

Araştırma Makalesi / Research Article

Atık Madeni Yağ İçeren Kapsüllerin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi

¹Esmâ SARIŞIN, ²Mehmet YILMAZ, ³Erkut YALÇIN

¹Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Malatya, Türkiye, esma.sarisin@ozal.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4466-6862>

²Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye, mehmetyilmaz@firat.edu.tr, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-2761-2598>

³Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye, erkutyalcin@firat.edu.tr, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-6389-4211>

Geliş / Received: 18.04.2022;

Kabul / Accepted: 29.06.2022

Öz

Günümüzde ulaşım açısından bitümlü sıcak karışımların önemi oldukça fazladır. Bitümlü sıcak karışımlar zamanla artan trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak rijitliğin artmasıyla kırılğan hale gelmektedir. Bu durum üst yapıda çatlaklara ve bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle bitümlü karışım tabakalarının düzenli olarak gözlenmesi, bakım ve onarım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ancak ekonomik veya teknik nedenlerden ötürü bu her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle kendini onarabilen bitümlü sıcak karışım fikri son yıllarda önem kazanmıştır. Çalışma kapsamında kapsüllerde onarıcı malzeme olarak araçların bakımları sonrası açığa çıkan atık madeni yağ kullanılmıştır. Optimum şartları sağlayan kapsüller üretilmiştir. Kapsüller, karışımlara dört farklı oranda (agrega ağırlığına %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) ilave edilmiştir. BSK numunelerine üç noktalı eğilme yorulma deneyi uygulanmıştır. Ayrıca kapsül ilavesinin karışımların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Bitümlü sıcak karışım, Kapsül, Atık madeni yağ, Yaşlanma

*¹Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Bakır, E., Yılmaz, M. & Yalçın, E. (2022). Makale başlığı. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 4(1), 17-30.

Effect of Capsules Containing Waste Mineral Oil on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt

Abstract

Nowadays, the importance of hot bituminous mixtures in terms of transportation is quite high. Bituminous hot mixes become brittle with the increase in stiffness due to the increasing traffic load and climatic conditions over time. This situation causes cracks and deterioration in the pavement. Therefore, it is necessary to observe the bituminous mixture layers regularly, and to carry out maintenance and repair activities. However, this may not always be possible for economic or technical reasons. For this reason, the idea of self-healing hot mix with bitumen has gained importance in recent years. Within the scope of the study, waste mineral oil, which is released after the maintenance of the vehicles, was used as a reparative material in the capsules. Capsules providing optimum conditions have been produced. Capsules were added to the mixtures in four different ratios (0.25%, 0.50%, 0.75% and 1.00% by weight of aggregate). Four different cures were applied to the bituminous hot mixtures. Three-point bending fatigue test was applied to BSK samples. In addition, the effect of capsule addition on the mechanical properties of the mixtures was evaluated.

Keywords: Hot mix asphalt, Capsule, Waste mineral oil, Aging

1. Giriş

Bitümlü malzemeler, kullanım kolaylığı, ekonomikliği, performansı ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle yol yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Partlı vd., 2003). Bitümlü malzemeler, petrolün damıtılmasından elde edilen hidrokarbonlardan oluşan ve yapışkan özelliklere sahip olan koyu renkli termoplastik bir malzeme olan bitümden yapılmıştır (Read, 2003). Bitümlü malzemelerin kullanıldığı asfalt karışımlar dünyada yol kaplaması yapımında en yaygın kullanılan kaplama türüdür (Papagiannakis & Masad, 2008). Agregalar, bitümlü karışımların ana bileşenleri olup bitümlü sıcak karışımların stabilitesine katkıda bulunan bir iskelet meydana getirirler (Valdes vd., 2015). Bitümlü sıcak karışımların daha yumuşak kısmı ise, trafik yükleme koşullarında karışımın esnekliğini artıran, filler ile bitüm karışımından oluşan mastiktir. Bununla birlikte, asfalt kaplamalar yıllarca mekanik ve termal streslere ve çevresel etkilere (hava oksidasyonu, UV radyasyonu, nem) maruz kaldıklarında, bitüm ve mineral agregalar arasındaki ara yüzde ayrılma meydana gelerek bitümlü malzemelerin çatlamasıyla sonuçlanabilir (Airey & Choi, 2002; Airey, 2003). Çatlaklar, asfalt kaplamalarda meydana gelen başlıca sorunlardan biridir. Bitümlü malzemelerdeki çatlama, nihayetinde asfalt kaplamalarda geri dönüşü olmayan hasara neden olup bu da her ülkenin karayolları için büyük bakım ve onarım maliyetlerine ihtiyaç duyulmasıyla sonuçlanır (Sultana vd.,

2013). Bu nedenle son zamanlarda, kendini iyileştiren bitümlü malzemelerin geliştirilmesine dayalı olarak, erken bir aşamada çatlak kapanmasını sağlamak için farklı yaklaşımlar ve teknolojiler önerilmiştir (Ayar vd., 2016). Kendini iyileştiren malzemeler, hizmet ömürleri boyunca kendilerine verilen hasarı (kısmen) onarma becerisine sahip yapay veya sentetik olarak oluşturulmuş malzemeler olarak tanımlanır (Van der, 2007). Günümüzde araştırmacılar, biyolojik sistemlerin kendini iyileştirme mekanizmalarını taklit eden, yani sürekli hasar algılama ve otonom onarım (Vander (2009) gibi yeni biyo-esinlenmiş kendini iyileştiren yapı malzemeleri geliştirmeye çalışmaktadır. Bu bakış açısıyla ve bitümün termoplastik doğası göz önüne alındığında, şu anda esas olarak bitümlü malzemelerde çatlak iyileşmesini desteklemek için iki yaklaşım kullanılmaktadır: Birincisi, harici olarak tetiklenen ısıtma yoluyla bitümün sıcaklığını artırarak viskozitesini düşürmek için basit bir yaklaşımdır (Liu vd., 2009). İkinci yaklaşım ise, bitümle karışabilen gençleştirici ajanlar kullanılmasıdır (Shen vd., 2007; Norambuena-Contreras vd., 2019; Norambuena-Contreras vd., 2020). Çalışmasında bitümlü sıcak karışımların kendini iyileştirme yöntemlerinden kapsülleme yöntemi kullanılmıştır. Yenileyici olarak atık madeni yağ kullanılmıştır. Üretim için gerekli kimyasallar, belirlenen oranlarda kullanılarak kapsüller üretilmiştir. Saf karışım numuneleri ve dört farklı oran (agrega ağırlığınca %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) kullanılarak kapsüllü numuneler hazırlanmıştır. Karışım

numuneleri 4 saat 135°C 'de kısa dönem yaşlandırmanın ardından 5 gün 85°C 'de uzun dönem yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Bu numunelere üç noktalı eğilme yorulma deneyi uygulanarak tekrarlı yükler altındaki dayanıklılığı belirlenmiştir.

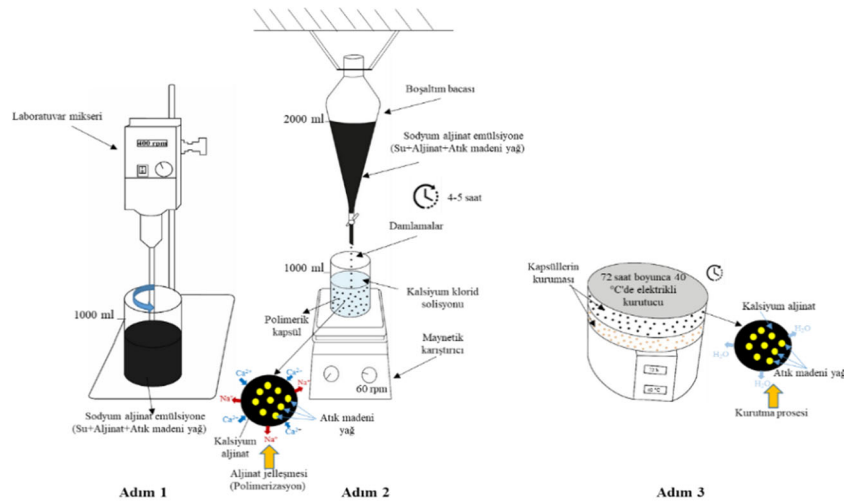
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Bağlayıcı

Çalışma kapsamında bitümlü sıcak karışımda çatlak oluşturulması ve bitümlü sıcak karışıma ilave edilen kapsüller içindeki atık yağların kapsüllerin kırılmasıyla serbest kalarak çatlakları onarması hedeflenmektedir. Bu nedenle iyileşmenin daha açık bir şekilde belirlenmesi için kıvamı yüksek bir kaplama sınıfı bitüm olan B 50/70 sınıfı bağlayıcı TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilmiştir.

2.2. Kapsül üretimi

Kapsüller, iyonotropik katılaştırıcı aljinatlardan oluşan özel kimyasallar kullanılarak oluşturulmuştur (Yalçın, 2018). Kalsiyum klorit kabuklu kapsüller elde etmek için, 20°C sıcaklıkta 75 g atık madeni yağ ve 525 g su kullanılarak toplamda 600 gramlık emülsiyonlar hazırlanmıştır. Yağ ve su, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak 1 dakika süreyle 400 rpm hızda karıştırılmıştır. Ardından hazırlanan emülsiyonlara 17,5 g sodyum aljinat eklenerek 10 dakika daha 400 rpm hızda karıştırılmıştır. Başka bir beherde 600 ml su içerisine 12 g kalsiyum klorit ilave edilerek solüsyon hazırlanmıştır. Sodyum aljinat, atık yağ ve sudan oluşan karışım 3 mm soket boyutunda 1000 ml basınca sahip damlatma hunisinden kalsiyum klorit solüsyonu içerisine damlatılarak kapsüller oluşturulmuştur. Kapsül üretim aşamalarının şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Şekillenen kapsüller çözeltiden süzülüp saf su ile yıkandıktan sonra 72 saat 40°C de kurutulmaktadır (Norambuena-Contreras vd., 2018).



Şekil 1. Kapsül üretiminin şematik bir gösterimi (Ozdemir vd., 2021)

2.3. Bitümlü sıcak karışım numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada kapsülsüz ve kapsüllü asfalt kırıntı numuneleri üretilmiştir. Malzemeler laboratuvarında, karıştırıcı sayesinde 100 rpm karıştırma hızında, belirlenen sıcaklıklarda karıştırılmıştır. Agregalar karıştırılmadan önce 3 saat, bitüm ise 1 saat 170°C'de ısıtılmıştır. Karışım malzemeleri karıştırıcının metalik kâsesine sırasıyla ilave edilmiştir. İlk olarak kaba agrega, daha sonra ince agrega, üçüncü olarak filler malzemesi ve son olarak da bitüm eklenmiştir. Malzemeler yaklaşık 5 dakika boyunca karıştırıldıktan sonra soğutucudan çıkarılan atık madeni yağ içeren kapsüller agrega ağırlığına 4 farklı oranda (%0,25, %0,5, %0,75 ve %1,00) bitümlü sıcak karışıma ilave edilerek 20 saniye boyunca karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bağlayıcı

miktarının karışımların mekanik özelliklerine etki etmesini engellemek amacıyla kapsül kullanılarak hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri kapsül içermeyen karışımla aynı bitüm içeriğinde (%4,67) hazırlanmıştır. Karışım numuneleri sıkıştırılmadan önce 4 saat 135°C sıcaklıkta, ardından viskozite deneyiyle belirlenen sıkıştırma sıcaklığı olan 158°C sıcaklıktaki etüvde yarım saat bekletilmiştir. Hazırlanan kapsüllü ve kapsülsüz karışımlar %4 hava boşluğu içeriğine ulaşana kadar merdaneli sıkıştırıcı kullanılarak 30,5*40*5 cm ölçülerine sahip prizmatik bir kalıpta sıkıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen numuneler, döner testere ile 15 x 7 x 5 cm boyutlarında kesilerek kırıntı numuneler elde edilmiştir (Şekil 2). Son olarak hazırlanan numuneler 5 gün 85°C'de uzun dönem yaşlandırmaya tabi tutulmuştur.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan BSK numunesi

2.4. Üç noktalı eğilme yorulma deneyi

Kapsül içeren bitümlü sıcak karışımlarda meydana gelen yorulmanın iyileşmesi, prizmatik asfalt kırımların 3 noktalı tekrarlı dinamik eğilme testine tabi tutulmasıyla incelenmiştir. Yorulma testlerini gerçekleştirmek için UTM cihazı kullanılmıştır. Yorulma testi esnasında kalıcı deformasyonların oluşmasını önlemek için numunenin altına esnek bir membran yerleştirilmiştir. Her bir yükleme dalgası 0,10 saniye sürmüştür ve bir sonraki yüklemeden önce 0,15 saniye dinlenme süresi uygulanmıştır. Dolayısıyla yükleme frekansı 4 Hz. olarak elde edilmiştir. Aktüatör ve numunenin her an temas halinde olmasını sağlamak amacıyla minimum 0,15 kN yük tercih edilmiştir.

Kapsül ilavesinin bitümlü sıcak karışımların iyileşme performansı üzerindeki etkisini incelemek için dört farklı maksimum yük seçilmiştir: 1, 1,25, 1,5 ve 1,75 kN. Tüm deneyler 25°C'de gerçekleştirilmiştir. Numunelerin boyalı tarafındaki çatlak oluşumu her 40

yükleme döngüsünde bir fotoğraf çeken f/2.8 açıklığa ve 12Mpx çözünürlüğe sahip statik bir kamera ile sürekli olarak izlenmiştir. Görüntülerin ImageJ® yazılımı ile işlenmesiyle çatlak uzunluğu an an belirlenmiştir. Çatlak uzunluğu, test numunelerinin toplam yüksekliğinin %20'si olduğunda numuneler kırılmış olarak kabul edilmiştir. 3 noktalı eğilme yorulma testi aşağıdaki adımlara göre yapılmıştır:

- 1. Adım:** Bu çalışmada kapsül içeren ve içermeyen asfalt kırımların numuneleri, 3 noktalı eğilme yorulma testlerine başlamadan önce uzun dönem yaşlandırma maksadıyla 5 gün 85°C'deki etüvde yaşlandırılmış ve deney öncesinde 20°C'de 4 saat koşullandırılmıştır. Ayrıca çatlak oluşumunu izleyebilmek için numunelerin yan kısmı beyaza boyanmıştır. Koşullandırma süresinden sonra deney numuneleri iki parça halinde kırılıncaya kadar, 3 noktalı eğilme yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Bu aşamada kullanılan numuneler Şekil 3'te gösterilmiştir.



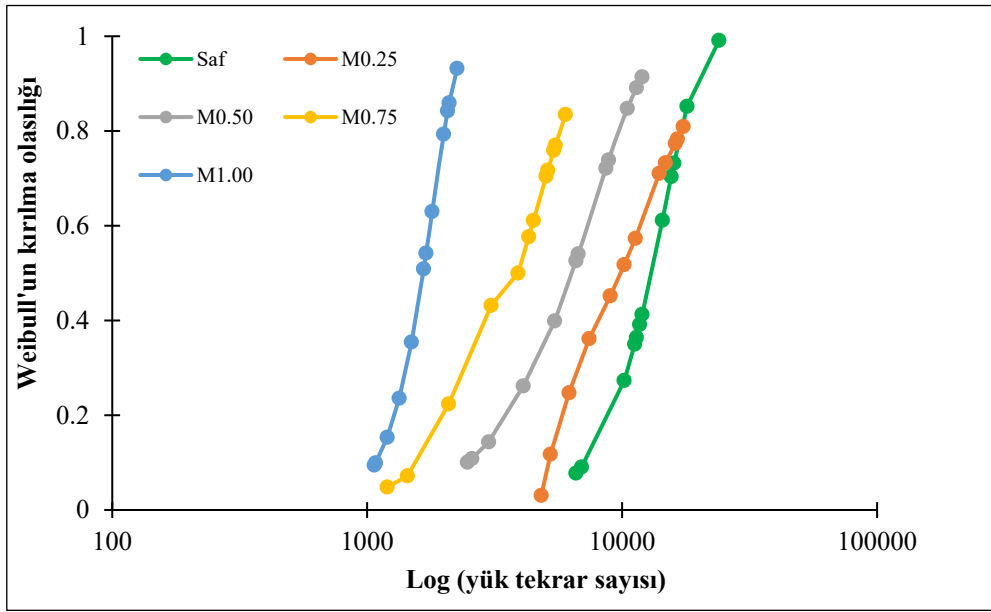
Şekil 3. No.5'i bulmak için kullanılan numuneler

2. Adım: Numunelerin ortalama ömrü, tekrar sayısı olarak kabul edilmiştir. Çatlakların testlerin başlangıcından itibaren yaklaşık 1 cm uzunluğa ulaştığı andaki tekrar sayısı bundan sonra $N_{0.5}$ olarak anılacaktır. Karışımların Weibull kırılma olasılığının %50 olmasına dikkat edilmiştir.

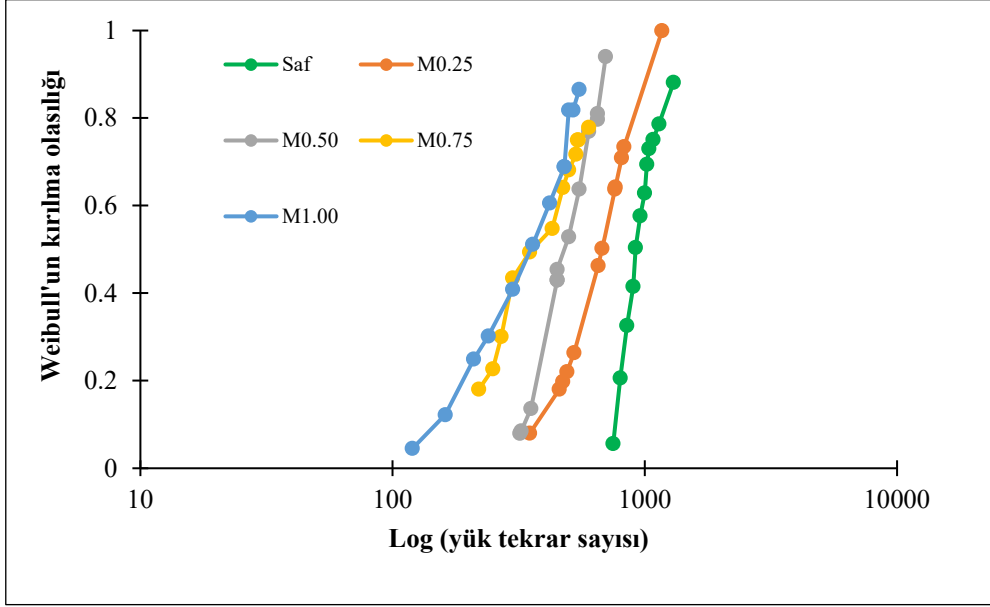
3. Bulgular

Üç nokta eğilme yorulma deneyi, saf karışım ile dört farklı oranda atık madeni yağ içeren kapsül (agrega ağırlığına %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uzun dönemli yaşlanma prosedürü uygulandıktan

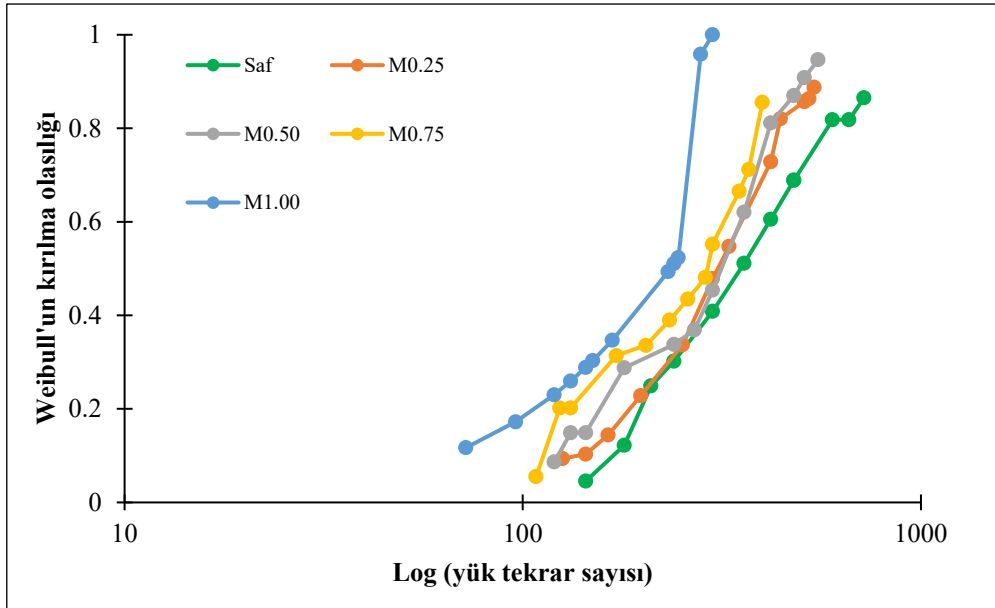
sonra yapılmıştır. Saf karışım ve dört farklı oranda kapsül içeren karışımların 4 farklı yük seviyesinde dayanabildiği yük tekrar sayısının Weibull dağılımı Şekil 4-7'de görülmektedir. Bu eğriler karışım numunelerinin dinlenme periyotları olmaksızın yüke dayandığı dönemleri temsil ederek, kırılma olasılığı 0,5 olduğunda yük tekrar sayısı olarak hesaplanan $N_{0.5}$ 'i bulmak için kullanılmıştır. Şekil 4-7 incelendiğinde yük ve kapsül içeriği arttıkça asfalt karışımların yük tekrar sayılarında yani yorulma ömürlerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Tüm yük seviyesinde en düşük döngü sayısı M1.00 karışımından elde edilirken en yüksek döngü sayısı ise saf karışımdan elde edilmektedir.



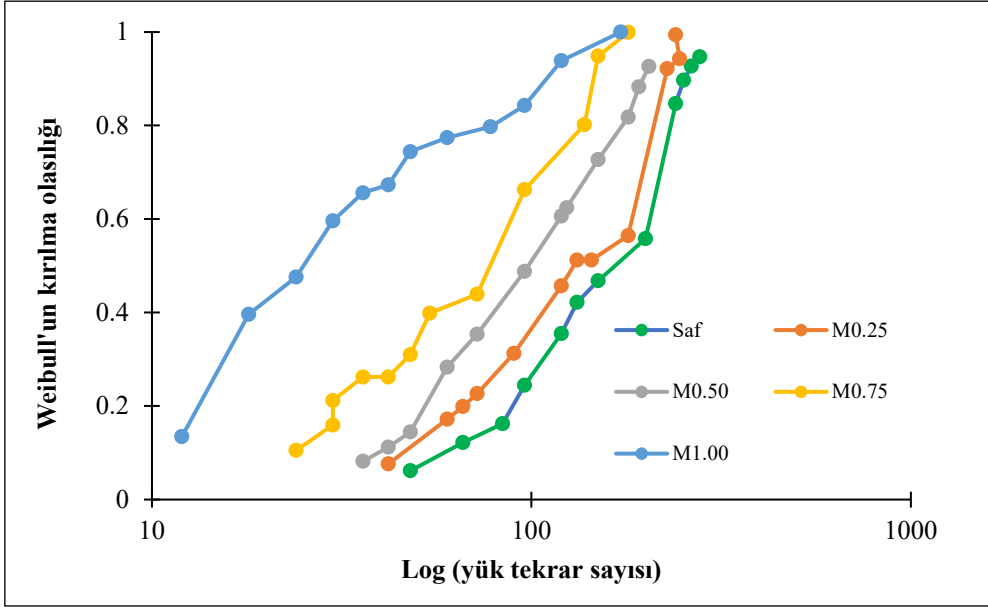
Şekil 4. 1,00 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı



Şekil 5. 1,25 kN yüklemesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı



Şekil 6. 1,50 kN yüklemesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı

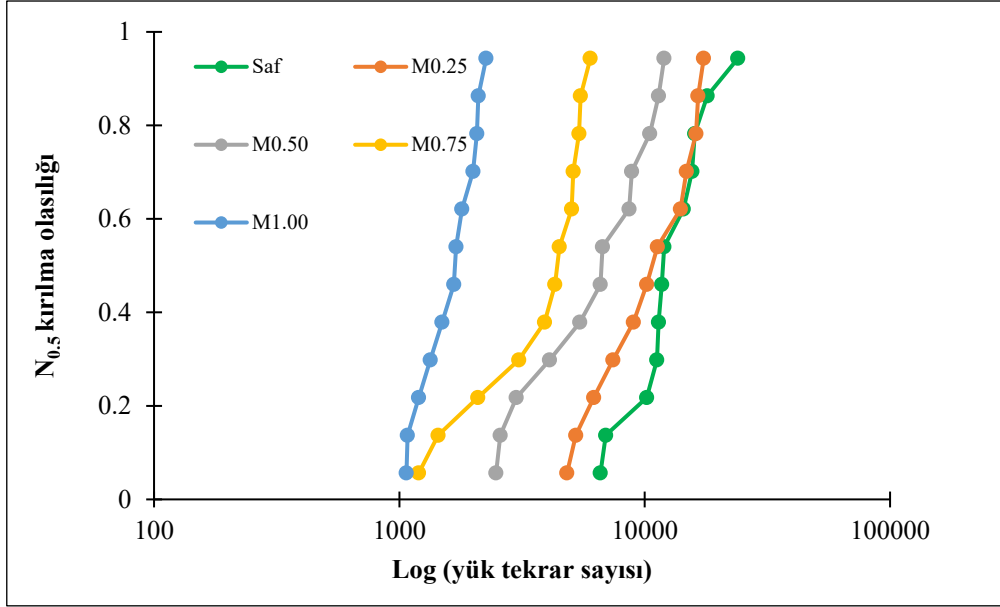


Şekil 7. 1,75 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin kırılma olasılığı

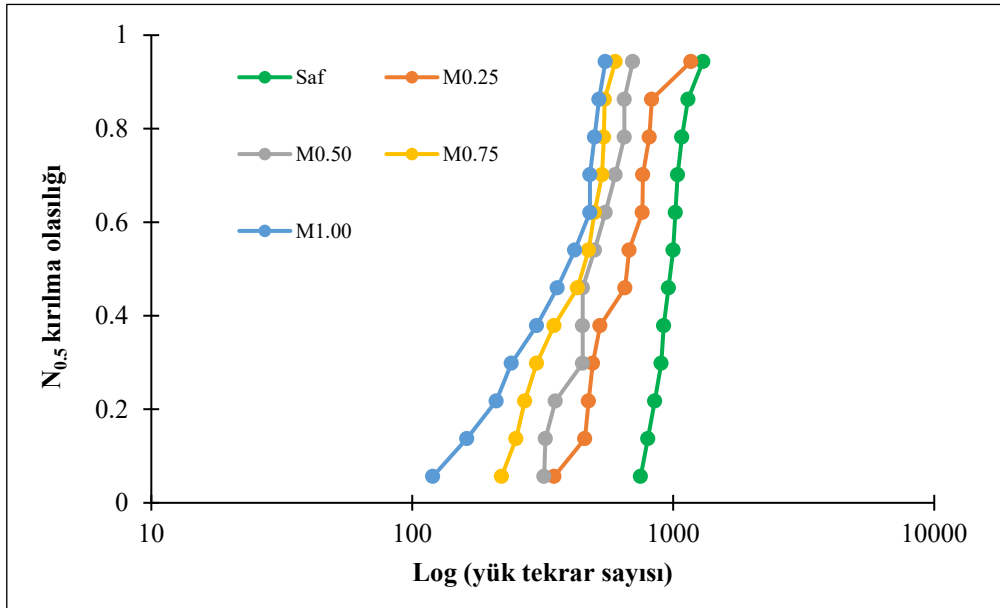
Yorulma ömrü, deneyin her bir yükleme durumu için 10 numunelik bir seri üzerinde tekrarlanmasıyla belirlenmiştir. Numunelerde meydana gelen hasar, yük tekrar sayısı ile artan mekanik enerji birikimi tarafından üretildiğinden, sonuçlara Weibull istatistiksel dağılımı uyarlanmıştır ve numunelerin kırılma olasılığının 0,5 olduğu döngü sayısı ile bir referans yorulma ömrü elde edilmiş ve $N_{0.5}$ olarak tanımlanmıştır. Bu referans değer, asfalt karışım numunelerinden beklenebilecek yorulma ömrü olarak kabul edilmiştir.

Saf karışım ve dört farklı oranda kapsül içeren karışımların 4 farklı yük seviyesinde dayanabildiği yük tekrar sayısının $N_{0.5}$ kırılma olasılığı Şekil 8-11'de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde yük seviyesi ve kapsül

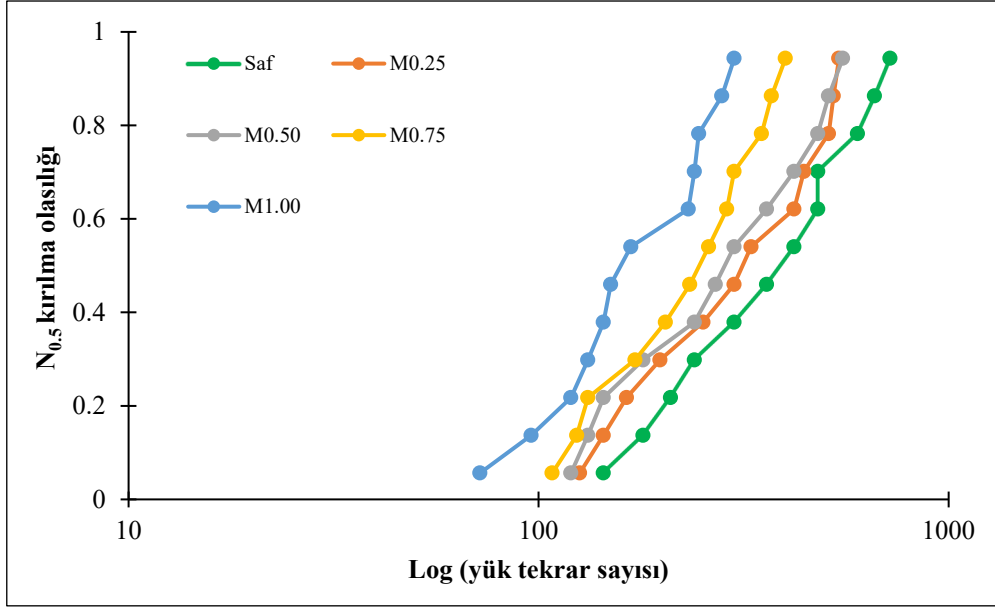
oranı arttıkça yük tekrar sayısının azaldığı görülmektedir. En yüksek yük tekrar sayısını saf karışım verirken, en düşük yük tekrar sayısını M1.00 karışımı vermektedir. Yük seviyesindeki artışlar, yorulma ömründe üstel azalmalara neden olmaktadır. 1,00 kN yük seviyesinden sonra diğer yük seviyelerinde yük tekrar sayılarında ani azalma meydana gelmiştir. $N_{0.5}$ kırılma olasılık değerlerinde kapsül oranı arttıkça çok büyük değişiklikler meydana gelmemektedir. Dört farklı oranda kapsül içeriğine sahip asfalt numunelerinin yük tekrar sayısındaki değişim en fazla 1,75 kN yük seviyesinde meydana gelmiştir. 1,25 kN ve 1,5 kN yük seviyelerinde saf ve dört farklı oranda kapsül içeren numunelerin yük tekrar sayıları birbirlerine yakındır.



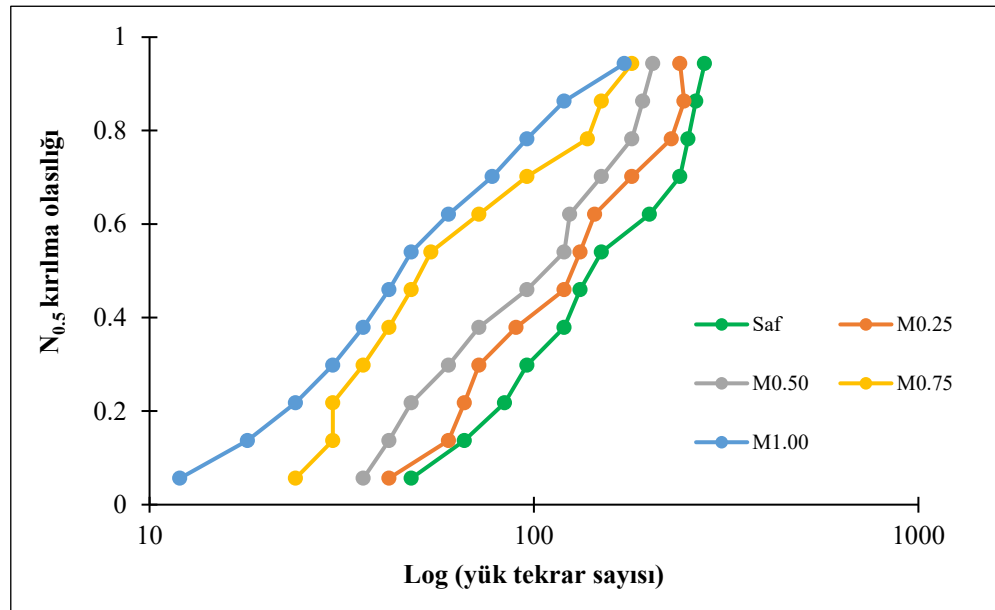
Şekil 8. 1,00 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı



Şekil 9. 1,25 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı



Şekil 10. 1,5 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı



Şekil 11. 1,75 kN yükleme seviyesindeki deney numunelerinin $N_{0,5}$ kırılma olasılığı

Üç noktalı eğilme yorulma testi kullanılarak dört farklı yük seviyesinde, dört farklı oranda kapsül içeriğine sahip asfalt karışım numunelerinin kırılma

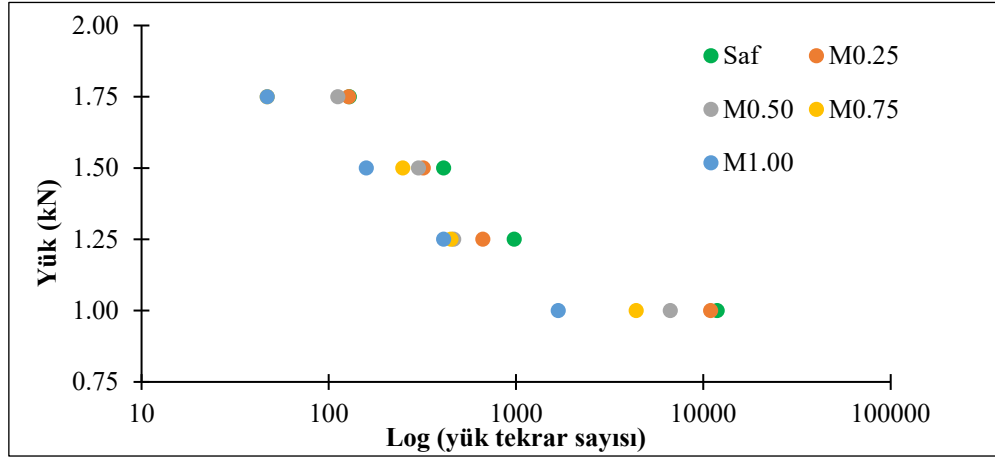
olasılığının 0,5 olduğu andaki yük tekrar sayıları Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere yük seviyesi arttıkça yük tekrar sayısında azalma meydana

gelmektedir. En fazla azalma 1 kN'dan 1,25 kN yük seviyesine geçildiği zaman gerçekleşmiştir. Tablo 1'de görüldüğü üzere atık madeni yağın %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00 oranlarında kullanılması durumunda 1,00 kN ve 1,25 kN'deki yük tekrar sayısı değerleri saf karışıma göre sırasıyla %7,83, %43,82, %63,04, %85,82 ve %32,04, %52,55, %54,08, %58,06 azalmıştır. 1,50 kN ve 1,75 kN'deki yük tekrar sayısı değerleri ise saf karışıma göre sırasıyla %22,14, %26,52, %39,41, %61,31 ve %0,78, %13,18, %63,57, %63,57 azalmıştır. Yük seviyesi arttıkça asfalt karışımların yorulma ömürlerinde önemli oranda azalma meydana gelmektedir. Şekil 12'de 0,5 olasılık düzeyinde incelenen beş farklı asfalt karışım numunesi için Wöhler eğrileri

görülmektedir. En yüksek yorulma dayanıklılığını saf ve M0.25 karışım numuneleri sağlamaktadır. En düşük yorulma dayanıklılığı ise M1.00 karışım numunesinde meydana gelmektedir. Beş Wöhler eğrisi paralel olmadığından, beş tip karışım numunesinin dayanıklılığını sayısal olarak karşılaştırmak mümkün değildir. Şekil 12'den elde edilebilecek ana sonuç, asfalt karışım numunelerinde dinlenme süreleri olmadan, kapsüllerin asfalt karışım numunelerinin yük tekrar sayısını azalttığıdır. Kapsül oranı arttıkça bu azalma oranının da arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak kapsül kullanımı asfalt karışımlarının dayanıklılığını azaltmaktadır.

Tablo 1. Yükü bağı olarak asfalt numunelerinin kırılma olasılığı 0,5 olan yük tekrar sayısı

Yük (kN)	Saf	M0.25	M0.50	M0.75	M1.00
1,00	11871	10942	6669	4388	1683
1,25	980	666	465	450	411
1,50	411	320	302	249	159
1,75	129	128	112	47	47



Şekil 12. Wöhler eğrileri (0,5 kırılma olasılığı)

4. Sonuçlar

Kapsüllenmiş atık madeni yağın bitümlü sıcak karışımların yapısını önemli ölçüde değiştirmeden, asfalt karışımlarda meydana gelen yansıtıcı çatlakların büyümesini geciktirebildiğini göstermektedir. Çalışmada üç noktalı eğilme yorulma deneyi kullanılmıştır. Üç noktalı eğilme yorulma deneyi, kapsül içermeyen karışım ile dört farklı oranda atık madeni yağ içeren kapsül (agrega ağırlığına %0,25, %0,50, %0,75 ve %1,00) kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde uzun dönemli yaşlanma prosedürü uygulandıktan sonra yapılmıştır. Numunelerde meydana gelen hasar, yük tekrar sayısı ile artan mekanik enerji birikimi tarafından üretildiğinden, sonuçlara bir

Weibull istatistiksel dağılımı uyarlandı ve numunelerin kırılma olasılığı 0,5 olan döngü sayısı bir referans yorulma ömrü elde edilerek, $N_{0.5}$ olarak tanımlanmıştır. Yük seviyesindeki artışlar, yorulma ömründe azalmalara neden olmaktadır. Asfalt karışım numunelerinde dinlenme süreleri olmadan, kapsüllerin asfalt karışım numunelerinin yük tekrar sayısını azalttığıdır. Kapsül oranı arttıkça bu azalma oranının da arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak kapsül kullanımı asfalt karışımlarının dayanıklılığını azaltmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, maddi olarak 1001 Program kodlu ve 217M570 numaralı proje ile tez çalışmasını destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür ederler.

5. Kaynaklar

- Airey, G. D. (2003). State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(3), 165-176.
- Airey, G. D., & Choi, Y. K. (2002). State of the art report on moisture sensitivity test methods for bituminous pavement materials. *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 355-372.
- Ayar, P., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gómez, M. C. (2016). The healing capability of asphalt pavements: a state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 28-40.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., & van de Ven, M. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1207-1213.
- Norambuena-Contreras, J., Yalcin, E., Garcia, A., Al-Mansoori, T., Yilmaz, M., & Hudson-Griffiths, R. (2018). Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules. *Construction and Building Materials*, 175, 254-266.
- Norambuena-Contreras, J., Liu, Q., Zhang, L., Wu, S., Yalcin, E., & Garcia, A. (2019). Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*, 52(4), 1-13.
- Norambuena-Contreras, J., Arteaga-Perez, L. E., Guadarrama-Lezama, A. Y., Briones, R., Vivanco, J. F., & Gonzalez-Torre, I. (2020). Microencapsulated bio-based rejuvenators for the self-healing of bituminous materials. *Materials*, 13(6), 1446.

- Ozdemir, A. M., Yılmaz, M., Yalçın, E., Vural Kok, B., Norambuena-Contreras, J., & Garcia, A. (2021). Effects of Capsules Containing Waste Oils on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt: Experimental Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9), 04021242.
- Papagiannakis, A. T., & Masad, E. A. (2008). *Pavement design and materials*. John Wiley & Sons.
- Partl, M. N., Bahia, H. U., Canestrari, F., De la Roche, C., Di Benedetto, H., Piber, H., & Sybilski, D. (Eds.). (2012). *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: state-of-the-art report of the RILEM technical committee 206-ATB* (Vol. 9). Springer Science & Business Media.
- Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The shell bitumen handbook*. Thomas Telford.
- Shen, J., Amirghani, S., & Aune Miller, J. (2007). Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of materials in civil engineering*, 19(5), 376-384.
- Sultana, M., Rahman, A., & Chowdhury, S. (2013). A review of performance based maintenance of road infrastructure by contracting. *International Journal of Productivity and Performance Management*.
- Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Miró-Recasens, R., & Norambuena-Contreras, J. (2015). Mechanical behavior of asphalt mixtures with different aggregate type. *Construction and Building Materials*, 101, 474-481.
- Van Der Zwaag, S. (2007). *Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of material science*. Delft: Springer.
- Van der Zwaag, S., Van Dijk, N. H., Jonkers, H. M., Mookhoek, S. D., & Sloof, W. G. (2009). Self-healing behaviour in man-made engineering materials: bioinspired but taking into account their intrinsic character. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1894), 1689-1704.
- Yalçın, E. (2018). Development of a self-healing asphalt mixture through the use of encapsulated healing agents/İyileştirici maddeler içeren kapsüller kullanılarak kendini onarabilen bitümlü sıcak karışımların geliştirilmesi.