

Polimer Katkılı Bitümlü Sıcak Karışımların İzmir Hava Durumu Şartlarındaki Marshall Stabilite Performansının İncelenmesi

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH¹, Perviz AHMEDZADE², Taylan GÜNAY³

¹ Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.

¹ Araştırma ve Geliştirme Merkezi, İstanbul Teknik İnaat Sanayi ve Ticaret A.S., 34235, İstanbul, Turkey

^{2,3} Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.

¹ Sorumlu Yazare-posta:

¹ sajjad.hassanpour.kasanagh@mail.ege.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9484-4324>

² Perviz.ahmedzade@ege.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8348-5901>

³ taylan.gunay@ege.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-6320>

Geliş Tarihi: 01.05.2021

Kabul Tarihi: 25.09.2021

Öz

Çalışmada, İzmir ili hava şartları dikkate alınarak, Superpave şartnamesine göre, bitümlü sıcak karışımlar (BSK) için uygun bağlayıcı seçim yöntemi incelenmiştir. Bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfını (PG) arttırmak amacıyla stiren-butadien-stiren (SBS) ve etilen-vinil-asetat (EVA) olmak üzere iki farklı elastomer ve plastomer kopolimerleri katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. BSK'nın ana bileşenleri olan orijinal ve polimer katkıli bağlayıcılar ile Superpave gradasyonlu agrega üzerinde çeşitli deneyler uygulanması suretiyle, bitüm ve BSK malzemelerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Marshall karışım numuneleri hazırlanarak orijinal bağlayıcının karışımındaki optimum içeriği belirlenmiş ve ardından polimer katkıli karışımlar hazırlanarak Marshall stabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı polimer katkıli BSK'ların İzmir ilinin iklim şartlarındaki performansının incelenmesidir. İki polimerin de deney sonuçları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde SBS katkıli karışımların İzmir ili yollarında kullanmaya daha uygun olabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler

Bitüm; Agrega;
Polimer; Bitümlü Sıcak
Karışım; Marshall;
Stabilite

Investigation of Marshall Stability Performance of Polymer Modified Hot Mix Asphalt Under İzmir Weather Conditions

Abstract

In this study, the determination of binder based on Superpave method considering the weather condition of state of İzmir were investigated. In order to enhance high temperature performance grade (PG) of the binder, two different copolymer namely styrene-butadiene-styrene (SBS) elastomer and ethylene vinyl acetate (EVA) plastomer were employed. The physical properties of the original and polymer modified asphalt binders and Superpave-graded aggregates, which are the main components of hot mix asphalt (HMA), were determined by means of multiple experiments. The optimum content of the original binder was determined by Marshall stability test. The comparison between the results that belong to two different polymer modified binders, it can be said that the mixtures with SBS additives is more suitable for using in flexible pavement roads of İzmir province.

Keywords

Bitumen, Aggregate;
Polymer; Hot Mix
Asphalt; Marshall;
Stability

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK), bağlayıcı ve mineral agregadan oluşan asfalt kaplama malzemesidir. Asfalt çimentosu veya modifiye asfalt çimentosunda rol alan bitüm, agrega taneciklerini kohezif bir kütleyle dönüştürmek için bir bağlayıcı madde görevi yapmaktadır. Bunun yanı sıra bitümün su

geçirmezliği aynı zamanda BSK'ları da suya karşı dirençli hale getirmektedir (Ameri *et al.* 2016, Behnood 2020). Mineral agrega asfalt bağlayıcıyla birleştiğinde, sisteme güç ve dayanıklılık kazandırarak bir taş iskeleti oluşturur. Karışımın davranışı, bileşenlerin (asfalt bağlayıcı ve mineral agrega) birebir özelliklerinden ve sistemde

birbirleriyle nasıl etkileşim gösterdiklerinden etkilenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ve ağır trafik seviyelerinde, kaplama yapısının performansını ve ekonomisini etkileyen çeşitli bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Yorulma çatlakları, tekerlek izi, nem hasarı ve termal çatlakları gibi bozulmalar esnek kaplamalarda meydana gelen en önemli sorunlardır. Bu sorunlar çoğu zaman yapı malzemesi kalitesi, yetersiz bakım ve yanlış tasarım nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

Asfalt bağlayıcının modifikasyonu, kaplama performansını iyileştirmek için alınan bir yaklaşımdır. Günümüzde, polimerlerin eklenmesi bağlayıcı modifikasyonun en yaygın yöntemlerinden biridir. Polimer modifiyeli BSK'lar tekerlek izini azaltmada ve yorulma ve termal çatlak direncini arttırmada etkisini önemli ölçüde göstermiştir (Almusawi *et al.* 2020, Köfteci *et al.* 2020, Sadeghian *et al.* 2019).

Bağlayıcının modifikasyonunda elastomerler ve plastomerler olmak üzere iki ana polimer sınıfı kullanılmaktadır. Elastomerler, adından da anlaşılacağı gibi, asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıklarda elastikiyetini, yüksek sıcaklıklarda stabilitesini artırma ve düşük sıcaklıkta asfalt betonunun kopma gerilimini artırma eğilimindedir. Asfalt bağlayıcıyı modifiye etmek için kullanılan tipik elastomerik polimerler arasında stiren-butadien-stiren (SBS), stiren-izopren-stiren (SIS) ve lastik tozu (GTR) gibi polimerler ve kopolimerler yer almaktadır (Airey 2003, Behnood and Olek 2017, Galooyak *et al.* 2010, Polacco *et al.* 2006, Vargas *et al.* 2005). Plastomerler ise sertliği ve stabilitesi artırmakta ancak karışımın esnekliğinde sınırlı şekilde artış sağlamaktadır. Plastomer, erime sıcaklıklarında plastik veya viskoz bir şekilde deforme olan ve düşük sıcaklıklarda sertleşen bir polimer grubudur. Başka bir ifadeyle, Plastomerler bitümün viskozitesini ve sertliğini arttırmaktadır. Etilen-vinil-asetat (EVA), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi polimerler bağlayıcı modifikasyonunda kullanılan en yaygın plastomerdir ve polimer modifiyeli BSK uygulamalı asfalt kaplamaları geleneksel karışımlara göre daha sert hale getirerek etkilemektedir (Ahmedzade *et al.* 2014, Ahmedzade *et al.* 2017, Sengoz *et al.* 2009, Zhu *et al.* 2014).

Günümüzde Türkiye'de de asfalt kaplamalarda polimer ile modifiye edilmiş bağlayıcılar kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, asfalt kaplamanın sıcaklık değişikliklerine göre bahsi geçen bozulmalara maruz kalmasını önlemek için Superpave yöntemiyle belirlenen yüksek sıcaklık performans sınıfları (PG) aracılığıyla bağlayıcı seçilmektedir. Bu yöntemde, farklı bölgelerde değişik iklim koşulları ve hava durumuna göre bağlayıcı seçimi gerçekleştirilmektedir. Diğer yandan, orijinal bağlayıcıların PG sınıfı kullanacağı bölgenin şartlarında Superpave yöntemine göre seçilirse bile yüksek sıcaklıklarda karışımın stabilitesi ve kalıcı deformasyona karşı direnci yeterli olmayabilir.

Mevcut araştırmada, karışımda kullanılan bağlayıcının PG sınıfı seçimi İzmir ilinin son 20 yıldaki hava durumuna göre Superpave yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve seçilen orijinal bağlayıcı sınıfı Marshall deneyiyle BSK'daki optimum içeriği bulunmuştur. Bunun ardından, orijinal bağlayıcının asfalt kaplamanın bozulmalara karşı performansını arttırmak amacıyla SBS ve EVA kopolimerleri kullanmıştır. Böylece bağlayıcının PG sınıfı iki sınıf daha üst seviyeye taşınmıştır. Dolayısıyla araştırmanın hedefi, İzmir hava durumu şartlarında uygun bağlayıcı seçimi ve seçilen bağlayıcının BSK içerisindeki etkisini artırma amacıyla asfalt kaplamanın stabilitesini arttırması ve bu şekilde yüksek sıcaklıklardaki bozulmaları önlemiş olmasıdır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Bitüm ve Katkı Malzemesi

Çalışmada Türkiye'nin TÜPRAŞ A.Ş. rafinerisinden elde edilen 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. LCY grubu tarafından üretilen Globalprene 3501 markalı stiren-butadien-stiren (SBS), doğrusal ve blok yapıya sahip co-polimerdir. Yüksek dayanıklılık sağlamasından dolayı asfalt karışımlarında bitümde modifiyer olarak kullanılmıştır. Beyaz renkli ve granül şeklinde olan katkının kimyasal bileşimi stiren-butadien-stiren, birim hacim ağırlığı 0,20 – 0,45 g/cm³'tür. ASTM D792 standardına göre özgül

ağırlığı 0,94'tür. Çalışmada referans olarak seçilen SBS katkısının görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Stiren-butadien-stiren (SBS) katkısı

Bitüm modifikasyonunda kullanılan diğer polimer katkısı ise DuPont firması tarafından üretilen Elvax®420, ağırlıkça %18 vinil asetat komonomer içeriğine sahip bir etilen-vinil-asetat (EVA) kopolimerdir. Şeffaf renkli ve granül şeklinde olan katkının yumuşama noktası 53 °C'dir. ISO 1183 standardına göre özgül ağırlığı 0,94'tür. Çalışmada referans olarak seçilen EVA katkısının görünümü Şekil 2'de verilmiştir.

2.2 Agregada Malzemesi

Çalışmada, optimum bitüm yüzdesini belirlemek için Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. Çizelge 1'de verilen agregada gradasyonu için, B50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitümlerin her biri için üçer Marshall numunesi hazırlanmıştır. Her karışım numunesi için agregada miktarı 1200 gr olarak hazırlanmış ve bitüm ağırlıkça 5 farklı yüzde de agregada eklenmiştir.

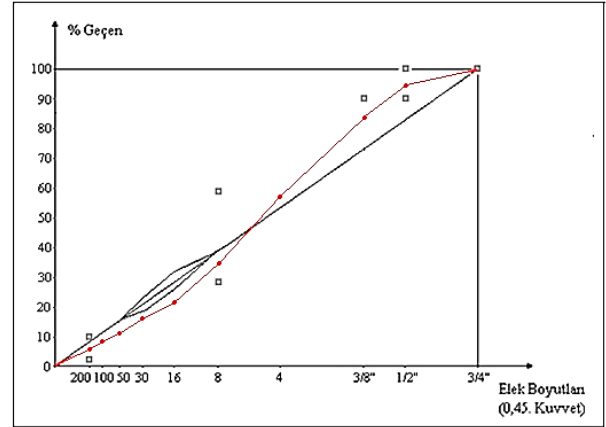
Dere Beton A.Ş.'den temin edilen kalker türü agregada Marshall numunelerinin hazırlanması için kullanılmıştır. Agregada gradasyonu limiti grafiği Şekil 3'te verilmiştir (Mohammad *et al.* 2006).



Şekil 2. Etilen vinil asetat (EVA) katkısı

Çizelge 1. Kullanılan agregada ait Superpave gradasyonu

Elek No	Elekten Geçen, (%)	Elekte Kalan, (%)	Elekte Kalan, (gr)	Toplam Elekte Kalan, (gr)
19 mm (3/4")	100	0	0	0
12,5 mm (1/2")	94	6	72	72
9,5 mm (3/8")	84	16	120	192
No: 4	58	42	312	504
No: 8	35	65	276	780
No: 16	22	78	156	936
No: 30	16	84	72	1008
No: 50	12	88	48	1056
No: 100	8	92	48	1104
No: 200	5	95	36	1140
Filler	-	-	60	1200



Şekil 3. Kullanılan agregada gradasyonu limiti grafiği

2.3 Marshall stabilite deneyi

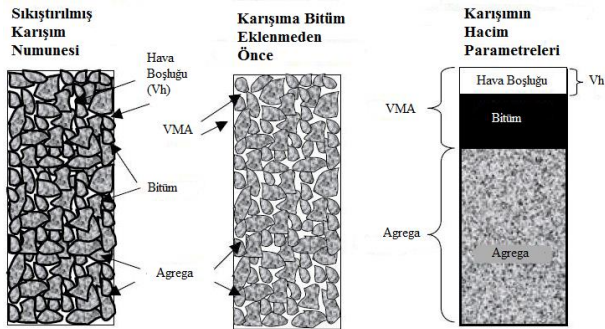
Elek analizi yapıldıktan sonra farklı boyutlara sahip agregada gradasyonu göre tartılarak metal bir plakaya yerleştirilmiştir. Daha sonra 24 saat boyunca 160 °C'ye ulaşacak şekilde etüv de bekletilmiştir. Bunun ardından akacak şekilde ısıtılan bitüm agregada ağırlıkça %3,5; %4; %4,5; %5; %5,5 olarak ilave edilmiştir. Bir sonraki aşamada, numunelerin sıcaklığı fazla düşmeyecek şekilde mikserde birer dakika karıştırılmıştır.

Karışım daha sonra yaklaşık 145-150 °C'de önceden ısıtılmış kalıplara yerleştirilmiştir. Yağlı filtre kağıtları kalıbın altına ve üstüne konulmuş ve Marshall sıkıştırma tokmağı 457,2 mm yükseklikten ve 4,5 kg'lık bir çekiç kullanılarak numunenin üst ve alt yüzeylerine standarda göre (trafik seviyesine göre) 75 darbe uygulanmıştır. Kalıplardaki karışım numuneleri yaklaşık 24 saat bekletilmiş ve daha sonra kalıptan çıkarma aletine yerleştirerek çıkarılmıştır. Daha sonra numunelerin yükseklikleri bir kumpas kullanılarak 3'er taraftan ölçülmüş ve ortalaması numunenin yüksekliği olarak kaydedilmiştir.

Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları alınan numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için numune 60 ± 1 °C suda 30–40 dakika bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numune elektronik Marshall yükleme aletine yerleştirilmiş, akma çubuğu sabitlenmiş ve yükleme uygulanmıştır (Şekil 4). Marshall stabilitesi ve akışı, ASTM D1559-89’da anlatılan prosedüre uygun olarak her numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. 30-40 dakikalık bir süre boyunca 60 ± 1 °C’lik bir su banyosunda bekletildikten sonra dakikada 50,8 mm’lik bir yükleme hızı ile kırıldığında sıkıştırılmış numune üzerindeki maksimum yük (Marshall stabilitesi) ve akış hızı belirlenmiştir. Örnek bir karışımın içeriğini temsil eden Marshall numunesi Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 4. Marshall stabilite aleti



Şekil 5. Örnek bir karışım içeriğini temsil eden Marshall numunesi

Yüklemeye, en yüksek yük değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. En yüksek yük değeri ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranından okunarak kaydedilir. Marshall stabilite deneyinde standart numune yüksekliği 63,5 mm’dir. Bu değerden farklı yükseklikte olan numunelerin stabilite değerleri düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilir. Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin düzeltilmiş stabilite değerleri arasındaki farkın 120

kgf’den az olması durumunda üçünün ortalaması Marshall stabilitesi olarak alınır. Eğer fark bu değerden büyük ise, aralarında 60 kgf’den daha az fark olan iki değer ortalaması Marshall stabilitesi olarak belirlenir. Bu da sağlanmadığı takdirde deneyin yeniden uygulanması gerekmektedir (ASTM D1559 1989).

3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

3.1 Orijinal Bitümün Superpave Yöntemiyle Performans Sınıfı (PG) Seçimi

Çalışmada, BSK’da kullanılacak bitümün performans sınıfı (PG) İzmir il bölgesinin hava durumuna göre seçilmiştir. İzmir Meteoroloji İl Müdürlüğü’nden temin edilen son 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük hava sıcaklığının ortalaması ve toplam 20 yıldaki elde edilen hava sıcaklığının ortalaması 38°C ve her yılın en düşük bir günlük hava sıcaklık değerlerinin ortalaması -4°C olarak belirlenmiş ve çalışmada esas alınmıştır. Ayrıca, İzmir’in enlem derecesi 38°41 olarak kullanılmıştır.

Superpave yöntemine göre, kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki kaplama yüksek dizayn sıcaklığı (T_{20mm}) Denklem (1) ve kaplama yüzeyi düşük dizayn sıcaklığı (T_{min}) Denklem (2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$T_{20mm} = (T_{havamax} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 \quad (1)$$

$$T_{min} = 0,859T_{havamin} + 1,17 \text{ °C} = 0,859 \times (-4) + 1,17 = -2,27 \text{ °C} \quad (2)$$

Buna göre, son 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (140 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (20 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması hesaplanmıştır (Geçkil 2008). Superpave SHRP yöntemine göre hesaplanan yüksek (T_{20mm}) ve düşük (T_{min}) hava sıcaklıklarının değeri ve standart sapması Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan agregaya ait Superpave gradasyonu

Özellikler	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	58,46	-2,27
Standart Sapma (°C)	2	2

Bunun yanı sıra yukarıda Superpave yöntemiyle %50 güvenilirlik derecesinde hesaplanmış kaplama dizayn performans belirlenmesindeki sıcaklıkların %98 güvenilirlik değerleri sapma değerleri Denklem (3) ve Denklem (4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$T_{20mm\%98} = T_{20mm\%50} + 2S_{maks} = 58,46 + 2 \times 2 = 62,46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(3)

$$T_{\min\%98} = T_{\min\%50} + 2S_{\min} = -2,27 + 2(-2) = -6,27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(4)

Superpave şartnamesine belirtildiği üzere bağlayıcı seçimindeki sıcaklık %98 güvenilirliği sağladığında bir üst sınıf sıcaklık grubu olan PG 64-12 veya PG 64-18 olarak seçilmiştir. Ancak mevcut çalışmada Marshall stabilite deneyi esas alındığından, bitüm ve karışımın yüksek sıcaklık performansı dikkate alınarak bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık PG sınıfı dikkate alınmıştır.

3.2 Bağlayıcı Üzerinde Uygulanan Fiziksel ve Reolojik Deneyler

Çalışmada İzmir ilinin iklim koşulları esas alınarak yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 64 olan bitüm orijinal bağlayıcı malzeme olarak BSK numunelerinde kullanılmıştır. Bunun yanı sıra asfalt kaplamalarda tekerlek izi ve yorulma gibi bozulmaların oluşmasını önlemek ve BSK'ların stabilitesini artırma amacıyla bağlayıcı modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan SBS ve EVA polimer katkıları optimum miktarlarda bağlayıcı modifikasyonunda kullanılarak sırasıyla SBS-PG76 ve EVA-PG76 deneylere tabi tutulmuştur. Böylece polimer katkılı BSK'ların karşılaştırmalı şekilde orijinal BSK üzerinde etkisi incelenmiştir.

BSK'lara önemli ölçüde etkisi olduğundan hem orijinal ve hem polimer modifiyeli bağlayıcıların üzerinde farklı fiziksel ve reolojik deneyler gerçekleştirilerek şartnamelerinin kriterleri göz önünde bulundurularak Çizelge 3'te listelenmiştir (Hassanpour Kasanagh 2020).

Çizelge 3. Orijinal ve polimer modifiyeli bağlayıcılara uygulanan deneyler ve sonuçları

Özellikler	Standart	B-PG64	SBS-PG76	EVA-PG76	Limit
Penetrasyon (dmm)	ASTM D5	52	38	32	-
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36	43	63	56	-
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	-3,03	-1,6	-0,78	-2<PI<+2
Vizkozite, 135 °C (cP)	ASTM D4402	398	1149	875	Maks. 3000
Vizkozite, 165 °C (cP)	ASTM D4402	112	338	237	-
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	-	153-158	178-184	168-174	-
Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	-	141-146	166-171	157-162	-
G*/sinδ, 64 °C (kPa)	AASHTO T315	1,40	4,18	4,74	Min. 1,0
G*/sinδ, 70 °C (kPa)	AASHTO T315	0,76	2,14	2,01	Min. 1,0
G*/sinδ, 76 °C (kPa)	AASHTO T315	-	1,19	1,09	Min. 1,0
RTFO deneyiyle kısa süre yaşlandırılma sonrası					
Kütle Kaybı (%)	ASTM D2872	0,46	0,34	0,40	Maks. 1,0
Penetrasyon (dmm)	ASTM D5	45	28	21	-
Kalıcı Penetrasyon (%)	-	86	76	66	Min. 50
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36	46	52	57	-
Yum. Noktasındaki Artış (°C)	-	3	1	1	Maks. 12
G*/sinδ, 64 °C (kPa)	AASHTO T315	4,07	11,31	12,38	Min. 2,2
G*/sinδ, 70 °C (kPa)	AASHTO T315	1,78	5,30	5,98	Min. 2,2
G*/sinδ, 76 °C (kPa)	AASHTO T315	-	2,53	3,68	Min. 2,2

3.3 Agrega Üzerinde Uygulanan Fiziksel Deneyler

Çalışmada, İzmir bölgesi için 20 yıllık trafik dizayn sayısı tahmini 15 milyon eşdeğer standart dingil yükü (ESAL) tekerrür sayısı olarak seçilmiş ve trafiğin standart hızda (>70 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Kalker (kireçtaşı) türü agreganın maksimum tane boyutu 19 mm ve nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave

agrega gradasyonu kullanılmıştır. BSK'larda kaba agrega oranı %16, ince agrega oranı %79, filler oranı ise %5'dir. Sonuç olarak, BSK'larda kullanılan kalker agregasının üzerinde aşınma kaybı (Los Angeles), yassılık endeksi, su emme ve özgül ağırlıkları deneyleri gerçekleştirilmiş ve değerleri Çizelge 4'te listelenmiştir.

Çizelge 4. Kullanılan agregaya ait Superpave gradasyonu

Özellikler	Standart	Mineral Agregası		
		Kaba	İnce	Filler
Aşınma kaybı, (%)	ASTM C131	26,5	-	-
Yassılık endeksi (%)	AASTM D4791	20,15	-	-
Su emme oranı	ASTM C127	0,23	-	-
Hacim Özgül Ağırlığı	ASTM C127	2,630	2,650	-
Zahiri Özgül Ağırlığı	ASTM C127	2,640	2,660	2,700

4. Marshall Stabilite Deney Sonuçları ve Tartışma

Yüksek sıcaklık performans sınıfı PG64 olan orijinal bağlayıcı toplam agregası ağırlığının %3,5, %4, %4,5, %5,0 ve %5,5 oranı olarak seçilmiş ve her bir yüzde için üçer karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymuş kuru yüzey ağırlıkları ilgili formüllerde kullanılarak BSK numunelerinin hacim özgül ağırlıkları (Dp), boşluk oranları (Vh), kuru agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve ADB (asfalt dolu boşluk oranı, Vf) belirlenmiştir. Bu işlemin ardından numuneler Marshall stabilite cihazı ile kırılarak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerlerin kullanılmasıyla stabilite, Dp, Vh, VMA, Vf ve akma - % bitüm grafikleri çizilmiştir.

Çizelge 5, PG64 bağlayıcı ile hazırlanmış olan karışım numunelerin sonuçlarını, Şekil 6-11 ise aynı bağlayıcıdan elde edilen Marshall numunelerin optimum bitüm içerikleri tayininde kullanılan grafiklerini sunmaktadır.

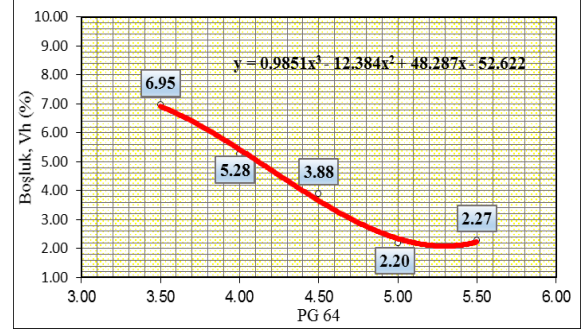
Çizelge 5. Marshall deney sonuçları

PG64 (%)	V _h (%)	VMA (%)	V _f (%)	D _p (g/cm ³)	Akma (mm)	Stabilite (kgf)
3,5	6,95	14,50	52,1	2,339	2,22	1125
4	5,28	13,98	62,2	2,364	2,38	1171
4,5	3,88	13,72	71,7	2,383	2,62	1232
5	2,20	13,21	83,4	2,408	2,81	1247
5,5	2,27	14,25	84,1	2,391	3,06	1199

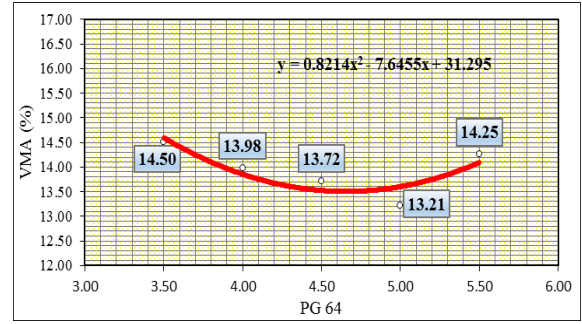
Şekil 6'da, karışımdaki hava boşluklarının yüzdesi bitüm içeriğinin artışıyla azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, bitüm içeriğinin sabit bir hacim için arttığını, havanın dışarı çıkarıldığını ve böylece artan bitüm içeriği ile doğru ilişkili hava boşluğu yüzdesinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 7'de, mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) ilk olarak bitüm içeriğindeki artışla azalmakta, ardından minimum seviyeye ulaştıktan

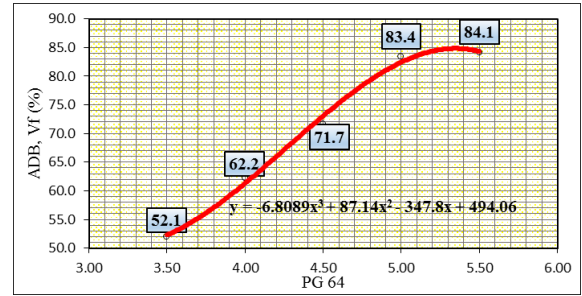
sonra yeniden artmaya başlamaktadır. Bu, sıkıştırılmış bir numunenin VMA yüzdesinin artan bitüm içeriği ile azalmasını, minimum seviyeye ulaşmasını ve ardından artması gerektiğini ifade etmektedir.



Şekil 6. PG64 bağlayıcı için hava boşluğu (Vh) – bitüm içeriği grafiği



Şekil 7. PG64 bağlayıcı için agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm içeriği grafiği



Şekil 8. PG64 bağlayıcı için asfalt dolu boşluk (Vf) – bitüm içeriği grafiği

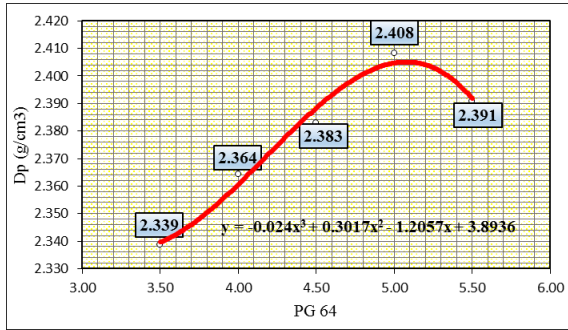
Şekil 8'de, asfalt dolu boşluk oranı artan bitüm içeriği ile artmaktadır. Bu, karışımlar için sıkıştırılmış numunelerin ADB yüzdesinin bitüm içeriğinde bir artışla arttığını ortaya çıkarmaktadır.

Şekil 9'da, hacim özgül ağırlık (Dp) genellikle artan asfalt içeriği ile artmış, maksimum seviyeye ulaşmış ve daha sonra azalmıştır. Bu, karışım için sıkıştırılmış numunelerin birim ağırlığının başlangıçta bitüm içeriğindeki artışla arttığını, maksimum değere ulaştığını ve daha sonra azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni, karışımdaki bitüm içeriği artarken

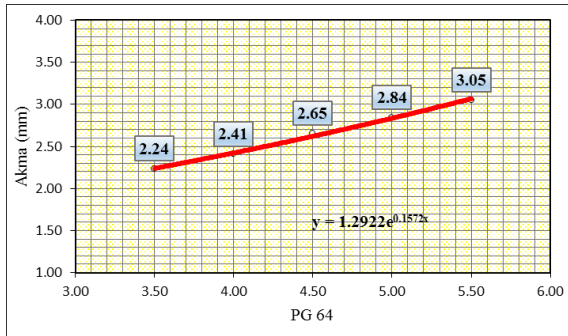
boşlukları doldurması dolayısıyla birim ağırlığını arttırmıştır.

Şekil 10'da, akış değeri bitüm içeriğindeki artışla artmaktadır, bu sonuç da akış değerinin karışımdaki sertliğin azalması nedeniyle bitüm içeriğindeki artışla arttığını meydana getirmektedir.

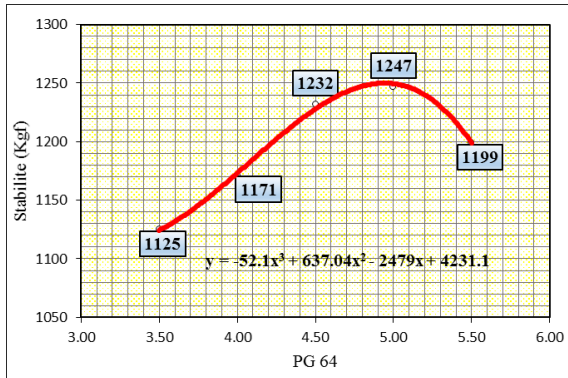
Şekil 11'de, artan bitüm içeriği ile stabilite artarak zirveye ulaşmış ve ardından azalmıştır. Bu, karışım için sıkıştırılmış numunelerin özgül ağırlığının başlangıçta bitüm içeriğindeki artışla arttığını, maksimum değere ulaştığını ve daha sonra azaldığı anlamına gelmektedir. Özgül ağırlığındaki artış ve düşüş eğilimleri numunenin stabilitesi ile doğru bağlantılıdır.



Şekil 9. PG64 bağlayıcı için hacim özgül ağırlığı (Dp)- bitüm içeriği grafiği



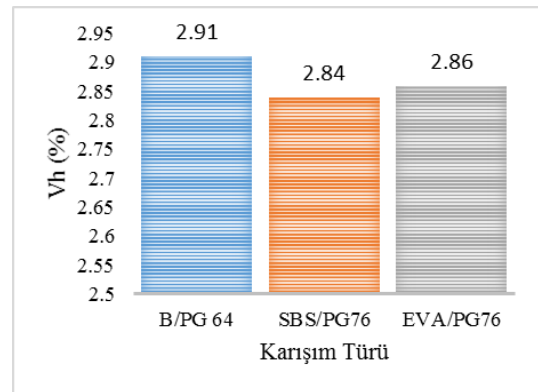
Şekil 10. PG64 bağlayıcı için akma değeri - bitüm içeriği grafiği



Şekil 11. PG64 bağlayıcı için stabilite - bitüm içeriği grafiği

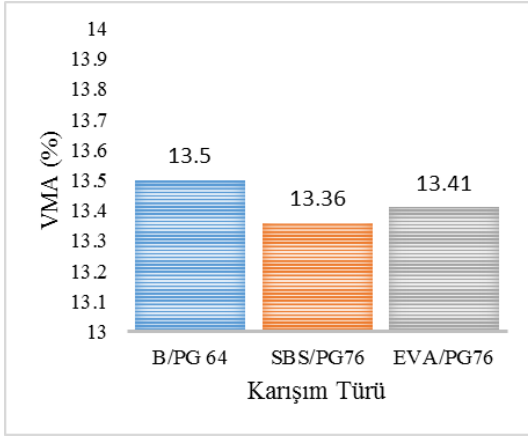
Orijinal PG64 bağlayıcıya sahip karışım numuneleri için gerekli özgül ağırlıkları, boşluk ve stabilite grafikleri çizilmesi ve ilgili analizlerin yapılmasının ardından, Dp - bitüm % ve stabilite - bitüm % grafiklerin maksimum olduğu bitüm içerikleri, hava boşluğu (Vh) - bitüm % grafiğinde boşluk oranının %4'e tekabül ettiği bitüm içerikleri, ADB - bitüm % grafiğinde asfalt dolu boşluk oranının %80'e tekabül ettiği bitüm içerikleri belirlenmiştir. Her dört grafikten elde edilen optimum bitüm değerinin aritmetik ortalaması alınarak, optimum bitüm içeriği bulunmuştur. Sonuç olarak, Orijinal PG64 bağlayıcının karışımdaki optimum bitüm içeriği %4,81 olarak bulunmuştur.

Yüksek sıcaklık performans sınıfı PG64 olan orijinal bağlayıcının karışım içerisindeki optimum yüzdesi hesaplandıktan sonra optimum içerikte kontrol amaçlı üçer karışım numunesi yapılmıştır. Bunun yanı sıra yaygın polimer katkılı bağlayıcıların karışım üzerinde etkisini incelenmesi amacıyla orijinal PG64 bağlayıcının optimum içeriği miktarında SBS/PG76 ve EVA/PG76 Marshall karışımları hazırlanmıştır. Polimer katkılı karışımlar orijinal karışımlarda olduğu gibi her karışım için üçer numune yapılmış ve tüm verilerin ortalaması Şekil 12-17'de sunulmuştur.



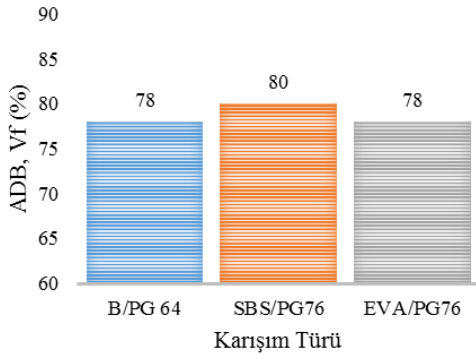
Şekil 12. Polimer katkılı karışımların hava boşluğu (Vh)

Elde edilen sonuç incelendiğinde, orijinal bağlayıcıya sahip (PG-64) karışımın hava boşluğu polimer katkılı karışımlara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Katkıların arasında kıyaslama yapıldığında, her iki bitümde en yüksek Vh değerine sahip olan katkı EVA ve en düşüğü ise SBS olmuştur (Şekil 12).

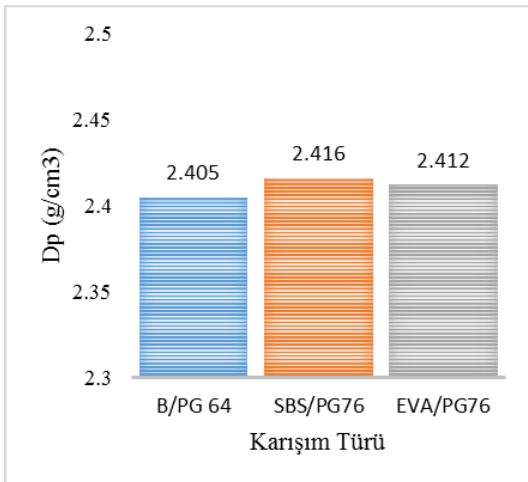


Şekil 13. Polimer katkılı karışımların agregalar arasındaki boşluğu (VMA)

Kuru agregalar arasında boşluk oranı her iki katkıda orijinal bağlayıcıya göre nispeten düşük değerler elde edilmiştir. Katkıların arasında en düşük değer SBS katkısına ve orijinal bağlayıcıya yakın olan en yüksek değer ise EVA katkısına ait olmuştur (Şekil 13).

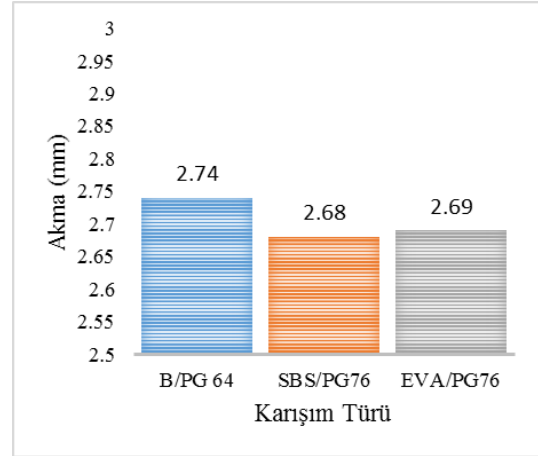


Şekil 14. Polimer katkılı karışımların asfalt dolu boşluğu (Vf)



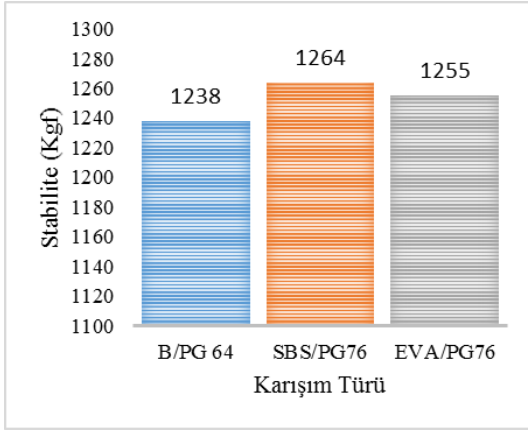
Şekil 15. Polimer katkılı karışımların özgül ağırlığı (Dp)

Orijinal ve EVA katkılı karışım numunelerin asfalt dolu boşluk oranı değerlerinin (Vf) aynı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, en yüksek değer SBS katkısında ortaya çıkmıştır (Şekil 14). SBS katkılı karışım numunesinin kuru agregalar arasındaki boşluk oranı düşük olmasına rağmen hava boşluğu da diğer katkıya türüne ait BSK'ya oranla daha düşüktür. Bu parametreler bir arada dikkate alındığında tüm numunelerin hacim özgül ağırlığı (Dp) değerleri sırasıyla SBS/PG76, EVA/PG76, B/PG64 olmuştur (Şekil 15).



Şekil 16. Polimer katkılı karışımların akma değeri

Katkıların akma değeri orijinal bağlayıcıya göre düşük olmasına rağmen sonuçlar arasında çok belirgin farklar bulunmamaktadır. Ancak, diğer parametrelerde de olduğu gibi en iyi sonucu SBS katkısına sahip BSK numuneleri vermektedir (Şekil 16). Akma değerinin düşük olması karışım numunesinin daha yüksek mertebede yüklemeye maruz kaldığının göstergesidir. Dp değerinin büyük olması ise bir numunenin bütünlüğünün korunduğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla, bir numunenin yüksek Dp değeri ve düşük akma değeri yüksek stabilite anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım neticesinde en yüksek stabilite değerinin numuneler arasında SBS katkılı karışıma ait olduğu görülmektedir. EVA katkılı karışımın ise orijinal bağlayıcıya sahip karışıma göre daha yüksek stabilite değerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Polimer katkılı karışımların stabilitesi

5. Sonuç

Çalışma kapsamında İzmir ilinin son 20 yıldaki hava durumu şartı göz önünde bulundurularak Superpave yöntemiyle BSK'larda kullanılacak uygun bağlayıcı türü seçilmiş ve bunun yanı sıra SBS ve EVA katkıları olmak üzere iki farklı polimer ile BSK numunesi hazırlanarak Marshall stabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Marshall deneyi verilerinin analizi aşağıdaki sonuçları ortaya koymaktadır.

- ✓ Superpave yöntemine göre İzmir iklimi şartları kapsamında BSK'larda kullanılan bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 64 olarak belirlenmiştir.
- ✓ Orijinal PG 64 bağlayıcı ve Superpave gradasyonlu agregalardan hazırlanmış bitümlü sıcak karışımın optimum bitüm içeriği %4,81 olarak belirlenmiştir.
- ✓ Orijinal karışımın hava boşluğu miktarının polimer katkılı karışımlardan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Katkıların arasında kıyaslama yapıldığında, en yüksek V_h değerine sahip olan karışımın EVA katkılı bağlayıcıya ait BSK numunesi olduğu, buna karşılık en düşük V_h değerine sahip karışımın ise SBS katkılı bağlayıcıyla hazırlanan BSK karışımı olduğu tespit edilmiştir.

- ✓ SBS katkılı karışım numunesinin kuru agregalar arasındaki boşluk oranının EVA katkılı ve orijinal bağlayıcıya sahip karışımlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Buna göre, numunelerin hacim özgül ağırlıklarının (D_p) değerleri sıra ile SBS/PG76, EVA/PG76, B/PG64 olarak büyükten küçüğe sıralanmaktadır.
- ✓ Karışımın yüksek D_p değeri ve düşük akma değeri yüksek stabilite değerini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşımı dikkate alarak en yüksek stabilite değerinin SBS katkılı karışıma ait olduğu, EVA katkılı karışımın ise orijinal bağlayıcıya göre daha yüksek stabilite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.
- ✓ TDV katkısının karışım içerisinde diğer katkılara kıyasen performansını daha detaylı incelemek amacıyla daha kapsamlı karışım esaslı deneylere ve standartlara tabi tutulması tavsiye edilmektedir.

6. Kaynaklar

- Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., and Grygoryeva, O., 2014. Modification of bitumen by electron beam irradiated recycled low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, **69**, 1–9.
- Ahmedzade, P., Günay, T., Grigoryeva, O., and Starostenko, O., 2017. Irradiated recycled high density polyethylene usage as a modifier for bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29(3)**, 4016233.
- Airey, G. D., 2003. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, **82(14)**, 1709–1719.
- Almusawi, A., Sengoz, B., and Topal, A., 2020. Evaluation of mechanical properties of different asphalt concrete types in relation with mixing and compaction temperatures. *Construction and Building Materials*, **228**, 121140.

- Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., and Mirabimoghaddam, M. H., 2016. A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, **106**, 243–252.
- ASTM D1559., 1989. Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. In *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, USA, 4.
- Behnood, A., 2020. A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties. *Journal of Cleaner Production*, **259**, 120817.
- Behnood, A., and Olek, J., 2017. Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, **151**, 464–478.
- Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E., and Moeini, A., 2010. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials*, **24(3)**, 300–307.
- Geçkil, T., 2008. *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 273.
- Hassanpour Kasanagh, S., 20020. Geri Dönüştürülmüş Polimer ve Atık Lastik Tozu Esaslı Termoplastik Dinamik Vulkanizat (TDV) Katkısının Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 217.
- Köfteci, S., Gunay, T., and Ahmedzade, P., 2020. Rheological Analysis of Modified Bitumen by PVC Based Various Recycled Plastics. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, **146(4)**, 4020063.
- Mohammad, L. N., Wu, Z., Obulareddy, S., Cooper, S., and Abadie, C., 2006. Permanent Deformation Analysis of Hot-Mix Asphalt Mixtures with Simple Performance Tests and 2002 Mechanistic–Empirical Pavement Design Software. *Transportation Research Record*, **1970(1)**, 133–142.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., and Zanzotto, L., 2006. Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **11(4)**, 230–245.
- Sadeghian, M., Namin, M. L., and Goli, H., 2019. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier. *Construction and Building Materials*, **226**, 818–826.
- Sengoz, B., Topal, A., and Isikyakar, G., 2009. Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, **23(5)**, 1986–1992.
- Vargas, M. A., Chavez, A. E., Herrera, R., and Manero, O., 2005. Asphalt modified by partially hydrogenated SBS tri-block copolymers. *Rubber Chemistry and Technology*, **78(4)**, 620–643.
- Zhu, J., Birgisson, B., and Kringos, N., 2014. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, **54**, 18–38.