



## Investigation of physical, chemical and rheological properties of bituminous binders modified with different rejuvenators

Erkut Yalçın\*

Department of Civil Engineering, Firat University, Elazig, 23000, Turkey

### Highlights:

- Rejuvenates have a great effect on viscosity
- The use of two additives as rejuvenating has been investigated.
- Rejuvenates have shown that by reducing the viscosity of bitumen, it improves its workability.

### Keywords:

- Bitumen
- Rejuvenator
- Rheology
- Chemical Compounds
- Modification

### Article Info:

Research Article  
Received: 27.11.2020  
Accepted: 28.06.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.832495

### Correspondence:

Author: Erkut Yalçın  
e-mail:  
erkutyalcin@firat.edu.tr  
phone:+90 424 237 0000 /  
5448

### Graphical/Tabular Abstract

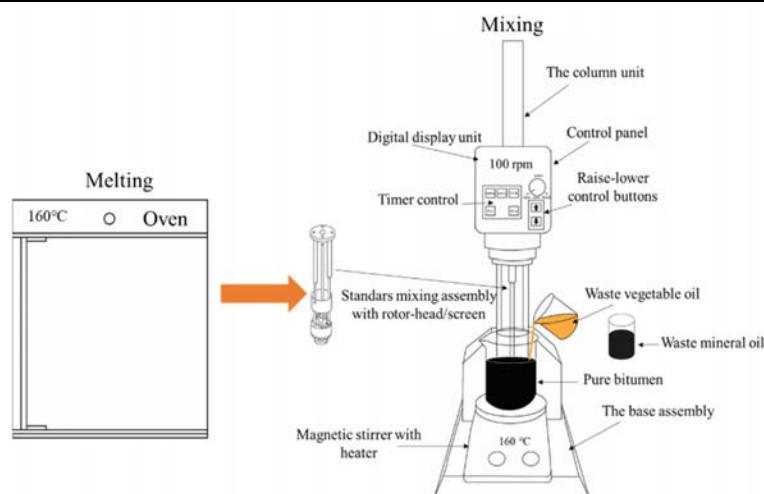


Figure A. Schematic version of the modified bitumen preparation procedure

**Purpose:** We have used these two rejuvenator to carry out a broad-based study of their effects on the mechanical, rheological, and chemical structures of bitumen binders. The reclaimed asphalt mixtures were composed of mixtures of RAP materials, pure bitumen, aggregates, and the selected rejuvenator. Despite the fact that the rejuvenators were used as a means of measuring their amelioration performance on the characteristics of the aged binders found in RAP, it was also seen that these rejuvenators also affected the performance of mixtures made with pure bitumen binders.

### Theory and Methods:

This study focuses on the effects on the unaged binder of two rejuvenators by evaluating their effects at five different ratios. Penetration, softening point, elastic recovery, flash point, force ductility, brookfield viscosity, and dynamic shear rheometer (DSR) tests were conducted to gain an understanding of the physical and mechanical characteristics of bitumen binders after being mixed with these rejuvenators.

### Results:

The addition of rejuvenators to pure bitumen reduced the penetration and softening point values, while increasing the flash point values. R2 rejuvenator tended to soften the pure bitumen more than that R1. R1 and R2 addition significantly reduced the binder viscosity. R2 reduced the viscosity of the pure bitumen more than R1. the increase in additive content led to a decrease in complex modulus with both types of additives. The reduction in the complex modulus was observed mostly with R1 addition. R2 modification led to the highest complex modulus values. In R1 modification, it was observed that the increase in phase angles with increased additive content was greater when compared to the R2 modification.

### Conclusion:

Both additives used in the study led to promising results for their utilizations as rejuvenator in recycled asphalt mixtures. Tests conducted to measure consistency and rheological tests demonstrated that both of these additives may provide rejuvenating benefits to the bitumen being used. Tests also led us to conclude that both of these rejuvenators can provide benefits to the utilization of RAP materials from both environmental and economic perspectives, but the results also indicated that the R2 rejuvenator provides better performance than does the R1.



## Farklı gençleştiricilerle modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların fiziksel, kimyasal ve reolojik özelliklerinin araştırılması

Erkut Yalçın\*

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Gençleştiricilerin viskozite üzerinde büyük etkisi vardır.
- İki katkı maddesinin gençleştirici olarak kullanımı araştırılmıştır.
- Gençleştiriciler bitümün viskozitesini azaltarak işlenebilirliğini iyileştirdiğini göstermiştir

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.11.2020

Kabul: 28.06.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.832495

### Anahtar Kelimeler:

Bitüm,  
gençleştirici,  
reoloji,  
kimyasal bileşikler,  
modifikasyon

### ÖZ

Son dönemde bitümlü sıcak karışım talebinin artmasından ötürü doğal malzemeler azalmakta olup karayolu sektöründe geri dönüştürülmüş asfalt (RAP) kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, RAP'deki bitümlü bağlayıcı, uzun süre atmosfer etkilerine maruz kaldığı için ciddi bir şekilde yaşlanmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar çalışmalarını uygun gençleştiriciler ekleyerek RAP'ın özelliklerini etkili bir şekilde restore etmek üzerine yoğunlaşmışlardır. Fakat bu gençleştiricileri kullanmak birçok avantaj sunsa da, karayolu uygulamalarını sınırlandırabilecek bazı problemlere neden olabilmektedir. Bu problemlerden biri gençleşmiş bitümün kimyasal bileşimi ve kolloidal yapısının saf bitümünkinden farklı olması ve geri dönüştürülmüş asfalt karışımının uzun süreli performansının etkilenmesidir. Bu yüzden çalışmada, olumsuz etkiyi incelemek için yaşlandırılmamış bitüm kullanılmıştır. Bu çalışmada, farklı viskoziteli iki gençleştirici (SYLVAROAD™ RP1000 (R1) ve ITERLENE ACF 2000 GREEN (R2)) beş farklı oranda yaşlandırılmamış bağlayıcıya uygulanmıştır. Bitümlü bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için penetrasyon, yumuşama noktası, elastik geri dönme, parlama noktası, kuvvet düktilite, viskozite ve dinamik kesme reometresi (DSR) deneyleri yapılmıştır. Katkı içeriğinin artması ile kompleks modül değerleri her iki katkı tipinde de azalmıştır. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi deney sonuçlarına göre iki gençleştiriciyle hazırlanan bitümlerin reolojik ve fiziksel özelliklerinin saf bağlayıcınıninkine benzer bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

## Investigation of physical, chemical and rheological properties of bituminous binders modified with different rejuvenators

### H I G H L I G H T S

- Rejuvenates have a great effect on viscosity
- The use of two additives as rejuvenating has been investigated
- Rejuvenates have shown that by reducing the viscosity of bitumen, it improves its workability

### Article Info

Research Article

Received: 27.11.2020

Accepted: 28.06.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.832495

### Keywords:

Bitumen,  
rejuvenator,  
rheology,  
chemical compounds,  
modification

### ABSTRACT

Due to the increase in the demand for hot mix asphalt, natural materials are decreasing recently, and the use of recycled asphalt (RAP) in the highway sector comes to the fore. However, the bituminous binder in RAP ages significantly due to long periods of exposure to atmospheric effects. Therefore, the researchers focused on effective restoration of RAP properties by adding adequate rejuvenates. However, although the use of these rejuvenates offers several advantages, they could also lead to some problems that could limit highway applications. One of these problems is the difference between the chemical composition and colloidal structure of rejuvenated bitumen and pure bitumen and the resulting impact on long-term performance of the reclaimed asphalt mixture. Thus, non-age hardened bitumen was used in the study to analyze the negative effect. In the present study, 5 different rates of two rejuvenates (SYLVAROAD™ RP1000 [R1] and ITERLENE ACF 2000 GREEN [R2]) with different viscosities were applied to non-aged binders. Penetration, softening point, elastic recovery, flash point, force ductility, Brookfield viscosity and dynamic shear rheometer (DSR) tests were conducted to analyze the physical and mechanical properties of bituminous binders. As the additive content increased, complex modulus values decreased with both types of additives. According to the results of the Fourier transform infrared spectroscopy experiment, it was determined that the rheological and physical properties of the bitumen prepared with two rejuvenators had an effect similar to those of pure binder.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalar yaygın olarak agrega, filler ve bitüm malzemelerinden oluşmaktadır [1]. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, kentleşme ve sanayileşmenin hızlı bir şekilde artmasından dolayı daha fazla karayolu ve bakım projesi yapılmaktadır. Bitümlü sıcak karışımların servis ömrü boyunca yavaş yavaş bozularak işlevlerini kaybetmektedir. Bu yüzden kaplamaların performanslarını eski haline getirmek için bozulan asfalt kaplamalar çıkarılıp, yerlerine yenisi yapılmaktadır. Sonuç olarak her yıl yüz milyon ton geri kazanılmış asfalt (RAP) kaplaması ortaya çıkmaktadır [2, 3]. RAP ve diğer inşaat atıkları, karayollarının temel tabakalarında, banketlerde ve kırsal yollarda yeniden kullanılabilir. Ayrıca RAP belirli bir oranda bitümlü sıcak karışım kaplamalara eklenebilmekte olup bu yönde çeşitli şartnameler oluşturulmuştur [4, 5]. Böylece çevresel sürdürülebilirlik odaklı olarak, karayolu üst yapılarında RAP'ın daha verimli kullanılmasını sağlamak için uygun bir strateji geliştirilmiştir [6]. Kaplama atık malzemesi olan RAP, ömrünü tamamlamış BSK kaplamaların kazıldıktan sonra öğütülmesi ve elenmesi ile yeniden kullanıma hazır hale getirilmektedir. BSK kaplamaların uzun servis ömrü nedeniyle, RAP'daki bitümlü bağlayıcı yaşlanmakta veya yüksek derecede okside olmaktadır [7]. Yaşlanma sürecinde Maltenler/Asfalt oranı azalmaktadır. Bu azalmadan dolayı bitümün sertliği artar ve bu da asfalt karışımının kırılabilirliğine neden olmaktadır. Herhangi bir gençleştirici ilave edilmeden bitümlü sıcak karışımlara düşük oranda (<20%) RAP eklenmesi, asfalt karışımlarının mekanik performansını düşük oranda olumsuz etkilemektedir [8]. Daha yüksek oranlarda RAP kullanımı, uygun maliyete sahip olmasına rağmen RAP içerisindeki yaşlanmış bitüm, asfalt karışımlarının performansı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir [9,10]. Bu nedenle geri dönüştürülmüş BSK'ların olumsuz etkilerini gidermek için uygun bir gençleştirici seçilerek RAP bağlayıcısının kötüleşmiş mekanik özelliklerinin giderilmesi planlanmaktadır. Böylece yaşlanmış bağlayıcıların Maltenler/Asfalt oranını artırarak, RAP malzemelerinin sıcaklık duyarlılığını iyileştirmektedir [10].

Geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarda yaşlanmış bitümün özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı gençleştiriciler kullanılmaktadır. Bu gençleştiriciler sayesinde gençleşmiş bitümün ve RAP kullanılan asfalt karışımların özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çeşitli çalışmalarda bitkisel yağlar, atık madeni yağlar, geleneksel veya geleneksel olmayan rafineri yağlar gençleştirici olarak kullanılmışlardır [1, 11]. Gençleştiriciler kullanıldığı zaman, geri dönüştürülmüş BSK'nın sertliği önemli ölçüde azaltılarak çatlama direncinin önemli ölçüde artırıldığı belirlenmiştir [10, 12]. Zoumanis vd. [13] altı farklı gençleştirici maddenin yaşlanmış bitümün ve RAP kullanılarak hazırlanan BSK'ların özelliklerine etkisini incelemiş, bitkisel yağın en iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca gençleştirici olarak bitkisel yağ kullanılması durumunda karışımların yorulma ömrünün, neredeyse saf bağlayıcı ile hazırlanan

karışımlar ile aynı olduğunu göstermişlerdir. Mogawer vd. [14] %50 RAP ile hazırlanan asfalt karışımlara parafinik yağ, aromatik yağ ve organik harman gençleştiricileri ekleyerek, karışımların performanslarını araştırılmışlardır. Sonuçlar, tüm gençleştiricilerin geri dönüştürülmüş asfalt karışımlarının yorulma ömürlerini uzattığını göstermiştir. İlave olarak, gençleştirici ilavesiyle hazırlanan geri dönüştürülmüş karışımlar, yaşlı karışımla karşılaştırıldığında genellikle daha düşük stabilite sertlik ve daha yüksek sünme oranına sahiptir [14]. Ganter vd. tarafından yapılan çalışmada RAP malzemesi ile saf bağlayıcı olarak modifiye bitüm kullanılmış olup bu karışımlara ilave edilen üç farklı gençleştiricinin etkisini incelemişlerdir. Yaşlanmanın bitümün makro ve mikro-reolojisi üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir [12]. Ayrıca bitümün viskozitesinde ve yüzey yapısında net değişikliklere neden olmuştur. Çalışmada kullanılan gençleştiricilerin, yaşlanmış bitümün reolojik özelliklerine olumlu yönde etkileri olduğu belirlenmiştir. Zhang vd. (2015) beş farklı viskoziteye sahip gençleştirici tasarlayıp, yaşlanmış bağlayıcıyı gençleştirmek için kullanmışlardır. Bu çalışmada tasarlanan beş gençleştiricinin, yaşlı bitümün reolojik özelliklerini ve sertliğini, saf bağlayıcının benzer bir seviyeye getirdiği görülmüştür. Ayrıca optimum viskoziteye sahip gençleştirici (R2) en iyi gençleştirici performansını sağladığı görülmektedir [13]. Yan vd. tung yağının gençleştirici malzeme olarak kullanmışlardır. Tung yağının RAP ile hazırlanan karışımların performansına ve karakteristik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla dört farklı oranda yaşlanmış RAP ile hazırlanan karışımlara eklenmiştir. Yapılan çalışmada gençleştirilmiş asfaltların sertliğinin, saf asfaltların sertliğinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca yaşlanmış asfalt karışımların daha düşük sıcaklık hassasiyetine sahip oldukları belirlenmiştir [15]. Li vd. değişik miktarlarda atık kızartma yağı ve atık motor yağı kullanarak, yaşlandırılmış bitüm üzerindeki gençleştirme etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar temel performans testleri, mikrobik test ve kimyasal analiz testlerini uygulamışlardır. Araştırmacılar sonuç olarak optimum yağ içeriğinde bitümün geleneksel fiziksel özelliklerini atılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca yaşlanmış bitüme atık yağ ilavesi temel performans seviyesini geri getirebileceğini belirlemişlerdir [16]. Devulapalli vd. taş mastik asfalt (SMA) karışımlarına belirli oranlarda dört farklı oranda RAP malzemesi ve e farklı oranda gençleştirici ilave ederek hacimsel özelliklerini ve stabilitelelerini incelemişlerdir. Gençleştirici olarak atık motor yağı ve atık gres yağı kullanmışlardır. Sonuç olarak %40 RAP içerikli SMA karışımların hacimsel özellikleri ve nem hasarı bakımından olumsuz etki yaratmadan kullanılabileceğini belirlemişlerdir. İstatistiksel analize göre atık madeni yağın atık gres yağına göre daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir [17]. Malzeme teknolojisindeki gelişmeler, daha etkin gençleştirici malzemelerin üretimi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada literatürde çok fazla yer alamayan yeni nesil iki farklı gençleştirici bitümlü bağlayıcıların mekanik, reolojik ve kimyasal yapısına etkisi geniş bir aralıkta araştırılmıştır. Geri dönüştürülmüş asfalt karışımlar; RAP malzemesi, saf bitüm, agrega ve gençleştirici karıştırılması ile elde edilmektedir.

Gençleştiriciler, RAP içerisindeki yaşlanmış bağlayıcının özelliklerini iyileştirmesi amacıyla kullanılmasına rağmen, karışım esnasında bu gençleştiriciler ilave edilen saf bitümlü bağlayıcılara da etki etmektedir. Bu nedenle gençleştiricilerin saf bitümlerin özelliklerine etkilerinin de belirlenmesi fayda sağlayacaktır. Ayrıca önceki araştırmalara göre gençleşmiş bitümün yaşlanma hızının, saf bitümle karşılaştırıldığında daha hızlı olduğu belirlenmiştir [6]. Yapılan literatür çalışmasında bu problem hakkında çok fazla bilgiye rastlanılmamıştır. Bu düşüncelerle bu çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak iki yeni gençleştirici (SYLVAROAD™ RP1000 (R1) ve ITERLENE ACF 2000 GREEN (R2)) saf bitüme ilave edilerek reolojik ve kimyasal özellikleri incelenmiştir.

## 2. MALZEMELER VE DENEYSSEL YÖNTEMLER (MATERIALS AND EXPERIMENTAL METHODS)

### 2.1. Malzemeler (Materials)

#### 2.1.1. Bitüm ve gençleştirici (Bitumen and rejuvenator)

Çalışmada TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen, 1,015 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğundaki B 50/70 sınıfı bitüm, gençleştirici olarak SYLVAROAD™ RP1000 (R1) ve ITERLENE ACF 2000 GREEN (R2) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan gençleştiricilerin genel özellikleri Tablo 1’de görülmektedir.

#### 2.1.2. Gençleştirici katkılı bitümlerin hazırlanması (Preparation of rejuvenator added bitumens)

Bu çalışmada iki farklı gençleştirici beş farklı oranda (%1, %2, %3, %4 ve %5) saf bitüme ilave edilerek hedef bağlayıcılar hazırlanmıştır. Gençleştiriciler ile modifiye bitüm hazırlama işlemi aşağıdaki sıralamaya göre yapılmıştır.

- İlk önce saf bitüm 160±5°C’deki etüvde 30 dakika ısıtılarak akışkan hale getirildi.
- Akışkan hala getirilen bitüm 500 gram olacak şekilde karıştırıcının metal haznesine döküldü.
- Homojen ısı kaynağı oluşturmak için metal hazneye dökülen bitümün 160±5°C koşullandırılan ısıtıcı kaynağı üzerindeki ısı gömleğinin içerisine bırakıldıktan sonra ısıtıcı 160±5°C ısı dengesini sağlayana kadar bekletildi.
- Tanımlanan bitüm ağırlığınca yüzde oranlarında gençleştiricilerin sıcak bitümün içerisine döküldü.

Gençleştirici içeren bitümler, 60 dakika boyunca 1000 devir/dakika hızla çalışan mekanik karıştırıcı ile

karıştırılarak hazırlanmıştır [18]. Şekil 1’de gençleştiriciler ile modifiye bitüm hazırlama prosedürünün şematik hali, Şekil 2’de ise detaylı deneysel çalışma planı verilmiştir.

Saf ve gençleştirici içeren bağlayıcıların çalışmada kullanılan kısaltmaları Tablo 2’de verilmiştir. Saf ve gençleştirici içeren bitümlerin penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve elastik geri dönme deney sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. R1 ve R2 katkıları saf bağlayıcının penetrasyon ve parlama noktası değerlerini artırırken yumuşama noktası ve elastik geri dönme değerlerini azalttığı belirlenmiştir. Tablo 3’te görüldüğü üzere her iki gençleştirici kullanılması durumunda da gençleştirici içeriği arttıkça penetrasyon değerlerinin arttığı, yumuşama noktası, parlama noktası ve elastik geri dönme değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. R2 içeren bağlayıcıların R1 içeren bağlayıcılara göre daha yüksek penetrasyon, yumuşama noktası değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. R1 içeren bağlayıcının parlama noktası ve elastik geri dönme değerleri ise R2 içeren bağlayıcıdan daha yüksektir. Gençleştirici kullanımı ile saf bitüm daha yumuşak bir özellik göstermektedir.

### 2.2. Test Yöntemleri (Test Methods)

#### 2.2.1. Döner viskozimetre testi (Rotational viscometer test)

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Bitümlü bağlayıcıların dönel viskozimetre değerleri Brookfield DV-III cihazı kullanılarak ASTM D4402 standardına göre belirlenmiştir. Bu çalışmada, saf ve gençleştirilmiş bitümlü bağlayıcı numunelerinin viskozite değerleri altı (120°C, 135°C, 140°C, 160°C, 165°C, ve 180°C) sıcaklıkta ölçülmüştür.

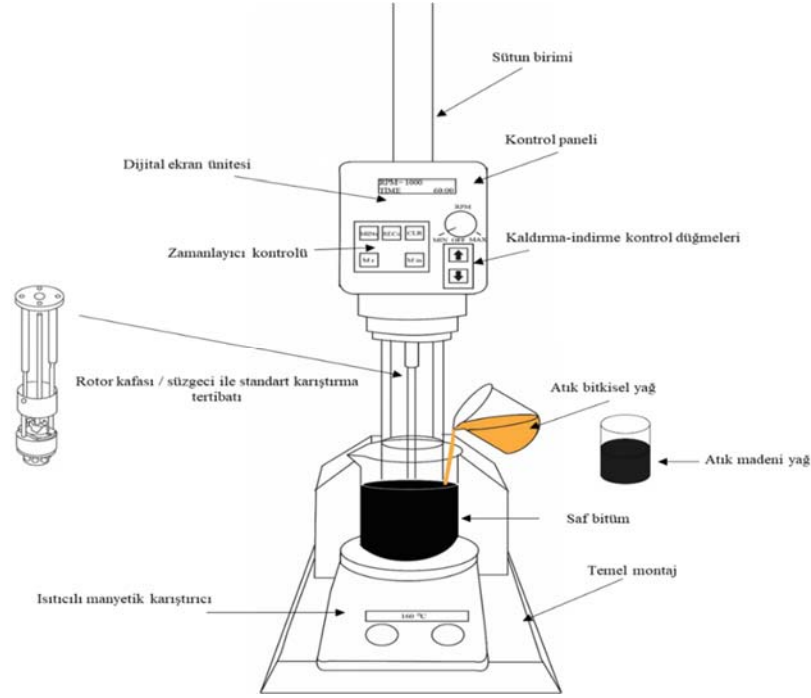
#### 2.2.2. Dinamik Kesme Reometresi testi (Dynamic Shear Rheometer test)

##### 2.2.2.1. Kompleks kayma modülü (G\*) ve faz açısı (δ) belirleme (Determination Complex shear modulus (G\*) and phase angle (δ))

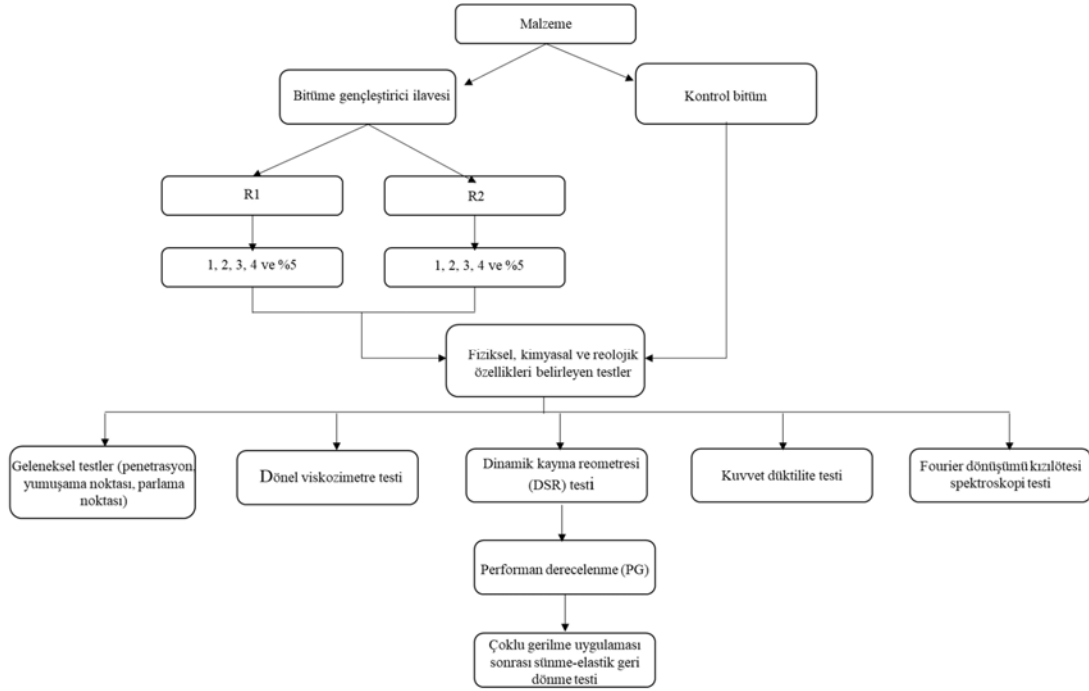
Dinamik kesme reometresi (DSR), bitümlü bağlayıcıların orta ve yüksek sıcaklıklarda viskoz ve elastik davranışlarını karakterize etmek için kullanılan bir deney yöntemidir. DSR deneyinde, bağlayıcıların kompleks kesme modülü (G\*) ve faz açısı (δ) belirlenmektedir. Kompleks kesme modülü, bağlayıcının belirli bir periyotla burulması sırasında

**Tablo 1.** R1 gençleştiricisinin genel özellikleri (R1 general properties of the rejuvenator )

Özellik	Test Metodu	Tipik Değer
Parlama noktası (°C)	ASTM D92	>280
Görünüm	Dahili yöntem	Açık ve parlak
		-20°C 1600
		0°C 350
		20°C 100
Kinematik viskozite, Cannon-Fenske (cSt)	ASTM D445	40°C 40
		60°C 23
		100°C 10



Şekil 1. Modifiye bitüm hazırlama prosedürünün şematik versiyonu (Schematic version of the modified bitumen preparation procedure)



Şekil 2. Deneysel çalışmanın yapısı (Framework of experimental study)

Tablo 2. Çalışmada kullanılan bitümlerin kısa isimlendirmeleri (Abbreviations used for the bitumen in the study)

Gençleştiricinin Adı	Gençleştirici İçeriği (%)					
	0	1	2	3	4	5
SYLVAROAD™ RP1000		R1-1	R1-2	R1-3	R1-4	R1-5
ITERLENE ACF 2000 GREEN	C	R2-1	R2-2	R2-3	R2-5	R2-5

deformasyona karşı toplam direnci temsil ederken, faz açısı uygulanan kesme gerilmesi ve ortaya çıkan kesme şekil

değiştirmesi arasındaki gecikmeyi temsil etmektedir. Daha büyük faz açısı daha viskoz bir bitümlü bağlayıcıya işaret

**Tablo 3.** Saf ve gençleştirici içeren bitümlerin konvansiyonel bağlayıcı deney sonuçları  
(Conventional binder test results for the pure and rejuvenate-modified bitumen)

Bitüm Tipi	Penetrasyon (mm <sup>-1</sup> )	Yumuşama Noktası (°C)	Parlama Noktası (°C)	Elastik Geridönme (%)
C	56	53,3	245	30
R1-1	61	50,2	257	29
R1-2	64	49,9	253	28
R1-3	79	48,7	249	27
R1-4	88	48,2	247	25
R1-5	100	45,5	245	21
R2-1	67	50,0	250	21
R2-2	74	48,9	248	19
R2-3	92	46,5	247	12
R2-4	109	46,1	246	10
R2-5	140	44,1	245	8

etmektedir. Kalıcı deformasyon, tekerlek izi parametresini ( $G^*/\sin \delta$ ), yaşlanmamış orijinal bağlayıcılar için 1,0 kPa'dan daha büyük değerlerle sınırlanarak kontrol edilir [19]. Deney, yaşlandırılmamış saf ve modifiye bitümlere gerilme kontrollü olarak Bohlin DSR II reometresi ile ASTM D7175 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney, 25 mm çapında plak ve 1 mm plak açıklığı ile 1,59 Hz frekans değerinde 52, 58, 64 ve 70°C'de uygulanmıştır. Deneyde bağlayıcıların yüksek sıcaklık performansını ve elastik davranışlarını değerlendirmek amacıyla tekerlek izi parametreleri ve faz açılıarı tespit edilmiştir.

#### 2.2.2.2. Çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme testi (Multiple stress creep recovery test (MSCR))

Bu çalışmada, MSCR testi AASHTO TP70 standardına uygun olarak T315 standardına göre hazırlanmış saf ve gençleştirici içeren bağlayıcılar üzerinde 25 mm plak kullanılarak bütün bağlayıcılar PG sıcaklığında (64°C) yapılmıştır. Test, bağlayıcılara 10 döngü 0,1 kPa, 10 döngü 3,2 kPa gerilme uygulanarak farklı sıcaklıklarda yapılmaktadır. Her bir döngü 1sn kayma gerilmesinin uygulanmasının ardından 9 sn geri dönme süresinden oluşmaktadır. 0,1 kPa kayma gerilmesi lineer viskoelastik bölgedeki bir bağlayıcının davranışını karakterize ederken, 3,2 kPa gerilme seviyesi modifiye ve saf bağlayıcılar için lineer olmayan viskoelastik bölgedeki davranışı yansıtmaktadır. Bu deney ile gençleştiricilerin ilave edildiği saf bitümlerin elastik geri dönme ve tekerlek izi özelliklerini etkileyip etkilemediği belirlenecektir.

MSCR testi ile AASHTO M332'ye göre iki parametre elde edilmektedir. Bunlar, yüzde geri dönme (R) ve kalıcı sünme uyumu ( $J_{nr}$ ) değerleridir. Bitümlü bağlayıcılar için ortalama yüzde geri dönme (R) değerleri sırasıyla, 0,1( $R_{0,1}$ ) ve 3,2( $R_{3,2}$ ) kPa kayma gerilmeleri seviyesinde Eş. 1 ve Eş. 2'ye göre hesaplanmaktadır [20].

$$R_{0,1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [\varepsilon_r(0,1, N)]}{10} \quad (1)$$

$$R_{3,2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [\varepsilon_r(3,2, N)]}{10} \quad (2)$$

Burada  $\varepsilon_r(0,1, N)$  ve  $\varepsilon_r(3,2, N)$ , N döngü sayısında sırasıyla 0,1 ve 3,2 kPa gerilme seviyesindeki yüzde geri dönmeyi, N ise her bir gerilme seviyesindeki döngü sayısını ifade etmektedir.  $J_{nr}$  parametresinin Superpave PG kriterine göre tekerlek izi direnci ile daha iyi bir kolerasyon sağladığı belirlenmiştir [21, 22]. 0,1 kPa ( $J_{nr0,1}$ ) ve 3,2 kPa ( $J_{nr3,2}$ ) için kalıcı sünme uyumu değerlerinin hesaplanması Eş. 3 ve 4'te,  $J_{nr\text{diff}}$  değerinin hesaplanması ise Eş. 5'de verilmiştir.

$$J_{nr0,1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [J_{nr}(0,1, N)]}{10} \quad (3)$$

$$J_{nr3,2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [J_{nr}(3,2, N)]}{10} \quad (4)$$

$$J_{nr\text{diff}} = \frac{(J_{nr3,2} - J_{nr0,1})}{J_{nr0,1}} * 100 \quad (5)$$

#### 2.2.3. Düktilite deneyi (Force ductility)

Kohezyon, malzemenin moleküllerini bir arada tutan kuvvet olarak bilinmektedir. Kuvvet düktilite deneyi ise bu molekülleri birbirinden ayırmaya neden olan kuvveti ölçen deney olarak tanımlanmaktadır. Düktilite, bitümlü bağlayıcının belirli bir çekme hızında kopmadan uzayabilme yeteneğidir. Deney 5°C sıcaklıkta 50 mm/min  $\pm$  2,5 mm/min çekme hızında BS EN 13589:2018 standardına uygun olarak yapılmıştır [23].

#### 2.2.4. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi testi (Fourier transform infrared spectroscopy test)

Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), malzemelerin bir ortam içindeki kimyasal fonksiyonel gruplarını belirleme yöntemidir. Kimyasal fonksiyonel

gruplar, bileşik içindeki farklı reaksiyonlardan sorumlu olan atom gruplarıdır [24]. Bu çalışmada Bruker Tensor 27 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılmıştır. Deneyde spektrum aralığı 4000-400  $\text{cm}^{-1}$  olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, belirgin zirveler saf bitüm için tanımlanmıştır 3000-2800  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde gözlemlenen yaşlanmamış bitüm spektrumundaki dört tepe,  $\text{CH}_2$  ve  $\text{CH}_3$ 'teki C-H'nin asimetrik ve simetrik uzamalarına karşılık gelir. Aynı fonksiyonel grubun bükülme titreşimi,  $\text{CH}_3$ 'ün asimetrik ve simetrik bükülmesini gösteren 1460  $\text{cm}^{-1}$  ve 1376  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenmiştir. Ayrıca C-H fonksiyonel gruplar ve alifatik indeks yapılan çalışmalara dayanarak [14, 25-27] Eş. 6, 7 ve 8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Alifatik indeks} = (A_{1376} + A_{1460}) / \sum A \quad (6)$$

$$I_{C-H} = A_{2870} / \sum A \quad (7)$$

$$I_{C-H} = A_{2955} / \sum A \quad (8)$$

Burada 1376  $\text{cm}^{-1}$  1460  $\text{cm}^{-1}$  merkezli alifatik plan deformasyonu, 1460  $\text{cm}^{-1}$  1460  $\text{cm}^{-1}$  merkezli alifatik deformasyon, 2870  $\text{cm}^{-1}$  2870 alifatik hidrojen ( $\text{CH}_3$ ) simetrik uzama, 2955  $\text{cm}^{-1}$  2955 alifatik hidrojen ( $\text{CH}_3$ ) asimetrik uzama ve  $\sum A = A_{1700} + A_{1600} + A_{14600} + A_{1376} + A_{1030} + A_{864} + A_{814} + A_{743} + A_{724} + A_{2953} + 2923; 2862)$  bantlarının alanıdır.

### 3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENT RESULTS)

#### 3.1. Viskozite ve İşlenebilirlik Gereksinimi (Viscosity and Workability Requirement)

Çalışmada saf ve gençleştirici içeren bitümler üzerinde dönel viskozimetre deneyi 6 farklı sıcaklıkta uygulanmıştır. Şekil 3'te görüldüğü üzere R1 içeren bitümlerin viskozite değerleri, R2 içeren bitümlerin viskozite değerlerinden daha yüksektir. Şekil 3'te görüldüğü üzere sıcaklık arttığı zaman viskozite değerleri azalmaktadır. Ayrıca gençleştirici kullanım oranı arttıkça viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Hem 135°C hem de 165°C sıcaklıkta katkı kullanımı ile viskozite değerleri önemli oranda azalmıştır. Bütün bağlayıcıların 135°C sıcaklıktaki viskozite

değerlerinin 3000 cP değerinden düşük olması, bağlayıcıların işlenebilirlik ve pompalanabilirlik açısından uygun olduğunu göstermektedir. Viskozite değerlerine göre gençleştiricilerin saf bitümü yumuşattığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar bize penetrasyon ve yumuşama noktası değerleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

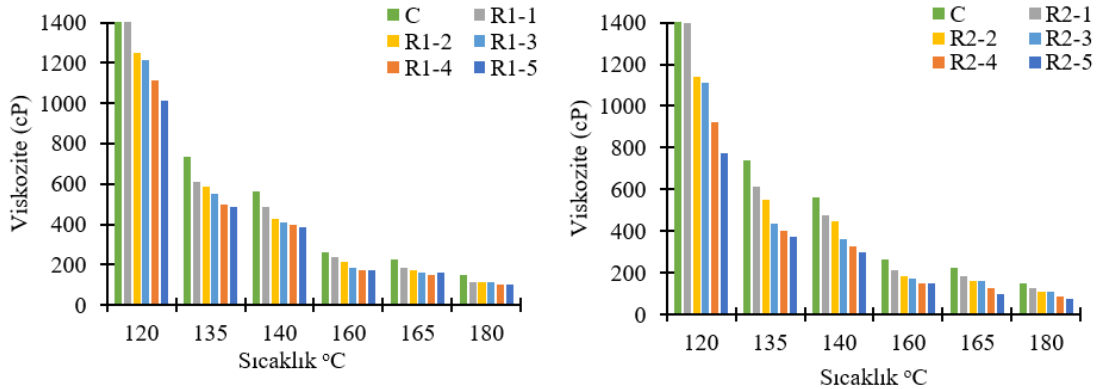
R1 katkısının bitüme %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında ilave edilmesi ile 135°C deki viskozite değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %16,9; %20,3; %25,4; %32,2 ve %33,9 oranlarında, R2 katkısının saf bitüme aynı oranlarda ilave edilmesi durumunda ise sırasıyla yüzde 16,9; 25,4; 40,7; 45,8 ve 49,1 azalmıştır. 165°C sıcaklıkta R1 bitüm modifikasyonunda benzer oranların kullanılması ile viskozite değeri saf bağlayıcıya göre %16,7; %22,2; %27,8; %33,3 ve %38,9 R2 bitüm modifikasyonunun kullanılması ile viskozite değerleri %16,7; %27,8; %27,8; %44,4 ve %55,6 azaldığı belirlenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü üzere hem R1 hem de R2 bağlayıcısı 140°C ye kadar viskozite değerleri saf bağlayıcıya göre yüksek oranlarda azalmıştır. Fakat daha yüksek sıcaklıklardaki viskozite değerleri saf bağlayıcıya göre düşük yüzdelerde azalmış, viskozite deneylerinde birbirlerine yakın değerler bulunmuştur.

#### 3.2. Reolojik Test Sonuçları (Rheological Test Results)

##### 3.2.1. Kompleks kayma modülü ve faz açısı (Complex shear modulus and phase angle)

Çalışmada kullanılan saf ve gençleştirici içeren bağlayıcılar üzerinde yapılan DSR deneyinden elde edilen tekerlek izi parametresi ( $G^*/\sin\delta$ ) değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4'te görüldüğü üzere katkı içeriğinin artması ile  $G^*/\sin\delta$  değerleri her iki katkı tipinde de azalmaktadır. Bu azalış R1 modifikasyonunda daha fazla olmaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda (52°C) modifiye bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre tekerlek izi parametresinde meydana gelen azalış yüksek sıcaklıklarda daha fazla olmaktadır. R1-5 ve R2-5 modifikasyonu 52°C'de saf bağlayıcıdan sırasıyla %66,5 ve %55,9, 70°C'de ise sırasıyla %61,2 ve %63,5 daha az  $G^*/\sin\delta$  değeri vermektedir. Modifiye bağlayıcıların sıcaklık artışı ile  $G^*/\sin\delta$  değerlerinde meydana gelen azalış saf bağlayıcınınkinden daha az olmaktadır. R1 ve R2



Şekil 3. Gençleştirici içeren bitümlerin viskozite-sıcaklık ilişkisi (The viscosity-temperature relation of rejuvenator included bitumens)

modifikasyonunun sıcaklıktan etkilenme oranlarının benzer olduğu tespit edilmiştir. Bütün bağlayıcıların 52-70°C sıcaklık aralığındaki 1,59 Hz frekansdaki kompleks kayma modülü ( $G^*$ ) değerleri Şekil 4’de verilmiştir.

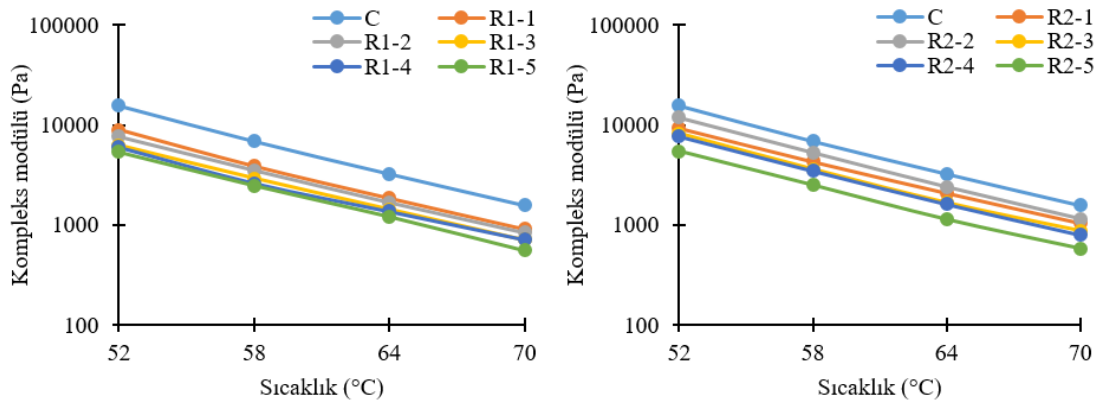
Şekil 4’de görüldüğü üzere katkı içeriğinin artması ile kompleks kayma modülü değerleri her iki katkı tipinde de azalmaktadır. Kompleks modülündeki bu azalma en fazla R1 modifikasyonunda meydana gelmektedir. Şekil 4’de sıcaklık değeri arttıkça her iki katkı içinde içeriğin artması ile kompleks modülü değerleri düzenli olarak azalmaktadır. Gençleştirici içeren bağlayıcılar içerisinde en yüksek kompleks kayma modülü değerlerini R2 içeren bağlayıcılar vermektedir. R1-1 ve R2-1 modifikasyonu 52°C’de saf bağlayıcıdan sırasıyla %43 ve %40,4, 70°C’de ise sırasıyla %42,2 ve %33,3 daha az kompleks modülü değeri vermektedir. R1-5 ve R2-5 modifikasyonunda ise 52°C’de saf bağlayıcıdan sırasıyla %65,7 ve %65,0, 70°C’de ise sırasıyla %64,8 ve %63,3 daha az kompleks modülü değeri elde edilmiştir. R1-1 bağlayıcısı 64°C’de saf bağlayıcıdan yaklaşık %43,1 daha az  $G^*$  değeri vermektedir. R2-1 bağlayıcısı ise 64°C’de saf bağlayıcıdan yaklaşık %35,5 daha az kompleks modülü değeri belirlenmiştir. Katkı oranı arttıkça R1 içeren bağlayıcılarda benzer kompleks modülü değeri vermesine rağmen R2 bağlayıcısında ise kompleks modülü değeri farklılık göstermektedir. Ayrıca R1 katkısı R2 katkısına göre saf bağlayıcının kompleks modülü değerini

daha fazla azaltmaktadır. R1 katkısı R2 katkısına göre daha fazla kompleks modülü değerini azalttığı için bağlayıcıların daha fazla viskoz özellik göstermesine neden olmuştur. Bağlayıcıların katkı içeriği ile faz açılarında meydana gelen değişim Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5’te görüldüğü üzere her iki gençleştiricinin kullanılması durumunda katkı içeriğinin artması ile faz açıları düzenli olarak artmaktadır. R1 kullanımı durumunda, artan katkı içeriği ile birlikte faz açılarında meydana gelen artış R2 modifikasyonundan daha fazla olduğu görülmektedir. Sıcaklık artışı ile faz açısı değerlerinin hem R1 hem de R2 katkısı içeren bağlayıcılar için arttığı görülmektedir. Faz açısı değerlerinin artışı bağlayıcıların daha viskoz bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Bu yüzden R2 katkısı R1 katkısına göre bağlayıcıların daha yüksek viskoz özellik göstermesine neden olmaktadır. Ayrıca her iki katkı kullanılan bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre daha viskozdur. R1-1 ve R2-1 bağlayıcıları 52°C’de saf bağlayıcıdan sırasıyla 1,032 ve 1,038 kat, 70°C’de ise sırasıyla 1,011 ve 1,018 kat daha fazla faz açısı değeri vermektedir. R1-5 ve R2-5 modifikasyonunda ise 52°C’de saf bağlayıcıdan sırasıyla 1,066 ve 1,067 kat, 70°C’de ise sırasıyla 1,027 ve 1,034 kat daha fazla faz açısı değeri vermektedir. Katkı oranı arttıkça faz açısı değeri de artmaktadır. R1 modifikasyonu sıcaklık artışına karşı esnek davranışını R2 modifikasyonuna göre daha fazla

**Tablo 4.** Bağlayıcıların  $G^*/\sin\delta$  değerleri ( $G^*/\sin\delta$  values of bitumens )

Bitüm Tipi	Test Sıcaklığı (°C)				Yüksek Sıcaklık Performans Derecesi
	52	58	64	70	
C	16471,9	7119,9	3314,2	1592,5	PG 70
R1-1	8815,8	3957,7	1877,5	918,1	PG 64
R1-2	7900,4	3590,1	1696,9	841,6	PG 64
R1-3	6436,2	2980,8	1449,2	713,4	PG 64
R1-4	5963,2	2785,3	2200,8	685,9	PG 64
R1-5	5514,8	2523,2	1223,2	618,6	PG 64
R2-1	9685,0	4416,4	2126,5	1059,4	PG 70
R2-2	13038,6	4361,4	2053,3	1008,1	PG 70
R2-3	8529,2	3671,9	1679,7	875,1	PG 64
R2-4	7912,3	3524,2	1624,6	796,8	PG 64
R2-5	7258,4	2532,6	1139,2	581,0	PG 64



**Şekil 4.** Bağlayıcıların kompleks kayma modülü - sıcaklık ilişkisi  
(The correlation between binder complex shear modulus and temperature )



koruyabilmektedir. R1 modifikasyonu sıcaklık artışına karşı esnek davranışını R2 modifikasyonuna göre daha fazla koruyabilmektedir.

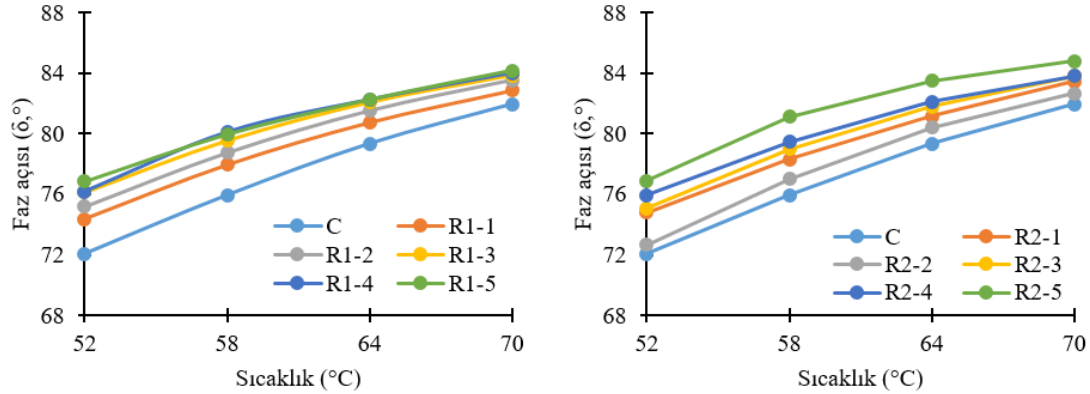
### 3.2.3. Çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme test sonuçları

(Multiple stress creep recovery (MSCR) test results)

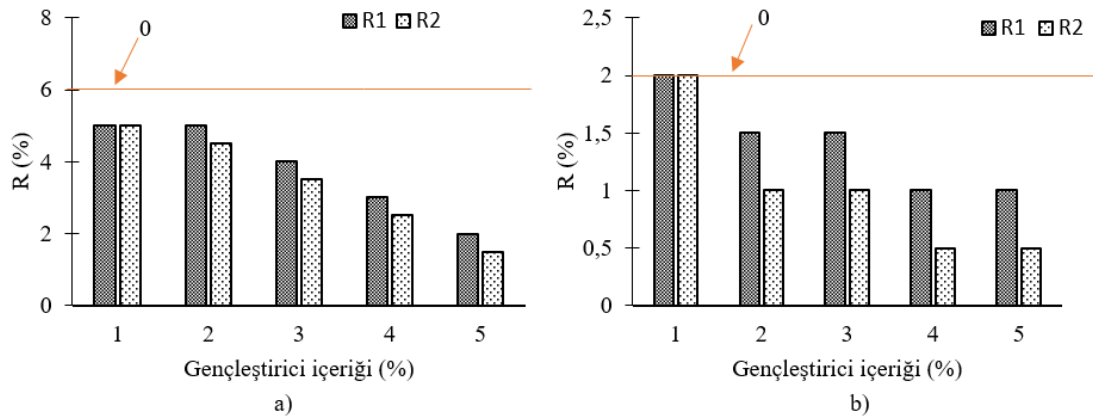
0,1 ve 3,2 kPa kesme gerilmesi altında sadece R1 ve R2 katkılı bağlayıcıların katkı oranı ile elastikliğinde (R) meydana gelen değişim Şekil 6'da verilmiştir. R1 modifikasyonunda katkı içeriği arttıkça 0,1 kPa kesme gerilmesindeki elastiklik değerleri azalmaktadır. R2 modifikasyonunun da ise katkı oranı arttıkça elastiklik değerleri de azalmaktadır. Her iki modifikasyonda da gerilmenin 0,1 kPa'dan 3,2 kPa çıkması durumunda elastiklikteki artış yüksek katkı oranında ilk önce azalır daha sonra sabit kalmaktadır. Yüksek gerilmede (3,2 kPa) yüksek katkı oranları düşük katkı oranlarına göre daha az etkili olmaktadır. Diğer taraftan gerilmenin artması ile elastiklik değerleri önemli ölçüde azalmaktadır. R1-5 bağlayıcısının 0,1 kPa gerilme seviyesindeki %2 olan elastikliği 3,2 kPa gerilme seviyesinde %1 değerine düşmektedir. Aynı şartlar altında %5 R2 modifikasyonunda ise elastik geri dönme %1,5'den %0,5 değerine düşmektedir. Gerilmenin 0,1 kPa'dan 3,2 kPa'a çıkması durumunda R1-1, R2-1, R1-5 ve

R2-5 bağlayıcıları esnekliklerini sırası ile %40, %40, %50 ve %33,3 oranlarında kaybetmektedir. R1 modifikasyonu R2 modifikasyonundan 0,1 kPa gerilme seviyesi için daha yüksek esnek davranış göstermektedir. 3,2 kPa gerilme seviyesinde iki gençleştirici içinde %1, 2, 3 katkı oranlarında elastiklik değerleri sabit kalmıştır. R1 ile bitüm modifikasyonunda %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında kullanılması ile 0,1 kPa'daki elastiklik değeri saf bağlayıcıya göre yüzde 16,6; 16,6; 33,3; 50 ve 66,7 azaltmıştır. R2 bağlayıcısında ise katkı oranı arttıkça saf bağlayıcıya göre elastiklik değeri %2 ve %3 ile %4 ve %5 katkı içeriklerinde sabit kalarak elastiklik değeri azalmaktadır. Bu sonuçlar faz açısı değerleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

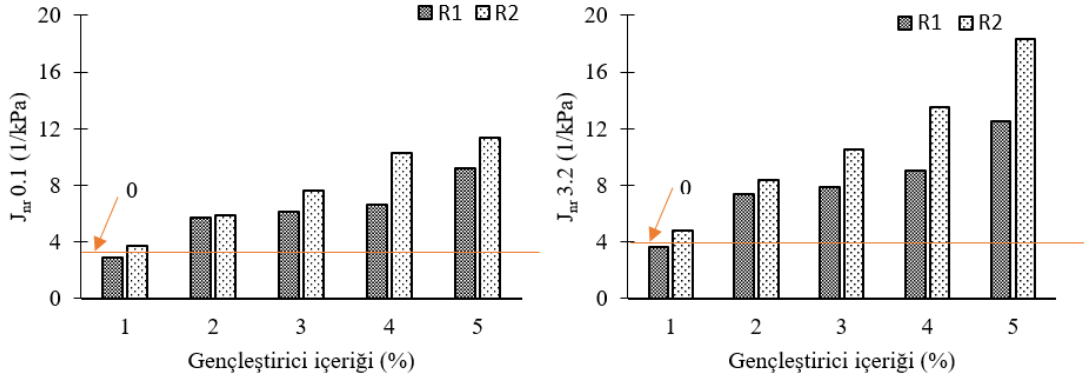
Şekil 7'de görüldüğü üzere her iki modifikasyonda da katkı içeriğinin artması ile  $J_{nr}$  değerleri önemli ölçüde artmıştır. R1-1 ve R1-5 katkılı bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerleri saf bağlayıcıya göre 0,1 kPa'da 1,1 ve 3,5 kat artmaktadır. Bu artışlar R2-1 ve R2-5 katkılı bağlayıcıda 1,4 ve 4,3 kat olmaktadır. R1-1 ve R1-5 katkılı bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerleri saf bağlayıcıya göre 3,2kPa'da ise 1,1 ve 3,7 kat artmaktadır. Bu artışlar R2-1 ve R2-5 katkılı bağlayıcıda 1,4 ve 5,4 kat olmaktadır. Hem 0,1 kPa da hem de 3,2 kPa da R2 modifikasyonu R1 modifikasyonuna göre daha yüksek  $J_{nr}$  değeri vermektedir. Bu yüzden R1 bağlayıcısı daha iyi tekerlek izi parametresi vermektedir. Gerilme seviyesi 0,1



Şekil 5. Farklı oranlarda gençleştirici içeren bağlayıcıların sıcaklık-faz açısı ilişkisi  
(The correlation between temperature and phase angle for binders with different rejuvenate content)

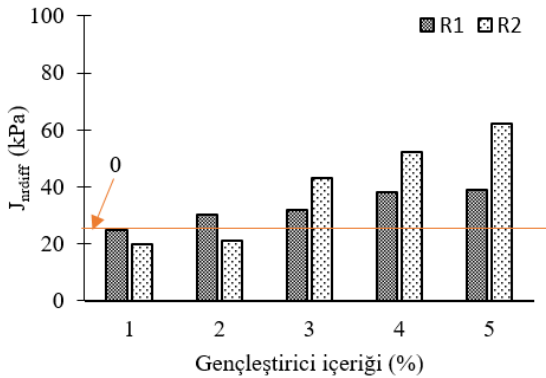


Şekil 6. a) 0,1 kPa b) 3,2 kPa gerilmede %R değerlerinin değişimi (The variation in R% under a) 0,1 kPa b) 3,2 kPa stress)



Şekil 7. J<sub>nr</sub> değerlerinin katkı oranıyla değişimi (The variations in J<sub>nr</sub> values based on the modification rate)

kPa dan 3,2 kPa'a çıktığı zaman J<sub>nr</sub> değerlerinde bir artış görülmektedir. Bu artışın her iki modifikasyonda da katkı oranı arttıkça daha yüksek oranda olduğu belirlenmiştir. R2 modifikasyonun J<sub>nr</sub> değerleri, her iki gerilme seviyesinde de saf bağlayıcıdan fazladır. R1 modifikasyonunda ise R1-1 bağlayıcısı hariç diğer oranların J<sub>nr</sub> değerleri saf bağlayıcıdan fazladır. Bağlayıcıların 0,1 ve 3,2 gerilme seviyelerindeki sünmeye toparlanmaları arasındaki farkın (J<sub>nr</sub>diff) %75'ten büyük olması tekerlek izine karşı hassasiyete işaret etmektedir [20]. Şekil 8'de görüldüğü üzere R1 ve R2 modifikasyonlarında J<sub>nr</sub>diff değerlerinin katkı içeriği ile sürekli arttığı söylenebilmektedir. Her iki modifikasyonun J<sub>nr</sub>diff değeri de saf bağlayıcının J<sub>nr</sub>diff değerinden fazladır. R1 ve R2 modifikasyonlarının %1 ve %2 katkı oranlarında R1 katkılı bağlayıcıların J<sub>nr</sub>diff değerleri R2 katkılı bağlayıcılardan fazla iken diğer katkı oranlarında ise R2 katkılı bağlayıcıların J<sub>nr</sub>diff değerleri R1 katkılı bağlayıcıların değerlerinden daha fazladır. R1-1 ve R2-1 modifikasyonu saf bağlayıcıdan sırasıyla 1,25 ve 1,00 kat daha fazla J<sub>nr</sub>diff değeri vermektedir. R1-5 ve R2-5 modifikasyonunda ise saf bağlayıcıdan sırasıyla 1,95 ve 43,10 kat daha fazla J<sub>nr</sub>diff değeri bulunmuştur.



Şekil 8. Bağlayıcıların J<sub>nr</sub>diff değerlerindeki değişim (The variations in binder J<sub>nr</sub>diff values)

### 3.3. Kuvvet Düktilitesi Test Sonuçları (Force Ductility Test Results)

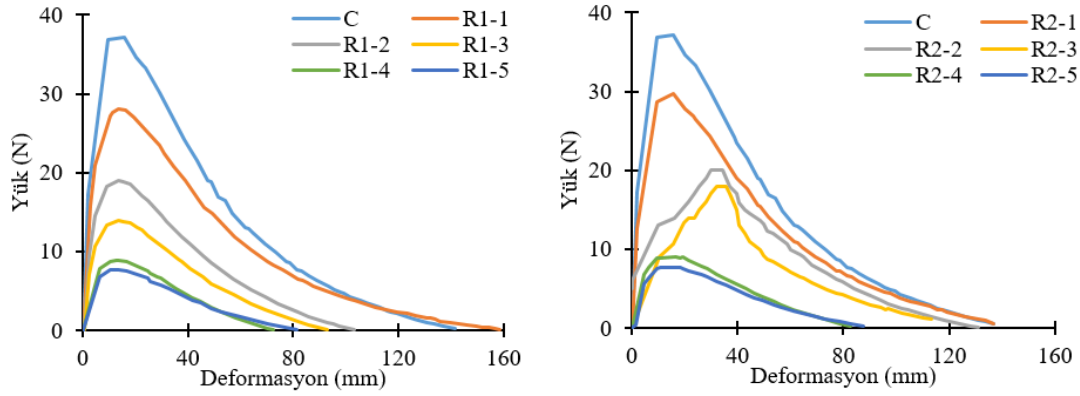
Çalışmada kullanılan saf ve modifiye bağlayıcılara uygulanan kuvvet düktilite deneyi sonucunda elde edilen

bağlayıcıların uzama sırasında gösterdikleri dirençteki değişim Şekil 9'da verilmiştir. Saf bağlayıcı 140 mm, R1-1 bağlayıcısı 158 mm, R1-5 bağlayıcısı 81 mm, R2-1 bağlayıcısı 141 mm ve R2-5 bağlayıcısı ise 87 mm deformasyon seviyesine kadar yük almış ve sonrasında kopmuştur. R1-1 ve R2-1 bağlayıcısı benzer bir davranış göstermiş, ancak 100 mm deformasyon seviyesinden sonra R2-1 bağlayıcısı çekme yüküne daha fazla direnç göstererek daha yüksek bir deformasyon seviyesinde kopmuştur. Katkı içeriğinin artması ile kuvvet düktilite değerleri her iki katkı tipinde de azalmaktadır. Bu azalma en fazla R1 modifikasyonunda meydana gelmektedir. R1-1 ve R2-1 bağlayıcıları saf bağlayıcıdan sırasıyla yüzde 24,3 ve 20,1 daha az kuvvet değeri vermektedir. R1-5 ve R2-5 bağlayıcıları ise saf bağlayıcıdan sırasıyla yüzde 79,4 ve 79,1 daha az kuvvet değeri vermektedir.

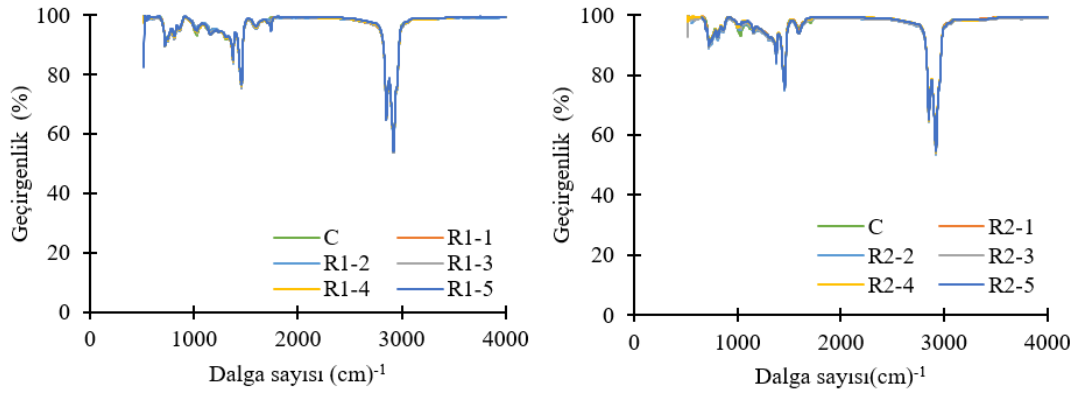
Yük-deformasyon eğrisinin altında kalan alan, bağlayıcıların deformasyon enerjilerini vermektedir. Tablo 5'te hesaplanan alan değerleri görülmektedir. Bağlayıcıların deformasyon enerjilerinin katkı içeriğinin artması ile azaldığı görülmektedir. R1 katkısı R2 katkısına göre daha düşük deformasyon enerjisi vermektedir. R2-1 bağlayıcısı R1-1 bağlayıcısına göre yüzde 1,08 daha fazla deformasyon enerjisine sahiptir. R1-1 ve R2-1 bağlayıcılarının deformasyon enerjileri saf bağlayıcıdan sırası ile %19,7 ve %18,8 daha azdır. R1-5 ve R2-5 bağlayıcılarının deformasyon enerjileri ise saf bağlayıcıdan sırası ile %84,4 ve %82,5 daha azdır. Bu yüzden saf bağlayıcıya göre deformasyon enerjisinin azalma oranı katkı içeriği arttıkça artmaktadır.

### 3.4. FTIR Test Sonuçları (FTIR Testing Results)

Saf ve modifiye bağlayıcıların FTIR deney sonuçları Şekil 10'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bağlayıcıların alifatik plan deformasyon (CH<sub>3</sub>) karşılık gelen 1376 cm<sup>-1</sup> pik noktasının, alifatik deformasyon (CH<sub>3</sub> & CH<sub>2</sub>) karşılık gelen 1460 cm<sup>-1</sup> pik noktasının, alifatik hidrojen simetrik uzama grubuna (C-C) karşılık gelen 2870 cm<sup>-1</sup> pik noktasının ve alifatik hidrojen asimetric uzama grubuna (C-C) karşılık gelen 2955 cm<sup>-1</sup> pik noktasının fazla değişmediği belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere katkı kullanımının saf bitümün kimyası üzerinde fazla bir değişikliğe neden



Şekil 9. Bağlayıcıların kuvvet-deformasyon ilişkisi (Load-deformation relation of binders)



Şekil 10. FTIR bağlayıcı spektrumları (FTIR spectra of binders)

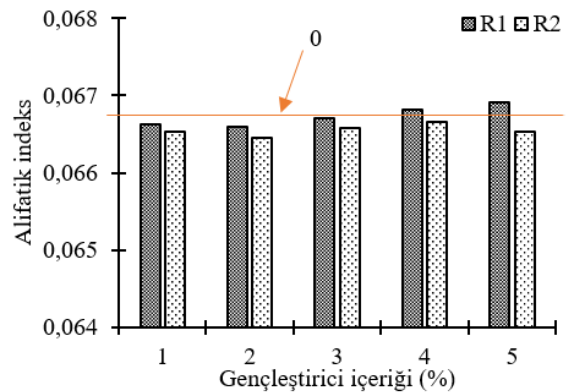
olmadığı görülmektedir. Her iki katkı tipinde de benzer bir kimyasal etki görülmektedir. Buda gençleştiricinin yaşlanmamış bitümün kimyasal özelliklerini önemli oranda değiştirmedeği belirlenmiştir. Bu durum, ilave edilen gençleştiricilerin bitümün sadece fiziksel özelliklerini değiştirdiğini göstermektedir. Saf ve modifiye bağlayıcıların alifatik indeksi Şekil 11’de verilmiştir.

**Tablo 5.** Bağlayıcıların kuvvet ölçüm (düktilite) alanları  
(The areas below the load-deformation curve of the binders)

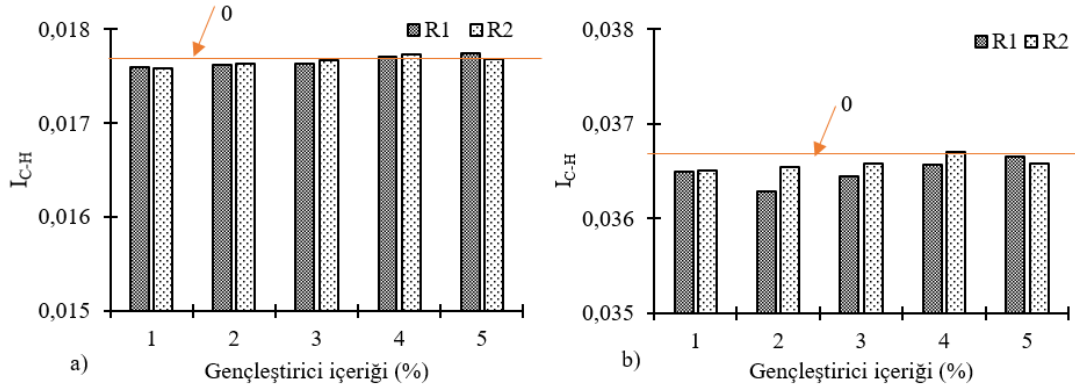
Bitüm Tipi	Kuvvet Düktilite Alanı (N.mm)
C	1992,8
R1-1	1601,1
R1-2	881,8
R1-3	621,5
R1-4	336,7
R1-5	310,1
R2-1	1618,5
R2-2	1142,1
R2-3	869,4
R2-4	400,9
R2-5	348,8

Şekil 11’de gösterildiği gibi her iki katkı kullanımının indeksler üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Alifatik indeks değerleri, oksijen içeren fonksiyonel gruplardaki değişikliklerini yansıtmaktadır [28, 29]. Şekilde görüldüğü üzere sadece R1-4 ve R1-5

bağlayıcıların alifatik indeks değerleri saf bitümünkinden fazladır. R2 bağlayıcısı saf bitümünkinden daha az alifatik indeks değerlerine sahiptir. R1 bağlayıcısında gençleştirici miktarı arttıkça alifatik indeks değerleri de artmıştır. R2 bağlayıcısında ise düzenli bir değişim gözlenmemiştir. R1-4 ve R1-5 bağlayıcılarının alifatik indeks değerleri saf bağlayıcıdan sırası ile 1,001 ve 1,003 kat fazladır. R2-4 ve R2-5 bağlayıcılarının alifatik indeks değerleri ise saf bağlayıcıdan sırası ile %0,11 ve %0,3 daha azdır. Saf ve modifiye bağlayıcıların alifatik hidrojen simetrik ve asimetrik uzama Şekil 12’de verilmiştir.



**Şekil 11.** Bağlayıcıların alifatik indeks sonuçları  
(Aliphatic index results for the binders)



**Şekil 12.** Bağlayıcıların alifatik hidrojen a) simetrik b) asimetric gerilme sonuçları (Alifatic hydrogen a) symmetric b) asymmetric stretching results of the binders)

Şekil 12’de gösterildiği gibi her iki katkı kullanımının C-H bağları üzerinde fazla bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Şekil 11a’da görüldüğü üzere R1 bağlayıcısında gençleştirici oranı arttıkça simetrik C-H indeks değerleri de artmaktadır. R2 bağlayıcısında ise R2-5 bağlayıcısında azalırken diğer bağlayıcılarda artmıştır. Saf bağlayıcıya göre en yüksek C-H indeks değerini R1-5 bağlayıcısı verirken en düşük değeri ise R2-1 bağlayıcısı vermiştir. Şekil 12a’da görüldüğü üzere sadece R1-4 ve R1-5 bağlayıcılarının C-H indeks değerleri saf bitümünkinden fazladır. R2-3, R2-4 ve R2-5 bağlayıcıları ise saf bitümünkinden daha fazla C-H indeks değerlerine sahiptir. Şekil 12b’de görüldüğü üzere R1 bağlayıcısında gençleştirici oranı arttıkça asimetric C-H indeks değerlerinde düzensiz bir değişim görülmektedir. R2 bağlayıcısında ise R2-5 bağlayıcısında azalırken diğer bağlayıcılarda artmıştır. R2-4 bağlayıcısının asimetric C-H indeks değerleri saf bitümünkinden fazladır. R2-4 bağlayıcılarının asimetric C-H indeks değerleri saf bağlayıcıdan 1,001 kat fazladır. Bu sonuçlar, yaşlanmamış saf bitüme gençleştiriciler eklenmesinin, saf bitümlerin kimyasal yapısında aşırı bir değişikliğe neden olmadığını göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, farklı viskoziteli iki farklı gençleştirici 5 farklı oranda yaşlandırılmamış bağlayıcıya ilave edilerek, bağlayıcıların kimyasal, fiziksel ve reolojik özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Farklı viskoziteye sahip gençleştiricilerin saf bitüm üzerindeki etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Saf bitüme gençleştirici ilavesi penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerini azaltırken parlama noktası değerlerini arttırmıştır. R2 katkısının R1 katkısına göre saf bitümü daha fazla yumuşattığı belirlenmiştir. Saf bağlayıcı ve gençleştirici modifiyeli bağlayıcılar üzerine yapılan elastik geri dönme deneyleri sonucunda saf bağlayıcının gençleştirici içeren bağlayıcılara göre daha elastik olduğu belirlenmiştir. Elastik geri dönme deneyine göre saf bağlayıcıdan sonra en iyi geri dönme yüzdesine R1-1

modifiye bağlayıcının, en düşük değere ise R2-5 modifiye bağlayıcının sahip olduğu tespit edilmiştir.

- R1 ve R2 kullanımı bağlayıcının viskozitesini önemli derecede azaltmaktadır. R2 katkısı R1 katkısına göre saf bitümün viskozitesini daha fazla azaltmıştır. Hem 135°C hem de 165°C sıcaklıkta saf bağlayıcıdan sonra en yüksek viskozite değerine R1-1 bağlayıcısı, en düşük viskozite değerine ise R2-5 bağlayıcısı sahip olmuştur.
- Dinamik kesme reometresi deneyine göre saf bağlayıcının yanı sıra R2-1 ve R2-2 modifiyeli bağlayıcıların 70°C’de, R1-1, R1-2, R1-3, R1-4, R1-5, R2-3, R2-4 ve R2-5 modifiyeli bağlayıcıların ise 64°C’de 1000 Pa tekerlek izi parametresini sağladığı tespit edilmiştir. 70°C’de katkı oranı arttıkça her iki gençleştirici kullanılması için de  $G^*/\sin\delta$  değerleri azalmaktadır. Ayrıca katkı içeriğinin artması ile kompleks modülü değerleri her iki katkı tipinde de azalmaktadır. Kompleks modülündeki bu azalma en fazla R1 modifikasyonunda meydana gelmektedir. En yüksek kompleks modülü değerlerini R2 katkısı vermektedir. R1 modifikasyonunda, artan katkı içeriği ile birlikte faz açılarında meydana gelen artışın R2 modifikasyonundan daha fazla olduğu görülmektedir. Faz açısı değerlerinin artışı bağlayıcıların daha viskoz bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Bu yüzden R2 içeren bağlayıcılar R1 içeren bağlayıcılara göre daha yüksek viskoz özellik göstermektedir. Ayrıca her iki katkı kullanılması durumunda elde edilen bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre daha viskozdur.
- Bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki davranışını karakterize etmek amacıyla yapılan MSCR deneyleri sonucunda gençleştirici içeren bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerlerinin saf bağlayıcıya göre daha yüksek olduğu, 64°C’de sıcaklıkta katkı kullanımının bu değeri 1-3 kat aralığında arttırdığı tespit edilmiştir. Hem 0,1 kPa da hem de 3,2 kPa gerilme seviyesinde R2 modifikasyonu R1 modifikasyonuna göre daha yüksek  $J_{nr}$  değeri vermektedir. Bu yüzden R1 katkısı daha yüksek tekerlek izi dayanım parametresi sağlamaktadır. R1 modifikasyonunda katkı içeriği arttıkça 0,1 kPa kesme gerilmesindeki elastiklik değerleri azalmıştır. R2 modifikasyonunda ise katkı oranı arttıkça elastiklik değerleri de azalmıştır.

- Saf ve gençleştirici içeren bağlayıcılar üzerine yapılan kuvvet ölçümlü düktilite deneyleri ile bağlayıcıların kohezyon özellikleri değerlendirilmiştir. Katkı içeriğinin artması ile kuvvet düktilite değerleri her iki katkı tipinde de azalmaktadır. Bu azalma en fazla R1 modifikasyonunda meydana gelmektedir. Bağlayıcıların deformasyon enerjisinin katkı içeriğinin artması ile azaldığı belirlenmiştir. R1 katkısı R2 katkısına göre daha düşük deformasyon enerjisi sağlamıştır.
- FTIR deneyleri sonucunda her iki katkı tipini içeren bağlayıcıların saf bağlayıcı ile benzer bir kimyasal yapı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu da gençleştiricinin yaşlanmamış bitümün kimyasal özelliklerini değiştirmediğine işaret etmektedir. Her iki katkı kullanımında indeksler üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Özellikle de alifatik hidrojen simetrik uzama çok fazla bir değişiklik olmamıştır.

Çalışmada kullanılan iki katkı malzemesi de asfalt karışımlar için gençleştirici olarak kullanılma açısından ümit verici sonuçlar vermiştir. Kıvam deneyleri ayrıca reolojik deneyler sonucunda her iki gençleştiricinin de bitümün gençleştirilmesinde katkı sağlayacağı tespit edilmiştir. Parlama noktası deneylerinden bu gençleştiricilerin kullanılması durumunda güvenlik açısından sorun olmayacağı belirlenmiştir. Özellikle çevresel ve ekonomik açıdan büyük önem arz eden RAP malzemelerin kullanılması durumunda her iki katkının da fayda sağlayacağı tespit edilmiştir. İki katkı arasında uygulanan deney sonuçlarına göre R2 bağlayıcısı R1 bağlayıcısına göre daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada sadece yaşlandırılmamış bağlayıcılar üzerinde analizler yapılarak kullanılan malzemelerin bağlayıcıların özelliklerine etkisi geniş bir aralıkta değerlendirilmiştir. Çalışmaya derinlik kazandırmak amacıyla saf ve RAP'dan elde edilen bağlayıcıların birlikte kullanılarak bu gençleştiricilerin ilave edilmesi ile elde edilecek bağlayıcılar üzerinde de benzer deneylerin tekrarlanmasının ayrıca bu bağlayıcılarla hazırlanan karışımlar üzerinde performans deneylerinin uygulanmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri programı (FÜBAP), Araştırma Projesi MF.19.18 kapsamında yapılmıştır. FÜBAP tarafından sağlanan mali destek için çok teşekkür ederim.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Baghaee Moghaddam T., Baaj H., The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review, *Construction and Building Materials*, 114, 805816, 2016.
2. Lin J., Guo P., Wan L., Wu S., Laboratory investigation of rejuvenator seal materials on performances of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 37, 41–45, 2012.
3. Ji J., Yao H., Suo Z., You Z., Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (3), D4016003, 2017.
4. Zaumanis M., Mallick R.B., Frank R., 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis, *Resources, Conservation & Recycling*, 92, 230–245, 2014.
5. Xuan D.X., Molenaar A.A.A., Houben L.J.M., Shrinkage cracking of cement treated demolition waste as a road base, *Materials and Structures*, 49, 631–640, 2016.
6. Ongel A., Hugener M., Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen, *Construction and Building Materials*, 94, 467–474, 2015.
7. Asli H., Ahmadinia E., Zargar M., Karim M.R., Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder, *Construction and Building Materials*, 37, 398–405, 2012.
8. Shen J., Amirhanian S., Aune Miller J., Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19, 376–384, 2007.
9. Zaumanis M., Mallick R.B., Frank R., Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt, *Materials and Structures*, 48, 2475–2488, 2015.
10. Chen M., Xiao F., Putman B., High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*, 59, 10–16, 2014.
11. Zaumanis M., Mallick R.B., Frank R., Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, *Transportation Research Record*, 2370, 17–25, 2013.
12. Ganter D., Mielke T., Maier M., Lupascu D.C., Bitumen rheology and the impact of rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 222, 414–423, 2019.
13. Zhang J., Sun C., Li P., Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. *Construction and Building Materials*, 239, 117755, 2020.
14. Mogawer W.S., Austerman A., Roque R., Ageing and rejuvenators: evaluating their impact on high RAP mixtures fatigue cracking characteristics using advanced mechanistic models and testing methods, *Road Materials and Pavement Design*, 16, 1–28, 2015.
15. Yan K., Peng Y., You L., Use of tung oil as a rejuvenating agent in aged asphalt: Laboratory evaluations. *Construction and Building Materials*, 239, 117783, 2020.
16. Li H., Zhang F., Feng Z., Li W., Zou X., Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture, *Construction and Building Materials*, 276, 122138, 2021.

17. Devulapalli L., Kothandaraman S., Sarang G., Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP, *Construction and Building Materials*, 254, 119298, 2020.
18. Kök B.V., Yılmaz M., Kuloğlu N., Alataş T., Investigation of the rheological properties of SBS modified binder produced by different methods, *Sigma*, 29, 272–288, 2011.
19. Airey G., Hunter A., Rahimzadeh B., The influence of geometry and sample preparation on dynamic shear rheometer testing. In: *Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL, 33487-2742, 3–12, 2017.
20. M332 A., D8239 Standard specification for Performance-Graded Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, AASHTO, Washington, 2015.
21. Wasage T.L.J., Stastna J.L.Z., Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test Title, *International Journal of Pavement Engineering*, 12, 561–568, 2011.
22. Behnood A., Shah A., McDaniel R.S., High-Temperature Properties of Asphalt Binders: Comparison of Multiple Stress Creep Recovery and Performance Grading Systems, *Transportation Research Record*, 2574, 131–143, 2016.
23. BSI (British Standards Institution), *Methods of test for petroleum and its products-BS 2000-520: Bitumen and bituminous binders-Determination of the tensile properties of modified bitumen by the force ductility method*, London, 2003.
24. Dong Z., Zhou T., Wang H., Luan H., Performance Comparison between Different Sourced Bioasphalts and Asphalt Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 04018063, 2018.
25. Hou X., Lv S., Chen Z., Xiao F., Applications of Fourier transform infrared spectroscopy technologies on asphalt materials. *Measurement*, 121, 304–316, 2018.
26. Lamontagne J., Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens, *Fuel*, 80, 483–488, 2001.
27. Yao H., Dai Q., You Z., Fourier Transform Infrared Spectroscopy characterization of aging-related properties of original and nano-modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, 101, 1078–1087, 2015.
28. Feng Z.G., Yu J.Y., Zhang H.L., Effect of ultraviolet aging on rheology, chemistry and morphology of ultraviolet absorber modified bitumen, *Materials and Structures*, 46, 1123–1132, 2013.
29. Feng Z., Bian H., Li X., Yu J., FTIR analysis of UV aging on bitumen and its fractions, *Materials and Structures*, 49, 1381–1389, 2016.