

Bentonit Kullanımının Bitümlü Bağlayıcıların Reolojik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Erkut YALÇIN

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Tel: (424) 2370000-5422

E-Posta: erkutyalcin@firat.edu.tr

Mehmet YILMAZ

İnşaat Mühendisliği Bölümü ELAZIĞ

Tel: (424) 2370000-5421

E-Posta: mehmetyilmaz@firat.edu.tr

Baha Vural KÖK

Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Tel: (424) 2370000-5418

E-Posta: bvural@firat.edu.tr

M. Ertuğrul ÇELOĞLU

İnşaat Mühendisliği Bölümü ELAZIĞ

Tel: (424) 2370000-5431

E-Posta: meceloglu@firat.edu.tr

Öz

Bitümlü bağlayıcılar ve karışımların özelliklerini iyileştirerek karayolu esnek üstyapılarının servis ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bitümlü bağlayıcı ve karışımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla genellikle polimer veya doğal asfalt katkı maddeleri kullanılmaktadır. Son dönemde kil türevi malzemelerin bitüm modifikasyonunda kullanımı üzerine çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda ülkemizde bol miktarda bulunan Bentonit'in bitüm modifikasyonunda kullanımı araştırılmıştır. Ana bileşeni montmorillonit kil minerali olan hidro alümina silikatlar bentonit olarak isimlendirilir. Ticari anlamda ise suyla temasa geçince şişebilen, asitle aktifleştirilebilen, geniş yüzey alanına sahip maddeler bentonit kili olarak bilinirler. Dünya bentonit rezervlerinin %20'sine sahip olan ülkemizdeki bentonit sahaları Biga-Gelibolu yarımadası, İç Anadolu, Kelkit vadisinin kuzeyi, Doğu Karadeniz, Malatya-Elazığ bölgeleridir. Bentonitin ucuz ve kolay bulunabilir olması nedeniyle endüstride pek çok kullanım alanı mevcuttur. Bentonit kilinin bileşim ve yapısına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklar, endüstriyel uygulamalarını da farklı kılmaktadır. Çalışmada ana bağlayıcı olarak Batman rafinesinden temin edilen B 160/220 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Bentonit, üç farklı oranda saf bitüme ilave edilmiş ve 1 saat süreyle karıştırılmıştır. Elde edilen bentonit modifiyeli bitüm üzerinde penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri yapılmıştır. Ayrıca dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan bentonit ilavesi ile penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası değerlerinin arttığı, viskozite değerlerinin değişmediği tespit edilmiştir. Ayrıca bentonit kullanımı ile kompleks modülü değerleri artarken faz açısı değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Bitüm, Bentonit, Reoloji, Modifikasyon.

Giriş

Esnek kaplamalar genellikle bitümlü bağlayıcılar ve granüler malzemeden yapılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımlar farklı tip plentlerde bitüm ve agreganın ısıtılarak karıştırılma ve sıkıştırılmasıyla elde edilen karışımlardır (Huang, 1993).

Bitüm, geleneksel olarak suya karşı geçirimsiz tabaka oluşturmak, asfalt karışımlarda yapıştırıcı özelliğiyle agregaları bağlamak amacıyla kullanılan yüksek molekül ağırlığa sahip, yapısında çeşitli hidrokarbonlar ihtiva eden parlak siyah bir malzemedir. Bitümlü malzemeler ham petrolün rafinajı ile elde edilmekte ve petrol rezervinin gün geçtikçe azalmasından dolayı maliyeti sürekli artmaktadır. Esnek kaplama uygulamalarında kullanılan bitümlü bağlayıcıların miktarının azalması yönünde yapılan çalışmalar, toplam maliyetleri azaltacak bunun yanı sıra fosil kaynaklı olan bu malzemenin kullanılmasından doğan çevresel sorunlar açısından fayda sağlamış olacaktır (Zare Shahabadi ve diğ., 2010).

Tekrarlı araç yüklemelerinin etkisi altında hem tekerleğin altında hem de kaplama yüzeyinde basınç gerilmeleri, tekerleklerin asfalt yüzeyine değdiği bölgelerin yanlarında ve altında, asfalt tabakasının en düşük yüzeyinde ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Moghadas Nejad ve diğ., 2014). Kaplama malzemelerinde görülen kalıcı deformasyonlar tekrarlı yüklerle giderek artmakta ve tekerleklerin kaplama yüzeyine değdiği kısımlarda, yan kısımlarda ise kabarmalar şeklinde görülmektedir (Azari and Mohseni, 2013).

Günümüzde bitümlü malzemelerin termal ve yansıma çatlaklarına karşı direncini arttırmak, kalıcı deformasyonu ve kusmayı azaltmak, bitümün yaşlanmasından dolayı kaplamanın sertleşmesini geciktirmek amacıyla mineral, organik, doğal ve endüstriyel katkıları kullanılmaktadır. Fakat, çeşitli ülkelerdeki coğrafi şartlar ve mevcut olanaklar göz önüne alınarak, o ülkeye uygun modifiye edici katkıları seçilmelidir. Polimerler ve öğütülmüş araç lastiği gibi katkıların yapılan çalışmalarda bitümün performansını arttırdıkları bilinmektedir. Fakat katkı malzemesinin tercihinde sağlayacağı performans aranan tek kriter değildir. Sağlayacakları performansın yanı sıra ekonomik katkısı, üretim koşulları ve çevresel olarak uygunluğu gibi faktörlerde katkı malzemesinin kullanılmasında göz önünde bulunmaktadır. Bu gibi faktörler değerlendirildiğinde endüstriyel olarak üretilen ve kullanılan katkı malzemelerine alternatif olabilecek doğal malzemelerin araştırılması büyük önem arz etmektedir. Esnek kaplamalar üzerine yapılan çalışmalarda bitümlü bağlayıcılarla birlikte birçok farklı doğal malzemenin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Katkı malzemesi olarak değerlendirilecek doğal kaynağın miktarı da bu gibi malzemelerin kullanılabilirliğini araştırmaya değer kılabacak önemli bir faktördür. Bentonit dünyanın bazı bölgelerinde ve özellikle Ülkemizde de bolca bulunabilen doğal kaynaklardanır (Ziari ve diğ., 2014).

Türkiye, dünyada ciddi miktarda bentonit kaynağına sahip olan ülkelerden biridir. Ülkemizde büyük miktarda bentonit kaynağının mevcut olması ve diğer katkı malzemeleriyle karşılaştırıldığında düşük maliyeti göz önüne alındığında bitüm modifikasyonunda kullanımının değerlendirilmesi çalışmamızın amacı olmaktadır.

Kolloidal alüminyum hidrosilikat topluluğu olarak tanımlanabilecek bentonitin büyük bir bölümü montmorillonit grubu kil minerallerinden oluşmuş ve genellikle baydellit ihtiva eden bir kayacıdır. Montmorillonit ve baydellit oranı %85'in üzerinde olan hammaddeler bentonit olarak değerlendirilebilmektedir. Bentonit partikülleri çok ince olduğundan su ile karıştırdığı zaman şişme özelliği göstermektedir (D.P.T., 1992).

Bentonit rezervleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Eldeki verilere göre dünya bentonit kaynaklarının toplamı 2 milyar tonun üzerinde olduğu tahmin edilmektedir. Bunun %43'ü Amerika Birleşik Devletleri'nde, %20'si Türkiye'de geri kalanı ise diğer ülkelerde yer almaktadır (D.P.T., 2001).

Yapılan bir çalışmada, saf bitüme bentonit eklenerek yumuşama noktası, vizkozite ve düktilite gibi standart bitüm deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca yaşlandırılmış modifiye bitüme kirış eğme reometresi (BBR) deneyi uygulanmış olup düşük sıcaklıkta bitümün reolojik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği görülmüştür (Shahabadi ve diğ., 2011).

Nanofil-15 ve cloisite-15A nanokillerinin, bitüm reolojik özellikleri üzerindeki etkisini Jahromi ve Khodaei (2009) incelemiştir. Kil'in uygun ve etkili karıştırılması halinde, nanokile oluşan düşük içerikli modifiyeler bitümün özelliklerinin geliştirebilirler. Nanokil, modifiye bitümün sertliğini ve yaşlanmasını, sünekliğini yumuşama noktasını ve reolojik özelliklerini geliştirmiştir. Bitümün penetrasyonunu azaltacaktır. DSR deney sonuçlarına göre sıcaklığın azalması ile kompleks kayma modülü (G^*) değerinin arttığı görülmektedir (Sadeghpour ve diğ., 2010).

You ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada, styrene-butadiene-styrene (SBS), sodium montmorillonit ve montmorillonit ile oluşan modifiye bitümlerin etkileri değerlendirilmiş ve nanokil bitümün viskozitesini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bitüme katkı ilavesi ile bitümün faz açısı ve kompleks kayma modülü artmıştır. Saf bitüme SBS eklenmesi ile daha iyi bir etki sağladığı belirtilmiştir (You ve diğ., 2011). Galooyak ve ekibi tarafından yapılan çalışmada bitüme nanokil eklenmesinin bitümün özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür (Galooyak ve diğ., 2010).

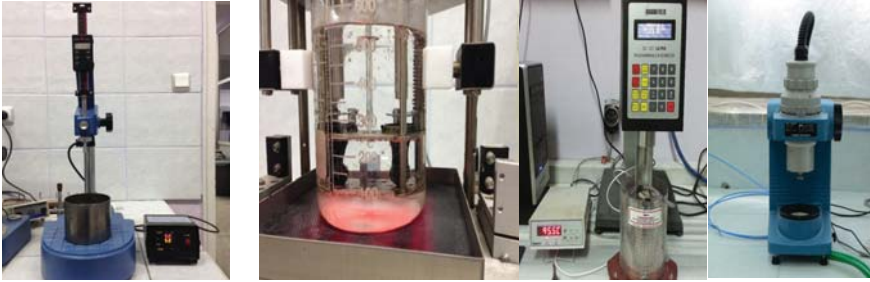
Ziari ve ekibi tarafından yapılan çalışmada bentonit ile hazırlanan asfalt karışımların, saf bitümle hazırlanan karışımlara göre yolculma ömrünün ve elastik modülünün daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Ziari ve diğ., 2014).

Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılan bağlayıcı TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı asfalt çimentosudur. Bitüm modifikasyonunda ise Karakaya Bentonit San. ve Tic. A.Ş. şirketinden temin edilen bentonit kullanılmıştır. Bağlayıcının bentonit ile modifiyesi işleminde, bağlayıcıya ağırlığınca %5-15-25 oranlarında ilave edilerek karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi, 1000 devir/dakika hıza sahip bir karıştırıcı ile 180 °C sıcaklıkta orjinal bitüm ve katkı malzemesinin 60 dakika süreyle karıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hızı 0-2000 devir/dakika aralığında ayarlanabilen hassas karıştırıcı (Şekil 1) kullanılmıştır. Bu karıştırıcı ile 3 farklı kombinasyonda elde edilen bağlayıcılara, yumuşama noktası (EN 1427), penetrasyon (EN 1426), dönel viskozite (ASTM D4402) ve dinamik kayma reometresi (AASHTO TP5) deneyleri uygulanmıştır. Deney aletleri Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 1 Modifiye bitüm karıştırma cihazı ve kullanılan bentonit.



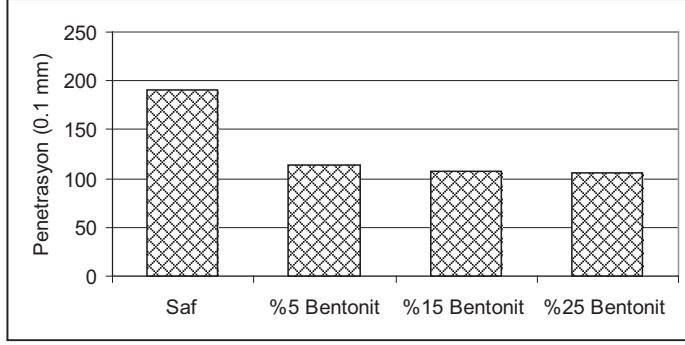
Şekil 2 Penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve DSR deney aletleri.

Deneysel Çalışma

Bu çalışmada bağlayıcıların TS 1081 EN 12591'e göre penetrasyon sınıflarına uygunluğunu belirlemek amacıyla geleneksel deneyler penetrasyon, yumuşama noktası, yüksek sıcaklıklarda işlenebilirliğini belirlemek amacıyla dönel viskozimetre (RV), tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımlarını belirleyebilmek amacıyla DSR deneyleri yapılmıştır.

Penetrasyon Denev Sonuçları

Bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere en düşük penetrasyon değerine %15 ve %25 bentonit ile modifiye edilen bitümler, en yüksek penetrasyon değerine ise saf bağlayıcı sahip olmuştur.

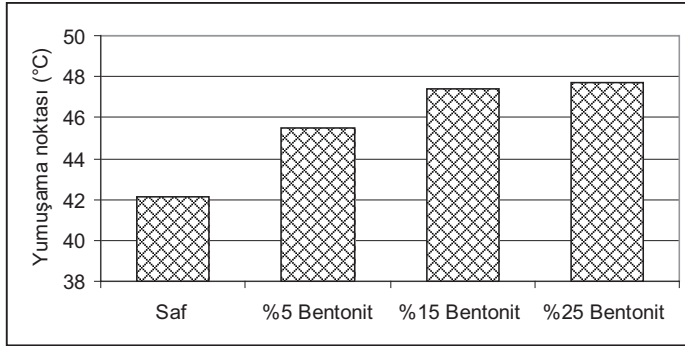


Şekil 3 Bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin bentonit içeriği ile değişimi.

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere katkı kullanımı ile saf bağlayıcıya göre (191 penetrasyon) penetrasyon değerleri azalmış dolayısıyla bağlayıcıların kıvamı artmıştır. Katkı içeriği arttıkça penetrasyon değerleri düzenli olarak azalmıştır. %5 oranında bentonit kullanımı ile penetrasyon değeri saf bağlayıcıya göre %67,9 , %15 bentonit içeren bağlayıcıda %76,4 ve %25 oranında bentonit içeren bağlayıcıda ise %78,9 oranında azalmıştır.

Yumuşama Noktası Denev Sonuçları

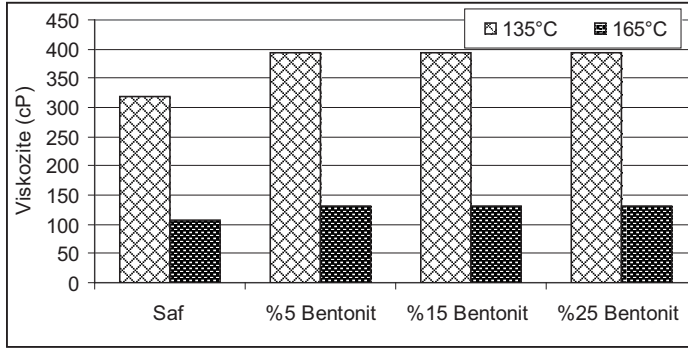
Bağlayıcılara uygulanan yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4'te görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere en yüksek yumuşama noktası değerine %25 bentonit modifiyeli bitümün, en düşük değere ise saf bağlayıcının sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı içeriğinin artması ile yumuşama noktası değerlerinin düzenli olarak arttığı belirlenmiştir. %5, %15 ve %25 bentonit kullanımı ile yumuşama noktası değerleri saf bitüme göre sırasıyla %8,1; %12,7 ve %13,3 oranlarında artmıştır.



Şekil 4 Bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerinin bentonit içeriği ile değişimi.

Dönel Viskozimetre (RV) Deney Sonuçları

Bağlayıcılara 135°C ve 165°C sıcaklıkta uygulanan dönel viskozimetre deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5 Bağlayıcıların 135°C ve 165°C'deki viskozite değerlerinin bentonit içeriği ile değişimi

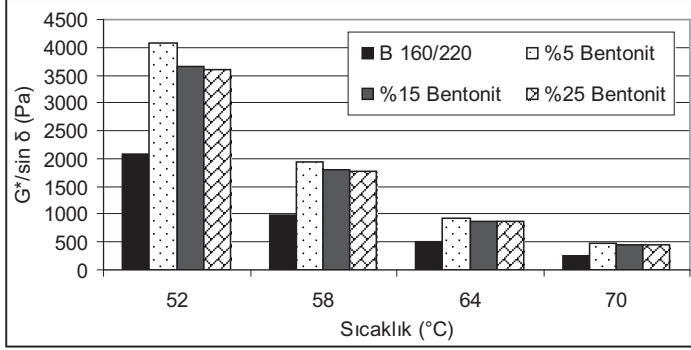
Şekil 5'te görüldüğü üzere katkı kullanımı ile viskozite değerleri artmıştır. Katkı içeriğinin artması ile viskozite değerlerinin sabit kaldığı görülmüştür. 135°C sıcaklıkta katkıların kullanımı ile viskozite değerleri saf bağlayıcıya göre %23,5 oranında artmıştır. 165°C sıcaklıkta katkı kullanımının viskozite değerleri üzerindeki etkileri 135°C sıcaklıktaki değişimle benzerlik göstermiştir. Viskozite deneylerinden elde edilen sonuçlar penetrasyon ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlarla uyum göstermiştir.

Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deney Sonuçları

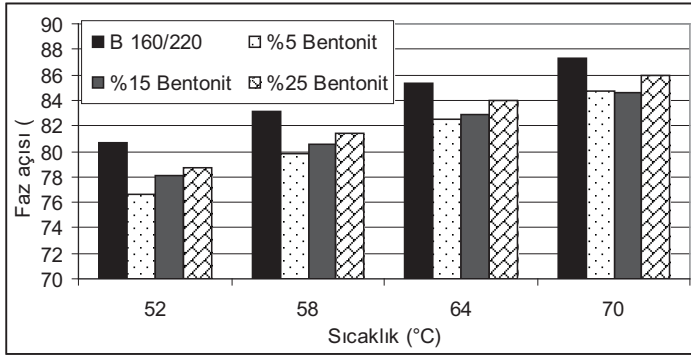
Çalışmada saf, %5, %15 ve %25 bentonit içeren bitümlere 4 farklı sıcaklıkta (52, 58, 64 ve 70°C) dinamik kayma reometresi deneyi uygulanmıştır. Numuneler, Superpave prosedürüne uygun olarak 10 rad/sn (1,59 Hz) frekansta deneye tabi tutulmuştur. Bağlayıcıların Superpave yöntemine uygun olarak tekerlek izi parametreleri (G^* , δ) belirlenmiştir. Tekerek izi parametrelerinin ve faz açılarının (δ) sıcaklık ve katkı türü ile değişimleri Şekil 6 ve Şekil 7'de görülmektedir. Ayrıca deney sonuçları ve yüksek sıcaklık performans seviyesi değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Bağlayıcıların DSR deney sonuçları

Bağlayıcı Türü	$G^*/\sin \delta$ (Pa)				Faz açısı (°)				Performans Seviyesi
	52°C	58°C	64°C	70°C	52°C	58°C	64°C	70°C	
B 160/220	2082	977,1	496,3	254,4	80,68	83,18	85,28	87,24	PG 52-Y
%5 bentonit	4087	1950	941,3	481,9	76,66	79,87	82,57	84,68	PG 58-Y
%15 bentonit	3660	1806	883,6	457	78,12	80,59	82,93	84,63	PG 58-Y
%25 bentonit	3612	1776	871,6	459,1	78,74	81,44	83,96	85,9	PG 58-Y



Şekil 6 Bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin bentonit sıcaklıkla değişimi.



Şekil 7 Bağlayıcıların faz açısı değerlerinin bentonit sıcaklıkla değişimi.

Şekil 6'da görüldüğü üzere katkı kullanımı ile modifiye bitümlerin tekerlek izi parametreleri saf bağlayıcıya göre önemli oranda artmıştır. İncelenen 4 bağlayıcı arasında bütün sıcaklıklarda en yüksek değere %5 bentonit içeren bağlayıcının, en düşük değere ise saf bağlayıcının sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum bentonit kullanımının bitümlü bağlayıcının tekerlek izi oluşumuna karşı dayanımını arttırdığını göstermektedir. 52°C sıcaklıkta %5, %15 ve %25 bentonit içeren bağlayıcıların $G^*/\sin \delta$ değerlerinin in saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1,96; 1,76 ve 1,73 kat yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bütün sıcaklıklarda %15 ve %25 bentonit içeren bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri üzerinde sıcaklığın etkisi değerlendirildiğinde sıcaklıkla değerlerin değişiminin bütün bağlayıcılar için yakın olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1'de görüldüğü üzere saf bağlayıcı 52°C sıcaklıkta Superpave şartname kriterini (1000 Pa) sağlarken, %5, %15 ve %25 bentonit içeren modifiye bitümler 58°C sıcaklıkta şartname kriterini sağlamıştır. Bu durum %5, %15 ve %25 bentonit kullanımının bitümlü bağlayıcının performans seviyesini 1 derece yükselttiğini göstermektedir.

Şekil 7 incelendiğinde faz açısı değerlerinin bentonit kullanımı ile azaldığı görülmektedir. Bütün sıcaklıklarda en düşük faz açısı değerlerine %5 bentonit içeren bağlayıcıların en yüksek faz açısı değerlerine ise saf bağlayıcının sahip olduğu belirlenmiştir. Tekerlek izi parametreleri ile birlikte faz açısı değerleri değerlendirildiğinde bentonit kullanımı ile bağlayıcıların daha elastik davranış sergileyeceği söylenebilmektedir.

Sonuçlar

Çalışmada bentonit, bitüm ağırlığına %5, %15 ve %25 oranlarında bağlayıcı modifikasyonunda kullanılmış, bağlayıcılara çeşitli deneyler uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

Penetrasyon deneyleri sonucunda katkı kullanımı ile bağlayıcıların penetrasyon değerlerinin azaldığı, dolayısıyla bağlayıcıların kıvamının arttığı belirlenmiştir. Penetrasyon değerleri üzerinde en etkin katkı içeriğinin %25 bentonit olduğu belirlenmiştir.

Yumuşama noktası deneyleri sonucunda her üç oranın da yumuşama noktası değerlerini arttırdığı, katkı içeriği arttıkça yumuşama noktası değerlerinin de sürekli arttığı tespit edilmiştir. Yumuşama noktası değerleri üzerinde de en etkin katkı içeriğinin %25 bentonit olduğu belirlenmiştir.

Viskozite deney sonuçlarından katkı kullanımı ile viskozite değerlerinin arttığı katkı içeriği arttıkça viskozite değerlerinin değişmediği belirlenmiştir.

Dinamik kayma reometresi deneylerinden bentonit kullanımı ile yüksek sıcaklık performans seviyesi değerlerinin PG 52'den PG 58'e yükseldiği belirlenmiştir. En etkin bentonit oranının %5 olduğu tespit edilmiştir. Bentonit içeren bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinin saf bağlayıcıya göre daha yüksek ve faz açısı değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum bentonit içeren bağlayıcıların tekerlek izi oluşumuna karşı daha dayanımlı olacaklarını ayrıca daha elastik davranış sergileyeceğini göstermektedir.

Bütün deney sonuçları dikkate alındığında bentonit kullanımının bitümlü bağlayıcıların reolojik özelliğini iyileştirdiği, özellikle DSR açısından en uygun oranın %5 olduğu tespit edilmiştir. Bentonitin bitümlü bağlayıcılarda katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin belirlenebilmesi için karışım özellikleri üzerindeki etkilerinin de incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca bentonitin bitümlü bağlayıcıların düşük sıcaklık özelliklerine etkilerinin de incelenmesi faydalı olacaktır.

Kaynaklar

Azari, H., and Mohseni, A. (2013). Effect Of Short-Term Conditioning and Long-Term Ageing on Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mixtures. Road Materials and Pavement Design Journal, 14(2), pp. 79–91.

D.P.T., (1992). Beşinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Sektörü Sanayi Hammaddeleri Özel İhtisas Komisyonu, Endüstri Mineralleri Ait Komisyon Raporu; Yay. No: D.P.T. 2300, O.İ.K., 407, Ankara, 204s.

D.P.T., (2001). Bentonit; Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik (Endüs. Hammad: Genel End. Miner.), Cilt IV, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 1-26.

Hasan. Z., Rezvan, B., Mahmoud, A. and Ali A. (2014). Evaluation of Fatigue Behavior of Hot Mix Asphalt Mixtures Prepared by Bentonite Modified Bitumen, Construction and Building Materials, 68, pp. 685-691.

Hasan, Z., Rezvan, B., Mahmoud, A. and Ali A. (2015). Investigation of Fatigue and Rutting Performance of Hot Mix Asphalt Mixtures Prepared by Bentonite-Modified Bitumen, Road Materials and Pavement Design, 16(1), pp. 101-118.

Huang, Y. H. (1993). Pavement Analysis and Design. Englewood Cliffs, NJ: Pearson Prentice Hall.

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, pp. 300-307.

Moghadas N., F., Azarhoosh, A. and Hamed, G. H. (2014). Effect of High Density Polyethylene on The Fatigue and Rutting Performance of Hot Mix Asphalt – A Laboratory Study. Road Materials and Pavement Design, 15(3), pp. 746–756.

Sadeghpour G., 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, pp. 300–307.

TS 118 EN 1426 (2002). Bitümler ve Bitümlü Bağlayıcılar–İğne Batma Derinliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12 s.

TS 120 EN 1427 (2002). Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama Noktası Tayini–Halka ve Bilya Metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12 s.

You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J. M., Roy, S., Odegard, G. M., Dai, Q. and Goh, S. W. (2011). Nanoclay Modified Asphalt Materials: Preparation and Characterization. Construction and Building Materials, 25, pp. 1072–1078.

Zare S., A., Shokuhfar, A. and Ebrahimi-Nejad, S. (2010). Preparation and Rheological Characterization of Asphalt Binders Reinforced with Layered Silicate Nanoparticles. Construction and Building Materials, 24, pp. 1239–1244.

