



**INVESTIGATION OF THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SBS  
MODIFIED BINDER PRODUCED BY DIFFERENT METHODS**

**Baha Vural KÖK\* , Mehmet YILMAZ, Necati KULOĞLU, Taner ALATAŞ**

*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ*

**Received/Geliş: 23.08.2010 Revised/Düzelme: 22.03.2011 Accepted/Kabul: 06.05.2011**

**ABSTRACT**

In this study 4% stiren-butadien-stiren (SBS) was added to base bitumen by 27 different mixing methods including 3 different mixing rates, 3 different mixing times and 3 different mixing temperatures and the rheological properties of these binders were investigated. In addition, binder experiments were carried out for pure bitumen with applying the same mixing methods. Softening point, viscosity and complex modulus values of binders, which were prepared with the methods explained above, were determined. Temperature, which is a variable in the mixing process, is observed as less influential compared to other two variables that are mixing time and mixing rate. Moreover, it is observed that pure binders are affected more than modified binders from mixing parameters. The difference mentioned above is attributed to the fact that pure binder experiences oxidation and evaporation with the mixing conditions, which are becoming harsher, compared to the modified binders do. With the interpretation of experimental data, it is clarified that mixtures, which have similar complex modulus characteristics, can be obtained with different combinations of mixing time, mixing rate and mixing temperature. It is found that viscosity and softening point values of modified binders have a linear relationship above 80 percent. Furthermore, this relationship is valid for complex modulus with softening point and viscosity values. However, correlations between the parameters are seen as more consistent with the slower mixing rates, lower mixing time and temperatures whilst various complex modulus values can be acquired with higher mixing values corresponding to same viscosity and softening point values.

**Keywords:** Bitumen, SBS, mixing procedure, rheological properties.

**DEĞİŞİK YÖNTEMLERLE HAZIRLANMIŞ SBS MODİFİYELİ BAĞLAYICILARIN REOLOJİK  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**ÖZET**

Bu çalışmada %4 stiren-butadien-stiren (SBS) saf bağlayıcıya üç farklı karıştırma hızı, üç farklı karıştırma süresi ve üç farklı karıştırma hızı olmak üzere 27 farklı karıştırma metodu ile ilave edilmiş ve bu bağlayıcıların reolojik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca katkı içermeyen saf bitüme aynı karıştırma yöntemleri uygulanarak bağlayıcı deneylerine tabi tutulmuştur. Bu yöntemlerle hazırlanan bağlayıcıların yumuşama noktası, viskozite ve kompleks modülü değerleri belirlenmiştir. Karıştırma prosedüründeki değişkenlerden biri olan sıcaklığın, karıştırma hızı ve karıştırma süresine göre daha az etkin olduğu belirlenmiştir. Saf bağlayıcının karıştırma parametrelerinden etkilenme oranının katkılı bağlayıcıya göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu farkın saf bağlayıcının karıştırma şartlarının ağırlaşması ile oksidasyona ve buharlaşmaya maruz kalması, katkılı bağlayıcının ise bu durumdan daha az etkilenmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Deneysel veriler neticesinde benzer kompleks modülüne sahip karışımların değişik karıştırma süre, sıcaklık ve hız değerlerinde elde edilebileceği belirlenmiştir. Katkılı bağlayıcının viskozite ve yumuşama noktası değerleri arasında ayrıca kompleks modülü ile yumuşama noktası ve viskozite değerleri arasında %80'in üzerinde lineer bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Düşük karıştırma süre, sıcaklık ve hızlarında parametreler arasındaki uyumun daha yüksek olduğu ancak yüksek karıştırma süre, sıcaklık ve hızlarında aynı viskozite veya yumuşama noktası değerlerine karşılık farklı kompleks modülü değerlerinin ortaya çıkabileceği belirlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Bitüm, SBS, karıştırma prosedürü, reolojik özellikler.

\* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: bvural@firat.edu.tr, tel: (424) 237 00 00 / 5418

## 1. GİRİŞ

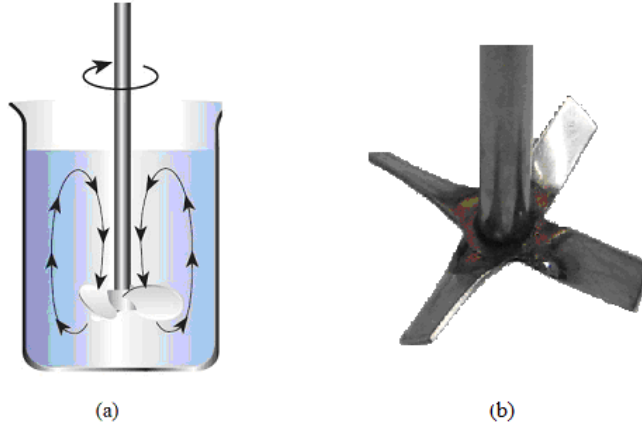
Kaplamada oluşacak bozulmaları engelleyerek kaplamanın servis ömrünü uzatmak amacıyla başlıca polimer kökenli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri içerisinde en çok Stiren-Butadien-Stiren (SBS) Blok Kopolimerleri kullanılmaktadır. Bitüm modifikasyonu, kayma direnci yüksek kaplama yüzeyleri elde etmek, karışımların mukavemet ve stabilitesini artırmak, karışımların yorulma direncini artırmak, düşük kaliteli agregaları kullanılabilir hale getirmek gibi amaçları taşımaktadır [1]. Yapılan birçok çalışma sonucunda SBS'nin karışımın düşük sıcaklıklarda çatlama, yüksek sıcaklıklarda tekerlek izi oluşumu ve yorulmaya karşı dayanımı arttırdığı belirlenmiştir [2-6]. Kök ve Kuloğlu [7], yaptıkları çalışmada bitümlü sıcak karışımlar içerisindeki en etkili SBS oranının ağırlıkça %4-5 olduğunu tespit etmişler, SBS modifiyeli bağlayıcının kalker kökenli agrega ile daha iyi mekanik özellikler sergilediğini belirtmişlerdir. Son zamanlarda şantiye kullanımı da yaygınlaşan polimer modifiyeli bitümlerin (PMB), hazırlanışı ve yerinde üretimi temsil etmesine yönelik çalışmalar üzerinde durulmaya başlanmıştır.

Bitümlü bağlayıcının polimerler ile karıştırılma işlemi bağlayıcının mühendislik özellikleri bakımından oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bitümlü bağlayıcının polimerlerle modifikasyonu işleminde karıştırma aracına, hızına, zamana ve sıcaklığa bağlı olarak bitümün fiziksel ve kimyasal yapısında değişiklikler meydana gelmektedir. İstenilen özelliklerde ve stabil kompozisyonda bir modifikasyon elde etmek tamamıyla bu üç faktöre bağlıdır. Birçok polimer, bitüm içinde bazı sıcaklıklarda çözölememekte ve kümeler halinde dağılmakta ve iyi bir kimyasal bağ kurulamamaktadır. Bir çok çalışmada değişik hız ve sıcaklıklar dikkate alınarak polimer modifikasyonu yapılmış ve farklı sonuçlar elde edilmiştir Lepe ve ekibi [8], bitüm modifikasyonunda değişik hızları (1200, 8200rpm) denemiş sonuçta yüksek karıştırma hızının stabil bir karışım elde etmede önemli olduğu ancak bu işlemin bitümün yaşlanmasına neden olarak reolojik özelliklerinin değişeceğine işaret etmişlerdir. Giuliani ve ekibi [9], polimer modifikasyonunda 500 ml alüminyum kaplara 250-260 gr asfalt koyarak 180°C sıcaklıkta ve 4000 rpm hızda karıştırma yapmışlardır. Ouyang ve ekibi [10], SBS modifikasyonunu, bağlayıcı ve polimeri 170°C sıcaklıkta 4000 rpm hızda 25 dakika karıştırarak yapmışlardır. Mouillet ve ekibi [11], SBS ve etilen-vinil-asetat (EVA) modifikasyonlu bağlayıcıyı, 180°C sıcaklıkta 300 rpm hızda 2 saat karıştırarak hazırlamışlardır. Larsen ve ekibi [12], farklı asfalt oranlarına sahip iki bağlayıcının SBS ile modifikasyonunda 4200 rpm ve 5800 rpm hızlarda ve farklı sürelerde karıştırma yapmış, bağlayıcıların 90 dakika ve 120 dakika sürelerde maksimum viskoziteye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Haddadi ve ekibi [13], bitüm modifikasyonunda karıştırma süre ve sıcaklığın önemli olduğunu belirtmişler ve EVA modifikasyonunda 300 rpm hız ve 180°C sıcaklığı esas almışlardır. Karıştırma süresinin artması ile bağlayıcıların penetrasyon derecelerinin düştüğü ve 4 saat sonra sabit bir değere ulaştığını belirtmiştir. Yılmaz ve Kök [14], SBS modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklık performans seviyesinin incelendiği çalışmada, modifikasyon işleminde 500 rpm hız, 170°C sıcaklık ve 90 dakika karıştırma prosedürünü esas almışlardır. Navarro ve ekibi [15], farklı SBS oranlarını dikkate alarak farklı sıcaklık ve karıştırma hızlarında bitüm modifikasyonu yapmışlar ve düşük polimer içeriğinde 180°C ve 1200 rpm hızda homojen bir dağılımın meydana geldiğini yüksek polimer içeriğinde ise bunun tersi olabileceğine işaret etmişlerdir. Yukarıda belirtilen örneklerde göröldüğü üzere modifiye bitümlerin laboratuvar ortamında hazırlanmasında süre, sıcaklık ve karıştırma hızı bakımından herhangi bir düzen veya standart bulunmamaktadır.

Bu çalışma ile SBS modifiye bitümlerin laboratuvar ortamında hazırlanmasında karıştırma süre, hız ve sıcaklığının bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerine etkisi incelenecektir. Böylece hem önemli bir literatür eksikliğinin giderilmesi hem de bu yönde yapılacak çalışmalara bir temel oluşturulması amaçlanmaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan bağlayıcı TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 160/220 sınıfı asfalt çimentosudur. Bitüm modifikasyonunda ise Shell Bitümen şirketi tarafından üretilen ve stiren-butadien-stiren (SBS) blok kopolimer ihtiva eden KRATON D 1101 kullanılmıştır. Karışımındaki SBS içeriği, karıştırma tekniğindeki parametrelerin detaylı incelenebilmesi, polimer içeriğinin değişmesinden dolayı farklılık göstermemesi için literatürde de en çok kullanılan oran olan %4 oranında sabit tutulmuştur. Modifiye bağlayıcının laboratuarda üretimi için firmalar tarafından geliştirilen değişik karıştırma milleri bulunmaktadır. Bu çalışmada kap içinde Şekil 1 (a)'daki etkiyi yapan Şekil 1 (b)'deki karıştırma mili kullanılmıştır.



Şekil 1. Karıştırma mili ve karıştırma etkisi

B 160/220 bağlayıcısının %4 SBS ile modifikasyonunda 500, 1000 ve 1500 devir/dakika olmak üzere üç farklı karıştırma hızı; 30, 60 ve 120 dakika olmak üzere üç farklı karıştırma süresi; 170, 180 ve 190 °C olmak üzere üç farklı karıştırma sıcaklığı ele alınarak 27 değişik kombinasyon oluşturulmuştur. Çalışmada hızı 0-2000 devir/dakika aralığında ayarlanabilen hassas karıştırıcı (Şekil 2) kullanılmıştır. Bu karıştırıcı ile 27 farklı kombinasyonda elde edilen bağlayıcılara, yumuşama noktası, dönele viskozite ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır.



şekil 2. Modifiye bitüm karıştırma sistemi

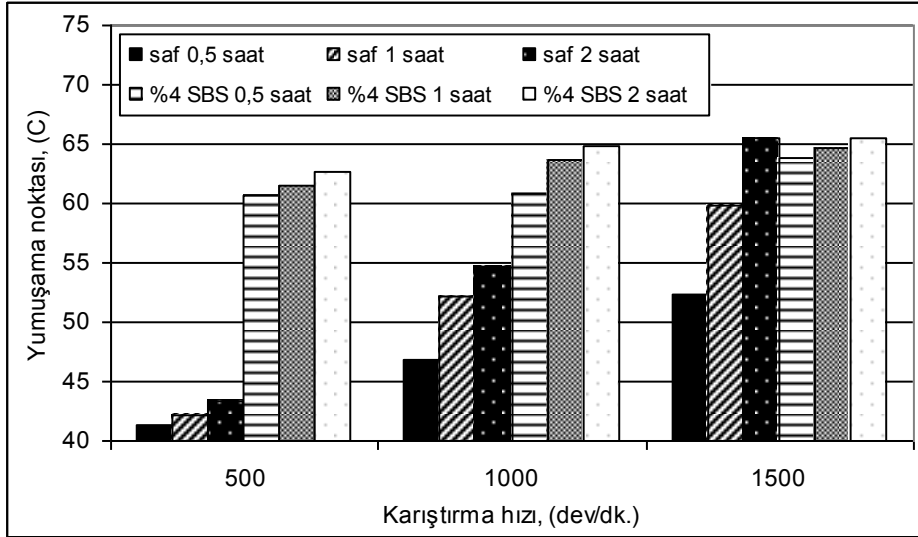
### 3. DENEYSSEL ALIşMA

#### 3.1. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

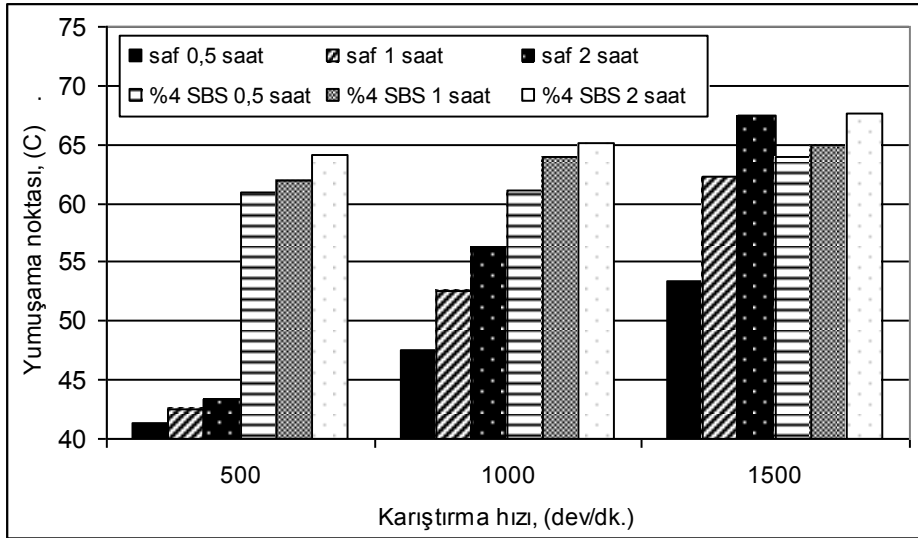
Farklı hız, süre ve sıcaklıklarda karıştırılarak elde edilen modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktalarının karıştırma şartlarından nasıl etkilendiğini araştırmanın yanı sıra, aynı karıştırma şartları altında modifiyeli bağlayıcının saf bağlayıcı ile karşılaştırılabilmesi için ayrıca saf bağlayıcı da 27 farklı kombinasyonda karıştırılmıştır. Hiçbir karıştırma işlemine tabi tutulmayan saf bağlayıcının yumuşama noktası değeri ise 41,1°C olarak tespit edilmiştir. Çizelge 1’de değişik şartlar altında karıştırılarak elde edilmiş saf ve modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri verilmiştir. Karıştırma değişkenlerinin saf ve modifiyeli bağlayıcı üzerindeki etkileri grafiksel olarak şekil 3-5’te verilmiştir.

Çizelge 1. Saf ve Modifiyeli Bağlayıcıların Yumuşama Noktası Değerleri

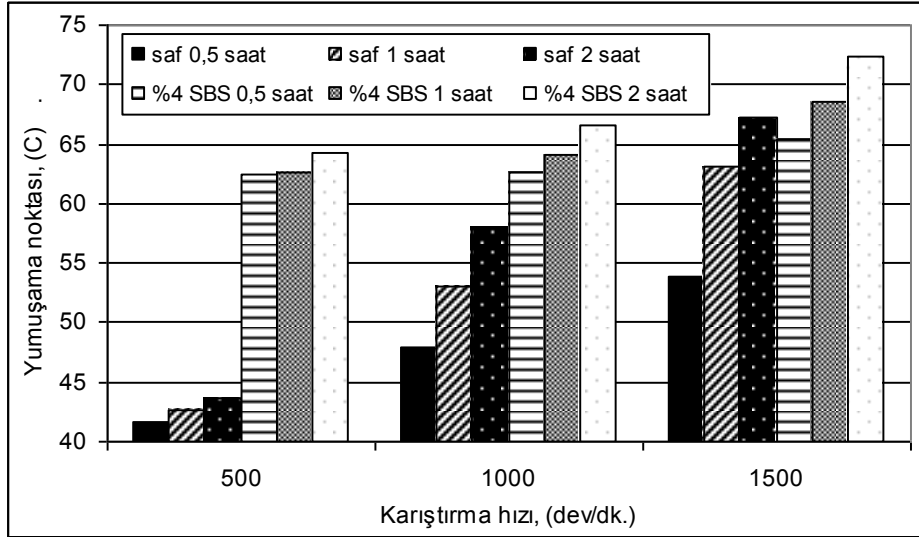
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma hızı (devir/dakika)	Karıştırma süresi (dakika)					
		B 160/220			B 160/220 + %4 SBS		
		30	60	120	30	60	120
170	500	41,3	42,2	43,3	60,6	61,5	62,7
	1000	46,9	52,1	54,6	60,8	63,7	64,8
	1500	52,3	59,8	65,5	63,8	64,7	65,5
180	500	41,4	42,5	43,3	60,9	62	64,1
	1000	47,5	52,5	56,2	61,1	64	65,1
	1500	53,4	62,3	67,5	63,9	64,9	67,6
190	500	41,6	42,7	43,7	62,5	62,6	64,2
	1000	47,9	53,1	58,0	62,7	64,1	66,6
	1500	53,8	63,0	67,3	65,4	68,5	72,3
Karıştırma işlemine tabi tutulmayan saf bağlayıcının yumuşama noktası değerleri : 41,1							



Şekil 3. Bağlayıcıların 170°C karıştırma sıcaklığında hız-yumuşama noktası ilişkisi



Şekil 4. Bağlayıcıların 180°C karıştırma sıcaklığında hız-yumuşama noktası ilişkisi



şekil 5. Bağlayıcıların 190°C karıştırma sıcaklığında hız-yumuşama noktası ilişkisi

şekil 3,4 ve 5 incelendiğinde sıcaklığın artması ile bütün karıştırma hız ve sürelerinde yumuşama noktası değerlerinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca devir sayısının artması ve karıştırma süresinin artması ile yumuşama noktası değerlerinde artış meydana gelmiştir. Saf ve %4 SBS içeren bağlayıcılarda en düşük değer parametrelerin en düşük değerlerinde elde edilmiştir. Her üç sıcaklıkta devir sayısının artması ile yumuşama noktasında önemli oranda artış meydana gelmiştir. Saf bağlayıcının yumuşama noktası değerlerinin 60 ve 120 dk karıştırma sürelerinde karıştırma hızından önemli derecede etkilenmektedir. Karıştırma hızının artması ile her sıcaklıkta yumuşama noktası değerleri artmakta ve bu artış ise en fazla 120 dakika karıştırma süresi ve 1500 devir/dakika karıştırma hızında meydana gelmektedir. Saf bağlayıcının yumuşama noktası değerleri, 170°C’de 500 devir/dakika hızda 30 dakika karıştırılması sonucunda 41,3°C iken bu değer 170°C’de 1500 devir/dakika hızda 120 dakika karıştırılma şartlarında %59 artış göstererek 65,5°C’ye yükselmiştir. Aynı şartlar altında 190°C’de bu artış %61 olmaktadır. Buna karşın katkılı bağlayıcının maksimum karıştırma şartlarındaki yumuşama noktası minimum karıştırma şartlarındakinden %19 daha yüksek çıkmıştır.

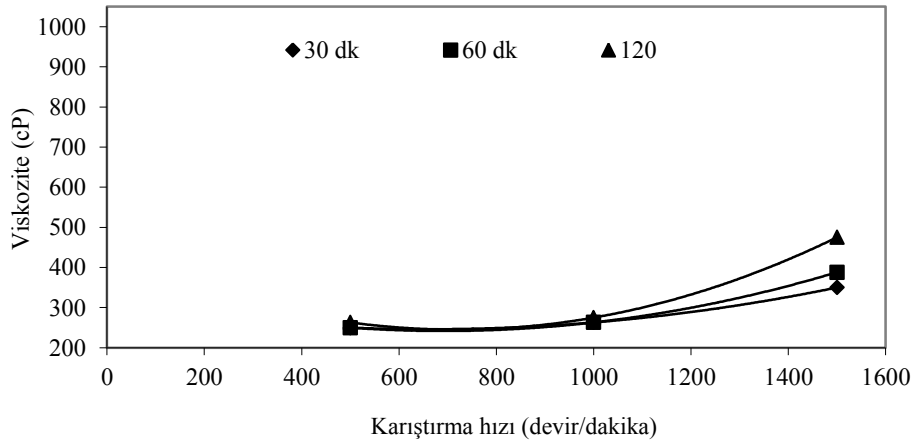
### 3.2. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları

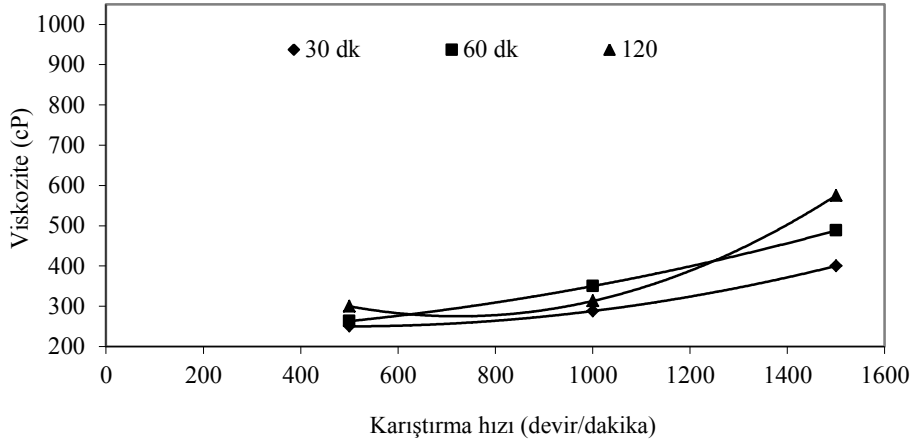
Değişik karıştırma yöntemleri ile hazırlanan saf ve SBS katkılı bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla AASHTO TP48 standardına uygun olarak ‘‘Brookfield Viskozimetre’’ kullanılarak viskozite deneyi yapılmıştır. İlk önce hiçbir karıştırma işlemi uygulanmayan saf bağlayıcının viskozite değerleri belirlenmiştir. Buna göre 135°C’deki viskozite değerleri 237,5 cP çıkmıştır. İkinci ve üçüncü olarak saf ve SBS katkılı bağlayıcının 135°C’deki viskozite değerlerinin karıştırma yönteminden nasıl etkilendiği tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar izelge 2’de verilmiştir. şekil 6-8’de saf bağlayıcının şekil 9-11’de ise katkılı bağlayıcının farklı karıştırma yöntemi ile viskozitelerinde meydana gelen değişim grafiksel olarak verilmiştir.

**Çizelge 2.** Saf ve modifiyeli bağlayıcıların 135°C'deki viskozite değerleri (cP)

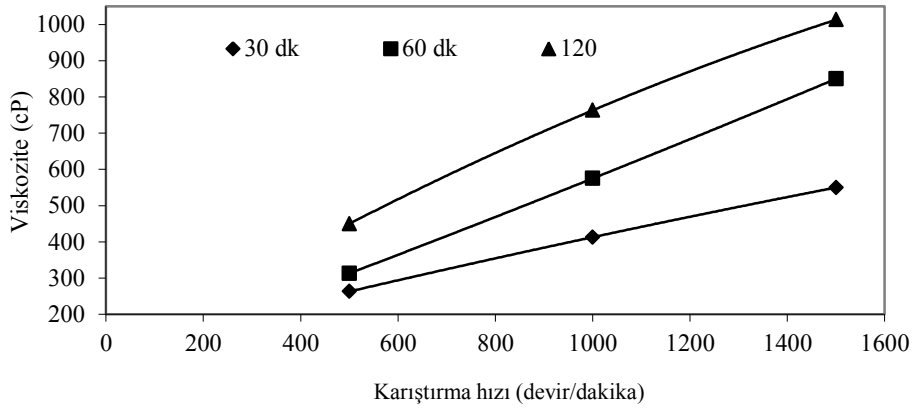
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma hızı (devir/dakika)	Karıştırma süresi (dakika)					
		B 160/220			B 160/220 + %4 SBS		
		30	60	120	30	60	120
170	500	250	250	263	1988	2000	2200
	1000	263	263	275	1988	2288	2862
	1500	350	388	475	2163	2500	2738
180	500	250	263	300	1988	2013	2325
	1000	288	350	313	1988	2300	2600
	1500	400	488	575	2288	2650	2850
190	500	263	313	450	2125	2225	2338
	1000	413	575	763	2150	2225	2475
	1500	550	850	1013	2375	2788	3700

Karıştırma işlemine tabi tutulmayan saf bağlayıcının viskozite değeri : 237,5

**Şekil 6.** Saf bağlayıcının 170°C karıştırma sıcaklığında hız-viskozite ilişkisi



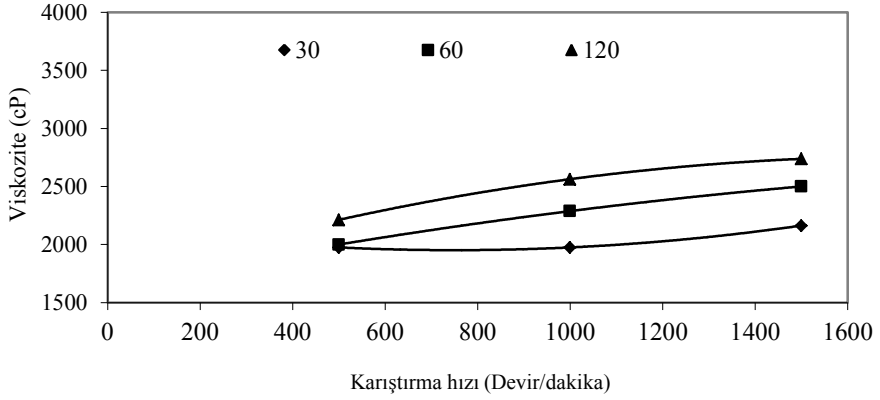
Şekil 7. Saf bağlayıcının 180°C karıştırma sıcaklığında hız-viskozite ilişkisi



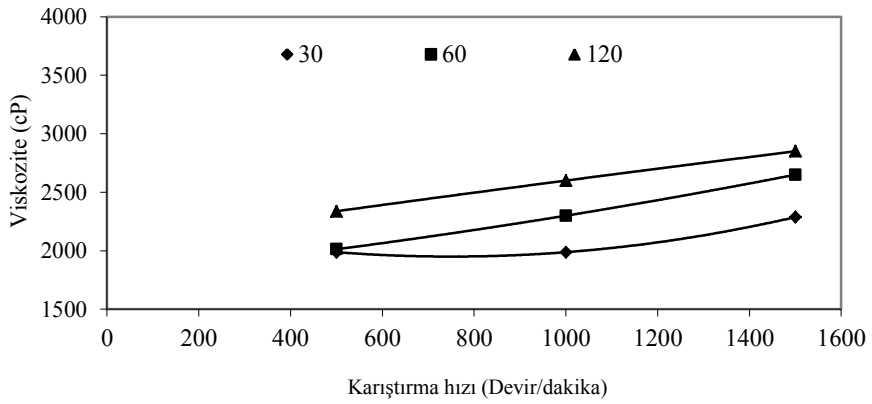
Şekil 8. Saf bağlayıcının 190°C karıştırma sıcaklığında hız-viskozite ilişkisi

Saf bağlayıcının viskozite değerinin bütün karıştırma sürelerinde, 170°C ve 180°C'de ve özellikle düşük devirde önemli derecede değişmediği, 190°C'nin ise 60 dakika karıştırma süresi ve 1000 dvr/dk karıştırma hızının üzerinde viskozitenin önemli derecede artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere 170°C karıştırma sıcaklığında 500 dvr/dk ve 1000 dvr/dk karıştırma hızı bütün karıştırma sürelerinde viskozitede bir değişiklik yapmamıştır. 1500 dvr/dk karıştırma hızı her sıcaklık ve karıştırma süresinde viskozite üzerinde etkili olmaktadır. Saf bağlayıcının ağır karıştırma şartlarındaki viskozite değerinin hafif karıştırma şartlarındaki viskoziteden 4 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. İçerisinde hiçbir katkı bulunmayan saf bağlayıcının viskozitesinde meydana gelen bu artışın karıştırma esnasında meydana gelen oksidasyon ve buharlaşmadan kaynaklandığı, viskozitenin önemli derecede bu durumdan etkilendiği tespit edilmiştir. Önceden yapılan çeşitli çalışmalarda da benzer şekilde oksidasyon nedeniyle bağlayıcılarda yaşlanma meydana geldiği belirlenmiştir [16–20].

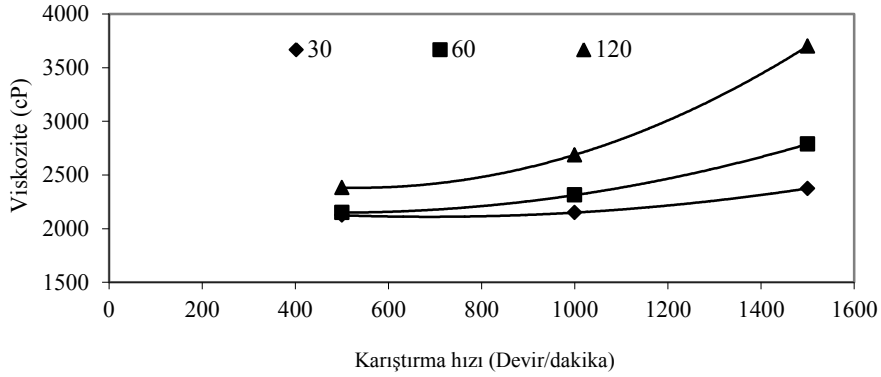




Şekil 9. Katkılı bağlayıcının 170 °C karıştırma sıcaklığında hız-viskozite ilişkisi



Şekil 10. Katkılı bağlayıcının 180 °C karıştırma sıcaklığında hız-viskozite ilişkisi



Şekil 11. Katkılı bağlayıcının 190 °C karıştırma sıcaklığında hız-viskozite ilişkisi

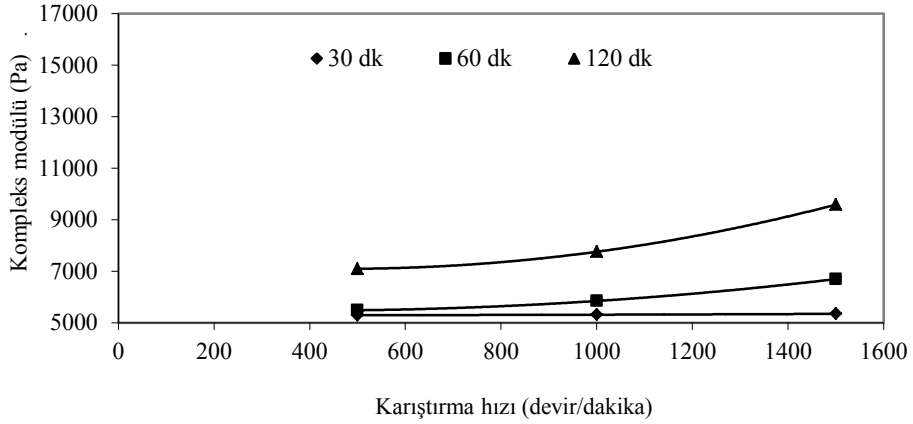
500 ve 1000 dvr/dk karıştırma hızlarında ve bütün karıştırma sürelerinde SBS katkılı bağlayıcının viskozite değeri sıcaklık artışından önemli derecede etkilenmemektedir. Ancak 120 dk karıştırma süresinde ve 1500 dvr/dk karıştırma hızında 190 °C sıcaklığın viskozitenin artışında etkili olduğu görülmektedir. 30 dakika karıştırma süresi ve 500 dvr/dk karıştırma hızında bütün sıcaklıklarda katkılı bağlayıcının viskozite değeri hemen hemen değişmemektedir. Karıştırma süresi arttıkça her sıcaklıkta viskozite değerleri artmakta ve bu artış yüksek karıştırma hızında daha fazla olmaktadır.

### 3.3. Dinamik Kayma Reometresi Deney Sonuçları

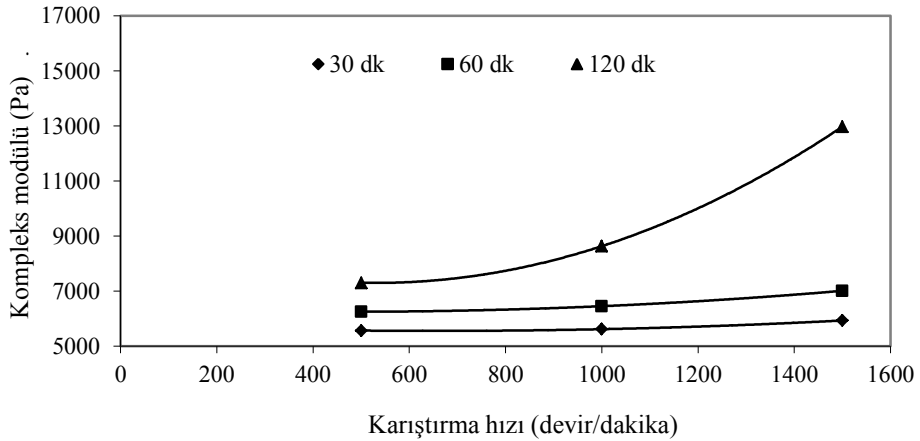
Dinamik kayma reometresi deneyi, asfalt çimentosunun kompleks modülü ( $G^*$ ) ve faz açısını ( $\delta$ ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. Aynı kompleks modülüne sahip bağlayıcılardan faz açısı düşük olanın elastik modül bileşeni daha yüksek olmaktadır. Çalışmada 0,01 ile 1 Hz arasında 10 farklı frekans ve 40-80 °C arasında 5 farklı sıcaklık dikkate alınmıştır. Farklı sıcaklıklardaki verileri incelemek zor olduğundan değişim faktörü kullanılarak farklı sıcaklıklardaki veriler tek bir sıcaklığa dönüştürülebilmektedir. Bu amaçla bitümlü viskoelastik malzemelerde en çok kullanılan yöntemler log-lineer, Williams-Landel-Ferry (WLF) ve Arrhenius denklemleridir [21]. Uygun bir karşılaştırma yapabilmek için beş farklı sıcaklıktaki kompleks modülü ve faz açıları program vasıtası ile Arrhenius logaritması kullanılarak 50 °C referans sıcaklığına dönüştürülmüştür. SBS katkılı bağlayıcıların, 0,01 ile 1 Hz frekansları arasında orta bir değer olan 0,1 Hz frekanstaki kompleks modülü ve faz açıları değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Şekil 12-14'de katkılı bağlayıcının farklı karıştırma yöntemi ile kompleks modülünde meydana gelen değişim grafiksel olarak verilmiştir.

Çizelge 3. Katkılı bağlayıcıların kompleks modülü ve faz açısı değerleri

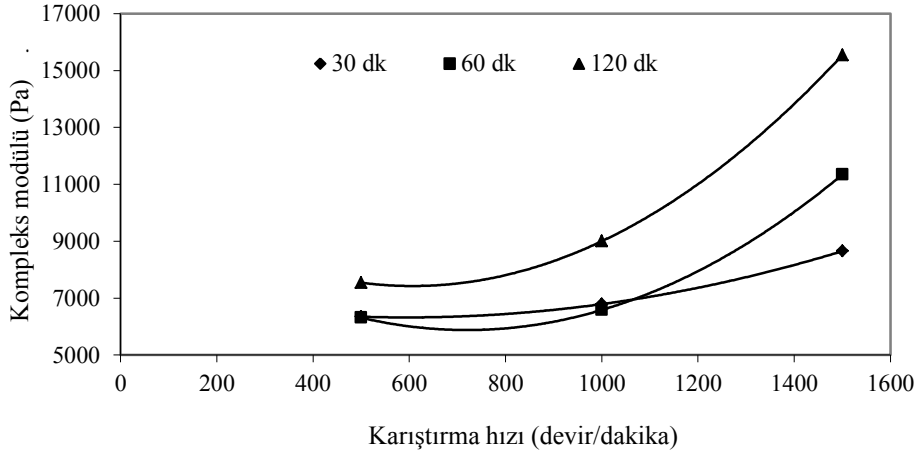
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Karıştırma hızı (devir/dakika)	Kompleks modülü			Faz açısı		
		Karıştırma süresi (dakika)					
		30	60	120	30	60	120
170	500	5300	5489	7100	72,91	72,48	68,91
	1000	5317	5850	7760	72,64	72,31	68,26
	1500	5351	6699	9588	70,55	69,43	66,34
180	500	5567	6250	7301	71,97	69,95	68,69
	1000	5617	6452	8631	72,37	68,54	64,72
	1500	5932	7009	12970	69,31	67,81	60,23
190	500	6347	6312	7542	71,01	70,91	68,84
	1000	6583	6789	8999	70,35	69,81	64,17
	1500	8650	11340	15540	64,48	59,76	57,86



Şekil 12. Katkılı bağlayıcının 170 °C karıştırma sıcaklığında hız-G\* ilişkisi



Şekil 13. Katkılı bağlayıcının 180 °C karıştırma sıcaklığında hız-G\* ilişkisi



Şekil 14. Katkılı bağlayıcının 190 °C karıştırma sıcaklığında hız-G\* ilişkisi

1000 dvr/dk hızın üstünde kompleks modülleri her sıcaklıkta özellikle 190 °C'de hızlı bir şekilde artmaya başlamaktadır. Karıştırma hızının artması ile birlikte karıştırma süresinin de artması kompleks modülünü önemli dercede etkilemektedir. 170 ve 180 °C'de ve 30 ve 60 dk karıştırma sürelerinde karıştırma hızının artması kompleks modülünü fazla etkilememektedir. En ağır karıştırma şartlarındaki kompleks modülü en düşük karıştırma şartlarındaki kompleks modülünden 2,9 kat daha fazla olmaktadır.

Daha önceki saf bağlayıcının viskozite ve yumuşama noktası deneylerinden 170 °C karıştırma sıcaklığı, 500 dvr/dk karıştırma hızı ve 30 dk karıştırma süresinin hiçbir karıştırma işlemine tabi tutulmayan saf bağlayıcının değerlerine çok yakın olduğu dolayısıyla bu minimum karıştırma şartlarında bağlayıcıda önemli bir oksidasyonun ve buharlaşmanın oluşmadığı düşünülmektedir. Bu sayede katkılı bağlayıcının minimum karıştırma şartlarındaki kompleks modülü referans alınarak diğer karıştırma şartlarının bu kompleks modülünü hangi oranda etkilediği belirlenmiştir. Bu oran üç sınıfa ayrılmıştır. Bunlardan birincisi minimum şartlardaki kompleks modülünün 1-1,2 katı, ikincisi minimum şartlardaki kompleks modülünün 1,2-1,5 katı, üçüncüsü ise 1,5-3 katıdır. Çizelge 4'te 27 değişik şekilde hazırlanmış SBS katkılı bağlayıcının kompleks modülleri ve bu modüllere karşılık gelen karıştırma şartları verilmiştir.

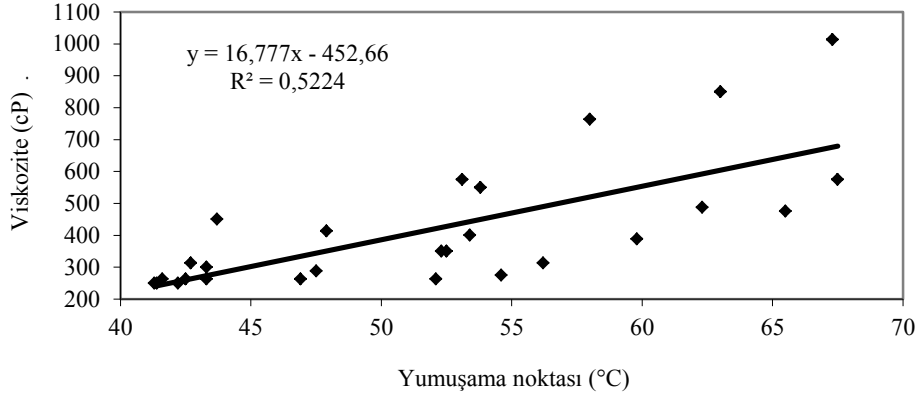
Tablodan görüldüğü üzere birbirine yakın kompleks modülleri değişik karıştırma şartları ile elde edilebilmektedir. Kompleks modülündeki artışın belirli bir kısmının SBS katkısının bağlayıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılmasından ve önemli bir kısmının ise oksidasyondan ve buharlaşmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kompleks modülündeki %20'ye kadarki artışın katkının bağlayıcı içerisinde homojen bir şekilde karışıp iyi derecede polimerize olmasından dolayı olduğu kabul edilirse bu artış oranı içerisinde 120 dakikalık karıştırma süresi yer almamaktadır. Karıştırma hızının ve karıştırma sıcaklığının bütün değişkenleri, karıştırma süresinden de 30 ve 60 dakika değişkenleri her artış oranı içerisinde yer alırken 120 dakika karıştırma süresi düşük artış oranları içerisinde yer almamaktadır. Benzer kompleks modüllerini elde edebilmek için karıştırma süre ve sıcaklığı düşük ise karıştırma hızı artırılabilir, karıştırma süre ve hızı düşük ise karıştırma sıcaklığı artırılabilir ya da karıştırma sıcaklığı ve hızı düşük ise karıştırma süresi artırılabilir.

Çizelge 4. Karıştırma parametrelerinin kompleks modül üzerindeki etkisi

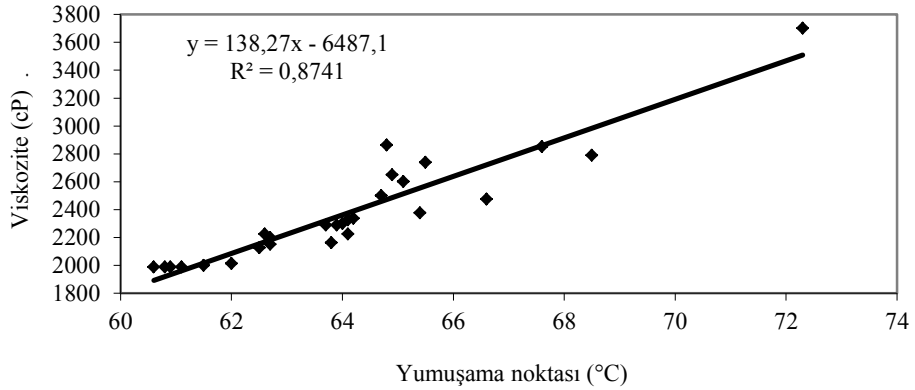
Artış oranı, %	Kompleks modülü (Pa)	Karıştırma sıcaklığı (°C)	Karıştırma hızı (dvr/dk)	Karıştırma süresi (dakika)
0-20	5300	170	500	30
	5317	170	1000	30
	5351	170	1500	30
	5489	170	500	60
	5567	180	500	30
	5617	180	1000	30
	5850	170	1000	60
	5932	180	1500	30
	6250	180	500	60
	6312	190	500	60
20-50	6347	190	500	30
	6452	180	1000	60
	6583	190	1000	30
	6699	170	1500	60
	6789	190	1000	60
	7009	180	1500	60
	7100	170	500	120
	7301	180	500	120
50-300	7542	190	500	120
	7760	170	1000	120
	8631	180	1000	120
	8650	190	1500	30
	8999	190	1000	120
	9588	170	1500	120
	11340	190	1500	60
12970	180	1500	120	
15540	190	1500	120	

### 3.4. Özelliklerin Karşılaştırılması

Değişik karıştırma teknikleri sonucunda saf ve katkılı bağlayıcılar için her bir karıştırma tekniğine ait farklı yumuşama noktası, viskozite ve kompleks modülü değerleri elde edilmiştir. Bu farklı değerler kullanılarak özellikler arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Şekil 15 ve 16'da saf ve katkılı bağlayıcıların yumuşama noktasına karşılık gelen viskozite değerleri grafiksel olarak verilmiştir.



şekil 15. Saf bağlayıcının yumuşama noktası – viskozite ilişkisi

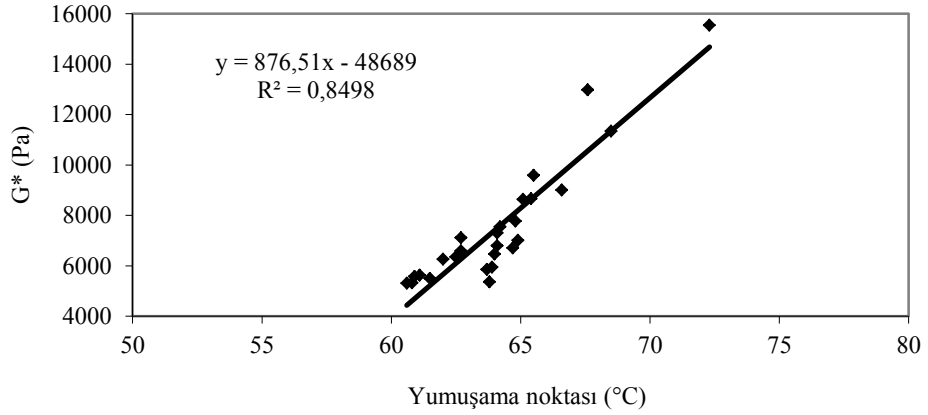


şekil 16. Katkılı bağlayıcının yumuşama noktası – viskozite ilişkisi

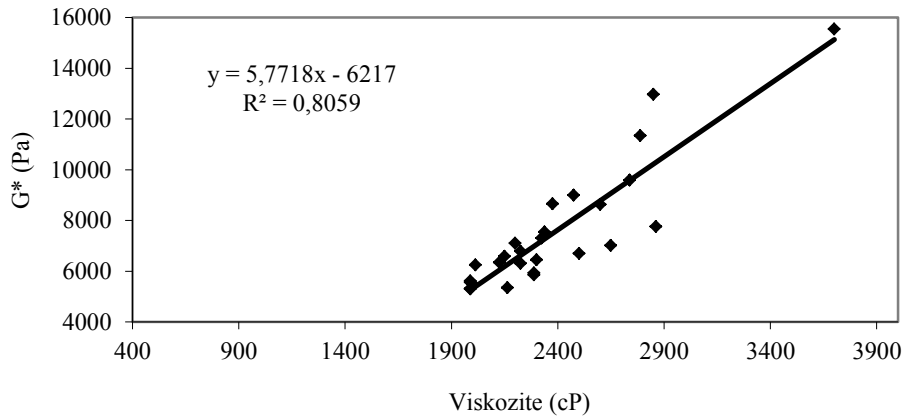
Saf bağlayıcının yumuşama noktası ve viskozite değerleri arasındaki korelasyon katkı bağlayıcıya göre çok düşüktür. Saf bağlayıcı aynı yumuşama noktasında çok farklı viskozite değerleri verirken katkılı bağlayıcıda bu dağılım daha düşük orandadır.

Çalışmada SBS'nin bitüme ilavesinde 27 farklı karıştırma tekniğinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ilk önce hiç katkı katılmayan saf bağlayıcıya da aynı karıştırma prosedürleri uygulanmış ve bu şekilde elde edilmiş saf bağlayıcının, yumuşama noktası, viskozite ve kompleks modülü değerleri katkılı bağlayıcının değerlerinden çıkartılarak SBS'nin net etkisi tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ancak saf bağlayıcının söz konusu özelliklerindeki değişim, karıştırma parametrelerinin değişiminden, katkılı bağlayıcıya göre daha fazla etkilenmiş ve saf bağlayıcı ile katkılı bağlayıcı arasında mantıklı bir karışlaştırma yapma imkanı sunmamıştır.

Katkılı bağlayıcının yumuşama noktası ile kompleks modülü arasındaki ilişki şekil 17'de viskozite ile kompleks modülü arasındaki ilişki ise şekil 18'de verilmiştir.



Şekil 17. Katkılı bağlayıcının yumuşama noktası – kompleks modülü ilişkisi



Şekil 18. Katkılı bağlayıcının viskozite – kompleks modülü ilişkisi

Katkılı bağlayıcının kompleks modülünün yumuşama noktası ve viskozite ile arasında %80'in üzerinde lineer bir ilişki söz konusudur. Özellikle eğriye yakın olan değerlerin eğrinin alt ucunda olduğu orta kısımda ise noktaların daha fazla dağılım yaptığı görülmektedir. Bu, hafif karıştırma şartlarında özellikler arasında bir uyum olduğuna ancak ağır karıştırma şartlarında aynı viskozite ya da yumuşama noktası değerlerine karşılık farklı kompleks modülü değerlerinin ortaya çıktığına, ağır karıştırma tekniğinin katkıli bitümün yumuşama noktası viskozite ve kompleks modülü değerlerini farklı oranlarda etkilediğine işaret etmektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, ağırlıkça %4 SBS'nin bitüme ilavesinde üç farklı karıştırma hızı, üç farklı karıştırma süresi ve üç farklı karıştırma sıcaklığı olmak üzere toplam 27 farklı karıştırma tekniğinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla ilk önce hiç katkı katılmayan saf bağlayıcıya da aynı karıştırma prosedürleri uygulanmış ve bu şekilde elde edilmiş saf bağlayıcının, yumuşama

noktası, viskozite ve kompleks modülü değerleri katkılı bağlayıcının değerlerinden çıkartılarak SBS'nin net etkisi tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ancak yapılan gözlemler ve elde edilen deneysel sonuçlar neticesinde, saf bağlayıcının yüksek karıştırma hızlarında katkılı bağlayıcıya göre karıştırıldığı kap içerisinde çok fazla bir yüzey alanı oluşturarak havayla temas eden bağlayıcı miktarının fazla olduğu dolayısıyla aşırı derecede oksidasyona ve buharlaşmaya uğradığı tespit edilmiştir. Bu sebeple çalışmada katkılı bağlayıcının değerlerinden aynı şartlarda karıştırılarak elde edilmiş saf bağlayıcının değerlerini çıkartarak katkının net etkisini tespit etmek mümkün olmamış ancak gerek saf bağlayıcı gerekse katkılı bağlayıcı karıştırma tekniklerinden nasıl etkilendiği kendi içinde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Yumuşama noktası deney sonuçlarına göre, saf bağlayıcının ağır karıştırma şartlarındaki yumuşama noktasının hafif karıştırma şartlarındakinden %61 daha fazla olduğu, bu oranın katkılı bağlayıcıda % 19 olduğu tespit edilmiştir. Saf bağlayıcının yumuşama noktası değerlerinin  karıştırma süresinde de karıştırma hızından önemli derecede etkilendiği, SBS katkılı bağlayıcının ise 500 dvr/dk ile 1000 dvr/dk arasında yumuşama noktası değerlerinin çok fazla değişmediği 1000 dvr/dk'dan sonra bir fark olduğu tespit edilmiştir.

Viskozimetre deney sonuçlarına göre, saf bağlayıcının viskozite değeri bütün karıştırma sürelerinde 170 ve 180 °C'de ve 500 dvr/dk karıştırma hızında fazla değişmez iken SBS katkılı bağlayıcının viskozite değeri bütün karıştırma sıcaklıkları ve karıştırma sürelerinde 500 dvr/dk ve 1000 dvr/dk karıştırma hızlarında fazla değişmemektedir. 1500 dvr/dk karıştırma hızı saf bağlayıcının viskozitesi üzerinde her sıcaklıkta ve karıştırma süresinde etkili olmaktadır. Ancak SBS katkılı bağlayıcının viskozitesi 170, 180 ve 190 C'de 1500 dvr/dk'da 30 dakika karıştırılması durumunda fazla değişmemektedir. Saf bağlayıcının maksimum karıştırma şartlarındaki viskozitesi minimum karıştırma şartlarındaki viskoziteden 4 kat fazla iken bu değer SBS katkılı bağlayıcıda 1,8 kat olmaktadır.

Dinamik kayma reometresi deney sonuçlarına göre, 1000 dvr/dk hızın üstünde kompleks modülleri her sıcaklıkta özellikle 190 °C'de hızlı bir şekilde artmaya başlamaktadır. Karıştırma hızının artması ile birlikte karıştırma süresinin de artması kompleks modülünü önemli dercede etkilemektedir. 170 ve 180 °C'de ve 30 ve 60 dk karıştırma sürelerinde karıştırma hızının artması kompleks modülünü fazla etkilememektedir. En ağır karıştırma şartlarındaki kompleks modülü en düşük karıştırma şartlarındaki kompleks modülünden 2,9 kat daha fazla olmaktadır.

Sonuçta laboratuvar ortamında hazırlanan modifiye bitümlerde katkı miktarı ve bağlayıcı cinsi aynı olmasına rağmen değişik karıştırma yöntemleri ile birbirinden çok farklı modifiye bitümlerin ortaya çıkabileceği tespit edilmiştir. Bu alışma, laboratuvar ortamında modifiye bitüm dizayn parametrelerinin bitümlü bağlayıcının reolojik özelliklerini önemli oranda etkilediğini göstermektedir. Bu çalışmada karıştırma parametrelerinin önemi ön plana çıkarılmıştır. Devam eden çalışmalar ile modifiye bitüm plenti ile laboratuvar örnekleri karşılaştırılarak optimizasyon yapılması amaçlanmaktadır. Bağlayıcı deneylerinin yanında ilerleyen dönemde farklı şekillerde hazırlanan modifiye bitümler içeren bitümlü sıcak karışım numunelerinin performans açısından değerlendirilmesi çalışmanın geçerlilik kazanması açısından büyük önem arz etmektedir.

## REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Uluaylı, M., "Modifiye Bitüm ve Modifikasyon Katkılarının Kullanımı", II.Ulusal Asfalt Sempozyumu, Ankara, Türkiye, Aralık, 1998, 15-29.
- [2] Lu, X.,Isacsson, U., "Laboratory Study on the Low Temperature Physical Hardening of Conventional and Polymer Modified Bitumens",Constr. Build. Mater., 14, 79-88, 2000.
- [3] Navarro, F.J., Patal, P., Martinez-Boza, F., Valencia, C. And Gallegos, C., "Rheological Characteristics of Ground Tire Rubber-Modified Bitumens", Chem. Eng. J., 89, 53-61,2002.
- [4] Airey, G. D., "Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens" Fuel, 82, 14, 1709-1719, 2002.



- [5] Aglan, H., Othman, A., Figueroa, L., Rollings, R., “Effect of Styrene-Butadiene- Styrene Block Copolymer on Fatigue Crack Propagation Behavior of Asphalt Concrete Mixtures”, *Transp. Res. Rec.*, 1417, 178-186, 1993.
- [6] Khatkhat, M. J., Baladi, G. Y., “Engineering Properties of Polymer – Modified Asphalt Mixtures”, *Transp. Res. Rec.*, 1638, 12-22, 1998.
- [7] K k, B.V., Kuloğlu, N., “Investigation of Mechanical Properties of Asphalt Concrete Containing Styrene-Butadiene-Styrene”, *Journal of Engineering and Natural Science*, 26, 1, 81-94, 2008.
- [8] Lepe, A.P., Boza, F.J.M., Gallegos, C., Gonzalez, O., Munoz, M.E., Santamarı, A., “Influence of the Processing Conditions on the Rheological Behaviour of Polymer-Modified Bitumen”, *Fuel*, 82, 1339–1348, 2003.
- [9] Giuliani, F., Merusi, F., Filippi, S., Biondi, D., Finocchiaro, M.L., Polacco, G., “Effects of Polymer Modification on the Fuel Resistance of Asphalt Binders”, *Fuel*, 83, 9, 1539-1546, 2009.
- [10] Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., Yinxi Z., “Preparation and Properties of Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer/Kaolinite Clay Compound and Asphalt Modified With the Compound”, *Polym. Degrad. Stab.*, 87, 309-317, 2005.
- [11] Mouillet, V., Lamontagne, J., Durrieu, F., Planche, J.P., Lapalu, L., “Infrared Microscopy Investigation of Oxidation and Phase Evolution in Bitumen Modified With Polymers”, *Fuel*, 87, 1270–1280, 2008.
- [12] Larsen, D.O., Alessandrini, J.L., Bosch, A., Cortizo, M.S., “Micro-Structural and Rheological Characteristics of SBS-Asphalt Blends During Their Manufacturing”, *Constr. Build. Mater.*, 23, 8, 2769-2774, 2009.
- [13] Haddadi, S., Ghorbel, E., Laradi, N., “Effects of the Manufacturing Process on the Performances of the Bituminous Binders Modified with EVA”, *Constr. Build. Mater.*, 22, 1212–1219, 2008.
- [14] Yılmaz, M., Kok B.V., “Stiren-Butadien-Stiren Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Superpeve Sistemine Göre Yüksek Sıcaklık Performans Seviyesinin ve İşlenebilirliğinin Belirlenmesi”, *Gazi  nv.Müh.Mim.Fak.Der.*, 23, 4, 811-819, 2008.
- [15] Navarro, F.J., Partal, P., Boza, F.M., Gallegos, C., “Effect of Composition and Processing on the Linear Viscoelasticity of Synthetic Binders”, *Eur. Polym. J.*, 41, 1429–1438, 2005.
- [16] Őeng z, B., “Asfalt Film Kalınlığının Bitümlü Karışımların Yaşlanmasına ve Suya Duyarlılığına Etkisi”, *Doktora Tezi, İnşaat Fakültesi, İ.T. .*, 2003.
- [17] Verhasselt, A., “Short- and Long –Term Ageing of Bituminous Ageing- Simulation with the RCAT Method”, *Proceedings of 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium, France, March, 2003*, 167-173.
- [18] Molenaar, A.A.A., Hagos, E.T., Van de Ven, M.F.C., “Effects of Ageing on the Mechanical Characteristics of Bituminous Binders in PAC”, *J. Mater. Civ. Eng.*, 22,8, 779-787, 2010.
- [19] Mollenhauer, K., Pierard, N., Tusar, M., Mouillet, V., Gabet, T., “ Development, and Validation of a Laboratory Aging Method for the Accelerated Simulation of Reclaimed Asphalt”, *Journal of Wuhan University of Technology- Mater. Sci. Ed.*, 25,4, 631-636, 2010.
- [20] Lepe, A.P., Boza, F.J.M., Gallegos, C., Gonzalez, O., Munoz, M.E., Santamarı, A., “Influence of the Processing Conditions on the Rheological Behaviour of Polymer-Modified Bitumen”, *Fuel*, 82, 1339–1348, 2003.
- [21] Kim, Y.R., “Modeling of Asphalt Concrete”, *Mc Graw-Hill Construction, ASCE Press, USA, 2009*, 480 pp.