

Polietilen ve kalsiyum karbonat bileşiği modifiyeli bitümlü bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığı ve depolama stabilitesinin incelenmesi

Investigation of temperature sensitivity and storage stability of polyethylene and calcium carbonate compound modified bituminous binders

Yunus ERKUŞ¹, Baha Vural KÖK^{2*}, Mehmet YILMAZ²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
yerkus@firat.edu.tr

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
bvural@firat.edu.tr, mehmetyilmaz@firat.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.11.2021
Kabul Tarihi/Accepted: 07.04.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 25.03.2022

doi: 10.5505/pajes.2022.48052
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, polietilen ve kalsiyum karbonat bileşiği (PEC) modifiyeli bitümün sıcaklık duyarlılığı ve depolama stabilitesi incelenmiştir. PEC bitüm ağırlığına %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. PEC modifiyeli bağlayıcıların özellikleri, %4 styrene-butadiene-styrene (SBS) modifiyeli bağlayıcı ile kıyaslanmıştır. Bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini belirlemek için penetrasyon, yumuşama noktası ve döneel viskozimetre deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcılara depolama sonrası yumuşama noktası ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca bağlayıcıların yaklaşık maliyetleri yardımıyla performans/maliyet ilişkisi belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre; %15 PEC içeren bağlayıcı düşük sıcaklık hassasiyeti ile ön plana çıkmıştır. PEC modifiyeli bağlayıcılarda %6'dan daha fazla katkı içeriğinde depolama sonrası önemli derecede faz ayrımı olduğu belirlenmiştir. Bağlayıcıların performans ve maliyetleri birlikte değerlendirildiğinde %6 PEC içeren bağlayıcının %4 SBS modifikasyonu ile sıcaklık hassasiyeti, depolama stabilitesi ve ekonomik bakımdan benzer performansa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Polietilen ve kalsiyum karbonat bileşiği, bitüm, depolama stabilitesi, sıcaklık duyarlılığı, SBS.

Abstract

In this study, temperature sensitivity and storage stability of polyethylene and calcium carbonate compound (PEC) modified bitumen were investigated. PEC was used at the rates of 3%, 6%, 9%, 12% and 15% by weight of bitumen. The characteristics of PEC added binders were confronted with 4% styrene-butadiene-styrene (SBS) added binder. Penetration, rotational viscometer and softening point experiments were applied to determine the temperature sensitivity of the binders. After the storage process, dynamic shear rheometry and softening point experiments were applied to the binders. Moreover, their performance/cost relations were determined with the help of the approximate costs of the binders. According to the test results; The binder containing 15% PEC stands out with its low temperature sensitivity. It has been appeared that there was an important phase separation after storage with an additive content of more than 6% in PEC modified binders. When the performance and costs of the binders are evaluated together, it has been determined that the binder containing 6% PEC has similar performance with 4% SBS modification in terms of temperature sensitivity, storage stability and economy.

Keywords: Polyethylene and calcium carbonate compound, Bitumen, Storage stability, Temperature sensitivity, SBS.

1 Giriş

Karayollarında asfalt kaplamalar dayanıklılığı, esnekliği ve sürüş konforu bakımından sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Fakat devamlı artan taşıt trafiği, dingil yükleri ve çevresel faktörlerden dolayı asfalt kaplamalarda kullanılan bitümün, çeşitli katkılarla modifiye edilmesi gerekir. Bu sebeple bitüm ve bitümlü karışımlarda stiren-butadien-stiren (SBS), öğütülmüş araç lastiği, parafin, doğal asfalt ve grafit gibi katkı maddeleri kullanılmaktadır [2]-[7]. SBS, saf bitüm ve asfalt karışımların performansını geliştirmek için sık kullanılan katkı malzemelerinden biridir. SBS, polistiren (PS) ve polibütadien (PB) oluşan bir blok kopolimeridir. Stiren dağınık fazdır ve malzemenin mukavemetini sağlar. Bütadien ise sürekli fazdır ve SBS'nin esnekliğine katkıda bulunur. PS'nin sert bloğunun ve PB'nin yumuşak bloğunun camı geçiş sıcaklığı sırasıyla yaklaşık +100 °C ve -90 °C'dir. SBS, bu sıcaklık aralığında düz bir modüle sahiptir, bu nedenle geniş bir sıcaklık aralığında bitümün sıcaklığa duyarlılığını azaltabilir. Fakat SBS bitümün

içerisinde fiziksel olarak karıştığından dolayı, yüksek depolama sıcaklıklarında bitümden ayrılma eğilimindedir. Ayrıca, SBS'de doymamış bağlar bulunduğu için, ısıya, UV ışığa ve oksijene maruz kaldığında bozulmaya uğrar [8]. Bunun yanında SBS maliyet artışına neden olduğundan alternatif katkıların araştırılması zorunlu hale gelmiştir.

Kalsiyum karbonat, kayalarda ve deniz kabuklarında bulunan bir maddedir. Mermer, tebeşir ve kalker gibi farklı malzemelerin üretiminde kullanılır. Kalsiyum karbonat, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını ve tekerlek izi dayanımını artırır [9]-[11]. Kalsiyum karbonat kullanımı soyulmaya karşı direnci artırır ve dolayısıyla nem hassasiyetini azaltır [12]. Asfalt karışımlarında kalsiyum karbonat kullanımı ile sıcaklık hassasiyeti ve kalıcı deformasyon azalır. Ayrıca asfalt karışıma kalsiyum karbonat ilavesi yorulma ömrünü ve çekme dayanımını geliştirir [13]. Depolama stabilitesi deneyi sonuçlarına göre çökeltilmiş kalsiyum karbonat modifiyeli bitümlü bağlayıcının alt ve üst

*Yazışılan yazar/Corresponding author

numunelere uygulanan yumuşama noktası sonuçlarının farkı 0.2 °C olarak iyi bir depolama stabilitesi göstermektedir [14].

Dünya çapında her yıl birkaç milyon ton plastik poşet ve plastik şişe üretiliyor. Gerek ham madde gerekse atık ve geri dönüşüm olmak üzere dünyada en çok bulunan ve doğal çevreyi ciddi derecede etkileyen bir malzemedir. Polietilen plastik endüstrilerinde en yaygın kullanılan polimerlerden biridir. Polietilen katkısı saf, atık ve geri dönüşüm formda bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda kullanılır. Polietilen bitümün tekerlek izi direncini artırmaktadır [15]. Saf bitüme polietilen ilave edildiğinde sıcaklık hassasiyeti azalırken süneklik değeri yükselir. Polietilen modifiyeli bağlayıcının viskozitesi ve yumuşama noktası değeri artarken penetrasyon değeri düşmektedir [16]-[18]. Polietilen içeren bağlayıcıların elastik performansı artarken, düşük sıcaklık performansı ve yolulma direnci azalmaktadır [19].

Bununla birlikte, düşük yoğunluklu polietilen katkı maddesinin bitümün düşük sıcaklık özelliklerini iyileştirdiğini gösteren çalışmalar da vardır [20],[21]. Depolama stabilitesi deney sonuçlarına göre polietilen modifiyeli bağlayıcılar bitüm içerisinde segregasyona neden olarak düşük depolama stabilitesi gösterir [22],[23]. Nano kalsiyum karbonat ve polimer modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktası ve süneklik değeri artarken penetrasyon değeri azalır [24]. Polimer kaplı çöktürülmüş kalsiyum karbonat modifikasyonu bitümün yumuşama noktası ve penetrasyon indeksi değerlerini artırarak bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetini azaltır. Ayrıca katkı depolama stabilitesi üzerinde şartname sınırlarını aşan olumsuz bir etki göstermez [11].

Bu çalışmada; polietilen ve kalsiyum karbonat bileşiği modifiyeli bitümlerin sıcaklık hassasiyeti, depolama stabilitesi ve fiyat/performansı araştırılmıştır. Sıcaklık duyarlılığını belirlemek için saf ve katkılı bitümlü bağlayıcılara penetrasyon, dönel viskozite ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Depolama stabilitesi prosedüründen sonra katkılı bitümlü bağlayıcılara yumuşama noktası ve dinamik kayma reometrisi testleri uygulanmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar uygulamada ve literatürde sıklıkla kullanılan %4 SBS modifiyeli bağlayıcılarla karşılaştırılmıştır [25]-[27].

2 Malzeme ve metot

Deneylerde kullanılan saf bağlayıcı Türkiye'de TÜPRAŞ Batman Rafinerisi'nden temin edilen B160/220 penetrasyon sınıfına sahip bitümdür. Saf bağlayıcının özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

*-,0 Şekil 1'de Semerkand Plastik Şirketinden temin edilen polietilen ve kalsiyum karbonat bileşiği (PEC) katkısı ve Shell Kimyasal Şirketinden temin edilen styrene-butadiene-styrene (SBS) polimerinin görüntüleri verilmiştir. PEC plastik endüstrisinde uygun maliyetli düzenleyici olarak yaygın bir şekilde kullanılır. PEC katkı maddesi, kompozit şeklinde hazır olarak tedarik edilmiştir. Tablo 2'de PEC'in fiziksel özellikleri verilmiştir. Tablo 3'te ise SBS'nin fiziksel özellikleri verilmiştir.

Modifiye bağlayıcılar 1500 devir/dk. yüksek kesme hızlı mikser (Şekil 2) kullanılarak 170 °C stabil sıcaklıkta 1.5 sa. karıştırılarak üretilmiştir. Karıştırma hızı, sıcaklığı ve süresi önceki çalışmalara göre belirlenmiştir [28]-[30]. Saf bitüm ağırlığına göre %3, %6, %9, %12 ve %15 PEC ile modifiye edilmiş bağlayıcılar sırasıyla 3PEC, 6PEC, 9PEC, 12PEC ve 15PEC ile temsil edilmiştir. %4 SBS modifiyeli bağlayıcı 4SBS ile gösterilmiştir. Çalışma planı Şekil 3'te verilmiştir. PEC ve SBS

katkı oranları literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir [31]-[33].

Tablo 1. Saf bitümün özellikleri.

Table 1. Properties of pure bitumen.

Özellikler	Standart	B160/220
Penetrasyon (0.1 mm)	ASTM D5	190
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	42
Penetrasyon indeksi (PI)		0.965
Özgül ağırlık	ASTM D70	1.019
Viskozite (cP, 135 °C)	ASTM D4402	262.5
Viskozite (cP, 165 °C)	ASTM D4402	87.5

Tablo 2. PEC'in fiziksel özellikleri.

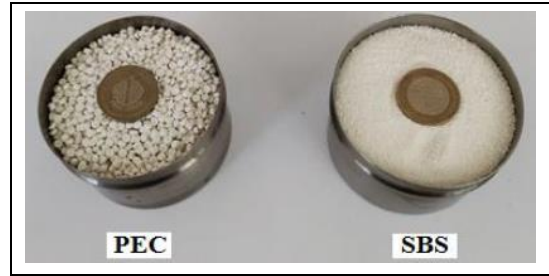
Table 2. The physical properties of PEC.

Yoğunluk (g/cm ³)	Akış İndeksi (g/10 dk.)	Kül (%)
1.70	0.4-1.5	70

Tablo 3. SBS'nin fiziksel özellikleri.

Table 3. The physical properties of SBS.

Stiren Çift Blok	Çekme Dayanımı (MPa)	Destekli Sertlik A	Uçucu Madde (%)	Kül (%)
14-18	> 4	28-38	< 0.7	< 0.2
48-51				



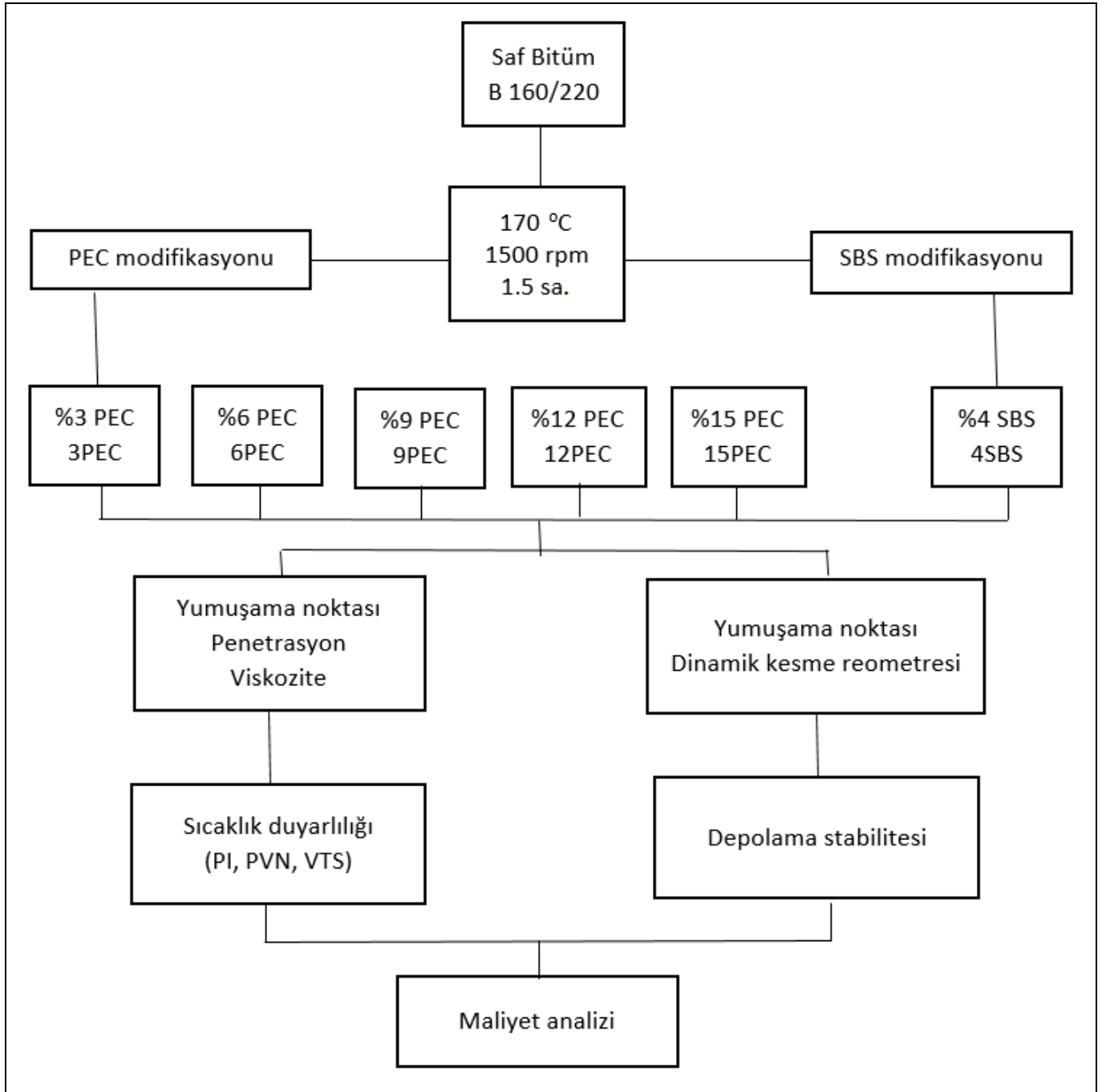
Şekil 1. Çalışmada kullanılan katkılar.

Figure 1. The additives used in the study.



Şekil 2. Bitüm modifikasyon cihazı.

Figure 2. Bitumen modification device.



Şekil 3. Çalışma planı.

Figure 3. Study plan.

Bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığını ve depolama stabilitesini belirlemek amacıyla penetrasyon (ASTM D5), yumuşama noktası (ASTM D36), dönel viskozimetre (ASTM D4402) ve dinamik kesme reometresi (AASHTO T315) deneyleri uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlarla bitümlü bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığı ve depolama stabilitesi detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

3 Bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin değerlendirilmesi

Bağlayıcılara uygulanan penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneylerinin sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Bu değerler yardımıyla saf ve modifiye bitümlerin penetrasyon indeksi (PI), viskozite-sıcaklık duyarlılığı (VTS) ve penetrasyon-viskozite sayısı (PVN) hesaplanarak sıcaklık hassasiyetleri araştırılmıştır.

Tablo 4. Bağlayıcıların deney sonuçları.

Table 4. Test results of binders.

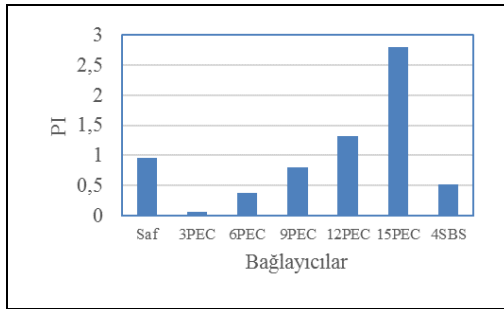
	Penetrasyon (0.1 mm)	Yumuşama Noktası (°C)	Viskozite (Cp, 135 °C)	Viskozite (Cp,165 °C)
3PEC	120	45.7	412.5	132
6PEC	110	48.1	612.5	187.5
9PEC	90	51.8	825	250
12PEC	72	56.4	1180	350
15PEC	64	65.8	1663	462.5
4SBS	101	53.9	1025	325

Penetrasyon indeksi, bitümlü bağlayıcıların sıcaklık değişikliklerine cevabının nicel bir ölçüsünü ifade eder. Penetrasyon indeksi sonuçlarındaki azalma, sıcaklık hassasiyetindeki artışın göstergesidir. Bağlayıcının penetrasyon indeksi (PI), yumuşama noktası ve penetrasyon testi sonuçlarından faydalanılarak formül (1)'de verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \log(Pen25) - 20 SP}{50 \log(Pen25) - SP - 120} \quad (1)$$

Formülde, Pen25 değeri bitümlü bağlayıcının 25 °C'deki penetrasyonunu ifade ederken SP ise bağlayıcının yumuşama noktası sıcaklığıdır.

Şekil 4'te bağlayıcıların PI sonuçları verilmiştir. PEC kullanımı saf bağlayıcının PI değerini başlangıçta azaltsa da özellikle %12'nin üstünde PEC kullanımı PI değerini önemli derecede artırmıştır. 15PEC bağlayıcısı saf bağlayıcıdan 2.76 kat daha yüksek PI değeri vermiştir. 3PEC bağlayıcısının en yüksek sıcaklık duyarlılığına sahipken 15PEC en düşük sıcaklık duyarlılığını göstermiştir. 4SBS, saf bağlayıcıdan daha düşük PI değeri vermiştir. %4 SBS modifikasyonunun sahip olduğu sıcaklık hassasiyeti yaklaşık olarak %6 PEC modifikasyonu ile elde edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki polietilen bazlı polimerlerle uyum göstermektedir [34],[35].



Şekil 4. Bağlayıcıların PI sonuçları.

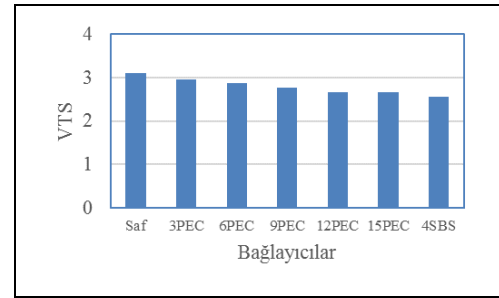
Figure 4. PI results of the binders.

Bir bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık hassasiyeti, sıcaklık değişimiyle birlikte hızlı bir viskozite farklılığını ifade eder. Viskozite-Sıcaklık Duyarlılığı (VTS) belirlemek için formül (2) kullanılmaktadır [36].

$$VTS = \frac{\log \log (V1) - \log \log (V2)}{\log (T2) - \log (T1)} \quad (2)$$

Formülde, T1 ve T2 bir noktadaki bitüm sıcaklıklarını (Kelvin) temsil ederken V1 ve V2 bir noktadaki bitüm viskoziteleridir (cP).

Şekil 5'te bitümlerin VTS sonuçları gösterilmiştir. Verilen sonuçlar 135 °C ve 165 °C'deki viskozite değerlerine göre bulunmuştur. VTS sonuçlarıyla sıcaklık hassasiyeti ilişkisi doğrusaldır. PEC oranının artması ile VTS değerleri düzenli olarak azalmaktadır. Bu durum literatürdeki polietilen modifiyeli bağlayıcılar içinde geçerlidir [37]. En düşük VTS değerini dolayısıyla en düşük sıcaklık hassasiyetini 4SBS bağlayıcısı vermiştir. 15PEC ve 4SBS bağlayıcıları yakın VTS sonuçları vermiştir. PI değerleri katkı içeriğinin değişiminden önemli derecede etkilenirken VTS değerlerinde önemli fark oluşmamaktadır. Ancak VTS değerlerine göre de modifiye bağlayıcılar içinde %3 PEC içeriğinin sıcaklık duyarlılığının fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Bağlayıcıların VTS sonuçları.

Figure 5. VTS results of binders.

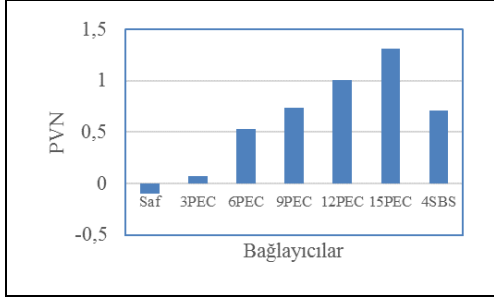
Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN), bitümlü bağlayıcıyla düşük sıcaklıktaki çatlama direnci arasındaki empirik ilişkidir. PVN yöntemi, bitümlü bağlayıcısının sıcaklık hassasiyetini belirlemek ve düşük sıcaklıktaki çatlak engelleme yeteneğini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Düşük PVN değeri yüksek sıcaklık hassasiyetini gösterir ayrıca düşük sıcaklık hassasiyetine sahip bitümlü bağlayıcılar içeren asfalt kaplamalar çatlaklara karşı daha dirençlidir [38]. Bitümlü bağlayıcının PVN değeri formül (3) yardımıyla bulunabilir.

$$PVN = -1.5 \frac{4.258 - 0.7967 \log P25 - \log V}{0.795 - 0.1858 \log P25} \quad (3)$$

Formülde, P25 bitümlü bitümün 25 °C'deki penetrasyon değerini, V bitümlü bitümün 135 °C'deki viskozite (cP) değerini ifade eder.

Şekil 6'da bitümlü bağlayıcıların PVN sonuçları verilmiştir. PVN sonuçlarının yüksek çıkması düşük sıcaklık hassasiyetini ifade etmektedir. PEC içeriğinin artmasıyla literatürle uyumlu olarak PVN değerleri önemli derecede artmakta dolayısıyla ısıya karşı duyarlılık azalmaktadır [34]. 15PEC bağlayıcısı en düşük sıcaklık duyarlılığı gösteren bağlayıcı olmuştur. 4SBS bağlayıcısı 6PEC'den iyi 9PEC'den ise daha kötü bir sıcaklık

hassasiyetine sahiptir. Yüksek oranda PEC kullanımı PVN eğilimini tersine çevirmiştir.

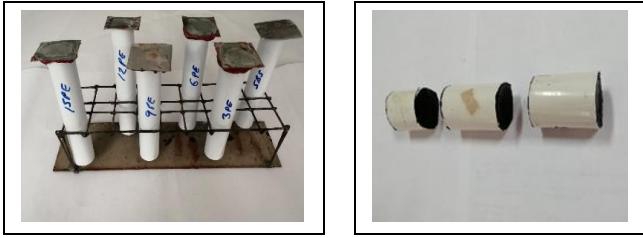


Şekil 6. Bağlayıcıların PVN sonuçları.

Figure 6. PVN results of the binders.

4 Bağlayıcıların depolama stabilitesinin değerlendirilmesi

Modifiye bağlayıcıların depolama stabilitesi testi EN 13399 standardı dikkate alınarak yapılmıştır. Testte 160 mm yükseklik 30-40 mm çapa sahip standart alüminyum tüpler kullanılmaktadır. Bağlayıcılar homojen duruma gelinceye kadar karıştırılır ve deney tüplerine 100-120 mm ulaşmaya kadar hava kabarcığı olmayacak şekilde yerleştirilir. Daha sonra tüpler hava almayacak şekilde kapatılmaktadır (Şekil 7). Tüpler dik durumda 72±1 sa. boyunca 180 °C sıcaklıkta etüvde bekletilmektedir. Üç günün sonunda tüpler dik durumda bağlayıcılar oda sıcaklığına ulaşmaya kadar bekletildikten sonra soğutucuda -20 °C sıcaklıkta 30 dk. bekletilmekte ve sonra üç eşit parçaya bölünmektedir (Şekil 7). Ortadaki parça deneye tabi tutulmazken, alt ve üst parçalar bağlayıcı deneylerine tabi tutulmaktadır. Çalışmada depolama stabilitesi prosedürüne tabi tutulan numunelerin alt ve üst parçaları alınarak yumuşama noktası ve DSR deneyleri uygulanmıştır. Böylece modifiye bağlayıcıların homojenlik depolanabilirlik özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 7. Depolama stabilitesi için hazırlanan numuneler.

Figure 7. Samples prepared for storage stability.

4.1 Depolama sonrası yumuşama noktası test sonuçları

Bağlayıcının yumuşama noktası testi ASTM D36 standardına göre yapılmıştır. Her bağlayıcı türü için aynı anda iki test yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Modifiye bağlayıcıların 72 saat 180 °C'de bekletilmesinden sonra tüplerin alt ve üst kısmından alınan numunelere uygulanan yumuşama noktası deneyinden elde edilen veriler Tablo 5'te verilmiştir. Depolama sonrası %4 SBS modifikasyonunda polimer fazı bitüm fazından ayrılarak bağlayıcıların koyulduğu tüplerin üst kısmında birikmiş ve sonuçta üst kısmın yumuşama noktası değerleri alt kısma göre %32 oranında artmıştır. SBS modifikasyonunun depolama sonrası alt kısmındaki yumuşama noktası değerleri orjinal durumdaki yumuşama noktasından %11 daha fazladır. PEC modifikasyonunda ise alt kısmın yumuşama noktası

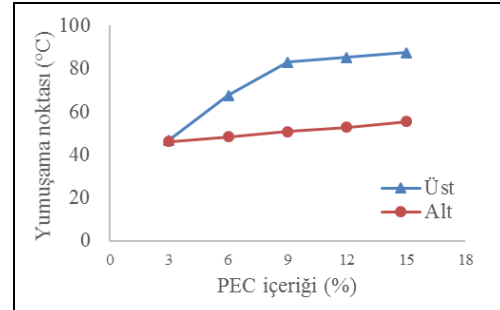
değerleri %9 PEC içeriğinden sonra orjinal durumdan daha düşük çıkmıştır. Bu durum PEC içeriğinin artmasının polimerin, tüpün üst kısmında birikme oranının artmasına neden olduğuna işaret etmektedir.

Tablo 5. Depolama stabilitesi deneyi sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri.

Table 5. Softening point values of binders after storage stability test.

	Alt kısım (°C)	Üst kısım (°C)	Fark (°C)	Orjinal (°C)
3PEC	46.1	46.8	0.7	45.7
6PEC	48.4	67.7	19.3	48.1
9PEC	50.9	83.1	32.2	51.8
12PEC	52.7	85.2	32.5	56.4
15PEC	55.5	87.4	31.9	65.8
4SBS	60.1	79.6	19.5	53.9

Şekil 8'de PEC içeriği ile alt ve üst kısımdan tespit edilen yumuşama noktası değerlerinin değişimi verilmiştir. Alt kısmın yumuşama noktası değerleri PEC içeriğinin artması ile lineer olarak artmaktadır, buna karşın üst kısmın değerleri %9 PEC içeriğine kadar hızlı bir artış sonra ise düşük bir artış oranı ile stabil bir davranış göstermektedir. %6 katkı içeriğine kadar PEC modifikasyonunda alt ve üst kısımların yumuşama noktaları arasındaki fark 4SBS modifikasyonuna benzerken, %6'dan daha yüksek orandaki PEC içeriğinde alt ve üst kısımları arasında 30 °C'den daha fazla farklar oluşmakta bu da önemli derecede faz ayrışımı meydana geldiğine işaret etmektedir. Önceki çalışmalarda da polietilen bazlı polimerlerin bitümlü bağlayıcı içerisindeki oranının artmasıyla birlikte depolama stabilitesinin olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir [39]-[41].

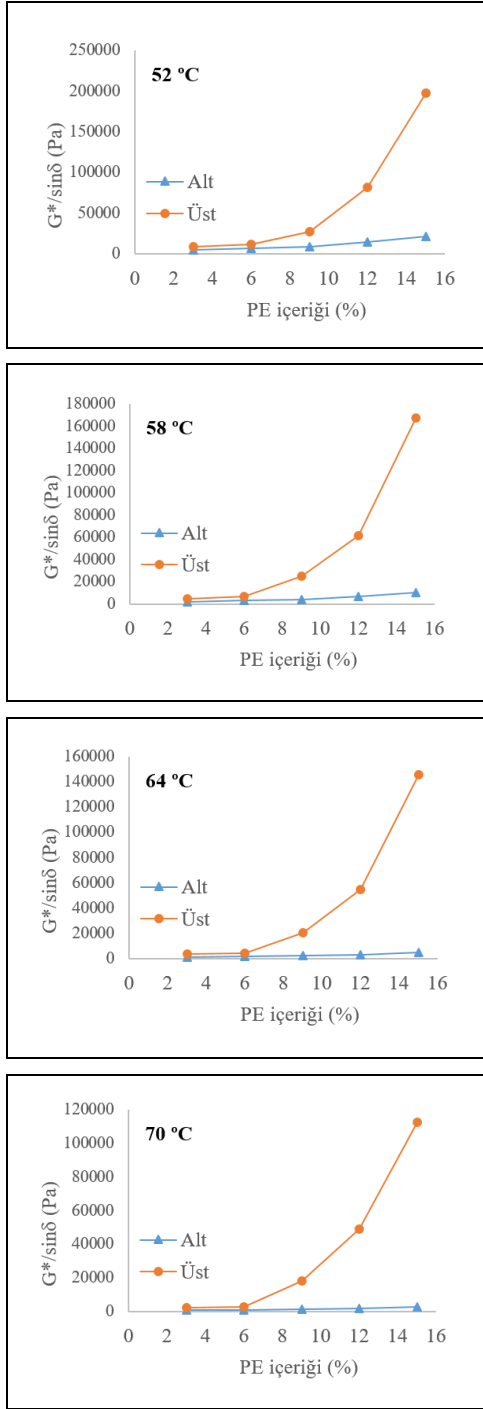


Şekil 8. PEC modifiyeli bağlayıcıların depolama stabilitesi sonrası yumuşama noktası değerleri.

Figure 8. Softening point values of PEC modified binders after storage stability.

4.2 Depolama sonrası dinamik kayma reometresi test sonuçları

Test, AASHTO T315 standardı göz önünde bulundurularak Bohlin DSRII test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 25 mm paralel plaka ve 1 mm plaka aralığı kullanılmıştır. Bağlayıcıların kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısı (δ) 52-70 °C aralığında 6 °C'lik artışlarla belirlenmiştir. Bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri ($G^*/\sin\delta$) 10 rad/s (1.59 Hz) kesme hızında belirlenmiştir. Test, gerilme kontrolü ile lineer elastik limitler içerisinde gerçekleştirilmiştir. Depolama sonrası tüplerin alt ve üst kısmından alınan PEC modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 9'da verilmiştir.

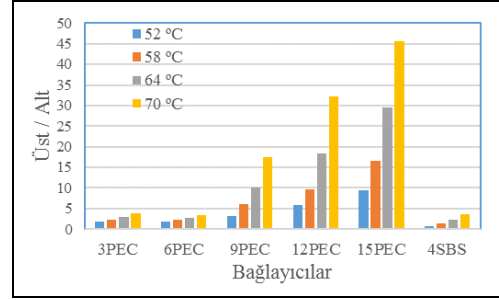


Şekil 9. PEC modifiyeli bağlayıcıların depolama sonrası G*/sinδ değerlerindeki değişim.

Figure 9. Change in G*/sinδ values of PEC modified binders after storage.

PEC içeriğinin artması ile üst kısmın G*/sinδ değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Bu artış özellikle %6 PEC içeriğinden sonra oluşmaktadır. %6 PEC içeriğine kadar bağlayıcının alt ve üst kısmı arasındaki G*/sinδ değerleri arasında deney sıcaklığına bağlı olarak 1.76 ile 3.49 kat fark oluşurken %15 PEC içeriğinde 9.4 ile 45.5 kat fark oluşmaktadır. Depolama sonrası tüpün üst kısmında biriken PEC'in tekerlek izi direncinin tüpün alt kısmında biriken saf bitüme göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 10'da bağlayıcıların üst kısmının G*/sinδ değerlerinin alt kısmın G*/sinδ değerlerine oranı, farklı deney sıcaklıkları için verilmiştir. En düşük oranları 4SBS bağlayıcısı vermiştir. Bütün deney sıcaklıkları dikkate alındığında 3PEC, 6PEC ve 4SBS bağlayıcıların depolama sonrası faz ayrışmalarının benzer olduğu görülmektedir. %6'dan daha fazla PEC modifiyeli bağlayıcıların depolama sırasında katkının üst kısımda birikmesini önleyecek bir karıştırma sistemi uygulanmasının çok önemli olduğu görülmektedir.

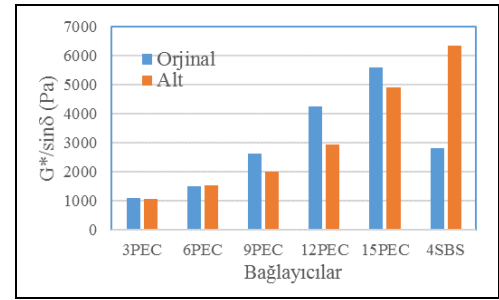


Şekil 10. Üst ve alt kısmın G*/sinδ değerlerinin oranı.

Figure 10. Ratio of G*/sinδ values of the upper and lower parts.

Bağlayıcıların depolama sonrası katkının ne kadarlık bir bölümünün tüpün üst kısmında biriktiğini değerlendirmek için, depolama öncesi orjinal ve depolama sonrası tüpün alt kısmının tekerlek izi parametrelerinin değişimleri tespit edilmiş ve Şekil 11'de verilmiştir.

PEC modifiyeli bağlayıcılarda depolama öncesi orjinal durumdaki numunelerin tekerlek izi parametrelerinin depolama sonrası tüpün altında kalan numunelerin değerlerinden daha yüksek olduğu dolayısıyla PEC katkısının depolama sırasında büyük oranda üst kesimde biriktiği anlaşılmaktadır. SBS modifikasyonunda ise depolama sonrası alt kesimin değerlerinin orijinal durumdakinden fazla olması, depolama esnasında SBS katkısının bazı bileşenlerinin tüpün altında biriktiğine işaret etmektedir.

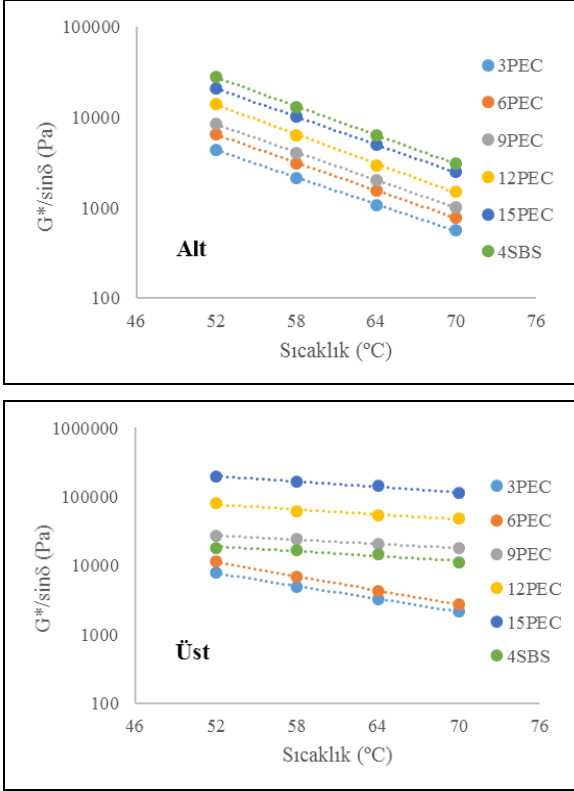


Şekil 11. Depolama öncesi ve sonrası alt kısmın G*/sinδ değerleri.

Figure 11. G*/sinδ values of the lower part before and after storage.

Bağlayıcıların alt ve üst kısımlarının tekerlek izi parametrelerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Alt kısımların değerleri incelendiğinde en yüksek tekerlek izi parametresinin SBS modifikasyonuna ait olduğu ve PEC içeriğinin azalması ile G*/sinδ değerlerinin düzenli olarak azaldığı görülmektedir. Alt kesimdeki bağlayıcıların sıcaklık artışından etkilene oranları benzerdir. Üst kesimin değerleri incelendiğinde 4SBS bağlayıcısının 9PEC bağlayıcısından daha düşük G*/sinδ değerleri verdiği görülmektedir.

Bu durum bir kez daha PEC katkısının SBS'ye göre daha fazla ayrıştığını ve depolama sonrası tüpün üstünde yüksek bir saflıkta polimer fazı oluşturduğuna işaret etmektedir. Ayrıca PEC modifikasyonunda %6 katkı içeriğinden sonra sıcaklık hassasiyetinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 12. Alt ve üst kısmın $G^*/sind$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Figure 12. Variation of the $G^*/sind$ values of the lower and upper parts with temperature.

5 Bağlayıcıların maliyet analizi

Bitüm modifikasyonunda kullanılan katkı malzemelerinin performansı artırmasının yanında ekonomik olması da gerekir. Bu amaçla PEC katkısının maliyet analizi de yapılmıştır. Bağlayıcıların yaklaşık maliyetleri Tablo 6'da gösterilmiştir. PEC modifiyeli bağlayıcıların tamamı, %4 SBS modifiyeli bağlayıcıdan daha düşük maliyetle üretilebilmektedir.

Çalışmada kullanılan PEC katkısının uygulanabilirliği açısından performans ve maliyet birlikte değerlendirilmelidir. Tablo 7'de bağlayıcı performansının bağlayıcı maliyetine oranı (P/C) verilmiştir. Bu bağlamda sıcaklık duyarlılığı belirlemek için hesaplanan bağlayıcının PI değerinin maliyete oranı (PI/M) ile bağlayıcının VTS değerinin ve maliyetinin bire oranı ($1/(VTS*M)$) hesaplanmıştır. Ayrıca depolama stabilitesi sonrası bağlayıcının alt ve üst kısımlarının yumuşama noktası farkının ve maliyetinin bire oranı ($1/(YN*M)$) belirlenmiştir. Diğer taraftan, bağlayıcının üst kısmının alt kısmına 64 °C'deki tekerlek izi parametrelerinin bölümüyle elde edilen değer ve maliyetinin bire oranı ($1/(G^*M)$) belirlenmiştir. Burada hesaplanan P/C değerleri 100000 ile çarpılarak yazılmıştır.

Bağlayıcıların P/C değerleri sonuçlar arasında en yüksek değere bölünerek normalize edilmiştir. Şekil 13'te modifiye edilmiş bağlayıcıların kendi aralarında değerlendirilmesine olanak sağlayan normalize edilmiş P/C değerinin değişimi verilmiştir. Sıcaklık duyarlılığı ve maliyetin birlikte ele alındığı (PI/M) kriterine göre 15PEC ve 12PEC en yüksek değere sahipken, 3PEC en düşük değeri vermiştir. 12PEC en yüksek ($1/(VTS*M)$) değerine sahipken, 4SBS bağlayıcısından en düşük değer elde edilmiştir. Depolama stabilitesi ve maliyetin birlikte değerlendirildiği ($1/(YN*M)$) kriterine göre 3PEC en yüksek değere sahipken, diğer bütün bağlayıcılar birbirine yakın değerler ile kötü performans sergilemiştir. 4SBS, 3PEC ve 6PEC bağlayıcıları en yüksek ($1/(G^*M)$) değerine sahipken, 15PEC bağlayıcısından en düşük ($1/(G^*M)$) değeri elde edilmiştir. Bütün P/C değerleri dikkate alındığında 6PEC bağlayıcısının 4SBS ile benzer verimlilik sunduğu görülmektedir.

Tablo 6. Bitümlü bağlayıcıların maliyetleri.

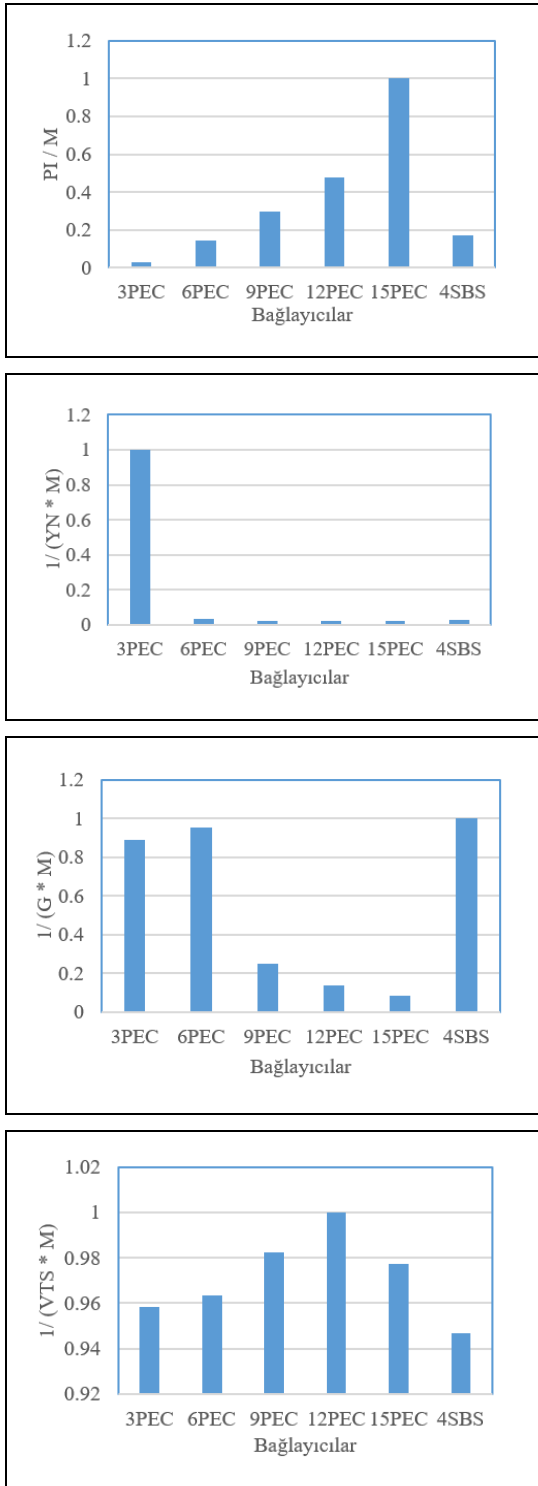
Table 6. Costs of bituminous binders.

Bağlayıcı	Saf bitüm (kg)	PEC (kg)	SBS (kg)	Toplam maliyet (₺)	Toplam ağırlık (kg)	Birim maliyet (₺/ton)
3PEC	1000	30	-	4562	1030	4429
6PEC	1000	60	-	4804	1060	4532
9PEC	1000	90	-	5047	1090	4630
12PEC	1000	120	-	5289	1120	4722
15PEC	1000	150	-	5532	1150	4810
4SBS	1000	-	40	5400	1040	5190
B 160/220 Bitüm						4320
PEC						8080
SBS						27050

Tablo 7. Modifiye bağlayıcıların P/C değerleri.

Table 7. P/C values of modified binders.

	PI/M	$1/(VTS*M)$	$1/(YN*M)$	$1/(G^*M)$
3PEC	1.64	7.64	32.25	32.25
6PEC	8.46	7.68	1.14	1.14
9PEC	17.36	7.83	0.67	0.67
12PEC	27.82	7.97	0.65	0.65
15PEC	58.15	7.78	0.65	0.65
4SBS	10.05	7.54	0.98	0.98



Şekil 13. Bağlayıcıların normalize edilmiş P/C değerlerinin değişimi.

Figure 13. Change of normalized P/C values of binders.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, PEC katkılı bitümlü bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığı ve depolama stabilitesi araştırılmıştır. Ayrıca PEC ve SBS modifiyeli bağlayıcılar performans ve maliyet açısından karşılaştırılmıştır.

15PEC bağlayıcısı en yüksek PI değeri ile en düşük sıcaklık duyarlılığına sahip olmuştur. 4SBS, saf bağlayıcıdan bile daha düşük PI değeri ile kötü bir performans sergilemiştir. 15PEC, 12PEC ve 4SBS bağlayıcıları yakın VTS değerleri vermiştir. PVN değerlerine göre en düşük sıcaklık hassasiyetini 15PEC ve 12PEC bağlayıcıları göstermiştir. PEC katkısı sıcaklık hassasiyeti bakımından yüksek performans göstermiştir. Sıcaklık farklılıklarının fazla olduğu bölgelerde PEC modifiyeli bağlayıcılarla elde edilen karışımların asfalt kaplamalarda kullanımını tavsiye edilebilir.

Depolama sonrası yumuşama noktası deney sonuçlarına göre 3PEC bağlayıcısının alt ve üst kısımları arasındaki farkın en düşük çıktığı tespit edilmiştir. 6PEC ve 4SBS bağlayıcılarında bu farkın çok yakın olduğu belirlenmiştir. PEC modifikasyonunda katkı içeriğinin artmasıyla alt kısmın yumuşama noktası sıcaklığı lineer şekilde artmıştır. Üst kısımda %9 PEC içeriğine kadar hızlı bir artış daha sonra düşük bir artış oranı ile stabil bir davranış görülmüştür. Dinamik kayma reometresi test sonuçları dikkate alındığında alt ve üst kısımlar arasındaki tekerlek izi parametresi oranının özellikle %6 PEC içeriğinden sonra arttığı belirlenmiştir. 3PEC, 6PEC ve 4SBS bağlayıcıların alt ve üst kısımlarının $G^*/\sin\delta$ değerleri oranı birbirine çok yakın çıkarak benzer performans sergilemiştir. PEC katkısının depolama sırasında büyük oranda üst kesimde birikirken SBS katkısının bazı bileşenlerinin tüpün altında biriktiği ortaya çıkmıştır. %6'dan daha fazla orandaki PEC modifikasyonunda, modifiye bitümün depolandığı tanklarda bağlayıcıyı üstten alta doğru çeviren bir karıştırma sisteminin olmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

Bağlayıcıların sıcaklık duyarlılığı, depolama stabilitesi performansı ve maliyetini birlikte değerlendirme imkânı veren P/C ilişkilerine göre; 6PEC ve 4SBS bağlayıcıları benzer değerler vermiştir. Elde edilen veriler ışığında PEC katkısının gerek performans gerekse maliyet açısından uygulamada en çok kullanılan SBS katkısına iyi bir alternatif olacağı düşünülmektedir.

7 Conclusions

In this study, temperature sensitivity and storage stability of PEC modified bituminous binders were investigated. In addition, PEC and SBS modified binders were compared in terms of performance and cost.

The 15PEC binder had the highest PI value and the lowest temperature sensitivity. 4SBS performed poorly with even lower PI than the pure binder. 15PEC, 12PEC and 4SBS binders gave close VTS values. 15PEC and 12PEC binders showed the lowest temperature sensitivity according to PVN values. PEC additive showed high performance in terms of temperature sensitivity. The use of PEC modified mixtures in asphalt pavement can be recommended in the regions where temperature differences are high.

According to the post-storage softening point test results, it was determined that the difference between the upper and lower parts of the 3PEC binder was the lowest. It was determined that this difference was very close in 6PEC and 4SBS binders. In the PEC modification, the softening point temperature of the lower part increased linearly with the increase of the additive content. A rapid increase in the upper part up to 9% PEC content then a stable behavior with a low rate of increase was observed. Considering the dynamic shear rheometer test results, it was determined that the rutting parameter ratio between the upper

and lower parts increased especially after 6% PEC content. The ratio of $G^*/\sin\delta$ values of the upper and lower parts of the 3PEC, 6PEC and 4SBS binders were very close to each other and showed similar performance. It was revealed that some components of the SBS additive accumulated at the bottom of the tube, while the PEC additive mostly accumulated in the upper part during storage. In more than 6% PEC modification, it was determined that it would be appropriate to have a mixing system that turns the binder from top to bottom in tanks where modified bitumen is stored.

According to the P/C relations that allow the temperature sensitivity, storage stability performance and cost of binders to be evaluated together; 6PEC and 4SBS binders gave similar values. In the light of the data obtained, it is thought that the PEC additive will be a good alternative to the most widely used SBS additive in terms of both performance and cost.

8 Yazar katkı beyanı

Çalışmada Yazar 1 fikrin oluşması, deneylerin yapılması ve literatür taraması başlıklarında; Yazar 2 elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, sonuçların incelenmesi ve yorumlanması başlıklarında; Yazar 3 sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makale için etik kurul onayı gerekmemektedir. Hazırlanan yazıda herhangi bir kişi/kuruluş ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

10 Kaynaklar

- [1] Kök BV, Yılmaz M, Geçkil A. "Çimento stabilizasyonlu zeminin esnek üstyapı maliyetine etkisi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 165-172, 2012.
- [2] Cai L, Shi X, Xue J. "Laboratory evaluation of composed modified asphalt binder and mixture containing nano-silica/rock asphalt/SBS". *Construction and Building Materials*, 172, 204-211, 2018.
- [3] Kök BV, Yılmaz M, Erkuş Y. "Effects of graphite on mechanical properties of stone mastic asphalt pavement". *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8), 1013-1020, 2017.
- [4] Kaya D, Topal A, Gupta J, McNally T. "Aging effects on the composition and thermal properties of styrene-butadiene-styrene (SBS) modified bitumen". *Construction and Building Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117450>.
- [5] Erkuş Y, Kök BV, Yılmaz M. "Evaluation of performance and productivity of bitumen modified by three different additives". *Construction and Building Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120553>.
- [6] Aghazadeh Dokandari P, Oner J, Topal A, Sengoz B. "A laboratory study of an organic warm mix asphalt additive on aging characteristics of bituminous mixtures". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 20(9), 332-337, 2014.
- [7] Almusawi A, Abdulrahman HS, Shakhan MR, Doğaroğlu B. "Effects of crumb rubber size and concentration on Marshall parameters of rubberized asphalt mixture". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1048-1052, 2020.
- [8] Zhu J, Lu X, Kringos N. "Experimental investigation on storage stability and phase separation behaviour of polymer-modified bitumen". *International Journal of Pavement Engineering*, 19(9), 832-841, 2018.
- [9] Ali SIA, Ismail A, AlMansob RA, Alhmali DI. "Evaluation of elevated temperature properties of asphalt cement modified with aluminum oxide and calcium carbonate nanoparticles". *Transport Infrastructure 2017*, Prague, Czech Republic, 21-22 September 2017.
- [10] Liu DL, Yao HB, Bao SY. "Performance of nano-calcium carbonate and SBS compound modified asphalt". *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 38, 579-582, 2007.
- [11] Hao XH, Zhang AQ, Yang W. "Study on the performance of nano calcium carbonate modified asphalt concrete AC-13". *Advanced Materials Research*, 450, 503-507, 2012.
- [12] Haider S, Hafeez I, Zaidi SBA, Nasir MA, Rizwan M. "A pure case study on moisture sensitivity assessment using tests on both loose and compacted asphalt mixture". *Construction and Building Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117817>.
- [13] Moghadas Nejad F, Geraee E, Azarhoosh AR. "The effect of nano calcium carbonate on the dynamic behaviour of asphalt concrete mixture". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(8), 1219-1228, 2020.
- [14] Kebritchi A, Jalali-Arani A, Roghanizad AA. "Rheological behavior and properties of bitumen modified with polymeric coated precipitated calcium carbonate". *Construction and Building Materials*, 25(6), 2875-2882, 2011.
- [15] Khan IM, Kabir S, Alhussain MA, Almansoor FF. "Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction". *Procedia Engineering*, 145, 1557-1564, 2016.
- [16] Punith VS, Veeragavan A. "Behavior of reclaimed polyethylene modified asphalt cement for paving purposes". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 833-845, 2011.
- [17] Costa LM, Silva HMRD, Oliveira JR, Fernandes SR. "Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement". *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(4), 457-464, 2013.
- [18] Fang C, Yu R, Li Y, Zhang M, Hu J, Zhang M. "Preparation and characterization of an asphalt-modifying agent with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite". *Polymer Testing*, 32(5), 953-960, 2013.
- [19] Amirkhanian S. "Utilization of scrap plastics in asphalt binders". *Eco-Efficient Pavement Construction Materials*, 13-32, 2020.
- [20] Al-Hadidy AI, Tan YQ. "Evaluation of Pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10), 618-623, 2009.
- [21] Liu S, Zhou SB, Peng A, Xuan W, Li W. "Analysis of the performance and mechanism of desulfurized rubber and low-density polyethylene compound-modified asphalt". *Journal of Applied Polymer Science*, 2019. <https://doi.org/10.1002/app.48194>.
- [22] Ho S, Church R, Klassen K, Law B, MacLeod D, Zanzotto L. "Study of recycled polyethylene materials as asphalt modifiers". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(8), 968-981, 2006.

- [23] Padhan RK, Sreeram A. "Enhancement of storage stability and rheological properties of polyethylene (PE) modified asphalt using cross linking and reactive polymer based additives". *Construction and Building Materials*, 188, 772-780, 2018.
- [24] Zhang HL, Su MM, Zhao SF, Zhang YP, Zhang ZP. "High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt". *Construction and Building Materials*, 114, 323-332, 2016.
- [25] Zhang W, Qiu L, Liu J, Hu K, Zou L, Chen Y, Zang J. "Modification mechanism of C9 petroleum resin and its influence on SBS modified asphalt". *Construction and Building Materials*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124740>.
- [26] Shan L, Xie R, Wagner NJ, He H, Liu Y. "Microstructure of neat and SBS modified asphalt binder by small-angle neutron scattering". *Fuel*, 253, 1589-1596, 2019.
- [27] Padhan RK, Leng Z, Sreeram A, Xu X. "Compound modification of asphalt with styrene-butadiene-styrene and waste polyethylene terephthalate functionalized additives". *Journal of Cleaner Production*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124286>.
- [28] Cao Z, Huang X, Yu J, Han X, Wang R, Li Y. "Laboratory evaluation of the effect of rejuvenators on the interface performance of rejuvenated SBS modified bitumen mixture by surface free energy method". *Construction and Building Materials*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121866>.
- [29] Mojabi SA, Mirbaha B. "Laboratory investigation of stone matrix asphalt modified with SBS polymer and C25 fiber in using the semi-circular bend geometry (SCB) and moisture susceptibility". *Construction and Building Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120511>.
- [30] Cuadri AA, Roman C, García-Morales M, Guisado F, Moreno E, Partal P. "Formulation and processing of recycled-low-density-polyethylene-modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies". *Chemical Engineering Science*, 156, 197-205, 2016.
- [31] Arabani M, Pedram M. "Laboratory investigation of rutting and fatigue in glassphalt containing waste plastic bottles". *Construction and Building Materials*, 116, 378-383, 2016.
- [32] Fang C, Wu C, Hu J, Yu R, Zhang Z, Nie L, Mi X. "Pavement properties of asphalt modified with packaging-waste polyethylene". *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 20(1), 31-35, 2014.
- [33] Wang L, Shan M, Li C. "The cracking characteristics of the polymer-modified asphalt mixture before and after aging based on the digital image correlation technology". *Construction and Building Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119802>.
- [34] Ameri M, Nasr D. "Properties of asphalt modified with devulcanized polyethylene terephthalate". *Petroleum Science and Technology*, 34(16), 1424-1430, 2016.
- [35] Jun L, Yuxia Z, Yuzhen Z. "The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen". *Construction and Building Materials*, 22(6), 1067-1073, 2008.
- [36] Rasmussen RO, Lytton RL, Chang GK. "Method to predict temperature susceptibility of an asphalt binder". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(3), 246-252, 2002.
- [37] Raouf MA, Williams RC. "Temperature and shear susceptibility of a nonpetroleum binder as a pavement material". *Transportation Research Record*, 2180(1), 9-18, 2010.
- [38] Yamaç ÖE, Yılmaz M, Kök BV. "Effects of the combined use of styrene-butadiene-styrene and gilsonite in bitumen modification on the stiffness and thermal sensitivity of bitumens". *Turkish Journal of Science and Technology*, 13(1), 77-85, 2018.
- [39] Hong Z, Yan K, Ge D, Wang M, Li G, Li H. "Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on laboratory properties of low-density polyethylene (LDPE)/ethylene-vinyl acetate (EVA) compound modified asphalt". *Journal of Cleaner Production*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130677>.
- [40] Yu R, Fang C, Liu P, Liu X, Li Y. "Storage stability and rheological properties of asphalt modified with waste packaging polyethylene and organic montmorillonite". *Applied Clay Science*, 104, 1-7, 2015.
- [41] Galooyak SS, Dabir B, Nazarbeygi AE, Moeini A. "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites". *Construction and Building Materials*, 24(3), 300-307, 2010.