

Rekatif Polimer Modifiye Bitümlerin Kütleme Sürelerinin Bitüm Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Halim SOLAK^{1*}, Hasan Deniz ALTUNTAŞ², Erol İSKENDER¹, Atakan AKSOY³

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği-Trabzon, Türkiye

²Karayolları genel müdürlüğü 13. Bölge Müdürlüğü - Antalya, Türkiye

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Türkiye

Sorumlu Yazar/Corresponding Author
E-mail: imrankanmaz@ktu.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article
Geliş Tarihi/Received: 18.10.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 21.10.2024

Öz

Bu çalışmanın amacı Elvaloy/Elvax/nanokil ile modifiye edilmiş asfaltın deformasyon ve çatlama direnci üzerinde kütleme süresinin etkilerini araştırmaktır. Reaktif polimerlerle modifiye edilen asfaltın bileşenlerinin oranları, modifiye bitümün özellikleri üzerinde anahtar rol oynadığı gibi modifikasyon süreçlerini de etkilemektedir. Reaktif polimer ile yapılan modifikasyonlarda kütleme aşaması da önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada Elvax, Elvaloy ve nanokil (NC), bitüme ağırlıkça sırasıyla %0,8, %1 ve %2 oranlarında katılmış ve modifikasyon, 3000 devir/dakika karıştırma hızında, 180 °C'de 120 dakika boyunca yüksek kesme etkili mikserde gerçekleştirilmiştir. Modifiye edilmiş bitümler, 160 °C'de 0, 1, 2, 3 ve 4 saat boyunca kürlenmiştir. Kürlenmiş örneklerin düşük ve yüksek sıcaklık davranışları, kiriş eğme reometresi (BBR) ve dinamik kesme reometresi (DSR) testleri kullanılarak araştırılmıştır. BBR ve DSR deneylerinden önce kısa ve uzun dönem yaşlandırılmaları ince film halinde ısıtma (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma (PAV) yöntemleri ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kütleme süresinin bitümlü bağlayıcının çatlama ve deformasyona karşı direncini etkilediğini, uzun kütleme süresinin (4 saat) tekerlek izi ve düşük sıcaklık direncini artırdığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kütleme süresi, Polimer modifiye bitüm, Elvax, Elvaloy, DSR, BBR.

Investigation of the Effects of Curing Times of Reactive Polymer Modified Bitumens on Bitumen Behavior

Abstract

This study aims to investigate the effects of curing time on the deformation and cracking resistance of asphalt modified with Elvaloy/Elvax/nanoclay. The proportions of the components in asphalt modified with reactive polymers play a key role in influencing the properties of the modified bitumen as well as the modification processes. The curing stage is also significant in modifications made with reactive polymers. In this study, Elvax, Elvaloy, and nanoclay (NC) were added to bitumen at ratios of 0.8%, 1%, and 2% by weight, respectively, and the modification was performed in a high-shear mixer at 180 °C for 120 minutes at a mixing speed of 3000 rpm. The modified bitumens were cured at 160 °C for 0, 1, 2, 3, and 4 hours. The low and high-temperature behaviors of the cured samples were investigated using the bending beam rheometer (BBR) and dynamic shear rheometer (DSR) tests. Short-term and long-term aging before the BBR and DSR tests were conducted using rolling thin film oven (RTFOT) and pressure aging vessel (PAV) methods. The results obtained showed that the curing time affects the resistance of the bituminous binder to cracking and deformation, and that longer curing times (4 hours) increase the rutting and low-temperature resistance.

Keywords: Curing time, Polymer-modified bitumen, Elvax, Elvaloy, DSR, BBR.

Cite as;

Solak, H., Altuntaş, H.D., İskender, E., Aksoy, A. (2024). Rekatif polimer modifiye bitümlerin kütleme sürelerinin bitüm davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 5(2), 135-148. DOI: 10.53501/rteufemud.1569929

1. Giriş

Trafik miktarındaki ve yüklerindeki artışın yanı sıra değişen iklim koşullarıyla birlikte asfalt kaplamaların daha yüksek mekanik özellikler göstermesi gerekliliği oluşmuştur. Katkısız bitüm ile yapılan asfalt betonu kaplamalar kendilerinden beklenen performans özelliklerini göstermekte genellikle yetersiz kalmakta, tekerlek izi ve yorulma çatlakları gibi deformasyonlara karşı yeterli dayanım gösterememektedir.

Asfalt kaplamalarda oluşan bozulmaları geciktirmek, bakım ve onarım sıklığını azaltmak ve kaplama performansını iyileştirmek amacıyla birçok ülkede modifiye bitüm kullanımı tercih edilmektedir. Bitüm katkılarının farklı oranlarda bitüme veya agrega-bitüm karışımına katılmasıyla elde edilen asfalt karışımların performansları birçok çalışmada değerlendirilmiştir. Bitüm modifiyesi ile yol kaplamalarında meydana gelen hasarlara karşı direnç sağlamak için kaplamanın yüksek hava sıcaklıklarında yeterli rijitliğe ve düşük hava sıcaklıklarında ise yeterli esnekliğe sahip olması için araştırmalar yapılmaktadır (Anıl vd., 2018; Solak vd., 2023)

Yol üstyapılarında tekerlek izi, çökme, kabarma ve ondülasyon gibi kalıcı deformasyonlar, yorulma ve termal çatlama, sökülme ve soyulma gibi ayrılmalar oluşabilmektedir. Bu deformasyonlardan bazıları yük kaynaklı gerçekleşirken, bazıları trafik yüklerinden bağımsız oluşmaktadır. Yol üstyapısının bulunduğu bölgenin coğrafik durumu, sıcaklık değişimleri, bitüm özellikleri ve trafik yükleri yorulma çatlaklarının oluşmasına sebep olabilir. Düşük sıcaklık çatlakları olarak adlandırılan çatlaklar ise yükten bağımsız asfalt betonunun hızlı soğuma ve düşük sıcaklık esnasında maruz kaldığı gerilmeler ile kaplamanın kırılma dayanımının aşılmasıyla meydana gelmektedir (Gunalan, 2005). Kalıcı deformasyonlardan biri olan tekerlek izi ise taşıt tekerleklerinin yola değdiği bölümlerde yol boyunca oluşan ve yolun enine düzgünlüğünü bozan deformasyon türüdür. Son yıllarda trafik yükünün artmasıyla esnek kaplamalarda tekerlek izi önemli bir husus haline

gelmiştir (Kutluhan ve Açar, 2011). Literatürde, düşük sıcaklık çatlakları ve tekerlek izi deformasyonlarına karşı bitüm özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Bhnood ve Gharehveran, 2019). Bu çalışmalarda, polimer modifiyeli asfalt kaplamaların tekerlek izi ve termal çatlaklara karşı üstün dayanım gösterdiği ve aynı zamanda yorulma, soyulma ve sıcaklık duyarlılığında azalma sağladığı görülmüştür. Polimer türleriyle modifiye edilmiş kaplamaların yoğun trafikli kavşaklarda, havaalanlarında ve yarış pistleri de dahil olmak üzere birçok yoğun gerilme seviyesine sahip kaplamalarda yüksek dayanım gösterdiği belirtilmiştir (King vd., 1999).

Polimer katkıları; stiren/budatien, doğal ve kauçuk gibi polimerleri içeren elastomerik polimerler ve polipropilen, polietilen polimerleri içeren plastomerik polimerlerden oluşmaktadır. Asfalt kaplama performansını geliştirmek için en yaygın kullanılan polimer stiren-butadien-stiren (SBS) polimeridir. SBS kullanımının oldukça popüler olmasına rağmen depolama stabilitesi düşük olduğu için ekonomik görülmemektedir. Yapılan son çalışmalarda Elvax ve Elvaloy polimerlerinin SBS polimerine alternatif olabileceği ve kaplamada deformasyon direncini arttırdığı görülmüştür. Tavsiye edilen oranlarda Elvax/Elvaloy modifiye bağlayıcı kullanımında, kaplamanın düşük sıcaklık çatlama direncinin, su hasarı direncinin ve tekerlek izi direncinin arttığı ve uzun dönemde ekonomik olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Kumandaş vd., 2021).

Nanomalzemeler de polimerlerin asfalt içerisinde daha iyi dağılabilmelerini sağlayabilmek amacıyla kullanılabilir. Nanomalzemeler, yüksek yüzey alanı ve yüksek yüzey serbest enerjisine sahiptir. Arayüz atomları, harici kuvvetlerle bu atomların bağ kurmalarına olanak sağlayabilecek karışık tarzda dizilmişlerdir. Polimer partikülleri nanopartiküllere absorbe edilebilir ve yüzey serbest enerjisi azalır, bu da küçük polimer partiküllerinin yüzeyinin serbest enerjisini azaltır, küçük polimer partiküllerinin bir araya toplanmasını önler ve polimer ile asfalt

arayüzünün bağlanma kapasitesini artırır (İskender, 2019). Eksfoliyeye olarak dağılmış hidrofobik nanokiller polimer modifiye bitümlerin depolama stabilitelelerini geliştirebilmektedir (Zapién-Castillo vd., 2016).

Elvaloy katkı maddesinin modifiye bitümün yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyona karşı direncini artırırken düşük sıcaklıklarda sınırlı düzeyde performans iyileşmesi sağladığı ifade edilmektedir. Reolojik testler, Elvaloy eklemenin bitümün hem yorulma çatlamasına hem de özellikle kalıcı deformasyon karşı direnç artışı ile bitümün yüksek sıcaklık performans sınıfının da yükseldiğini göstermiştir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Atasagun, 2021). Polimer modifiye asfalt nano kompozitlerin depolama stabilitelelerinin araştırıldığı bir çalışmada; polimer modifiye bitümlere üçüncü bileşen olarak nanokil katıldığında polimer modifiye bitümlerin penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktaları ve depolama stabilitelelerinin arttığı ve plastomerik polimerlerin elastomerik olanlara göre daha yüksek depolama stabilitesi sergilediği görülmüştür (İskender, 2019).

Literatürde son yıllarda RET ile yapılan bitüm modifikasyonları, bu modifikasyonlarda izlenen seçilen modifikasyon parametreleri ve modifikasyon süreci sonundaki kürlenme koşulları Tablo 1’de özetlenmiştir. Modifikasyon işlemlerinde karıştırıcı olarak genelde mekanik mikser (MK) kullanıldığı fakat bazı çalışmalarda yüksek kesme etkili mikser (YKK) seçildiği görülmektedir. Karıştırma hızı çoğunlukla 1000 devir/dakikanın altında uygulanmaktadır. Modifikasyon sıcaklığı ise çok yüksek oranda 180 °C ile 190 °C arasında seçilmektedir. Kür koşullarında ise değişkenlik görülmektedir. Çalışmaların yarısında kür koşulu ile bilgi bulunmazken kürlenme yapılan çalışmalarda da kürlenme sıcaklığı ile süresinin değişkenliği göze çarpmaktadır. Polifosforik asit (PPA) kullanıldığı durumda 120 dakikaya kadar, kullanılmadığı durumda da 24 saate kadar değişen kürlenme süreleri, 165 °C ile 190 °C arasında kürlenme sıcaklıkları uygulanmaktadır. Literatürde, RET modifiye bitümlerin kürlenme koşulları üzerine yapılan araştırmaların eksikliği görülmektedir

Tablo 1. Son yıllarda yapılan çalışmalardaki RET modifikasyon koşulları ve kürlenme süreleri (Kumandaş vd., 2021)

Table 1. RET modification conditions and curing times in recent studies (Kumandaş vd., 2021)

Saf Bitüm	RET Türü	RET (%)	PPA (%)	Karıştırma Parametreleri				Kür Koşulları		Referans
				Karıştırıcı Türü	Hız (dev/dk)	Sıcaklık (°C)	Süre	Sıcaklık (°C)	Süre	
AC 70/100	Elvaloy AM, Elvaloy 4170	1.6, 1.9	-	Y. K.K.	-	180-185	4 s	180	24 s	[1]
VG 30	Elvaloy 4170	1.5, 1.8, 2	-	M. K.	1550	180	90 dk	-	-	[2]
AC 90/130	Elvaloy 4170	1.4	-	M. K.	200	180	2 s	180	10 dk	[3]
AC 50/70	Elvaloy 4170	1.3	0.3	M. K.	300	190	2 s	-	-	[4]
AC 50/70	Elvaloy 4170	0.6	0.2	Y. K.K.	-	180	-	-	-	[5]
AC 50/70	Elvaloy 4170	1	0.2	M. K.	120	200	2-7 s	-	-	[6]
AC 60/70	Elvaloy RET	1.35	1.4 g	M. K.	120	165	90 dk	-	2 s	[7]
AC 60/70	Elvaloy 4170	1, 2, 3, 4	-	Y. K.K.	1000	180	-	-	-	[8]
AC 40/50, AC 60/80, AC 80/100	Elvaloy RET; Elvaloy AC	1,35, 1,7; 2,2,5; 3,5 4,5	0,2	-	-	165	2 s	165	90 dk	[9]

Tablo devamı 1. Son yıllarda yapılan çalışmalarda RET modifikasyon koşulları ve kürlenme süreleri (Kumandaş vd., 2021)

The rest of Table 1. RET modification conditions and curing times in recent studies (Kumandaş vd., 2021)

Saf Bitüm	RET Türü	RET (%)	PPA (%)	Karıştırma Parametreleri				Kür Koşulları		Referans
				Karıştırıcı Türü	Hız (dev/dk)	Sıcaklık (°C)	Süre	Sıcaklık (°C)	Süre	
PG 67-22	EMA-GMA	1,8	0,15 0,3	M. K.	2500	165	60 dk	160	12 s	[10]
AC 100/150	Elvaloy 4170	0,5; 0,75; 1	0,3	M. K.	500	185	2 s	185	90 dk	[11]
AC 50/70	Elvaloy RET	0,5; 1, 1,5; 2, 2,5	0,2	M. K.	120	190	2-7 s	-	-	[12]
AC 50/70	Elvaloy 4170	1,5	-	M. K.	200	185	2 s	190	24 s	[13]
AC 160/220	Elvaloy 5160	0,4; 0,8; 1,2	0,3	M. K.	500	185	2 s	185	90 dk	[14]
AC 50/70	Elvaloy RET	1; 1,25; 1,5 1,75; 2	0,2	M. K. / Y. K.K.	1000- 6000	170-180	0,5-2,5 s	-	-	[15]
AC 60/70	Elvaloy 4170	0,25	0,3	M. K.	500	185	2 s	185	90 dk	[16]
VG 30	Elvaloy	1.6	0.3	Y. K.K.	1000	175	90 dk	-	-	[17]
AC 50/70	Elvaloy 4170	1.6	0.5	M. K.	300	190	2 s	-	-	[18]

Referanslar: [1] Bulatovi ć vd., 2014a, 2014b; [2] Vachhani ve Mishra, 2014; [3] Bagdat vd., 2015; [4] Inocente Domingos ve Faxina, 2015; [5] Hampl vd., 2015; [6] Keyf, 2015; [7] Javid, 2016; [8] Irfan, vd., 2017; [9] Ali, vd., 2018; [10] Gama, vd., 2018; [11] Geçkik ve Seloglu, 2018; [12] Keyf, 2018; [13] Almusawi, vd., 2021a, 2021b; Almusawi, 2019; [14] Geçkil, 2019; [15]: Xu, vd., 2020; Xu, vd., 2019; [16] Alam, vd., 2022; [17] Singh, vd., 2019a, 2019b; Singh, vd., 2017; Singh, vd., 2018; [18] Domingos vd., 2022; Domingos vd., 2017

Yüksek kıvamlı bitümlerin sıcak iklimin yaygın olduğu bölgelerde, düşük kıvamlı bitümlerin ise soğuk iklimin yaygın olduğu yerlerde kullanılması önerilmektedir (Kaşak vd., 2004; Altaş, 2015). Ancak aynı penetrasyona sahip bağlayıcılar aynı tür olarak değerlendirilip kullanıldığında, bağlayıcılar farklı şartlarda farklı özellikler ve performanslar sergileyebilmektedir. Geleneksel laboratuvar testleri uygulama koşullarını sınırlı derecede temsil ettiğinden asfalt kaplamalar için sağlıklı bir hizmet ömrü belirlenmesinde zorluklar oluşabilmekte ve bu durum ekonomik olarak zarar oluşturabilmektedir. Bu sebeple birçok ülke yeni tasarım yöntemleri bulmaya yönelmiş ve sonuç olarak Amerika'da 1987 yılında SHRP (Superpave Highway Research Program) içerisinde Superpave olarak adlandırılan Üstün Performanslı Asfalt Kaplama anlamına gelen yöntem geliştirilmiştir. Durabilityyi arttırmaya yönelik geliştirilen yöntemde bitümün arazi koşullarında gösterdiği fiziksel özellikleri ile ilgili

Superpave bağlayıcı şartnamesi geliştirilmiştir. Bu yöntemde, standart deney sıcaklığı kullanılarak değil, kaplamanın uygulanacağı bölgenin en yüksek ve en düşük sıcaklıkları kullanılarak deneylerden bağlayıcının uygulama performansı ile ilgili doğrudan bilgiler elde edilmektedir (Cominsky vd., 1994; Orhan, 2000; Zaiewski ve Padula, 2003).

Literatürde modifiye bitümler farklı çalışmalarda farklı süreler ile kürlenmişse de malzeme özelliğine uygun kürlenme süreleri ile ilgili herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu durum modifiye bitümlerin hangi şartlarda ve ne kadar süre ile kürlenmesi gerektiğinin bilinmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Bu sebeple bu çalışmanın amacı literatürün aksine reaktif terpolimer (RET) ile modifiye edilmiş bitümde farklı kür süreleri karşılaştırılarak bitümün düşük ve yüksek sıcaklık özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaçla, Elvax-Elvaloy/nanokil modifiye bitümler üretilerek 0, 1, 2, 3 ve 4 saat kürlenme yapılmıştır. Kürlenme sonrasında bitüm

soğutularak yaşlandırılmadan, RTFOT yaşlandırması yapıldıktan sonra ve PAV yaşlandırması yapıldıktan sonra dinamik kesme reometresi ve kiriş eğme reometresi ile bitümün çatlama ve deformasyon davranışları araştırılmıştır.

2. Materyal ve metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır. Bitümün mühendislik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Elvax, Elvaloy ve nanokil katkı maddeleri modifiyer olarak kullanılmıştır. DuPont

tarafından üretilen reaktif elastomerik bir terpolimer olan Elvaloy polimeri, karışıma bitümün ağırlığının %1'i oranında eklenmiştir. Elvax 660A, endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir etilen-vinil asetat kopolimer reçinedir. %12 vinil asetat kopolimer içeriğine sahiptir. Vinil asetat bileşeninin varlığının, saf polietilene kıyasla polimerin kristalliğini azalttığı belirtilmektedir (Seyrek, 2014). Elvax, bitüme ağırlıkça %0,8 oranında eklenmiştir. Elvaloy katkı maddesinin özellikleri Tablo 3'te, Elvax katkı maddesinin özellikleri ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 2. Bitüm özellikleri [URL-1, 2023]

Table 2. Bitumen properties [URL-1, 2023]

Test	Test metod	Sonuç	Şartname Limiti
Özgül ağırlık (25 °C)	ASTM D-70	1.011	
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	52	46-54
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2592	240	≥230
Penetrasyon (25 °C) 0.1mm	TS EN 1426	63	50-70
Düüktilite (25 °C)	ASTM D-113	100+	

Tablo 3. Elvaloy katkısı özellikleri [URL-1, 2023]

Table 3. Elvaloy additive properties [URL-1, 2023]

Fiziksel özellikler	Değer	Birim	Test Standardı
Yoğunluk	0.95	g/cm ³	ASTM D792, ISO 1183
Eriyik akış hızı	12	g/10 min.	ASTM D1238, ISO 1183
Termal özellikler			
Erime noktası	80	°C (176 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Donma noktası	55	°C (131 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Mekanik özellikler			
Çekme direnci	3653	PSI	D638
Kopma uzaması	718	%	D638
Maksimum işleme sıcaklığı	220	°C (428 °F)	

Tablo 4. Elvax 660A katkısı özellikleri [URL-2, 2023].

Table 4. Elvax 660A additive properties [URL-2, 2023].

Fiziksel özellikler	Değer	Birim	Test Standardı
Yoğunluk	0.93	g/cm ³	ASTM D792, ISO 1183
Eriyik akış hızı	2.5	g/10 min.	ASTM D1238, ISO 1133
Termal özellikler			
Erime noktası	95	°C (203 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Donma noktası	81	°C (177.8 °F)	ASTM D3418, ISO 3146
Vicat yumuşama noktası	71	°C (159.8 °F)	ASTM D1525, ISO 306
Maksimum işleme sıcaklığı	235	°C (455 °F)	

Çalışmada kullanılan nanokil Eczacıbaşı ESAN tarafından üretilmiştir. Nanokil, montmorillonitin saflaştırılması ve organik modifikasyonu ile üretilmiştir. Montmorillonitik killerin başlangıç tabakalar arası mesafe değerleri yaklaşık olarak 15Å iken, organik modifikasyon yapıldığında bu değerler yaklaşık olarak 38-40 Å aralıklarına

taşınabilmektedir. Tabakalar arası mesafedeki bu artış da kilin polimer ana yapıda homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Kullanılan nanokilin kimyasal analiz sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Çalışmada nanokil bitüme ağırlıkça, %3 oranında ilave edilerek yüksek kesme etkili mikserle karıştırılmıştır.

Tablo 5. Kullanılan nanokilin kimyasal analiz sonuçları
Table 5. Chemical analysis results of the nanoclay used

Bileşim	Formül	Oranı (%)
Alüminyum oksit	Al ₂ O ₃	6±1
Kalsiyum oksit	CaO	0,4±0,1
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	0,4±0,2
Potasyum oksit	K ₂ O	0,3±0,1
Magnezyum oksit	MgO	1,4±0,2
Sodyum oksit	Na ₂ O	0,6±0,2
Silisyum dioksit	SiO ₂	44±1
Kızdırma kaybı		45±2
Titanyum dioksit	TiO ₂	0,05±0,02

Bitüm modifikasyonları yüksek kesme hızlı karıştırıcıda gerçekleştirilmiştir. Modifikasyon işlemi, 180 °C sıcaklıkta ve 3000 dev./dak. karıştırma hızında 120 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Beş grup modifiye bitüm üretilmiş ve birinci gruptaki modifiye bitüm modifikasyon sürecinden sonra, daha sonra test

edilmek üzere hemen soğutulmuştur. İkinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci grup modifiye bitümler sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 saat süre kürlenmeye bırakıldıktan sonra soğutulmuş sonraki testler için hazır hale getirilmiştir. Kürlenme sıcaklığı 180 °C seçilmiştir.



Şekil 1. a: Katkı maddesi oranı tayini, b: karıştırma işlemi, c: kürlenme işlemi
Figure 1. a: Additive ratio determination, b: mixing process, c: curing process

2.2 Metot

Üretilen modifiye bitümlere kısa dönemli ve uzun dönemli yaşlandırmayı temsil eden dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) deneyi yapılmıştır. Modifiye bitümlere dinamik kesme reometresi

(DSR) ve kiriş eğilme reometresi (BBR) deneyleri yaşlandırılmadan RTFOT ve (RTFOT + PAV) yaşlandırmasından önce ve sonra uygulanmıştır.

2.2.1 RTFOT Yaşlandırması

Dönel ince film halinde ısıtma deneyi (RTFOT), bitümlü bağlayıcılarda, depolanma, plente aktarılma, plente karıştırılma, taşınma, serilme ve sıkıştırılma işlemleri gibi süreçlerde meydana gelen kısa süreli yaşlanmayı temsil etmek amacıyla en çok kabul edilen yöntemlerden biridir (Yılmaz ve Ahmedzade, 2008).

RTFOT yaşlandırma deneyi TS EN 12607-1 (EN, 2003) yöntemine göre yapılmıştır. TS EN 12607-1'de deney yöntemi özetle, 163°C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır. Her bir şişeye 35 gr bitüm doldurulup düşey ekseninde dakikada 15 devir yapacak şekilde 75 dakika süreyle döndürülmektedir. Dönme esnasında deney aletinin tabanında bulunan bir hava üfleyici yardımıyla şişelere, akışı 4000±200 ml/dk. olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak 1,25 mm kalınlığında ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır. Deney süresinin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek, geri kalan altı şişe ise bitümün yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır.

2.2.2 PAV Yaşlandırması

Basınçla yaşlandırma kabı (PAV) deneyi ısı ve basınç uygulaması ile bitümlü bağlayıcının 7-10 yıllık bir servis süresince maruz kalacağı yaşlanmayı temsil etmek için RTFOT yaşlandırması uygulanmış örneklere kullanılmaktadır. (Rodríguez-Alloza vd., 2023). Deney TS EN 14769 (TS EN 14769, 2023) standardına göre RTFOT örneklerine yapılmıştır. Deneyde, RTFOT deneyinden çıkan numuneler her birine 50g olacak şekilde numune kaplarına konur. Numune kapları, 10 adet numune kabı alabilen raflı numune taşıyıcıya yerleştirildikten sonra basınçlı yaşlandırma kabına alınarak 2070 kPa basınç altında bitümlü bağlayıcının belirlenen yüksek sıcaklık performansına bağlı olarak 90 °C, 100 °C veya 110 °C'de 20 saat süre ile yaşlandırılır (TS EN 14769, 2023).

2.2.3 Dinamik Kesme Reometresi Deneyi

Dinamik kesme reometresi (DSR) deneyi, TS EN 14770 ve AASHTO T 315 standartları çerçevesinde bitümün yüksek ve orta sıcaklıklardaki viskoelastik özellikleri ve buna bağlı olarak sergilediği performansını belirlemek için yapılmaktadır. Yapımdan hemen sonra kaplamada meydana gelen tekerlek izi, ilerleyen dönemlerde de yorulma çatlakları gibi deformasyonlara karşı direnci değerlendirmek için yapılan DSR deneyi bitümlü bağlayıcı numunesinin sinüsoidal gerilmelere karşı davranışının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bağlayıcının tekerlek izi potansiyelini belirlemek için gerekli olan ve kesme deformasyon direnci göstergesi kompleks kesme modülü (G^*) ve faz açısı (δ°) DSR deneyi ile belirlenebilmektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Atasağun, 2021). Bu deneyde asfalt örneği sabit bir plaka ile salınım adı verilen küçük dönme hareketleri yaparak döndürülür. Belirli hızda ve ısıda döndürülen tabla ile saniyede 10 radyanlık sabit frekansta 10 devir yapılarak tamamlanır (Kennedy vd., 1994).

Elastik ve viskoz olmak üzere iki bileşeni bulunan kayma modülü (G^*), deformasyona karşı gösterdiği direnci göstermesi açısından gerilmelere tabi tutulur. Gerilmenin uygulanmasıyla meydana gelen deformasyon zaman aralığına eşit olan faz açısı (δ°) ise elastik ve viskoz deformasyon miktarının göstergesidir (McGennis vd., 1994). Yüksek sıcaklıklarda viskoz davranış gösteren bitümler, düşük sıcaklıklarda elastik katı davranışı göstermektedir. Dinamik kesme reometresi deneyi ile tekerlek izi parametresi olan $G^*/\sin\delta$ değeri elde edilir ve yüksek tekerlek izi direnci için yüksek G^* değeri ve düşük δ değeri istenmektedir. Bunun sebebi yüksek kesme modülüne sahip bağlayıcılar sertlik özelliği göstererek deformasyon direncini arttırırken, düşük faz açısına sahip bağlayıcılar yüksek elastik bileşen yapısıyla oluşan deformasyonların geri dönmesine neden olur. $G^*\cdot\sin\delta$ değeri ise yorulma değerini vermektedir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004). DSR deneyi ile bağlayıcının

yüksek sıcaklık performans sınıfı belirlenirken $G^*/\sin\delta$ değeri yaşlandırılmamış bağlayıcılar için 1 kPa, RTFOT ile yaşlandırılmış bağlayıcılar için 2.2 kPa değeri ile sınırlandırılıp, bu değerlere karşılık gelen sıcaklıklar alınmaktadır (Geçkil vd., 2011).

2.2.4 Kiriş Eğme Reometresi Deneyi

Kiriş eğme reometresi (BBR) deneyi, TS EN 14771 ve ASTM D 6648 standartlarına göre yapılabılır, bitümün düşük sıcaklıklarda sergilediği davranışın tayini için yapılmaktadır. Soğuk iklimin ağırlıkta olduğu bölgelerde bulunan esnek kaplamalarda çevre ve iklim şartlarından kaynaklanan, yüke bağlı olmayan termal çatlaklar oluşmaktadır. Bu deney ile kaplamanın en düşük sıcaklıkta göstereceği elastik davranış belirlenir (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Seyrek, 2014; Loh ve Olek, 1999; Geçkil vd., 2011). BBR deneyi ile bitüm rijitliği göstergelerinden olan sünme rijitliği (S) ve bitümün sertliğindeki değişimi ifade eden sünme oranı (m) değeri parametreleri elde edilmektedir. Bağlayıcının düşük sıcaklık çatlamlarına karşı direncinin göstergeleri olan bu parametrelerden sünme rijitliğinin (S) düşük, sünme oranının (m) yüksek olması çatlama direncinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bunun sebebi, sünme rijitliği arttıkça bağlayıcının gevrek bir davranış sergileyerek daha fazla çatlama eğilimi göstermesidir. Sünme rijitliğinin azalmasıyla ise bağlayıcıda daha küçük çekme gerilmeleri oluşarak düşük sıcaklık çatlak oluşma olasılığı azalmaktadır (Jun vd., 2008). Deneyde bilgisayar kontrolünde zaman-sünme grafiği çizilerek 60 sn sonundaki “ S ” ve “ m ” değeri hesaplanır. Superpave şartnamesine göre sünme rijitliği değeri için 300 MPa’dan fazla, sünme oranı ise 0,3 limit değerlerinden az olmamalıdır. Deney süresince birim şekil değiştirme ölçülür ve 1 numaralı formül ile sünme sertliği hesaplanır (Zaniewski ve Pumphrey, 2004; Sarışın vd., 2021).

$$S(t) = \frac{P * L^3}{4 * b * h^3 \delta(t)} \quad (1)$$

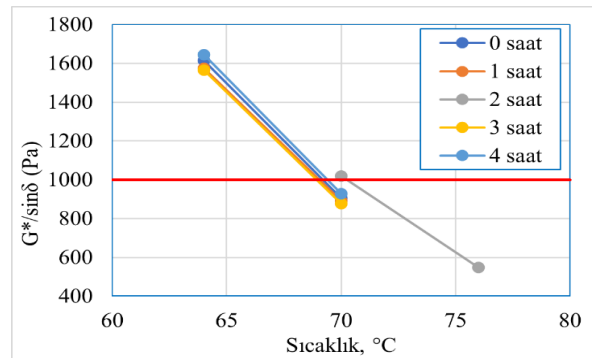
$S(t)$: t anında sünme sertliğini (MPa), P : Uygulanan sabit yükü (N), L : Kirişin yük tatbik aralığını (102 mm), b : Kiriş genişliğini (12.5 mm), h : Kiriş yüksekliğini (6.25 mm), $\delta(t)$: t anında yer değiştirmeyi (mm) ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 DSR Test Sonuçları

Kürleme sürelerine göre gruplandırılmış modifiye bitümlere, dinamik kesme reometresi deneyi yapılmıştır. Yaşlandırılmamış, RTFOT yaşlandırması yapılmış ve RTFOT+PAV yaşlandırması uygulanmış modifiye bitümlere DSR deneyleri yapılmış, kürleme süresi ile tekerlek izi parametresi arasındaki ilişki Şekil 2 ve Şekil 3’te, yorulma parametresi ile kürleme süresi arasındaki ilişki ise Şekil 4’te verilmiştir.

Şekil 2 incelendiğinde, yaşlandırılmamış örneklerde, KTS’de (URL-3) belirtilen en az 1 kPa şartname limitini sağlayan en yüksek sıcaklık 2 saat kürleme süresinde elde edilmiştir. Diğer kürleme süreleri arasında önemli bir farklılık görülebilmesine rağmen 4 saat kürleme süresinin diğerlerine göre biraz daha yüksek performans gösterdiği görülebilmektedir. 0, 1, 2, 3 ve 4 saat kürleme yapılan modifiye bitümlerin 1,0 kPa değerini sağlayan yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 69°C, 68,8°C, 70°C, 68,6°C ve 69,2°C olarak belirlenmiştir.

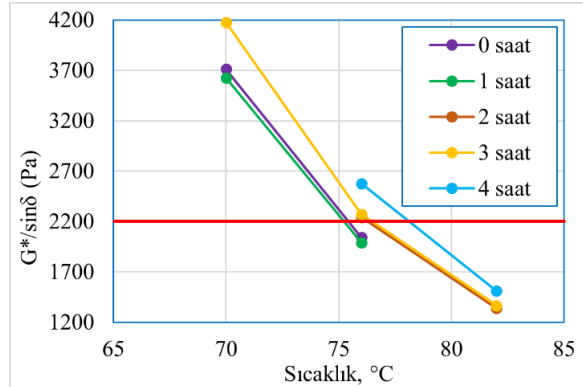


Şekil 2. Yaşlandırılmamış örneklerde $G^*/\sin\delta$ & sıcaklık ilişkisi

Figure 2. $G^*/\sin\delta$ & temperature relationship in unaged samples

Şekil 3’te RTFOT yaşlandırması yapılmış örneklerin DSR deney sonuçları verilmiştir. 0, 1, 2, 3 ve 4 saat kürleme sürelerinde 2,2 kPa

şartname limitini sağlayan en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 75,3 °C, 75 °C, 76,2 °C, 76,4 °C, 77,8 °C' de karşıladığı görülmektedir. Bu değerlere göre 4 saat kürlenme seçeneği ile en yüksek tekerlek izi direnci elde edildiği, kürlenme uygulanmayan ve 1 saat kürlenme uygulanan modifiye bitüm ile de en düşük tekerlek izi direnci sağlandığı görülmektedir. Bu sebeple uygun koşullarda 2-4 saat arası kürlenme süresi tercih edilebilmektedir.



Şekil 3. RTFOT yaşlandırması yapılmış örneklerde $G^*/\sin\delta$ & sıcaklık ilişkisi

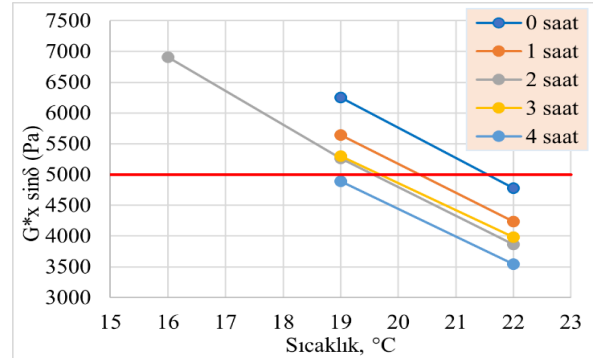
Figure 3. $G^*/\sin\delta$ & temperature relationship in RTFOT aged samples

Şekil 4'te kürlenme sürelerine göre bitüm örneklerinin yorulma davranışları gösterilmiştir. 0, 1, 2, 3 ve 4 saat kürlenme sürelerinde 5000 Pa şartname limitinin sağlandığı sıcaklıklar sırasıyla 21,5 °C, 20,3 °C, 19,6 °C, 18,8 °C ve 19,5 °C olarak görülmektedir. Bu değerler kürlenme yapılmayan modifiye bitümlerin daha yüksek yorulma direnci gösterdiğini ifade etmektedir. Kürlenme süresi arttıkça yorulma direncinde azalış eğilimi olduğu görülmektedir. Yaşlandırılmış bitümlerin daha fazla yüksek sıcaklık etkisinde kalması uzun süreli dayanım açısından zararlı olmaktadır. Bu sebeple RTFOT yaşlandırması yapılan modifiye bitümlerin kürlenmesi önerilmemektedir.

3.2 BBR Test Sonuçları

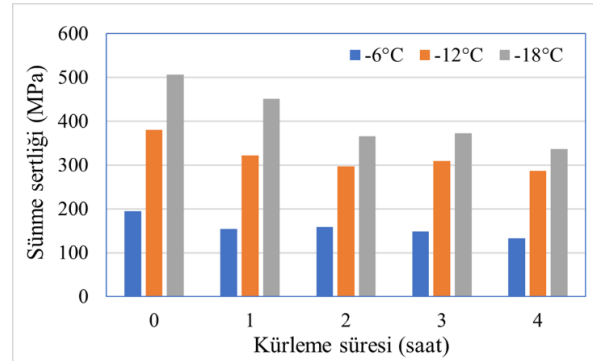
Nununelerin düşük sıcaklık davranışlarını incelemek için modifiye bitümlere -6 °C, -12 °C ve -18 °C'de BBR deneyi uygulanmıştır. Düşük sıcaklık performans sınıfları 6 °C'lik aralıklarla belirlenmektedir. Şekil 5 ve Şekil 6'da farklı

kürlenme sürelerinde modifiye bitümlerin sünme sertliği ve sünme hızları verilmiştir. Karayolları teknik şartnamesine göre düşük sıcaklığa karşı direnç sağlanabilmesi için sünme sertliğinin 300 MPa'dan küçük, sünme hızının (m) ise 0,3'ten büyük olması gerekmektedir.



Şekil 4. RTFOT + PAV yaşlandırması yapılmış örneklerin $G^* \sin\delta$ & sıcaklık ilişkisi

Figure 4. $G^* \sin\delta$ & temperature relationship of RTFOT + PAV aged samples

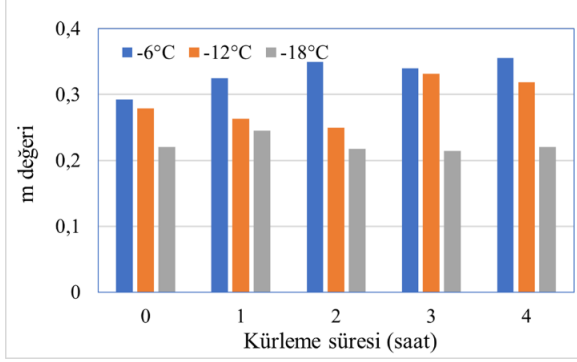


Şekil 5. Kürlenme süresi ile sünme sertliği arasındaki ilişki

Figure 5. Relationship between curing time and creep hardness

Şekil 5 incelendiğinde -18 °C' de hiçbir kürlenme süresinde şartname kriteri sağlanamamıştır. -12 °C'de ise 2 saat kürlenmede 297,1 MPa sünme sertliği ve 4 saat kürlenmede 286,32 MPa sünme sertliği sağlanarak şartname değeri sağlanmıştır. Diğer kürlenme sıcaklıklarında bu değer karşılanamamıştır. Bu sıcaklıkta en yüksek düşük sıcaklık direncini 4 saat kürlenme, en küçük düşük sıcaklık direncini 379 MPa sünme sertliği ile 0 saat kürlenme göstermiştir. -6°C'de her bir kürlenme süresi şartname limitini sağlamıştır. Bu sıcaklıkta en fazla düşük sıcaklık direnci sağlayan kürlenme süresi 132,79 MPa sünme sertliği ile 4 saat olmuştur. En az düşük sıcaklık direnci gösteren

kürleme süresi ise 194,17 sünme sertliği ile 0 saattir. Elde edilen verilere göre; 300 MPa'dan daha düşük sünme sertliğinin elde edildiği en düşük sıcaklık $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 2 saat ve 4 saat kürleme yapılan modifiye bitüm olmuştur. Ancak 4 saat kürleme yapılan modifiye bitümde daha düşük sünme sertliği oluşmuştur.



Şekil 6. Kürleme süresi ile sünme hızı arasındaki ilişki

Figure 6. Relationship between curing time and creep speed

Şekil 6 incelendiğinde $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de hiçbir kürleme süresinde 0,3'ten daha yüksek m değerinin sağlanmadığı görülmektedir. $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de, 3 ve 4 saat kürleme sürelerinin şartname değerini sağlayıp diğer sürelerin sağlamadığı görülmüştür. $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ise 0 saat kürleme süresi hariç tüm kürleme süreleri şartname limitini sağlamaktadır. Sonuç olarak 0,3 m değerini sağlayan en düşük sıcaklık $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir ve bu değerler 3 saat ve 4 saat kürleme sürelerinde sağlanmıştır.

Javid (2016), yaptığı çalışmada bitüme asfalt örneği ağırlığına %1,35, %1,7 ve %2 oranında Elvaloy RET polimeri eklemiş ve 120 rpm hızında sürekli karıştırma gerçekleştirmiştir. Karıştırma işlemi sonlandıktan sonra hazırlanan örnekler kürleme amacıyla iki saat boyunca $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik fırında bekletilmiştir. Modifiye edilen örneklere DSR deneyi uygulanmış ve kürlemenin tekerlek izine karşı direnç sağladığını ortaya koymuştur (Javid, 2016).

Geçkil, ve Seloglu (2018), yaptıkları çalışmada bitüm ağırlığına %0,5-2,5 oranında Elvaloy RET kullanarak bitümü modifiye etmiş ve modifiye edilmiş bağlayıcıları hazırlamak için saf bitüm ve katkı maddeleri, $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 120 dakika

boyunca 500 rpm hızla dönen bir mikser ile karıştırmışlardır. Katalizör olarak, saf bitümün ağırlıkça %0,3'ü kadar süper fosforik asit karışımına eklenmiş ve karıştırma işlemi ek olarak 30 dakika daha sürdürülmüştür. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, karışım örnekleri kalıcı olarak modifiye edilmiş bağlayıcılar oluşturmak için kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesine olanak tanımak amacıyla $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 90 dakika süreyle kürlenmiştir (Geçkil ve Seloglu, 2018).

4. Sonuçlar

Reaktif terpolimer modifiye bitümlerin kürleme sürelerinin modifiye bitümün reolojik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, bitüm ağırlıkça %1 oranında Elvaloy ve %0,8 oranında Elvax katkısı ile modifiye edilmiştir. Modifiye bitümler 0, 1, 2, 3 ve 4 saat kürleme işlemi yapıldıktan sonra RTFOT ve PAV yaşlandırmaları yapılarak DSR ve BBR deneyleri ile düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık davranışlarının belirlenmesi için test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Reaktif terpolimer modifiye bitümlerin kürleme sürelerinin modifiye bitümün düşük ve yüksek sıcaklık davranışları üzerinde etkilemiştir. Kısa dönem yaşlandırması yapılmış örneklerde en yüksek tekerlek izi parametresi 4 saat kürleme yapılan modifiye bitümlerde görülmüştür. Kürleme yapılmayan ve kısa süre (1 saat) kürleme yapılan modifiye bitümlerin tekerlek izi dirençleri daha düşük çıkmıştır. Yaşlandırılmamış bitümlerde ise 2 ve 4 saat kürleme sürelerinde daha yüksek tekerlek izi parametreleri elde edilmiştir.
- Yorulma parametreleri açısından, kürleme yapılmayan örnekler daha yüksek performans sergilemiştir. Bu sonuçlar modifiye bitümün uzun dönem yaşlanmasına karşı daha duyarlı olabileceği şeklinde yorumlanmıştır.
- Düşük sıcaklık çatlaması yönünden yapılan değerlendirmelerde 4 ve 2 saat kürleme sürelerinde daha düşük sünme sertliği ve 3 ve 4 saat kürleme sürelerinde ise daha yüksek sünme oranı (m) görülmüştür. Bu anlamda genel olarak 4 saat kürleme ile daha yüksek düşük sıcaklık

çatlama direnci sağlanabileceği değerlendirilmiştir.

- Literatüre bakıldığında kürlenme sürelerinin 0,5 saat, 1,5 saat ve 2 saat arasında değiştiği, farklı koşullarda ise 24 saati bulabileceği görülmüştür. Ancak yapılan çalışmaya göre en uygun kürlenme süresinin düşük sıcaklık çatlama direnci açısından 4 saat, tekerlek izi direnci açısından ise 2-4 saat arası olması gerektiği gözlemlenmiştir.
- Bu sebeple net bir bilgi sağlamak adına, reaktif terpolimer modifiye bitümlerin kürlenme süresi olarak, yaşlandırma işlemi yapılmamış bitümlerin 4 saat kürlenmenin diğer kürlenme sürelerine oranla daha fazla tekerlek izi direnci, düşük sıcaklık çatlama direnci ve yorulma direnci sağladığı söylenebilmektedir.
- Yaşlandırma yapılmış modifiye bitümlerin kürlenme yapılması halinde yorulma direncinin azaldığı gözlemlenmiş, bu sebeple kürlenme önerilmemektedir.
- Kürlenme süreleri ile ilgili çalışmanın bu alana katkı sağlayacağı düşünülüp, çalışmaların genişletilmesi ve çeşitlendirilmesi önerilmektedir.

Yazar katkısı (Author contribution)

Solak, H.: Veri toplama, Veri İşleme, Deney çalışması, Tasarım ve Dizayn,

Altuntaş, H.D.: Deney çalışması, Veri toplama, Veri İşleme,

İskender, E.: Fikir ve Kavram, Denetleme ve Danışma, Veri toplama,

Aksoy, A.: Fikir ve Kavram, Eleştirel İnceleme, Denetleme ve Danışma.

Finansman beyanı

Bu araştırma herhangi bir fon kuruluşundan, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerden özel bir hibe almamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Etik standartlar

Bu çalışma için Etik Kurul Kararı gerekmemektedir.

Kaynaklar

- Alam, G., Hafeez, I., Yaseen, G., Nasir, M.A., Hussain, A. and Ahmad, N. (2022). Assessing the aging tendency of asphalt binder using a thermal cycler. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(8), 2503-2514. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1861279>
- Ali, A., Rehman, Z., Farooq, U., Mirza, M.W. (2018). Evaluation of rutting potential of polymer modified asphalt binder using multiple stress creep and recovery method. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002176](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002176)
- Almusawı, A. (2019). Comparison between zero shear viscosity and steady shear flow methods to determine mixing and compaction temperatures of PMB. *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture*, 3(2), 1-8.
- Almusawı, A., Sengoz, B., Topal, A. (2021). Evaluation of mechanical properties of different asphalt concrete types in relation with mixing and compaction temperatures. *Construction and Building Materials*, 268, 121140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121140>
- Almusawı, A., Sengoz, B., Topal, A. (2021). Investigation of mixing and compaction temperatures of modified hot asphalt and warm mix asphalt. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), 72-83. <https://doi.org/10.3311/ppci.15118>
- Altaş, Ö.Y. (2015). Bitümlü malzemeler ve karışım şartnamelerinin karşılaştırılması. Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Anıl, Ö., Metin, G., Karacasu, M. (2018). Nano magnezyum spinel ve kolemanit ile bitümün performans özelliklerinin geliştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(3), 939-952. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416397>
- Atasağun, N. (2021). Atık çınar yaprakları ve plastik bardakların birlikte pirolizinden üretilen piroliz çarının bitümün viskozitesi ve yüksek sıcaklık performans sınıfı üzerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1703-1714. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.843014>
- Bagdat, T., Galiya, I., Yarik, A. (2015). Rheological properties of oxidized bitumen with polymer additive. *Journal of Applied Sciences*, 15(1), 129-137. <https://doi.org/10.3923/jas.2015.129.137>

- Behnood, A., Gharehveran, M. M. (2019). Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal*, 112, 766-791. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>
- Bulatović, V.O., Rek, V., Marković, K.J. (2014). Effect of polymer modifiers on the properties of bitumen. *Journal of elastomers and plastics*, 46(5), 448-469. <https://doi.org/10.1177/0095244312469964>
- Bulatović, V.O., Rek, V., Marković, J. (2014). Rheological properties of bitumen modified with ethylene butylacrylate glycidylmethacrylate. *Polymer Engineering and Science*, 54(5), 1056-1065. <https://doi.org/10.1002/pen.23649>
- Cominsky, R.J., Huber, G.A., Kennedy, T.W., Anderson, M. (1994). The superpave mix design manual for new construction and overlays (No. SHRP-A-407). Washington, DC, USA: Strategic Highway Research Program.
- Domingos, M.D.I., Faxina, A.L., Bernucci, L.L.B. (2017). Characterization of the rutting potential of modified asphalt binders and its correlation with the mixture's rut resistance. *Construction and Building Materials*, 144, 207-213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.171>
- Domingos, M.D.I., Faxina, A.L., Bernucci, L.L.B. (2022). Rutting on asphalt binders and mixtures modified with PPA and Elvaloy®: laboratory aspects and rheological modeling. *TRANSPORTES*, 30(1), 2652-2652. <https://doi.org/10.14295/transportes.v29i3.2652>
- EN, T. (2003). 12607-1, "Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar-sıcaklık ve havanın etkisiyle sertleşmeye karşı direncin tayini-Bölüm 1: RTFOT (Etüvde Hareket Halinde İnce Film Deneyi) Yöntemi". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12.
- Gama, D.A., Yan, Y., Rodrigues, J.K.G., Roque, R. (2018). Optimizing the use of reactive terpolymer, polyphosphoric acid and high-density polyethylene to achieve asphalt binders with superior performance. *Construction and Building Materials*, 169, 522-529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.206>
- Geçkil, T., Alataş, T., Ahmedzade, P. (2011). Superpave sisteminde bölge meteorolojik hava verileri kullanılarak performans dereceli (PG) bağlayıcı sınıfı seçimi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 27(1), 88-106.
- Geçkil, T., Seloglu, M. (2018). Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Construction and building materials*, 173, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.036>
- Geçkil, T. (2019). Physical, chemical, microstructural and rheological properties of reactive terpolymer-modified bitumen. *Materials*, 12(6), 921. <https://doi.org/10.3390/ma12060921>
- Gunalan, K.N. (2005). Highway Construction. In: *The handbook of highway engineering* (Ed. Fwa, T.F.). CRC press. ISBN: 9780429124358, Boca Raton, USA, 14-1. <https://doi.org/10.1201/9781420039504>
- HAMPL, R., VACIN, O., JASSO, M., STASTNA, J., ZANZOTTO, L. (2015). Modeling of tensile creep and recovery of polymer modified asphalt binders at low temperatures. *Applied Rheology*, 25(3), 32-39.
- Inocente Domingos, M.D., Faxina, A.L. (2015). Accelerated short-term ageing effects on the rheological properties of modified bitumens with similar high PG grades. *Road Materials and Pavement Design*, 16(2), 469-480. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.995209>
- Irfan, M., Saeed, M., Ahmed, S., Ali, Y. (2017). Performance evaluation of elvaloy as a fuel-resistant polymer in asphaltic concrete airfield pavements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(10), 04017163. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002018](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002018)
- İşkender, E. (2019). Bentonit nanokilinin elastomerik ve plastomerik polimer modifiye bitümlerin depolama stabilizasyonu üzerindeki etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(3), 1187-1203. <https://doi.org/10.29130/dubited.511073>
- Javid, M.A. (2016). Effect of polymer modification on rheological properties of asphalt. *Journal of Civil Engineering Research*, 6(3), 55-60.
- Kaşak, S., Orhan, F., Eribol, S., Güngör, A.G. (2004). Yeni Bitüm Standardı, 4. Ulusal Asfalt Sempozyumu, KGM, 405-413.
- Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Von Quintus, H., Moulthrop, J.S. (1994). Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program.
- Keyf, S. (2015). The modification of bitumen with reactive ethylene terpolymer, styrene butadiene styrene and variable amounts of ethylene vinyl acetate. *Research on Chemical Intermediates*,

- 41, 1485-1497. <https://doi.org/10.1007/s11164-013-1287-9>
- Keyf, S. (2018). The modification of bitumen with styrene-butadiene-styrene, ethylene vinyl acetate and varying the amount of reactive ethylene terpolymer. *Journal of Elastomers & Plastics*, 50(3), 241-255. <https://doi.org/10.1177/0095244317708590>
- King, G., King, H., Pavlovich, R.D., Epps, A.L., Kandhal, P. (1999). Additives in asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 68, 32-69.
- Kumandaş, A., Çavdar, E., Pancar, E.B., Oruç, Ş. (2021). Reaktif etilen terpolimerlerin bitümün modifikasyonunda kullanımı: Bir literatür araştırması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 845-862. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.894286>
- Kutluhan, S., Açar, E. (2011). Bitümlü sıcak karışımlarda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler ve azaltmaya yönelik öneriler. *İTÜ Dergisi/d*, 8(6).
- Loh, S.W., Olek, J. (1999). Contributions of PG graded asphalt to low temperature cracking resistance of pavement. <https://doi.org/10.5703/1288284313168>
- McGennis, R.B., Shuler, S., Bahia, H.U. (1994). Background of Superpave asphalt binder test methods (No. FHWA-SA-94-069). United States. Federal Highway Administration. Office of Technology Applications.
- Yılmaz, M., ve Ahmedzade, P. (2008). Saf ve SBS modifiyeli bitümlü bağlayıcıların kısa dönem yaşlanmadan sonraki özelliklerinin iki farklı yaşlandırma yöntemi kullanılarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3).
- Orhan, F. (2000). Asfaltın Geleceği Superpave. 3. Ulusal Asfalt Sempozyumu, KGM, Ankara, 146-160.
- Padula, M. (2002). Automation of the superpave mix design process for the west virginia division of highways, master's thesis, asphalt technology program, West Virginia, 154p. <https://doi.org/10.33915/etd.1288>
- Pumphrey, M. E. (2003). Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol, master's thesis, civil and environmental engineering, West Virginia University. <https://doi.org/10.33915/etd.1396>
- Rodríguez-Alloza, A.M., Autelitano, F., Giuliani, F. (2023). Restoration of physical properties on an aged crumb rubber modified bitumen adding a bio-based recycling agent. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01990. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01990>
- Sarışın, E., Yalçın, E., Öner, J. (2021). Analysis of rheological properties of modified bitumen with hybrid polymers. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 201-212. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.709653>
- Seyrek, E.Ş. (2014). Cibre ve şlempeden elde edilen aktif karbonun bitüm katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Türkiye.
- Singh, D., Ashish, P.K., Kataware, A., Habal, A. (2017). Evaluating performance of PPA-and-Elvaloy-modified binder containing WMA additives and lime using MSCR and LAS tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017064. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001934](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001934)
- Singh, D., Ashish, P.K., Kataware, A., Habal, A. (2019). Effects of WMA additives and hydrated lime on high-stress and high-temperature performance of Elvaloy®-and PPA-modified asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 20(6), 1354-1375. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1446040>
- Singh, D., Ashish, P.K., Chander, S., Habal, A., Kataware, A. (2019). Effect of warm-mix additives and lime on intermediate-temperature fracture property of RET-and PPA-modified asphalt binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), 04019112. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2151500>
- Singh, D., Habal, A., Ashish, P.K., Kataware, A. (2018). Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach. *Construction and Building Materials*, 158, 949-960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.079>
- Solak, H., İskender, E., Aksoy, A., İskender, C., Altuntaş, H.D., (2023). Comparison of SBS and Elvax/Elvaloy modified asphalt mixtures. 3rd International Civil Engineering & Architecture Conference (pp.1761-1772). Trabzon, Turkey. <https://doi.org/10.31462/icearc.2023.sme852>
- TS EN 14769, (2023). Bitümler ve bitümlü bağlayıcılar - Basınçlı yaşlandırma kabı (pav) ile hızlandırılmış uzun süreli yaşlandırma işlemi.

- URL-1. <https://www.gsckw.com/site/admincp/files/datasheets/2%20Elvaloy%205160%20datasheet.pdf>. 10 Ocak 2023.
- URL-2. <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/914/914-22901-01-elvax-660-ethylene-vinyl-acetate-copolymer-tds.pdf>. 10 Ocak 2023.
- URL-3. [https://www.tamyol.com.tr/UserFiles/Content/KGM Teknik Sartnamesi 2013.pdf](https://www.tamyol.com.tr/UserFiles/Content/KGM_Teknik_Sartnamesi_2013.pdf)
- Vachhani, K.K., Mishra, C. (2014). Influence of VG30 grade bitumen with and without reactive ethylene terpolymer (Elvaloy® 4170) in short term aging. *Int. J. Curr. Eng. Technol*, 4, 4206-4209. <https://doi.org/10.9790/1684-11653640>
- Xu, C., Zhang, Z., Liu, F. (2020). Improving the low-temperature performance of RET modified asphalt mixture with different modifiers. *Coatings*, 10(11), 1070. <https://doi.org/10.3390/coatings10111070>
- Xu, C., Zhang, Z., Zhao, F., Liu, F., Wang, J. (2019). Improving the performance of RET modified asphalt with the addition of polyurethane prepolymer (PUP). *Construction and Building Materials*, 206, 560-575. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.101>
- Zapién-Castillo, S., Rivera-Armenta, J.L., Chávez-Cinco, M.Y., Salazar-Cruz, B.A., Mendoza-Martínez, A.M. (2016). Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite. *Construction and Building Materials*, 106, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.099>