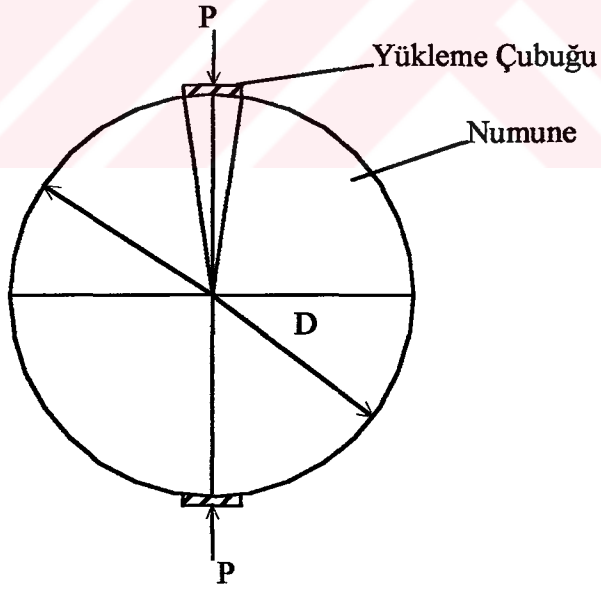
4.2.2 Dolaylı çekme deneyi

Bu deneyin amacı, laboratuarda hazırlanmış veya araziden alınmış karot numunelerine tekrarlı yük uygulamak suretiyle bu numunelerin elastisite modülünün tespit edilmesidir. Deney sıcaklıkları (5, 25, 40°C) ve yükleme periyotları değişkendir. Her bir farklı sıcaklık ve yükleme periyodu için numunelere ait elastisite modülünün değerleri ayrı ayrı belirlenir.

Elastisite modülü değerleri, malzemelerin relatif kalitesini değerlendirmesinin yanı sıra kaplama tasarımı, değerlendirme ve analizleri için girdi üretmeye yaramaktadır. Bu deney sayesinde sıcaklık, yükleme miktarı ve süresi gibi. etkileri araştırılabilmektedir.

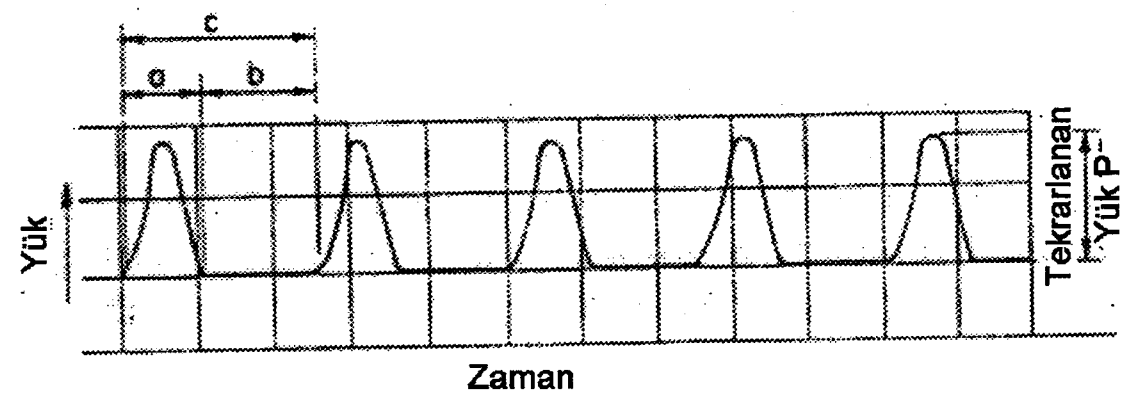
- **Deneyin özeti**

Bitümlü karışımların dolaylı çekme gerilmesi deneyi ile elastisite modülü değerlerinin tespit edilmesinde numunelere yarı sinüzoidal (haversin) bir formda basınç yükü uygulanması suretiyle yapılır. Yük silindirik asfalt numunesi üzerine Şekil 4.1' de verildiği gibi uygulanır (Şekil 4.1)



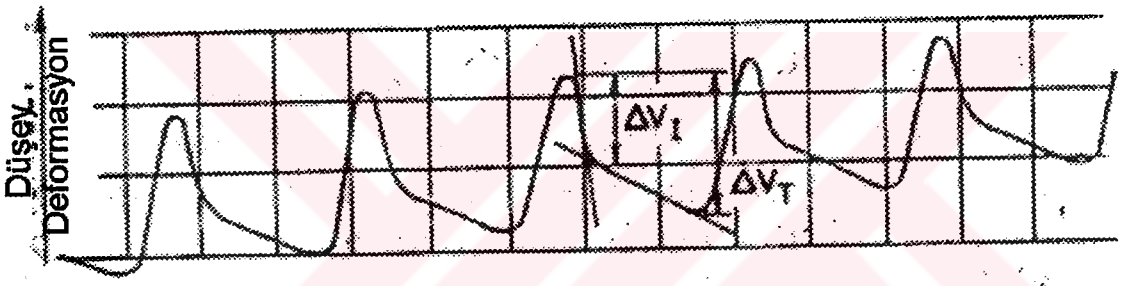
Şekil 4.1 Numuneye yükün uygulanma şekli

Şekil 4.2' de verilen süre-yük eğrisine uygun olarak yapılan deney sonucunda numunenin nihai yatay deformasyonu ölçülür ve bir poisson oranı kabul edilerek numunenin elastisite modülü hesaplanır.

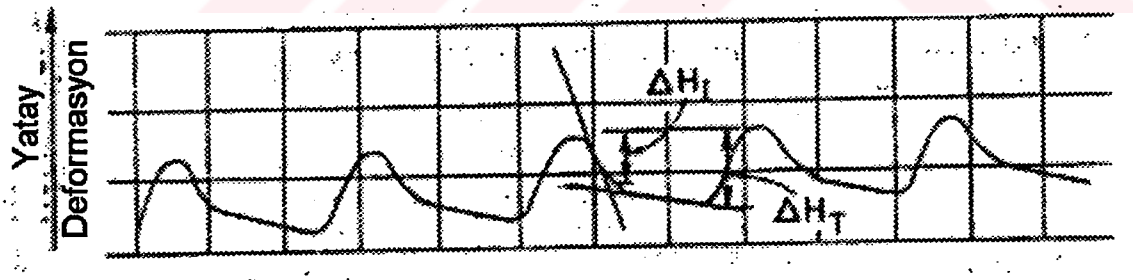


(a) Yük-Zaman

a = Yüklü Süre
b = Yüksüz Süre
c = Tekrar Süresi (Periyot)



(b) Düşey deformasyon - Süre İlişkisi



(c) Yatay deformasyon - Süre İlişkisi

Şekil 4.2 Uygulanan yük ve deformasyon şekilleri

- **Deneyin yapılışı**

-Numuneler sıcaklık kontrollü hücreye yerleştirilerek belirlenen sıcaklığa gelmesi için 24 saat beklenir. Numunelerin istenen sıcaklığa gelip gelmediği kukla numune içerisine yerleştirilen bir derece ile tespit edilir.

-Numuneler deney ekipmanına yerleştirilir.

-Ön hazırlık yüklemesi yapılarak numunenin yerleşmesi sağlanır.

-Numuneye dolaylı çekme mukavemeti değerinin % 10'u ile 50'si arasında değişen bir yük, belirlenen bir periyot boyunca beş kez yarı sinüzoidal (haversin) olarak uygulanır ve numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçülür.

-Deney aşamasında yük tekerrüründe 0.33, 0.5 ve 1 Hz'lik frekansların uygulanması önerilmektedir.

-Elastisite modülü değeri için bir numuneye iki defa deney uygulanır. İlk deney tamamlandıktan sonra numune 90° döndürülerek ikinci kez deneye tabii tutulur ve elastisite modülü değeri olarak ise iki deney sonucunun ortalaması alınır.

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

- **Hesaplamalar**

Her bir deney sonucu için Elastisite modülü değerleri, aşağıda verildiği şekilde;

$$E = \frac{P * (\nu + 0{,}27)}{h * \Delta h} \qquad (4{,}8)$$

E =Elastisite Modülü (Mpa)

P =Uygulanan yük (kN)

ν =Poisson oranı

h =numune yüksekliği (in.)

Δh =Geri dönen deformasyon

denklemi ile hesaplanır.

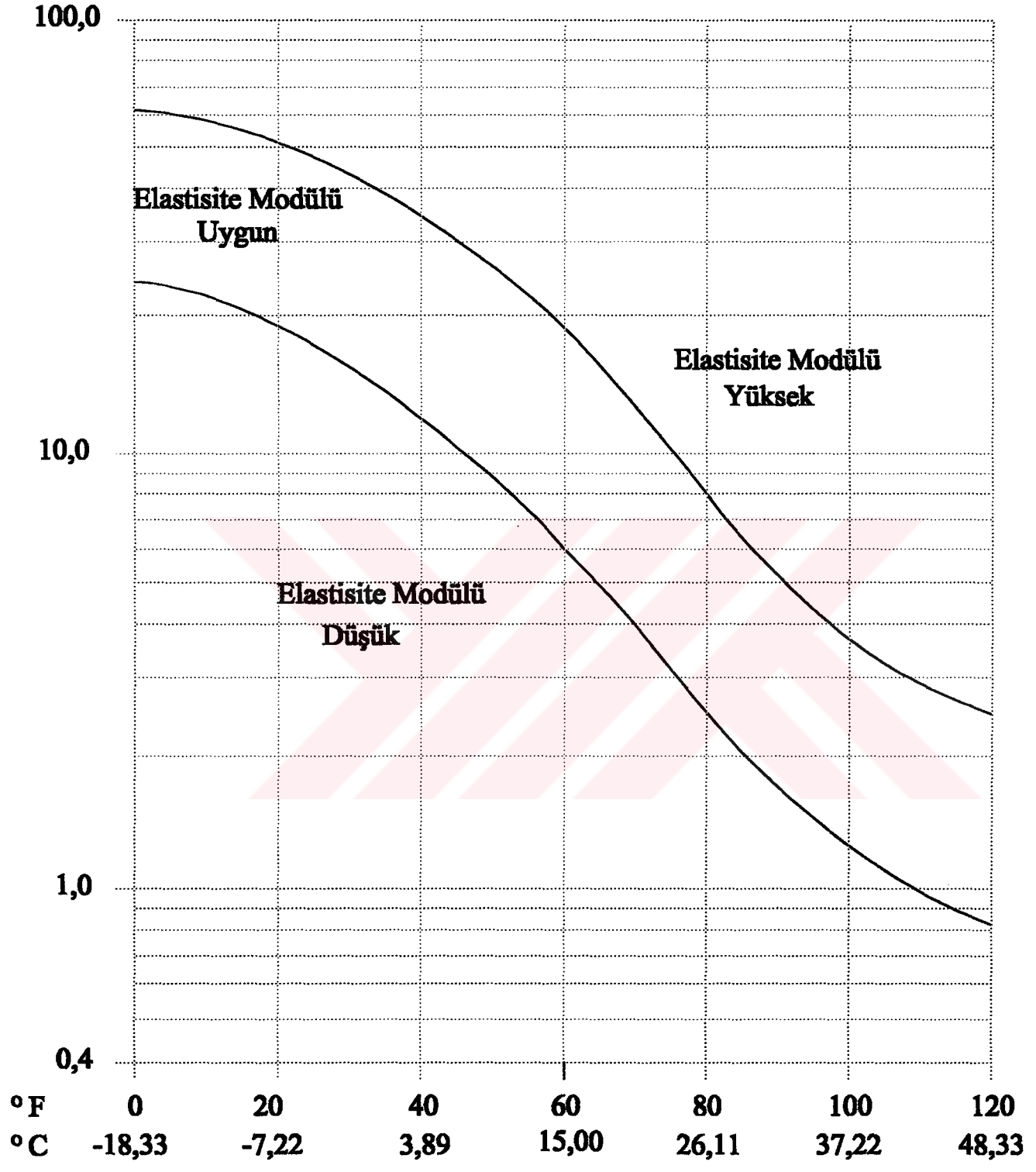
Karışımların istenilen rijitliğe sahip olup olmadıklarının değerlendirilmesinde AAMAS' da verilmiş olan nomoğraftan faydalanılmaktadır. Şekil 4.3' de verilen nomoğrafta sıcaklığa bağlı olarak dolaylı çekme deneyi sonucunda elde edilen elastisite modülü değerleri işlenir. Şekil üç bölgeden oluşmaktadır. Bölge 1, elastisite modülünün yüksek, dolayısıyla karışımın rijitliğinin fazla olduğu kısımdır. Bölge 3' te, elastisite modülünün düşüktür, yani karışımın tekerlek izi oluşumuna karşı direnimi düşüktür. Bölge 2 ise, karışımın rijitliği açısından en uygun kısımdır.

4.2.3 Statik sünme deneyi

Bu deneyde yoğun gradasyonlu sıcak karışımların dairesel ve tek eksenli basınç yüklemesi altında sünme modülü değerlerinin belirlenmesini içerir. Tek eksenli basınç deneyi asfalt betonu karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı direnimlerini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Bu deney yöntemi yoğun bitümlü karışımlara ve karot numunelerine uygulanabilir.

Bu deneyden elde edilen sünme modülü değeri,elastik teori veya nonelastik teori yardımıyla ısı ve dingil yükleri etkisi altındaki asfalt betonu karışımların ,düşük sıcaklıklardaki çatlama potansiyeli veya tekerlek izinin hesaplanması ve rijitliğinin tahmininde kullanılabilir.

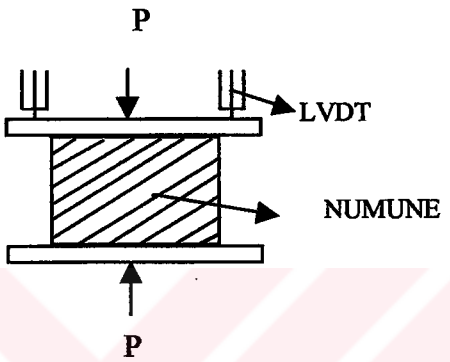


Şekil 4.3 Karışımların rijitliklerinin uygunluğu

-Deneyin Özeti

A. Tek Eksenli Basınç;

Sabitlenmiş bir zaman boyunca, sabit büyüklükte bir yük sıkıştırılmış silindirik numune üzerine uygulanır. Numunenin tek eksen boyunca deformasyonları ölçülür ve yükün üzerinde bulunduğu sürenin herhangi bir parçası için bir basınç sünme modülü hesaplanır. Üzerine uygulanan yükün kaldırılmasından sonra, belirli bir süre içinde geri dönen deformasyon ölçülür. Şekil.4.4'de tek eksenli basınç deneyi verilmiştir.



Şekil.4.4 Tek Eksenli Basınç

B. Dolaylı Çekme;

Sabit bir yük, belirli bir zaman boyunca, dairesel eksen doğrultusunda numuneye uygulanır. Numunenin yatay deformasyonu ölçülür ve numunenin dolaylı çekme sünme modülü hesaplanır. Yükün kaldırılmasından sonra, belirli bir süre içinde geri dönen deformasyon ölçülür.

-Önemi ve Kullanımı

Sünme modülü değeri, numunelerin değerlendirilmesi yanında üstyapı tasarımında ve değerlendirme modellerinde kullanılabilir. Deney; sıcaklık etkisinin, yük büyüklüğünün, bağlayıcı içeriğinin ve yükleme süresinin etkisinin değerlendirilmesinde de kullanılabilmektedir. Tek eksenli silindirik numuneler, bir basınç uygulanarak veya uygulanmaksızın da test edilebilirler.

Sünme modülü , karışımın fiziksel özellikleri ile birlikte değerlendirilirse karışımın karakterize edilmesine de yardımcı olabilir. Buna ilaveten, belirli bir trafik ve çevre şartları altında karışımın bir karayolu malzemesi olarak uygunluğu hakkında bilgi edinmek amacıyla da sünme modülünden faydalanılabilir.

-Eksenel yükleme ekipmanı
-Sıcaklık hücresi
-Deformasyon ölçüm ekipmanı
-Yük ölçüm ekipmanı
-Kayıt ekipmanı

-Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri Marshall Tasarım Deneyine uygun olarak üretilirler. Deney numunelerinin minimum yüksekliği 6" (15 cm) olmalıdır.

-Deneyin Yapılışı

-Numunelerin deney öncesinde birim hacim ağırlıkları tespit edilir.
-Numuneler istenen sıcaklıkta ±1°C sıcaklık kontrollü bir hücreye yerleştirilir ve deney sıcaklığına gelinciye kadar beklenir. Eğer numunelerin gerçek sıcaklıkları ölçülemiyor ise numuneler sıcaklık kontrollü hücrede 12 saat bekletildikten sonra deneye tabi tutulur.
-Numuneler deney ekipmanına yerleştirilir.
-Sabitlenmiş olan numunenin bozulmasına sebep olan yükün %5 ile %25 arasındaki basınç yükü uygulanır.
-Yarı sinüzoidal ön hazırlık gerilmesi 1 sn'lik periyotta 0.1 rise time , 0.9 rest time olacak şekilde uygulanır.
-Ön hazırlık sonunda geri dönen düşey deformasyon ölçülür ve buradan da elastisite modülü hesaplanır.
-Ön hazırlık yükünün sıfıra inmesi ile, ±%2' lik hata ile sabitlenmiş yük uygulanır.
-Tüm yükleme süresince düşey deformasyonlar kaydedilir. Yük 60 dakika ±15 sn boyunca uygulanır.
-Sabitlenmiş yükün 60 dakika boyunca uygulanmasının ardından , geri dönen deformasyonun ölçülmesi için ilave bir 60 dakika yük uygulanmaksızın düşey yer değiştirmeler ölçülür.

-Hesaplamalar

Her bir numunenin 1, 10, 100, 1000 ve 3600. sn' deki Sünme Modülü Değerleri hesaplanır. İlave olarak karışımların değerlendirilmesi için deformasyon-süre eğrisi de çizilebilir.

Tek eksenli basınç numunelerine ait hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

$$Ecq(t) = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c(t)} \qquad (4,9)$$

Ecq(t) =t anındaki sünme modülü (psi)

σc =Numunelere uygulanan basınç gerilmesi(psi)

εc(t) =t anında tek eksende oluşan deformasyon (in/ in)

$$\varepsilon_c(t) = \frac{\Delta v(t)}{l} \qquad (4,10)$$

l = Numune yüksekliği (in.)

Δv(t) =t anında düşey yönde oluşan yer değiştirme (in)

-Dolaylı Çekme Gerilmesi Numunelerine Ait Hesaplamalar Aşağıda Verilmiştir.

$$Ect(t) = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_t(t)} \qquad (4,11)$$

σ t= Numuneye uygulanan dolaylı çekme gerilmesi değeri

$$\sigma_t = \frac{P}{h} * 0,156 \qquad (4,12)$$

P =Numuneye uygulanan yük

εt(t) =Sünme deformasyonu (in / in)

$$\varepsilon_t(t) = \Delta h(t) * \frac{(0,03896 + \nu * 0,1185)}{(0,0673 + \nu * 0,2494)} \qquad (4,13)$$

Δh(t)= t anındaki yatay yer değiştirme (in)

v= poisson oranı

X= Numunenin geriye dönüş kabiliyeti

$$X = \frac{\Delta r(3600)}{\Delta vh(3600)} \qquad (4,14)$$

Δr (3600)= Deney sonunda tek eksenli basınç deneyinde geriye dönen düşey deformasyon veya dolaylı çekme deneyi için geriye dönen yatay deformasyon (yükün uygulandığı 2. 3600 sn' deki)

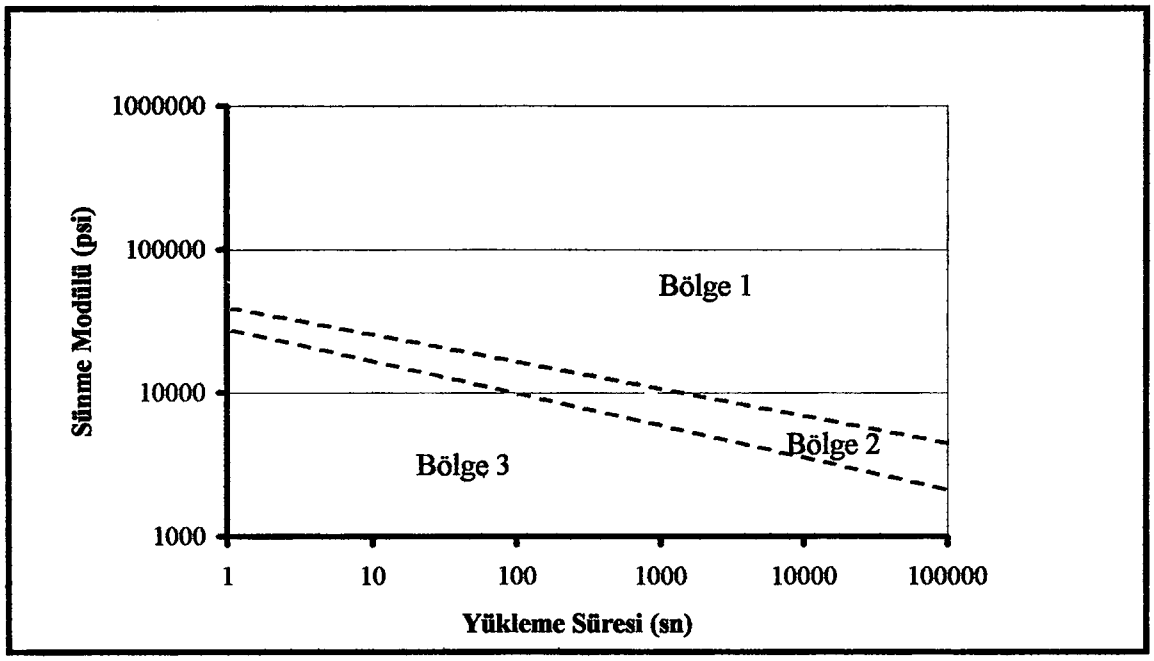
Δvh = Tek eksenli deneydeki düşey veya dolaylı çekme deneyindeki yatay deformasyon. Yüklü sürenin yani birinci 3600 sn' nin sonundaki deformasyonlar

Katkılı ve katkısız karışımların uygun bir Sünme Modülü değerine sahip olup olmadıklarının belirlenmesi için AAMAS' da verilmiş olan nomoğraftan faydalanılır (Şekil 4,5). Bu şekilde üç ana bölge vardır. Bölge 1' de tekerlek izi oluşma potansiyeli düşük, Bölge 2' de tekerlek izi oluşma ihtimali var fakat makul düzeyde, üçüncü bölgede ise tekerlek izi oluşma potansiyeli yüksektir.

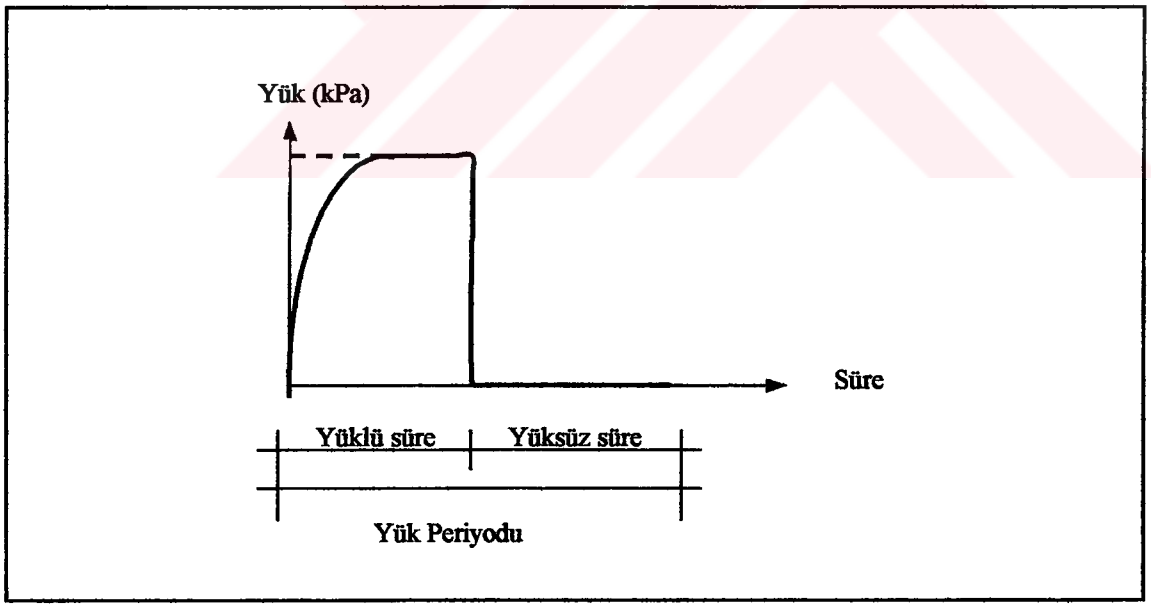
4.2.4 Tekrarlı sünme deneyi

Tekrarlı sünme deneyi, karışımların tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır.

Bu deneyde numuneler, belirli bir sıcaklıkta Şekil 4,6' da verildiği şekilde belirli vuruş periyotlarıyla yüklü ve yüksüz süreleri içermek şartıyla tek eksenli basınç yükü etkisinde bırakılır. Her bir yük tekrarından sonra numune içinde oluşan kalıcı deformasyonlar ölçülür.



Şekil 4.5 Sünme modülü nomoğrafi



Şekil 4.6 Tekrarlı yük uygulama şekli

5. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER ve DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, üzerinde deneylerin yapılmış olduğu karot numunelerde kullanılmış olan malzemeler ve uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar verilmektedir.

5.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Asfalt betonu karışımlarının iki ana bileşeni agrega ve bağlayıcı olarak bitümdür. Ayrıca karışım özeliklerinin iyileştirilmesi amacıyla katkı maddeleri kullanılmaktadır.

- **Agrega**

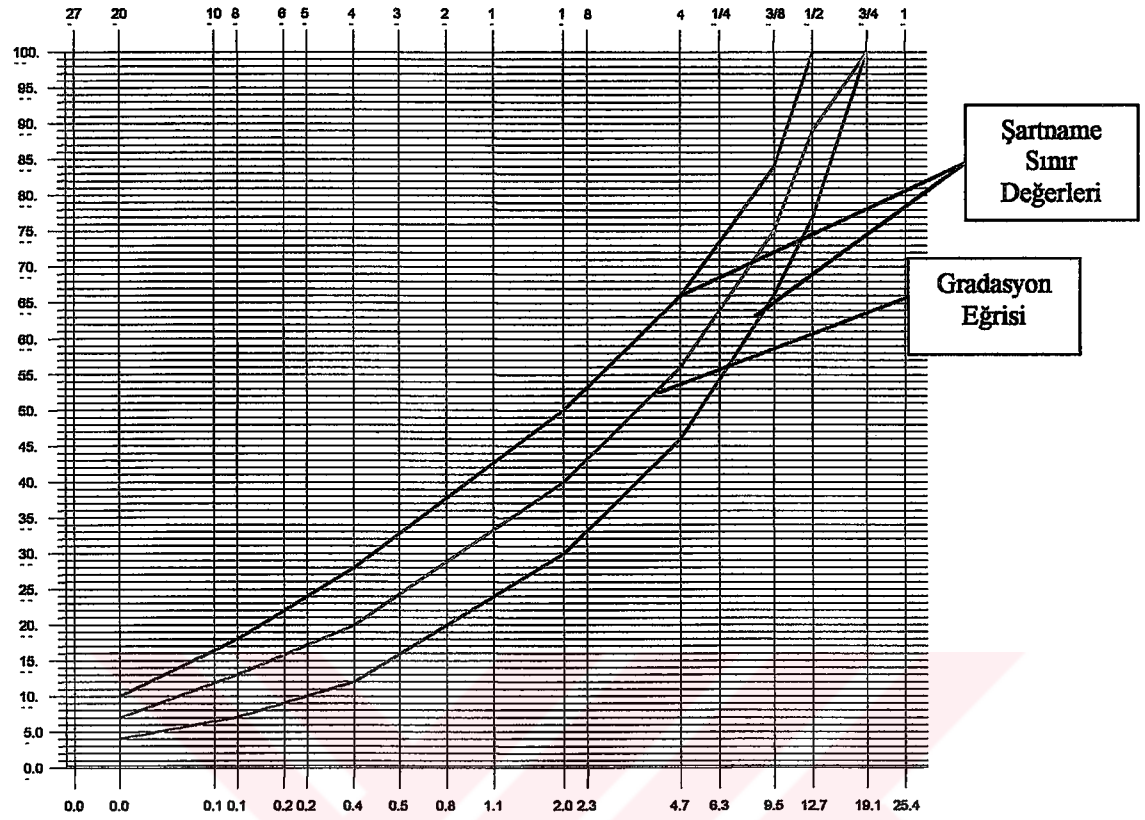
Çalışmada, üzerinde deneylerin yapıldığı karot numunelerde kullanılmış olan agrega Koyunbaba ve Kapaklı taş ocaklarından temin edilmiştir. Kullanılmış olan agreganın gradasyonu ve TCK Genel Müdürlüğü Tip 2 aşınma tabakasına ait şartname sınır değerleri Çizelge 5.1, gradasyon eğrisi ise Şekil 5.1' de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Agrega Gradasyonu

Elek Boyutu		Agrega Gradasyonu (% Geçen)		
No	mm	Şartname		Numune
200	0,074	9,2	5,2	7,4
80	0,177	14	7	10,3
40	0,42	18	12	13,6
10	2	40	32	36
4	4,76	64	54	59,4
3/8	9,52	80	70	75,4
1/2	12,7	90	80	85,1
3/4	19,1	100	100	100

- **Bitüm**

Deneylerin yapılmış olduğu karot numunelerde bağlayıcı olarak geleneksel 60-70 AC bitüm kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Agrega gradasyon eğrisi

- **Katkı Maddesi**

Katkı maddesi olarak "Shell Chemicals Europe" tarafından üretilen Cariflex TR-1101 kullanılmış ve bitüme ağırlık olarak %5 oranında katılmıştır. Bu katkı maddesinin ticari adı daha sonra Kraton D olarak değiştirilmiş olmasına rağmen bu çalışmada, katkılı bağlayıcının uygulandığı tarihte katkı maddesinin adı olan Cariflex TR-1101 kullanılmaktadır.

5.2 Çalışmada Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

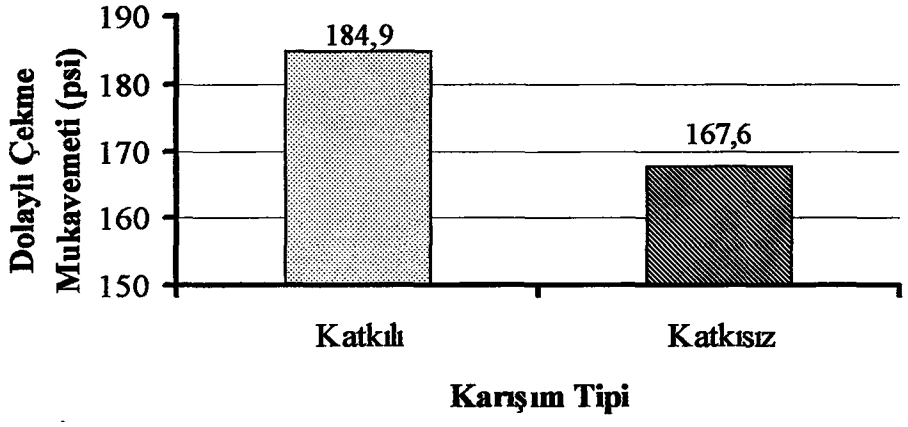
Çalışma kapsamında, araziden yeter sayıda temin edilmiş olan karot numuneler üzerinde uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.2.1 Dolaylı çekme mukavemeti deneyinden elde edilen sonuçlar

Bu deney, Bölüm 4' de anlatıldığı şekilde Marshall numunelerine 25 °C sıcaklıkta dolaylı çekme mukavemeti deneyi uygulanmıştır. Deney esnasında numunenin kırıldığı andaki yük ve düşey deformasyon okunarak kaydedilmiştir. Yapılan hesaplamalarda; Monismith, Tung-Wen Hsu, Baladi gibi araştırmacıların kabul ettiği şekilde karışımların Poisson oranı 0,35 alınarak yatay yönde oluşan deformasyonlar hesaplanmıştır (Monismith, vd., TRR1492, Tung-Wen, vd., 1996, Baladi, vd., 1989). Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2' de verilmiştir. Ayrıca, katkılı ve katkısız karışımlara ait dolaylı çekme mukavemeti değerleri Şekil 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Dolaylı çekme mukavemeti

Karışım Tipi	Numune				Yer Değiştirme		Deformasyon		Çekme Muk.
	No	Yükseklik (h)		(Pb)	Düşey Δv	Yatay Δh	Çekme εt	Basınç εc	St
		mm	in.	pound	(in)x10^{-3}	(in)x10^{-3}	(in/in)x10^{-4}	(in/in)x10^{-4}	(psi)
Katkılı	1	59,0	2,32	2832	78,7	14,5	75,28	123,62	190,23
	2	55,7	2,19	2558	63,0	11,6	60,22	98,90	181,99
	3	57,0	2,24	2626	82,7	15,2	79,04	129,80	182,53
	ort						71,52	117,44	184,91
Katkısız	1	47,0	1,85	1686	74,8	13,8	71,52	117,44	142,14
	2	55,5	2,19	2585	59,1	10,9	56,46	92,72	184,57
	3	57,4	2,26	2549	61,8	11,4	59,09	97,04	175,98
	ort						62,36	102,40	167,56



Şekil 5.2 Katkılı ve katkısız karışımların dolaylı çekme mukavemeti

5.2.2 Dolaylı çekme deneyinden elde edilen sonuçlar

Numuneler üzerine,ASTM D-4123-82 standardına uygun olarak Dolaylı Çekme Deneyi yapılmıştır. Dolaylı çekme deneyinde deneylerin uygulanma akış şeması ve numunelerin kodlandırma sistemi Şekil 5.3'de verilmiştir.

Şekil incelendiğinde de görülebileceği gibi deney katkısız ve katkılı bağlayıcılı numuneler üzerine uygulanmıştır. Deneysel çalışma aşamasında sıcaklık için üst sınır olarak 40 °C ve alt sınır olarak da 5 °C sıcaklık alınmış ve deneyler 5, 25 ve 40 °C sıcaklıklar da yapılmıştır.

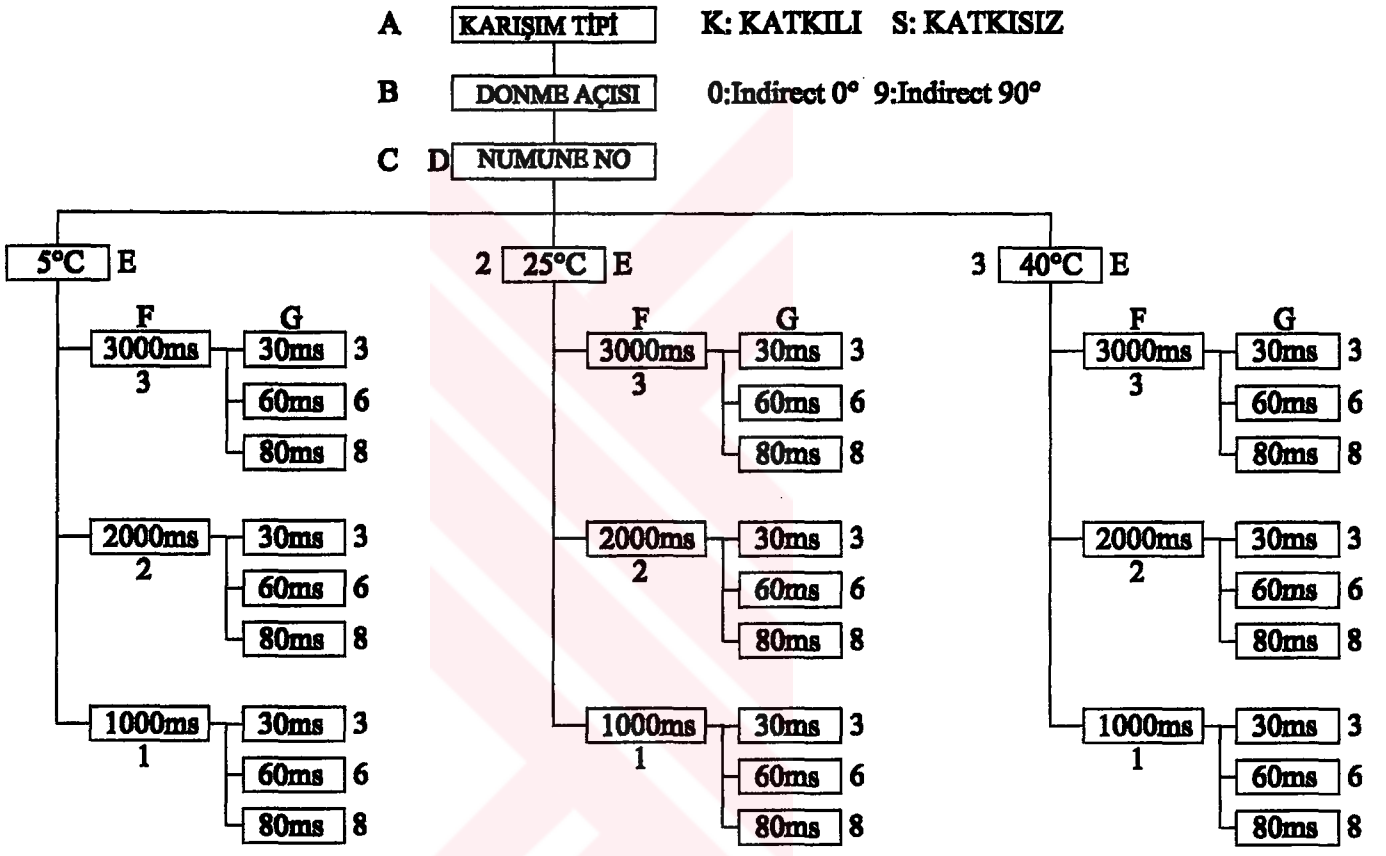
Ayrıca yük olarak ise 25 °C sıcaklıkta yapılan Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyinden elde edilen mukavemet değerinin yaklaşık % 20'sine karşılık gelen 1500 N yük uygulanmıştır.

Deneysel çalışma aşamasındaki diğer deney değişkenleri; yükleme periyodu ve yükleme hızı Çizelge 5.3'de verilmiştir. Bu çizelgede de görülebileceği gibi, yükleme periyodu olarak yüksek yoğunluklu trafiği temsil etmek için 1000, düşük yoğunluklu trafiği temsil etmek için ise 3000 ms'lik yük tekerrür süresi alınmıştır. Taşıt hızları veya dingil geçiş hızının temsilinde ise, yüksek hızlar için 30 ms, düşük hızlar için 80 ms' lik yükleme hızları seçilmiştir. Deneylerde uygulanan yükleme hızlarından 30ms yaklaşık olarak 40 km/sa, 60ms yaklaşık 20km/sa ve 80ms yaklaşık 15km/sa hıza karşılık gelmektedir. Yapılan bu kabuller ASTM D-4123 standardında da önerilmektedir.

Çizelge 5.3 Yükleme Periyodu ve Yükleme Hızı

Yükleme Periyodu		Yükleme Hızı (ms)
Hz.	Tekerrür Süresi (ms)	
0,33	3000	30
0,50	2000	60
1,00	1000	80

NUMUNE KODLAMA SİSTEMİ						
A	B	C	D	E	F	G
K	0			1	1	3
S	9			2	2	6
				3	3	8



Şekil 5.3 Dolaylı Çekme Deneyi Akış Diyagramı

Bu deneyde her bir ayrı koşul için üçer adet numune hazırlanmış ve toplam olarak 324 adet deney yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar; yük uygulama periyodu 1000ms için EK A - Çizelge 1, yük uygulama periyodu 2000ms için EK A - Çizelge 2 ve yük uygulama periyodu 3000ms için EK A - Çizelge 3' de verilmiştir. Çizelge 5.4, Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6' da ise elde edilen deney sonuçları özet olarak verilmektedir.

Çizelge 5.4 1000 ms yükleme periyodu için deformasyon ve elastisite modülü değerleri

yükleme hızı (ms)		30		60		80	
		με	E	με	E	με	E
5°C	Katkılı	13,42	13501	14,12	12702,3	14,73	12317,5
5°C	Katkısız	19,77	10518	21,02	9913	22,1	9343
25°C	Katkılı	39,17	4422	44,41	3904	46,55	3725
25°C	Katkısız	61,98	3371	71,05	2920	78,99	2688
40°C	Katkılı	119,5	1455	140,87	1241	163,15	1080
40°C	Katkısız	188,98	998	225,08	847	265,87	726

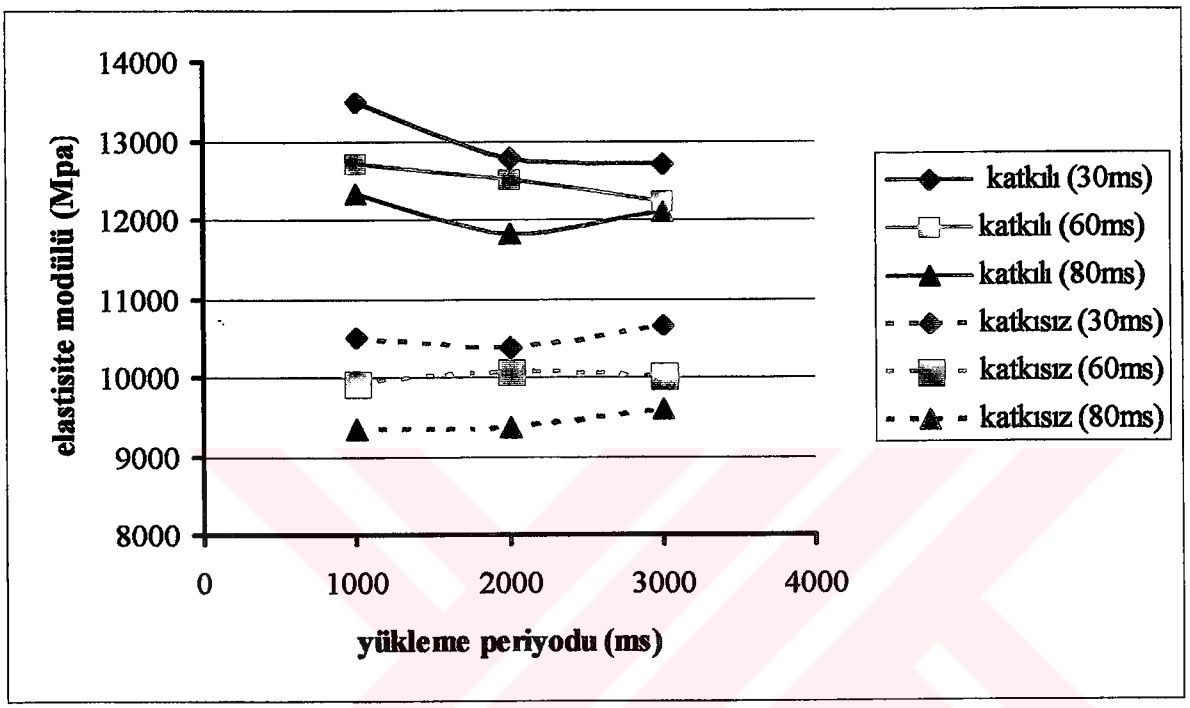
Çizelge 5.5 2000 ms yükleme periyodu için deformasyon ve elastisite modülü değerleri

yükleme hızı (ms)		30		60		80	
		με	E	με	E	με	E
5°C	Katkılı	14,05	12782	14,29	12499	15,28	11824
5°C	Katkısız	19,84	10374	20,59	10067	22,12	9359
25°C	Katkılı	39,07	4382	44,19	3881	47,52	3648
25°C	Katkısız	59,63	3362	59,15	2941	74,5	2716
40°C	Katkılı	120,01	1434	140,85	1233	156,06	1123
40°C	Katkısız	183,81	1011	214,46	874	236,55	801

Çizelge 5.6 3000 ms yükleme periyodu için deformasyon ve elastisite modülü değerleri

yükleme hızı (ms)		30		60		80	
		με	E	με	E	με	E
5°C	Katkılı	14,17	12713	14,63	12225	14,94	12102
5°C	Katkısız	18,53	10650	20,33	10028	21,58	9592
25°C	Katkılı	39,75	4322	44,21	3878	47,54	3636
25°C	Katkısız	59,89	3362	68,8	2948	74,12	2720
40°C	Katkılı	120,57	1412	143,16	1218	157,75	1113
40°C	Katkısız	195,38	953	226,64	839	242,62	780

Katkılı ve katkısız karışımlarda elastisite modülü ile yükleme periyodu arasındaki ilişkiyi göstermek amacıyla Şekil 5.4, şekil 5.5 ve şekil 5.6 hazırlanmıştır. Şekil 5.4' de 5°C, şekil 5.5' de 25°C ve şekil 5.6' da 40°C sıcaklıklar için katkılı ve katkısız karışımlarda elastisite modülü ile yükleme periyodu arasındaki ilişkiler gösterilmiş; grafiklerde her farklı yükleme hızı için (30ms, 60ms, 80ms) ayrı eğriler çizilmiştir.

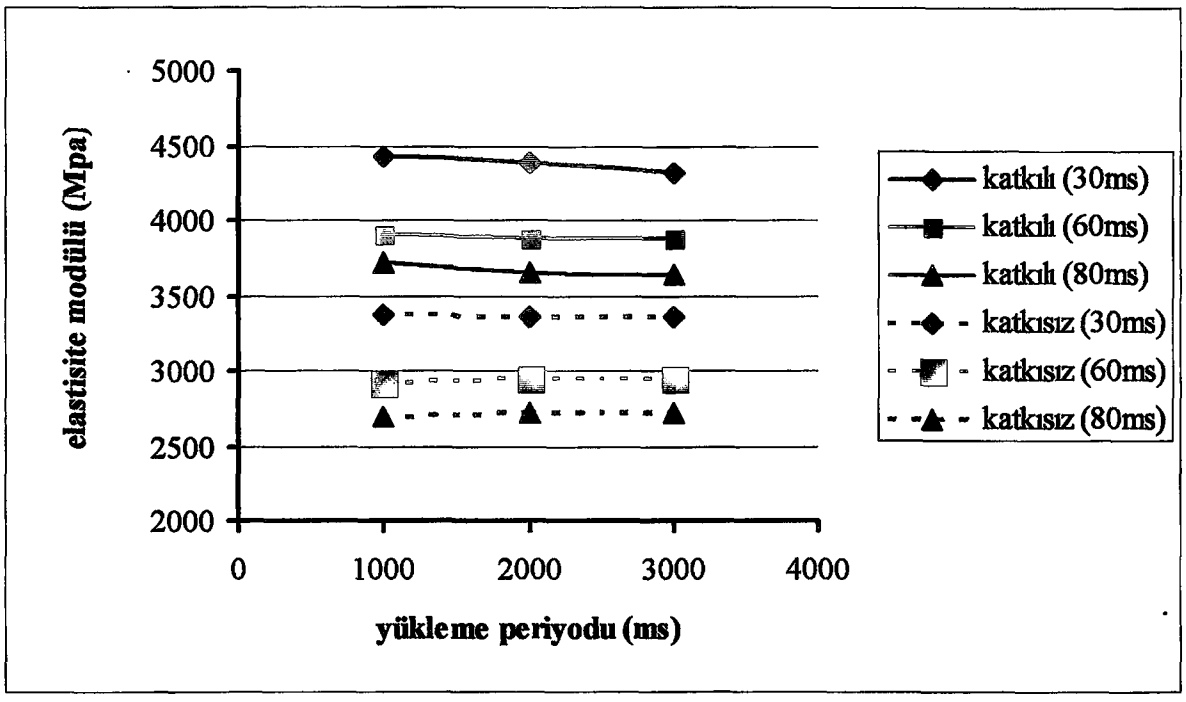


Şekil 5.4 5°C sıcaklık için katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü - yükleme periyodu ilişkileri

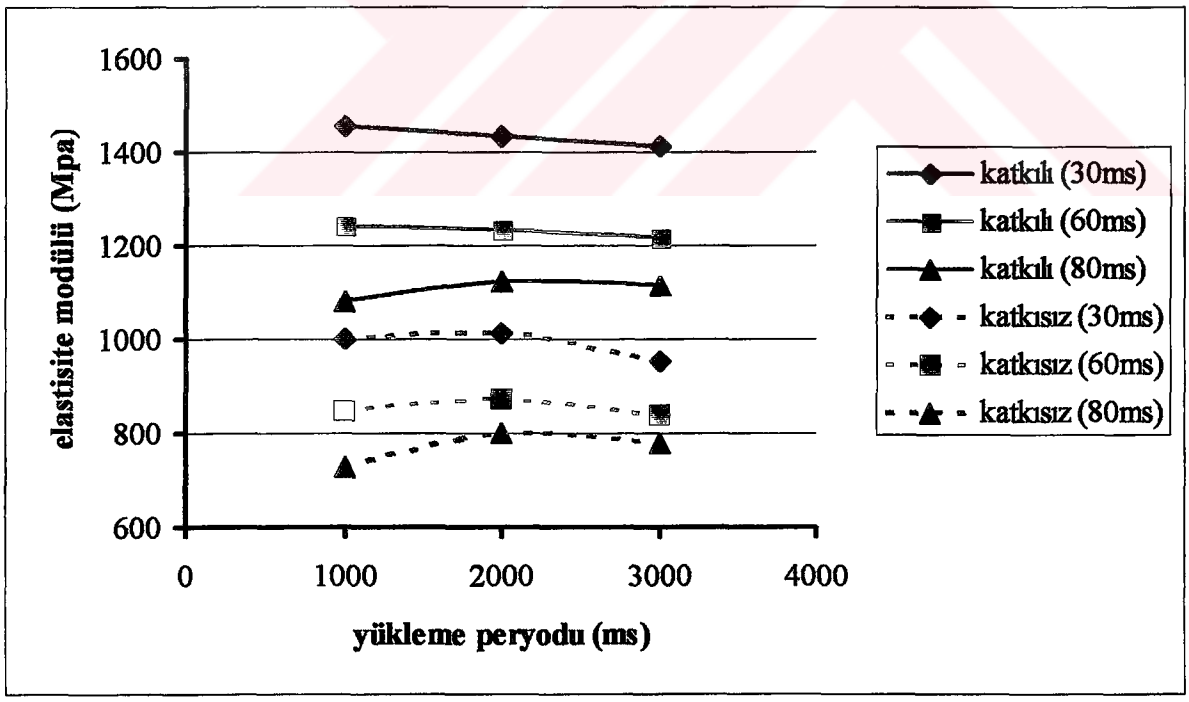
5.2.3 Statik sünme deneyinden elde edilen sonuçlar

Asfalt betonu karışımlarının tekerlek izi oluşmasına karşı sergiledikleri performansın değerlendirilmesiyle amacıyla Tek Eksenli Statik Sünme Deneyi uygulanmıştır. Deney katkılı ve katkısız karışımlar üzerinde uygulanmıştır.
Çalışmada kullanılan deney değişkenleri aşağıda verilmiştir.

Tek eksenli basınç yükü : 350 kPa (50,76 psi – 3,57 kg/cm^2)
Deney sıcaklığı : 25°C
Yük uygulama süresi : 3600sn
Yüksüz süre : 3600sn



Şekil 5.5 25°C sıcaklık için katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü - yükleme periyodu ilişkileri



Şekil 5.6 40°C sıcaklık için katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü - yükleme periyodu ilişkileri

Numuneye, bu deneyde 3600sn süreyle 350 kPa basınç yükü uygulanmış ve bu süre boyunca oluşan deformasyonlar ölçülüp kaydedilmiştir. 3600sn yüklemeden sonra 3600sn boyunca numune yüksüz bırakılmış ve ikinci 3600. saniye sonunda geriye dönen deformasyon miktarı ölçülmüştür.

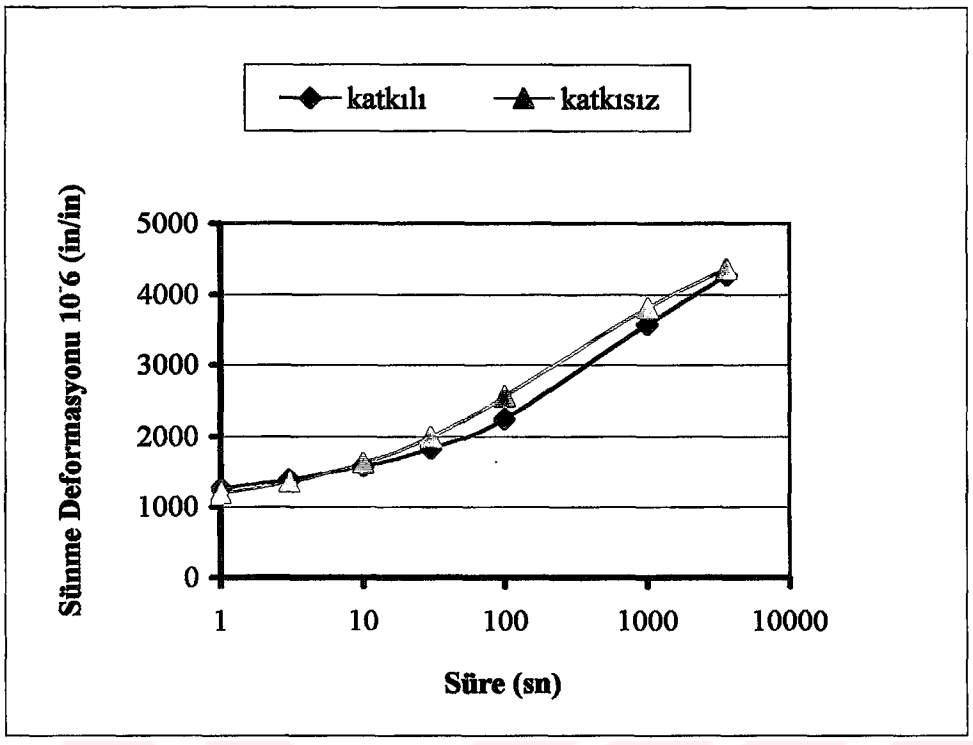
Deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7' de verilmiştir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8' de ise katkılı ve katkısız karışımlar için süre – sünme (kalıcı) deformasyonu ve süre – sünme modülü grafikleri verilmiştir. Çizelge 5.8' de ise, katkılı ve katkısız karışımlar için birinci ve ikinci 3600 saniyelik bölümlerin sonundaki sünme (kalıcı) deformasyon değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.7 Sünme (kalıcı) deformasyonu ve sünme modülü değerleri

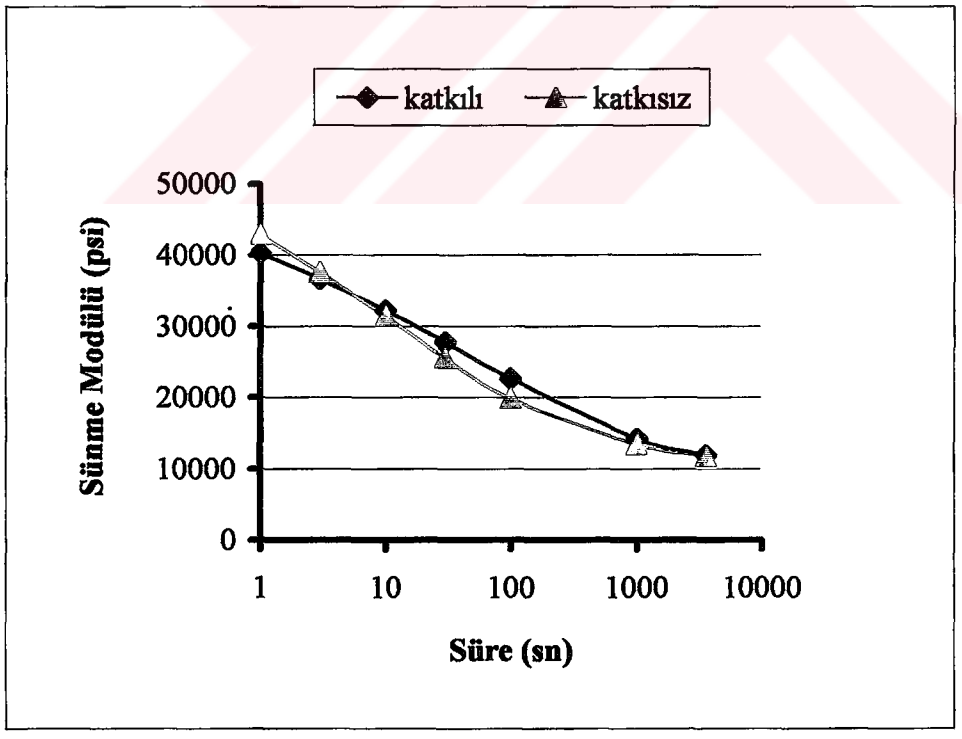
Süre	Sünme Deformasyonu (με)		Sünme Modülü (psi)	
(sn)	Katkılı	Katkısız	Katkılı	Katkısız
1.	1259	1184	40317,7	42871,6
3.	1386	1351	36623,4	37572,2
10.	1573	1614	32269,5	31449,8
30.	1828	1991	27768,1	25494,7
100.	2245	2561	22610,2	19820,4
1000.	3571	3807	14214,5	13333,3
3600.	4269	4360	11890,4	11642,2

Çizelge 5.8 İlk ve ikinci saat sonundaki sünme (kalıcı) deformasyon değerleri

Süre	Sünme Deformasyonu (με)	
(sn)	Katkılı	Katkısız
3600.	4269	4360
7200.	4042	4252



Şekil 5.7 Sünme (kalıcı) deformasyonu – süre ilişkisi

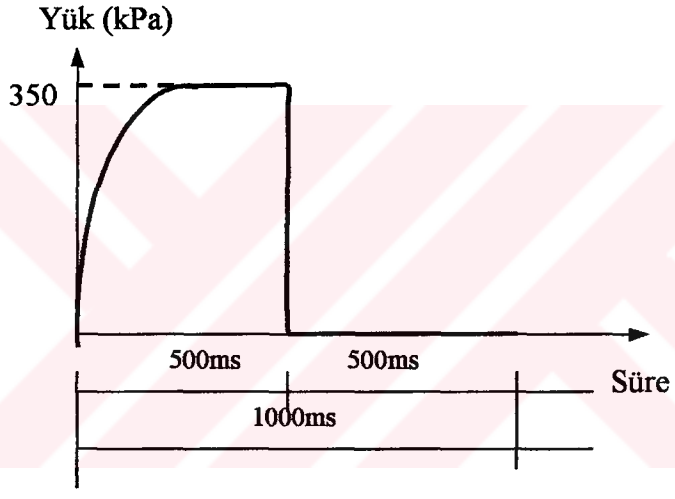


Şekil 5.8 Sünme modülü – süre ilişkisi

5.2.4 Tekrarlı (Dinamik) sünme deneyinden elde edilen sonuçlar

Bitümlü karışımlarda tekerlek izi oluşumu (kalıcı deformasyon) karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanan deneyde numunelere, 25°C sıcaklıkta Şekil 5.9' da görülebileceği gibi 1000 ms vuruş periyodu süresince 500 ms yüklü ve 500 ms yüksüz olmak üzere 350 kPa tek eksenli basınç yükü 7 saat süreyle uygulanmış ve her bir yük tekrarından sonra numune içinde meydana gelen kalıcı deformasyonlar ölçülmüştür.

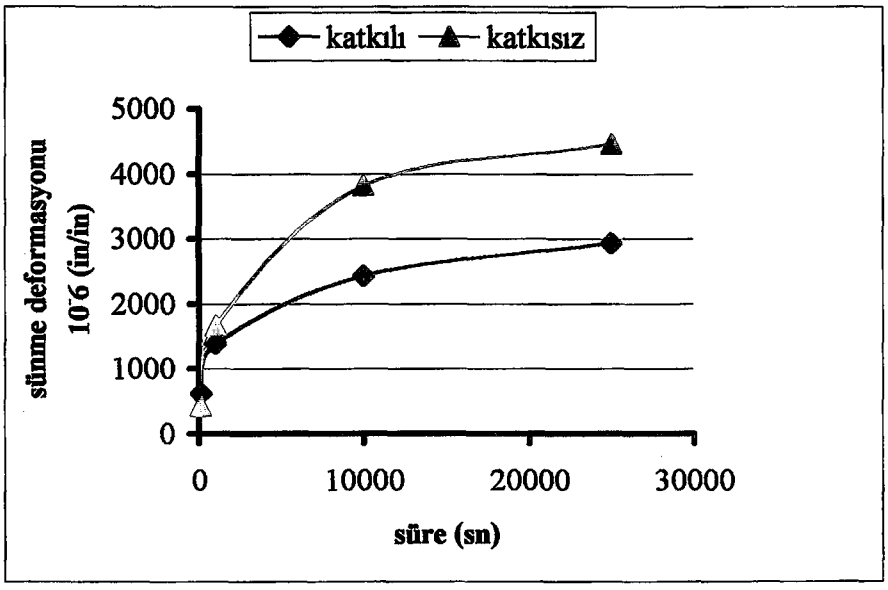
Katkılı ve katkısız numunelerde 100., 1000., 10000. ve 25000. saniyeler sonunda meydana gelen kalıcı deformasyon miktarları Çizelge 5.9' da, yük tekerrürü – sünme deformasyonu ilişkisi ise Şekil 5.10' da verilmiştir.



Şekil 5.9 Tekrarlı yük ve uygulama şekli

Çizelge 5.9 Gözlenen kalıcı deformasyon

Süre	Sünme Deformasyonu (με)	
(sn)	Katkılı	Katkısız
100	620	426
1000	1384	1660
10000	2436	3819
25000	2937	4457



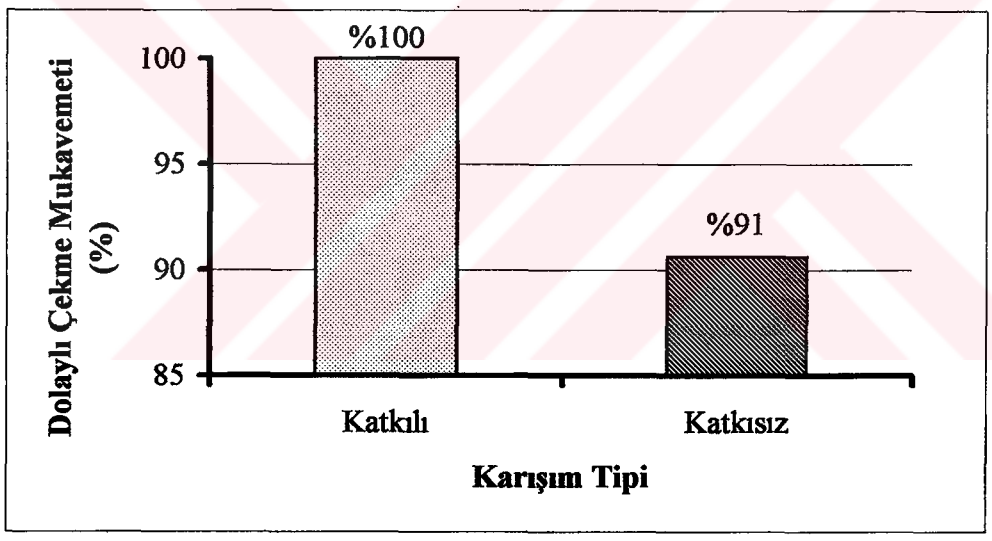
Şekil 5.10 Yük tekerrürü – sünme (kalıcı) deformasyonu ilişkisi

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Edirne – Kınalı Otoyolu, Lalapaşa kavşağı kesiminden alınmış olan karot numunelere uygulanmış olan deneylerden elde edilen sonuçlar Bölüm 5'de anlatılmıştır. Bu bölümde de; elde edilen deney sonuçlarından faydalanılarak, katkılı ve katkısız karışımların performanslarının (karışım rijitliği ve tekerlek izi açısından) değerlendirilmesi yapılmıştır.

6.1 Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyine ait Değerlendirme

Katkılı ve katkısız karışımların dolaylı çekme mukavemeti açısından değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 5.2' den faydalanarak Şekil 6.1 çizilmiştir. Bu şekil hazırlanırken katkılı numunenin dolaylı çekme mukavemeti değeri 100 kabul edilmiş ve buna göre katkılı ve katkısız karışımların bir diğerine üstünlüğü tespit edilmiştir.



Şekil 6.1 Katkılı ve katkısız karışımların dolaylı çekme mukavemeti (%)

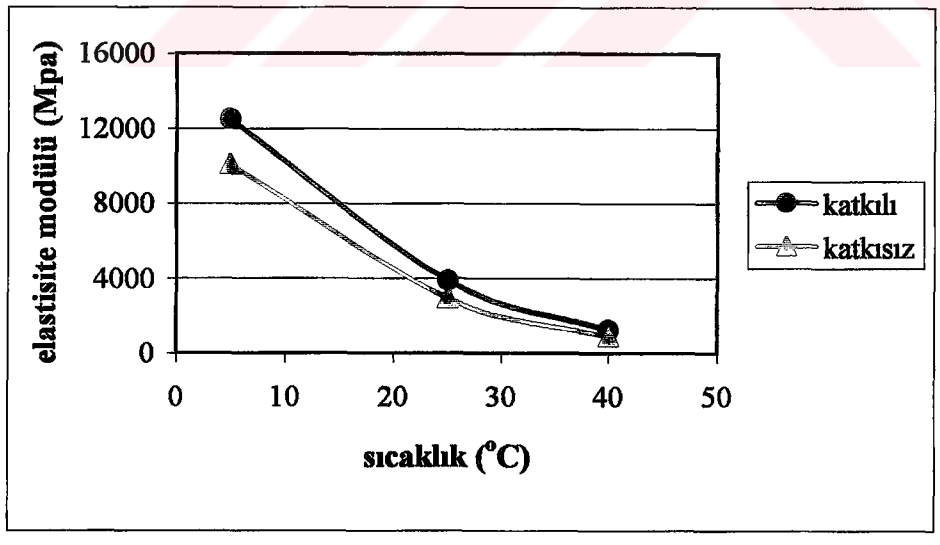
Bu tez çalışması kapsamında yapılmış olan dolaylı çekme mukavemeti deneylerinden elde edilen veriler değerlendirildiğinde Şekil 6.1' de görüldüğü gibi; katkılı karışımların dolaylı çekme mukavemeti değeri, katkısız karışımların dolaylı çekme mukavemeti değerinden %9 daha yüksek çıkmıştır.

6.2 Dolaylı Çekme Deneyine ait Değerlendirme

Katkılı ve katkısız karışımlar üzerinde yapılmış olan dolaylı çekme deney sonuçlarının değerlendirilmesi iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada yükleme periyodunun 2000ms, yükleme hızının ise 60ms olduğu koşullardaki elastisite modülü değerleri; 5°C, 25°C ve 40°C sıcaklıklar için Çizelge 6.1' de verilmiştir. Yükleme periyodu ve yükleme hızının bu şekilde seçilmesindeki gaye, gerek katkılı gerekse katkısız numuneler için ortalama şartları oluşturmaktır. Şekil 6.2' de ise, Çizelge 6.1' deki değerlerden faydalanarak, bu şartlar altında katkılı ve katkısız karışımlar için sıcaklık – elastisite modülü ilişkisi verilmiştir.

Çizelge 6.1 2000ms yükleme periyodu ve 60ms yükleme hızı için 5°C -25°C -40°C sıcaklıklardaki elastisite modülü değerleri

	Katkılı	Katkısız
Sıcaklık	E (Mpa)	E (Mpa)
5°C	12499	10067
25°C	3881	2941
40°C	1233	874



Şekil 6.2 2000ms yükleme periyodu ve 60ms yükleme hızı için elastisite modülü - sıcaklık ilişkisi

Dolaylı çekme deneyinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde ikinci aşama ise; yükleme periyodu, yükleme hızı ve sıcaklık değişkenlerinin karışımların üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir.

- **Yükleme periyodunun etkisi**

Yükleme periyotlarının karışımın üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Çizelge 6.2 hazırlanmıştır. Çizelge hazırlanırken, aynı sıcaklık ve yükleme hızındaki farklı yükleme periyodu (1000ms, 2000ms, 3000ms) değerlerine karşılık gelen elastisite modülü değerlerinden en küçüğü ile en büyüğü arasında arasındaki fark en büyük elastisite modülü değerine bölünüp 100 ile çarpılarak, bu şartlar için elastisite modülündeki (%) değişim belirlenmiştir. Şekil 6.3' de ise bu çizelgeden faydalanılarak, yükleme periyodunun karışımların elastisite modülü üzerindeki etkilerini gösteren bir grafik verilmiştir.

Çizelge 6.2 Yükleme periyodunun katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü değerleri üzerindeki etkisi (%)

Yükleme hızı	30 ms		60 ms		80 ms	
Karışım tipi	katkılı	katkısız	katkılı	katkısız	katkılı	katkısız
5°C sıcaklıkta	5,83	2,59	3,75	1,52	4,00	2,59
25°C sıcaklıkta	2,25	0,28	0,67	0,94	2,38	1,18
40°C sıcaklıkta	2,98	5,74	1,93	4,03	3,78	9,42

- **Yükleme hızının etkisi**

Yükleme hızlarının karışımın üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Çizelge 6.3 hazırlanmıştır. Çizelge hazırlanırken, aynı sıcaklık ve yükleme periyodundaki farklı yükleme hızı (30ms, 60ms, 80ms) değerlerine karşılık gelen elastisite modülü değerlerinden en küçüğü ile en büyüğü arasında arasındaki fark en büyük elastisite modülü değerine bölünüp 100 ile çarpılarak, bu şartlar için elastisite modülündeki (%) değişim tespit edilmiştir. Şekil 6.4' de ise bu çizelgeden faydalanılarak, yükleme hızının karışımların elastisite modülü üzerindeki etkilerini gösteren bir grafik verilmiştir.

Çizelge 6.3 Yükleme hızının katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü üzerindeki etkisi (%)

Yükleme periyodu	1000 ms		2000 ms		3000 ms	
Karışım tipi	katkılı	katkısız	katkılı	katkısız	katkılı	katkısız
5°C sıcaklıkta	8,76	11,17	7,49	9,78	4,81	9,93
25°C sıcaklıkta	15,75	20,27	16,75	19,20	15,87	19,10
40°C sıcaklıkta	25,77	27,26	21,67	20,75	21,14	18,11

- **Sıcaklık etkisi**

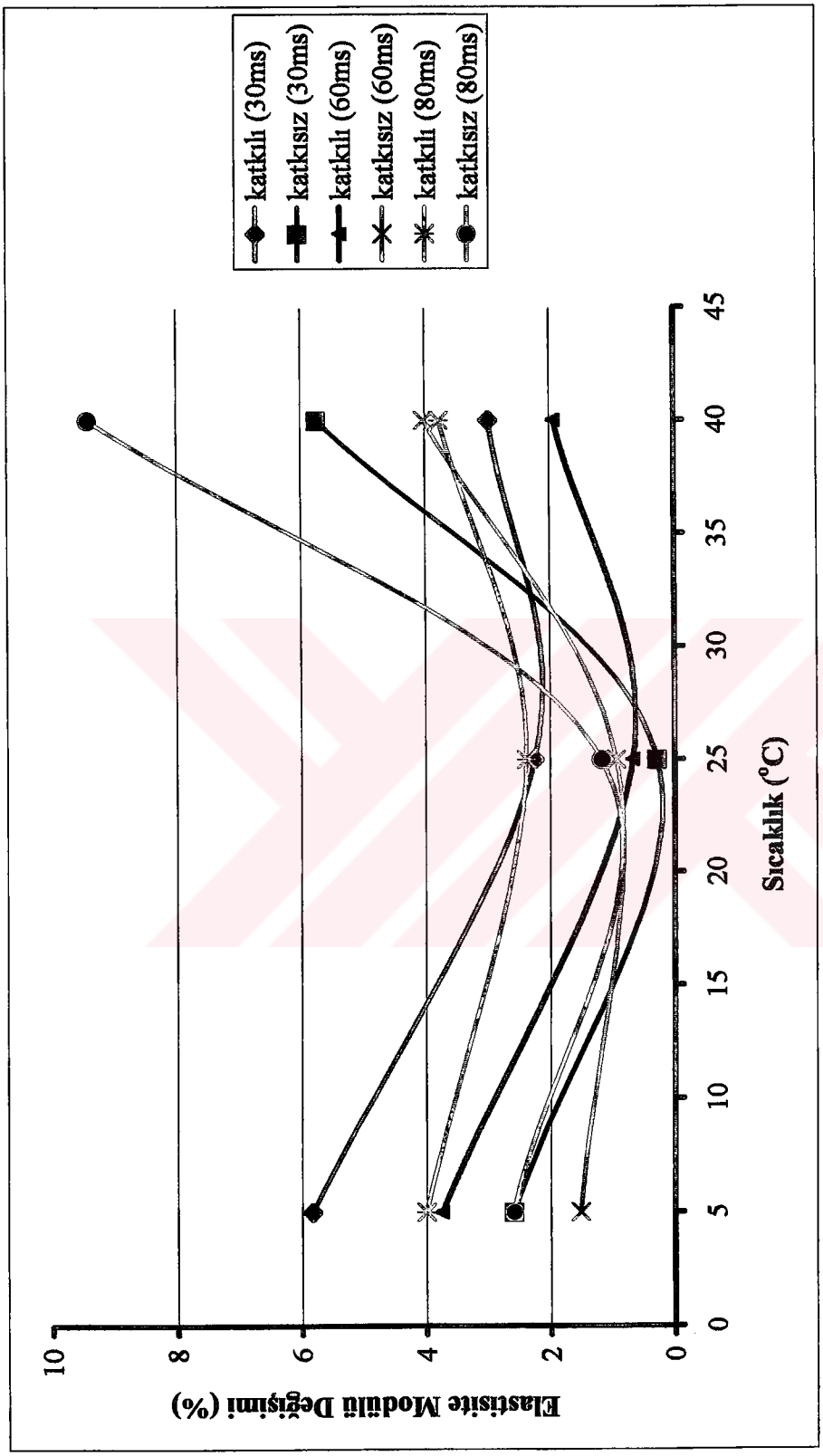
Sıcaklığın karışımın üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Çizelge 6.4 hazırlanmıştır. Çizelge hazırlanırken, aynı yükleme hızı ve yükleme periyodundaki farklı sıcaklık (5°C, 25°C , 25°C) değerlerine karşılık gelen elastisite modülü değerlerinden en küçüğü ile en büyüğü arasında arasındaki fark en büyük elastisite modülü değerine bölünüp 100 ile çarpılarak, bu şartlar için elastisite modülündeki (%) değişim tespit edilmiştir. Şekil 6.5' de ise bu çizelgeden faydalanılarak, sıcaklığın karışımların elastisite modülü üzerindeki etkilerini gösteren bir grafik verilmiştir.

Çizelge 6.4 Sıcaklığın katkılı ve katkısız karışımların elastisite modülü üzerindeki % etkisi

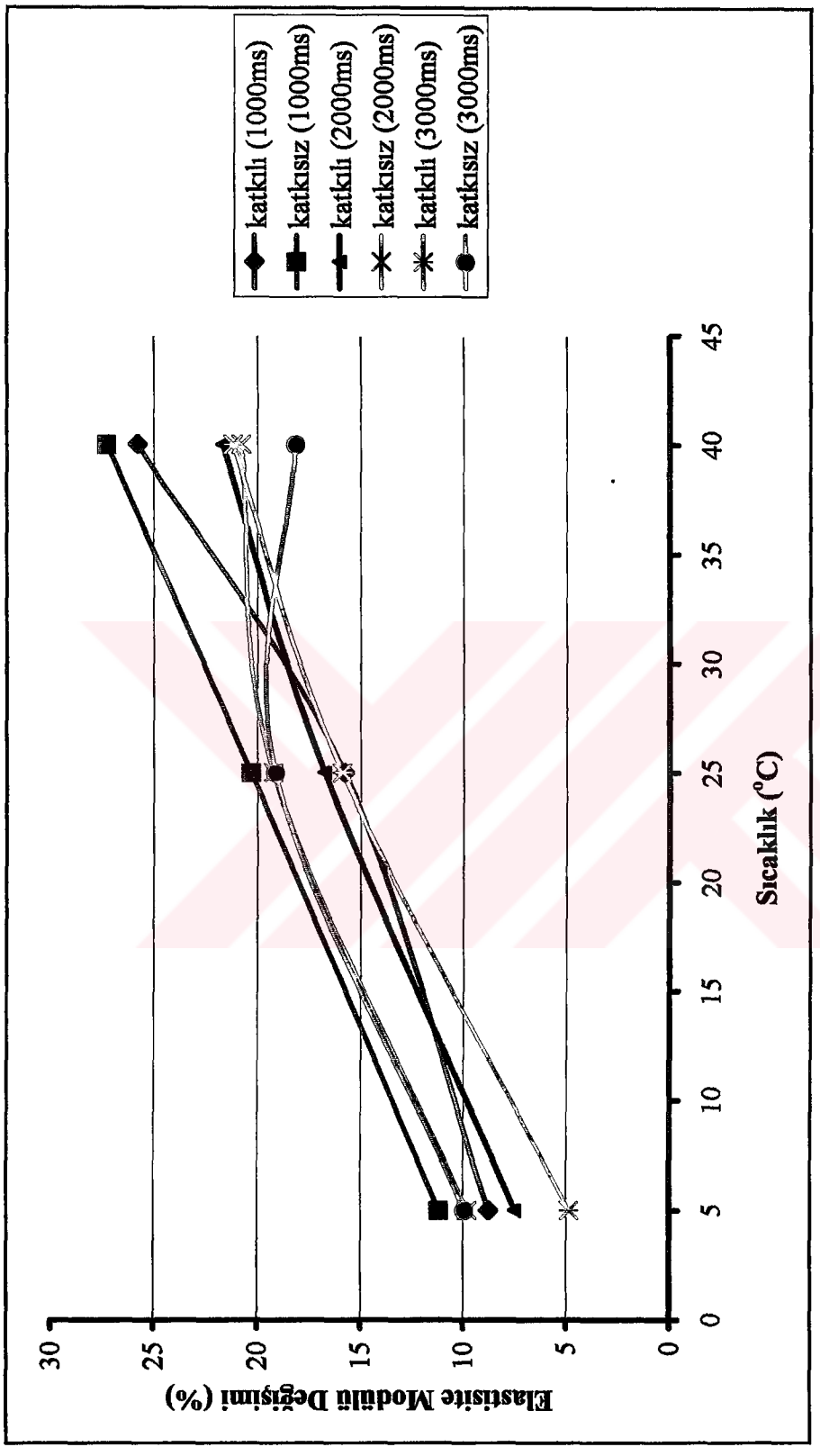
Yükleme periyodu	1000 ms		2000 ms		3000 ms	
Karışım tipi	katkılı	katkısız	katkılı	katkısız	katkılı	katkısız
30ms yükleme hızı	89,21	90,51	88,78	90,24	88,89	91,04
60ms yükleme hızı	90,22	91,45	90,13	91,31	90,04	91,63
80ms yükleme hızı	91,22	92,22	90,50	91,43	90,79	91,86

- **Elastisite modüllerinin uygunluğu**

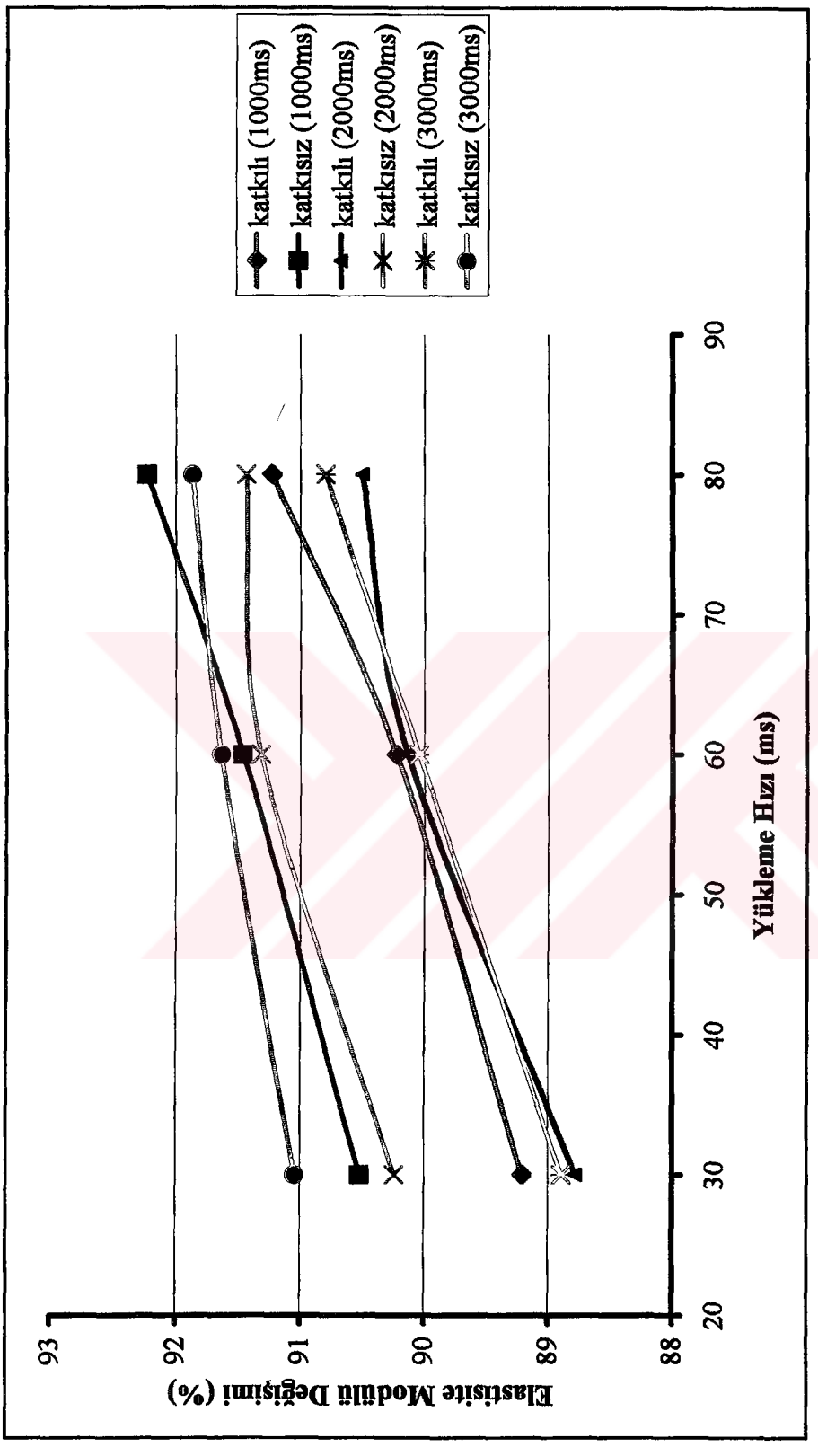
Dolaylı çekme mukavemeti deneylerinden elde edilen sonuçlarının değerlendirilmesinde Bölüm 4' de verilen nomoğraftan faydalanılmıştır. ve değerlendirme sonucunda elde edilen elastisite modülü değerleri Şekil 6.6' de verilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü gibi, elastisite modülü değerleri hem katkılı numunelerde hem de katkısız numunelerde istenen şartları sağlamaktadır.



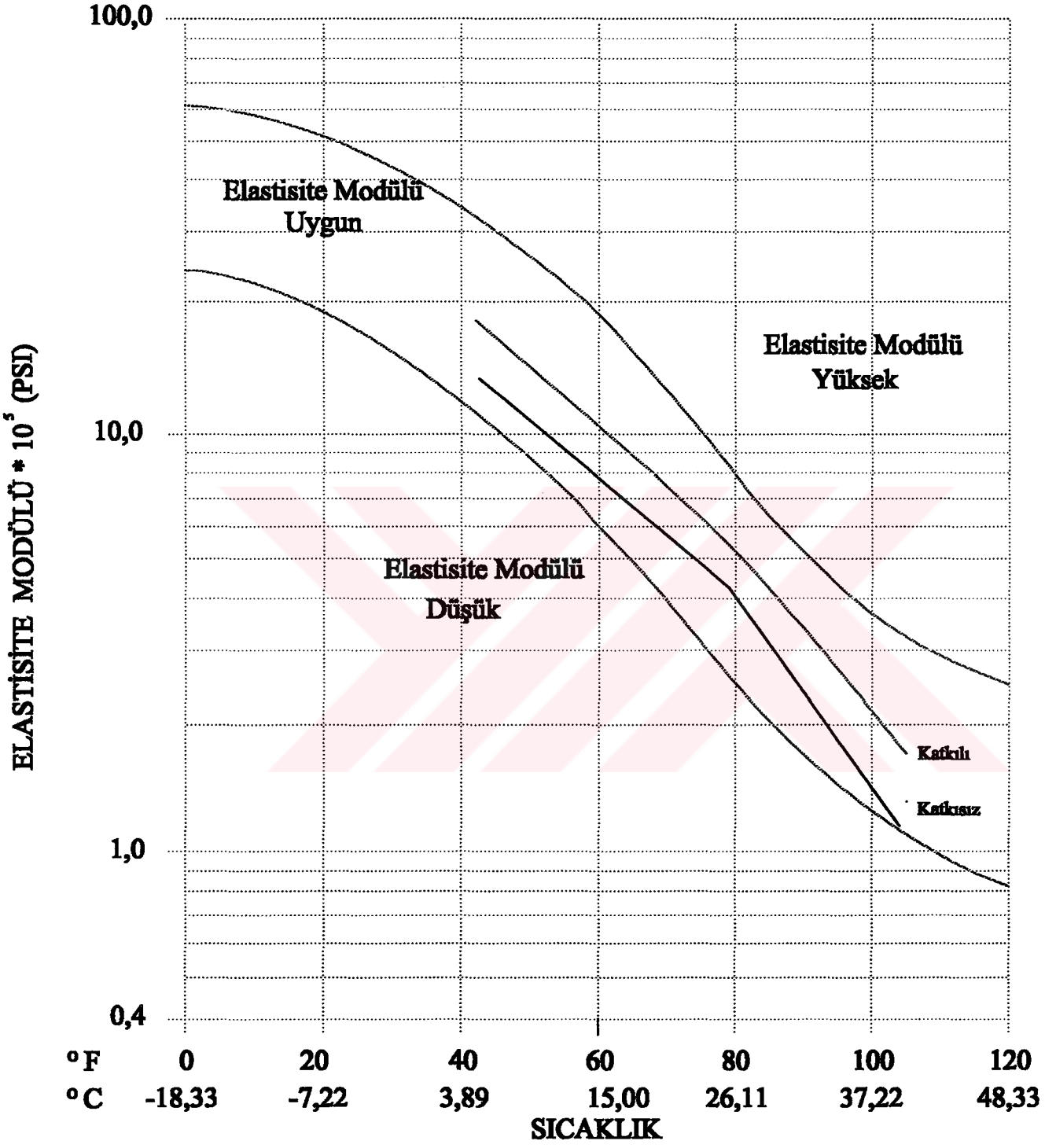
Şekil 6.3 Yükleme periyodundaki değişimin, elastisite modülü üzerinde olan etkisinin sıcaklıkla değişimi (%)



Şekil 6.4 Yükleme hızındaki değişimin, elastisite modülü üzerinde olan etkisinin sıcaklıkla değişimi (%)



Şekil 6.5 Sıcaklık değişiminin, elastisite modülü üzerinde olan etkisinin yükleme hızı ile değişimi (%)



Şekil 6.6 Katkılı ve katkısız karışımların rijitliklerinin uygunluğu

6.3 Statik Sünme Deneyine ait Değerlendirme

Katkılı ve katkısız karışımlar üzerinde yapılan statik sünme deneyinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 6.5 hazırlanmıştır. Bu çizelge hazırlanırken Çizelge 5.7' den faydalanılmıştır. Katkılı ve katkısız karışımların 1. saniyedeki sünme deformasyon değerleri baz alınmış ve süre ilerledikçe bulunan sünme deformasyon değerlerinin % artımları hesaplanarak çizelgeye işlenmiştir.

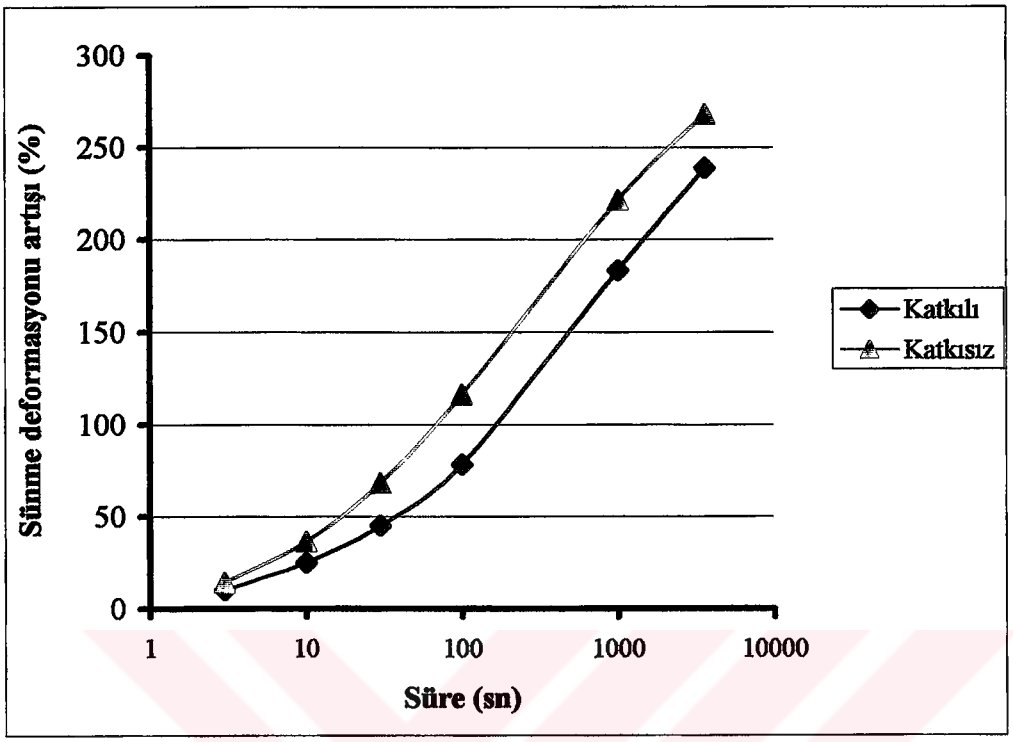
Çizelge 6.5 Sünme deformasyonu (%) artımları

Süre (sn)	Sünme Deformasyonu Artışı (%)	
	Katkılı	Katkısız
1	baz	baz
3	10,087	14,105
10	24,94	36,318
30	45,195	68,159
100	78,316	116,3
1000	183,64	221,54
3600	239,08	268,24

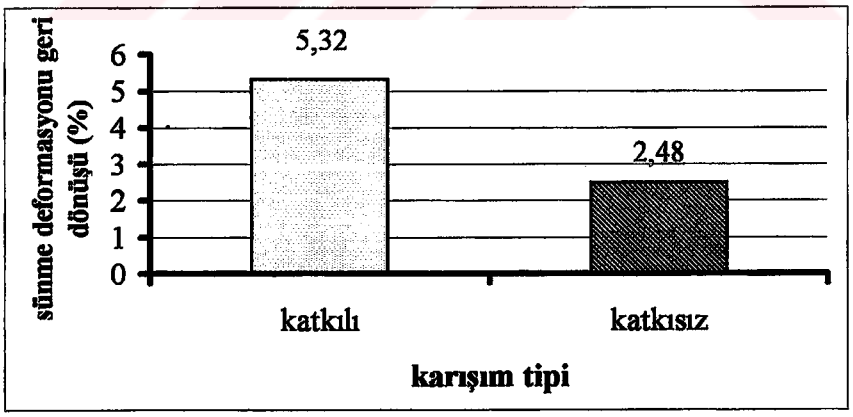
Çizelge 6.5' de görüldüğü gibi, deney sonunda (3600. saniye), katkılı karışımlardaki (%) sünme deformasyonu artışı baz değere göre %239,08 olurken katkılı karışımlardaki artış %268,24 düzeyinde olmuştur. Buradan da anlaşıldığı gibi katkılı karışımlar yaklaşık %29 düzeyinde bir üstünlük sergilemiştir . Şekil 6.7' de ise sünme (kalıcı) deformasyonlarındaki % artışlar bir grafik halinde sunulmuştur.

Katkılı ve katkısız karışımlara uygulanan statik sünme deneyinde, yükün kaldırıldığı ikinci 3600 saniye sonunda tespit edilen (%) geri dönüş oranları Şekil 6.8' de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, katkılı karışımlarda geri dönüş oranı, katkısız karışımlardaki geri dönüş oranından yaklaşık %3 daha fazladır.

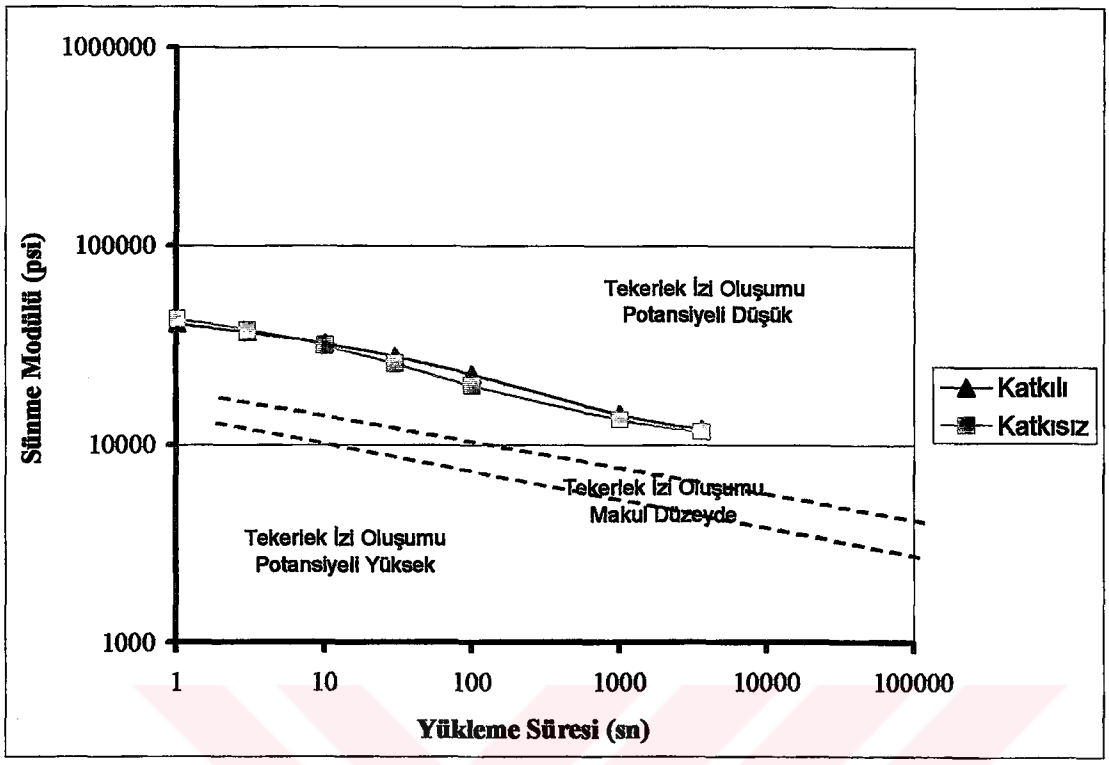
Deney sonucunda elde edilen verilerin uygunluğunun tespiti için AAMAS – sünme modülü nomogramı üzerine değerler işlenmiş ve karışımların istenen sünme modülü değerlerinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.7 Sünme (kalıcı) deformasyonu % artışları



Şekil 6.8 Sünme (kalıcı) deformasyonu % geri dönüş miktarları



Şekil 6.9 Sünme modülü değerlerinin uygunluğu

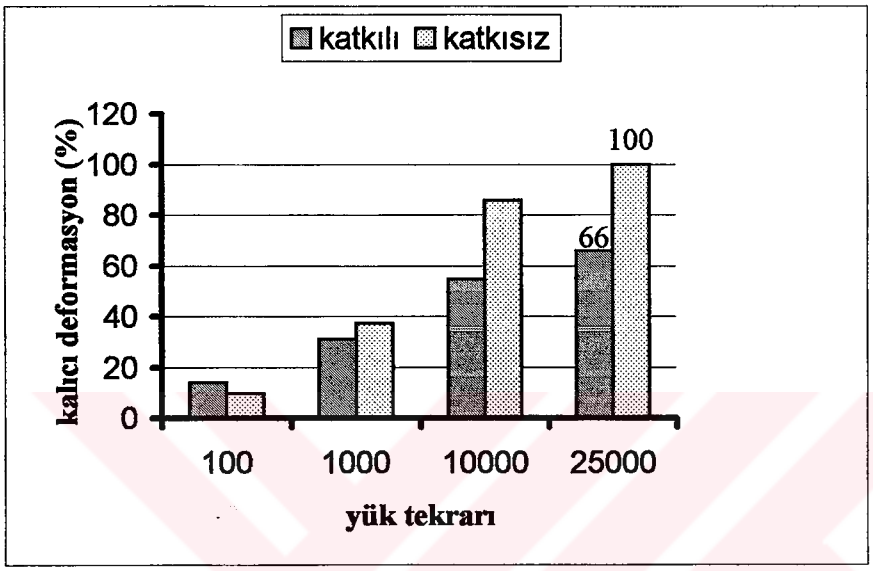
6.4 Tekrarlı (dinamik) Sünme Deneyine ait Değerlendirme

Karışımlar üzerinde uygulanan tekrarlı sünme deneyi sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 6.6 hazırlanmıştır. Çizelge hazırlanırken; 100, 1000, 10000 ve 25000. saniyelerde ölçülen kalıcı deformasyon değerlerinden katkısız karışımın deney sonundaki (25000. yük tekrarı) deformasyon değeri baz alınarak 100 kabul edilmiş ve buna bağlı olarak da diğer deformasyon yüzdeleri tespit edilmiştir.

Çizelge 6.6 Tekrarlı sünme deneyi sonucu (%) deformasyon

Yük tekrarı	Kalıcı Deformasyon (με)	
	Katkılı	Katkısız
100	13,91	9,55
1000	31,05	37,24
10000	54,65	85,68
25000	65,89	100

Şekil 6.10' da, tekrarlı sünme deneyinin 100., 1000., 10000. ve 25000. yük tekrarlarında gözlemlenen % kalıcı deformasyon miktarları Çizelge 6.6' dan faydalanılarak bir grafik halinde sunulmuştur. Bu grafikte de görüldüğü gibi 25000. yük tekrarında katkılı numunelerde gözlenen kalıcı deformasyon miktarı, katkısız numunelerden yaklaşık %34 daha düşük olmuştur.



Şekil 6.10 Kalıcı (sünme) deformasyon oranları %

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi çalışmasında; karayolu üstyapısı, üstyapıda kullanılan malzemeler (katkı maddeleri) ve karışım performansının ölçülmesinde kullanılan yöntemler ile ilgili detaylı bir literatür çalışması yapılmıştır. Literatür çalışmasını takiben, polimerler grubuna giren bir asfalt katkı malzemesi olan Cariflex TR-1101' in bitümlü karışımların uzun dönemli performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Katkılı karışımlar, dolaylı çekme mukavemeti açısından katkısız karışımlara oranla daha iyi bir performans göstermektedirler (Şekil 5.2).

- Katkılı karışımların elastisite modülü değerleri her bir sıcaklık ve diğer deney değişkenlerinde katkısız karışımların elastisite modülü değerlerinden daha yüksektir (Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6).

- Deney değişkenlerinden yükleme hızı ve yükleme periyodu için ortalama şartları ifade eden 60ms ve 2000ms değerlerinde elastisite modülü değerleri her sıcaklıkta katkılı karışımlarda daha yüksek çıkmıştır (Şekil 6.2).

- Dolaylı çekme deneyinden elde edilen sonuçlara göre, yükleme periyodunun etkisi özelikle düşük sıcaklıklarda katkılı karışımlarda, katkısız karışımlara oranla daha yüksektir (Şekil 6.3).

- Dolaylı çekme deneyinden elde edilen sonuçlara göre, katkılı karışımlar yükleme hızından katkısız karışımlara oranla daha az etkilenmektedirler (Şekil 6.4).

- Yine aynı deneyden elde edilen sonuçlara göre sıcaklık etkisi, katkılı karışımlarda katkısız karışımlara oranla daha düşüktür (Şekil 6.5).

- Elastisite modüllerinin değerlendirilmesi sonucunda hem katkılı hem de katkısız karışımların elastisite modülü değerleri uygun çıkmıştır (Şekil 6.6).

- Statik sünme (kalıcı) deformasyonu, katkılı karışımlarda kısa bir zaman dilimi için katkısızlara nazaran daha yüksek olmasına rağmen (Şekil 5.7) genelde katkılı karışımlarda görülen kalıcı deformasyon miktarı katkısız karışımlara oranla daha düşüktür.

- Statik sünme deformasyonundaki artış yüzdesi ise katkısız karışımlarda sürekli daha yüksektir. Deneyin 100. saniyesinden sonra ise sünme deformasyon artış yüzdeleri paralellik göstermektedir (Şekil 6.7).

- Sünme modülleri açısından değerlendirme yapıldığında ise yukarıdaki maddeye paralel olarak kısa bir süre için katkılı karışımların sünme modülü değeri katkısızlara nazaran daha yüksek olmasına rağmen genelde daha düşük değerler vermektedir (Şekil 5.8).

- Geri dönen deformasyonlar açısından, statik sünme deneyinden elde edilen sonuçlara göre katkılı karışımlar daha iyi performans sergilemektedirler (Şekil 6.8).

- Tekerlek izi oluşum potansiyeli değerlendirilmesi sonucu hem katkılı hem de katkısız karışımların performansları yüksek çıkmıştır. Ancak katkılı karışımlar bu açıdan da katkısız karışımlara üstünlük sağlamıştır (Şekil 6.9).

- Tekrarlı sünme deneyi sonucunda, katkılı karışımlarda oluşan kalıcı deformasyon miktarının katkısızlara oranla genelde daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 5.10).

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen ve yukarıda sıralanmış olan sonuçlara dayanarak Çizelge 7.1' de katkılı ve katkısız karışımların genel değerlendirmesi yapılmıştır.

Çizelge 7.1 Katkılı ve katkısız karışımların genel değerlendirmesi

	Katkılı	Katkısız
Elastisite modüllerinin uygunluğu	uygun*	uygun
Tekerlek izi oluşma potansiyeli	düşük*	düşük
Yükleme periyodu etkisi	düşük	düşük*
Yükleme hızı etkisi	düşük*	düşük
Sıcaklık etkisi	yüksek*	yüksek
Tekrarlı sünme deneyinden bulunan kalıcı deformasyon	100	66
Statik sünme modülü	100	97
Dolaylı çekme mukavemeti değerleri	100	91
Dolaylı çekme deneyinden bulunan elastisite modülü	100	76

- Katkılı ve katkısız karışımlarda aynı veya yaklaşık sonuçların çıkması durumunda daha üstün özelik gösteren karışım tipi " * " ile işaretlenmiştir.
- Sayısal olarak verilen değerlendirmelerde; üstün özelik gösteren karışım tipine 100 puan verilmiş, diğeri karışım tipinin puanı ise önceki bölümlerde verilen sonuçlardan faydalanarak hesaplanmıştır

KAYNAKLAR

AASHTO, (1993), Guide for Design of Pavements Structers, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C.

Alderson A., (1995) UMATTA Testing Equipment Trial Course, England

ASTM Standart Book

Baladi G. Y. Ve Harichandran R. S., (1989), Asphalt Mix Design and the Indirect Test: A New Horizon, ASTM STP 104, Philadelphia, s 86-105

Barksdale R. D. ve Miller J. H:, (1977), Development of Equipment and Techniques for Evaluating Fatigue and Rutting Charecteristics of Asphalt Concrete Mixes, Report, Atlanta

Birliker R. Y., (1998), Bitümlü Karışımlara Eklenebilecek Katkılar ile Bu tip Bitümlü Karışımların Davranışlarının Araştırılması ve Bir Yorulma Eğrisi Tahmin Modeli, YTÜ, Doktora Tezi, İstanbul

Harvey, J., Monismith C. L., Effects of Laboratory Asphalt Concrete Specimen Preparation Variables on Fatigue and Permanent Deformation Test Results Using Strategic Highway Research Program A-003 A proposed Testing Equipment, Transportation Research Record TRR 1417, TRB, Washington D. C., 1993, s 38-48

Ilıcalı, M., (1988), Erdemir Cürufunun Yol Üstyapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, YTÜ, İstanbul

İnan, M., (1981), Cisimlerin Mukavemeti, İTÜ, İstanbul

KGM, (1995), Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, Ankara

Yağız, F., Keçeciler, A.F., Işıkarslan, C. ve Akkol, G., (1967), Bitümlü Malzemeler, T.C.Bayındırlık Bakanlığı KGM-Y.N.149.

Keçeciler, A.F., Gümrükçüoğlu A., Akkol G., Gökçe A.F., (1990) Bitümlü Malzemeler Laboratuar El Kitabı.

Kennedy T. W. Ve Anagnos J. N., (1983), Procedures for the Static and Repeated Load Indirect Tensile Tests, Researc Record 183-14, University of Texas, Texas

Kim V. R., Kim N. ve Khosla P., (1992), Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete, Asphalt Mixture Performance, ASTM STP 1147, Philadelphia

KumbasarV., Kumbasar F., Ünal A.,Soil Mechanics for Road Engineers, Çeviri, İ.T.Ü. İstanbul, 1970.

Monismith, C. L., Deacon, J. A., Craus, J. Ve Tangella, S. C. S., (1990), Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures, Strategic Highway Research Program, National Research Council, SHRP-A/IR-90-011, California

Preston, J.N. (1991), Using an SBS Bitumen to Minimise Road Repairs, Highways and Transpotation (December 1991)

Pell P. S. ve Hanson J. M., (1973), Behavior of Bituminious Road Base Materials under Repeated Loading, Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 38

Postacıoğlu, B., (1981), Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, İTÜ, İstanbul

Raithby, K. D. ve Ramshaw, J. T., (1972), Effects of Secondary Compaction the Fatigue Performance to Prevent Fatigue Cracking, Special Report 140, Highway Research Board, s 49-64

Scung W. L., (1993) Waste products as highway materials in flexible pavement system, Journal of Transportation Engineering, Vol 119, May/June, s 433-449

TCK, (1994), Yollar Fenni Şartnamesi, Ankara

Terrel, R.L., ve Epps, J.A., (1989a), Using Additives and Modifiers in Hot Mix Asphalt (Part A), NAPA-QIP 114.

The Shell Bitumen Handbook

Umar F. ve Ağar, E., (1985), Yol Üstyapısı, İTÜ, İstanbul

Yüce, R., (1972), The Influence of Some Dimensional Factors and Elastic Foundation Support on Fatigue of Asphalt Concrete, Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara

Yoder, E.J., Witczak N.W., Principles of Pavement Design, John Wiley and Sons, Second Edition, USA, 1975

EK A. Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları

Tablo A.1

Yükleme periyodu 1000 ms için Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları

yükleme hızı (ms)			30		60		80	
			me	E	me	E	me	E
SICAKLIK = 5°C	Katkılı 0°	1	14,85	11276,7	15,874	10593,6	16,2838	10588,5
		2	15,1573	12061,7	15,4646	11562,5	15,6693	11377,6
		3	16,8984	10247,3	18,0249	9657,75	19,6634	8883,16
	Katkılı 90°	1	10,446	16624,7	10,8559	15652	11,1632	15593,2
		2	11,3679	15999,8	11,4704	15284,1	12,3918	14374
		3	11,7777	14795,9	13,0064	13463,9	13,2115	13088,3
		ort	13,42	13501	14,12	12702,3	14,73	12317,5
	Katkısız 0°	1	12,597	13620,7	12,8017	13634	14,0308	12313,1
		2	27,0371	8013,39	28,8808	7434,09	30,9292	6911,9
		3	19,817	10817,1	20,8412	10534,1	22,48	9612,51
	Katkısız 90°	1	14,9521	11522,8	17,1031	10196,9	17,1031	10107,1
		2	24,4768	8916,12	25,296	8386,15	26,3205	8039,59
		3	19,7145	10219,4	21,1996	9291,54	21,7118	9073,33
		ort	19,77	10518,3	21,02	9912,8	22,1	9342,92
SICAKLIK = 25°C	Katkılı 0°	1	35,0259	4668,39	41,2731	4036,27	42,297	3908,13
		2	35,5379	4864,49	40,3512	4358,27	41,7851	4178,95
		3	41,3757	4163,8	45,1646	3742,12	49,36	3433,23
	Katkılı 90°	1	36,9717	4581,39	41,6825	4089,09	44,1407	3747,24
		2	38,8149	4562,15	44,3454	4015,4	43,0142	4109,76
		3	47,3156	3690,13	53,6639	3183,49	58,681	2972,45
		ort	39,17	4421,72	44,41	3904,11	46,55	3724,96
	Katkısız 0°	1	38,2008	4471,88	44,5501	3864,33	47,1109	3635,27
		2	70,8696	2981,25	76,297	2683,21	81,5193	2497,95
		3	54,5352	3726,56	60,4235	3273,77	64,3151	3066,61
	Katkısız 90°	1	46,9057	3737,62	55,1979	3180,63	58,2706	2971,02
		2	91,9638	2294,48	108,149	1951,16	129,043	1646,65
		3	69,4348	3016,05	81,6732	2565,89	93,6566	2308,83
		ort	61,98	3371,31	71,05	2919,83	78,99	2687,72
SICAKLIK = 40°C	Katkılı 0°	1	110,298	1450,73	131,192	1263,67	142,047	1164,05
		2	100,366	1789,41	114,602	1544,67	124,328	1415,87
		3	122,794	1402,58	138,769	1226,73	151,573	1118,3
	Katkılı 90°	1	109,174	1495,72	131,91	1255,94	162,531	1005,36
		2	119,003	1451,67	152,086	1186,13	171,544	1026,71
		3	155,359	1142,47	176,663	971,752	226,849	751,474
		ort	119,5	1455,43	140,87	1241,48	163,15	1080,29
	Katkısız 0°	1	167,24	1024,42	193,356	892,021	208,515	826,231
		2	194,074	1053,2	226,336	916,626	239,033	864,96
		3	180,657	1038,81	209,846	904,324	223,774	845,595
	Katkısız 90°	1	181,988	936,953	223,468	764,288	291,265	578,666
		2	212,614	977,77	257,162	815,156	324,656	634,099
		3	197,301	957,361	240,315	789,722	307,96	606,383
		ort	188,98	998,09	225,08	847,02	265,87	725,99

Tablo A.2

Yükleme periyodu 2000 ms için Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları

yükleme hızı (ms)			30		60		80	
			me	E	me	E	me	E
SICAKLIK = 5°C	Katkılı 0°	1	14,2355	11980,3	15,7719	10632,9	16,0791	10320,8
		2	15,4646	11917,6	15,1573	11591,5	16,5911	10792,6
		3	17,5129	9995,3	18,127	9622,33	18,5369	9275,98
	Katkılı 90°	1	11,4704	15144,3	10,5486	15913	10,7533	16119,1
		2	11,9824	14964,6	11,5725	15152,5	13,6209	13501,4
		3	13,6209	12690,8	14,5427	12079,1	16,0791	10934,9
		ort	14,05	12782,2	14,29	12498,6	15,28	11824,1
	Katkısız 0°	1	12,4944	13752,8	12,6991	13590,9	13,9282	12358,1
		2	27,3444	7837,35	30,1099	7103,7	31,2364	6905,35
		3	19,9194	10795,1	21,4045	10347,3	22,5823	9631,75
	Katkısız 90°	1	15,362	11103,3	16,0791	10731,8	16,7958	10181,6
		2	24,1695	8800,46	23,4529	8840,79	26,5252	7990,67
		3	19,7658	9951,9	19,766	9786,3	21,6605	9086,12
		ort	19,84	10373,5	20,59	10066,8	22,12	9358,94
SICAKLIK = 25°C	Katkılı 0°	1	36,3571	4509,95	39,4294	4098,91	41,5804	3935,56
		2	36,3571	4847,91	40,2487	4379,97	41,6825	4151,32
		3	40,7611	4242,2	49,2574	3431,39	53,151	3217,88
	Katkılı 90°	1	36,1524	4599,2	39,4294	4146,2	43,1163	3873,95
		2	38,9174	4470,65	43,8334	4021,95	47,213	3758,5
		3	45,8818	3620,53	52,9458	3210,11	58,3732	2949,32
		ort	39,07	4381,74	44,19	3881,42	47,52	3647,75
	Katkısız 0°	1	38,5076	4409,85	45,4719	3816,43	48,0322	3547,86
		2	68,9253	2933,97	78,7543	2627,12	84,5921	2427,74
		3	53,7164	3671,91	62,1131	3221,77	66,3122	2987,8
	Katkısız 90°	1	46,4963	3703,02	54,0743	3217,88	58,2706	2971,02
		2	84,5921	2400,52	58,3146	2102,06	107,123	1918,22
		3	65,5442	3051,77	56,1944	2659,97	82,6966	2444,62
		ort	59,63	3361,84	59,15	2940,87	74,5	2716,21
SICAKLIK = 40°C	Katkılı 0°	1	112,858	1440,45	133,444	1240,73	150,855	1125,6
		2	103,234	1743,35	119,824	1479,24	131,295	1359,7
		3	124,328	1357,75	145,633	1167,83	160,278	1066,9
	Katkılı 90°	1	112,345	1474,72	136,312	1249,51	148,09	1150,86
		2	120,132	1453,19	141,534	1253,07	154,543	1140,69
		3	147,167	1132,05	168,368	1008,99	191,309	893,229
		ort	120,01	1433,59	140,85	1233,23	156,06	1122,83
	Katkısız 0°	1	169,394	1001,11	203,908	852,146	222,648	768,792
		2	200,015	1025,3	228,178	889,442	246,82	831,962
		3	184,704	1013,2	216,043	870,794	234,734	800,377
	Katkısız 90°	1	177,792	943,299	217,938	805,883	237,601	734,771
		2	188,031	1075,99	207,821	950,34	239,135	870,61
		3	182,912	1009,64	212,88	878,112	238,368	802,69
		ort	183,81	1011,42	214,46	874,45	236,55	801,53

Tablo A.3

Yükleme periyodu 3000 ms için Dolaylı Çekme Deneyi Sonuçları

yükleme hızı (ms)			30		60		80	
			mε	E	mε	E	mε	E
SICAKLIK = 5°C	Katkılı 0°	1	15,4646	11100,9	15,5667	10790,6	15,9766	10521,2
		2	16,5911	10836,8	16,0791	11062	15,7719	11306,6
		3	17,4104	10026,2	18,8442	9121,43	19,0489	9146,41
	Katkılı 90°	1	10,446	16036,2	10,958	15411,9	11,2653	15406,5
		2	11,3679	15571,9	11,4704	15378,9	12,3918	14724,3
		3	13,7235	12707,8	14,85	11587,7	15,1573	11504,1
		ort	14,17	12713,3	14,63	12225,4	14,94	12101,5
	Katkısız 0°	1	12,2897	13610,7	13,7235	12670,9	13,7235	12656,6
		2	27,1397	7771,44	29,5979	7241,47	31,7484	6792,15
		3	19,7147	10691,1	21,6607	9956,2	22,736	9724,38
	Katkısız 90°	1	12,6815	11794,2	16,2838	10556,2	17,2057	10022,3
		2	22,0191	9422,96	21,7118	9643,21	23,6575	8897,49
		3	17,3503	10608,6	18,9978	10099,7	20,4316	9459,9
		ort	18,53	10649,8	20,33	10028	21,58	9592,14
SICAKLIK = 25°C	Katkılı 0°	1	36,5618	4536,97	40,4538	4089,91	42,3996	3884,59
		2	36,4597	4717,11	39,8393	4314,87	41,7851	4172,4
		3	45,3698	3825,43	49,4626	3459,23	54,0743	3174,08
	Katkılı 90°	1	35,0259	4650,17	39,9419	4115,08	42,8095	3852,45
		2	37,7909	4525,51	43,0142	4056,34	46,701	3761,77
		3	47,3156	3676,62	52,5354	3229,96	57,4548	2970,4
		ort	39,75	4321,97	44,21	3877,56	47,54	3635,95
	Katkısız 0°	1	40,4538	4330,22	46,0865	3794,32	48,1348	3557,28
		2	71,0747	2871,33	79,8828	2601,12	86,4338	2405,63
		3	55,7643	3600,78	62,9846	3197,72	67,2843	2981,46
	Katkısız 90°	1	45,5745	3764,64	53,6639	3248,79	58,3732	2954,64
		2	82,4426	2483,42	95,5496	2146,48	103,537	1962,7
		3	64,0085	3124,03	74,6067	2697,64	80,9551	2458,67
		ort	59,89	3362,4	68,8	2947,68	74,12	2720,06
SICAKLIK = 40°C	Katkılı 0°	1	113,166	1419,78	136,825	1212,83	151,881	1109,06
		2	103,234	1686,77	121,563	1490,42	132,115	1359,21
		3	126,888	1309,69	147,577	1160,26	161,915	1062,58
	Katkılı 90°	1	110,708	1475,76	134,265	1252,58	149,624	1142,23
		2	121,153	1460,02	141,534	1235,88	156,282	1132,56
		3	148,295	1119,91	177,176	952,981	194,69	875,031
		ort	120,57	1411,99	143,16	1217,49	157,75	1113,45
	Katkısız 0°	1	180,865	926,718	213,635	810,899	226,746	751,003
		2	230,327	890,302	254,602	825,35	265,559	785,25
		3	205,596	908,51	234,118	818,124	246,153	768,127
	Katkısız 90°	1	177,484	954,516	214,66	806,682	236,165	731,741
		2	192,843	1041,58	223,674	913,638	242,003	854,418
		3	185,164	998,046	219,167	860,16	239,084	793,079
		ort	195,38	953,28	226,64	839,14	242,62	780,6

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	06.09.1971	
Doğum yeri	İzmir	
Lise	1986-1989	Antalya Anadolu Lisesi
Lisans	1989-1993	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. İnşaat Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurum(lar)

1993-1995	Doğuş Yapı Sanayi A.Ş.
1996-Devam ediyor	Doğuş İnşaat ve Ticaret A.Ş.