

Bitüm Modifikasyonunda Stiren-Butadien-Stiren ile Gilsonit'in Birlikte Kullanılmasının Bitümlü Sıcak Karışımların Kalıcı Deformasyon Dayanımına Etkisi

Mehmet YILMAZ*¹, Baha Vural KÖK¹, Özge ERDOĞAN YAMAÇ¹

¹Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ

(Alınış / Received: 31.05.2017, Kabul / Accepted: 12.10.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 06.12.2017)

Anahtar Kelimeler

Bitümlü sıcak karışım,
Modifikasyon,
Gilsonit,
Stiren-butadien-stiren,
Kalıcı deformasyon

Özet: Çalışmada, stiren-butadien-stiren (SBS) ve Amerikan Gilsoniti'nin (AG) bitüm modifikasyonunda birlikte kullanımının bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımına etkisi araştırılmıştır. Öncelikle sadece SBS ve Amerikan Gilsoniti kullanılarak aynı performans seviyesine (PG 76-16) sahip modifiye bitümler elde edilmiştir. Ardından SBS modifiyeli bitümlerde SBS içeriği azaltılarak yerine farklı oranlarda Amerikan Gilsoniti ilave edilmiştir. Böylece aynı performans seviyesine sahip 3 farklı SBS+Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitüm elde edilmiştir. Saf, 2 tane tek bir katkı içeren (%5 SBS ve %18 AG) ve 3 tane iki farklı katkı içeren (%4 SBS + %6 AG, %3 SBS + %10 AG ve %2 SBS + %13 AG) aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılarla karışım numuneleri hazırlanmıştır. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde dinamik sünme deneyi uygulanmıştır. Böylece SBS ve Amerikan Gilsoniti'nin birlikte kullanımının kalıcı deformasyona karşı etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda bütün katkıların, karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir. Akma sayısı ve sünme modülü değerleri üzerinde en etkin katkıların %18 AG ve %3 SBS + %10 AG olduğu, karışımların elastikiyetini en fazla arttıran katkının %5 SBS olduğu belirlenmiştir.

Effects of Using Styrene-Butadiene-Styrene in Conjunction with Gilsonite on the Resistance to Permanent Deformation of Hot Mix Asphalts

Keywords

Hot mix asphalt,
Modification,
Gilsonite,
Styrene-butadiene-styrene,
Permanent deformation

Abstract: In this study, the effect of the combined use of styrene-butadiene-styrene (SBS) and the American Gilsonite (AG) modifications on the resistance to permanent deformation of hot mix asphalts was investigated. Firstly, the modified bitumen with a same performance level (PG 76-16) was obtained using SBS and American Gilsonite only. Then, the SBS content in SBS-modified bitumens was reduced, and American Gilsonite at different portions was added instead. Thus, at least 3 different modified bitumens with SBS + American Gilsonite with same performance level was obtained. Sample mixtures were prepared with 2 binders containing a single additive (5% SBS and 18% AG) and at least 3 binders containing two different additives (4% SBS + 6% AG, 3% SBS + 10% AG and 2% SBS + 13% AG), which have the same performance level. Dynamic creep test was applied to hot mix asphalt samples prepared in the design bitumen content. Thus, the effect of the use of American Gilsonite in conjunction with SBS on permanent deformation was tried to determine. As a result of the experiments in aforementioned study, positive effect on the mix of all additives resistance to permanent deformation with the use of additive was determined. The most effective additives as 18% AG and 3% SBS + 10% AG on flow number and the creep modulus, the use of 5% SBS as the additive which increased the elasticity of mixture most were determined.

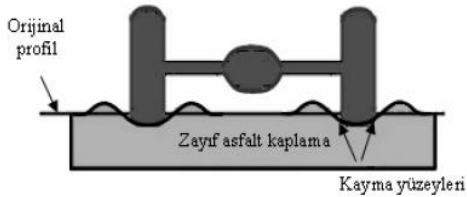
1. Giriş

Orta ve ağır trafikli yollarda, trafik yüklerini taşımak ve üst yapıdaki diğer tabakaları çevre koşullarının

olumsuz etkilerinden korumak için yapılan bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama tabakaları, bitüm ve agreganın ısıtılıp karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Bitümlü sıcak karışımlar; agrega, bitümlü bağlayıcı ve

hava boşluğundan oluşan kompozit bir yapıya sahiptir. Trafik yükü ve iklim koşullarına bağlı olarak BSK'larda deformasyonlar (tekerlek izi gibi), çatlama ve ayrışmalar şeklinde bozulmalar meydana gelmektedir [1]. Bu bozulmalar içerisinde kalıcı deformasyonlar hem güvenlik hem de sürüş konforu açısından büyük olumsuzluklara neden olmaktadır. BSK tabakalarının yeterli mukavemete sahip olmamasından kaynaklanan kalıcı deformasyonlar akma tekerlek izi olarak isimlendirilmektedir.

Akma tekerlek izi, bitümlü tabaka veya tabakaların kendi içlerindeki deformasyonların sonucu olup yükten dolayı oluşan gerilmelerin bitümlü malzemenin dayanımını aşmasından kaynaklanmaktadır. Tekerlek izi etrafında kabarmaların olduğu akma tekerlek izleri en çok çıkış eğimli kesimlerde, kavşak yaklaşımlarında ve kurbalarda (yani ağır taşıtların hızlarını azalttığı kesimlerde) ve lastik ile kaplama arasındaki değme alanında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yüksek olduğu kesimlerde oluşmaktadır (Şekil 1). Yük tekrar sayısı arttığında, tekerleğin altındaki kısımlarda çökmeler, kenarlarda ise yükselmeler artmaktadır. Bu tip tekerlek izi oluşumunda etkili faktörler; bitümlü karışımdaki bileşenlerin özellikleri ve karışım oranlarıdır [2].



Şekil 1. Akma tekerlek izi [2]

BSK'larda oluşan tekerlek izi, soyulma, çatlama, ondülasyon gibi bozulmaları geciktirmek, bakım ve yenileme gereksinimini daha seyrek aralıklara düşürmek ve kaplama performansını arttırmak amacıyla bitümlü bağlayıcılara veya karışımlara çeşitli katkı maddeleri eklenerek özellikleri iyileştirilmiş modifiye bitümler veya karışımlar elde edilmektedir [3-6]. Modifiye bitüm üretiminde elastomer ve plastomer polimerlerin yanı sıra polimer olmayan kimyasal katkı maddeleri ile göl asfaltları, kaya asfaltları ve Gilsonitler gibi doğal katkı maddeleri de kullanılmaktadır [7, 8].

Yol uygulamalarında en fazla kullanılan ürün olan lineer yapıya sahip SBS'nin yapısındaki polistiren adacıklar fiziksel çapraz bağlar oluşturarak sağlamlık verirken polibütadien köprüler ise elastiklik ve esneklik sağlamaktadır. Bitüme hangi oranda SBS'nin katılacağı tamamen uygulama bölgesinin iklimine, trafik şartlarına ve kullanılan bitümün özelliklerine bağlıdır. Bitüm içinde sürekli bir polimer fazı oluşturmak için minimum %3 oranında SBS kullanılmalıdır. En fazla ise %7 oranına kadar SBS kullanıldığı olmuştur [9]. SBS ile bitümün

karıştırılması tamamen bir çözünme olayı olup kimyasal bir reaksiyon değildir. SBS, bitüm ile karıştırıldığında yağsı fraksiyonları bünyesine alarak hacmi artmaktadır. Bitüm modifikasyonunda en sık kullanılan polimer olan elastomer türü stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimerlerinin, bitümün rijitliğini arttırmasının yanı sıra düşük servis sıcaklıklarında çatlama, yüksek servis sıcaklıklarında ise tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir [10-13].

Gilsonit, bitümün fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip, doğal olarak oluşan bir katı hidrokarbon mineralidir [14]. Kütle halindeki Gilsonit obsidiyen mineraline benzer görünümde, oldukça parlak, siyah renkli, çentikli bir kırılma yüzeyine sahip ve çizgisi kahverengi olan bitümlü bir maddedir. Gilsonit, kolay kullanımı ve bitüm ile olan iyi uyumuyla bilinmektedir. Gilsonit, doğada bulunan bir tür asfalt bağlayıcı olması nedeniyle bitüm içinde hızlı bir şekilde çözülebilmektedir [15]. Ekonomik miktarda Gilsonit madeni özellikle Amerika ve İran'da bulunmaktadır.

Asfaltum ya da uintaite olarak da isimlendirilen Gilsonit, petrol ürünleriyle çok iyi uyum sağlamasından dolayı genellikle daha yumuşak petrol asfaltlarının sertleştirilmesinde kullanılır. Gilsonit, asfalt karışımlarına kolaylıkla karıştırılması ve uyumlu olması gibi özellikleriyle diğer modifiyerlerden farklı avantajlar sağlamaktadır [16].

Gilsonit'in bitüme ilave edilmesiyle bitümün penetrasyonu azalmakta, viskozitesi artmakta ve bunun sonucunda daha sert bir modifiye bitüm elde edilmektedir. Gilsonit modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar, modifiye edilmemiş bitümlerle hazırlanan karışımlara göre daha yüksek stabiliteye, daha düşük kalıcı deformasyona ve sıcaklık hassasiyetine bunun yanında suyun sebep olduğu soyulmaya karşı daha yüksek dirence sahip olmaktadır [7, 8, 17, 18].

Yapılan çeşitli çalışmalarda, SBS modifiyeli bitümlerin reolojik özelliklerinin katkısız bağlayıcıya göre daha üstün olmasına rağmen depolama stabilitelerinin düşük olduğu belirtilmiştir [19, 20]. Ayrıca SBS, Gilsonit'e göre daha pahalı bir katkı maddesidir. Aynı performansa sahip olacak şekilde sadece SBS içeren modifiye bitümler yerine bitüm modifikasyonunda SBS ve Gilsonit'in birlikte kullanılması, ekonomik fayda sağlamaktadır [21]. Katkıların olumsuz yönlerini gidermek ve bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini dolayısıyla BSK'ların performansını farklı yönlerden daha fazla arttırmak düşüncesiyle iki katkının birlikte kullanılması son dönemde yaygın olarak kullanılmaktadır [22-25].

Yılmaz ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada SBS ile Gilsonit'in birlikte kullanımının bitümlü

bağlayıcıların depolama özelliklerine etkisi değerlendirilmiş, depolama özelliği en düşük olan modifiye bitümün sadece SBS içeren olduğu ve SBS ile birlikte AG kullanılması durumunda modifiye bitümlerin depolama özelliklerinin iyileştiği belirlenmiştir [26].

Amerikan Gilsoniti'nin endüstriyel bir katkı maddesi olan SBS'nin yerine kısmen veya tamamen kullanılabilirliğinin değerlendirildiği çalışma sonucunda bitüm modifikasyonunda Gilsonit ve SBS'nin birlikte kullanımının bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını ($G^*/\sin \delta$) artırdığı fakat SBS'nin daha etkin olduğu belirlenmiştir. İki katkı maddesi aynı bağlayıcıda karıştırıldığında Gilsonit/SBS oranına göre %1 SBS'nin yerine yaklaşık %3-4 Gilsonit gerektiği ortaya çıkmıştır [27].

Yılmaz ve Erdoğan Yamaç tarafından yapılan çalışmada SBS ve Gilsonit birlikte bitüm modifikasyonunda kullanılmış, hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde Marshall stabilite ve akma, nem hasarına karşı dayanım, indirekt çekme rijitlik modülü ve dinamik yorulma deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan SBS ile Gilsonit'in birlikte kullanılmasının özellikle yorulma, stabilite ve nem hasarına karşı dayanım açısından tek bir katkı kullanımına göre daha faydalı olduğu belirlenmiştir [28].

Kök vd., yapmış oldukları çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS ile birlikte Gilsonit kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerine etkisini araştırmışlardır [27]. Yılmaz ve Erdoğan Yamaç ise yapmış oldukları çalışmada SBS modifikasyonunun olumsuz yönlerini iyileştirmek ve ekonomik fayda sağlamak amacıyla SBS ile Gilsonit'in birlikte kullanılmasının bitümlü bağlayıcıların reolojik ve bitümlü sıcak karışımların stabilite, nem hasarına karşı dayanım ve yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir [28]. Fakat önceden yapılan çalışmalarda SBS ile Gilsonit'in birlikte kullanılmasının BSK'ların en önemli performans parametrelerinden olan kalıcı deformasyona karşı dayanım üzerindeki etkisi değerlendirilmemiştir. BSK'larda görülen başlıca bozulmalardan olan kalıcı deformasyon bu çalışmada dinamik sünme deneyi ile değerlendirilmiştir. Saf, sadece SBS ve sadece AG içeren karışımların yanı sıra 3 farklı oranda SBS + Gilsonit modifiyeli BSK numunesi üzerinde yapılan dinamik sünme deneyleri sonucunda iki farklı katkının birlikte kullanılmasının kalıcı deformasyon üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Bitümlü bağlayıcı deneyleri

Çalışmada, ana bağlayıcı olarak Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 sınıfı saf bağlayıcı kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak Shell Firması tarafından üretilen SBS (Kraton D 1101) ve

Amerikan Gilsonite şirketinden temin edilen Amerikan Gilsoniti (AG) kullanılmıştır. Bağlayıcı ve karışım tasarımı Superpave yöntemine göre yapılmıştır. Uygulama bölgesi olarak Türkiye'nin en sıcak ili olan Şanlıurfa seçilmiştir. Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden son 21 sene içerisindeki her yılın ardı ardına en yüksek 7 günlük ve en düşük bir günlük hava sıcaklığı değerleri temin edilmiş, tasarım trafiği tahmininin 3-30 milyon eşdeğer standart dingil yükü aralığında olduğu ve trafiğin düşük hızda (<50 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Şanlıurfa için belirlenen tasarım kriterlerinde kullanılması gereken bağlayıcı sınıfının PG 76-10 olduğu tespit edilmiştir.

Saf bitüm, sıcaklığı 135°C olan bir etüv içerisinde bir saati geçmeyecek şekilde eriyinceye kadar bekletilmiş, yaklaşık 400 gr saf bitüm karıştırıcının haznesine aktarılmıştır. Belirlenen orana göre katkı maddesi hesaplanmış ve hazırlanmıştır. Karıştırıcı haznesi ısıtıcı tablaya yerleştirilmiş ve mekanik karıştırıcı için ayarlamalar yapılarak karıştırma işlemine başlanmıştır. Karıştırma işleminde Şekil 2'de görülen dört bıçaklı karıştırıcı kullanılmıştır. Modifiye bitümler, 1000 devir/dakika hızla 180°C sıcaklıkta saf bitüm ve katkı malzemelerinin 60 dakika süreyle karıştırılması sonucu elde edilmiştir. Karıştırma başladıktan sonra 5 dakika içerisinde katkı maddesi bitüme ilave edilerek topaklanma oluşması engellenmiştir. Karıştırmada kullanılan prosedür her seferinde aynı şekilde uygulanmış böylece karıştırma prosedürünün deney sonuçlarına etki etmesi engellenmiştir.



Şekil 2. Modifiye bitüm mikseri ve karıştırma başlığı

Çalışmada öncelikle %2, %3, %4 ve %5 oranlarında SBS; %12, %14, %16, %18 ve %20 oranlarında Amerikan Gilsoniti kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan %5 SBS içeren ve %18 Amerikan Gilsoniti içeren yaşlandırılmamış modifiye bitümlerin yüksek sıcaklık performans seviyesinin (PG) 76-Y olduğu ve tekerlek izi parametrelerinin ($G^*/\sin \delta$) birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmada kullanılacak en yüksek SBS içeriği %5, en yüksek Amerikan Gilsoniti içeriği ise %18 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın devamında %2, %3, %4 SBS ve farklı oranlarda Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitümler hazırlanarak yüksek sıcaklık performans seviyesi PG 76-Y olacak ve tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin \delta$) %5 SBS ve %18 Amerikan Gilsoniti içeren modifiye bitümlere yakın (en fazla \pm %5 fark) olacak Amerikan Gilsoniti içerikleri belirlenmiştir (Tablo 1). Elde

edilen sonuçlardan çalışmanın devamında %5 SBS (MB5S), %18 Amerikan Gilsoniti (MB18G), %2 SBS + %13 AG (MB2S+13G), %3 SBS + %10 AG (MB3S+10G) ve %4 SBS + %6 AG (MB4S+6G) kullanılmasına karar verilmiştir. Saf ve katkı içerikleri belirlenen 5 farklı modifiye bitüm dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyleri ile kısa ve uzun süre yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Kısa dönem ve uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde dinamik kayma reometresi (DSR), uzun dönem yaşlandırılmış numuneler üzerinde kiriş eğme reometresi (BBR) deneyleri uygulanarak saf ve modifiye bağlayıcıların performans seviyeleri belirlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1'de görüldüğü üzere RTFOT kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının 52°C sıcaklıkta ve modifiye bitümlerin 76°C sıcaklıkta şartname limiti değeri olan 2200 Pa değerini sağladıkları belirlenmiştir. Orijinal ve RTFOT kalıntısı numuneler üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının performans seviyesi yüksek sıcaklık değerinin PG 52-Y, modifiye bitümlerin ise PG 76-Y olduğu belirlenmiştir. RTFOT kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneyleri sonucunda %18 AG kullanımının RTFOT sonrası tekerlek izi parametresi açısından %5 SBS kullanımına göre önemli oranda artış sağladığı belirlenmiştir. Modifiye bitümlerdeki SBS içeriği arttıkça bağlayıcıların tekerlek izi parametresi azalmıştır. Benzer sonuç PAV kalıntıları üzerinde uygulanan DSR deneylerinde de görülmüştür. En yüksek yorulma parametresi %18 AG modifiyeli bitümde görülürken en düşük değer %5 SBS modifiyeli bitümde görülmüştür. Bağlayıcıların düşük sıcaklık performans seviyesini belirlemek amacıyla

saf bağlayıcının PAV kalıntısı üzerinde değişik sıcaklıklarda DSR deneyleri uygulanmıştır. DSR deneyleri sonucunda Superpave şartnamesine uygun olarak saf bağlayıcının PAV kalıntısı 16°C sıcaklıkta, modifiye bitümlerin PAV kalıntıları ise 25°C sıcaklıkta "G*. sin δ " şartname limitini (maks. 5000 kPa) sağlamıştır. Ayrıca -6, -12, -18 ve -24°C sıcaklıklarda PAV kalıntıları üzerinde BBR deneyleri uygulanmıştır. BBR deneyleri sonucunda saf bağlayıcının -18°C sıcaklıkta, bütün modifiye bağlayıcıların ise -6°C sıcaklıkta m-değeri ve sünme sertliği şartname limitlerini sağladığı belirlenmiştir. Superpave şartname kriterleri dikkate alındığında saf bağlayıcının performans seviyesinin PG 52-28, modifiye bağlayıcıların performans seviyelerinin ise PG 76-16 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen modifiye bitümlerin Şanlıurfa için uygun olan bağlayıcı kriterlerini (PG 76-10) sağladığı tespit edilmiştir.

2.2. Agrega deneyleri

Çalışmada agregası olarak Elazığ'ın Karayazı Bölgesi'nden temin edilen kalker türü kırmataş malzemesi kullanılmıştır. Deneylerde agregası karışımının No. 4 elek üzerinde kalan kaba kısmı yıkanarak tozdan arındırılmış olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılacak agregası yığınının mutabakat ve kaynak özellikleri tespit edilerek, tasarım trafiği (15 milyon) ve kaplamanın kalınlığına (<100 mm) bağlı olarak şartname kriterleri ile karşılaştırılmış ve bu kriterlerin sağlandığı tespit edilmiştir. Karışımlarda kullanılan kalker agregasının fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 2'de verilmiştir. Çalışmada, maksimum tane boyutu 19 mm, nominal maksimum tane boyutu 12.5 mm olan Superpave agregası gradasyonu seçilmiştir (Tablo 3).

Tablo 1. Bağlayıcıların DSR ve BBR deney sonuçları [28]

DSR deney sonuçları						
Sıcaklık (°C)	G*/sin δ (kPa) (Şartname limiti min. 1 kPa)					
	PG 52-28	MB5S	MB18G	MB2S+13G	MB3S+10G	MB4S+6G
52	2.021	-	-	-	-	-
76	-	1.367	1.504	1.495	1.481	1.405
G*/sin δ (kPa) RTFOT kalıntısı (Şartname limiti min. 2.2 kPa)						
52	8.782	-	-	-	-	-
76	-	4.673	8.678	7.810	7.084	6.364
G*.sin δ (kPa) (Şartname limiti maks. 5000 kPa)						
16	2023	-	-	-	-	-
25	-	739	4213	2991	2683	2193
BBR deney sonuçları						
Sıcaklık (°C)	m-değeri (Şartname limiti min. 0.300)					
	PG 52-28	MB5S	MB18G	MB2S+13G	MB3S+10G	MB4S+6G
-6	-	0.330	0.333	0.326	0.310	0.305
-24	0.451	-	-	-	-	-
Sünme sertliği (MPa) (Şartname limiti maks. 300 MPa)						
-6	-	43.2918	151.0398	83.8838	92.6497	60.0304
-12	-	76.790	283.9786	146.885	139.314	108.923
-18	165.7	-	-	-	-	-
-24	325.4	-	-	-	-	-
Performans seviyesi (PG)						
	52-28	76-16	76-16	76-16	76-16	76-16

Tablo 2. Kullanılan agreganın fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney Standardı	Mineral Agregası			Şartname Sınırı
		Kaba	İnce	Filler	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), (%)	TS EN 1097-2	29.2	-	-	Maks. 30
Aşınma Direnci (Mikro-Deval), (%)	TS EN 1097-1	17.4	-	-	Maks. 25
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO4 ile kayıp), (%)	TS EN 1367-4	16.7	-	-	Maks. 18
Metilen Mavisi (gr/kg)	TS EN 933-9	-	0.5	-	Maks. 1.5

Tablo 3. Çalışmada kullanılan agregası gradasyonu

Elek boyutu (mm)	Geçen (%)	Kontrol noktaları		Yasaklanmış bölge	
		Min.	Min.	Maks.	Maks.
19 (3/4")	100				
12,5 (1/2")	95	90	100		
9,5 (3/8")	88				
4,75 (No.4)	65				
2,36 (No.8)	35	28	58	39,1	39,1
1,18 (No.16)	23			25,6	31,6
0,6 (No.30)	14			19,1	23,1
0,3 (No.50)	10			15,5	15,5
0,15 (No.100)	8				
0,075 (No.200)	6	2	10		

2.3. Karışımların tasarım bitüm içeriklerinin belirlenmesi

Karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları belirlendikten sonra Superpave yöntemine göre tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir. Daha sonra tasarım bitüm içeriklerinde karışım numuneleri hazırlanarak Hava Boşluğu Yüzdesi (Va), Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA), Asfaltla Dolu Boşluk Yüzdesi (VFA), Filler Oranı (DP), %Gmm@Nini, %Gmm@Ndes, %Gmm@Nmak değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarımda servis ömrü boyunca toplam eşdeğer standart dingil yükü geçiş sayısının 3-30 milyon olduğu çift yönlü yüksek trafikli bir karayolu için tasarım yapıldığı kabul edilmiştir. Buna göre yağurmalı preste Nini değeri 8, Ndes değeri 100 ve Nmak değeri 160 olarak alınmıştır. Karışımların tasarım değerleri Şekil 3'te görülmektedir.

Şekil 3 incelendiğinde katkı içeren karışımlarda saf bağlayıcı ile hazırlanan karışıma göre tasarım bitüm içeriklerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum bağlayıcıların viskozitesinin artmasından ötürü agregayı kaplamak için daha fazla bitüm gerekmesinden kaynaklanmıştır. Superpave karışım tasarımının temelini oluşturan karışımların hava boşlukları karşılaştırıldığında bütün karışımların Superpave şartname kriterini sağladığı, hava boşluğu

değerlerinin yaklaşık %4 olduğu tespit edilmiştir. Karışımların agregalar arası boşluk oranı değerleri (VMA), karışımdaki hava boşluğu değerleri ve efektif bitüm içeriği değerlerinin toplamına eşittir. Saf karışımda her ne kadar hava boşluğu değeri %4'e yakın olsa da bitüm içeriği az olduğundan efektif bitüm içeriğinin düşük olması VMA değerinin Superpave şartnamesi alt sınırı olan %14'ün sınırda sağlanmasına neden olmuştur. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda ise bitüm içeriği saf bitüme göre daha fazla olduğundan efektif bitüm içeriği artmış dolayısıyla saf karışıma göre VMA değerleri daha yüksek çıkmıştır. Böylece bütün modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar VMA Superpave şartname kriterini sağlamıştır. Bitümle dolu boşluk oranları incelendiğinde bütün karışımların Superpave şartname kriterlerini sağladıkları belirlenmiştir. Filler oranı değerleri incelendiğinde bütün karışımların şartname kriterini sağladığı, en yüksek değere tasarım bitüm içeriği en düşük olan PG 52-28 ile hazırlanan karışımların, en düşük değere ise tasarım bitüm içeriği en yüksek olan MB5S ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımların erken kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının bir göstergesi olan %Gmm@Nini değerleri incelendiğinde bütün karışımların Superpave şartname kriteri olan maksimum %89 kriterini sağladığı belirlenmiştir. Karışımların %Gmm@Ndes değerleri incelendiğinde karışımların tasarım bitüm içeriklerinde tasarım hava boşluğu şartını sağladıklarından hedeflenen değer olan %96 değerini yaklaşık olarak sağladıkları belirlenmiştir. Karışımların %Gmm@Nmak değeri karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarıyla doğrudan ilişkilidir. Bu değer maksimum yağurma sayısında %98'den az olması gerekmektedir. Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların %Gmm@Nmak değerleri incelendiğinde bütün karışımların Superpave şartname kriterini sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında belirlenen tasarım bitüm içeriklerinde bütün karışımların Superpave şartname kriterlerini sağladığı, belirlenen tasarım bitüm içeriklerinin uygun olduğu tespit edilmiştir.

2.4. Dinamik sünme deneyi

Tekerlek izi, tekrarlı trafik yükleri altında üstyapıdaki tabakaların her birinde kalıcı deformasyonun kademeli olarak artması ile meydana gelmektedir [11]. Trafik yüklerine direkt maruz kalan kaplama tabakası kalıcı deformasyondan en çok etkilenen tabakadır [29].

Bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan deneylerden biri dinamik sünme deneyidir. Deneyde sabit bir yük, numune yüzeyine belirli bir periyot ile tekrarlı olarak uygulanmaktadır (Şekil 4). Numunenin yüzeyine yerleştirilen metal plak üzerine dik olarak ayarlanan

LVDT'ler yardımıyla her bir yük tekrarında oluşan plastik ve elastik deformasyonlar tespit edilebilmektedir. Sünme ve esneklik modülleri aşağıdaki Denklemler yardımıyla belirlenebilmektedir [30].

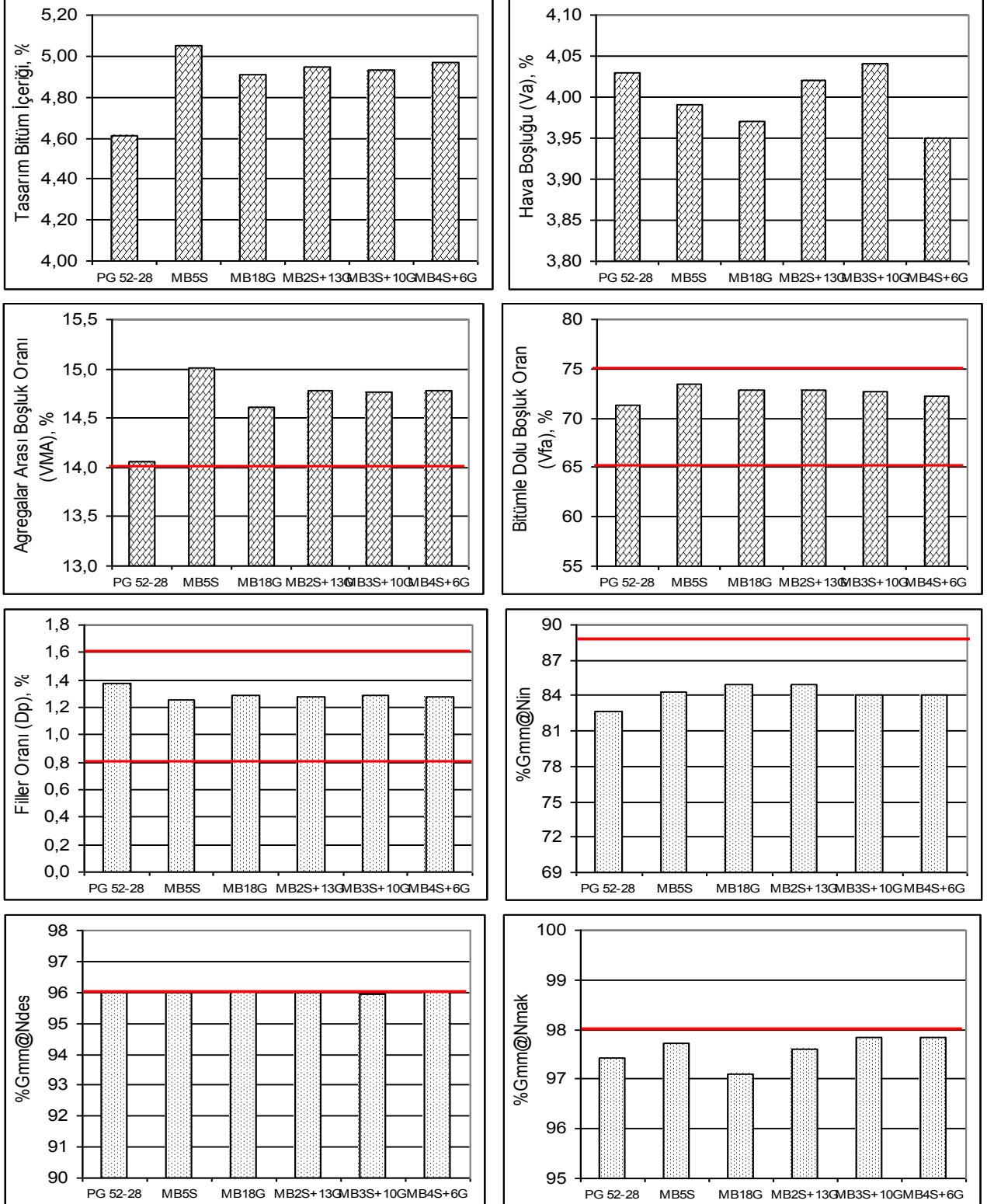
$$E_c = \sigma / \varepsilon_c \quad (1)$$

$$E_r = \sigma / \varepsilon_r \quad (2)$$

$$\varepsilon_c = (L3_n - L1) / G \quad (3)$$

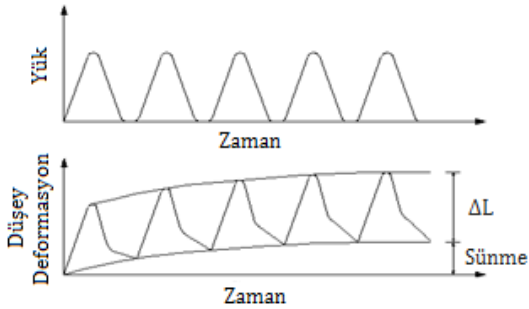
$$\varepsilon_r = (L2_n - L3_n) / (G - (L3_n - L1)) \quad (4)$$

$$\sigma = F / A \quad (5)$$



Şekil 3. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların tasarım değerleri

Denklem 1 ve 2'de görüldüğü üzere plastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda sünme modülü düşük, elastik birim şekil değiştirmenin yüksek olması durumunda esneklik modülü düşük olmaktadır.



Şekil 4. Yük - zaman ve deformasyon - zaman ilişkisi [30]

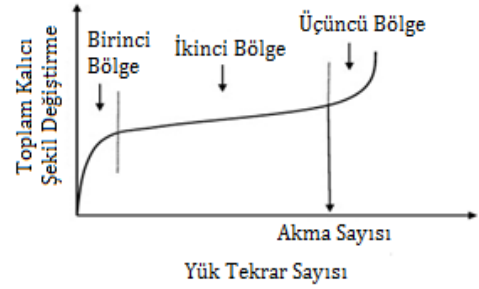
Dinamik sünme deneyi, UTM deney aleti ile yapılmaktadır (Şekil 5). İklimlendirme kabini sayesinde deney istenilen sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler en az 4 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, numune çapı, ön yükleme gerilmesi, ön yükleme süresi, yük periyodu, yük artış süreleri ve uygulanacak gerilme gibi değerler yazılıma girildikten sonra, numune yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Deneyde öncelikle ön yükleme uygulanarak birincil oturmanın oluşması hedeflenmektedir. Ön yüklemenin sonunda sisteme girilen gerilme seviyesinde tekrarlı yük uygulanarak numuneler istenen yük tekrarına ulaşıncaya veya kırılıncaya kadar deney devam etmektedir.



Şekil 5. Dinamik sünme deney düzeneği

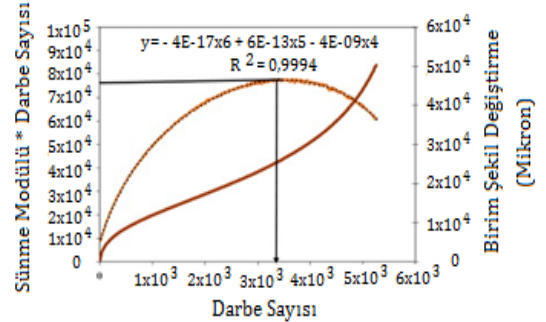
Deney sonucunda yük tekrar sayısına bağlı olarak deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 6'da görüldüğü üzere eğri üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede, konsolidasyon meydana gelerek hacim azalmakta ve şekil değiştirme başlangıçta hızla artarken daha sonra artış hızı düşmektedir. İkinci bölgede toplam şekil değiştirme lineere yakın bir değişim göstermektedir. Üçüncü bölgede ise kayma deformasyonları oluşmakta ve şekil değiştirme miktarı tekrar yükselişe geçmektedir. Witczak'ın teorisine göre üçüncü bölgenin başladığı noktadaki yük tekrar sayısı "akma sayısı" olarak tanımlanmış ve

akma sayısının kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımın bir göstergesi olduğu çeşitli çalışmalarla belirlenmiştir [31].



Şekil 6. Yük tekrar sayısı - şekil değiştirme ilişkisi

Akma sayısını tespit etmek için bir diğer yöntem de Bausano ve Williams tarafından geliştirilmiştir [32]. Bu yöntemde yatay eksen darbe sayısı, düşey eksen ise sünme modülü ile darbe sayısının çarpımı olmak üzere grafik çizilerek ve grafiğin pik noktası akma sayısı olarak bulunmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Akma sayısının bulunması [32]

3. Bulgular

Çalışmada, saf ve aynı performans seviyesine sahip 5 farklı modifiye bağlayıcı ile tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımları dinamik sünme deneyi ile belirlenmiştir.

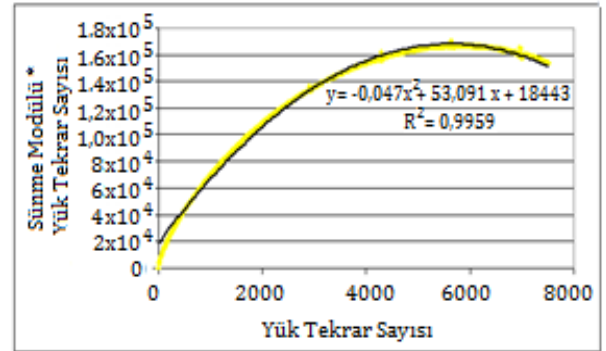
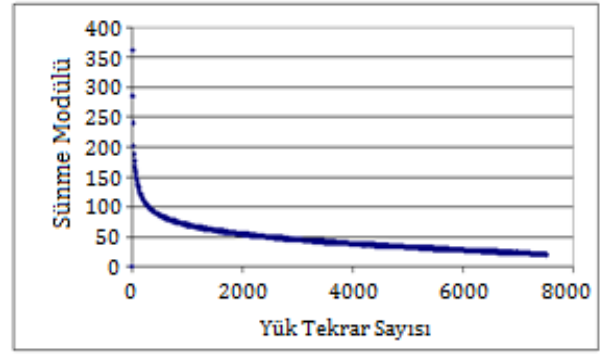
3.1. Dinamik sünme deneyi sonuçları

Dinamik sünme deneyi, üniversal deney aleti (UTM) kullanılarak 60°C sıcaklıkta ve 2 farklı gerilme seviyesinde (500 ve 600 kPa) uygulanmıştır. Saf ve modifiye bitümlerle tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan karışım numunelerinden her bir gerilme seviyesi için en az 3 tane olmak üzere toplam 36 numune dinamik sünme deneyine tabi tutulmuştur. Deney öncesinde numunelerin deney sıcaklığına tam olarak ulaşabilmesi için numuneler UTM iklimlendirme kabininin içerisinde 4 saat bekletilmiştir. Koşullandırma süresinin sonunda numune deney düzeneğine yerleştirilmiş ve deney yazılımına uygulanacak gerilme, numunenin çapı ve yüksekliği girilmiş, düşey deformasyonu tespit eden LVDT'ler yerleştirildikten sonra deneye başlanmıştır. Deneyde öncelikle 1.5 dakika boyunca numunelere 10 kPa ön yükleme uygulanarak numunelerin deney

düzeneğine tam olarak oturması sağlanmıştır. Deneyde yük etki süresi ve dinlenme süresi eşit (500 ms) olacak şekilde 1 sn'lik yükleme periyodu uygulanmıştır.

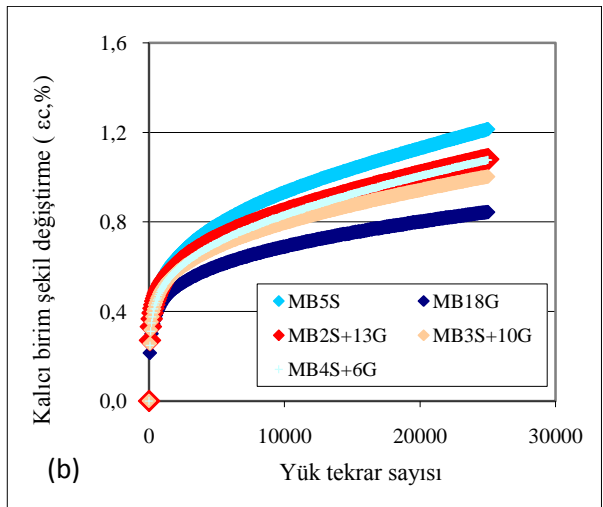
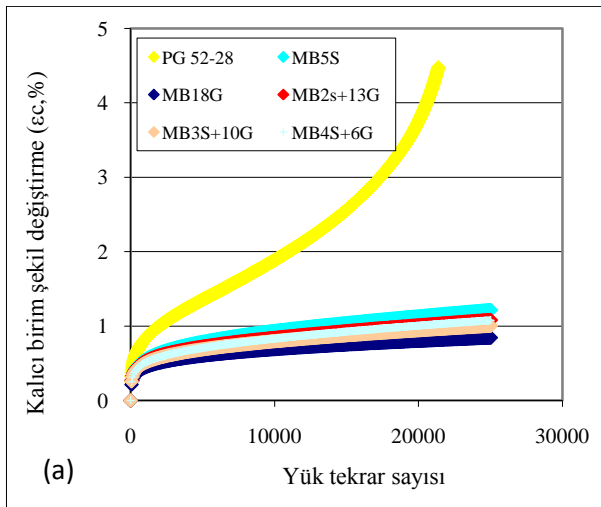
Modifiye bitümlerin kıvamları yüksek olduğundan (PG 76) modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda rijitlik değerleri yüksek çıkmış buna bağlı olarak da modifiye bitümlerle hazırlanan karışım numuneleri üzerinde 500 kPa gerilme seviyesinde 35.000, 600 kPa gerilme seviyesinde ise 25.000 yük tekrarı uygulanmasına rağmen III. bölge tam olarak belirlenememiştir. Bu nedenle akma sayıları Bausano ve Williams tarafından önerilen yöntemle belirlenmiştir [32]. Bu yöntemde düşey eksende "sünme modülü * yük tekrar sayısı" yatay eksende ise yük tekrar sayısı olacak şekilde grafikler çizilmiştir. Grafığe 2. derece polinom fonksiyonu uygulanarak eğri modellenmiş ve modellere uygun denklemler tespit edilmiştir. Denklemin türevi alınıp sıfıra eşitlenerek akma sayısı olarak ifade edilen pik noktaya karşılık gelen yük tekrar sayıları belirlenmiştir. Saf karışımın akma sayısının bulunmasına bir örnek Şekil 8'de görülmektedir.

500 ve 600 kPa gerilme seviyelerinde karışımların kalıcı birim şekil değiştirme değerlerinin değişimi Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere saf karışımda her iki gerilme seviyesinde numunelerde tamamen bozulma meydana gelerek III. bölge gözlenirken, modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlarda III. bölge gözlenememiştir. Karışımlar içerisinde en erken bozulma saf bağlayıcı ile hazırlanan karışımlarda gözlenmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde kalıcı deformasyona karşı dayanımı en yüksek karışımın MB18G modifiye bitümü ile hazırlanan karışımlar, en düşük karışımın ise MB5S ile hazırlanan karışımlar olduğu gözlenmiştir.

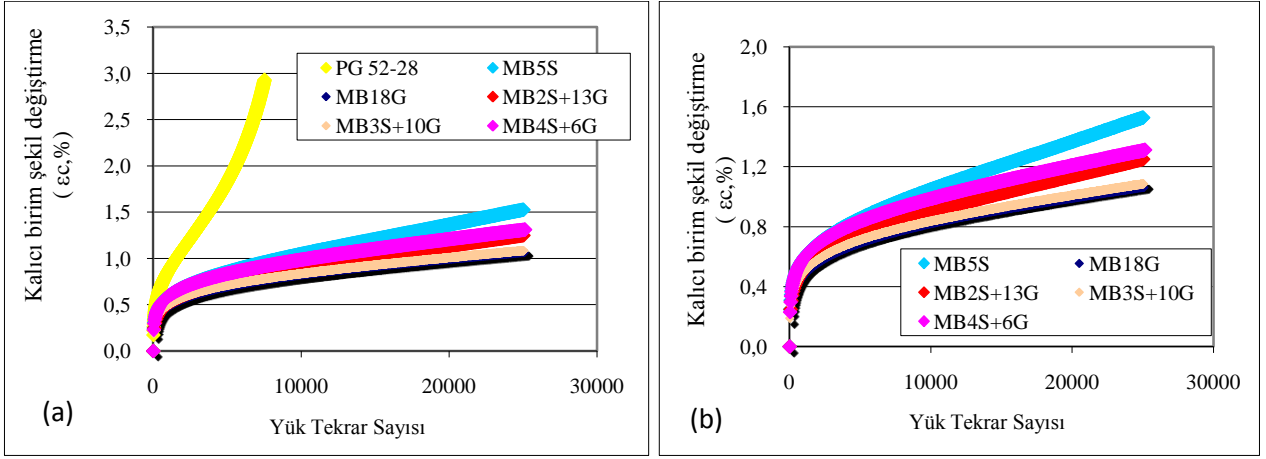


Şekil 8. Karışımların akma sayısının bulunmasına bir örnek

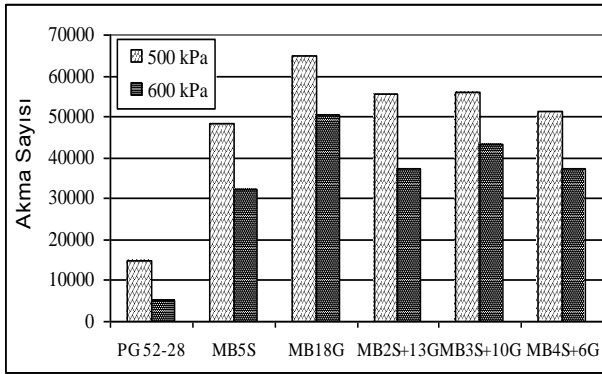
Çalışmada 25.000 yük tekrarı dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Karışımların akma sayısı değerlerinin, 25.000 yük tekrarındaki ϵ_c , 25.000 yük tekrarındaki Esneklik Modülü, 25.000 yük tekrarındaki Sünme Modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 11-Şekil 14'te görülmektedir. Saf karışım, 600 kPa gerilme seviyesinde en fazla 8.000 yük tekrarında, 500 kPa gerilme seviyesinde ise yaklaşık 23.000 yük tekrarında tamamen deforme olduğundan Şekil 12-14'te PG 52-28 ile hazırlanan karışımların değerleri bulunmamaktadır.



Şekil 9. 500 kPa gerilme seviyesinde bütün karışımların (a) ve sadece modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların (b) ϵ_c - yük tekrar sayısı ilişkisi

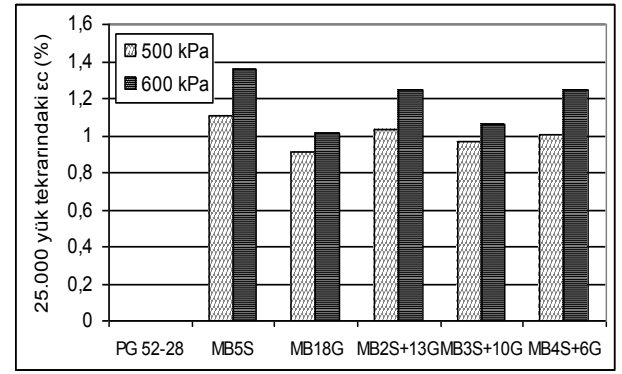


Şekil 10. 600 kPa gerilme seviyesinde bütün karışımların (a) ve sadece modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların (b) ϵ_c – yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 11. Karışımların akma değerlerinin katkı türü ile değişimi

Şekil 11 incelendiğinde katkı kullanımı ile kalıcı deformasyona karşı dayanımın bir göstergesi olan akma sayısı değerlerinin arttığı görülmektedir. En düşük akma sayısı değerine saf karışımın, en yüksek akma sayısı değerine ise MB18G modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Karışımların akma sayıları kullanılan bağlayıcı cinsine göre; MB18G > MB3S+10G > MB2S+13G > MB4S+6G > MB5S > PG 52-28 şeklinde sıralanmıştır. 600 kPa gerilme seviyesinde MB18G, MB3S+10G, MB2S+13G, MB4S+6G ve MB5S ile hazırlanan karışımların akma sayısı değerlerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışıma göre sırasıyla 9,91, 8,46, 7,34, 7,33 ve 6,30 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 500 kPa gerilme seviyesinde ise bu değişimin sırasıyla 4,41, 3,81, 3,79, 3,50 ve 3,27 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum özellikle yüksek gerilme seviyelerinde katkıların daha etkin olduğunu göstermektedir. Gerilmenin artması ile akma sayıları azalmıştır. Gerilmenin 500 kPa'dan 600 kPa'a yükselmesi ile MB18G, MB3S+10G, MB2S+13G, MB4S+6G, MB5S ve PG 52-28 ile hazırlanan karışımların akma sayısı değerlerinin sırasıyla 1,28, 1,30, 1,49, 1,37, 1,50 ve 2,88 kat azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum kalıcı deformasyon açısından gerilmedeki artıştan en fazla etkilenen karışımın PG 52-28 ile hazırlanan karışım olduğunu, en az etkilenen karışımın ise MB18G ile hazırlanan karışımlar olduğu tespit edilmiştir.

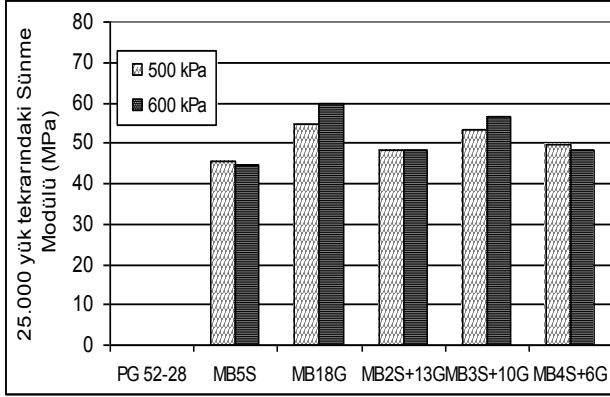


Şekil 12. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki ϵ_c değerlerinin katkı türü ile değişimi

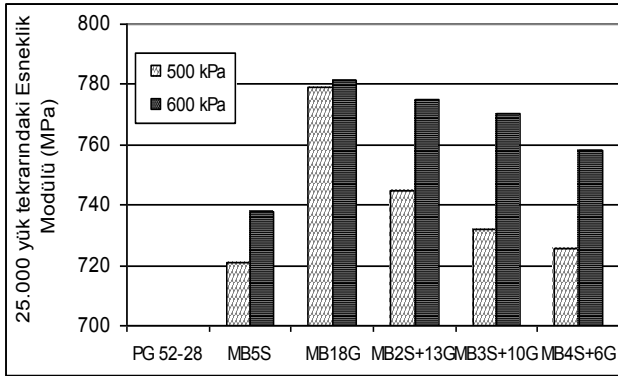
Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki kalıcı birim şekil değiştirme değerleri incelendiğinde (Şekil 12) en düşük ϵ_c değerlerine MB18G ile hazırlanan karışımların sahip olduğu görülmektedir. PG 52-28 ile hazırlanan karışımlar 25.000 yük tekrarı ulaşmadan bozulduklarından saf karışımlardan değer alınamamıştır. Bunun yanı sıra gerilmedeki artış ile bütün karışımlarda kalıcı birim şekil değiştirme değerleri artmıştır. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar içerisinde gerilmedeki değişimden en fazla etkilenen karışımın MB4S+6G ile hazırlanan karışım (%19,4) olduğu, en az etkilenen karışımın ise MB3S+10G ile hazırlanan karışım (%8,5) olduğu tespit edilmiştir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar dikkate alındığında en fazla deformasyonun her iki gerilme seviyesinde de MB5S ile hazırlanan karışımlarda olduğu, MB2S+13G ve MB4S+6G ile hazırlanan karışımların da benzer kalıcı deformasyon sergiledikleri belirlenmiştir.

Şekil 13'te görülen karışımların sünme modülü değerleri, gerilme değerlerinin kalıcı birim şekil değiştirme (ϵ_c) değerlerine oranlanması ile elde edilmiştir. Gerilme değerleri sabit olduğundan sünme modülü değerleri birim şekil değiştirme değerlerindeki değişimle benzerlik göstermektedir. Sünme modülü değeri, gerilmenin kalıcı birim şekil değiştirmeye oranı olduğundan bu değer yüksek olması kalıcı deformasyona karşı dayanımın yüksek

olacağı anlamına gelmektedir. Elde edilen sonuçlardan akma sayısı değerlerinde olduğu gibi kalıcı deformasyona karşı dayanımı en yüksek olan karışımın MB18G ile hazırlanan karışım, dayanımı en düşük olan karışımın 25.000 yük tekrarına kadar mukavemet gösteremeyen PG 52-28 ile hazırlanan karışım olduğu belirlenmiştir.



Şekil 13. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki sünme modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi



Şekil 14. Karışımların 25.000 yük tekrarı sonundaki esneklik modülü değerlerinin katkı türü ile değişimi

Karışımların esneklik modülü değerleri uygulanan gerilme değerlerinin elastik birim şekil değiştirmeye oranlanması ile elde edilmiştir (Şekil 14). Bu nedenle daha düşük esneklik modülü değeri daha fazla elastik davranışı ifade etmektedir. Modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlar değerlendirildiğinde her iki gerilme seviyesinde de en düşük esneklik modülü değerine MB5S ile hazırlanan karışımın sahip olduğu dolayısıyla en fazla elastik birim şekil değiştirmeye MB5S ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki gerilme seviyesinde de karışımlardaki SBS içeriği arttıkça esneklik modülü değerlerinin azaldığı dolayısıyla elastik davranışın arttığı belirlenmiştir. 600 kPa gerilme seviyesinde MB5S modifiye bitümü ile hazırlanan karışımların esneklik modülü değerlerinin MB4S+6G, MB3S+10G, MB2S+13G ve MB18G ile hazırlanan karışımların esneklik modüllerinden sırasıyla %2.74, %4.39, %5.01 ve %5.92 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 500 kPa gerilme seviyesinde ise bu değerlerin sırasıyla %0.64, %1.52, %3.27 ve %8.04 daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Bütün dinamik sünme deney sonuçları dikkate alındığında katkı kullanımı ile kalıcı deformasyona karşı dayanımın bir göstergesi olan akma sayısı ve sünme modülü değerlerinin arttığı, bitüm modifikasyonunda %18 AG ve %3 SBS ile %10 AG'nin birlikte kullanımının kalıcı deformasyona karşı dayanım açısından en etkin katkı olduğu, bitüm modifikasyonunda %5 SBS kullanımının ise etkinliği en az olan katkı olduğu belirlenmiştir. Esneklik modülü değerlerinden en yüksek elastik davranışı %5 SBS modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımların sergilediği, elastikliği en düşük karışımın ise %18 AG modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışım olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan sadece SBS kullanımının elastikliği, sadece AG kullanımının ise önemli oranda kalıcı deformasyona karşı dayanımı arttırdığı söylenebilmektedir. Bir karayolunun kalıcı deformasyonlara karşı dayanıklı olmasının yanı sıra elastik davranış sergilemesi de beklenmektedir. Bu nedenle sadece SBS veya AG kullanımı yerine bitüm modifikasyonunda %3 SBS ile %10 AG kullanımının daha faydalı olacağı söylenebilmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, SBS ve Gilsonit'le birlikte ve ayrı ayrı modifiye edilen bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımları değerlendirilmiştir. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan saf ve aynı performans seviyesine sahip 5 farklı modifiye bitümle tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde dinamik sünme deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcı ve karışım tasarımı Superpave yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Uygulama bölgesi olarak seçilen Şanlıurfa iline uygun bağlayıcı elde edebilmek için saf bağlayıcıya (PG 52-28); %5 SBS, %18 Amerikan Gilsoniti, %2 SBS ile birlikte %13 AG, %3 SBS ile birlikte %10 AG ve %4 SBS ile birlikte %6 AG ilave edilmesi gerektiği belirlenmiştir.
- Katkı kullanımı ile bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının arttığı belirlenmiştir.
- Akma sayısı ve sünme modülü değerleri üzerinde en etkin katkıların %18 AG ve %3 SBS + %10 AG olduğu tespit edilmiştir.
- Karışımların elastikiyetini en fazla arttıran katkının %5 SBS olduğu belirlenmiştir.

Bitümlü sıcak karışımlarda aranan özellikler mevcut trafik ve iklim koşullarında kalıcı deformasyona neden olmayacak kadar yeterli mukavemete sahip olmanın yanı sıra seyahat konforunu sağlayacak yeterli esnekliğe sahip olmalıdır. Çalışmada

görüldüğü üzere kalıcı deformasyon oluşumuna karşı en etkin katkı Amerikan Gilsoniti'dir. Elastikiyet açısından en etkin katkı ise SBS'dir. Her iki katkının birlikte kullanılması ile hem kalıcı deformasyona karşı dayanım hem de elastikiyet açısından tek bir katkı içeren modifiye bitümlerle hazırlanan karışımlara göre avantaj sağlanacağı söylenebilmektedir.

Ayrıca bitümlü sıcak karışım üretiminde kullanılacak katkıların ekonomik olmaları da büyük önem arz etmektedir. 1 birim SBS'in fiyatı yaklaşık 10-12 birim Gilsonit'in fiyatına eşittir [27]. Çalışmada kullanılan aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılar dikkate alındığında MB5S ile karşılaştırıldığında MB2S+13G bağlayıcısında %3 SBS'in yerine %13 Gilsonit kullanıldığı (%1 SBS yerine %4,33 Gilsonit), MB3S+10G bağlayıcısında %2 SBS'in yerine %10 Gilsonit kullanıldığı (%1 SBS yerine %5 Gilsonit), MB4S+6G bağlayıcısında %1 SBS'in yerine %6 Gilsonit kullanıldığı belirlenmiştir. Gilsonit'in, SBS'e göre 10-12 kat daha ucuz olması iki katkının birlikte kullanılmasının sadece SBS kullanımına göre ekonomik açıdan da fayda sağlayacağını göstermektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, MAG-214M669 numaralı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Programı (TÜBİTAK) projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Yılmaz, M., Kök, B.V. 2008. The Effect of Using Ferrochromium Slag on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt. Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 12 (3), 186-194.
- [2] Verstraeten, J. 1995. Bituminous Materials with a High Resistance to Flow Rutting. PIARC Technical Committee on Flexible Roads, Belgium.
- [3] Karahancer, S., Erişkin, E., Çapalı, B., Saltan, M., Terzi, S. 2016. Investigation of Using Waste Welded Tuff Material as Mineral Filler in Asphalt Concrete. Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 20 (3), 399-404.
- [4] Topal, A. 2010. Evaluation of the Properties and Microstructure of Plastomeric Polymer Modified Bitumens. Fuel Processing Technology, 91, 45-51.
- [5] Morova, N., Terzi, S. 2015. Evaluation of Colemanite Waste as Aggregate Hot Mix Asphalt Concrete. Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 19 (2), 8-15.

- [6] Lav, A. H. ve Lav, M. A. 2004. Shell Bitüm El Kitabı. İsfalt Bilimsel Yayınları, No:3, İstanbul, 334s.
- [7] Yalçın, E. 2014. Filler olarak kireç kullanımının modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların performansına etkisinin incelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- [8] Çeloğlu, M. E. 2014. Farklı doğal asfaltların bitüm ve bitümlü sıcak karışımların özelliklerine etkileri. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- [9] Lu, X., Isacson, U. 1997. Rheological Characterization of Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer Modified Bitumens. Construction and Building Materials, 11(1), 23-32.
- [10] Kumar, P., Chandra, S., Bose, S. 2006. Strength Characteristics of Polymer Modified Mixes. The International Journal of Pavement Engineering, 7(1), 63-71.
- [11] Tayfur, S., Ozen, H., Aksoy, A. 2007. Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer Modifiers. Construction and Building Materials, 21, 328-37.
- [12] Kok, B. V., Yılmaz, M. 2009. The Effects of Using Lime and Styrene-Butadiene-Styrene on Moisture Sensitivity Resistance of Hot Mix Asphalt. Construction and Building Materials, 23, 1999-2006.
- [13] Gorkem, C., Sengoz, B. 2009. Predicting Stripping and Moisture Induced Damage of Asphalt Concrete Prepared with Polymer Modified Bitumen and Hydrated Lime. Construction and Building Materials, 23, 2227-2236.
- [14] Hamidi, H. 1998. Stiffness Modulus and Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mix Containing Gilsonite. PhD Thesis, Bandung Technology Institute, India.
- [15] Liu, J., Li, P. 2008. Experimental Study on Gilsonite-Modified Asphalt. Proceeding of the 2008 Airfield and Highway Pavement Specialty Conference, Washington, 222-228.
- [16] Asia Gilsonite. <http://www.asiagilsonite.com/?page=gilsonite> (Erişim Tarihi: 27 Ocak 2017).
- [17] Widyatmoko, I., Elliott, R. 2008. Characteristics of Elastomeric and Plastomeric Binders in Contact with Natural Asphalts. Construction and Building Materials, 22, 239-249.
- [18] Babagoli, R., Hasaninia, M., Namazi, N. M. 2015. Laboratory Evaluation of The Effect of Gilsonite on the Performance of Stone Matrix Asphalt Mixture. Road Materials and Pavement Design, 16(4), 889-906.

- [19] Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., Fan, Y. 2002. Rheological Characterization of Storage-Stable SBS-Modified Asphalts. *Polymer Testing*, 21, 295-302.
- [20] Sun, D., Lu, W. 2003. Investigation and Improvement of Storage Stability of Sbs Modified Asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 21(5-6), 901-910.
- [21] Davis, N., Tooman, C. E. 1989. New Laboratory Tests Evaluate the Effectiveness of Gilsonite Resin as a Borehole Stabilizer. *SPE Drilling Engineering*, 4(1), 47-56.
- [22] Kök, B.V, Yılmaz, M., Akpolat, M. 2014. Evaluation of the Conventional and Rheological Properties of SBS + Sasobit Modified Binder. *Construction and Building Materials*, 63, 174-179.
- [23] Carcer, I. A., Masegosa, R. M., Vinas, M. T., Salom, C., Prolongo, M. G., Contreras, V., Barcelo, F., Paez, A. 2014. Storage Stability of SBS/Sulfur Modified Bitumens at High Temperature: Influence of Bitumen Composition and Structure. *Construction and Building Materials*, 52, 245-52.
- [24] Pamplona, T. F., Amoni, B. C., Alencar, A. E. V., Lima, A. P. D., Ricardo, N. M., Soares, J. B., Soares, S. A. 2012. Asphalt Binders Modified by SBS and SBS/Nanoclays: Effect on Rheological Properties. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 23(4), 639-647.
- [25] Peng, Y., Ruibo, R., Lizhi, W., Xiaoning, Z. 2012. Characteristic Behavior of Asphalt with SBS and PE. *Sustainable Construction Materials*, 421-429.
- [26] Yılmaz, M., Kök, B. V., Çeloğlu, M. E., Yalçın, E., Erdoğan Yamaç, Ö., Akpolat, M. 2015. Stiren-Butadien-Stiren ve Gilsonit'in Birlikte Kullanımının Modifiye Bitümlerin Depolama Stabilitesi Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP), Performans Projesi, Proje No: MF.14.22. Elazığ.
- [27] Kök, B.V., Yılmaz, M., Güler, M. 2011. Evaluation of High Temperature Performance of SBS + Gilsonite Modified Binder. *Fuel*, 90, 3093-3099.
- [28] Yılmaz, M., Erdoğan Yamaç, Ö. 2017. Evaluation of Gilsonite and Styrene-Butadiene-Styrene Composite Usage in Bitumen Modification on the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9), 2017.
- [29] Khodaii, A., Mehrara, A. 2009. Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and Sbs Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2586-2592.
- [30] ELE, 1994. Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens. Reference and Operating Manual, ELE International Ltd, Hertfordshire, UK.
- [31] Witczak, M. W., Kaloush, K. E., Pellinen, T., El-Basyouny, M., Von Quintus, H. 2002. Simple Performance Test for Superpave Mix Design. The National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Rep 465, 465p, Washington, DC.
- [32] Bausano, J., Williams, C. 2007. A New Approach to Calculating Flow Number, Unpublished Paper.