

Farklı Katkılar İçeren Bitümlü Sıcak Karışımların Yorulma Ömürlerinin İncelenmesi

Mehmet YILMAZ, Baha Vural KÖK, Erkut YALÇIN

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ELAZIĞ
mehmetyilmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16.04.2017; Kabul/Accepted: 27.08.2017)

Özet

Bu çalışmada, bitüm modifikasyonunda stiren-butadiyen-stiren (SBS), Amerika Gilsoniti (AG) ve İran Gilsoniti (IG) kullanılmıştır. Uygulama bölgesi olarak Elazığ seçilmiş ve Elazığ'a uygun bağlayıcı elde edebilmek için %4 SBS, %11 AG ve %10 IG kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Saf bitüm ve 3 farklı modifiye bitüm kullanılarak bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri hazırlanmış ve tasarım bitüm içerikleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca filler olarak %2 oranında hidrate kireç kullanılmıştır. Tasarım bitüm içeriklerinde hazırlanan bitümlü sıcak karışım numuneleri üzerinde 25°C sıcaklıkta ve 375 kPa gerilme seviyesinde indirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD) uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının karışımların yorulma ömrünü arttırdığı belirlenmiştir. En yüksek yorulma ömrü değerlerine %11 AG modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri incelendiğinde bitüm katkı maddelerinin karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Gilsonit kullanımının SBS'e göre çatlak ilerleyişine karşı dayanımı daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Kireç kullanımının bitüm katkı kullanımı kadar etkin olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Bitümlü sıcak karışım, Yorulma, Stiren-butadiyen-stiren, Amerika Gilsoniti, İran Gilsoniti.

Investigation of Fatigue Lives of Hot Mix Asphalts Including Various Additives

Abstract

In this study, styrene-butadiene-styrene (SBS), America Gilsonite (AG) and Iranian Gilsonite were used in bitumen modification. Elazığ province was chosen as the application region and 4% SBS, 11% AG and 10% IG were used in order to obtain the appropriate binder grade for Elazığ. Hot mix asphalts (HMAs) were prepared with neat and modified binders which include 3 different modifiers and designed bitumen contents were determined for each binder. Also, hydrated lime was used as filler in proportion of 2% with respect to aggregate weight. Indirect tensile fatigue tests (ITFT) were conducted on mixtures, which were prepared with design bitumen contents, under 375 kPa stress level and at 25°C. From the obtained results, it was determined that SBS, AG and IG usage in bitumen modification increased the fatigue life of mixtures. The highest fatigue life results were obtained from mixtures prepared with 11% AG modified binders. All bitumen modifiers increased the resistance to crack propagation of the mixtures. It was determined that Gilsonite usage in bitumen modification was more effective than SBS usage in terms of resistance to crack propagation of mixtures. It was observed that the hydrated lime was not as effective as the binder additives.

Keywords: Bitumen, Hot mix asphalt, Fatigue, Styrene-butadiene-styrene, America Gilsonite, Iranian Gilsonite.

1. Giriş

Artan ağır taşıt trafiği ve dingil yükleri, esnek üstyapılarda kullanılan bitümlü sıcak karışımların performansının azalmasına neden olmaktadır. Taşıt yükleri ve trafik artışına bağlı olarak bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) oluşan başlıca bozulmalardan biri yorulma çatlak oluşumudur. Karayollarında kullanılan bitümlü malzemeler,

her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmakta ve bu yükler, malzemenin rijitliğinin azalmasına neden olan mikro hasarlara yol açmaktadır. Bu mikro hasarlar uzun dönemde yorulma çatlak olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [1]. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunu takiben kademeli olarak artmaktadır. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma

kaplamanın belirli bir oranda yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Malzeme açısından; bitümlü sıcak karışım (BSK) tasarımının uygun şekilde yapılması, reolojik açıdan daha uygun bitümlü bağlayıcı seçimi, bozulmalara karşı daha dayanıklı bağlayıcı ve agrega seçimi üstyapı performansının artmasına yardımcı olmaktadır [2]. Agregalar, bitümlü sıcak karışımların ağırlıkça %90-95'ini oluşturmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlarda agregalara göre çok az miktarda kullanılmalarına rağmen, bitümlü sıcak karışımların performansı üzerinde bitümlü bağlayıcıların büyük rolü bulunmaktadır. Bu nedenle bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliklerini iyileştirmeye yönelik çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [1].

Bitümlü sıcak karışımların çevresel etkenlere karşı yeteri kadar durabil ve trafik yüklerine karşı yeteri kadar stabil olması için bitümlü bağlayıcılara katkı maddeleri ilave edilmektedir [1]. Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı maddeleri genellikle polimerlerdir. Polimerler kendi aralarında; elastomerler ve plastomerler olmak üzere iki büyük guruba ayrılmakta olup bitüm modifikasyonunda en çok kullanılan malzeme olan stiren-butadiyen-stiren (SBS), elastomer polimer gurubunda yer almaktadır [3]. SBS kopolimerleri, dayanımlarını ve elastikiyetlerini, moleküller arasındaki üç boyutlu ağlar ve çapraz bağlardan almaktadır. Polistiren uç bloklar polimerlerin mukavemetini sağlarken polibutadiyen bloklar elastikiyeti sağlamaktadır [4]. SBS bitüm ile karıştırıldığında SBS'nin elastomerik fazı bitümün yağı fraksiyonlarını absorbe etmekte ve ilk hacmine göre 9 kata yakın hacmi artmaktadır [5]. Yeterli miktarda SBS kullanılması ile sürekli polimer faz oluşmakta ve saf bitümün özellikleri iyileştirilmiş olmaktadır [6]. Yapılan çeşitli çalışmalarda bitüm modifikasyonunda SBS kullanımının bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini iyileştirdiği, ayrıca bitümlü sıcak karışımların performansını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir [7-10].

Bitümlü sıcak karışımların performansını artırmak amacıyla kullanılan diğer bir grup bitüm katkısı ise doğal hidrokarbonlardır [11]. Doğal olarak oluşan bitüm kaynağı olan ve genellikle gilsonit olarak isimlendirilen bitüm katkı maddeleri %99 saflıkta olup %57-70 oranında asfalten içermektedir [12]. Mineral

bitüm olan gilsonit, siyah, kırılğan ve kolayca toz haline gelen bir yapıya sahiptir [13]. Başlıca Gilsonit kaynakları Amerika ve İran'da bulunmaktadır. Katkı olarak gilsonit kullanılması ile bitümlü bağlayıcının viskozitesi artarken Penetrasyon değeri azalmaktadır. Bu durum gilsonit kullanımının bitümün kıvamını arttırdığını göstermektedir. Gilsonit bitümlü sıcak karışımlarda genellikle iki şekilde kullanılmaktadır. İlk yöntemde gilsonit bitüm modifikasyonunda kullanılırken ikinci yöntemde karışıma ilave edilmektedir [14]. Bitüm modifikasyonunda Amerika Gilsoniti (AG) kullanılan bir çalışma sonucunda AG kullanımını ile BSK'ların yüksek sıcaklık dayanımı iyileşirken düşük sıcaklık dayanımı olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir [15]. Bunun yanı sıra İran Gilsoniti (IG) kullanımını ile BSK'ların yüksek sıcaklık özelliklerinin yanında orta ve düşük sıcaklık özelliklerinin de iyileştiğinin belirlendiği çalışmalar bulunmaktadır [13, 16]. Bu durum kullanılan gilsonitin kaynağının ve saf bitümün özelliklerinin modifiye bitümün özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

BSK'ların dayanımını arttırmak amacıyla uygulanan diğer bir yöntem karışımın modifiye edilmesidir. Bu yöntemde, katkı malzemeleri doğrudan karışıma eklenmektedir. Karışıma eklenen katkı maddeleri genellikle filler malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kireç, siyah karbon, uçucu kül gibi malzemeler BSK'larda filler olarak kullanılabilen katkı maddeleridir [1]. Mineral filler yerine belirli oranda kireç kullanılması, BSK'ların nem hasarına karşı dayanımını önemli miktarda arttırmaktadır [17]. Ayrıca, hidrate kireç, bitümlü sıcak karışımlardaki mastik yapıyı yüksek sıcaklıklarda mineral fillere göre daha sert hale getirmekte, böylece BSK'ların mekanik özellikleri iyileşmektedir [18]. Yapılan çeşitli çalışmalarda en etkin kireç oranının agrega ağırlığının %2'si olduğu belirlenmiştir [19].

Bu çalışmada bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Ayrıca filler olarak %2 oranında hidrate kireç kullanılmıştır. Hazırlanan modifiye bitümlerle tasarım bitüm içeriklerinde BSK numuneleri üretilmiştir. BSK numuneleri üzerinde indirekt çekme yorulma deneyleri uygulanmıştır. Böylece bitüm modifikasyonunda

üç farklı katkı türü ve filler olarak hidrate kireç kullanımının BSK'ların yorulma ömrüne etkisi değerlendirilmiş, ayrıca yorulma ömrü açısından en etkin katkı türü belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada, uygulama bölgesi olarak Elazığ seçilmiştir. Superpave yöntemine göre Elazığ'a ait 20 yıllık hava sıcaklığı verileri ve coğrafi bilgiler kullanılarak uygun bağlayıcı seviyesinin PG 70-22 olduğu belirlenmiştir. TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen PG 52-28 sınıfı saf bağlayıcı ana bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu saf bağlayıcı ile SBS, AG ve IG kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. SBS polimeri (Kraton D-1101); Shell Chemicals Company, AG; American Gilsonite Company ve IG Aydın Trade Company şirketlerinden temin edilmiştir.

Çalışmada, Elazığ için uygun bağlayıcı elde edilmesi için %4 SBS ($MB_{\%4.0SBS}$), %10 IG ($MB_{\%10.0IG}$) ve %11 AG ($MB_{\%11.0AG}$) kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Bağlayıcı deney sonuçları Tablo 1'de verilmiştir [20]. Modifiye bitüm hazırlanmasında bütün katkılar için aynı

prosedür uygulanmış olup, saf bitüm ile katkı maddeleri 180°C sıcaklıkta 60 dakika süresince 1000 devir/dakika hızla karıştırılmışlardır.

BSK hazırlanmasında Elazığ Karayolu Bölgesi'nden elde edilen kalker türü kırmataş agregası kullanılmıştır. Agregası fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Çalışmada maksimum dane boyutu 19 mm olan yoğun gradasyonlu agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregaya ait gradasyon eğrisi ise Şekil 1'de verilmiştir. Hidrate kireç içeren karışımlarda %2 oranında kalker filler yerine hidrate kireç kullanılmıştır.

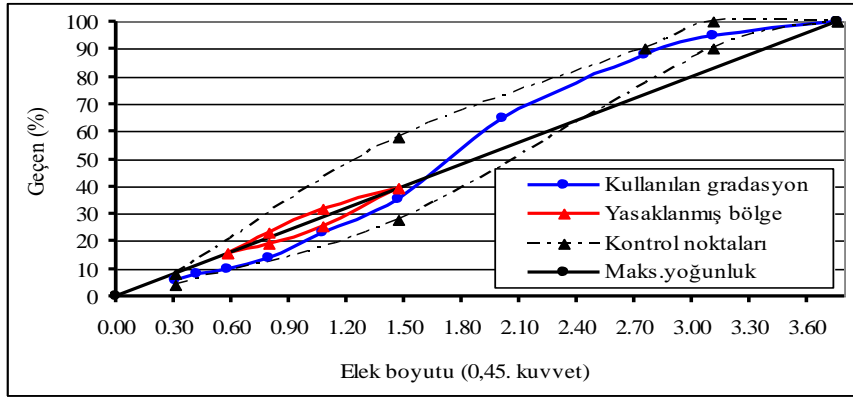
Amerika Stratejik Karayolu Araştırma Programı (SHRP), yolların performans ve durabilitesini arttırmak ayrıca yolları daha güvenli hale getirmek amacıyla yaptığı uzun süreli ve yüksek bütçeli araştırmalar sonucunda Yüksek Performanslı Asfalt Kaplama (Superpave) sistemini geliştirmiştir. Superpave sistemi; tekerlek izini, düşük sıcaklık ve yorulma çatlaklarını sınırlandırarak, uygulama bölgesindeki çevre koşullarını dikkate alarak kaplama performansını arttırmak amacıyla, kullanılacak malzemelerin performansına dayalı olarak incelenmesini içermektedir.

Tablo 1. DSR ve BBR deney sonuçları ve bağlayıcıların performans seviyeleri [20]

DSR deney sonuçları				
Sıcaklık (°C)	G*/sinδ (kPa) (şartname limiti min. 1 kPa)			
	PG 52-28	MB _{%4.0SBS}	MB _{%11.0AG}	MB _{%10.0IG}
52	1.803	-	-	-
70	-	1.279	1.334	1.291
G*/sin δ (kPa) RTFOT kalıntısı (şartname limiti min. 2.2 kPa)				
52	14.460	-	-	-
70	-	7.318	8.163	8.769
G*.sin δ (kPa) PAV kalıntısı (şartname limiti maks. 5000 kPa)				
16	2578	-	-	-
28	-	1158	1754	1746
BBR deney sonuçları				
Sıcaklık (°C)	m-değeri (şartname limiti min. 0.300)			
	PG 52-28	MB _{%4.0SBS}	MB _{%11.0AG}	MB _{%10.0IG}
-12	-	0.310	0.310	0.305
-18	0.514	0.278	0.405	0.723
-24	0.587	0.258	0.250	0.531
Sünme sertliği (Mpa) (şartname limiti maks. 300 MPa)				
-12	-	80.4	134.0	86.0
-18	182.6	125.1	389.9	359.3
-24	364.3	228.6	433.7	599.0
Performans seviyesi (PG)				
	52-28	70-22	70-22	70-22

Tablo 2. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	Deney standardı	Mineral agregası			Şartname limiti
		Kaba	İnce	Filler	
Los Angeles Aşınma kaybı, (%)	ASTM C-131	25.4	-	-	Maks. 35
Aşınma kaybı (Mikro deval), (%)	ASTM D 6928	13.3	-	-	Maks. 15
Na ₂ SO ₄ ile donma kaybı, (%)	ASTM C-88	4.9	-	-	Maks. 10
Kaba agregası köşelliliği, (%)	ASTM D-5821	98/96	-	-	Min. 95/90
Yassı ve uzun daneler, (%)	ASTM D-4791	3	-	-	Maks. 10
Metilen mavisi (gr/kg)	EN 933-9		1.0		Maks. 1.5

**Şekil 1.** Kullanılan agregası gradasyonu

Superpave'in üç ana bileşenini; bağlayıcı şartnamesi, karışım dizaynı ile analiz ve bilgisayar yazılım sistemleri oluşturmaktadır [11, 15]. Çalışmada, karışımların tasarım bitüm içerikleri Superpave yöntemine göre belirlenmiştir. Hidrate kireç içeren karışımlarda

tamamen kalker kullanılan karışımlar için belirlenen bitüm içerikleri kullanılmıştır. Karışımların hacimsel özellikleri ve şartname limitleri Tablo 3'te verilmiştir. Bütün karışımlar şartname limitlerini sağlamıştır.

Tablo 3. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri [20]

Hidrate kireç içermeyen karışımlar					
Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü			
		PG 52-28	MB _{%4.0} SBS	MB _{%11.0} AG	MB _{%10.0} IG
Tasarım bitüm içeriği (%)	-	4.67	4.90	4.80	4.85
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	3.98	4.08	4.04	3.97
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14.24	14.11	14.17	14.06
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65-75	72.01	71.07	71.52	71.79
Filler oranı (Dp)	0.8-1.6	1.30	1.34	1.32	1.33
%G _{mm} @N _{ini} = 8 (%)	maks. 89	85.23	84.94	85.38	85.45
%G _{mm} @N _{des} = 100 (%)	96	96.02	95.92	95.96	96.03
%G _{mm} @N _{max} = 160 (%)	maks. 98	97.81	96.84	97.63	97.67

Tablo 3. Saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanan karışımların hacimsel özellikleri (Devamı) [20]

Karışım özellikleri	Şartname limitleri	Bağlayıcı türü			
		PG 52-28	MB%4.0SBS	MB%11.0AG	MB%10.0IG
Tasarım bitüm içeriği (%)	–	4.67	4.90	4.80	4.85
Hava boşluğu (Va, %)	4.0	4.21	4.39	4.29	4.26
Agregalar arası boşluk oranı (VMA, %)	min. 14.0	14.74	14.76	14.69	14.92
Bitümle dolu boşluk oranı (VFA, %)	65–75	71.41	70.30	70.81	71.42
Filler oranı (Dp)	0.8–1.6	1.26	1.27	1.28	1.24
%Gmm@Nini. = 8 (%)	maks. 89	80.71	82.25	82.46	82.64
%Gmm@Ndes. = 100 (%)	96	95.79	95.61	95.71	95.74
%Gmm@Nmax. = 160 (%)	maks. 98	97.36	97.14	97.22	97.38

2.1. İndirekt çekme yorulma deneyi

Bitümlü sıcak karışımların yorulma ömrünü değerlendirebilmek için çeşitli yöntemler bulunmakta olup bu yöntemlerde çok değişik numune geometrileri kullanılmaktadır. İndirekt çekme yorulma deneyinin basit olması ayrıca geometrisi nedeniyle numunelerin laboratuvar ortamı ya da araziden rahatlıkla temin edilebilmesi, bu deney yöntemini en fazla uygulanan deneylerden biri haline gelmiştir. Silindirik şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

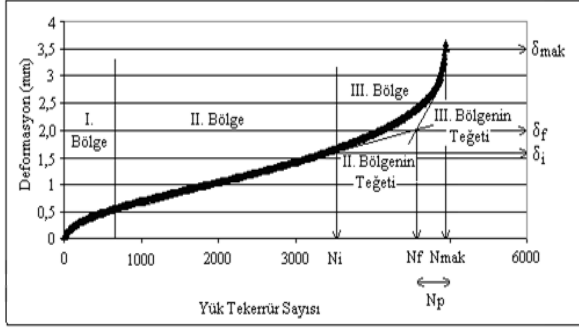
Gerilme kontrollü İndirekt çekme yorulma deneyi (İÇYD), UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2’de deney düzeneği görülmektedir. Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. Standart deney sıcaklığı 25°C olmasına rağmen iklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme

yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak doğrusal değişken türevsel dönüştürücüler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, numuneler tam olarak kırılmaya kadar devam etmektedir.



Şekil 2. İndirekt çekme yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 3’te temsili olarak görüldüğü gibi yük tekrerrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekrerrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara <çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [21, 22].



Şekil 3. Temsili deformasyon - yük tekrarı sayısı ilişkisi

Çatlak ilerleme oranı (r_f), yorulma ömrü değerinden maksimum yük tekrar sayısına kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili formül aşağıda verilmiştir [21]. Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_f = \frac{N_p}{\delta_{\max} - \delta_f} \quad (1)$$

Burada;

r_f : Çatlak ilerleme oranı (darbe sayısı/mm)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

$\delta_{f \max}$: Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon (mm)

δ_f : Yorulma ömründeki (N_f) toplam deformasyonu (mm) ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. İndirekt çekme yorulma deney sonuçları

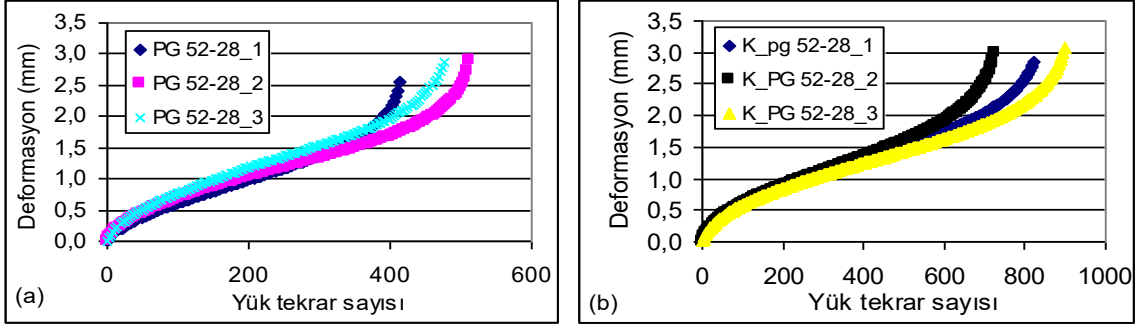
PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} kullanılarak hazırlanan, filler olarak tamamen kalker ve %2 oranında hidrate kireç içeren karışım numuneleri üzerinde indirekt çekme yorulma deneyleri gerilme kontrollü olarak, 375 kPa gerilme seviyesinde ve 25°C sıcaklıkta uygulanmıştır. Deneyden önce numuneler 3 saat deney sıcaklığında bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, yükleme başlıkları arasında yerleştirilmiş, düşey deformasyonu okuyacak LVDT'ler ayarlanmış,

numune yüksekliği, çapı, gerilme seviyesi değerleri ve yükleme periyodu bilgisayara girilmiş ve deneye başlanmıştır. Yükleme periyodu 1.5 sn olarak alınmış bu sürenin 0.124 saniyesi yük etki süresi olarak ayarlanmıştır. Dolayısıyla dinlenme periyodu (rest period) 1.376 saniye olmuştur. Deney, numuneler tam olarak kırılıncaya kadar devam etmiştir. Numunelerin deneyden sonraki durumları Şekil 4'te görülmektedir.

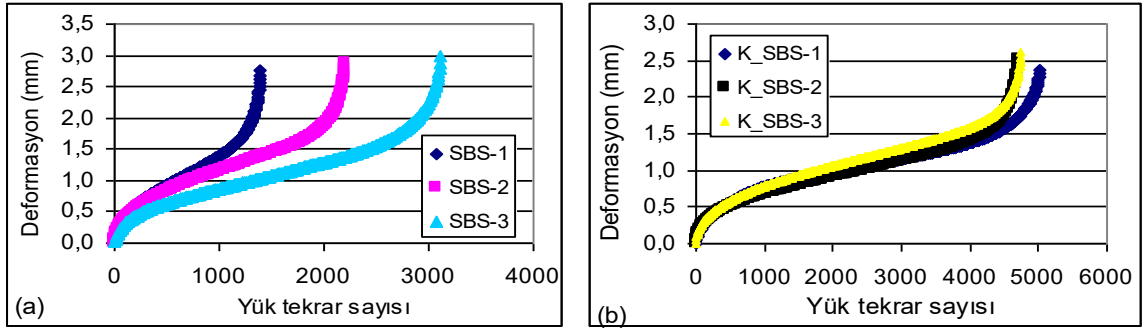


Şekil 4. İndirekt çekme yorulma deneyine tabi tutulan numuneler

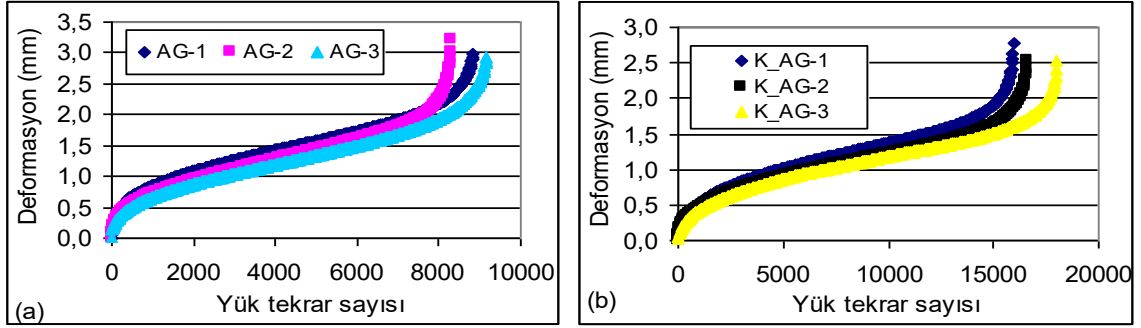
İndirekt çekme yorulma deneylerinde numunelerde kırılma meydana gelinceye kadar tekrarlı yük uygulanmaya devam edildiğinden maksimum yük tekrarı sayısı (N_{\max}) ve maksimum yük tekrarı sayısındaki deformasyon miktarları (δ_{\max}) belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrisinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesişimlerinden yorulma ömürleri belirlenmiştir. III. kısımda teğet, eğrinin dönüş yaptığı noktadan itibaren alınmıştır. Excel ortamında eğrinin II. ve III. kısımları iki ayrı kısma ayrılmış belirlenen yerlerden geçirilen teğetlerin formülleri belirlenmiştir. İki teğet birbirine eşitlenerek karışımların yorulma ömürleri (N_f) belirlenmiştir. Formül 1 kullanılarak III. Bölgede, N_f ile N_{\max} arasında her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayıları (r_f) belirlenmiştir. PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} bitümleri kullanılan numunelere 375 kPa gerilme seviyesinde uygulanan deneylerden elde edilen deformasyon-yük tekrarı ilişkileri Şekil 5-8'de verilmiştir. Bütün karışımların deformasyon değerlerinin yük tekrarı ile değişimine birer örnek Şekil 9'da verilmiştir.



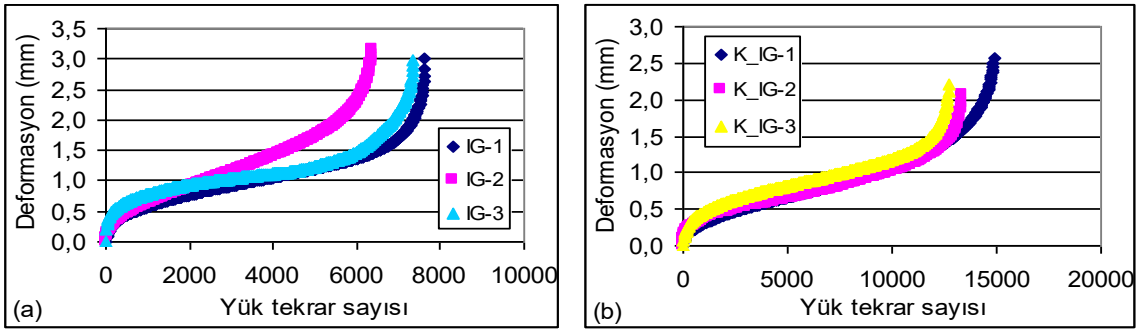
Şekil 5. PG 52-28 ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



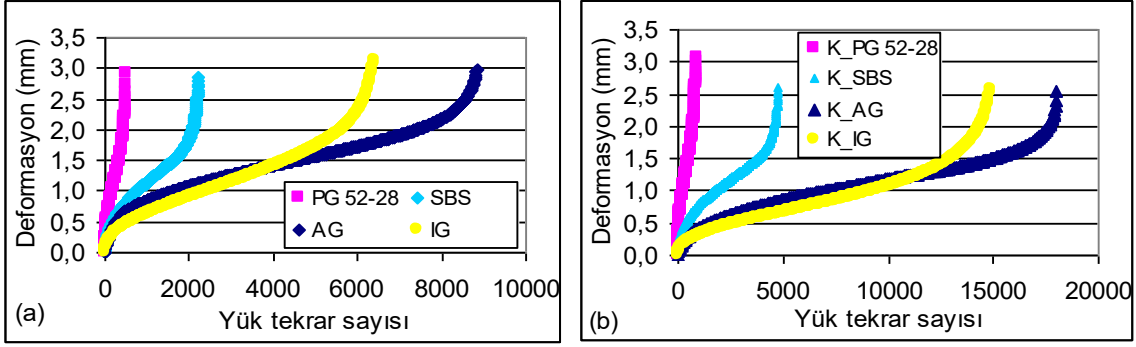
Şekil 6. MB%4,0SBS ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 7. MB%11,0AG ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



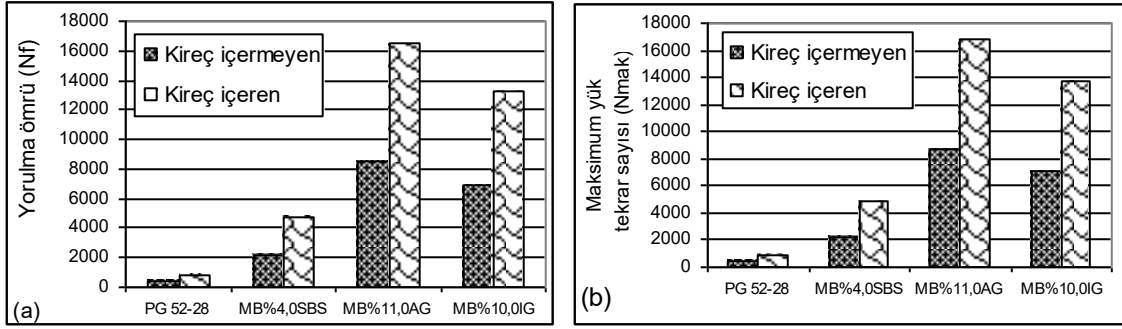
Şekil 8. MB%10,0IG ile hazırlanan, kireç içermeyen (a) ve içeren (b) numunelerin deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisi



Şekil 9. Kireç içermeyen (a) ve içeren (b) karışımların deformasyon-yük tekrar sayısı ilişkisinin karşılaştırılması

Numunelerde kırılma meydana gelmesi için en düşük yük tekrar sayısına PG 52-28 ile hazırlanan karışımların, en yüksek yük tekrarına ise MB_{%11,0AG} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 9). Kireç kullanımı

ile yorulma ömürlerinin önemli oranda arttığı tespit edilmiştir. Ortalama yorulma ömrü (N_f) ve maksimum yük tekrar sayısı (N_{mak}) değerlerinin katkı türü ile değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Yorulma ömrü (N_f) (a) ve maksimum yük tekrar sayısı (N_{mak}) (b) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi

Yorulma ömrü değerleri (Şekil 10a), yük tekrar sayısı - deformasyon grafiğinde II. ve III. kısımların teğetlerinin kesim noktalarından elde edilmiştir. Yorulma ömrü değerleri, hem filler olarak kireç kullanımı ile hem de bitüm katkı maddelerinin kullanımı ile artmıştır. Kireç kullanımı ile PG 52-28, MB_{%4,0SBS}, MB_{%11,0AG} ve MB_{%10,0IG} ile hazırlanan BSK'ların yorulma ömrü değerleri sırasıyla 1.84; 2.21, 1.95 ve 1.92 kat artmıştır. Bu durum kireç kullanımının yorulma ömrü değerleri üzerinde en fazla MB_{%4,0SBS} modifiyeli bitüm ile hazırlanan karışımlarda etkin olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda kireç, en az PG 52-28 ile hazırlanan karışımlarda etkin olmuştur.

Kireç içermeyen karışımlarda MB_{%4,0SBS}, MB_{%11,0AG} ve MB_{%10,0IG} ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerleri PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 4.96, 19.77 ve 16.09 kat artmıştır. Kireç içeren karışımlarda

ise MB_{%4,0SBS}, MB_{%11,0AG} ve MB_{%10,0IG} ile hazırlanan karışımların yorulma ömrü değerleri PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 5.96, 20.88 ve 16.80 kat artmıştır. Bu durum hem kireç içeren hem de kireç içermeyen karışımlarda yorulma ömrünün en fazla MB_{%11,0AG} ile hazırlanan karışımlarda olacağını göstermektedir. Kireç içeren karışımlarda modifiye bitümlerle hazırlanan karışımların yorulma ömür değerlerinin saf karışıma göre artış oranlarının, kireç içermeyen karışımların artış oranlarına göre yükseldiği belirlenmiştir (MB_{%4,0SBS} ile hazırlanan karışımlarda 4.96 kattan 5.96 kata arttığı gibi). Bu duruma bitüm katkı maddeleri ile filler olarak kireç kullanımının uyum göstermesinin neden olduğu düşünülmektedir. Bu sonuç, bitüm katkı maddelerinin karışımda filler olarak kireç kullanımı ile uyum sağlayacağını ve karışımların yorulma ömürlerini arttıracaklarını göstermektedir. Bunun yanında bitüm katkı

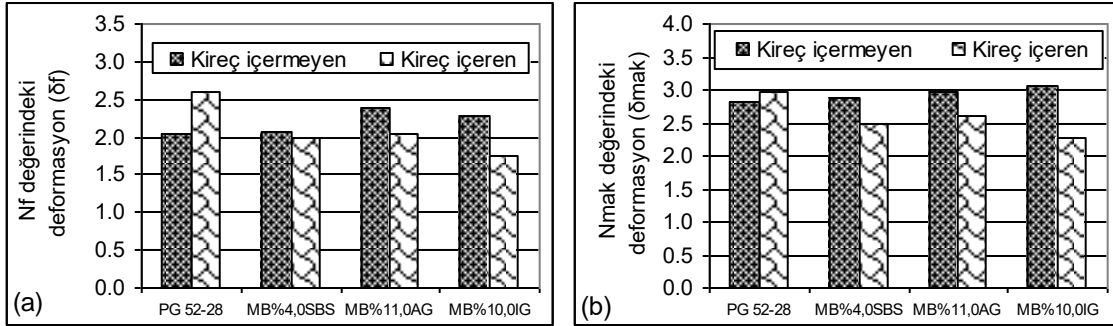
maddelerinin hepsinin yorulma ömrü bakımından filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğunu göstermektedir.

Karışımların maksimum yük tekrar sayıları (Şekil 10b), yorulma ömürleri ile benzer değişim göstermiştir. Hem filler olarak kireç kullanımı hem de bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımı ile maksimum yük tekrar sayıları artmıştır. Kireç kullanımı ile PG 52-28, MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların N_{mak} değerleri sırasıyla 1.74, 2.16, 1.93 ve 1.92 kat artmıştır. Yorulma ömrü değerlerinde olduğu gibi maksimum yük tekrar sayısı değerlerinde de kireç kullanımı en fazla MB_{%4.0SBS} modifiyeli bitüm ile hazırlanan

karışımlarda, en az PG 52-28 ile hazırlanan karışımlarda etkin olduğu tespit edilmiştir.

Yorulma ömrü değerlerinde olduğu gibi hem kireç içeren hem de kireç içermeyen karışımlarda maksimum yük tekrar sayısına en fazla MB_{%11.0AG} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile modifiye bitümlerin etkinlikleri artmıştır. N_{mak} değerleri açısından da bütün bitüm katkı maddelerinin filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğu belirlenmiştir.

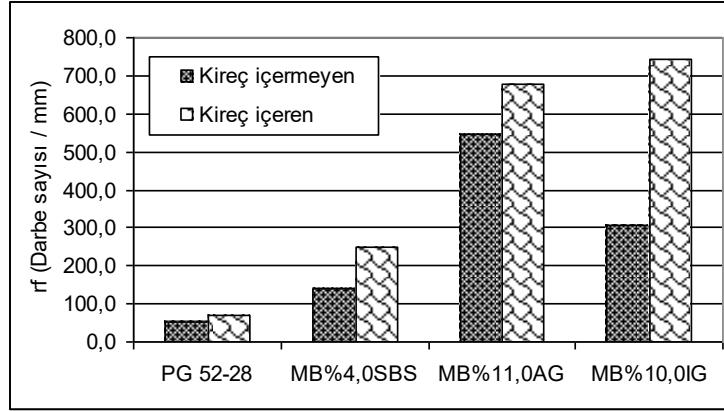
Yorulma ömrü (N_f) değerindeki deformasyon miktarlarının (δ_f) ve maksimum yük tekrar sayılarındaki deformasyon miktarlarının (δ_{mak}) ortalamasının katkı kullanımı ile değişimi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. N_f (a) ve N_{mak} (b) değerlerindeki deformasyon değerlerinin katkı türü ile değişimi

N_f yük tekrar sayılarındaki deformasyon değerleri incelendiğinde PG 52-28 ile hazırlanan karışım dışındaki diğer karışımlarda filler olarak kireç kullanımı ile deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 11a). Kireç içermeyen karışımlarda en yüksek δ_f değerine MB_{%11.0AG}, en düşük δ_f değerine ise PG 52-28 ile hazırlanan karışımın sahip olduğu belirlenmiştir. Kireç içeren karışımlarda ise en yüksek δ_f değerine PG 52-28 ile hazırlanan karışımın, en düşük değere ise MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımın sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kirecin karışımındaki bağlayıcının cinsine göre deformasyon değeri üzerinde farklı etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Maksimum yük tekrarı sayılarındaki deformasyon değerleri (δ_{mak}) incelendiğinde δ_f değerleri ile uyum sağlandığı belirlenmiştir. Sadece kireç içermeyen karışımlarda maksimum deformasyon değerlerine MB_{%11.0AG} ile hazırlanan karışımların yanında MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan kireç içermeyen karışımlarda en gevrek davranışı PG

52-28 ile hazırlanan saf karışımın göstereceği, kireç içeren karışımlarda ise MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların göstereceği tespit edilmiştir. Karışımların $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı değerlerinin (r_f) katkı kullanımı ile değişimi Şekil 12'te verilmiştir. Şekil 12'de görülen $N_f - N_{mak}$ arası çatlak ilerleme oranı (r_f) değerlerinin katkı kullanımı ile değişimi incelendiğinde katkı kullanımı ile r_f değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Kireç kullanımı ile çatlak ilerleme oranı değerleri sırasıyla 1.33, 1.78, 1.24 ve 2.41 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu durum çatlak ilerleme oranı açısından kirecin en fazla MB_{%10.0IG} ile uyum sağladığını göstermektedir. Kireç içermeyen karışımlarda MB_{%4.0SBS}, MB_{%11.0AG} ve MB_{%10.0IG} ile hazırlanan karışımların çatlak ilerleme oranı değerlerinin PG 52-28 ile hazırlanan karışımlara göre sırasıyla 2.70, 10.66 ve 5.99 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kireç içeren karışımlarda ise sırasıyla 3.61, 9.89 ve 10.83 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 12. Karışımların Nf – Nmak arası çatlak ilerleme oranları

Elde edilen sonuçlar, bitüm katkı maddelerinin filler olarak kireç kullanımına göre daha etkin olduğunu göstermektedir. Ayrıca doğal asfaltların SBS'e göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

İndirekt çekme yorulma deney sonuçlarından filler olarak kireç kullanımının ve bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının yorulma ömrünü arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca filler olarak kireç kullanımının ve bitüm modifikasyonunda SBS, AG ve IG kullanımının yorulma ömrünü daha da arttırdığı, katkıların birbiri ile uyum sağladığı tespit edilmiştir. Bitüm katkı maddelerinin hidrate kirece göre daha etkin olduğu tespit edilmiştir. Yorulma ömrü açısından kireç kullanımının en fazla SBS modifiyeli bitümlerle hazırlanan karışımlar üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. En yüksek yorulma ömrü değerlerine hem kireç kullanılan hem de kireç kullanılmayan numunelerde MB_{11,0AG} ile hazırlanan karışımların sahip olduğu tespit edilmiştir. Deformasyon değerleri dikkate alındığında PG 52-28 ile hazırlanan karışım dışında diğer karışımlarda kireç kullanımı ile deformasyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Çatlak ilerleme oranı değerleri incelendiğinde hem kirecin hem de bitüm katkı maddelerinin karışımların çatlak ilerleyişine karşı dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. Doğal asfalt kullanımının SBS'ye göre çatlak ilerleyişine karşı dayanımı daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir.

Hidrate kireç; mineral filler olarak görev yaparak bitümlü bağlayıcı ve karışımın rijitliğini

arttırmakta, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı dayanımı arttırmakta, bitümlü bağlayıcı ve karışımın yaşlanmasını geciktirmekte ve karışımdaki killerin özelliklerini iyileştirerek nem hasarına karşı dayanımı ve durabiliteyi iyileştirmektedir [23]. Elde edilen sonuçlar literatürü destekler nitelikte olup bütün deney sonuçlarından yorulma ömrü açısından Amerika Gilsoniti'nin diğer bitüm katkılarına göre daha etkin olduğu, bitüm katkıları ile birlikte filler olarak hidrate kireç kullanılması ile yorulma ömrü açısından daha fazla fayda sağlanacağı söylenebilmektedir.

5. Teşekkür

MF.13.12 numaralı proje ile çalışmamızı destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (FÜBAP) teşekkürü bir borç biliriz.

6. Kaynaklar

1. Francken, L. (1998). Bituminous Binders and Mixes. Rilem Reports. 352 p.
2. Tang, N., Huang, W., Zheng, M., Hu, J. (2016). Investigation of Gilsonite-, polyphosphoric acid- and styrene-butadiene-styrene-modified asphalt binder using the multiple stress creep and recovery test. *Road Mater. Pavement*, DOI: 10.1080/14680629.2016.1206954.
3. Sengoz, B., Isikyakar, G. (2008). Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. *J. Hazard. Mater.* **150**: 424–432.
4. Isacsson, U., Lu, X. (1995). Testing and appraisal of polymer modified road bitumens: State of the art. *Mater. Struct.* **28**: 139–159.

5. Şengöz, B., Işıkyakar, G. (2008). Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen. *Constr. Build. Mater.* **22** (9): 1897-1905.
6. Cavaliere, M.G., Diani, E., Dia, M.D. (1996). Dynamic mechanical characterization of binder and asphalt concrete. In: Proceedings of *Euroasphalt and Eurobitume Congress*, (7-10 May), Strasbourg.
7. Yılmaz, M., Çeloğlu, M.E. (2013). Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures. *Constr. Build. Mater.* **44**: 533-540.
8. Sonmez, I., Deniz, M.T., Tayfur, S., Ozen, H., Yildirim, S.A., Eren B.K. (2005). Effects of modifiers on the hot mix asphalt performance. 6th Transportation Congress, (23-25 May), Istanbul, 334-348.
9. Topal, A., Yılmaz, M., Kök, B.V., Kuloglu, N., Sengoz, B. (2011). Evaluation of rheological and image properties of styrene-butadiene-styrene and ethylene-vinyl acetate polymer modified bitumens. *J. Appl. Poly. Sci.* **122**: 3122-3132.
10. Gorkem, C., Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Constr. Build. Mater.* **23**: 2227-2236.
11. Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., Anderson, R.M. (2001). Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design (No. Project 9-10 FY'96), *NCHRP*, Washington.
12. Brown, S.F., Rowlett, R.D., Boucher, J.L. (1990). Asphalt modification. Proceedings of the conference The United States strategic highway research program. London: Institute of Civil Engineers, 181-203.
13. Ameri, M., Mansourian, A., Ashani, S.S., Yadollahi, G. (2011). Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction. *Constr. Build. Mater.* **25**: 1379-1387.
14. Bardesi, A., Brule, B., Corte, J. F., Diani, E., Gerritsen, A., Lefevre, G., Watkins, S. (1999). Use of modified bituminous binders, special bitumens and bitumens with additives in pavement applications. Technical Committee Flexible Roads (C8) World Road Association (PIARC), Paris, France.
15. Anderson, D.A., Maurer, D., Ramirez, T., Christensen, D.W., Marasteanu, M.O., Mehta, Y. (1999). Field performance of modified asphalt binders evaluated with superpave test methods: 1-80 test project. *Transp. Res. Rec.* **1661**: 60-68.
16. Aflaki, S., Tabatabaee, N. (2009). Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. *Constr. Build. Mater.* **23**: 2141-2150.
17. Little, D.N., Petersen, J.C. (2005). Unique effects of hydrated lime filler on the performance-related properties of asphalt cements: physical and chemical interactions revisited. *J. Mater. Civil Eng.* **17**: 207-218.
18. Moullet, V., Séjourné, D., Delmotte, V., Ritter, H.J., Lesueur, D. (2014). Method of quantification of hydrated lime in asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* **68**: 348-354.
19. Kök, B.V., Yılmaz, M. (2009). The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *Constr. Build. Mater.* **23**: 1999-2006.
20. Yılmaz, M., Yalçın E. (2016). The effects of using different bitumen modifiers and hydrated lime together on the properties of hot mix asphalts. *Road Mater. Pavement*, **17**(2): 499-511.
21. Subagio, B.S., Siswosoebrotho, B.I., Karsaman, R.H. (2003). Development of laboratory performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in hot rolled asphalt mix. *Proc. East. Asia Soc. Transportation Stud.*, **4**: 436-449.
22. Aragao, F.T.S., Lee J., Kim, Y.R., Karki, P. (2010). Material specific effects of hydrated lime on the properties and performance behaviour of asphalt mixtures and asphaltic pavements. *Constr. Build. Mater.* **24**(4): 538-544.
23. Little, D.N., Epps, J.A. (2001). The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. *National Lime Association*, p. 54.