



**ÖĞÜTÜLMÜŞ ARAÇ LASTİĞİ MODİFİYELİ ILIK KARIŞIM
ASFALTLARIN ÇEVRESEL ETKİLER ALTINDA
UZUN DÖNEM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Mustafa AKPOLAT
141115203
Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma
Danışman: Prof. Dr. Baha Vural KÖK

EYLÜL-2018

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖĞÜTÜLMÜŞ ARAÇ LASTİĞİ MODİFİYELİ ILIK KARIŞIM ASFALTLARIN
ÇEVRESEL ETKİLER ALTINDA UZUN DÖNEM PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Mustafa AKPOLAT

141115203

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 Eylül 2018

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ekim 2018

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Baha Vural KÖK (F.Ü) 

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Necati KULOĞLU (F.Ü) 

Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR (K.T.Ü) 

Doç. Dr. Mehmet YILMAZ (F.Ü) 

Dr. Öğr. Üyesi Tacettin GEÇKİL (İ.Ü) 

EYLÜL 2018

ÖNSÖZ

Ülkemizde ve dünyada her yıl açığa çıkan milyonlarca atık araç lastiği, depolanması güvenlik tedbirlerinin alınması ve çevreye zarar vermesi yönüyle büyük bir sorun teşkil etmektedir. Çevre üzerinde büyük bir baskı oluşturan ve gün geçtikçe artan bir sorun haline gelen atık araç lastiklerinin yol inşaatlarında kullanımı, bitümlü karışıma ve çevreye sağladığı katkılar sayesinde ekonomik ve ekolojik bir sürdürülebilirlik temin etmektedir. Ancak öğütülmüş araç lastiğinin bitümlü karışımlarda kullanımı çeşitli olumsuzlukları beraberinde getirmektedir. Bu olumsuzluklar ise ılık asfalt teknolojisinin kullanımı ile bertaraf edilerek uzun dönem performansı daha iyi kaplamaların yapılmasının mümkün olacağı düşünülmektedir.

Doktoraya başladığım ve bitirmek üzere olduğum bugüne kadar gerek bilgi ve tecrübe paylaşımında gerekse laboratuvar çalışmalarında desteğini esirgemeyen ve takıldığım her noktada önümü açan, bundan sonraki akademik hayatımda da takdirini kazanmaya çalışacağım saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Baha Vural KÖK'e gönülden teşekkür ederim.

Bu süreçte her zaman her türlü konuda görüşlerine başvurduğum değerli hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet YILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım kapsamında Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü AR-GE laboratuvarlarını kullanımı noktasında bizi hiçbir zaman geri çevirmeyen ve desteğini hep yanımda hissettiğimiz Jeoloji Mühendisi Sayın Hacı Bayram TAŞKIRAN'a ve Karayolları laboratuvar çalışmalarında yardımını esirgemeyen Sayın Engin TUTAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Akademisyenliğe başladığımız ilk günden beri her türlü destekleriyle yanımda olan birlikte bu işe gönül verdiğimiz ve ülkemiz adına yapılabilecekler noktasında aynı rüyaları gördüğümüz değerli ağabeyim Sayın Arş. Gör. M.Ertuğrul ÇELOĞLU ve kardeşim Sayın Arş. Gör. Dr. Erkut YALÇIN'a teşekkürü ayrı bir borç bilirim.

Tez çalışmamı maddi olarak destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Koordinasyona Birimine teşekkür ederim.

Beni bugünlere kadar getiren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Sultan AKPOLAT ve babam Kazim AKPOLAT'a minnettarım.

Doktora tezim boyunca, sıkıştığım her noktada yanımda olup bana koşulsuz güvenen, anne ve babamla iyi bir şekilde ilgilenemediğim bu süreçte onların her türlü yardımına koşan ve eksikliğimi hissettirmeyen ve sonsuz moral, sabır ve sevgisi için eşim Emel AKPOLAT'a çok teşekkür ederim.

Bu süreçte zamanından aldığım oğlum Ertuğrul Yağız'a atfen; varlığıyla hep neşem ve umudum oldun iyi ki varsın oğlum.

MUSTAFA AKPOLAT

ELAZIĞ -2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÖZET	V
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIV
SEMBOLLER LİSTESİ	XVI
KISALTMALAR.....	XVII
1. GİRİŞ.....	1
2. AMAÇ VE KAPSAM.....	4
3. MODİFİKASYON.....	6
4. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA MEYDANA GELEN YAŞLANMA	14
5. MATERYAL VE METOT	34
5.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi.....	34
5.2. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi.....	37
5.3. Yaşlandırma Prosedürleri	40
5.3.1. Bağlayıcıların Yaşlandırma Prosedürü.....	40
5.3.2. Karışımların Hazırlanması ve Yaşlanma Prosedürü.....	42
5.4. Karışımlardan Bağlayıcıların Geri Kazanılması.....	46
5.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deney Yöntemleri.....	47
5.5.1. Yumuşama Noktası Deneyi	47
5.5.2. Dönel Viskozimetre (RV).....	48
5.5.3. Dinamik Kayma Reometresi (DSR)	49
5.5.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)	50
5.6. Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deney Yöntemleri	51
5.6.1. İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS)	51
5.6.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi (ITSM)	52
5.6.3. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	53
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
6.1. Bağlayıcı Deney Sonuçları	57
6.1.1. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları.....	57
6.1.2. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları	64
6.1.3. DSR Deney Sonuçları.....	70
6.1.4. FTIR Test Sonuçları	89
6.2. Karışım Deney Sonuçları	103
6.2.1. İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) Deney sonuçları	103
6.2.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları	108
6.2.3. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi	114
6.3. Deneylerin ve Yaşlandırma Yöntemlerinin Birlikte Değerlendirilmesi.....	132
7. SONUÇLAR.....	145
KAYNAKLAR.....	148
ÖZGEÇMİŞ	161

ÖZET

Bitümlü karışımların daha uzun süre hizmet verebilmesi için katkı kullanımı kaçınılmaz bir durum haline gelmiştir. Katkı olarak çoğunlukla polimer tipi katkıları kullanılmaktadır. Bu katkıların ek maliyetler getirmesi, enerji verimliliğinin olmaması ve yüksek emisyon değerlerine sahip olması, her yıl daha da fazla artarak açığa çıkan atık araç lastiklerinin de katkı olarak kullanımını pek çok ülkede gündeme getirmiştir. Ancak bu katkıların performansı artırırken ve polimer modifikasyonuna göre ekonomi sağlarken karışımın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemekte ve bağlayıcıların viskozitesini arttırmaktadır. Karışımların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmek ve bağlayıcı viskozitesini azaltmak amacıyla ılık karışım katkıları da son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu katkıların kullanıldığı bağlayıcı ve karışımların uzun dönemde yaşlanmaya karşı performansı konusunda çok detaylı çalışmalar bulunmamaktadır. Yaşlanma kaplama ömrünü belirleyen önemli bir parametredir. Laboratuvar da bitüm yaşlanmasını temsil etmek için dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) başta olmak üzere çeşitli test yöntemleri kullanılmaktadır. Karışımların laboratuvar da yaşlandırma yöntemi olarak kabul gören standart AASHTO R30 yöntemi ise birçok araştırmacı tarafından sorgulanmaktadır. Bu yüzden birçok araştırmacı karışımların arazi yaşlanmasını tespit etmek amacıyla farklı yaşlandırma metotları uygulamışlardır. Ancak uygulanan yaşlandırma yöntemleri, kullanılan katkıları, çevresel şartlar ve karışım tasarımı bakımından değişiklikler göstermektedir.

Bu çalışmada 4 bağlayıcı 3 karışım deneyi olarak toplam 7 farklı deney yöntemi ele alınmıştır. 3 farklı modifikasyonun (%10 Öğütülmüş araç lastiği (CR), %10 CR+%3 Sasobit ve %10 CR+%0.7 Evotherm) bağlayıcı ve bitümlü karışım içindeki etkileri laboratuvar da (60 °C’de 1, 2, 3 ve 4 hafta) ve çevresel koşullar altında (arazide) (2’şer aylık periyotlarla 12 ay boyunca) farklı yaşlandırma süreleri dikkate alınarak araştırılmıştır. Bağlayıcı deneylerinde, yaşlanma periyotlarına maruz bırakılan bitümlü karışımlardan ekstrasyon ve distilasyon yöntemi ile elde edilen bağlayıcılar kullanılmıştır. Bağlayıcı deneyi olarak Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), dinamik kayma reometresi (DSR), dönel viskozimetre (RV) ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. İndirekt çekme yorulma, indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) ve indirekt çekme mukavemeti (ITS) karışım deneyleri saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanmış laboratuvar da ve arazide yaşlandırılmış Marshall numuneleri üzerine uygulanmıştır.

Gerek bağlayıcı gerekse karışım deneylerinin yaşlanmayı belirlemedeki hassasiyetini, ayrıca CR modifikasyonunun ve CR modifikasyonu ile ılık asfalt katkılarının birlikte kullanımının etkinliğini değerlendirmek amacıyla her deneyden elde edilen yaşlanma indekslerinin değişimi incelenmiştir.

Bitümlü karışımların yaşlanma derecelerinde meydana gelecek küçük bir değişikliğin yorulma deneyindeki maksimum yük tekrar sayılarının önemli derecede farklılaşmasına neden olduğu ve yorulma deneyinin saf ve katkılı karışımlarda, yaşlanmaya karşı en hassas deney yöntemi olduğu tespit edilmiştir. Yorulma deneyinden sonra yaşlanmanın değerlendirilmesine karşı hassasiyet bakımından sırasıyla DSR, ITSM, RV, ITS, FTIR ve yumuşama noktası deneyleri gelmektedir.

Laboratuvar ve arazi yaşlandırması sonrası elde edilen bağlayıcılara yapılan deneyler sonucunda %10 CR + %3 Sasobit modifiyeli bağlayıcı bütün bağlayıcı deneylerinde en az, %10 CR modifiyeli bağlayıcı ise en fazla yaşlanan bağlayıcılar olmuştur.

%10 CR + % 0.7 Evotherm bağlayıcısı yine bu yaşlandırma yöntemlerine göre saf bağlayıcıdan daha az yaşlanmıştır. Bu yaşlandırma yöntemlerine göre CR'nin tek başına kullanılması yaşlanma bakımından olumsuz etkiye sahipken ılık asfalt katkıları ile birlikte kullanılması yaşlanma direncini önemli derecede arttırmaktadır. Standart kısa dönem yaşlandırma yönteminin CR modifiyeli karışımların yaşlandırılmasında uygun bir yöntem olmadığı tespit edilmiştir. Bağlayıcı ve karışım deneyleri bakımından gerek CR modifikasyonu gerekse CR+ılık karışım asfalt katkısı modifikasyonu saf bağlayıcı ve karışımlardan önemli derecede üstün performans göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Bitümü sıcak karışım, Modifikasyon, Öğütülmüş araç lastiği, Ilık karışım katkıları, Yaşlanma



SUMMARY

The Investigation of Long-Term Performance of Crumb Rubber Modified Warm Mix Asphalt Under Environmental Effects

Use of additives has become indispensable for bituminous mixtures to serve for a longer time. Mostly, polymer-type additives are used as additives. These additives' additional expenses, lack of energy efficiency and higher emission rates have raised the topic of using waste vehicle tires, which emerges at an increasing rate each year, as additives in many countries. However, while these additives improve performance and they provide more economic benefits in polymer modification, they affect the workability of the mixture negatively and decrease the binder viscosity. Recently, warm mixture additives have been widely used to improve the workability properties of the mixtures and to improve the binder viscosity as well. Nevertheless, not many comprehensive studies were conducted regarding the performance of binders and mixtures with these additives against long-term aging. Aging is a significant parameter that determines the service lives of pavements. In laboratories, various tests, mainly rolling thin film oven test (RTFOT) and pressure aging vessel (PAV), are used to represent the bitumen's aging. The standards of AASHTO R30 method, which is regarded as the method to age mixtures in laboratories, are questioned by researchers. Thus, many researchers used various aging methods to determine the field aging of mixtures. However, the aging methods vary in terms of the additive used, environmental conditions and mixture design.

In this study, a total of 7 test methods, 4 binder and 3 mixture tests, were evaluated. The effects of 3 different modification (%10 Crumb rubber (CR), %10 CR+%3 Sasobit and %10 CR+%0.7 Evotherm) on binders and bituminous mixtures were investigated by considering various aging periods both in laboratory (at 60 °C for 1, 2, 3, and 4 weeks) and in the field (for 12 months with 2-month intervals). In the binder tests, binders obtained from the aged bituminous mixtures by using extraction and distillation method were used. As the binder tests, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), dynamic shear rheometer (DSR), rotational viscometer (RV) and softening point tests were conducted. Indirect tensile fatigue, indirect tensile strength modulus (ITSM) and indirect tensile strength (ITS) mixture tests were conducted on laboratory and field-aged Marshall specimens, which were prepared with pure and modified binders.

The variances in aging indexes from each test were investigated in order to evaluate the sensitivity of both binder and mixture tests in predicting aging as well as the efficiencies of CR modification and using warm asphalt additives with CR modification.

It was determined that a minor change in the aging rate of bituminous mixtures could cause significant changes in the number of repetitive loads in the fatigue test, and fatigue test was determined to be the most sensitive test for aging in pure and modified mixtures. In terms of the sensitivity in evaluating aging, DSR, ITSM, RV, ITS, FTIR and softening point test follow the fatigue test, respectively.

As a result of the tests conducted on the bitumen obtained from laboratory and field aging, it was determined that 10% CR + 3% Sasobit modified binder was aged the least compared to all other binders while 10% CR modified binder was aged the most. Also with these aging

methods, 10% CR + 0.7% Evotherm modified binder was aged less than the pure binder was. According to these aging methods, sole use of CR had negative effects in terms of aging while its use with warm-mix asphalt additives substantially increased aging resistance. It was also determined that standard short-term aging method was not a suitable method for the aging of CR modified mixtures. In terms of binder and mixture tests, both CR modification and CR + warm-mix asphalt additives modification demonstrated significantly superior performances compared to pure binder and mixtures.

Keywords: Bitumen, Hot mix asphalt, Crumb rubber, Warm mix additive, Aging



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. BSK ve IKA karışımlarının üretim sırasındaki gaz salınımları	8
Şekil 3.2. Ilık ve sıcak asfalt karışımların esneklik modülündeki değişim	10
Şekil 3.3. Mekanik özellikler (a) yorulma ömrü (b) Rijtilik	12
Şekil 4.1. Oksidatif yaşlanmanın muhtemel mekanizması.....	17
Şekil 4.2. Difüzyon sürecinin şeması	17
Şekil 4.3. Bitümün yaşlanma indeksinin zamanla değişimi.....	18
Şekil 4.4. Asfalt kaplama yaşlanma süreçleri ve yüzey değişimi (a) Kaplamanın yapım sonrası görünüşü (b) Başlangıçta yaşlanmış kaplama (c) Kısmen yaşlanmış kaplama (d) Aşırı derecede yaşlanmış kaplama (e) Kaplama bozulmaları.	19
Şekil 4.5. VAPro için yaşlandırma düzeneği	24
Şekil 4.6. Yaşlanma öncesi ve sonrası CR içerginin CRMA'nın fiziksel özelliklerine etkisi (a) Penetrasyon, (b) Yumuşama noktası, (c) Esneklik (5 °C'deki)	26
Şekil 4.7. Nem hasarı periyotlarından sonra karışımın rijitliğindeki değişim.....	27
Şekil 4.8. Donma-çözünme döngüsü altında karışımın rijitliğindeki değişim	28
Şekil 4.9. Termal yaşlanmanın karışımın taşıma kapasitesine etkisi	28
Şekil 4.10. Tekerlek izi deformasyonu.....	29
Şekil 5.1. (a) CR (b) Sasobit (c) Evotherm	34
Şekil 5.2. Yüksek Kesmeli Mikser (High Shear Mixer)	35
Şekil 5.3. Deneysel çalışma akış şeması	36
Şekil 5.4. Bağlayıcı oranı – yoğunluk ilişkisi	37
Şekil 5.5. Bağlayıcı oranı – Stabilite ilişkisi	38
Şekil 5.6. Bağlayıcı oranı – boşluk oranı ilişkisi.....	38
Şekil 5.7. Bağlayıcı oranı – agregalar arası boşluk ilişkisi	39
Şekil 5.8. Bağlayıcı oranı – asfaltla dolu boşluk ilişkisi	39
Şekil 5.9. Bağlayıcı oranı – akma ilişkisi.....	40
Şekil 5.10. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi	41
Şekil 5.11. PAV deney aleti	42
Şekil 5.12. Çevresel koşullar altında yaşlanmaya bırakılan numuneler.....	44
Şekil 5.13. Laboratuvarında yaşlandırılan numuneler.....	44
Şekil 5.14. 01.06.2016-01.06.2017 tarihleri arasında aylık Elazığ Bölge maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değişimi.....	45
Şekil 5.15. Arazideki temsili numunelerin sıcaklığının hava sıcaklığıyla değişimi	46
Şekil 5.16. Temsili arazi ölçüm sistemi	46
Şekil 5.17. Ekstrasyon cihazı	47
Şekil 5.18. Distilasyon Cihazı	47
Şekil 5.19. Yumuşama noktası deney düzeneği.....	48
Şekil 5.20. Brookfield dönel viskozimetresi	49
Şekil 5.21. Dinamik kayma reometresi (DSR) deney aleti ve numune kabı.....	50
Şekil 5.22. DSR deneyinde deformasyon yönleri	50
Şekil 5.23. FTIR test cihazı.....	51
Şekil 5.24. İndirekt çekme mukavemeti deney düzeneği.....	52
Şekil 5.25. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği.....	53
Şekil 5.26. İndirekt çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği.....	55
Şekil 5.27. Temsili deformasyon - yük tekerrür sayısı ilişkisi.....	55
Şekil 6.1. Saf ve katkılı bağlayıcıların yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV sonrası yumuşama noktası değerlerindeki değişim	57

Şekil 6.2.	Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim	58
Şekil 6.3.	Laboratuvar yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi	59
Şekil 6.4.	Arazide yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim.....	60
Şekil 6.5.	Arazi yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi	61
Şekil 6.6.	Yaşlandırılmamış ve kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerden alınan bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri	63
Şekil 6.7.	Saf ve katkılı bağlayıcıların yaşlandırılmamış ve RTFOT sonrası viskozite değerlerindeki değişim.....	64
Şekil 6.8.	Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların viskozite değerlerindeki değişimi	65
Şekil 6.9.	Laboratuvar yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi	66
Şekil 6.10.	Arazide yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların viskozite değerlerindeki değişimi	67
Şekil 6.11.	Arazi yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi	68
Şekil 6.12.	Yaşlandırılmamış ve standart deney yöntemleri ile yaşlandırılmış numunelerden alınan bağlayıcıların viskozite değerlerindeki değişim	69
Şekil 6.13.	Yaşlandırılmamış saf ve katkılı bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerindeki değişimi .	70
Şekil 6.14.	Yaşlandırılmamış saf ve katkılı bağlayıcıların faz açısı (δ) değerindeki değişimi	71
Şekil 6.15.	RTFOT sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri.....	72
Şekil 6.16.	RTFOT sonrası bağlayıcıların “ δ ” değerleri	72
Şekil 6.17.	%10 şekil değiştirme seviyesinde RTFOT kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları	73
Şekil 6.18.	PAV sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerindeki değişimi.....	74
Şekil 6.19.	PAV sonrası bağlayıcıların “ δ ” değerlerindeki değişimi	74
Şekil 6.20.	RTFOT sonrası $G^*/\sin\delta$ değerlerine göre yaşlanma indekslerinin sıcaklığa göre değişimi.....	76
Şekil 6.21.	PAV sonrası faz açısı değerlerine göre yaşlanma indekslerinin sıcaklığa göre değişimi.....	77
Şekil 6.22.	Saf karışımdan elde edilen bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerleri	77
Şekil 6.23.	10-0 karışımdan elde edilen bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerleri	78
Şekil 6.24.	10-3 karışımdan elde edilen bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerleri	78
Şekil 6.25.	10-7 karışımdan elde edilen bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerleri	79
Şekil 6.26.	Saf karışımlardan elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri	79
Şekil 6.27.	10-0 elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri	80
Şekil 6.28.	10-3 elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri	80
Şekil 6.29.	10-7 karışımlardan elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri	80
Şekil 6.30.	58 °C’deki farklı yaşlandırma sürelerinde $G^*/\sin\delta$ değişimi	81

Şekil 6.31. Laboratuvar yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi	82
Şekil 6.32. Arazide yaşlandırılmış saf karışımlardan elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/Sin\delta$ değerleri.....	83
Şekil 6.33. Arazide yaşlandırılmış 10-0 karışımlarından elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/Sin\delta$ değerleri.....	83
Şekil 6.34. Arazide yaşlandırılmış 10-3 karışımlarından elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/Sin\delta$ değerleri.....	84
Şekil 6.35. Arazide yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/Sin\delta$ değerleri.....	84
Şekil 6.36. Saf ve katkılı bağlayıcıların arazide yaşlandırılması sonucu $G^*/Sin\delta$ değerlerinde meydana gelen değişim.....	85
Şekil 6.37. Arazi yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi	86
Şekil 6.38. 60 °C’de 4 hafta yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*/Sin\delta$ değerleri ile LTA sonrası bağlayıcıların $G^*/Sin\delta$ değerlerinin karşılaştırılması	88
Şekil 6.39. Arazide 12 ay yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*/Sin\delta$ değerleri ile LTA sonrası bağlayıcıların $G^*/Sin\delta$ değerlerinin karşılaştırılması	89
Şekil 6.40. Saf bitüm ve karışımların AASHTO yöntemlerine göre yaşlandırıldıktan sonra elde edilen bağlayıcı için FTIR test sonuçları	90
Şekil 6.41. B50/70 için asfalt bağlayıcı ve karışımların AASHTO yöntemlerine göre yaşlandırmanın (a) Karbonil İndeks ($I_{C=O}$) (b) Sülfoksit İndeks ($I_{S=O}$) sonuçlarına etkisi.....	91
Şekil 6.42. 0-0, 10-0, 10-3, 10-7 bağlayıcılarının modifiye, RTFOT ve PAV sonrası FTIR test sonuçları	92
Şekil 6.43. Saf, CR, CR+Sasobit ve CR+Evotherm katkılı bağlayıcıların modifiye, RTFOT ve PAV sonrası C=O indeksindeki değişimi	92
Şekil 6.44. Laboratuvarda yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişim	93
Şekil 6.45. Arazide yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişim	93
Şekil 6.46. Laboratuvarda, arazide ve R30 yöntemine göre yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	94
Şekil 6.47. Laboratuvarda, arazide ve R30 yöntemine göre yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların S=O indekslerindeki değişimi.....	95
Şekil 6.48. Laboratuvarda yaşlandırılmış CR modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	95
Şekil 6.49. Arazide yaşlandırılmış CR modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	96
Şekil 6.50. Laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış 10-0 karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	96
Şekil 6.51. Laboratuvarda yaşlandırılmış CR+Sasobit modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	97
Şekil 6.52. Arazide yaşlandırılmış CR+Sasobit modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	97
Şekil 6.53. Laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış CR+Sasobit modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	98
Şekil 6.54. Laboratuvarda yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi	99

Şekil 6.55. Arazide yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi.....	99
Şekil 6.56. Laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi.....	100
Şekil 6.57. Laboratuvarda 60 °C’de yaşlandırılmış karışımların C=O indekslerindeki değişimi.....	102
Şekil 6.58. Çevresel koşullar altında yaşlandırılmış karışımların C=O indekslerindeki değişimi.....	102
Şekil 6.59. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin ITS değerlerindeki değişimi.....	104
Şekil 6.60. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin yaşlanma indekslerindeki değişimi.....	105
Şekil 6.61. Arazide yaşlandırılmış numunelerin ITS değerlerindeki değişimi	105
Şekil 6.62. Arazide yaşlandırılmış numunelerin ITS deney sonuçlarına göre yaşlanma indekslerindeki değişimi.....	107
Şekil 6.63. Yaşlandırılmamış ve standart yöntemlerle yaşlandırılmış numuneleri ITS değerlerindeki değişim.....	108
Şekil 6.64. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülündeki değişimi.....	108
Şekil 6.65. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülüne deneyine göre yaşlanma indeksiindeki değişimi	110
Şekil 6.66. Arazide yaşlandırılmış saf ve katkılı numunelerin rijitlik modülündeki değişim	110
Şekil 6.67. Arazide yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülü deneyine göre yaşlanma indeksiindeki değişimi	112
Şekil 6.68. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülündeki değişimi	113
Şekil 6.69. Yaşlandırılmamış numunelerin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi	115
Şekil 6.70. Laboratuvarda yaşlandırılmış saf numunelerin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi	116
Şekil 6.71. Laboratuvarda yaşlandırılmış 10-0 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi.....	116
Şekil 6.72. Laboratuvarda yaşlandırılmış 10-3 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi.....	117
Şekil 6.73. Laboratuvarda yaşlandırılmış 10-7 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi.....	117
Şekil 6.74. Karışımların laboratuvarda farklı yaşlandırma sürelerindeki yük tekrar sayıları arasındaki ilişkisi	118
Şekil 6.75. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin yorulma deneyine göre yaşlanma indekslerindeki değişimi	119
Şekil 6.76. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi.....	120
Şekil 6.77. Laboratuvarda 2, 3 ve 4 hafta yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi	120
Şekil 6.78. Arazide yaşlandırılmış 0-0 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi.....	121
Şekil 6.79. Arazide yaşlandırılmış 10-0 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi	121
Şekil 6.80. Arazide yaşlandırılmış 10-3 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi	122
Şekil 6.81. Arazide yaşlandırılmış 10-7 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi	122

Şekil 6.82. Karışımların arazide farklı dönemlerdeki yaşlandırma sonrası yük tekrar sayıları arasındaki ilişkisi	123
Şekil 6.83. Arazide yaşlandırılmış numunelerin yorulma deneyine göre yaşlanma indekslerindeki değişimi	124
Şekil 6.84. Arazide yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi.....	125
Şekil 6.85. Arazide 4-12 ay arasında yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi	126
Şekil 6.86. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin çatlak başlangıcındaki yük tekrar sayılarına göre yaşlanma indekslerindeki değişimi	127
Şekil 6.87. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi.....	127
Şekil 6.88. Arazide yaşlandırılmış numunelerin çatlak başlangıcındaki yük tekrar sayılarına göre yaşlanma indekslerindeki değişimi.....	128
Şekil 6.89. Arazide yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi.....	129
Şekil 6.90. Yük tekrar sayıları bakımından laboratuvar ve arazi yaşlandırması arasındaki ilişki	130
Şekil 6.91. STA yöntemine göre yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar-deformasyon ilişkisi	131
Şekil 6.92. LTA yöntemine göre yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar-deformasyon ilişkisi	131
Şekil 6.93. Laboratuvarda yaşlandırılan (a) 0-0 (b) 10-0 (c) 10-3 (d) 10-7 karışımlarından elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanan farklı deneylerden elde edilen yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresi ile değişimi	133
Şekil 6.94. Arazide yaşlandırılan (a) 0-0 (b) 10-0 (c) 10-3 (d) 10-7 karışımlarından elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanan farklı deneylerden elde edilen yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresi ile değişimi	134
Şekil 6.95. Arazi yaşlanmasının (a) Laboratuvarda 60 °C (b) STA (c) LTA (d) RTFOT ve (e) PAV yaşlandırması ile ilişkisi	137
Şekil 6.96. (a) Laboratuvar (b) kısa ve (c) uzun dönem yaşlandırmalarının arazi yaşlandırması ile ilişkisi	140
Şekil 6.97. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin rijitlik modülleri-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki.....	140
Şekil 6.98. Arazide yaşlandırılan numunelerin rijitlik modülleri-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki.....	141
Şekil 6.99. Uzun dönem yaşlandırma sonrası rijitlik ve yük tekrarı arasındaki ilişki.....	141

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. 01.01.2018 tarihi itibari ile ülkemizin yol ağı uzunluğu (km).....	2
Tablo 3.1. Tipik bir BSK üretimine göre İKA teknolojisindeki emisyon azalma yüzdeleri	7
Tablo 4.1. Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmasına neden olan faktörler	14
Tablo 4.2. Asfalt karışım yaşlanmasını etkileyen faktörler	15
Tablo 4.3. Asfalt karışımların uzun dönem yaşlanması üzerine yapılan çalışmalar.....	20
Tablo 5.1. Bağlayıcı kombinasyonu	35
Tablo 5.2. Çalışmada kullanılan bağlayıcı özellikleri	35
Tablo 5.3. Çalışmada kullanılan agreganın gradasyonu ve fiziksel özellikleri	35
Tablo 5.4. Katkısız karışımlarının farklı bitüm içeriklerindeki özellikleri.....	37
Tablo 5.5. Saf karışımın %5.3 bitüm içeriğindeki özellikleri.....	40
Tablo 5.6. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları.	42
Tablo 5.7. Bağlayıcı tipine göre karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları	43
Tablo 5.8. Bitüm ve karışımların yaşlanma prosedürü	43
Tablo 5.9. Elazığ Bölge/17201 no'lu istasyonun maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık verileri.....	45
Tablo 6.1. Yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV sonrası yumuşama noktası değerleri ve yaşlanma indeksleri	58
Tablo 6.2. Laboratuvar yaşlandırması sonrası yumuşama noktası değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri	59
Tablo 6.3. Arazi yaşlandırma sonrası yumuşama noktası sonuçlarına göre yaşlanma indeksleri.....	61
Tablo 6.4. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin yumuşama noktası sonuçları bakımından arazideki karşılığı.....	62
Tablo 6.5. Laboratuvar yaşlandırması sonrası 135 °C'deki RV değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri	65
Tablo 6.6. Arazi yaşlandırması sonrası 135 °C'deki RV değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri.....	67
Tablo 6.7. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin viskozite değerleri bakımından arazideki karşılığı.....	68
Tablo 6.8. Yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV sonrası bağlayıcıların DSR deney sonuçları ve yaşlanma indeksleri.....	75
Tablo 6.9. Laboratuvar yaşlandırma sonrası 58 °C'de DSR sonuçlarına göre yaşlanma indeksleri.....	82
Tablo 6.10. Arazi yaşlandırma sonrası 58 °C'de DSR sonuçlarına göre yaşlanma indeksleri	85
Tablo 6.11. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin $G^*/\sin\delta$ sonuçları bakımından arazideki karşılığı.....	87
Tablo 6.12. Farklı yaşlandırma yöntemlerinde elde edilen C=O indeksleri.....	101
Tablo 6.13. Yaşlanmış numunelerin yaşlanmamış numunelere göre karbonil indeksindeki değişimi.....	103
Tablo 6.14. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin C=O indeksi bakımından arazideki karşılığı	103
Tablo 6.15. Laboratuvar yaşlandırması sonrası ITS değerleri ve yaşlanma indeksleri	104
Tablo 6.16. Arazi yaşlandırması sonrası ITS değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri	106
Tablo 6.17. Laboratuvar yaşlandırması sonrası rijitlik modülleri ve yaşlanma indeksleri	109

Tablo 6.18. Arazi yaşlandırması sonrası rijitlik modülü değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri.....	111
Tablo 6.19. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin rijitlik modülü bakımından arazideki karşılığı	112
Tablo 6.20. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülleri ve yaşlanma indeksleri	113
Tablo 6.21. Laboratuvar yaşlandırması sonrası yük tekrarı değerleri ve yaşlanma indeksleri	118
Tablo 6.22. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerinin belirlenme yöntemi	119
Tablo 6.23. Arazi yaşlandırması sonrası yük tekrarı değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri.....	124
Tablo 6.24. Arazide yaşlandırılan numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerinin belirlenme yöntemi	125
Tablo 6.25. Laboratuvar yaşlandırılan numunelerin çatlak oluşumu için gerekli yük tekrarı ve yaşlanma indeksleri.....	126
Tablo 6.26. Arazide yaşlandırılan numunelerin çatlak oluşumu için gerekli yük tekrar sayısı ve yaşlanma indeksleri.....	128
Tablo 6.27. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin çatlak oluşumuna neden olan yük tekrar sayıları bakımından arazideki karşılığı.....	130
Tablo 6.28. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin kırılma anındaki yük tekrar sayıları	132
Tablo 6.29. Bağlayıcı deney sonuçlarından elden edilen yaşlanma indeksleri.....	136
Tablo 6.30. Karışım deney sonuçlarından elden edilen yaşlanma indeksleri	139
Tablo 6.31. Yaşlandırılmamış ve farklı yöntemlerle yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcılar ile RTFOT ve PAV sonrası elde edilen bağlayıcıların deney sonuçları.....	142
Tablo 6.32. Yaşlandırılmamış ve farklı yöntemlerle yaşlandırılmış karışımların deney sonuçları.....	144

SEMBOLLER LİSTESİ

G^*	: Kompleks kayma modülü
δ	: Faz açısı
$G^*/\sin\delta$	: Tekerlek izi parametresi
V_a	: Hava boşluğu hacmi
Gmb	: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı
VMA	: Agregalar arası boşluk
VFA	: Asfaltla dolu boşluk
h	: Numune yüksekliği
H	: 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon
F	: İndirek çekme rijitlik modülü deneyinde maksimum dikey yük
R	: Poisson oranı
L	: Ortalama numune yüksekliği
Sm	: Rijitlik modülü
YN_i	: Farklı yaşlandırma periyotlarındaki yumuşama noktası
η_i	: Farklı yaşlandırma periyotlarındaki viskozite
Δ_i	: Farklı yaşlandırma periyotlarındaki tekerlek izi parametresi
I_i	: Farklı yaşlandırma periyotlarındaki indirek çekme mukavemeti
R_i	: Farklı yaşlandırma periyotlarındaki indirek çekme rijitlik modülü
Y_i	: Farklı yaşlandırma periyotlarındaki yük tekrar sayısı
r_f	: Çatlak ilerleme oranı
N_p	: Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı
N_f	: Yorulma ömrü
δ_{fmax}	: Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon
δ_f	: Yorulma ömründeki (N_f) toplam deformasyon

KISALTMALAR

KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Birliği (American Association of State Highway and Transportation Official
SHRP	: Startejik Otoyol Araştırma Programı (Strategic Highway Research Program)
CR	: Öğütölmüş araç lastiğı (Crumb Rubber)
SBS	: Stiren-Butadien-Stiren
RTFOT	: Dönel İnce Film Halinde Isıtma
PAV	: Basınçlı Yaşlandırma Kabı
DSR	: Dinamik Kayma Reometresi
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
RV	: Dönel Viskozimetre
BBR	: Kiriş Eğme Reometresi
ITSM	: İndirek Çekme Rijitlik Modölü
ITS	: İndirek Çekme Mukavemeti
ÖTL	: Ömrünü Tamamlamış Lastik
LASDER	: Lastik Sanayicileri Derneğı
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
STA	: Kısa Dönem Yaşlanma (Shot-term Aging)
LTA	: Uzun Dönem Yaşlanma (Long-term Aging)
CRMA	: Crumb Rubber Modifiyeli Asfalt
IKA	: Ilık Karışım Asfalt (Warm-Mix Asphalt)
PMB	: Polimer Modifiyeli Bitüm
RCAT	: Döner Silindir Yaşlandırma Testi
VAPro	: Viennese Yaşlandırma Prosederü
GPC	: Jel Permeasyon Kromatografisi
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafineleri Anonim Şirketi

1. GİRİŞ

Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmaya karşı duyarlılığı, kaplama ömrünü belirleyen önemli bir parametredir. Laboratuvarda bitüm yaşlanmasını temsil etmek için Dönel ince film halinde ısıtma (RTFOT) ve basınçlı yaşlandırma kabı (PAV) başta olmak üzere çeşitli test yöntemleri kullanılmaktadır. Karışımların laboratuvarda yaşlandırma yöntemi olarak kabul gören standart AASHTO R30 yöntemi ise birçok araştırmacı tarafından sorgulanmaktadır. Bu yüzden birçok araştırmacı, karışımların arazi yaşlanmasını tespit etmek amacıyla geçmiş çalışmalarda farklı yaşlandırma yöntemleri uygulamışlardır. Ancak uygulanan yaşlandırma yöntemleri kullanılan katkılar, çevresel şartlar ve karışım tasarımı bakımından değişiklikler gösterebilmektedir.

Ömrünü tamamlamış lastikler (ÖTL) çimento ve enerji fabrikalarında enerji geri kazanımı olarak değerlendirildiği gibi malzeme geri kazanımı olarak da birçok alanda kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarından biri ise bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği kapsamında üreticiler, her yıl bir önceki yıl iç piyasaya sürülen lastik tonajını hesaba alarak Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın ortalama lastik aşınma oranını dikkate alarak belirleyeceği kota oranında toplamak/toplatmak, toplanan miktarın geri kazanımını veya bertarafını sağlamak ve bu işlemleri Bakanlığa belgelemekle yükümlüdürler [1].

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın verilerine göre 2007-2012 yılları arasında "Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği" kapsamında 337 bin 700 ton ömrünü tamamlamış lastik toplanmış ve toplanan ÖTL'nin yaklaşık 210 bin tonu geri kazanım tesislerinde malzeme geri kazanımı olarak, yaklaşık 140 bin tonu ise çimento ve enerji fabrikalarında enerji geri kazanımı olarak kullanılmıştır. Bakanlığın teşvikleri, yürütülen sosyal sorumluluk projeleri ve çalışmaları sayesinde sadece 2014 yılında 120 bin ton ömrünü tamamlamış lastik toplanarak Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliğinde belirtilen yasalar gereğince geri dönüşümü ve geri kazanımı sağlanmıştır [2].

Lastik Sanayicileri Derneği (LASDER) verilerine göre ise 2017 yılı sonuna kadar 765 bin ton ÖTL geri kazanımı sağlanmış ve 2018 yılı sonu itibari ile bu miktarın 935 bin ton olması beklenmektedir. Ayrıca 2007 yılında 3 olan geri kazanım tesisinin şu anda 24 olduğu belirtilmiştir [3].

Tablo 1.1’de 01.01.2018 tarihi itibari ile ülkemizin satıl cinsine göre yol ağı görülmektedir.

Tablo 1.1. 01.01.2018 tarihi itibari ile ülkemizin yol ağı uzunluğu (km) [4].

Yol Sınıfı	Asfalt Betonu	Sathi Kaplama	Parke	Stabilize	Toprak	Geçit Vermez	Toplam Uzunluk
Otoyollar	2157	-	-	-	-	-	2157
Devlet Yolları	16991	361	66	36	-	282	31066
İl Yolları	3802	26492	248	632	520	2202	33896
Toplam	22950	40183	314	668	520	2484	67119

Türkiye’de 2016 yılında asfalt uygulamalarında toplam 40,4 Milyon ton bitümlü sıcak karışım (BSK) kullanılmıştır. Ayrıca sadece Karayollarında 1,755 Milyon ton bitüm tüketilmiştir [5]. Bu veriler dikkate alındığında BSK içerisinde bağlayıcı ağırlığınca %10’luk oranda kullanılacak öğütülmüş araç lastiği (CR) ile yıllık 175,5 bin ton ÖTL bertaraf edilmiş olacaktır.

Atık araç lastiklerinin bitümde ve bitümlü karışımlarda katkı olarak kullanılmasının performansı önemli derecede artırdığı ve bağlayıcının yaşlanmaya karşı direncine katkıda bulunduğu yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır. Ancak CR kullanımı ile meydana gelen yüksek viskozite nedeniyle karıştırma-sıkıştırma sıcaklığında artış olmaktadır. Bu artış ise ancak ılık karışım asfalt katkıları ile düşürülebilmektedir. Son zamanlarda çevrenin korunması yönünde artan farkındalık ve enerji tasarrufu konusundaki sürdürülebilirlik yaklaşımları, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları, sıcak karışımlar ile soğuk karışımlar arasında olan ve en az sıcak karışımlar kadar performansa sahip ılık karışım asfaltları gündeme getirmiştir. Ilık karışımlarda bitüme ya da karışıma katılan doğal, organik, sentetik katkıları, düşük sıcaklıklarda karışıma işlenebilme özelliği kazandırarak enerjiden tasarruf sağlamakta, karbon salınımını azaltmakta, inşaat mevsimini uzatmakta, karışımın daha uzun mesafelere taşınabilmesini sağlamakta ve bağlayıcının üretim esnasında çok fazla ısıya maruz kalarak yaşlanmasını önlemektedir. Bu katkıları çoğu zaman karışımın mekanik özelliklerini de iyileştirebilmektedir. Ilık karışım katkıları olarak son zamanlarda yaygın olarak Sasobit ve Evotherm kullanılmaktadır.

Ilık karışım asfalt yapımı son yıllarda artmasına rağmen hala bazı karakteristikleri bilinmemektedir. Özellikle uygulamada çok eski ılık asfalt kaplamaların olmamasından

dolayı yaşılanma davranışı detaylı olarak tespit edilememiştir. Bu çalışmada kısa zamanda CR modifiyeli ılık asfalt karışımların çevresel etkiler altındaki performansı ve yaşılanma davranışı hakkında detaylı bilgi edinme amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, saf bağlayıcının CR, CR+Sasobit ve CR+Evotherm katkıları ile modifiye edilmesiyle elde edilen bağlayıcı ve karışımların, standart yaşlandırma yöntemleriyle kısa ve uzun dönem, laboratuvar ve arazide çevresel şartlar altında farklı periyotlarda yaşlandırma sonrası performanslarındaki değişim ve yaşılanma dirençleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.



2. AMAÇ VE KAPSAM

Polimer modifiyeli sıcak karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının yüksek olmasından dolayı bağlayıcı ve karışımlarda erken yaşlanmalar meydana gelmektedir. Bu da bağlayıcı ve karışımın rijitliğini arttırarak yollarda erken yapısal bozulmalara neden olmaktadır. Aynı zamanda polimer modifikasyonun ek maliyetler getirmesi, enerji verimliliğinin olmaması ve yüksek emisyon değerlerine sahip olması negatif etkileri arasında sayılabilmektedir. Bu sebeple bitümlü sıcak karışımlarda (BSK), her yıl daha da fazla artarak açığa çıkan atık araç lastiklerinin katkı olarak kullanımı pek çok ülkede gündeme gelmiştir. Ancak bu katkılar performansı artırırken ve polimer modifikasyonuna göre ekonomi sağlarken karışımın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemekte ve bağlayıcıların viskozitesini arttırmaktadır [6]. Karışımların işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmek ve bağlayıcı viskozitesini azaltmak amacıyla ılık karışım katkıları son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [7,8]. Bu çalışmanın amacı; öğütülmüş araç lastiği (CR) modifikasyonu ile ekonomik bir şekilde karışımın performansı artırılırken, ılık asfalt katkıları olan Sasobit (FT-parafin) ve Evotherm'in kullanılması ile işlenebilirliği arttırarak daha düşük karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarına sahip bağlayıcı ve karışımlar elde etmektir. Bu sayede bağlayıcı ve karışımın erken yaşlanması önlenecek, emisyonlar azaltılacak ve enerjiden tasarruf sağlanarak ekonomiye katkıda bulunulacaktır. Bununla birlikte karışımları laboratuvar ve çevresel koşullar altında (arazide) yaşlandırarak arazi ve laboratuvar yaşlanması arasındaki ilişkisi, CR modifikasyonunun ve CR modifikasyonu içerisinde ılık karışım katkılarının bağlayıcı ve karışımın yaşlanması üzerindeki etkisini belirlemek amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmalar;

- Saf, CR, CR+Sasobit ve CR+Evotherm katkılı bağlayıcılara standart yaşlandırma yöntemleri (RTFOT ve PAV) uygulanarak, CR modifikasyonunun ve CR modifiyesinin içinde ılık karışım katkılarının bağlayıcının yaşlanma parametrelerine etkisi araştırılmıştır.

- Saf, CR ve CR ile birlikte ılık asfalt katkılarının kullanımının, karışımların hem kısa (STA) hem de uzun dönem (LTA) yaşlanma üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.
- Saf, CR ve CR modifiyeli ılık karışım asfaltlar laboratuvar ortamında belli sıcaklık ve periyotlarda (60 °C’de 1, 2, 3 ve 4 hafta) yaşlandırılarak karışımların performansı değerlendirilmiştir.
- Saf, CR ve CR modifiyeli ılık karışım asfaltlar arazide 12 ay boyunca gerçek çevresel koşullara maruz bırakılarak ve 2’şer aylık periyotlarla numuneler alınarak çevresel koşullar altındaki performansı değerlendirilmiştir.
- Arazi ve laboratuvar ortamından elde edilen veriler kıyaslanarak arazi-laboratuvar yaşlanmaları temsil edilmiş ve kısa sürede saf ve modifiyeli karışımların uzun dönem performansı hakkında gerçekçi veriler elde edilmeye çalışılmıştır.
- Arazi ve laboratuvar ortamında yaşlandırılmış numunelerin bağlayıcıları ekstrasyon ve distilasyon yöntemiyle tekrar geri kazanılıp, standart bağlayıcı yaşlandırma yöntemleri ile yaşlandırılan bağlayıcılar ile arasındaki performans ve yaşlanma direnci açısından farklılıkları tespit edilmiştir.

Çalışmanın özgün değeri, maliyetleri düşük olan, araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde araştırılan ve günümüzde kullanılmış araç lastiklerinin öğütülerek bitümlü karışımlarda kullanılması etkin bir çözüm olarak sunulmaktadır. Ülkemizde ve dünyada her yıl açığa çıkan milyonlarca atık araç lastiği, depolanması güvenlik tedbirlerinin alınması ve çevreye zarar vermesi yönüyle büyük bir sorun olmaktadır. Çevre üzerinde büyük bir baskı oluşturan ve gün geçtikçe artan bir sorun haline gelen atık araç lastiklerinin yol inşaatlarında kullanımı, bitümlü karışıma ve çevreye sağladığı katkılar sayesinde ekonomik ve ekolojik bir sürdürülebilirlik temin etmektedir.

3. MODİFİKASYON

Her yıl daha da fazla artarak açığa çıkan atık araç lastiklerinin bitümlü bağlayıcı ve karışımlarda katkı malzemesi olarak kullanımı pek çok ülkede çevresel kaygıları azaltan adımlardan biri olmuştur. Atık lastiklerin bitümlü sıcak karışımlarda sağladığı fayda, içerisinde bulunan kauçuk sayesinde olmaktadır. Kauçuk, bir izopren türevi olan çok sayıda yalın molekülün, hep aynı geometrik düzenle birleşmesi sonucunda oluşmuş bir makro moleküldür. Kauçuklar doğal ve sentetik olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Sentetik kauçuklar, doğal kauçuğun niteliklerine sahip olmamakla beraber çok miktarda üretilip dolgu lastiklerde kullanılmaktadır. Önemli sentetik kauçuklar olarak bütadien kauçuğu (BR), stiren-bütadien kauçuğu (SBR), nitrol-bütadien kauçuğu (NBR), izobutilen-izopropilen kauçuğu (IBR) ve izobutilen-izopren kauçuğu (IIR) sayılabilir [9]. Sentetik kauçuk en çok araç lastiklerinin üretiminde olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bir otomobil atık lastiğinin ağırlığı 9,1 kg'dır. Atık lastiğin yaklaşık olarak %35'i doğal ve %65'i sentetik olan geri kazanılabilir kauçuktan meydana gelmektedir. Bir kamyon lastiği 18,2 kg ağırlığında olup, bu ağırlığın %60 ile %70'i geri kazanılabilir kauçuk içermektedir [10].

Öğütülmüş araç lastiği (CR) modifikasyonu, karışımların mekanik özelliklerini polimer modifikasyonunda olduğu kadar maliyetlerin artmasına neden olmadan iyileştirirken, viskozite artışına neden olarak işlenebilme özelliğini düşürmektedir [6,11,12]. Ayrıca artan viskoziteden dolayı daha yüksek karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları gerektirmektedir. Yüksek sıcaklıklarda (180-190 °C) üretilen ve bitümlü sıcak karışım (BSK) olarak adlandırılan bu karışım yöntemi, çevreye verdiği zararlar (yüksek emisyon), üretim maliyetlerinde ve sıkıştırma enerjilerindeki artışlardan dolayı daha düşük sıcaklıkta üretilen fakat mekanik özellikleri düşük olmayan bitümlü karışımların üretilmesinin araştırılmasını gerektirmiştir. Bu bağlamda ılık karışım olarak adlandırılan ve sıcak karışımlardan 10-30 °C daha düşük sıcaklıklarda üretilen karışım yöntemleri geliştirilmiştir. Burada sunulan çeşitli yöntemler farklı işlem aşamalarına sahip olsa da temelde bağlayıcı viskozitesini düşürmek, agrega ve bağlayıcı arasındaki sürtünme direncini azaltarak işlenebilirliği artırmak esasına dayanmaktadır [13]. Sıcak bitüme direk su püskürtülerek ya da içinde doğal olarak su bulunan katkıların (zeolit) katılmasıyla köpüklenmesini ve viskozite azalmasını sağlayan köpük asfalt yöntemi, çeşitli kimyasal

(Evoterm, Cecabase) ve organik katkıları (Sasobit, Rediset) ile viskozitenin düşürülmesi ve işlenebilirliğin artırılması ılık karışım üretim yöntemlerindendir [14-16].

Genel olarak ılık asfalt katkılı karışımların avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Düşük sıcaklıklarda üretim ve serim
- Daha az enerji ve yakıt tüketimi dolayısıyla düşük maliyet
- Karıştırma ve taşıma sırasında daha az yaşlanma ve böylece daha uzun servis ömrü
- Emisyonların azalması (Tablo 3.1)
- Kısa zamanda ve düşük sıcaklıkta ısıtılmaya bağlı olarak duman miktarında azalma (Şekil 3.1)
- İnşaat süresinin uzaması (Düşük sıcaklıklarda çalışmaya olanak sağlar)
- Taşıma mesafesinde artış
- Plentte çalışan işçilerin çalışma şartlarında iyileştirme sağlar [17].

Tablo 3.1. Tipik bir BSK üretimine göre İKA teknolojisindeki emisyon azalma yüzdeleri [18].

Emisyonlar	Tipik Bir BSK Üretimine Göre Emisyonlardaki
	Azalma (%)
CO ₂ ve SO ₂	30-40
Uçucu organik bileşikler	50
CO	10-30
Azot oksitler (NO _x)	60-70
Toz	20-25



Şekil 3.1. BSK ve IKA karışımlarının üretim sırasındaki gaz salınımları

Yapılan birçok çalışmada CR modifiyesi karışımların, çevre, ömür döngü maliyeti ve kaplama performansı açısından fayda sağladığını belirtmişlerdir [19-22].

CR modifiyesinin bağlayıcıların viskozitesini arttırdığı, sıcaklık hassasiyetini geliştirdiği ve düşük ve yüksek sıcaklık performans seviyesini bir derece arttırdığını belirtilmiştir. Ancak CR modifiyeli asfalt (CRMA) karışımlar, saf bağlayıcılı sıcak karışımlarla karşılaştırıldığında yüksek karıştırma-sıkıştırma sıcaklığı ve bunun sonucu olarak üretim süresince yüksek enerji tüketimi ve emisyon kirliliğine neden olduğu belirtilmektedir [23].

Çalışmada kullanılan Sasobit katkısı, doğal gaz ya da kömürün Fischer-Tropsch sentezi ile üretilen uzun alifatik hidrokarbon zincirinden oluşan bir katkıdır [24]. Sasobit üzerine yapılan çalışmalarda en çok vurgulanan sonuç, Sasobit modifikasyonunun çok önemli ölçüde viskoziteyi düşürmesidir [25-28]. Bitüm ağırlığınca %2 oranında kullanılan Sasobit modifiyeli karışımın sıcak karışımdan 30 °C daha düşük sıcaklıkta aynı işlenebilirlik özelliklerine sahip olduğu belirtilmiştir [29].

Çalışmada kullanılan diğer bir katkı olan Evotherm, Amerikalı MeadWestvaco Asphalt Innovations firması tarafından üretilmektedir. Evotherm üretiminde, katyonik emülsifikasyonlu maddeler içeren kimyasal bir teknoloji kullanılır. Agregaların yüzey

kaplamasını yani adezyonu artırır. Karışımın işlenebilirliğini ve sıkışabilirliğini geliştirir [17]. Kimyasal katkı olan Evotherm M1 yüzey aktif maddesi olarak kullanılmaktadır ve sıcak karışım asfaltlara göre 30-40 °C daha düşük sıcaklıklarda sıkışma sağladığı belirtilmektedir [30]. Bir diğer çalışmada yine Evotherm kullanımının yüzey enerjisini, işlenebilirliği ve agrega-bağlayıcı arasındaki adezyonu arttırdığı ve nem hassasiyetini azalttığı belirtilmiştir [31].

Yapılan çalışmada Cecabase, Sasobit, Evotherm ve Rediset gibi ılık asfalt katkıları kullanarak bağlayıcının viskozite değerlerini düşürüldüğü ve böylelikle karışımın karıştırma-sıkıştırma sıcaklığının azaltıldığı belirtilmektedir [32].

Sasobit katkılı bağlayıcılar diğer ılık asfalt katkılı bağlayıcılara göre daha yüksek tekerlek izi parametresi ($G^*/\sin\delta$), kompleks modül ve daha düşük faz ve sünme açısı verdiği belirtilmektedir [32,25].

Kök ve ekibi SBS ve Sasobit modifiyeli bağlayıcılar ve karışımlar üzerine reolojik ve mekanik testler uygulamıştır. Elde edilen sonuçlara göre Sasobit'in SBS ile kullanımı durumunda özellikle orta ve yüksek sıcaklıklarda SBS katkısının etkinliğini arttırdığı ancak düşük sıcaklıklarda SBS gibi esnek davranmadığı belirtilmiştir. SBS ve Sasobit katkısının birlikte kullanıldığı karışımlarda, karışımın yorulma performansının önemli derecede arttığı belirtilmiş özellikle her iki katkının %3 oranında kullanılması durumunda bu artışın en yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir [33].

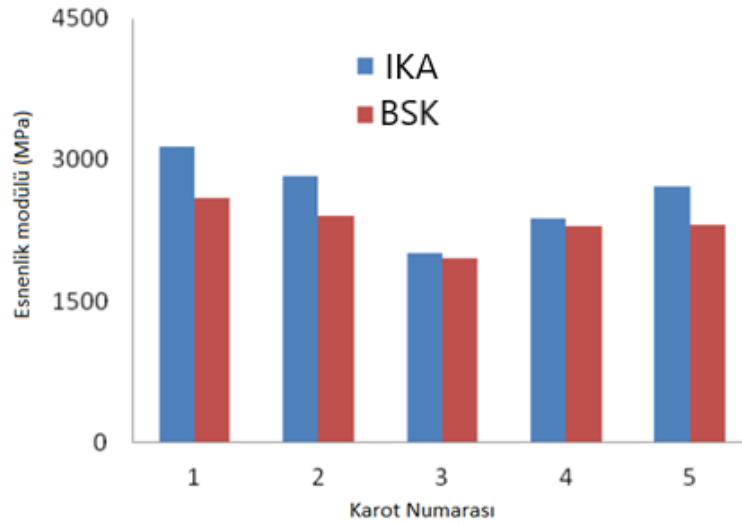
Kök ve ekibi [7] değişik oranlarda stiren-butadien-stiren (SBS) ve bir organik ılık karışım katkısı (Sasobit) içeren bağlayıcıların geleneksel ve reolojik özelliklerini incelemiştir. Katkıların bağlayıcı içerisinde hem ayrı olarak hem de birlikte kullanılmalarının etkileri değerlendirilmiştir. Katkıların ayrı ayrı kullanılmaları durumunda Sasobit modifikasyonunun ısıya karşı duyarlılık açısından SBS modifikasyonundan daha iyi bir performansa sahip olduğu, tekerlek izi parametresi açısından ise özellikle de yüksek sıcaklıklarda SBS modifikasyonunun Sasobit modifikasyonundan daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir. Ayrıca Sasobit modifikasyonunun SBS modifikasyonuna göre viskoziteyi önemli derecede düşürdüğü ve yumuşama noktasını ise önemli derecede artırdığı belirtilmiştir. Katkıların aynı bağlayıcı içinde birlikte kullanılmaları durumunda ise bitümün geleneksel ve reolojik özelliklerinin önemli ölçüde değiştiği özellikle %3 SBS ile birlikte %3 Sasobit kullanımının en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir.

SBS modifiyeli bağlayıcı ile birlikte Sasobit kullanımının bağlayıcı viskozitesini önemli derecede düşürdüğü, yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirdiği ancak düşük sıcaklık

özelliklerini kötüleştirdiği, bu birleşik bağlayıcı ile hazırlanan ılık karışımların kabul edilebilir bir nem hassasiyeti direnci ve düşük gerilme seviyelerinde sıcak karışımlardan daha yüksek yorulma direnci verdiği belirtilmiştir [34,35].

Yapılan bir diğer çalışma sonuçlarına göre ılık karışım asfaltların üretim ve serim boyunca sıcak karışımlara göre daha düşük emisyon değeri verdiği, daha düşük sıcaklıklarda sıkışma ve daha yoğun karışımlar elde edilebildiği belirtilmiştir. Laboratuvar sonuçlarına göre, ılık asfalt karışımlar sıcak karışımların 3 aylık servisinden sonra daha yüksek ITS değeri vermemiştir. Nem hassasiyeti testi sonuçlarına göre ise Sasobit ve Evotherm katkılı ılık karışımların nem hassasiyeti kabul edilebilir oranda olduğu tespit edilmiştir [36].

Şekil 3.2’de ılık ve sıcak asfalt karışımların 40 °C’deki esneklik modüllerindeki değişim verilmiştir. Behl ve ekibinin yaptığı bu çalışmaya göre ılık asfalt karışımların sıcak asfalt karışımlara göre daha yüksek esneklik modülü verdiği görülmektedir. Yüksek esneklik modülünün, ılık asfalt karışımlarının yapımı sırasında sıkışmayı geliştirmesi ve daha iyi yoğunluk vermesini sağladığı düşünülmüştür [37].



Şekil 3.2. Ilık ve sıcak asfalt karışımların esneklik modülündeki değişim [37].

2007 yılında Çin’de düşük hava sıcaklığında Evotherm katkılı ılık asfalt deneme yolu çalışması yürütülmüş ve başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu uygulamaya göre Evotherm katkısında bulunan artık suyun (<0.05%) sıkışma esnasında bağlayıcının viskozitesini

düşürerek yaklaşık olarak 80-140 °C sıcaklıkta sıkıştırmaya olanak sağladığı belirtilmektedir [38].

Kimyasal katkıların sağladığı düşük sıcaklıkta üretilme imkanı, viskoziteyi azaltmaktan daha çok agrega ve bitüm ara yüzeyindeki direnci azaltarak agreganın daha iyi kaplanma imkanı sunmasından kaynaklanmaktadır. Soyulma önleyici katkı olarak kullanılan ılık karışım katkıları düşük oranda kullanımlarıyla birlikte bağlayıcının viskozitesi üzerinde önemli etki yaratmamaktadır. Ancak önemli ölçüde tekerlek izi oluşumunu düşürmekle birlikte, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumunu ve yorulma çatlaklarını geliştirdiği belirtilmiştir [13,39]. Bir kimyasal ılık karışım katkısı olan Evotherm'in işlenebilirliği artırarak düşük sıcaklıkta karıştırma ve sıkıştırma imkanı sunduğu ayrıca bağlayıcının adezyon özelliklerini artırarak karışımın soyulma direncini artırdığı belirtilmiştir [13,39].

Karışımın karıştırılması esnasında ölçülen tork değeri ile tespit edilen karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarına göre Evotherm katkılı ılık karışımın, sıcak karışımlardan 20 °C daha düşük değerler verdiği tespit edilmiştir [40]. Ghabchi ve ekibi Evotherm modifiyeli bağlayıcıların adezyon ve ıslatma yeteneklerini serbest yüzey enerjisi ve kontak açısı yöntemi ile incelemiştir. Sonuçta Evotherm modifikasyonunun, bağlayıcının adezyon özelliklerini artırdığı bu adezyonun kireçtaşı agregalarda daha iyi oluştuğu ve saf bağlayıcıya göre daha düşük kontak açısı sunarak daha iyi ıslatma özellikleri sağladığını tespit etmişlerdir [31].

Arega ve ekibi, Evotherm katkılı bağlayıcının yaşlanmadan nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Bitüm ağırlığınca %0.5 oranında kullanılan Evotherm'in PG-76-28 bağlayıcısıyla birlikte kullanımında kısa ve uzun süreli yaşlanma sonunda saf bağlayıcı karışıma göre daha fazla yorulma ömrü elde edildiği PG 64-22 bağlayıcısı ile kullanılması durumunda ise daha az yorulma ömrü sunduğu belirtilmiştir [41].

Min-Yong ve ekibi, -20 °C'de Evotherm katkılı karışımların kırılma dirençlerinin sıcak karışım yöntemi ile üretilen kontrol karışımlarına eşit ya da daha iyi olduğunu belirtmişlerdir [42]. Yapılan çalışmalarda Evotherm katkısının soyulma önleyici bir katkı görevi gördüğü ve içinde kullanıldığı karışımların nem hassasiyetini azalttığı belirtilmiştir [43,44].

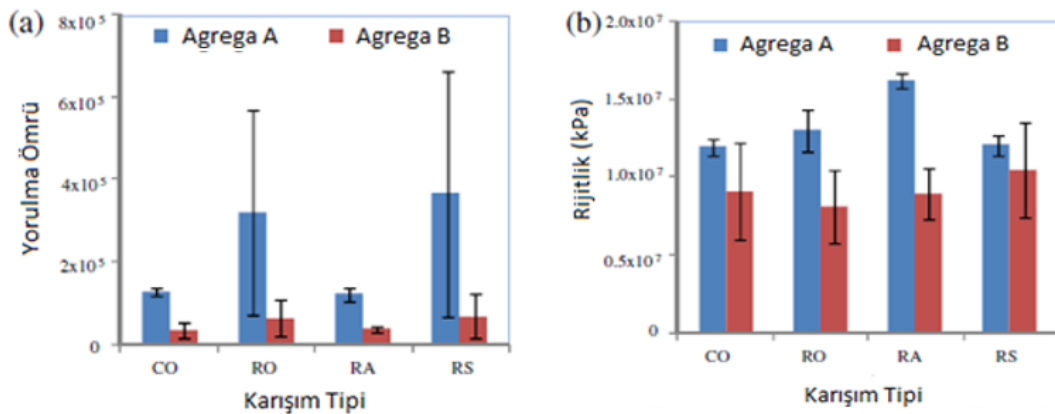
CR modifikasyonu içinde Evotherm-DAT katkısının kullanımının daha düşük tekerlek izi direnci verdiği ancak düşük sıcaklık performansına önemli ölçüde etki etmediği ayrıca düşük yorulma direncine yol açtığı belirtilmektedir [45].

Yapılan çalışmada CR ve Evotherm katkılı bağlayıcıların reolojik ve geleneksel özellikleri değerlendirilmiş ve saf bağlayıcı ile kıyaslanmıştır. Çalışmada bağlayıcı

ağırlığınca %6, %8 ve %10 oranında CR ve %0.7 oranında Evotherm kullanılmıştır. Sonuç olarak, CR yüzdesi arttıkça viskozitede, yumuşama noktasında ve tekerlek izi parametresinde artış görüldüğü ayrıca BBR testi sonucunda düşük rijitlik ve yüksek “*m-value*” değeri sağlayarak düşük sıcaklık performansına katkıda bulunduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan Evotherm katkısının hem ayrı hem de CR modifikasyonu ile kullanımının reolojik ve geleneksel testler açısından bağlayıcı performansı üzerinde pozitif veya negatif etkiye sahip olmadığı belirtilmiştir [46].

Oner ve ekibi [47], yaptığı çalışmada 3 farklı oranda SBS kopolimer kullanılarak polimer modifiyeli bitüm (PMB) hazırlanmış ve PMB içerisine ayrı ayrı olarak organik ve kimyasal ılık asfalt katkıları olan Sasobit (bağlayıcı ağırlığınca %3 oranında) ve Rediset (bağlayıcı ağırlığınca %2 oranında) ilave edilerek geleneksel bağlayıcı testleri yapılmış ve sıfır kesme viskozitesi yöntemi ile bağlayıcıların tekerlek izi davranışı incelenmiştir. Geleneksel test sonuçlarına göre PMB ılık asfalt katkısı ilavesi sıcaklık hassasiyetini azalttığı, reolojik test sonuçlarına göre ise özellikle %4 SBS modifiyeli bağlayıcılara ilave edilen organik ılık karışım katkısının tekerlek izi parametresini geliştirdiği belirtilmiştir.

Xiao ve ekibi [48], iki farklı agrega çeşidi kullanarak (granit (agrega A) ve şist (agrega B)), yalnızca CR modifiyeli (RO) ve CR modifiyesine ılık karışım asfalt katkısı olan Sasobit (RS) ve Asphamin'i (RA) ayrı ayrı ilave ederek karışımların yorulma ömrü ve rijitliklerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.3'te görülmektedir. Şekil 3.3(a)'ya göre Asphamin katkılı karışımlar hariç CR ve Sasobit katkılı karışımların yorulma ömürleri kontrol karışımlarına (CO) göre yüksek çıkmaktadır. Şekil 3.3(b)'ye göre ise CR modifiyesine Sasobit ilavesi ile rijitlik değerlerinin kontrol karışımları ile benzer özellik sergilediği görülmüştür.



Şekil 3.3. Mekanik özellikler (a) yorulma ömrü (b) Rijitlik [48].

CR ile birlikte parafinin kullanılmasının işlenebilirlik açısından olumlu olduğu bu sayede yüksek oranda CR kullanımını mümkün kıldığı ve CR ile birlikte kullanılan parafinin performansa da katkı sağladığı, mekanik özellikler bakımından CR ile uyumlu olduğu belirtilmiştir [49].

CR+parafin modifikasyonunun karışımın tekerlek izi direncini artırdığı, parafin katkısının CR modifikasyonunun sağladığı yüksek yorulma direncine önemli derecede katkı sağladığı belirtilmiştir [49-51].

Kauçuk asfaltla birlikte %0.5 kimyasal ılık karışım katkısının birlikte kullanımı sıcak karışıma göre 30 °C daha düşük sıcaklıkta üretilme imkanı sunduğu ve ılık karışım kauçuk asfaltın sıcak karışımlardan daha iyi tekerlek izi direnci verdiği belirtilmiştir [39].



4. BİTÜM VE BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLARDA MEYDANA GELEN YAŞLANMA

Kaplama bünyesindeki asfalt çimentosunun, servis ömrü boyunca ısının, havanın ve çevresel koşulların etkisinde sertleşmeye uğraması, zamanla asfalt çimentosunun viskozitesinde artış oluşturmakta ve bu değişim yaşlanma sertleşmesi olarak adlandırılmaktadır. Yaşlanma sertleşmesine uğrayan asfalt çimentosunun daha düşük penetrasyon ve daha yüksek viskozite gösterdiği, yaşlanma sertleşmesinin gevrek kırılma ile daha düşük adezyon ortaya koyduğu ifade edilmektedir [52,53]. Bitümlü bağlayıcılar ve asfalt karışımlarda meydana gelen yaşlanmaya neden olan faktörler ile ilgili geniş bilgi Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmasına neden olan faktörler [54].

Yaşlanmaya Neden Olan Etkiler	Meydana Geliş Sebebi				Meydana Geldiği Yer	
	Süre	Sıcaklık	Oksijen	Güneş Işığı	Yüzeyde	Kütlede
1. Oksidasyon	X	X	X	-	X	-
2. Fotooksidasyon (Direkt ışık)	X	X	X	X	X	-
3. Buharlaşıma	X	X	-	-	X	X
4. Fotooksidasyon (Yansıyan ışık)	X	X	X	X	X	-
5. Foto Kimyasal (Direkt ışık)	X	X	-	X	X	-
6. Foto Kimyasal (Yansıyan ışık)	X	X	-	X	X	X
7. Polimerleşme	X	X	-	-	X	X
8. Yapı İçerisinde Gerçekleşen Yaşlanma (Tiksotropi)	X	-	-	-	X	X
9. Yağ yayılması (Sinerezis)	X	X	-	-	X	-
10. Nükleer Enerjideki Değişim	X	X	-	-	X	X
11. Suyun Etkisi	X	X	X	X	X	
12. Agregat Tarafından Absorbe Edilme	X	X	-	-	X	X
13. Agregat Tarafından Bileşenlerin Absorbe Edilme	X	X	-	-	X	-
14. Ara Yüzeyde Meydana Gelen Kimyasal Reaksiyonlar veya Katalizör Etkisi	X	X	-	-	X	X
15. Mikrobiyolojik Bozulma	X	X	X	-	X	X

Tablo 4.2. Asfalt karışım yaşlanmasını etkileyen faktörler [77].

	Etkenler	Bulgular	Referanslar
Kısa Dönem Yaşlanma	Bağlayıcı kimyası	Ana etken	Traxler [55]
	Bağlayıcı tipi ve kaynağı	Arazi yaşlanmasında önemli etki	Lund ve Wilson [56,57]
	Bağlayıcı tipi ve kaynağı	Laboratuvar yaşlanmasında önemli etki; polimer ile yaşlanmada azalma	Topal ve Şengöz [58], Zhao vd. [59], Morian vd. [60]
	Bitümlü bağlayıcı film kalınlığı	Önemli etki	Kandhal ve Chakraborty [61]
	Agrega gradasyonu	Etkisi yok Önemli etki	Chipperfield ve Welch [62] Morian vd. [60]
	Agrega absorpsiyonu	Ana etken Önemli etki	Traxler [55] Aschenbrener ve Far [63] Morian vd. [60]
	Geri dönüştürülmüş malzemelerin eklenmesi ve yeniden ısıtılması	Önemli etki	Mogawer vd. [64]
	Plant tipi	Önemli etki	Terrel ve Holen [65] Chollar vd.[66]
	Üretim sıcaklığı ve depolama	Önemli etki	Mogawer vd. [64] Daniel vd. [67]
	Agrega kaynağı	Laboratuvar yaşlanması üzerinde etkisi yok	Morian vd. [60]
Uzun Dönem Yaşlanma	Agrega gözenekliliği	Önemli etki	Kemp ve Prodoehl [68]
	Bağlayıcı kaynağı	Önemli etki	Morian vd. [60]
	Bağlayıcı içeriği	Önemli etki	Kari [69]
		Etkisi yok	Rolt [70]
	Hava boşluğu	Önemli etki	Kemp ve Prodoehl [68] Harrigan [71] ve Houston vd. [72]
	Kaplama geçirimsizliği	Etkisi yok Önemli etki	Kari [69] Rolt [70]
	Kaplama Derinliği	Arazi yaşlanması kaplama yüzeyinden 25 mm ile sınırlı değil; arazi yaşlanması değişim hızı gözlemlendi Yaşlanma kaplama derinliği arttıkça azalmıştır 10 yıllık arazi yaşlanması 2.tabakada bozulmaya neden olabilir	Farrar vd. [73] Wu vd. [74]
	Kaplama servis sıcaklığı	Önemli etki	Kemp ve Predoehl [68] Rolt [70] Epps Martin vd. [75]
	Maruz kalma süresi	Önemli etki	Rolt [70]
	Ultraviyole ışın	Önemli etki	Lee [76]

Sertleşmeye neden olan mekanizmalar;

Oksidasyon; Kaplamanın, atmosferin oksijeni ve ultraviyole ışınlarına maruz kalması sonucu yüzeyinde sertleşme meydana gelmektedir. Bu sertleşmeden dolayı zamanla çatlaklar oluşarak havanın kaplamaya sızması sonucu oksidasyon meydana gelmektedir. Oksidasyon hidrojen kaybı oksijen kazanımı olarak tanımlanmaktadır.

Uçucu madde kaybı; Bağlayıcı yapısında bulunan uçucu maddelerin karıştırma-sıkıştırma esnasında ve servis ömrü boyunca çevresel etkiler sonucunda bağlayıcının bünyesinden ayrılmasıdır.

Tiksotropi; Kaplamanın uzun süre yüke maruz kalmadan sadece çevresel koşullar altında sertleşerek kolloidal bir yapıya dönüşmesi olarak tanımlanmaktadır.

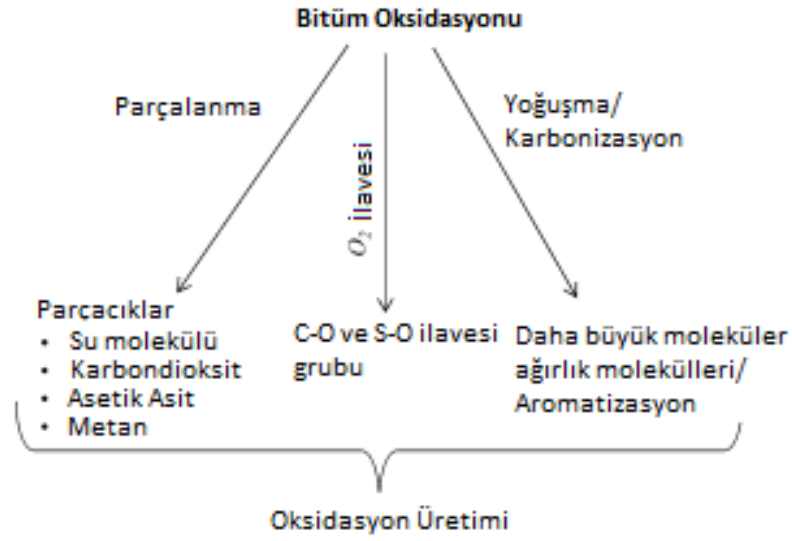
Sinerisis; Bağlayıcının yağlı kısımlarının ısının etkisiyle zamanla bağlayıcı bünyesinden ayrılması olayıdır.

Polimerizasyon; Bitümün hidrokarbon zincirinin zamanla değişikliğe uğramasıdır.

Parçalanma; Bitümün bünyesinde bulunan maltenlerin yumuşama periyotları sırasında agrega tarafından emilmesi sonucunda oluşmaktadır.

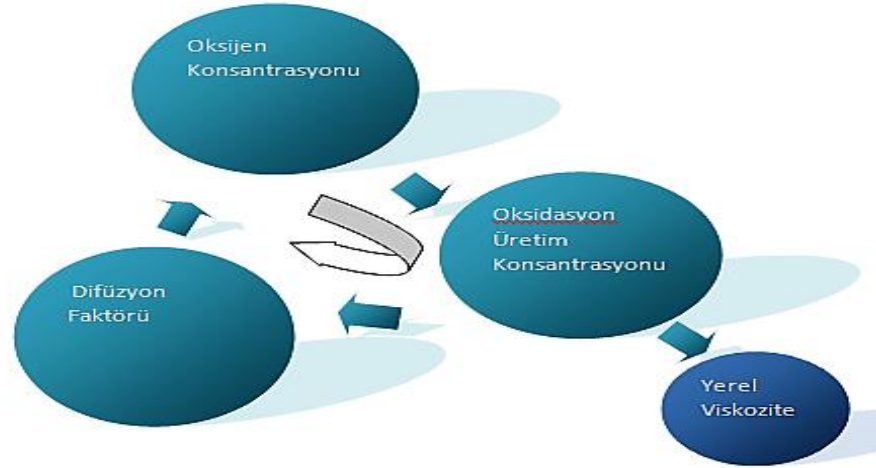
Oksidasyon ile oluşan değişimin, bitümün özelliklerine bağlı olarak bazılarında daha hızlı yaşlanma ve daha fazla sertleşme şeklinde kendini göstermektedir. Bu olay iki kısımda ortaya çıkmaktadır. Birinci kısımda karıştırma-sıkıştırma süresince bitümün maruz kaldığı yüksek sıcaklıktan ve ısıtılan agreganın geniş yüzey alanından dolayı hızlı oksidasyon oluşmaktadır. İkinci kısımda ise kaplamanın servis ömrü boyunca gerçekleşen yavaş oksidasyon olduğu, bu durumun kaplamanın zamanla havadaki oksijenle etkilenmesi ve bağlayıcının bu oksijenle oluşturduğu tepkime nedeniyle gerçekleşmektedir. Birinci süreçte bitümün bünyesindeki bazı maddelerin uçmasının bitümün sertleşmesine neden olduğu, ikinci aşamada ise oksidasyonun yavaş ve uzun süreli gerçekleştiği ve esas sertleşme olarak bilindiği, sonuçta bağlayıcı adezyonunda azalma olduğu belirtilmektedir [78].

Oksidatif yaşlanmayı Şekil 4.1’de görüldüğü gibi parçalanma, oksijen ilavesi ve yoğunlaşma veya karbonizasyon olmak üzere üç farklı şekilde açıklayabiliriz.



Şekil 4.1. Oksidatif yaşlanmanın muhtemel mekanizması [79].

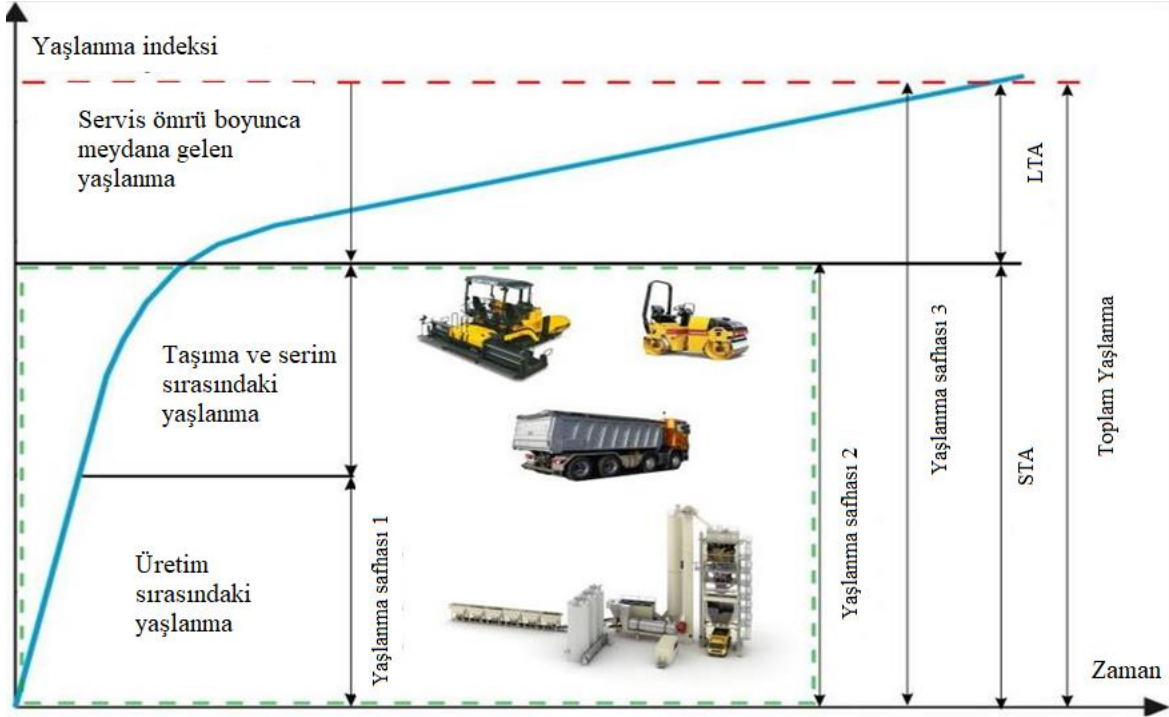
Oksijenin bitümdeki difüzyonu lineer olmayan bir süreçtir ve yaşlanma geçmişine bağlıdır. Difüzyon katsayısının değişimi, ya bitümün reaktif olmayan hidrokarbon aşamasına ulaşıncaya kadar ya da oksijen varlığı tükeninceye kadar devam eden bir süreçtir (Şekil 4.2)[79].



Şekil 4.2. Difüzyon sürecinin şeması [79].

Bitümlü karışımlarda meydana gelen yaşlanma kısa ve uzun dönem olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Kısa dönem yaşlanma, bitümün depolanma, plente taşınma, agregayla karıştırılma, uygulama bölgesine taşınma, serilme ve sıkıştırılma sırasında meydana gelirken

uzun dönem yaşlanma yolun servis ömrü boyunca meydana gelmektedir. Yaşlanma derecesini tespit etmek amacıyla, genellikle yaşlanmış bağlayıcının orijinal bağlayıcının viskozitesine oranı olan yaşlanma indeksi kullanılmaktadır. Yaşlanma indeksi ve zaman arasındaki ilişki Şekil 4.3'te verilmiştir [80].

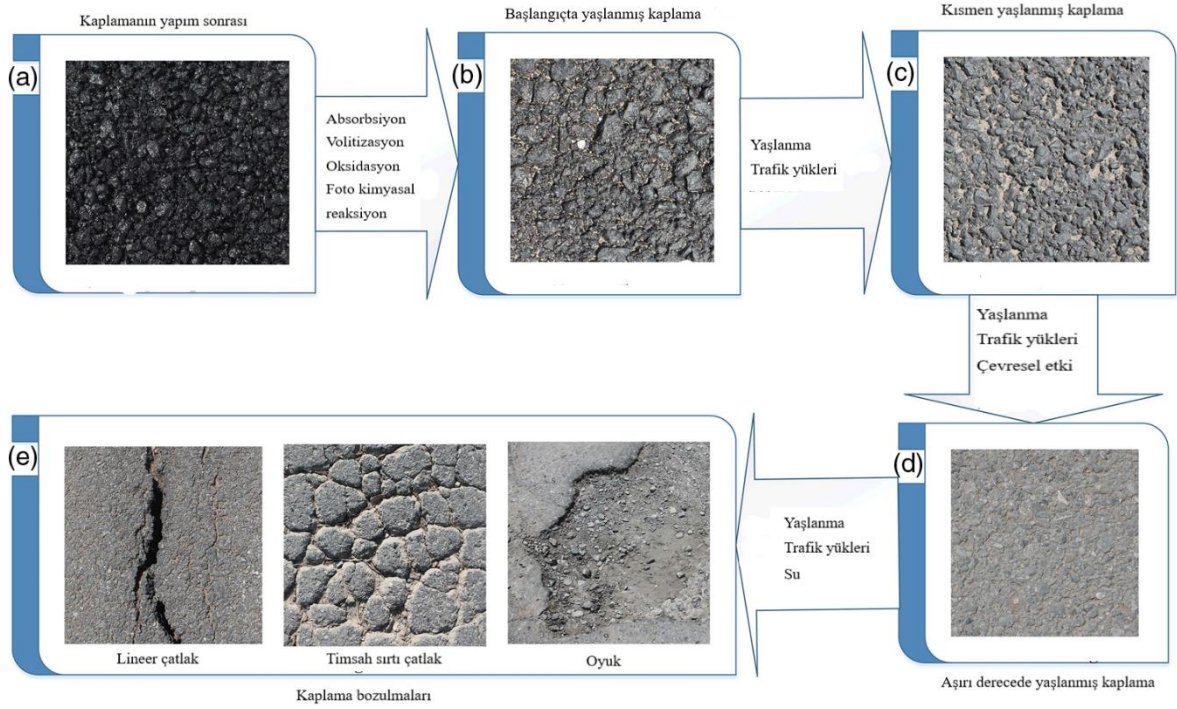


Şekil 4.3. Bitümün yaşlanma indeksinin zamanla değişimi [80].

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere yaşlanmanın büyük bir kısmı yolun hizmete açılıncaya kadar geçen sürede gerçekleşmektedir. Hizmet süresi boyunca meydana gelen yaşlanma ise toplam yaşlanma miktarının %30'unu oluşturmaktadır. Yaşlanmanın büyük bir kısmı ise karıştırma esnasında gerçekleşmektedir [80]. BSK'larda meydana gelen yaşlanmalar bağlayıcı ve karışımda meydana gelen yaşlanma olarak iki alt grupta incelenmektedir. Yaşlanmanın sadece bağlayıcıda meydana geldiği düşünülmesine rağmen bazı agrega türleriyle bitüm arasında kimyasal bağ oluşması ayrıca bazı agrega türlerinin de zamanla özelliklerinin değişmesi karışım numunelerinin uzun dönem yaşlanma açısından değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [81].

Asfalt kaplama yüzeyindeki buharlaşma, oksidasyon, volitizasyon ve foto kimyasal reaksiyon etkilerine bağlı olarak kaplamanın başlangıçtaki yaşlanması meydana gelmektedir (Şekil 4.4 (b)) bu da kırılğan bir kaplamaya neden olmaktadır. Bağlayıcının yaşlanma ve

trafik etkileri sonucu daha fazla aşınması ile yol yüzeyinde agregalar görünür hale gelmektedir (Şekil 4.4 (c)). Asfalt kaplama daha sonra yaşlanma, trafik ve çevresel etkiler ile aşırı yaşlanmış kaplama halini almaktadır Şekil 4.4 (d). Yaşlanma süreçleri sonunda ise kaplamada oyuk, timsah sırtı çatlak ve lineer çatlak gibi bozulma türleri meydana gelmektedir (Şekil 4.4 (e)) [82].



Şekil 4.4. Asfalt kaplama yaşlanma süreçleri ve yüzey değişimi (a) Kaplamanın yapım sonrası görünüşü (b) Başlangıçta yaşlanmış kaplama (c) Kısmen yaşlanmış kaplama (d) Aşırı derecede yaşlanmış kaplama (e) Kaplama bozulmaları [82].

Geçmişten günümüze arazi şartlarını temsil açısından karışımlara farklı koşullandırmalar uygulanarak çalışmalar yapılmıştır. Tablo 4.3'te uzun dönem yaşlanma üzerine yapılan çalışmalar görülmektedir.

Tablo 4.3. Asfalt karışımların uzun dönem yaşlanması üzerine yapılan çalışmalar [83].

Çalışma Ekibi	Yaşlanma Türü	Yaşlanma Etkileri
Kemp ve Predoehl [68]	Saha Yaşlanması	• Hava sıcaklığı, AV, ve agrega porozitesinin önemli etkileri
Kari [69]	Saha Yaşlanması	• Hava sıcaklığı, AV, ve agrega porozitesinin önemli etkileri
Rolt [70]	Saha Yaşlanması	• Maruz kalma süresi ve ortam sıcaklığının önemli etkileri • Bağlayıcı içeriği, AV, karışım ve filler malzemenin etkisizliği
Rondon, Reyes, Flintsch, ve Mogrovejo [84]	Saha Yaşlanması	• Karışım rijitliğinin artması, tekerlek izi direnci ve ilk 29 aylık çevresel etki altındaki yorulma direnci • Karşılıklı eğilim 30 ila 42 ay arasında gözlemlendi
Farrar, Turner, Planche, Schabron, ve Harnsberger [73]	Saha Yaşlanması	• Kaplama alanının en üst 25 mm'si ile sınırlı olmayan alan yaşlanması • Alan yaşlanma değişimi gözlemlendi
West vd. [85]	Saha Yaşlanması	• Üretim sırasında IKA, HMA'dan daha az yaşlanma gösterdi. • Alan yaşlanmayla birlikte IKA ve HMA arasındaki farkın azalması • İki yıllık saha yaşlanmasının ardından IKA ve HMA için eşdeğer bağlayıcı performans seviyesi ve bağlayıcı absorpsiyonu
Morian, Hajj, Glover, and Sebaaly [60]	Laboratuvar yaşlanması (3, 6, ve 9 ay 60 °C'de)	• Karışımın Kompleks modül (E*) ve bağlayıcı karbonil alanının (CA) uzun dönem yaşlanma (LTOA) ile artması • Bağlayıcı kökeni önemliyken, agrega kökeni etkisizdir
Azari ve Mohseni [86]	Laboratuvar yaşlanması (iki gün 85 °C, beş gün 85 °C)	• Karışımın LTOA ile kalıcı deformasyona karşı direnci artmaktadır • STOA ve LTOA arasında ilişki gözlemlendi
Tarbox ve Sias Daniel [87]	Laboratuvar yaşlanması (iki gün 85°C, dört gün 85 °C, sekiz gün 85 °C)	• Karışımın LTOA ile kalıcı deformasyona karşı direnci artmaktadır • LTOA'dan sertleşme etkisi: saf karışım > RAP karışımı • Küresel yaşlanma sistemi modeli > LTOA
Safaei, Lee, Nascimento, Hintz, ve Bell vd. [81]	Laboratuvar yaşlanması (iki gün 85 °C'de, sekiz gün 85 °C'de) Saha yaşlanmasına karşı laboratuvar yaşlanması (dört gün 100 °C sekiz gün 85 °C'de)	• LTOA ile artan rijitlik • LTOA ile HMA ve IKA için rijitlikteki azalma farkı • 135 °C'de dört saatlik kısa dönem yaşlanma (STOA) = üretim, taşıma ve serim sırasındaki yaşlanma • Karışım yaşlanma etkisi: LTOA sıcaklığı > LTOA süresi • 100 °C'de dört gün STOA + LTOA, 85 °C'de sekiz gün = Washington State'de yaşanan dokuz yıllık süre
Brown ve Scholz [88]	Saha ve Lab. Yaşlanması (dört gün 85 °C)	• Dayanıklılık: 85 °C'de dört günün LTOA'sı = Birleşik Devletlerde yaşanan 15 yıllık yaşlanma
Harrigan [71]	Saha ve Lab. Yaşlanması (beş gün 80 °C'de, beş gün 85 °C'de beş gün 90 °C'de)	• Önemli saha ve laboratuvar yaşlanması • Hava boşluğunun arazi yaşlanmasına etkisi • Beş günlük 85°C vs. 7-10 yıllarında ki saha yaşlanması: lab > arazi AV < 8%; lab < sahadan AV > 8%
Epps Martin vd..[75]	Saha ve Lab. Yaşlanması (1-16 hafta 60 °C'de)	• Arazi yaşlanması ve laboratuvar uzun dönem yaşlanma ile rijitlik artışı • Arazi yaşlanmasının kaplama servis sıcaklığına etkisi • Rijitlik: IKA = HMA, Altı ila sekiz aylık arazi yaşlanmasından sonra • Rijitlik: HMA için 135 °C'de 2 saat kısa dönem yaşlanma, IKA için 116°C'de 2 saat kısa dönem yaşlanma ve 4-8 hafta 60°C'de uzun dönem yaşlanma = saha yaşlanmasındaki ilk yaz dönemi

Asfalt bağlayıcılar yaşlanmadan sonra fiziksel özellikler bakımından yüksek yumuşuma noktası ve parlama noktasının yanı sıra düşük penetrasyon ve düktilite değerleri vermektedir. Bu değişimin sebebi moleküler boyutun değişmesiyle viskozitenin artmasıdır [89].

Yapılan çalışmaya göre asfalt bağlayıcının rijitlik modülü yaşlanmadan sonra 4 kat arttığı ve bu değişim daha yüksek kalıcı deformasyon ve önemli düşük sıcaklık çatlakları meydana getirdiği belirtilmiştir [90,91].

SHRP A-005 raporuna göre, asfalt bağlayıcıların yaşlanma sertleşmesi karakteristiklerindeki çevresel etki açık bir şekilde gösterilmiştir [72]. Yapılan çalışmalarda, yıllık ortalama hava sıcaklıklarının yüksek olduğu yerlerle daha soğuk iklimli yerler karşılaştırıldığında sıcak bölgelerde yaşlanma oranının arttığı görülmüştür [92]. Diğer taraftan nemin, asfalt karışımların yaşlanma özelliklerine önemli bir etkisinin bulunmadığı, fakat zamanla durabiliteyi etkileyecek olan, soyulmalara neden olduğu belirtilmektedir [72].

Bağlayıcının yaşlandırılması mevcut PP1-98 (AASHTO R 28) protokolü kapsamında, AASHTO T240 (RTFOT) ile kısa dönem (163 °C'de 85 dk), PAV ile uzun dönem (20 saat, 2.10 MPa ve 90,100 veya 110 °C) yaşlandırılması yapılmaktadır. PP2-99 (AASHTO R 30-02) protokolüne göre ise karışımın kısa dönem (135 °C'de 4 saat) ve uzun dönem yaşlandırılması (85 °C'de 5 gün) laboratuvar koşullarında temsil edilmektedir. PP1-98 bağlayıcının 5-10 yıllık yaşlanmasını, PP2-99 ise karışımın 5-7 yıllık yaşlanmasını temsil etmektedir. Ancak kaplama ömrü boyunca herhangi bir zamandaki yaşlanma tahmini mevcut protokollerin sınırlı koşulları altında mümkün değildir. Laboratuvar koşulları her bir bağlayıcı için benzerdir. Fakat protokollerde, yaşlanma potansiyelinin bağlayıcı tipine bağlı olduğu hesaba katılmamıştır. Protokollerle tahmin edilen yaşlanmada, oksidatif yaşlanmada önemli bir etkiye sahip olan ve hava boşluklarının özel varyasyonlarındaki hacimsel özellikleri hesaba katılmadığı belirtilmektedir [72].

RTFOT ve İnce film halinde ısıtma (TFOT) testlerinde oksidatif yaşlanma seviyeleri arazideki oksidatif yaşlanmadan oldukça düşük iken bu testlerde uçucu madde kaybı daha fazla olmaktadır. Bu nedenle, bu testlerin asfalt kaplamadaki bitümün yaşlanmasını tahmin etmede yetersiz kaldığı belirtilmiştir [93,94].

PAV prosedürü ise yüksek sıcaklıkta (90,100,110 °C) 20 saatlik periyot ile bağlayıcıyı daha yüksek seviyede okside etmektedir. Fakat bu seviyenin, iklim, bağlayıcı kinetiği ve hava boşlukları gibi karışım parametreleri değişkenlerinin servis ömründeki yaşlanma zamanını nasıl karşılayacağı bilinmemektedir [94].

Asfaltın yaşlanma olayını etkileyen bir kaç temel faktör;

1- Sıcaklık şartları

a. Yıllık ortalama hava sıcaklığı

b. Aylık maksimum hava sıcaklığı

2-Bulut örtüsü

3-Radyasyon

4- Yağış şeklinde sıralanmaktadır.

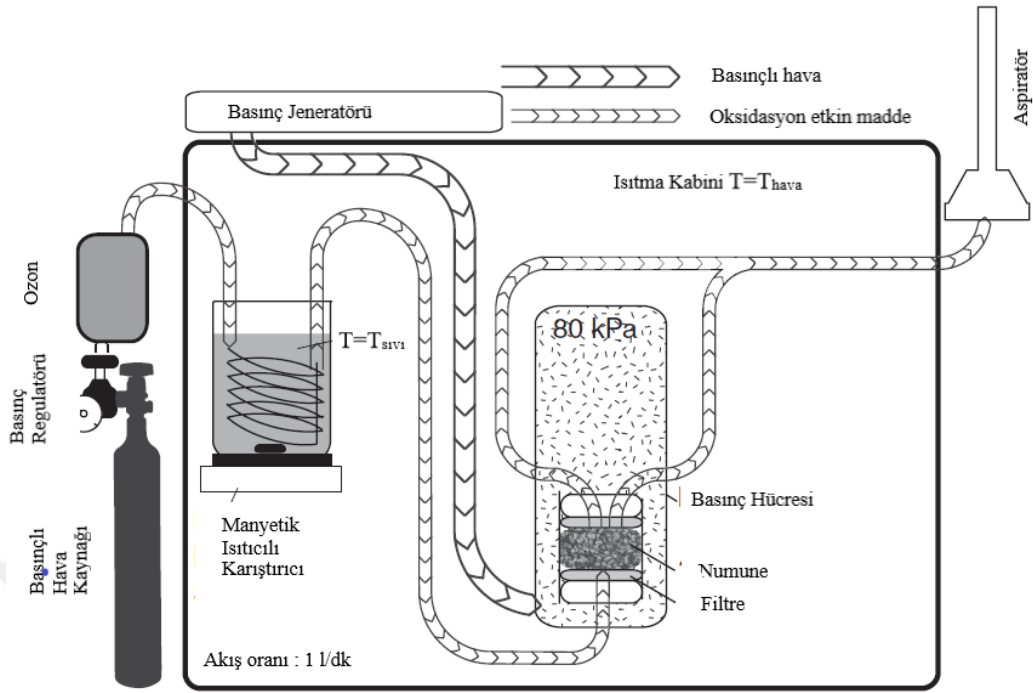
Bu değişkenlerin nasıl etkileşim halinde oldukları çok iyi bilinmemektedir. Fakat birçok araştırmacı, yıllık ortalama hava sıcaklığının yaşlanma sürecindeki iklim etkisinin iyi bir göstergesi olduğuna katılmaktadırlar [72].

Avusturalya’da uygulanan çalışmada, iklimin yaşlanma süreci üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve çalışma tamamlandığında her 10 °C sıcaklık artışında termal oksidasyonun yaklaşık olarak iki kat arttığı görülmüştür [92]. Kemp ve Prodoehl [68] hava koşullarının asfalt birikimlerindeki aşınmaya etkisini göstermiştir. 4 farklı iklim bölgesinde 25 °C deki viskozitenin zamanla değişimini dikkate almış ve daha sıcak iklim bölgesinde yaşlanma oranının açık bir şekilde arttığı görülmüştür. Asfalt karışımlardaki bağlayıcı özellikleri karıştırma, sıkıştırma ve servis ömrü boyunca değişmektedir. Bu aşamalar içinde bitümün fiziksel ve kimyasal değişimi özellikle oksidasyon oluşumu ile malzemenin rijitliğinin artmasını kapsamaktadır. Bu olay yaşlanma olarak da bilinmektedir ve temel faktör asfalt kaplamanın servis ömrünü etkilemesidir [95,96]. Doğru bir şekilde inşa göz önünde bulundurulursa bitümlü karışımların durabilitesini birincil olarak yaşlanma sertleşmesi ve nem hasarı etkilemektedir. Yaşlanma bitümlü bağlayıcının rijitliğinin artmasına (veya viskozitesinin), nem hasarı ise genellikle karışımın kohezyonunun ve bağlayıcı-agrega arasındaki adezyonun azalmasına neden olmaktadır. Kısa dönem yaşlanma karıştırma ve sıkıştırma sırasında uçucu madde kaybı olarak gerçekleşirken uzun dönem yaşlanma ise servis ömrü boyunca arazide oksidasyon ve yapısal sertleşme olarak meydana gelmektedir [93].

Esnek kaplama performansında yaşlanmanın etkisi zamanla birlikte iç ve dış değişkenlere de bağlıdır. İç değişkenler; bağlayıcı-agrega özellikleri, karışımdaki bağlayıcı yüzdesi, asfalt film kalınlığı ve hava boşluğu yüzdesini ifade etmektedir. Dış değişkenler ise üretim sırasındaki yaşlanma (kısa dönem yaşlanma) ve çevresel etkiler (uzun dönem yaşlanma) olarak tanımlanmaktadır [97].

Bitümlü bağlayıcıların yaşlanmaya karşı duyarlılığı kaplama ömrünü belirleyen önemli bir parametredir. Laboratuvarda bitüm yaşlanmasını temsil etmek için RTFOT, PAV ve RCAT (Döner silindir yaşlandırma testi) başta olmak üzere çeşitli test yöntemleri kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada saf ve SBS modifiyeli bağlayıcıların yaşlandırılması (1) RTFOT, ardından 8 ile 48 saat 100 °C'de PAV; (2) RTFOT, ardından 48 ile 220 saat 75 °C'de PAV; ve (3) 4 saat 163 °C'de RCAT, daha sonra 17 ile 140 saat boyunca 90 °C şeklinde devam etmiştir. Yapılan yaşlandırmanın arazi ile kıyaslanması için uzun dönem kaplama performansı (LTPP) veri tabanından farklı yaşlardaki bir kaç yol seçilmiştir. Sonuçta kısa dönem yaşlanma olarak önerilen 163 °C/4saat RCAT yaşlanmasının RTFOT yaşlanması ile benzer sonuçlar vermiştir. Uzun dönem yaşlanma prosedürlerinin saf bağlayıcılarda yaklaşık olarak eşdeğer olduğu belirtilmiştir. Ancak, polimer modifiyeli bağlayıcı için bu testler yaşlanma kinetiklerine göre farklılık göstermektedir. Arazide 10-30 yıl hizmet ömründen sonra kaplamalardan elde edilen bağlayıcıların yaşlanma sertleşmesine standart da belirtilen yaşlanma sürelerinden daha az sürelerde elde edildiği bunun ise karışımların düşük hava boşluğuna ve/veya yüzey kaplamasının oksidasyonu engellediğine işaret edilmiştir. Aynı zamanda arazi ile laboratuvar yaşlanması arasında bağlayıcı içerisindeki Sülfoksit (S=O) ve Karbonil (C=O) grupları da farklılık göstermiştir. Arazide yaşlanan karışımlardan elde edilen bağlayıcıların laboratuvarda yaşlandırılan karışımlardan elde edilen bağlayıcılardan daha yüksek S=O ve daha düşük C=O değeri verdiği belirlenmiştir. Bu durum arazideki oksidasyon mekanizmasının laboratuvardaki yaşlandırma prosedürleriyle aynı olmayabileceğine işaret etmiştir [98].

Steiner ve ekibi [99], karışımların uzun dönem oksidatif yaşlanmasını temsil etmek için optimize edilmiş bir yaşlanma prosedürünü (Viennese Ageing Procedure-VAPro-Şekil 4.5) geliştirmişlerdir. Böylece karışımların hizmet ömrü boyunca oksidatif yaşlanmasının etkilerinin hesaba katılacağı belirtilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmada BSK'lar, basınçlı bir kap içerisinde ozon ve nitrik oksit ile zenginleştirilmiş oksidan ajan yardımıyla yaşlanmaya maruz bırakılmıştır. Karışımlar 60 °C'de 4 gün ve 1 l/dk oranında gaz ilavesiyle yaşlandırılmıştır. Karışımlardan ve standart RTFO+PAV yaşlandırması ile elde edilen bağlayıcılar DSR deneyi ile kıyaslanmış ve benzer performanslar elde edilmiştir. Böylece etkili bir zaman içinde arazide oluşan yaşlanmayı temsil edebilecek bir yaşlanma prosedürü elde etmişlerdir.



Şekil 4.5. VAPro için yaşlandırma düzeneği

Yapılan çalışma ile asfalt karışımların yüksek sıcaklıklardan dolayı zorlu çevresel şartlara maruz kaldığı Katar’da, yaşlanmanın asfalt bağlayıcı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Deneye tabi tutulan bağlayıcılar 5 yıllık deneme kaplamasından geri kazanılarak elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre yaşlanmanın, Katar’daki asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Bu etkinin kaplamanın aşınma yüzeyinde daha fazla olduğu ve kaplama derinliği arttıkça azaldığı belirtilmiştir. Araç lastik geçiş güzergâhlarında yaşlanmanın daha az olduğu belirtilmiştir. Agerga tipi ve karışım tasarım metodunun da arazideki asfalt bağlayıcının yaşlanmanı etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca, PAV yaşlandırma metodunun Katar için yeterli olmadığı görülmüş ve Katar gibi sıcak iklimli bir ülke için standart 20 saat PAV yaşlanmasının 70 saate kadar çıkarılabileceği önerilmiştir [100].

Yin ve ekibi [83], iklim, agrega tipi, geri dönüştürülmüş malzeme (RAP) kullanımı, IKA teknolojisi, plenti tipi ve üretim sıcaklığının karışımların yaşlanması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada 7 ayrı saha uygulamasından elde edilen karışımlar ile laboratuvar da 60 °C’de 2 hafta ve 85 °C’de 5 gün yaşlandırılmış karışımlar rijitlik ve tekerlek izi açısından değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre 60 °C’de 2 hafta ve 85 °C’de 5 gün uzun dönem yaşlandırmanın sırasıyla arazideki 7-12 aylık ve 12-23 aylık servis ömrüne denk

geldiği belirlenmiştir. Ayrıca IKA teknolojisi, RAP kullanımı ve agrega absorpsiyonunun asfalt karışımların uzun dönem yaşlanma özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, üretim sıcaklığı ve plent tipinin ise yaşlanma özellikleri üzerine etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Yapılan çalışmada, yaşlanmanın poroz asfalt karışımların bağlayıcı özellikleri üzerindeki reolojik ve kimyasal araştırmaların bir parçası olan bitümün kimyasal karakterizasyonu ele alınmıştır. FTIR ve Jel permeasyon kromatografi (GPC) gibi analitik yöntemler, bitümdeki kimyasal değişimleri değerlendirmek için etkili deney yöntemleridir. Çalışmada, standart bağlayıcı yaşlanmaları (RTFOT, RCAT) ile poroz asfalt yaşlanma sürecini temsil etmek için sıcaklık, UV ışığı ve nemi birleştiren yeni bir yaşlanma prosedürü uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre oksidasyon sonucu oluşan Ketonlar ve Sülfoksitlerin arttığı belirlenmiştir. FTIR sonuçlarına göre yaşlandırılmış poroz asfalttan elde edilen bağlayıcının standart yöntemlerle yaşlandırılan bağlayıcının yaşlanmasından daha şiddetli olduğu belirtilmiştir. Standart uzun dönem yaşlandırmanın poroz asfalt yaşlanmasını tahmin etmede yetersiz olduğu belirtilmiştir [101].

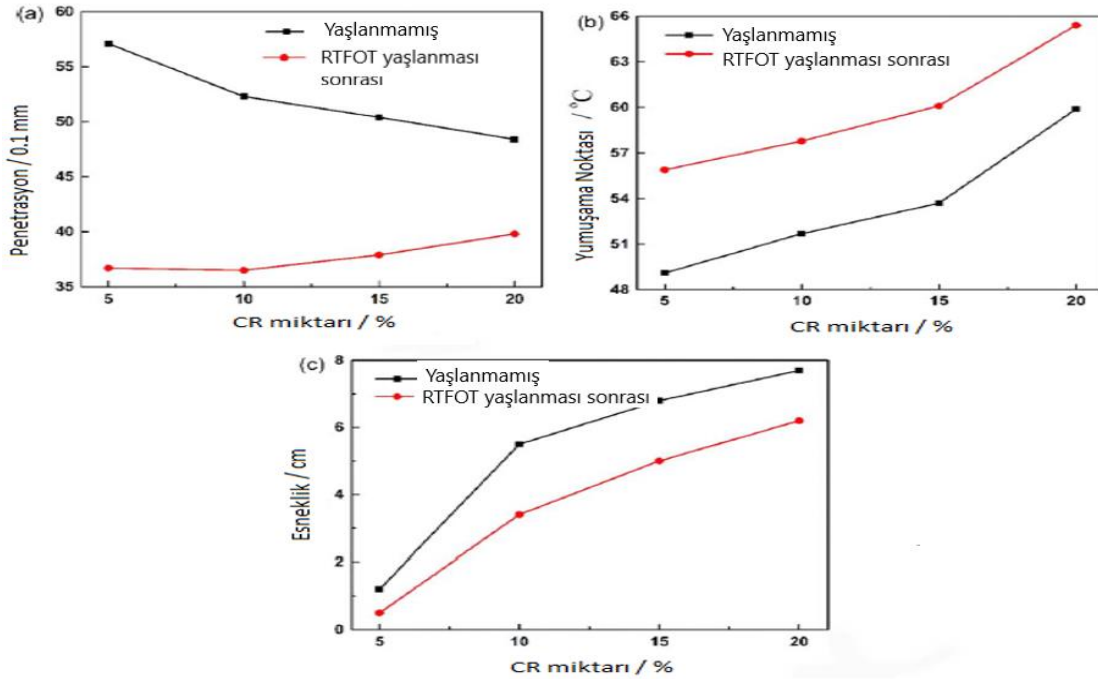
Xiang ve ekibi [102], saf, CR, SBS ve CR+SBS modifiyeli bağlayıcılara RTFOT deneyi ile termal oksidatif yaşlanma prosedürü uygulayarak FTIR deneyi ile katkıların yaşlanma üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre saf bağlayıcının katkılı bağlayıcılara göre daha fazla sertleştiği ve özellikle CR ve CR+SBS katkılı karışımların yaşlanmaya karşı direnç gösterdiği belirtilmiştir.

Hamzah ve ekibi [103], 80/100 penetrasyonlu saf bitümün ve parçalanmış atık lastikle modifiye edilmiş bitümün reolojik özelliklerini dinamik kesme reometresi (DSR) ile incelemiş ve bu bağlayıcılar ile hazırlanmış bitümlü sıcak karışımlarında rijitlik modülleri değerlendirilmiştir. Karışım numuneleri yoğurmalı sıkıştırıcı ile hazırlanmıştır. Bu yaklaşım ile bitümün kompleks modülü ve karışımın sertliği arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta öğütülmüş araç lastiği ilavesinin orijinal bitümün $G^*/\sin\delta$ değerini artırdığını ve dolayısıyla daha uzun bir tekerlek izi parametresi sunduğunu ve araç lastiği modifiyeli bağlayıcının yaşlanmadan daha az etkilendiği belirtilmiştir. Karışım numunelerinde ise öğütülmüş araç lastiği modifiyeli karışımların %24 daha yüksek Marshall stabilitesi %56 daha yüksek sünme rijitliği değeri verdiği ve daha düşük ısı hassasiyeti gösterdiği belirtilmiştir.

Son yıllarda CRMA ve IKA bağlayıcılarının ve karışımlarının yaşlanmaları üzerine çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Abbas ve ekibinin iki farklı bağlayıcı (PG 70-22 ve PG

64-22) ve bir agrega (Nominal maksimum boyut (N_{max}):12.5mm kireç taşı) kullanarak elde ettikleri köpük ılık karışım asfaltlar ile geleneksel sıcak asfaltların kısa ve uzun dönem yaşlanmasını kıyaslamışlardır. Bu karışımlardan ekstrasyon ve geri kazanım ile elde ettikleri ve laboratuvarında hazırlanarak kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış (RTFO ve PAV) bağlayıcılar üzerine DSR, FTIR ve GPC deneylerini uygulamışlardır. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların DSR sonuçları kıyaslandığında köpük ılık asfaltların geleneksel sıcak karışımlara göre daha az yaşlandığı belirtilmiştir. DSR ile elde edilen verilerin FTIR ve GPC testiyle uyumlu olduğu belirtilmiştir [104].

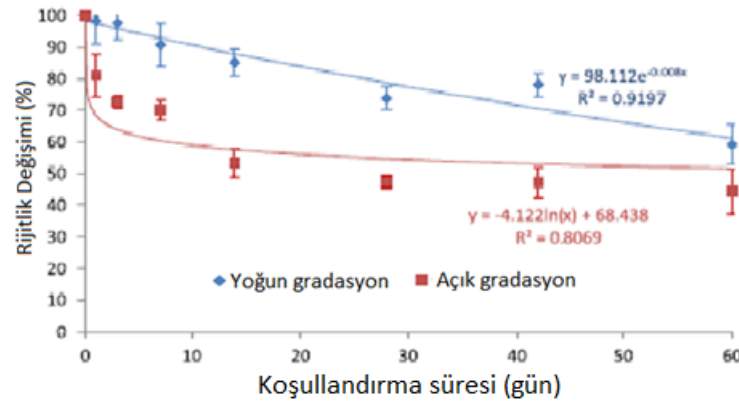
Öğtölmüş araç lastiğı modifiyeli asfaltların termo-oksidatif yaşlanma mekanizmasını inceleyen Wang ve ekibi [105] CR içeriğinin artmasıyla CRMA'nın termo-oksidatif yaşlanmayı geliştirdiğini belirtmiş ve bunun ileri yaşlanma evrelerinde CR'ın bağlayıcı içerisinde çözündüğünün bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 4.6'da da görüldüğü üzere bağlayıcıda CR içeriğinin artmasıyla birlikte penetrasyon ve yumuşama noktasını arttığı ancak esnekliğin ise yaşlanmanın etkisiyle azaldığı görölmektedir.



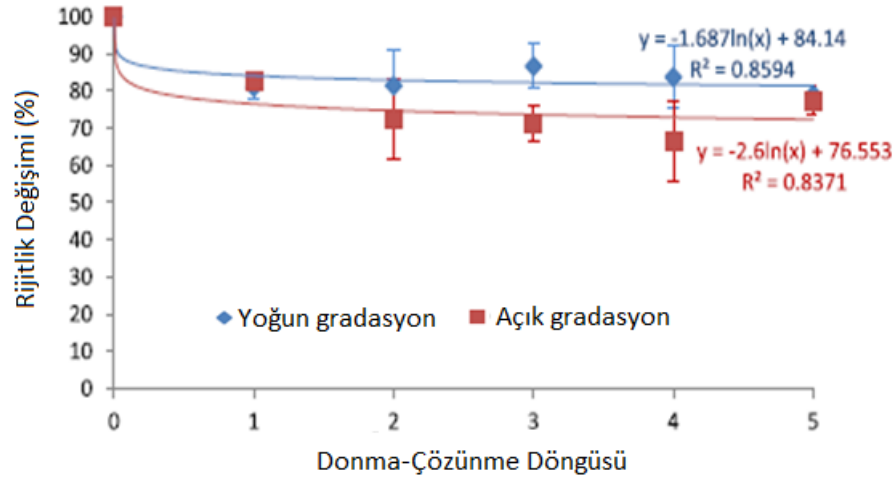
Şekil 4.6. Yaşlanma öncesi ve sonrası CR içeriğinin CRMA'nın fiziksel özelliklerine etkisi (a) Penetrasyon, (b) Yumuşama noktası, (c) Esneklik (5 °C'deki) [105].

Açık ve yoğun gradasyonlu karışımlar hazırlanarak yapılan çalışmada karışımların çevresele etkiler (nem, donma-çözünme ve termal yaşlanma) altındaki dayanımı ve taşıma

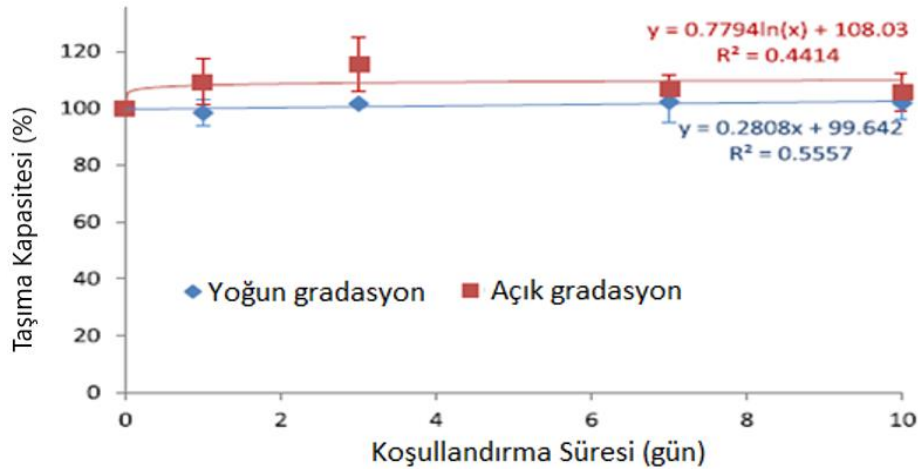
kapasitesi incelenmiştir. Numuneler nemi temsil açısından 40 °C suda 0, 1, 3, 7, 14, 28, 35, 42, 60 gün bekletilmiş, donme-çözünme döngüsü AASHTO T283'e göre 16 saat -18 °C – 24 saat 60 °C'de bekletilerek 5 periyot şeklinde yapılmış ve termal yaşlanma için ise 80 °C etüvde 0, 1, 3, 10 gün bekletilmiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, uzun süreli nem etkisinin yoğun gradasyonlu karışımların mekanik performansı üzerinde daha yüksek bir etkisi var iken açık gradasyonlu karışımlarda kısa vadede belirgin bir şekilde mukavemet ve rijitliğinde azalma gösterirmiş ve uzun dönemde nemin etkisi sabit kalmıştır. Bu sonuca göre açık gradasyonlu karışımların uzun süreli yağış alan bölgelerde kullanımının daha uygun olacağı belirtilmiştir. Donma-çözünme periyotlarındaki rijitlik değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. 1. döngüde her iki tip karışım içinde bozulma fazla olmuştur ancak diğer döngülerde mekanik özellikler üzerinde etkisi azalmıştır. Ancak bu tür iklim etkileri yoğun gradasyonlu karışımlarda daha etkili olmaktadır. Çünkü açık gradasyonlu karışımların boşluk miktarı suyun hacim genişlemesine müsaade edebilmektedir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi termal yaşlanma prosederüne göre bitümün yaşlanmasına bağlı olarak karışımda sertleşme meydana geldiği ve her iki karışım tipinin birbirine yakın özellikler sergilediği belirlenmiştir [106].



Şekil 4.7. Nem hasarı periyotlarından sonra karışımın rijitliğindeki değişim [106].



Şekil 4.8. Donma-çözünme döngüsü altında karışımın rijitliğindeki değişim [106].



Şekil 4.9. Termal yaşlanmanın karışımın taşıma kapasitesine etkisi [106].

Dinamik modül, esneklik modülü ve süneklilik kaybının yaşlanma araştırmalarında en yaygın parametreler olduğu yapılan çalışmada belirtilmiştir. Çalışmada ITS deneyi ile arazi yaşlanmasının laboratuvardaki simülasyonu araştırılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan silindirik numuneler laboratuvarda 1, 5, 10, 15, 20 ve 25 gün 85 °C’de etüvde ve birer aylık aralıkla 12 ay arazide yaşlandırılmıştır. Ayrıca laboratuvarda hazırlanan ve sıkıştırılmamış numuneler 8, 16, 32, 48, 72 ve 100 saat 135 °C’de yaşlandırıldıktan sonra sıkıştırılmış ve ITS deneyine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarına göre hem laboratuvarda hem de arazide yaşlandırılan numunelerin yaşlanma süresi ile beraber ITS değerleri artmış ve akma değerleri azalmıştır. Çalışmada 85 °C’deki bir günlük yaşlanmanın arazide yaklaşık bir yıllık yaşlanmaya denk geldiği belirtilmiştir. Gevşek halde yaşlandırılan numunelerin ITS

değerlerinin 32 saatte maksimuma ulaştığı ve daha sonra yaşlanma süresi arttıkça azaldığı belirtilmiştir [107].

Öğütülmüş araç lastiğinin, bağlayıcıların yaşlanma direncini geliştirdiği [105] ve bağlayıcı içerisindeki oranı arttıkça uzun dönem yaşlandırma sonrası yorulma parametresini düşürdüğü belirtilmiştir [48,108].

Yapılan çalışmada bağlayıcı içerisinde CR ile ılık karışım katkısının kombinasyonu hem yaşlanmamış hem de yaşlandırılmış bağlayıcıların reolojik özelliklerini geliştirdiği belirlenmiştir. CR ilavesi ile artan karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının ılık karışım katkıları ilavesiyle geleneksel sıcak karışım asfaltlara göre düşürüldüğü belirtilmiştir [48].

Mohammad ve ekibi [109], geleneksel bitümlü sıcak karışım, geri kazanılmış asfalt kaplamalar (RAP) ve CR içeren karışımların laboratuvar performansını araştırmıştır. Bu çalışmaya, Louisiana’da yaygın olarak kullanılan kalın taneli doğal kum ve silisli kalker agregalar dahil edilerek, toplam altı karışım laboratuvarında incelenmiştir. CR hem yaş proses olarak bitüm modifikasyonunda hem de kuru proses olarak direk karışıma ilave edilmiştir. Kauçuk oranı bağlayıcı ağırlığının %10’u olarak kullanılmıştır. Bağlayıcılar üzerinde fiziksel ve reolojik testler uygulanmıştır. Bitümlü karışımların kalıcı deformasyon ve yorulma davranışlarının belirlenmesi için yarım daire eğilme, dinamik modül, dinamik sünme ve modifiye edilmiş Lottman testleri uygulanmıştır. Sonuçta %40 oranında geri dönüştürülmüş PG 64-22 asfalt çimentosu ve %10 öğütülmüş kauçuk karışımının PG 70-28 gibi davrandığı, öğütülmüş kauçuk ilavesinin karışımların nem hassasiyetini azalttığı, bu karışımların iyi bir kırılma direnci sergilediği, 54 °C’ye kadar lineer-viskoelastik bölgede kalabildiği ve tekerlek izine (Şekil 4.8) karşı çok yüksek bir direnç gösterdiği belirtilmiştir.



Şekil 4.10. Tekerlek izi deformasyonu

Arabani ve ekibi, lastik lifi örgüsünün, asfalt kaplamayı takviye etmede kullanımını incelemiştir. Çalışmada, lastik lifi örgüsüyle takviye edilmiş asfalt kaplamanın çatlama potansiyeli değerlendirilmiştir. Sonuçlar lastik lifi örgüsü takviyesinin bakım ve iyileştirme maliyetlerini düşürürken, asfalt kaplamanın çatlamaya karşı direncini önemli ölçüde arttırdığını ve hizmet ömrünü yükselttiğini göstermiştir [110].

Wang ve ekibi, 80/100 penetrayonlu saf bağlayıcı ile hazırlanan ve 5 farklı oranda (%15, 18, 20, 22, 25) öğütülmüş araç lastiği ile modifiye edilmiş karışımların yorulma ömürlerini ve SCB testi ile çatlak ilerleyişini incelemiştir. Kesikli gradasyona sahip karışımların yorulma özelliklerinde CR modifiyesi önemli rol oynamaktadır. Bitüm ağırlığınca %20 CR içeriğinde karışımların yorulma ömrü uzamakta ve çatlak ilerleyişi yavaşlamaktadır [111].

Caltrans [112], yaptığı çalışmada CR modifiyesinin sıcak karışımların sıcaklık hassasiyetini azalttığı, düşük sıcaklıklarda çatlak oluşumuna karşı direnci, yaşlanma ve oksidasyon direncini geliştirdiğini belirtmiştir.

Xiao ve ekibi üç farklı bağlayıcı türü kullanarak PG64-22 sınıfı bitüme bitüm ağırlığınca %10 CR ilave ederek modifiye etmiş, saf ve %3 SBS modifiyeli bağlayıcılar ile kıyaslamıştır. Yaşlanma olmadığı takdirde CR modifiyesinin tekerlek izi parametresini ($G^*/\sin\delta$) arttırdığı ve yorulma parametresini ($G^*.\sin\delta$) düşürdüğü belirtilmiştir. Aynı zamanda üç tip bağlayıcıda da CR modifiyeli bağlayıcıların en düşük sünme rijitliği değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Uzun dönem yaşlanmadan sonra ise CRMA bağlayıcıların yaşlanma direncini arttırdığı ve yaşlanma sıcaklıkları ve süresinin SBS modifiyeli bağlayıcılarla benzer özellikler sergilediği belirtilmiştir [113].

Sarsam ve Al-Sadik, yaptıkları çalışmada bitüm ağırlığınca %8-16 CR ile bağlayıcıyı modifiye ederek karışımlar hazırlamış, bu karışımlara farkı periyotlarda (kısa dönem (4-8 saat), uzun dönem (2-5 gün)) yaşlandırma yaparak kontrol karışımıyla Marshall stabilitesi, esneklik modülü ve çekme özellikleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre %8 CR içeriğinde bütün yaşlandırma periyotlarında maksimum Marshall stabilitesi değerlerine ulaşılmıştır. 5 günlük uzun dönem yaşlandırma sonucunda CR modifiyeli karışımların kontrol numunelerine göre Marshall stabilitesi (25 °C), ITS (40 °C) ve esneklik modüllerinin arttığı belirtilmiştir [114].

Yapılan çalışmada CR modifikasyonu ile birlikte kullanılan Sasobitin, yüksek sıcaklık performans seviyesini artırarak tekerlek izine karşı direnci önemli derecede iyileştirdiği ve bu etkilerin kısa dönem yaşlandırmadan (STA) sonra söz konusu olduğu tespit edilmiştir [50].

Banerjee ve diğ. (2012), Rediset, Sasobit, Evoterm gibi ılık karışım katkılarının zaman içinde bitümde meydana gelen sertleşme hızını azalttığını belirtmişlerdir. Ilık karışım katkıları bağlayıcının kırılma direncini, neme karşı dayanıklılığını, adezyonu ve kaplama tabakaları içindeki kohezyonu geliştirmektedir [115].

Jamshidi ve ekibi yaptığı çalışmada Sasobit modifikasyonunun orjinal karışımların hacimsel özelliklerini ve optimum bitüm oranını etkilemediğini, düşük uygulama sıcaklığı dolayısıyla düşük yaşlanma özellikleri sunarak yüksek yorulma direnci sağladığı ve Sasobit modifikasyonu ile daha yüksek oranda geri dönüşüm malzemesinin kullanılabileceğini belirtmişlerdir [116].

Safaei ve ekibi yaptıkları çalışmada, Evotherm ve köpüklendirme yöntemiyle elde ettikleri ılık karışımların kısa ve uzun dönem performanslarını sıcak karışımlarla kıyaslamıştır. Ilık karışım katkısının kullanımıyla kısa dönem yaşlanmanın sıcak karışımlara göre azaldığı belirtilmiştir [117].

Yapılan çalışmada kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış köpüklü ılık karışım asfalt ve geleneksel sıcak karışım (BSK) asfaltların reolojik ve kimyasal özellikleri değerlendirilmiştir. Asfalt karışımların kısa ve uzun dönem yaşlanmalarını temsil etmek için AASHTO R30 standardı kullanılmıştır. DSR testi yaşlanmamış ve yaşlanmış bağlayıcıların reolojik özelliklerini karakterize etmek için, FTIR deneyi bağlayıcılarda bulunan fonksiyonel grupların miktarlarını tanımlamak ve ölçmek için, GPC deneyi ise bağlayıcı içerisindeki molekül boyut ve dağılımını belirlemek için kullanılmıştır. Uzun ve kısa dönem etüvde yaşlandırılmış BSK karışımlarından elde edilen bitümlü bağlayıcılar, köpüklü ılık asfalt karışımlarından elde edilenlerle karşılaştırıldığında, biraz daha fazla $G^*/\sin\delta$ ve $G^*\sin\delta$ değerleri göstermiştir. FTIR ve GPC test sonuçları DSR testinden elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Bu durumda köpüklü ılık asfalt karışımlar, geleneksel BSK'larla karşılaştırıldığında, yaşlanmaya daha az maruz kaldığı belirtilmiştir [118].

Dinamik modül testine göre sıkıştırma sıcaklığı daha yüksek olduğu zaman ılık karışım asfalt (IKA) için tüm dinamik modül (E^*) değerleri daha yüksek bulunmuştur. Dört nokta kırış yorulma testine dayanarak 115 °C'de üretilen IKA karışımları, kontrol karışımlarına göre benzer veya daha yüksek yorulma ömrü sergilemiştir [119].

Xiao ve ekibi yaptığı çalışmada nemli agrega ile elde ettikleri karışımları uzun dönem yaşlanmaya tabi tutmuş ve bu karışımların nem hassasiyeti üzerine çeşitli ılık asfalt katkılarının etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma göstermiştir ki ılık asfalt katkılarının,

soyulma önleyici ve nem içeriğine bakılmaksızın uzun dönem yaşlandırmaya tabi tutulmuş IKA karışımlarının nem hassasiyetine karşı dayanımı geliştirdiği belirtilmiştir [120].

Bağlayıcının kompleks modülünün faz açısına oranı ($G^*/\sin\delta$) olan tekerlek izi parametresinin incelendiği çalışmada FT-parafin modifikasyonunun her türlü bağlayıcıda ve her türlü yaşlanma koşulunda $G^*/\sin\delta$ ve sıfır kesme viskozite değerlerini diğer ılık karışım katkılarına göre daha fazla artırdığı ve esnek davranışı sergileyen daha düşük faz açısı sunduğu belirtilmiştir [121,122].

60/70 penetrasyon dereceli asfalt bağlayıcı farklı oranlardaki (%1,5 ve %3,5) Sasobit ile modifiye edilmiş ve fiziksek ve reolojik testlerden geçirilerek Sasobit katkısının bitümlü bağlayıcı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Test sonuçlarına göre Sasobit katkısının sıcaklık hassasiyeti üzerinde etkili olduğu ve bağlayıcıların kompleks modüllerini arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca FTIR test sonuçlarına göre Sasobit katkısının, bağlayıcıların mikro yapısını ve ağırlık dağılımını değiştirdiği ifade edilmiştir [123].

Yapılan çalışmada CR modifiyeli bağlayıcıların performans özellikleri, yüksek, orta ve düşük sıcaklıklarda FT-paraffin vaks içeriğinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. CRMA bağlayıcılar 5 farklı (%0, %1,5, %2,5, %3,5 ve %4,5) FT-parafin yüzdesi ile modifiye edilmiş ve RTFOT ve PAV prosedürleri kullanılarak kısa ve uzun dönem yaşlandırılmıştır. Elde edilen bağlayıcılara RV, DSR ve BBR deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, (1) CRMA bağlayıcıların 135 °C'deki viskozitesinin FT-parafin katkısı ile düşürüleceği (2) Superpave şartname gereksinimlerini, özellikle yorulma parametrelerini ($G^*.\sin\delta$ ve rijitlik) karşılayan bağlayıcı performanslarına erişilebileceği (3) CRMA bağlayıcılar için FT-parafinin %3,5'e kadar kullanılabilir olduğu ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının düşürüleceği belirtilmiştir [124].

Tekerlek izinin karışım deneylerinde değerlendirildiği çalışmalarda FT-parafin modifiyeli ılık karışımların ilerleyen tekerlek geçiş sayılarında sıcak karışımlardan daha az şekil değiştirmeye uğradığı ayrıca dinamik modül deneylerinde de FT-parafin modifiyeli karışımlarının geri dönen elastik deformasyonunun daha fazla olması dolayısıyla sıcak karışımlardan daha fazla dinamik modül sunduğu böylece kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli olduğu belirtilmiştir [125-127].

Liu ve Glover [128], ılık asfalt karışımların oksidasyon kinetiğinin kaplama dayanıklılığı üzerine muhtemel etkilerinin bilinmediğini belirtmiş ve Evotherm, Rediset ve Advera ılık asfalt katkılarını kullanarak ılık asfalt karışımların farklı sıcaklıklardaki yaklaşık oksidasyon kinetik parametrelerini Arrhenius reaksiyon modeli ile belirlemeye çalışılmış ve örnek bir

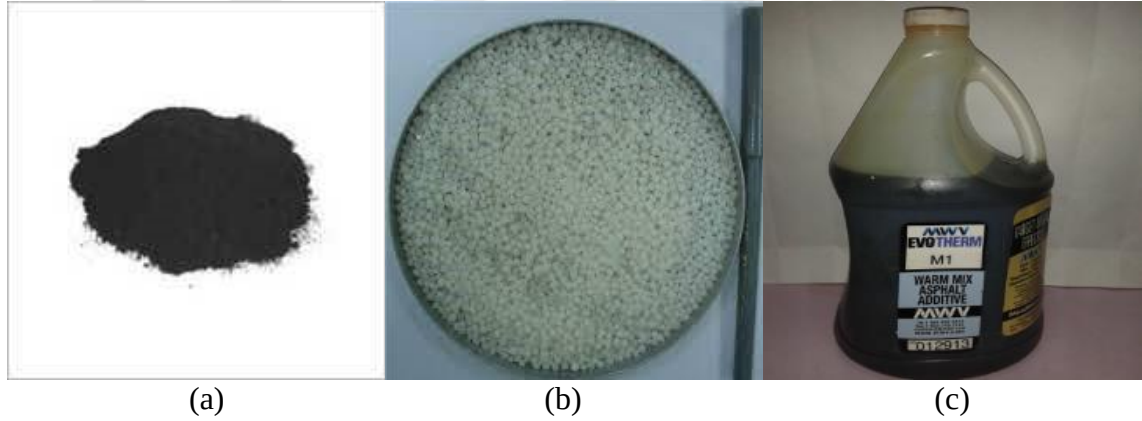
kaplama yaşlanması simülasyonu ile kaplama yaşlanmasındaki aktivasyon enerjisindeki değişikliklerin etkileri araştırılmıştır. Sabit oranlı aktivasyon enerjileri, saf ve ılık asfalt katkılı bağlayıcılar arasında istatistiksel olarak farklılıkların olmadığını göstermiştir. Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde ılık asfalt katkılarının bitüm oksidasyonu üzerinde saf bağlayıcıya göre negatif bir etkiye sahip olmadığı belirtilmiştir. 10 yılın üzerindeki hizmet ömründe saf bağlayıcı ve ılık asfalt katkılı karışımlar arasında kaplama oksidasyonundaki değişimin minimal boyutta olacağı belirtilmiştir.



5. MATERYAL VE METOT

5.1. Malzeme Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Çalışmada bağlayıcı olarak TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bitüm modifikasyonunda kullanılan CR Arısan Samsun Akın Rejenere Kauçuk firmasından, Sasobit Sasolwax firmasından ve Evotherm MeadWestvaco (MWV) şirketinden temin edilmiştir. Şekil 5.1’de çalışmada kullanılan katkıları görülmektedir.



Şekil 5.1. (a) CR (b) Sasobit (c) Evotherm

Çalışmada deneye tabi tutulacak karışımlar saf, %10 CR, %10 CR ile %3 Sasobit ve %10 CR ile % 0,7 Evotherm modifiyeli bağlayıcılar ile optimum bitüm içeriğinde hazırlanmıştır. Kullanılan katkı oranlarına daha önce yaptığımız çalışmalar ve yapılan literatür çalışması ışığında karar verilmiştir [12,33,35,46,129]. Çalışmada kullanılan bağlayıcı kombinasyon gösterimi ve deneysel tasarım Tablo 5.1 ve Şekil 5.3’te verilmiştir. Modifiyeli bağlayıcı Şekil 5.2’de görülen yüksek kesmeli mikser (high shear mixer) ile 170 °C sabit sıcaklıkta 2000 devir/dk hızda 45 dk karıştırılarak hazırlanmıştır. Bu karıştırma şartlarının neden olduğu yaşlanma etkisinin saf bağlayıcıda da görülmesi için aynı karıştırma şartları saf bağlayıcı için de uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan bağlayıcıya ait özellikler Tablo 5.2’de agregaya ait gradasyon ve fiziksel özellikler Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.1. Bağlayıcı kombinasyonu

Kullanılan katkı	Bağlayıcı ağırlığınca kullanılan katkı oranı (%)			
CR	0	10	10	10
Sasobit	0	0	3	0
Evotherm	0	0	0	0.7
Gösterim	0-0	10-0	10-3	10-7

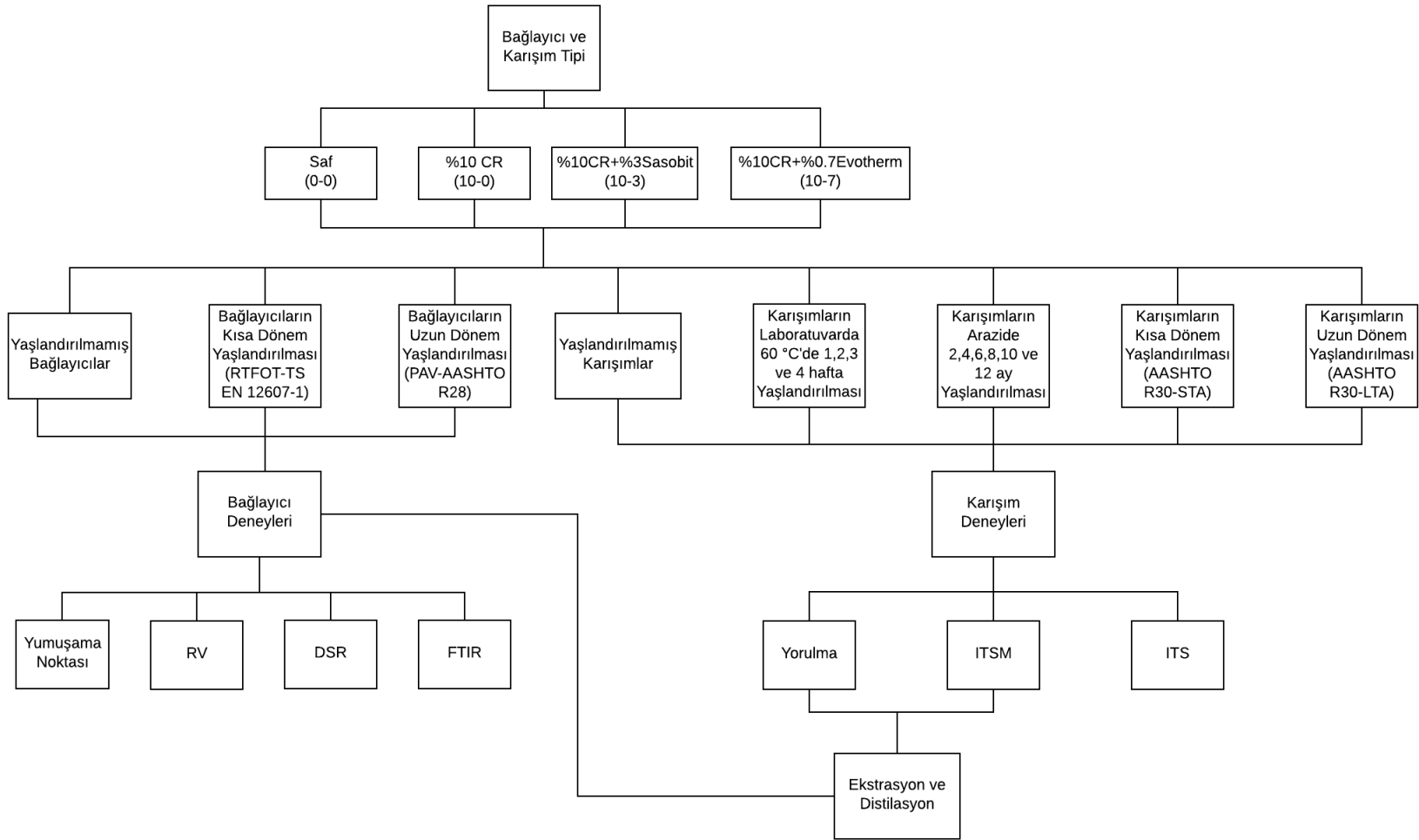
Tablo 5.2. Çalışmada kullanılan bağlayıcı özellikleri

Özellikler	Standard	B 50/70
Penetrasyon (0,1 mm), 100 g, 5 s	ASTM D5	51.25
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	52.2
Penetrasyon indeksi (PI)		-0.61
Özgül ağırlık		1.032
Viskozite (cP, 135 °C)	ASTM D4402	600.0
Viskozite (cP, 165 °C)	ASTM D4402	175.0

Tablo 5.3. Çalışmada kullanılan agreganın gradasyonu ve fiziksel özellikleri

Elek Çapı (mm)	19.1	12.7	9.52	4.76	2.00	0.425	0.18	0.075
Geçen (%)	100	94.0	81.0	50.0	30.0	15.0	10.5	5.5
Özgül ağırlık (g/cm^3 , Kaba, ince, filler)	2.552	2.580	2.713					
Aşınma kaybı (% , Los Angeles)			29					
Dona dayanıklılık (% , Na_2SO_4)			4.5					
Soyulma direnci (% , Nicholson)			70-75					

**Şekil 5.2.** Yüksek Kesmeli Mikser (High Shear Mixer)



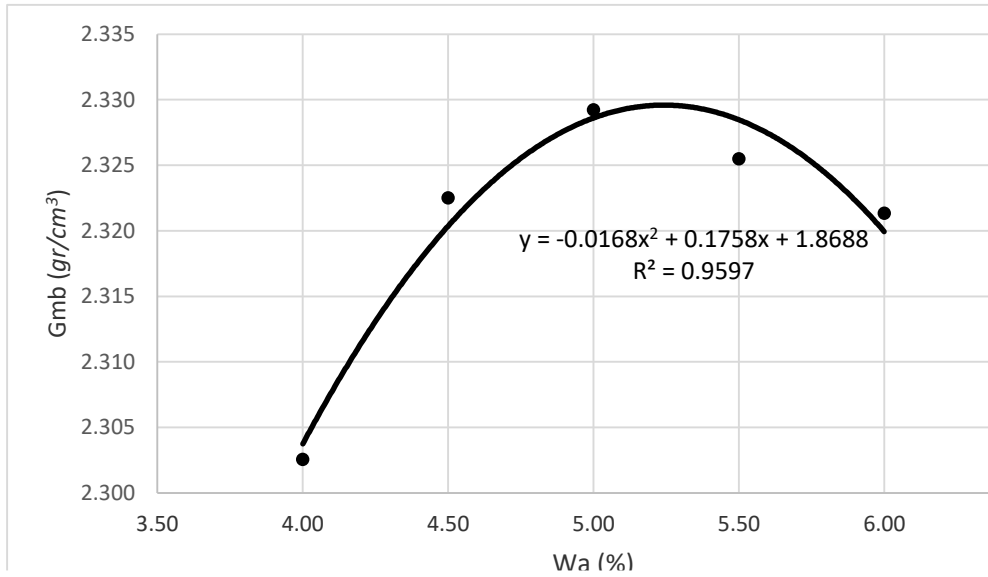
Şekil 5.3. Deneysel çalışma akış şeması

5.2. Optimum Bitüm İçeriğinin Belirlenmesi

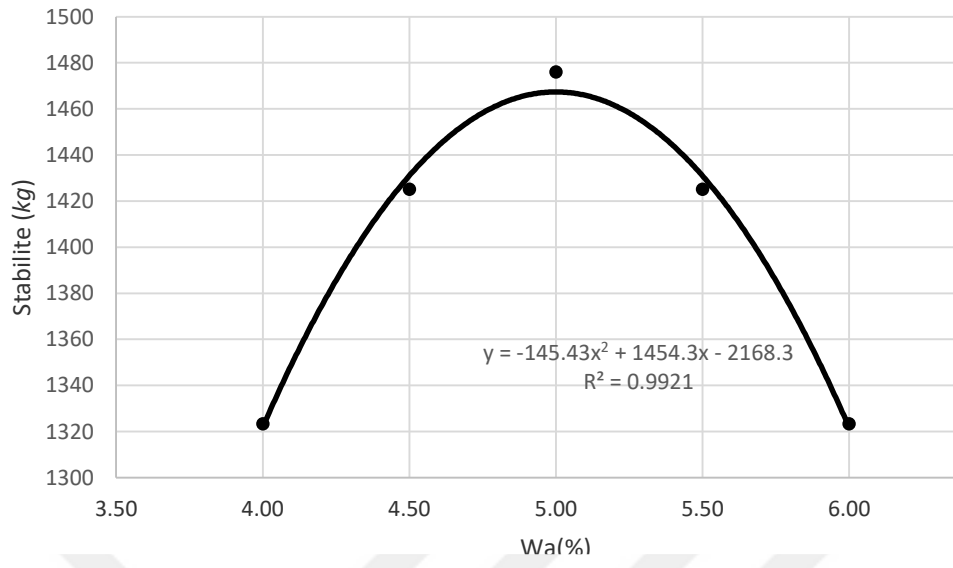
Optimum bitüm içeriği saf karışımlar için Marshall yöntemine uygun olarak numunelerin her iki yüzüne 75 darbe uygulanarak belirlenmiş olup farklı bitüm içeriklerinde (Wa:bitüm yüzdesi) hazırlanan numunelerin ortalama stabilite, akma ve hacimsel değerleri (Gmb: Yoğunluk, VFA: Asfaltla doluluk boşluk, Va: Hava boşluğu ve VMA: Agregalar arası boşluk) Tablo 5.4’te verilmiştir. İlgili özelliklerin bitüm içeriği ile değişimi grafiksel olarak Şekil 5.4-5.9’de verilmiştir. Tablo 5.5’te ise %5.3 bitüm içeriğinde hazırlanan karışımların özellikleri görülmektedir.

Tablo 5.4. Katkısız karışımlarının farklı bitüm içeriklerindeki özellikleri

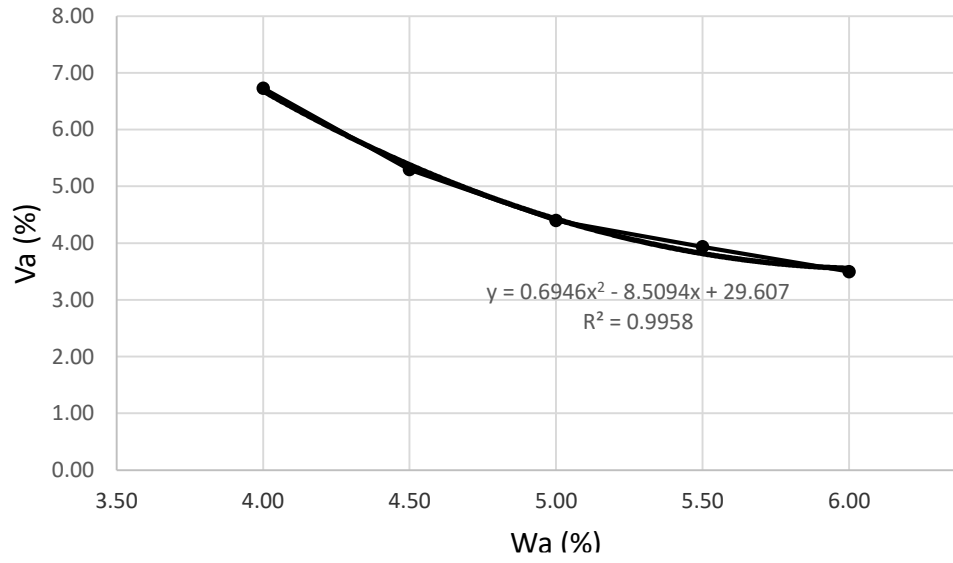
Wa (%)	Va (%)	VFA (%)	Gmb (%)	VMA (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)
4	6.73	51.8	2.303	13.95	1323	2.22
4.5	5.29	61.1	2.323	13.62	1425	2.53
5	4.40	68.1	2.329	13.78	1476	2.79
5.5	3.94	72.5	2.325	14.33	1425	3.34
6	3.50	76.5	2.321	14.88	1323	4.72



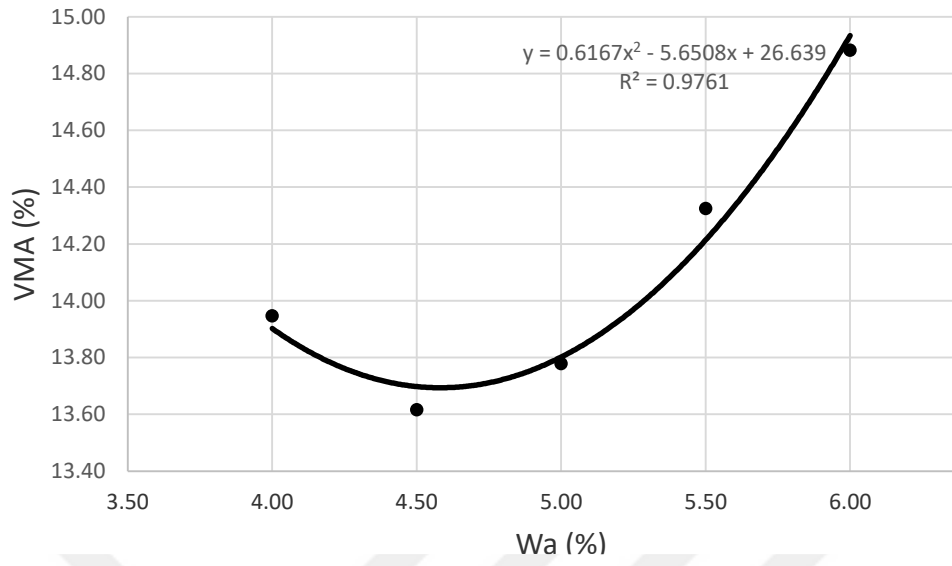
Şekil 5.4. Bağlayıcı oranı – yoğunluk ilişkisi



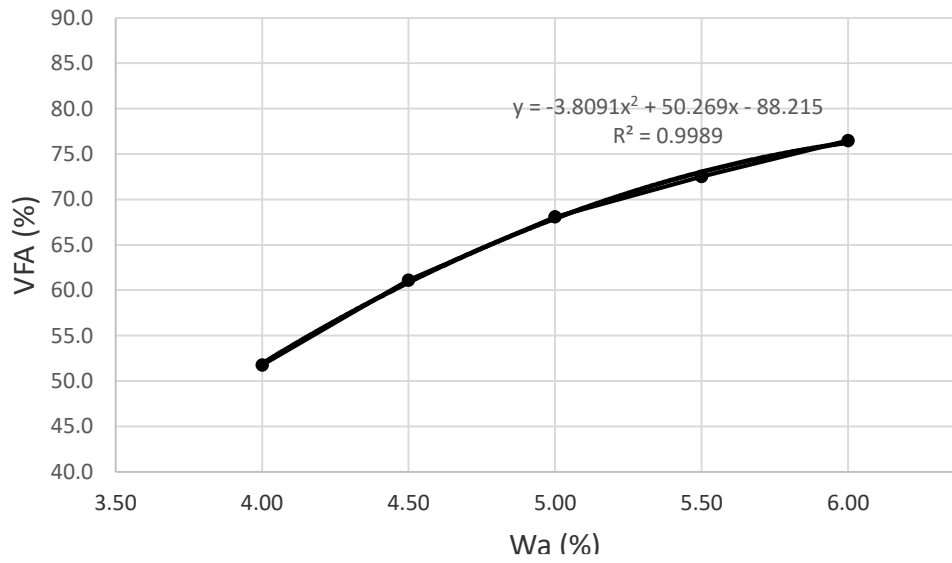
Şekil 5.5. Bağlayıcı oranı – Stabilité ilişkisi



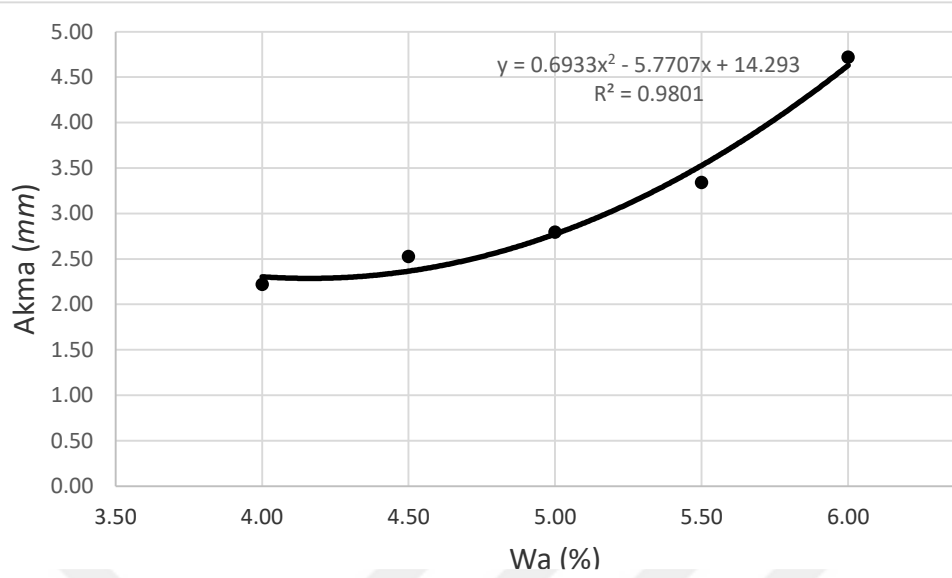
Şekil 5.6. Bağlayıcı oranı – boşluk oranı ilişkisi



Şekil 5.7. Bağlayıcı oranı – agregalar arası boşluk ilişkisi



Şekil 5.8. Bağlayıcı oranı – asfaltla dolu boşluk ilişkisi



Şekil 5.9. Bağlayıcı oranı – akma ilişkisi

Tablo 5.5. Saf karışımın %5.3 bitüm içeriğindeki özellikleri

Özellikler	Değerler	Aşınma Şartname Kriterleri
Gmb (g/cm^3)	2.329	
Stabilite (kgf)	1449	Min. 900 kgf
VMA (%)	14.01	Min.%14
Va (%)	4.04	3-5
VFA (%)	71.21	65-75
Akma (mm)	3.03	2-4 mm

5.3. Yaşlandırma Prosedürleri

5.3.1. Bağlayıcıların Yaşlandırma Prosedürü

Dönel İnce Film Halinde Isıtma (RTFOT): Karıştırma süresince bağlayıcının yaşlanması, laboratuvarda RTFOT (Dönel İnce Film Halinde Isıtma Deneyi) ile temsil edilmektedir. Bu deneyde asfalt hazırlama tesislerinde karıştırma sırasında bitümlü bağlayıcının maruz kaldığı sertleşmeyi temsil edecek şekilde, ince bir film halinde hareket eden bitümlerin veya bitümlü bağlayıcıların üzerinde, sıcaklık ve havanın birleşik etkisini değerlendirmektedir. RTFOT yöntemi ile bağlayıcıların ısıtma sonucu uçucu madde kaybı belirlenebilmekte ayrıca sıcaklık ve havanın etkisiyle bitümlü malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimi tespit etmek amacıyla gerekli malzeme elde edilebilmektedir.

AASHTO T240'ta belirtilen bu deney, 163 °C sıcaklığa sahip etüve yerleştirilen 8 adet şişe kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. Dönel ince film halinde ısıtma deneyi

Deneyde, 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 $4000 \pm 200 \text{ mL/dk}$ olacak şekilde hava verilmektedir. Sıcaklığın etkisiyle bitüm, şişeleri tam olarak kaplayarak ince bir film tabakası oluşturmakta ve bu sayede yaşlanmanın meydana gelişi kolaylaştırılmaktadır.

Bu sürenin sonunda iki numune kütle kaybını tayin etmek amacıyla, geri kalan altı şişe ise bitümlü malzemelerin yaşlandıktan sonraki fiziksel özelliklerini tespit etmekte kullanılmaktadır. Kütle kaybı aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmektedir. Denklem 5.1'de M_1 yaşlanmadan önceki ağırlığı, M_2 ise yaşlanmadan sonraki ağırlığı ifade etmektedir.

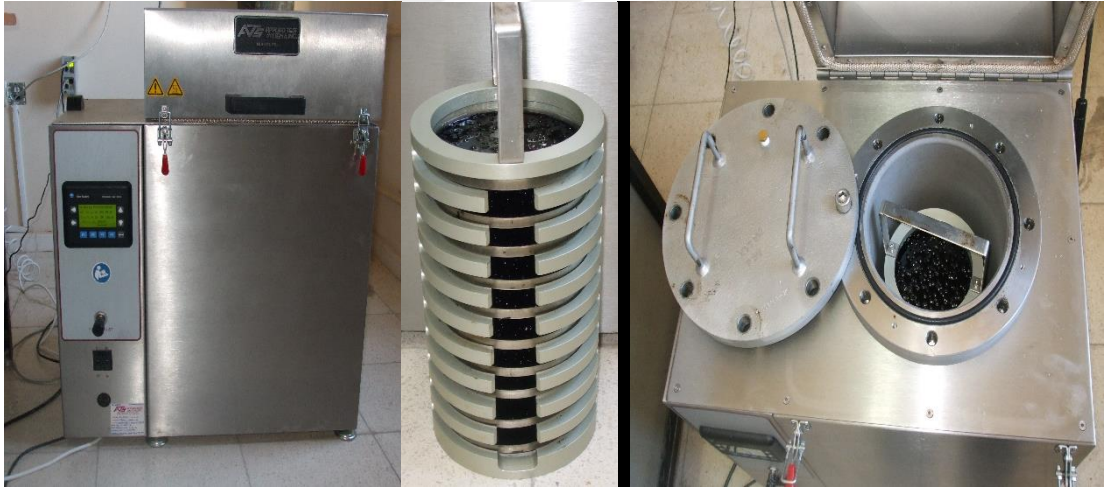
$$\text{Kütle Kaybı, \%} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (5.1)$$

Basınçlı Yaşlandırma Kabı (PAV): Basınçlı yaşlandırma kabı (PAV), kaplamanın servis ömrü boyunca bağlayıcılarda meydana gelen uzun dönemli sertleşme özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. PAV deneyi, RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanmaktadır. AASHTO R28 standardına uygun olarak her bir numune kabına 50 gr RTFOT deneyinden elde edilen bağlayıcı konulmaktadır. PAV deneyinde bağlayıcı sınıfına göre değişen (90–100 ve 110 °C) belirli bir sıcaklıkta

numunelere 20 saat süreyle 2070 *kPa*'lık basınç uygulanmaktadır [130]. Bağlayıcı sınıfına göre değişen deney sıcaklıkları Tablo 5.6'da verilmiştir. Deney aleti ise Şekil 5.11'de görülmektedir.

Tablo 5.6. Bağlayıcı sınıfına bağlı olarak PAV deney sıcaklıkları [130].

Bağlayıcı Sınıfları	PAV Deney Sıcaklığı (°C)
PG 46-Y	90
PG 52-Y	90
PG 58-Y	100
PG 64-Y	100
PG 70-Y	100–110
PG 76-Y	100–110
PG 82-Y	100–110



Şekil 5.11. PAV deney aleti

5.3.2. Karışımların Hazırlanması ve Yaşlanma Prosedürü

Marshall deney numuneleri Tablo 5.3'te verilen gradasyona uygun olarak 1100 *gr* olacak şekilde hazırlanmıştır. Agregalar karıştırma sıcaklığında 3 saat bekletilmiş ve Tablo 5.7'de verilen karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarında Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan Marshall numuneleri Şekil 5.12'de görüldüğü üzere 2 aylık periyotlar halinde 12 ay boyunca çevresel şartlara maruz bırakılmak üzere araziye, Şekil 5.13'te görüldüğü gibi 1, 2, 3 ve 4 hafta laboratuvar yaşlandırması için 60 °C'lik etüve bırakılmıştır. Ayrıca arazide çevresel

koşullar altında ve laboratuvarında 60 °C’deki etüvde yaşlandırılmış numuneler ile kıyaslamak amacıyla standart AASHTO R30 yöntemine göre kısa (135 °C’de 4 saat gevşek halde) ve uzun dönem (85 °C’de 5 gün) yaşlandırılmış saf ve modifiyeli Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Tablo 5.8’de bitüm ve karışımların yaşlanma prosedürü verilmiştir.

Tablo 5.7. Bağlayıcı tipine göre karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcı Tipi	Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
0-0	160.0	150.0
10-0	170.0	165.0
10-3	160.0	155.0
10-7	165.0	160.0

Tablo 5.8. Bitüm ve karışımların yaşlanma prosedürü

Numuneler	Yaşlanma Prosedürü
Saf ve modifiyeli bağlayıcılar	STA: RTFOT (AASHTO T240) LTA: RTFOT+PAV (AASHTO R28)
Laboratuvar numuneleri	1, 2, 3 ve 4 hafta 60 °C (Şekil 5.13) STA: 135 °C/4 saat, Gevşek (AASHTO R30) LTA: STA+85 °C/5 gün, Sıkışmış (AASHTO R30)
Arazi numuneleri	2, 4, 6, 8, 10 ve 12 ay çevresel koşullar altında (Şekil 5.12)



Şekil 5.12. Çevresel koşullar altında yaşlanmaya bırakılan numuneler

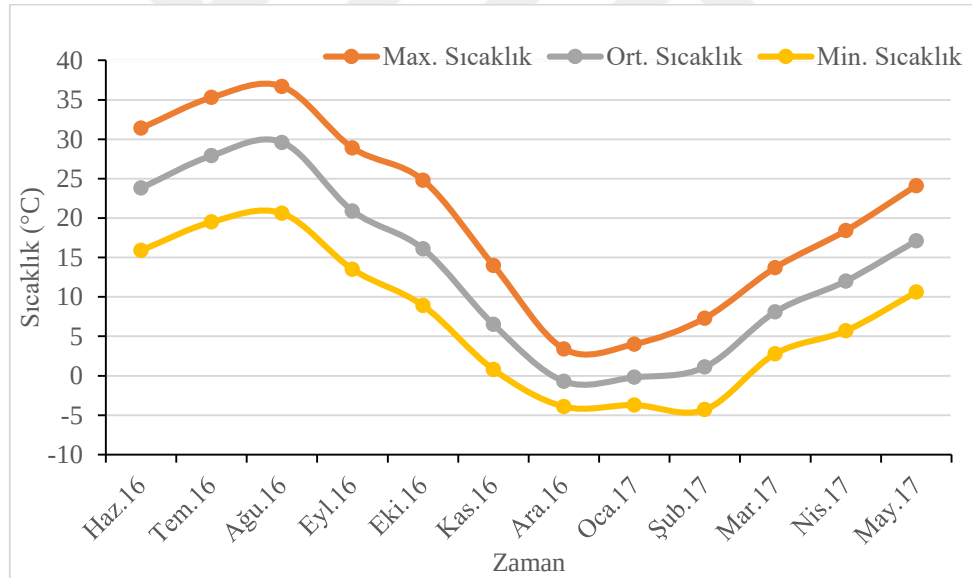


Şekil 5.13. Laboratuvarda yaşlandırılan numuneler

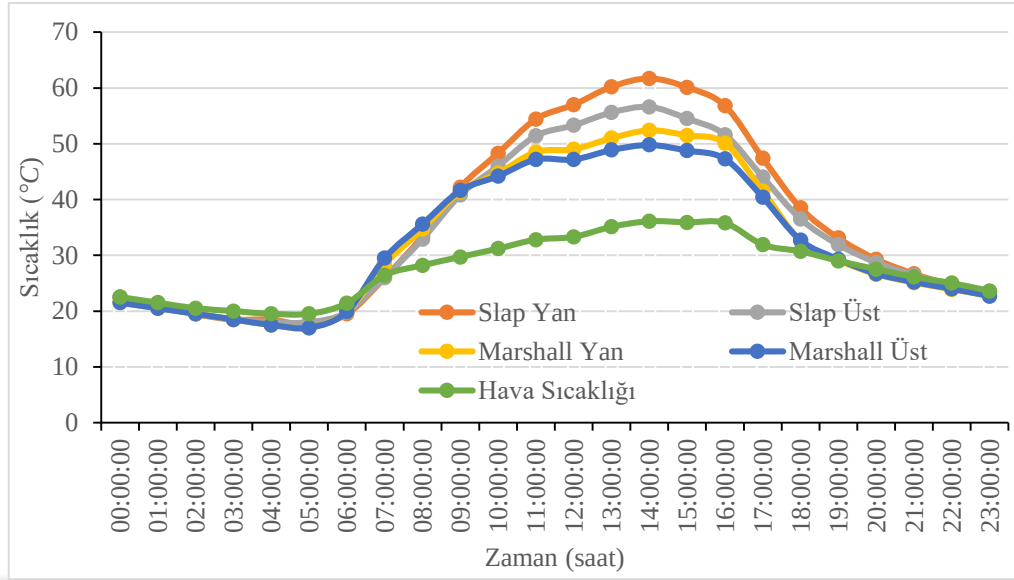
Tablo 5.9’da 01.06.2016-01.06.2017 tarihleri arasındaki Elazığ bölge/17201 nolu istasyonun maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık verileri görülmektedir. Şekil 5.14’te bu verilerin grafiksel gösterimi Şekil 5.15’te ise arazide Şekil 5.16’da görülen sıcaklık ölçüm cihazıyla ölçülen günlük saatlik numune sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 5.9. Elazığ Bölge/17201 no’lu istasyonun maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık verileri

Sıcaklık (°C)	Aylar (01.06.2016-01.06.2017)											
	Haziran 2016	Temmuz 2016	Ağustos 2016	Eylül 2016	Ekim 2016	Kasım 2016	Aralık 2016	Ocak 2017	Şubat 2017	Mart 2017	Nisan 2017	Mayıs 2017
Maksimum Sıcaklık	31.4	35.3	36.7	28.9	24.8	14.0	3.4	4.0	7.3	13.7	18.4	24.1
Minimum Sıcaklık	15.9	19.5	20.6	13.5	8.9	0.8	-3.9	-3.7	-4.3	2.8	5.7	10.6
Ortalama Sıcaklık	23.8	27.9	29.6	20.9	16.1	6.5	-0.7	-0.2	1.1	8.1	12.0	17.1



Şekil 5.14. 01.06.2016-01.06.2017 tarihleri arasında aylık Elazığ Bölge maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık değişimi



Şekil 5.15. Arazideki temsili numunelerin sıcaklığının hava sıcaklığıyla değişimi



Şekil 5.16. Temsili arazi ölçüm sistemi

Şekil 5.15'te görüldüğü üzere 30 x 30 x 5 cm boyutundaki numune Marshall numunelerine göre arazide yaklaşık olarak %10 oranında daha fazla ısınmaktadır. Bu da inşa edilen yol kaplamalarının deneylerde kullandığımız Marshall numunelerine göre daha fazla sıcaklığa maruz kalacağı ve yaşlanma oranının artacağına işaret etmektedir.

5.4. Karışımlardan Bağlayıcıların Geri Kazanılması

Yaşlandırma prosedürleri sonrası bağlayıcılarda meydana gelen yaşlanmayı tespit etmek amacıyla karışım deneylerine tabi tutulmuş Marshall numuneleri Şekil 5.17-5.18'de görüldüğü üzere Elazığ Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü'nün AR-GE laboratuvarında

bulunan ekstrasyon ve distilasyon cihazı ile bağlayıcıların geri kazanılma işlemi EN 12697-1 ve EN 12697-3 standartlarına uygun olarak yapılmıştır[131,132].



Şekil 5.17. Ekstrasyon cihazı



Şekil 5.18. Distilasyon Cihazı

5.5. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deney Yöntemleri

5.5.1. Yumuşama Noktası Deneyi

Bitümün yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde, bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilmekte ve bitüm üzerine 2,5 cm yükseklikten standart bir bilye bırakılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5 °C'dir ve deney

boyunca sıcaklık dakikada 5 °C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü malzemenin tabana değdiği anda termometrenin gösterdiği değerdir. Yumuşama noktasının 80 °C'nin üzerine çıkması durumunda deneyde su yerine gliserin kullanılmalıdır ve deneyin başlangıç sıcaklığı 32 °C'dir. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda tekerlek etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Tekerlek izine hassas karışımlar için yumuşama noktası sıcaklığı tekerlek iziyle iyi bir korelasyon sağladığı ve yumuşama noktasındaki 5-6 °C'lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı belirtilmektedir [133]. Otomatik yumuşama noktası deney aleti Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Yumuşama noktası deney düzeneği

5.5.2. Dönel Viskozimetre (RV)

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bu amaçla AASHTO TP48 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (Şekil 5.20). Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Deneyde bir motor yardımıyla milin düzenli olarak 20 devir/dk hızla dönmesi sağlanmakta ve viskozite okumaları yapılmaktadır. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135 °C'deki viskozite değerinin 3 Pa.s'yi aşmaması istenir [134].



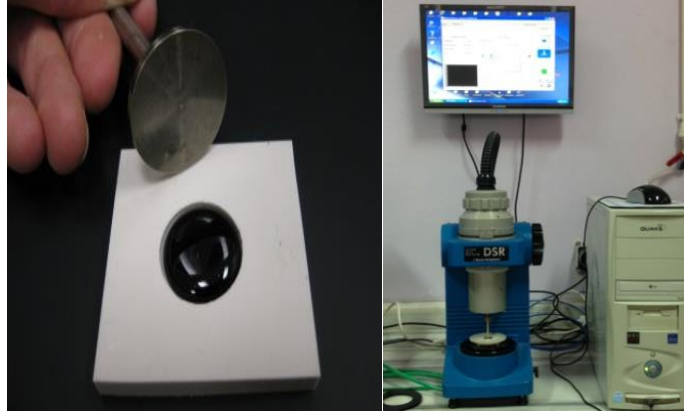
Şekil 5.20. Brookfield dönel viskozimetresi

5.5.3. Dinamik Kayma Reometresi (DSR)

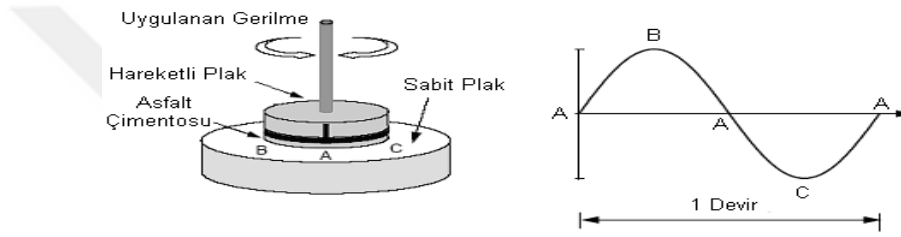
Dinamik kayma reometresi (DSR) deneyi (Şekil 5.21), bağlayıcının kompleks kayma modülü (G^*) ve faz açısını (δ) belirleyerek viskoz ve elastik davranışını karakterize etmektedir. G^* , tekerrür eden kayma gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlara karşı bağlayıcının gösterdiği toplam direncin göstergesidir. Hem G^* hem de δ değerleri bağlayıcının sahip olduğu ısı ve yükleme hızı ile önemli ölçüde değişmektedir [130,135].

DSR deneyinde, bağlayıcılar Şekil 5.22’de görüldüğü gibi sabit alt plak ve hareketli üst plak arasına yerleştirilmektedir. Hareketli üst plaktaki A noktası, B noktasına gitmekte geri dönerek tekrar A noktasına geldikten sonra C noktasına gitmektedir. Daha sonrada tekrar A noktasına ulaşmaktadır. Bu döngüye bir devir denilmektedir ve deney boyunca tekrarlanmaktadır.

Bu çalışmada deney 10 *rad/sn* de ve 58-82 °C sıcaklık aralığında ve şekil değiştirme kontrollü olarak yapılmıştır.



Şekil 5.21. Dinamik kayma reometresi (DSR) deney aleti ve numune kabı



Şekil 5.22. DSR deneyinde deformasyon yönleri

5.5.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

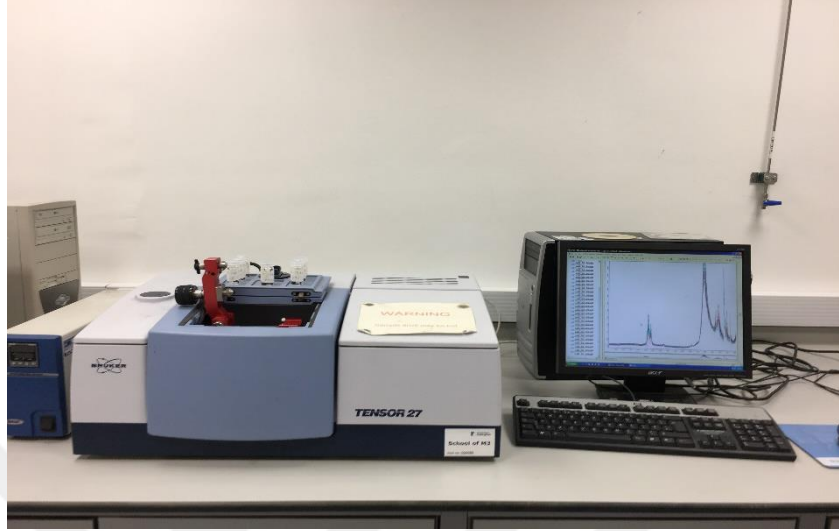
Bu çalışmada Bruker Tensor 27 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılmıştır (Şekil 5.23). Deneyde spektrum aralığı $4000\text{-}500\text{ cm}^{-1}$ olarak seçilmiştir. Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış 65 bağlayıcıya FTIR testi yapılmıştır. Her bir bağlayıcı için 3 tekrar yapılmıştır. Yaşlanmayı tespit etmek için kullanılan karbonil ve sülfoksit indeksleri yapılan çalışmalara dayanarak [104,136-139] Denklem 5.2 ve 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_{C=O} = A_{1700\text{cm}^{-1}} / \sum A \quad (5.2)$$

$$I_{S=O} = A_{1030\text{cm}^{-1}} / \sum A \quad (5.3)$$

Burada $A_{1700\text{cm}^{-1}}$ 1700 cm^{-1} merkezli karbonil bandın alanıdır ($1650\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$ aralığında hesaplanmıştır), $A_{1030\text{cm}^{-1}}$ 1030 cm^{-1} merkezli sülfoksit bandın alanıdır ($980\text{-}1080\text{ cm}^{-1}$

aralığında hesaplanmıştır) ve $\sum A$ ise $600-2000\text{ cm}^{-1}$ aralığında spektrum bandının toplam alanıdır.



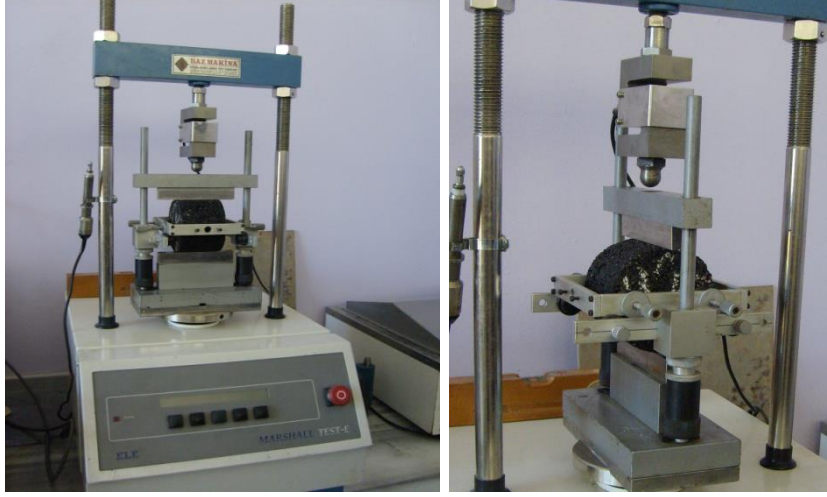
Şekil 5.23. FTIR test cihazı

5.6. Bitümlü Karışımlara Uygulanan Deney Yöntemleri

5.6.1. İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS)

BSK'ların indirekt çekme gerilmesi çatlak potansiyeli için iyi bir göstergedir. Bozulma anındaki yüksek çekme birim şekil değiştirmesi, BSK'nın bozulmadan önce yüksek değerlerdeki şekil değiştirmeleri, çatlamlara dayanacak şekilde tolere edeceğine işaret eder. İndirekt çekme dayanımı deneyinde silindirik numuneler çap doğrultusunda etki eden basınç yüklemesine tabi tutulur. Marshall deney ekipmanı (Şekil 5.24) ile bu deney yapılabilmektedir. Deney yapılmadan önce numuneler $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik su banyosunda 2 saat bekletilmiştir ve deney $50 \pm 2\text{ mm/dk}$ yükleme hızında yapılmıştır. İndirekt çekme mukavemeti Denklem 5.4 ile hesaplanmaktadır [140,141]. Denklemde ITS çekme dayanımı (kPa), $P_{\max}$ kırılmaya neden olan maksimum yük (kN), t ortalama numune yüksekliği (m), d numune çapını (m) ifade etmektedir.

$$ITS = \frac{2P_{\max}}{\pi.t.d} \quad (5.4)$$

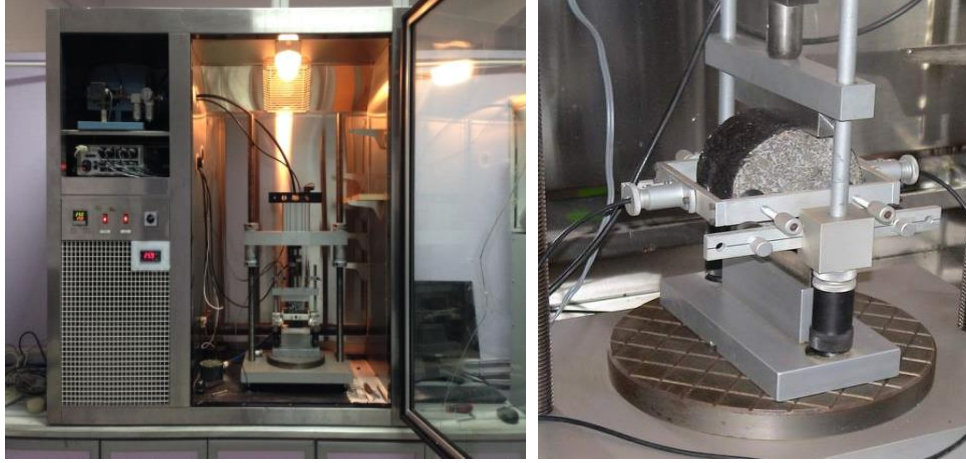


Şekil 5.24. İndirekt çekme mukavemeti deney düzeneği

5.6.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü Deneyi (ITSM)

İndirekt çekme modunda ölçülen rijitlik modülü, elastik özelliklerin değerlendirilmesinde kullanılan gerilme-şekil değiştirme ölçümlerinin en yaygın şeklidir. Bitümlü tabakaların yük dağıtma kabiliyetinin bir ölçüsü olan rijitlik modülü, bitümlü sıcak karışımların en önemli performans karakteristiklerinden birisidir [142].

BSK'ların rijitlik modülünün deneysel olarak belirlenmesinde, direk basınç, indirek çekme, burulma deneyleri uygulanmaktadır. Bütün deney metotları, viskoelastik bir malzemenin kısa süreli yüklemelerde elastik davrandığı kabulüne dayanmaktadır. Deney yöntemleri periyodik olarak uygulanan yükü ve bu esnada oluşan ani deformasyonları içermektedir. Rijitlik modülü uygulanan gerilme ve geri dönen birim şekil değiştirme ile hesaplanmaktadır. Rijitlik modülü esasında viskoelastik malzemenin ani elastik modülüdür. Diametral (çap doğrultusunda yük uygulanan) deneyler, direk basınç deneylerine göre karışımdaki bağlayıcının etkisine karşı daha hassas olduğundan daha yaygın olarak kullanılmaktadır [140]. BS DD 213 standardı ile tanımlanmış hasarsız ve deformasyon kontrollü bir deney olan indirekt çekme rijitlik modülü (ITSM) deneyi Şekil 5.25'te görülen UMATTA (Universal Material Testing Apparatus) deney aleti kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 5.25. UMATTA cihazı ve ITSM deney düzeneği

Deney sistemi; iklimlendirme kabini, yükleme çerçevesi, yazılım ve bilgisayardan oluşmaktadır. İklimlendirme kabini sayesinde deney farklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Bu çalışmada deney 25 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Deney öncesinde numuneler en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, hedef yatay deformasyon, yük etki süresi, tahmini poisson oranı, yük artış süreleri ve tahmini rijitlik modülü gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir. Daha sonra numune yükleme çerçevesine yerleştirilerek yatay deformasyonu ölçen sensörler ayarlanmaktadır. Deneyde, önce numunelere ön yükleme işlemi uygulanmaktadır. 5 defa tekrarlanan ön yükleme sırasında cihaz otomatik olarak numunede yatay ekseninde hedef deformasyonu meydana getirecek yükü belirlemektedir. Ardından numuneye ön yükleme ile belirlenen yükte uygulanan 5 darbe sonucu Denklem 5.5'teki bağıntı kullanılarak ITSM değerleri belirlenmektedir.

$$S_m = F(R + 0,27) / LH \quad (5.5)$$

Burada S_m , indirekt çekme rijitlik modülü (MPa), F maksimum dikey yük (N), H 5 yük tekrarı sonucunda oluşan ortalama yatay deformasyon (mm), L ortalama numune kalınlığı (mm) R ise poisson oranıdır (0,35).

5.6.3. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

Bitümlü kaplamalar, her bir taşıt geçişinde kısa süreli bir yüke maruz kalmaktadır. Bu yükler, kaplamanın rijitliğinin azalmasına neden olan küçük hasarlara yol açmaktadır. Bu

küçük hasarlar uzun dönemde yorulma çatlağı olarak adlandırılan kaplama bozulmalarına neden olmaktadır [143]. Yorulma çatlakları, bitümlü sıcak karışımlarda en fazla görülen ve trafik yüklerinden ve tekerrüründen kaynaklanan bozulma türüdür. Yorulma çatlakları, tekrar eden yükler sonucu çatlak oluşumunun ardından giderek artmaktadır [140]. Pratikte yorulmadan kaynaklanan bozulma belirli bir oranda kaplamanın yorulma çatlakları ile kaplanması şeklinde tanımlanmaktadır.

Laboratuvar ortamında bitümlü sıcak karışımların yorulma dayanımlarını tespit edebilmek amacıyla geliştirilmiş birçok deney bulunmaktadır. Bu deneyler, gerilme ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilir. Deney türüne göre yükleme şekli, numune geometrisi ve numunede oluşan gerilme artışı farklılık gösterdiğinden yapılan bu deneylerde yorulma ömürleri farklılık gösterebilmektedir. Yorulma ömrü üzerine yapılan çalışmalar sonucunda deformasyon kontrollü deneylerden elde edilen yorulma ömürlerinin gerilme kontrollü deneylere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvarda belirlenen yorulma ömrünün arazide tespit edilen yorulma ömründen çok daha kısa olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yorulma ömrünün gerilme dağılımının ve kaplamanın sınır şartlarının bir fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır [144]. Buna rağmen yorulma deneyleri, farklı karışımların yorulma performanslarını karşılaştırmaya imkan sağlamaktadır.

Üst yapı performansında en önemli özellik olarak BSK'ların yorulma davranışı kabul edilmektedir. BSK'ların sıkışması, asfalt içeriği ve hava boşluğu gibi özelliklerin etkinlik dereceleri diğer deneylere göre, yorulma davranışının incelenmesi ile daha açık bir şekilde belirlenebilmektedir [145].

İndirekt çekme yorulma deneyi, gerilme veya deformasyon kontrollü olarak tekrarlı yükleme altında bitümlü karışımların yorulma dayanımını karakterize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Silindir şeklindeki deney numunelerine düşey çapsal düzlemde haversine biçiminde tekrarlı basınç yükleri uygulanmaktadır. Bu yükleme, uygulanan yük doğrultusuna dik, yatay çapsal doğrultuda nispeten üniform çekme gerilmeleri oluşturmaktadır. Oluşan çekme gerilmeleri, numunenin düşey doğrultuda numunenin orta kısmında yarıma meydana gelmesine neden olmaktadır.

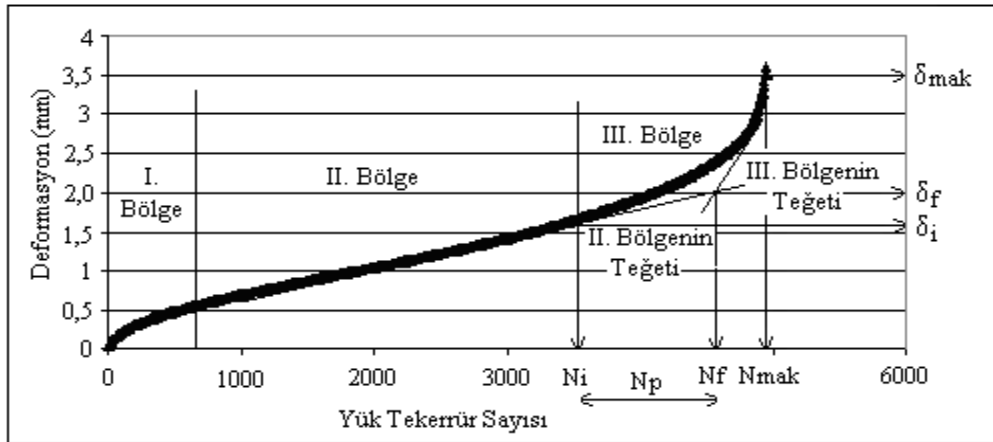
Gerilme kontrollü indirekt çekme yorulma deneyi, UMATTA deney aleti kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 5.26'da deney düzeneği görülmektedir. Deney öncesinde numuneler, en az 3 saat deney sıcaklığında bekletilmektedir. Numune yüksekliği, çapı, uygulanacak gerilme yük periyodu ve yük artış süreleri gibi değerler önceden yazılıma girilmektedir.

Numune, yükleme çerçevesine yerleştirilmekte, düşey deformasyonu okuyacak sensörler (LVDT) ayarlanmakta ve deneye başlanmaktadır. Deney, ya numuneler tam olarak kırılıncaya kadar ya da rijitlikleri yarılanıncaya kadar devam etmektedir.



Şekil 5.26. İndirekt çekme tekrarlı yorulma deney düzeneği

Gerilme kontrollü olarak yapılan yorulma deneyi sonucunda Şekil 5.27’de temsili olarak görüldüğü gibi yük tekrür sayısı-deformasyon miktarı grafiği çizilebilmektedir. Yorulma ömrü, bazı araştırmacılar tarafından deformasyon - yük tekrür sayısı grafiğinde eğimin önemli oranda değiştiği nokta veya II. kısım ve III. kısımlara çizilen teğetlerin kesim noktası olarak tanımlanmaktadır [146,147].



Şekil 5.27. Temsili deformasyon - yük tekrür sayısı ilişkisi

Çatlak ilerleme oranı (r_f), yorulma ömrü değerinden maksimum yük tekrar sayısına kadar her 1 mm deformasyon oluşabilmesi için gerekli yük tekrar sayısının ifade etmektedir. Çatlak ilerleme oranı ile ilgili denklem aşağıda verilmiştir [146]. Çatlak ilerleme oranı, çatlak ilerleme hızıyla ters orantılıdır. Çatlak ilerleme oranının büyük olması, çatlak ilerleyişinin daha yavaş olduğunu göstermektedir.

$$r_f = \frac{N_p}{\delta_{f \max} - \delta_f} \quad (5.6)$$

Burada;

r_f : Çatlak ilerleme oranı (*darbe sayısı/mm*)

N_p : Çatlak ilerlemesi için gerekli yük tekrar sayısı

$\delta_{f \max}$: Maksimum yük tekrar sayısındaki toplam deformasyon (*mm*)

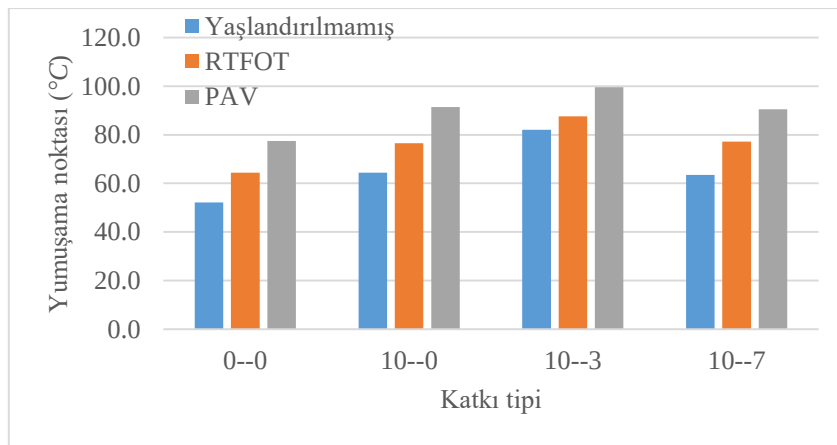
δ_f : Yorulma ömründeki (N_f) toplam deformasyonu (*mm*) ifade etmektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Bağlayıcı Deney Sonuçları

6.1.1. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Yaşlandırılmamış, laboratuvarında (60 °C’de 1, 2, 3 ve 4 hafta), arazide (2, 4, 6, 8, 10 ve 12 ay) ve laboratuvarında kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış (STA-LTA) saf ve katkıli bağlayıcılara yumuşama noktası deneyi uygulanmıştır. Şekil 6.1’de yaşlandırılmamış (sadece modifikasyon işleminde 170 °C’de, 45 dk, 2000 devir/dk karıştırma işlemine tabi tutulan), RTFOT ve PAV sonrası bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim, Tablo 6.1’de ise yumuşama noktası değerleri ve yaşlanma indeksleri verilmiştir. Şekil ve tablodan görüldüğü üzere bütün durumlarda en yüksek yumuşama noktası değerlerini 10-3 bağlayıcısı vermiştir. Yaşlandırılmamış bağlayıcıların (YN₀) RTFOT (YN_R) ve PAV (YN_P) sonrası yumuşama noktalarındaki artış yüzdesi dikkate alındığında en fazla yaşlanan bağlayıcının 0-0, en az yaşlanan bağlayıcının ise 10-3 olduğu belirlenmiştir. CR ve CR+Evotherm içerikli bağlayıcılar kıyaslandığında RTFOT sonrası CR+Evotherm modifiyeli bağlayıcısının daha fazla yaşlandığı, PAV sonrasında ise CR modifiyeli bağlayıcının daha fazla yaşlandığı belirlenmiştir. Buna göre uzun dönemde Evotherm katkısının CR ile birlikte kullanılmasının yaşlanmayı geciktireceği tespit edilmiştir.

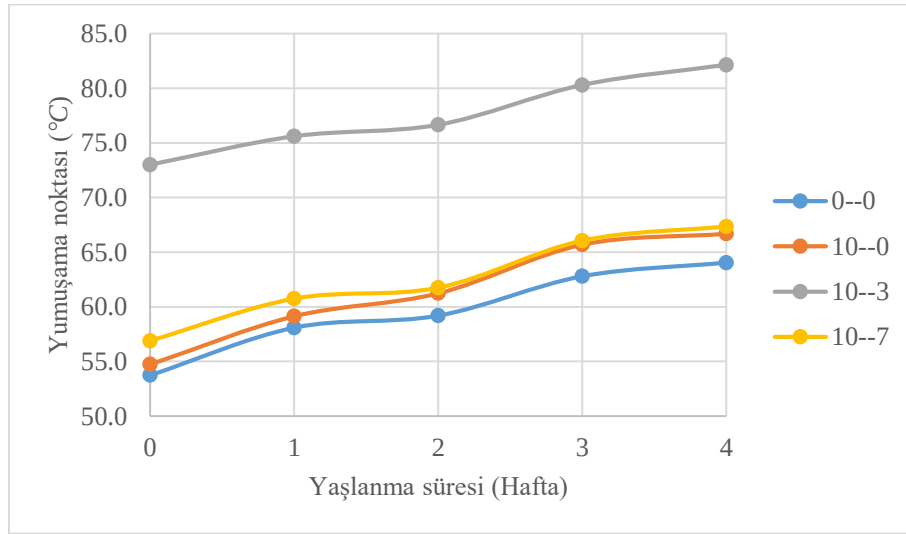


Şekil 6.1. Saf ve katkıli bağlayıcıların yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV sonrası yumuşama noktası değerlerindeki değişim

Tablo 6.1. Yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV sonrası yumuşama noktası değerleri ve yaşlanma indeksleri

Katkı Tipi	Yaşlandırılmamış	RTFOT Sonrası	PAV Sonrası	$(Y_{N_R}) / (Y_{N_0})$	$(Y_{N_P}) / (Y_{N_0})$
	(Y_{N_0})	(Y_{N_R})	(Y_{N_P})		
	Yumuşama	Yumuşama	Yumuşama		
	Noktası	Noktası	Noktası		
	(°C)	(°C)	(°C)		
0-0	52.2	64.4	77.5	1.23	1.48
10-0	64.4	76.5	91.4	1.19	1.42
10-3	82.0	87.6	99.6	1.07	1.21
10-7	63.5	77.2	90.5	1.22	1.43

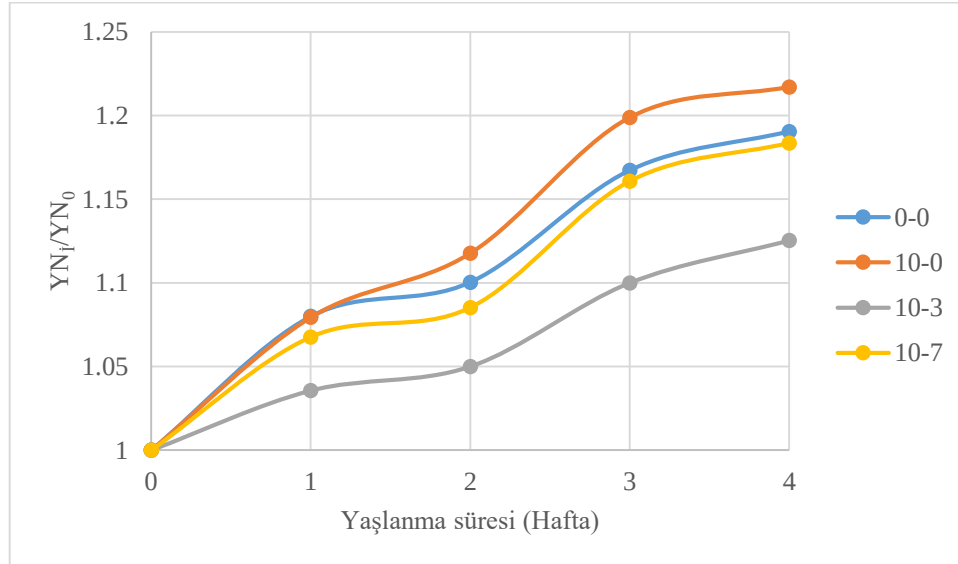
Şekil 6.2’de laboratuvarında 60 °C’lik etüvde 1, 2, 3 ve 4 hafta süre ile bekletilen saf ve katkılı BSK numunelerinden ekstrasyon ve distilasyon yöntemi ile elde edilen bağlayıcıların yumuşama noktalarındaki değişim verilmiştir. Laboratuvardaki yaşlandırma süresine bağlı olarak yumuşama noktaları lineer olarak artmaktadır. CR kullanımı saf bağlayıcının yumuşama noktasını yaşlandırılmamış durumda sadece 1 °C arttırırken CR ile birlikte Sasobit kullanımı 19.2 °C arttırmaktadır. 10-3 ve saf bağlayıcının yumuşama noktaları arasındaki bu önemli fark 4 hafta yaşlandırma sonrasında da devam etmektedir. 10-0 ve 10-7 bağlayıcılarının yumuşama noktaları arasında önemli bir fark olmadığı dolayısıyla Evotherm katkısının yumuşama noktası üzerinde etkisinin olmadığı görülmektedir.

**Şekil 6.2.** Laboratuvarında yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim

Laboratuvarda farklı sürelerde yaşlandırılmış numunelerden elde edilen bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları ve yaşlanma indekslerinin değerleri Tablo 6.2’de, Şekil 6.3’te ise indeks değerlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Şekle göre 10-0 bağlayıcısı yaşlanmadan en fazla etkilenirken 10-3 bağlayıcısı en az etkilenmektedir. Sasobit katkısı yaşlanmayı önemli derecede azaltırken Evothrm, CR’nin neden olduğu yaşlanmayı saf bağlayıcı seviyesine indirebilmiştir. 4 hafta sonunda 0-0, 10-0, 10-3 ve 10-7 bağlayıcılarının yumuşama noktası değerleri yaşlanmamış durumlarına göre sırasıyla 9.5, 11.9, 9.2 ve 10.5 °C artmaktadır.

Tablo 6.2. Laboratuvar yaşlandırması sonrası yumuşama noktası değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri

Katkı Tipi	0 Hafta	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	$(Y_{N1})/(Y_{N0})$	$(Y_{N2})/(Y_{N0})$	$(Y_{N3})/(Y_{N0})$	$(Y_{N4})/(Y_{N0})$
	(Y_{N0})	(Y_{N1})	(Y_{N2})	(Y_{N3})	(Y_{N4})				
	Yumuşama Noktası (°C)	Yumuşama Noktası (°C)	Yumuşama Noktası (°C)	Yumuşama Noktası (°C)	Yumuşama Noktası (°C)				
0-0	53.8	58.1	59.2	62.3	63.3	1.08	1.08	1.04	1.07
10-0	54.8	59.2	61.3	65.7	66.7	1.10	1.12	1.05	1.09
10-3	73.0	75.6	76.7	80.3	82.2	1.17	1.20	1.10	1.16
10-7	56.9	60.8	61.8	66.1	67.4	1.19	1.22	1.13	1.18

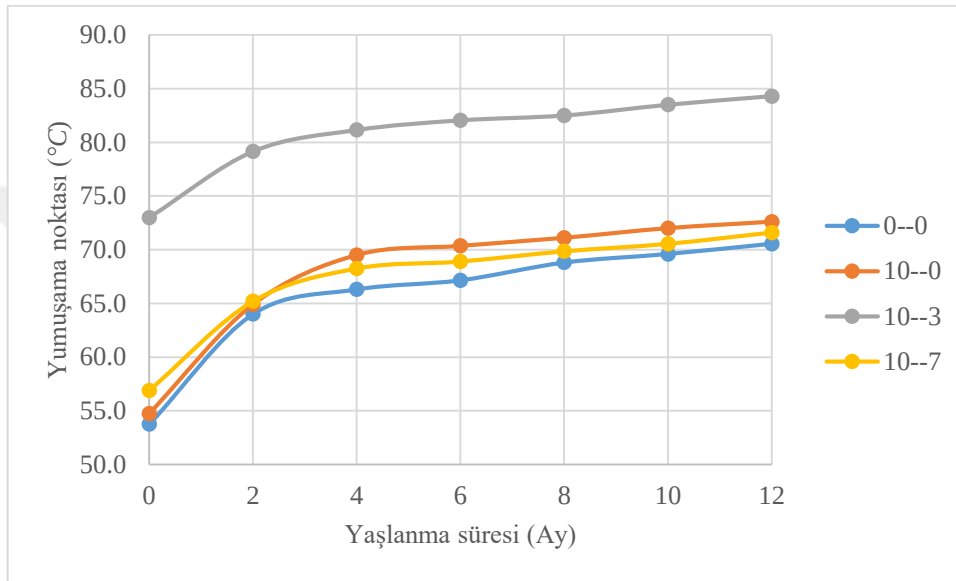


Şekil 6.3. Laboratuvar yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi

Şekil 6.4’te arazide 12 ay boyunca bekletilen BSK numunelerinden her 2 ayda bir geri dönüştürülen bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları verilmiştir. Yumuşama

noktaları 2.aya kadar hızlı bir şekilde artmakta ve daha sonra düşük bir artış hızıyla lineer olarak artmaktadır. 10-3 bağlayıcısı bütün yaşlandırma sürelerinde en yüksek yumuşama noktası değerlerini verirken diğer bağlayıcılar benzer performans göstermiştir.

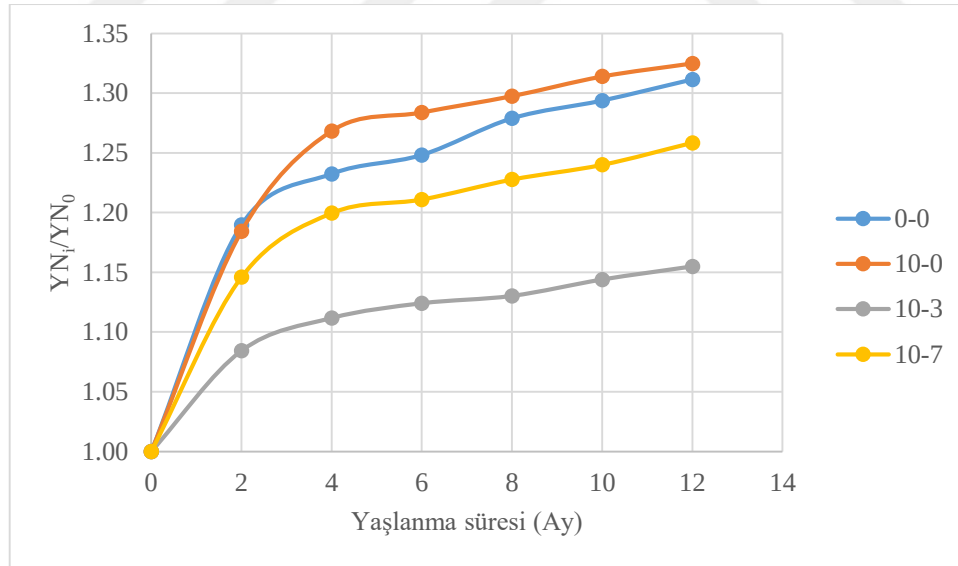
Tablo 6.3'te arazi yaşlandırma sonrası yumuşama noktası deney sonuçları ve yaşlanma indeksleri verilmiştir. Şekil 6.5'te ise yaşlanma indekslerinin zamanla değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 6.4. Arazide yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların yumuşama noktası değerlerindeki değişim

Tablo 6.3. Arazi yaşılandırma sonrası yumuşama noktası sonuçlarına göre yaşılanma indeksleri

Yaşılanma Süresi	0-0	10-0	10-3	10-7
Yumuşama Noktası (°C)				
0 Ay (YN ₀) (Yaşılandırılmamış)	53.8	54.8	73.0	56.9
2 Ay (YN ₂)	64.0	64.9	79.2	65.2
4 Ay (YN ₄)	66.3	69.5	81.2	68.3
6 Ay (YN ₆)	67.2	70.4	82.1	68.9
8 Ay (YN ₈)	68.8	71.1	82.5	69.9
10 Ay (YN ₁₀)	69.6	72.0	83.5	70.6
12 Ay (YN ₁₂)	70.6	72.6	84.3	71.6
(YN _i)/ (YN ₀)				
(YN ₂)/ (YN ₀)	1.19	1.18	1.08	1.15
(YN ₄)/ (YN ₀)	1.23	1.27	1.11	1.20
(YN ₆)/ (YN ₀)	1.25	1.28	1.12	1.21
(YN ₈)/ (YN ₀)	1.28	1.30	1.13	1.23
(YN ₁₀)/ (YN ₀)	1.29	1.31	1.14	1.24
(YN ₁₂)/ (YN ₀)	1.31	1.32	1.15	1.26



Şekil 6.5. Arazi yaşılandırması sonrası saf ve katkıli numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşılanma indeksindeki değişimi

Laboratuvar yaşılanmasında olduğu gibi çevresel koşullar altında da en fazla yaşılanan numune 10-0 bağlayıcısı olmuştur. Saf bağlayıcı da en az 10-0 bağlayıcısı kadar yaşılanmadan etkilenmiştir. 10-0 bağlayıcısının 12.ay sonundaki yumuşama noktası değeri yaşılandırılmamış

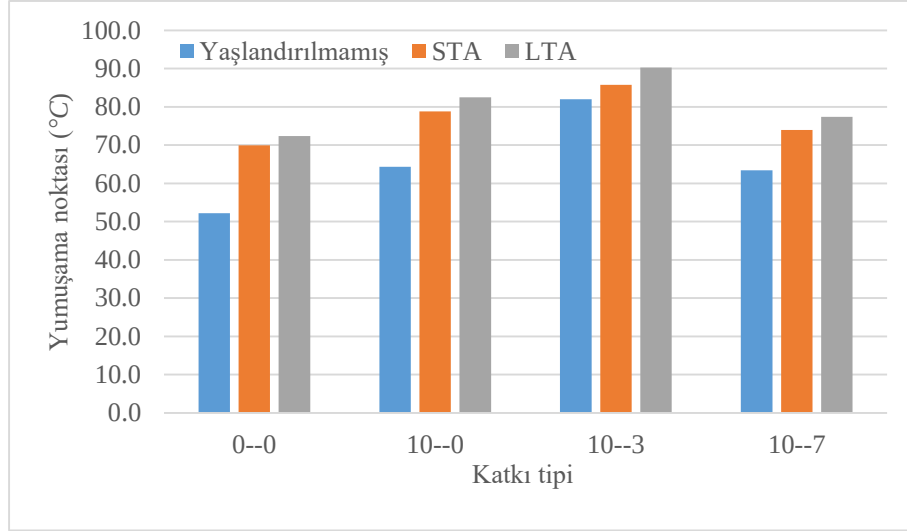
yumuşama noktası değerine göre 1.32 kat artmaktadır. Bu oran 10-3 bağlayıcısı için 1.15 kat olmaktadır.

Tablo 6.4'te laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin yumuşama noktası değerlerinin arazide ne kadar sürede meydana geldiği verilmiştir. Laboratuvarda 60 °C'de 4 hafta yaşlandırma sonunda tespit edilen yumuşama noktası değerleri arazide yaklaşık 2-3 ay arasında gerçekleşmektedir. Yumuşama noktası değerlerinde yaşlanma ile meydana gelen artışın büyük bir kısmı gerek laboratuvarda gerekse arazide diğer deney yöntemlerine göre daha kısa sürede meydana gelmektedir.

Tablo 6.4. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin yumuşama noktası sonuçları bakımından arazideki karşılığı

Yaşlandırma süresi (Hafta)	Arazideki Yaşlanma Süresi (Ay)			
	0-0	10-0	10-3	10-7
1	0.85	0.88	0.85	0.94
2	1.06	1.29	1.20	1.18
3	1.77	2.16	2.37	2.22
4	2.02	2.36	3.00	2.53

Şekil 6.6'da yaşlandırılmamış ve kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri verilmiştir. Kısa dönem yaşlandırılmış (STA) numunelerden ve yaşlanmamış numunelerden elde edilen bağlayıcıların yumuşama noktaları arasındaki artışlar dikkate alındığında 10-0 bağlayıcısında en fazla artış meydana gelmiştir. Bu da 10-0 katkılı bağlayıcıların STA ve LTA sonrası hem saf bağlayıcılara hem de ılık asfalt katkılı bağlayıcılara göre daha fazla yaşlandığını göstermektedir. Kısa ve uzun dönem yaşlandırma sonrası yumuşama noktasındaki artış en az 10-3 bağlayıcısında olmaktadır.



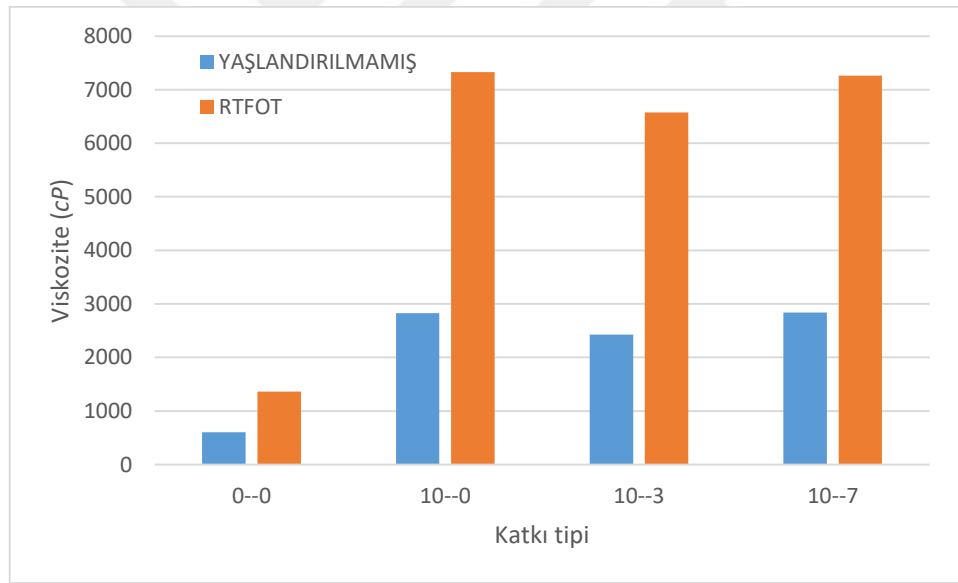
Şekil 6.6. Yaşlandırılmamış ve kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerden alınan bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri

Laboratuvarda farklı sürelerde meydana gelen yaşlanmalar ile kısa dönem yaşlandırma (STA) sonrası meydana gelen yaşlanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.2'deki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak STA sonucu oluşan yumuşama noktası değerlerinin hangi haftaya denk geldiği tespit edilmiştir. Saf bağlayıcının kısa dönem yaşlandırılmasıyla (STA) elde edilen yumuşama noktası değeri laboratuvarda 6.1 haftada oluşurken, 10-0; 7.7 haftada, 10-3; 5.6 haftada ve 10-7; 6.4 haftada oluşmaktadır. 10-0 bağlayıcısının laboratuvarda daha uzun süre yaşlandırılma ile kısa dönem yaşlanmaya denk gelmesinin anlamı CR modifikasyonunun kısa dönem yaşlandırma yöntemine göre diğer katkılı bağlayıcılardan daha fazla yaşlanmasıdır. CR modifikasyonu içerisinde ılık asfalt katkılarının kullanımı yaşlandırmayı geciktirmiştir. Evotherm katkısı bu yaşlanmayı saf bağlayıcı ile aynı olacak şekilde azaltırken, Sasobit katkısı yaşlanmayı daha fazla azaltmıştır.

Uzun dönem yaşlandırma (LTA) sonrası meydana gelen yaşlanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.4'deki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak LTA sonucu oluşan yumuşama noktası değerlerinin hangi aya denk geldiği tespit edilmiştir. Saf bağlayıcının uzun dönem yaşlandırılmasıyla (LTA) elde edilen yumuşama noktası değeri arazide 15.1 ayda oluşurken, 10-0; 37.0 ayda, 10-3; 27.6 ayda ve 10-7; 26.1 ayda oluşmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma yöntemi katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre daha fazla yaşlanmasına neden olmuştur. LTA yöntemi 10-0 bağlayıcısının daha fazla yaşlanmasına neden olmuştur.

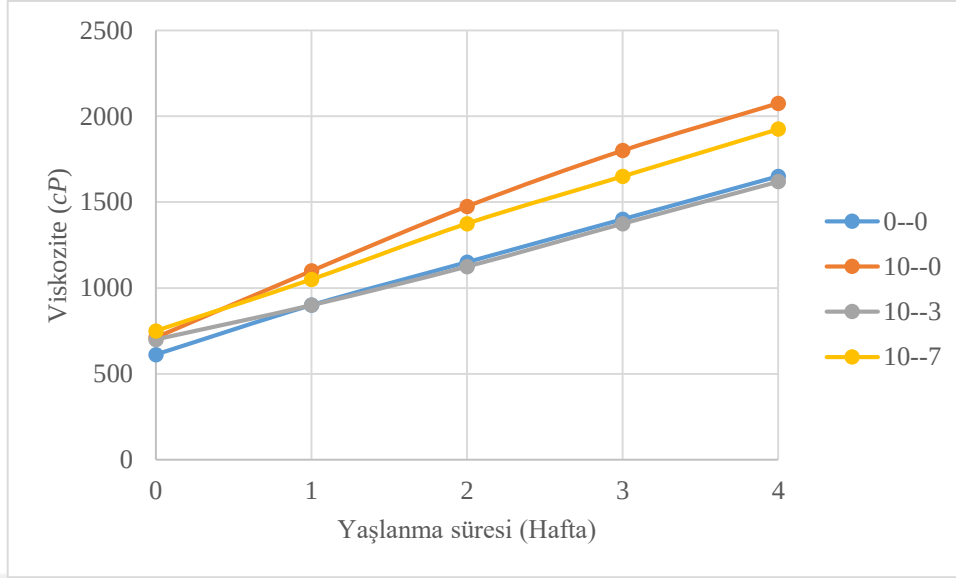
6.1.2. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları

Yaşlandırılmamış, laboratuvarı, arazide, laboratuvarı kısa (STA) ve uzun (LTA) dönem yaşlandırma yöntemlerine göre yaşlandırılmış saf ve katkılı bağlayıcılara 135 °C’de dönel viskozimetre deneyi uygulanmıştır. Şekil 6.7’de yaşlandırılmamış (sadece modifikasyon işleminde 170 °C’de, 45 dk, 2000 devir/dk karıştırma işlemine tabi tutulan) ve RTFOT sonrası bağlayıcıların viskozite değerleri verilmiştir. CR kullanımı bağlayıcının viskozitesini önemli derecede arttırmaktadır. Sasobit katkısının CR ile birlikte kullanılması durumunda CR’nin neden olduğu viskozite artışı bir miktar düşmektedir. Evotherm ise viskozite azalışına bir katkı sunmamaktadır. Saf bağlayıcının RTFOT sonrası viskozitesi yaşlandırılmamış durumdaki viskozitesine göre 2.2 kat artarken bu oran katkılı bağlayıcılarda yaklaşık 2.6 kat olmaktadır. RTFOT yaşlandırmasının etkisi katkılı bağlayıcılarda daha fazla olmaktadır.



Şekil 6.7. Saf ve katkılı bağlayıcıların yaşlandırılmamış ve RTFOT sonrası viskozite değerlerindeki değişim

Şekil 6.8’de 60 °C’lik etüvde farklı sürelerde bekletilen saf ve katkılı BSK numunelerinden ekstrasyon ve distilasyon yöntemi ile elde edilen bağlayıcıların viskozitelerindeki değişim verilmiştir. Laboratuvarıdaki yaşlandırma süresine bağlı olarak viskoziteler lineer olarak artmaktadır. Yaşlandırma süresi arttıkça saf ve katkılı bağlayıcıların (10-3 hariç) viskozite değerleri arasındaki fark açılmaktadır.

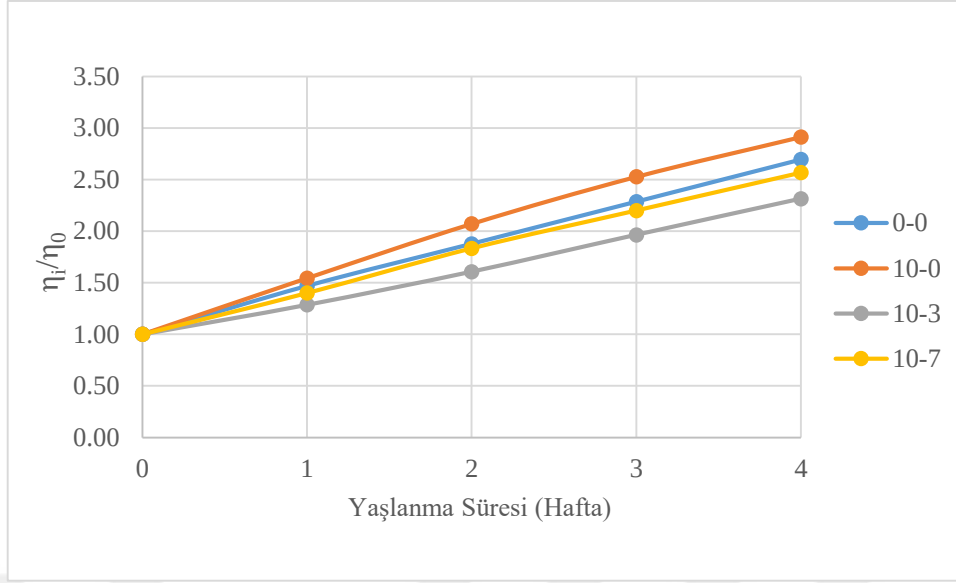


Şekil 6.8. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların viskozite değerlerindeki değişimi

Tablo 6.5'te laboratuvarda farklı sürelerde yaşlandırılmış numunelerden elde edilen bağlayıcıların 135 °C'deki dönel viskozimetre deney sonuçlarından elde edilen viskozite ve yaşlanma indekslerinin değerleri, Şekil 6.9'da ise indeks değerlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Tablo 6.5 ve Şekil 6.9'a göre 10-0 bağlayıcısı yaşlanmadan en fazla etkilenirken 10-3 bağlayıcısı en az etkilenmektedir. 4 hafta sonunda 10-0, 0-0, 10-7 ve 10-3 bağlayıcılarının viskozite değerleri yaşlanmamış durumlarına göre sırasıyla 2.91, 2.69, 2.57 ve 2.31 kat artmaktadır. Ekstrasyon ve distilasyon esnasında CR geri dönüştürülemediğinden bağlayıcıların viskozite değerleri arasındaki fark katkıların yaşlanma sürecindeki etkisini direk yansıtmaktadır. Buna göre CR'ın tek başına kullanılması yaşlanmayı azaltamazken Sasobit ile birlikte kullanılması durumunda yaşlanma önemli derecede azaltmaktadır.

Tablo 6.5. Laboratuvar yaşlandırması sonrası 135 °C'deki RV değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri

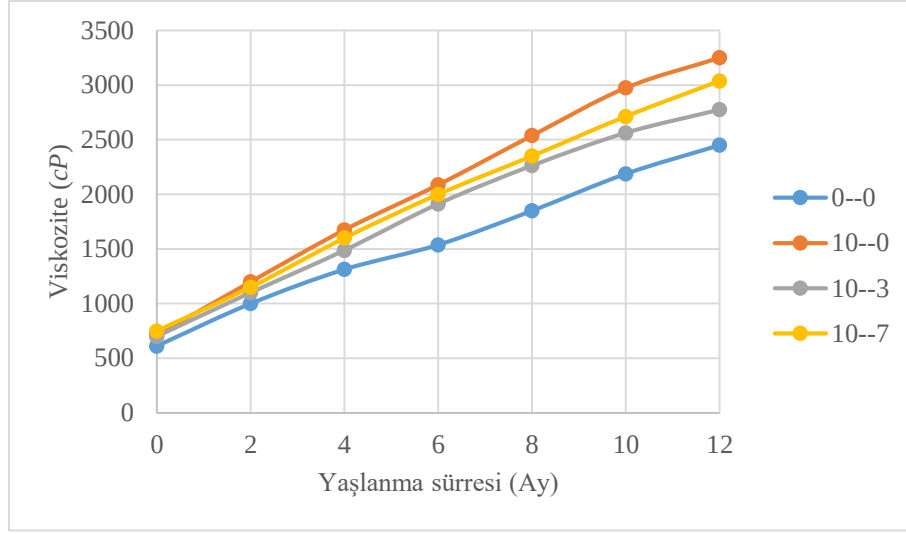
Katkı Tipi	0 Hafta	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	$\frac{(\eta_1)}{(\eta_0)}$	$\frac{(\eta_2)}{(\eta_0)}$	$\frac{(\eta_3)}{(\eta_0)}$	$\frac{(\eta_4)}{(\eta_0)}$
	(η_0)	(η_1)	(η_2)	(η_3)	(η_4)				
	η (cP)	η (cP)	η (cP)	η (cP)	η (cP)				
0-0	612.5	712.5	1150	1400	1650	1.47	1.88	2.29	2.69
10-0	712.5	1100	1475	1800	2075	1.54	2.07	2.53	2.91
10-3	700	900	1125	1375	1620	1.29	1.61	1.96	2.31
10-7	750	1050	1375	1650	1925	1.40	1.83	2.20	2.57



Şekil 6.9. Laboratuvar yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi

Şekil 6.10’da arazide 12 ay boyunca bekletilen BSK numunelerinden her 2 ayda bir geri dönüştürülen bağlayıcılar üzerinde 135 °C’de yapılan viskozite deney sonuçları verilmiştir. Zaman içerisinde viskoziteler bütün bağlayıcılarda lineer olarak artmaktadır. 10-0 bağlayıcısı en yüksek viskozite değerine saf bağlayıcı ise en düşük viskozite değerine sahiptir. Ilık karışım katkılarının CR modifikasyonun neden olduğu viskozite artışını azaltma üzerindeki etkisi arazide yaşlandırma durumunda da görülmektedir. Ilık karışım katkılarının viskoziteyi azaltma etkisi 12 ay boyunca çevresel koşullardan etkilenmemektedir.

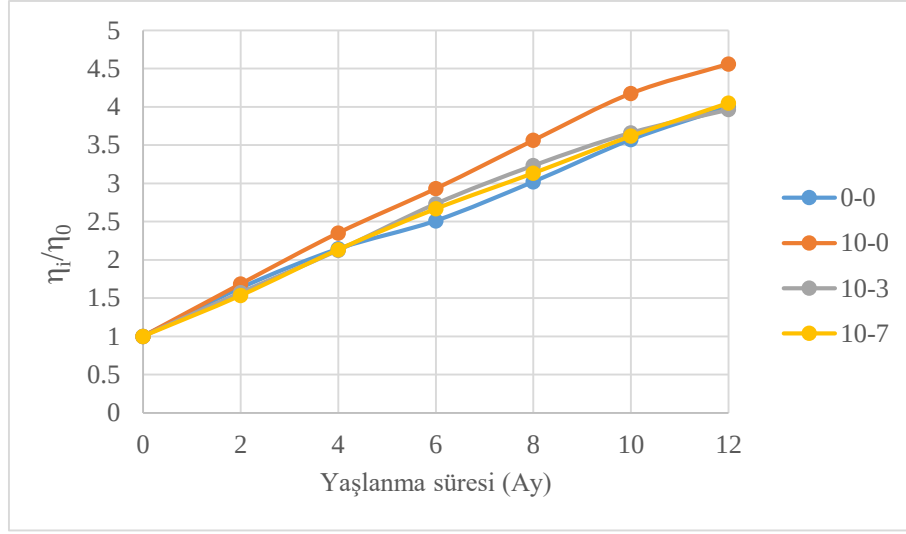
Tablo 6.6’da arazi yaşlandırma sonrası 135 °C’deki viskozite deney sonuçları ve yaşlanma indeksleri verilmiştir. Şekil 6.11’de ise yaşlanma indekslerinin zamanla değişimi grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 6.10. Arazide yaşlandırılan numunelerden alınan bağlayıcıların viskozite değerlerindeki değişimi

Tablo 6.6. Arazi yaşlandırması sonrası 135 °C’deki RV değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri

Yaşlanma Süresi (Ay)	0-0	10-0	10-3	10-7
η (cP)				
0 (Yaşlandırılmamış)	612.5	712.5	700	750
2	1000	1200	1100	1150
4	1313	1675	1488	1600
6	1538	2088	1913	2000
8	1850	2538	2263	2350
10	2188	2975	2563	2713
12	2450	3250	2775	3038
η_i/η₀				
(η ₂)/ (η ₀)	1.63	1.68	1.57	1.53
(η ₄)/ (η ₀)	2.14	2.35	2.13	2.13
(η ₆)/ (η ₀)	2.51	2.93	2.73	2.67
(η ₈)/ (η ₀)	3.02	3.56	3.23	3.13
(η ₁₀)/ (η ₀)	3.57	4.18	3.66	3.62
(η ₁₂)/ (η ₀)	4.00	4.56	3.96	4.05



Şekil 6.11. Arazi yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi

Arazide çevresel koşullar altında en fazla yaşlanan numune 10-0 bağlayıcısı olmuştur. Katkılı ve saf bağlayıcılar ise birbiri ile benzer ve 10-0'dan daha az yaşlanma göstermiştir. 10-0 bağlayıcısının 12.ay sonundaki viskozite değeri yaşlandırılmamış viskozite değerine göre 4.56 kat artmaktadır. Bu oran saf ve katkılı bağlayıcılarda ortalama 4 kat olmaktadır.

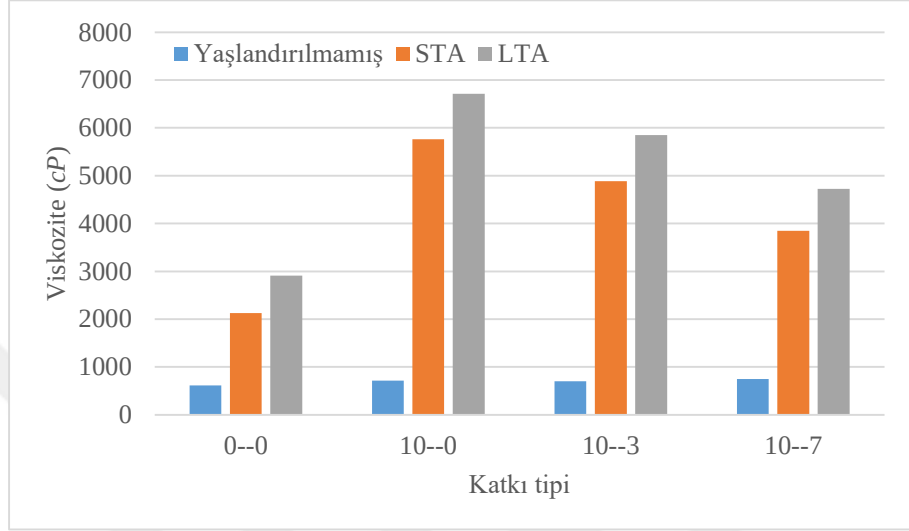
Tablo 6.7'de laboratuvarı yaşlandırılan numunelerin viskozite değerleri açısından arazide ne kadar sürede meydana geldiği verilmiştir. Laboratuvarı 60 °C'de 4 hafta yaşlandırma sonunda tespit edilen viskozite değerlerine arazide yaklaşık 6 ay sonra ulaşılabilir.

Tablo 6.7. Laboratuvarı yaşlandırılan numunelerin viskozite değerleri bakımından arazideki karşılığı

Yaşlandırma süresi (Hafta)	Arazideki yaşlanma süresi (Ay)			
	0-0	10-0	10-3	10-7
1	1.58	1.51	0.76	1.34
2	3.24	3.26	2.03	3.03
3	4.90	4.77	3.44	4.47
4	6.57	6.05	4.82	5.90

Şekil 6.12'de yaşlandırılmamış ve standart yöntemler (STA-LTA) ile yaşlandırılmış bağlayıcıların viskozite değerlerindeki değişim verilmiştir. Kısa dönem yaşlandırma (STA) sonrası katkılı bağlayıcılar özellikle 10-0 bağlayıcısı saf bağlayıcıya göre aşırı derecede yaşlanmaktadır. Bu durum önce kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutulan LTA yönteminde de söz konusudur. Bağlayıcıların kısa ve uzun dönem yaşlandırma sonrası viskozite değerlerinin farkının, LTA'dan kaynaklanan bir artış olduğu düşünüldüğünde bütün bağlayıcılarda benzer

bir artış görüldüğü diğer bir ifadeyle bağlayıcıların viskozite değerlerinin uzun dönem yaşlandırma (LTA) yönteminden ziyade kısa dönem yaşlandırma yönteminden daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir. STA yöntemi katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre daha fazla yaşlanmasına neden olmaktadır.



Şekil 6.12. Yaşlandırılmamış ve standart deney yöntemleri ile yaşlandırılmış numunelerden alınan bağlayıcıların viskozite değerlerindeki değişim

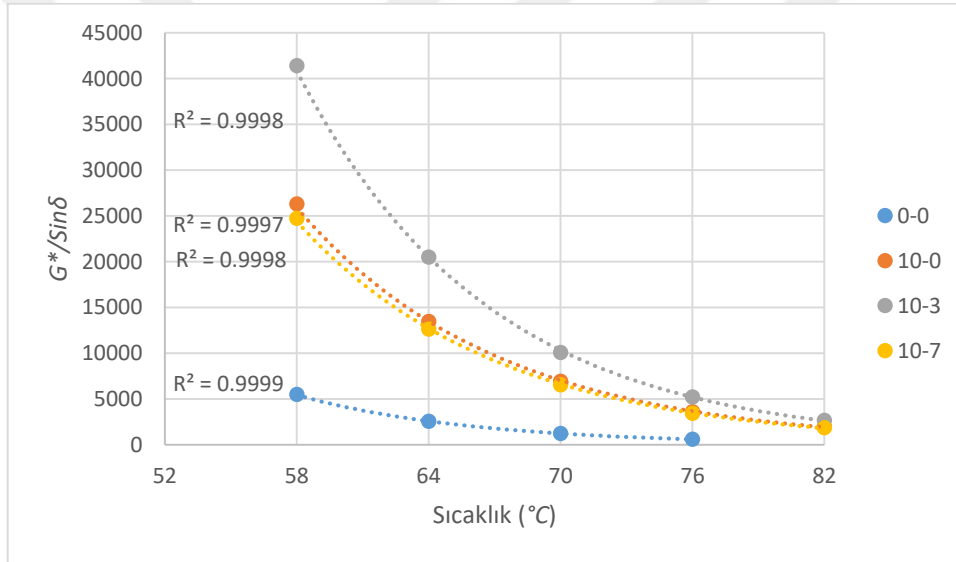
Laboratuvarda farklı sürelerde meydana gelen yaşlanmalar ile standart kısa dönem yaşlandırma (STA) sonrası meydana gelen yaşlanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.8'deki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak STA sonrası oluşan viskozite değerlerinin hangi haftaya denk geldiği tespit edilmiştir. Buna göre saf bağlayıcı ile katkılı bağlayıcıların çok farklı yaşlanma karakteristiği izlediği FTIR sonuçlarında görüleceği gibi burada da görülmüştür. Saf bağlayıcının kısa dönem yaşlandırılmasıyla (STA) elde edilen viskozite değeri laboratuvarda 5.8 haftada oluşurken, 10-0; 14.6 haftada, 10-3; 18.1 haftada ve 10-7; 10.4 haftada oluşmaktadır. Viskozite değerleri dikkate alındığında STA ile meydana gelen yaşlanma ile laboratuvarda aynı yaşlanmayı elde etmek için katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıdan çok daha uzun süre yaşlandırmaya tabi tutulması gerekmektedir. Buda STA yönteminin katkılı bağlayıcıların aşırı derecede yaşlanmasına neden olduğuna bir kere daha işaret etmektedir.

Standart uzun dönem yaşlandırma (LTA) sonrası meydana gelen yaşlanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.10'daki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak LTA sonucu oluşan viskozite değerlerinin hangi aya denk geldiği tespit edilmiştir. Saf bağlayıcının uzun dönem yaşlandırılmasıyla (LTA) elde edilen viskozite değeri arazide 14.9 ayda oluşurken,

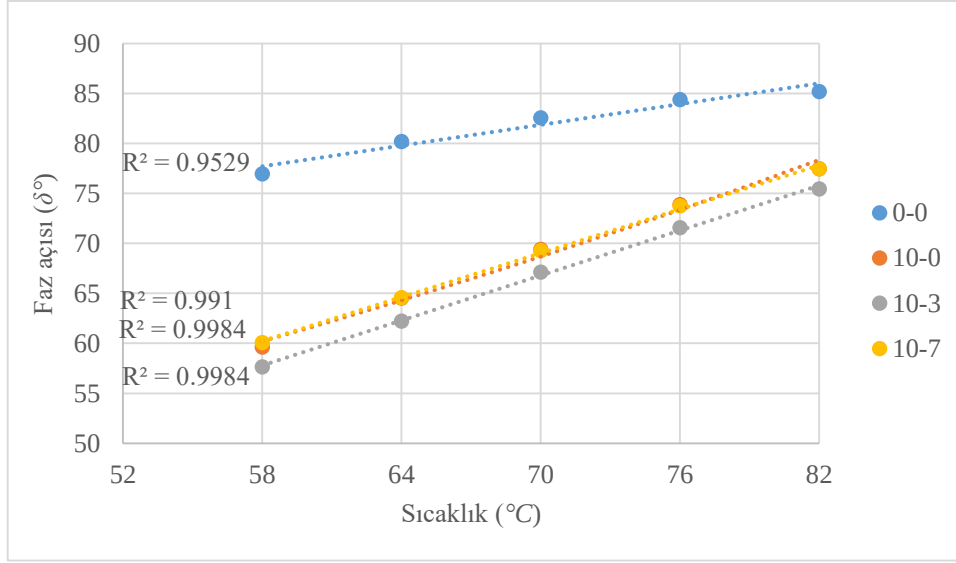
10-0; 27.6 ayda, 10-3; 28.6 ayda ve 10-7; 20.5 ayda oluşmaktadır. Uzun dönem yaşlandırma yöntemi katkıli bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre daha fazla yaşlanmasına neden olmuştur. Gerek laboratuvarda gerekse arazide yapılan yaşlanmaya göre 10-3 bağlayıcısı en geç yaşlanan bağlayıcı olmuştur.

6.1.3. DSR Deney Sonuçları

Katkılı bağlayıcılar, katkıların 170 °C, 45 dk, 2000 devir/dk karıştırma şartlarında ilave edilmesi ile üretilmiştir. Bütün bağlayıcı tipleri için elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerleri Şekil 6.13'te verilmiştir. Şekil 6.14'te ise bağlayıcıların faz açısındaki değişimi verilmiştir.



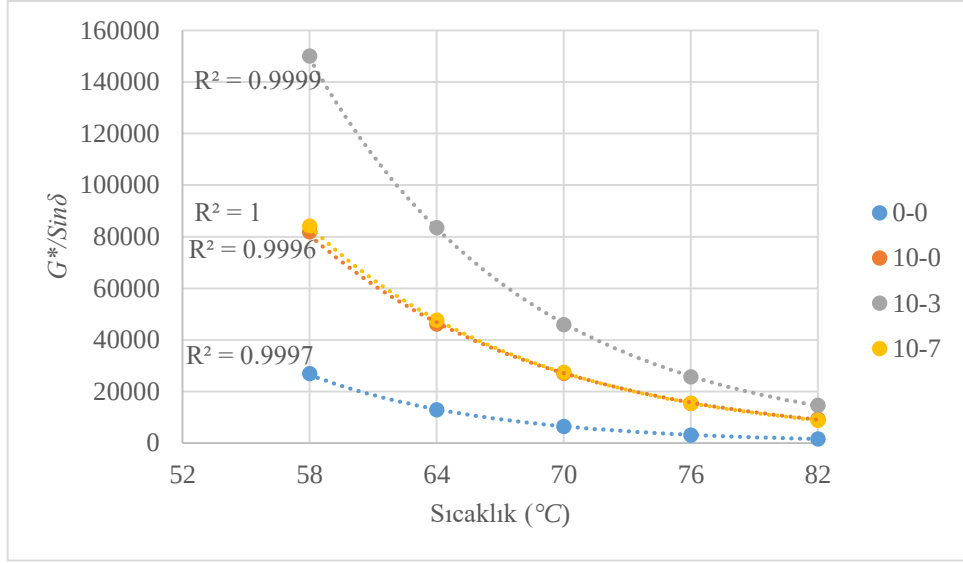
Şekil 6.13. Yaşlandırılmamış saf ve katkıli bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerindeki değişimi



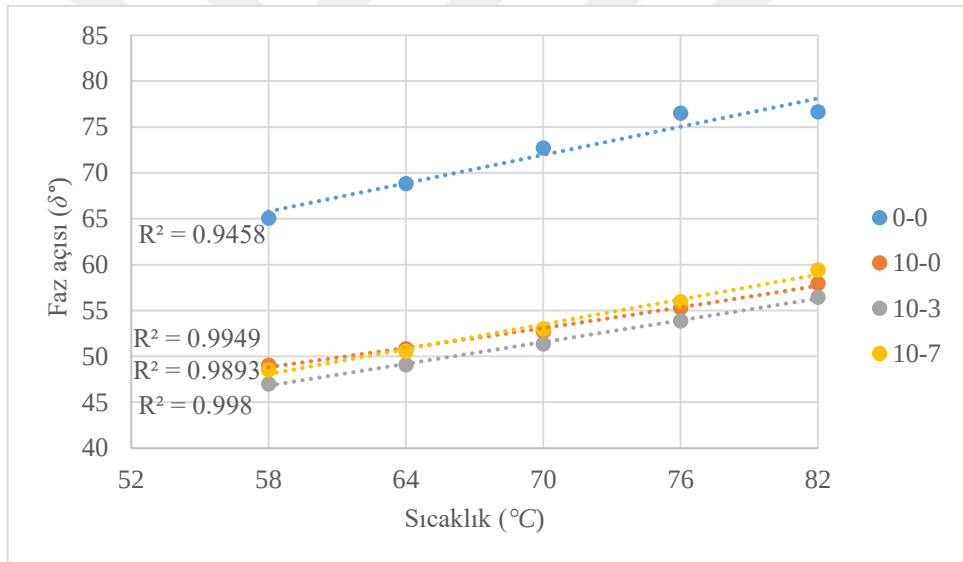
Şekil 6.14. Yaşlandırılmamış saf ve katkılı bağlayıcıların faz açısı (δ) değerindeki değişimi

Sıcaklığın artması ile $G^*/\sin\delta$ değerleri üstel bir şekilde azalmaktadır. Sıcaklık arttıkça $G^*/\sin\delta$ değerleri birbirine yaklaşırken sıcaklığın azalmasıyla katkılı bağlayıcıların değerleri saf bağlayıcıya göre önemli derecede artmaktadır. 10-0 ile 10-7 bağlayıcısı her sıcaklıkta benzer performans sergilerken en yüksek tekerlek izi parametresini 10-3 bağlayıcısı vermiştir. 10-3 bağlayıcısı 58 °C’de 0-0, 10-0 ve 10-7 bağlayıcılarına göre sırasıyla 7.5, 1.5 ve 1.7 kat daha fazla $G^*/\sin\delta$ değerine sahiptir. Faz açısı bağlayıcıların esnekliğinin bir göstergesidir. Faz açısının düşük olması esnek davranışa yüksek olması ise viskozluğa işaret eder. Katkılı bağlayıcıların faz açıları arasında önemli fark oluşmaz iken saf bağlayıcı her sıcaklıkta katkılı bağlayıcılara göre önemli derecede yüksek faz açısı değerleri vermiştir. En düşük faz açısı değerlerine 10-3 bağlayıcısı sahip olmuştur.

Şekil 6.15’te bütün bağlayıcıların RTFOT yaşlandırma sonrası DSR deney sonuçları verilmiştir. Yaşlandırma işlemine tabi tutulmamış bağlayıcılarla RTFOT yaşlandırma sonrası bağlayıcıların deney sonuçlarını aynı şartlar altında kıyaslamak amacıyla RTFOT kalıntısı bağlayıcılarda yaşlandırılmamış bağlayıcılarda olduğu gibi orijinal bağlayıcı prosedürüne göre deneye tabi tutulmuştur. Şekil 6.16’da bağlayıcıların RTFOT yaşlandırma sonrası faz açısı değerleri verilmiştir.



Şekil 6.15. RTFOT sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri

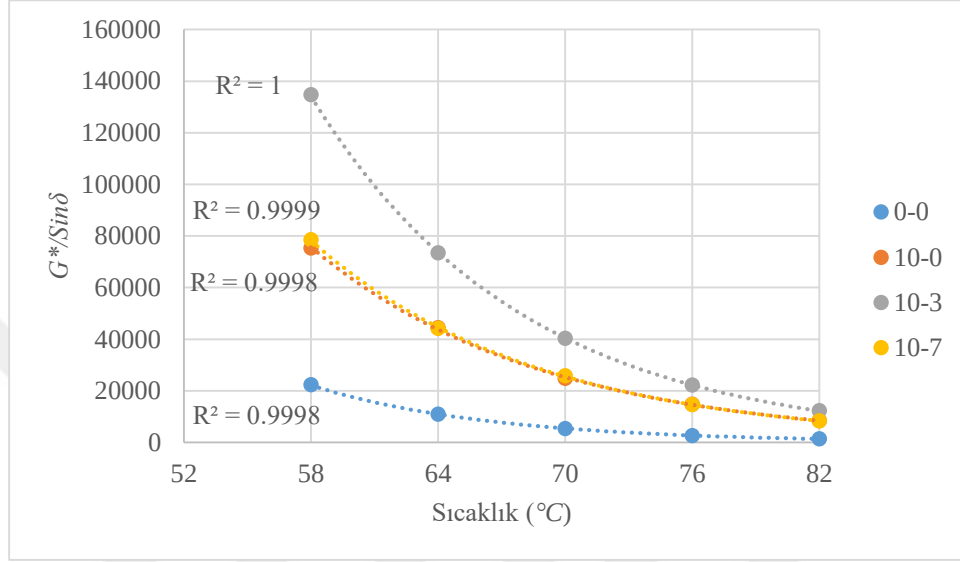


Şekil 6.16. RTFOT sonrası bağlayıcıların " δ " değerleri

Yaşlandırılmamış bağlayıcılarda olduğu gibi burada da katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıdan her sıcaklıkta önemli derecede yüksek $G^*/\sin\delta$ değerleri vermektedir. 10-0 ile 10-7 bağlayıcısı benzer bir performans göstermiştir. En yüksek değerlere 10-3 bağlayıcısı sahip olmuştur. 10-3 bağlayıcısı 58 °C'de 0-0, 10-0 ve 10-7 bağlayıcılarından sırasıyla 5.5, 1.8 ve 1.7 kat daha fazla $G^*/\sin\delta$ değeri vermiştir.

RTFOT yaşlandırma sonrası faz açılarında meydana gelen değişim yaşlandırılmamış bağlayıcılardaki değişimden farklı olmamıştır. Katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıdan önemli derecede düşük kendi içinde ise benzer faz açısı değerleri vermiştir.

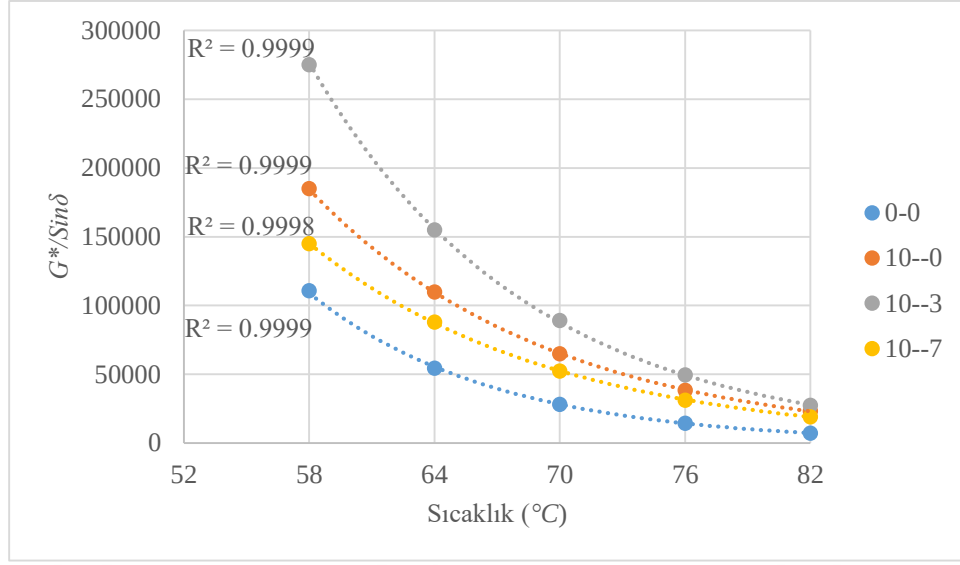
Şekil değiştirme kontrollü olarak yapılan DSR deney prosedürü yaşlandırılmamış orijinal bağlayıcılar için %12, RTFOT kalıntısı bağlayıcılar için %10 şekil değiştirme değerlerini esas almaktadır. Şekil 6.15'te %12 değeri esas alınarak elde edilen sonuçlar verilmişken Şekil 6.17'de ise %10 şekil değiştirme esas alınarak elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerleri verilmiştir.



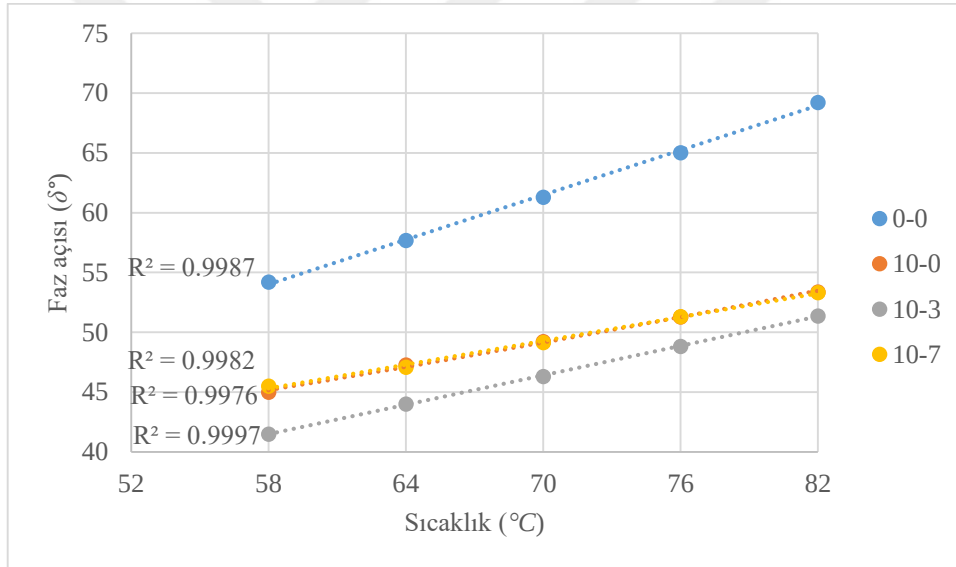
Şekil 6.17. %10 şekil değiştirme seviyesinde RTFOT kalıntısı bağlayıcıların DSR sonuçları

Deneyin %10 şekil değiştirme seviyesinde yapılması durumunda %12 şekil değiştirme seviyesinde yapılmasına göre $G^*/\sin\delta$ değerleri bir miktar farklı olmakla birlikte sıcaklığa bağlı olarak değişim oranlarında bir fark olmamaktadır.

Şekil 6.18'de PAV sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ sonuçları verilmiştir. Bütün sıcaklıklarda en yüksek $G^*/\sin\delta$ değerlerini sırasıyla 10-3, 10-0, 10-7 ve saf bağlayıcı vermiştir. 58 °C'de 10-3 bağlayıcısı 10-0, 10-7 ve saf bağlayıcıdan sırasıyla 1.48, 1.89 ve 2.48 kat daha fazla $G^*/\sin\delta$ değeri vermiştir. 10-0 ve 10-7 bağlayıcıları RTFOT yaşlandırma sonrası benzer performans sergilerken PAV sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri arasındaki fark açılmıştır. Bu da katkılı bağlayıcılar arasındaki farklılıkların tespit edilebilmesi için uzun dönem yaşlandırmanın daha uygun olduğuna işaret etmektedir. Şekil 6.19'da PAV sonrası bağlayıcıların faz açısı değerleri verilmiştir. En düşük faz açısı değerini 10-3 bağlayıcısı vermiştir. Bu bağlayıcı saf bağlayıcıya göre hemen her sıcaklıkta %25 daha az faz açısı değerine sahiptir. Sıcaklığın değişimi ile bağlayıcıların faz açılarının bir birlerine oranları çok değişmemektedir. Faz açılarının sıcaklıktan etkilenme oranı saf ve katkılı bağlayıcılar için benzer olmaktadır.



Şekil 6.18. PAV sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerindeki değişimi



Şekil 6.19. PAV sonrası bağlayıcıların “ δ ” değerlerindeki değişimi

Tablo 6.8’de yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV sonrası DSR deneyinden elde edilen sonuçlar ve yaşlanma indeksleri birlikte verilmiştir. Yaşlandırmanın bağlayıcılar üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla RTFOT ve PAV sonrası deney sonuçları yaşlandırılmamış bağlayıcıların DSR sonuçlarına oranlanarak yaşlanma indeksleri de bu tablo da görülmektedir. Tablo 6.8’de görüldüğü üzere hem RTFOT hem de PAV yaşlandırma yöntemlerine göre katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre daha az yaşlanmaktadır. Kısa dönem yaşlandırma yöntemine göre 10-0 bağlayıcısı en az yaşlanırken, uzun dönem yaşlandırma yöntemine göre 10-3 ve 10-7 bağlayıcıları en az yaşlanan bağlayıcılardır. Bu ılık asfalt katkılarının uzun dönemde

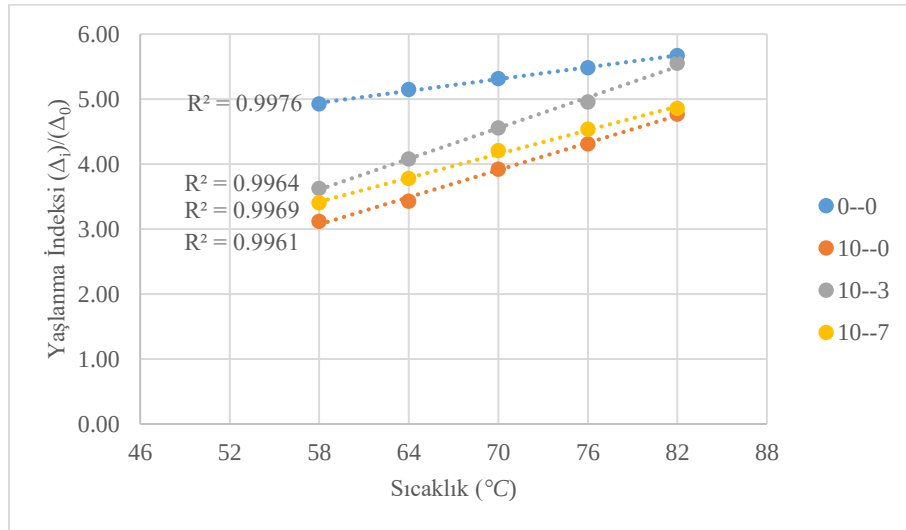
yaşlanmayı geciktirici bir etkisi olduğuna işaret etmektedir. Yaşlanma indekslerinin sıcaklığa göre değişimi Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de verilmiştir.

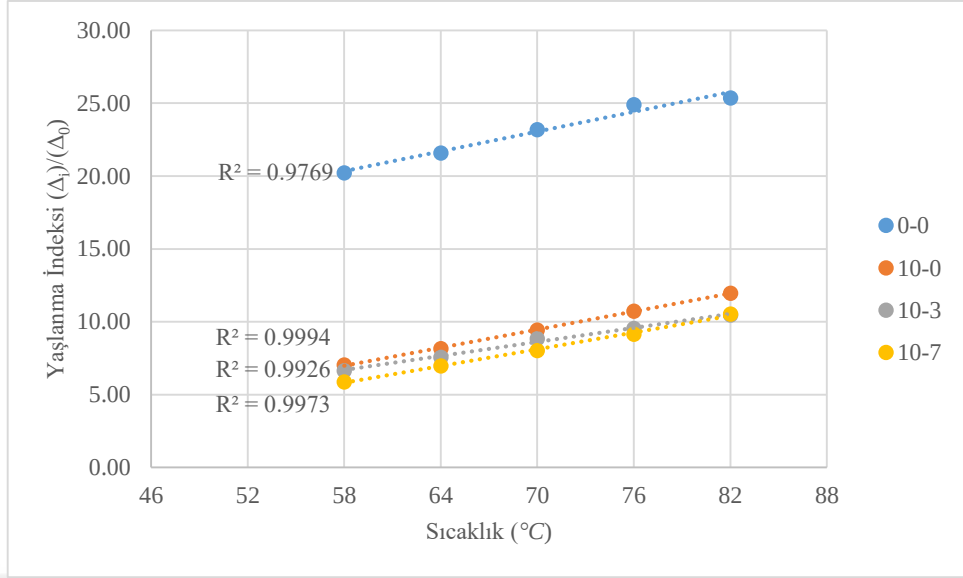
Tablo 6.8. Yaşlandırılmamış, RTFOT ve PAV sonrası bağlayıcıların DSR deney sonuçları ve yaşlanma indeksleri

58 °C										
Katkı Tipi	Yaşlandırılmamış		RTFOT Sonrası		PAV Sonrası		$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$	$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$
	(Δ_0, δ_0)		(Δ_R, δ_R)		(Δ_P, δ_P)					
	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ				
	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)				
0-0	5475	76.96	26960	65.09	110753	54.2	4.92	0.85	20.23	0.70
10-0	26288	59.63	81951	49.06	185123	45	3.12	0.82	7.04	0.75
10-3	41392	57.64	150540	47.03	275286	41.5	3.62	0.82	6.64	0.72
10-7	24727	60.08	84151	48.52	145021	45.5	3.40	0.81	5.86	0.76
64 °C										
Katkı Tipi	Yaşlandırılmamış		RTFOT Sonrası		PAV Sonrası		$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$	$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$
	(Δ_0, δ_0)		(Δ_R, δ_R)		(Δ_P, δ_P)					
	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ				
	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)				
0-0	2526	80.19	12998	68.84	54508	57.69	5.14	0.86	21.57	0.72
10-0	13456	64.54	46149	50.84	109771	47.27	3.43	0.79	8.16	0.73
10-3	20486	62.22	83584	49.11	155031	44.07	4.08	0.79	7.57	0.71
10-7	12615	64.57	47627	50.55	88182	47.12	3.78	0.78	6.98	0.73
70 °C										
Katkı Tipi	Yaşlandırılmamış		RTFOT Sonrası		PAV Sonrası		$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$	$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$
	(Δ_0, δ_0)		(Δ_R, δ_R)		(Δ_P, δ_P)					
	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ				
	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)				
0-0	1215.7	82.58	6460	72.72	28192	61.3	5.31	0.88	23.19	0.74
10-0	6896.9	69.4	27052	52.72	65058	49.23	3.92	0.75	9.43	0.71
10-3	10078	67.11	45927	51.36	89100	46.31	4.55	0.76	8.84	0.69
10-7	6536.1	69.27	27483.1	53	52486.4	49.16	4.20	0.77	8.03	0.71

Tablo 6.8'in devamı

76 °C										
Katkı Tipi	Yaşlandırılmamış		RTFOT Sonrası		PAV Sonrası		$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$	$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_P)/(\delta_0)$
	(Δ_0, δ_0)		(Δ_R, δ_R)		(Δ_P, δ_P)					
	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ				
	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)				
0-0	580	84.4	3180	76.52	14436	65.03	5.48	0.91	24.89	0.77
10-0	3591	73.88	15469	55.30	38559	51.30	4.31	0.75	10.74	0.69
10-3	5196	71.59	25741	53.86	49563	48.83	4.95	0.75	9.54	0.68
10-7	3409	73.75	15471	55.96	31176	51.32	4.54	0.76	9.14	0.70
82 °C										
Katkı Tipi	Yaşlandırılmamış		RTFOT Sonrası		PAV Sonrası		$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_R)/(\delta_0)$	$(\Delta_R)/(\Delta_0)$	$(\delta_P)/(\delta_0)$
	(Δ_0, δ_0)		(Δ_R, δ_R)		(Δ_P, δ_P)					
	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ	$G^*/Sin\delta$	δ				
	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)	(Pa)	(°C)				
0-0	290	85.20	1644	76.65	7356.6	69.22	5.67	0.90	25.37	0.81
10-0	1950	77.47	9300	57.95	23310	53.37	4.77	0.75	11.95	0.69
10-3	2640	75.46	14650	56.47	27614	51.38	5.55	0.75	10.46	0.68
10-7	1830	77.47	8890	59.41	19251	53.32	4.86	0.77	10.52	0.69

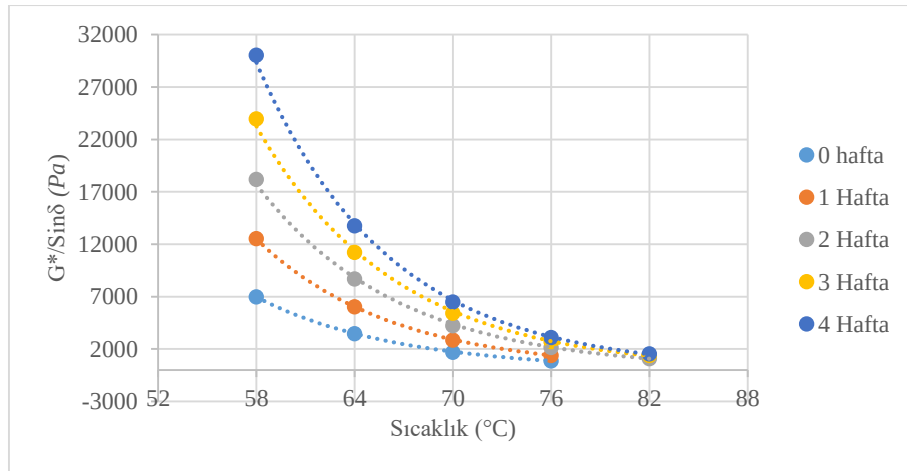
Şekil 6.20. RTFOT sonrası $G^*/\text{Sin}\delta$ değerlerine göre yaşlanma indekslerinin sıcaklığa göre değişimi



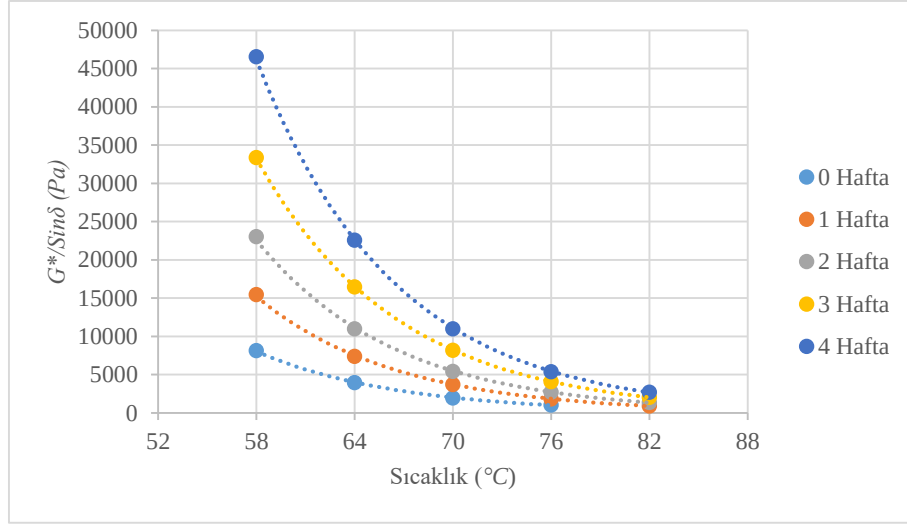
Şekil 6.21. PAV sonrası faz açısı değerlerine göre yaşlanma indekslerinin sıcaklığa göre değişimi

Şekillerden deney sıcaklığının artması ile yaşlanma indekslerinin arttığı görülmektedir. Saf ve katkılı bağlayıcıların yaşlanma indekslerinin sıcaklığa bağlı değişim oranı uzun süreli yaşlandırmada benzer iken kısa süreli yaşlandırmada katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre sıcaklıktan daha fazla etkilenmektedir.

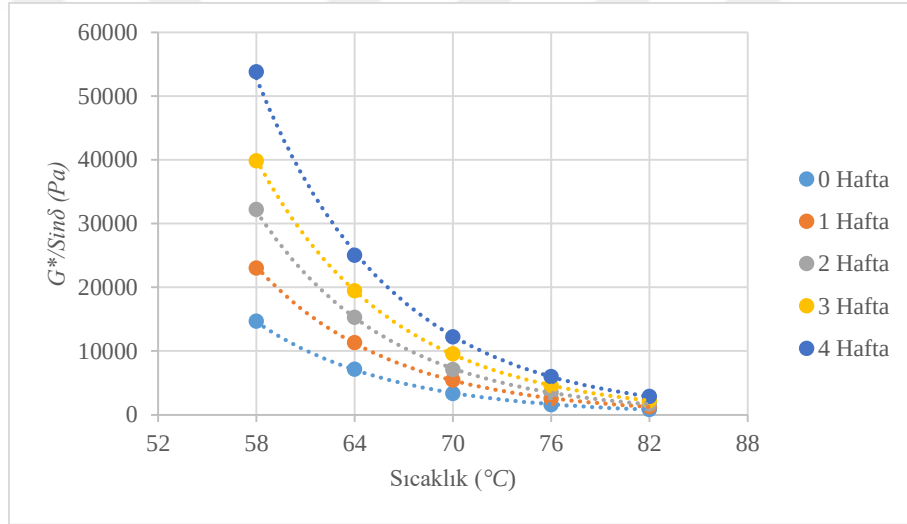
Saf ve modifiye bitümlerle hazırlanmış BSK numunelerin 0, 1, 2, 3 ve 4 hafta 60 °C’de etüvde bekletilerek yaşlandırılması sonrasında bu numunelerden ekstrasyon ve distilasyon ile elde edilen bağlayıcılar üzerinde DSR deneyi uygulanmıştır. Şekil 6.22-6.25’te bağlayıcıların farklı deney sıcaklıklarında ve farklı yaşlandırma sürelerinde elde edilen $G^*/\sin\delta$ değerleri verilmiştir.



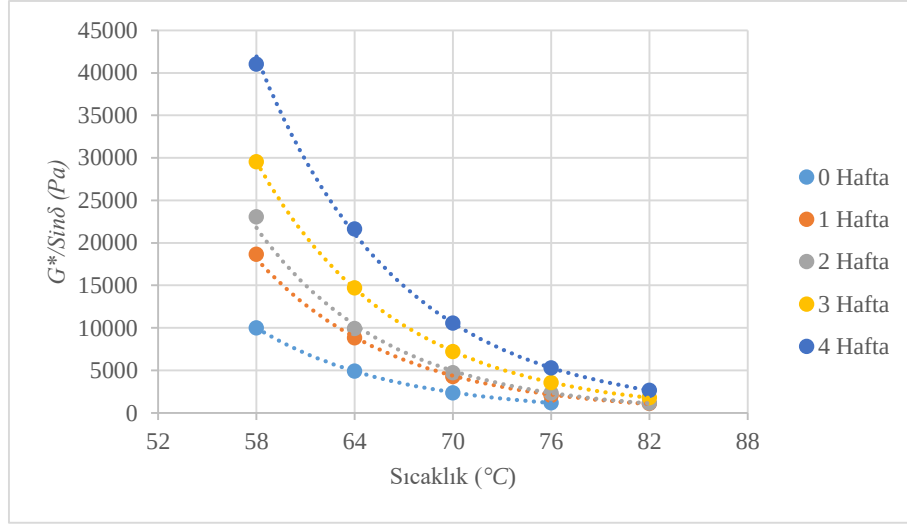
Şekil 6.22. Saf karışımdan elde edilen bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerleri



Şekil 6.23. 10-0 karışımından elde edilen bağlayıcının $G^*/\text{Sin}\delta$ değerleri

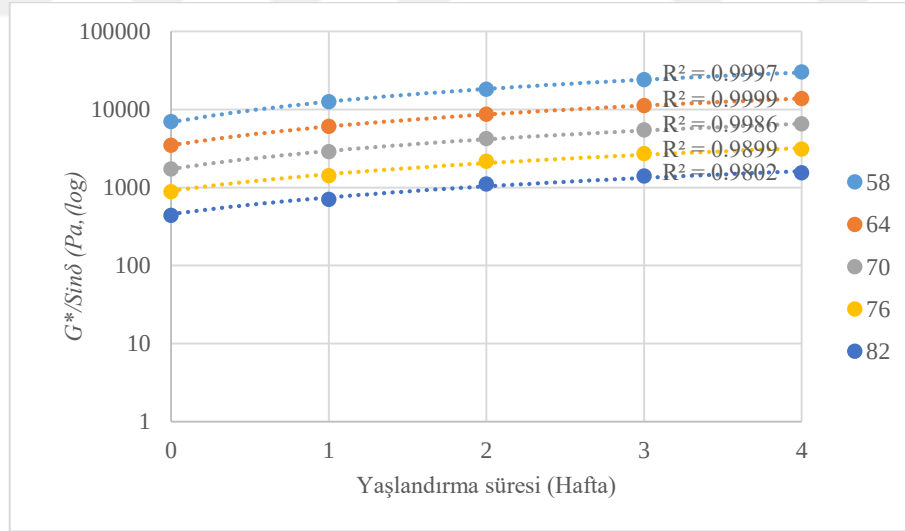


Şekil 6.24. 10-3 karışımından elde edilen bağlayıcının $G^*/\text{Sin}\delta$ değerleri

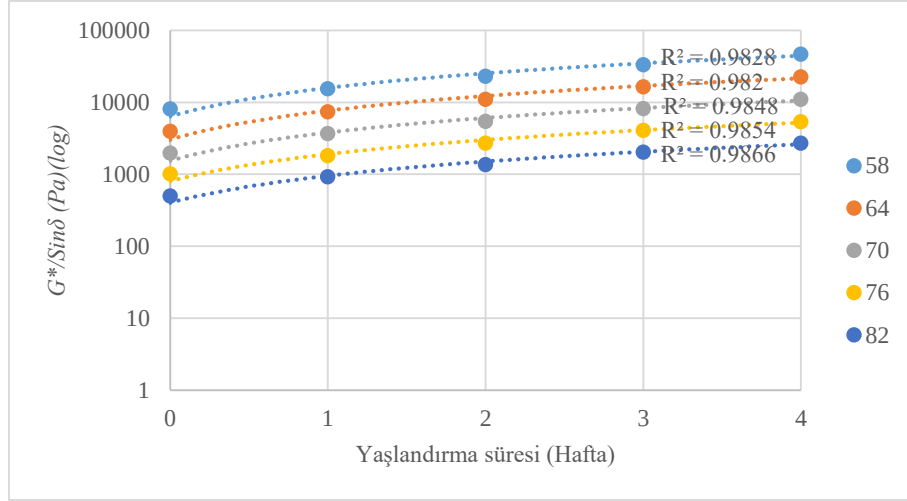


Şekil 6.25. 10-7 karışımından elde edilen bağlayıcının $G^*/\sin\delta$ değerleri

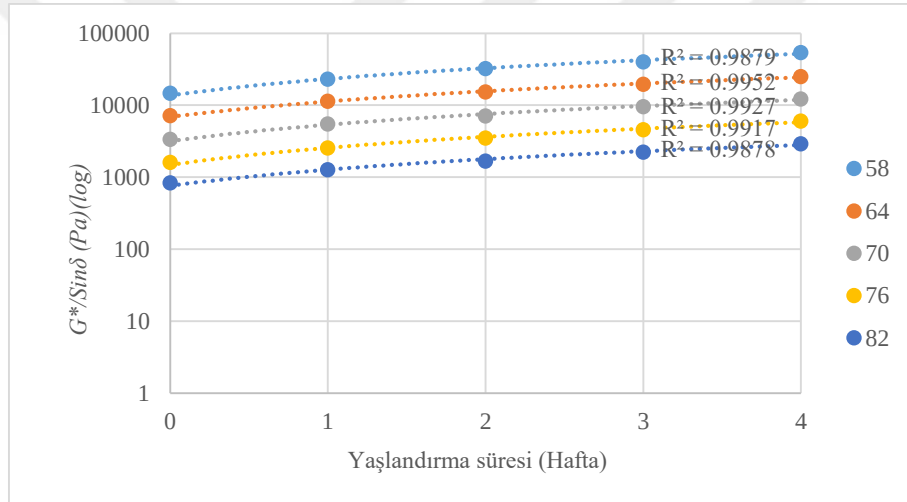
Şekillerden görüldüğü üzere karışımlardan elde edilen bütün bağlayıcılarda deney sıcaklığının artmasıyla $G^*/\sin\delta$ değerleri azalmaktadır. Bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri yaşlandırma süresinin artmasıyla sürekli arttığı tespit edilmiştir. Şekil 6.26-6.29'da bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinde yaşlandırma süresine bağlı değişim verilmiştir.



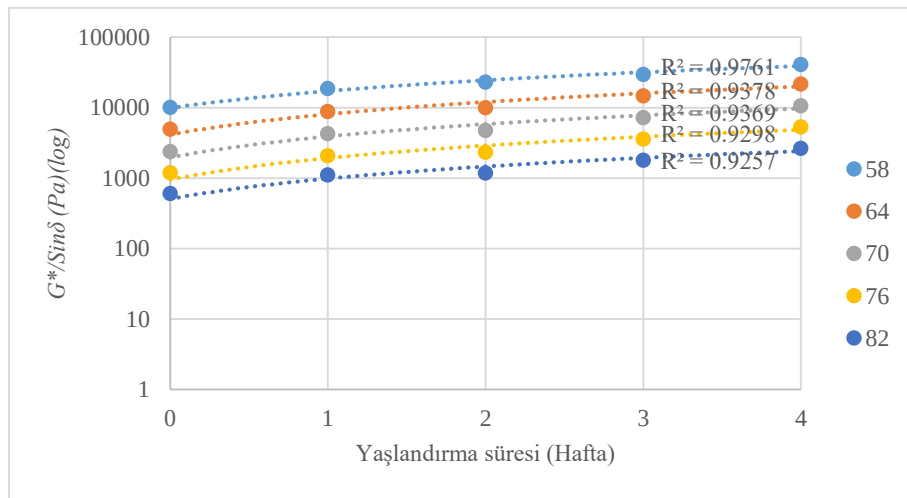
Şekil 6.26. Saf karışımlardan elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri



Şekil 6.27. 10-0 elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri

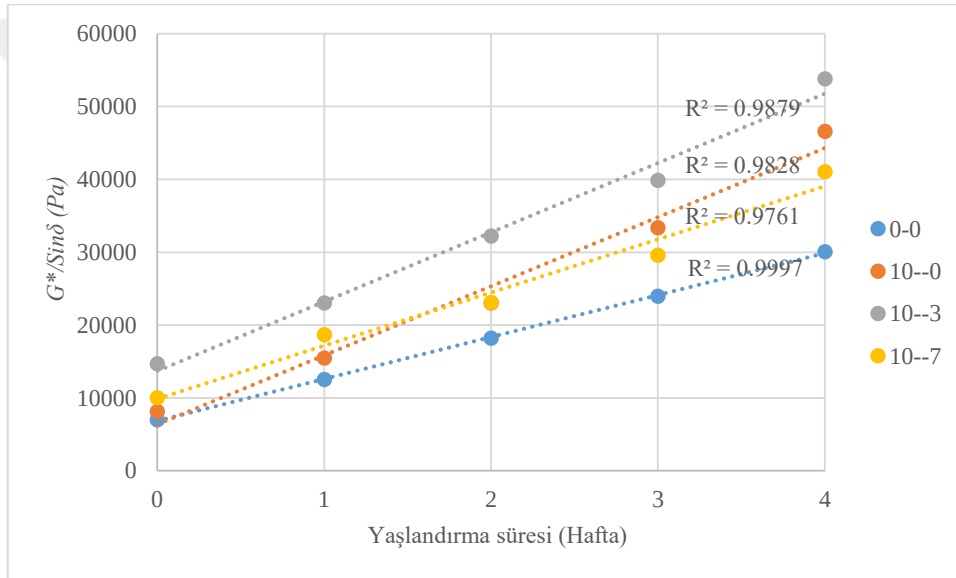


Şekil 6.28. 10-3 elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri



Şekil 6.29. 10-7 karışımlardan elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri

Laboratuvardaki yaşlandırma süresinin artması ile bütün bağlayıcıların $G^*/Sin\delta$ değerlerinde lineer bir artış olmaktadır. Deney sıcaklığının değişmesiyle yaşlandırma süresine bağlı $G^*/Sin\delta$ değerlerindeki değişim oranı değişmemektedir. Dolayısıyla yaşlandırma süresinin ya da katkı tipinin etkinliğini belirlemek amacıyla DSR deneyindeki herhangi bir sıcaklığın ele alınması olumsuz bir sonuç doğurmayacaktır. Şekil 6.30'da 58 °C deney sıcaklığında elde edilmiş bütün bağlayıcı tiplerinin farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/Sin\delta$ değerleri verilmiştir. 10-3 bağlayıcısı bütün yaşlandırma sürelerinde en yüksek değerleri verirken 10-0 ve 10-7 bağlayıcıları birbirine benzer sonuçlar vermektedir. 10-3 bağlayıcısı saf bağlayıcıya göre 0, 1, 2, 3 ve 4.haftalarda yaklaşık 2 kat daha fazla $G^*/Sin\delta$ değeri vermektedir.

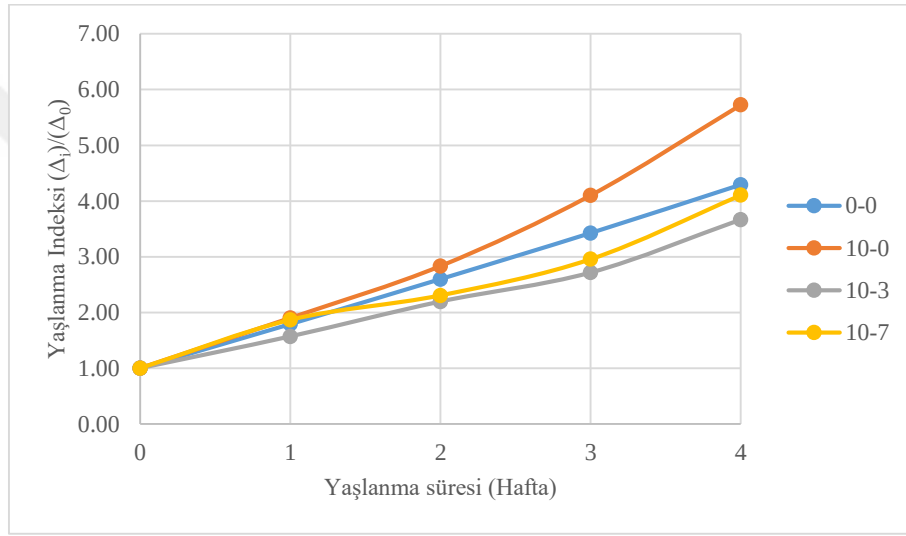


Şekil 6.30. 58 °C'deki farklı yaşlandırma sürelerinde $G^*/Sin\delta$ değişimi

Tablo 6.9'da laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerden elde edilen bağlayıcıların 58 °C'deki DSR sonuçlarından elde edilen yaşlanma indeksleri verilmiştir. Şekil 6.31'de ise indeks değerlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir.

Tablo 6.9. Laboratuvar yaşlandırma sonrası 58 °C’de DSR sonuçlarına göre yaşlanma indeksleri

Katkı Tipi	0 Hafta	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	$(\Delta_1)/(\Delta_0)$	$(\Delta_2)/(\Delta_0)$	$(\Delta_3)/(\Delta_0)$	$(\Delta_4)/(\Delta_0)$
	(Δ_0)	(Δ_1)	(Δ_2)	(Δ_3)	(Δ_4)				
	$G^*/Sin\delta$ (Pa)	$G^*/Sin\delta$ (Pa)	$G^*/Sin\delta$ (Pa)	$G^*/Sin\delta$ (Pa)	$G^*/Sin\delta$ (Pa)				
0-0	7022	12533	18192	23977	30051	1.78	2.59	3.41	4.28
10-0	8134	15474	23046	33373	46574	1.90	2.83	4.10	5.73
10-3	14678	23043	32234	39863	53805	1.57	2.20	2.72	3.67
10-7	10015	18681	23065	29565	41050	1.87	2.31	2.96	4.11

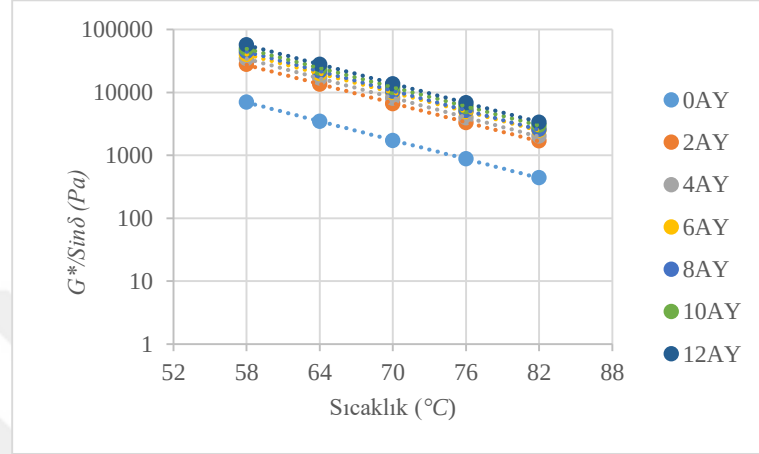


Şekil 6.31. Laboratuvar yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi

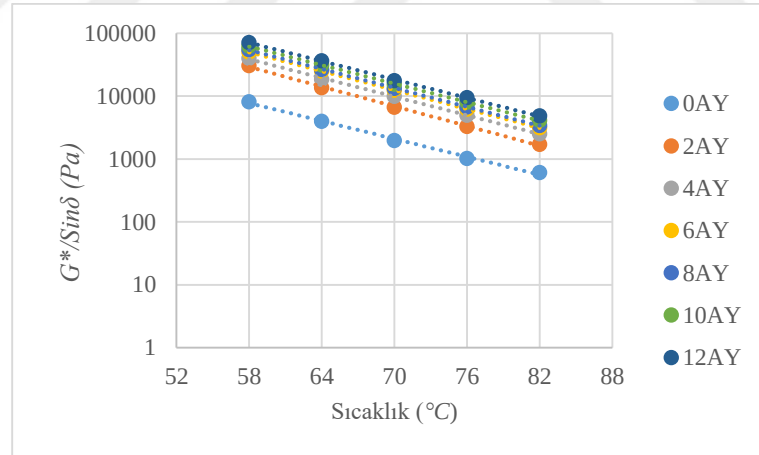
Zaman ile yaşlanma indeksleri bütün bağlayıcılarda artmaktadır. Yaşlanma süresi arttıkça bağlayıcıların birbirlerine göre yaşlanma indeksleri de artmaktadır. En fazla yaşlanan bağlayıcı 10-0 bağlayıcısı daha sonra sırasıyla 0-0, 10-7 ve 10-3 bağlayıcılarıdır. 10-3 bağlayıcısının $G^*/Sin\delta$ değeri 4 hafta yaşlandırma sonrasında 3.67 kat artmaktadır. Bu oran 10-0, 0-0 ve 10-7 bağlayıcıları için sırasıyla 5.73, 4.29 ve 4.11 olmaktadır. Şekil ve Tablodan da görüldüğü üzere ılık asfalt katkılarının CR ile birlikte kullanımının DSR deneyi ile elde edilen yaşlanma indekslerine göre yaşlanmayı geciktirdiği tespit edilmiştir.

DSR deneyi ayrıca 2 aylık dönemlerle 12 ay süresince çevresel koşullar altında yaşlandırılan BSK numunelerinden ekstrasyon ve distilasyon yöntemi ile elde edilen bağlayıcılara da uygulanmıştır. Burada da laboratuvarda yaşlandırılmış bağlayıcılarda olduğu gibi DSR deneyi 58-82 °C aralığında yapılmıştır. Şekil 6.32-6.35’te farklı yaşlandırma sürelerinde ve farklı

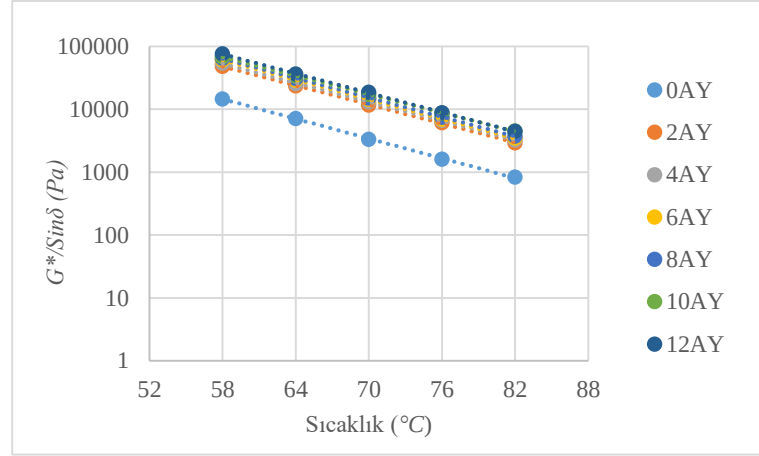
deney sıcaklıklarındaki $G^*/\sin\delta$ değerleri verilmiştir. Bütün yaşlandırma sürelerinde hem saf hem de katkıli bağlayıcılarda deney sıcaklığının artmasıyla $G^*/\sin\delta$ değerlerinde meydana gelen azalma oranının benzer olduğu dolayısıyla deney sıcaklığının katkıların ve yaşlanma sürelerinin değerlendirilmesinde önemli bir faktör olmadığı görülmüştür.



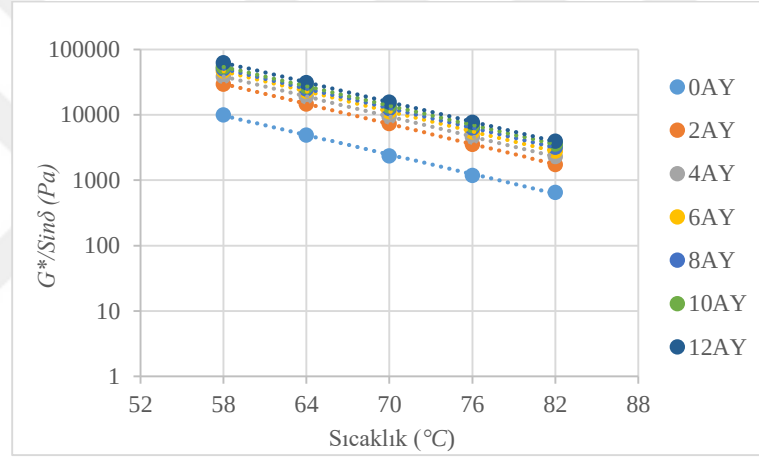
Şekil 6.32. Arazide yaşlandırılmış saf karışımlardan elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri



Şekil 6.33. Arazide yaşlandırılmış 10-0 karışımlarından elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri

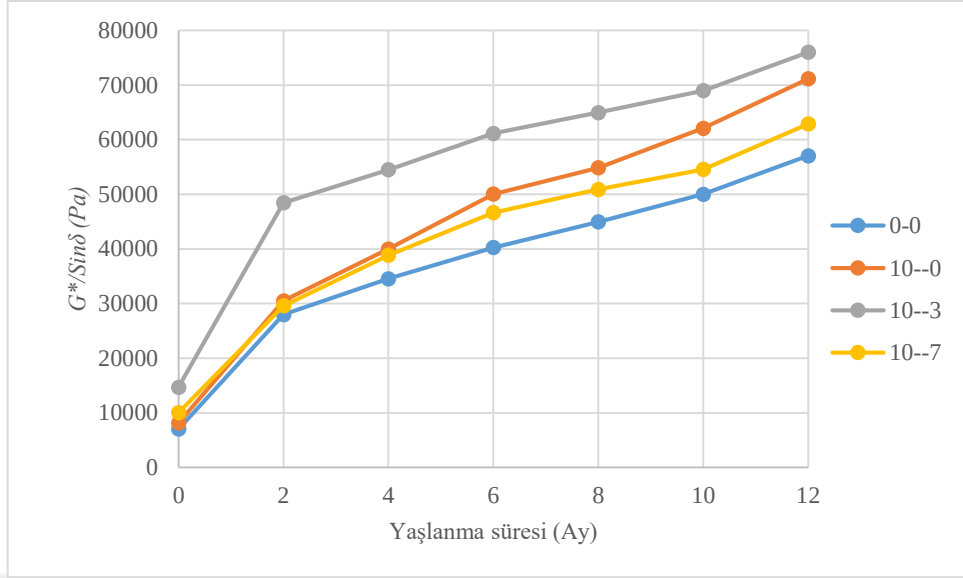


Şekil 6.34. Arazide yaşlandırılmış 10-3 karışımlarından elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri



Şekil 6.35. Arazide yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından elde edilen bağlayıcıların farklı yaşlandırma sürelerindeki $G^*/\sin\delta$ değerleri

Şekil 6.36'da saf ve katkıli bağlayıcıların arazide yaşlandırılması sonucu $G^*/\sin\delta$ değerlerinde meydana gelen değişim verilmiştir. İlk 2.ayda (1 Haziran – 6 Ağustos 2016) bütün bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri hızlı bir şekilde artmakta daha sonra ise bu artış lineer olarak devam etmektedir. 10-3 bağlayıcısı bütün aylarda en yüksek değerlere sahiptir. Daha sonra ise sırasıyla en yüksek değerlere 10-0, 10-7 ve 0-0 bağlayıcıları sahip olmuştur. 10-3 bağlayıcısı 0-0, 10-7 ve 10-0 bağlayıcılarına göre 12.ay sonunda sırasıyla %33, %21 ve %7 daha fazla $G^*/\sin\delta$ değeri vermiştir.

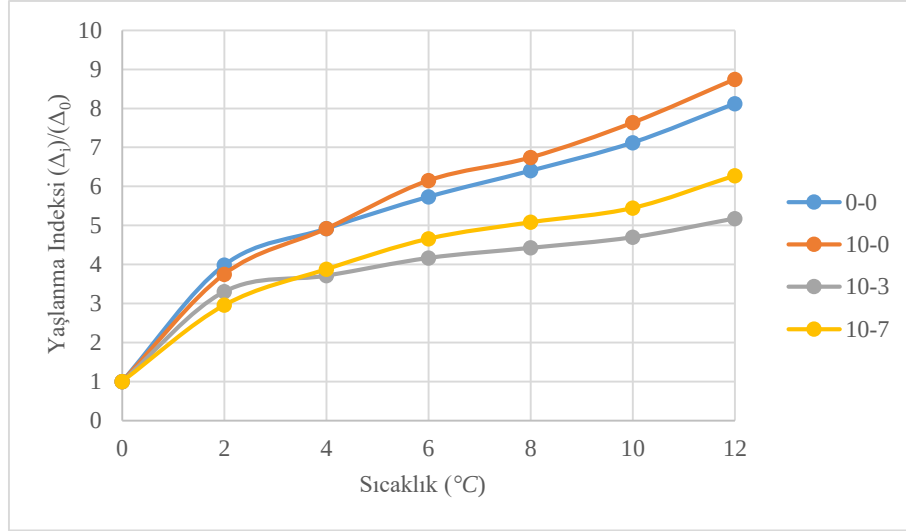


Şekil 6.36. Saf ve katkıli bağlayıcıların arazide yaşlandırılması sonucu $G^*/\sin\delta$ değerlerinde meydana gelen değişim

Tablo 6.10'da çevresel koşullar altında yaşlandırılmış numunelerden elde edilen bağlayıcıların 58 °C'deki DSR sonuçlarından elde edilen $G^*/\sin\delta$ ve yaşlanma indekslerinin değerleri, Şekil 6.37'de ise indeks değerlerinin grafiksel gösterimi verilmiştir.

Tablo 6.10. Arazi yaşlandırma sonrası 58 °C'de DSR sonuçlarına göre yaşlanma indeksleri

Yaşlanma Süresi	0-0	10-0	10-3	10-7
$G^*/\sin\delta$ (Pa)				
0 Ay (Δ_0) (Yaşlandırılmamış)	7291	8134	14678	10015
2 Ay (Δ_2)	27960	30500	48446	29598
4 Ay (Δ_4)	34524	39982	54474	38830
6 Ay (Δ_6)	40255	50030	61143	46650
8 Ay (Δ_8)	44949	54829	64938	50877
10 Ay (Δ_{10})	50010	62088	68946	54552
12 Ay (Δ_{12})	57030	71138	75995	62863
Δ_i/Δ_0				
(Δ_2)/ (Δ_0)	3.98	3.75	3.30	2.96
(Δ_4)/ (Δ_0)	4.92	4.92	3.71	3.88
(Δ_6)/ (Δ_0)	5.73	6.15	4.17	4.66
(Δ_8)/ (Δ_0)	6.40	6.74	4.42	5.08
(Δ_{10})/ (Δ_0)	7.12	7.63	4.70	5.45
(Δ_{12})/ (Δ_0)	8.12	8.75	5.18	6.28



Şekil 6.37. Arazi yaşlandırması sonrası saf ve katkılı numunelerden elde edilen bağlayıcıların yaşlanma indeksindeki değişimi

Tablo 6.10 ve Şekil 6.37'ye göre zaman ile yaşlanma indeksleri bütün bağlayıcılarda artmaktadır. Bütün bağlayıcılar için 2.aydan sonra lineer bir artış olduğu görülmüştür. Laboratuvar yaşlanmasında olduğu gibi arazi yaşlanmasında da en fazla yaşlanan bağlayıcı 10-0 bağlayıcısı daha sonra sırasıyla 0-0, 10-7 ve 10-3 bağlayıcılarıdır. 10-3 bağlayıcısının $G^*/\sin\delta$ değeri 12 ay yaşlandırma sonrasında 5.18 kat artmaktadır. Bu oran 10-0, 0-0 ve 10-7 bağlayıcıları için sırasıyla 8.75, 7.82 ve 6.28 olmaktadır. Şekil ve Tablodan da görüldüğü üzere çevresel koşullar altında da laboratuvar yaşlandırmasında olduğu gibi ılık asfalt katkılarının CR ile birlikte kullanımının DSR deneyi ile elde edilen yaşlanma indekslerine göre yaşlanmayı geciktirdiği tespit edilmiştir. DSR deneyine göre laboratuvar yaşlandırması ile arazi yaşlandırması arasında bütün bağlayıcılar için iyi bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.11'de laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin $G^*/\sin\delta$ değerlerinin arazide ne kadar sürede meydana geldiği verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere $G^*/\sin\delta$ değerleri dikkate alındığında, katkılı karışımların saf karışımlara göre laboratuvardaki yaşlanma seviyesine gelmesi için arazide daha uzun süre yaşlandırılmalıdırlar. Buda katkılı karışımların arazideki yaşlanmasının daha uzun sürede meydana geldiğinin bir göstergesidir.

Tablo 6.11. Laboratuvarda yaşılandırılan numunelerin $G^*/\sin\delta$ sonuçları bakımından arazideki karşılığı

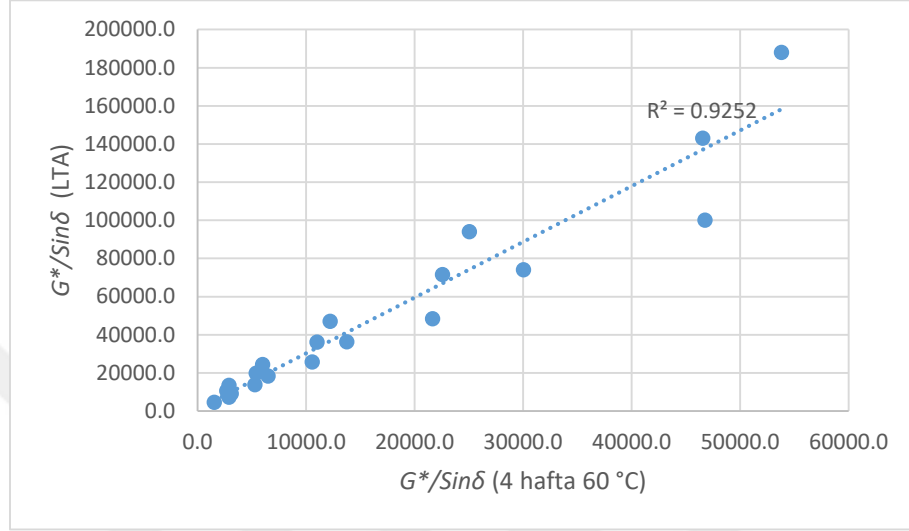
Yaşılandırma süresi (Hafta)	Arazideki Yaşılanma Süresi (Ay)			
	0-0	10-0	10-3	10-7
1	0.53	0.66	0.50	0.89
2	1.07	1.33	1.04	1.33
3	1.62	2.26	1.49	2.00
4	2.20	5.57	2.32	4.53

Laboratuvarda farklı sürelerde meydana gelen yaşılanmalar ile standart kısa dönem yaşılandırma prosedüründe (STA) meydana gelen yaşılanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.30'daki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak STA sonucu oluşan $G^*/\sin\delta$ değerlerinin hangi haftaya denk geldiği tespit edilmiştir. Buna göre saf bağlayıcı ile katkılı bağlayıcıların çok farklı yaşılanma karakteristiği izlediği FTIR sonuçlarında görüleceği gibi burada da görülmüştür. Saf bağlayıcının kısa dönem yaşılandırılmasıyla (STA) elde edilen $G^*/\sin\delta$ değeri laboratuvarda 6.4 haftada oluşurken, 10-0; 10.8 haftada, 10-3; 13.2 haftada ve 10-7; 8.2 haftada oluşmaktadır. $G^*/\sin\delta$ değerleri dikkate alındığında STA sonrası ile laboratuvarda aynı yaşılanmayı elde etmek için katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıdan çok daha uzun süre yaşılandırmaya tabi tutulması gerekmektedir.

Standart uzun dönem yaşılandırma (LTA) sonrası meydana gelen yaşılanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.36'daki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak LTA sonucu oluşan $G^*/\sin\delta$ değerlerinin hangi aya denk geldiği tespit edilmiştir. Saf bağlayıcının uzun dönem yaşılandırılmasıyla (LTA) elde edilen $G^*/\sin\delta$ değeri arazide 18.7 ayda oluşurken, 10-0; 29.7 ayda, 10-3; 54.2 ayda ve 10-7; 24.4 ayda oluşmaktadır. LTA yöntemi katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre daha fazla yaşılanmasına neden olmuştur. Gerek laboratuvarda gerekse arazide yapılan yaşılanmaya göre 10-3 bağlayıcısı en geç yaşılanan bağlayıcı olmuştur. FTIR deneyinde görüleceği gibi burada da standart yaşılandırma yöntemlerinin (STA-LTA) saf ve katkılı bağlayıcılar üzerinde çok farklı yaşılandırma etkisine sahip olduğu görülmüştür.

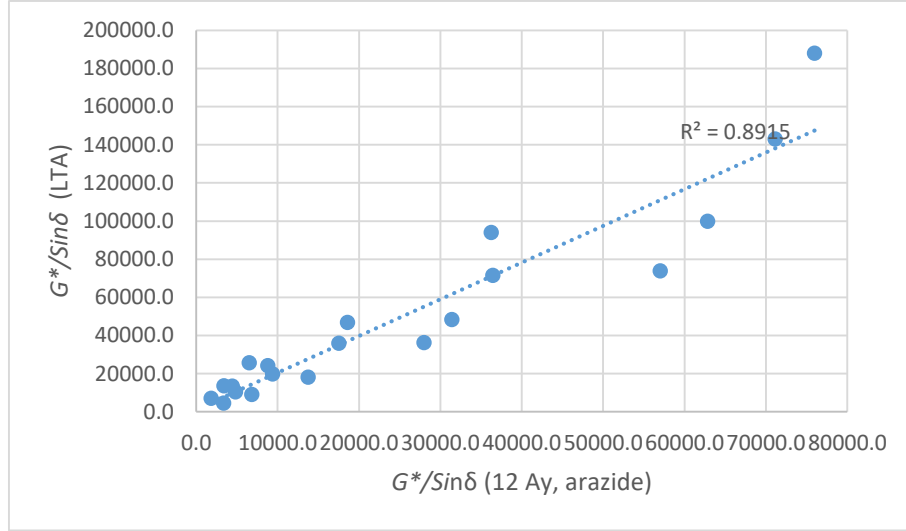
Uzun dönem yaşılandırma (LTA) yöntemi karışımların 5 gün 185 °C'de bekletilmesini kapsamaktadır. Bu çalışmada laboratuvarda uygulanan yaşılandırma yönteminde ise 60 °C'de 1, 2, 3 ve 4 hafta bekletmeyi esas alan bir yaşılandırma prosedürü uygulanmıştır. Uygulanan bu yöntemin standart yöntem ile uyumunu araştırmak amacıyla her iki yöntemden gelen saf ve katkılı bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri bütün deney sıcaklıkları için karşılaştırılmıştır. Şekil 6.38'de 4 hafta 60 °C'de yaşılandırılan BSK numunelerinden elde edilen bağlayıcıların uzun

dönem yaşlandırılmış aynı tip karışımlardan elde edilen bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri karşılaştırılmıştır. Şekle göre 2 deney prosedürü arasında yüksek bir uyumun olduğu görülmektedir. 1, 2 ve 3 hafta yaşlandırılmış bağlayıcılarda da sırasıyla 0.916, 0.958 ve 0.951 belirleme katsayıları tespit edilmiştir.



Şekil 6.38. 60 °C’de 4 hafta yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri ile LTA sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin karşılaştırılması

Çalışmada kullanılan diğer bir yaşlandırma yöntemi olan çevresel koşullar altındaki (arazi) 12 ay yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri ile uzun dönem yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri Şekil 6.39’da karşılaştırılmıştır. Burada da çevresel koşulların etkisini değerlendirmek amacıyla uygulanan yaşlandırma yönteminin standart deney yöntemiyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Arazide farklı sürelerde bekletilen numunelerden gelen bağlayıcılar ile uzun dönem yaşlandırılmış numunelerden gelen bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri arasındaki belirleme katsayıları 2, 4, 6, 8 ve 10. aylar için sırasıyla 0.938, 0.931, 0.927, 0.916 ve 0.912 olarak tespit edilmiştir.

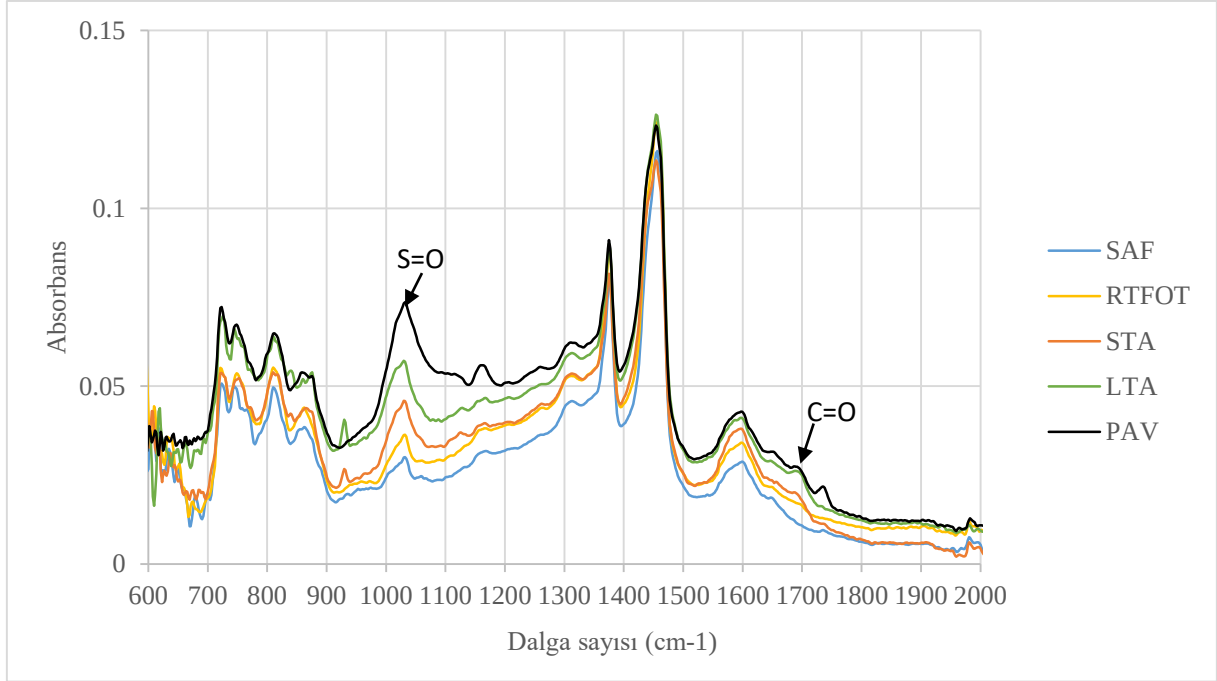


Şekil 6.39. Arazide 12 ay yaşlandırılmış bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerleri ile LTA sonrası bağlayıcıların $G^*/\sin\delta$ değerlerinin karşılaştırılması

6.1.4. FTIR Test Sonuçları

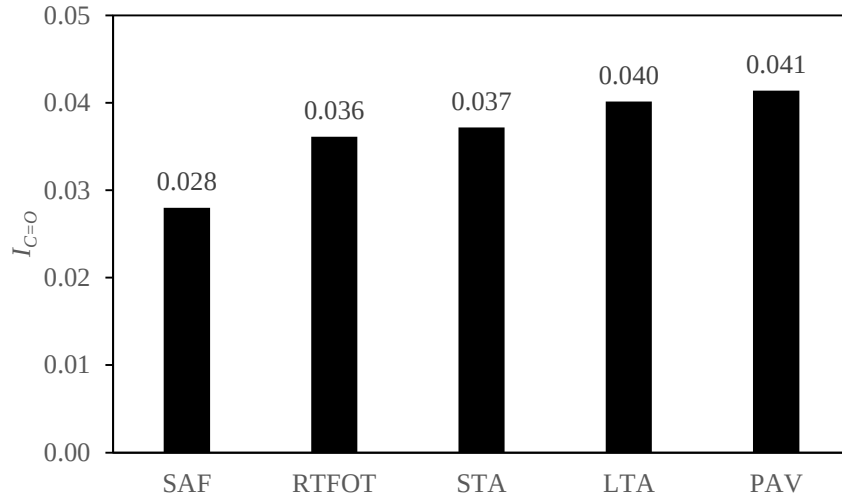
Şekil 6.40'ta B50/70 saf bitümün karıştırma sonrası (170 °C'de 45 dk 2000 devir/dak), RTFOT ve PAV yöntemiyle yaşlandırması sonrası elde edilen kalıntının, ayrıca saf bitüm ile üretilmiş BSK'lara kısa dönem yaşlandırma (STA) ve uzun dönem yaşlandırma (LTA) uygulandıktan sonra ekstrasyon ve distilasyon yöntemiyle elde edilen bağlayıcıların FTIR test sonuçları verilmiştir.

Şekilde görüldüğü üzere bağlayıcıya ve karışıma uygulanan standart yaşlandırma sonrasında karbonil grubuna (C=O) karşılık gelen 1700 cm^{-1} pik noktasının ve sülfoksit grubuna (S=O) karşılık gelen 1030 cm^{-1} pik noktasının arttığı belirlenmiştir.

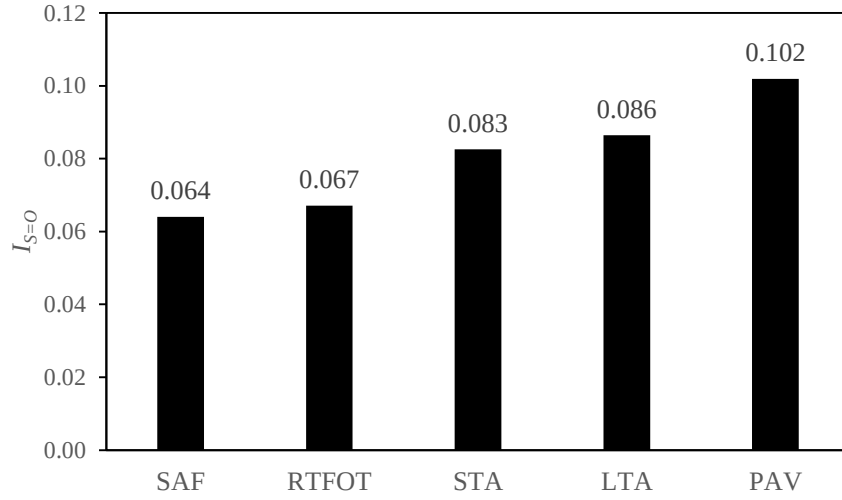


Şekil 6.40. Saf bitüm ve karışımların AASHTO yöntemlerine göre yaşlandırıldıktan sonra elde edilen bağlayıcı için FTIR test sonuçları

Bağlayıcılar için kısa dönem yaşlanmayı temsil eden RTFOT ve buna karşılık karışımların kısa dönem yaşlanmasını temsil eden STA (135 °C’de 4 saat) arasında benzerlik olduğu görülmüştür. Aynı benzerlik uzun dönem yaşlandırma yöntemleri olan bağlayıcılar için PAV (100 °C’de 20 saat) ve karışımlar için LTA (85 °C’de 5 gün) sonrasında da görülmektedir. Saf bağlayıcının yaşlandırma yöntemlerine göre değişen karbonil ve sülfoksit indeksleri Şekil 6.41’de verilmiştir. En fazla yaşlanmaya sırasıyla basınçlı yaşlandırma kabının (PAV), LTA, STA ve RTFOT yöntemlerinin neden olduğu görülmüştür. PAV yöntemiyle yaşlandırılan saf numunelerin yaşlandırılmamış saf bağlayıcıya göre karbonil indeksi %46 artmıştır. Bu artışlar LTA, STA ve RTFOT yöntemlerinde sırasıyla %43,%32,%28 olmuştur. Sülfoksit indeksi ise PAV, LTA, STA ve RTFOT yöntemlerinde sırasıyla %59, %34, %29 ve %5 artmıştır. Yaşlandırma yöntemlerine tabi tutulan bütün numuneler yaşlandırma öncesi 45 dakika 2000 devir karıştırma işlemine maruz kalmışlardır.



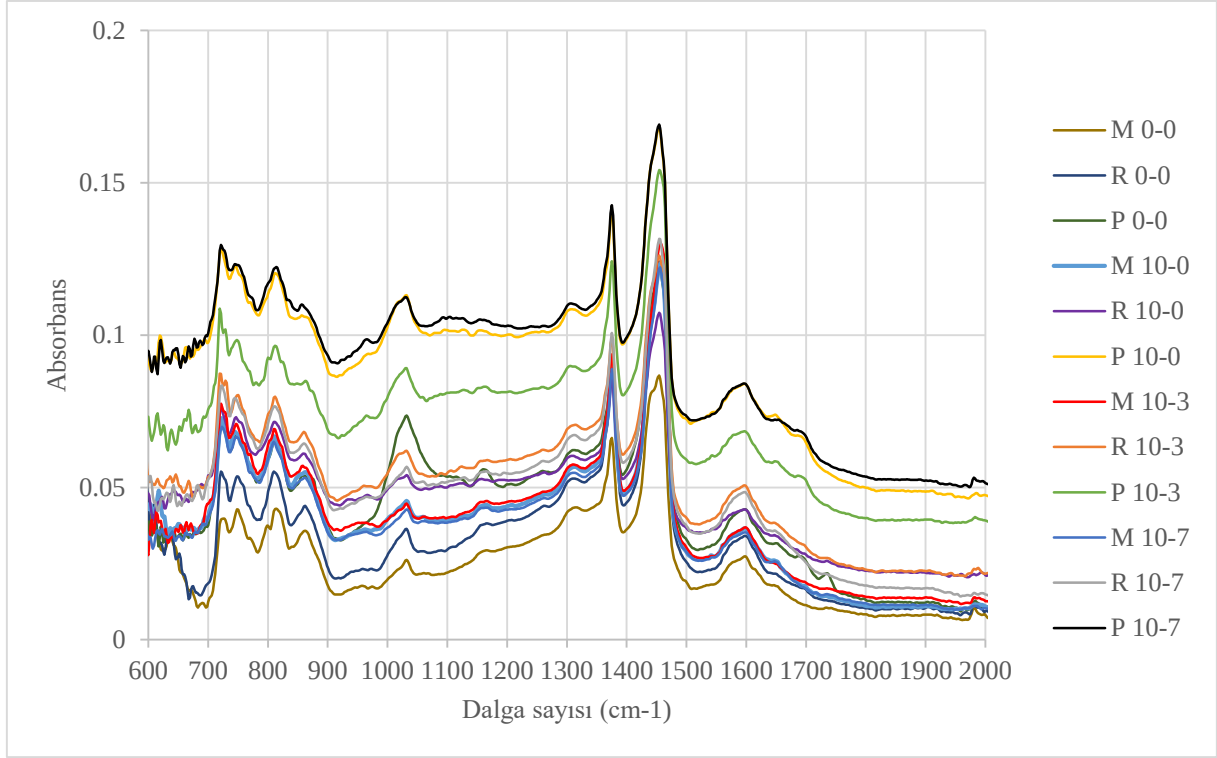
(a)



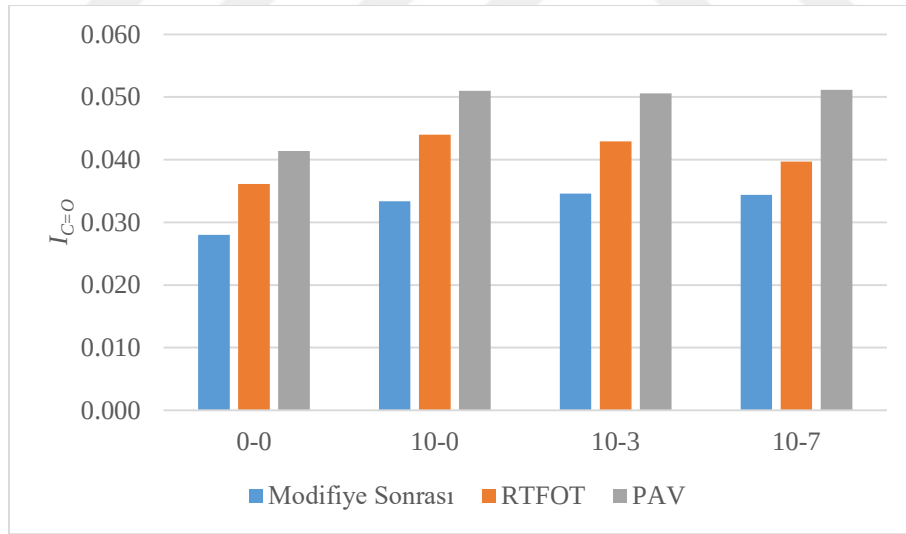
(b)

Şekil 6.41. B50/70 için asfalt bağlayıcı ve karışımların AASHTOO yöntemlerine göre yaşlandırmanın (a) Karbonil İndeks ($I_{C=O}$) (b) Sülfoksit İndeks ($I_{S=O}$) sonuçlarına etkisi

Şekil 6.42’de saf, CR, CR+Sasobit ve CR+Evothem katkılı bağlayıcıların modifiye, RTFOT ve PAV sonrası FTIR test sonuçları verilmiştir. Şekil 6.43’te ise FTIR eğrilerinden elde edilen alanlar yardımı ile belirlenen C=O indeksleri verilmiştir.



Şekil 6.42. 0-0, 10-0, 10-3, 10-7 bağlayıcılarının modifiye, RTFOT ve PAV sonrası FTIR test sonuçları

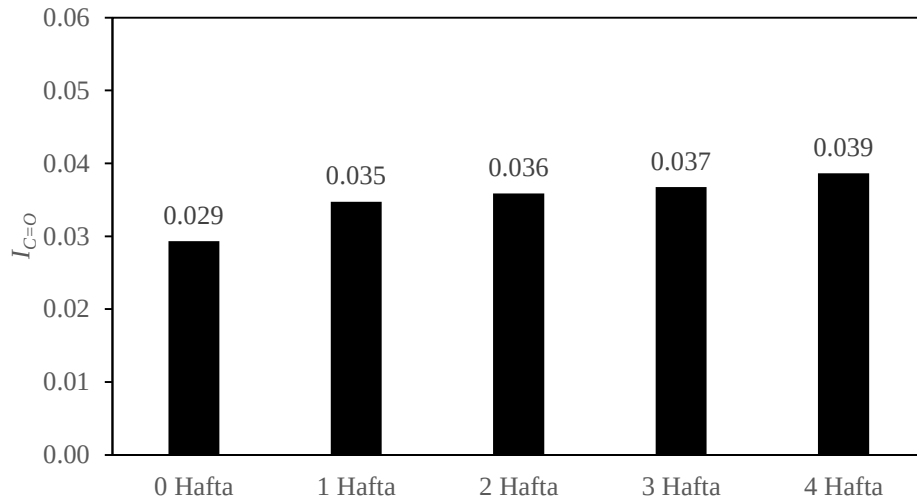


Şekil 6.43. Saf, CR, CR+Sasobit ve CR+Evotharm katkıli bağlayıcıların modifiye, RTFOT ve PAV sonrası C=O indeksindeki değişimi

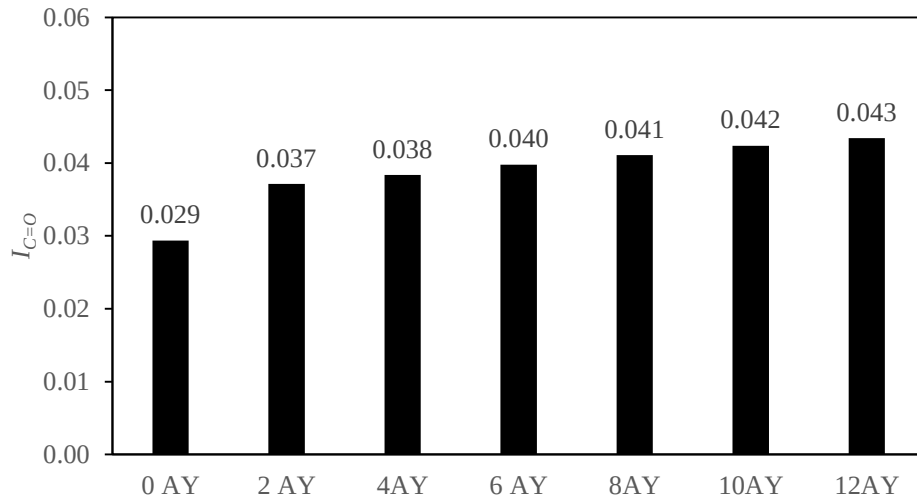
Saf bağlayıcının karıştırma (45 dk, 2000 devir/dk) sonrası C=O indeksi 0.028 iken katkıli bağlayıcıların C=O indeksleri 0.034 civarındadır. Buna göre katkıli karışımların modifikasyon sürecinde maruz kaldığı yaşlanma saf bağlayıcıya göre daha fazladır. Katkıli bağlayıcılar PAV yaşlandırmasından aynı oranda etkilenirken RTFOT yaşlandırmasından farklı şekilde etkilenmiştir. Diğer bir ifadeyle yaşlandırma koşulları ağırlaştıkça katkıli bağlayıcıların benzer

C=O indeksi verdikleri görülmüştür. Bütün bağlayıcılar PAV yaşlandırması soncu C=O indeksleri yaklaşık olarak %50 oranında atmaktadır. RTFOT yaşlandırmasından en az etkilenen bağlayıcı 10-7, en fazla etkilenen bağlayıcı ise 10-0 bağlayıcısıdır. Katkılı bağlayıcıların RTFOT ve PAV sonrası C=O indekslerinin saf bağlayıcının değerinden yüksek olması başlangıçtaki karıştırma işleminde oluşan yaşlanmanın saf bağlayıcıdan fazla olması sonucu oluşmuştur.

Laboratuvarda ve çevresel koşullar altında (arazide) farklı sürelerde yaşlandırılan BSK numunelerinden (Marshall numuneleri) ekstrasyon ve distilasyon yöntemi ile elde edilmiş bağlayıcıların karbonil indekslerindeki değişimler Şekil 6.44 ve 6.45'te verilmiştir.

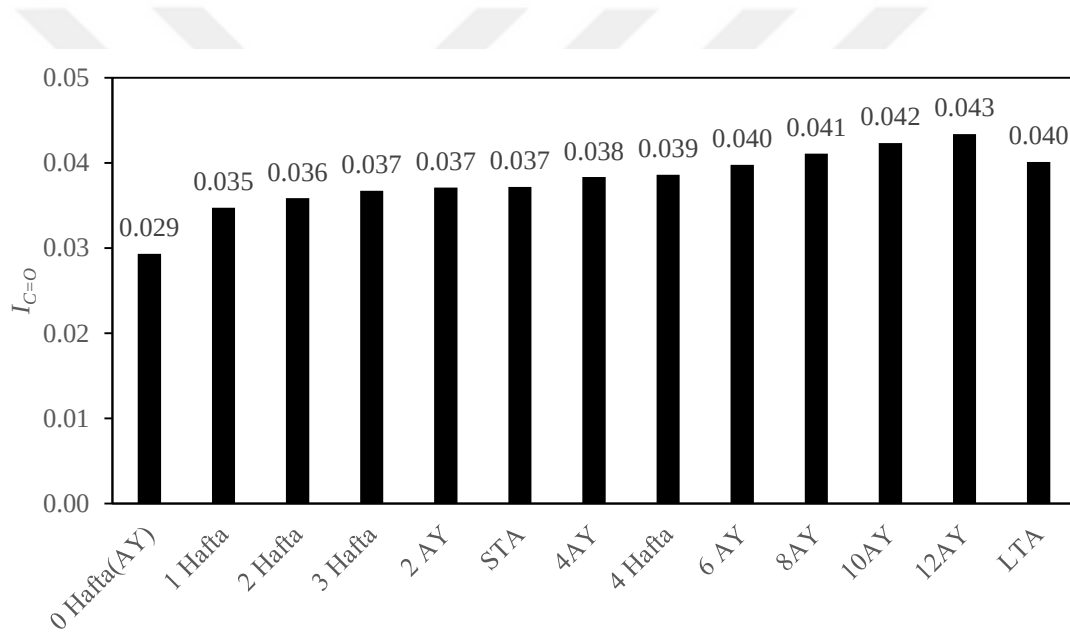


Şekil 6.44. Laboratuvarda yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişim



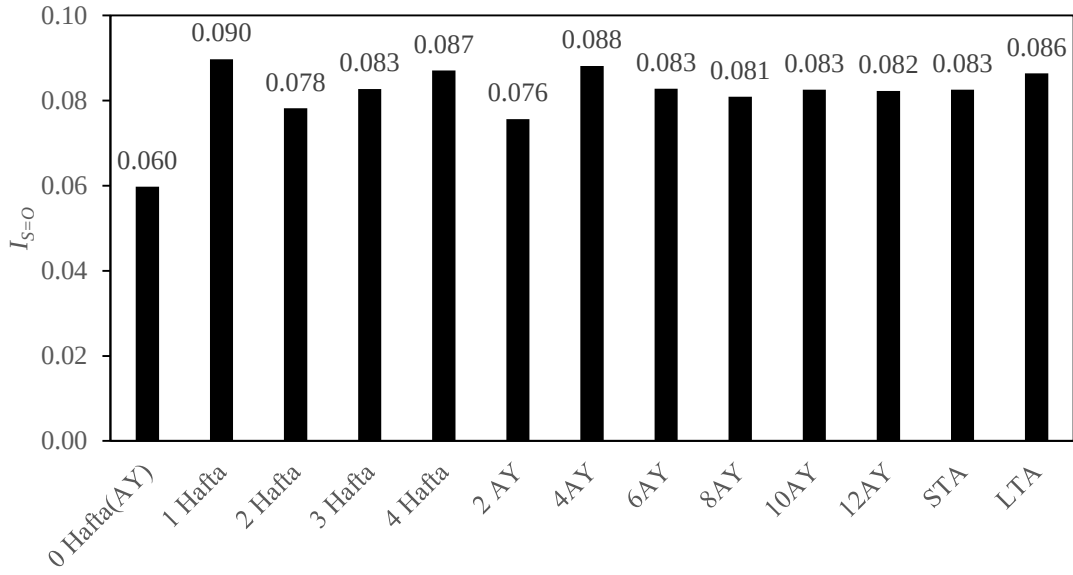
Şekil 6.45. Arazide yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişim

Şekillerden görüldüğü üzere gerek laboratuvarında gerekse arazideki yaşlandırmada zaman ile C=O indeksleri sürekli olarak artmaktadır. Bu artış laboratuvarında ilk haftada arazide de 2.ayda belirgin olmakta sonra yavaş bir şekilde devam etmektedir. Şekil 6.46'da laboratuvarında, arazide, laboratuvarında kısa ve uzun dönem yaşlandırma yöntemlerine göre yaşlandırılmış numunelerden alınan bağlayıcıların C=O indeksleri birlikte verilmiştir. Buna göre kısa dönem yaşlandırma sonucu oluşan C=O indeksi laboratuvarında 3 haftada arazide ise 2.ayda meydana gelmektedir. Laboratuvarında 4.haftada, arazide ise 12.ayda meydana gelen C=O indeksi LTA (uzun dönem yaşlandırma) sonrası oluşan C=O indeksinden düşük kalmaktadır. Laboratuvarında 3.haftada meydana gelen C=O indeksinin arazide 2.ayda; 4 haftada oluşan C=O indeksinin ise arazide 6.ayda meydana geldiği tespit edilmiştir.



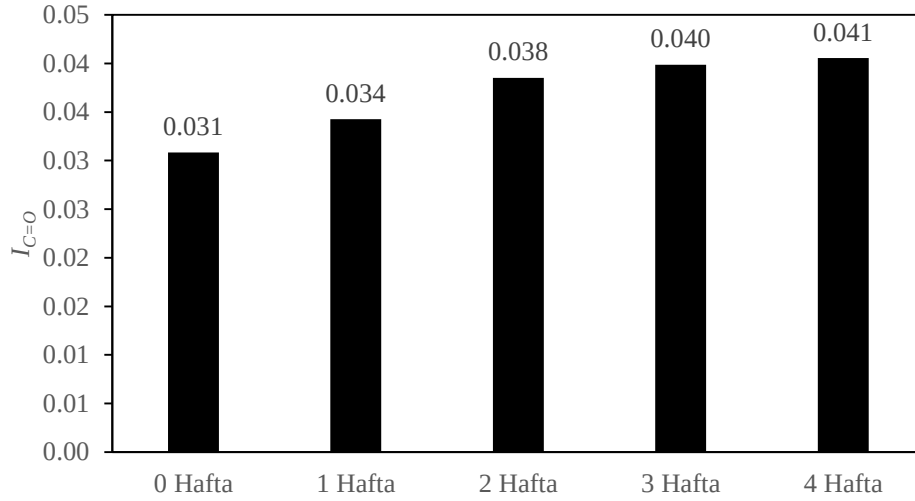
Şekil 6.46. Laboratuvarında, arazide ve R30 yöntemine göre yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi

Şekil 6.47'de laboratuvarında, arazide, laboratuvarında kısa ve uzun dönem yaşlandırma yöntemlerine göre yaşlandırılmış numunelerden alınan bağlayıcıların S=O indeksleri birlikte verilmiştir. Sülfoksit değişimi karboksilde olduğu gibi düzenli bir değişim göstermemektedir. Bu durum daha önce yapılan bir çalışmada [104] da tespit edilmiş ve karbonil indekslerinde değişimin daha tutarlı olduğu ve bu nedenle karışımlar arasında yaşlanmanın değerlendirilmesinde karbonil indeks değerlerinin kullanılmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir.

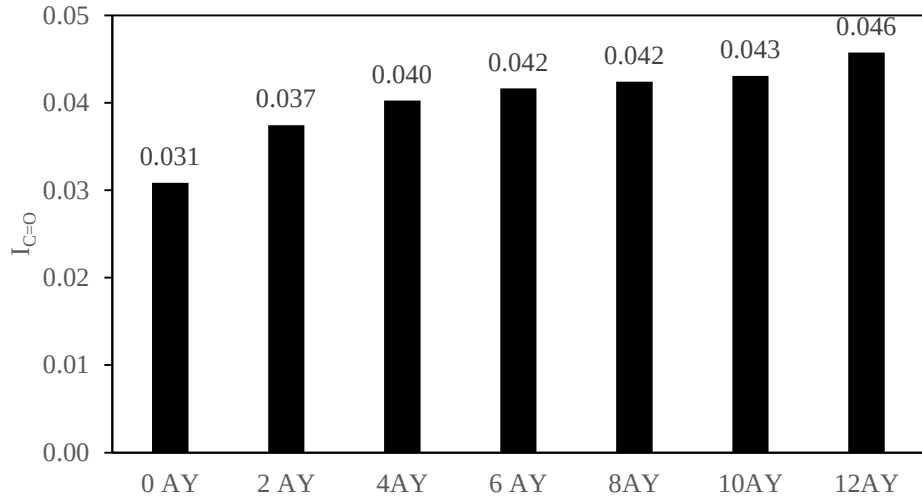


Şekil 6.47. Laboratuvarda, arazide ve R30 yöntemine göre yaşlandırılmış saf karışımlardan alınan bağlayıcıların S=O indekslerindeki değişimi

Laboratuvarda ve arazide yaşlandırılmış CR modifiyeli BSK numunelerinden elde edilmiş bağlayıcıların C=O indeksindeki değişimi Şekil 6.48 ve 6.49’da verilmiştir. Gerek laboratuvarda gerekse arazide başlangıçta hızlı bir yaşlanma daha sonra ise daha düşük bir hızda yaşlanma gözlenmiştir.

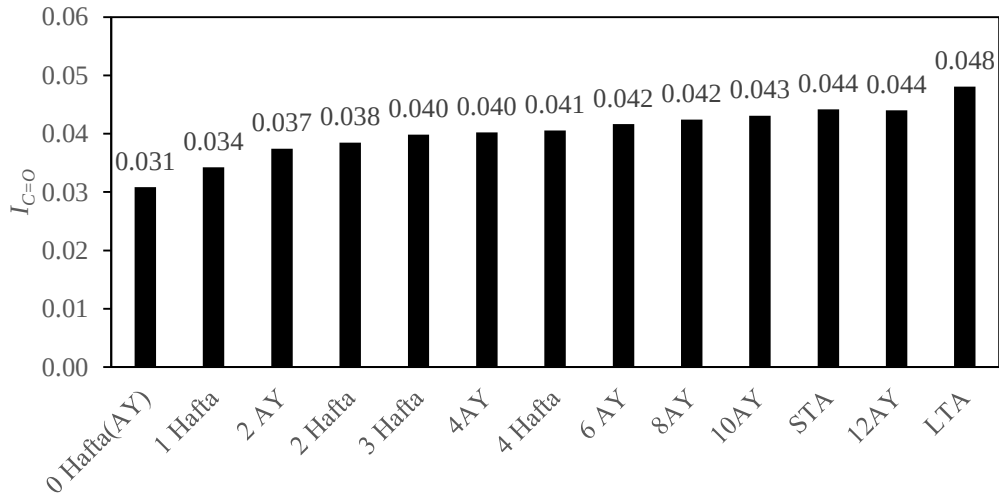


Şekil 6.48. Laboratuvarda yaşlandırılmış CR modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi



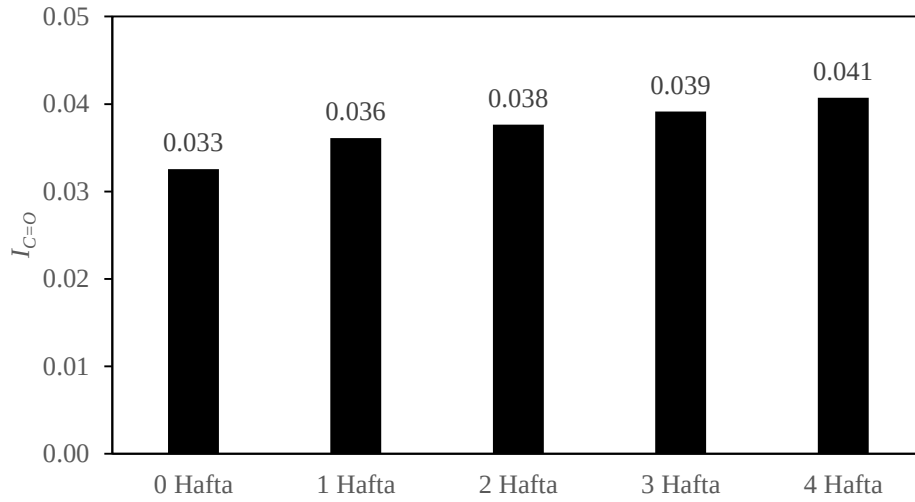
Şekil 6.49. Arazide yaşlandırılmış CR modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi

Şekil 6.50’de laboratuvar, arazide, laboratuvar kısa ve uzun dönem yaşlandırma yöntemlerine göre yaşlandırılmış 10-0 BSK numunelerinden alınan bağlayıcıların C=O indeksleri birlikte verilmiştir. Buna göre kısa dönem yaşlandırma sonucu oluşan C=O indeksi değerine laboratuvar 4 haftada ulaşamamış arazide ise 12.ayda ulaşılmıştır. Laboratuvar 4.haftada, arazide ise 12.ayda meydana gelen C=O indeksi LTA (uzun dönem yaşlandırma) sonrası oluşan C=O indeksinden düşük kalmaktadır. Laboratuvar 2.haftada meydana gelen C=O indeksinin arazide 2.ayda; 3 haftada oluşan C=O indeksinin arazide 4.ayda; 4 haftada oluşan C=O indeksinin ise arazide yaklaşık olarak 6.ayda meydana geldiği tespit edilmiştir.

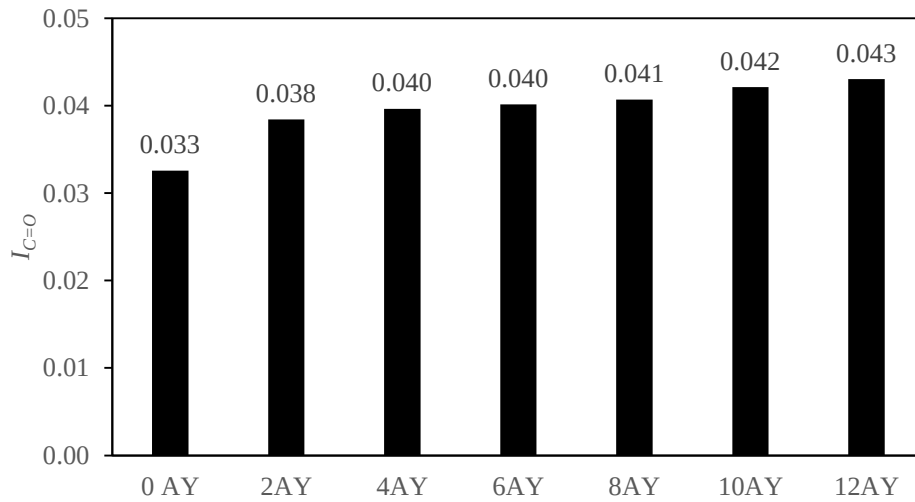


Şekil 6.50. Laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış 10-0 karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi

Laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış CR+Sasobit (10-3) modifiyeli numunelerden elde edilmiş bağlayıcıların C=O indeksindeki değişimi Şekil 6.51 ve 6.52’de verilmiştir. Laboratuvar ve arazide C=O indekslerinde başlangıçta hızlı bir artış daha sonra ise lineer bir artışın olduğu gözlenmiştir.



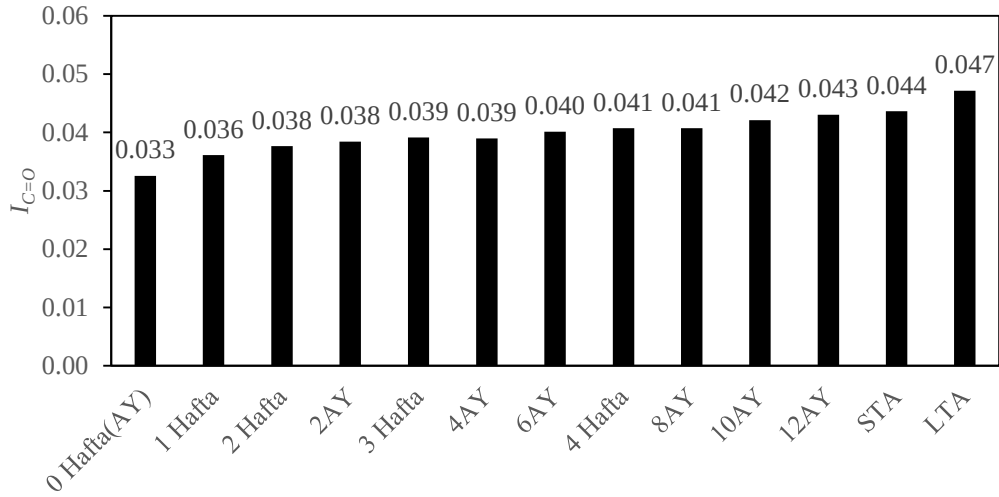
Şekil 6.51. Laboratuvarda yaşlandırılmış CR+Sasobit modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi



Şekil 6.52. Arazide yaşlandırılmış CR+Sasobit modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi

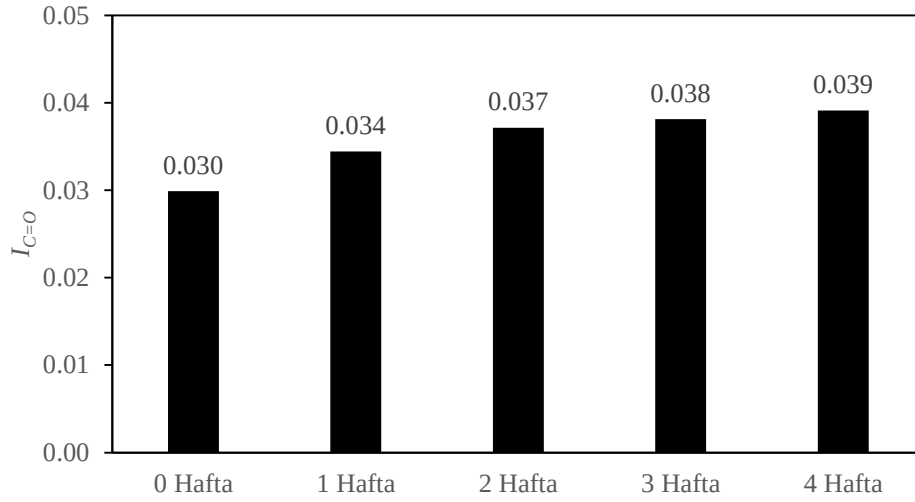
Şekil 6.53’te laboratuvar, arazide, laboratuvar kısa ve uzun dönem yaşlandırma yöntemlerine göre yaşlandırılmış 10-3 BSK numunelerinden alınan bağlayıcıların C=O indeksleri birlikte verilmiştir. Buna göre kısa dönem yaşlandırma sonucu oluşan C=O indeksi

değerine laboratuvarda 4 haftada ulaşılammamış arazide ise 12.ayda ulaşılmıştır. Laboratuvarda 4.haftada, arazide ise 12.ayda meydana gelen C=O indeksi LTA (uzun dönem yaşlandırma) sonrası oluşan C=O indeksinden düşük kalmaktadır. Laboratuvarda 2.haftada meydana gelen C=O indeksinin arazide 2.ayda; 3 haftada oluşan C=O indeksinin arazide 4.ayda; 4 haftada oluşan C=O indeksinin ise arazide yaklaşık olarak 8.ayda meydana geldiği tespit edilmiştir.

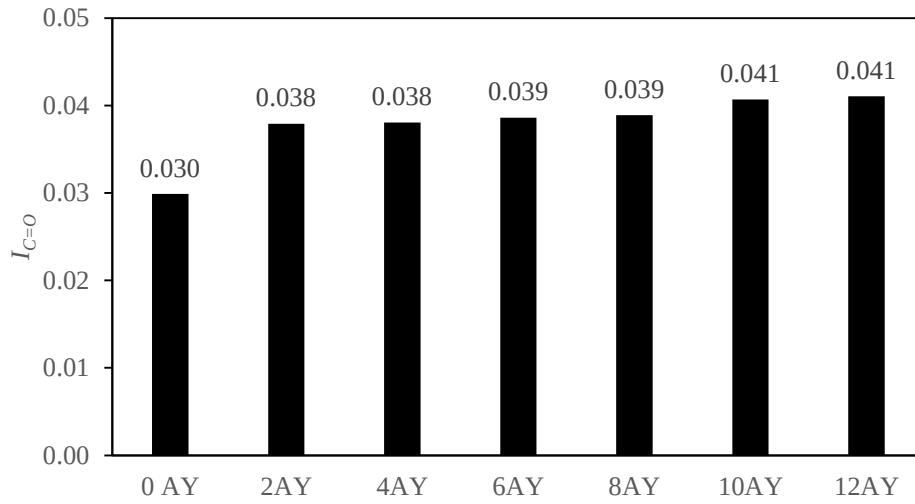


Şekil 6.53. Laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış CR+Sasobit modifiyeli karışımlardan alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi

Laboratuvarda ve arazide yaşlandırılmış CR+Evotharm (10-7) modifiyeli BSK numunelerinden elde edilmiş bağlayıcıların C=O indeksindeki değişimi Şekil 6.54 ve 6.55'te verilmiştir. Laboratuvar ve arazide C=O indekslerinde başlangıçta hızlı bir artış daha sonra ise lineer bir artışın olduğu gözlenmiştir.

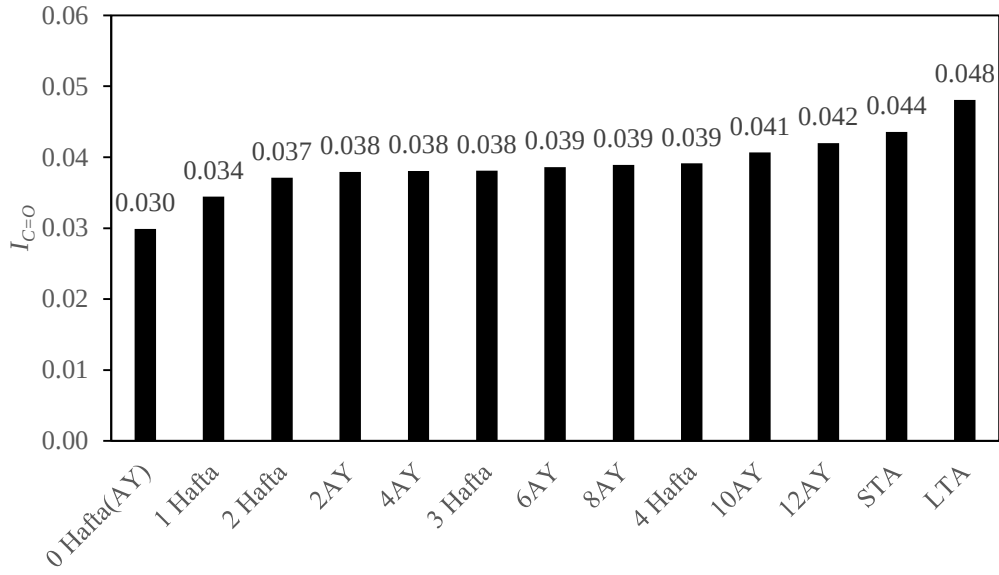


Şekil 6.54. Laboratuvarda yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi



Şekil 6.55. Arazide yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi

Şekil 6.56’da laboratuvarda, arazide, laboratuvarda kısa ve uzun dönem yaşlandırma yöntemlerine göre yaşlandırılmış 10-7 BSK numunelerinden alınan bağlayıcıların C=O indeksleri birlikte verilmiştir. Buna göre kısa dönem yaşlandırma sonucu oluşan C=O indeksi değerine laboratuvar ve arazi yaşlandırmasında ulaşamamıştır. Laboratuvarda 4.haftada, arazide ise 12.ayda meydana gelen C=O indeksi LTA (uzun dönem yaşlandırma) sonrası oluşan C=O indeksinden düşük kalmaktadır. Laboratuvarda 3.haftada meydana gelen C=O indeksinin arazide 2.ayda; 4 haftada oluşan C=O indeksinin ise arazide yaklaşık olarak 8.ayda meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 6.56. Laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış 10-7 karışımlarından alınan bağlayıcıların C=O indekslerindeki değişimi

Laboratuvarda farklı sürelerde meydana gelen yaşlanmalar ile standart kısa dönem test prosedüründe (STA) meydana gelen yaşlanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.57'deki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak STA sonucu oluşan C=O indeks değerlerinin hangi haftaya denk geldiği tespit edilmiştir. Buna göre saf bağlayıcı ile katkılı bağlayıcıların çok farklı yaşlanma karakteristiği izlediği görülmüştür. Saf bağlayıcının kısa dönem yaşlandırılmasıyla (STA) elde edilen C=O indeks değeri laboratuvarda 3 haftada oluşurken, 10-0; 5 haftada, 10-3; 6 haftada ve 10-7; 7 haftada oluşmaktadır. Kısa dönem yaşlandırma yöntemi katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre daha fazla yaşlanmasına neden olmuştur.

Standart uzun dönem test prosedüründe (LTA) meydana gelen yaşlanmaları karşılaştırmak amacıyla Şekil 6.58'deki eğrilerin denklemlerinden faydalanarak LTA sonucu oluşan C=O indeks değerlerinin hangi aya denk geldiği tespit edilmiştir. Saf bağlayıcının uzun dönem yaşlandırılmasıyla (LTA) elde edilen C=O indeks değeri arazide 6 ayda oluşurken, 10-0; 16 ayda, 10-3; 23 ayda ve 10-7; 37 ayda oluşmaktadır. LTA yöntemi katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre daha fazla yaşlanmasına neden olmuştur.

Tablo 6.12'de laboratuvarda 4.haftada arazide 12.ayda ayrıca kısa ve uzun dönem yaşlandırma sonrası BSK numunelerinden alınan bağlayıcıların C=O indeksleri verilmiştir.

Tablo 6.12. Farklı yaşlandırma yöntemlerinde elde edilen C=O indeksleri

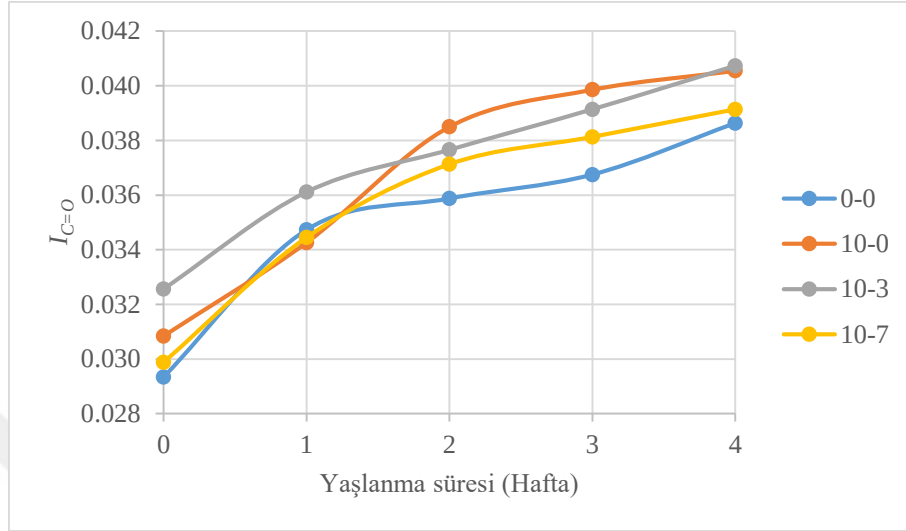
Bağlayıcı Tipi	Yaşlandırma yöntemi			
	Laboratuvar (4 Hafta)	Arazi (12 Ay)	STA	LTA
0-0	0.039	0.043	0.037	0.040
10-0	0.041	0.044	0.044	0.048
10-3	0.041	0.043	0.044	0.047
10-7	0.039	0.042	0.044	0.048

Tablo 6.12’den görüldüğü üzere standart yaşlandırma yöntemlerinde (STA-LTA) katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre daha fazla yaşlandığı laboratuvar ve arazide ise katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıyla aynı indeks değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu da standart yaşlandırma yönteminin CR modifiyeli karışımlar için uygun olmadığına işaret etmektedir.

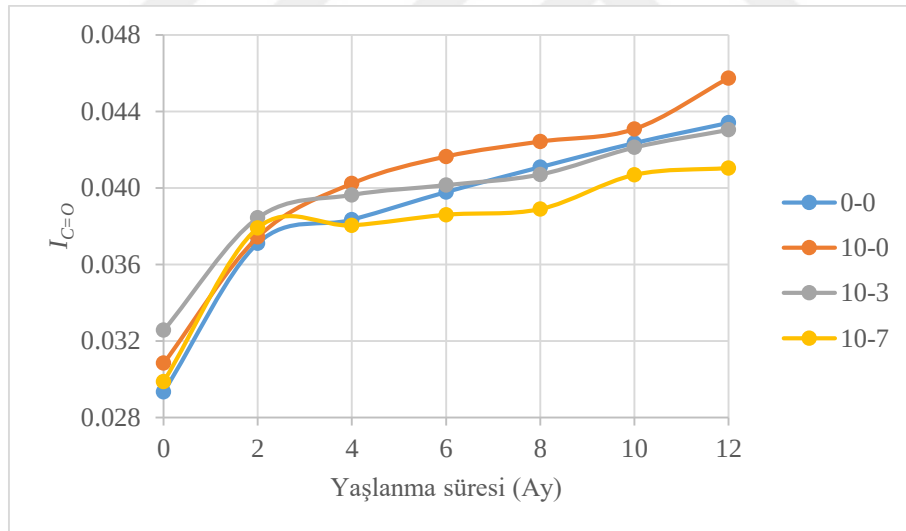
Şekil 6.57 ve 6.58’de karışımların karbonil ve sülfoksit indekslerindeki değişimi birlikte verilmiştir. Bağlayıcıların modifikasyonu ve karıştırma sırasında en fazla karbonil indeksi değerini 10-3 karışımı vermiştir. Laboratuvar ve çevresel şartlar altındaki karışımlar dikkate alındığında 10-3 karışımın başta daha fazla yaşlandığı (Şekil 6.42 ve 6.43’te görülmektedir) ancak yaşlanma prosedürü içinde daha az yaşlandığı tespit edilmiştir. Bu nedenle süreç içindeki yaşlanmayı tespit etmek için Tablo 6.13’te verilen oranların kullanılmasının daha uygun olacağı düşünülmektedir. Yaşlandırılmış numunelerin karbonil indeksleri ile yaşlandırılmamış numunelerin karbonil indeksleri oranı ile elde edilen yüzdesel değişimi gösteren Tablo 6.13’teki artış oranları kıyaslandığında laboratuvarda yaşlandırılan numuneler için özellikle 1.haftada, çevresel koşullar altında yaşlandırılan numuneler için de 2.ayda daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Saf bağlayıcının C=O indeksi 4. Hafta sonunda yaşlanmamış bağlayıcıya göre %35 artarken, katkılı bağlayıcıların bu süre sonundaki C=O indekslerindeki artış saf bağlayıcıdan daha düşüktür. Tablo 6.13’te görüldüğü üzere saf karışımların karbonil indeksinin düşük olmasına rağmen laboratuvar ve çevresel şartlar altındaki yaşlanma sürecinde en fazla yaşlanan karışım olduğu belirlenmiştir. Modifiyeli karışımlar arasında ise en az 10-3 karışımı en fazla 10-0 karışımının yaşlandığı tespit edilmiştir. Bu nedenle ılık asfalt katkılarının yaşlanmayı geciktirdiği belirlenmiştir.

C=O indekslerine bakıldığında saf karışımlara göre yalnız CR ve CR ile birlikte ılık asfalt katkılarının kullanılmasıyla daha fazla oksijenin bağlandığı görülmektedir. Bu da karışımın rijitliğinin artmasına neden olmuştur. Bu rijitlik artışı karışım deneylerinde de tespit edilmiştir.

Ancak sertleşmenin artması karışımların yaşlandırma süreleri içinde performans düşüşüne neden olmamıştır.



Şekil 6.57. Laboratuvarda 60 °C’de yaşlandırılmış karışımların C=O indekslerindeki değişimi



Şekil 6.58. Çevresel koşullar altında yaşlandırılmış karışımların C=O indekslerindeki değişimi

Tablo 6.13. Yaşlanmış numunelerin yaşlanmamış numunelere göre karbonil indeksindeki değişimi

Karışım Tipi	Yaşlanmış numunelerin yaşlanmamış numunelere göre karbonil indeksindeki değişimi(%)											
	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	2Ay	4Ay	6Ay	8Ay	10Ay	12Ay	STA	LTA
0-0	20	24	28	35	28	31	38	41	45	48	28	38
10-0	10	23	29	32	19	29	36	36	39	48	42	55
10-3	9	15	18	24	15	18	21	24	27	30	33	42
10-7	13	23	26	30	26	26	30	30	37	37	47	60

Tablo 6.14'te laboratuvarında farklı haftalarda yaşlandırılan numunelerin C=O indekslerinin arazide ne kadar süre yaşlandırma ile oluştuğu verilmiştir. Buna göre saf bağlayıcı için laboratuvarındaki ilk 3 hafta arazide 2 aydan daha kısa zamanda meydana gelen yaşlanmaya eşdeğer iken 3.haftadan sonra meydana gelen yaşlanma arazide daha uzun sürelerde meydana gelmektedir. Katkılı bağlayıcılarda ise ilk 2 haftada oluşan C=O indeksleri arazide 2 ay süresinde oluşmaktadır. Arazi yaşlanmasına temsil etmek amacıyla laboratuvarında yapılacak yaşlandırmada saf bağlayıcıların en az 4 hafta katkılı bağlayıcıların ise en az 3 hafta yaşlandırılması uygun olacaktır. Katkılı bağlayıcıların standart yaşlandırma yöntemlerinden olumsuz yönde etkilendiği tespit edildiğinden yüksek sıcaklık ve kısa süreli yaşlandırma yerine düşük sıcaklık ve uzun süreli yaşlandırmanın araziye daha iyi temsil edeceği düşünülmektedir.

Tablo 6.14. Laboratuvarında yaşlandırılan numunelerin C=O indeksi bakımından arazideki karşılığı

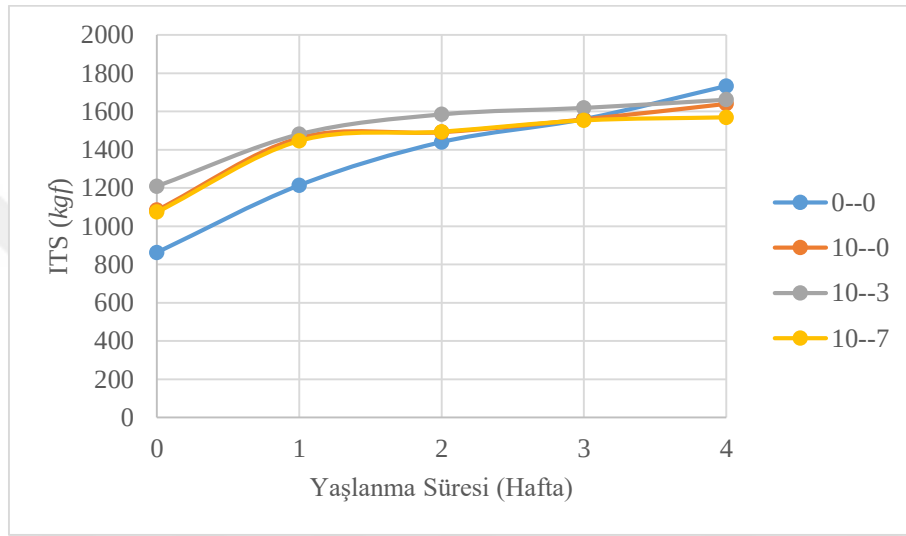
Yaşlandırma süresi (Hafta)	Laboratuvarında yaşlandırılan numunelerin arazideki karşılığı (Ay)			
	0-0	10-0	10-3	10-7
1	1.46	0.97	1.17	1.03
2	1.71	1.86	1.86	2.03
3	1.83	4.71	3.5	7.33
4	5.16	6.14	8.5	14

6.2. Karışım Deney Sonuçları

6.2.1. İndirekt Çekme Mukavemeti (ITS) Deney sonuçları

Arazi ve laboratuvarında yaşlandırılmış numuneler deneye tabi tutulmadan önce 25 °C su banyosunda 2 saat bekletilmiştir. Deney 50.8 mm/dk yükleme hızında yapılmıştır. Şekil 6.59'da laboratuvarında 60 °C'de etüvde yaşlandırılmış numunelerin ITS değerlerinin yaşlanma süresi ile

değişimi verilmiştir. Saf karışımın ITS değeri yaşlanma süresi ile katkılı karışımlara göre daha hızlı artmaktadır. Katkılı karışımların ITS değerlerindeki artış 1.haftadan sonra azalmaktadır. Yaşlanmamış durumda saf karışım en düşük ITS değerini, 10-3 karışımı ise en yüksek ITS değerini vermektedir. 10-3 karışımı yaşlanmamış durumda saf karışımdan %40, 10-0 ve 10-7 karışımları ise %25 daha fazla ITS değeri vermektedir. Bu sıralama 3.haftaya kadar devam etmektedir. 4.hafta sonunda saf karışım daha fazla yaşlanarak en yüksek ITS değerini vermiştir.

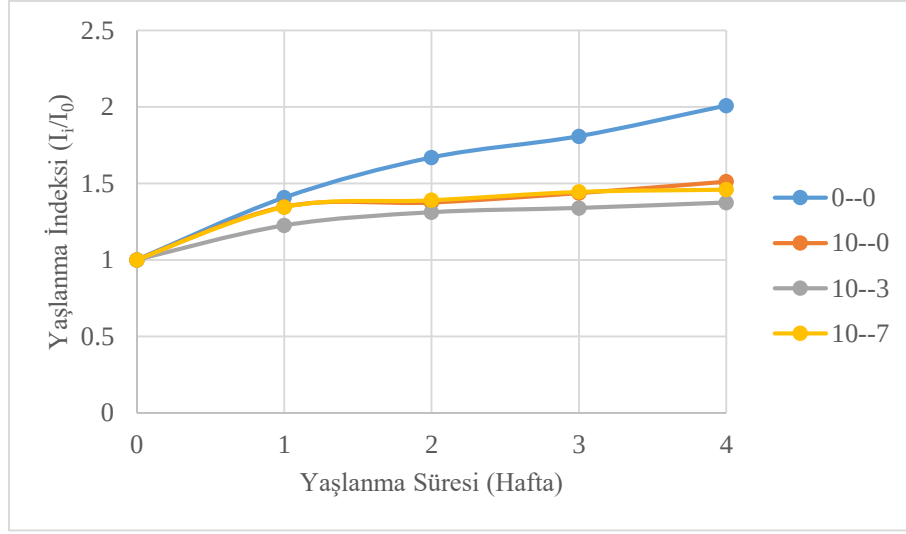


Şekil 6.59. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin ITS değerlerindeki değişimi

Tablo 6.15'te laboratuvarda yaşlandırılmış karışımların ITS değerleri ve yaşlanma indeksleri Şekil 6.60'da ise karışımların yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresine göre değişimi grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 6.15. Laboratuvar yaşlandırması sonrası ITS değerleri ve yaşlanma indeksleri

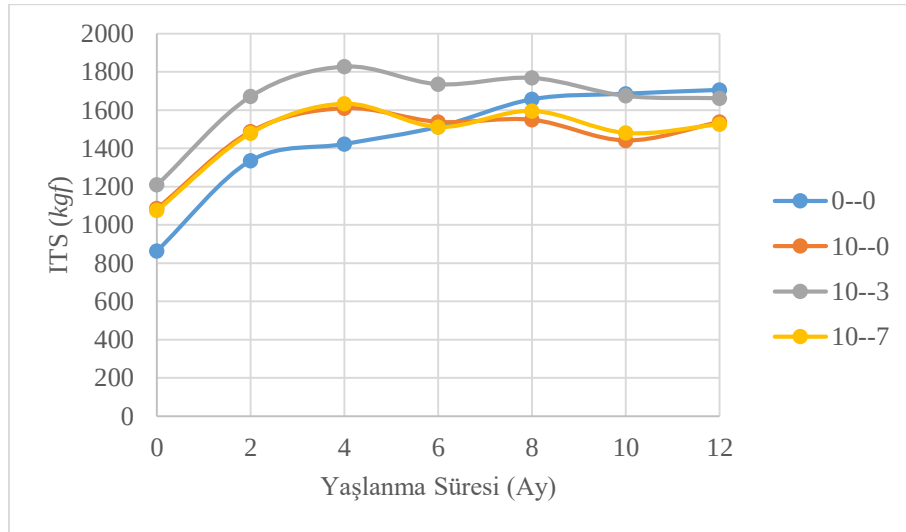
Katkı Tipi	0 Hafta	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	$(I_1)/(I_0)$	$(I_2)/(I_0)$	$(I_3)/(I_0)$	$(I_4)/(I_0)$
	(I ₀)	(I ₁)	(I ₂)	(I ₃)	(I ₄)				
	ITS (kgf)	ITS (kgf)	ITS (kgf)	ITS (kgf)	ITS (kgf)				
0-0	863	1214	1440	1560	1733	1.41	1.67	1.81	2.01
10-0	1085	1462	1492	1559	1640	1.35	1.38	1.44	1.51
10-3	1209	1481	1585	1619	1662	1.22	1.31	1.34	1.37
10-7	1075	1446	1494	1553	1569	1.35	1.39	1.44	1.46



Şekil 6.60. Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış numunelerin yaşlanma indeksindeki değişimi

Saf karışım katkılı karışımlara göre en çok ve en hızlı yaşılanan karışımdır. 10-3 karışımı en az yaşılanan karışımdır. Saf karışımın ITS değeri 4 hafta yaşlandırmadan sonra yaşılanmamış karışımın ITS değerinden 2 kat, 10-3 karışımı ise 1.37 kat artmaktadır. 10-0 ve 10-7 karışımları benzer yaşlanma özelliği göstermektedir.

Arazide yaşlandırılmış numunelerin ITS değerlerindeki değişim Şekil 6.61’de verilmiştir. ITS değerlerinde laboratuvar ortamında olduğu gibi saf karışımın ITS değeri zamanla sürekli artarken katkılı numunelerin ITS değerlerinde ilk 2 ayda meydana gelen artış daha sonra çok fazla değişmemektedir. 8. aya kadar 10-3 karışımı en yüksek ITS değerlerini vermektedir. 10-0 ve 10-7 karışımları bütün aylarda birbirine yakın ITS değerleri vermiştir.

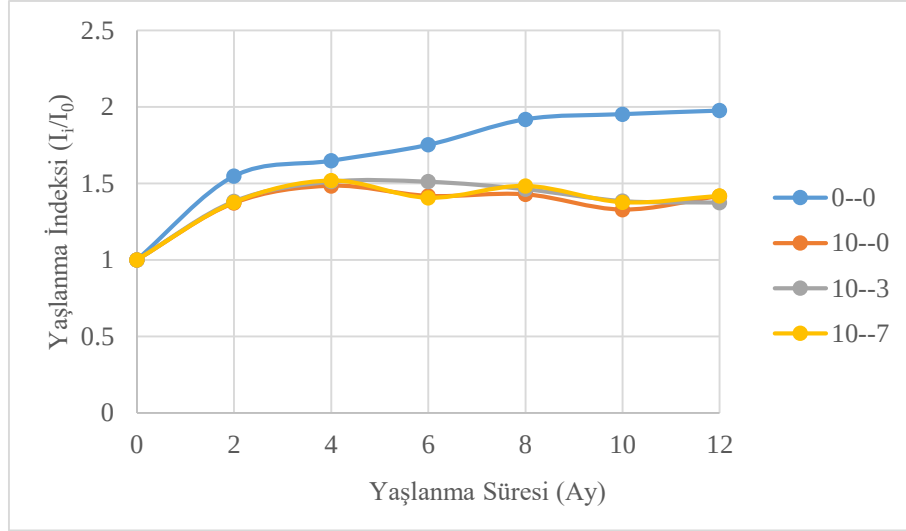


Şekil 6.61. Arazide yaşlandırılmış numunelerin ITS değerlerindeki değişimi

ITS değerlerinde zamanla meydana gelen artış yaşlanma sonucu meydana gelen rijitlik artışından kaynaklanmaktadır. Numunelerin yaşlanmadan nasıl etkilendiğini değerlendirmek amacıyla yaşlanma indeksleri belirlenmiştir. Tablo 6.16’da arazide yaşlandırılmış karışımların ITS değerleri ve yaşlanma indeksleri, Şekil 6.62’de ise karışımların yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresine göre değişimi grafiksel olarak verilmiştir. Bütün numuneler ilk 2 ayda hızlı bir şekilde yaşlanmaktadır. Katkılı numunelerin yaşlanma indeksleri 2 aydan sonra çok fazla değişmezken saf karışımın yaşlanma indeksi sürekli artmaktadır. Bu deney yöntemi ile ılık asfalt katkılarının yaşlanma üzerindeki etkisi açık bir şekilde ortaya çıkmamaktadır.

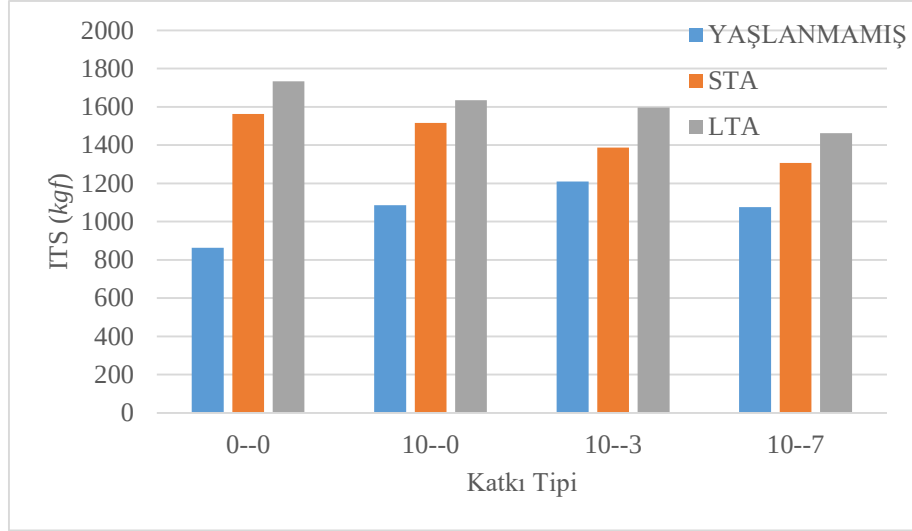
Tablo 6.16. Arazi yaşlandırması sonrası ITS değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri

Yaşlanma Süresi	0-0	10-0	10-3	10-7
	ITS (kgf)			
0 Ay (I ₀) (Yaşlandırılmamış)	863	1085	1209	1075
2 Ay (I ₂)	1335	1488	1672	1479
4 Ay (I ₄)	1422	1610	1827	1633
6 Ay (I ₆)	1512	1538	1735	1511
8 Ay (I ₈)	1656	1549	1768	1595
10 Ay (I ₁₀)	1685	1441	1674	1480
12 Ay (I ₁₂)	1705	1537	1662	1525
	I _i /I ₀			
(I ₂)/ (I ₀)	1.55	1.37	1.38	1.38
(I ₄)/ (I ₀)	1.65	1.48	1.51	1.52
(I ₆)/ (I ₀)	1.75	1.42	1.51	1.41
(I ₈)/ (I ₀)	1.92	1.43	1.46	1.48
(I ₁₀)/ (I ₀)	1.95	1.33	1.38	1.38
(I ₁₂)/ (I ₀)	1.98	1.42	1.37	1.42



Şekil 6.62. Arazide yaşlandırılmış numunelerin ITS deney sonuçlarına göre yaşlanma indekslerindeki değişimi

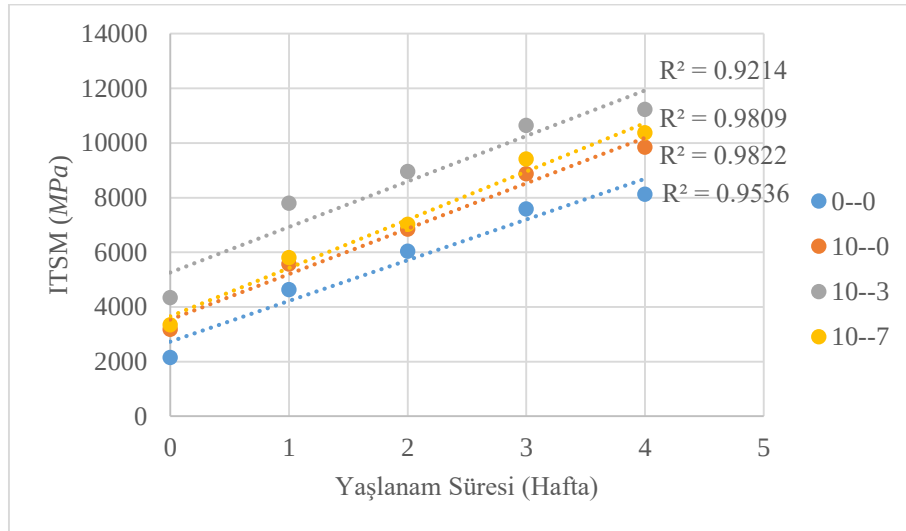
Şekil 6.63'te yaşlandırılmamış ve standart yaşlandırma yöntemlerine (STA-LTA) maruz bırakılmış karışımların ITS değerleri verilmiştir. Yaşlanmamış durumda en yüksek ITS değerini 10-3 karışımı verirken ve diğer katkılı numunelerde saf karışımdan daha yüksek ITS değeri verirken kısa ve uzun dönem yaşlandırma sonrası katkılı numuneler saf karışımdan daha düşük ITS değerleri vermektedir. Aynı durum yorulma deneylerinde de görülmüştür. Gerek laboratuvarında 60 °C'de ve gerekse arazide yaşlandırılan katkılı numunelerin rijitlik modülleri saf karışımdan yüksektir. Ancak AASHTO R30 yaşlandırma sonrası katkılı karışımlar saf karışıma göre yüksek rijitlik modülü buna karşın düşük ITS ve yük tekrar sayısı vermektedir. Katkılı karışımların ITSM değerleri artarken, yorulma deneyindeki yük tekrar sayıları ve ITS değerlerinin kısa ve uzun dönem yaşlandırma sonrası azalması bu karışımların daha az yaşlandığı anlamına gelmemektedir. Katkılı karışımların laboratuvarında (60 °C, 4 hafta) ve arazide yaşlandırılması sonrası yapılan karışım ve bağlayıcı deney sonuçlarına göre saf karışımdan yüksek değerler, buna karşın düşük yaşlanma indeksleri verdiği tespit edilmiştir. Ancak kısa ve uzun dönem yaşlandırma (STA-LTA) sonrası ITS ve yorulma deneyleri bakımından saf karışımdan daha düşük değerler vermektedir. ITSM deneyinde olduğu gibi yüklemelerin numunenin esneklik sınırı içerisinde yapılmadığı ITS ve yorulma deneylerinde, STA-LTA sonrası katkılı karışımların saf karışımdan daha düşük değerler vermesi kısa ve uzun dönem yaşlandırmaların CR içerikli karışımların kohezyon ve adezyon özelliklerini etkileyerek yapısal bozulmaya neden olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.63. Yaşlandırılmamış ve standart yöntemlerle yaşlandırılmış numuneleri ITS değerlerindeki değişim

6.2.2. İndirekt Çekme Rijitlik Modülü (ITSM) Deney Sonuçları

İndirekt çekme rijitlik modülü deneyi (ITSM) şekil değiştirme kontrollü olarak 25 °C’de yapılmıştır. Şekil değiştirme seviyesi 5 mikron seçilmiştir. Şekil 6.64’te laboratuvarında 60 °C’lik etüvde farklı sürelerde bekletilen saf ve katkılı karışımların rijitlik modüllerindeki değişim verilmiştir.



Şekil 6.64. Laboratuvarında yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülündeki değişimi

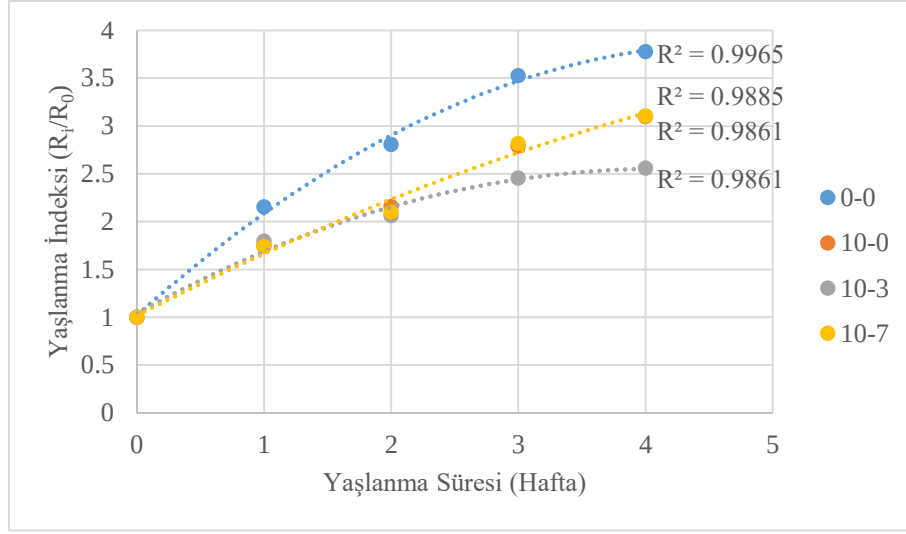
Laboratuvardaki yaşlanma süresi ile rijitlik modülleri arasında lineer bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. 4 haftalık bir yaşlanma süresi için yaşlanma süresi arttıkça saf ve katkılı

numunelerin rijitlik modülleri sürekli olarak artmaktadır. 10-3 karışımı en yüksek saf karışım ise en düşük rijitlik modülü değerlerine sahiptir. 10-3 karışımı saf karışımdan 1, 2, 3 ve 4 hafta yaşlanmadan sonra sırasıyla 2, 1.68, 1.48 ve 1.40 kat daha fazla rijitlik modülü değeri vermektedir. Bu değerlerin yaşlanma süresinin artması ile azalması saf karışımın zamanla meydana gelen rijitlik artışının daha fazla olduğunu göstermektedir. 10-0 ve 10-7 karışımları benzer performans göstermiştir.

Tablo 6.17’de laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülleri ve yaşlanma indeksleri Şekil 6.65’te ise yaşlanma indekslerinin grafiksel değişimi verilmiştir. Yaşlanma indekslerindeki artış bütün numuneler için yaşlanma süresine bağlı olarak azalarak devam etmektedir. Saf karışımın rijitlik modülü yaşlanmamış karışıma göre 4 hafta sonunda 3.78 kat artarken 10-3 karışımı 2.56 kat artmaktadır. Saf karışım en hızlı yaşlanan karışımdır. 10-3 karışımının yaşlanma hızı 3. haftadan sonra önemli derecede azalmaktadır. 10-0 ve 10-7 karışımları yaşlanma karakteristiği bakımından çok benzer bir performans göstermiştir.

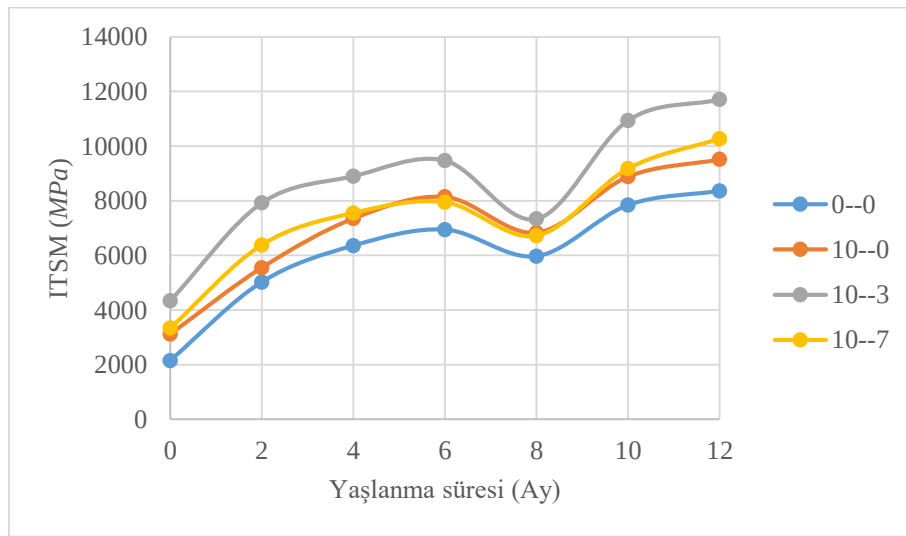
Tablo 6.17. Laboratuvar yaşlandırması sonrası rijitlik modülleri ve yaşlanma indeksleri

Katlı Tipi	0 Hafta	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	$(R_1)/(R_0)$	$(R_2)/(R_0)$	$(R_3)/(R_0)$	$(R_4)/(R_0)$
	(R_0)	(R_1)	(R_2)	(R_3)	(R_4)				
	ITSM (MPa)	ITSM (MPa)	ITSM (MPa)	ITSM (MPa)	ITSM (MPa)				
0-0	2150	4632	6036	7586	8124	2.15	2.81	3.53	3.78
10-0	3177	5566	6852	8871	9843	1.75	2.16	2.79	3.10
10-3	4338	7790	8955	10648	11230	1.80	2.06	2.45	2.56
10-7	3340	5809	7023	9416	10377	1.74	2.10	2.82	3.11



Şekil 6.65. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülüne deneyine göre yaşlanma indeksindeki değişimi

Şekil 6.66'da arazide yaşlandırılmış saf ve katkılı numunelerin rijitlik modülündeki değişim verilmiştir. İlk 2.ayda bütün numunelerin rijitlik modüllerinde hızlı bir artış meydana gelmektedir. Daha sonra zaman ile artışlar devam etmektedir. Ancak 8.ayda yağışların numuneleri etkilemesi nedeni ile bütün karışımların rijitlik modüllerinde bir düşüş meydana gelmektedir. En yüksek rijitlik modülü değerlerini 10-3 karışımı en düşük rijitlik modülü değerlerini ise saf karışım vermiştir. Laboratuvar yaşlandırmasında olduğu gibi burada da 10-0 ve 10-7 karışımları benzer performans göstermiştir.

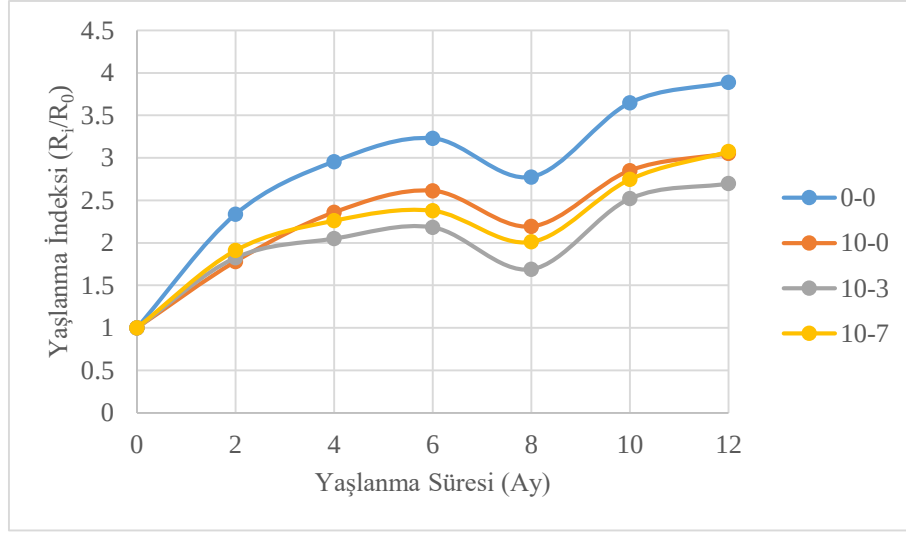


Şekil 6.66. Arazide yaşlandırılmış saf ve katkılı numunelerin rijitlik modülündeki değişim

Tablo 6.18’de arazide yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülleri ve yaşlanma indeksleri Şekil 6.67’de ise yaşlanma indekslerinin grafiksel değişimi verilmiştir. En fazla yaşlanan karışım saf karışım, en az yaşlanan karışım ise 10-3 karışımıdır. Saf karışımın 12 ay sonraki rijitlik modülü yaşlanmamış karışımın rijitlik modülüne göre 3.89 kat artmaktadır. 10-3 karışımında bu değer 2.70 kat olmaktadır. 8.ayda yaşlanma indekslerinde meydana gelen azalış bu aydaki yağışlar nedeni ile rijitlik modüllerinde meydana gelen azalıştan kaynaklanmaktadır. 10-0 ve 10-7 karışımları laboratuvarında olduğu gibi arazide de yaşlanma karakteristiği bakımından benzer performans göstermiştir. Saf karışımın yaşlanma hızı katkılı karışımlardan açık bir şekilde daha fazla olmaktadır. 10-3 karışımının yaşlanma hızı 2.aydan sonra önemli derecede azalmaktadır.

Tablo 6.18. Arazi yaşlandırması sonrası rijitlik modülü değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri

Yaşlanma Süresi	0-0	10-0	10-3	10-7
ITSM (MPa)				
0 Ay (R ₀) (Yaşlandırılmamış)	2150	3117	4338	3340
2 Ay (R ₂)	5022	5552	7920	6383
4 Ay (R ₄)	6357	7351	8900	7554
6 Ay (R ₆)	6943	8145	9473	7947
8 Ay (R ₈)	5969	6836	7334	6721
10 Ay (R ₁₀)	7841	8886	10941	9178
12 Ay (R ₁₂)	8362	9517	11707	10272
R _i /R ₀				
(R ₂)/ (R ₀)	2.34	1.78	1.83	1.91
(R ₄)/ (R ₀)	2.96	2.36	2.05	2.26
(R ₆)/ (R ₀)	3.23	2.61	2.18	2.38
(R ₈)/ (R ₀)	2.78	2.19	1.69	2.01
(R ₁₀)/ (R ₀)	3.65	2.85	2.52	2.75
(R ₁₂)/ (R ₀)	3.89	3.05	2.70	3.08



Şekil 6.67. Arazide yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülü deneyine göre yaşlanma indeksindeki değişimi

Tablo 6.19’da laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin rijitlik modülleri açısından arazide ne kadar sürede meydana geldiği verilmiştir. Laboratuvarda ilk 2 haftada meydana gelen yaşlanma arazide 3-5 ay arasında meydana gelirken 2. haftadan sonra meydana gelen yaşlanma 10-12 ayda meydana gelmektedir. Laboratuvarda meydana gelen yaşlanmanın 2 haftadan sonra önemli hale geldiği görülmektedir. Laboratuvarda oluşan yaşlanmanın arazide oluşabilmesi için katkılı numuneler ile saf karışımlar arasında önemi bir fark oluşmamaktadır. Arazi şartlarında en geç yaşlanan karışım 10-0 karışımıdır. Şekil 6.67’de görüldüğü üzere laboratuvarda uygulanan yaşlandırma yöntemi ile arazi yaşlanması arasında bir uyum söz konusudur.

Tablo 6.19. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin rijitlik modülü bakımından arazideki karşılığı

Yaşlandırma süresi (Hafta)	Arazideki yaşlanma süresi (Ay)			
	0-0	10-0	10-3	10-7
1	1.73	1.98	1.92	1.62
2	3.85	3.74	4.49	3.30
3	10.32	10.68	10.59	10.78
4	11.22	12.13	11.13	11.86

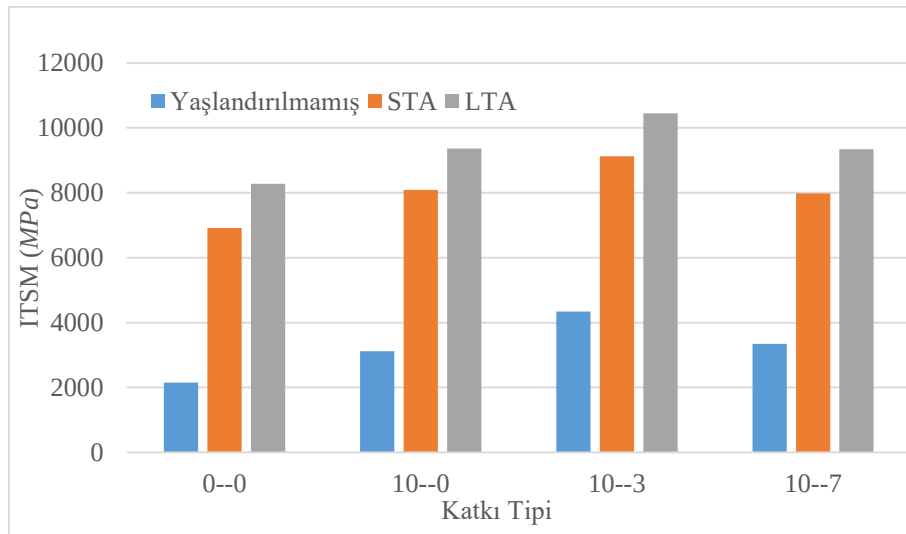
Rijitlik modülü bakımından laboratuvar ve arazi yaşlandırma koşulları karşılaştırıldığında saf ve katkılı numuneler arasında önemli bir fark oluşmamaktadır. Laboratuvarda saf ve katkılı numunelerin 4 hafta sonraki rijitlik modülleri arazide bütün numune tipleri için 11-12 ay yaşlandırma süresinde elde edilmektedir. Bu durum, katkının yaşlandırmadan nasıl etkilendiğini anlamak amacıyla laboratuvarda ya da arazide yaşlandırılması durumunda rijitlik

modüllerine göre herhangi bir farkın oluşmayacağına işaret etmektedir. Diğer bir ifadeyle rijitlik modülü bakımından katkı tipi gözetilmeksizin laboratuvar yaşlandırması arazi yaşlandırmasını çok iyi bir şekilde temsil etmektedir.

Tablo 6.20’de yaşlandırılmamış, laboratuvarda kısa (STA) ve uzun (LTA) dönem yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülü değerleri ve yaşlanma indeksleri, Şekil 6.68’de ise değerlerin grafiksel değişimi verilmiştir. Yaşlanma indekslerine göre hem kısa hem de uzun dönem yaşlandırma prosedüründen en az etkilenen karışım tipi 10-3 karışımıdır. Diğer katkılı karışımlar da saf karışıma göre daha az yaşlanmaktadır. Şekil 6.68’e göre kısa ve uzun dönem yaşlandırma sonrası rijitlik modüllerindeki farkın az olduğu görülmektedir. Uzun dönem yaşlandırma sonrası meydana gelen rijitlik artışının %80-85’lik kısmının kısa dönem yaşlandırmada meydana geldiği tespit edilmiştir.

Tablo 6.20. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülleri ve yaşlanma indeksleri

Numune Tipi	Yaşlandırılmamış	STA	LTA	STA	LTA
				Yaşlanmamış	Yaşlanmamış
0-0	2150	6915	8277	3.21	3.85
10-0	3117	8094	9357	2.59	3.00
10-3	4338	9125	10446	2.10	2.40
10-7	3340	7979	9340	2.38	2.79



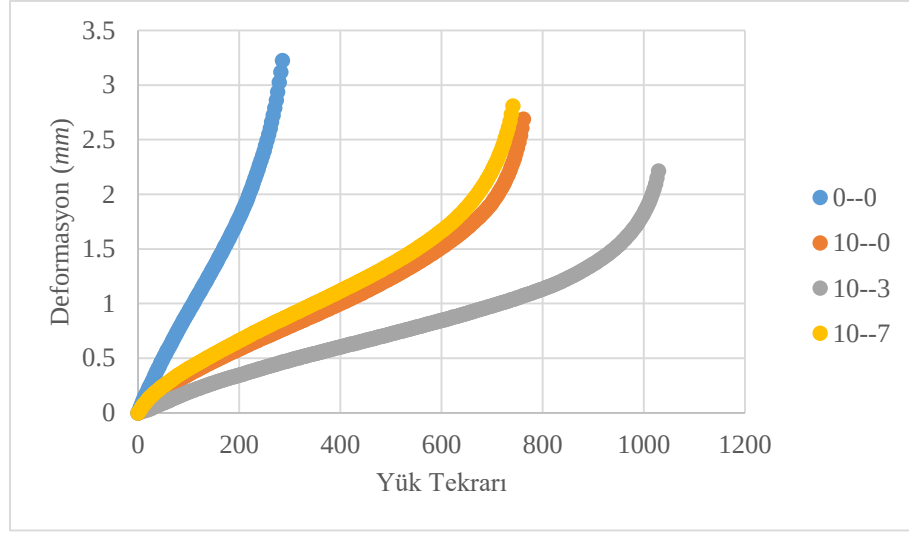
Şekil 6.68. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin rijitlik modülündeki değişimi

STA sonrası elde edilen rijitlik modülü değerleri laboratuvar yaşlandırılmasında saf karışım için 2.81 hafta, 10-0 karışımı için 2.74 hafta, 10-3 karışımı için 2.32 hafta ve 10-7 karışımı için 2.44 haftada elde edilmektedir. Bu da katkılı karışımların laboratuvarda ilk haftalarda hızlı bir şekilde yaşlandığına işaret etmektedir.

Uzun dönem yaşlandırma (LTA) sonrası elde edilen rijitlik modülü değerleri arazi yaşlandırılmasında saf karışım için 11.48 ayda, 10-0 karışımı için 11.40 ayda, 10-3 karışımı için 10.41 ayda ve 10-7 karışımı için 11.09 ayda elde edilmektedir. LTA yönteminin saf ya da katkılı karışımlar üzerindeki etkisi arazide yaklaşık 11 ayda gerçekleşmektedir. Laboratuvarda 60 °C’de 4 hafta bekletilen numunelerin rijitlik modülleri ile laboratuvarda 85 °C’de 5 gün (LTA) bekletilen numunelerin rijitlik modülü değerleri benzer çıkmaktadır. Aynı zamanda bu değerler arazide yıllık ortalama 14 °C (Meteorolojiden alınan 1 Haziran 2016-31 Mayıs 2017 arasındaki bir yıllık veriler dikkate alınmıştır) sıcaklıkta 12 ayda elde edilmektedir. Buna göre BSK’ların yaşlanmaları üzerinde sıcaklık büyük bir etkiye sahiptir. Aynı yaşlanma etkisinin oluşabilmesi için sıcaklıktaki küçük bir azalış çok daha uzun yaşlandırma süresi gerektirmektedir.

6.2.3. İndirekt Çekme Yorulma Deneyi

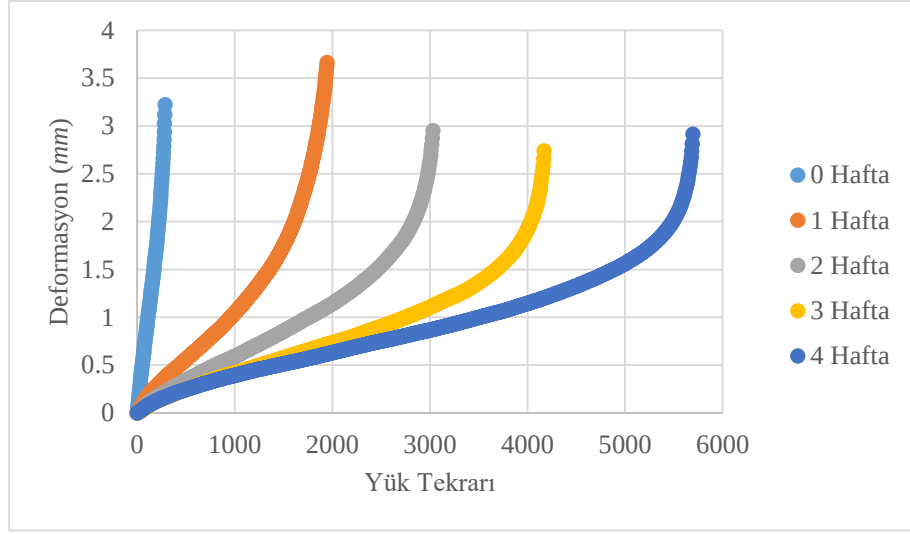
Yaşlandırılmamış, laboratuvarda 60 °C’de, arazide ve R30 yöntemine göre kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış BSK numunelerine indirekt çekme yorulma deneyi uygulanmıştır. Deney 400 kPa gerilme seviyesinde ve 25 °C’de yapılmıştır. Numuneler kırılıncaya kadar yük tekrarı devam etmiştir. Her bir karışım tipinden 3 numune deneye tabi tutulmuştur. Şekil 6.69’da yaşlandırılmamış numunelerin yük tekrar ve deformasyon ilişkisi verilmiştir. Şekildeki eğriler 3 numunenin ortalamasına en yakın olan numunenin değerleridir.



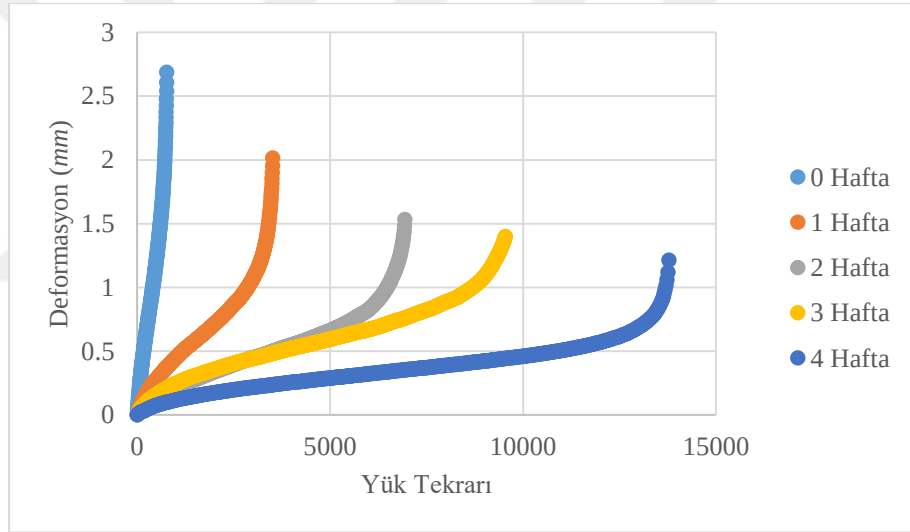
Şekil 6.69. Yaşlandırılmamış numunelerin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi

Bütün numuneler başlangıçta yük tekrarı ile hızlı bir deformasyon yapmakta daha sonra deformasyon artışı lineer olarak devam etmekte, çatlak oluşuktan sonra, deney gerilme kontrollü yapıldığı için, deformasyon hızlı bir şekilde oluşmaktadır. Katkılı bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre yük tekrarına çok uzun süre dayanmaktadır. 10-3 karışımı en fazla yük tekrarına sahip olmuştur. 10-0 ve 10-7 bağlayıcıları benzer performans göstermiştir. 10-3 numunesi saf numuneye göre 3.6 kat, 10-0 ve 10-7 numunesi 2.6 kat daha fazla yük tekrar sayısı vermiştir.

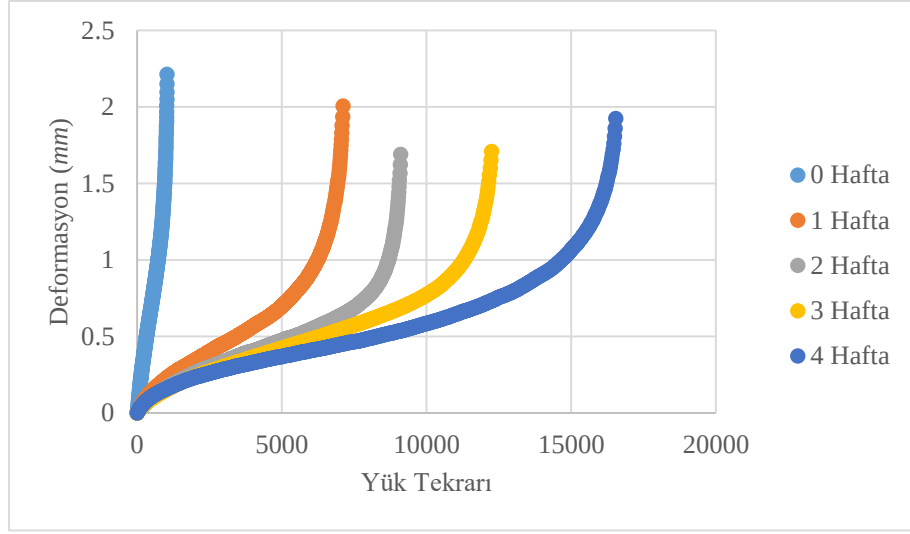
Şekil 6.70-6.73'te laboratuvarında 60 °C'lik etüvde 0, 1, 2, 3 ve 4 hafta yaşlandırılan numunelerin yük tekrarı-deformasyon ilişkileri verilmiştir. Bütün numunelerde yaşlandırma süresinin artması ile yük tekrar sayılarının düzenli olarak arttığı görülmektedir. Çatlağın oluşmaya başladığı deformasyon seviyeleri numune tiplerine göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca çatlak oluşuktan sonraki deformasyon artış hızının 4 hafta yaşlandırılmış numunelerde fazla olduğu görülmektedir. 4 hafta yaşlandırmadan sonra 10-3 karışımı hariç diğer karışımların deformasyon artışı çatlak oluşuktan sonra çok hızlı gelişmektedir. 10-3 karışımında ise ani bir deformasyon artışı olmamakta bu da yaşlanma etkisi sonrasında çatlak ilerleyişine karşı direncinin diğer karışımlardan daha iyi olduğuna işaret etmektedir.



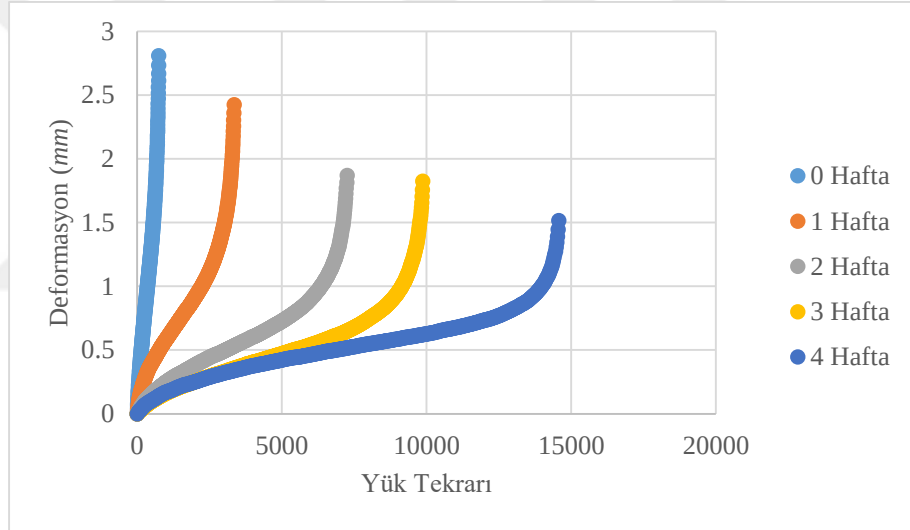
Şekil 6.70. Laboratuvarda yaşlandırılmış saf numunelerin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi



Şekil 6.71. Laboratuvarda yaşlandırılmış 10-0 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi

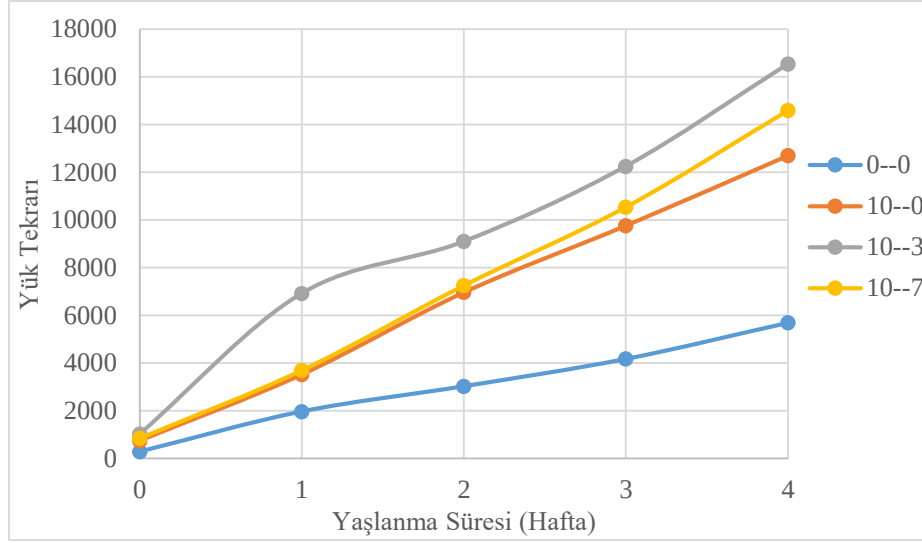


Şekil 6.72. Laboratuvarında yaşlandırılmış 10-3 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi



Şekil 6.73. Laboratuvarında yaşlandırılmış 10-7 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi

Şekil 6.74'te laboratuvarında 0, 1, 2, 3 ve 4 hafta yaşlandırılan numunelerin kırılmaya neden olan yük tekrar sayıları bir arada verilmiştir. Yük tekrar sayıları laboratuvardaki yaşlanma süresiyle bütün numune tipleri için lineer olarak artmaktadır. En yüksek yük tekrar sayılarını 10-3 karışımı vermiştir. 10-0 ve 10-7 karışımları 2.haftaya kadar benzer performans gösterirken daha uzun süreli yaşlandırmalarda 10-7 karışımı 10-0'dan bir miktar daha fazla yük tekrar sayısı vermektedir. 10-3, 10-7, 10-0 karışımları 4 hafta yaşlandırma sonrasında saf karışıma göre sırasıyla 2.9, 2.56 ve 2.23 kat daha fazla yük tekrar sayısı vermektedir.

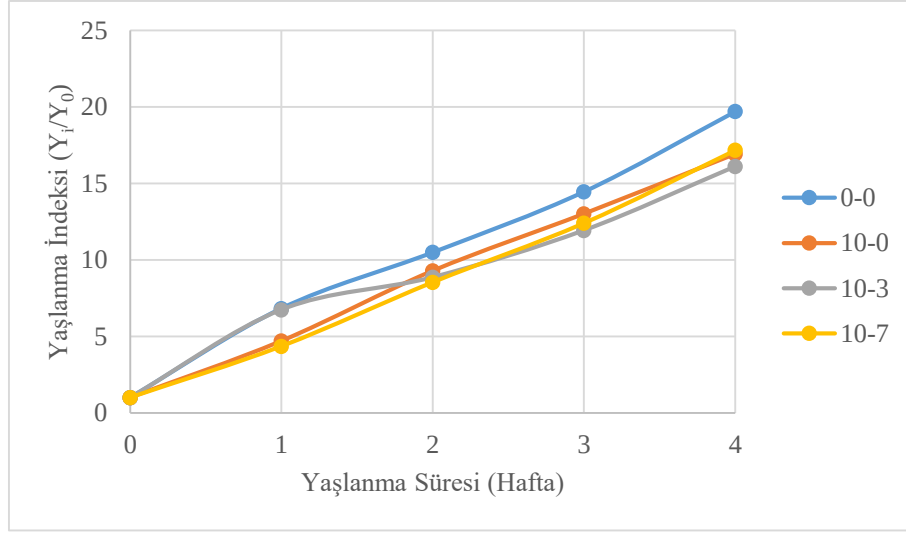


Şekil 6.74. Karışımların laboratuvarda farklı yaşlandırma sürelerindeki yük tekrar sayıları arasındaki ilişkisi

Tablo 6.21’de laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar sayıları ve yaşlanma indeksleri Şekil 6.75’te ise yaşlanma indekslerinin grafiksel değişimi verilmiştir. Numunelerin yaşlanma indeksleri yaşlanma süresi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. 4 hafta sonunda en fazla yaşlanan karışım saf karışımdır. En az yaşlanan karışım ise 10-3 karışımıdır. Karışımların yük tekrar sayıları 4 hafta yaşlandırma sonunda yaşlandırılmamış numunelerin yük tekrar sayılarına göre yaklaşık olarak 16-20 kat artmaktadır. 10-3 karışımı ilk haftada hızlı bir şekilde yaşlanmakta daha sonra yaşlanma hızı azalmaktadır.

Tablo 6.21. Laboratuvar yaşlandırması sonrası yük tekrarı değerleri ve yaşlanma indeksleri

Katlı Tipi	0 Hafta	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	$(Y_1)/(Y_0)$	$(Y_2)/(Y_0)$	$(Y_3)/(Y_0)$	$(Y_4)/(Y_0)$
	(Y ₀)	(Y ₁)	(Y ₂)	(Y ₃)	(Y ₄)				
	Yük Tekrarı	Yük Tekrarı	Yük Tekrarı	Yük Tekrarı	Yük Tekrarı				
0-0	289	1972	3031	4177	5692	6.82	10.49	14.45	19.70
10-0	750	3524	6964	9763	12698	4.70	9.29	13.02	16.93
10-3	1027	6923	9100	12250	16540	6.74	8.86	11.93	16.11
10-7	850	3700	7255	10540	14587	4.35	8.54	12.40	17.16

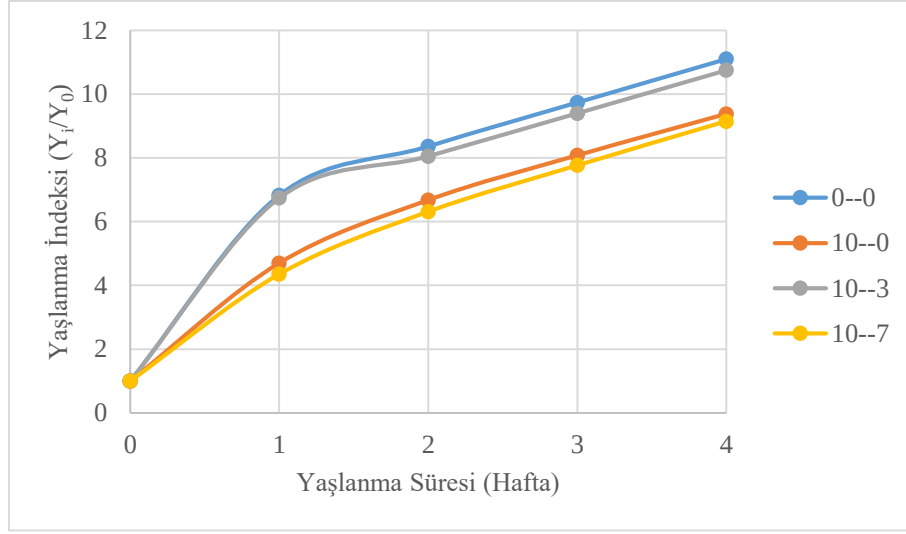


Şekil 6.75. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin yorulma deneyine göre yaşlanma indekslerindeki değişimi

Şekil 6.76’da karışımlarda her hafta meydana gelen yaşlanma indekslerinin üst üste toplanması ile elde edilen kümülatif yaşlanma karakteristikleri verilmiştir. 1, 2, 3 ve 4 haftalara karşılık gelen kümülatif yaşlanma indeksleri Tablo 6.22’de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

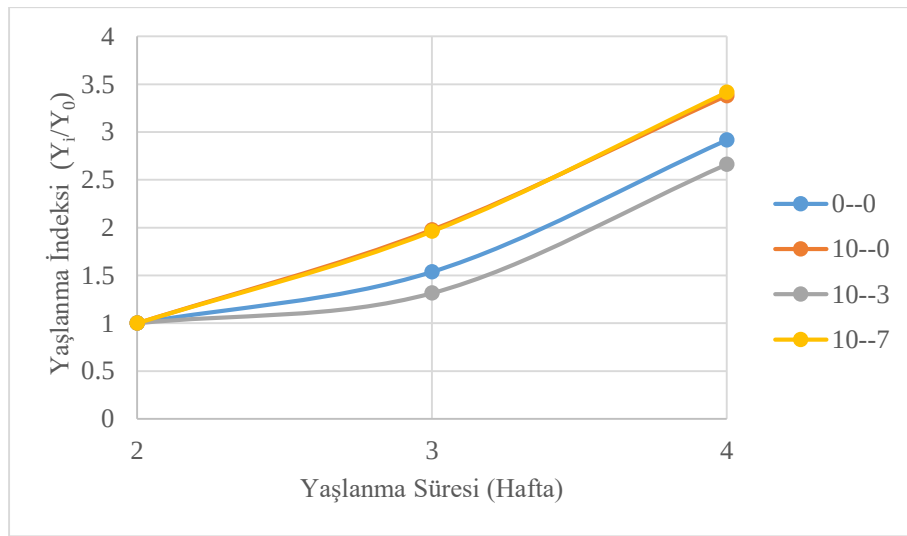
Tablo 6.22. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerinin belirlenme yöntemi

Yaşlanma Süresi (Hafta)	Kümülatif Yaşlanma İndeksi Belirleme Yöntemi
1	$1/0$
2	$1/0 + 2/1$
3	$1/0 + 2/1 + 3/2$
4	$1/0 + 2/1 + 3/2 + 4/3$



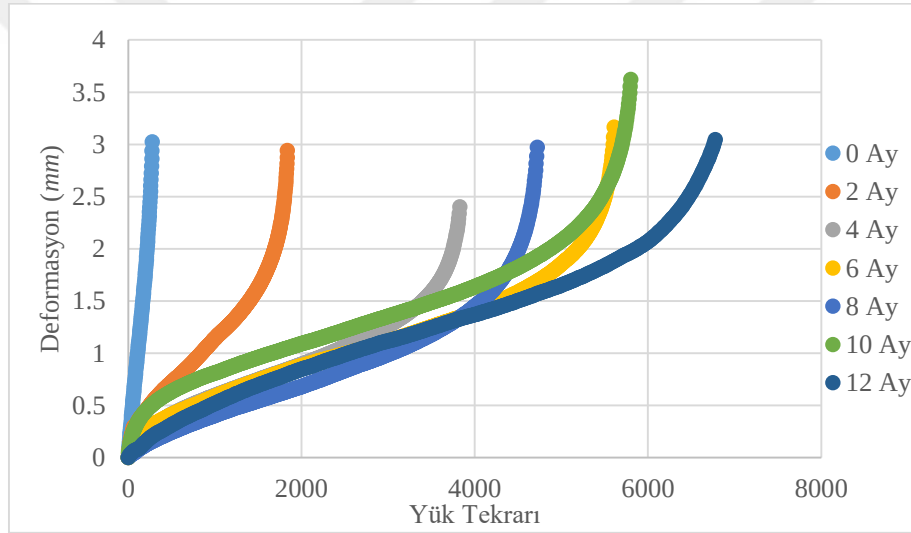
Şekil 6.76. Laboratuvar ortamında yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi

Bütün karışımlar ilk hafta hızlı bir şekilde yaşlanmakta saf ve 10-3 karışımı ise en fazla yaşlanan karışımlardır. Kümülatif yaşlanma indeksi bir önceki dönemde meydana gelen yaşlanmaların üst üste toplanması ile tespit edildiğinden ilk hafta yüksek bir yaşlanma indeksi veren saf ve 10-3 karışımı grafikte sürekli en üstte yer almıştır. Kümülatif yaşlanma indeksleri, ilk hafta meydana gelen yaşlanmayı dikkate alınmadan tespit edilmesi durumunda Şekil 6.77’de görüldüğü üzere 10-3 karışımı en az yaşlanan karışım tipi olmaktadır. Bu durum daha öncede belirtildiği üzere 10-3 karışımının ileriki dönemlerdeki yaşlanmasının diğer karışım tiplerine göre daha az olduğuna işaret etmektedir.

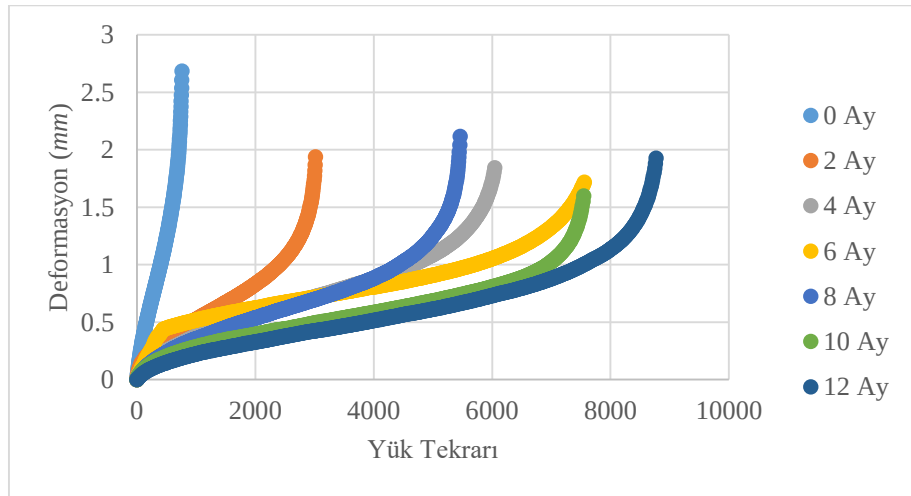


Şekil 6.77. Laboratuvar ortamında 2, 3 ve 4 hafta yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi

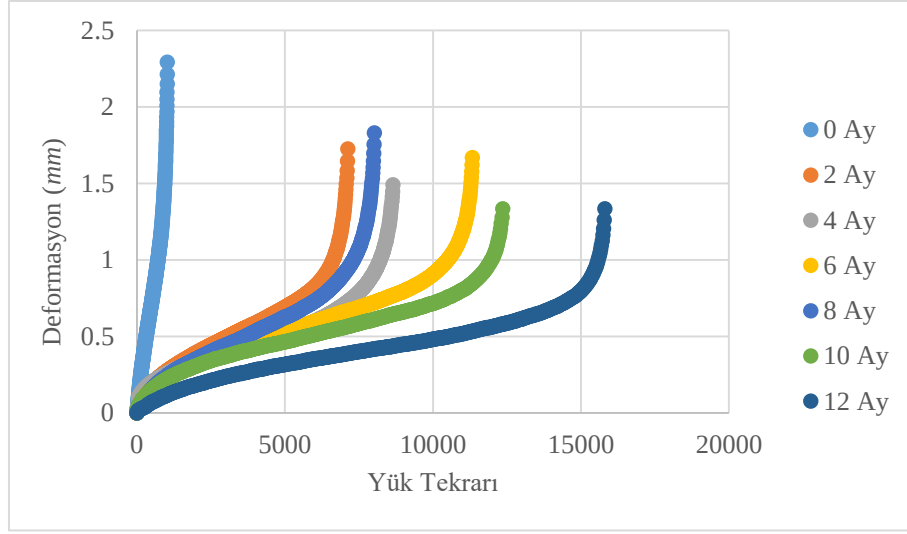
Şekil 6.78-6.81’de arazide çevresel koşullar altında 2 aylık dönemlerle 12 ay süresince yaşlandırılan karışımların yük tekrarı – deformasyon ilişkisi verilmiştir. Bütün numunelerde laboratuvarında olduğu gibi burada da zamanla artan bir yaşlanma meydana gelmektedir. Katkılı numunelerde yük tekrar sayısı artarken deformasyon miktarı azalmaktadır. Çatlak oluşuktan sonra çatlak ilerleme hızı en fazla 10-3 ve 10-7 karışımında olmaktadır. Bu durum uzun süre tekrarlı yüklere direnç gösterecek kadar rijitliğe sahip karışımlarda beklenen bir durumdur. Saf karışımında diğer karışımlara göre daha az yük tekrarı ve daha fazla deformasyon oluşmaktadır. Bu durum ise rijitliğin az olup tekrarlı yüklere uzun süre dayanamamasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca saf karışımın katkılı karışımlardan daha fazla deformasyon yapması ağır yüklere katkılı karışımlar kadar dayanamayacağı anlamına gelmektedir.



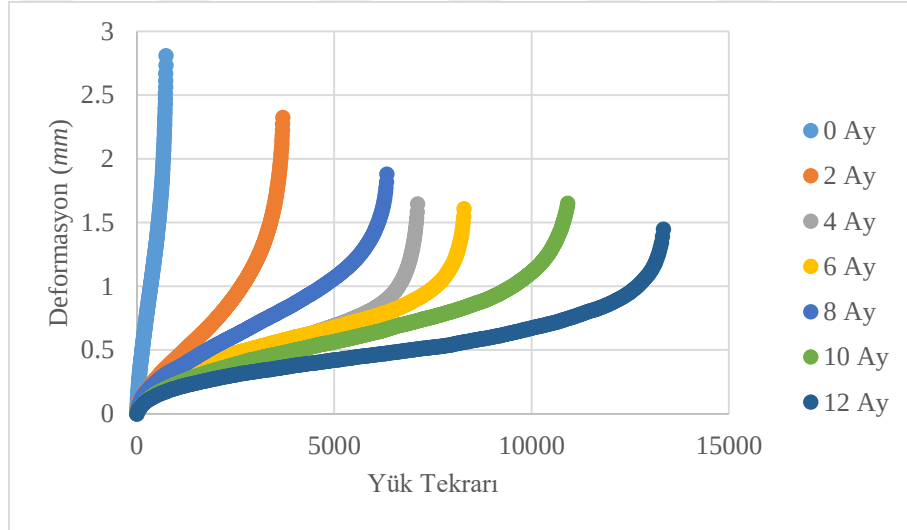
Şekil 6.78. Arazide yaşlandırılmış 0-0 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi



Şekil 6.79. Arazide yaşlandırılmış 10-0 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi



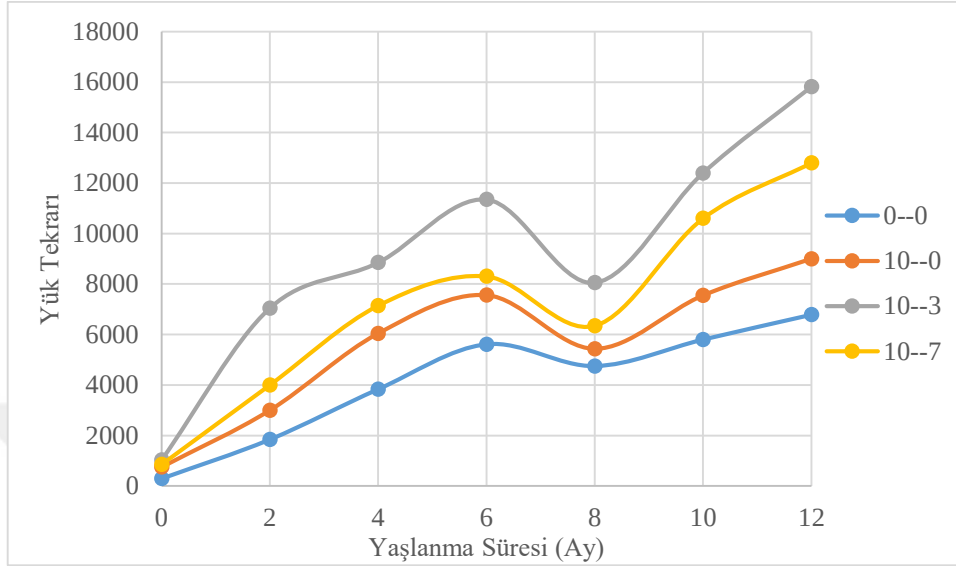
Şekil 6.80. Arazide yaşlandırılmış 10-3 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi



Şekil 6.81. Arazide yaşlandırılmış 10-7 numunelerinin yük tekrarı – deformasyon ilişkisi

Şekil 6.82’de karışımların arazideki yaşlanma sonrası yük tekrarı-yaşlanma süresi ilişkisi verilmiştir. Şekle göre arazideki yaşlanma süresi arttıkça (8.ay hariç) numunelerin yorulma ömürleri artmaktadır. Fakat 8. ayın kış aylarına denk gelmesi ve buna bağlı olarak numunelere yağmur sularının etki etmesinden dolayı bütün numunelerin yük tekrar sayılarında bir miktar düşüş görülmüştür. Burada ele alınan çevresel şartlar içerisinde trafik etkisi bulunmamaktadır. Buna rağmen sadece suyun etkisi ile performansta meydana gelen bu azalış trafik etkisi de göz önüne alındığında çok daha şiddetli olacaktır, dolayısıyla yolların daha uzun süre hizmet verebilmesi için drenaja çok önem verilmesi gerekmektedir. Laboratuvardaki yaşlanmada olduğu gibi arazi yaşlanması sonrasında da yorulma ömrü açısından en iyi performansı 10-3

karışımı vermiştir. 12.ay sonunda 10-3 karışımı saf karışımdan 2.33 kat, 10-7 karışımı 1.88 kat ve 10-0 karışımı 1.29 kat daha fazla yük tekrar sayısı vermiştir.

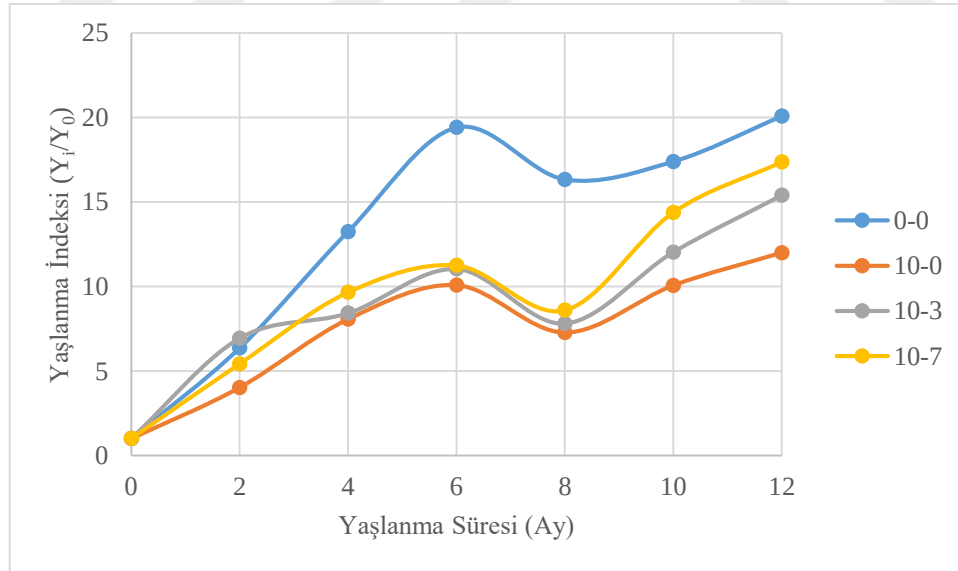


Şekil 6.82. Karışımların arazide farklı dönemlerdeki yaşlandırma sonrası yük tekrar sayıları arasındaki ilişkisi

Tablo 6.23'te arazide yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar sayıları ve yaşlanma indeksleri Şekil 6.83'te ise yaşlanma indekslerinin grafiksel değişimi verilmiştir. 12.ay sonunda en fazla yaşlanan karışım saf karışımdır. En az yaşlanan karışım ise 10-0 karışımı ve daha sonra ise 10-3 karışımıdır. Karışımların yük tekrar sayıları 12 ay yaşlandırma sonunda yaşlandırılmamış numunelerin yük tekrar sayılarına göre yaklaşık olarak 11-20 kat artmaktadır. 8.ayda yaşlanma indekslerinde bir düşüş söz konusudur. Bu durum yaşlanmanın azalması anlamına gelmemektedir. 8.ayda meydana gelen düşüş bu ayda yağışların etkisiyle bütün numunelerin yorulma değerlerinde meydana gelen düşüşten kaynaklanmaktadır. Yaşlanmanın zaman ile sürekli artacağı düşünüldüğünde, çevresel koşulların değişken olduğu arazide kümülatif yaşlanma indekslerinin değerlendirilmesi daha doğru olacaktır.

Tablo 6.23. Arazi yaşlandırması sonrası yük tekrarı değerlerindeki değişim ve yaşlanma indeksleri

Yaşlanma Süresi	0-0	10-0	10-3	10-7
Yük Tekrarı				
0 Ay (Y ₀) (Yaşlandırılmamış)	289	750	1027	850
2 Ay (Y ₂)	1840	3000	7044	4000
4 Ay (Y ₄)	3832	6043	8850	7144
6 Ay (Y ₆)	5614	7560	11350	8305
8 Ay (Y ₈)	4752	5437	8053	6349
10 Ay (Y ₁₀)	5800	7549	12400	10600
12 Ay (Y ₁₂)	6783	9000	15816	12800
Y_i/Y₀				
(Y ₂)/ (Y ₀)	6.36	4.02	4.94	5.43
(Y ₄)/ (Y ₀)	13.25	8.06	8.42	9.66
(Y ₆)/ (Y ₀)	19.41	10.08	11.04	11.25
(Y ₈)/ (Y ₀)	16.34	7.28	7.82	8.60
(Y ₁₀)/ (Y ₀)	17.40	10.06	12.04	14.38
(Y ₁₂)/ (Y ₀)	20.08	12.00	15.40	17.37



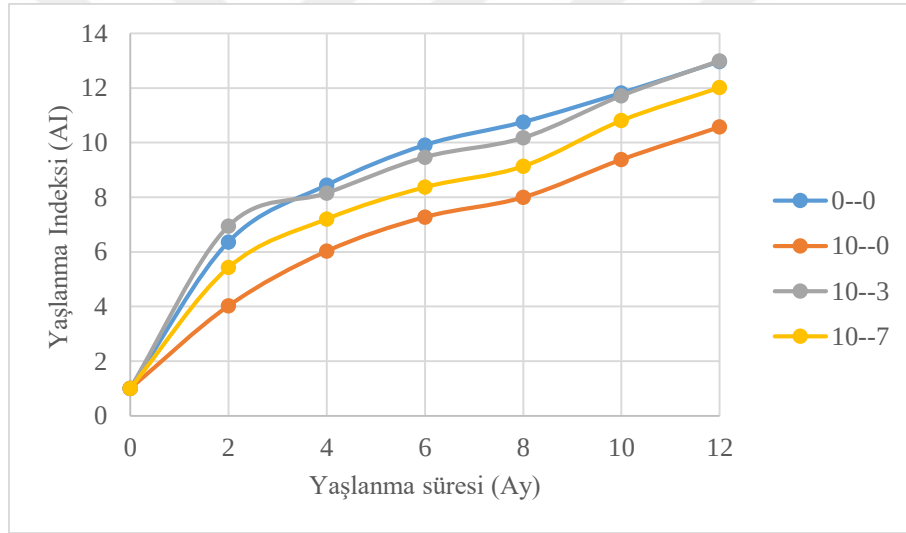
Şekil 6.83. Arazide yaşlandırılmış numunelerin yorulma deneyine göre yaşlanma indekslerindeki değişimi

Şekil 6.84'te karışımlarda 12 ay boyunca her 2 ayda meydana gelen yaşlanma indekslerinin üst üste toplanması ile elde edilen kümülatif yaşlanma karakteristikleri verilmiştir. 2, 4, 6, 8, 10

ve 12. aylara karşılık gelen kümülatif yaşlanma indeksleri Tablo 6.24'te belirtildiği şekilde hesaplanmıştır.

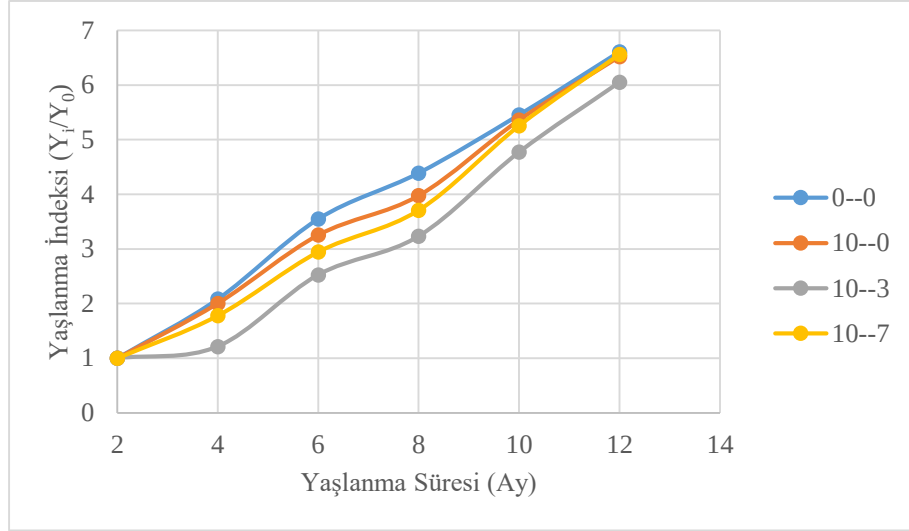
Tablo 6.24. Arazide yaşlandırılan numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerinin belirlenme yöntemi

Yaşlanma Süresi (Ay)	Kümülatif Yaşlanma İndeksi Belirleme Yöntemi
2	2/0
4	2/0 + 4/2
6	2/0 + 4/2 + 6/4
8	2/0 + 4/2 + 6/4 + 8/6
10	2/0 + 4/2 + 6/4 + 8/6 + 10/8
12	2/0 + 4/2 + 6/4 + 8/6 + 10/8 + 12/10



Şekil 6.84. Arazide yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi

Şekil 6.84'e göre 12. ay sonunda en az yaşlanan karışım 10-0 karışımıdır. Ancak laboratuvar yaşlanmasında olduğu gibi burada da erken dönemde (ilk 2 ayda) 10-3 karışımı hızlı bir şekilde yaşlanmakta daha sonra yaşlanma hızı diğer karışımlara göre azalmaktadır. Uzun dönemdeki yaşlanmayı değerlendirmek amacıyla 2.ayda meydana gelen yaşlanmanın dikkate alınmadığı Şekil 6.85'te verilen kümülatif yaşlanma indekslerine göre 10-3 karışımı uzun dönemde yaşlanmadan en az etkilenen karışım olmuştur.

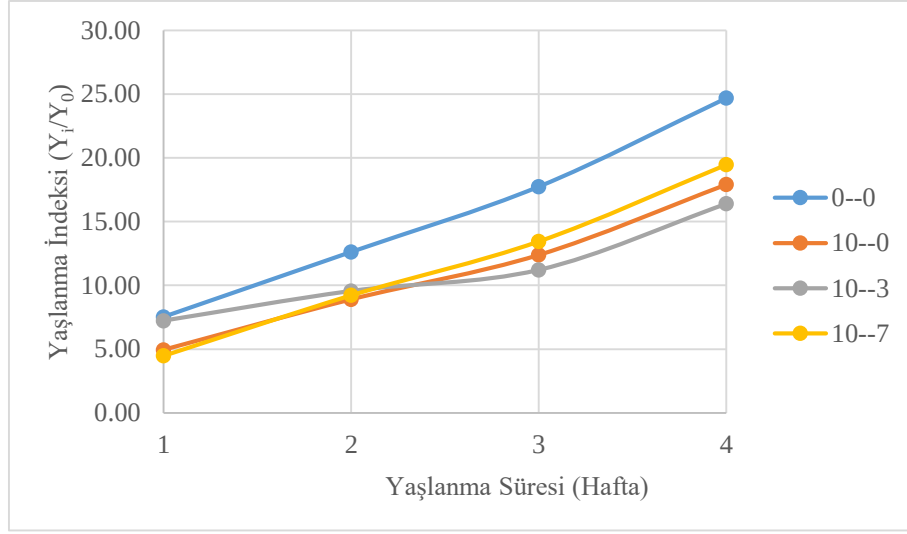


Şekil 6.85. Arazide 4-12 ay arasında yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi

Tablo 6.25'te laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin çatlak başlangıcındaki yük tekrar sayıları ve bu yük tekrar sayılarının oranlarından elde edilen yaşlanma indekslerinin değerleri Şekil 6.86'da ise yaşlanma indekslerinin grafiksel gösterimi verilmiştir.

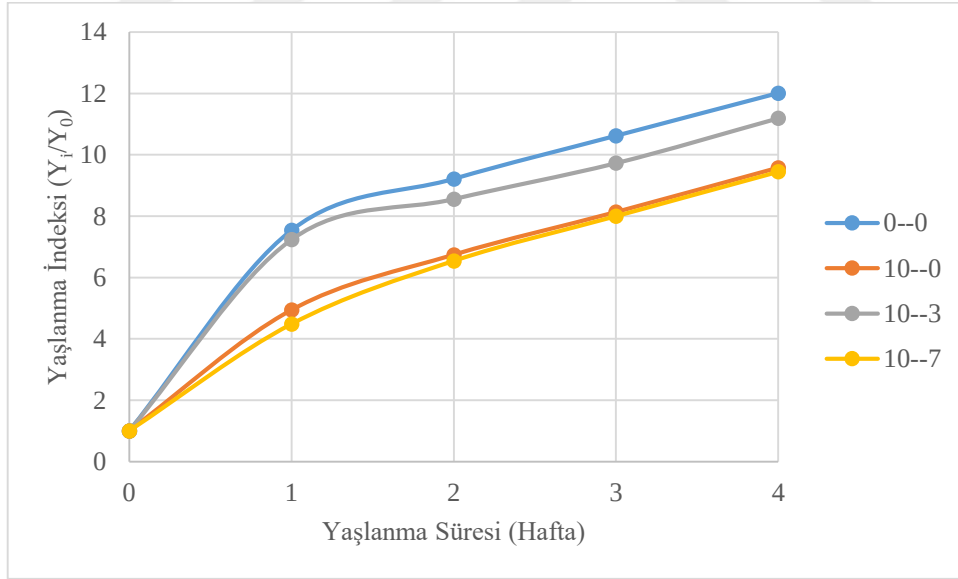
Tablo 6.25. Laboratuvar yaşlandırılan numunelerin çatlak oluşumu için gerekli yük tekrarı ve yaşlanma indeksleri

Katkı Tipi	0 Hafta	1 Hafta	2 Hafta	3 Hafta	4 Hafta	$(Y_1)/(Y_0)$	$(Y_2)/(Y_0)$	$(Y_3)/(Y_0)$	$(Y_4)/(Y_0)$
	(Y ₀)	(Y ₁)	(Y ₂)	(Y ₃)	(Y ₄)				
	Yük	Yük	Yük	Yük	Yük				
	Tekrarı	Tekrarı	Tekrarı	Tekrarı	Tekrarı				
0-0	222	1673	2803	3940	5481	7.54	12.63	17.75	24.69
10-0	684	3379	6088	8473	12255	4.94	8.90	12.39	17.92
10-3	891	6446	8523	9994	14616	7.23	9.57	11.22	16.40
10-7	650	2914	5998	8744	12656	4.48	9.23	13.45	19.47



Şekil 6.86. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin çatlak başlangıcındaki yük tekrar sayılarına göre yaşlanma indekslerindeki değişimi

Şekil 6.87’de laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indeksleri verilmiştir.

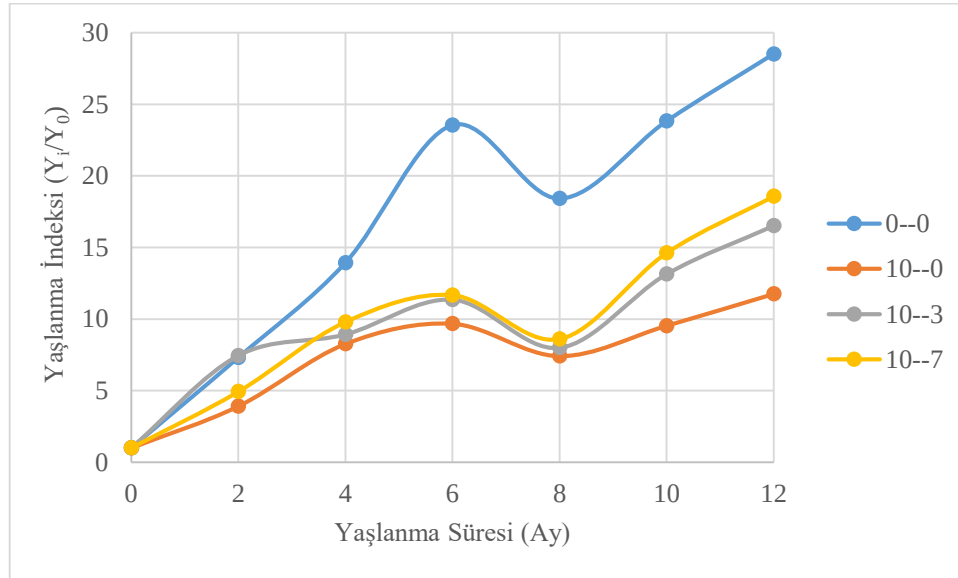


Şekil 6.87. Laboratuvarda yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi

Tablo 6.26’da arazide yaşlandırılmış numunelerin çatlak başlangıcındaki yük tekrar sayıları ve bu yük tekrar sayılarının oranlarından elde edilen yaşlanma indekslerinin değerleri Şekil 6.88’de ise yaşlanma indekslerinin grafiksel gösterimi verilmiştir.

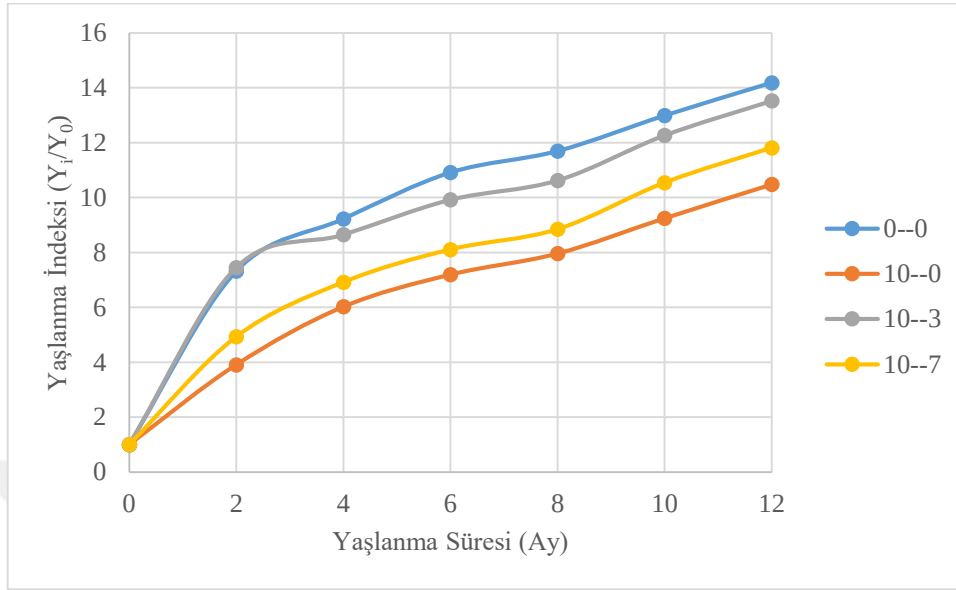
Tablo 6.26. Arazide yaşlandırılan numunelerin çatlak oluşumu için gerekli yük tekrar sayısı ve yaşlanma indeksleri

Yaşlanma Süresi	0-0	10-0	10-3	10-7
Yük Tekrarı				
0 Ay (Y_0) (Yaşlandırılmamış)	222	684	891	650
2 Ay (Y_2)	1624	2673	6636	3203
4 Ay (Y_4)	3092	5648	7954	6365
6 Ay (Y_6)	5227	6616	10120	7590
8 Ay (Y_8)	4089	5071	7123	5593
10 Ay (Y_{10})	5289	6518	11703	9497
12 Ay (Y_{12})	6330	8386	14711	12071
Y_i/Y_0				
$(Y_2)/ (Y_0)$	7.32	3.91	7.45	4.93
$(Y_4)/ (Y_0)$	13.93	8.26	8.93	9.79
$(Y_6)/ (Y_0)$	23.55	9.67	11.36	11.68
$(Y_8)/ (Y_0)$	18.42	7.41	7.99	8.60
$(Y_{10})/ (Y_0)$	23.82	9.53	13.13	14.61
$(Y_{12})/ (Y_0)$	28.51	12.26	16.51	18.57



Şekil 6.88. Arazide yaşlandırılmış numunelerin çatlak başlangıcındaki yük tekrar sayılarına göre yaşlanma indekslerindeki değişimi

Şekil 6.89’da arazide yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indeksleri verilmiştir.



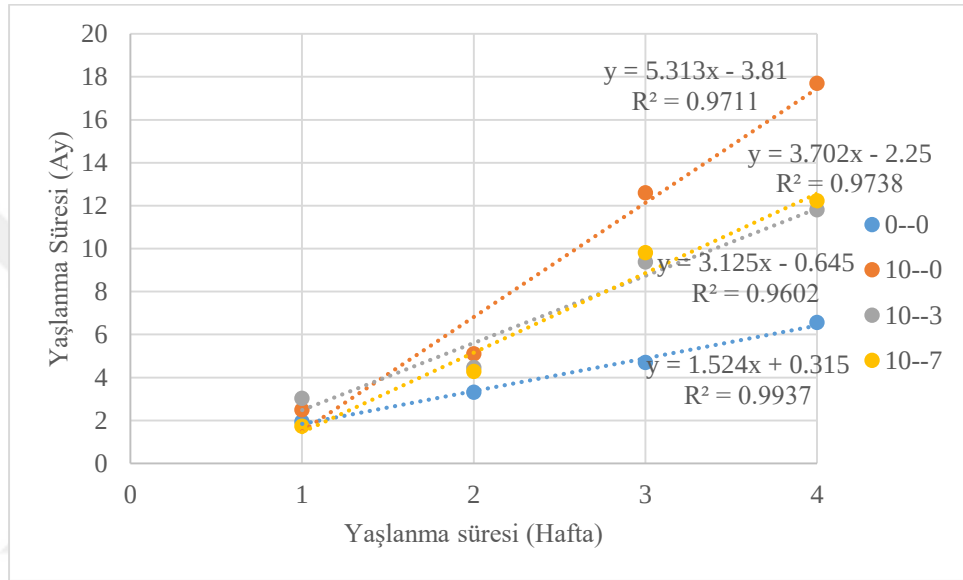
Şekil 6.89. Arazide yaşlandırılmış numunelerin kümülatif yaşlanma indekslerindeki değişimi

Gerek laboratuvar da gerekse arazide yaşlandırılmış numunelerin çatlak başlangıcındaki yük tekrar sayıları dikkate alındığında yük tekrarı ve yaşlanma indeksleri bakımından karışım tipleri arasındaki sıralamanın kırılmaya neden olan yük tekrarları ve buna bağlı yaşlanma indekslerinden farklı olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 6.27’de laboratuvar da yaşlandırılan numunelerin yük tekrar sayıları (çatlamaya neden olan yük tekrar sayısı) açısından arazide ne kadar sürede meydana geldiği verilmiştir. Laboratuvar da ilk 2 haftada meydana gelen yaşlanma arazide 3-5 ay arasında meydana gelirken 3. haftadan sonra meydana gelen yaşlanma 4-12 ay, 4. haftadan sonra meydana gelen yaşlanma ise 6-17 ayda meydana gelmektedir. Laboratuvar da meydana gelen yaşlanmanın 2 haftadan sonra önemli hale geldiği görülmektedir. Laboratuvar da oluşan yaşlanmanın arazide oluşabilmesi için katkılı numunelerin saf karışıma göre arazide çok daha uzun süre kalması gerekmektedir. Arazi şartlarında en geç yaşlanan karışım 10-0 karışımıdır. Şekil 6.90’da görüldüğü üzere laboratuvar da uygulanan yaşlandırma yöntemi ile arazi yaşlanması arasında bir uyum söz konusudur.

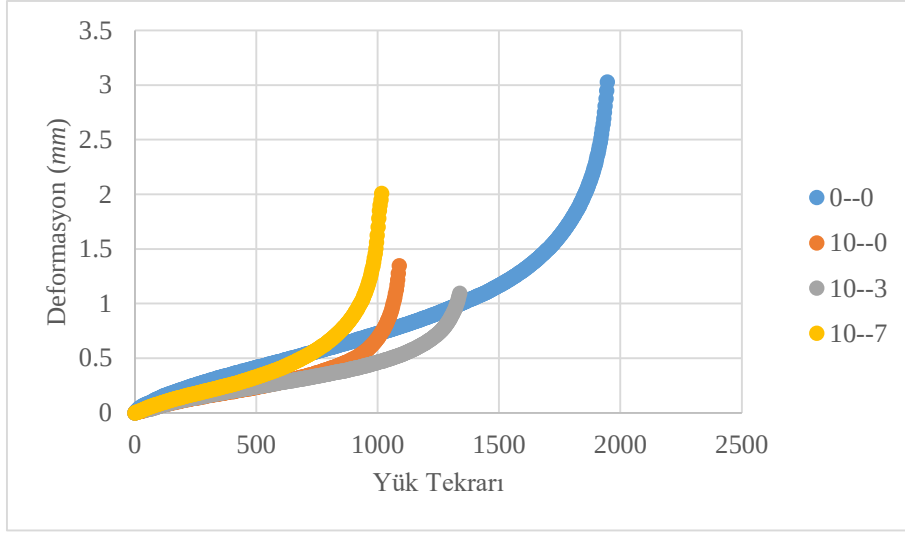
Tablo 6.27. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin çatlak oluşumuna neden olan yük tekrar sayıları bakımından arazideki karşılığı

Yaşlandırma süresi (Hafta)	Arazideki yaşlanma süresi (Ay)			
	0-0	10-0	10-3	10-7
1	1.94	2.49	3.03	1.72
2	3.31	5.10	4.46	4.28
3	4.69	12.60	9.37	9.80
4	6.56	17.70	11.81	12.22



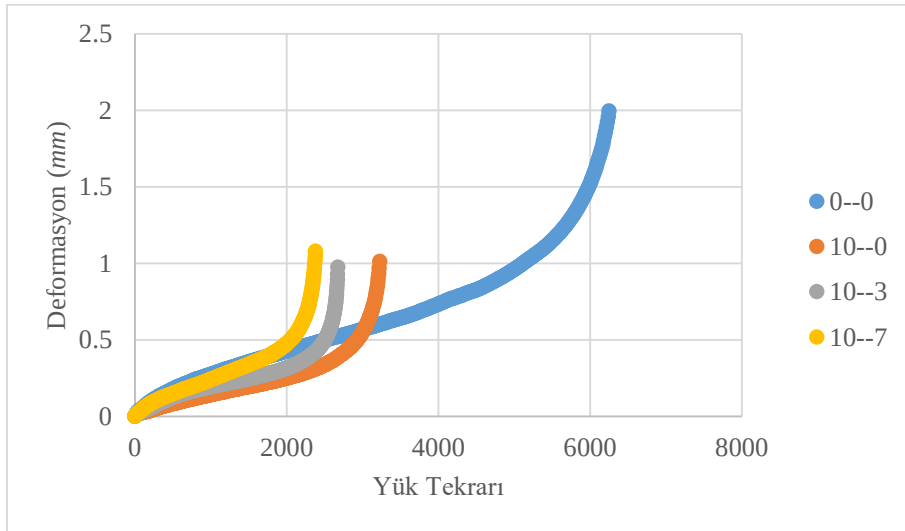
Şekil 6.90. Yük tekrar sayıları bakımından laboratuvar ve arazi yaşlandırması arasındaki ilişki

Şekil 6.91’de kısa dönem yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar-deformasyon ilişkisi verilmiştir. Saf karışım katkılı karışımlardan önemli derecede yüksek yük tekrar sayısı vermiştir. Saf karışım kısa dönem yaşlandırma yöntemi ile yaşlandırılmamış karışıma göre 6.7 kat daha fazla yük tekrarı verirken 10-0, 10-3 ve 10-7 karışımları sırasıyla 1.45, 1.32 ve 1.20 kat daha fazla yük tekrarı vermektedir. STA yönteminde katkılı karışımların yük tekrar sayılarının saf karışma göre düşük çıkmasının iki sebebi olabilir; birincisi, katkılı karışımların bu yaşlandırma yöntemine göre çok az yaşlandığı, ikincisi ise bu yaşlandırma yönteminin katkılı karışımların yapısal olarak bozulmasına neden olmasıdır. Laboratuvar ve arazi yaşlandırmasında katkılı karışımların saf karışımdan daha fazla yük tekrar sayısı vermesi ikinci seçeneği işaret etmektedir. Rijitlik değerleri de incelendiğinde kısa dönem yaşlandırma sonrasında katkılı karışımların rijitlik değerlerinin saf karışıma göre yüksek çıkması buna karşılık yorulma deneyindeki yük tekrar sayılarının düşük çıkması STA yönteminin katkılı karışımlarda adezyonu etkileyecek yapısal bir bozulmaya neden olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.91. STA yöntemine göre yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar-deformasyon ilişkisi

Şekil 6.92’de uzun dönem yaşlandırma yöntemine (LTA) göre numunelerin yük tekrar-deformasyon ilişkisi verilmiştir. Uzun dönem yaşlandırma yöntemine maruz bırakılan karışımlar bu yaşlandırma yönteminden önce kısa dönem yaşlandırmaya tabi tutulduğundan STA yönteminde meydana gelen yapısal bozulmanın etkisi burada da devam etmektedir. Tablo 6.28’de yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin kırılmaya neden olan yük tekrar sayıları verilmiştir.



Şekil 6.92. LTA yöntemine göre yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar-deformasyon ilişkisi

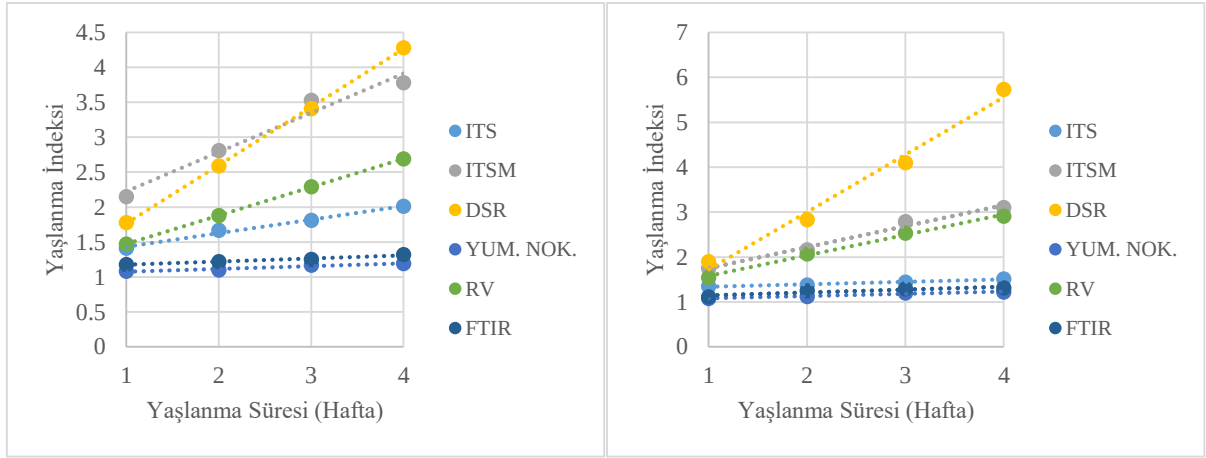
Tablo 6.28. Yaşlandırılmamış, kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış numunelerin kırılma anındaki yük tekrar sayıları

Numune Tipi	Yaşlandırılmamış	STA	LTA	STA/LTA
0-0	289	1954	6252	3.20
10-0	750	1093	3228	2.95
10-3	1016	1339	2676	1.99
10-7	850	1027	2382	2.32

Karışımların LTA yönteminden nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla LTA sonrası yük tekrarlarının STA sonrası yük tekrarlarına oranı incelenmiştir. Buna göre saf karışım katkılı karışımlardan daha fazla yaşlanmakta en az yaşlanan karışım tipi ise 10-3 karışımı olmaktadır.

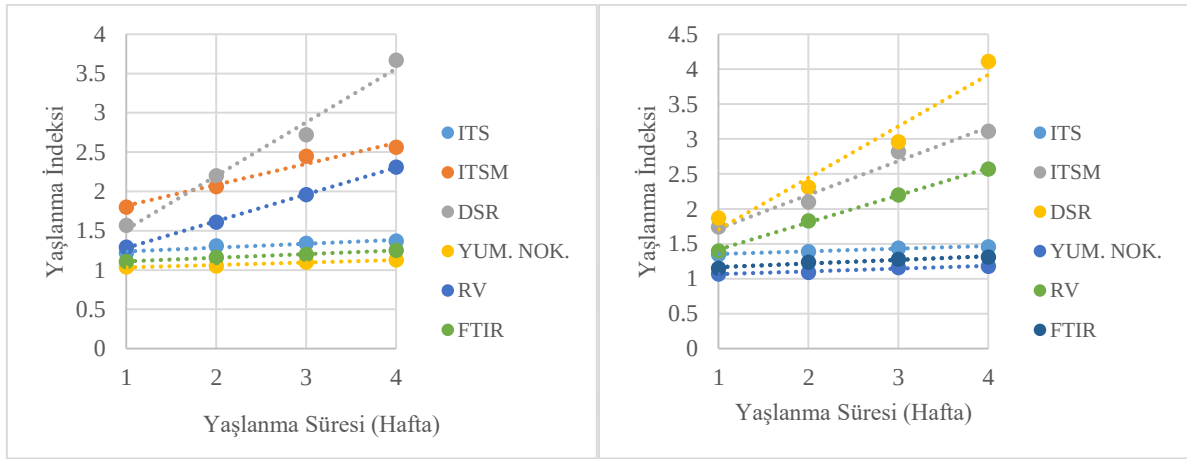
6.3. Deneylerin ve Yaşlandırma Yöntemlerinin Birlikte Değerlendirilmesi

Gerek bağlayıcı gerekse karışım deneylerinin yaşlanmayı belirlemedeki hassasiyetini değerlendirmek amacıyla her deneyden elde edilen yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresi ile değişimi incelenmiştir. Şekil 6.93-6.94'te laboratuvar ve arazide yaşlandırılan karışım ve bu karışımlardan elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanan farklı deneylerden elde edilen yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresi ile değişimi verilmiştir. Yorulma deney sonuçlarından elde edilen indeks değerleri diğer deneylerden elde edilenlerden çok fazladır. Bu yüzden yorulma deneyi dışındaki deneylerin yaşlanma indeksi üzerindeki etkisinin açık bir şekilde görülebilmesi için Şekil 6.93 ve 6.94'te yorulma deneyinden elde edilen yaşlanma indeks değerleri verilmemiştir.



(a)

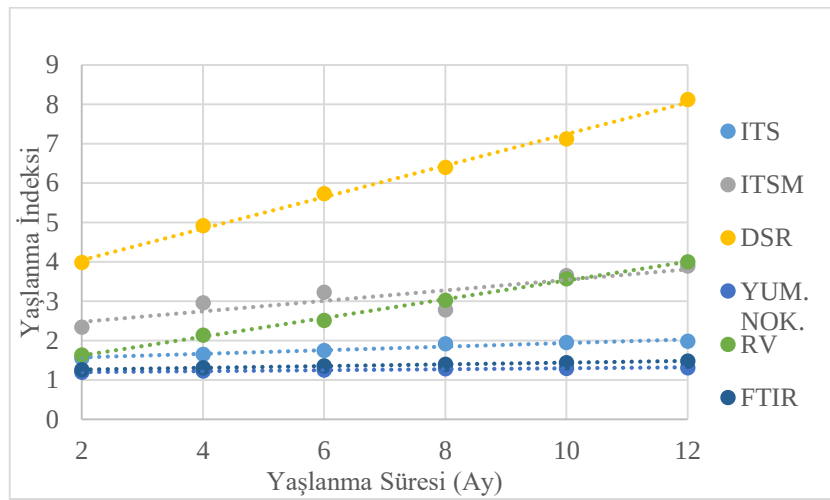
(b)



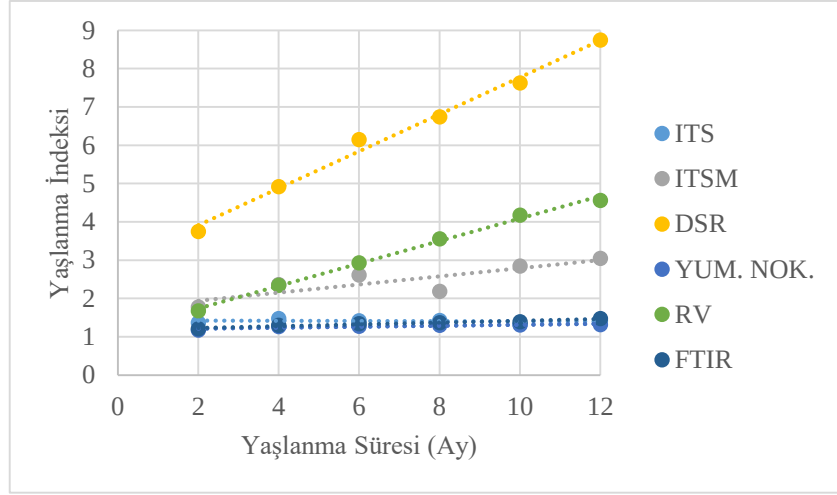
(c)

(d)

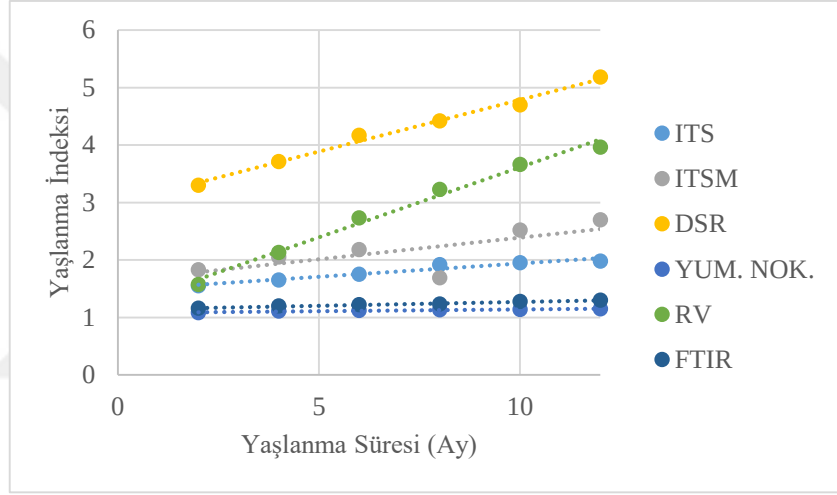
Şekil 6.93. Laboratuvarda yaşlandırılan (a) 0-0 (b) 10-0 (c) 10-3 (d) 10-7 karışımlarından elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanan farklı deneylerden elde edilen yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresi ile değişimi



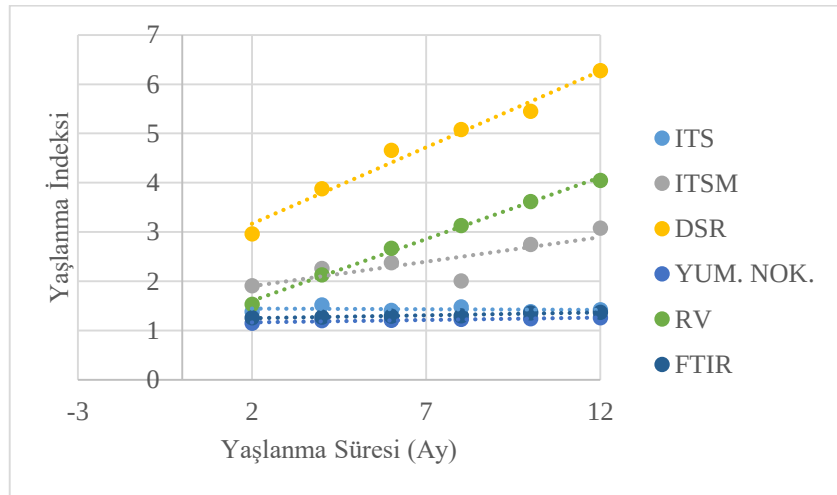
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.94. Arazide yaşlandırılan (a) 0-0 (b) 10-0 (c) 10-3 (d) 10-7 karışımlarından elde edilen bağlayıcılar üzerinde uygulanan farklı deneylerden elde edilen yaşlanma indekslerinin yaşlanma süresi ile değişimi

Şekil 6.93 ve 6.94’te görüldüğü üzere numunelerin yaşlanma indeksleri deney yöntemine göre önemli farklılıklar göstermektedir. Bitümlü karışımların yaşlanma derecelerinde meydana gelecek küçük bir değişiklik yorulma deneyindeki yük tekrar sayılarının önemli derecede farklılaşmasına neden olmaktadır. Yorulma deneyi saf ve katkılı karışımlarda yaşlanmaya karşı en hassas deney yöntemidir. Yorulma deneyinden sonra yaşlanmanın değerlendirilmesine karşı hassasiyet bakımından sırasıyla DSR, ITSM, RV, ITS, FTIR ve yumuşama noktası deneyleri gelmektedir. ITS, FTIR ve yumuşama noktası deneylerinden elde edilen indeks değerleri arasında çok önemli farklılıklar oluşmamaktadır. Bu sonuçlara göre bir bitümlü karışımın ya da bağlayıcının yaşlanma süresinden nasıl etkilendiğini ya da bir katkı tipinin etkinliğini değerlendirmede yorulma ve DSR deneyinin en uygun deney yöntemi olduğu belirlenmiştir.

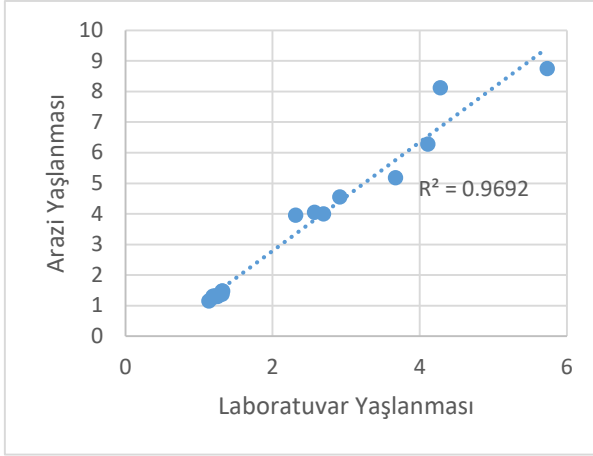
Tablo 6.29 ve 6.30’da verilen indeks değerleri yaşlanma derecesini göstermektedir. İndeks değeri en küçük olan numune yaşlanmaya karşı iyi bir dirence, indeks değerleri yüksek olan numuneler ise yaşlanmaya karşı hassasiyete işaret etmektedir. Tablo 6.29’da bağlayıcı deney sonuçlarından elde edilen yaşlanma indeksleri verilmiştir. Laboratuvar ve arazi yaşlandırması sonrası 10-3 bağlayıcısı bütün bağlayıcı deneylerinde en düşük, 10- 0 bağlayıcısı ise en yüksek indeks değerlerini vermiştir. 10-7 bağlayıcısı yine bu yaşlandırma yöntemlerine göre bütün deneylerde saf bağlayıcıdan daha düşük indeks değerleri vermektedir. Bu yaşlandırma yöntemlerine göre CR’nin tek başına kullanılması yaşlanma bakımından olumsuz etkiye sahipken ılık asfalt katkıları ile birlikte kullanıldığında önemli derecede yaşlanma direnci göstermektedir. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış karışımlardan elde edilmiş bağlayıcıların indeks değerlerine göre saf bağlayıcı bütün deneylerde en düşük indeks değerine sahiptir. FTIR deneyi hariç 10-0 bağlayıcısı kısa ve uzun dönem yaşlandırma yöntemlerinde de en yüksek indeks değerini vermekte ve ılık asfalt katkıları ile birlikte kullanılması durumunda indeks değerleri düşmektedir. Kısa ve uzun dönem yaşlandırmada yumuşama noktası hariç CR içerikli bağlayıcıların indeks değerlerinin saf bağlayıcınıninkinden yüksek olduğu ancak bu durumun arazi ve laboratuvar yaşlandırmasında söz konusu olmadığı görülmektedir. Her ne kadar 10-0 bağlayıcısı arazi ve laboratuvar yaşlandırmasında saf karışımdan yüksek indeks değerleri verse de kısa ve uzun dönem yaşlandırmada çok daha fazla yüksek değerler vermektedir. Bu durum kısa ve uzun dönem yaşlandırma yönteminin CR içerikli karışımların aşırı yaşlanmasına işaret etmektedir. DSR deneyine göre PAV yaşlandırması saf bağlayıcıların katkılı bağlayıcılara göre 3 kat daha fazla yaşlandığına işaret ederken FTIR ve yumuşama noktası deneylerinde saf ve katkılı bağlayıcıların indeks değerleri arasında önemli bir fark oluşmamaktadır. RTFOT

yaşlandırmasına göre saf ve katkılı bağlayıcıların yaşlanma indeksleri arasındaki sıralama her bir deney yönteminde aynı olmayıp farklılıklar göstermektedir.

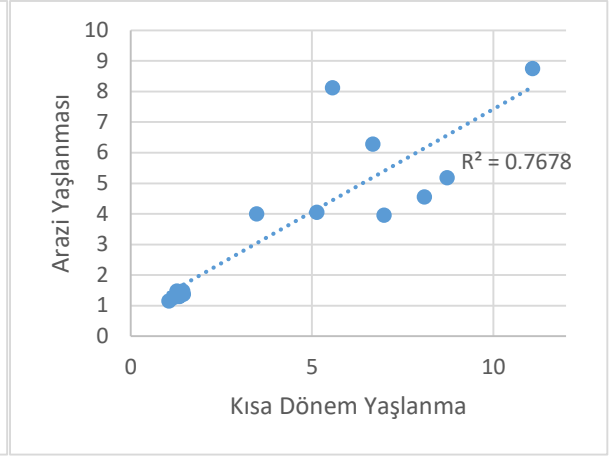
Tablo 6.29. Bağlayıcı deney sonuçlarından elden edilen yaşlanma indeksleri

Deney Adı	Katkı Tipi	Yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcılar				Modifikasyon Sonrası	
		Laboratuvar (4 Hafta)	Arazi (12 Ay)	STA (135 °C, 4 saat, Gevşek)	LTA(Etövde 85 °C, 5gün, Sıkışmış)	RTFOT (163 °C, 85 dk)	PAV (100 °C, 20 saat)
DSR	0-0	4.28	8.12	5.56	10.53	4.92	20.23
	10-0	5.73	8.75	11.08	17.70	3.12	7.04
	10-3	3.67	5.18	8.72	12.81	3.62	6.64
	10-7	4.11	6.28	6.67	9.99	3.40	5.86
RV	0-0	2.69	4.00	3.47	4.76	2.27	-
	10-0	2.91	4.56	8.09	9.42	2.59	-
	10-3	2.31	3.96	6.98	8.36	2.71	-
	10-7	2.57	4.05	5.13	6.30	2.56	-
FTIR	0-0	1.32	1.48	1.27	1.37	1.29	1.48
	10-0	1.31	1.48	1.43	1.55	1.32	1.53
	10-3	1.25	1.30	1.33	1.45	1.24	1.46
	10-7	1.31	1.37	1.45	1.61	1.15	1.49
Yumuşama Noktası	0-0	1.19	1.31	1.34	1.39	1.23	1.48
	10-0	1.22	1.32	1.23	1.28	1.19	1.42
	10-3	1.13	1.15	1.05	1.10	1.07	1.21
	10-7	1.18	1.26	1.17	1.22	1.22	1.43

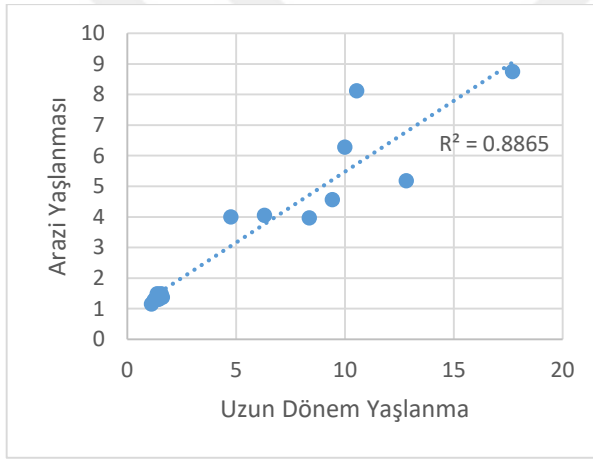
Arazideki yaşlandırmayı referans alarak diğer yaşlandırma yöntemleri ile olan ilişki Şekil 6.95'te verilmiştir. Arazi ile en iyi yaşlandırma yönteminin laboratuvar da 60 °C'lik etövde yapılan yaşlandırma olduğu görülmektedir.



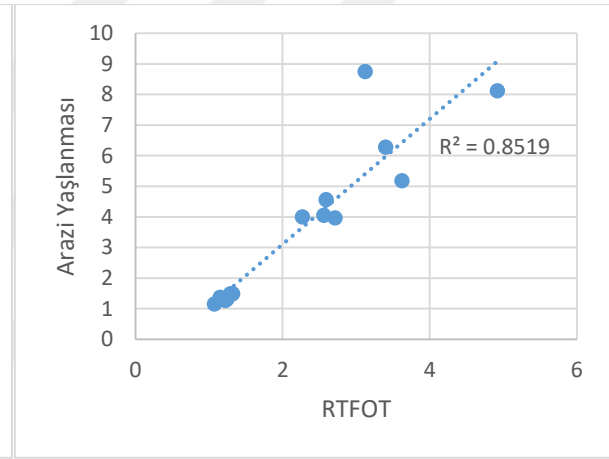
(a)



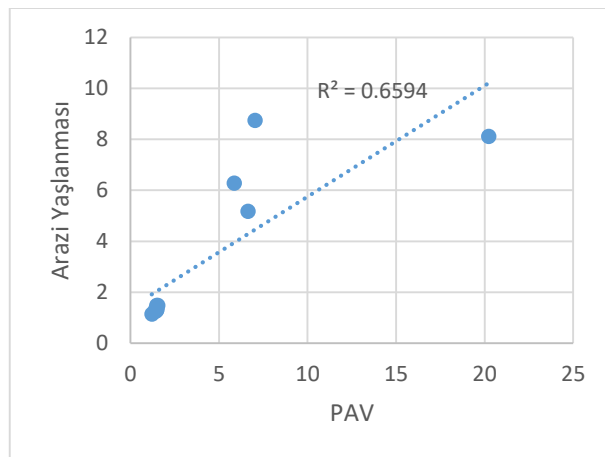
(b)



(c)



(d)



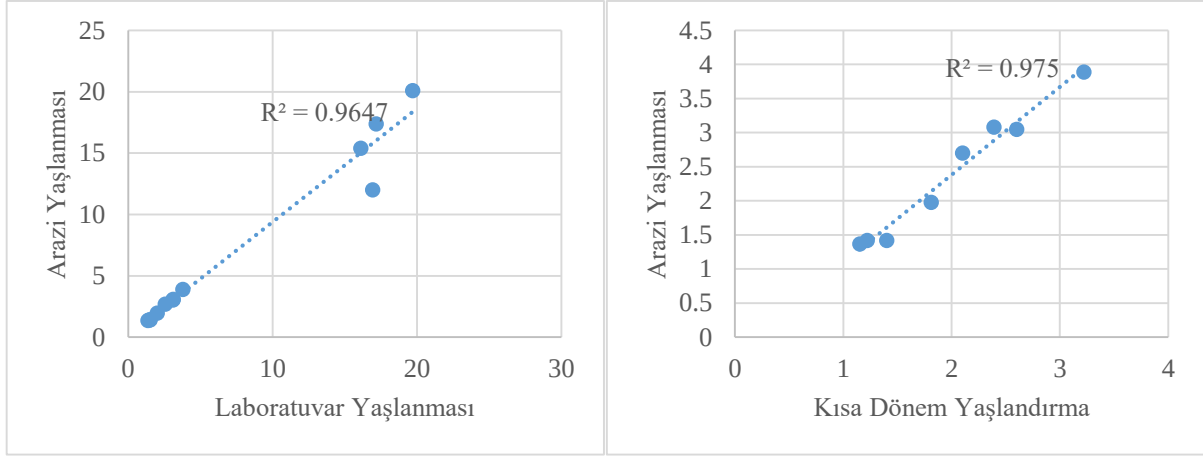
(e)

Şekil 6.95. Arazi yaşlanması (a) Laboratuvarda 60 °C (b) STA (c) LTA (d) RTFOT ve (e) PAV yaşlandırması ile ilişkisi

Tablo 6.30’da karışım deneylerine göre farklı yaşlandırma yöntemleri ile elde edilen yaşlanma indeksleri verilmiştir. Bütün yaşlandırma yöntemlerinde ve bütün karışım deneyi sonuçlarına göre saf karışım en fazla yaşlanan karışımdır. Saf karışımdan sonra sırasıyla en çok yaşlanan karışımlar 10-0, 10-7 ve 10-3 karışımlarıdır. 10-0 karışımının arazi yaşlandırma sonrası yorulma deneyinde yukarıdaki sıralamayı bozacak şekilde bir indeks değeri vermesi numune hazırlanması, karışım homojenliğinin bozulması gibi olumsuz bir durum olarak düşünülüp istisnai bir durum olarak göz önüne alınmıştır. Katkı içeriğinin değişimi göz önüne alındığında karışım deneyleri yaşlandırma yöntemlerinden farklı şekilde etkilenmemektedir. Karışım deneyleri bağlayıcı deneylerine göre daha düzenli indeks değerleri vermektedir. Şekil 6.96’da laboratuvar, kısa ve uzun dönem yaşlandırmalarının arazi yaşlandırması ile ilişkisi verilmiştir. Buna göre laboratuvardaki 60 °C’lik etüvde yaşlandırma yöntemi yorulma ITS ve ITSM değerleri bakımından, kısa ve uzun dönem yaşlandırma yöntemleri ise ITS ve ITSM değerleri bakımından arazi yaşlandırması ile yüksek bir uyum içerisindedir. Bağlayıcı ve karışım deneyleri birlikte düşünüldüğünde arazi yaşlanması ile en iyi uyum sadece laboratuvar 60 °C’lik etüvde yapılan yaşlandırma yöntemi arasındadır. Kısa ve uzun dönem yaşlandırma sonrası katkılı karışımların yorulma deneyine göre belirlenen indeks değerlerinin saf karışımdan önemli derecede düşük olması daha öncede değinildiği üzere bu yaşlandırma yönteminin CR içerikli karışımları adezyon ve kohezyon özelliğini etkileyerek daha düşük yük tekrar sayısına neden olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 6.97-Şekil 6.99’da verilen laboratuvar 60 °C etüvde, arazide, uzun dönem (LTA) yaşlandırılmış karışımların rijtlik modüllerine karşılık yük tekrar sayılarında açıkça görülmektedir. Burada rijitlik modülünün artması ile hem laboratuvar 60 °C etüvde hem de arazide yaşlandırılmış numunelerin yük tekrar sayıları üstel bir şekilde artarken kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış karışımlarda azalmaktadır. Bu nedenle uzun dönem yaşlandırmaların arazi yaşlanması ile ilişkisi değerlendirilirken yorulma deney sonuçları dikkate alınmamıştır.

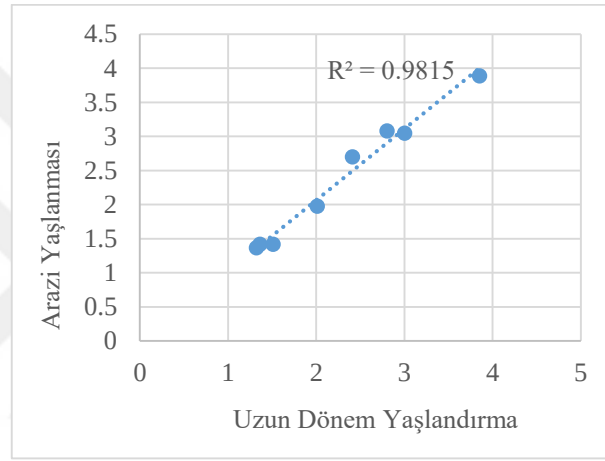
Tablo 6.30. Karışım deney sonuçlarından elden edilen yaşlanma indeksleri

Deney Adı	Katkı Tipi	Laboratuvar (4 Hafta)	Arazi (12 Ay)	STA (135 °C, 4 saat, Gevşek)	LTA (Etüvde 85 °C, 5 gün, Sıkışmış)
YORULMA	0-0	19.70	20.08	6.76	21.63
	10-0	16.93	12.00	1.46	4.30
	10-3	16.11	15.40	1.32	2.63
	10-7	17.16	17.37	1.21	2.80
ITSM	0-0	3.78	3.89	3.22	3.85
	10-0	3.10	3.05	2.60	3.00
	10-3	2.56	2.70	2.10	2.41
	10-7	3.11	3.08	2.39	2.80
ITS	0-0	2.01	1.98	1.81	2.01
	10-0	1.51	1.42	1.40	1.51
	10-3	1.37	1.37	1.15	1.32
	10-7	1.46	1.42	1.22	1.36



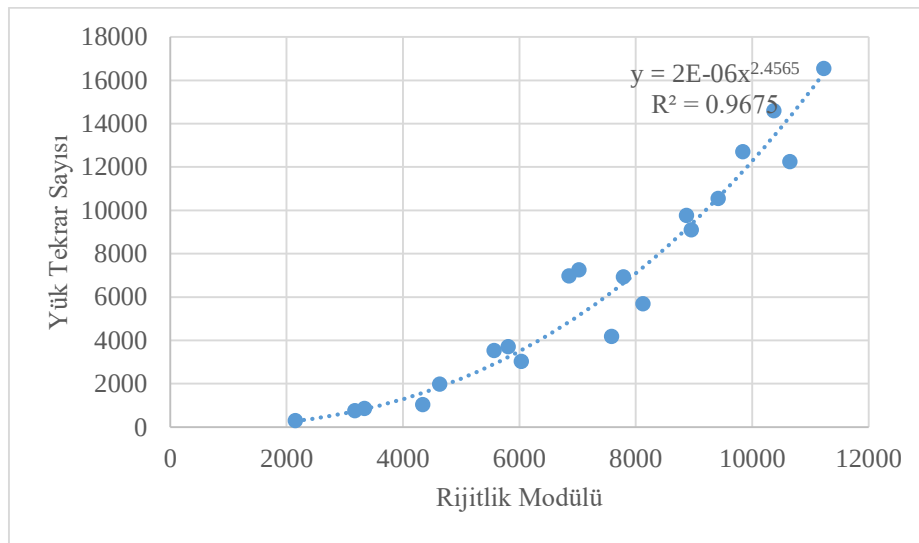
(a)

(b)

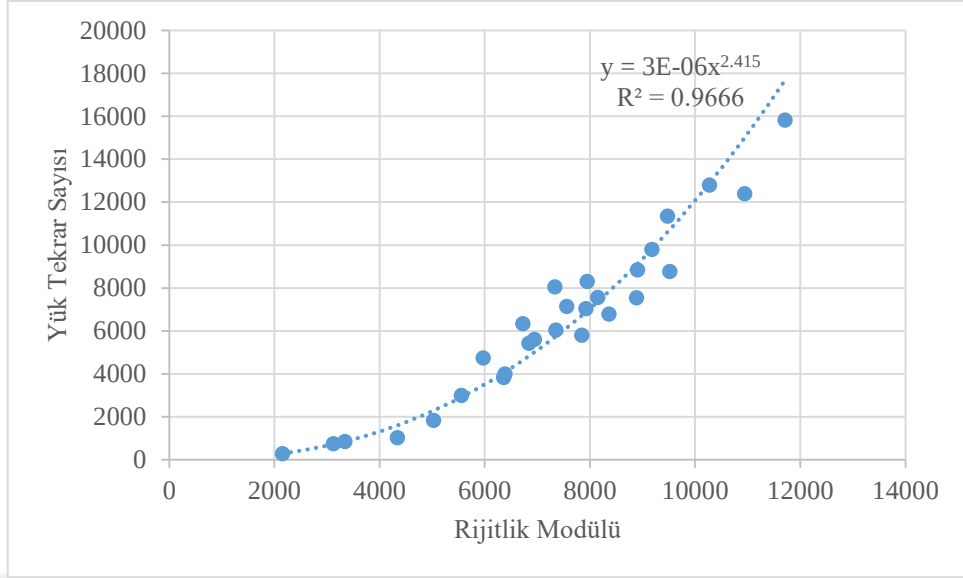


(c)

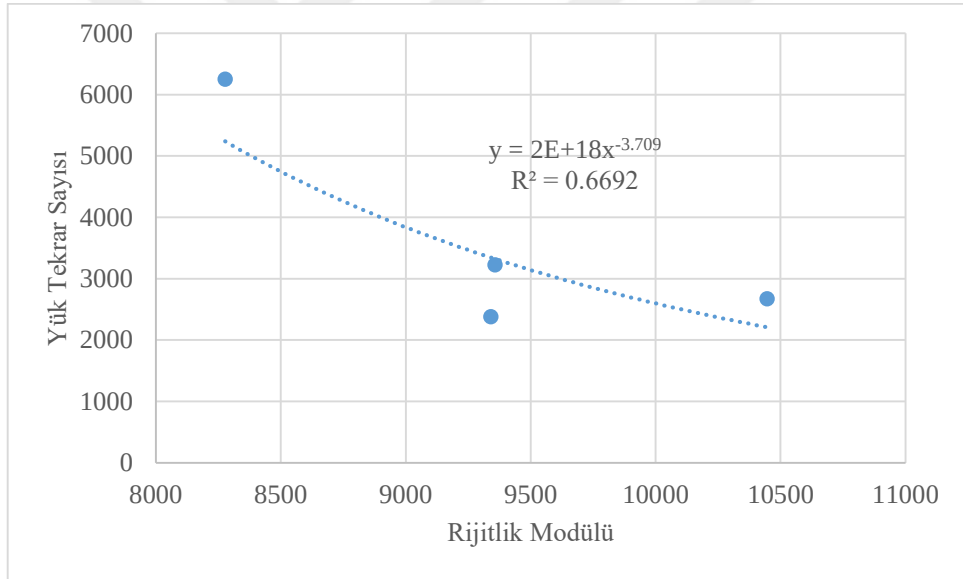
Şekil 6.96. (a) Laboratuvar (b) kısa ve (c) uzun dönem yaşlandırmalarının arazi yaşlandırması ile ilişkisi



Şekil 6.97. Laboratuvarda yaşlandırılan numunelerin rijitlik modülleri-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki



Şekil 6.98. Arazide yaşlandırılan numunelerin rijitlik modülleri-yük tekrar sayıları arasındaki ilişki



Şekil 6.99. Uzun dönem yaşlandırma sonrası rijitlik ve yük tekrarı arasındaki ilişki

Tablo 6.31’de yaşlandırılmamış, laboratuvarında 60 °C’de, arazide ve AASHTO R30 yöntemiyle yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcılar ile standart RTFOT ve PAV sonrası elde edilen bağlayıcıların DSR, RV, Yumuşama Noktası ve FTIR deney sonuçları performans açısından değerlendirilmek üzere birlikte verilmiştir.

Tablo 6.31. Yaşlandırılmamış ve farklı yöntemlerle yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcılar ile RTFOT ve PAV sonrası elde edilen bağlayıcıların deney sonuçları

Deney Adı	Katkı Tipi	Yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcılar					Modifikasyon Sonrası	
		Yaşlandırılmamış	Laboratuvar (4 Hafta, 60 °C)	Arazi (12 Ay)	STA (135 °C, 4 saat, Gevşek)	LTA (Etüvde 85 °C, 5 gün, Sıkışmış)	RTFOT (163 °C, 85 dk)	PAV (100 °C, 20 saat)
DSR ($G^*/\sin\delta$)	0-0	7022	30051	57030	39031	73967	26960	110753
	10-0	8134	46574	71138	90155	143123	81952	185283
	10-3	14678	53805	75995	128000	188062	150000	275000
	10-7	10015	41050	62863	66800	100025	84151	145012
RV (cP)	0-0	612.5	1650	2450	2125	2913	1363	-
	10-0	712.5	2075	3250	5763	6713	7325	-
	10-3	700	1620	2775	4888	5850	6575	-
	10-7	750	1925	3038	3850	4725	7263	-
FTIR (C=O İndeks)	0-0	0.029	0.039	0.043	0.037	0.040	0.036	0.041
	10-0	0.031	0.041	0.044	0.044	0.047	0.044	0.051
	10-3	0.033	0.041	0.043	0.044	0.047	0.043	0.051
	10-7	0.030	0.039	0.042	0.044	0.048	0.040	0.051
Yumuşama Noktası (°C)	0-0	53.8	63.3	70.6	70.0	72.4	64.4	77.5
	10-0	54.8	66.7	72.6	78.9	82.5	76.5	91.4
	10-3	73.0	82.2	84.3	85.8	90.3	87.6	99.6
	10-7	56.9	67.4	71.8	74.0	77.4	77.2	90.5

Tablo 6.31’de görüldüğü üzere bütün bağlayıcılar için en yüksek tekerlek izi parametresini 10-3 katkılı bağlayıcı vermiştir. Burada yaşlanma ile birlikte Sasobit katkısının tekerlek izi parametresindeki etkisinin azalmadığı görülmektedir. 10-3 katkısından sonra en yüksek $G^*/\sin\delta$ değerlerini sırasıyla 10-0, 10-7 ve 0-0 katkılı bağlayıcılar vermiştir.

Bütün bağlayıcıların farklı yaşlandırmalar sonrası viskozite değerleri birlikte değerlendirildiğinde en düşük viskozite değerine saf bağlayıcı sahip olmuştur. Laboratuvar yaşlandırmasında saf bağlayıcıdan sonra en düşük viskozite değerlerine sırasıyla 10-3, 10-7 ve 10-0 bağlayıcıları sahip olmuştur. CR ile birlikte Sasobit katkısının kullanımının laboratuvar yaşlandırması sonrası viskoziteyi düşürücü etkisi görülmektedir. Ancak arazi ve AASHTO R30 yaşlandırmaları sonrasında Evotherm katkılı karışımların Sasobit katkılı bağlayıcılardan daha düşük viskozite değeri verdiği görülmüştür. Bu da Evotherm katkısının uzun dönem yaşlandırmalarda viskozite değerleri açısından Sasobit katkısından daha etkili olacağı anlamı taşımaktadır.

Yaşlandırma sonrası FTIR deneyinden elde edilen C=O indeks değerleri birlikte kıyaslandığında ise yaşlanmamış karışımlardan elde edilen bağlayıcılar dahil bütün bağlayıcılarda en düşük C=O indeksi değerini saf bağlayıcılar vermiştir. Ancak daha öncede belirtildiği üzere saf bağlayıcıların düşük C=O indeksi değeri vermesi daha az yaşlandığı anlamına gelmemektedir. Çünkü CR ve ılık asfalt katkılı bağlayıcıların saf bağlayıcıya göre modifikasyon sırasında daha fazla yaşlandığı ancak yaşlandırma prosedürü içerisinde daha az yaşlandığı belirlenmiştir. Aynı zamanda katkılı bağlayıcıların yaşlanma süresi arttıkça benzer C=O indeksi değerleri verdikleri görülmüştür.

Bütün bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek değere 10-3 katkılı bağlayıcıların sahip olduğu görülmektedir. Daha sonra ise yaşlanmamış ve laboratuvarda yaşlandırılmış karışımlardan elde edilen bağlayıcılar hariç en yüksek değerlere sırasıyla 10-0, 10-7 ve 0-0 bağlayıcıları sahip olmuştur. Yumuşama noktası deneyinde de Sasobit katkısının yumuşama noktası üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 6.32’de ise yaşlandırılmamış, laboratuvarda 60 °C’de, arazide ve AASHTO R30 yöntemiyle yaşlandırılmış karışımların ITS, ITSM ve yorulma deney sonuçları birlikte verilmiştir.

Tablo 6.32. Yaşlandırılmamış ve farklı yöntemlerle yaşlandırılmış karışımların deney sonuçları

Deney Adı	Katkı Tipi	Yaşlandırılmamış (0 Hafta/Ay)	Laboratuvar (4 Hafta)	Arazi (12 Ay)	STA (135 °C, 4 saat, Gevşek)	LTA (Etüvde 85 °C, 5 gün, Sıkışmış)
YORULMA (Yük Tekrarı)	0-0	289	5692	6783	1954	6252
	10-0	750	12698	9000	1093	3228
	10-3	1027	16540	15816	1339	2676
	10-7	850	14587	12800	1027	2382
ITSM (MPa)	0-0	2150	8124	8362	6915	8277
	10-0	3177	9843	9517	8094	9357
	10-3	4338	11230	11707	9125	10446
	10-7	3340	10377	10272	7979	9340
ITS (kgf)	0-0	863	1733	1705	1563	1734
	10-0	1085	1640	1537	1516	1634
	10-3	1209	1662	1662	1388	1597
	10-7	1075	1569	1525	1307	1463

Tablo 6.32’ye göre kısa (STA) ve uzun (LTA) dönem yaşlandırılmış numuneler hariç bütün numunelerde en yüksek yük tekrar sayısına 10-3 katkılı bağlayıcılar sahip olmuştur. STA ve LTA sonrası en yüksek yük tekrar sayısını saf bağlayıcı karışımlar vermiştir. Daha öncede belirtildiği üzere CR modifiyeli karışımların kısa dönem yaşlandırma süresinde yapısal olarak bozulmasından dolayı katkılı karışımların daha düşük yük tekrar sayısı verdiği görülmüştür.

ITSM deney sonuçları değerlendirildiğinde bütün karışımlarda en yüksek rijitlik değerini 10-3 karışımları vermiştir. Ayrıca 10-0 ve 10-7 karışımları benzer rijitlik değerleri sergilemiştir. Ayrıca her bir katkı tipi kendi içinde kıyaslandığında laboratuvar da 4 hafta 60 °C’de yaşlandırılan numuneler ile arazide 12 ay boyunca yaşlandırılan numunelerin benzer ITSM değerleri verdiği belirlenmiştir.

ITS deney sonuçlarına göre ise yaşlandırılmış numuneler arasında en yüksek ITS değerini saf bağlayıcı karışımlar vermiştir. ITSM deneyinde olduğu gibi yaşlandırma süreleri sonunda karışımlar kendi içinde benzer özellikleri sergilemektedir.

7. SONUÇLAR

Çalışmada 4 bağlayıcı 3 karışım deneyi olarak toplam 7 farklı deney yöntemi ele alınmıştır. 3 farklı katkının bağlayıcı ve bitümlü karışım içindeki etkileri laboratuvar ve açık havada (arazide) farklı yaşlandırma süreleri dikkate alınarak araştırılmıştır. Bağlayıcı deneylerinde saf ve modifiye bağlayıcılar ve yaşlanma periyotlarına maruz bırakılan bitümlü karışımlardan ekstrasyon ve distilasyon yöntemi ile elde edilen bağlayıcılar kullanılmıştır. Bağlayıcı deneyi olarak FTIR, DSR, RV ve yumuşama noktası deneyleri uygulanmıştır. Yorulma, ITSM ve ITS karışım deneyleri saf ve modifiye bağlayıcılarla hazırlanmış laboratuvar ve arazide yaşlandırılmış Marshall numuneleri üzerine uygulanmıştır.

Yumuşama noktası deney sonuçlarına göre, en yüksek yumuşama noktası ve en düşük yaşlanma indeksi değerini %10 CR+%3 Sasobit katkılı bağlayıcı vermiştir. Ayrıca uzun dönemde Evotherm katkısının CR ile birlikte kullanılmasının yaşlanmayı geciktirdiği tespit edilmiştir. Laboratuvar yaşlandırması sonrası geri dönüştürülen bağlayıcılar içerisinde 10-0 bağlayıcısı yaşlanmadan en fazla etkilenen bağlayıcı olurken CR ile Sasobit katkısının birlikte kullanılması yaşlanmayı önemli derecede azaltmıştır.

CR kullanımı bağlayıcının viskozitesini önemli derecede artırmaktadır. Sasobit katkısının CR ile birlikte kullanılması durumunda CR'nin neden olduğu viskozite artışı bir miktar düşmektedir. Evotherm ise viskozite azalışına bir katkı sunmamaktadır. Viskozite deneyine göre RTFOT ve STA yaşlandırmasının etkisi katkılı bağlayıcılarda daha fazla olmaktadır. CR'ın tek başına kullanılması yaşlanmayı azaltamazken Sasobit ile birlikte kullanılması durumunda yaşlanma önemli derecede azaltmaktadır. Laboratuvar 60 °C'de 4 hafta yaşlandırma sonunda tespit edilen viskozite değerlerine, arazide yaklaşık 6 ay sonra ulaşılabilir.

DSR deney sonuçlarına göre en yüksek tekerlek izi parametresini %10 CR+%3 Sasobit katkılı bağlayıcı vermiştir. Katkılı bağlayıcılar RTFOT yaşlandırma sonrası benzer performans sergilerken PAV sonrası $G^*/\sin\delta$ değerleri arasındaki fark açılmıştır. Bu da katkılı bağlayıcılar arasındaki farklılıkların tespit edilebilmesi için uzun dönem yaşlandırmanın daha uygun olduğuna işaret etmektedir. Laboratuvar ve çevresel koşullar altında ılık asfalt katkılarının CR ile birlikte kullanımının DSR deneyi ile elde edilen yaşlanma indekslerine göre yaşlanmayı geciktirdiği tespit edilmiştir. DSR sonuçlarına göre laboratuvar 60 °C'de yaşlandırma ve arazi yaşlandırma yöntemleri ile standart uzun dönem yaşlandırma yöntemi (85 °C, 5 gün) arasında yüksek bir uyumun olduğu görülmüştür.

FTIR sonuçlarına göre gerek laboratuvarında gerekse arazideki yaşlandırmada zaman ile C=O indeksleri sürekli olarak artmaktadır. Bu artış laboratuvarında ilk haftada, arazide de 2.ayda belirgin olmakta sonra yavaş bir şekilde devam etmektedir. %10 CR+%3 Sasobit katkılı bağlayıcı, laboratuvarında ve çevresel şartlar altındaki yaşlandırmada C=O bakımından en az yaşlanan bağlayıcı olmuştur. Arazi yaşlanmasını temsil etmek amacıyla laboratuvarında 60 °C’de yapılacak yaşlandırmada saf bağlayıcıların en az 4 hafta katkılı bağlayıcıların ise en az 3 hafta yaşlandırılmasının uygun olacağı tespit edilmiştir. Katkılı bağlayıcıların standart yaşlandırma yöntemlerinden olumsuz yönde etkilendiği tespit edildiğinden yüksek sıcaklık ve kısa süreli yaşlandırma yerine düşük sıcaklık ve uzun süreli yaşlandırmanın araziye daha iyi temsil edeceği düşünülmektedir.

ITS deney sonuçlarına göre en çok ve en hızlı yaşlanan karışım saf bağlayıcı karışım olup %10 CR+%3 Sasobit katkılı karışım ise en az yaşlanan karışım olmuştur. Katkılı numunelerin arazideki yaşlanma indeksleri 2 aydan sonra çok fazla değişmezken saf karışımın yaşlanma indeksi sürekli artmaktadır. Bundan dolayı ITS deney yöntemiyle CR ve CR ile birlikte ılık asfalt katkılarının kullanımının yaşlanma üzerindeki etkisi açık bir şekilde ortaya çıkmamaktadır.

Laboratuvarındaki yaşlanma süresi ile rijitlik modülleri arasında lineer bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Laboratuvar ve arazi yaşlandırmasına göre en yüksek rijitlik modülü ve en düşük yaşlanma indeksi değerini %10 CR+%3 Sasobit katkılı karışımlar vermiştir. Uzun dönem yaşlandırma sonrası meydana gelen rijitlik artışının %80-85’lik kısmının kısa dönem yaşlandırmada meydana geldiği tespit edilmiştir. Karışımların rijitlik modülleri bakımından katkı tipi gözetmeksizin laboratuvarında 60 °C’de yaşlandırma ile arazi yaşlandırması arasında yüksek bir uyumun olduğu belirlenmiştir.

İndirek çekme tekrarlı yorulma deneyine göre laboratuvarında 4 hafta yaşlandırmadan sonra %10 CR+%3 Sasobit katkılı karışım hariç diğer karışımların deformasyon artışı çatlak oluşuktan sonra çok hızlı gelişmektedir. 10-3 karışımında ise ani bir deformasyon artışı olmamakta bu da yaşlanma etkisi sonrasında çatlak ilerleyişine karşı direncinin diğer karışımlardan daha iyi olduğuna işaret etmektedir. Laboratuvarında oluşan yaşlanmanın arazide oluşabilmesi için katkılı numunelerin saf karışıma göre arazide çok daha uzun süre kalması gerektiği tespit edilmiştir. Laboratuvarında 60 °C’de yaşlandırılan numuneler ile arazide yaşlandırılan numunelerin yorulma deney sonuçları arasında yüksek bir uyumun olduğu görülmüştür. Kısa ve uzun dönem yaşlandırılmış katkılı numunelerin yük tekrar sayılarının saf bağlayıcı numunelerden düşük çıkması STA yönteminin, CR içerikli

karışımların yapısal özelliklerini bozduğuna işaret etmektedir. Yorulma deneyinin saf ve katkılı karışımlarda yaşlanmaya karşı en hassas deney olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada öğütülmüş araç lastiklerinin ılık karışım asfalt katkıları ile birlikte kullanılmasının gerek mekanik özellikler bakımından gerekse standart ve çeşitli yaşlandırma yöntemlerine göre yaşlanma indeksleri bakımından etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle CR ile birlikte Sasobit kullanımının olumlu etkileri ayrıca ömür döngü maliyet analizi çerçevesinde ekonomik olarak değerlendirilmesi gereken bir konudur.



KAYNAKLAR

- [1] <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/11/20061125-2.htm> 2006. Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Kontrolü Yönetmeliği. 15 Ağustos 2018.
- [2] <http://atiksahasi.com/Atik-Lastiklerin-Omrunu-Tamamlamis-Lastikler-Geri-Donusum-Sektorundeki-Onemi-38> Atık Lastiklerin(Ömrünü Tamamlamış Lastikler) Geri Dönüşüm Sektöründeki Önemi. 15 Ağustos 2018.
- [3] <http://www.lasder.org.tr/> LASDER 2018 Yılı Hedefleri. 15 Ağustos 2018.
- [4] <http://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/DevletIIYolEnvanter/SatihYolAgiUzunlugu.pdf> Türkiye'nin Satih Cinsine Göre Toplam Yol Ağı Uzunluğu,” Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM). 5 Haziran 2018.
- [5] <http://www.asmud.org.tr/asfalt.php?sayfa=25> Türkiye’de Son 5 Yılda Yapılan Asfalt Uygulamaları ve Bitüm Tüketimi, Türkiye Asfalt Mütahitleri Derneği. 5 Haziran 2018.
- [6] **Çelik, O.N. and Atış, C.D.**, 2008. Compactibility of Hot Bituminous Mixtures Made with Crumb Rubber-Modified Binders, *Constr. Build. Mater.*, **22(6)**, 1143–1147.
- [7] **Kök, B.V., Yılmaz, M. and Akpolat, M.**, 2014. Evaluation of the Conventional and Rheological Properties of SBS+Sasobit Modified Binder, *Constr. Build. Mater.*, **63**, 174–179.
- [8] **Akpolat, M.**, 2014. Ilık Karışım Katkısının Bitüm ve Taş Mastik Asfalt Kaplamaya Etkisinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [9] **Özden, B. ve Türer, A.**, 2005, Ucuz Araba Lastiği Yastığı (ALY) Kullanarak Sismik İzolasyon, *YDGA2005-Yığma Yapıların Deprem Güvenliğinin Arttırılması Çalıştayı*, ODTÜ, Ankara, 17 Şubat 2005, s.1-8.
- [10] **Sugözü, İ. ve Mutlu, İ.**, 2009. Atık Taşıtlar Lastikleri ve Değerlendirme Yöntemleri, *Teknolojik Araştırmalar Dergisi*, **1(1)**, 34-46.
- [11] **Huang, S.C.**, 2006. Rheological Characteristics of Crumb Rubber-Modified Asphalts with Long-Term Aging, *Road Mater. Pavement Des.*, **7(sup1)**, 37–56.
- [12] **Kök, B.V. and Çolak, H.**, 2011. Laboratory Comparison of the Crumb-Rubber and SBS Modified Bitumen and Hot Mix Asphalt, *Constr. Build. Mater.*, **25(8)**, 3204–3212.

- [13] **Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F.,** 2012. Warm Mix Asphalt: An Overview, *J. Clean. Prod.*, **24**, 76–84.
- [14] **Smith, B.S.,** 2006. Design and Construction of Pavements in Cold Regions : State of the Practice, *Yüksek Lisans Tezi*, Brigham Young Üniversitesi, Provo, Utah, USA.
- [15] **Butz, T., Rahimian, I. and Hildebrand, G.,** 2001. Modification of Road Bitumen with the Fischer-Tropsch Paraffin Sasobit, *J. Appl. Asph. Bind. Technology*, **1(2)**, 70–86.
- [16] **Hurley, G.C. and Prowell, B.D.,** 2006. Evaluation of Evotherm for Use in Warm Mix Asphalt, *National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 06-02*, Auburn University, Auburn, AL.
- [17] **Chowdhury, A. and Button, J.,** 2008. A Review of Warm Mix Asphalt, *Texas Transportation Institute, Report 473700-0080-1*, Texas.
- [18] **Temren, Z.,** 2013. Ilık Karışım Asfalt Uygulamaları ve Performansı, 5. *Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 18-19 Kasım, s. 50–60.
- [19] **Mcmillan, C., Sc, M., Eng, P., Donovan, H. and Horton, B.,** 2003. Current Asphalt Rubber Developments in Alberta, *2003 Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, s. 1–20.
- [20] **Hicks, R.G., Lundy, J.R. and Epps, J.A.,** 1999 *Asphalt-Rubber Paving Materials, Volume I-Final Report Rubber Pavements Association*, Tempe, AZ.
- [21] **Sotil, A.,** 2004. Material Characteristics of Asphalt Rubber Mixtures, *Word J. Int. Linguist. Assoc.*, 1–22.
- [22] **Huang, B., Mohammad, L., Graves, P. and Abadie, C.,** 2002. Louisiana Experience with Crumb Rubber-Modified Hot-Mix Asphalt Pavement, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, **1789**, 1–13.
- [23] **Yu, X., Leng, Z. and Wei, T.,** 2014. Investigation of the Rheological Modification Mechanism of Warm-Mix Additives on Crumb-Rubber-Modified Asphalt, *J. Mater. Civ. Eng.*, **26(2)**, 312–319.
- [24] www.sasolwax.com What Is Sasobit. 1 Ocak 2014.
- [25] **Xiao, F., Punith, V.S. and Amirkhanian, S.N.,** 2012. Effects of Non-Foaming IKA Additives on Asphalt Binders at High Performance Temperatures, *Fuel*, **94**, 144–155.
- [26] **Akisetty, C.K., Lee, S.J. and Amirkhanian, S.N.,** 2009. High Temperature Properties of Rubberized Binders Containing Warm Asphalt Additives, *Constr. Build. Mater.*, **23(1)**, 565–573.

- [27] **Hurley, G.C. and Prowell, B.D.**, 2005. Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt, *National Center for Asphalt Technology, NCAT Report. 05-06*, Auburn, AL.
- [28] **Hamzah, M.O., Jamshidi, A. and Shahadan, Z.**, 2010. Evaluation of the Potential of Sasobit® to Reduce Required Heat Energy and CO2 Emission in the Asphalt Industry, *J. Clean. Prod.*, **18(18)**, 1859–1865.
- [29] **Zhao, G. and Guo, P.**, 2012. Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt, *Energy Procedia*, **16**, 1230–1236.
- [30] **MeadWestvaco Corporation and Asphalt Innovations**, 2012. Evotherm M1.
- [31] **Ghabchi, R., Singh, D., Zaman, M. and Tian, Q.**, 2013. Application of Asphalt-Aggregates Interfacial Energies to Evaluate Moisture-Induced Damage of Warm Mix Asphalt, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, **104**, 29–38.
- [32] **Xiao, F., Amirkhanian, S.N. and Zhang, R.**, 2011. Rheological Investigation of Non-Foaming IKA Additives at Mid-Temperature, *Emerging Technologies for Material, Design, Rehabilitation, and Inspection of Roadway Pavements*, 1–8.
- [33] **Kök, B.V. and Akpolat, M.**, 2015. Effects of Using Sasobit and SBS on the Engineering Properties of Bitumen and Stone Mastic Asphalt, *J. Mater. Civ. Eng.*, **27(10)**, 04015006.
- [34] **Fakhri, M., Ghanizadeh, A.R. and Omrani, H.**, 2013. Comparison of Fatigue Resistance of HMA and IKA Mixtures Modified by SBS, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, **104**, 168–177.
- [35] **Kök, B.V., Yılmaz, M. and Akpolat, M.**, 2014. Evaluation of the Conventional and Rheological Properties of SBS+Sasobit Modified Binder, *Constr. Build. Mater.*, **63**, 174–179.
- [36] **Sargand, S., Nazzal, M. D., Al-Rawashdeh, A. and Powers, D.**, 2012. Field Evaluation of Warm-Mix Asphalt Technologies, *J. Mater. Civ. Eng.*, **24(11)**, 1343–1349.
- [37] **Behl, A., Kumar, G., Sharma, G. and Jain, P.K.**, 2013. Evaluation of Field Performance of Warm-Mix Asphalt Pavements in India, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, **104**, 158–167.
- [38] **Tao, Z., Huang, W., Du, Q. and Yan, J.**, 2009. Warm Mix Asphalt Technology Applied at Low Air Temperature in China, *Road Mater. Pavement Des.*, **10(sup1)**, 337–347.

- [39] **Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Abreu, L.P.F. and Fernandes, S.R.M.,** 2013. Use of a Warm Mix Asphalt Additive to Reduce the Production Temperatures and to Improve the Performance of Asphalt Rubber Mixtures, *J. Clean. Prod.*, **41**, 15–22.
- [40] **Wang, C., Hao, P., Ruan, F., Zhang, X. and Adhikari, S.,** 2013. Determination of the Production Temperature of Warm Mix Asphalt by Workability Test, *Constr. Build. Mater.*, **48**, 1165–1170.
- [41] **Arega, Z.A., Bhasin, A. and Kesel, T. De,** 2013. Influence of Extended Aging on the Properties of Asphalt Composites Produced Using Hot and Warm Mix Methods, *Constr. Build. Mater.*, **44**, 168–174.
- [42] **Yoo, M.Y., Jeong, S.H., Park, J.Y., Kim, N.H. and Kim, K.W.,** 2011. Low-Temperature Fracture Characteristics of Selected Warm-Mix Asphalt Concretes, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, **2208**, 40–47.
- [43] **Bonaquist, R.,** 2011. Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt, **NCHRP Report 691**, Sterling, VA.
- [44] **Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D. and DelRio-Prat, M.,** 2011. Evaluation of Compactability and Mechanical Properties of Bituminous Mixes with Warm Additives, *Constr. Build. Mater.*, **25(5)**, 2304–2311.
- [45] **Yu, H., Leng, Z., Xiao, F. and Gao, Z.,** 2016. Rheological and Chemical Characteristics of Rubberized Binders with Non-Foaming Warm Mix Additives, *Constr. Build. Mater.*, **111**, 671–678.
- [46] **Kök, B.V., Yilmaz, M. and Akpolat, M.,** 2018. Effects of Evotherm on Conventional and Properties of Crumb Rubber Modified Binder, *Int. J. Eng. Sci. Manag. Res.*, **5(7)**, 1–9.
- [47] **Oner, J., Sengoz, B., Rija, S.F. and Topal, A.,** 2017. Investigation of the Rheological Properties of Elastomeric Polymer-Modified Bitumen Using Warm-Mix Asphalt Additives, *Road Mater. Pavement Des.*, **18(5)**, 1049-1066.
- [48] **Xiao, F., Wenbin Zhao, P.E. and Amirkhanian, S.N.,** 2009. Fatigue Behavior of Rubberized Asphalt Concrete Mixtures Containing Warm Asphalt Additives, *Constr. Build. Mater.*, **23(10)**, 3144–3151.
- [49] **Kök, B.V., Yilmaz, M. and Akpolat, M.,** 2016. Performance Evaluation of Crumb Rubber and Paraffin Modified Stone Mastic Asphalt, *Can. J. Civ. Eng.*, **43(5)**, 402–410.

- [50] **Wang, H., Dang, Z., You, Z. and Cao, D.,** 2012. Effect of Warm Mixture Asphalt (IKA) Additives on High Failure Temperature Properties for Crumb Rubber Modified (CRM) Binders, *Constr. Build. Mater.*, **35**, 281–288.
- [51] **Kim, H., Jeong, K.D., Lee, M.S. and Lee, S.J.,** 2014. Performance Properties of CRM Binders with Wax Warm Additives, *Constr. Build. Mater.*, **66**, 356–360.
- [52] **Aksoy, A.,** 2008. Bitüm Reolojik Yapısının Bitümün Yaşlanmasına ve Kaplamanın Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi
<http://www.trafik.gov.tr/SiteAssets/Yayinlar/Bildiriler/pdf/C2-17.pdf>.
- [53] **Noureldin, A.S.,** 1995. Long Term Performance of Asphalt Cement Binders; A Dual View, *Physical Properties of Asphalt Cement Binders, ASTM STP 1241*, pp. 154–174, J.C. Hardin, ed., ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [54] **Traxler, R.N.,** 1963. Durability of Asphalt Cements, *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, **32**, pp. 44–63.
- [55] **Traxler, R.N.,** 1961. Relation Between Asphalt Composition and Hardening by Volatilization and Oxidation, *Assoc Asphalt Paving Technol Proc*, pp. 359–372.
- [56] **Lund, J. W. and Wilson, J. E.,** 1984. Evaluation of Asphalt Aging in Hot Mix Plants, *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, **53**, 1–18.
- [57] **Lund, J.W. and Wilson, J.E.,** 1984. Field Validation of Asphalt Aging in Hot Mix Plants, *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, **55**, pp. 92–119.
- [58] **Topal, A. and Şengöz, B.,** 2008. Effect of SBS Polymer Modified Bitumen on the Ageing Properties of Asphalt, *In Proceedings of the 4th Euraspalt and Eurobitume Congress*, European Asphalt Pavement Association, Copenhagen, Denmark.
- [59] **Zhao, D., Lei, M. and Yao, Z.,** 2009. Evaluation of Polymer-Modified Hot-Mix Asphalt: Laboratory Characterization, *J. Mater. Civ. Eng.*, 21(4), 163–170.
- [60] **Morian, N., Hajj, E.Y., Glover, C.J. and Sebaaly, P.E.,** 2011. Oxidative Aging of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt Mixtures, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, **2207(1)**, 107–116.
- [61] **Kandhal, P. and Chakraborty, S.,** 1996. Effect of Asphalt Film Thickness on Short- and Long-Term Aging of Asphalt Paving Mixtures, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, **1535**, pp. 83–90.
- [62] **Chipperfield, E. H. and Welch, T. R.,** 1967. Studies on the Relationships between the Properties of Road Bitumens and Their Service Performance, *Assoc Asphalt Paving Technol Proc*, pp. 421–488.

- [63] **Aschenbrener, T. and Far, N.**, 1994. Short-Term Aging of Hot Mix Asphalt, *Colorado Department of Transportation, Report No. CDOT-DTD-R-94-11*, Denver, CO, USA.
- [64] **Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J.S., Bonaquist, R., Austerman, A. and Booshehrian, A.**, 2012. Performance Characteristics of Plant Produced High RAP Mixtures, *Road Mater. Pavement Des.*, **13(sup1)**, 183–208.
- [65] **Terrel, R.L., and Holen, D.J.**, 1976. Performance of Asphalt Concrete Pavement Mixtures Produced by the Drum Mixer Process, *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, **45**, 169–198.
- [66] **Chollar, B.H., Zenewitz, J.A., Boone, J.G., Tran, K.T. and Anderson, D.T.**, 1989. Changes Occurring in Asphalts in Drum Dryer and Batch (Pug Mill) Mixing Operations, *Transportation Research Board*, Washington, DC, USA.
- [67] **Daniel, J.S., Bennert, T., Kim, Y.R. and Mogawer, W.**, 2015. Evaluation of Plant-Produced RAP Mixtures in the Northeast, *Federal Highway Administration, Pooled Fund Phase I Interim Report No: TBF5-230*, Washington, DC, USA.
- [68] **Kemp, G.R. and Predoehl, N.H.**, 1981. A Comparison of Field and Laboratory Environments on Asphalt Durability, *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, **50**, pp. 492–537.
- [69] **Kari, W.J.**, 1982. Effect of Construction Practices on the Asphalt Properties in the Mix, *In Proceedings of the Annual Conference of Canadian Technical Asphalt Association*, Halifax, NS, Canada, pp. 310–334.
- [70] **Rolt, J.**, 2000. Top-down Cracking: Myth or Reality, *In The World Bank Regional Seminar on Innovative Road Rehabilitation and Recycling Technologies*, Amman, Jordan, pp. 24–26.
- [71] **Houston, W.N., Mirza, M.W., Zapata, C.E. and Raghavendra, S.**, 2007. Simulating The Effects of Hot Mix Asphalt Aging for Performance Testing and Pavement, *Research Results Digest 324*, Washington, D.C.
- [72] **Houston, W.N., Mirza, M.W., Zapata, C.E. and Raghavendra, S.**, 2005. Environmental Effects in Pavement Mix and Structural Design Systems, *Transportation Research Board, NCHRP Project 9-23*, Washington, DC.
- [73] **Farrar, M.J., Turner, T.F., Planche, J.P., Schabron, J.F. and Harnsberger, P.M.**, 2013. Evolution of the Crossover Modulus with Oxidative Aging, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, **2370(1)**, 76–83.
- [74] **Wu, S., Zhao, Z., Xiao, Y., Yi, M., Chen, Z. and Li, M.**, 2017. Evaluation of Mechanical Properties and Aging Index of 10-Year Field Aged Asphalt Materials, *Constr. Build. Mater.*, **155**, 1158–1167.

- [75] **Martin, A.E., Arambula, E., Yin, F., Cucalon, L.G., Chowdhury, A., Lytton, R., Epps, J., Estakhri, C. and Park, E.S.,** 2014, Evaluation of the Moisture Susceptibility of IKA Technologies, *Transportation Research Board, NCHRP, Report 763*, Washington, DC.
- [76] **Lee, D.,** 1973. Asphalt Durability Correlation in Iowa, *Transp. Res. Rec.*, **468**, 43–60.
- [77] **Sirin, O., Paul, D.K. and Kassem, E.,** 2018. State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives, *Adv. Civ. Eng.*, **2018**, 1–18.
- [78] **Petersen, J.C.,** 1984. Chemical Composition of Asphalts as Related to Asphalt Durability; State of Art, *Transp. Res. Rec.*, (999), pp. 13–30.
- [79] **Das, P.K., Balieu, R., Kringos, N. and Birgisson, B.,** 2015. On the Oxidative Ageing Mechanism and Its Effect on Asphalt Mixtures Morphology, *Mater. Struct.*, **48(10)**, 3113–3127.
- [80] **Whiteoak, D. and Read, J.,** 2003. The Shell Bitumen Handbook, *Thomas Telford Ltd*, London.
- [81] **Bell, C.A. and Sosn, D.,** 1994. Aging : Binder Validation.
- [82] **Pan, Y., Zhang, X., Tian, J., Jin, X., Luo, L. and Yang, K.,** 2017. Mapping Asphalt Pavement Aging and Condition Using Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis in Beijing, China, *J. Appl. Remote Sens.*, **11(1)**, 016003.
- [83] **Yin, F., Arámbula-Mercado, E., Epps Martin, A., Newcomb, D. and Tran, N.,** 2017. Long-Term Ageing of Asphalt Mixtures, *Road Mater. Pavement Des.*, **18(sup1)**, 2–27.
- [84] **Rondon, H.A., Reyes, F.A., Flintsch, G.W. and Mogrovejo, D.E.,** 2012. Environmental Effects on Hot Mix Asphalt Dynamic Mechanical Properties – a Case Study in Bogota, Columbia, *Transportation Research Board 91st Annual Meeting Compendium of Papers*, Washington, DC, USA, pp. 12–3637.
- [85] **West, R., Rodezno, C., Julian, G., Prowell, B., Frank, B., Osborn, L.V. and Kriech, T.,** 2014. Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies, *Transportation Research Board, Report No: NCHRP 09-47A*, Washington, DC.
- [86] **Azari, H. and Mohseni, A.,** 2013. Effect of Short-Term Conditioning and Long-Term Ageing on Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mixtures, *Road Mater. Pavement Des.*, **14(sup2)**, 79–91.
- [87] **Tarbox, S. and Daniel, J. S.,** 2012. Effects of Long-Term Oven Aging on Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, **2294(1)**, 1–15.

- [88] **Brown, S.F. and Scholz, T.V.**, 2000. Development of Laboratory Protocols for the Ageing of Asphalt Mixtures, *2nd Euroasphalt and Eurobitume Conference*, Barselona, İspanya, pp. 83–90.
- [89] **Siddiqui, M.N. and Ali, M.F.**, 1999. Studies on the Aging Behavior of the Arabian Asphalts, *Fuel*, **78(9)**, 1005–1015.
- [90] **Bell, C. A.**, 1989. Summary Report on the Aging of Asphalt-Aggregate Systems, *Strategic Highway Research Program, National Research Council*, Washington, DC, p. 125.
- [91] **Kliewer, J., Bell, C. and Sosnovske, D.**, 1995. Investigation of the Relationship Between Field Performance and Laboratory Aging Properties of Asphalt Mixtures, *Engineering Properties of Asphalt Mixtures and the Relationship to Their Performance*, ASTM STP 1265, S.D. Gerald, A. H., Dale, ed., ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [92] **Dickinson, E.J.**, 1980. The Hardening of Middle East Petroleum Asphalts in Pavement Surfacing, *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*, **49**, pp. 30–63.
- [93] **Airey, G.D.**, 2003. State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials, *Int. J. Pavement Eng.*, **4(3)**, 165–176.
- [94] **Glover, C.J., Han, R., Jin, X., Prapaitrakul, N., Cui, Y., Rose, A., Lawrence, J.J., Padigala, M., Arambula, E., Park, E.S. and Martin, A. E.**, 2014. Evaluation of Binder Aging and Its Influence in Aging of Hot Mix Asphalt Concrete, *Technical Report. by Charles J. Glover, Rongbin Han, Xin Jin, Nikornpon Prapaitrakul, Yuanchen Cui, Avery Rose, James J. Lawrence, Meghana Padigala, Edith Arambula, Eun Su*, **Rep. 0-6009-2, 7(2)**.
- [95] **Dondi, G., Mazzotta, F., Simone, A., Vignali, V., Sangiorgi, C. and Lantieri, C.**, 2016. Evaluation of Different Short Term Aging Procedures with Neat, Warm and Modified Binders, *Constr. Build. Mater.*, **106**, 282–289.
- [96] **Branthaver, J., Petersen, J., Robertson, R., Duvall, J., Kim, S., Harnsberger, P., Mill, T., Ensley, E., Barbour, F. and Schabron, J.**, 1993. Binder Characterization and Evaluation. Volume2: Chemistry. *Strategic Highway Research Program, National Research Council*, **SHRP-A-368**, Washington, DC.
- [97] **Quintana, H.R. and Lizcano, F. R.**, 2013. A Review of Asphalt and Asphalt Mixture Aging, *Ing. e Investig.*, **33(1)**, 5–12.
- [98] **Lu, X., Talon, Y. and Redelius, P.**, 2008. Aging of Bituminous Binders – Laboratory Tests and Field Data, *Proceedings Of The 4th Eurasphalt And Eurobitume Congress, Copenhagen, Denmark*, European Asphalt Pavement Association (EAPA), May 2008 pp. 1–12.

- [99] **Steiner, D., Hofko, B., Hospodka, M., Handle, F., Grothe, H., Füssl, J., Eberhardsteiner, L. and Blab, R.,** 2016. Towards an Optimised Lab Procedure for Long-Term Oxidative Ageing of Asphalt Mix Specimen, *Int. J. Pavement Eng.*, **17(6)**, 471–477.
- [100] **Sirin, O., Paul, D.K., Kassem, E. and Ohiduzzaman, M.,** 2017. Effect of Ageing on Asphalt Binders in the State of Qatar: A Case Study, *Road Mater. Pavement Des.*, **18**, 165–184.
- [101] **Hagos, E., Molenaar, A. and Van De Ven, M.F.C.,** 2009. Chemical Characterization of Laboratory and Field Bitumen Aging in Porous Asphalt Concrete, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, I.L.A.-Q. Andreas Loizos, Manfred N. Partl, Tom Scarpas, ed., CRC Press, pp. 173–184.
- [102] **Xiang, L., Cheng, J. and Kang, S.,** 2015. Thermal Oxidative Aging Mechanism of Crumb Rubber/SBS Composite Modified Asphalt, *Constr. Build. Mater.*, **75**, 169–175.
- [103] **Hamzah, M.O., Mohamed, A.A., and Ismail, H.,** 2006. Laboratory Investigation of the Properties of a Newly Developed Crumb Rubber Modified (Cri1) Asphalt Mixtures, *Emirates J. Eng. Res.*, **11(2)**, 67–72.
- [104] **Abbas, A.R., Nazzal, M., Kaya, S., Akinbowale, S., Subedi, B., Arefin, M.S. and Abu Qtaish, L.,** 2016. Effect of Aging on Foamed Warm Mix Asphalt Produced by Water Injection, *J. Mater. Civ. Eng.*, **28(11)**, 04016128.
- [105] **Wang, S., Wang, Q. and Li, S.,** 2016. Thermooxidative Aging Mechanism of Crumb-Rubber-Modified Asphalt, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133(16)**, 43323(1-7).
- [106] **Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., García-Travé, G. and Rubio-Gámez, M.C.,** 2015. Laboratory Study of the Long-Term Climatic Deterioration of Asphalt Mixtures, *Constr. Build. Mater.*, **88**, 32–40.
- [107] **Islam, M.R., Hossain, M.I. and Tarefder, R.A.,** 2015. A Study of Asphalt Aging Using Indirect Tensile Strength Test, *Constr. Build. Mater.*, **95**, 218–223.
- [108] **Ali, A.H., Mashaan, N.S. and Karim, M.R.,** 2013. Investigations of Physical and Rheological Properties of Aged Rubberised Bitumen, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, **2013**, 1–7.
- [109] **Mohammad, L.N., Cooper, S.B. and Elseifi, M.A.,** 2011. Characterization of HMA Mixtures Containing High Reclaimed Asphalt Pavement Content with Crumb Rubber Additives, *J. Mater. Civ. Eng.*, **23(11)**, 1560–1568.
- [110] **Arabani, M., Mirabdolazimi, S.M. and Sasani, A.R.,** 2010. The Effect of Waste Tire Thread Mesh on the Dynamic Behaviour of Asphalt Mixtures, *Constr. Build. Mater.*, **24(6)**, 1060–1068.

- [111] **Wang, H., Dang, Z., Li, L. and You, Z.,** 2013. Analysis on Fatigue Crack Growth Laws for Crumb Rubber Modified (CRM) Asphalt Mixture, *Constr. Build. Mater.*, **47**, 1342–1349.
- [112] **Caltrans,** 2003. Asphalt Rubber Usage Guide, *State of California Department of Transportation*, Sacramento, CA.
- [113] **Mitchell, M.R., Link, R.E., Xiao, F., Amirkhanian, S.N. and Shen, J.,** 2009. Effects of Various Long-Term Aging Procedures on the Rheological Properties of Laboratory Prepared Rubberized Asphalt Binders, *J. Test. Eval.*, **37(4)**, 101706.
- [114] **Sarsam, S.I. and Al-Sadik, S.M.,** 2014. Contribution of Crumb Rubber in the Aging Process of Asphalt Concrete, *Int. J. Sci. Res. Knowl.*, **2(9)**, 404–415.
- [115] **Ikpugha, O.M.O.J.,** 2014. Performance Testing of Asphalt Concrete Containing Crumb Rubber Modifier and Warm Mix Additives, Master of Science, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- [116] **Jamshidi, A., Hamzah, M.O. and You, Z.,** 2013. Performance of Warm Mix Asphalt Containing Sasobit®: State-of-the-Art, *Constr. Build. Mater.*, **38**, 530–553.
- [117] **Safaei, F., Lee, J., Nascimento, L.A.H.Do., Hintz, C. and Kim, Y.R.,** 2014. Implications of Warm-Mix Asphalt on Long-Term Oxidative Ageing and Fatigue Performance of Asphalt Binders and Mixtures, *Road Mater. Pavement Des.*, **15(sup1)**, 45–61.
- [118] **Abbas, A.R., Nazzal, M., Kaya, S., Akinbowale, S., Subedi, B., Qtaish, L.A. and Arefin, M.S.,** 2015. Influence of Warm Mix Asphalt on Aging of Asphalt Binders, *TMS Middle East Mediterranean Materials Congress on Energy and Infrastructure Systems (MEMA 2015)*, I. Karaman, R. Arroyave, and E. Masad, eds., pp. 55–56.
- [119] **Goh, S.W. and You, Z.,** 2011. Evaluation of Warm Mix Asphalt Produced at Various Temperatures through Dynamic Modulus Testing and Four Point Beam Fatigue Testing, *Pavements Mater.*, **212**, 123–130.
- [120] **Xiao, F., Punith, V.S., Amirkhanian, S.N. and Thodesen, C.,** 2013. Improved Resistance of Long-Term Aged Warm-Mix Asphalt to Moisture Damage Containing Moist Aggregates, *J. Mater. Civ. Eng.*, **25(7)**, 913–922.
- [121] **Biro, S., Gandhi, T. and Amirkhanian, S.,** 2009. Midrange Temperature Rheological Properties of Warm Asphalt Binders, *J. Mater. Civ. Eng.*, **21(7)**, 316–323.
- [122] **Liu, J., Saboundjian, S., Li, P., Connor, B. and Brunette, B.,** 2011. Laboratory Evaluation of Sasobit-Modified Warm-Mix Asphalt for Alaskan Conditions, *J. Mater. Civ. Eng.*, **23(11)**, 1498–1505.

- [123] **Kheradmand, B., Muniandy, R., Hua, L.T. and Solouki, A.**, 2015. A Laboratory Investigation on the Rheological Properties of Aged and Unaged Organic Wax Modified Asphalt Binders, *Pet. Sci. Technol.*, **33(7)**, 757–764.
- [124] **Kim, H.H., Jeong, K.D., Lee, M.S. and Lee, S.J.**, 2015. Effect of FT Paraffin Wax Contents on Performance Properties of Crumb Rubber-Modified Asphalt Binders, *J. Mater. Civ. Eng.*, **27(11)**, 04015011.
- [125] **Petit, C., Millien, A., Canestrari, F., Pannunzio, V. and Virgili, A.**, 2012. Experimental Study on Shear Fatigue Behavior and Stiffness Performance of Warm Mix Asphalt by Adding Synthetic Wax, *Constr. Build. Mater.*, **34**, 537–544.
- [126] **National Academies of Sciences, Engineering and Medicine**, 2007. Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting, Volume I: Dynamic Modulus (E*) and Volume II: Flow Number and Flow Time, Transportation Research Board, **NCHRP Report 580**, Washington, D.C.
- [127] **Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, J. and Zoorob, S.E.**, 2010. Optimization of Warm Mix Asphalts Using Different Blends of Binders and Synthetic Paraffin Wax Contents, *Constr. Build. Mater.*, **24(9)**, 1621–1631.
- [128] **Liu, G. and Glover, C.J.**, 2015. A Study on the Oxidation Kinetics of Warm Mix Asphalt, *Chem. Eng. J.*, **280**, 115–120.
- [129] **Kok, B.V., Yilmaz, M. and Akpolat, M.**, 2016. Evaluation of Using Evotherm with SBS Modification, *Academics World International Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 6–9.
- [130] **Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E.**, 2004, Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol, *Asphalt Technology Program*, Morgantown, West Virginia.
- [131] **BS EN 12697-1**, 2012. Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 1: Soluble Binder Content, *British Standard*, pp. 1–62.
- [132] **BS EN 12697-3**, 2013. Bituminous Mixtures - Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 3: Bitumen Recovery: Rotary Evaporator, *British Standard*, pp. 1–62.
- [133] **Kutluhan, S. ve Ağar, E.**, 2004. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Tekerlek İzi Oluşumunun İncelenmesi, *4. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 25-26 Kasım, s. 213–223.
- [134] **Bahia, H.U., Hanson, D.I., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A. and Anderson, R.M.**, 2001. Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, *Transportation Research Board, National Research Council, NCHRP REPORT 459*, Washington, D.C.

- [135] **Warren, R.S., McGennis, R. B. and Bahia, H.U.**, 1994. Superpave Asphalt Binder Test Methods An Illustrated Overview, Asphalt Institute, **Report No: FHWA-SA-94-068**, Lexington, KY.
- [136] **Yao, H., Dai, Q. and You, Z.**, 2015. Fourier Transform Infrared Spectroscopy Characterization of Aging-Related Properties of Original and Nano-Modified Asphalt Binders, *Constr. Build. Mater.*, **101**, 1078–1087.
- [137] **Lamontagne, J.**, 2001. Comparison by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Different Ageing Techniques: Application to Road Bitumens, *Fuel*, **80(4)**, 483–488.
- [138] **Liu, X., Wu, S., Liu, G. and Li, L.**, 2015. Optical and UV-Aging Properties of LDH-Modified Bitumen, *Materials (Basel)*, **8(7)**, 4022–4033.
- [139] **Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y. and Zhang, Y.**, 2006. Improving the Aging Resistance of Styrene-Butadiene-Styrene Tri-Block Copolymer Modified Asphalt by Addition of Antioxidants, *Polym. Degrad. Stab.*, **91(4)**, 795–804.
- [140] **Kök, B.V.**, 2007. Bitümlü Sıcak Karışımların Üretiminde Yeni Bir Karıştırma Yönteminin Araştırılması, *Doktora Tezi*, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [141] **Kennedy, T. W.**, 1972. Practical Method of Conducting the Indirect Tensile Test, *Texas Highway Department, Research Report Number: 98-10*, Austin, Texas.
- [142] **Zoorob, S.E., and Suparma, L.B.**, 2000. Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), *Cem. Concr. Compos.*, **22(4)**, 233–242.
- [143] **Francken, L.**, 1998. Bituminous Binders and Mixes: State of the Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design, E&FN Spon.
- [144] **Ghile, D. B.**, 2006. Effects of Nanoclay Modification on Rheology of Bitumen and on Performance of Asphalt Mixtures, Master of Thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- [145] **Yılmaz, M.**, 2011. Asfaltitin Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, F.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [146] **Subagio, B.S.**, 2003. Development of Laboratory Performance of Indonesian Rock Asphalt (Asbuton) in Hot Rolled Asphalt Mix, *Proc. East. Asia Soc. Transp. Stud.*, **4**, pp. 436–449.

- [147] **Aragão, F.T.S., Lee, J., Kim, Y.R. and Karki, P.**, 2010. Material-Specific Effects of Hydrated Lime on the Properties and Performance Behavior of Asphalt Mixtures and Asphaltic Pavements, *Constr. Build. Mater.*, **24(4)**, 538–544.



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa AKPOLAT	
KİŞİSEL BİLGİLER	
ADRES :	Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Merkez/Tunceli 62000
TELEFON :	+90(530)323 7300
EPOSTA :	mustafaakpolat@munzur.edu.tr
DOĞUM YERİ/TARİHİ:	ELAZIĞ/25.10.1987
MEDENİ HALİ:	EVLİ
EĞİTİM BİLGİLERİ	
LİSANSÜSTÜ	2012-2014, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ
LİSANS :	2008-2012, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ
LİSE :	2001-2004, Balakgazi Lisesi, Elazığ
İŞ DENEYİMİ	
2014 - 2015	UBM Müşavirlik, Bingöl Kesin Hesap-Hakediş Mühendisi
2015 -	Munzur Üniversitesi, Tunceli Araştırma Görevlisi
BİLDİĞİ YABANCI DİLLER	
	İngilizce (B2)