

İyon Işınıyla İşlenen Geri Dönüştürülmüş Polipropilenin Bitümün Fiziksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi

**Perviz AHMEDZADE, Taylan GÜNAY, Baurzhan KULTAYEV,
Ahmet Burak GÖKTEPE**

Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

Tel: +90 232 311 5179

e-Posta: perviz.ahmedzade@ege.edu.tr, taylan.gunay@ege.edu.tr, baur_kult@hotmail.com
abgoktepe@gmail.com

Alexander FAINLEIB, Olga GRIGORYEVA, Olga STAROSTENKO,

Ukrayna Ulusal Bilimler Akademisi, Makromoleküler Kimya Enstitüsü, Kiev

Tel: +380 44 559 5372

e-Posta: fainleib@i.ua, polym@ukrpack.net, o_starostenko@ukr.net,

Öz

Çalışmada, iyon ışınıyla işlenmiş geri dönüştürülmüş polipropilen (PP-i) malzemenin bitüm içerisindeki kullanılabilirliği incelenmiştir. Atık polimerlerin ekonomik olmaları sebebiyle kullanım alanlarını yaygınlaşmaktadır. Ancak, atık polimerlerin bitüm içerisinde kullanılabilirlik durumunda, bağlayıcı ile herhangi bir reaksiyon oluşmamaktadır. Bu nedenle, çalışmada, iyon ışını yöntemiyle, atık polipropilen malzeme işlenmiş ve yüzeylerinde bitümle etkileşime girebilecek serbest radikaller oluşturulmuştur.

İyon ışını işlemi ardından farklı oranlarda PP-i katkısına sahip bağlayıcılar hazırlanmış ve katkı malzemesinin kullanılabilirliği çeşitli fiziksel ve reolojik deneylerle incelenmiştir. Buna göre, PP-i katkı oranının artmasıyla birlikte bağlayıcının penetrasyon değeri sürekli azalırken yumuşama noktasının sürekli arttığı tespit edilmiştir. Dönel viskozite (RV) deneyi yardımıyla, PP-i katkısının bitümün kıvamını arttırdığı belirlenmiştir. Dinamik kayma reometresiyle (DSR) yapılan farklı frekans deney sonuçlarına göre tekerlek izi parametresinin katkı miktarının artmasıyla birlikte sürekli arttığı, faz açısı değerlerinin ise genel olarak azaldığı görülmüştür. Deneysel çalışmalardan elde edilen bu sonuçlarla bağlayıcının PP-i katkısıyla birlikte sertleştiği (fiziksel) ve PP-i katkısının yüksek sıcaklıklarda meydana gelen kalıcı deformasyonu azaltabileceği ortaya konmuştur.

Anahtar sözcükler: bitüm, iyon ışını, modifikasyon, geri dönüştürülmüş polipropilen

Giriş

Bitüm, sıcaklık ve yükleme süresine bağlı olarak farklı deformasyon davranışları gösteren viskoelastik (orta sıcaklık koşullarında) yapıda bir malzemedir. Viskoelastisite, yük altında meydana gelen deformasyonun, yükün kalkmasıyla birlikte bir kısmının geri döneceğini (elastik) ve diğer kısmının ise kalıcı (viskoz) olacağını ifade etmektedir. Sıcaklık artışıyla birlikte, bitüm viskoz sıvı davranış göstermeye başlar, meydana gelen deformasyonun elastik bileşeni azalır ve bu şekilde kalıcı deformasyon oluşur. Dolayısıyla, bitümün bağlayıcı

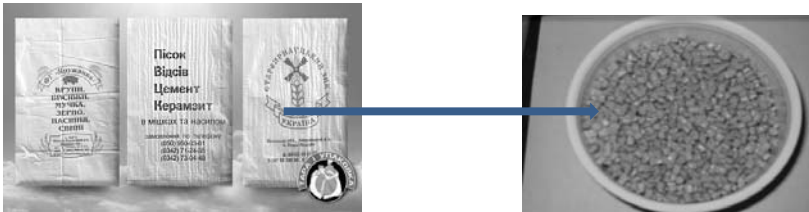
olarak kullanıldığı esnek üstyapılarda, yüksek sıcaklık koşulları altında (yük etkisiyle birlikte) tekerlek izi gibi deformasyonlar meydana gelmektedir (Read ve Whiteoak, 2003). Esnek üstyapı kaplamalarında meydana gelen kalıcı deformasyonların azaltılması amacıyla başta polimerler olmak üzere çeşitli katkı malzemeleri kullanılmaktadır. (Isacson ve Lu, 1999; Airey, 2002). Stiren butadien stiren (SBS), etilen vinil asetat (EVA), Polipropilen (PP) vb. Ancak, son yıllarda, polimer ve diğer katkı malzemelerinin bitüm içerisinde sağladıkları performansların atık, geri dönüştürülmüş plastikler gibi daha ekonomik malzemelerle sağlanmasına ilişkin çalışmalar giderek artmaktadır. (Garcia-Morales ve diğ., 2004; Polacco ve diğ., 2005; Habib ve diğ., 2011; Ouyang ve diğ., 2012). Buna karşın, geri dönüştürülmüş polimerler, bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak kullanıldıklarında bitüm ile bağlayıcı arasında iyi bir etkileşim sağlanmamaktadır (Gad ve diğ., 2010).

Bu nedenle, çalışmada, bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak seçilen geri dönüştürülmüş atık polipropilen, iyon ışını yöntemiyle işlenmiş ve bu sayede polimer yüzeyinde bitümlerle etkileşime girebilecek serbest radikaller meydana getirilmiştir. İyon ışını işlemi görmüş atık polipropilen (PP-i) katkısı, çalışma kapsamında B 160/200 penetrasyonlu bitüm içerisine farklı oranlarda ilave edilerek PP-i katkılı bitümler elde edilmiştir. Modifiye bitümlerin hazırlanmasının ardından, saf ve PP-i katkılı bitümler üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, düktilite, dönel viskozite ve dinamik kayma reometresi (DSR) deneyleri gerçekleştirilmiş, bu sayede PP-i katkısının bitümlü bağlayıcılar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Deneyel Çalışmalar

Kullanılan Malzemeler

Tüpraş A.Ş.'den temin edilen B160/220 penetrasyona sahip bitüm tüm deney programı için bağlayıcı malzeme olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan geri dönüştürülmüş atık PP polimeri, Ukrayna'daki Roksana firmasından alınmıştır. Malzeme, Şekil 1'de gösterildiği üzere çuvalların geri dönüştürülme işleminden elde edilmekte olup, erime sıcaklığı yaklaşık 170°C olarak verilmektedir.



Şekil 1 Geri dönüştürülmüş PP.

İyon Işınması Yöntemi

İyon ışınması yöntemi, radyasyon kaynağının iletmiş olduğu enerjiyle, bir malzemedeki molekül veya atom yapılarının elektronlarını serbest hale getirmesi işlemidir. Bu işlemde uygun radyasyon miktarının polimerlerin yüzeyine çarptırılmasıyla, polimer malzemelerin ısı duyarlılığı, yaşlanma gibi termomekanik ve gerilme çatlak dayanımı gibi yapısal özelliklerinde iyileşmeler sağlanabilmektedir. Şekil 2'de, çalışma kapsamında, iyon ışınması

yönteminin gerçekleştirildiği 18-24°C arası sıcaklık koşullarına sahip odacığın görüntüsü verilmiştir. Çalışmada, atık PP, standart kaplara konularak otomatik kontrol sistemi altında, $3 \times 10^7 - 8 \times 10^7 / \text{cm}^3$ yoğunluğunda 10 saat süreyle iyon ışınlamasına tabi tutulmuştur. İyon ışınması yöntemi laboratuvar ortamında gerçekleştirildiğinden, tam olarak katkı malzemesi üzerindeki maliyetini bildirmek gerçekçi olmayacağı için, araştırmada ekonomik bir çalışmaya yer verilmemiştir.



Şekil 2 İyon ışınlama odası.

Numunelerin Hazırlanması

Granüler halinde temin edilen PP-i katkı, modifikasyon işlemleri için öğütücü makine yardımıyla ufalanmış ve bu ufalanan parçalar 0.6 mm elekten geçirilmiştir. B 160/220 penetrasyonlu sahip bitüm 170 °C'ye ayarlı etüv ile 120 dakika süreyle ısıtıldıktan sonra karıştırıcıya aktarılmıştır. Karıştırıcı 500 dev/dak hızda çalışırken 15 dakika süreyle toz haline getirilen PP-i katkı malzemesi farklı oranlarda (%1, %3, % 5, %7, %9) bitüme ilave edilmiştir. İlave işlemlerinin tamamlanmasının ardından karıştırıcı hızı 1300 dev/dak hıza yükselttilirerek 60 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. İyon ışınması yöntemiyle PP-i yüzeylerinde oluşturulan serbest radikallerin, iyonların ve fonksiyonel grupların bitüm ile kimyasal reaksiyona girmesini ve kuvvetli bağların oluşmasını sağlamak amacıyla karıştırıcıdan alınan modifiye bitüm 60 dakika süreyle 170°C sıcaklıktaki etüvde bekletilmiştir. Bu işlemin ardından, cam beherlere aktarılan bitüm üzeri alüminyum folyo ile kaplanmış ve çeşitli deneylerde kullanılmak üzere bu şekilde muhafaza edilmiştir. Deney programında kullanılan saf ve çeşitli katkı oranlarına sahip bitümler aşağıdaki gibi kodlandırılmıştır;

- Saf bitüm – “B”;
- Saf bitüm + 1% PP-i – “B-1-PP-i”;
- Saf bitüm + 3% PP-i – “B-3-PP-i”;
- Saf bitüm + 5% PP-i – “B-5-PP-i”;
- Saf bitüm + 7% PP-i – “B-7-PP-i”;
- Saf bitüm + 9% PP-i – “B-9-PP-i”;

DeneySEL Program

Geleneksel Test Yöntemleri

Saf ve modifiye bitümler üzerinde geleneksel test yöntemleri olarak da adlandırılan yumuşama noktası, penetrasyon ve düktilite deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu sayede bağlayıcıların fiziksel özellikleri hakkında çeşitli bilgiler elde edilmiştir. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak her bir bağlayıcıya ait penetrasyon indeksi (PI) değerleri hesaplanmıştır. PI bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini gösteren bir parametredir. PI değerinin yüksek olması, bitümün sıcaklık değişimlerinden daha az etkilendiği anlamına gelmektedir. PI, Shell Bitumen Handbook'da (Read ve Whiteoak, 2003) tavsiye edilen ve aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (1)$$

Burada Pen_{25} , 25 °C sıcaklıkta yapılan penetrasyon değerini, SP ise yumuşama noktası değerini göstermektedir.

Dönel Viskozite Deneyi

Dönel viskozite deneyiyle bağlayıcıların viskozite değerlerinin yanı sıra işlenebilirlik ve pompalanabilirlik gibi özellikleri de belirlenebilmektedir. Çalışmada, 135 ve 165 °C’de iki ayrı viskozite deneyi saf ve PP-i modifiye bitümlere uygulanmış, her bir bitümün viskozite değeri tespit edilmiştir. Ayrıca, bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları Excel 2010 programı kullanılarak viskozite değerleri yardımıyla hesaplanmıştır.

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

DSR deneyi, esnek üstyapının ilk dönemlerinde yüksek servis sıcaklıklarında meydana gelen tekerlek izi bozulmalarına karşı bağlayıcının göstereceği direnci saptamaktadır. DSR deneyi ile bitümlü bağlayıcının viskoelastik özellikleri, uygulanan salınım (oscillation) hareketine karşı bağlayıcı davranışının değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004).

DSR deneyleri sonucunda elde edilen tekerlek izi parametresi yardımıyla, bitümlü bağlayıcıların yüksek performans sınıflarının (PG) belirlenmesi mümkündür. Araştırmada, Anton Paar SmartPave cihazı ile bağlayıcı olarak kullanılan saf ve PP_R katkı bitüm numunelerin farklı sıcaklık ve frekansta reolojik özelliklerine ilişkin kompleks kayma modülü, faz açısı ve tekerlek izi parametreleri belirlenmiştir. Tablo 1’de DSR testlerinde kullanılan parametreler yer almaktadır.

Tablo 1 DSR deney parametreleri.

Parametreler		
Yükleme türü	Deformasyon kontrollü	
Frekanslar, Hz	1 Hz (6 km/sa), 0.72115 Hz (45 km/sa), 1.9355 Hz (120 km/sa)	
Sıcaklıklar, °C	10, 15, 20, 25	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75
Plaka çapı, mm	8	25
Plakalar arası mesafe, mm	2	1

Deney Sonuçları

Geleneksel Deney sonuçları

Saf ve PP-i katkı bağlayıcılara ait fiziksel deney yöntemleri olarak da adlandırılan geleneksel deney sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, katkı miktarının artmasıyla birlikte penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin ise arttığı görülmektedir. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerindeki bu değişim, bağlayıcıların PP-i katkısıyla sertleştiğini ifade etmektedir. Ayrıca, PP-i polimerinin meydana getirdiği sertleşme etkisi, katkı oranının artmasıyla birlikte daha da belirgin hale gelmektedir. Buna göre, Saf bitümün 195.5 dmm olan penetrasyon değeri %5 PP-i ilavesiyle 82.2 dmm

değerine, %9 PP-i ilavesiyle ise 77.0 dmm değerine düşmektedir. Bağlayıcılara ait penetrasyon indeksinin (PI), genel olarak katkı oranının artmasıyla birlikte arttığı tespit edilmiştir. Buna göre, %7-9 PP-i katkılı bağlayıcıların PI'lerinin 2,00 civarında olduğu görülmektedir. PI değerlerinde meydana gelen bu artış, bitümün ısıya karşı olan duyarlılığının azaldığını, modifiye bitümün saf bitüme oranla daha geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Bitümün kopmadan uzama yeteneğini ifade eden düktilite değerlerinin ise katkı miktarının artmasıyla birlikte azaldığı belirlenmiştir.

Tablo 2 Saf ve PP-i katkılı bitümlerin fiziksel deney sonuçları.

Özellikler	Bağlayıcılar					
	B	B-1-PP-i	B-3-PP-i	B-5-PP-i	B-7-PP-i	B-9-PP-i
Penetrasyon (25 °C; 0.1mm)	195.5	187.4	92.5	82.2	80.9	77.0
Yumuşama Noktası (°C)	38.7	40.1	41.7	48.9	50.1	58.9
Duktilite (25 °C; cm)	-0.73	0.37	0.11	0.09	2.12	2.00
Penetrasyon indeksi (PI)	103	97	87	86	82	79

Dönel Viskozite Deney Sonuçları

Saf ve PP-i katkılı bağlayıcılara ait dönel viskozite değerleri ve bu değerlerle hesaplanan modifikasyon indeksi (η), karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 3'de bir arada verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, PP-i ilavesiyle bitümün viskozite değerlerinin arttığı görülmektedir. Buna göre %9 PP-i katkı ilavesiyle, 135 °C'de 202.5 cP olan saf bitümün viskozite değeri 800 cP'a, 165°C'de ise 65.5 cP'dan 132.5 cP'a yükseltmiştir. Viskozite değerlerinde meydana gelen artış viskozite indislerinden de (η) takip edilebilmektedir. Buna göre, 135 °C'de, B-9-PP-i bağlayıcısının viskozite değeri, saf bitümüne oranla yaklaşık 4 kat büyüktür. Excel 2010 programı yardımıyla hesaplanan, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında da katkı yüzdesinin artmasıyla birlikte artışların meydana geldiği görülmektedir. Buna göre, saf bitümün karıştırma sıcaklığı 135-142 °C, sıkıştırma sıcaklığı 122-128 °C, B-5-PP-i katkılı bitümün karıştırma sıcaklığı 154-159 °C, sıkıştırma sıcaklığı ise 143-148 °C olarak hesaplanmıştır. Tüm bağlayıcılar için hesaplanan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının uygulamalarda kullanılmaya uygun aralıkta olduğu görülmektedir.

Tablo 3 Dönel viskozite deneyi sonuçları.

Bağlayıcı Türü	Dönel Viskozite (cP)		$\eta_{\text{modifiye}} / \eta_{\text{saf}}$		Sıcaklık Aralıkları (°C)	
	135 °C	165 °C	135 °C	165 °C	Karıştırma	Sıkıştırma
B	202.5	65.5	1	1	135-142	122-128
B-1-PP-i	287.5	82.5	1.42	1.26	144-149	131-137
B-3-PP-i	405	97.5	2.00	1.49	152-157	142-147
B-5-PP-i	490	117.5	2.42	1.79	154-159	143-148
B-7-PP-i	397.5	117.5	1.96	1.79	152-158	140-146
B-9-PP-i	800	132.5	3.95	2.23	159-163	151-154

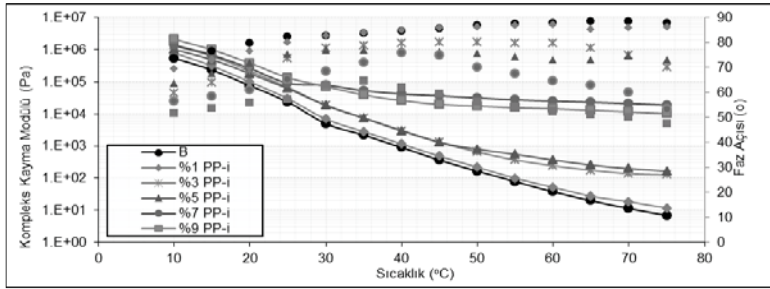
Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

Şekil 3-5'de Farklı frekanslara ait (sırasıyla 0,1 Hz, 0,72 Hz, 1,94 Hz) DSR deneyleri sonucunda saf ve katkılı bağlayıcıların elde edilen kompleks kayma modülü ve faz açısı değerlerinin sıcaklıkla değişimlerine ilişkin grafikler verilmiştir. Kompleks kayma modülü,

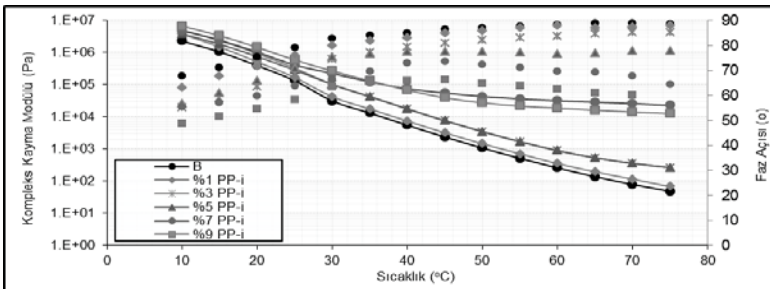
kayma gerilmelerine karşı bağlayıcının direncini ifade etmekte, bu değerin yüksek olması bağlayıcının gerilmelere karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. İlgili grafikler incelendiğinde (Şekil 3-5), düşük, orta ve yüksek trafik hız koşullarını ifade eden her üç frekansta da PP-i katkılı bitümlerin kompleks kayma modülü değerlerinin saf bitümün değerlerine göre çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, kompleks kayma değerlerinde meydana gelen bu artış, katkı oranının artmasıyla birlikte artmaktadır. Buna göre özellikle yüksek sıcaklık bölgesinde, %3 ve %5 PP-i katkılı bitümlerin kompleks kayma modülü değerlerinin saf ve %1 PP-i katkılı bağlayıcının değerlerine göre oldukça yüksek olduğu, bununla birlikte %7 ve %9 PP-i katkılı bitümlerin ise tüm bağlayıcı türlerinden daha yüksek kompleks kayma dayanımına sahip olduğu görülmektedir.

Faz açısı değeri meydana gelecek deformasyonun elastik ve viskoz bileşenlerini ifade etmekte, buna göre, 90° tam viskoz davranışı, 0° ise tam elastik davranışı göstermektedir. Saf ve PP-i katkılı bağlayıcıların faz açısı değerleri incelendiğinde bazı düzensizliklerle birlikte bu değerin katkı oranının artmasıyla birlikte azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, PP-i katkısıyla bağlayıcılarda meydana gelecek deformasyonun bir kısmının geri döneceğini göstermektedir.

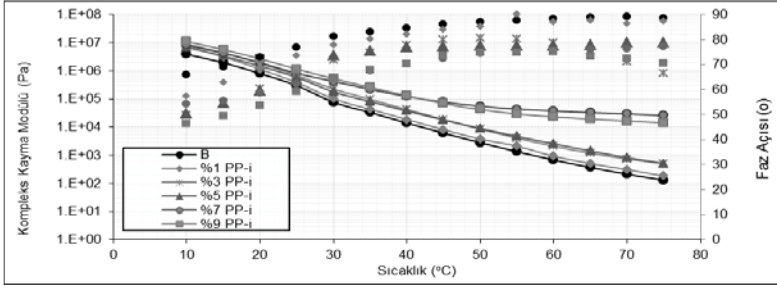
Şekil 6-8'de ise farklı frekanslarda bağlayıcılara ait tekerlek izi parametrelerinin sıcaklık ile değişim grafikleri verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi, PP-i katkısının artmasıyla hem kompleks kayma modülünde hem de faz açısında meydana gelen iyileşmeler tekerlek izi parametrelerini de olumlu şekilde etkilemektedir. Dolayısıyla, her üç frekansta da katkı miktarının artmasıyla sürekli olarak tekerlek izi parametrelerinde bir artış meydana gelmektedir. Bu sonuç, PP-i katkısının bitüm içerisinde katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla yüksek sıcaklıklarda ve ağır trafik altında meydana gelen tekerlek izi bozulmalarının önüne geçilebileceğini ortaya koymaktadır.



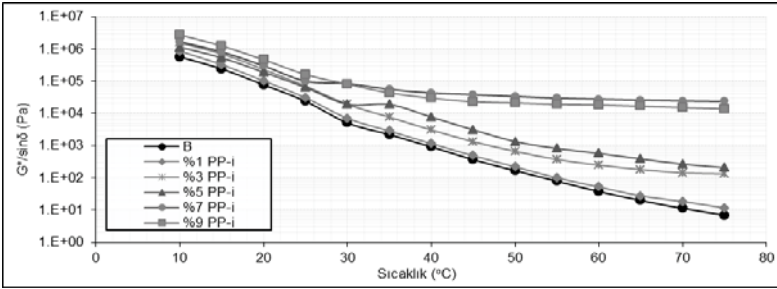
Şekil 3 Saf ve PP-i katkılı bitümlerin G^* ve δ değerleri (0.1Hz).



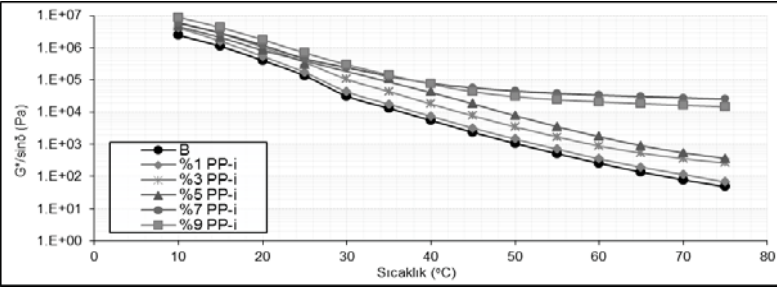
Şekil 4 Saf ve PP-i katkılı bitümlerin G^* ve δ değerleri (0.72Hz).



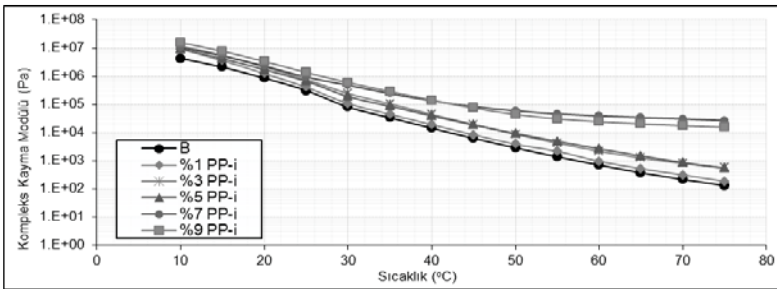
Şekil 5 Saf ve PP-i katkıli bitümlerin G^* ve δ değerleri (1.94 Hz).



Şekil 6 Saf ve PP-i katkıli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri (0.1Hz).



Şekil 7 Saf ve PP-i katkıli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri (0.72Hz).



Şekil 8 Saf ve PP-i katkıli bitümlerin $G^*/\sin\delta$ değerleri (1.94 Hz).

Sonuçlar

Çalışma kapsamında PP-i polimerinin bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri geleneksel test yöntemleri, RV, DSR incelenmiştir. Geleneksel test yöntemlerine göre katkı miktarının artmasıyla birlikte penetrasyon değerlerinde azalma ve yumuşama noktası değerlerinde ise artma meydana gelmiştir. Bu iki sonuç, bitümün PP-i katkısı ile fiziksel olarak sertleştiğini ortaya koymaktadır. PI değerlerine göre PP-i katkısı bitümlü bağlayıcıların ısı hassasiyetini azaltmaktadır. Buna göre PP-i katkılı bitümlerin uygun kullanım sıcaklıkları genişlemiştir. RV deneyi sonucunda, PP-i katkısının bitümün viskozite değerlerinin önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Viskozite değerlerindeki artış, penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinde tespit edilen sertleşme etkisini doğrulamaktadır. Ayrıca, RV deneyleri sonucunda hesaplanan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tüm bağlayıcılar için 165 °C'yi aşmadığı ve bu değerın uygulamalar için uygun bir sıcaklık değeri olduğu belirlenmiştir.

Farklı frekans DSR deney sonuçlarına göre bağlayıcıların PP-i ilavesi ile kompleks kayma modülü değerinin arttığı ve faz açısı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Kompleks kayma modülündeki artış, bitümün kayma gerilmelerine karşı direncinin arttığını ifade ederken faz açısı değerlerindeki azalma, esnek üstyapıda meydana gelecek kalıcı deformasyonun azalması anlamına gelmektedir. Bu sonuç, aynı zamanda yine DSR deneylerinden elde edilen tekerlek izi parametreleriyle de görülmektedir. PP-i katkı miktarının artmasıyla birlikte DSR parametrelerinde meydana gelen iyileşmeler düşük, orta ve yüksek trafik hızları için benzerdir. Bu sonuç, özellikle ağır trafik yükleri altında meydana gelen tekerlek izi bozulmaları açısından önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (İzmir, Türkiye) ve Ukrayna Ulusal Bilimler Akademisi (Kiev, Ukrayna) kurumlarının beraber yürütmekte oldukları ve TÜBİTAK tarafından desteklenen 110M400 Nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynaklar

Airey, G. D. (2002) Rheological Evaluation Of Ethylene Vinyl Acetate Polymer Modified Bitumens. Construction and Building Materials, 16(8), pp 473-487.

Bahia, H.U. and Anderson, D.A. (1995) Strategic Highway Research Program Binder Rheological Parameters: Background and Comparison with Conventional Properties, Transportation Research Record 1488, TRB, National Research Council, Washington DC, pp. 32-39.

Gad, Y. H., Magida, M. M. and El-Nahas, H. H. (2010) Effect of Ionizing Irradiation on the Thermal Blend of Waste Low Density Polyethylene/Ethylene Vinyl Acetate/Bitumen for Some Industrial Applications. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 16(6), pp. 1019-1024.

Garcia-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martinez-Boza, F., Mackley, M. R., and Gallegos, C. (2004) The Rheology of Recycled EVA/LDPE Modified Bitumen. Rheologica Acta, 43(5), pp. 482-490.

Habib, N. Z., Kamaruddin, I., Napiah, M., and Isa, M. (2011) Rheological Properties of Polyethylene and Polypropylene Modified Bitumen. International Journal Civil and Environmental Engineering, 3 (2), pp 96-100.

Isacson, U., and Lu, X. H. (1999) Laboratory Investigation of Polymer Modified Bitumens. Journal of the Association of Asphalt Paving Technology, Vol 68, pp. 35-63.

Kennedy T.W., Huber G.A., Harrigan E.T., Cominsky R.J., Hughes C.S., Quintus H.V. and Moulthrop J.S. (1994) Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, SHRP-A-410, National Research Council, Washington DC, USA.

McGennis, R.B., Shuler, S. and Bahia, H.U. (1994) Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods, National Asphalt Training Center Demonstration Project 101, Publication No. FHWA-SA-94-069, Asphalt Institute, Lexington, USA.

Ouyang, C. F., Gao, Q., Shi, Y. T., and Shan, X. Q. (2012). Compatibilizer in Waste Tire Powder and Low-Density Polyethylene Blends and the Blends Modified Asphalt. Journal of Applied Polymer Science, 123(1), pp. 485-492.

Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J., and Zanzotto, L. (2005) Asphalt Modification with Different Polyethylene-Based Polymers. European Polymer Journal, 41(12), pp. 2831-2844.

Read, J., and Whiteoak, D., (2003). The Shell Bitumen handbook (5th ed). Thomas Telford, London, UK.

Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E. (2004) Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, Asphalt Technology Program, West Virginia University, Morgantown, 109p.

