

# Öğütülmüş Atık Otomobil Lastiğiyle Modifiye Edilmiş Bitümler ile Yapılan Asfalt Betonunun Yorulma Davranışı

Osman Nuri ÇELİK

*Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi,  
İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
42031, Konya-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 28.06.2000

## Özet

Yol kaplamasında görülen kırılmalar yorulmayla açıklanabilir. Kaplama tabakası, farklı şiddetlerde ve frekanslarda tekrarlanan tekerlek yüklerine maruz kalırlar. Yorulma, tekrarlanan veya dalgalanan en yüksek, fakat çekme emniyet gerilmesinden daha düşük bir gerilme altında malzemenin kırılması olarak tanımlanmaktadır.

Bu makalede lastikle modifiye edilmiş bitümlü asfalt betonunun yorulma davranışının laboratuvar özellikleri incelenmiş ve parçalanmış otomobil lastiği ile modifiye edilmiş bağlayıcının asfalt betonunun yorulma davranışına etkisi değerlendirilmiştir.

Kiriş numunelerinin yorulma sürelerini belirlemek için sabit basınç deney yöntemi kullanılmıştır. Bu çerçevede, asfalt betonunun yorulma davranışına lastikle modifiye edilmiş bitümün ve farklı bağlayıcı oranlarının (optimum bağlayıcı oranının % 0,5 üstü ve % 0,5 altı) etkisi incelenmiştir.

Bitümün otomobil lastiği ile modifikasyonu, asfalt betonunun yorulma süresini önemli ölçüde artırmıştır. % 5 oranında küçük bir katkı, 50 penetrasyon bitüm için yorulma süresini 2 kat artırırken 100 penetrasyon bitümle yapılan modifikasyon sonucu yorulma süresinin 23 kat arttığı gözlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Yorulma, Asfalt betonu, Modifiye bitüm

## The Fatigue Behaviour of Asphaltic Concrete Made With Waste Shredded Tire Rubber Modified Bitumen

### Abstract

Pavement failure can be manifested by excessive cracking due to fatigue. Highway pavements are subjected to a repeated passage of wheel loading of varying magnitude and intensity. Fatigue has been defined as the phenomenon of fracture under repeated or fluctuating stress having a maximum value less than the tensile strength of the material.

This paper examines a laboratory characterisation of the fatigue behaviour of rubberised asphaltic concrete and assesses the effect of waste shredded rubber on its fatigue properties.

The constant stress mode of testing is used to determine the fatigue life of beam specimens. The objectives of the test programme are to determine the effect of waste shredded rubber modified bitumen on the fatigue behaviour of asphaltic concrete beam specimens and to evaluate the effect of varying binder content (0.5 per cent above and below the optimum binder content) on the fatigue life of asphaltic concrete.

The addition of the rubber is highly significant on the fatigue life of asphaltic concrete. Even 5% of rubber addition increased the fatigue life of the mixture twofold for the modified binder made with the 50 pen. base bitumen and 23 times for the binder made with the 100 pen. base bitumen.

**Key Words:** Fatigue, Asphaltic concrete, Modified bitumen

## Giriş

Hveem (1955), kaplamadaki bozulmanın yorulma ile olabileceğini ilk ortaya atan araştırmacı olmuştur. Bu tarihten itibaren problem genişletilerek devam eden bir araştırma konusu olmuştur. Bitümlü malzemelere kırılma gerilmesinden daha küçük bir gerilme uygulandığında, yükün birçok kez tekrarlanması durumunda kırılırlar. Gerçekte esnek kaplamalar sürekli olarak eğilme gerilmesine maruzdurlar. Gerilmenin değeri kaplamanın yapısına ve sağlamlık modülüne bağlıdır. Fakat çekme şekil değiştirmesi değerinin 50-200 mikron arasında değiştiği gözlenmiştir (Pell, 1986).

Dünyada, bitümlü karışımların yorulma davranışı üzerine yapılmış birçok araştırma mevcuttur. Bu arada modifiye bitümlü karışımların yorulma davranışı ile ilgili olarak da bir çok çalışma yapılmıştır. Fakat atık lastiklerle modifiye edilmiş bitümlü karışımların yorulma davranışı ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Esch (1982) tarafından karışım içerisinde lastik parçacıklarının ilavesi ile yapılmış olan tek çalışmada PlusRide<sup>TM</sup> kaplamaların yorulma davranışının normal bitümlü karışımlardan 10 defa daha iyi olabileceği belirtilmiştir.

Kırılma genel olarak çekme gerilmesinin en büyük olduğu kaplama tabakasının tabanından başlar ve yukarıya doğru ilerler. Tekrarlanan yüklerin sebep olduğu yorulma kırılması yüklem özellikleri, dinlenme yada yüksüz zaman aralıkları, iklimsel ve çevre etkileri ve karışım özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır.

Bu çalışma Doktora çalışmasının bir parçasıdır. Deneyler, İngiltere’de Leeds Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Bitümlü malzemeler Laboratuvarında yapılmıştır. Bu çalışmada, çok ince parçalanmış Wellington Rubber Co. Ltd. (Leeds-İngiltere) tarafından sağlanan vulkanize otomobil lastiği kullanılmıştır. Lastik parçacıklarının asfalt betonunun yorulma dayanımına etkisini incelemek için ağırlıkça % 2 ve 5 oranında lastik 50 ve 100 penetasyon bitüme ayrı ayrı 160 °C de karıştırılmıştır. Karışım 1/2 saat içinde tamamlanmıştır. Daha sonra elde edilen Öğütülmüş Atık Otomobil Lastiği ile Modifiye Edilmiş Bitümler ile granülometrisi Kuru

Sıkıştırma Deneyi (DCT), (Dry Compaction Test) ile önceden belirlenen agrega karıştırılarak elde edilen asfalt betonları için yorulma deneyleri yapılmıştır.

## Deney Yöntemleri

Yorulma davranışını etkileyen etkenleri yük, çevre ve karışım değişkenleri olarak üç başlıkta toplamak mümkündür. Irwin ve Gallaway (1974) laboratuvar koşullarının da belirgin olarak bitümlü karışımların yorulma davranışını etkilediğini ortaya koymuşlardır. Baburamani (1992) bitümlü malzemelerin yorulma özelliklerini belirlemek için aşağıdaki deney yöntemlerini sıralamıştır.

1- Kirişin üç nokta eğilme ile yüklenmesi veya iki nokta trapezoidal veya döndürme (silindirik numuneye bir ucu sabit moment uygulanması) veya tekerlek izi deneyi,

2- İtme - Çekme,

3- Dolaylı eksenel çekme.

Yukarıdaki deney yöntemleri yüklem şekli, yüklem cinsi, numune içindeki gerilme dağılışı ve numune kesiti gibi özelliklerinden dolayı farklılık göstermektedir. Bitümlü malzemeler üzerine uygulanan yorulma deneyi sabit basınç (yük) ya da sabit şekil değiştirme yöntemlerinden birisi uygulanarak gerçekleştirilir. Kalın bitümlü kaplamalar için (>150 mm) sabit basınç yöntemi önerilirken, ince bitümlü kaplamalar için (≤5 mm) sabit şekil değiştirme yöntemi önerilmiştir (Barksdale, 1978; Texas Institute, 1987).

Sabit basınç yönteminde, basınç tekrar sayısı arttıkça şekil değiştirme (yerdeğiştirme) değeri yükselmekte ve kırılma oluşumu hızlı gerçekleşmektedir. Deneyin sonucu kesindir. Karışımdaki değişkenlerin etkisinin incelenmesinde sabit basınç yöntemi kullanımının bazı üstünlükleri vardır. Bu çalışmada da bu yüzden sabit basınç yöntemi kullanılmıştır.

Yerdeğiştirme, sabit şekil değiştirme yönteminde sabittir (Barksdale, 1978). Başlangıçtaki şekil değiştirmeyi sabit tutmak için basınç, kademeli olarak azaltılır. Bu deney yönteminde, kırılma başlangıcında şekil değiştirmeyi sabit tutacak basınç değeri oldukça düşüktür. Basınç değerinin azalması nedeniyle diğer deney yöntemiyle karşılaştırıldığında

kırılmanın elde edilmesi zordur.

### Yorulma Davranışını Etkileyen Diğer Etkenler

Yorulma için genellikle dikkate alınan kriter maksimum eğilme gerilmesidir. Laboratuvarda yorulma deneyi belirli sayıda sabit basınç ya da gerilme tekrar sayısına dayandırılmıştır. İdeal olamı, deneyin malzemenin kırılmasına kadar sürdürülmesidir. Buna rağmen bir çok araştırmacı yorulma bozulmasını sağlamlık modülündeki değişim ile açıklamaya çalışmışlardır (Sharp ve Alderson, 1991) ve kriter olarak yorulma hasarının başlangıçtaki sağlamlık modülünün yarısına düştüğü anda başladığını kabul etmişlerdir (Texas Institute, 1987). Sabit şekil değiştirme yönteminde ise yorulma süresi olarak, başlangıçtaki basınç değerinin yarısına ulaşıldığı süre kabul edilmiştir (Van Dijk ve Visser, 1977; Moutier ve arkadaşları, 1988; Moutier ve arkadaşları, 1990).

Yüklemeye frekansının da yorulma süresine etkisi vardır. Taylor (1968) bir ucu sabit silindirik numuneye 1,3 ile 41,7 Hz arasında yüklemeler yapmış ve yorulma zamanının 3,3 Hz değerinin altında daha fazla etkilendiğini belirtmiştir. Pell ve Taylor (1969) 32 Hz' in altında yorulma davranışında büyük değişiklik olduğunu belirtmişlerdir. Deacon ve Monismith (1967) tarafından gerçekleştirilen diğer bir çalışmada 0,5 ile 1,7 Hz arasında değişen frekanslarda yorulma süresinin önemli derecede düştüğü gözlenmiştir. Bu farkların kullanılan farklı deney yöntemlerinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Sıcaklık, nem ve hizmet süresince malzemenin yaşlanması gibi çevre etkenleri de kaplamanın yorulma davranışını etkiler (Pell ve Taylor, 1969).

Yorulma davranışını etkileyen diğer önemli etmen, dinlenme (rest) süresidir. Birçok araştırmacı (Raithby ve Sterling, 1970; Van Dijk ve Visser, 1977; Bonnaure ve arkadaşları, 1982) dinlenme süresinin etkisini belirlemek için yorulma deney düzeneğine dinlenme süresini ilave etmeye çalışmışlardır. Dinlenme süresi, gerçek trafik koşulları altındaki yüklemeye verilerinin kaplama tabakasına uygulamasının bir benzetimi şeklinde olmaktadır. Dinlenme süresinin yorulma süresini uzattığı gözlenmiştir. Örneğin, yüklemeye aralarındaki bir saniye dinlenme süresi, sürekli tekrarlanan yüklemeye nazaran yorulma süresini 25 kez artırmıştır. Buna rağmen dinlenme süresinin, yorulma süresinin değişmediği sıcaklığa bağlı olarak değişen, artırılabilceği bir limit değeri vardır

(Raithby ve Sterling, 1970).

### Bitümlü Karışımların Analizi

Bitümlü karışımların yorulma direnci, tekrarlanan yükler altında karışımın kırılmadan dayanabilmesi olarak açıklanmıştır. Yorulma bozulması kavramı, kaplamanın istenilen düzeyde daha fazla hizmet edemez denileceği an belirsiz olduğundan, tartışmalıdır. Bu yüzden laboratuvar şartlarındaki deney yöntemi ve bozulma durumunun belirtilmesi gereklidir. Örneğin, yorulma bozulması sağlamlık modülü gibi numunenin belirli bir özelliğindeki değişimle veya kırılmanın olduğu süre ile veya gerilmedeki ani artışın başlangıç zamanı ile ifade edilebilir. Diğer taraftan yorulma bozulmasının uygulamada göstergesi kırılma ile olmaktadır.

Uygulanan basınç ile bozulma için tekrarlanan yüklemeye sayısı logaritmik çizildiğinde aralarında lineer bir bağıntı gözlenmektedir (Cooper ve arkadaşları, 1974; Pell ve Cooper, 1975). Bu bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir (Pell, 1962);

$$N = K \left( \frac{1}{\sigma} \right)^n \quad (1)$$

Basınç şekil değiştirmeye dönüştürüldüğünde;

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{S} \quad (2)$$

(1) bağıntısı, yorulma süresi ve uygulanan gerilme arasındaki ilişkinin incelenen bölümde lineer olacağı düşüncesiyle aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$N = K1 \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^m \quad (3)$$

Hizmet süresi (Nh) ve kırılma süresi (Nk) genellikle yorulma hasarı ile ilgilidir. Aynı zamanda yorulma süresi olarak da ifade edilen hizmet süresi, malzemenin sağlamlık modülünün başlangıçtaki değerinin yarısına düştüğü ana kadar tekrarlanan yük sayısı olarak değerlendirilmiştir (Bonnaure ve arkadaşları, 1982). Bu yüzden sabit şekil değiştirme yönteminde, basınç değerinin başlangıçtaki değer yarısına düşmesi ile yorulma süresi belirlenmiş olur. Sabit basınç yönteminde ise yorulma süresi, gerilme değerinin iki katına ulaşılması ile belirlenir. Diğer taraftan, bozulma tamamen kırılma ile ifade edilirse, hizmet süresi (Nh) ve kırılma süresi (Nk) aynı değer olur.

## Lastikle Modifiye Edilmiş Asfalt Betonunun Yorulma Davranışı

Bu bölümde öğütülmüş atık otomobil lastiği ile modifiye edilmiş asfalt betonunun yorulma özelliklerini belirlemek için yapılan laboratuvar çalışmasından bahsedilecektir. Bunun için, elastik bir temel üzerine oturan kiriş numuneler kullanılmıştır. Kirişlerde çekme gerilmesini ölçmek için A PI 60 mm (120  $\Omega$ ) elektriksel dirençli gerilme ölçücü kirişe yapıştırılmıştır. Deney düzenegi, Leeds Üniversitesinde Napiah (1993) ve Zoorob (1995) tarafından geliştirilmiştir. Bu düzenekte, kirişlerin yorulma davranışını belirlemek için sabit basınç yöntemi kullanılmıştır. Bu çerçevede, öğütülmüş atık otomobil lastiği ile modifiye edilmiş asfalt betonunun yorulma özelliklerini açıklayabilmek için aşağıdaki program amaçlanmıştır.

1- Öğütülmüş atık otomobil lastiği ile modifiye edilmiş bitümün, asfalt betonu kirişlerin yorulma davranışına etkisini belirlemek,

2- Değişen bağlayıcı oranının (en uygun bağlayıcı oranının yüzde 0,5 üstü ve altı) asfalt betonunun yorulma süresine etkisini incelemek.

### Numune Hazırlanması

50 penetrasyon ve 100 penetrasyon dereceli temel bitümlerle yapılan kiriş numuneleri kontrol numuneleri olarak hazırlanmışlardır. Öğütülmüş belirli granülometriye sahip (elek analizi Çelik, 1996b'de verilmiştir) lastikle modifiye edilmiş bitümlerin belirli granülometriye (DCT) sahip agrega ile karışımı sonucunda elde edilen asfalt betonunun yorulma davranışına etkisini incelemek için bağlayıcı olarak aşağıdaki lastik-bitüm karışımlar kullanılmıştır.

1- 50 penetrasyon bitüm + % 2 40's boyutta öğütülmüş lastik,

2- 50 penetrasyon bitüm + % 5 40's boyutta öğütülmüş lastik,

3- 100 penetrasyon bitüm + % 2 40's boyutta öğütülmüş lastik,

4- 100 penetrasyon bitüm + % 5 40's boyutta öğütülmüş lastik.

Kiriş numuneler, iç boyutları 100x100x500 mm olan çelik kalıplarda Kango titreşimli çekiç kullanılarak sıkıştırılmışlardır. Marshall deneyi için hazırlanan numunelerle birim hacim ağırlığının aynı olması için sıkıştırma işlemi dört tabakada gerçekleştirilmiş ve birim hacim ağırlıkları karşılaştırılmıştır (Çelik, 1996a). Sıkıştırılan kirişler tam ortadan kesilerek 40x100x500 mm boyutunda ikiz kirişler elde edilmiştir.

Bir kirişe yorulma deneyi uygulanacaksa küçük bir çentik kirişi zayıflatır ve yorulma çatlağının oluşumunu hızlandırır. Kiriş hazırlandıktan sonra bu çentiğin oluşturulması zor olduğundan kirişin yapımında, yükleme sırasında kirişin alt kısmına gelecek ters V şeklinde bir oyuk yapılmıştır.

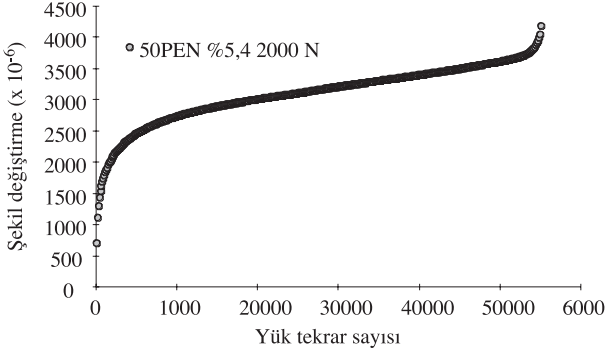
### Uygulanan Deney Yöntemi

Yarım sinüzoidal, tekrarlanan yük kirişlere orta-üst noktadan uygulanmıştır. Kirişler, 3 Hz frekansla dinlenme süresi uygulanmadan 5°C ( $\pm 1$ )' de yüklenmişlerdir. Sabit basınç 1500-2000 N arasında değiştirilmiştir. Kiriş numuneler lastik bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Kiriş ve lastik yüzeyler arası gres yağı ile yağlanmıştır. Lastik yüzey çelik bir tabaka üzerine yerleştirilmiştir. Yük 60 mm çapında bir lastik pabuç yardımıyla kirişin merkezine uygulanmıştır. Şekil değiştirme ölçücü (strain gauge), gerilme bölgesine, çentiğin hemen 1 cm üzerine yerleştirilmiştir. Kirişin her iki ucu, uzun yükleme sırasında yukarıya kalkmaması için lastik tabakasına bir bant yardımıyla tutturulmuştur. Kirişin yüzeyine, kirişin sıcaklığını izlemek için bir sıcaklık ölçücü (termokapl) yerleştirilmiştir. Tüm sistem geçirimsiz bir hazne içerisine alınmıştır. Hazneye hava girişi ve çıkışı yapılarak bir soğutucu yardımıyla ortamın ısı sabit tutulmuştur. Yorulma deneyine başlamadan önce sistem yavaşça yükseltilerek yükleme başı çelik yükleme bloğuna değdirilmiş ve arzu edilen yükleme seviyesinde ve frekansta tekrarlanan sabit basınç altında yükleme gerçekleştirilmiştir.

### Değerlendirme ve İrdeleme

Bu çalışmada, farklı bağlayıcı cinsleri için, 3 farklı bağlayıcı oranı (optimum bağlayıcı oranı ve  $\pm$  % 0,5) için 6 farklı kombinasyonda (2 kontrol 4 modifiye bitüm) toplam 54 kiriş hazırlanmış ve denenmiştir. Her karışıma üç sabit basınç seviyesinde yorulma deneyi uygulanmıştır. Deneylerde, Bjorklund (1985)' un sabit basınç yönteminde başlangıçta oldukça büyük bir düşey yer değiştirmeden sonra kalıcı deplasman azalarak malzeme daha elastik bir davranış gösterir yaklaşımı dikkate alınmıştır. Eğilme şekil değiştirmesi ve yükleme sayısı göz önünde bulundurularak çizilen bir grafikte (Şekil 1) başlangıçta elde edilen büyük bir lineer şekil değiştirme bölümü ve daha sonra sabite yakın yine lineer şekil değiştirme bölümü kesiktirilmiştir. Bu kesişme noktası, bazı çalışmalarda (Napiah, 1993;

Zoorob, 1995) başlangıç şekil değiştirmesi olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada bu yaklaşıma bir başka boyut getirilmiştir.



**Şekil 1.** 2000 Newton'luk tekrarlanan yük altında % 5,4 oranında 50 penetrasyon bitümle yapılan kırışte yük tekrar sayısı ile şekil değiştirme arasındaki ilişki.

Kirişin başlangıçtaki sağlamlık modülü, bu çalışmada BANDS bilgisayar programı ile belirlenmiştir (Shell Research BV, 1990). Başlangıçtaki

şekil değiştirme ise uygulanan yükün belirlenen sağlamlığa bölünmesiyle elde edilmiştir. Yorulma deneyinde şekil değiştirme değerleri 40 saniye aralıklarla bilgisayar yardımıyla okunmuştur. Yani, 3 Hz yükleme frekansı için her 40 saniyede 120 yükleme yapılmış demektir, bu yüzden bu sistemde başlangıç şekil değiştirmesini belirlemek olanaksızdır. Basınç değeri  $\sigma$  (Pa) aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} \quad (4)$$

Elastik temel üzerine oturan kirişlerde, orta noktadan bir P yükü etki ettirildiğinde eğilme momenti (M) aşağıdaki formülden hesaplanabilir (Hetenyi, 1946).

$$M = \frac{P}{4 \left( \frac{k}{4E \times I} \right)^{0.25}} \quad (5)$$

**Tablo 1.** Yorulma analizinde kullanılan deneysel parametreler.

| Deney serisi | Bağlayıcı oranı | Vag (%) | Vb (%) | Va (%) | Sbit (MPa) | Smix (MPa) |
|--------------|-----------------|---------|--------|--------|------------|------------|
| 50 PBB       | 5,4             | 81,77   | 11,58  | 6,65   | 214,98     | 11500      |
|              | 5,9             | 82,85   | 12,98  | 4,17   | 214,98     | 12500      |
|              | 6,4             | 82,77   | 14,20  | 3,03   | 214,98     | 12500      |
| 100 PBB      | 5,3             | 81,83   | 12,12  | 6,05   | 114,37     | 8390       |
|              | 5,8             | 82,15   | 13,58  | 4,27   | 114,37     | 8640       |
|              | 6,3             | 82,29   | 14,84  | 2,87   | 114,37     | 9250       |
| % 2<br>40's  | 5,6             | 82,40   | 12,92  | 4,68   | 302,97     | 14300      |
|              | 6,1             | 82,55   | 14,20  | 3,25   | 302,97     | 14500      |
| 50 PBB       | 6,6             | 82,24   | 15,41  | 2,35   | 302,97     | 14200      |
| % 5<br>40's  | 5,7             | 81,90   | 13,51  | 4,59   | 315,50     | 14100      |
|              | 6,2             | 82,20   | 14,35  | 3,45   | 315,50     | 14500      |
| 50 PBB       | 6,7             | 81,98   | 16,00  | 2,12   | 315,50     | 14300      |
| % 2<br>40's  | 5,8             | 80,71   | 13,54  | 5,75   | 156,70     | 8960       |
|              | 6,3             | 81,27   | 14,75  | 3,98   | 156,70     | 9400       |
| 100 PBB      | 6,8             | 81,39   | 16,02  | 2,59   | 156,70     | 9510       |
| % 5<br>40's  | 5,8             | 80,35   | 13,11  | 6,54   | 200,59     | 9910       |
|              | 6,3             | 81,12   | 14,92  | 3,96   | 200,59     | 10600      |
| 100 PBB      | 6,8             | 81,44   | 15,96  | 2,60   | 200,59     | 10900      |

Kirişin sağlamlık modülü; bağlayıcının sağlamlık modülü, bağlayıcı hacmi ve agrega hacmi değerlerine bağlı olarak BANDS programı yardımıyla bulunmuştur. Lastik-bitüm karışımının sağlamlık modülü, deney sıcaklığı (5°C) ve yükleme zamanı (3 Hz) için salımlı dinamik reolojik analiz

(Çelik,1996b) yardımıyla bulunmuştur. Daha önce söylendiği gibi başlangıç şekil değiştirmesi, uygulanan yükün başlangıç sağlamlık modülüne bölünmesi ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada yorulma süresinin tayininde mikro kırılmanın oluşum süresi göz önünde bulundurulmuştur. Eğilme şekil

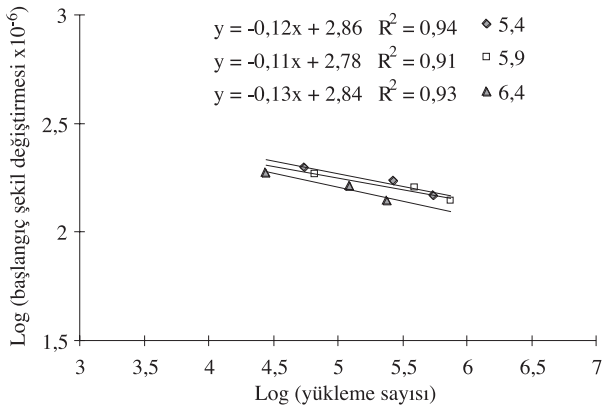
değiştirmesi ve yükleme sayısı göz önünde bulundurulurak çizilen bir grafikte (şekil 1) başlangıçtaki büyük lineer şekil değiştirmeden sonraki sabite yakın uzun süreli şekil değiştirme bölümü mikro kırılmanın olduğu yükleme sayısına kadar devam etmektedir. Bu değer, şekil değiştirmenin dikkate değer bir şekilde arttığı noktadır. Yorulma bozulması için tekrar sayısı, bu iki şekil değiştirme değerinin keşiştiği nokta olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan yorulma deney değerleri Tablo 1 de verilmiştir.

şekil 2 de 50 penetrasyon kontrol bağlayıcı ve kuru sıkıştırma sonucu (DCT) (elik, 1996a) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen agrega granülometrisi ile hazırlanan asfalt betonunun yorulma grafikleri verilmiştir. Başlangıç gerilmesi ile yorulma süresi arasında lineer bir bağıntı mevcuttur. Bu bağıntı;

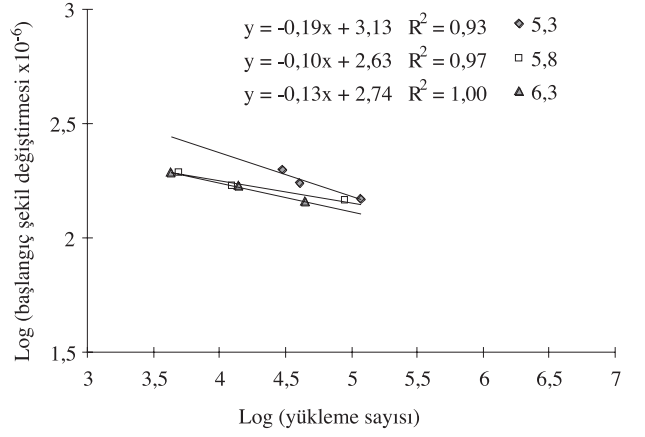
$$\log \varepsilon = a - b \log Nf \quad (6)$$

Bu bağıntı řu şekilde de verilebilir;

$$Nf = K1 \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^m \quad (7)$$

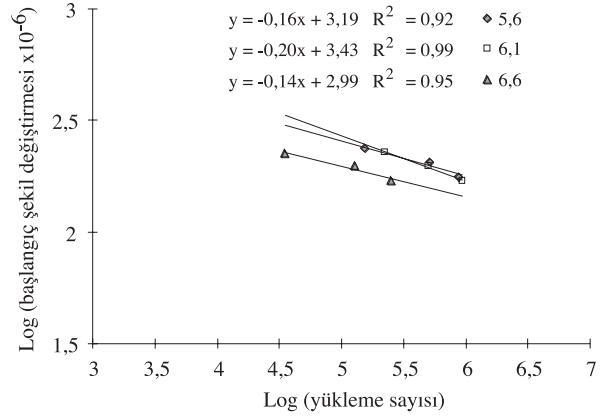


**şekil 2.** 50 penetrasyon kontrol bağlayıcı ve kuru sıkıştırma sonucu (DCT) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen agrega granülometrisi ile hazırlanan asfalt betonunun başlangıç şekil değiştirmesi-yorulma süresi arasındaki ilişki.

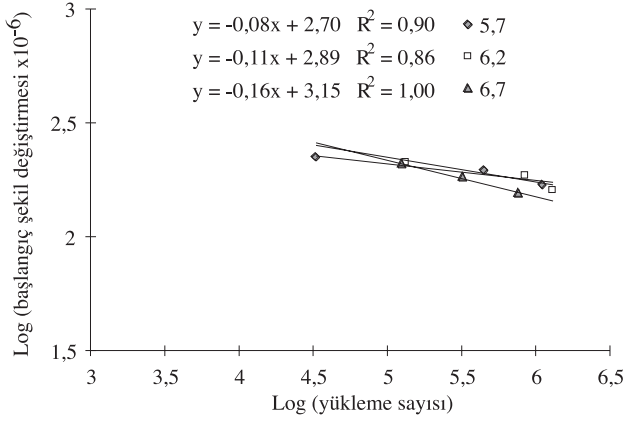


**şekil 3.** 100 penetrasyon kontrol bağlayıcı ve kuru sıkıştırma sonucu (DCT) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen agrega granülometrisi ile hazırlanan asfalt betonunun başlangıç şekil değiştirmesi-yorulma süresi arasındaki ilişki.

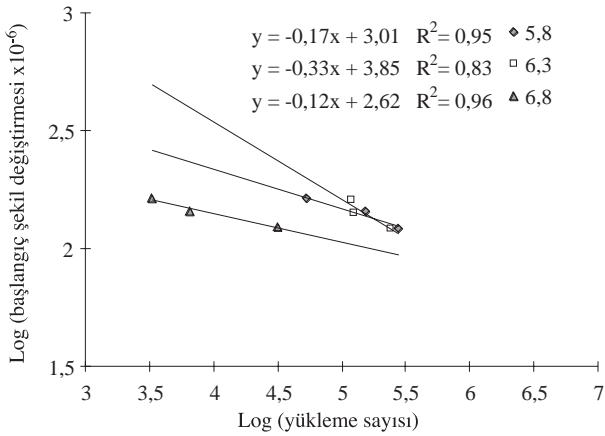
Benzer grafikler incelenen lastikle modifiye edilmiş asfalt betonları için çizilirse aşağıdaki şekil 4, şekil 5, şekil 6 ve şekil 7 elde edilir.



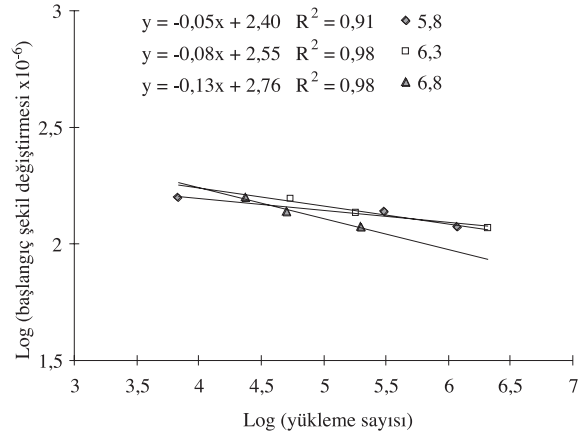
**şekil 4.** Kuru sıkıştırma sonucu (DCT) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen agrega granülometrisi ve 50 penetrasyon kontrol bağlayıcı artı % 2 (40's boyutta) parçalanmış otomobil lastiği ile hazırlanan asfalt betonunun başlangıç şekil değiştirmesi-yorulma süresi arasındaki ilişki.



**Şekil 5.** Kuru sıkıştırma sonucu (DCT) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen agreg granülometrisi ve 50 penetrasyon kontrol bağlayıcı artı % 5 (40's boyutta) parçalanmış otomobil lastiği ile hazırlanan asfalt betonunun başlangıç şekil değiştirme-yorulma süresi arasındaki ilişki.



**Şekil 6.** Kuru sıkıştırma sonucu (DCT) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen agreg granülometrisi ve 100 penetrasyon kontrol bağlayıcı artı % 2 (40's boyutta) parçalanmış otomobil lastiği ile hazırlanan asfalt betonunun başlangıç şekil değiştirme-yorulma süresi arasındaki ilişki.



**Şekil 7.** Kuru sıkıştırma sonucu (DCT) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen agreg granülometrisi ve 100 penetrasyon kontrol bağlayıcı artı % 5 (40's boyutta) parçalanmış otomobil lastiği ile hazırlanan asfalt betonunun başlangıç şekil değiştirme-yorulma süresi arasındaki ilişki.

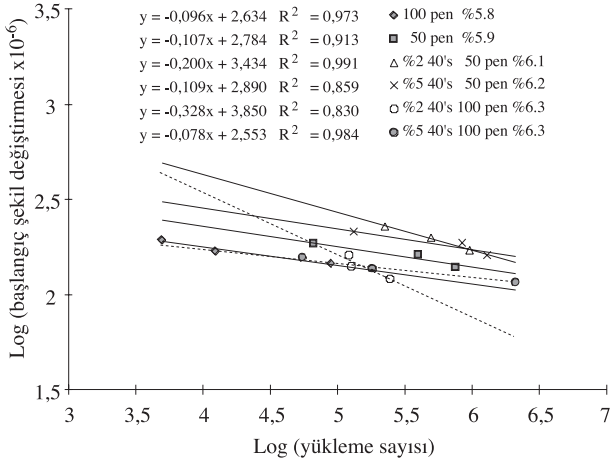
### Genel Sonuçlar

Kuru sıkıştırma sonucu (DCT) en az boşluk oranı göz önüne alınarak elde edilen granülometriye sahip agreg ile 50 ve 100 penetrasyon bitüm karıştırılarak elde edilen asfalt betonunun yorulma özellikleri incelenmiştir. İlave olarak, 40's boyuttaki parçalanmış otomobil lastiği ile % 2 ve % 5 oranlarında modifiye edilmiş bitümün asfalt betonunun yorulma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yorulma deneyi, Leeds Dizayn Yöntemine göre belirlenmiş en uygun bağlayıcı oranı ve  $\pm$  % 0,5 için gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen yorulma grafikleri uygulanan deney yöntemi, başlangıç şekil değiştirme ve kırılma kriteri açısından tektir. Bu yüzden, diğer çalışmalarla karşılaştırılması oldukça zordur.

Otomobil lastiği ile modifikasyon, asfalt betonunun yorulma süresini önemli ölçüde artırmıştır. % 5 oranında küçük bir katkı, 50 penetrasyon bitüm için yorulma süresini 2 kat artırırken 100 penetrasyon bitümle yapılan modifikasyon sonucu yorulma süresinin 23 kat arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 8 de optimum bağlayıcı oranı için elde edilen sonuçlar toplu olarak verilmiştir.

Bitüm cinsi de yorulma süresinde oldukça etkilidir. Sert bağlayıcı sert karışım demektir. Bu sonuç, Epps ve Monismith (1972) ile Pell (1986)'in gözlemleri ve karışımın yorulma süresini artırmak için sağlamlık modülünü artırmak gerekir sonucu ile paralellik göstermektedir.



**Şekil 8.** Bu çalışmada incelenen farklı bağlayıcılarla en uygun bağlayıcı oranında yapılan asfalt betonu karışımlar için başlangıç şekil değişimi-yorulma süresi arasındaki ilişki.

Diğer taraftan, bu araştırmada kullanılan her iki bitümün de (50 ve 100 penetrasyon) deney sıcaklığı olan 5°C’ de yaklaşık aynı sağlamlık modülü değerine (200 Mpa) sahip olduğu belirlenmiştir. Fakat yorulma süreleri farklı olmaktadır. Bu, agrega etrafındaki film tabakasının kalınlığı ile açıklanabilir. Bu çalışmada karıştırma sıcaklığı her iki bitümle yapılan karışımlar için sabit tutulmuştur (150°C). Aynı sıcaklıkta 50 ve 100 penetrasyon dereceli bitümlerin viskozitelerinin farklı olacağı açıktır. Dolayısıyla, daha az viskoziteye sahip yumuşak bitüm agregayı daha ince bir film tabakasıyla sararken, muhtemelen daha sert bitüm agrega etrafında daha kalın bir film tabakası oluşturmaktadır. Bu sert bitümle kıyaslandığında,

daha yumuşak bitümle yapılan karışım için erken kırılma anlamına gelmektedir.

### Semboller

- V<sub>ag</sub> : Agrega hacmi (%)
- V<sub>b</sub> : Bitüm hacmi (%)
- V<sub>a</sub> : Boşluk yada hava hacmi (%)
- S<sub>bit</sub> : Bağlayıcı sağlamlık modülü (MPa)
- S<sub>mix</sub> : Karışımın sağlamlık modülü (MPa)
- N : Bozulma için tekrarlanan yükleme sayısı
- σ : Uygulanan gerilmenin maksimum değeri (MPa)
- K : Doğrunun durumu ile ilgili katsayı
- n : Yorulma doğrusunun eğimi
- ε : Maksimum şekil değiştirme (μs)
- S : Belirli bir basınç, sıcaklık ve yükleme zamanı için malzemenin başlangıçtaki dinamik sağlamlık modülü (MPa)
- M : Eğilme momenti (Nm)
- y : Şekil değiştirme ölçerin kirişin orta noktasından düşey uzaklığı (m)
- I : Kirişin atalet momenti (I=(1/12) bd<sup>3</sup>) (m<sup>4</sup>)
- P : Uygulanan yük (Pa)
- k : Lastik temelin sağlamlık modülü (=4,3 MPa)
- E : Kirişin sağlamlık modülü (MPa)
- I : Kirişin atalet momenti (I=(1/12) bd<sup>3</sup>) (m<sup>4</sup>)
- N<sub>f</sub> : Kirişin yorulma süresi (yükleme sayısı)
- K<sub>1</sub> : Doğrunun durumunu belirleyen sabit (=10<sup>a/b</sup>) (y=a+bx)
- m : Yorulma doğrusunun eğimi (=1/b)

### Kaynaklar

Baburamani, P.S., “Fatigue Characterisation of Asphalt Mixes by Indirect Tensile (Diametrical) Testing: a Literature Review”, Australian Research Board, Research Report, ARR 234, October, 1992.

Barksdale, R.D., “Practical Application of Fatigue and Rutting Tests on Bituminous Mixes”, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 47, 115-159, 1978.

Bjorklund, N.A., “Permanent Deformation and Resistance to Fatigue of Resurfaced Pavements. A Laboratory Investigation Performed on Beams Taken Across the Wheel Path and Resurfaced in the Lab-

oratory”, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 54, 551-586, 1985.

Bonnaure, F.P., Huibers, A.H.J.J., ve Boonders, A., “A Laboratory Investigation of the Influence of Rest Periods on the Fatigue Characteristics of Bituminous Mixes”, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 51, 104-108, 1982.

Çelik, O.N., “The Engineering Properties and Fatigue Behavior of Asphaltic Concrete Made with Waste Thread Tire Rubber Modified Binders”, Ph.D. Dissertation, University of Leeds, UK, February, 1996a.



- Çelik, O.N., "Otomobil Lastiği ile Modifiye Edilmiş Asfaltın Dinamik Reolojik Analizi", 1. Ulusal Asfalt Sempozyumu, İstanbul, 19-20 Aralık 1996b.
- Cooper, K.E. ve Pell, P.S., "The Effect of Mix Variables on the Fatigue Strength of Bituminous Materials" Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 633, 1974.
- Deacon, J.A. ve Monismith, C.L., "Laboratory Flexural-Fatigue Testing of Asphaltic Concrete with Emphasis on Compound Loading Tests", Highway Research Board, Washington D.C., 1-31, 1967.
- Epps, J.A., ve Monismith, C.L., "Fatigue of Asphalt Concrete Mixtures-Summary of Existing Information" in Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures, American Society of Testing Materials, STP 508, 19-46, 1972.
- Esch, D.C., "Construction and Benefits of Rubber-Modified Asphalt Pavements", Transportation Research Record 860, 5-23, 1982.
- Hetenyi, M., "Beams on Elastic Foundation", University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1946.
- Hveem, F.N., "Pavement Deflection and Fatigue Failures", Highway Research Board Bulletin No: 114, Transportation Research Board, Washington D.C., 43-73, 1955.
- Irwin, L.H. ve Gallaway, B.M., "Influence of Laboratory Test Method on Fatigue Test Results of Asphaltic Concrete" in Fatigue and Dynamic Testing of Bituminous Mixtures, American Society of Testing Materials, STP 561, 12-46, 1974.
- Moutier F., Duan, T.H. ve Chauvin, J.J., "The Effects of the Formulation Parameters on the Mechanical Behavior of Mixes", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 57, 213-243, 1988.
- Moutier, F., Raymond, G., Such, C. ve Bonnet, J., "Institution of Civil Engineers Highway Research : Sharing the Benefits", by J. Porter, Proceedings of the Conferences The United States, SHRP, London, 229-240, October, 1990.
- Napiah, M.B., "Fatigue and Long Term Behavior of Polymer Modified Hot Rolled Asphalt", Ph.D. Dissertation, University of Leeds, UK, 1993.
- Pell P.S. ve Cooper K.E., "The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 44, 1-37, 1975.
- Pell, P.S., "Fatigue of Asphalt Paving Mixes", First International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, The University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1962.
- Pell, P.S., "Dynamic Stiffness and Fatigue Strength of Bituminous Materials", Residential Course on Bituminous Pavement, University of Nottingham, UK, 1986.
- Pell, P.S., ve Taylor, I.F., "Asphaltic Road Materials in Fatigue", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 38, 371-422, 1969.
- Raithby, K. D. ve Sterling, A. B., "The Effects of Rest Periods on the Fatigue Performance of a Hot Rolled Asphalt Under Reversed Axial Loading", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 39, 134-141, 1970.
- Sharp, K.G. ve Alderson, A., "Standard Method for the Laboratory Determination of the Elastic Modulus of Asphalt", Australian Research Board, Research Report, ARR 210, July, 1991.
- Shell Research BV, "Bitumen and Asphalt Nomo-graphs" Version: 1990, Release: ME 1.1, 1990.
- Taylor, I.F., "Asphaltic Road Materials in Fatigue", Ph.D. Thesis, University of Nottingham, October, 1968.
- Texas Institute, "Asphalt Additives for Increased Pavement Flexibility", Research Report 471-2F, The Texas A & M University System College Station, Texas, 1987.
- Van Dijk, W. ve Visser, W., "The Energy Approach to Fatigue for Pavement Design", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1 46, 1-40, 1977.
- Zoorob, E.S., "The Effect of Pulverised Fuel Ash on The Properties and Performance of Hot Rolled Asphalt", Ph.D. Dissertation, University of Leeds, UK., Jun, 1995.