



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



FT PARAFİN (SASOBİT) VE POLİFOSFORİK
ASİT MODİFİYE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN
PERFORMANS TESTLERİ İLE
İNCELENMESİ

Mehmet BAYAZİT

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet BAYAZİT tarafından hazırlanan “**Ft Parafin (Sasobit) ve Polifosforik Asit Modifiye Bitümlü Karışımların Mühendislik Özelliklerinin Performans Testleri ile İncelenmesi**” adlı tez çalışması 29/07/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat KARACASU

.....

Danışman

Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

.....

Üye

Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR

.....

Üye

Prof. Dr. Murat OLGUN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet BAYAZİT

Tarih: 25/08/2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FT PARAFİN (SASOBİT) VE POLİFOSFORİK ASİT MODİFİYE BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN PERFORMANS TESTLERİ İLE İNCELENMESİ

Mehmet BAYAZİT

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2022, 164 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Murat KARACASU
Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR
Prof. Dr. Murat OLGUN
Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN**

Bu tez çalışmasında 50/70 penetrasyona sahip bitüm, Sasobit® (S), Polifosforik asit (PPA) ve Sasobit® ile birlikte Polifosforik asit katkısı ile modifiye edilmiştir. Saf ve modifiye bitümler üzerinde geleneksel bitüm testleri tamamlanmış ve viskozite deneyi ile karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. Ayrıca bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimlerini belirleyebilmek için 90-160°C sıcaklık aralığında 10°C artan sıcaklıklardaki viskozite deneyleri tamamlanmıştır.

Karışım deneyleri için %3S ve %3S+%1PPA modifiyeli bitümler seçilmiştir. Agregalar olarak kalker ve bazalt tipi agregalar seçilmiştir. Kalker tipi agregalar ile aşınma tabakasına uygun bitümlü sıcak karışımlar, bazalt tipi agregalar ile Taş Mastik Asfalt karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların optimum bitüm miktarı Marshall testi ile belirlenmiştir. Karışımların suya karşı dayanımlarını belirleyebilmek için AASHTO T-283 testi uygulanmıştır. Kalıcı deformasyonu belirleyebilmek için üç eksenli statik sünme testi tamamlanmıştır. Üç eksenli statik sünme testi için 500kPa ve 300 kPa basınç değerinde iki farklı eksenel basınç ve 200 kPa ve 100 kPa basınç değerinde iki farklı çevresel basınç uygulanmıştır. Karışımların tekerlek izi deformasyonunu belirleyebilmek için de Hamburg tekerlek izi testi tamamlanmıştır.

Çalışma sonucunda bitümün karıştırma sıcaklığını S katkısı azaltırken, S+PPA katkısının artırdığı belirlenmiştir. Dolaylı çekme testleri sonucunda da tüm karışımların dolaylı çekme mukavemet oranı 0,80 değerinden yüksek çıkmıştır. En yüksek dolaylı çekme mukavemeti değeri %3S+%1PPA modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir. Tekerlek izi test sonucunda katkılar Bitümlü sıcak karışımların ve Taş Mastik Asfalt karışımların, tekerlek izi direncini artırmıştır. Üç eksenli statik sünme deneyi sadece bitümlü sıcak karışımlar üzerine tamamlanabilmiş ve deney sonucunda sünme testine karşı en dayanımlı karışımların %3S+%1PPA modifiyeli bitümle hazırlanan karışımlar olduğu gözlemlenmiştir. Üç eksenli statik

sünme deneyinin ve tekerlek izi deney sonuçlarının Francken model parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada BSK ve TMA karışımının üretim maliyet analizi yapılmıştır. Katkıların  retim maliyetini artırdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Modifiye bitüm, FT paraf n (Sasobit), Polifosforik asit, Bitümlü sıcak karışım, Taş mastik asfalt karışım, AASHTO T-283 deneyi, üç eksenli statik sünme deneyi, Hamburg tekerlek izi deneyi.



ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF FT PARAFFIN (SASOBIT) AND POLYPHOSPHORIC ACID MODIFIED BITUMINOUS MIXTURE BY PERFORMANCE TESTS

Mehmet BAYAZIT

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK

2022, 164 Pages

Jury

**Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK
Prof. Dr. Murat KARACASU
Prof. Dr. Yüksel TAŞDEMİR
Prof. Dr. Murat OLGUN
Dr. Öğr. Üyesi Deniz ARSLAN**

In this study, 50/70 penetration bitumen was modified with Sasobit® (S), Polyphosphoric acid (PPA) and Sasobit® together with Polyphosphoric acid (PPA) additive. Conventional bitumen tests were completed on the binder with and without additives, and the mixing and compression temperatures of the mixtures were determined by the viscosity test. Also, in order to determine the temperature-dependent viscosity changes of bitumen, viscosity tests at temperatures increasing by 10°C in the temperature range of 90-160°C were completed.

%3S and %3S+1%PPA modified bitumens were chosen for the mixing tests. Limestone and basalt type aggregates were chosen for mixtures. Hot mix asphalt were prepared with limestone type aggregate and Stone Mastic Asphalt mixtures were prepared with basalt type aggregate. The optimum bitumen amount of the prepared mixtures was tried to be determined by the Marshall test. AASHTO T-283 test was applied to determine the water resistance of the mixtures. Three-axis static creep test was completed to determine permanent deformation. For the triaxial static creep test, two different axial pressures at 500 kPa and 300 kPa pressures and two different environmental pressures at 200 kPa and 100 kPa pressures were applied. Hamburg rutting tests were completed in order to determine the rutting deformation.

As a result of the study, it was determined that the mixing compression temperature of the bitumen was decreased by the addition of S, while the additive of S+PPA increased it. As a result of indirect tensile tests, the indirect tensile strength ratio of all mixtures was higher than 0,80. The highest indirect tensile strength value was obtained from the mixtures prepared with 3%S+1%PPA modified bitumen. As a result of the rutting test, the rutting resistance of the mixtures started to increase with the addition

of additives. The triaxial static creep test could only be completed on the hot mix asphalt mixtures and it was observed that the mixtures prepared with 3%S+1%PPA modified bitumen were the most resistant to the creep test as a result of the experiment. The Francken model parameters of the triaxial static creep test and the rutting test results were tried to be determined.

In the study, production cost analysis of BSK and TMA mixtures was made. It has been determined that the additives increase the production cost.

Keywords: Modified bitumen, FT paraffin (Sasobit), Polyphosphoric acid, Hot mix asphalt, Stone mastic asphalt, AASHTO T-283 test, Triaxial static creep test, Wheel tracking test.



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın planlanması ve yürütülmesinde beni destekleyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK'e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam kapsamında kullandığım Sasobit® ticari katkı maddesini tedarik eden Teknomet firmasına teşekkür ederim.

Mehmet BAYAZİT
KONYA-2022



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Saf ve Modifiyeli Bitümler Üzerine Tamamlanmış Olan Çalışmalar	5
2.2. Bitümlü Karışımlar Üzerine Tamamlanmış Olan Çalışmalar.....	8
2.3. Kalıcı Deformasyon	11
2.3.1. Kalıcı Deformasyon ve Deformasyona Etki Eden Faktörler	11
2.3.1.1. Bitümlü sıcak karışımının kalıcı deformasyona etkisi.....	11
2.3.1.2. Agreganın kalıcı deformasyona etkisi	13
2.3.1.3. Bitümün kalıcı deformasyona etkisi	14
2.3.1.4. Fillerin kalıcı deformasyona etkisi	15
2.3.1.5 Hava boşluğunun kalıcı deformasyona etkisi	16
2.3.2. Kalıcı deformasyonun belirlenmesi	17
3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR	18
3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler.....	18
3.1.1. Agrega.....	18
3.1.1.1. Agregaların özellikleri	19
3.1.2. Bitüm	20
3.1.2.1. Bitümün reolojik yapısı	21
3.1.2.2. Modifiye bitümler	22
3.2. Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler.....	23
3.2.1. Stabilitate	23
3.2.2. Durabilite	24
3.2.3. Esneklik	25
3.2.4. İşlenebilirlik	25
3.2.5. Geçirimsizlik.....	25
3.2.6. Yorulma direnci	26
3.2.7. Kayma direnci.....	26
3.3. Taş mastik asfaltlar	27
3.3.1. Taş mastik asfaltların olumlu ve olumsuz yönleri	27
3.3.2. Taş mastik asfalt tasarımı	28
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29

4.1. Materyal	29
4.1.1 Bitüm ve çalışmada kullanılan katkıları	29
4.1.2. Çalışmada kullanılan agregalar	30
4.2. Yöntem.....	33
4.2.1. Bitümün modifiye edilmesi	33
4.2.2. Bitümün üzerine tamamlanan deneyler	34
4.2.2.1 Penetrasyon deneyi	34
4.2.2.2. Yumuşama noktası deneyi	34
4.2.2.3. Dönel viskozimetre deneyi	34
4.2.3. Marshall tasarım deneyi.....	36
4.2.4 AASHTO T-283 Modifiye Lottman deneyi	39
4.2.5. Üç eksenli statik sünme deneyi.....	41
4.2.6. Tekerlek izi deneyi.....	47
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	50
5.1. Penetrasyon Deneyi ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları	50
5.2. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları	51
5.3. Marshall Tasarım Deneyi.....	55
5.3.1. Aşınma tabakası tasarım sonuçları	55
5.3.2. Taş mastik asfalt tasarım sonuçları	55
5.4. AASHTO T-283 Modifiye Lotman Deneyi.....	56
5.5. Üç Eksenli Statik Sünme Deneyi.....	58
5.6. Tekerlek İzi Deneyi	61
5.7. Kalıcı Deformasyon Test Sonuçları İçin Model Uyumu	66
5.7.1. Sünme test sonuçlarının Francken modeline göre modellenmesi.....	69
5.7.2. Tekerlek izi test sonuçlarının Francken modeline göre modellenmesi.....	74
5.7.3. Akma noktasının belirlenmesi	77
5.8. Tekerlek İzi Testi ve Statik Sünme Testlerinin Karşılaştırılması	80
5.9. Sasobit® ve Polifosforikasit Katkılı Karışımların Maliyet Analizi.....	82
5.9.1. Agregası ve bitüm maliyetlerinin belirlenmesi	82
5.9.2. Katkı Maliyetlerinin Belirlenmesi	85
5.9.3. Karışımların enerji maliyetlerinin belirlenmesi	85
5.9.4. Karışımların toplam maliyetlerinin belirlenmesi	86
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
6.1 Sonuçlar	88
6.2 Öneriler	90
KAYNAKLAR	92
EKLER	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

G^*	: Bitümün kompleks modülü
$\sin \delta$	: Bitümün faz açısı
$G^*/\sin \delta$	: Tekerlek izi faktörü
E^*	: Asfaltın Dinamik modülü
V_h	: Sıkıştırılmış asfalt numunesinin hava boşluğu
D_p	: Sıkıştırılmış numunenin pratik yoğunluğu
D_t	: Maksimum teorik hacim özgül ağırlık
V_f	: Asfaltla dolu boşluk oranı
VMA	: Agregalar arası boşluk
kPa	: Kilopaskal
cP	: Centipoise
mPa-s	: Milipaskal saniye
ϵ	: Deformasyon
%def	: Yüzde deformasyon
®	: Tescilli ürün

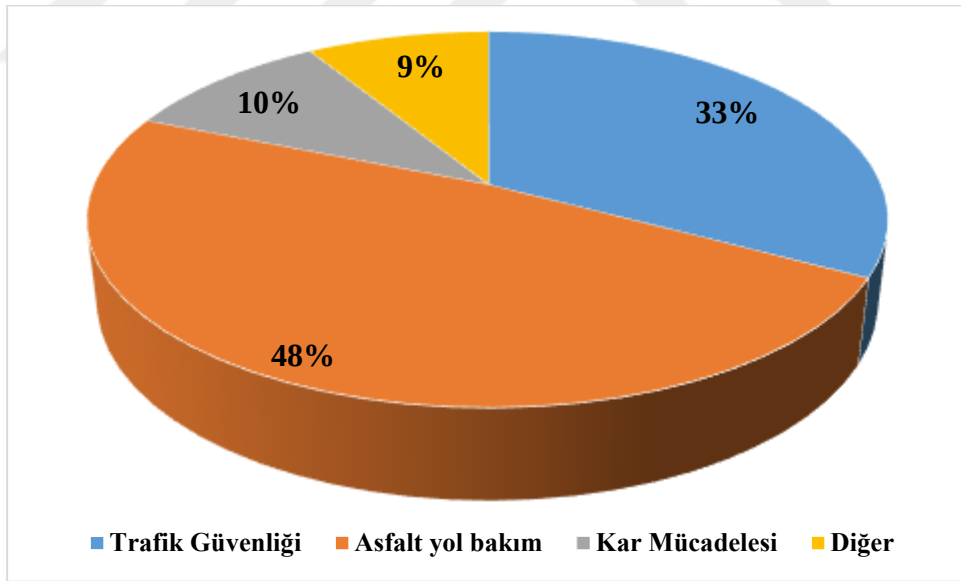
Kısaltmalar

S	: Sasobit® katkısı
PPA	: Polifosforik asit katkısı
APA	: Asfalt kaplama analizörü
DSR	: Dinamik kayma reometresi
BSK	: Bitümlü sıcak karışım
PET	: Polietilen tetrafalat
SBS	: Stiren bütadien stiren
TMA	: Taş mastik asfalt
ITS	: Dolaylı çekme mukavemeti
ITSR	: Dolaylı çekme mukavemet oranı
TÜPRAŞ	: Türkiye Petrol Rafinerileri

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi

Taşıt sayısının artmasına bağlı olarak ülkemizdeki artan trafik hacmi ve çevresel etkilerle birlikte yol kaplamasında deformasyonlar gözlemlenmektedir. Ülkemizdeki toplam yol uzunluğunun %95'ini (URL-1) esnek kaplama olarak adlandırılan sathi kaplama ya da Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) oluşturmaktadır. Bitümün termoplastik ve viskoelastik özelliğinden dolayı hem sıcaklıktan, hem de uzun süreli yüklemelerden dolayı bitümlü kaplamalı yollarda yüke, zamana veya çevresel etkilere bağlı olarak bozulmalar oluşmaktadır. Oluşan bozulmaları onarmak için de bitüm ve bitümlü karışım gereksinimi artmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün 2020 yılında toplam uzunluğu 68.633 olan karayolunun 62.673 km'lik kısmında bakım ve onarım için yapmış olduğu harcamaların oransal dağılımı Şekil 1.1'de yer almaktadır (KGM, 2021). (Şekil 1.1'deki verilerde personel giderleri kullanılmamış olup, kullanılan kaynağın "Bölge şubeleri işçisi bazında ihaleli giderler" başlığı altındaki verilerden faydalanılmıştır).



Şekil 1.1. Karayolları bakım-onarım gider dağılım oranları (KGM, 2021)

Şekil 1.1 yer alan harcama dağılımlarında en büyük oran %48 ile asfalt yol bakım çalışmasıdır. Asfalt yol bakımı, sathi kaplamaların ve bitümlü sıcak karışım kaplamaların bakımı ve onarımını kapsamakta olup bakım ve onarım için yapılan harcama oldukça yüksektir. Yol kaplamasının bakım ve onarımı ya da yeni yol güzergâhı inşası için

kullanılan malzemeler de bitüm ve agrega olmaktadır. Ülkemizde yol kaplamasında Bitümlü sıcak karışım üretimi ve üretim için kullanılan bitüm miktarı Avrupa ortalamasının oldukça üstündedir. Çizelge 1.1’de 2016-2020 yılları arasında Avrupa’da üretilen bitümlü sıcak karışım miktarı, karışımda kullanılan bitüm miktarı ve modifiye edilen bitüm oranı yer almaktadır (EAPA, 2020).

Çizelge 1.1. Avrupa’daki bitümlü sıcak karışım üretimi ve üretim için kullanılan bitüm miktarı (EAPA, 2020)

	Üretilen BSK Toplamı* (milyon ton)					Bitüm Tüketimi (milyon ton)					Modifiye Bitüm (%) Toplam bitüme oranı				
	2016	2017	2018	2019	2020	2016	2017	2018	2019	2020	2016	2017	2018	2019	2020
Almanya	41,0	42,0	41,0	40,0	38,0	1,6	1,7	1,7	1,5	1,5	29,7	29,3	26,4	25,8	24,4
Avusturya	7,4	7,4	7,5	7,5	7,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	20,0	8,0	15,0	25,0	35,0
Belçika	5,1	5,6	5,8	5,2	4,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	25,0	37,5	31,9	31,8	31,8
Çek Cumh.	6,7	7,4	7,9	6,8	6,7	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	27,7	26,6	27,0	28,0	31,0
Fransa	33,6	33,7	35,0	35,8	31,9	2,5	2,6	2,7	2,7	2,5	8,2	8,2	8,3	8,1	8,3
İngiltere	22,0	22,7	22,9	25,2	23,0	1,3	-	-	-	-	8,0	-	-	-	-
İspanya	13,1	15,2	16,0	18,8	17,1	0,6	0,7	0,7	0,8	0,5	12,2	16,0	10,5	8,7	24,6
İtalya	23,1	23,7	26,0	30,1	30,1	1,2	1,1	1,2	1,4	-	17,0	16,5	17,1	18,5	-
Macaristan	2,8	2,6	4,7	5,0	4,8	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	22,0	26,0	20,0	27,0	22,0
Slovakya	1,9	2,0	2,3	2,4	2,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	24,5	25,0	33,0	26,0	30,0
Türkiye	40,4	46,9	41,7	23,5	31,7	2,9	3,6	2,9	1,5	2,0	4,9	2,8	1,0	1,4	5,8
Avrupa	283	297	298	280	277	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Bitümlü sıcak karışım ve üretimi yapılan bitümlü ılık karışım toplam değeridir

Çizelge 1.1. incelendiğinde ülkemiz Bitümlü sıcak karışım üretiminde Avrupa ülkeleri arasında en üst sıralarda yer almaktadır. Ancak kullanılan bitüm miktarına göre bitümün modifiye oranı daha düşük kalmaktadır. Kullanılan bitümün kalitesinin artırılması amacıyla modifiye edilmesi, kaplamanın performansını artırılabilen ve servis ömrünü uzatılabilir. Trafik hacminin artması, çevresel etkiler, imalat hataları gibi faktörlerden dolayı da kaplamada çeşitli deformasyonlar oluşmaktadır.

Kalıcı deformasyonlar bitümlü kaplamalarda yaygın olarak gözlemlenen deformasyon türlerinden birisidir. Hareketli yük altında ağır taşıt lastiklerinin kaplamaya temas ettiği doğrultularda tekerlek izi olarak adlandırılan oluklanma tipinde kalıcı deformasyonlar oluşmaktadır. Tekerlek izine ek olarak bitümlü kaplamalarda uzun süreli yük altındaki kaplamada düşey yönde konsolide deformasyonlar oluşmaktadır. Ayrıca kaplamada termal çatlaklar, agreganın sökülmesi, ayrışması ya da kırılması şeklide bozulmalar da gözlemlenebilmektedir. Oluşan bu deformasyonlar kaplamanın ömrünü

azaltmakta ve bakım maliyetini artırmaktadır. Kaplamanın deformasyon direncini belirlemek ve ömrünü uzatmak için bitümlü sıcak karışımlar üzerinde laboratuvar ortamında çeşitli testler uygulanmaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların (BSK) laboratuvar ortamında kalıcı deformasyon özelliklerini belirleyebilmek için çeşitli test ekipmanları ve şartnameler geliştirilmiştir. Bu testler, geleneksel Marshall testi, tek eksenli ve üç eksenli statik/dinamik sünme testleri ve süperpave kayma testleridir. Marshall test metodu yaygın olarak optimum bağlayıcı yüzdesiyle hazırlanmış bitümlü sıcak karışımların stabilite değerini belirlemek için kullanılmaktadır. Ancak stabilite değeri BSK kaplamaların tekerlek izi oluşumunu tahmin edemediği gibi kaplamadaki yorulma çatlaklarının da belirlenmesinde kullanılamamaktadır (Tarefder ve Zaman, 2002). Kalıcı deformasyonun tahmin edilebilmesi için bitümlü karışımlar üzerinde daha ileri seviyede deneyler uygulanmaktadır. Tekerlek izi oyulmasını tespit edebilmek için tekerlek izi testleri kullanılabilmektedir. Hamburg tekerlek izi testi, Fransız tekerlek izi testi, Londra tekerlek izi testi, tekerlek izi test yöntemlerinden bazılarıdır. Test metodlarının birbirlerine göre üstün ya da eksik yönleri bulunmasına rağmen kaplamada oluşabilecek tekerlek izi bozulması hakkında tatmin edici sonuçlar verebilmektedirler.

Kaplamada üzerinde hareket eden taşıtların hızlarına, yük durumlarına, dingil sayılarına göre kaplama üzerinde tekrarlı ya da statik yük uygulanmaktadır. Taşıt hareketleri sonucunda kaplamada oluşabilecek kalıcı deformasyon sünme test cihazlarıyla belirlenebilmektedir. Tek eksenli, çevresel basınç uygulanmadan ya da çevresel basınç etki edilerek kalıcı deformasyon deneyi tamamlanmaktadır. Tek eksenli sünme deney yönteminde, yükleme durumunda test numunesinin çevresel olarak sınırlandırılmamış olması kaplamanın uygulamadaki durumunu tam olarak yansıtamaması test yönteminin eksik yönlerindendir. Çevresel olarak sınırlandırılan test yönteminde ise numuneye çevresel basınç uygulanmaktadır. Çevresel basınç uygulanan numune basınç kabına yerleştirilerek deney yapılmaktadır. Ancak basınç kabına yerleştirilen numunede deformasyonun ölçümü basınç kabininin dışından yapılması deformasyonun ölçülmesini olumsuz olarak etkileyebilmektedir.

Tez çalışmasında kalıcı deformasyonun belirlendiği tekerlek izi deneyi ile statik sünme deneyi hazırlanan numuneler üzerinde uygulanarak deneylerin sonuçları incelenmiştir. Saf, Sasobit® (S) modifiyeli ve hem Sasobit® hem de Polifosforik asit (PPA) modifiyeli numunelerin kalıcı deformasyon test sonuçları belirlenmiştir. Kullanılan katkıların bitümün fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca

hazırlanan karışımlar ile kullanılan katkıların stabilite, tekerlek izi ve kalıcı deformasyonu üzerindeki performansları değerlendirilmiştir.

İkinci bölümde çalışmada kullanılan katkıların bitüm ve bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkilerinin incelendiği literatür çalışması yer almaktadır. Ayrıca ikinci bölümde kalıcı deformasyon ve deformasyona bitüm, agrega ve karışım özelliklerinin etkilerinin incelendiği literatür taraması yer almaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agrega ve bitüm özellikleri, modifiye edilen bitümler ve bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özelliklerden bahsedilmiştir. Ayrıca taş mastik asfalt karışımları ve karışımla ilgili özelliklerden bu bölümde bahsedilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde deneysel çalışmadaki materyal ve metottan bahsedilmiştir. Materyal bölümünde çalışmada kullanılan malzemelerden (bitüm, katkılar, agregalar), yöntem bölümünde ise bitüm, bitümlü sıcak karışımlar ve taş mastik asfalt karışımları üzerine uygulanan deneysel yöntemlerden bahsedilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde, tezdeki deneysel çalışmalar yer almaktadır. Çalışmada saf ve modifiye bitümler üzerine penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi ve dönel viskozimetre deneyi tamamlanmış ve sonuçları incelenmiştir. Bitümlü sıcak karışımların ve taş mastik asfalt karışımların optimum bitüm miktarının belirlendiği Marshall deney sonucu, sudan kaynaklı deformasyonun incelendiği Modifiye Lotman deney sonucu, statik yükleme uygulanarak deformasyonun belirlendiği Üç Eksenli Statik Sünme deney sonucu, karışımın tekerlek izi direncinin belirlendiği Hamburg tekerlek izi deney sonucu bu bölümde yer almaktadır. Ayrıca hazırlanan karışımların maliyet analizi bu bölümde yer almaktadır.

Tezin altıncı ve son bölümünde ise çalışmanın sonucu ve öneri kısmı yer almaktadır. Tamamlanan çalışmadan elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. İlerleyen adımlarında yapılabilecek çalışma önerileri bu bölümde yer almaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kaynak araştırması bölümünde, çalışmada kullanılmış olan katkıların daha önce tamamlanmış olan çalışmalardaki performanslarından ve tamamlanmış olan kalıcı deformasyon test sonuçlarından bahsedilmiştir.

2.1. Saf ve Modifiyeli Bitümler Üzerine Tamamlanmış Olan Çalışmalar

Orange ve ark. (2004) yapmış oldukları çalışmada polisfosforik asit (PPA) ve polimer katkısı içeren karışımların, tekerlek izi direnci üzerindeki etkisini incelemeye çalışmışlardır. Tamamladıkları çalışmada PPA'nın karışımın sökülme etkisine karşı olumlu etkisinin olabileceğini gözlemlemişlerdir. PPA'nın polimerle birlikte karışımda kullanılmasının, karışımın tekerlek izi ve nem hasarı performansını artırdığını gözlemlemişlerdir.

Edwards ve ark. (2006) yapmış oldukları çalışmada üç farklı vaks katkısı ve PPA katkısını bitüme ayrı ayrı katarak bitümün düşük sıcaklık altındaki performans özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Modifiye edilen bitümün düşük sıcaklıktaki performansına, bitümün kaynağının ve eklenen katkı miktarının etkili olduğunu belirtmişlerdir. Düşük sıcaklıkta Sasobit® katkısı bitümün sertliğini artırırken polietilen vaks ve PPA katkıları bitümü daha az rijitleştirerek bitümün düşük sıcaklık çatlaklarına karşı direncini artırdığını belirtmişlerdir.

Lu ve Redelius (2007), yapmış oldukları çalışmada bitümde bulunan vaksın; asfalt karışımların kalıcı deformasyon, düşük sıcaklık çatlakları ve nem hassasiyetine etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Bitüm üzerinde yapmış oldukları deneyler sonucunda, bitümün yapısında vaks olup olmamasının yüksek sıcaklıktaki performansını önemli ölçüde etkilemediğini gözlemlemişlerdir. Bitüm üzerine yaptıkları testlerle, karışım üzerindeki tekerlek izi testi arasında korelasyon olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak yapısında vaks olan bitümün düşük sıcaklıklarda fiziksel sertleşmenin olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca aynı vaks oranına sahip farklı kaynaktan elde edilmiş olan bitümlerin kırılma sıcaklıklarında önemli farklılıkların bulunduğunu belirtmişlerdir. Bitümün yapısında vaksın bulunmasının ya da bulunmamasının karışımın nem hassasiyeti üzerine de önemli etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Kuloğlu ve ark. (2008), yapmış oldukları çalışmada farklı penetrasyon derecelerine sahip bitümlerin kalıcı deformasyon oluşumuna karşı dayanımlarını belirlemeye çalışmışlardır. Dört farklı penetrasyon derecesine sahip bitüm kullanarak

tamamladıkları çalışmalarında, bitümün penetrasyon değerlerinin artmasına bağlı olarak, viskozitelerinin ve kalıcı deformasyona karşı dayanımlarının azaldığını belirtmişlerdir.

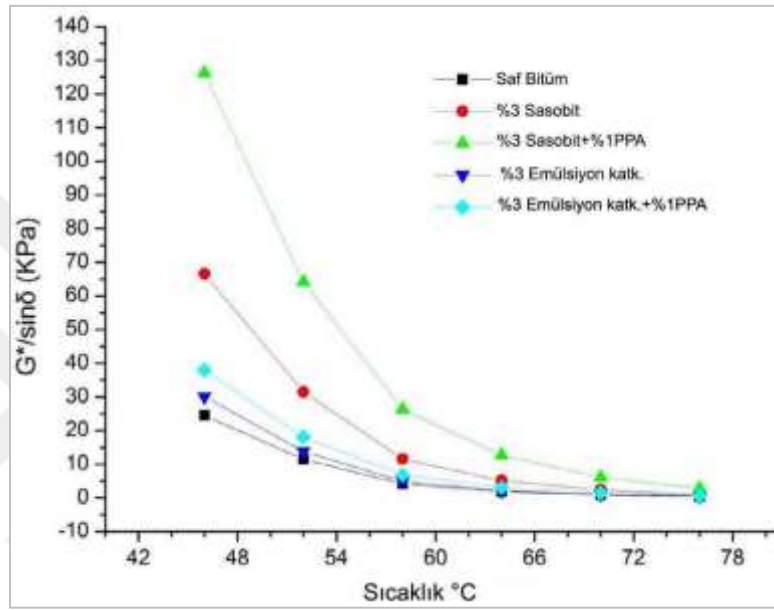
Zhao ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada Ilık Karışım katkıları (viskozite azaltıcı) kullanarak, katkıların tekerlek izi direncine etkisini incelemeye çalışmışlardır. Bitüm üzerine tamamladıkları dinamik kayma reometresi (DSR) testi ve karışım üzerine tamamladıkları tekerlek izi testi (APA) sonucunda, bitümlü ılık karışım katkılarının karıştırma sıcaklığı azaltmasının karışım esnasında yaşlanmayı azalttığı için tekerlek izi direncini de azalttığını belirtmişlerdir.

Zhang ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda bitüme katılan Sasobit® katkısının bitümün viskozite değişimine etkisini incelemişlerdir. Katkı miktarının artmasına bağlı olarak yumuşama noktasının arttığını, penetrasyon ve düktilite değerinin ise azaldığını; katkının bitümün yüksek sıcaklık özelliklerini artırdığını belirtmişlerdir. Katkının bitümün düktilite değerini azaltmasının, bitümün düşük sıcaklık performansını olumsuz etkileyeceğini ifade etmişlerdir. Katkı oranının artmasına bağlı olarak dinamik viskozitenin 60°C üzerinde arttığını, normal viskozite değerinin ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Sasobit® katkısının üretim esnasında viskoziteyi azaltarak karışımın işlenebilirliğini artırdığını belirtmişlerdir.

Ge ve ark. (2017) yapmış oldukları çalışmada %3 Sasobit® katkılı bitüme %2'ye kadar artan oranlarda PPA katkısı ile modifiye etmişlerdir. Her iki katkı kullanılarak hazırlanan modifiye bitümün penetrasyon değeri azalırken, yumuşama noktasının arttığını ve yüksek sıcaklıklarda oluşabilecek deformasyona karşı direncin arttığını belirtmişlerdir. Düktilite değeri ise PPA katkısının artmasına bağlı olarak azalırken %1 oranından fazla PPA katıldığında şartnamenin dışına çıkıldığını gözlemlemişlerdir. Bitümün viskozite değerinin Sasobit® katkısının katılmasına bağlı olarak azaldığını, PPA katkısının katılmasına bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir. DSR deney sonucunda Sasobit® ve PPA katkılarının bitüme katılmasıyla, kayma modülü (G^*) değerinin arttığını, faz açısı ($\sin\delta$) değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Farklı yaşlanma koşulları altında PPA katkısının yaşlanmaya olumlu katkı sağlayarak tekerlek izi direncini arttırdığını belirtmişlerdir. Her iki katkının birlikte kullanılması sonucunda sünme rijitliğinin azaldığını, bu durumun sonucunda da karışımın esneklik özelliğinin azalacağını belirtmişlerdir.

Liu ve ark. (2018a) yapmış oldukları çalışmada bitümlü ılık karışım katkıları ile PPA katkısını kullanarak bitümün düşük sıcaklık, yüksek sıcaklık ve viskozite değişimlerini incelemişlerdir. %3 oranında ılık karışım katkısı Sasobit® (S) ile %1

oranında PPA katkısını birlikte kullanarak modifiye bitüm hazırlamışlardır. Bitüme %3 oranında katılan Sasobit® katkısının karıştırma sıcaklığını azaltırken, PPA ile kullanılan Sasobit® katkısının bitümün viskozite değerini artırdığını gözlemlemişlerdir. Katkılarının düşük sıcaklıkta bitümün sertliğini artırdığını, %3S ile %1PPA katkılı bitümün DSR test sonucunda göre en yüksek $G^*/\sin\delta$ değerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.1). Yüksek sıcaklıklarda %3S ile %1PPA katkılı bitümün, saf ve %3S ile modifiye bitüme göre daha yüksek tekerlek izi direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.1. %3S ve %3S+%1PPA modifiyeli bitümlerin DSR test sonucuna göre $G^*/\sin\delta$ değerleri

Liu ve ark. (2018b) yapmış oldukları çalışmada farklı polimer ile PPA katkısını birlikte kullanarak bitümün yüksek sıcaklıktaki yaşlanma direncini belirlemeye çalışmışlardır. %3 polimer katkısı ile %0,5 PPA katkısını kullanarak modifiye ettikleri bitümün kısa süreli yaşlanma direncinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir.

Wang ve Ye (2020) çalışmalarında, yaşlanmanın bitümün reolojik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bitümde oluşan yaşlanmanın, bitümün reolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Yaşlanmaya bağlı olarak, faz açısının (δ) azaldığını, kompleks modülünün (G^*) ve elastik modülün (G'') önemli ölçüde arttığını, tekerlek izi faktörünün ($G^*/\sin \delta$) arttığını, böylece bitümün yüksek sıcaklıktaki performansının arttığını belirtmişlerdir. Bitümlü bağlayıcının kalıcı deformasyonunu belirleyen tekerlek izi faktörü ($G^*/\sin \delta$), faz açısı (δ), kompleks modülü

(G*) parametrelerinin, bitümün yumuşama noktasıyla güçlü korelasyona sahip olduğunu belirtmişlerdir.

2.2. Bitümlü Karışımlar Üzerine Tamamlanmış Olan Çalışmalar

Zhao ve Guo (2012) yapmış oldukları çalışmada Sasobit® katkısının bitümlü sıcak karışımın işlenebilirliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Katkısız olarak 175°C’de hazırlanan bitümlü sıcak karışımın işlenebilirliğinin, %2 oranında Sasobit® katkısı kullanarak 145C°’de hazırladıkları karışımın işlenebilirliği ile benzer olduğunu gözlemlemişlerdir. %2 oranında bitüme katılan Sasobit® katkısının, karışımın karıştırma sıcaklığını 30°C azaltabileceğini belirtmişlerdir.

Zhao ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada polimer ve PPA katkılarının bitümün tekerlek izi direncine etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Sadece polimer katkısının karışımın tekerlek izi direncini artırmasına ek olarak polimerle birlikte PPA katkısının, bağlayıcının tekerlek izi direncini önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir.

Moghaddam ve ark. (2014) yapmış oldukları çalışmada, farklı yüzdelere kullanarak hazırladıkları polietilen tetrafalet (PET) modifiyeli karışımlar üzerinde kalıcı deformasyon testleri uygulayarak test sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Çalışmada PET katkılı karışımların statik ve dinamik yükleme altında farklı kalıcı deformasyon sonuçları elde ettiklerini gözlemlemişlerdir. PET modifiyeli karışımların statik yükleme altında deformasyona uğradığı ve PET katkısının bitümlü sıcak karışımlar için uygun olmadığı sonucunu elde ederlerken, dinamik yükleme altında PET karışımın kalıcı deformasyona karşı özelliklerini artırdığını ve karışımlarda kullanılmasının uygun olabileceği sonucunu elde etmişlerdir. Deney sonuçlarından elde ettikleri bu farklı sonuçlarla PET katkılı bitümlü karışımların kalıcı deformasyon özelliklerini belirleyebilmek için kullanılan mevcut deney yöntemlerinin uygun olmadığını belirtmişlerdir.

Tayfur ve ark. (2007) yapmış oldukları çalışmada, polialfaolefin, selülozik fiber, poliolefin, bitümlü selülozik fiber ve stiren butadien (SBS) katkılı bitümlü karışımların kalıcı deformasyon dirençlerini belirlemeye çalışmışlardır. Modifiye karışımların optimum bağlayıcı miktarının katkısız karışımlara göre daha yüksek olmasına rağmen tekerlek izi testi sonucunda daha yüksek tekerlek izi direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Katkıların ilavesiyle optimum bitüm oranının artmasına rağmen tekerlek izi direncinin artmasının katkıların agrega ile bitüm arasındaki adezyonu artırıcı etki oluşturmasından dolayı olabileceğini belirtmişlerdir. Dolaylı çekme testi sonucunda

modifiye karışımların daha yüksek çekme gerilmesi değerine sahip olduğunu gözlemlemiştir. Marshall oranı testinin, Taş mastik asfalt karışımlarının kalıcı deformasyon özelliklerini doğru belirleyemediğini ve taş mastik asfalt karışımlar için Marshall oranı testinin uygun olmadığını ifade etmişlerdir. SBS katkılı karışımların ise en yüksek tekerlek izi direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Xie ve Shen (2016) yapmış olduğu çalışmada, polimer ve lastik parçalarıyla modifiye ettiği bitümle taş mastik asfalt karışımlar hazırlayarak, katkıların tekerlek izi direnci üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tekerlek izi deneyini kuru ve su etkisi altında incelediği çalışmasında, suyun etkisi altındaki tekerlek izi deformasyonunun kuru ortamda tamamladığı tekerlek izi deformasyonundan daha yüksek çıktığını gözlemlemiştir. Lastik parçalarıyla modifiyeli taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi ve yorulma çatlağı direncini saf bitümlü karışımlara göre artırdığını belirtmiştir. Lastik parçalarıyla birlikte polimer katkısını kullandığı karışımların tekerlek izi ve yorulma çatlağı direncinin hazırladığı tüm karışımlara göre daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Sengul ve ark. (2013) yapmış olduğu çalışmada, polimer modifiyeli bitümün taş mastik asfalt karışımları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Polimer modifiyeli karışımların stabilite değerlerinin saf bitümlü karışımlara göre daha yüksek çıktığını gözlemlemiştir. Dolaylı çekme mukavemet oranı test sonucuna göre polimer modifiyeli karışımların su hasarına karşı normal karışımlara göre daha dayanıklı olduğunu, tekerlek izi deneyi sonunda da polimer modifiyeli bitümlü karışımların tekerlek izi direncinin saf bitümlü karışımlara göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmiştir.

Özen ve ark. (2008) yapmış olduğu çalışmada farklı elastomer polimerlerle hazırladıkları karışımlar üzerinde tekrarlı yük ve tekerlek izi test sonuçlarını incelemiştir. Polimerlerle hazırlanan karışımların 25°C'deki dinamik yükleme testi sonunda deformasyon direncinin arttığını, farklı sıcaklıklarda polimerlerin deformasyon dirençlerinin farklı olduğunu ifade etmişlerdir. 40°C'de uyguladıkları tekrarlı test sonuçlarının 60°C uyguladıkları tekerlek izi sonuçlarıyla korelasyon olmadığını belirtmişlerdir. Dinamik yükleme test sonucunun tekerlek izi oluşumunu değerlendirmede kullanılabileceğini ancak diğer kalıcı deformasyon testleriyle de sonuçların değerlendirilmesini önermişlerdir. Gradasyon değişiminin de uygulanan test yöntemleri kadar etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Taherkhania (2011) yapmış olduğu çalışmada asfalt karışımların tek eksenli ve üç eksenli test sonuçlarındaki deformasyon davranışlarını incelemiştir. Düşük basınç gerilmeleri altında karışımlar lineer viskoz davranış gösterirken, yüksek basınç

gerilmeleri ile nanlineer viskoz davranış gösterdiklerini gözlemlemiştir. Üç eksenli basınç uyguladığı test sonucunda, çevresel basıncın deformasyon davranışı üzerinde rijitlik etkisi oluşturduğunu belirtmiştir.

Sohm ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada, üç eksenli statik sünme testini farklı sıcaklıklarda (10-40°C), farklı eksenel basınç değerleri (200 kPa' dan 2000kPa' ya) ve farklı çevresel basınç değerleri (0-200 kPa) altında uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda çevresel basınç değerinin artmasına bağlı olarak numune yüzeyinde oluşan gerilme değerinin azaldığını gözlemlemiştirler. Eksenel basınç değerinin artmasına bağlı olarak da bitümün viskoz davranış göstermesinden dolayı gerilme oranının arttığını, poission oranının ise azaldığını belirtmişlerdir.

Lu ve Harvey (2006) yapmış oldukları çalışmada tekerlek izi test cihazı test sonuçları ile uygulamadaki test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Bitümlü sıcak karışımların nem hassasiyetini belirlemek için Hamburg tekerlek izi test cihazının performansını değerlendirmişlerdir. İki farklı agrega tipi, iki farklı bitüm tipi ve soyulmaya karşı kullanılan katkıların da yer aldığı üç farklı katkı ile hazırladıkları karışımlar üzerinde tekerlek izi testlerini tamamlamışlardır. Tekerlek izi testine başlamak için suda yaklaşık olarak 2 saat bekletilen numunelerin nem hassasiyetini belirleyebilmek için yeterli doygunluğa erişemediğini, test süresinin de genellikle 9 saatten az sürdüğü için nem hasarının belirlenmesinde test süresinin yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Tekerlek izi testini kuru ortam şartlarında tamamladıklarında ise normal test şartlarına göre daha farklı sonuçlar elde ettiklerini, agreganın yapısal etkisi ve bitümün sertliği gibi özelliklerin testteki etkisinin azaldığını ifade etmişlerdir. Kuru ortamda yaptıkları test sonucu ile testin normal şartnamesine göre yaptıkları test sonuçları arasında farkların bulunduğunu belirtmişlerdir.

Rushing ve Little (2014) yapmış oldukları çalışmada, havaalanı üstyapılarının inşası için bitümlü sıcak karışımların performans testinin belirlenmesine yönelik bir laboratuvar çalışması yapmışlardır. Asfalt kaplama analizörü-APA (tekerlek izi test cihazı), üç eksenli tekrarlı yükleme ve üç eksenli statik yükleme test yöntemini kullandıkları çalışmalarında test sonuçlarını istatistiksel olarak değerlendirmişlerdir. 1380 kPa eksenel, 276 kPa çevresel basınç kullanarak tamamladıkları üç eksenli statik sünme testi ile APA test sonuçları arasında güçlü korelasyon olduğunu gözlemlemiştirler.

Biligiri ve ark. (2007) yapmış oldukları çalışmada tekrarlı yükleme testinden elde ettikleri akma sayısı (FN) değerini polinomal model kullanarak modellemeye çalışmışlar

ve polinomal modelin FN değerinin modellenmesinde iyi sonuç vermediğini gözlemlemişlerdir. Deney sonuçlarını Francken modeline göre modelleyerek daha doğru sonuç elde ettiklerini gözlemlemişlerdir. Sünme deneyi sonunda zamana bağlı deformasyon grafiğinde Francken modelinin, birinci ve ikinci bölgeyi tanımlayan power law modeli ile üçüncü bölgeyi tanımlayan eksponansiyel modelin birleşimi olduğu için FN değerinin modellenmesinde daha doğru sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

2.3. Kalıcı Deformasyon

Kalıcı deformasyon (tekerlek izi), kaplama üzerinde tekrarlı yük uygulanması sonucunda düşük miktardaki kalıcı gerilmelerin birikmesi daha büyük kalıcı gerilmeler oluşurması sonucunda oluşmaktadır. Kaplama yüzeyindeki tekerlek izi oluşumu, temel tabakasındaki ya da alt temel tabakasındaki bozulmaların sonucunda oluşabilmektedir. BSK’larda kalıcı deformasyon, trafik yükünden, yanal hareketlerden veya konsolidasyondan dolayı oluşmaktadır. BSK tabakasındaki kayma bozulması genellikle kaplama yüzeyinden 100 mm derinliğe kadar oluşmaktadır. Kaplama tabakasında kaliteli malzeme kullanılmaması durumunda bozulma daha derinlerde oluşabilmektedir.

Kaplamada tekerlek izi oluşumu, uygulanan yük sayısının artmasına bağlı olarak giderek artmakta ve kaplama üzerinde tekerleğin geçiş hattı boyunca genellikle boyuna deformasyon şeklinde gözlemlenmektedir. Tekerek izi genellikle kaplama tabakasının yoğunluğunun artmasına (sıkışmadan dolayı hacmin azalarak yoğunluğun artması) neden olmakta ve kaplama tabakasında ya da kaplamanın altında kalitesiz malzeme kullanılmasına bağlı olarak kaplamanın altındaki tabakalarda oluşabilmektedir (Brown ve ark., 2001).

2.3.1. Kalıcı Deformasyon ve Deformasyona Etki Eden Faktörler

Kalıcı deformasyon veya tekerlek izi, asfalt kaplamalarında görülen önemli yapısal sorunlardan birisi olup kaplamanın servis süresinin azalmasına neden olmaktadır. Asfalt kaplamalarda kalıcı deformasyonun aşırı seviyede olması güvenliğin azalması, yüksek bakım maliyeti, trafiğin aksaması gibi sorunlara yol açmaktadır. Tekerek izi üzerinde yapılan çalışmalar, aşırı kalıcı deformasyonun sonucu olarak taşıt tekerleklerinin kaplamaya temas ettiği yerlerde, boyuna çökmelerin oluştuğunu ve bunu boyuna çatlakların takip ettiğini göstermiştir. (Vallejo ve ark., 1976)

2.3.1.1. Bitümlü sıcak karışımının kalıcı deformasyona etkisi

Bitümlü sıcak karışımlarda oluşan kalıcı deformasyon, agrega ve bitümün özelliklerine ek olarak, agrega ile bitüm arasında oluşan adezyon bağ özelliğinin karışımın performansını etkilemesiyle ortaya çıkmaktadır. Bitümün, agreganın ve aradaki bağ yapısının özellikleri, karışımda kalıcı deformasyona veya çatlamaya neden olmakta ve kaplamanın servis ömrünü değiştirmektedir. Kaplamanın servis ömrü boyunca bitüm yaşlanmakta ve bitümün yumuşaklığı azalmaktadır. Bitümün yaşlanması kalıcı deformasyonun artmasını önemli derecede etkilemektedir Bitüm ve agrega özelliklerine ek olarak bitümlü sıcak karışımların performansları, karışımdaki hava boşluğunun yanı sıra, yük tekrarına ve sıcaklığa da bağlıdır. (Miljković ve Radenberg, 2011).

Tekerlek izinin oluşmasında karışımı oluşturan agrega ve bitümün karakteristik özelliklerine ek olarak, karışımın hazırlandığı plentin sıcaklığının düşük olması, karışımda aşırı miktarda nemin bulunması, karışımda tasarımdaki miktardan fazla fillerin bulunması, sıcaklığa karşı hassas bitümün kullanılması, agreganın yuvarlak formda olması ya da agreganın az miktarda kırılmış olması, karışımda aşırı miktarda bitümün bulunması ve soğuk havada kaplama yapılmasına bağlı olarak yoğunluğun azalması gibi faktörler de etkili olmaktadır (Button ve ark., 1990). Karışımda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler Çizelge 2.1’ de verilmiştir (Sousa ve ark., 1991)

Çizelge 2.1. Karışımda tekerlek izi oluşumunu etkileyen faktörler

	Etki	Karışımdaki Değişimi	Tekerlek İzi Direncinin Değişimi
Agrega	Yüzey Özelliği	Köşeliliğin artması	Artar
	Gradasyon	Açık Gradasyon özelliği	Artar
	Şekil Özelliği	Açısallığın Artması	Artar
	Boyut	Maksimum boyutun artması	Artar
Bitüm	Rijitlik	Artması	Artar
	Bağlayıcı miktarı	Artması	Azaltır
Karışım	Hava boşluğu miktarı	Artması	Azaltır
	Mineral agrega arasındaki boşluk	Artması	Azaltır
	Sıcaklık	Artması	Azaltır
Test Şartları	Yük tekrarı	Artması	Azaltır
	Su	Kuru ortamdan sulu ortamda	Azaltır (eğer karışımın
		deney yapılması	suya hassasiyeti varsa)

2.3.1.2. Agreganın kalıcı deformasyona etkisi

Bitümlü karışımlarda kullanılan agregası, hem ağırlıkça hem de hacimce karışımda en büyük orana sahiptir. Bundan dolayı agreganın aşınma dayanımı, yüzey şekli, mineral yapısı vb. gibi özelliklerine ek olarak karışımda kullanılan gradasyon da tekerlek izi oluşumunu etkilemektedir. Hatta seçilecek olan gradasyonu oluşturan alt ve üst limitlerde hazırlanan karışımların tekerlek izine karşı deformasyonu birbirinden farklı olabilmektedir.

Bitümlü sıcak karışımlarda birçok türde agregası kullanılmaktadır. Kullanılan agregalar kaynaklarına göre; doğal agregası, işlenmiş (kırılmış agregası, kırmataş) agregası ve sentetik agregası olarak üç ana grupta sınıflandırılabilirler. Karışımlarda agreganın asıl görevi, tekrarlı yüklerden dolayı oluşan kayma gerilme direncini artırmaktır. Oluşabilecek kalıcı deformasyon miktarı, uygulanan yüke agreganın direnç göstermesiyle ilişkilidir. Kübik formdaki agregalar, yuvarlak formdaki agregalara göre daha fazla tercih edilmektedir. Bunun sebebi, yük altında yuvarlak formdaki agregalar birbiri üstünden kayarken, kübik formdaki agregalar köşeli yapılarından dolayı birbirlerine kilitlenerek daha güçlü bir yapı oluşturabilmeleridir (Al-Mosawe, 2016).

Golalipour ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada gradasyonu oluşturan alt limit, üst limit ve orta gradasyon değerleri ile karışımlar hazırlayarak gradasyonun deformasyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Üst limitteki gradasyonla hazırladıkları karışımın kalıcı deformasyon değerinin daha az olduğunu ve daha fazla tekerlek izi direncine sahip olduğunu; alt limitteki gradasyonla hazırladıkları karışımlarda ise kalıcı deformasyonun artarken tekerlek izi direncinin azaldığını belirlemişlerdir. Çalışmalarında aynı agregası ve aynı gradasyon kullanmalarına rağmen; gradasyonu oluşturan alt limit, üst limit ve gradasyonun orta değerleriyle hazırladıkları karışımların hava boşluğu, asfaltla dolu boşluk oranı, stabilite, esneklik modülü gibi test sonuçlarının da farklı olduğunu açıklamışlardır.

Topal ve Sengoz (2005) yapmış oldukları çalışmada, ince agreganın açısallığının, tekerlek izine etkisini incelemişlerdir. Deneysel olarak belirledikleri ince agreganın açısallığına, agregası kaynağının, tipinin ve kırıcının tipinin etkili olduğunu belirtmişlerdir. İri agregayı, bitümü ve bitüm oranını sabit tutup, ince agregayı değiştirerek hazırladıkları karışımlar üzerine tekerlek izi deneyi yapmışlardır. Deney sonucunda agreganın açısallığının artmasının tekerlek izi dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Ahmed ve Attia (2013) yapmış oldukları çalışmada, agrega gradasyonunun ve kaynağının karışımın stabilitesi ve tekerlek izi direnci üzerindeki etkilerini incelemeye çalışmışlardır. Farklı kaynaklardan temin ettikleri bazalt, dolomit ve kireçtaşı tipindeki agregaları kullanarak, farklı gradasyonlarda (açık, yoğun, iri daneli) karışımlar hazırlayıp, karışımların stabilite ve tekerlek izi dirençlerini belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmanın sonucunda iri daneli agrega gradasyonuna sahip karışımların tekerlek izi direncinin tüm agrega tiplerinde en yüksek çıktığını, açık gradasyona sahip karışımların tekerlek izi direncinin ise tüm agrega tiplerinde en düşük çıktığını belirtmişlerdir. Agreganın kaynağı bakımından ise dolomit tipi agreganın tüm gradasyonlarda, diğer agrega kaynaklarına göre en iyi tekerlek izi direncini gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Marshall stabilite test sonucunda ise, en yüksek stabilite değerini yoğun gradasyonlu kireçtaşı, en düşük stabilite değerini ise açık gradasyonlu bazalt ile hazırladıkları karışımlarda elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Brown ve Bassett (1990), yapmış olduğu çalışmada bitümlü sıcak karışımların kalıcı deformasyon, esneklik modülü ve stabilite değerleri üzerinde maksimum agrega boyutunun etkisini incelemeye çalışmışlardır. Maksimum agrega boyutu 9,5 mm' den 37,5 mm'ye kadar olan beş farklı gradasyonda karışımlar hazırlamışlardır. Seçilen gradasyondaki maksimum agrega boyutunun artmasına bağlı olarak karışımların statik sünme performansı, esneklik modülü ve çekme gerilmesi test sonuç değerleri artmıştır. Ancak karışımdaki agrega boyutunun artmasının stabiliteyi önemli oranda etkilemediğini gözlemlemişlerdir. Karışımdaki maksimum agrega boyutunun artmasına paralel olarak, akma değerinin de arttığını gözlemlemişlerdir.

2.1.1.3. Bitümün kalıcı deformasyona etkisi

Bitüm, sıcaklık ve yükleme süresi ile farklı davranışlar gösteren viskoelastik, termoplastik yapıda karmaşık bir malzeme olup, yavaş hareket eden yükler altında ya da yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında viskoz yapıya sahip olmaktadır ve bu durum sonucunda karışım kalıcı deformasyona daha müsait duruma gelmektedir. Bitüm, düşük sıcaklıklara ya da hızlı yüklemeye maruz kaldığında ise, tamamen elastik yapıya sahip olurken, sıcaklığın aşırı azalmasına bağlı olarak kırılğan yapıya sahip olmaktadır. 10-35°C arasındaki servis sıcaklığında ve tekrarlı trafik yükleri altında kaplamada yorulma çatlakları oluşabilmektedir. Büyük miktarda tekrarlı yüklerin etkisiyle başlayan yorulma

çatlaklarının oluşumunu ve yayılmasını engellemek için asfalt kaplamalarının yeteri miktarda sert ve elastik olması gerekmektedir (Subhy, 2017).

Bitümün yüksek sıcaklıklardaki davranışını, fiziksel yapısı kadar reolojik yapısı da etkilemektedir. Farklı penetrasyon sınıflarına sahip bitümün yüksek sıcaklık altındaki davranışı farklı olmaktadır. Bitümün yüksek sıcaklık altındaki davranışını iyileştirmek için bitüme çeşitli modifiye edici katkıları (polimer, vaks, viskozite iyileştirici, çeşitli kimyasallar) katılmaktadır. Bu katkıları bitümün düşük sıcaklıklardaki davranışını değiştirmeden yüksek sıcaklıklardaki viskozite değerini arttırmayı amaçlamaktadır (Sousa ve ark., 1991).

Bitümlü karışımlar sıkıştırıldıktan sonra, sıcaklığa bağlı olarak bitümde doğal sertleşme oluşmaktadır. Bitüm zamanla iklime bağlı olarak servis ömrü boyunca sertleşmeye devam eder. Bu durum bitümün yaşlanması olarak adlandırılmaktadır. Yaşlanma bitümün fiziksel davranışını etkilemekte ve genellikle de kaplamanın servis ömrünü azaltmaktadır. Bitümde oluşan bu değişimler bitümün penetrasyonunun azalması, yumuşama noktasının artması, elastisite ve adezyon özelliğinin azalması ve kırılabilirliğin artması şeklinde gözlemlenmektedir. (Nikolaides, 2014)

2.3.1.4. Fillerin kalıcı deformasyona etkisi

Bitümlü sıcak karışımlarda bulunan mineral fillerin, karışımın sertliği üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Aktif filler olarak mineral filler, bitüm ile agrega arasındaki adezyonu, bitümün karışım içindeki dağılmasını, karışımın sertliğinin artmasını, sıkıştırılan sıcak karışımın kürlenmesini olumlu yönde etkilemektedir.

Remisova (2015), yapmış olduğu çalışmada fillerin bitümlü karışımlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Karışımdaki fillerin kimyasal ve gradasyon özelliklerinin, bitümün miktarını ve karıştırma-sıkıştırma esnasındaki işlenebilirliği etkilediğini belirtmiştir. Ayrıca iki farklı kireç taşı tozu ve hidrate kireç tozunu filler olarak kullanıp tamamlamış olduğu deneyler sonucunda, fillerin tipinin karışımın kalıcı deformasyona karşı direncini değiştirdiğini belirtmiştir. Hidrate kireç tozunu filler olarak kullanarak, karışımlarda daha iyi tekerlek izi direnci ve nem hassasiyeti elde etmiştir.

Yılmaz ve ark. (2011) asfaltitin mineral filler olarak sıcak karışımlar üzerindeki etkilerini incelemeye çalışmışlardır. Marshall stabilite deneyi sonucunda asfaltitin stabilite üzerinde çok fazla etkisinin olmadığını gözlemlenmelerine rağmen, 60° suda 24 saat süreyle şartlandırdıkları numunelerin, karışımdaki asfaltit oranının artmasına bağlı

olarak stabilite değerlerini arttığını gözlemlemişlerdir. Dolaylı çekme modülü test sonucunda ise karışımın rijitlik modülünün asfaltitin artmasına bağlı olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Asfaltitin filler olarak karışımlarda kullanılmasının karışımın rijitlik modülünü artırdığı ve kalıcı deformasyona karşı daha dirençli hale geldiğini belirtmişlerdir.

2.3.1.5 Hava boşluğunun kalıcı deformasyona etkisi

Karışımındaki hava boşluğu deformasyon ve stabilite için önemli parametrelerden birisidir. Karışımın optimum bağlayıcı yüzdesi belirlenirken hava boşluğunun belirli bir aralıkta olması istenmektedir. Bu durum hem yüksek stabilite hem de deformasyon direnci için gerekli özelliktir. Karışımındaki boşluk miktarının artması ya da azalması karışımın performansını etkilediği gibi, aynı boşluğa sahip olmasına rağmen boşluğun karışımındaki dağılımı da karışımın performansını olumlu ya da olumsuz olarak etkilemektedir.

Ma ve ark. (2016), yapmış olduğu çalışmada hava boşluğunun karışımındaki büyüklüğü ve karışım içinde konumlanması gibi parametrelerini de inceleyip kalıcı deformasyon üzerindeki etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Karışımındaki hava boşluğunun asfalt karışımın sünme deformasyonu üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu, boşluk miktarının artmasına bağlı olarak deformasyonun arttığını belirtmişlerdir. Hava boşluğunun mikro yapısının da karışımındaki deformasyonu etkilediğini, karışımındaki boşluk yapısının büyük olması ve boşluğun karışımında düşey ya da yatay konumda olmasının deformasyonu etkilediğini belirtmişlerdir. Birbiriyle bağlantısız ve tek noktada yer alan büyük hava boşluğunun, karışımında daha küçük ve dağılmış halde yer alan hava boşluğuna göre deformasyona daha fazla eğilimde olmasına rağmen, küçük yapıda ve dağılmış halde karışımında yer alan boşluk yapısının ise deformasyon direncine olumlu katkısının bulunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca düşey olarak konumlanmış olan (uygulanan eksenel yüke paralel) hava boşluğunun, yatay olarak konumlanmış olan hava boşluğuna göre daha iyi deformasyon direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Aynı hava boşluğuna sahip olmasına rağmen üniform olarak dağılmış olan hava boşluğunun deformasyon direncinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Zeiada ve ark. (2014), üç farklı hava boşluğu oranı (%4, %4,5, %5) ve üç farklı oranlarda bitümle (optimum bağlayıcı oranının $\pm$ %0,5'i oranında) karışımlar

hazırlayarak; hava boşluğunun ve bitüm oranının, karışımların Dinamik modülü (E^*) üzerindeki etkilerini incelemeye çalışmışlardır. Hava boşluğunun artmasına bağlı olarak karışımın Dinamik Modül değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bitüm oranının değişmesinin, hava oranının değişmesine göre karışımın Dinamik modül değerini daha az etkilediğini belirtmişlerdir.

2.3.2. Kalıcı deformasyonun belirlenmesi

Kalıcı deformasyon ya da tekerlek izi deformasyonu, trafik etkisi altındaki Bitümlü Sıcak Karışımlarda kaplamanın düşey yönde deformasyona uğramasıdır. Bu bozulma genellikle kaplamanın yüzeyinin 100 mm'lik kısmında oluşmaktadır. (Cross, 1992; Kandhal ve Cooley, 2003).

Kalıcı deformasyon olan tekerlek izi deformasyonun belirlenmesinde hızlandırılmış standart laboratuvar testleri kullanışlı ve büyük faydalar sağlamaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan laboratuvar tekerlek izi test cihazlarının en temel cihazı tekerlek izi test tipleridir. Georgia Tekerlek İzi Test Cihazı, Asfalt Kaplama Analizörü (APA), Hamburg Tekerlek İzi Test Cihazı ve Fransız Tekerlek İzi Cihazı yaygın olarak kullanılan tekerlek izi test cihazlarıdır. (Kandhal ve Cooley, 2003)

3. BİTÜMLÜ SICAK KARIŞIMLAR

3.1. Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılan Malzemeler

Bitümlü sıcak karışımlarda karışımın performansı üzerinde seçilecek olan agreganın ve bitümün önemli etkisi bulunmaktadır. Ayrıca karışımda kullanılan bitüm ve agregaya ek olarak hazırlanacak olan bitümlü sıcak karışımın özellikleri de karışımın performansını etkilemektedir. Bu bölümde agrega, bitüm gibi bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan malzemeler ve karışımların özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1.1 Agregalar

Agregalar bitümlü sıcak karışımların hacimce %80-90 ağırlıkça %94-95'ini oluşturmaktadırlar. Karışımın performansını geliştirmek için kaliteli agrega kullanmak önem taşımaktadır. Kaplamada kullanılacak olan agregaların kalitesi, agreganın dayanıklılığına, durabilitesine, kırılmış agreganın şekline, açısallığına, yüzey dokusuna ve su emmesine bağlıdır. (Prowell ve ark., 2005)

Kaplamalarda kullanılan en uygun agregalar minerolojik olarak volkanik, sedimanter ve metamorfik kayaların kırılmasıyla elde edilen kırmataş agregalardır (Tunç, 2001). Volkanik kayalar, erimiş magma tabakasının yer yüzeyinde ya da yerin altında katılaşmasıyla oluşmuştur. Magmanın yüzeyde hızlı soğumasıyla agrega daha küçük kristal yapıya sahip olurken (bazalt ve riolit gibi), yer altında daha yavaş soğumasıyla daha büyük kristal yapıya sahip olmaktadır (granit ve gabbro gibi). Volkanik kayalar, mineral bileşenlerine ve kristal yapılarına göre tanımlanabilirler. Örneğin riolit ve granit asidik bileşenli olmalarına rağmen kristal yapıları farklıdır. Benzer durum bazalt ve gabbro için de geçerli olup, bazik bileşenli olmalarına rağmen kristal yapıları farklı olup kristal yapıyı kayadaki silika (SiO_2) bileşeninin miktarı etkilemektedir. Yol kaplamasında kullanılan başlıca volkanik kayalar; bazalt, dolerit, granit ve andezit tipi agregalardır (Hunter ve ark., 2015).

Sedimanter kökenli kayalar, kayaların hava ve suyla aşındırılması ve tortulların taşındıktan sonra çökmesi ile oluşmaktadır. Tortulların biriktiği geniş alanlar zamanla birbirine konsolide olarak taşlaşmaktadırlar. Sedimentler taşlandıktan ve konsolide olduktan sonra kayalara dönüşürler. Örneğin kumtaşı, uzun mesafelere taşınan ve ağırlıklı olarak sığ denizlerde, kumsallarda ve nehirlerde biriken kumun taşlaşmasından oluşmaktadır. Kireçtaşları yapısında fosil parçaları ve çöktirilmiş kalsiyum karbonat

kombinasyonuyla karmaşık yapıda olabileceği gibi, yüksek oranda kalsiyum karbonatlı daha saf yapıya da sahip olabilir. Ancak saf yapıdaki kireçtaşının yapısındaki bazı kalsiyum iyonlarının yerini magnezyum iyonları alabilir ve yeraltı suyunun etkisiyle kireçtaşı dolomite dönüşebilir. Yol kaplamasında kullanılan başlıca sedimanter kayalar; kireçtaşı, dolomi ve kumaşı tipi agregalardır (Hunter ve ark., 2015).

Metamorfik kayalar, volkanik ya da sedimanter kayaların artan sıcaklık ve basınç etkisiyle değişikliğe uğrayarak oluşmaktadırlar. Basınç ve sıcaklık metamorfik kayaların oluşumunu etkilemektedir. Düşük basınç ve sıcaklık küçük yapısal değişiklikler oluştururken (arduvaz gibi), basıncın ve sıcaklık etkisinin artmasıyla daha büyük yapısal değişiklik oluşmaktadır (gnays gibi). Metamorfik kayalar genellikle katmanlı veya bölünebilir olma eğiliminde oldukları için yol kaplamalarında kullanılmaya uygun agregalar değildir (Hunter ve ark., 2015).

3.1.1.1 Agregaların özellikleri

Agregaların gradasyonu, maksimum dane boyutu, kırılmış agreganın şekli, sağlamlığı, porozitesi ve yüzey dokusu bitümlü sıcak karışımların stabilitesini etkilemektedir. Maksimum dane boyutu ve gradasyon, kullanılacak tabakaya göre belirlenmektedir (Orhan, 2012). Örneğin alt temel tabakası için maksimum dane boyutu 75mm (3inç) iken, temel tabakalarında 37,5mm (1,5inç), binder tabakasında 25mm (1inç) ve aşınma tabakasında ise 19mm (3/4 inç) olarak değişmektedir (KGM, 2013). Ayrıca aşınma tabakasında yoğun gradasyona sahip agrega gradasyonu seçilirken, sathi kaplamalarda üniform gradasyona sahip agrega gradasyonu kullanılmaktadır (Tunç, 2001).

Agregalar, karışımların üretim, serme ve sıkıştırma adımlarında ve trafik yükleri altında aşınma ve kırılmaya maruz kalmaktadırlar. Kaplama tabakasında kullanılacak olan agregaların temel ve alt emel tabakalarına göre daha sert yapıda olması gerekmektedir. Agregaların aşınma direnci Los Angeles Aşınma deneyi ile belirlenebilmektedir (Yavuz, 2002). Aşınma tabakasında kullanılacak olan agregaların Los Angeles aşınma kaybı en fazla %27, binder tabakasında %30 olması gerekmektedir (KGM, 2013).

Agregaların dane şekli ve yüzey dokusu karışımın işlenebilirliğini ve stabilitesini etkilemektedir. Pürüzlü yüzeye sahip agregalarla hazırlanan karışımların stabilitesi, cilalı yüzeye sahip agregalara göre daha yüksek olurken, işlenebilirlik açısından pürüzlü

yüzeyli agregalarla hazırlanan karışımın bitüm oranı artmaktadır. Cilalı yüzeyli agregalarla hazırlanan karışımlarda agregaların yüzeyinde daha kolay asfalt film tabakası oluşurken, pürüzlü yüzeyli agregaların adezyon özelliği daha fazla olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğüne ek olarak agreganın şekli ve köşeliliği artıkça agregaların birbirine kenetlenmesi artmakta ve agreganın kenetlenmesi karışımın stabilite değerini artırmaktadır (Yavuz, 2002).

Agreganın porozitesi su emme özelliği olup, poroz agregalar kullanılarak hazırlanan karışımların bitüm oranı daha yüksek olmaktadır. Poroz agregalar bitümü daha fazla absorbe edeceği için karışıma ilave edilecek olan bitüm miktarı da artacaktır (Yavuz, 2002). Agregaların maksimum su emme değerleri şartnamede belirtilmiş olup, alttemel tabakası için maksimum %3,5, temel tabakası için maksimum %3, binder tabakası için maksimum %2,5 ve aşınma tabakası için maksimum %2 oranındadır (KGM, 2013). Yeterli miktarda poroziteye sahip olan agregalarda, agregalar ile bitüm arasındaki kuvvetli adezyon stabilite değerini artırırken, porozitenin artmasıyla agreganın bitüm absorpsiyonu artacağı için karışımın özgül ağırlığı ve stabilitesi azalacaktır.(Tunç, 2001)

3.1.2. Bitüm

Bitüm, karbondisülfid içerisinde tamamen eriyebilen, fiziksel olarak sıvı, yarı katı ve katı halde bulunan, hidrokarbonlardan oluşmuş organik kökenli maddelerdir (Tunç, 2001). Ham petrolün rafinesi ile petrolün yapısında bulunan daha hafif fraksiyonların (petrol gazı, benzin, dizel) uzaklaştırılmasıyla bitüm elde edilmektedir.

Bitümün büyük çoğunluğu, yol kaplamasının ve çatı yalıtımının bir parçası olarak kullanılmaktadır. Yol kaplamasında kullanılan bitüm, pen AC (penetrasyon asfalt çimentosu) olarak da adlandırılmaktadır. Bitümün bu adlandırılması, bitümün penetrasyon deneyi sonucunda hangi penetrasyon sınıfında olduğu hakkında bilgi vermektedir. Su yalıtım özelliğinin iyi olması ve termoplastik malzeme olmasından dolayı, bitümün geniş bir kullanım alanı vardır. Yüksek sıcaklıklarda (100-200°C arasında) viskoz sıvı özellik göstererek agregalar ile karıştırılma imkânı sunar ve karışıma istenilen şekil verilebilmektedir. Soğuduğu zaman bitüm durabil katı bir form almaktadır.

Bitüm, sıcak karışım üretiminde yol kaplama malzemesi olarak kullanılabildiği gibi, farklı karışımlarda (bitümlü soğuk karışım) ve kaplama öncesi hazırlık (astar ve yapıştırma tabakası) uygulamalarında da kullanılabilmektedir. Bu uygulamalarda, bitüm

ana bileşen olarak kullanılırken farklı malzemeler (çözücü, su vb) de gerekli diğer bileşenleri oluşturmaktadır. (Hunter ve ark., 2015)

Katbek bitümlerde petrolden elde edilen çözücülerin bitüme eklenmesiyle bitümün viskozitesi azaltılmaktadır. Genel olarak beyaz ispirto, kerosen ve petrolden elde edilen çözücüler kullanılmaktadır (Hunter ve ark., 2015). Sıvı petrol asfaltlar olarak adlandırılan katbek bitümler ısıtılmış bitümlere;

Benzin ilavesiyle çabuk kür olan (RC) katbek asfaltlar,

Gazyağı ilavesiyle edilerek orta hızda kür olan (MC) katbek asfaltlar

Bakiye yağ ilavesiyle yavaş kür olan (SC) katbek asfaltlar elde edilmektedir. Katbek asfaltlar astar tabakasında (yüzeye püskürtülerek) ve soğuk karışımlarda kullanılmaktadır (Orhan, 2012).

Bitümün suyun içerisinde küçük parçalar halinde dağıtılması ile bitüm emülsiyonları elde edilir. Bitüm emülsiyonları düşük sıcaklıklarda bitümün taşınmasına yol yüzeyine uygulanmasına olanak sağlarlar. Emülsiyondaki bitüm parçacıklarının birbirine yapışmasını önlemek için emülgatör katkıları kullanılmaktadır. (Hunter ve ark., 2015). Kullanılan emülgatörün cinsine bağlı olarak emülsiyonlar anyonik veya katyonik bitüm emülsiyonu olarak ikiye ayrılırlar. Bitüm emülsiyonları, kaplamada astar ve yapıştırma tabakalarında (yüzeye püskürtülerek), bitümlü soğuk karışım uygulamalarında ve sathi kaplama uygulamalarında kullanılmaktadırlar (Orhan, 2012).

3.1.2.1. Bitümün reolojik yapısı

Bitümün yapısı çoğunlukla hidrokarbon atomları ile sülfür, nitrojen ve oksijen atomlarını içeren fonksiyonel gruplardan oluşmaktadır. Ayrıca yapısında nikel, vanadium, demir, kalsiyum, magnezyum gibi metaller yer almaktadır. Elemental analiz sonucunda birçok bitüm;

Karbon	(%82-88)
Hidrojen	(%8-11)
Oksijen	(%0-1,5)
Sülfür	(%0-6)
Nitrojen	(%0-1)

yapıdan oluşmaktadır. Kimyasal yapısı oldukça karmaşık olan bitüm genel olarak asfaltanlar ve maltenler olmak üzere iki gruptan oluşmaktadır.

Asfaltanlar, oldukça polar yapıya sahip olup, yüksek moleküler ağırlıklı (800-3500g/mol) karmaşık aromatik yapılardır. Bitümün reolojik özellikleri üzerinde bitümdeki asfaltanların oranının önemli etkisi bulunmaktadır. Artan asfaltan oranına bağlı olarak bitüm daha sert, daha viskoz ve daha yüksek yumuşama noktasına sahip olmaktadır. Bitümün reolojik özelliklerini bitümdeki asfaltanların oranı daha fazla etkilemektedir (Hunter ve ark., 2015).

Maltenler ise doygular, aromatikler ve reçineler olmak üzere alt gruplara ayrılmışlardır. Doygunlar, polar olmayan viskoz yağlar olup açık sarı renkte ya da renksiz yapıdadırlar. Ortalama molekül ağırlıkları 470-880g/mol olan doygular bitümün yapısının %5-20'sini oluşturmaktadırlar. Aromatikler, bitümün düşük moleküler ağırlıklı naftanik aromatik bileşenleridir. Bitümün yapısının %40-65'ini oluşturan aromatikler, siyah-kahverengi renkli likit viskoz sıvılar olup moleküler ağırlıkları 570-980g/mol'dür. Reçineler, n-heptanlar içinde çözülebilir yapıda olup, yapılarında çoğunlukla hidrojen ve oksijen ile düşük miktarda oksijen, sülfür ve nitrojen atomları bulunmaktadır. Koyu kahverengi renge sahip olan reçineler, katı veya yarı katı halde bulunurlar ve reçinelerin asfaltanlara oranı bitümün jel veya solüsyon karaktere sahip olmasını etkilemektedir. Reçineler bitümde 780-1400g/mol molekül ağırlığına sahip olup bitümün yapısında dağınık şekilde yer almaktadırlar (Hunter ve ark., 2015).

Bitümün yapısında bulunan maltenlerin alt grupları olan aromatiklerin oranının artması bitümün reolojik yapısını çok fazla etkilemezken, doyguların oranının artması bitümün yumuşamasına neden olmaktadır. Reçinelerin oranının artması sonucunda bitüm daha sert olmakta, viskozitesi artmakta ve penetrasyon indeksi azalmaktadır (Hunter ve ark., 2015).

3.1.2.2. Modifiye bitümler

Karayolu kaplamasında kullanılan saf bitümler herhangi bir katkı kullanılmadan trafik ve iklimsel etkilere karşı yeterli adezyona ve mekanik özelliklere sahiptir. Ancak yağışların ve iklim değişikliklerinin artması, taşıtların aks ağırlıklarının, lastik basınçlarının ve taşımacılığın artması, kaplamalarda daha ince tabakaların kullanılmak istenmesi, üretilen karışım maliyetlerin azaltılması gibi durumlardan dolayı kaplamalarda katkısız bitümlerin kullanılmasıyla istenilen performans elde edilememektedir (Hunter ve ark., 2015).

Bitüme eklenen kimyasal katkıları saf bitümün kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Bitümün viskoelastik yapısı kaplamanın performansını birçok açıdan etkilemektedir. Özellikle kaplamanın tekerlek izi ve kırılmaya karşı direncinin azalması, kaplamada yaygın olarak görülen sorunlardır. Bitümün katkı ile modifiyesinin ilk amacı farklı sıcaklıklar etkisindeki bitümün davranışını bozmadan, bitümün veya karışımın yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi direncini artırmaktır. Bunun için katkıdan beklenen performanslar, bitümün viskoelastik davranışını azaltmak için katkının bitüme daha sert yapı kazandırması ile bitümün viskoz davranışını azaltarak elastik yapı kazandırmasıdır. Bitümün sertliğinin artmasıyla karışımın dinamik rijitliği de artmaktadır. Bunun sonucunda, kaplamanın yük yayma kabiliyeti iyileşmekte, yapısal mukavemeti artacak ve kaplamanın beklenen hizmet ömrü uzamaktadır. Ayrıca kullanılacak katkıların etkisiyle bitümün elastik özelliğinin artmasına bağlı olarak karışımın esnekliği artacaktır (Hunter ve ark., 2015).

Bitümün modifiyesi üzerine araştırmalar uzun yıllardan beri devam etmekte olup yaygın olarak kullanılan modifiye katkıları, özel filler katkıları, lifler, mineral fiberler, plastomerler, termoplastik elastomerler ve kauçuk esaslı katkılardır (Hunter ve ark., 2015).

3.2. Bitümlü sıcak karışımlardan beklenen özellikler

Bitümlü sıcak karışımlar karayolları, otoyollar ve havaalanları inşasında kullanılan kaplama malzemeleridir. Karışım için bitüm ve agreganın ısıtılması, karışımın hazırlanması, taşınması ve serme-sıkıştırma işlemleri kaplamanın maliyetini artırmaktadır. Daha uzun servis ömrüne sahip bitümlü sıcak karışım kaplamalar elde edebilmek için karışımın stabilite, durabilite, esneklik, işlenebilirlik, geçirimsizlik, yorulma direnci ve kayma direnci gibi özelliklere sahip olması önem taşımaktadır.

3.2.1. Stabilite

Stabilite, bitümlü sıcak karışımlar kullanılarak imal edilen kaplamaların trafik yükü ve çevresel etkiler (sıcaklık) altında oluşacak deformasyonlara karşı gösterdiği dirençtir. Stabilitesi düşük karışımların trafik etkisi altında tekerlek izi ve ondülasyon gibi deformasyonlara karşı direnci de azalmaktadır. Stabilitenin çok yüksek olması durumunda, yük altında kaplama esnek davranış gösteremeyip, kaplamada çatlak oluşumu sorunu ortaya çıkmaktadır. Karışımın stabilitesi genel olarak agreganın içsel

sürtünmesine ve bitümün kohezyonuna bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda ve düşük trafik hızlarında stabilite üzerinde agreganın etkisi daha fazla olurken, düşük sıcaklıklarda ve hızlı trafik yüklemelerinde kohezyonun etkisi daha fazla olmaktadır (Tunç, 2001).

Agreganın içsel sürtünmesi, yüzey dokusuna, gradasyona, dane şekline, karışımın yoğunluğuna bağlıdır. Agreganın yüzey pürüzlülüğünün, köşeliliğinin ve temas alanının artmasına bağlı olarak içsel sürtünme artmakta içsel sürtünmenin artması da stabiliteyi olumlu olarak etkilemektedir. Karışımda aşırı miktarda bitümün bulunması durumunda ise bitüm karışımda yağlayıcı etki oluşturmakta ve karışımın stabilitesini düşürmektedir (Yavuz, 2002)

Agreganın içsel sürtünmesine ve kohezyona ek olarak, karışımın sıcaklığının artmasıyla bitümün viskozitesi azalmakta ve agrega daha fazla bitüm absorbe edeceği için karışımın stabilitesi artmaktadır. Ayrıca karışımın sıcaklığının artmasıyla işlenebilirlik artmakta, karışım daha kolay sıkışmakta ve daha iyi sıkışma sonucunda sıkıştırılan karışımın yoğunluğu artarak stabilitesi de artmaktadır. Hazırlanan karışımın mekanik özelliklerinin haricinde, uygulanan trafik yük miktarının azalması, yükleme hızının artması ve kaplama kalınlığının artması karışımın stabilitesini ve kaplamanın servis ömrünü olumlu olarak etkilemektedir (Tunç, 2001).

3.2.2. Durabilite

Durabilite, bitümlü karışımların çevresel (hava, su, sıcaklık) ve trafik etkilerine karşı dayanım göstermesidir. Karışımdaki bitümün oksidasyon ve buharlaşma etkisiyle yaşlanması (sertleşmesi) ve donma çözünme etkisiyle agreganın deformasyonu, durabiliteyi olumsuz olarak etkilemektedir.

Karışımın durabilitesi, yüksek bitüm oranı, yoğun agrega gradasyonu ve karışımın geçirimsizlik özelliği ile artmaktadır. Karışımdaki bitüm miktarının artmasıyla, agrega tanelerini saran film tabakası kalınlaşmakta ve bitümün yaşlanmaya karşı direnci artmaktadır. Bu durum stabiliteyi olumsuz olarak etkilese de durabiliteyi olumlu olarak etkilemektedir. Ayrıca bitüm miktarının artmasına bağlı olarak karışımdaki boşluk miktarı azalmakta ve geçirimsizlik arttığı için hava etkisi ve suyun donma çözünme kaynaklı deformasyon etkisi azalarak karışımın durabilitesi artmaktadır.

Trafik etkisi altındaki karışımda yeterli miktarda bitüm bulunmaması, agrega ile bitüm arasında yeterli adezyon sağlanamamasına ve agreganın kaplamadan sökülmesine yol açmaktadır. Benzer durum bitümün karışımda aşırı ısıtılması sonucunda kısa dönem

yaşlanmaya neden olmakta ve bitüm zamanla kırılgan hale gelmektedir. Rijit durumda olan bitümün bağlayıcı özelliğinin zayıflamasıyla, kaplamadaki agrega taneleri kopmakta ve durabilite azalmaktadır. (Yavuz, 2002)

Karışımın durabilitesi genel olarak, karışımda bitüm oranının yüksek olmasıyla, bitümün penetrasyonunun düşük olmasıyla, agreganın soyulma direncinin yüksek olmasıyla, yoğun gradasyonlu agrega kullanılmasıyla ve karışımın iyi sıkıştırılması ile artmaktadır.(Tunç, 2001)

3.2.3. Esneklik

Karayolu inşasında zeminin ve temel tabakasının yol boyunca tamamen aynı taşıma gücüne sahip olması pek mümkün olmamaktadır. Bitümlü sıcak karışımla oluşturulan kaplama tabakasının, temel ve alt temel tabakalarındaki oturmalara ve don kabarmasına bağlı gerilmelere karşı çatlamadan, hafifçe eğilerek uyum göstermesi, kaplamanın esneklik özelliğini oluşturmaktadır. Esneklik genel olarak, yüksek bitüm oranı ve açık gradasyonlu agrega ile artmaktadır (Yavuz, 2002).

Karışımda bitüm miktarının artmasına bağlı olarak esnekliğin artması stabiliteyi olumsuz olarak etkilediği gibi, azalması da yük altında çatlama ve kırılmalara yol açabileceği için stabilitenin düşmesine neden olmaktadır (Tunç, 2001).

3.2.4. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın serme ve sıkıştırma işlemlerinin kolay olarak uygulanabilmesinin ölçüsüdür. Karışımda kaba agrega oranı ve maksimum dane boyutu arttıkça, agreganın pürüzlülüğü arttıkça, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığı azaldıkça, bitümün penetrasyonu azaldıkça ve viskozluğu arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır. Karışımın işlenebilirliğinin azalmasına bağlı olarak yeterli sıkışma sağlanamamakta ve karışımın stabilitesi azalmaktadır. Ayrıca işlenebilirliği düşük olan karışımlarda uygulama esnasında kaba agrega sıkışamayıp yüzeyde kaldığı için yüzey pürüzlülüğü artmakta ve özellikle kaplama tabakasının yüzey kısmı yeterli sıkışmadığı için yüzeydeki agregalar trafiğin etkisiyle kaplamadan sökülmetedir (Tunç, 2001).

3.2.5. Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, bitümlü sıcak karışım kullanılan kaplamaların içine su veya hava girişine karşı gösterdiği direncin ölçüsüdür. Kaplamadaki boşluk oranı ve boşlukların

birbirleriyle ve yüzeyle olan bağlantıları, kaplamadaki su ve hava geçişini etkilemektedir. Geçirimsizliğin azalmasına bağlı olarak hava ve suyun etkisi ile bitümde yaşlanma oluşumu hızlanmakta, bitüm agrega adezyonu azalmakta ve donma çözünme etkisiyle kaplamada parçalanma artmaktadır. Karışımın bitüm miktarının artması, yoğunluğunun artması (yoğun gradasyonlu karışım) ve sıkıştırmanın artması ile geçirimsizlik genel olarak artmaktadır. Yeterli hava boşluğunun bırakılması stabiliteyi de artırmaktadır. Kaplamanın hava boşluğunun, aşınma tabakasında %3-5 arasında olması şartnamede belirtilmiş olup, karışımın geçirimsizliğini sağlamak ve yoğunluğunu artırmak için dikkat edilmesi gereken özelliktir. Ayrıca sıcak havalarda bitümün kaplama yüzeyine çıkmasını (kusmayı) önlemek, trafik yükleri altında yeterli sıkışmayı sağlamak, içsel sürtünme açısının azalmasını önlemek ve geçirgenliğin azalmasıyla bitümün yaşlanmasını azaltmak için kaplamanın şartnamede belirtilen hava boşluğu oranınca sıkışmasını sağlamak gerekmektedir (Tunç, 2001).

3.2.6. Yorulma direnci

Yorulma direnci, bitümlü sıcak karışımların kaplamada oluşan trafik yüklerinin etkisiyle kalıcı deformasyon oluşmasına karşı gösterdiği dirençtir. Karışımında agrega gradasyonunun yoğun olmasıyla, bitümün penetrasyonun artmasıyla, bitüm miktarının artmasıyla, kaplama kalınlığının artmasıyla karışımın yorulma direnci artmaktadır (Tunç, 2001).

Kaplamalarda yaygın görülen kusurlardan olan yorulma çatlağı, trafik yüklerinin belli süre kaplamaya etkimesiyle meydana gelmektedir. Özellikle kaplamaya etkileyen trafik yüklerinin artmasıyla, kaplama kalınlığının az olmasıyla ve zemin tabakasının taşıma gücünün yetersiz olmasıyla, kaplamada yorulma çatlak oluşumu artmaktadır (Tunç, 2001).

3.2.7. Kayma direnci

Kayma direnci, taşıtların emniyetli fren mesafeleri ve yatay kurplarda merkezkaç kuvvetinin etkisiyle savrulmamaları için taşıt lastiği ile kaplama yüzeyi arasında gerekli olan sürtünme kuvvetini ifade etmektedir. Cilalanma direnci yüksek agrega, açık gradasyonlu karışım ve düşük bitüm miktarı ile kaplama yüzeyindeki kayma direnci artmaktadır. Ancak kaplama yüzeyindeki kayma direncinin artması sürüş konforunu azaltırken taşıt işletme giderlerini de artırmaktadır (Tunç, 2001).

3.3. Taş mastik asfaltlar

Taş mastik asfalt (TMA), açık agrega gradasyonu (iri agrega oranı daha yüksek) ile yüksek bitüm oranı ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımlardır. Karışım, iri agregaların birbirlerine yoğun bitüm oranı, filler ve fiber (bitüm katkısı) ile kenetlenmesiyle oluşmaktadır. TMA, kış mevsiminde taşıtların kullandıkları çivili laskilerin kaplamadaki aşındırıcı etkisini azaltmak için ilk olarak 1960lı yıllarda Almanya'da kullanılmaya başlanmıştır. Ağır trafik etkisiyle oluşan deformasyonlara bitümlü sıcak karışımlara göre daha dirençli olduğu için otoyol ve diğer ana yollar da kullanılmaya başlanmıştır (O'Flaherty, 2001).

Taş mastik asfalt karışımında iri agreganın birbiriyle kenetlenerek oluşturduğu yapının boşluklarını mastik (ince agrega ve bitüm) doldurmaktadır ve hava boşluğu 2-4 arasındadır. Agregaların birbirine kenetlenmesiyle ağır trafik yükleri altında yüksek durabilite ve plastik deformasyona karşı oldukça dirençli karışımlar elde edilmektedir. Karışımındaki mastik harç, iri agregadaki boşlukların hacminden daha küçükse harç agregalar arasındaki boşluğu boşlukları dolduracak ve sıkışmaya uğramayacaktır. Ancak mastik hacmi, agregalar arasındaki boşluktan fazla ise sıkışmanın etkisiyle bitüm dışarı çıkarak (kusma) karışımın taşıma gücünü azaltacaktır. Bu nedenle, hem uygulamada hem de laboratuvar ortamında karışıma nispeten daha az sıkıştırma işlemi uygulanmaktadır. Agrega iskeletini dolduran mastik, karışımın yaşlanma ve hava koşullarına karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır (O'Flaherty, 2001).

Karışımında kullanılan bitümün karıştırma ve sıkıştırma esnasında agregalar arasından süzülmesini engellemek için karışıma düzenleyici katkılar ilave edilmesi gerekmektedir. Karışımın toplam ağırlığına %0,3 oranında ilave edilen selülozik lif katkıları karışımdan bitümün süzülmesini engellemek içindir. Bitümün performansını artıran katkılar (polimer katkıları gibi) da TMA karışımlarında kullanılmaktadır. Taş mastik asfalt karışımlarının çatlama ve yorulma direncinin yüksek olması, yüzey drenajının iyi olması, daha az gürültülü kaplamaya imkân vermesi gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır (O'Flaherty, 2001).

3.3.1. Taş mastik asfaltların olumlu ve olumsuz yönleri

Taş mastik asfaltların kaplamada kullanımında sağladığı faydalar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Daha uzun servis ömrüne sahiptir.

- Karışımdaki iri agrega oranının yüksek olması ve agreganın birbirine kenetlenmesiyle oluşan güçlü yapısı sayesinde deformasyonlara karşı yüksek dirençlidir.
- Bitüm oranının yüksek olmasından dolayı yorulma ömrü daha uzun olmaktadır.
- Karışımdaki iri agreganın sert (aşınma direnç yüksek) olmasından dolayı trafiğin aşındırma etkisine karşı daha dirençlidir.

Yukarıda belirtilen özelliklerin yansısı TMA'nın olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. TMA'nın olumsuz özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bitümlü sıcak karışımlara kıyasla daha yüksek bitüm oranı ve çeşitli katkılar içerdiği için karışım maliyeti yüksektir.
- Tasarım üretim ya da inşaatı sırasında oluşabilecek çeşitli hatalardan kaynaklı olarak kaplama yüzeyinde segregasyon ya da bitümün bir noktada birikmesi gibi sorunlar oluşabilmektedir. (Blazejowski, 2011)

3.3.2. Taş mastik asfalt tasarımı

Taş mastik asfalt karışım tasarım kriterleri karışımda yeterli iri agrega iskeletini sağlamak için geliştirilmiştir. Tasarım kriterleri arasında basınç (stabilite) testine ihtiyaç durulmamaktadır. Tasarım genel olarak beş adımdan oluşmaktadır.

Malzemenin seçilmesi,

Agrega gradasyonunun belirlenmesi,

Optimum bitüm miktarının belirlenmesi,

Bitümün süzülme miktarının belirlenmesi

AASHTO T-283 test metoduna göre nem hassasiyetinin belirlenmesidir. (Brown ve ark., 1997)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1 Bitüm ve çalışmada kullanılan katkıları

Çalışmada 50/70 penetrasyon sınıfına ait bitüm kullanılmıştır. Bitüm, Kayseri karayolları bölge müdürlüğü bitüm depolama tesislerinden temin edilmiştir. 50/70 penetrasyon sınıfındaki bitüm, ticari adı Sasobit® (S) olan katkı ve polifosforik asit (PPA) katkısı ile modifiye edilmiştir.

Çalışmada kullanılan Sasobit® katkısı Teknomet firmasından temin edilmiştir. Ticari adı Sasobit® olan katkı, FT- parafin olup, Fischer Tropsch sentezi ile üretilmektedir. Üretim aşamasında katalitik hidrojenasyonu takip eden distilasyon süreci ile Carbon monoksit daha yüksek hidrokarbona dönüştürülmektedir. Ürünün son halinde 40-100 karbon atomu içeren hidrokarbon zincirlerinden oluşmaktadır. Sasobit® katkısının bitüme katılması sonucunda yumuşama noktası değeri artmakta, penetrasyon değeri ise azalmaktadır. Yaklaşık 100°C’de eriyen Sasobit® katkısı bitümün viskozitesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Tamamen erime sıcaklığı ise 140-150 °C aralığında olmaktadır. Bitümün modifiyesinde %4 oranında Sasobit katkısı optimum değer olarak önerilmektedir. (Edwards ve ark., 2007). Şekil 4.1’de Sasobit® katkısının fiziksel görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 4. 1. Sasobit® katkısı (URL-5)

Bitümün polifosforik asit (PPA) ve fosfor pentoksit (P_2O_5) ile bitümün modifiye işlemi 1950’den itibaren uygulanmaktadır. Daha yaygın olarak kullanılan PPA ise 1970’li yıllardan beri bitümün modifiyesi için kullanılmaktadır. Polimer modifiyesine benzer şekilde bitümün PPA ile modifiye edilmesi yüksek sıcaklıklarda bitümün sertliğini arttırmakta ve böylece karışımın kalıcı deformasyona karşı dayanımını artırmaktadır. Bitüme katılacak olan PPA miktarı bitümün kaynağına ve kimyasal yapısına bağlı olabilmektedir. Yapılan çalışmalarda bazı bitümler PPA modifiyesi için uygun olmadığı ve PPA katkısının bitümü olumlu olarak etkilemediği görülmüştür. Ancak bitümün modifiyesinde kullanılacak PPA miktarının en fazla (%1,5-%2) olması önerilmektedir. Oda sıcaklığında viskoz likit bir yapıya sahip olan polifosforikasitin (D'Angelo, 2012) fiziksel görüntüsü Şekil 4.2’de yer almaktadır.



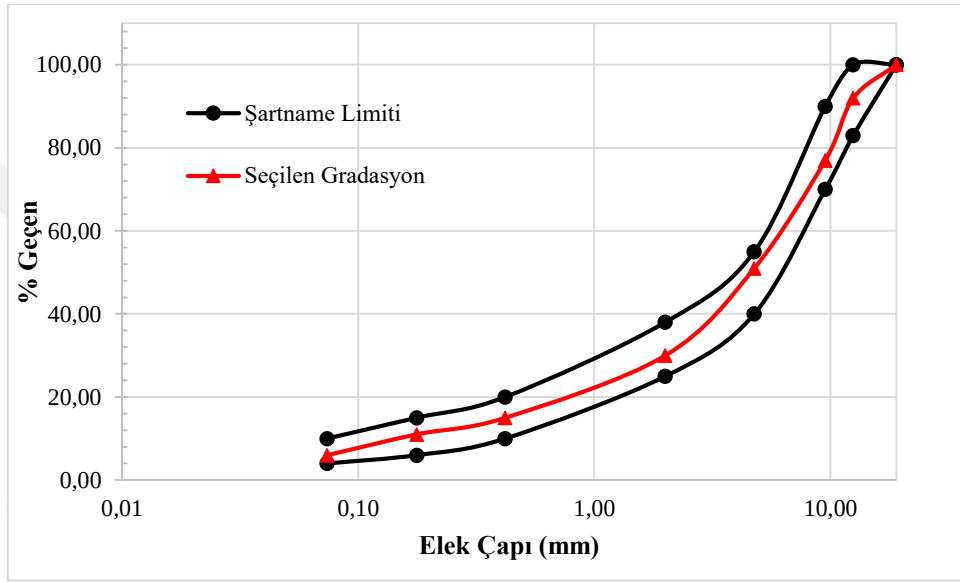
Şekil 4.2. Polifosforik asitin oda sıcaklığındaki fiziksel görüntüsü (URL-6)

4.1.2. Çalışmada kullanılan agregalar

Aşınma tabakası gradasyonuna uygun olarak hazırlanan bitümlü sıcak karışımlarda Yozgat ilinden temin edilen kalker tipi agrega kullanılmıştır. Maksimum dane boyutu 19 mm olan agrega gradasyonu, Karayolları teknik şartnamesinde belirtilen aşınma tabakası tip 1 gradasyonuna uygun olarak seçilmiştir (KGM, 2013). Çalışmada kullanılan kalker tipi agreganın gradasyon limitleri Çizelge 4.1’de grafiği ise Şekil 4.3’de yer almaktadır.

Çizelge 4.1. Agrega gradasyonu ve gradasyon limitleri (kalker)

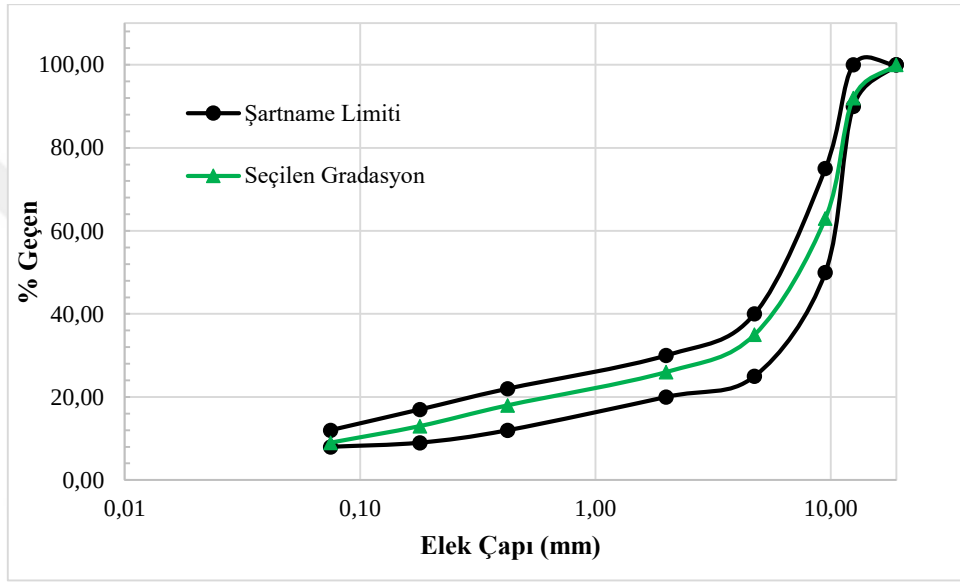
Elekler	Gradasyon Alt Limit	Gradasyon Üst Limit	Seçilen Gradasyon
3/4"	100,00	100,00	100
1/2"	83,00	100,00	92
3/8"	70,00	90,00	77
No.4	40,00	55,00	51
No.10	25,00	38,00	30
No.40	10,00	20,00	15
No.80	6,00	15,00	11
No.200	4,00	10,00	6

**Şekil 4.3.** Agrega gradasyon eğrisi (kalker)

Taş mastik asfalt karışımlarında kullanılacak agreganın sert, dayanıklı, temiz ve granit, bazalt gibi magmatik kayaların kırılmasından elde edilen agrega olması gerekmektedir (KGM, 2013). Taş mastik asfalt karışım gradasyonuna uygun olarak hazırlanan sıcak karışımlarda kullanılmak üzere, Yozgat ilinden temin edilen bazalt tipi agrega kullanılmıştır. Maksimum dane boyutu 19 mm olan agrega gradasyonu, Karayolları teknik şartnamesinde belirtilen Taş mastik asfalt aşınma tabakası tip 1 gradasyonuna uygun olarak seçilmiştir (KGM, 2013). Agregalar taş ocağından 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-23 mm boyutunda elenmiş yığınardan elde edilmiştir. Agrega yığınları, deneyde kullanılan elek sınıflarına göre elenmiş ve deneylerde elek sınıflarına ve gradasyona uygun olarak seçilen agrega kullanılmıştır. Taş mastik asfalt karışımlarında kullanılan bazalt tipi agreganın gradasyon limitleri Çizelge 4.2’de grafiği ise Şekil 4.4’de yer almaktadır.

Çizelge 4.2. TMA agrega gradasyonu ve gradasyon limitleri (bazalt)

Elekler	Gradasyon Alt Limit	Gradasyon Üst Limit	Seçilen Gradasyon
3/4"	100	100	100
1/2"	100	90	92
3/8"	75	50	63
No.4	40	25	35
No.10	30	20	26
No.40	22	12	18
No.80	17	9	13
No.200	12	8	9

**Şekil 4.4.** TMA agrega gradasyon eğrisi (bazalt)

Çalışmada kullanılan agregaların özellikleri şartnamelere uygun olarak Ek 1' de yer alan deneysel yöntemlerle belirlenmiştir. Çizelge 4.3'de karışımlarda kullanılan agregaların özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan agregaların özellikleri

Deney	Şartname	Sonuç	
		Kalker	Bazalt
Aşınma Kaybı (Los Angeles deneyi)	(ASTM-C131)	24,5	14,6
İri agrega Hacim Özgül Ağırlık	(ASTM-C127)	2,707	2,603
İnce Agrega Hacim Özgül Ağırlığı	(ASTM-C128)	2,746	2,593
Filler zahiri özgül ağırlık (g/cm³)	(ASTM-D854)	2,760	2,707
İri agrega su absorpsiyon yüzdesi	(ASTM-C127)	0,78	1,78
İnce agrega su absorpsiyon yüzdesi	(ASTM-C128)	0,13	1,91

4.2. Yöntem

4.2.1. Bitümün modifiye edilmesi

50/70 saf bitüm Sasobit® ve polifosforik asit katkıları ile modifiye edilmiştir. Modifiye işlemi aşamasında saf bitüm 1 lt.' lik tenekelere alınmıştır. Etüvde 150°C sıcaklıkta yaklaşık olarak 3 saat süreyle ısıtılan bitüme ağırlıkça %1PPA, %1S, %2S, %3S, %1S+%1PPA, %2S+%1PPA, %3S+%1PPA oranlardaki katkılar ilave edilmiştir. Katkılar ilave edildikten sonra tekrar etüve konularak 30 dk süreyle katkıların erimesi amaçlanmıştır. Etüvde 30 dk bekletildikten sonra 1000 devir/dakika hızdaki karıştırıcıyla, 40 dk süreyle karıştırılarak bitümün modifiye işlemi tamamlanmıştır. Karıştırma esnasında bitümün soğumaması için ısıtıcı ile bitümün konulduğu metal kaplar alttan ısıtılmıştır. Modifiye işleminin yaşlanma etkisinden dolayı herhangi bir katkı kullanılmadan saf bitüme de benzer modifiye adımı uygulanmıştır. Şekil 4.5'de modifiye işleminde kullanılan karıştırıcı yer almaktadır.



Şekil 4.5. Bitüm modifiye mikseri

4.2.2. Bitümün üzerine tamamlanan deneyler

Saf ve katkıları ve %1PPA, %1S, %2S, %3S, %1S+%1PPA, %2S+%1PPA, %3S+%1PPA ile modifiye edilen bitümler üzerinde penetrasyon deneyi, yumuşama noktası deneyi ve dönel viskozite deneyi yapılmıştır. DeneySEL yöntemler bir sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

4.2.2.1 Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi bitümlerin oda sıcaklığındaki katılığını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Deneyde penetrasyon kabına alınan bitüm numuneleri 25°C sıcaklıkta yaklaşık 2 saat bekletilmektedir. Deney, 25°C sıcaklıktaki bitüme 100±0,1 g ağırlığındaki standart iğnenin 5s süreyle batmasıyla sonlanmaktadır. Numune üzerinde üç farklı noktaya iğnenin batırılıp, sonuçlarının ortalaması alınarak deney tamamlanır. İğnenin numune üzerindeki batma miktarı bitümün penetrasyonunu ifade etmektedir. İğnenin bitüme batma miktarının arttıkça penetrasyon değeri artmakta ve bitüm fiziksel olarak yumuşak kıvam almaktadır. Penetrasyon deneyi sonucunda bitümün penetrasyon değerine göre sınıflandırması belirlenebilmektedir (ASTM-D5, 2013).

4.2.2.2. Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası deneyi, bitümün yumuşama noktasını ve sıcaklığa karşı hassasiyetini belirlemek için uygulanmaktadır. Deneyde standart halka ve metal bilye kullanılmaktadır. İki pirinç halkanın içine deneyi yapılması planlanan bitüm ısıtılarak dökülür. İçinde bitüm bulunan metal halkalar yumuşama noktası deney aparatına yerleştirildikten sonra 5°C sıcaklıktaki su dolu beher içerisinde 15 dakika bekletilir. 15 dakika beklendikten sonra bitüm plakaları üzerine standart metal bilye konulur. Dakikada 5°C sıcaklık artışı olacak şekilde beher ısıtılır. Kontrollü olarak yapılan bu ısıtma işleminin sonucunda, yüzük kalıplardaki bitümün, üzerindeki bilyenin etkisiyle alt kısımda yer alan plakaya temas ettiği sıcaklık kaydedilir. Her iki bilyenin plakaya temas ettiği sıcaklıkların ortalaması alınarak bitümün yumuşama noktası sıcaklığı bulunur (ASTM-D36, 2009).

4.2.2.3. Dönel viskozimetre deneyi

Bitümün yüksek sıcaklıklardaki viskozite özelliklerini belirlemek için dönel viskozimetre deneyi yapılmaktadır. Deneyin uygulanabilmesi için AASHTO TP48

standartlarına uygun Brookfield viskozimetre deney cihazı kullanılmaktadır. Deney sonunda belirlenen viskozite değerlerine göre bitümlü karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenebilmektedir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığını belirleyebilmek için 135°C ve 165°C sıcaklıklarda viskozite deneyi uygulanmaktadır. Viskozite sıcaklık grafiği çizilerek deney yapılan sıcaklardaki viskozite değerleri grafikte belirlenip bir doğru ile birleştirilirler. Doğrunun 170±20 centipoise (cP) değerini kestiği bölgede karıştırma sıcaklığı, 280±30 centipoise (cP) değerini kestiği bölgede ise sıkıştırma sıcaklığı belirlenmektedir (Kuloğlu ve ark., 2008). Şekil 4.6'da Dönel viskozimetre deney cihazı yer almaktadır.

Çalışmada deney için 150°C'de ısıtılarak akışkan hale getirilmiş yaklaşık 11g ağırlığındaki deney numunesi viskozimetre deney tüplerine konularak viskozite cihazına yerleştirilmiştir. Deney viskozite cihazına bağlı milin dönme hızına (20 devir/dakika) karşı koyduğu dirence bağlı olarak bitümün viskozite değerini belirlemektedir. Yaklaşık 1 saat süreyle test cihazında deney sıcaklığında bekletilen numune üzerinde deney başlatılmıştır. Deney başladıktan sonra 15. Dakikadan itibaren 1'er dakika arayla üç okuma yapıp ortalamaları alınarak bitümlerin viskozite değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.6. Dönel viskozimetre test cihazı (URL-3)

4.2.3. Marshall tasarım deneyi

Saf ve %3S ve 3S+%1PPA ile modifiye edilmiş bitümler ile karışımlar hazırlanmıştır. Karışımların optimum bitüm oranı Marshall tasarım yöntemi ile belirlenmiştir.

Marshall deneyi, bitümlü sıcak karışımların 101 mm çapında ve 76.2 mm kalıplara konulup sıkıştırıldıktan sonra sıkıştırılmış numunenin, stabilite, yoğunluk, hava boşluğu gibi fiziksel özellikleriyle karışımın optimum bitüm miktarının belirlendiği deney yöntemidir. Deney için yaklaşık 1200 g ağırlığında hazırlanan karışımlar standart deney kalıplarına dökülür. 4536 ± 9 g ağırlığındaki standart Marshall tokmağın $457,2 \pm 1,524$ mm ($18 \pm 0,006$ inç) yükseklikten serbest düşmesi ile numune sıkıştırılır. Numunenin her iki yüzüne 50 ya da 75 darbe uygulanarak sıkıştırma işlemi tamamlanır. Karışıma eklenen her bitüm oranı için en az üç adet numune hazırlanması gerekmektedir. Numuneler sıkıştırma işleminden sonra hidrolik krika yardımıyla kalıplardan çıkartılıp 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Oda sıcaklığında bekletilen numunelerin ilk olarak yükseklik değerleri ölçülür. Deney numunelerinin yüksekliklerinin 63,5 mm olması gerekmektedir. Bu değeri sağlamayan numunelerin stabilite sonuçları, stabilite düzeltme katsayılarıyla düzeltilmelidir. Sıkıştırılan numunelerin havada, suda ve doymuş yüzey kuru ağırlıkları tartılır ve pratik hacim ağırlıkları belirlenir. Daha sonra numuneler 60° sıcaklıktaki su banyosunda 30-40 dak. süreyle bekletildikten sonra Marshall test cihazına yerleştirilir. Eksenel yüke maruz bırakılan numunelerin en büyük yük altındaki deformasyon değerleri kaydedilir. Yükün en büyük değeri numunenin stabilite değerini, deformasyon miktarı da akma değerini vermektedir (Önal ve Kahramangil, 1993).

Çalışmada kalker tipi agregası ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımların optimum bitüm miktarını belirlemek için %3,5'den %5,5 e kadar %0,5 artan bitüm oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Karışımları hazırlamak için yaklaşık 1200g ağırlığındaki agregası, gradasyona (Aşınma tabakası tip 1) uygun olarak seçilmiştir. Agregalar karıştırma sıcaklığının 10°C üzerindeki sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 5 saat bekletildikten sonra karışıma geçilmiştir. Karışımlarda kullanılan saf, %3S modifiyeli ve %3S+%1PPA modifiyeli bitümler ise dönel viskozimetre cihazı ile belirlenen karıştırma sıcaklığındaki etüvde yaklaşık 3 saat süreyle bekletilmiştir. Isıtılan agregası ve bitüm karıştırıcıya alınmıştır. Karıştırma esnasında sıcaklığın azalmaması için karıştırıcı alttan ısıtılmış ve 90s süreyle karıştırılmıştır. Karıştırıcıdan alınan karışım bir tepsiye boşaltılmış ve termometre ile kontrollü olarak sıkıştırma sıcaklığına kadar sıcaklığının düşmesi

beklenmiştir. Sıkıştırma sıcaklığına düşen karışım Marshall deney kalıplarına alınmıştır. Kalıbın altına karışımın yapışmaması için yağlı kâğıt konulmuştur. Kalıba alınan karışımlar şişlendikten sonra üzerine yağlı kâğıt konulup Marshall kompaktörüne yerleştirilmiştir. Marshall kompaktörü ile numunenin her iki yüzüne 75'er darbe olacak şekilde karışım sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan numuneler soğumaya bırakıldıktan sonra kriko yardımıyla kalıplardan çıkartılmıştır. Numunelerin yüzeyindeki yağlı kâğıtlar çıkartıldıktan sonra numuneler oda sıcaklığında 24 saat süreyle soğumaya bırakılmıştır. Bu işlem adımı her bitüm oranı için uygulanmış ve her bitüm oranı için dört adet numune hazırlanmıştır. Numuneler soğuduktan sonra yükseklikleri ölçülüp, havadaki, sudaki, doymuş yüzey kuru ağırlıkları belirlenerek pratik yoğunluk özellikleri belirlenmiştir. Ek 5'de numunelerin fiziksel özellikleri ve deney sonucu yer almaktadır. Bu işlemden sonra numunelerin stabilite değerlerini belirlemek için 60°C sıcaklıktaki suda 30 dakika bekletilen numuneler stabilite cihazına yerleştirilmiştir. Cihazda numunelere 50,8 mm/dak hızda yükleme yapılarak maksimum yüke eriştiği noktada akma değerleri okunmuştur. Tamamlanan deney adımlarından sonra stabilitenin ve pratik yoğunluğun maksimum olduğu bitüm oranı, hava boşluğunun %3 olduğu bitüm oranı, asfaltla dolu boşluk oranının %70 olduğu değerlerin ortalaması alınarak optimum bitüm oranı belirlenmiş (Ek 7) ve seçilen optimum bitüm oranının akma değerine göre kontrolü sağlanmıştır. Optimum bitüm miktarı saf, %3S ve %3S+%1PPA modifiyeli bitümler için ayrı ayrı belirlenmiştir.

Taş mastik asfalt karışımlarının optimum bitüm oranı da Marshall tasarımına göre belirlenmiştir. Gradasyona uygun olarak hazırlanan yaklaşık 1150g ağırlığındaki bazalt agregalara %4,5'den %7,5'e kadar %0,5 artan oranlarda bitüm katılmıştır. Agregalar karıştırma sıcaklığının 10°C üzerindeki sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 5 saat bekletildikten sonra karışıma geçilmiştir. Karışımlarda kullanılan saf, %3S modifiyeli ve %3S+%1PPA modifiyeli bitümler ise dönel viskozimetre cihazı ile belirlenen karıştırma sıcaklığındaki etüvde yaklaşık 3 saat süreyle bekletilmiştir. Isıtılan agrega ve bitüm karıştırıcıya alınmıştır. Karıştırma esnasında sıcaklığın azalmaması için karıştırıcı alttan ısıtılmış ve 90s süreyle karıştırılmıştır. TMA karışımlarında bitüm oranı yüksek olduğu için bitümün karışımdan süzülmesini engellemek amacıyla karıştırma esnasında, karışımın toplam ağırlığınca %0,3 oranında selülozik fiber katkısı karışıma ilave edilmiştir. Selülozik fiber katkısının fiziksel görünüşü Şekil 4.7'de yer almaktadır.



Şekil 4.7. Taş mastik asfalt karışımlarında kullanılan selülozik fiber katkısı

Karıştırıcıdan alınan karışım bir tepsiye boşaltılmış ve termometre ile kontrollü olarak sıkıştırma sıcaklığına kadar sıcaklığının düşmesi beklenmiştir. Sıkıştırma sıcaklığına düşen karışım Marshall deney kalıplarına alınmıştır. Kalıpların alt ve üstlerine yağlı kâğıt konulduktan sonra Marshall kompaktörüne yerleştirilmiş ve her yüze 50 darbe ile sıkıştırılmıştır. Bitüm oranı fazla olduğu için sıkıştırılan numunelerin bozulmamasına dikkat edilmiş ve kalıplardan daha geç çıkartılmıştır. Kalıptan çıkartılan numuneler 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakıldıktan sonra numunelerin yükseklikleri ölçülüp pratik hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Ek 6'da taş mastik asfalt numunelerinin fiziksel özellikleri yer almaktadır. Taş mastik asfalt karışımları için stabilitenin, asfaltla dolu boşluk oranının minimum değerleri şartnamede belirtilmemiştir. Hava boşluğu değer aralığı %2-4 belirtilmiş olup optimum bitüm oranı %3 hava boşluğuna karşılık gelen bitüm oranıyla belirlenmiştir (Ek 8).

Taş mastik asfalt karışımlarında bitümün karışımdan süzülmesinin oranı şartnamede %0,3 olarak belirtilmiştir (KGM, 2013). Schellenber bitüm süzülme deneyi saf, %3S modifiyeli ve %3S+%1PPA modifiyeli Taş mastik asfalt karışımlar için yapılmıştır. Deney için karışımın toplam ağırlığı 1000g olacak şekilde gradasyona uygun olarak agrega ayarlanmıştır. Saf ve %3S katkılı bitümler için $135 \pm 5^\circ\text{C}$, %3S+%1PPA katkılı bitümler için 145°C sıcaklıkta karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan agregalar karışım sıcaklıklarında yaklaşık 5 saat süreyle, bitümler ise 3 saat süreyle bekletilmiş ve karışım hazırlanmıştır. 1000ml'lik beher 110°C sıcaklıkta 15 dakika ısıtıldıktan sonra karışımlar cam behere dökülüp tartılmıştır. Beher üzeri kapatılıp saf ve %3S katkılı bitümlü karışımlar için 175°C , %3S+%1PPA modifiyeli bitümlü karışımlar için 185°C sıcaklıktaki etüvde 60 ± 1 dk süreyle bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda etüvden çıkartılan

cam beherdeki karışım bir kaba boşaltılarak tartılmış ve ağırlık kaybı yüzde (%) olarak hesaplanmıştır.

4.2.4 AASHTO T-283 Modifiye Lottman deneyi

AASHTO T 283 Modifiye Lottman deneyi ile bitümlü sıcak karışımların suya karşı bozulma dirençleri belirlenebilmektedir. Deney, sıkıştırılmış Marshall numuneleri üzerinde uygulanmaktadır. Deneyde kullanılacak numuneler $\pm 1\%$ hava boşluğu olacak şekilde hazırlanmaktadır. Hazırlanan numuneler koşullandırılmış ve koşullandırılmamış olarak iki gruba ayrılmaktadır.

Deney AASHTO T283 şartnamesine uygun olarak hazırlanmış olup, her karışım grubu için 6 adet numune hazırlanmıştır. Karışım için gradasyona uygun olarak 1100g ağırlığında agregalar hazırlanmıştır. Agregalar karıştırma sıcaklığının 10°C üstündeki etüvde yaklaşık 5 saat süreyle bekletilmiştir. Bitümler ise karıştırma sıcaklığındaki etüvde 3 saat süreyle bekletilmiştir. Isıtılan agrega ve bitüm karıştırıcıya alınarak karışım sağlanmıştır. Karışım esnasında taş mastik asfalt karışımlara ağırlıkça $0,3\%$ oranında selülozik fiber katkısı ilave edilmiştir. Karışım hazırlandıktan sonra yaklaşık 2 saat süreyle oda sıcaklığında bekletilip $60\pm 3^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 16 ± 1 saat süreyle bekletilmiştir. Kür işleminden sonra karışımlar, sıkıştırma sıcaklığındaki etüvde 2,5 saat bekletilmiştir. Etüvden çıkartılan karışımın sıcaklığı termometre ile kontrol edildikten 100 mm çapındaki yoğurmalı pres kalıbına konulmuştur. Karışımın hava boşluğu $\pm 1\%$ olacak şekilde yoğurmalı presle yoğunluk hedefi ayarlanarak sıkıştırılmıştır. Kalıptan çıkartılan numuneler 24 saat süreyle oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığında soğuyan numunelerin, kalınlıkları (h), çapları (D) pratik yoğunluğu (D_p) ve hava boşluğu (V_h) belirlenmiştir. Her karışım grubu için 6 adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin 3 tanesi şartlandırılmış 3 tanesi ise kontrol (şartlandırılmamış) olarak ikiye ayrılmıştır.

Şartlandırma adımı ilk olarak numuneler $70-80\%$ oranında suya doymun hale getirilmiştir. Suyu doymun hale getirebilmek için vakum piknometre kabına yerleştirilen numunelerin üstü 3 cm su ile dolacak şekilde vakum kabına su doldurulmuştur. Vakum cihazı ile 13-67 kPa aralığında 15 dak süreyle vakum uygulanmıştır. Vakum uygulama işlemi sona erince numuneler 5 dakika süreyle suda bekletildikten sonra doymunluk derecesi hesaplanmıştır. Doymunluk (%) aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$D_{p(\text{doymun})} = \frac{A}{C_d - B_d} \quad (4.1)$$

$$V_{h(doygun)} = \left(1 - \frac{D_t}{D_{p(doygun)}}\right) * 100 \quad (4.2)$$

$$\text{Doygunluk (\%)} = \left\{ \frac{C_d - A}{D_{p(doygun)} * (C_d - B_d)} \right\} \quad (4.3)$$

Formüllerde;

- A : Sıkıştırılmış numunenin havadaki ağırlığı (g)
 B_d : Numunenin doymuktan sonra ağırlığı (g)
 C_d : Numunenin doymuktan sonra yüzey kuru ağırlığı (g)
 V_{h(doygun)} : Doymu hale getirilen numunelerin hava boşluğu (%)
 D_t : Maksimum teorik hacim özgül ağırlığı
 D_{p(doygun)} : Doymu hale getirilen numunelerin hacim özgül ağırlığı

Doymu derecesi %70'in altında olan numunelere tekrar vakum uygulanmıştır. Tekrar vakum cihazına konulan numunelere kontrollü olarak 5 dakika süreyle vakum uygulanmıştır. Numunelerin doymu derecesinin %80 üstüne çıkmamasına dikkat edilmiştir. Suya doymu hale getirilen numuneler parafilmle kaplandıktan sonra plastik poşetlere konulmuş ve poşetlerin içine 10 ml su ilave edildikten sonra -18±3°C sıcaklıktaki dondurucuya konulmuştur. Numuneler dondurucuda 16 saat süreyle bekletildikten sonra, 60±1°C sıcaklıktaki su banyosuna konulmuştur. Su banyosundaki numunelerin poşetleri ve üzerlerindeki parafilm çıkartılmıştır. Numuneler 60±1°C sıcaklıktaki su banyosunda 24 saat bekletildikten sonra su banyosuna su ilave edilip su sıcaklığı 25°C'ye düşürülmüştür. Numuneler 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 3 saat bekletildikten sonra Marshall test cihazında dolaylı çekme mukavemeti aparatıyla kırılmıştır. Şartlandırılmamış numuneler üzerinde herhangi bir donma çözünme döngüsü uygulanmadan 25°C sıcaklıktaki su banyosunda 3 saat bekletildikten sonra Marshall test cihazında dolaylı çekme mukavemeti aparatıyla kırılmıştır. Dolaylı çekme mukavemeti;

$$ITS = \frac{2000 * P_{max}}{\pi * h * D} \quad (4.4)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Formülde

- ITS : (indirect tensile strength) dolaylı çekme mukavemeti (kPa)
 P_{max} : maksimum yükü (N),
 h : sıkıştırılmış numunenin kalınlığını (mm),
 D : sıkıştırılmış numunenin çapını (mm) ifade etmektedir.

Dolaylı çekme mukavemet oranı (ITSR) ise ;

$$ITSR = \frac{\text{koşullandırılmış numunelerin ortalama ITS değeri}}{\text{koşullandırılmamış numunelerin ortalama ITS değeri}} \quad (4.5)$$

oranı ile hesaplanmaktadır. Oranın 0,80 değerinden büyük olması gerekmektedir.

4.2.5. Üç eksenli statik sünme deneyi

Sünme testi asfalt karışımlarının oluşabilecek tekerlek izini tahmin etmek için geliştirilmiştir. Test sıcak karışım asfalt numuneleri üzerine statik yük uygulanarak yapılmaktadır ve zamana bağlı olarak kalıcı deformasyon sonuçları ölçülmektedir. Sünme testi üç farklı şekilde uygulanabilmektedir. Bunlar;

- 1 Tek eksenli sınırlandırılmamış statik yükleme testi (çevresel basınç yok)
2. Tek eksenli sınırlandırılmış statik statik yükleme testi (çevresel basınç var)
3. Dolaylı çekme testi

Dolaylı çekme testi genellikle karışımlarda oluşabilecek düşük sıcaklık çatlaklarını belirlemek için kullanılırken, tek eksenli sünme testleri oluşabilecek tekerlek izi oyulması için kullanılmaktadır (Roberts ve ark., 1991). Şekil 4.8'de kalıcı deformasyon test cihazı yer almaktadır.



Şekil 4.8. Kalıcı deformasyon (sünme) test cihazı (URL-2)

En yaygın kullanılan test yöntemi ise sınırlandırılmamış statik sünme testidir. Bu test, numune üzerine belirli zaman ve sıcaklık altındaki statik yükün uygulanmasını ve örnek numune üzerindeki deformasyonların ölçülmesini kapsamaktadır. Test yöntemi çok pahalı olmayıp kolay uygulanabilir olmasına rağmen testin kalıcı deformasyon tahmini net sonuç vermeyebilmektedir. Tek eksenli (sınırlandırılmamış) sünme testi ile uygulanan basınç genellikle 30psi'yı (206,9 kPa) ve test sıcaklığı 40°C'yi geçmemektedir. Uygulamada asfalt karışımlarına uygulanan kamyon lastik basınçları yaklaşık olarak 120 psi (828kPa) ve en fazla sıcaklık değeri 60°C'den fazla olmaktadır. (Roberts ve ark., 1991).

Sünme testinin diğer uygulama yöntemi olan statik sınırlandırılmış sünme testi alan uygulaması için daha doğru yöntemdir. Çevresel basınç uygulayarak (genellikle 20 psi (138 kPa) numune eksenel olarak 120 psi (828kPa) basınca ve 60°C sıcaklığa kadar numune üzerinde test uygulanabilmektedir. Bu test koşulları uygulamadaki şartları

deneysel ortama yansıtma sınırlandırılmamış statik sünme testine göre daha elverişli olmaktadır. (Roberts ve ark., 1991)

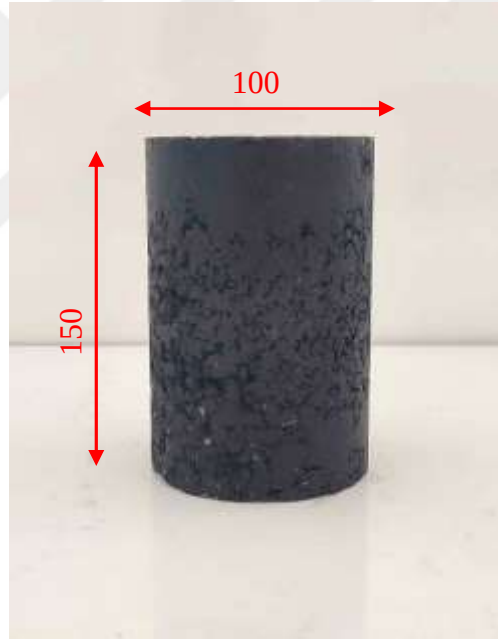
Üç eksenli statik sünme testi için yoğurmalı pres cihazı (Şekil 4.9) kullanılmıştır. Marshall testinde belirlenen optimum bitüm oranında hazırlanan karışımlar yoğurmalı presle hava boşluğu $\%4\pm0,5$ ve yüksekliği 150 ± 1 mm olacak şekilde sıkıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin yüksekliği, çapı ve hava boşluğu literatür çalışması (Witczak ve ark., 2002; Rushing ve Little, 2014) yapılarak belirlenmiştir.



Şekil 4.9. Yoğurmalı Pres test cihazı (URL-7)

Belirtilen hava boşluğu ve yüksekliklerde numuneler hazırlayabilmek için deneme karışımları ve numuneler hazırlanıp ön çalışma tamamlandıktan sonra gradasyona uygun olarak 2700g ağırlığındaki agrega ile optimum bitüm oranında karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan agrega karıştırma sıcaklığının 10°C üzerindeki sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 5 saat süreyle ısıtılmıştır. Saf ve modifiyeli bitümler de karıştırma sıcaklığındaki etüvde yaklaşık 3 saat süreyle ısıtılmışlardır. Isıtılan agrega ve bitüm karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra tepsiye boşaltılmıştır. Tepside kontrollü olarak karışımın sıcaklığı sıkıştırma sıcaklığına düşürülmüştür. Karışımın kütlesi Marshall numunelerine göre daha fazla olduğu için tepsideki karışım spatulayla karıştırılarak

karışımın iç sıcaklığının da sıkıştırma sıcaklığına düşmesi sağlanmıştır. Sıkıştırma sıcaklığına gelen karışım 100mm çapındaki yoğurmalı pres kalıbına boşaltılmıştır. Kalıbın alt ve üstüne yağlı kâğıt konularak karışımın cihaza yapışması önlenmiştir. Yoğurmalı test cihazıyla karışımın sıkıştırılması, numunenin hedeflenen yoğunluğu, yüksekliği ya da sıkıştırmada kullanılacak döngü sayısına göre ayarlanmaktadır. Yoğurmalı pres test cihazı sıkıştırma işleminin sonunda numunenin yüksekliği 150mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Sıkıştırma esnasında döngü sayısına dikkat edilmiştir. Sıkıştırma sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklardaki karışımlarda döngü sayısı daha az olurken, sıcaklığın artmasına bağlı olarak döngü sayısı artmaktadır. Sıkıştırılan karışım yaklaşık 15 dakika oda sıcaklığında bekletildikten sonra yoğurmalı pres cihazına monteli krika yardımıyla kalıplardan çıkartılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Şekil 4.10'da yoğurmalı presle hazırlanan statik sünme test numunesi yer almaktadır.



Şekil 4.10. Üç eksenli statik sünme testi numune örneği

Üç eksenli statik sünme deneyinde uygulanan her basınç değeri için iki adet numune hazırlanmıştır (TS-EN-12697-25). Hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri ve uygulanan deney şartları Ek-9'da verilmiştir. Numuneler hazırlandıktan sonra 40°C sıcaklıktaki üç eksenli statik sünme basınç kabına (Şekil 4.11) yerleştirilmiştir. 8 saat süreyle numunenin 40°C sıcaklığa erişebilmesi için ön koşullandırma yapılmıştır. Ön koşullandırma yapılan numune çevresel basınç uygulanacağı basınç kabına yerleştirildikten sonra basınç kabıyla birlikte tekrar 8 saat süreyle 40°C sıcaklıktaki deney

ortamında koşullandırılmıştır. Deneyin ortam sıcaklığını ölçmek için, üç eksenli test cihazının içine ve basınç kabı içine termometre yerleştirilmiş ve deney ortam sıcaklığının 40°C olmasına önem verilmiştir. Deneyin tamamlandığı sünme test cihazı Şekil 4.12’de yer almaktadır.



Şekil 4.11. Üç eksenli statik sünme deneyi basınç kabini



Şekil 4.12. Sünme cihazı

Koşullandırma işlemi tamamlandıktan sonra test aşamasına geçilmiştir. Teste başlanırken numuneye 90s süreyle yaklaşık 20kPa ön yükleme yapılmıştır. Ön yüklemenden sonra deneye başlanmıştır. Basınç kabının içinden ve basınç kabının yerleştirildiği sünme deney cihazından yükün uygulandığı deney ortamındaki sıcaklık kontrolü yapılarak deney tamamlanmıştır. Deney 10000s süreyle 500 kPa ve 300 kPa değerlerindeki iki farklı eksenel basınç ve eksenel basınçlara ek olarak 200 kPa ve 100 kPa değerlerindeki iki farklı çevresel basınç değeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her deney için iki adet numune hazırlanarak sonuçların ortalaması alınmıştır. Ön çalışmalarda 500kPa basınç altında numunelerin deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Numunelerin deformasyona uğradıkları eksenel basınç altında çevresel basıncın etkilerini gözlemlemek için 500 kPa basınç seçilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelenerek (Rushing ve Little, 2014) 100 ve 200 kPa çevresel basınç değerleri seçilmiştir. Çalışmada statik sünme deney şartları;

500 kPa :500 kPa eksenel basınç uygulanmış numune

500/200 kPa :500 kPa eksenel basınca ek olarak 200 kPa çevresel basınç uygulanmış numune.

300 kPa :300 kPa eksenel basınç uygulanmış numune
 300/100 kPa :300kPa eksenel basınca ek olarak 100 kPa çevresel basınç uygulanmış numune olarak adlandırılmıştır.

4.2.6. Tekerlek izi deneyi

Hamburg tekerlek izi test cihazı 1970’li yıllarda geliştirilmiş olup, asfalt numunelerinin 40° veya 50° sıcaklıktaki su ortamına batırıldıktan sonra yüzeyine temas eden demir tekerleğin hareketi sonucunda asfalt numunesinin yüzeyinde oluşan tekerlek izi ve nem hasarı (sökülme) etkilerinin belirlenmeye çalışıldığı deney yöntemidir. Çalışmalarda 10000’den fazla tekerlek geçişi olduğunda bazı karışımların nem hasarından dolayı bozulabildiği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı 10000’den fazla tekerlek geçişlerinde nem hasarı etkisi görülmektedir (Yıldırım ve ark., 2007).

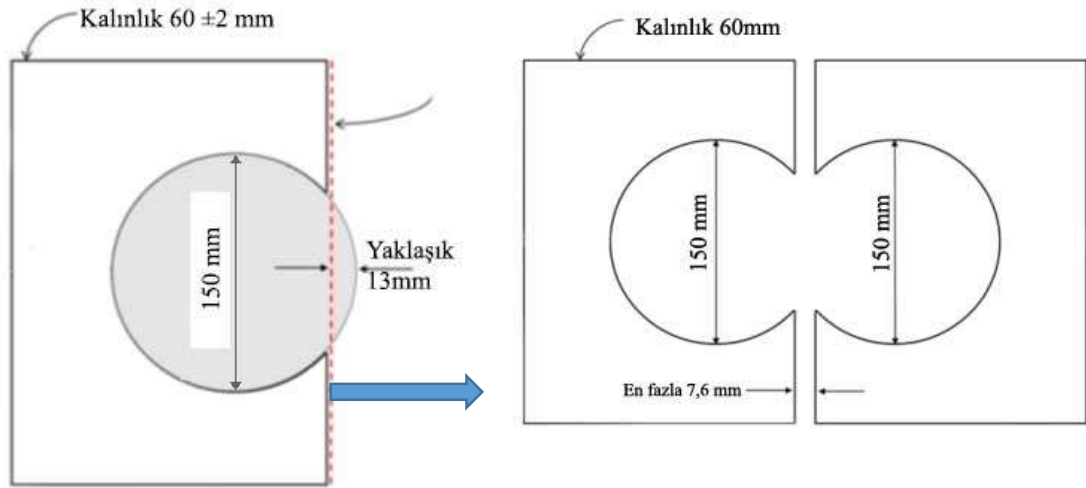
Testte çapı 8 inç (203mm) genişliği 0,90 inç (22,87mm) olan tekerlek kullanılmaktadır. Test numunelerinin hava boşlukları $\%7\pm1$ olacak şekilde hazırlanması önerilmektedir. 25°-70° sıcaklıklarda yapılabilecek testin yaygın olarak uygulandığı sıcaklık ise 50°’dir. Testte tekerleğin uyguladığı yük 705 N olup asfalt yüzeyinde yaklaşık olarak 0,73MPa basınç oluşturmaktadır. Oluşan bu temas basıncı çift dingilli bir kamyonun arka lastiği tarafından üretilen etkiyi simule etmektedir (Yıldırım ve ark., 2007).

Test, bitümlü sıcak karışımlar için 50°C sıcaklıkta uygulanmakta, tekerleğin toplam 20000 geçişinde ya da 20 mm deformasyona ulaştığı anda tamamlanmaktadır. Tekerleğin ortalama hızı yaklaşık olarak 1,1 km/s’dir. İleri geri yönde asfalt numuneleri üzerinde 320 mm mesafede hareket eden tekerlek dakikada 53 ± 2 geçiş yapmaktadır. 20000 tekerlek izi geçişi yaklaşık olarak 6,5 saatte tamamlanmaktadır (Yıldırım ve ark., 2007). Şekil 4.13’de Hamburg tekerlek izi test cihazı yer almaktadır.



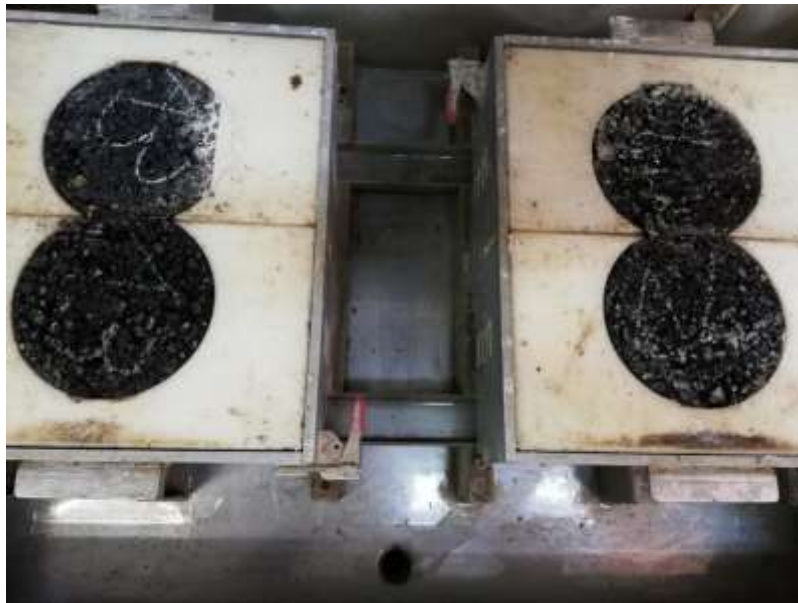
Şekil 4.13. Hamburg Tekerlek izi test cihazı (URL-4)

Çalışmada tekerlek izi deneyi, saf ve %3S ve %3S+%1PPA ile modifiye edilmiş bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar ve taş mastik asfalt karışımları üzerinde tamamlanmıştır. Deneyde kullanılmak üzere numune hazırlamak için 4600-4800g ağırlığındaki agregalar gradasyona uygun olarak seçilmiş, karıştırma sıcaklığının 10°C üstündeki sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 5 saat süreyle ısıtılmıştır. Bitümler (saf, %3S modifiyeli, %3S+%1PPA modifiyeli) karıştırma sıcaklığında yaklaşık 3 saat süreyle etüvde ısıtılmıştır. Isıtılmış agrega ile optimum bitüm oranındaki bitüm karıştırıcıda karıştırılmıştır. Taş mastik asfalt karışımlarında karışımın toplam ağırlığınca %0,3 oranında selülozik fiber katkısı ilave edilmiştir. Karışımlar hazırlandıktan sonra tepsiye alınarak termometre yardımıyla kontrollü şekilde sıkıştırma sıcaklığına kadar oda sıcaklığında soğutulmuştur. Karışımın kütlesi büyük olduğu için spatulayla karıştırılarak, karışımın yüzey ve iç sıcaklıklarının sıkıştırma sıcaklığına düşmesi sağlanmıştır. Sıkıştırma sıcaklığına düşen karışımlar yoğurmalı presle çapı 150 mm olan kalıplara yerleştirilmiştir. Sıkıştırılmış numunenin hava boşluğu 7 ± 1 olacak şekilde hedeflenen yoğunluğa kadar sıkıştırılmıştır. Sıkışma işlemi sonucunda 130-140 mm yüksekliğinde numuneler üretilmiştir. Hazırlanan numuneler yükseklikleri 60 mm olacak şekilde mermer kesicide kestirilmiştir. Yükseklikleri 60 mm olan numuneler, test kalıbına yerleştirilmek için Şekil 4.14'deki gibi uçlarından yaklaşık 13mm kesilerek kalıba yerleştirilmiştir.



Şekil 4.14. Hamburg tekerlek izi test kalıbı(Txdot:Tex-242-F, 2014)

Şekil 4.15’de yer alan Hamburg tekerlek izi test cihazıyla aynı anda iki adet numune testte kullanılabilmektedir. Her karışım tipi için (saf bitüm, %3S modifiyeli karışım %3S+%1PPA modifiyeli karışım) için iki adet numune hava boşluğu 7 ± 1 olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri Ek 10’da yer almaktadır. Kalıba yerleştirilen numuneler deney cihazına konulduktan sonra deney ortamı su ile doldurulmuştur. Su sıcaklığı 50°C sıcaklığa geldikten sonra deney otomatik olarak başlamıştır ve 20000 geçiş (10000 devir) ya da tekerlek izinin 20 mm’ye ulaştığı anda deney sonlandırılmıştır. (Tekerleğin her bir devri tekerleğin gidiş ve gelişi olup geçiş sayısının yarısı kadar olmaktadır).



Şekil 4.15. Hamburg tekerlek izi test cihazına yerleştirilen numuneler

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Penetrasyon Deneyi ve Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Saf ve modifiyeli bitümler üzerinde yapılan penetrasyon deneyinin, yumuşama noktası deneyinin ve PI değerinin sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Bitümün ısıya karşı duyarlılığı Penetrasyon İndeksi ile tanımlanmaktadır. Penetrasyon indeksi hesabı bitüm üzerine uygulanan Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri denklem (5.1) kullanılarak yapılmıştır.

$$\frac{20-PI}{(10+PI)*50} = \frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{RB}-25} \quad (5.1)$$

Denklem 1’den elde edilen PI değerine göre bitümün ısıya duyarlılığı $PI < -2$ ise ısıya karşı duyarlı, $PI > 2$ ise ısıya karşı az duyarlı olarak sınıflandırılmaktadır. (Tunç, 2001)

Çizelge 5.1. Bitüm üzerine uygulanan deney sonuçları

Bitüm	Penetrasyon deneyi (1/10 mm)	Yumuşama Noktası (°C)	PI
50/70 (Saf)	53,9	50,8	-0,83
%1PPA	46,7	59,4	0,74
%1S	49,4	54,3	-0,21
%2S	42,9	64,7	1,54
%3S	37,1	74,9	2,84
%1S+%1PPA	36,4	63,5	0,94
%2S+%1PPA	35,1	68,7	1,75
%3S+%1PPA	33,4	76,0	2,79

Çizelge 5.1’de yer alan deney sonuçlarına göre katkıların eklenmesine bağlı olarak saf bitümün penetrasyon değeri azalırken, yumuşama noktası değeri artmıştır. Elde edilen sonuçların daha önceden tamamlanmış olan çalışmalarla (Edwards ve ark., 2006); (Edwards ve ark., 2007) (Fazaeli ve ark., 2012) benzerlik taşıdığı yapılan literatür araştırması sonucunda tespit edilmiştir. Penetrasyon indeksine göre katkıların bitüme eklenmesiyle bitümün sıcaklığa olan hassasiyeti azalmıştır. %3S katkılı bitümün sıcaklığa karşı hassasiyetinin, diğer bitümlere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

5.2. Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları

Bitümün viskozitesini ve hazırlanacak olan karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını belirlemek için dönel viskozimetre deneyi yapılmıştır. 135°C ve 165°C sıcaklıklarındaki viskozite değerleri ile hazırlanacak olan karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. Karıştırma sıcaklığının belirlendiği grafikler Ek-2’de yer almaktadır. Karıştırma sıcaklığı olarak bitümün $0,17 \pm 0,2$ Pa-s viskozite değer aralığı, sıkıştırma sıcaklığı olarak da $0,28 \pm 0,03$ Pa-s viskozite değer aralığı seçilmiştir (Kuloğlu ve ark., 2008). %1PPA, %1S+%1PPA ve %3S+%1PPA ile modifiye edilen bitümlerin 165°C sıcaklıktaki viskozite değeri 0,17 Pa-s değerinden büyük çıktığı için, karıştırma sıcaklıkları 175°C sıcaklıktaki viskozite değerleri ile belirlenmiştir. Şekil 5.1’de deneyde kullanılan dönel viskozimetre test cihazı yer almaktadır. Tamamlanan deney sonuçlarından bitümün viskozite değerleri ve karıştırma sıkıştırma sıcaklıkları Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Dönel viskozimetre test cihazı ve ekipmanları

Çizelge 5.2. Bitüm üzerine uygulanan deney sonuçları

Bitüm	Viskozite Değerleri mPa-s		Karıştırma	Sıkıştırma
	135°C	165°C (*175°C)	Sıcaklığı (°C)	Sıcaklığı (°C)
Saf	492,5	129,5	156-161	145-150
%1PPA	1083,3	137,5*	168,5-174	159-163
%1S	443,3	112,5	153,5-159	142,5-147,5
%2S	402,5	107,5	152-157,5	140-145,5
%3S	368,3	104,6	150-156	139-144
%1S+%1PPA	875,0	125,0*	166,5-171,5	155-160
%2S+%1PPA	848,3	155,8	161,5-165,5	152,5-156,5
%3S+%1PPA	812,5	112,5*	164,5-169	154,5-158,5

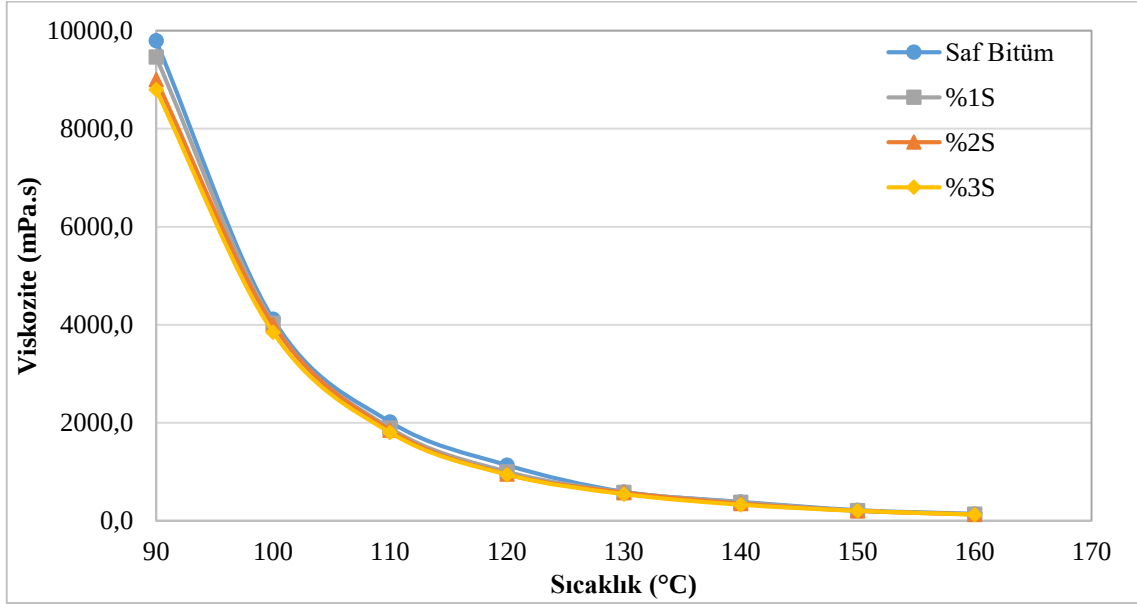
* 175°C sıcaklıktaki viskozite değerlerine göre karıştırma sıcaklığı belirlenmiştir.

Çizelge 5.2’de yer alan dönel viskozimetre deney sonuçlarına göre S katkısının artan oranlarda saf bitüme eklenmesine bağlı olarak bitümün aynı sıcaklıktaki viskozite değeri ve buna bina bina bağlı olarak karıştırma-sıkıştırma sıcaklık değerleri azalmaktadır. Karıştırma sıkıştırma sıcaklığının azalması ekonomik olarak yarar sağlayabilecek bir sonuçtur. Saf ve Sasobit® modifiyeli bitümlere %1PPA katkısı ilave edildikten sonra bitümlerin viskoziteleri artmıştır. Saf bitüme %1PPA katkısı ilavesiyle elde edilen modifiye bitüm, en yüksek karıştırma sıkıştırma sıcaklığına sahip olurken Sasobit® oranının artmasına bağlı olarak karıştırma sıkıştırma sıcaklığı azalmıştır. Elde edilen sonuçların literatürde daha önceden tamamlanan çalışmalarla (Fazaeli ve ark., 2016; Ge ve ark., 2017; Liu ve ark., 2018a) benzerlik taşıdığı tespit edilmiştir.

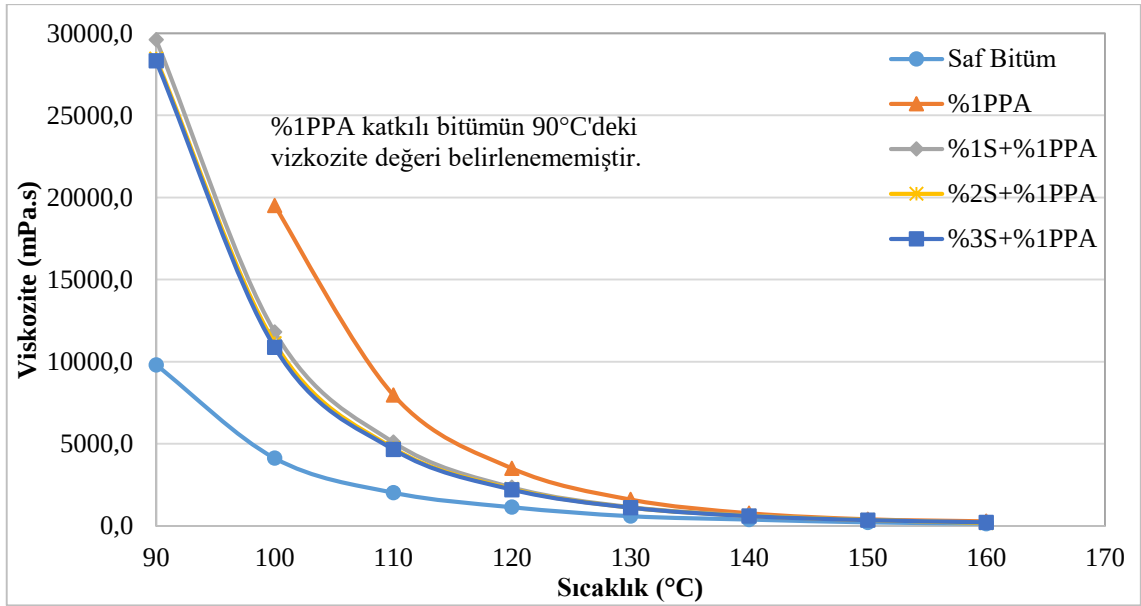
Saf ve modifiye bitümlerin karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesine ek olarak bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişimini incelemek için 90-160 °C sıcaklık aralığında 10°C artan sıcaklıklarda bitümlerin viskoziteleri belirlenmiştir. Tamamlanan deney sonuçları Çizelge 5.3’de yer almaktadır. Saf ve Sasobit® modifiyeli bitümlerin viskozite sıcaklık grafiği Şekil 5.2’de, saf ve S+PPA modifiyeli bitümlerin viskozite sıcaklık grafiği Şekil 5.3’de yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Saf ve modifiyeli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değerleri (mPa.s)

Sıcaklık (°C)	Saf	%1PPA	%1S	%2S	%3S	% 1S+ %1PPA	% 2S+ %1PPA	% 3S+ %1PPA
90	9800,0	-	9466,7	9000,0	8800,0	29616,7	28466,7	28316,7
100	4116,7	19500,0	4033,3	4000,0	3850,0	11816,7	11133,3	10866,7
110	2016,7	7966,7	1891,7	1850,0	1800,0	5100,0	4733,3	4650,0
120	1133,3	3500,0	1000,0	950,0	941,7	2350,0	2250,0	2200,0
130	587,5	1600,0	581,7	575,0	541,7	1150,0	1108,3	1100,0
140	383,3	766,7	375,0	350,0	325,0	637,5	612,5	587,5
150	212,5	400,0	205,8	202,5	200,0	362,5	359,2	341,7
160	137,5	275,0	132,5	127,5	125,0	225,0	175,0	208,3



Şekil 5.2. Saf ve Sasobit® modifiyeli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişim grafiği



Şekil 5.3. Saf ve PPA ve S+PPA modifiyeli bitümlerin sıcaklığa bağlı viskozite değişim grafiği

Viskozite-sıcaklık deneyi sonucunda sıcaklığın azalmasına bağlı olarak katkıların viskoziteye etkileri daha belirgin hale gelmiştir. Şekil 5.2’de saf bitüme Sasobit® katkısının eklenmesiyle bitümün viskozite değerleri azalmaktadır. Viskozitenin Sasobit® katkısının bitüme ilave edilmesiyle sıcaklığa bağlı değişimi daha önceden tamamlanmış olan çalışmalarla (Zhang ve ark., 2015); (Rezaeizadeh Herozi ve ark., 2022) benzerlik taşıdığı yapılan literatür araştırması sonucunda tespit edilmiştir. Şekil 5.3’de ise PPA katkısının bitüme eklenmesiyle bitümün viskozitesi artmıştır. En yüksek viskoziteye sahip olan %1PPA modifiyeli bitümün 90°C sıcaklıktaki viskozite değeri belirlenememiştir. Ancak PPA katkısı Sasobit® ile birlikte kullanıldığında 90°C sıcaklıktaki viskozite değeri belirlenebilmiştir. %1PPA katkısı bitümün viskozitesini artırmasına rağmen penetrasyon ve yumuşama noktası değerini S ya da S+PPA modifiyeli bitümler kadar olumlu etkilemediği için %1PPA modifiyeli bitüm ile karışım deneleri yapılmamıştır. Karışım için saf, %3S modifiyeli ve %3S+%1PPA modifiyeli bitümler kullanılmıştır. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’e ilave olarak saf ve modifiyeli bitümlerin ayrı ayrı sıcaklık-viskozite grafikleri Ek-3’de yer almaktadır. Deneyde tamamlanan viskozite ölçüm sonuçları ve ortalama viskozite değerleri Ek 4’de yer almaktadır

5.3. Marshall Tasarım Deneyi

5.3.1. Aşınma tabakası tasarım sonuçları

Hazırlanan bitümlü sıcak karışımların optimum bitüm oranı 4.2.3’de açıklandığı gibi Marshall tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Marshall deney numunelerinin özellikleri Ek-5’de, stabilite, pratik hacim ağırlık, agregalar arası boşluk, asfaltla dolu boşluk oranı, hava boşluğu, akma grafikleri Ek-7’da yer almaktadır. Çizelge 5.4’de kalker tipi agregayla Aşınma tip-1 gradasyonuna göre hazırlanan bitümlü sıcak karışımların Marshall tasarım test sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 5.4. Marshall Tasarımı Test Sonuçları (BSK)

	Saf Bitüm	%3S Modifiyeli	%3S+%1 PPA Modifiyeli	Şartname Limit
Optimum Bitüm (%)	4,30	4,26	4,25	-
Marshall	1184,6	1235,9	1378,6	>900 kg
Stabilitesi (kg)				
Birim Hacim Ağırlık	2,441	2,438	2,439	-
(g/cm ³)				
Maksimum Teo. Özgül	2,533	2,529	2,535	-
Ağ. (g/cm ³)				
Hava Boşluğu (%)	3,6	3,6	3,8	3-5
Agregalar Arası Boşluk	14,2	14,3	14,3	14-16
Asfaltla Dolu Boşluk (%)	74,3	74,7	73,5	65-75
Akma mm, (10 ⁻² inç)	3,1	3,4	3,4	2(8)-4(16)
Filler/Bitüm	1,39	1,40	1,41	<1,5

Tasarım sonucuna göre, saf ve modifiyeli bitümlerin optimum bitüm oranları birbirlerine yakın değerler çıkmıştır. Tasarımda belirlenen optimum değerlere göre hazırlanan karışımların test sonuçlarında tüm karışımlar minimum stabilite değerinin üzerinde stabiliteye sahip olurken,%3S ile modifiye edilen karışımların stabilite değeri saf bitümlü sıcak karışıma göre daha yüksek çıkmıştır. Benzer sonuç literatürde (Li ve ark., 2015) tarafından yapılan çalışmada belirlenmiştir. %3S+%1PPA modifiyeli karışımların stabilite değeri saf ve %3S modifiyeli karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır.

5.3.2. Taş mastik asfalt tasarım sonuçları

Hazırlanan taş mastik asfalt karışımların optimum bitüm oranı 4.2.3’de açıklandığı gibi Marshall tasarım yöntemi ile belirlenmiştir. Çizelge 5.5’de taş mastik

asfalt karışımlarının Marshall tasarım testinin sonuçları yer almaktadır. Marshall deney numunelerinin özellikleri Ek-6'da, stabilite, pratik hacim ağırlık, agregalar arası boşluk, asfaltla dolu boşluk oranı, hava boşluğu, akma grafikleri Ek 8'de yer almaktadır.

Çizelge 5.5. Marshall Tasarımı Test Sonuçları (TMA)

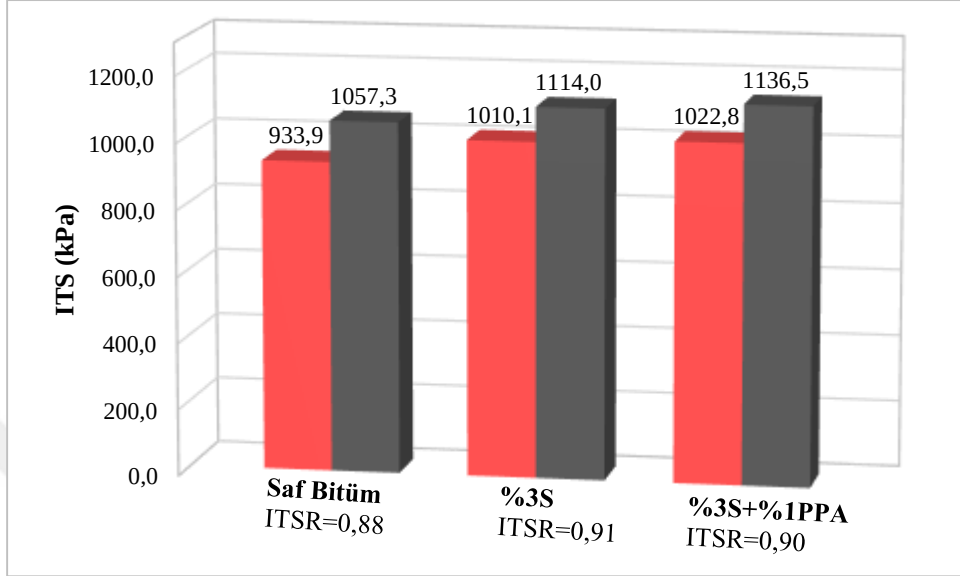
	Saf Bitüm	%3S Modifiyeli	%3S+%1 PPA Modifiyeli	Şartname Limit
Optimum Bitüm (%)	6,60	6,55	6,57	min 5,8
Birim Hacim Ağırlık (g/cm ³)	2,297	2,299	2,297	-
Maksimum Teo. Özgül Ağ. (g/cm ³)	2,387	2,371	2,376	-
Hava Boşluğu (%)	3,8	3,0	3,3	2-4
Agregalar Arası Boşluk	17,8	17,6	17,8	min 16
Asfaltla Dolu Boşluk (%)	78,7	82,8	81,2	-
Selülozik fiber katkısı (%)	0,3	0,3	0,3	0,3-1,0
Schellenberg süzülme deneyi (%)	0,11	0,13	0,11	max 0,3
AASHTO T-283 ITS oranı	0,81	0,83	0,87	0,80

Tamamlanan taş mastik asfalt tasarımına göre belirlenen optimum değerlerle hazırlanan karışımların hava boşlukları ve agregalar arası boşluk değerleri şartnamenin sınırları içinde kalmıştır. Belirlenen optimum bitüm oranları da şartnamede belirtilen minimum değerinin üstünde çıkmıştır. Karışıma eklenen %0,3 oranındaki selülozik fiber katkısının, bitümün karışımdan süzülmesini şartname limitinin altında tuttuğu gözlemlenmiştir. Sasobit® katkısı taş mastik asfalt karışımların stabilite değerini artırmıştır. Literatür taraması sonucunda benzer sonuçların (Mendigeri ve Jagadeesh, 2015) tarafından elde edildiği belirlenmiştir. Taş mastik asfalt karışımlarında da stabilite deneyi sonucunda en yüksek stabilite %3S+%1PPA ile modifiyeli karışımlarla elde edilmiştir.

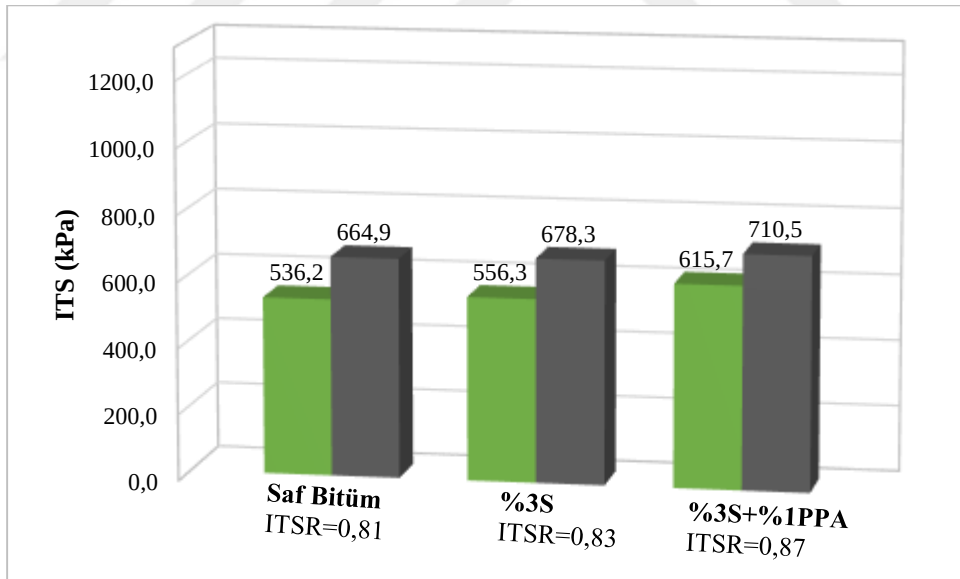
5.4. AASHTO T-283 Modifiye Lotman Deneyi

AASHTO T-283 deneyi sıkıştırılmış bitümlü sıcak karışım numunelerine yapılmakta olup, su doygunluğu ile hızlandırılmış su etkisi altında çekme gerilmesinin hesaplanmasını kapsamaktadır.

Bitümlü sıcak karışımların AAHSTO T-283 Modifiye Lotman test sonuçları Şekil 5.4’de, taş mastik asfalt test sonuçları ise Şekil 5.5’de yer almaktadır. Hazırlanan numunelerin hava boşluğu, yükseklik, doygunluk gibi özellikleri ve deney sonuçları Ek 9’da yer almaktadır.



Şekil 5.4. Bitümlü sıcak karışım AASHTO-T283 test sonucu (Dolaylı Çekme Mukavemet Oranı)



Şekil 5.5. Taş Mastik Asfalt AASHTO-T283 test sonucu (Dolaylı Çekme Mukavemet Oranı)

Test sonuçlarına göre (Şekil 5.4 ve Şekil 5.5) bitümlü sıcak karışım ve taş mastik asfalt karışımlarının dolaylı çekme oranları 0.8 değerinin üstünde olup karışımların suya karşı dirençleri şartnamede belirtilen standarda uygundur. Aşınma tabakası test sonuçlarında katkıların ilave edilmesiyle dolaylı çekme mukavemet değerleri artmıştır.

Dolaylı çekme mukavemetinde en yüksek değerler %3S+%1PPA katkılı karışımlarla elde edilmiştir. Dolaylı çekme mukavemeti oranında (ITSR) ise katkılar oranı çok fazla etkilememiştir. ITSR sonucu birbirine yakın değerler çıkmış olup karışımların sudan kaynaklı bozulma dirençlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

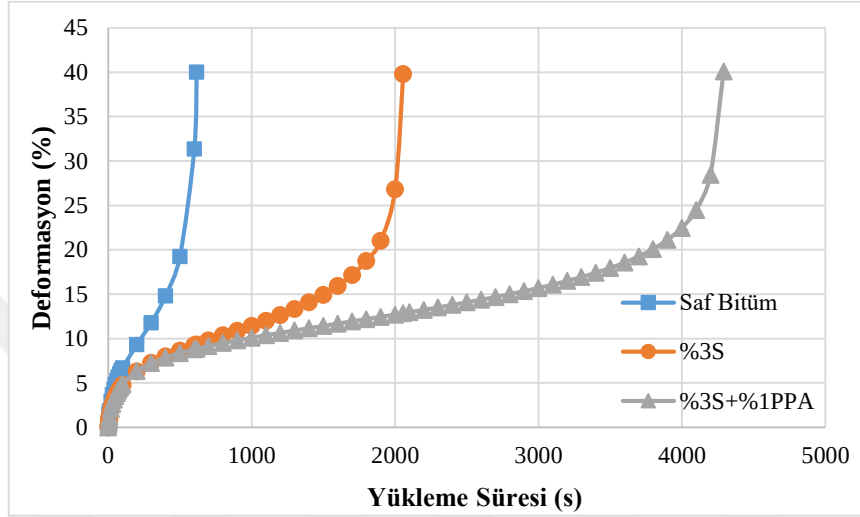
Taş mastik asfalt karışımları üzerinde tamamlanan testlerde karışımlara katkıların ilave edilmesiyle dolaylı çekme mukavemet değerleri artmıştır. Saf bitümlü karışımların ITSR değeri 0,80 değerinin üstünde olmasına rağmen sınır değere yakın çıkmıştır. %3S modifiyeli karışımların dolaylı çekme mukavemet değeri ve ITSR değeri saf bitümlü karışımlara göre daha iyi çıkmış olup, %3S katkısı karışımın sudan kaynaklı bozulma direncini artırmıştır. Literatür taramasında, (Li ve ark., 2015) Sasobit® katkısının BSK ve TMA karışımlarının dolaylı çekme mukavemeti ve dolaylı çekme mukavemet oranını artırdığını belirtmiştir. %3S+%1PPA modifiyeli karışımların dolaylı çekme mukavemet değerleri ve ITSR değerleri saf ve %3S modifiyeli karışımlara göre daha yüksek çıkmış olup, %3S+%1PPA katkısı karışımın sudan kaynaklı deformasyon direncini olumlu olarak etkilemiştir. ITSR oranlarında aşınma tabakası değerlerinin taş mastik asfalt karışımlarına göre daha yüksek çıkmasının kullanılan agregaların gradasyonlarının, fiziksel özelliklerinin, aşınma-kırılmaya karşı dirençlerinin ve su emme yüzdelерinin, tasarımdaki agregalar arası boşluk değeri nin birbirlerinden farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatür taraması sonucunda (Tafti ve ark., 2016) tamamladıkları çalışmada agregaların kaynağının ve kimyasal yapısının farklı olmasının, Modifiye Lottman deney sonucunu etkilediğini belirtmiştir. BSK ve TMA karışımlarının ITS ve ITSR değerlerinin birbirinden farklı çıkmasının, literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

5.5. Üç Eksenli Statik Sünme Deneyi

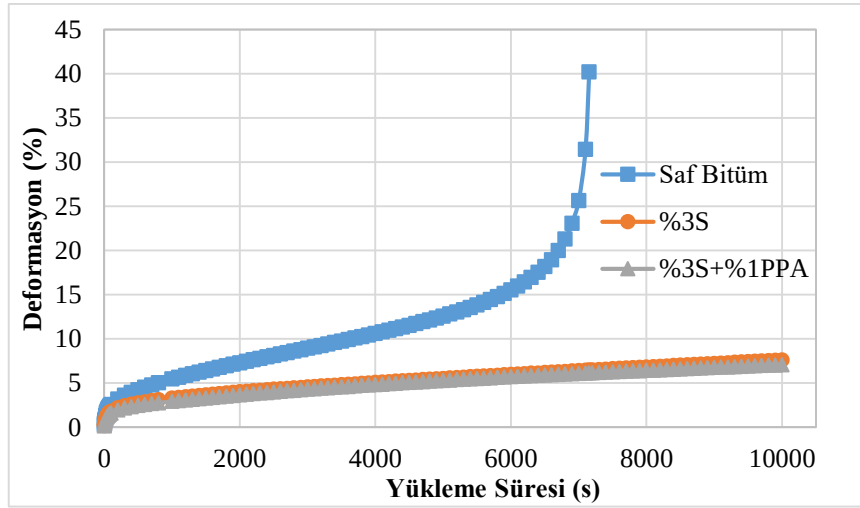
Üç eksenli statik sünme deneyi 40°C sıcaklıkta tamamlanmış olup deney numuneleri bölüm 5.5’de belirtildiği gibi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri ve deneyde uygulanan basınç değerleri Ek 10’da yer almaktadır. Çalışmada eksenel yüke ek olarak çevresel basınç da kullanılmıştır. Çevresel basınç kullanılmasıdaki amaç numunelerin yanal yöndeki deformasyonlarını sınırlandırarak asfalt kaplamanın uygulamada karşılaşacağı yükleme durumuna daha yakın deney yapmaktır. Üç eksenli statik sünme deneyleri kalker ile hazırlanan bitümlü sıcak

karışımlar üzerinde tamamlanırken, cihazın arızalanması ve arızasının giderilememesinden dolayı taş mastik asfalt karışımlar üzerinde tamamlanamamıştır.

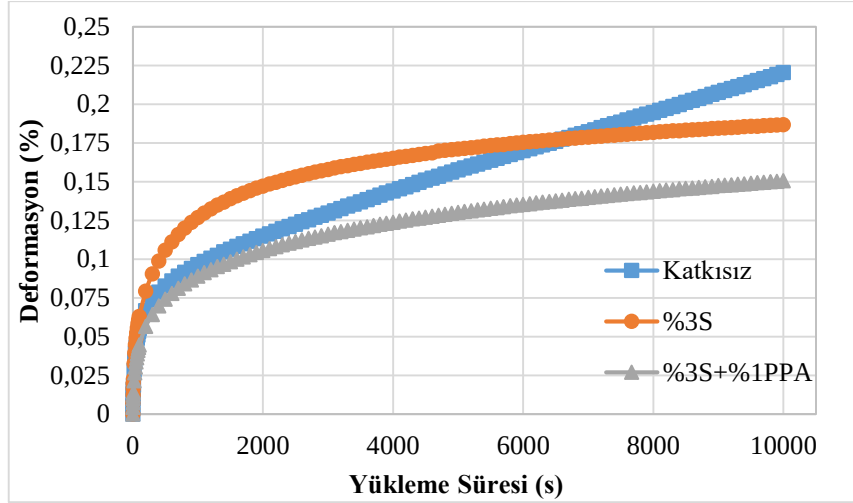
Deneyde uygulanan sabit yüke karşılık düşey deformasyon değerleri lwdt deformasyon ölçerler yardımıyla ölçülmüştür. Basınç kabının dışında, pistonun düşey hareket ettiği iki farklı notada düşey deformasyonlar ölçülüp ortalaması alınmıştır. Zamana bağlı statik sünme deneyinin % deformasyon sonuçları Şekil 5.6 ile Şekil 5.9 arasında verilmiştir.



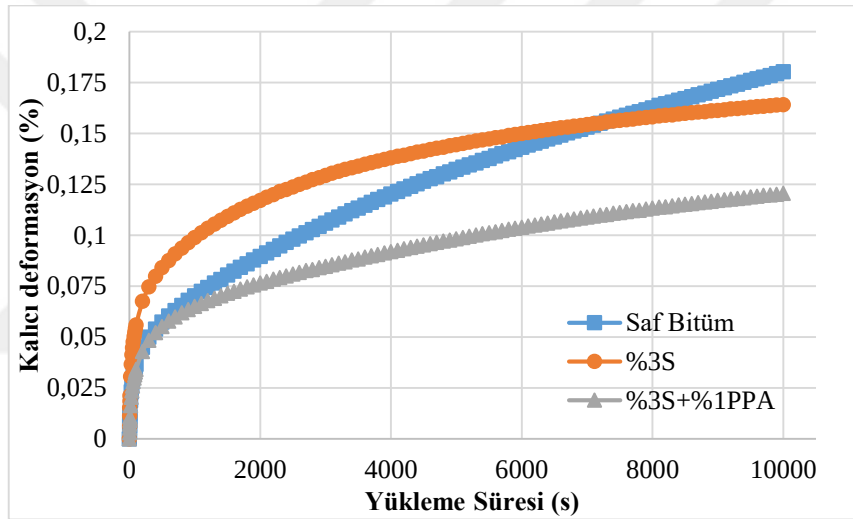
Şekil 5.6. 500 kPa basınç altındaki numunelerin test sonuçları (BSK)



Şekil 5.7. 500/200 kPa basınç altındaki numunelerin test sonuçları (BSK)



Şekil 5.8. 300 kPa basınç altındaki numunelerin test sonuçları (BSK)



Şekil 5.9. 300/100 kPa basınç altındaki numunelerin test sonuçları (BSK)

Üç eksenli statik sünme test sonuçlarına göre en düşük deformasyon oluşumu %3S+%1PPA modifiyeli karışımlarda gözlemlenmiştir. 500 kPa eksenel basınç altında bütün numuneler yüklem süresi tamamlanmadan tamamen deformasyona uğramıştır. 500 kPa eksenel basınca ek olarak 200 kPa çevresel basınç uygulanan test sonucunda ise sadece katkısız numune tamamen deformasyona uğramıştır. 300kPa eksenel basınç altında ise numunelerde daha az kalıcı deformasyonun %3S+%1PPA katkılı karışımlarda olduğu gözlemlenmiştir. 300 kPa ve 300/100 kPa basınç altındaki numuneler akma deformasyonuna uğramadan deney tamamlanmıştır. Çevresel basıncın uygulandığı test sonuçlarının çevresel basınç uygulanmayan numunelere göre daha düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar (Rushing ve Little, 2014) tarafından yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir.

Statik sünme deneyi sonucunda saf bitümle hazırlanan karışımların deformasyon direnci düşük çıkarken, %3S modifiyeli bitümlü karışımların deformasyon direnci saf karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. %3S+%1PPA modifiyeli karışımların deformasyon direnci ise tüm karışımlarda daha yüksek çıkmıştır. Bulunan sonuçlar (Liu ve ark., 2018a) tarafından bitüm üzerine tamamlanan DSR test sonuçlarıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. (Şekil 2.1’de katkıların eklenmesiyle bitümün deformasyon direnci artmaktadır).

5.6. Tekerlek İzi Deneyi

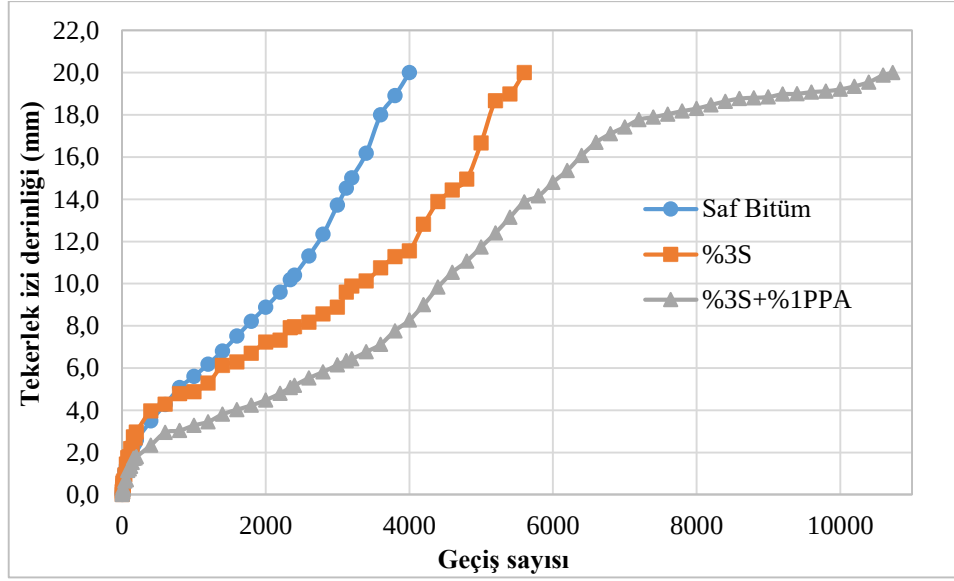
Hamburg tekerlek izi deneyi, 50°C sıcaklıkta tamamlanmıştır. Tekerlek izi deneyi numuneleri bölüm 4.2.6’da belirtildiği gibi hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin fiziksel özellikleri Ek 11’de yer almaktadır. Kalker ile hazırlanan bitümlü sıcak karışımlarının tekerlek izi deney sonuçları Çizelge 5.6’da ve Çizelge 5.7’de, test sonuç grafikleri de Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de yer almaktadır.

Çizelge 5.6. Bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi deney sonuçları (mm)

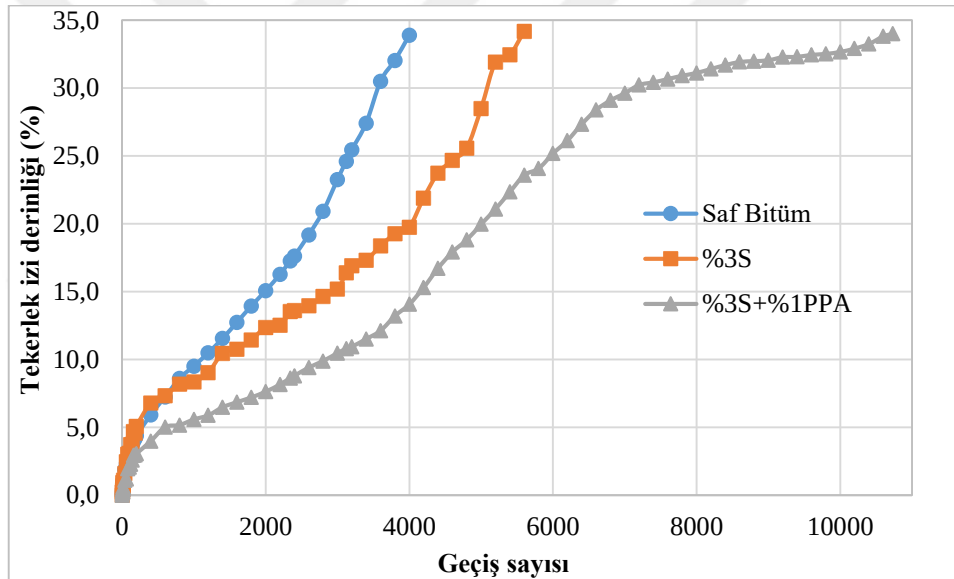
Karışım	Geçiş Sayıları								
	100	200	400	1000	2000	4000	6000	8000	10000
Saf	1,83	2,58	3,49	5,60	8,88	20,00	-	-	-
+%3S	1,79	2,96	3,96	4,88	7,23	11,55	-	-	-
+%3S+%1PPA	1,21	1,79	2,33	3,28	4,48	8,17	14,80	18,29	19,89

Çizelge 5.7. Bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi deney sonuçları (%)

Karışım	Geçiş Sayıları								
	100	200	400	1000	2000	4000	6000	8000	10000
Saf	3,10	4,37	5,92	9,50	15,05	32,25	-	-	-
+%3S	3,09	5,11	6,83	8,41	12,46	22,08	-	-	-
+%3S+%1PPA	2,13	3,14	4,10	5,75	7,86	15,78	25,97	32,10	33,32



Şekil 5.10. Bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi derinliği (mm)



Şekil 5.11. Bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi % deformasyon

Aşınma tabakası tekerlek izi sonuçları incelendiğinde saf ve modifiyeli bitümler ile kalker tipi agrega kullanılarak hazırlanan karışımların tamamı tekerleğin 20000 geçişi tamamlanamadan deformasyona uğramıştır. Saf bitüm ve kalkerle hazırlanan karışımın tekerlek izi deneyinde en düşük tekerlek izi direncine sahip olduğu gözlemlenmiş olup 4000 tekerlek izi geçişi sonunda numune deformasyona uğrayarak deney tamamlanmıştır. Saf bitümün rijitliğinin az olması ve kalkerin Los Angeles aşınma direnci testinde aşınma direncinin düşük olması deformasyonun yüksek olmasını etkilemektedir.

%3S modifiyeli bitümlü karışımlarda da tekerlek izi testi 20000 geçiş tamamlanmadan sonlanmış ve numunelerde 20 mm'lik deformasyon oluşmuştur. Ancak %3S modifiyeli karışım toplam 5600 tekerlek geçiş sayısı sonunda deformasyona uğramış ve tekerlek geçiş sayısı saf bitümlü karışımlara göre %40 daha fazla olmuştur. Tekerleğin toplam geçiş sayısının artmasında, %3S katkısının bitüme eklenmesiyle bitümün daha sert ve sıcaklığa karşı daha dirençli olması etkili olduğu düşünülmektedir.

%3S+%1PPA katkılı karışımlarla hazırlanan numunelerde de ise tekerlek izi testi tekerleğin toplam geçişi tamamlanmadan sonlanmış. Tekerleğin toplam geçiş sayısı 10734 geçiş ile en fazla %3S+%1PPA ile modifiye edilen karışımlarda gözlemlenmiştir. %3S+%1PPA modifiyeli bitümlü karışımlar, %3S modifiyeli karışımlara göre %90 daha fazla tekerlek geçişi sonunda 20mm'lik deformasyona uğramıştır.

Hazırlanan üç karışım içinde aynı agrega ve gradasyon kullanılmasına rağmen tekerlek izi direnci en fazla %3S+1PPA modifiyeli karışımlarla elde edilmiştir. Tekerlek izi direncinin artmasında, %3S+%1PPA modifiyeli bitümün penetrason deneyi sonucuna göre en düşük penetrasyona ve yumuşama noktası deneyine göre en yüksek yumuşama noktasına sahip olması ve karıştırma- sıkıştırma sıcaklığının daha diğer karışımlara göre daha yüksek olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Bulunan sonuçlar, literatür çalışmasıyla uyum göstermektedir. (Rezaeizadeh Herozi ve ark., 2022) çalışmasında Sasobit katkısının tekerlek izi direncini artırdığını belirtmiştir. (Liu ve ark. (2018a) tamamladıkları çalışmada DSR test sonucuna göre modifiyeli bitümler arasında en yüksek tekerlek izi direncine %3S+%1PPA modifiyeli bitüm olduğunu belirtmişlerdir.

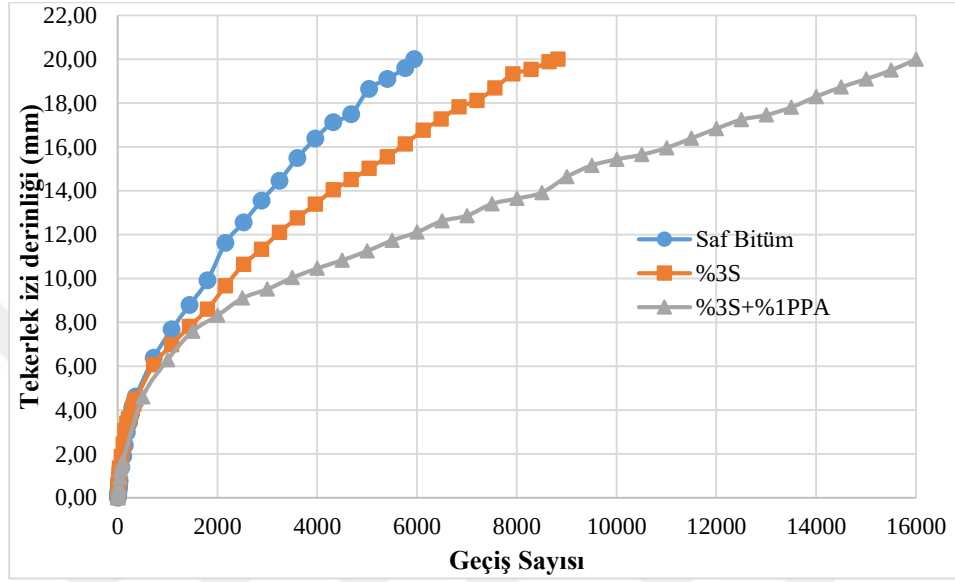
Taş mastik asfalt karışımlarının tekerlek izi deney sonuçları Çizelge 5.8'de ve Çizelge 5.9'da, test sonuç grafikleri de Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de yer almaktadır.

Çizelge 5.8. Taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi deney sonuçları (mm)

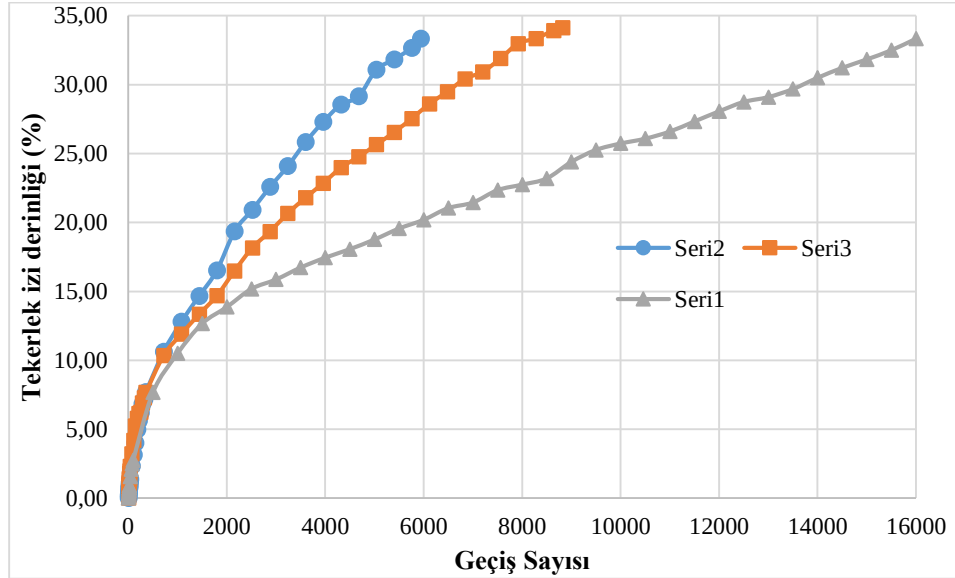
Karışım	Geçiş Sayıları										
	100	200	400	1000	2000	4000	6000	8000	10000	15000	20000
Saf	1,78	3,2	4,81	7,39	10,86	16,47	-	-	-	-	-
+%3S	2,33	3,51	4,67	6,78	9,19	13,46	16,55	19,37	-	-	-
+%3S+%1PPA	1,65	2,39	3,86	6,3	8,32	10,47	12,12	13,65	15,44	19,1	-

Çizelge 5.9. Taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi deney sonuçları (%)

Karışım	Geçiş Sayıları										
	100	200	400	1000	2000	4000	6000	8000	10000	15000	20000
Saf	2,97	5,33	8,02	12,32	18,10	27,45	-	-	-	-	-
+%3S	3,88	5,85	7,78	11,30	15,32	22,43	27,58	32,28	-	-	-
+%3S+%1PPA	2,75	3,98	6,43	10,50	13,87	17,45	20,20	22,75	25,73	31,83	-



Şekil 5.12. Taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi derinliği (mm)



Şekil 5.13. Taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi % deformasyon

Taş mastik asfalt karışımlarının tekerlek izi sonuçları incelendiğinde saf ve modifiyeli bitümler (%3S, %3S+%1PPA) ile bazalt tipi agrega ile hazırlanan karışımların

tamamı tekerleğin 20000 geçişi tamamlanamadan sonlanmıştır. Ancak taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi direnci aşınma tabakası karışımlarına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Taş mastik asfalt karışımlarında kaba agrega oranının fazla olması ve ara boşlukların ince agrega ve bitümle dolması, yapısal olarak tekerlek izi direncini artırmaktadır. Ayrıca karışımda kullanılan bazaltın kalkere göre daha dayanıklı olması taş mastik asfalt test sonuçlarının daha iyi çıkmasında etkili olmuştur.

Taş mastik asfalt karışımları üzerinde tamamlanan tekerlek izi deney sonucuna göre, saf bitüm ve bazaltla hazırlanan karışımın tekerlek izi deneyinde en düşük tekerlek izi direncine sahip olduğu gözlemlenmiş olup 5940 tekerlek izi geçişi sonunda numune deformasyona uğrayarak deney tamamlanmıştır.

%3S modifiyeli bitümlü karışımlarda da tekerlek izi testi 20000 geçişi tamamlanmadan sonlanmış ve numunelerde 20 mm'lik deformasyon oluşmuştur. Ancak %3S modifiyeli karışım toplam 8820 tekerlek geçişi sayısı sonunda deformasyona uğramış ve tekerlek geçişi sayısı saf bitümlü karışımlara göre yaklaşık %50 daha fazla olmuştur. Bulunan sonuçların (Rezvan ve Hassan, 2017) tarafında yapılan çalışma ile uyumlu olduğu yapılan literatür taramasında belirlenmiştir.

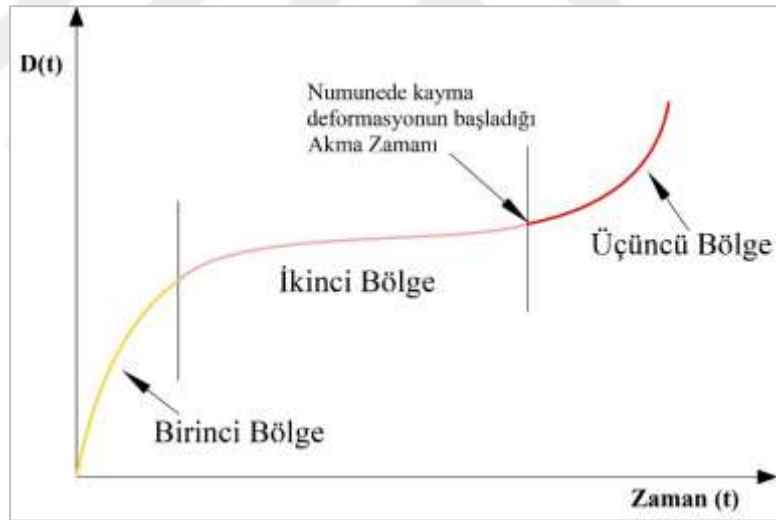
%3S+%1PPA modifiyeli karışımlarla hazırlanan numunelerde ise tekerlek izi testi tekerleğin toplam geçişi tamamlanmadan sonlanmıştır. Tekerleğin toplam geçişi sayısı 16000 geçişi ile en fazla %3S+%1PPA ile modifiye edilen karışımlarda gözlemlenmiştir. %3S modifiyeli karışımlara göre %80 daha fazla tekerlek izi geçişi sonunda karışım deformasyona uğramıştır.

Tamamlanan tüm tekerlek izi test sonuçlarına göre tekerlek izi direnci en fazla %3S+1PPA modifiyeli taş mastik asfalt karışımlarıyla elde edilmiştir. Taş mastik asfalt karışımlarında kullanılan kaba agrega oranını fazla olması, karışımda kullanılan agreganın aşıma ve kırılmaya karşı daha dayanıklı olması, karışımın yapısı, karışımın tekerlek izi direncini artırmıştır. Tekerlek izi direncinin artmasında, %3S+%1PPA modifiyeli bitümün penetrasyon deneyi sonucuna göre en düşük penetrasyona ve yumuşama noktası deneyine göre en yüksek yumuşama noktasına sahip olması ve karıştırma- sıkıştırma sıcaklığının daha diğer karışımlara göre daha yüksek olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca deneyin su içinde tamamlanmasından dolayı numunelerde su hasarı da deformasyonunu etkilemektedir. Taş mastik asfalt karışımların uygulanan AASHTO T-283 deney sonucundan elde edilen bulgularda modifiyeli bitümlerin sudan kaynaklı deformasyon direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Tekerlek izi deneyinden elde edilen sonuçların AASHTO T-283 deney sonucuyla uyum gösterdiği

gözlemlenmiştir. Bulunan sonuçlar, literatür çalışmasıyla da uyum göstermektedir. Liu ve ark. (2018a) tamamladıkları çalışmada DSR test sonucuna göre modifiyeli bitümler arasında en yüksek tekerlek izi direncine %3S+%1PPA modifiyeli bitüm olduğunu belirtmişlerdir.

5.7. Kalıcı Deformasyon Test Sonuçları İçin Model Uyumu

Statik basınç uygulanan sünme testinde, karışım için toplam gerilme-zaman ilişkisi, çevresel basınç uygulanmış ya da uygulanmamış olmak üzere laboratuvar ortamda gerçekleştirilebilmektedir. Statik sünme testinde yük, tek döngüde yükleme-boşaltma ya da artan yükleme boşaltma döngüsü ile numunelere uygulanabilmektedir. Deney, yük uygulanan malzemenin zamana bağlı viskoelastik ve viskoplastik bileşenlerinin yanı sıra, zamandan bağımsız başlangıç elastik ve plastik bileşenleri hakkında yeterli bilgi sağlayabilmektedir. Şekil 5.14’de deney sonucunda elde edilen genel model uyumu ve yükleme zamanı arasındaki ilişki yer almaktadır.



Şekil 5.14. Kalıcı deformasyon bölgeleri

Şekil 5.14 incelendiğinde deney sonucu üç farklı bölge olarak incelenebilmektedir.

- Birinci bölgede zamana bağlı yükleme altında deformasyon hızı azalmakta,
- İkinci bölgede zamana bağlı yükleme altında deformasyon hızı sabit kalmakta
- Üçüncü bölgede ise zamana bağlı yükleme altında deformasyon hızı artmaktadır.

Üçüncü bölgenin başladığı zaman akma zamanı olarak tanımlanmaktadır. Akma zamanı bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi direncini değerlendirmek için önemli bir parametredir.

Sünme modeli ile ilgili literatürde çeşitli modeller bulunmasına rağmen birinci ve ikinci bölgenin uyumu için genel olarak kullanılan model power law modelidir (Witczak ve ark., 2002).

Power law modeline göre sünme eğrisinin ikinci bölgesinin tanımında;

$$D' = D(t) - D_0 = a \cdot t^m \quad (5.2)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Burada;

D' : herhangi bir zamandaki viskoelasik uyum

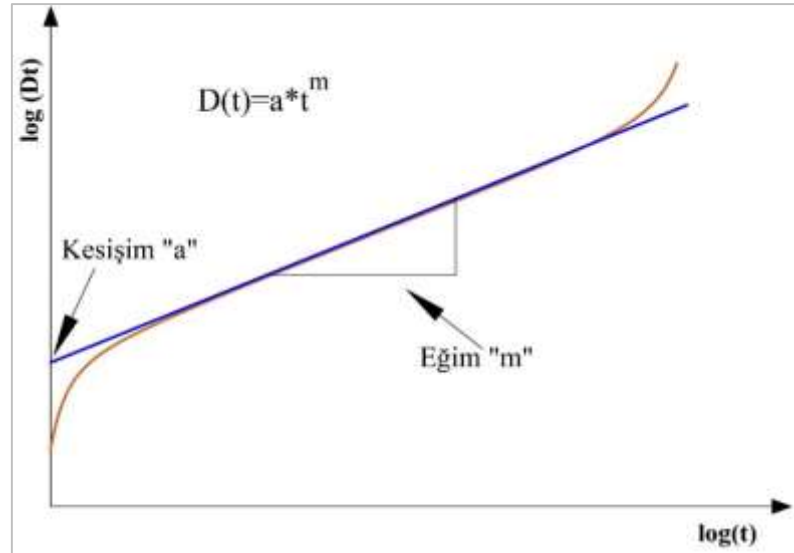
$D(t)$: zamana bağlı toplam uyum

D_0 : eğrideki ani uyum

T : yükleme zamanı

a ve m katsayıları : malzemenin regresyon parametreleridir

Power law modelinde Şekil 5.15’de yer alan a ve m değerleri malzemenin model eğrisine uyum parametreleridir. Bu parametreler malzemenin kalıcı deformasyon davranışlarının genel göstergesidir. Genel olarak daha yüksek “ a ” değeri, model eğrisine daha yüksek uyumu göstermektedir. Sabit “ a ” değeri için model eğrisinin eğim parametresi olan “ m ” değerinin artması daha yüksek kalıcı deformasyon anlamına gelmektedir (Witczak ve ark., 2002).



Şekil 5.15. Kalıcı deformasyon model uyumunda a ve m değerlerinin elde edilmesi

Ancak power law modeli, kalıcı deformasyon test sonuçlarının model uyumunda yetersiz kalabilmektedir. Özellikle 3. bölgeye geçen test sonuçlarının model uyumu için

daha iyi matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır. Francken modeli Şekil 5.16’da görüldüğü üzere ekxponansiyel model ve power law modelinin kombinasyonudur. Power law modeli kalıcı deformasyon test sonucunun birinci ve ikinci bölgesinin uyumunu oluştururken, ekxponansiyel model, üçüncü bölgenin model uyumunu oluşturmaktadır. 4 parametre kullanılarak deneysel veriler modellenmektedir. Francken modeli;

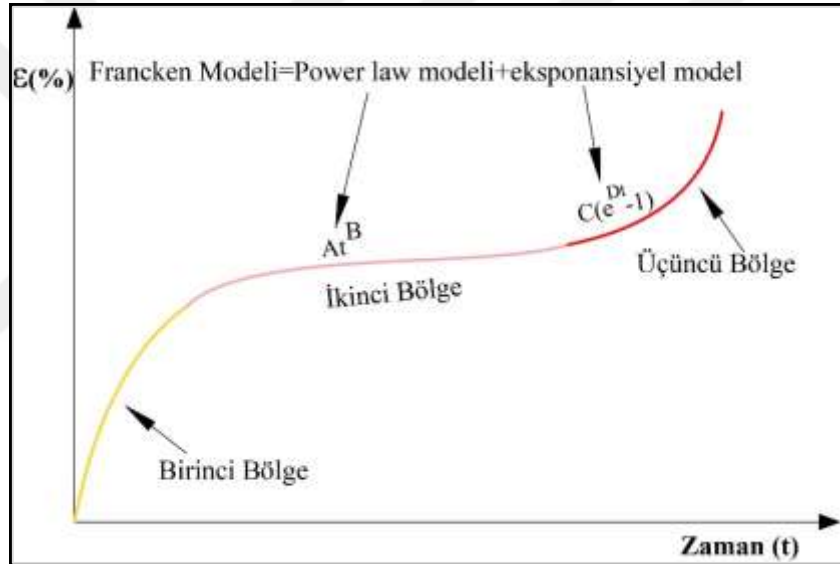
$$\varepsilon_p = At^B + C(e^{Dt} - 1) \quad (5.3)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada;

ε_p : eksenel deformasyon

t : zaman (s)

A, B, C, D ise regresyon katsayılarıdır (Rushing ve Little, 2014).



Şekil 5.16. Francken model uyumu

Modelde A,B,C,D, regresyon katsayıları nonlineer regresyon ile bulunabilmektedir. Katsayılar, test verilerindeki yükleme zamanına bağlı olarak farklı test sonuçlarında farklı değerler alabilmektedir. Modeldeki C sabiti plastik deformasyonun olması durumunda hesaplanabilirken, plastik deformasyon oluşmadığı durumlarda hesaplanamamaktadır. Test sonuçlarının her üç bölgede de olduğu durumda Francken modeli test verilerinin model uyumu için iyi sonuç verebilmektedir (Bilgiri ve ark., 2007).

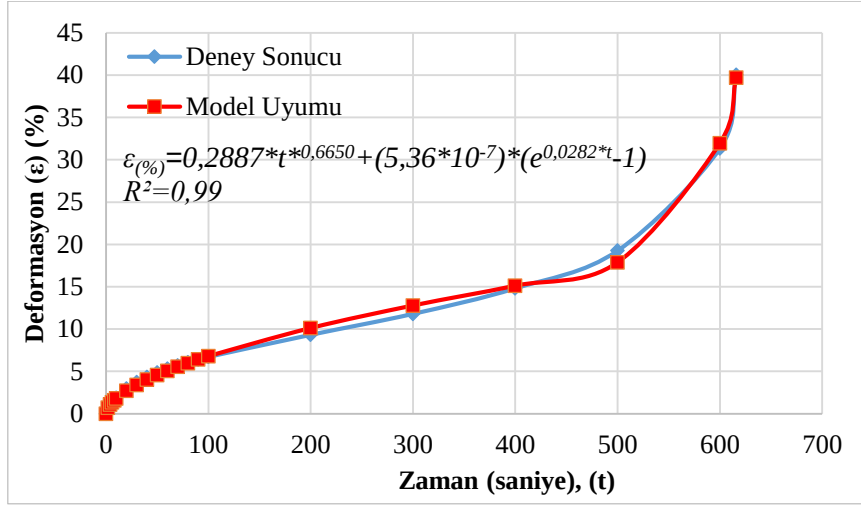
5.7.1. Sünme test sonuçlarının Francken modeline göre modellenmesi

Sünme test sonuçlarının % deformasyon değerleri $\varepsilon_0 = At^B + C(e^{Dt} - 1)$ Francken modeline göre modellenmiştir. Modele ilişkin A,B,C,D, katsayıları nonlinear olarak hesaplanmıştır. Modelin C ve D katsayıları eksponansiyel değerler olup test sonuçlarının 3. bölgeye geçtiği ve tamamen deformasyona uğradığı deneyler sonrasında belirlenebilmiştir. A ve B katsayıları ise Power Law model parametreleridir ve tüm deney sonuçlarında hesaplanabilmiştir. Katsayılar Excel programıyla hesaplanmıştır ve model parametrelerinin hesaplanmasına ilişkin örnek hesaplama Ek 12’de yer almaktadır. Ayrıca üç eksenli statik sünme test sonuçlarının Francken model parametrelerinin belirlenmesi Ek 12’de yer almaktadır. Modelde hesaplanan parametreler Çizelge 5.10’da yer almaktadır.

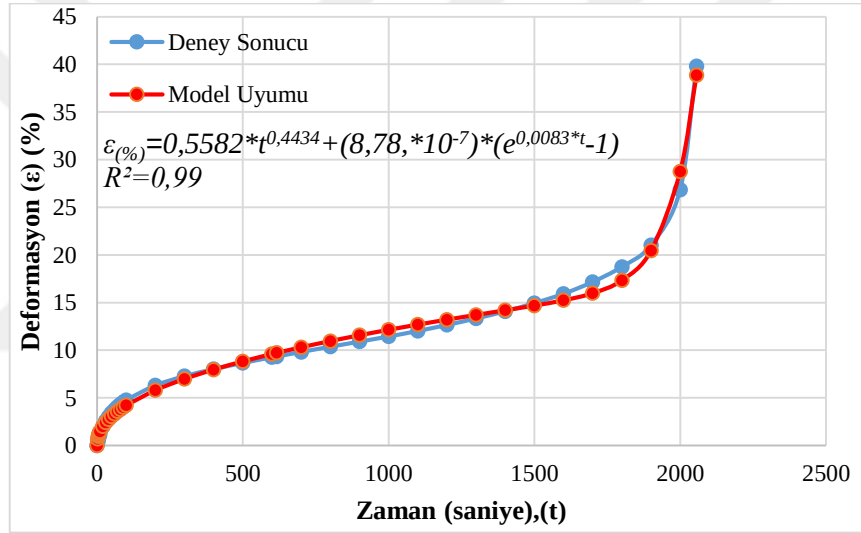
Çizelge 5.10. Üç eksenli statik sünme deneyi Francken model parametreleri

Uygulanan Basınç	Karışım	A	B	C	D
500 kPa	Saf	0,2887	0,665	$5,36 \times 10^{-7}$	0,0282
	%3 S	0,5582	0,4434	$8,78 \times 10^{-7}$	0,0083
	%3S+%1PPA	0,7743	0,3743	$9,42 \times 10^{-8}$	0,0045
500/200 kPa	Saf	0,0337	0,6949	$5,32 \times 10^{-8}$	0,0028
	%3 S	0,2664	0,3595	-	-
	%3S+%1PPA	0,2201	0,3747	-	-
300 kPa	Saf	0,0077	0,3575	-	-
	%3 S	0,0250	0,2233	-	-
	%3S+%1PPA	0,0139	0,2612	-	-
300/100 kPa	Saf	0,0041	0,4095	-	-
	%3 S	0,0180	0,2431	-	-
	%3S+%1PPA	0,0084	0,2886	-	-

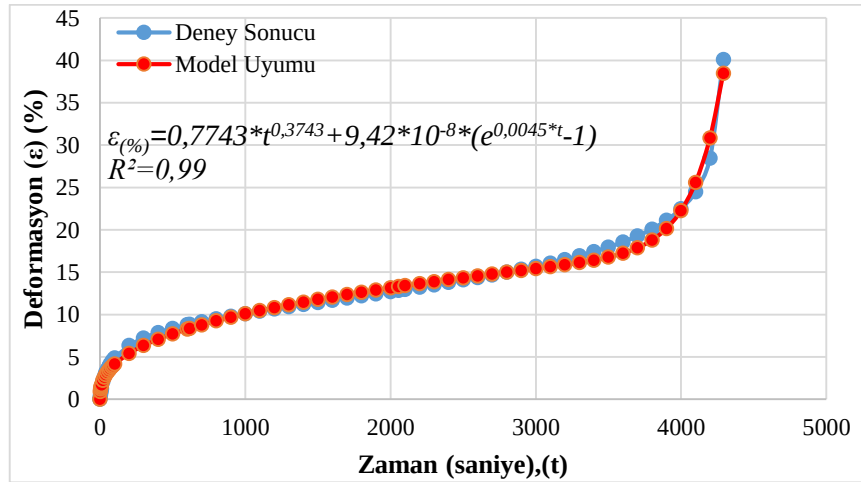
Çizelge 5.10 incelendiğinde 500 kPa basınç altındaki bütün deney numunelerinin ve 500/200 kPa basınç altındaki katkısız deney numunesi tamamen deformasyona uğradığı için C ve D parametreleri belirlenebilmiştir. Diğer test sonuçlarında ise sadece A ve B parametreleri belirlenmiştir. Deney sonuçları ve modelden elde edilen sonuçlara ilişkin grafikler Şekil 5.17-Şekil 5.28 arasında yer almaktadır.



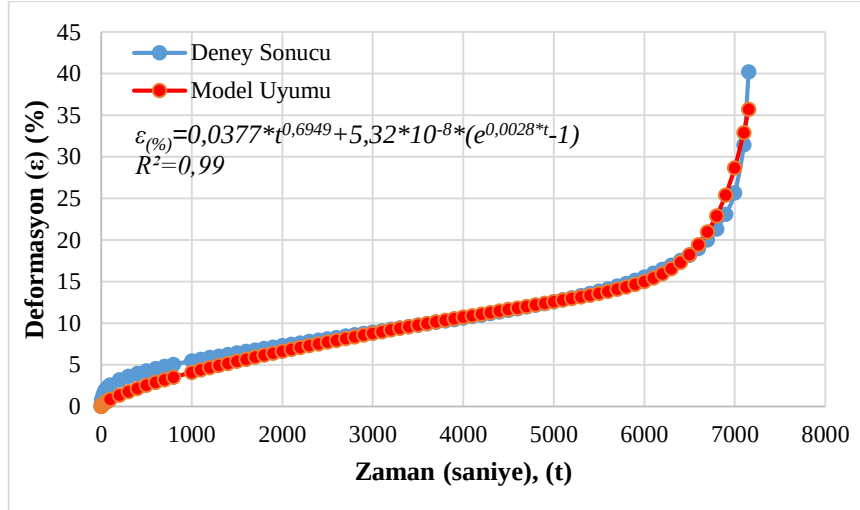
Şekil 5.17. Şekil 500 kPa basınç altındaki saf bitümlü numunelerin Francken model uyumu



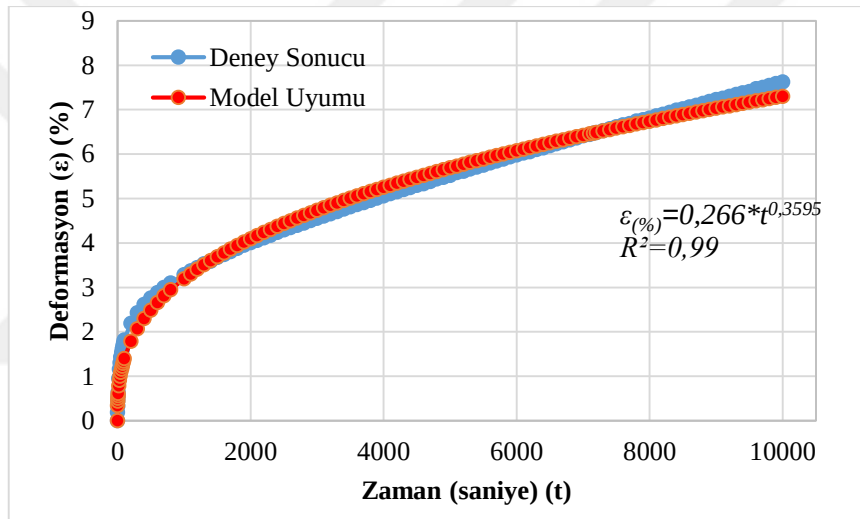
Şekil 5.18. Şekil 500 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model uyumu



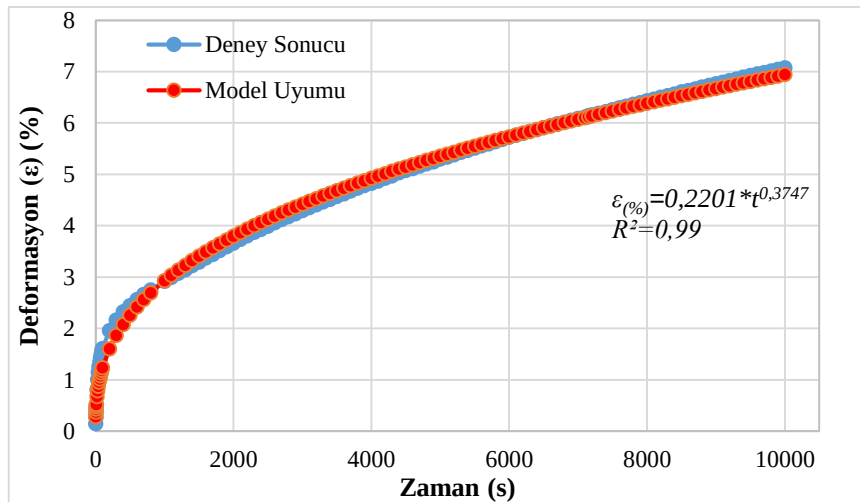
Şekil 5.19. 500 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model uyumu



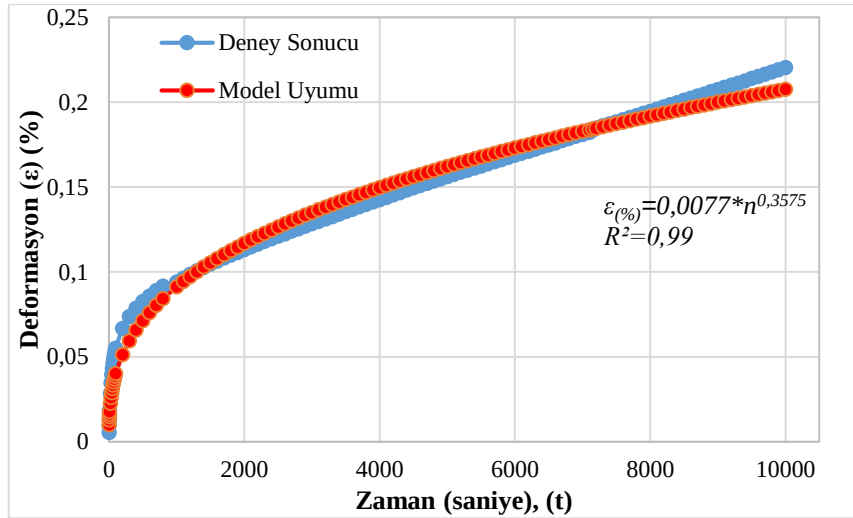
Şekil 5.20. 500/200 kPa basınç altındaki saf bitümlü numunelerin Francken model uyumu



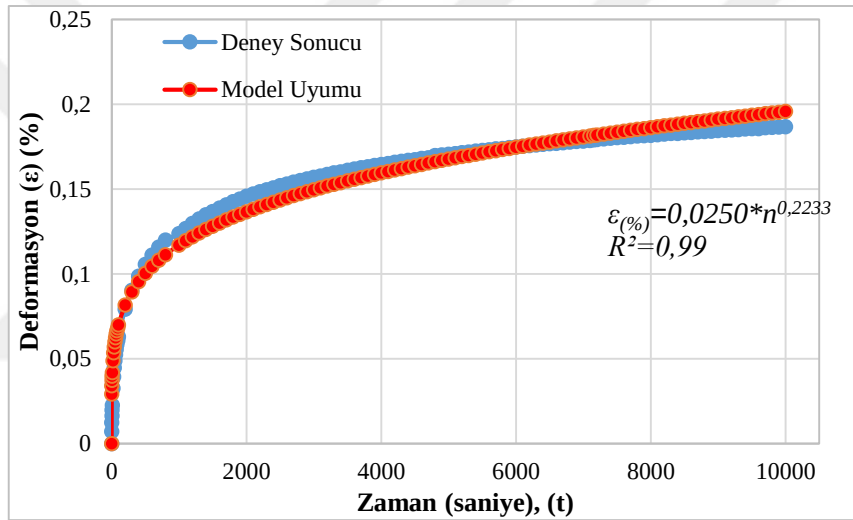
Şekil 5.21. 500/200 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model uyumu



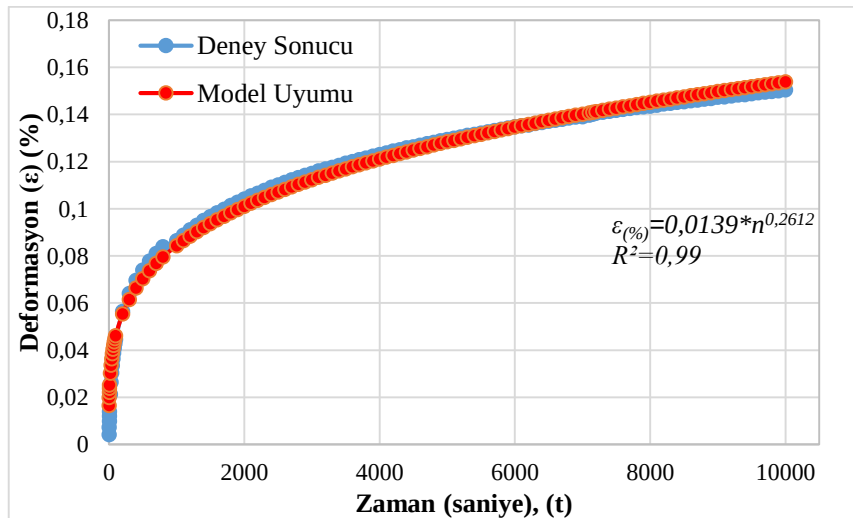
Şekil 5.22. 500/200 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model uyumu



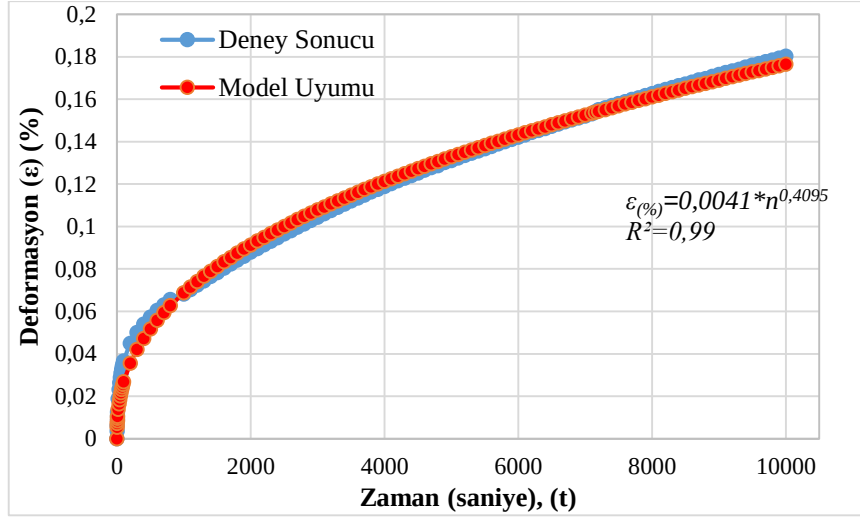
Şekil 5.23. 300 kPa basınç altındaki saf bitümlü numunelerin Francken model uyumu



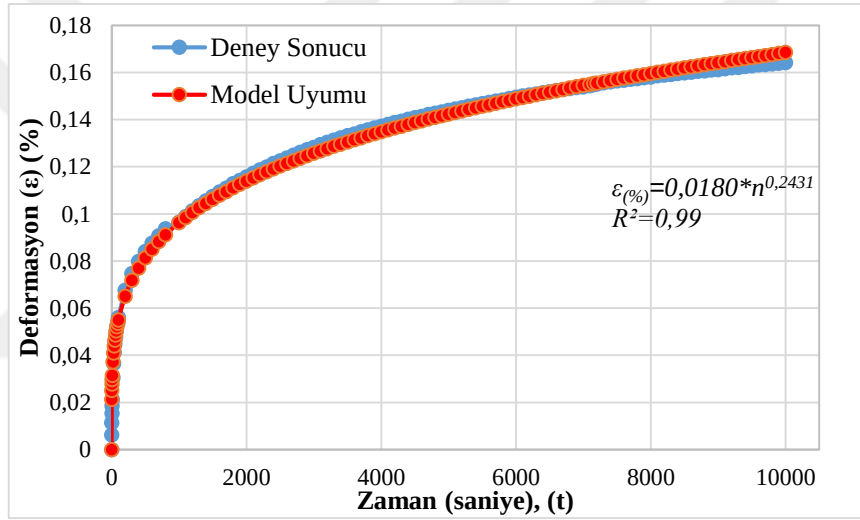
Şekil 5.24. 300 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model uyumu



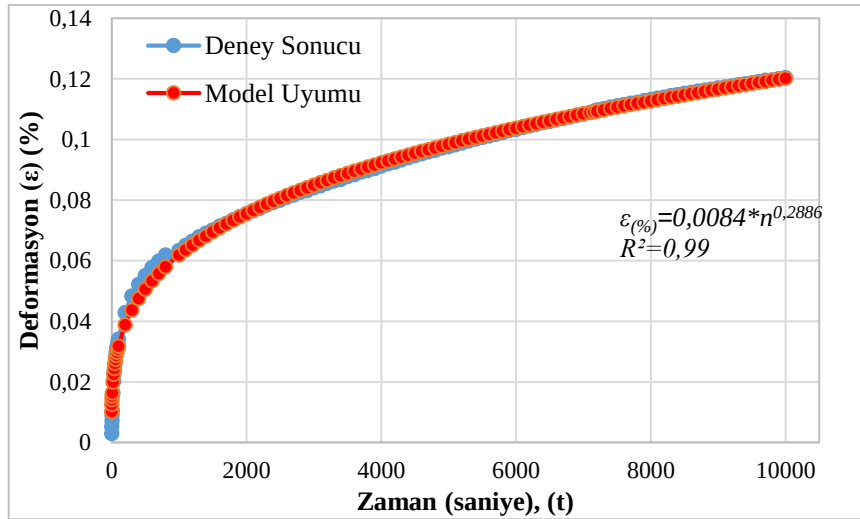
Şekil 5.25. 300 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model uyumu



Şekil 5.26. 300/100 kPa basınç altındaki saf bitümlü numunelerin Francken model uyumu



Şekil 5.27. 300/100 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model uyumu



Şekil 5.28. 300/100 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model uyumu

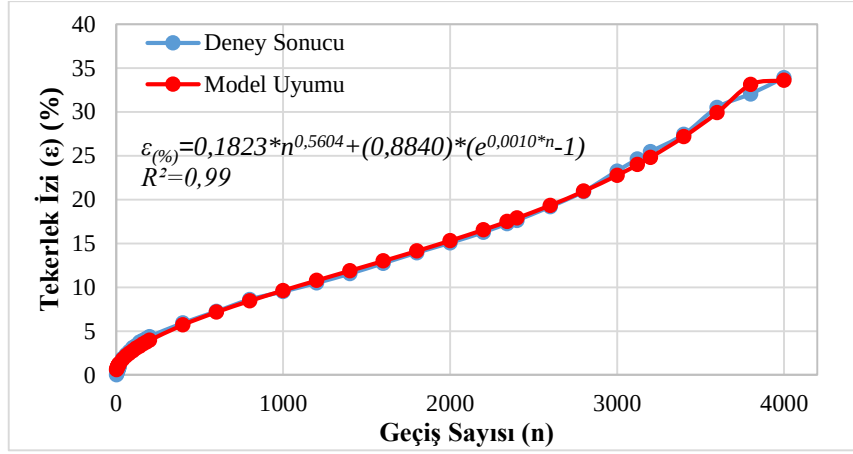
Şekil 5.17-Şekil 5.28 arasındaki grafikler incelendiğinde Şekil 5.17-Şekil 5.20 grafiklerinde deney sonucu 3. bölgeye geçmiş ve numuneler tamamen deformasyona uğrayarak bozulmuştur. Şekil 5.21-Şekil 5.28 arasındaki grafiklerde ise numuneler 3.bölgeye geçmeden (bozulma olmadan) deformasyona uğramıştır. Her iki durumda da Francken modeli ile deney sonuçları modellenebilmiş ve model parametreleri deneyi iyi şekilde modelleyebilmiştir. Literatür taraması sonucunda (Biligiri ve ark., 2007) Francken modelinin deformasyonun üç bölgesini de iyi şekilde modelleyebildiğini belirtmişlerdir.

5.7.2. Tekerlek izi test sonuçlarının Francken modeline göre modellenmesi

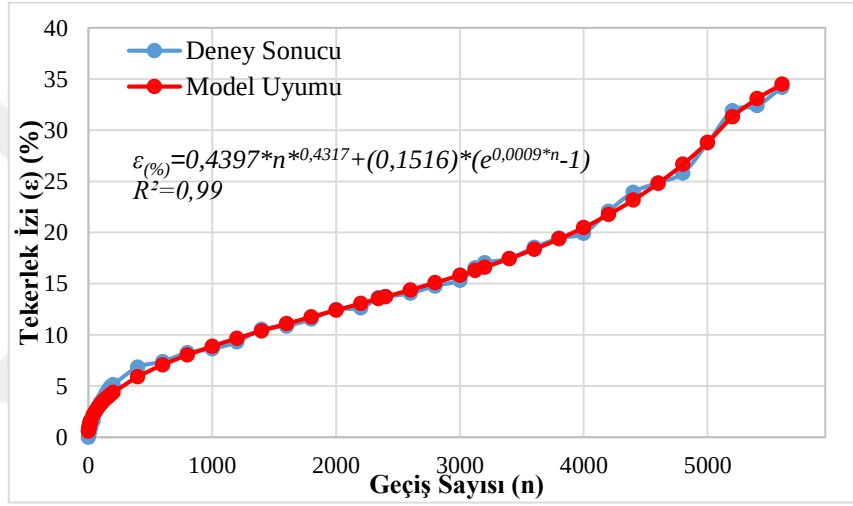
Bitümlü sıcak karışımların ve taş mastik asfalt karışımların tekerlek izi deney sonuçları Francken modeline göre modellenerek model parametreleri belirlenmiş ve belirlenen parametreler Çizelge 5.11 de verilmiştir. Çizelge 5.11 incelendiğinde C ve D parametreleri bitümlü sıcak karışımlarda elde edilirken, taş mastik asfalt karışımlarda belirlenememiştir. Bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi deney sonuçları 3. Bölgeye (akma bölgesi) geçerken taş mastik asfalt karışımlarının tekerlek izi deney sonuçları 3. Bölgeye geçmeden deney tamamlanmıştır. Tekerlek izi deney sonuçları ve modelden elde edilen sonuçlara ilişkin grafikler Şekil 5.29-Şekil 5.34 arasında yer almaktadır.

Çizelge 5.11. Tekerlek izi deneyi Francken model parametreleri

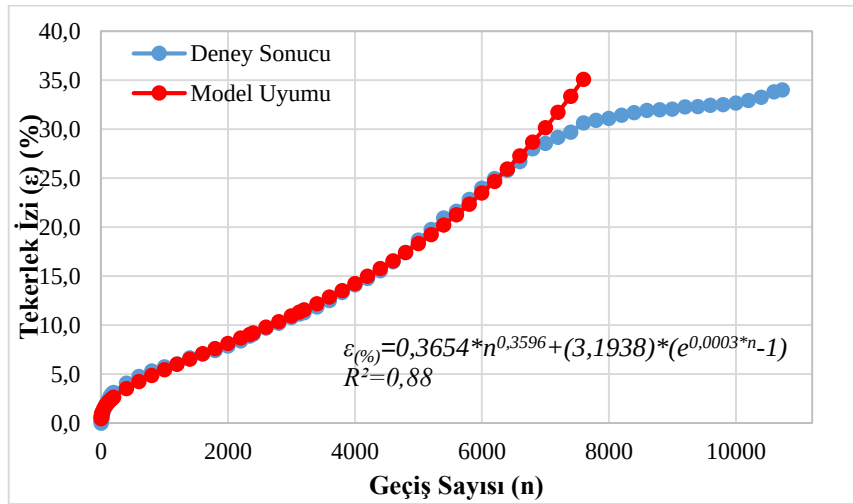
Karışım	A	B	C	D
BSK-Katkısız	0,1823	0,5604	0,8840	0,0010
BSK-%3S	0,4397	0,4317	0,1516	0,0009
BSK-%3S+%1PPA	0,3654	0,3596	3,1938	0,0003
TMA-Katkısız	0,2556	0,5619	-	-
TMA-%3S	0,3836	0,4941	-	-
TMA-%3S+%1PPA	0,4127	0,4500	-	-



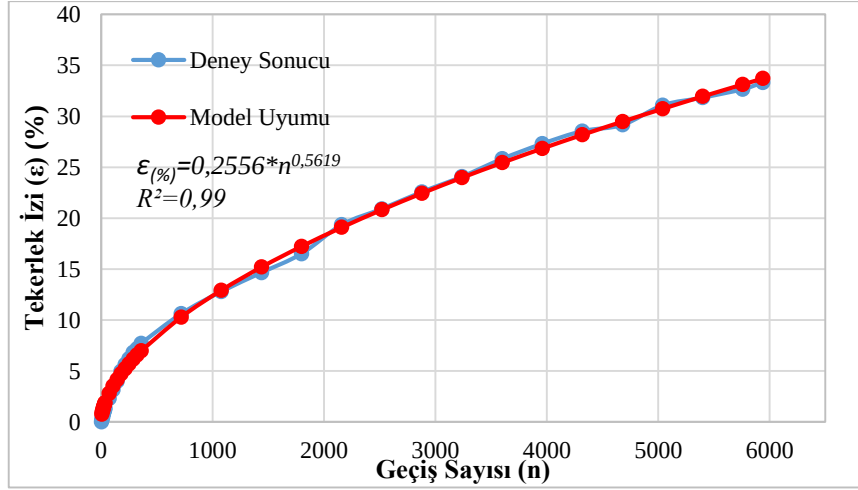
Şekil 5.29. Saf BSK numunelerin tekerlek izi test sonucunun Francken modeli uyumu



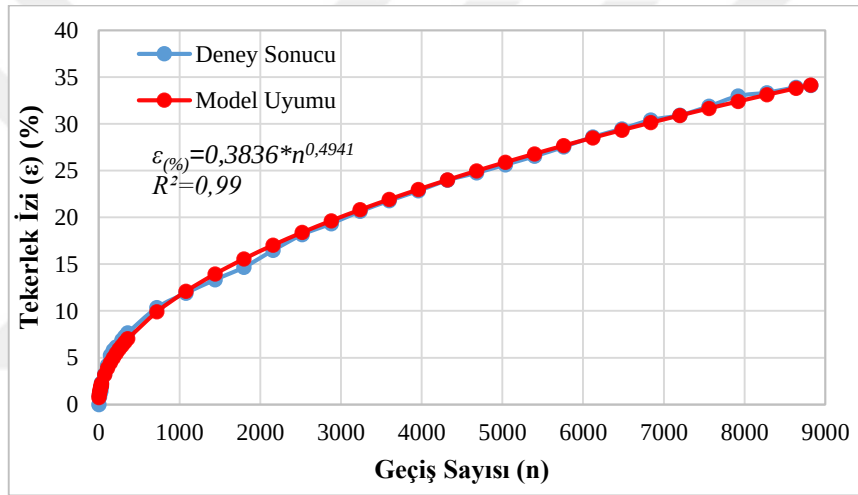
Şekil 5.30. %3S modifiyeli BSK numunelerin tekerlek izi test sonucunun Francken modeli uyumu



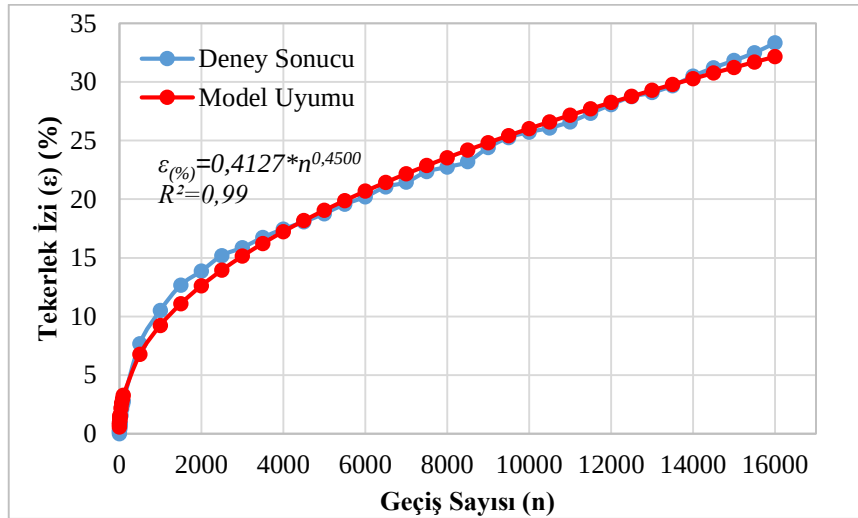
Şekil 5.31. %3S+%1PPA modifiyeli BSK numunelerin tekerlek izi test sonucunun Francken modeli uyumu



Şekil 5.32. Saf TMA numunelerin tekerlek izi test sonucunun Francken modeli uyumu



Şekil 5.33. %3S modifiyeli TMA numunelerin tekerlek izi test sonucunun Francken modeli uyumu

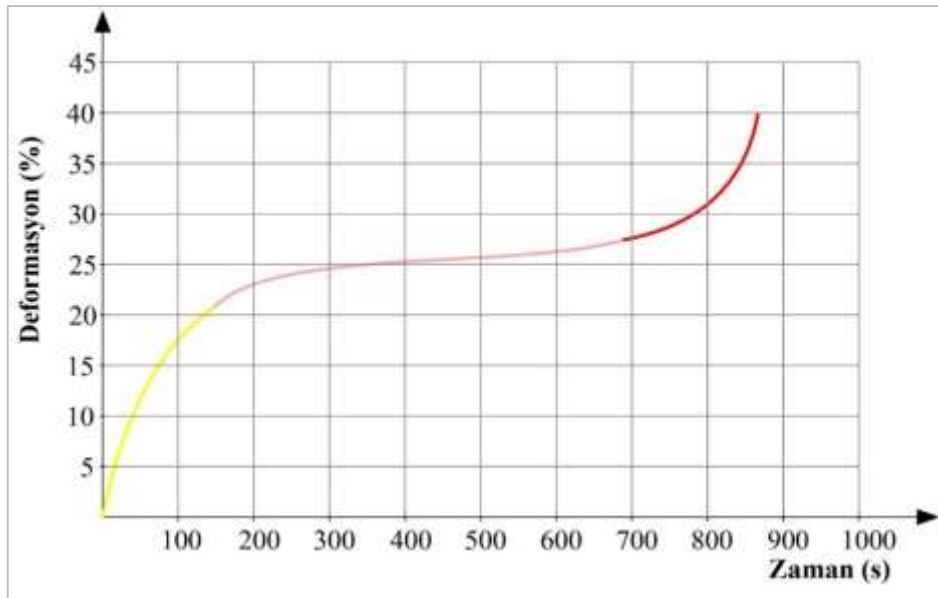


Şekil 5.34. %3S+%1PPA modifiyeli BSK numunelerin tekerlek izi test sonucunun Francken modeli uyumu

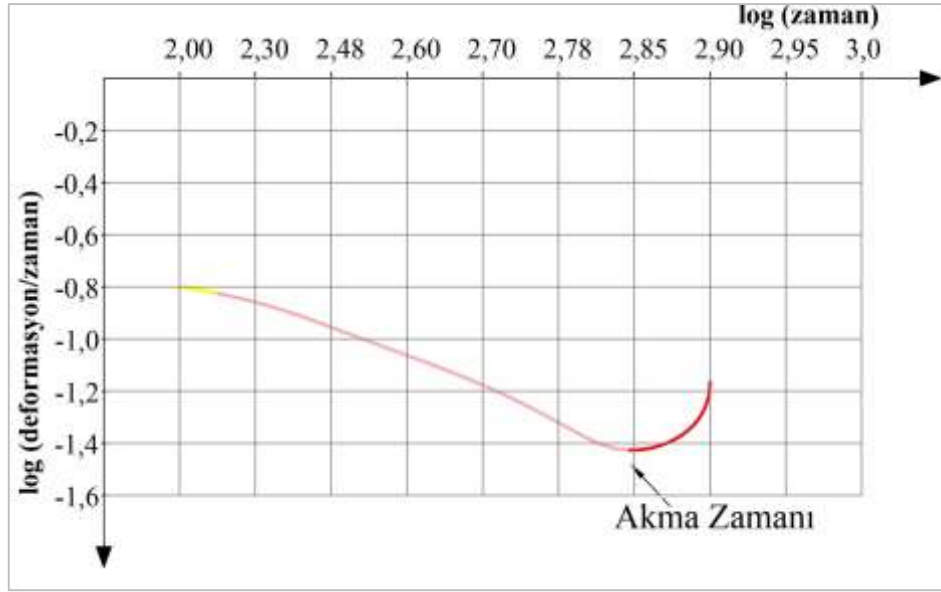
Şekil 5.29-5.34 incelendiğinde saf bitümlü karışımların ve %3S modifiyeli karışımların tekerlek izi deney sonuçları Francken modeli ile iyi uyum göstermiştir. Ancak %3SS+%1PPA modifiyeli karışımların tekerlek izi deneyi sonucunda tekerleğin geçiş sayısının artmasına bağlı olarak deformasyon artarak devam etmesine rağmen 6800. geçişten sonra yatayda hareket etmeye başlayıp 20 mm’lik deformasyona uğramış ve deney sonlanmıştır. Modelleme tekerlek izi testinin 6800. geçişine kadar uyum gösterirken daha sonra uyum bozulmuştur. Tekerlek izi testi sonucuna göre 6800. geçişten sonra deformasyon hızı azalmaya başlamıştır. Francken modeli %3S+%1PPA katkılı aşınma tabakası karışımının tekerlek izi deney sonucunu modellemede yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

5.7.3. Akma noktasının belirlenmesi

Şekil 5.35 ve Şekil 5.36’da gerçek statik sünme test sonuçları ve sonuçlarının genel sonuç grafiği görülmektedir. Şekil 5.35’de eğrinin zamana bağlı değişimi görülmekte ve bu eğrinin lineer kısmı olan ikincil bölgeden (yaklaşık 100. saniyeden sonrası) “a” ve “m” katsayıları belirlenebilmektedir. Şekil 5.36’da ise yüklemenin zamana bağlı logaritmik değişimi görülmektedir. Eğrinin minimum noktasına karşılık gelen noktası deneydeki numunenin akma zamanı olarak belirlenmektedir (Witczak ve ark, 2002).

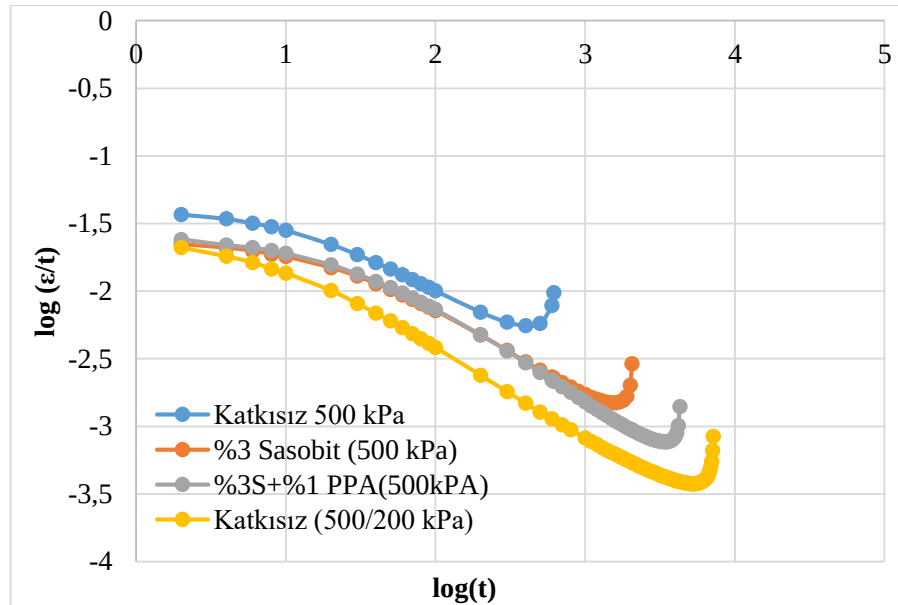


Şekil 5.35. Statik sünme test sonuç grafik örneği



Şekil 5.36. Statik yükleme deneyinden akma noktasının (3.bölgeye geçiş) elde edilmesi

Çalışmada statik sünme deney sonuçlarından 500 kPa basınç deneyinin uygulandığı tüm numuneler ile 500/200 kPa basınç altında sadece saf bitümlü karışımla hazırlanan numuneler, test süresince akma sınırını aşmış, tamamen deformasyona uğramışlardır (üçüncü bölgeye geçen numuneler). Şekil 5.37’de akma zamanını belirlemek için numunelerin üç eksenli deney sonucundan elde edilen deformasyon $\epsilon(\%)$ - zaman (t) değerlerinden $\log(\epsilon/t)$ ’ye karşılık $\log(t)$ grafiği çizilmiştir. Çizilen grafikte her eğrideki minimum nokta belirlenerek akma noktası değeri belirlenmiştir. Üç eksenli statik sünme testinden belirlenen akma noktası değerleri Çizelge 5.12’de yer almaktadır.



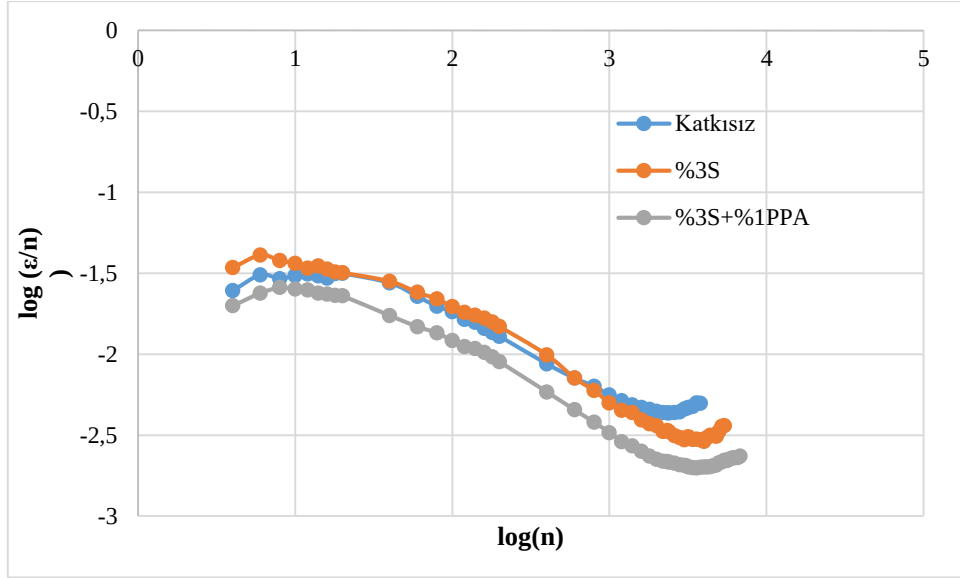
Şekil 5.37. Üç eksenli statik sünme deneyi akma noktasının belirlenmesi (3. Bölgeye geçiş zamanı)

Çizelge 5.12. Üç eksenli statik sünme deneyi akma noktası geçiş sayıları

Numune	Eksenel basınç	Çevresel basınç	Akma noktasının başladığı zaman zamanı (saniye) (t)	Deneyin sonlandığı süre (saniye) (t)
Saf bitüm	500kPa	-	400	616
%3S	500 kPa	-	1500	2056
%3S+%1PPA	500 kPa	-	3600	4292
Saf bitüm	500 kPa	200 kPa	5500	7154

Akma noktası test altındaki numunelerin kalıcı deformasyona uğramaya başladığı noktadır. Akma noktası geçildikten sonra deformasyon-zaman eğrisi üçüncü bölgeye geçmeye başlamakta ve yük altındaki numunede bozulma gerçekleşmektedir. Çizelge 5.12 incelendiğinde aynı yükleme şartlarında, katkıların ilave edilmesiyle akma noktasının oluştuğu süre artmıştır. %3S ile modifiye edilen numunelerin akma noktası saf bitümle hazırlanan numunelerin akma noktasından daha büyük çıkmıştır. Katkılar akma noktasını artırarak deformasyon direncine olumlu katkı sağlamıştır. Benzer bulgular yapılan literatür taraması sonucunda (Liu ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir.

Bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi test sonuçlarının akma noktalarını belirlemek için numunelerin deformasyon $\epsilon(\%)$ – geçiş sayısı (n) değerlerinden $\log(\epsilon/n)$ değerine karşılık $\log(n)$ değerinin grafiği çizilmiştir. Şekil 5.38’de yer alan grafikteki en düşük değere karşılık gelen geçiş sayısı akma noktası olarak belirlenmiştir. Taş mastik asfalt karışımlarının tekerlek izi deney sonuçları incelenmiş, numuneler akma deformasyonuna uğramadığı için akma noktası hesaplanamamıştır. Bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi testinden belirlenen akma noktası değerleri Çizelge 5.13’de yer almaktadır.



Şekil 5.38. Üç eksenli statik sünme deneyi akma noktasının belirlenmesi (3. Bölgeye geçiş zamanı)

Çizelge 5.13. Tekerlek izi testinin akma noktasının oluştuğu geçiş sayıları

Numune	Akma Noktasının Başladığı	Toplam Tekerlek İzi Geçiş
	Geçiş Sayısı (n)	Sayısı
Saf bitüm	2400	4000
%3S	3400	5600
%3S+%1PPA	3600	10734

Çizelge 5.13 incelendiğinde akmanın oluştuğu geçiş sayısı katkıların ilave edilmesiyle artmıştır. Benzer sonuçlar üç eksenli statik sünme testinden de elde edilmiştir. Katkılar akmanın oluştuğu geçiş sayısını artırarak deformasyon direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Benzer bulgular (Liu ve ark., 2011) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir.

5.8. Tekerlek İzi Testi ve Statik Sünme Testlerinin Karşılaştırılması

Üç eksenli statik sünme test ve tekerlek izi testi yönteminde testlerin uygulama yöntemleri incelendiğinde, tekerlek izi testi ile kaplamada bir doğrultu boyunca hareket eden taşıt tekerleklerinin oluşturdukları deformasyonlar belirlenirken, statik sünme deneyinde sabit yük altında zamana bağlı olarak düşey yöndeki deformasyon oluşumu belirlenmektedir. Deneylerin uygulanma yöntemlerine göre karşılaştırmaları Çizelge 5.14’de verilmiştir.

Çizelge 5.14. Üç eksenli statik sünme testi ile tekerlek izi testinin karşılaştırması

Deney Tipi		
	Hamburg Tekerlek İzi Deneyi	Üç Eksenli Statik Sünme Testi
Numune boyutu	Çap: 150 mm Yükseklik :60±1 mm	Çap: 100 mm Yükseklik :150±1 mm
Numune hazırlaması	Yoğurmalı pres	Yoğurmalı pres
Deneye ön hazırlık	Numunelerin kalıba yerleştirilmesi için kesilmesi, kalıba yerleştirilmesi numunelerin 60 mm olan kalıpta düz yüzey oluşturacak şekilde tesviye edilmesi gerekmektedir.	Kalıba yerleştirmek için ön hazırlık gerekmiyor.
Hava boşluğu	%7±1	%4±0,5
Deney Sıcaklığı	50°C	40°C
Koşullandırma Süresi	Yaklaşık olarak 90 dakika (numuneler cihaza yerleştirildikten sonra su sıcaklığının artması)	24 saat (standartta belirtilmemiş ancak numunenin deney sıcaklığına gelmesi için literatür çalışmalarda numunenin deney kabininde bekletildiği süre)
Deformasyon ölçümü	Otomatik deformasyon ölçer	Deformasyon ölçer (LWDT) elle numuneye yerleştirilmektedir
Koşullandırma	Numuneler, suya batırılmış olarak deney yapılmaktadır (Deneyin 10000 geçişinden sonra numunedeki ayrışmadan dolayı oluşan deformasyon belirlenebilmektedir)	Kuru ortamda deney yapılmaktadır
Deformasyon oluşumu	Tekerleğin her geçişi ile oluşmaktadır (tekerleğin numune üzerinde her gidiş gelişi bir devir olarak adlandırılmaktadır)	Zamana bağlı olarak deformasyon oluşmaktadır.
Yükleme	Sabit tekerlek yükü uygulanmaktadır Serbest tekerlek ağırlığı etki ettiği için uygulanan yük miktarı değişmemektedir.	Basınca bağlı olarak sabit yük uygulanmaktadır. (Kompresördeki basınç değeri zamana bağlı olarak azalabilmektedir. Deney süresince uygulanan basınç değeri kontrol edilmelidir)

Çizelge 5.14 incelediğinde deneylerin uygulama yöntemleri ve deney şartları birbirinden farklı olmaktadır. Numunelerin fiziksel özellikleri, boyutları birbirinden farklıdır. Tekerlek izi deneyinde numuneler suya batırılmış halde tamamlanırken, sünme

testlerinde kuru ortamda deney tamamlanmaktadır. Deney sonucunda oluşan deformasyonlarda da farklılıklar mevcuttur. Tekerlek izi deneyinde numunelerde tekerleğin geçişi sonucunda oyulma şeklinde deformasyon oluşumuna ek olarak agregalarda kırılmalar gözlemlenirken, sünme deneyinde düşey doğrultuda konsolide deformasyon oluşmaktadır. Deformasyonun oluşumu ise tekerlek izinde tekerleğin geçiş sayısına bağlı olurken sünme deneyinde zamana bağlı deformasyon oluşmaktadır.

Test sonuçları incelendiğinde katkıların katılması ile sünme testinde büyük yükleme ve basınç altında deformasyona uğrama süresi uzamıştır. Yükün daha az uygulandığı, numunelerin deformasyona uğramadığı durumlarda ise katkılar oluşan deformasyonu azaltmıştır. Özellikle %3S+%1PPA katkılı karışımların deformasyon direnci en yüksek çıkmıştır. %3S katkılı bitümlü karışımlarda ise deformasyon direnci katkısız karışımlara göre daha iyi sonuç vermiştir. Benzer durum tekerlek izi test sonucunda da gözlemlenmiştir. Saf bitümlü karışımlarla hazırlanan numunelerin deformasyon direnci düşük çıkarken %3S+%1PPA modifiyeli karışımların deformasyon direnci daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlarda sünme testi ile tekerlek izi benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

5.9. Sasobit® ve Polifosforikasit Katkılı Karışımların Maliyet Analizi

Çalışmanın bu bölümünde katkılarla modifiye edilen Bitümlü sıcak karışımların ve Taş mastik asfalt karışımlarının üretimi esnasında ortaya çıkan maliyetler belirlenmiştir. Karışımların nakliyesi, serme sıkıştırma gibi ilave maliyetler dikkate alınmamıştır. Maliyet hesaplarında karışımlarda kullanılan agrega, bitüm ve katkıların maliyeti ile üretim esnasında oluşan enerji maliyetleri, karışımın ton başına olmak üzere hem Türk Lirası (TL) hem de Amerikan Doları para biriminde belirlenmiştir. Dolar kuru 15.08.2022 tarihi itibarı ile 1\$=17,96 TL olarak hesaplara dâhil edilmiştir.

5.9.1. Agrega ve bitüm maliyetlerinin belirlenmesi

Karışımlarda kullanılan agregaların maliyetleri karayolları birim maliyet bilgileri kullanılarak Çizelge 5.15’de verilmiştir.

Çizelge 5.15. Bitümlü sıcak karışımlar ve taş mastik asfalt karışımlarında kullanılan agregaların ton maliyetleri

Poz No	Poz Açıklaması	Birim Fiyat-ton	
		TL	Dolar
KGM 4104	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm. (3/4") ve 12,5 mm. (1/2") lik agreganın hazırlanması	80,13	4,46
KGM 4106	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 9,5 mm. (3/8") lik agreganın hazırlanması	85,11	4,74
KGM 4107	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 4,75 mm. (No.4) ve daha küçük agreganın hazırlanması	88,38	4,92
KGM 4104-S	Sert taştan konkasörle kırılmış ve elenmiş 19 mm. (3/4") ve 12,5 mm. (1/2") lik agreganın hazırlanması	96,46	5,37
KGM 4106-S	Sert taştan konkasörle kırılmış ve elenmiş 9,5 mm. (3/8") lik agreganın hazırlanması	104,71	5,83
KGM 4107-S	Sert taştan konkasörle kırılmış ve elenmiş 4,75 mm. (No.4) ve daha küçük agreganın hazırlanması	109,93	6,12

Bitümlü sıcak karışımlarda agregaların maliyet hesapları, seçilen gradasyona uygun olarak aşağıda belirtilen agreganın oranlarına göre yapılmıştır.

- ❖ 19 mm-12,5 mm : %8 (agrega ağırlığına)
- ❖ 12,5 mm-9,5 mm : %15 (agrega ağırlığına)
- ❖ 4,75m ve altı : % 77 (agrega ağırlığına)

Taş mastik asfalt karışımlarında agregaların maliyet hesapları, seçilen gradasyona uygun olarak aşağıda belirtilen agreganın oranlarına göre yapılmıştır.

- ❖ 19 mm-12,5 mm : %8 (agrega ağırlığına)
- ❖ 12,5 mm-9,5 mm : %29 (agrega ağırlığına)
- ❖ 4,75m ve altı : %63 (agrega ağırlığına)

Karışımlarda, Marshall tasarımında elde edilen optimum bitüm miktarı dikkate alınarak maliyet hesaplarına dahil edilmiştir. Marshall tasarımında belirlenen optimum oranlar, karışımdaki agregaya ilave edilen bitüm miktarıdır. Maliyet analizi 1 ton karışım üzerine yapılacağından 1 ton karışıma ilave edilecek bitüm miktarı belirlenerek bitüm maliyetleri hesaplanmıştır. Bitüm oranları BSK için % Bitüm miktarlarına modifiyeli bitümlerdeki katkı miktarı da dâhildir. Bitüm fiyatı 15.08.2022 tarihinde TÜPRAŞ'ın sitesinden (URL-8) 8,530.4 TL/ton (474,97 \$/ton) olarak belirlenmiştir. TMA karışımları için karışımlara ilave edilen selülozik fiber katkısı 8980 TL/ton (500\$/ton) olarak

belirlenmiştir. Bu bilgilere göre BSK ve TMA karışımlarının agrega ve bitüm maliyetleri aşağıdaki gibidir.

- BSK için agrega maliyeti:
 $(0,957 \times 0,08 \times 80,13) + (0,957 \times 0,15 \times 85,11) + (0,957 \times 0,77 \times 88,38) = 83,48$ TL/ton
 (4,65 \$/ton)
 BSK için bitüm maliyeti:
 $0,043 \times 8980 = 386,14$ TL/ton (21,5 \$/ton)
- %3S ile modifiye edilen BSK için agrega maliyeti:
 $(0,9574 \times 0,08 \times 80,13) + (0,9574 \times 0,15 \times 85,11) + (0,9574 \times 0,77 \times 88,38) = 83,51$ TL/ton
 (4,65 \$/ton)
 %3S ile modifiye edilen BSK için bitüm maliyeti:
 $0,0426 \times 8980 = 382,55$ TL/ton (21,3 \$/ton)
- %3S+%1PPA ile modifiye edilen BSK için agrega maliyeti:
 $(0,9575 \times 0,08 \times 80,13) + (0,9575 \times 0,15 \times 85,11) + (0,9575 \times 0,77 \times 88,38) = 83,52$ TL/ton
 (4,65 \$/ton)
 %3S+%1PPA ile modifiye edilen BSK için bitüm maliyeti:
 $0,0425 \times 8980 = 381,65$ TL/ton (21,25 \$/ton)
- TMA için agrega maliyeti:
 $(0,934 \times 0,08 \times 96,46) + (0,934 \times 0,29 \times 104,71) + (0,934 \times 0,63 \times 109,93) = 100,25$ TL/ton
 (5,58 \$/ton)
 TMA için bitüm maliyeti:
 $0,066 \times 8980 = 592,68$ TL/ton (33 \$/ton)
- %3S ile modifiye edilen TMA için agrega maliyeti:
 $(0,9345 \times 0,08 \times 96,46) + (0,9345 \times 0,29 \times 104,71) + (0,9345 \times 0,63 \times 109,93) = 100,30$ TL/ton (5,58 \$/ton)
 %3 S ile modifiye edilen TMA için bitüm maliyeti:
 $0,0655 \times 8980 = 588,19$ TL/ton (32,75 \$/ton)
- %3S+%1PPA ile modifiye edilen TMA için agrega maliyeti:
 $(0,9343 \times 0,08 \times 96,46) + (0,9343 \times 0,29 \times 104,71) + (0,9343 \times 0,63 \times 109,93) = 100,28$ TL/ton (5,58 \$/ton)
 %3S+%1PPA ile modifiye edilen TMA için bitüm maliyeti:
 $0,0657 \times 8980 = 589,99$ TL/ton (32,85 \$/ton)

5.9.2. Katkı Maliyetlerinin Belirlenmesi

Sasobit katkısı ve polifosforik asit katkısı bitüme ağırlıkça %3 ve %1 oranında ilave edilmiştir. Karışımlara ilave edilecek olan katkı miktarları optimum bitüm miktarına göre her bir karışım için ayrı ayrı belirlenmiştir. Yapılan fiyat araştırması sonucunda Sasobit® katkısının birim fiyatı 53,88 TL/kg (3,5 \$/kg), Polifosforik asit katkısının birim fiyatı da 35,92 TL/kg (2 \$/kg) olarak belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan katkıların maliyetleri aşağıdaki gibidir.

- %3S ile modifiye edilen BSK için katkı maliyeti (%3 Sasobit®):
 $43 \cdot (3/103) \cdot 53,88 = 67,48 \text{ TL/ton (3,76 $/ton)}$
- %3S+%1PPA ile modifiye edilen BSK için katkı maliyeti (%3 Sasobit®+%1 Polifosfoikasit):
 $42,5 \cdot (3/104) \cdot 53,88 + 42,5 \cdot (1/104) \cdot 35,92 = 80,73 \text{ TL/ton (4,49 $/ton)}$
- %3S ile modifiye edilen TMA için katkı maliyeti (%3 Sasobit®):
 $65,5 \cdot (3/103) \cdot 53,88 = 102,79 \text{ TL/ton (5,72 $/ton)}$
- %3S+%1PPA ile modifiye edilen TMA için katkı maliyeti (%3 Sasobit®+%1 Polifosfoikasit):
 $65,7 \cdot (3/104) \cdot 53,88 + 42,5 \cdot (1/104) \cdot 35,92 = 116,79 \text{ TL/ton (6,50 $/ton)}$

5.9.3. Karışımların enerji maliyetlerinin belirlenmesi

Karışımların enerji maliyetleri (Almusawi ve ark., 2022) tarafından yapılan çalışma örnek alınarak belirlenmiştir. Beç tipi elektrikli asfalt plantinde karışımların sıcaklıklarına göre enerji maliyetleri Çizelge 5.16'da verilmiştir. Elektrik 1kWh tüketim bedeli 2.74 TL (0,15\$) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.16. Karışımların enerji tüketim maliyetleri

Karışım Sıcaklığı (°C)	Enerji Tüketimi (kWh/ton)	Enerji Tüketim Maliyeti (TL/ton)-(\$/ton)
150-155	2,55	6,98 TL/ton (0,39 \$/ton)
155-160	2,87	7,86 TL/ton (0,44 \$/ton)
160-165	3,24	8,88 TL/ton (0,49 \$/ton)

5.9.4. Karışımların toplam maliyetlerinin belirlenmesi

Karışımlara ait agrega, bitüm katkı maliyetleri ile enerji tüketiminden maliyetinden oluşan toplam üretim maliyetleri çizelge 5.17’de yer almaktadır.

Çizelge 5.17. BSK ve TMA karışım maliyetleri

Maliyetler	BSK	BSK (%3S)	BSK (%3S+%1 PPA)	TMA	TMA (%3S)	TMA (%3S+%1 PPA)
Agrega maliyeti ton/TL (\$/ton)	83,48 (4,65)	83,51 (4,65)	83,52 (4,65)	100,25 (5,58)	100,30 (5,58)	100,28 (5,58)
Bitüm maliyeti ton/TL (\$/ton)	386,14 (21,5)	382,55 (21,3)	381,65 (21,25)	592,68 (33)	588,19 (32,75)	589,99 (32,85)
Katkı maliyeti ton/TL (\$/ton)	-	67,48 (3,76)	80,73 (4,49)	-	102,79 (5,72)	116,79 (6,50)
Selülozik fiber katkı (%0,03) maliyeti ton/TL (\$/ton)	-	-	-	26,93 (1,5)	26,93 (1,5)	26,93 (1,5)
Karışımın enerji maliyetleri ton/TL (\$/ton)	5,91 (0,33)	5,25 (0,29)	6,67 (0,37)	5,91 (0,33)	5,25 (0,29)	6,67 (0,37)
Karışımın toplam maliyeti ton/TL (\$/ton)	475,53 (26,47)	538,79 (29,99)	552,57 (30,77)	725,77 (40,41)	823,46 (45,85)	840,66 (46,80)
Yıllık 100000 ton üretim maliyeti ton/TL (\$/ton)	47,533 (2646,6)	53,879 (3000,9)	55,257 (3076,6)	72,577 (4041,0)	82,346 (4584,9)	84,066 (4680,7)

Çizelge 5.17’de yer alan maliyet analizi sonucunda, %3S ile modifiye edilen karışımların BSK ve TMA maliyetlerini yaklaşık olarak %13 oranında artırdığı belirlenmiştir. %3S+%1PPA ile modifiye edilen karışımların katkısız BSK ve TMA karışımlarına göre maliyeti yaklaşık olarak 17 oranında artırdığı belirlenmiştir. Çizelge 5.17’ de maliyeti en yüksek karışım %3S+%1PPA ile modifiye edilen TMA karışımlarıdır. Yapılan literatür taraması sonucunda (Karakuzu ve Özen, 2020) karışım

maliyetlerinin bitüm fiyatlarının değişkenlik göstermesine bağlı olarak modifiye edilen karışımların maliyetini etkilediğini belirtmiştir. Tekerlek izi deney sonucuna göre en yüksek tekerlek izi direncine sahip karışımların %3S+%1PPA ile modifiye edilen TMA karışımları olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda katkıların karışımın üretim maliyetini arıtmasına rağmen karışımın performansını da artırdığı gözlemlenmiştir. Benzer sonuç (Rubio ve ark., 2012) tarafından yapılan literatür taraması sonucunda belirlenmiştir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Katkısız, Sasobit® modifiyeli, Polifosforik asit modifiyeli ve Sasobit®+Polifosforik asitle modifiyeli bitümler ve bu bitümlerle hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar ve taş mastik asfalt karışımlar üzerinde tamamlanan tasarım deneyleri, dolaylı çekme mukavemeti deneyleri, statik üç eksenli sünme deneyleri ve tekerlek izi deneylerinden elde edilen bulgular ve sonuçlar ve tekerlek izi deneyi ile üç eksenli statik sünme deney sonuçlarının birbirleriyle olan ilişkisinin incelendiği çalışmada elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

50/70 saf bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 oranında S katkısının katılmasıyla katkı oranının artmasına bağlı olarak, bitümün penetrasyon değeri azalırken, yumuşama noktası değeri artmıştır. S katkısı bitümü fiziksel olarak daha rijitleştirirken, sıcaklığa karşı bitümün hassasiyetini azaltmıştır. Saf bitüme %1S, %2S, %3 S katkılarına ilave olarak %1PPA katkısı ilave edildiğinde, bitümdeki S oranının artmasıyla penetrasyon değeri artış göstermiştir. %1S+%1PPA modifiyeli bitümün penetrasyonu %3S modifiyeli bitümün penetrasyonundan daha düşük, yumuşama noktası ise daha yüksek çıkmıştır.

Bitümün 90-160°C sıcaklık aralığındaki viskozite değişimi incelendiğinde saf bitüme ağırlıkça %1, %2, %3 oranında S katkısının ilave edilmesiyle bitümün viskozite değerinin azaldığı görülmüştür. %1 oranında PPA katkısı ise bitümün viskozitesini artırmış, ve 90-160 °C aralığındaki 10°C'lik artışlarla tamamlanan tüm sıcaklıklarda en yüksek viskozite değeri elde edilmiştir. %1PPA ile modifiye edilen saf bitümün 90°C sıcaklıktaki viskozite değeri belirlenememiştir. %1S+%1PPA modifiyeli bitümün viskozite değeri %1PPA modifiyeli bitüme göre daha düşük çıkmış ve 90°C sıcaklıktaki viskozite değeri %1S+%1PPA modifiyeli bitümde belirlenebilmiştir. S katkısının bitümün viskozite değerini azaltırken, PPA katkısının bitümün viskozite değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Karıştırma sıkıştırma sıcaklıkları da viskozite deneyi sonucunda belirlenmiştir. Bitümlerin 135°C ve 165°C sıcaklıklardaki viskozite değerleriyle hazırlanacak karışımların karıştırma sıkıştırma sıcaklıkları belirlenmiştir. En düşük karıştırma sıkıştırma sıcaklığı %3 S modifiyeli bitümle elde edilirken %1PPA modifiyesi bitümlerin karıştırma sıkıştırma sıcaklığını artırdığı gözlemlenmiştir. En yüksek karıştırma sıkıştırma sıcaklığına %1PPA modifiyeli bitümle elde edilmiş ve karıştırma sıkıştırma sıcaklığını çok fazla artırdığı için %1PPA modifiyeli bitüm karışımlarda

kullanılmamıştır. Hazırlanacak karışımlar için saf bitüm, %3S modifiyeli bitüm, %3S+%1PPA modifiyeli bitümler seçilmiştir.

Karışım deneyleri bitümlü sıcak karışımlar ve taş mastik asfalt karışımlar üzerinde tamamlanmıştır. Bitümlü sıcak karışımlar, aşınma tabakası gradasyonuna uygun olarak hazırlanmış ve karışımlarda kalker tipi kırılmış agrega kullanılmıştır. Taş mastik asfalt karışımları için bazalt tipi kırılmış agrega kullanılmıştır. Agrega üzerine tamamlanan deneylerde kalkerin Los Angeles aşınma direncinin bazalta göre daha düşük çıktığı, su emme değerinin ise daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir. Marshall tasarımı saf, %3S, %3S+%1PPA modifiyeli bitümler için ayrı ayrı belirlenmiştir. Kullanılan katkıların optimum bitüm değerini çok fazla değiştirmedığı gözlemlenirken, 3S modifiyeli bitümlü karışımların saf bitümlü karışımlara göre stabilite değerini artırdığı gözlemlenmiştir. Stabilite değerini en yüksek çıkan karışımlar ise 3S+%1PPA modifiyeli bitümlü karışımlarla elde edilmiş olup %3S+%1PPA modifiyesinin bitümün stabilite değerini artırarak karışımların performansını iyileştirdiği belirlenmiştir.

Hazırlanan bitümlü sıcak karışımların ve taş mastik asfalt karışımlarının su hasarına karşı dayanımlarını belirlemek için AAHSTO -283 deneyi tamamlanmıştır. Aşınma tabakası gradasyonuna göre hazırlanan karışımların dolaylı çekme mukavemet oranı (ITSR) saf, %3S ve %3S+1PPA modifiyeli karışımlarda birbirine yakın değerler çıktığı belirlenmiştir. Ancak %3S modifiyeli karışımın dolaylı çekme mukavemeti saf bitümlü karışımlara göre yüksek çıkarken, %3S+%1PPA modifiyeli bitümlü karışımların dolaylı çekme değeri en yüksek çıkmıştır. Taş mastik asfalt karışımlarında ise dolaylı çekme mukavemeti katkıların eklenmesiyle artmıştır. %3S modifiyeli karışımların hem dolaylı çekme mukavemeti hem de ITSR değeri saf bitümlü karışımlara göre daha yüksek çıkarken, %3S+%1PPA modifiyeli bitümlü karışımların dolaylı çekme mukavemeti ve ITSR değeri en yüksek çıkmıştır. Eklenen katkıların dolaylı çekme mukavemetini ve ITSR değerini artırdığı ve sudan kaynaklı bozulmalara karşı karışımları daha dirençli hale getirdikleri belirlenmiştir.

Üç eksenli statik sünme deneyi aşınma tabakası gradasyonuna uygun hazırlanan bitümlü sıcak karışımlar üzerinde tamamlanmıştır. 40°C ortam sıcaklığı ve 10000s yükleme süresi uygulanarak tamamlanan üç eksenli statik sünme test sonuçlarına göre 500 kPa basınç uygulanan numunelerin tamamı deformasyona uğrayarak bozulmuştur. Ancak test süresi en uzun %3S+%1PPA katkılı karışım ile elde edilmiştir. 500/200 kpa basınç altında sadece katkısız numuneler deformasyona uğrarken (tamamen bozulma) modifieli numuneler deformasyona uğramamıştır. 300 kPa ve 300/100 kpa basınç

altındaki numunelerde katkıların deformasyon miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. %3S+%1PPA katkısı ile hazırlanan numunelerin statik sünme testi sonucuna göre kalıcı deformasyon direnci en yüksek çıktığı belirlenmiştir.

Tekerlek izi deneyi için Hamburg tekerlek izi deney cihazı kullanılmış ve deney hem bitümlü sıcak karışımlar hem de taş mastik asfalt karışımlar üzerinde 50°C sıcaklıkta tamamlanmıştır. Tekerlek izi testi sonunda bütün numuneler, tekerleğin 20000 geçişi tamamlanamadan deformasyona uğramıştır. Aşınma tabakası gradasyonuna göre hazırlanan saf bitümlü sıcak karışımların tekerlek izi direnci tüm karışımlar içinde en düşük çıkmıştır. %3S modifiyeli karışımların tekerlek izi direnci saf bitümlü karışımlara göre yüksek çıkarken, tekerlek izi direnci en yüksek çıkan karışımlar %3S+%1PPA modifiyeli bitümlü karışımlarla elde edilmiştir. Taş mastik asfalt karışımlarının tekerlek izi direnci ise aynı bitümün kullanıldığı bitümlü sıcak karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Taş mastik asfalt karışımlarında da %3S modifiyeli bitümlü karışımların tekerlek izi direnci saf bitümlü karışımlara göre daha yüksek çıkarken, tekerlek izi direnci en yüksek olan karışımlar %3S+%1PPA modifiyeli karışımlarla elde edilmiştir. %3S+%1PPA modifiyeli taş mastik asfalt karışımının tüm karışımlar içinde en yüksek tekerlek izi direncine sahip olduğu gözlemlenmiş ve katkıların tekerlek izi direncini artırdığı belirlenmiştir.

Çalışmada katkıların karışıma eklenmesiyle üretimde maliyet artışının olduğu belirlenmiştir. %3 S ile modifiye edilen BSK ve TMA karışımlarının üretim maliyeti katkısız karışımlara göre yaklaşık %13 daha fazla maliyet oluşturmuştur. %3S+%1PPA ile modifiye edilen BSK ve TMA karışımların üretim maliyeti katkısız karışımlara göre yaklaşık %17 daha fazla maliyet oluşturmuştur. Katkıların üretim maliyetlerini artırmasına rağmen karışımın performansını artırdığı yapılan deneysel çalışmada belirlenmiştir.

6.2 Öneriler

Tamamlanan çalışmaya ilave olarak kuru ortamda tamamlanan tekerlek izi deney sonuçları ile üç eksenli statik sünme ya da dinamik sünme deney sonuçları karşılaştırılıp deney sonuçları arasındaki ilişki incelenebilir. Deneylerde farklı ortam sıcaklıkları ve karışımdaki farklı hava boşlukları da değişen parametreler olarak kullanılıp kalıcı deformasyon deneyleri üzerindeki etkileri incelenebilir. Ek çalışma olarak polimer modifiyeli bitüm ile %3S+%1PPA modifiyeli bitüm karşılaştırılabilir. Hazırlanan karışımların tekerlek izi dirençleri karşılaştırılabilir. Özellikle polimer modifiyeli bitüm ve %3S+%1PPA modifiyeli bitümün taş mastik asfalt üzerindeki performansı

incelenebilir. Çalışmada kullanılan agregalar Yozgat'taki taş ocaklarından seçilmiştir. Mevcut agregalarla hazırlanan karışımların tekerlek izi performansı düşük çıkmıştır. Tekerlek izi direnci daha yüksek agregalar elde edebilmeye yönelik araştırma çalışmaları yapılabilir. Bölgenin jeolojik yapısı incelenip varsa daha kaliteli agrega yatakları tespit edilebilir, asfalt karışımlarda kullanılabilirliği ve performansı araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Ahmed, M. A. ve Attia, M. I., 2013, Impact of aggregate gradation and type on hot mix asphalt rutting in Egypt, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3 (4), 2249-2258.
- Al-Mosawe, H., 2016, Prediction of permanent deformation in asphalt mixtures, *University of Nottingham*.
- Almusawi, A., Sengoz, B., Ozdemir, D. K. ve Topal, A., 2022, Economic and environmental impacts of utilizing lower production temperatures for different bitumen samples in a batch plant, *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00987.
- ASTM-C127, 2012, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.
- ASTM-C128, 2012, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.
- ASTM-C131, 2012, Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.
- ASTM-D5, 2013, Standard test method for penetration of bituminous materials, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.
- ASTM-D36, 2009, D36. Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus), *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.
- ASTM-D854, 2010, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.
- Biligiri, K. P., Kaloush, K. E., Mamlouk, M. S. ve Witczak, M. W., 2007, Rational modeling of tertiary flow for asphalt mixtures, *Transportation Research Record*, 2001 (1), 63-72.
- Blazejowski, K., 2011, Stone matrix asphalt: Theory and practice, CRC Press, p.
- Brown, E. ve Bassett, C. E., 1990, Effects of maximum aggregate size on rutting potential and other properties of asphalt-aggregate mixtures, *Transportation Research Record*, 1259, 107-119.
- Brown, E., Haddock, J. E., Mallick, R. B. ve Lynn, T. A., 1997, Development of a mixture design procedure for stone matrix asphalt.
- Brown, E. R., Kandhal, P. S. ve Zhang, J., 2001, Performance testing for hot mix asphalt, *NCAT report*, 1 (05).
- Button, J. W., Perdomo, D. ve Lytton, R. L., 1990, Influence of aggregate on rutting in asphalt concrete pavements, *Transportation Research Record* (1259).

- Cross, S. A., 1992, A national study of rutting in hot mix asphalt (HMA) pavements, Auburn University, p.
- D'Angelo, J. A., 2012, Polyphosphoric Acid Modification of Asphalt Binders: A Workshop. Workshop Summary, *Transportation Research Circular* (E-C160).
- EAPA, 2020, European Asphalt Pavement Association, p.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. ve Isacsson, U., 2006, Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220—low temperature performance, *Fuel*, 85 (7-8), 989-997.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. ve Isacsson, U., 2007, Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220—high and medium temperature performance, *Construction and Building Materials*, 21 (10), 1899-1908.
- Fazaeli, H., Behbahani, H., Amini, A. A., Rahmani, J. ve Yadollahi, G., 2012, High and low temperature properties of FT-paraffin-modified bitumen, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012.
- Fazaeli, H., Amini, A. A., Nejad, F. M. ve Behbahani, H., 2016, Rheological properties of bitumen modified with a combination of FT paraffin wax (sasobit®) and other additives, *Journal of civil Engineering and management*, 22 (2), 135-145.
- Ge, D., Yan, K., You, L. ve Wang, Z., 2017, Modification mechanism of asphalt modified with Sasobit and Polyphosphoric acid (PPA), *Construction and Building Materials*, 143, 419-428.
- Golalipour, A., Jamshidi, E., Niazi, Y., Afsharikia, Z. ve Khadem, M., 2012, Effect of aggregate gradation on rutting of asphalt pavements, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 440-449.
- Hunter, R. N., Self, A. ve Read, J., 2015, The shell bitumen handbook, ICE Publishing, p.
- Kandhal, P. S. ve Cooley, L. A., 2003, Accelerated laboratory rutting tests: Evaluation of the asphalt pavement analyzer, Transportation Research Board, p.
- Karakuzu, K. ve Özen, H., 2020, Türkiye Şartlarında Ilık Karışım Asfalt Uygulamasının Ekonomik ve Çevresel Değerlendirmesi, *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13 (2), 429-443.
- KGM, 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi, *Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, KTŞ*.
- KGM, 2021, 2020 Yılı Devlet ve İl Yolları Bakım-İşletme Maliyetleri, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, p. 407.
- Kuloğlu, N., Yılmaz, M. ve Kök, B. V., 2008, Farklı Penetrasyon Derecelerine Sahip Asfalt Çimentolarının Kalıcı Deformasyona Karşı Dayanımlarının ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 13 (1).

- Li, X., Xie, Z., Fan, W., Wang, L. ve Shen, J., 2015, Selecting Warm Mix Asphalt Additives by the Properties of Warm Mix Asphalt Mixtures—China Experience, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10 (1), 79-88.
- Liu, J., Saboundjian, S., Li, P., Connor, B. ve Brunette, B., 2011, Laboratory evaluation of Sasobit-modified warm-mix asphalt for Alaskan conditions, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23 (11), 1498-1505.
- Liu, J., Yan, K. ve Liu, J., 2018a, Rheological properties of warm mix asphalt binders and warm mix asphalt binders containing polyphosphoric acid, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11 (5), 481-487.
- Liu, X., Li, T. ve Zhang, H., 2018b, Short-term aging resistance investigations of polymers and polyphosphoric acid modified asphalt binders under RTFOT aging process, *Construction and Building Materials*, 191, 787-794.
- Lu, Q. ve Harvey, J. T., 2006, Evaluation of Hamburg wheel-tracking device test with laboratory and field performance data, *Transportation Research Record*, 1970 (1), 25-44.
- Lu, X. ve Redelius, P., 2007, Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance, *Construction and Building Materials*, 21 (11), 1961-1970.
- Ma, T., Zhang, D., Zhang, Y., Zhao, Y. ve Huang, X., 2016, Effect of air voids on the high-temperature creep behavior of asphalt mixture based on three-dimensional discrete element modeling, *Materials & Design*, 89, 304-313.
- Mendigeri, A. ve Jagadeesh, D. H., 2015, Studies on Stone Matrix Asphalt with Warm Mix Technology using Sasobit and Zychotherm as Additives, *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online)*, 2319-7064.
- Miljković, M. ve Radenberg, M., 2011, Rutting mechanisms and advanced laboratory testing of asphalt mixtures resistance against permanent deformation, *Facta Universitatis-Series: Architecture and Civil Engineering*, 9 (3), 407-417.
- Moghaddam, T. B., Soltani, M. ve Karim, M. R., 2014, Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads, *Construction and Building Materials*, 65, 487-494.
- Nikolaides, A., 2014, Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality, CRC Press, p.
- O'Flaherty, C. A., 2001, Highways, CRC Press, p.
- Orange, G., Martin, J.-V., Menapace, A., Hemsley, M. ve Baumgardner, G., 2004, Rutting and moisture resistance of asphalt mixtures containing polymer and polyphosphoric acid modified bitumen, *Road Materials and Pavement Design*, 5 (3), 323-354.
- Orhan, F., 2012, Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara, p. 40.

- Önal, M. A. ve Kahramangil, M., 1993, Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, p.
- Özen, H., Aksoy, A., Tayfur, S. ve Çelik, F., 2008, Laboratory performance comparison of the elastomer-modified asphalt mixtures, *Building and Environment*, 43 (7), 1270-1277.
- Prowell, B. D., Zhang, J. ve Brown, E. R., 2005, Aggregate properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt, Transportation Research Board, p.
- Remisova, E., 2015, Study of mineral filler effect on asphalt mixtures properties, *Bituminous Mixtures and Pavements VI*, 49.
- Rezaeizadeh Herozi, M., Valenzuela, W., Rezagholilou, A., Rigabadi, A. ve Nikraz, H., 2022, New Models for the Properties of Warm Mix Asphalt with Sasobit, *CivilEng*, 3 (2), 347-364.
- Rezvan, B. ve Hassan, Z., 2017, Evaluation of rutting performance of stone matrix asphalt mixtures containing warm mix additives, *Journal of Central South University*, 24 (2), 360-373.
- Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D.-Y. ve Kennedy, T. W., 1991, Hot mix asphalt materials, mixture design and construction.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. ve Moreno, F., 2012, Warm mix asphalt: an overview, *Journal of Cleaner Production*, 24, 76-84.
- Rushing, J. F. ve Little, D. N., 2014, Static creep and repeated load as rutting performance tests for airport HMA mix design, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26 (9), 04014055.
- Sengul, C. E., Oruc, S., Iskender, E. ve Aksoy, A., 2013, Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance, *Construction and Building Materials*, 41, 777-783.
- Sohm, J., Gabet, T., Horny, P., Piau, J.-M. ve Di Benedetto, H., 2012, Creep tests on bituminous mixtures and modelling, *Road Materials and Pavement Design*, 13 (4), 832-849.
- Sousa, J. B., Craus, J. ve Monismith, C. L., 1991, Summary report on permanent deformation in asphalt concrete.
- Subhy, A., 2017, Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review, *Construction and Building Materials*, 156, 28-45.
- Tafti, M. F., Khabiri, M. M. ve Sanij, H. K., 2016, Experimental investigation of the effect of using different aggregate types on WMA mixtures, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9 (5), 376-386.

- Taherkhania, H., 2011, Compressive creep behaviour of asphalt mixtures, *Procedia Engineering*, 10, 583-588.
- Tarefder, R. A. ve Zaman, M., 2002, Evaluation of rutting potential of hot mix asphalt using the asphalt pavement analyzer, *Federal Highway Administration*.
- Tayfur, S., Ozen, H. ve Aksoy, A., 2007, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Construction and Building Materials*, 21 (2), 328-337.
- Topal, A. ve Sengoz, B., 2005, Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 19 (2), 155-163.
- TS-EN-12697-25, 2006, Bitümlü karışımlar-Sıcak asfalt karışımları için deney yöntemleri-Bölüm 25:Çevrimsel basma deneyi, *TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ*.
- Tunç, A., 2001, Yol malzemeleri (agrega, asfalt, bitümlü karışımlar, beton, zemin) ve uygulamaları (kaplamalar ve zemin ıslahı-dizayn ve yapım metotları), Atlas-Nobel yayın dağıtım, p.
- Txdot:Tex-242-F, 2014, Hamburg Wheel Tracking Test, *texas Department of Transportation*.
- URL-1, <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Istatistikler/DevletliYolEnvanter/SatihYolAgiUzunlugu.pdf>,
- URL-2, <https://www.controls-group.com/eng/universal-testing-machines-utm/>,
- URL-3, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/rotational-viscometer/>,
- URL-4, <https://www.geo-con.com.au/product/dwt-hamburg-type-double-wheel-tracker/>,
- URL-5, www.sasobit.com.
- URL-6, <https://www.shiningdeal.com/polyphosphoric-acid/>
- URL-7, <https://www.indiamart.com/proddetail/gyratory-compactor-10633435730.html>.
- URL-8, <https://www.tupras.com.tr/bitum-fiyatlari-guncel>.
- Vallejo, J., Kennedy, T. W. ve Haas, R. C., 1976, Permanent deformation characteristics of asphalt mixtures by repeated-load indirect tensile test, *University of Texas at Austin*.
- Wang, Z. ve Ye, F., 2020, Experimental investigation on aging characteristics of asphalt based on rheological properties, *Construction and Building Materials*, 231, 117158.
- Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T. ve Basyouny, M., 2002, Simple performance test for superpave mix design ,NCHRP Report 465, Transportation Research Board, p.

- Xie, Z. ve Shen, J., 2016, Performance properties of rubberized stone matrix asphalt mixtures produced through different processes, *Construction and Building Materials*, 104, 230-234.
- Yavuz, A., 2002, Asfalt El Kitabı, *İstanbul*, İsfalt, p.
- Yildirim, Y., Jayawickrama, P. W., Hossain, M. S., Alhabshi, A., Yildirim, C., Smit, A. d. F. ve Little, D., 2007, Hamburg wheel-tracking database analysis, *Texas Department of Transportation and Federal Highway Administration*, FHWA/TX-05/0-1707-7.
- Yilmaz, M., Kök, B. V. ve Kuloğlu, N., 2011, Effects of using asphaltite as filler on mechanical properties of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials*, 25 (11), 4279-4286.
- Zeiada, W., Kaloush, K., Underwood, B. ve Mamlouk, M., 2014, Improved method of considering air void and asphalt content changes on long-term performance of asphalt concrete pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (8), 718-730.
- Zhang, J., Yang, F., Pei, J., Xu, S. ve An, F., 2015, Viscosity-temperature characteristics of warm mix asphalt binder with Sasobit®, *Construction and Building Materials*, 78, 34-39.
- Zhao, G.-j. ve Guo, P., 2012, Workability of Sasobit warm mixture asphalt, *Energy Procedia*, 16, 1230-1236.
- Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S. N. ve Putman, B. J., 2012, Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 31, 265-272.

EKLER

Ek 1 Agregada Deneyleri

Los Angeles Aşınma Deneyi

Aşınma deneyi, maksimum dane boyutu 37,5 mm olan agregaların Los Angeles test cihazında aşınma ve bozulmasını belirlemek için uygulanmaktadır. Deney cihazı, iç çapı 711 ± 5 mm, iç uzunluğu da 508 ± 5 mm olan çelik silindirden oluşmaktadır. Deney cihazına Çizelge 3.3’de belirtildiği şekilde gradasyona uygun olarak yıkanmış ve $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulmuş agrega ile birlikte her biri 390-445g ağırlığında silindir küreler konulur. Cihaz 30-33dev/dak hızda 500 döngü yaptıktan sonra numune cihazdan çıkartılır 1,7 mmlik elek (No 12) üstünde kalan malzeme yıkanır. $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde kurutulup tartılır. Elek üstünde kalan agreganın toplam agrega ağırlığına % olarak oranıyla aşınma yüzdesi hesaplanır (Önal ve Kahramangil, 1993).

Çalışmada kalker ve bazalt tipi agregaların aşınma dirençleri Los Angeles aşınma deneyi ile belirlenmiştir. 19 mm’den geçen 2500 g ağırlığındaki agrega ile 12,5 mm’den geçen 2500 g ağırlığındaki agrega ile 11 adet metal küre deney cihazına yerleştirilmiştir. Cihaz 500 döngü yaptıktan sonra No 12 elekten yıkanarak elenmiştir. Elek üstünde kalan numune tepsiye alındıktan sonra $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde ağırlığı sabitlenene kadar kurutulup tartılarak agregaların aşınma yüzdeleri belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Los Angeles aşınma deneyi için agrega ağırlığı ile küre sayısı ve ağırlıkları

Elekler (mm/inç)		Maksimum dane boyutuna göre seçilecek agrega ağırlığı (g)			
Geçtiği	Kaldığı	A	B	C	D
37,5 (1 1/2)	25 (1)	1250±25			
25 (1)	19 (3/4)	1250±25			
19 (3/4)	12,5 (1)	1250±25	2500±10		
12,5 (1)	9,5 (3/8)	1250±25	2500±10		
9,5 (3/8)	6,3 (1/4)			2500±10	
6,3 (1/4)	4,75 No 4			2500±10	
4,75 No 4	2,36 No 8				5000±10
Agregaların toplam ağırlığı (g)		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Küre sayısı		12 adet	11 adet	8 adet	6 adet
Kürelerin toplam ağırlığı (g)		5000±25	4584±25	3330±20	2500±15

Ek 1 Agrega Deneyleri

Kaba Agrega Özgöl Ağırlık Deneyi

Deney, kaba agreganın su emme oranı ile özgöl ağırlığının belirlenmesini kapsamaktadır. 4 no'lu elek (4,75mm) üzerinde kalan agregadan gradasyona uygun şekilde belli miktarda malzeme alınır. Numune yıkanır, tepsiye konulduktan sonra 24 saat süreyle suyun içinde bekletilir. 24 saat sonra numune yüzey kuru hale getirilmek için su emici bezin üzerine yayılıp, agrega daneleri üzerinde gözle görülebilecek su filmi kalmayana kadar kurulanır. Danelerin gözeneklerindeki suyun buharlaşmamasına dikkat edilmelidir.

Doygun yüzey kuru hale getirilen numune tartılır ve tartım sonucu kaydedilir (B).

Numune tel sepete konularak $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki $977\pm 2 \text{ g/cm}^3$ yoğunluktaki suyun içine daldırılır. Agrega daneleri arasına suyun dolması için suya daldırılan tel sepet sallanır ve tartılıp sonuç kaydedilir (C).

Tel sepetteki numune tepsiye boşaltılıp $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulur. Etüvden çıkartılan numune oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Kuru numune tartılır ve tartım kaydedilir (A).

Tamamlanan deney aşamalarından sonra kaba agregaya ait özgöl ağırlıklar ve su emme yüzdesi aşağıdaki formüllerle hesaplanır (Önal ve Kahramangil, 1993) :

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlığı} = \frac{A}{B-C} \quad (3.1)$$

$$\text{Yaş Hacim Özgöl Ağırlığı} = \frac{B}{B-C} \quad (3.2)$$

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlığı} = \frac{A}{A-C} \quad (3.3)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.4)$$

A : Kuru numune ağırlığı

B : Doygun yüzey kuru numune ağırlığı

C : Numunenin sudaki ağırlığı

Çalışmada kullanılan kalker ve bazalt tipi iri agregaların (No 4 üstü) hacim özgöl ağırlıkları ve su emme yüzdeleri yukarıda anlatıldığı gibi belirlenmiştir.

Ek 1 Agrega Deneyleri

İnce Agrega Özgöl Ağırlık Deneyi

Deney ince agreganın (4 no'lu elek ile 200 no'lu elek arası) su emme, zahiri özgöl ağırlık ve hacim özgöl ağırlık özelliklerinin belirlenmesini kapsamaktadır.

Gradasyonu temsil edecek şekilde yaklaşık 1000 g ağırlığındaki numune alınır. 200 no'lu elekten yıkanan numune bir tepsiye alınır. Yıkanmış numunenin üzeri suyla doldurularak 24 sa suda bekletilir. 24 sa suda bekletildikten sonra numunede ince malzeme kaybı olmayacak şekilde tepsideki su süzülür. Numune düz bir yüzey üzerine yayılır ve doymuş yüzey kuru hale getirmek için sıcak hava karşısında devamlı karıştırılır. Karıştırma esnasında numune serbestçe dökülebildiği hale kadar numune sıcak hava akımı karşısında karıştırılmaya devam edilir.

Doymuş yüzey kuru hale gelen numuneden yaklaşık 500 g ağırlığında alınarak piknometre içine konulur ve piknometre ile tartılıp kaydedilir (C).

Piknometreye numunenin üzerini geçecek şekilde su eklenir ve piknometre avuç içinde her iki yönde döndürülerek çalkanıp hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Piknometre su ile tamamen doldurularak $25 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su banyosunda bekletilir. Su banyosunda bekletilen piknometredeki su miktarı tekrar kontrol edilir ve piknometrede eksilen su varsa tekrar tamamlanır. Su banyosundan alınan piknometre kurulanıp tartılır ve tartım kaydedilir (D).

Piknometredeki ince agrega bir tepsiye alınıp $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Kurutma işleminden sonra numune oda sıcaklığında soğuduktan sonra tartılır ve tartım kaydedilir (E).

Tamamlanan deney aşamalarından sonra ince agregaya ait özgöl ağırlıklar ve su emme yüzdesi aşağıdaki formüllerle hesaplanır (Önal ve Kahramangil, 1993):

$$\text{Hacim Özgöl Ağırlığı} = \frac{E}{B+C-A-D} \quad (3.5)$$

$$\text{Yaş Hacim Özgöl Ağırlığı} = \frac{C-A}{B+C-A-D} \quad (3.6)$$

$$\text{Zahiri Özgöl Ağırlığı} = \frac{E}{B+E-D} \quad (3.7)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \frac{C-A-E}{E} \times 100 \quad (3.8)$$

A : Piknometre ağırlığı (g)

B : 25°C 'deki su dolu piknometre ağırlığı (g)

C : Piknometre ve doymuş yüzey kuru numune ağırlığı (g)

D : 25°C 'deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (g)

E : Kuru numune ağırlığı (g)

Çalışmada kullanılan kalker ve bazalt tipi ince agregaların (No 4 altı-No 200 üstü) hacim özgül ağırlıkları ve su emme yüzdeleri yukarıda anlatıldığı gibi belirlenmiştir.

Fillerin Zahirî Özgöl Ağırlık Deneyi

Deney 200 no'lu elek altında kalan malzemenin (fillerin) özgül ağırlık (zahiri özgül ağırlık) özelliklerinin belirlenmesini kapsamaktadır.

Kuru ve temiz olan 50 ya da 100ml'lik özgül ağırlık şişesi ile kapağı tartılır ve tartım kaydedilir.(A)

Şişe damıtılmış su ile ağzına kadar doldurulduktan sonra $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki su banyosunda en az 1 sa kadar bekletilip kapağı kapatıldıktan sonra su banyosundan çıkartılır, kurulanır, tartılır ve tartım kaydedilir (B).

$105\pm5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 4 sa süreyle kurutulan filler, oda sıcaklığında soğuduktan sonra, kuru ve temiz olan özgül ağırlık şişesine, bir huni yardımıyla şişenin 1/3ü dolacak şekilde boşaltılır. Şişenin kapağı kapatılır tartılır ve tartım kaydedilir (C).

Şişenin yarısı su ile doldurulup ağzı kapatıldıktan sonra vakum desikatör içinde hava kabarcığı çıkartılır. Şişede hiçbir hava kalmayınca kadar bu işleme devam edilir. Hava kabarcığı biten şişe tamamen su ile doldurulup $25\pm0,1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki su banyosunda en az 1sa kadar bekletilip kapağı kapatıldıktan sonra su banyosundan çıkartılır, kurulanır, tartılır ve tartım kaydedilir (D).

Tamamlanan deney aşamalarından sonra ince agregaya ait zahirî özgül ağırlık aşağıdaki formülle hesaplanır (Önal ve Kahramangil, 1993):

$$\text{Zahirî Özgöl Ağırlığı} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.9)$$

A : Piknometre ağırlığı (g)

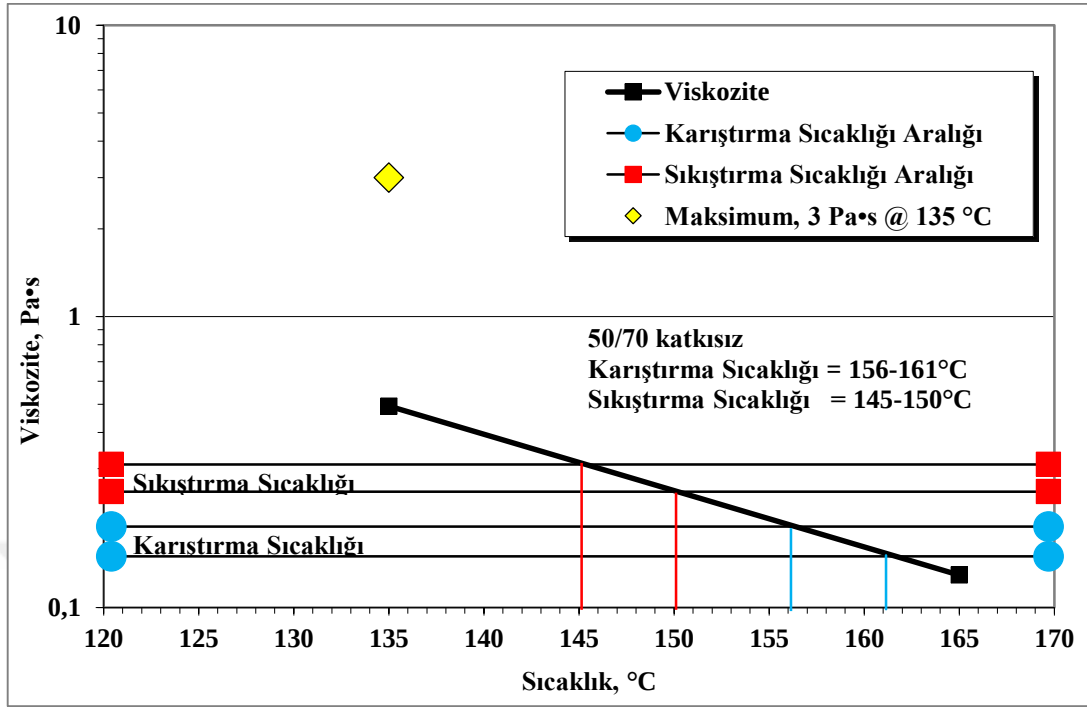
B : 25°C 'deki su dolu piknometre ağırlığı (g)

C : Piknometre ve kuru numune ağırlığı (g)

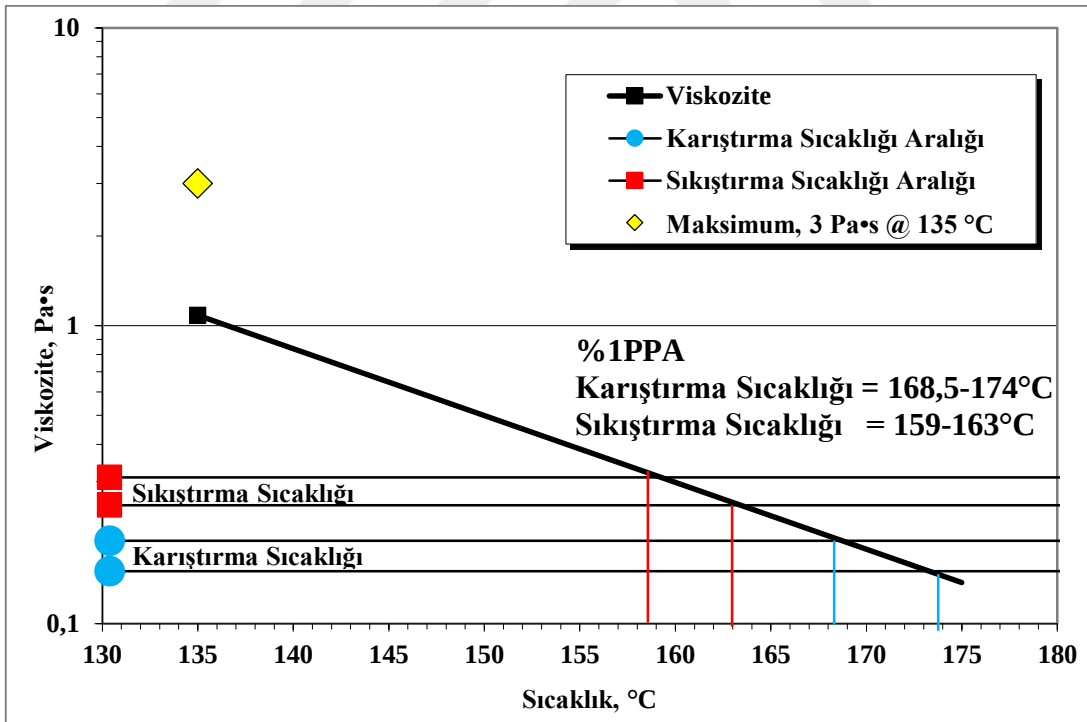
D : 25°C 'deki numune ve su dolu piknometre ağırlığı (g)

Çalışmada kullanılan kalker ve bazalt tipi agregaların No 200 elek altındaki kısmının (fillerin) zahiri hacim özgül ağırlıkları yukarıda anlatıldığı gibi belirlenmiştir.

Ek-2 Saf ve modifiyeli bitümlerin karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

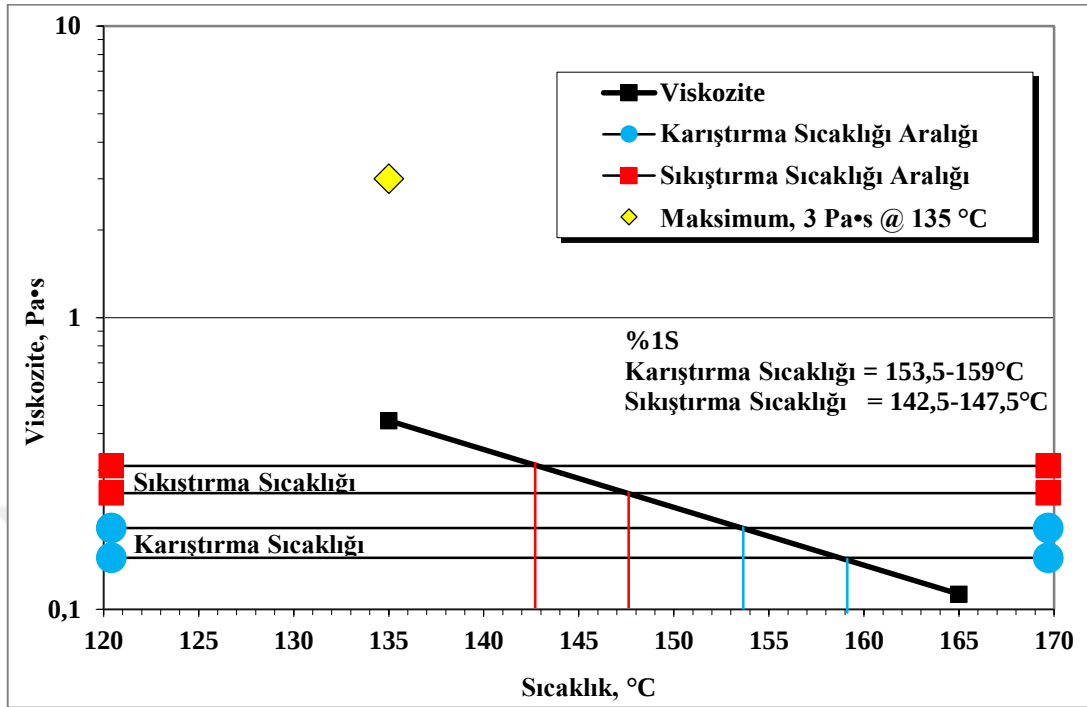


Şekil Ek 2.1. Saf bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

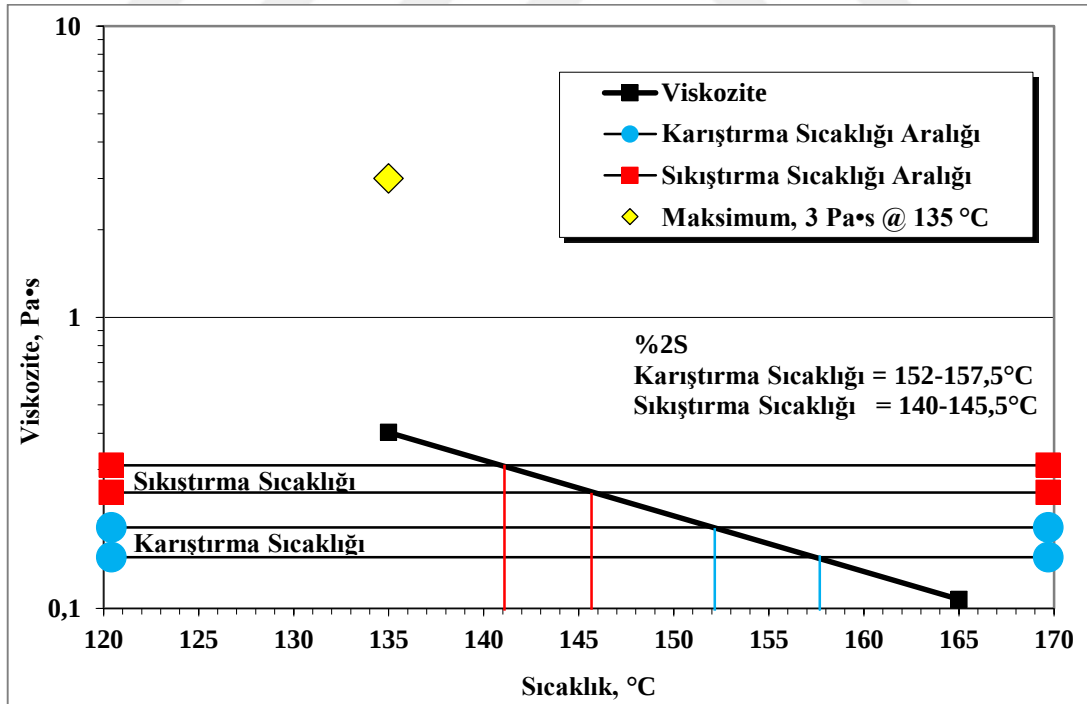


Şekil Ek 2.2. %1PPA katkılı bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

Ek-2 Saf ve modifiyeli bitümlerin karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

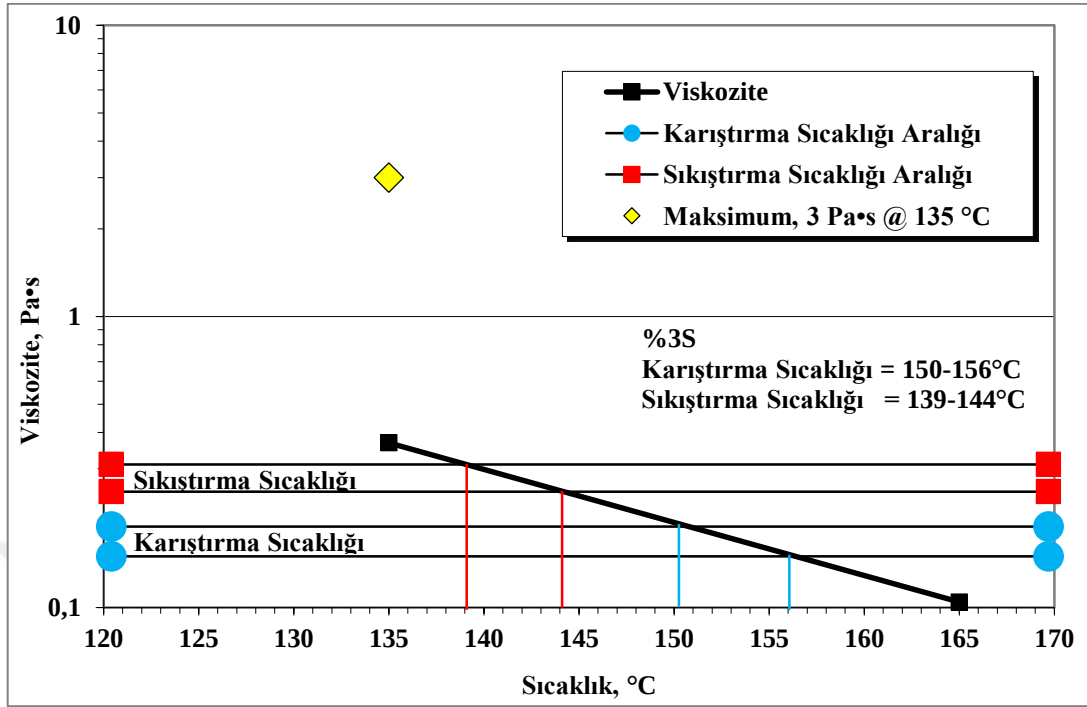


Şekil Ek 2.3. %1S katkılı bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

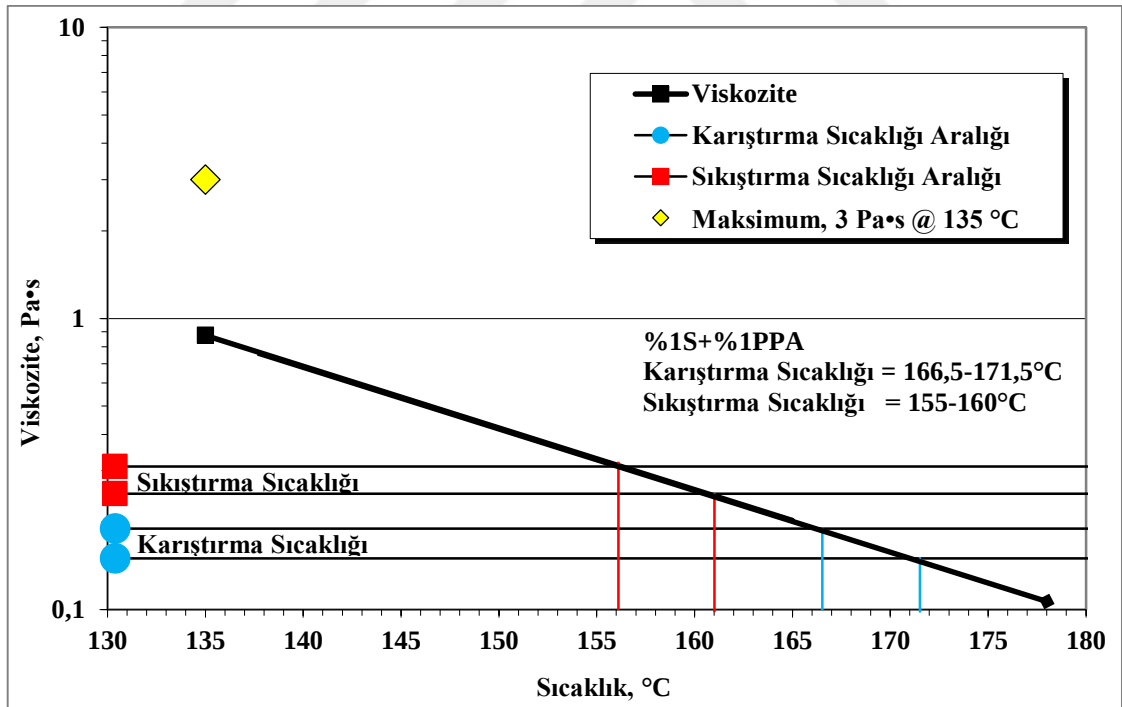


Şekil Ek 2.4. %2S katkılı bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

Ek-2 Saf ve modifiyeli bitümlerin karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

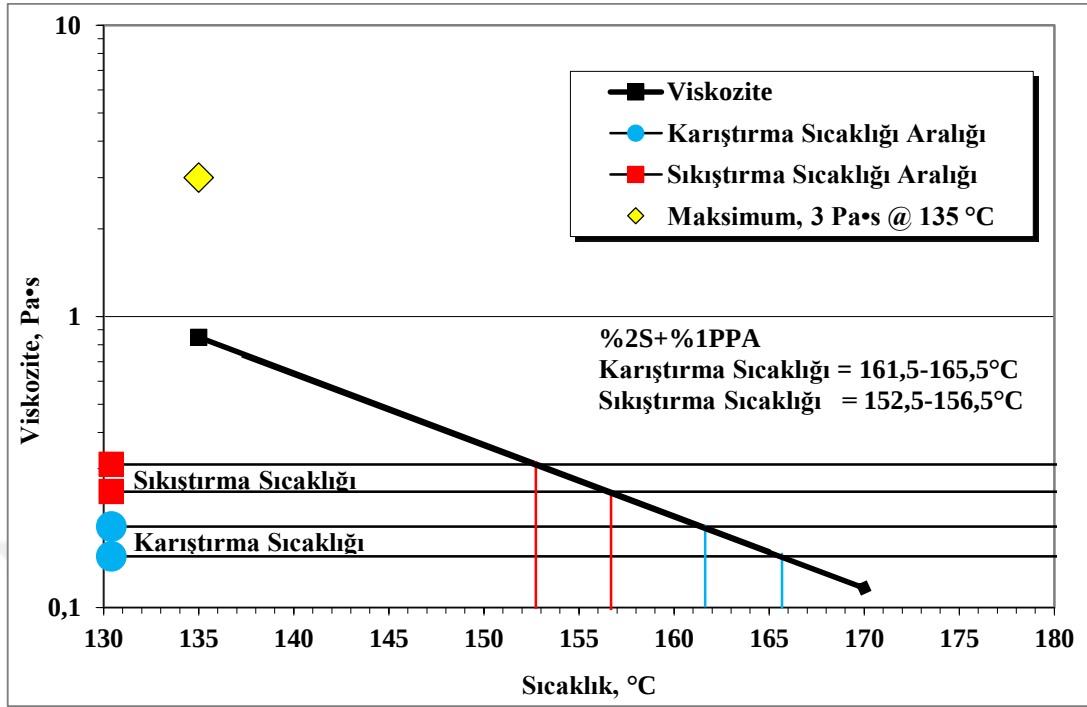


Şekil Ek 2.5. %3S katkılı bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

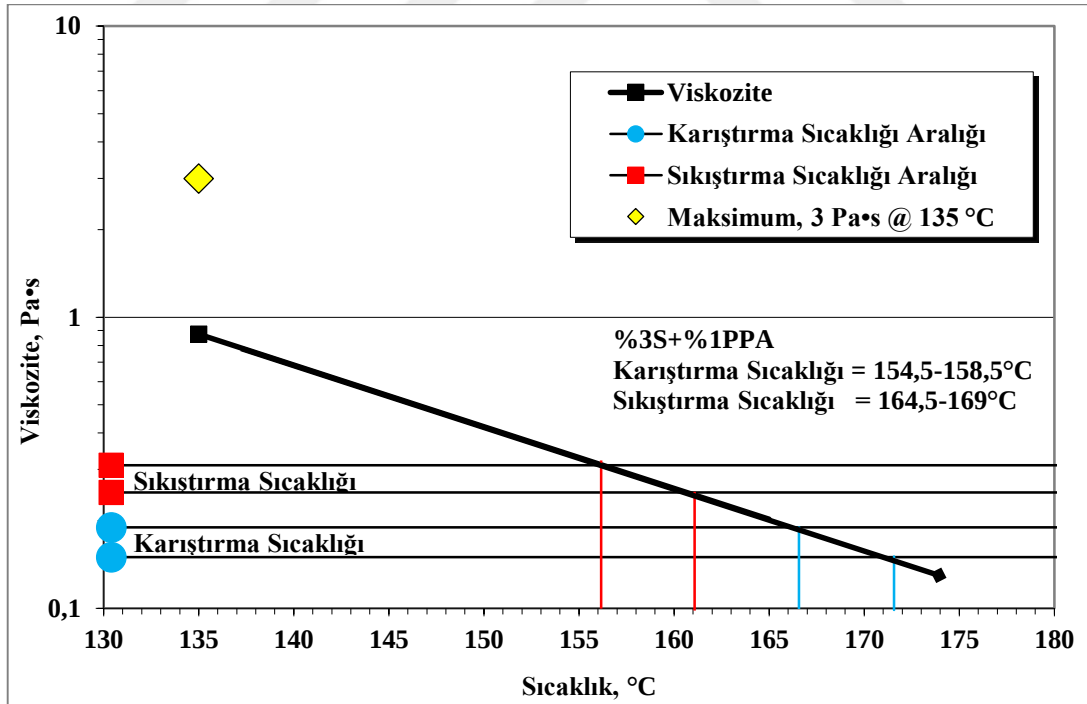


Şekil Ek 2.6. %1S+%1PPA katkılı bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

Ek-2 Saf ve modifiyeli bitümlerin karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

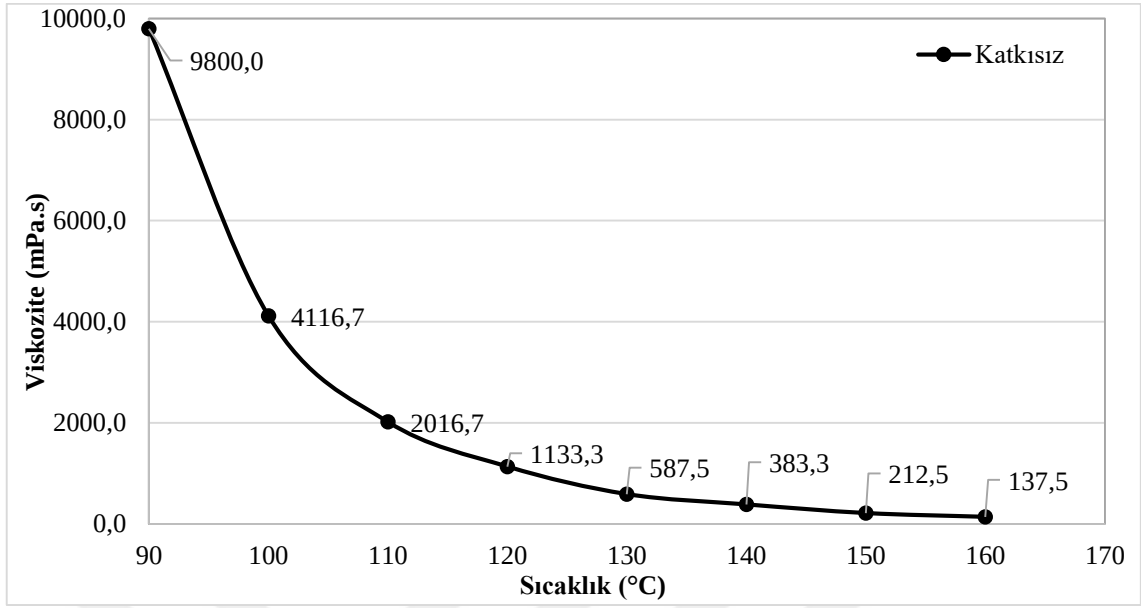


Şekil Ek 2.7. %2S+%1PPA katkılı bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

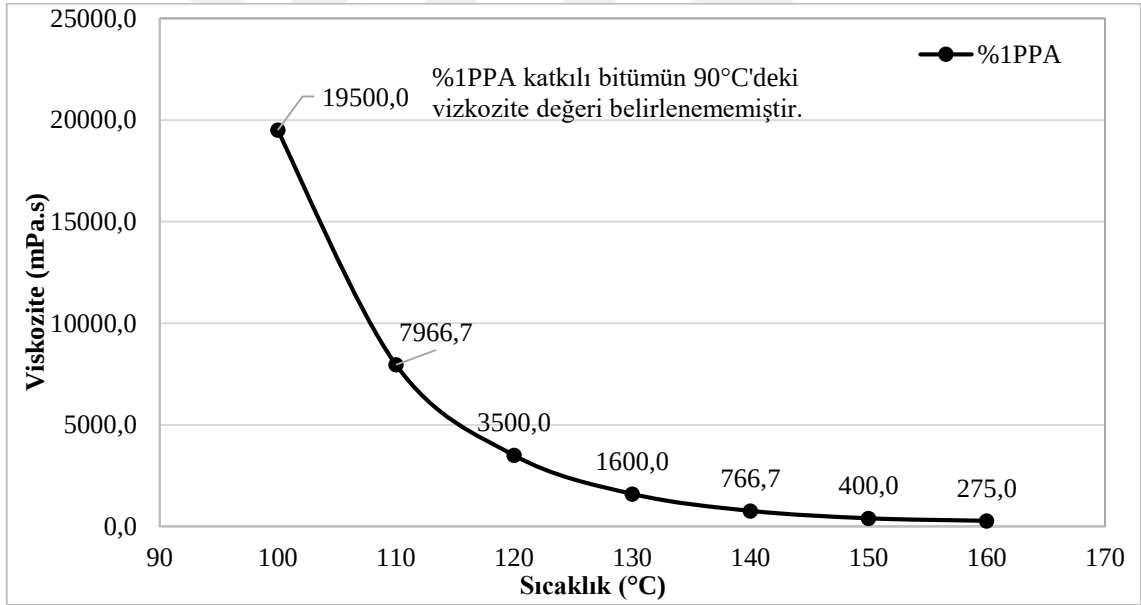


Şekil Ek 2.8. %3S+%1PPA katkılı bitümün RV deney sonucuyla karıştırma sıkıştırma sıcaklığının belirlenmesi

Ek-3 Saf ve modifiyeli bitümlerin sıcaklık-viskozite değişimleri

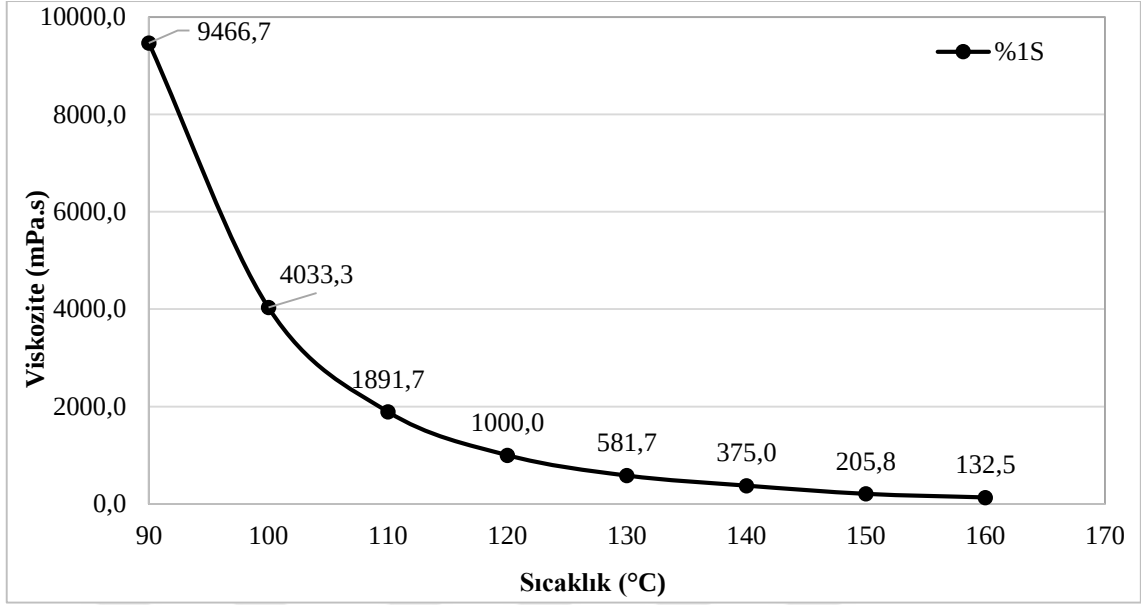


Şekil Ek 3.1. Saf bitümün sıcaklık-viskozite grafiği

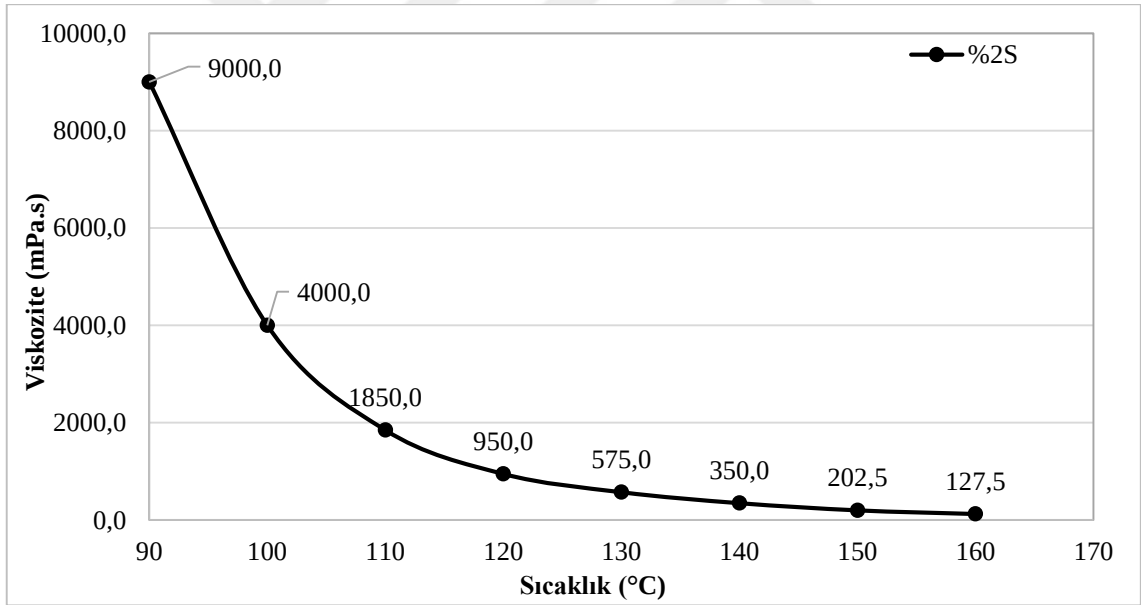


Şekil Ek 3.2. %1PPA katkılı bitümün sıcaklık-viskozite grafiği

Ek-3 Saf ve modifiyeli bitümelerin sıcaklık-viskozite değişimleri

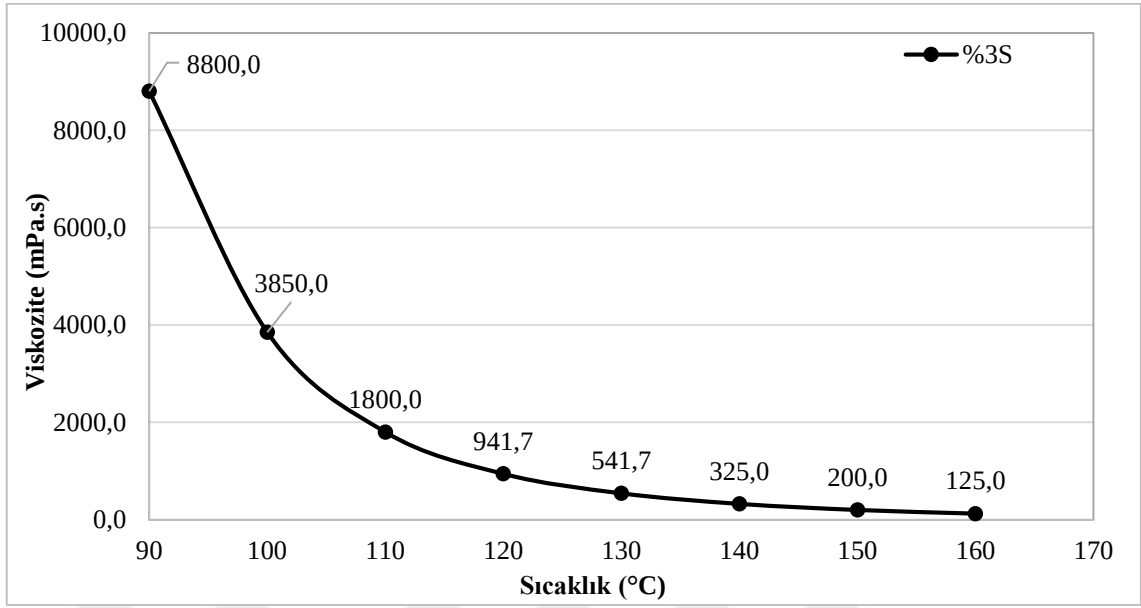


Şekil Ek 3.3. %1S katkılı bitümün sıcaklık-viskozite grafiği

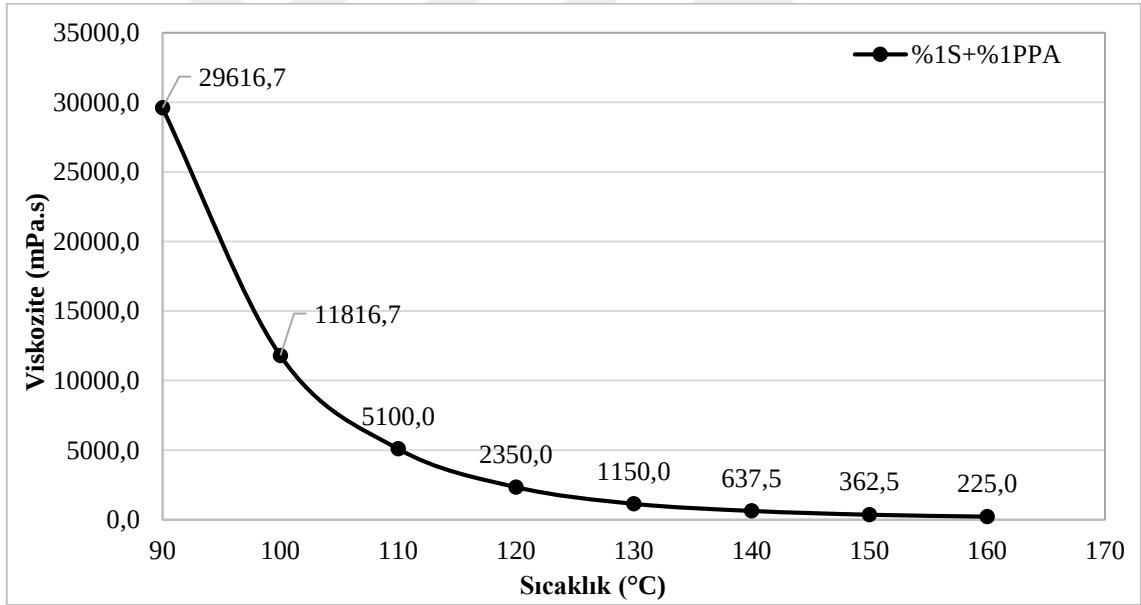


Şekil Ek 3.4. %2S katkılı bitümün sıcaklık-viskozite grafiği

Ek-3 Saf ve modifiyeli bitümlerin sıcaklık-viskozite değişimleri

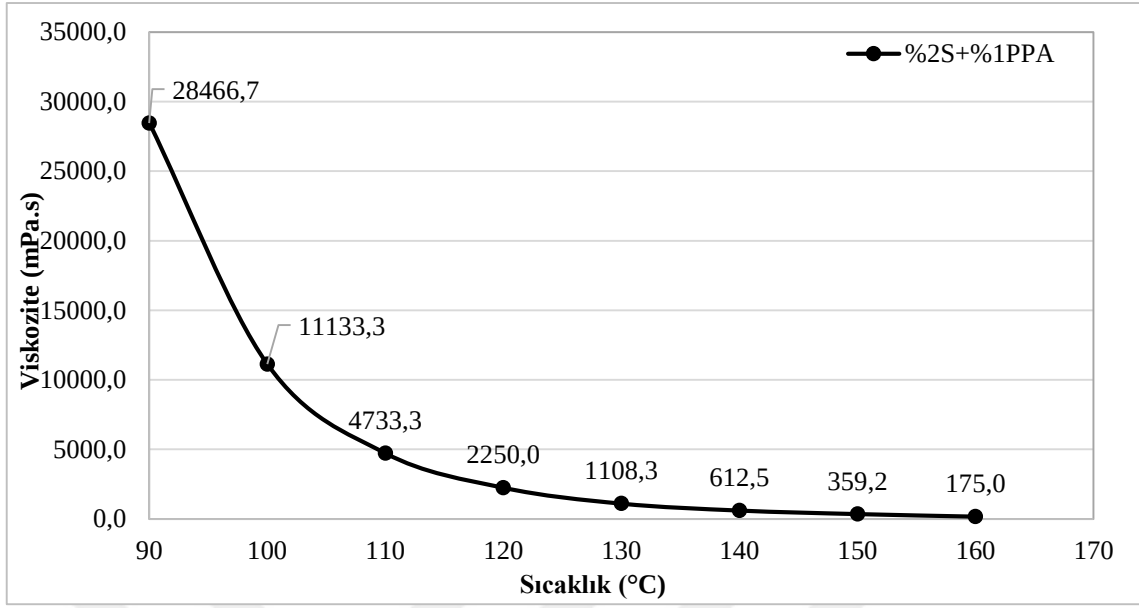


Şekil Ek 3.5. %3S katkılı bitümün sıcaklık-viskozite grafiği

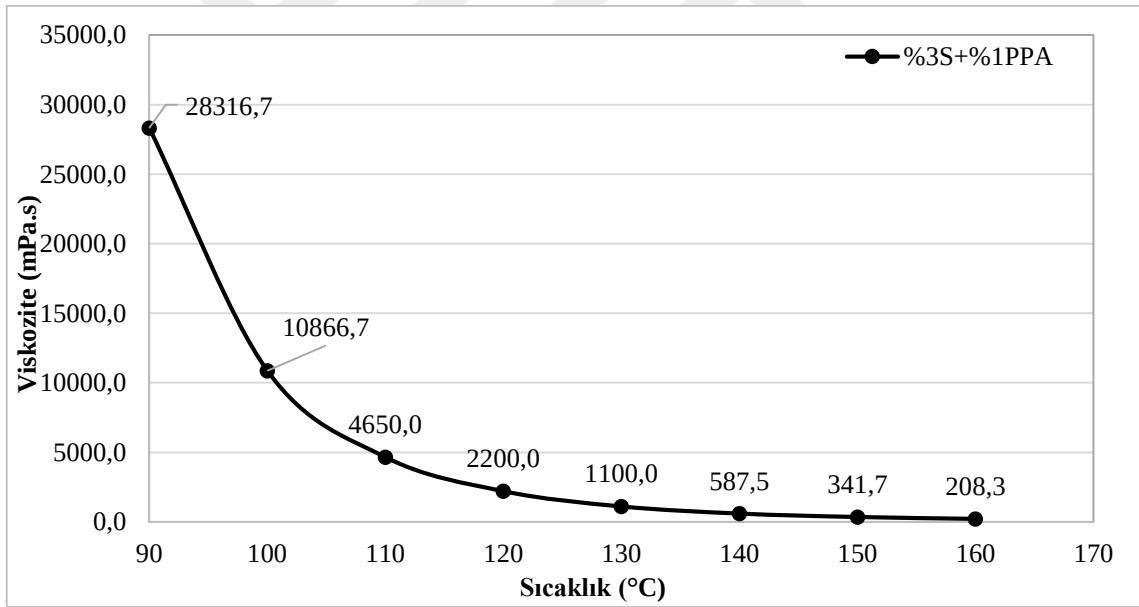


Şekil Ek 3.6. %1S+%1PPA katkılı bitümün sıcaklık-viskozite grafiği

Ek-3 Saf ve modifiyeli bitümlerin sıcaklık-viskozite değişimleri



Şekil Ek 3.7. %2S+%1PPA katkıli bitümün sıcaklık-viskozite grafiği



Şekil Ek 3.8. %3S+%1PPA katkıli bitümün sıcaklık-viskozite grafiği

EK-4 Dönel Viskozimetre Deney Sonuçları

Çizelge 4.1. Dönel viskozimetre deney sonuçları (mPa.s)

Sıcaklık	Katkısız				%1PPA				%1S				%2S			
	1	2	3	ort	1	2	3	ort	1	2	3	ort	1	2	3	ort
90	9800	9700	9900	9800,0					9450	9500	9450	9466,7	9000	9000	9000	9000,0
100	4100	4050	4200	4116,7	19500	19500	19500	19500,0	4000	4050	4050	4033,3	4000	4000	4000	4000,0
110	1950	2000	2100	2016,7	7950	7950	8000	7966,7	1900	1875	1900	1891,7	1850	1850	1850	1850,0
120	1050	1100	1250	1133,3	3500	3500	3500	3500,0	1000	1000	1000	1000,0	950	950	950	950,0
130	587,5	587,5	587,5	587,5	1600	1600	1600	1600,0	582,5	580	582,5	581,7	575	575	575	575,0
135	492,5	492,5	492,5	492,5	1050	1100	1100	1083,3	445	442,5	442,5	443,3	402,5	402,5	402,5	402,5
140	390	380	380	383,3	800	750	750	766,7	375	375	375	375,0	350	350	350	350,0
150	212,5	212,5	212,5	212,5	400	400	400	400,0	205	207,5	205	205,8	202,5	202,5	202,5	202,5
160	137,5	137,5	137,5	137,5	275	275	275	275,0	132,5	132,5	132,5	132,5	127,5	127,5	127,5	127,5
165	129,5	129,5	129,5	129,5	247,5	247,5	247,5	247,5	112,5	112,5	112,5	112,5	107,5	107,5	107,5	107,5

Sıcaklık	%3S				%1S+%1PPA				%2S+%1PPA				%3S+%1PPA			
	1	2	3	ort	1	2	3	ort	1	2	3	ort	1	2	3	ort
90	8800	8800	8800	8800,0	29600	29650	29600	29616,67	28550	28450	28400	28466,7	28300	28350	28300	28316,7
100	3850	3850	3850	3850,0	11800	11850	11800	11816,67	11150	11100	11150	11133,3	10850	10900	10850	10866,7
110	1800	1800	1800	1800,0	5100	5100	5100	5100	4750	4750	4700	4733,3	4650	4650	4650	4650,0
120	937,5	937,5	950	941,7	2350	2350	2350	2350	2250	2250	2250	2250,0	2200	2200	2200	2200,0
130	537,5	537,5	550	541,7	1150	1150	1150	1150	1100	1125	1100	1108,3	1100	1100	1100	1100,0
135	368,5	368	368	368,3	875	875	875	875	850	847,5	847,5	848,3	812,5	812,5	812,5	812,5
140	325	325	325	325,0	637,5	637,5	637,5	637,5	612,5	612,5	612,5	612,5	587,5	587,5	587,5	587,5
150	200	200	200	200,0	362,5	362,5	362,5	362,5	360	362,5	355	359,2	337,5	337,5	350	341,7
160	125	125	125	125,0	225	225	225	225	175	175	175	175,0	212,5	212,5	200	208,3
165	104,6	104,6	104,6	104,6	202,5	202,5	202,5	202,5	155	157,5	155	155,8	212,5	212,5	212,5	184,5

EK-5 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (BSK)
Çizelge 5.1. Katkısız bitümlü sıcak karışımların Marshall test sonuçları

Numune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltme Katsayısı	Düzeltilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
%3,5	1	63,8	63,8	63,8	63,7	63,8	1231,5	728,5	1242,5	2,396	2,565	6,7	15,3	55,6	1121	2,8	0,992	1112,0
	2	64,2	64,2	64,3	64,3	64,3	1236,7	729,5	1244,5	2,401					1146	2,4	0,980	1123,1
	3	64,5	64,2	64,2	64,2	64,3	1233,8	724,2	1242,5	2,380					1250	2,3	0,980	1225,0
	4	64,1	64,1	64,2	64,1	64,1	1231,5	724,7	1239,4	2,393					1190	2	0,985	1172,2
%4,0	1	63,4	63,4	63,4	63,4	63,4	1243,4	736,9	1247,5	2,435	2,545	4,6	14,5	67,7	1075	2,7	1,003	1078,2
	2	63,7	63,8	63,7	63,8	63,8	1231,8	727,3	1234,9	2,427					1205	3,0	0,992	1195,4
	3	63,1	63,1	63,1	63,2	63,1	1223,8	721,9	1227,9	2,419					1146	3,0	1,010	1157,5
	4	63,5	63,5	63,4	63,4	63,5	1230,1	726,3	1233,2	2,427					1250	2,6	1,000	1250,0
%4,5	1	63,2	63,2	63,3	63,3	63,3	1262,6	749,2	1265,1	2,447	2,525	2,8	13,9	79,6	1212	3,6	1,006	1219,3
	2	62,1	62,1	62,1	62,1	62,1	1232,8	732,3	1234,5	2,455					1210	3,1	1,036	1253,6
	3	63,0	63,0	63,5	64,0	63,4	1255,1	746,8	1257,3	2,459					1130	2,9	1,003	1133,4
	4	63,4	63,4	63,4	63,0	63,3	1255,4	747,1	1258,5	2,455					1201	3,3	1,006	1208,2
%5,0	1	62,0	62,0	62,0	62,5	62,1	1243,5	740,3	1244,6	2,466	2,506	1,8	14	87,3	1160	4,1	1,036	1201,8
	2	63,1	63,0	63,5	63,3	63,2	1247,9	740,7	1249,2	2,454					1102	4,0	1,008	1110,8
	3	63,0	63,0	63,0	63,5	63,1	1254,2	746,6	1255,4	2,465					1105	4,0	1,010	1116,1
	4	63,1	62,9	62,8	63,2	63,0	1253,1	746,5	1255,4	2,462					1048	3,8	0,990	1060,6
%5,5	1	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0	1250,1	742,2	1250,7	2,458	2,487	1,2	14,6	91,5	1126	4,8	1,012	1139,5
	2	63,0	63,0	63,0	63,0	63,0	1257,9	746,9	1258,4	2,459					1102	4,6	1,012	1115,2
	3	63,0	63,0	63,1	63,0	63,0	1256,8	745,2	1257,9	2,451					1032	4,9	1,012	1044,4
	4	63,0	62,9	63,1	63,0	63,0	1255,6	744,9	1256,4	2,455					1086	4,9	1,012	1099,0

EK-5 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (BSK)

Çizelge 5.2. %3S Katkılı bitümlü sıcak karışımların Marshall test sonuçları

umune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltme Katsayısı	Düzelilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
%3,5	1	64,2	64,7	64,9	64,3	64,5	1234,5	730,6	1243,5	2,407	2,559	6,1	14,8	59,1	1290	2,6	0,990	1257,8
	2	64,7	64,8	65,1	65,1	64,9	1232,5	731	1243,4	2,405					1176	2,5	0,968	1134,8
	3	65,3	65,3	64,9	64,8	65,1	1231,1	725,1	1236,9	2,405					1310	3	0,965	1244,5
	4	64,4	64,4	64,4	64,6	64,5	1232,4	729,4	1243,4	2,398					1204	3,1	0,975	1173,9
%4,0	1	63,1	63,1	63,2	63,1	63,1	1230,4	727,4	1234,6	2,426	2,539	4,4	14,4	69,6	1321	2,7	1,018	1335,5
	2	64,6	64,5	64,6	64,5	64,6	1236,7	733	1242,1	2,429					1288	2,8	0,980	1251,9
	3	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	1237,4	732,9	1241,1	2,435					1202	3,2	0,990	1192,4
	4	64,1	64,1	63,9	63,9	64,0	1232,2	725,4	1234,2	2,422					1221	2,9	0,985	1200,2
%4,5	1	63,3	62,9	63	63,7	63,2	1242,9	737,9	1244,5	2,453	2,520	2,6	13,8	81,4	1300	3,2	1,008	1310,4
	2	62,2	61,6	61,3	62,2	61,8	1225,1	728,2	1226,5	2,459					1230	3,6	1,043	1282,9
	3	62,7	62,7	63	63,5	63,0	1254	746,8	1255	2,468					1274	3,2	1,013	1290,6
	4	64	63,6	63,5	63,8	63,7	1241,6	735,2	1244	2,440					1220	3,3	0,995	1213,9
%5,0	1	63,3	63,5	64	63,8	63,7	1256,8	747,4	1257,7	2,463	2,500	1,5	14,0	89,2	1216	3	0,995	1209,9
	2	61,1	61,2	62,5	62,2	61,8	1231,6	732,8	1232,6	2,464					1172	4,3	1,043	1222,4
	3	63,1	63,2	63,7	63,8	63,5	1248,6	741,6	1249,9	2,456					1118	4,2	1,000	1118,0
	4	61,7	61,5	62,1	62,2	61,9	1231	732,6	1232,1	2,464					1074	4	1,040	1117,0
%5,5	1	62,2	61,9	62,2	62,8	62,3	1222	725	1222,9	2,454	2,481	1,1	14,7	92,6	1036	3,4	1,030	1067,1
	2	61,7	61	62	62,2	61,7	1218,4	721,7	1219,1	2,450					938	3,9	1,046	981,1
	3	62	62,4	62,2	62,2	62,2	1225,6	727,5	1226,2	2,458					1008	4,6	1,033	1041,3
	4	62,8	62,7	62,3	62,7	62,6	1237,2	733,6	1237,6	2,455					1052	4,6	1,023	1076,2

EK-5 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (Aşıma)

Çizelge 5.3. %3S+%1PPA Katkılı bitümlü sıcak karışımların Marshall test sonuçları

Numune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltme Katsayısı	Düzelilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
%3,5	1	63,7	64,2	64,7	64,2	64,2	1220,6	719,7	1229,3	2,395	2,566	6,6	15,1	56,1	1271	3	0,982	1248,1
	2	63,8	63,4	63,9	64,1	63,8	1215,0	716,7	1222,5	2,402					1230	3	0,992	1220,2
	3	64,2	64,6	64,7	63,9	64,4	1221,1	718,3	1230,3	2,385					1379	2,9	0,978	1348,7
	4	64,8	64,1	63,7	64,5	64,3	1232,7	725,8	1239,1	2,402					1260	3,7	0,980	1234,8
%4,0	1	63,0	63,9	64,3	63,6	63,7	1219,2	720,2	1224,8	2,416	2,546	4,8	14,5	67,0	1416	2,5	0,995	1408,9
	2	65,4	63,9	63,4	63,9	64,2	1248,8	737,6	1253,0	2,423					1342	3,7	0,983	1319,2
	3	62,8	63,9	64,2	62,9	63,5	1232,3	729,7	1236,0	2,434					1440	3,5	1,000	1440,0
	4	64,0	62,7	62,9	63,9	63,4	1219,6	721,0	1224,7	2,421					1380	3	1,003	1384,1
%4,5	1	63,9	63,1	63,2	64,2	63,6	1249,4	740,6	1252,0	2,443	2,525	3,2	13,3	76,2	1442	3,9	0,998	1439,1
	2	63,4	63,6	62,7	62,6	63,1	1234,0	731,9	1236,4	2,446					1340	3,6	1,010	1353,4
	3	62,5	63,4	63,7	62,6	63,1	1227,2	728,3	1229,0	2,451					1296	3,2	1,010	1309,0
	4	63,2	63,1	64,0	64,1	63,6	1235,4	732,0	1238,1	2,441					1200	4	0,998	1197,6
%5,0	1	62,1	63,1	62,8	61,5	62,4	1238,1	735,3	1239,3	2,457	2,506	1,9	14,2	86,3	1196	4,1	1,028	1229,5
	2	62,4	63,4	63,6	62,5	63,0	1242,7	737,4	1243,3	2,456					1256	3,7	1,013	1272,3
	3	63,2	63,4	62,2	62,2	62,8	1246,0	739,5	1246,7	2,457					1148	4,1	1,018	1168,7
	4	62,5	63,7	62,5	62,0	62,7	1232,2	732,0	1232,8	2,460					1208	4,1	1,020	1232,2
%5,5	1	63,8	62,5	62,4	62,7	62,9	1238,4	734,3	1239,1	2,453	2,487	1,5	14,8	90,2	1192	4,3	1,015	1209,9
	2	64,0	63,0	62,9	63,9	63,5	1258,4	745,1	1258,8	2,450					1042	4,8	1,000	1042,0
	3	60,9	61,4	62,3	61,6	61,6	1220,8	722,9	1221,6	2,448					994	4,3	1,049	1042,7
	4	62,5	61,9	62,6	63,4	62,6	1236,8	732,7	1237,0	2,453					1086	4,2	1,023	1111,0

EK-5 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (BSK)
Çizelge 5.4. %Optimum bitüm oranıyla hazırlanan Marshall numunelerinin fiziksel özellikleri

Numune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltilme Katsayısı	Düzeltilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
Saf	1	62,8	64,1	63,8	62,7	63,4	1241,8	737,1	1245	2,445	2,533	3,6	14,2	74,3	1184	2,6	1,003	1187,6
	2	62,6	61,8	63,7	63,5	62,9	1223,6	725,1	1227,3	2,436					1194	2,5	1,016	1213,1
	3	64,5	65	63,9	63,8	64,3	1244	737	1247,2	2,438					1194	3	0,980	1170,1
	4	63	62,8	64	63,7	63,4	1239,1	743,3	1250,4	2,444					1164	3,1	1,003	1167,5
%3S	1	62,3	63	63,7	62,7	62,9	1236,7	733,8	1239,8	2,444	2,529	3,6	14,3	74,7	1202	3,4	1,016	1221,2
	2	63,6	64,2	63,2	62,8	63,5	1242,5	736,8	1245,2	2,444					1326	3,7	1,000	1326,0
	3	62,6	64	63,7	62,6	63,2	1230,3	726,9	1234,5	2,424					1130	3,2	1,006	1136,8
	4	63,5	62,4	63,2	63,8	63,2	1230,4	729,7	1234,2	2,439					1252	3,3	1,006	1259,5
%3S +%1PPA	1	63,7	63,7	62,5	62,7	63,2	1235,9	731,2	1238	2,439	2,535	3,8	14,3	73,5	1356	3,2	1,006	1364,1
	2	62,9	62,1	62,7	63,9	62,9	1229,7	728,1	1232,5	2,438					1378	3,6	1,016	1400,0
	3	64	63	63	63,8	63,5	1230	727,1	1233,1	2,431					1338	3,8	1,000	1338,0
	4	62,8	64,4	63,6	62,8	63,4	1236,8	733	1238,3	2,448					1408	3,3	1,003	1412,2

EK-6 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (Taş Mastik Asfalt)**Çizelge 6.1.** Saf bitümlü (TMA) karışımların Marshall test sonuçları

Numune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltilme Katsayısı	Düzeltilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
%5,0	1	66,6	65,3	65,1	66,7	65,9	1129	643,7	1146,9	2,244	2,440	8,9	19,0	53,4	606	2,9	0,945	572,7
	2	64,7	66,2	64	63,5	64,6	1126,1	645,1	1146,1	2,248					636	2,8	0,973	618,8
	3	65,6	65,2	65,6	66,4	65,7	1130,6	629,6	1149,1	2,176					726	3,1	0,949	689,0
	4	67,1	68,8	67,1	66,4	67,4	1130	643,5	1150,7	2,228					662	3	0,913	604,4
%5,5	1	63,5	63,2	64,4	64,9	64,0	1115,8	632	1124,3	2,267	2,422	5,9	17,4	66,4	656	3,3	0,988	648,1
	2	64,3	65,1	65,8	64,7	65,0	1143,8	652,8	1150,5	2,298					738	3,2	0,963	710,7
	3	65,8	65,1	65,8	66,4	65,8	1135,1	646,2	1144,1	2,280					670	3,1	0,947	634,5
	4	64,4	64,2	65,6	65,2	64,9	1135,1	644,8	1143,4	2,277					622	3,4	0,965	600,2
%6,0	1	64,7	63,7	65,4	65,8	64,9	1144,9	651,8	1148,5	2,305	2,405	4,5	17,3	73,8	628	3,6	0,965	606,0
	2	64,4	63,8	64,5	64,3	64,3	1145,9	650	1150,5	2,290					570	3,1	0,980	558,6
	3	64,4	65,5	65,5	64,8	65,1	1145,2	652,3	1150,9	2,297					620	3,9	0,960	595,2
	4	63,4	63,8	65	63,9	64,0	1140,6	648,5	1145,7	2,294					572	3,4	0,988	565,1
%6,5	1	63,2	63,1	64,1	64,1	63,6	1148,3	654,1	1150,9	2,311	2,387	3,4	17,4	80,5	526	3,7	0,998	524,9
	2	64,5	64,2	63,1	63,7	63,9	1143,6	650,7	1146,2	2,308					440	3,6	0,990	435,6
	3	64,5	65	63,5	63,8	64,2	1145,2	651,1	1148,5	2,302					460	3,6	0,983	452,2
	4	65,4	65,2	63,3	63,7	64,4	1141,5	648,5	1144,2	2,303					490	3,8	0,978	479,2
%7,0	1	64,1	63,6	63,3	64	63,8	1148,8	652,8	1151,5	2,304	2,370	2,5	17,6	86,1	458	4,3	0,993	454,8
	2	64,3	65,1	64,3	64,2	64,5	1166,5	662,8	1168,2	2,308					520	4,4	0,975	507,0
	3	63,2	64	64,7	63,7	63,9	1151,8	657,8	1153,1	2,325					460	4,5	0,990	455,4
	4	65	63,9	63,2	65,3	64,4	1154,9	657,2	1157,1	2,310					470	4,2	0,978	459,7
%7,5	1	62,3	63,5	64	62,7	63,1	1136,3	646	1138,4	2,308	2,353	1,9	18,2	89,5	478	4,1	1,010	482,8
	2	63,1	62,4	62,4	62,8	62,7	1129,1	641,3	1130,2	2,309					478	4,6	1,020	487,6
	3	64,1	63,8	65	64,7	64,4	1188,5	674,3	1189,5	2,307					495	4,6	0,978	484,1
	4	63,1	61,9	62,7	64	62,9	1142,1	648,5	1143,4	2,308					480	4,7	1,015	487,2

EK-6 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (Taş Mastik Asfalt)
Çizelge 6.2. %3S Katkılı (TMA) karışımların Marshall test sonuçları

Numune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltilme Katsayısı	Düzeltilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
%5,0	1	65,5	66,6	67,3	65,7	66,3	1127,9	637,5	1146	2,218	2,425	8,1	18,9	56,9	682	2,8	0,938	639,7
	2	64,6	65,5	66,4	64,9	65,4	1132,2	643,4	1150,7	2,232					664	2,6	0,954	633,5
	3	67,5	66	65,8	66	66,3	1128,3	640,1	1144,1	2,239					632	3,0	0,938	592,8
	4	65,4	66,4	66,8	65,7	66,1	1130,2	638,2	1146,6	2,223					642	3,2	0,941	604,1
%5,5	1	65,3	65,3	64,2	64,1	64,7	1147,7	649,1	1155,8	2,265	2,407	5,9	18,0	67,0	794	3,3	0,970	770,2
	2	64,5	65,5	65,6	64,4	65,0	1126,6	639,3	1138,1	2,259					694	3,4	0,963	668,3
	3	65,2	64,9	65,9	66,1	65,5	1130,2	639,3	1140,3	2,256					628	3,1	0,953	598,5
	4	64,4	63,8	64,9	65,2	64,6	1144,4	650,5	1153,1	2,277					702	3,4	0,973	683,0
%6,0	1	63,6	63,6	64,3	64,5	64,0	1130,9	639,8	1137,6	2,272	2,390	4,2	17,5	76,0	684	3,8	0,988	675,8
	2	64,6	64,8	64,6	63,8	64,5	1162,3	659,1	1165,8	2,294					662	3,6	0,975	645,5
	3	63	63,6	63,9	63,1	63,4	1143	649,3	1147	2,297					660	3,5	1,003	662,0
	4	63,6	63,4	62,4	62,7	63,0	1137,3	645	1140,2	2,297					710	3,5	1,013	719,2
%6,5	1	63,7	64	64	64,2	64,0	1145,7	650,5	1148,2	2,302	2,373	3,3	17,8	81,3	620	3,6	0,988	612,6
	2	63,4	64,3	64,5	63,9	64,0	1134,9	640,6	1137,4	2,284					566	3,5	0,988	559,2
	3	64	63	63	63	63,3	1132,9	641,8	1136	2,292					508	4,0	1,005	510,5
	4	63,9	63,9	63,7	64	63,9	1152,7	653,5	1155,2	2,298					608	3,7	0,990	601,9
%7,0	1	64,3	63	63,4	64,5	63,8	1158,1	657,6	1159,6	2,307	2,356	2,2	17,8	87,9	602	4,0	0,993	597,8
	2	62,7	63	63,8	62,8	63,1	1159,3	658,5	1160,2	2,311					506	4,4	1,010	511,1
	3	63,8	63,4	63,6	64,4	63,8	1148,6	650	1149,9	2,298					546	3,7	0,993	542,2
	4	62,9	63,1	63,9	64,2	63,5	1150,9	652,8	1152,1	2,305					594	3,8	1,000	594,0
%7,5	1	62,3	63,8	63,2	62	62,8	1138,6	644,6	1140,1	2,298	2,340	1,8	18,6	90,1	544	4,4	1,018	553,8
	2	64,2	64,8	63,2	63	63,8	1149,9	651,3	1151,1	2,301					486	4,7	0,993	482,6
	3	61,9	63,2	63,7	62,4	62,8	1147,2	648,2	1148,1	2,295					510	4,8	1,018	519,2
	4	63,7	62,4	61,7	62,8	62,7	1130,7	639,4	1132	2,295					490	4,1	1,020	499,8

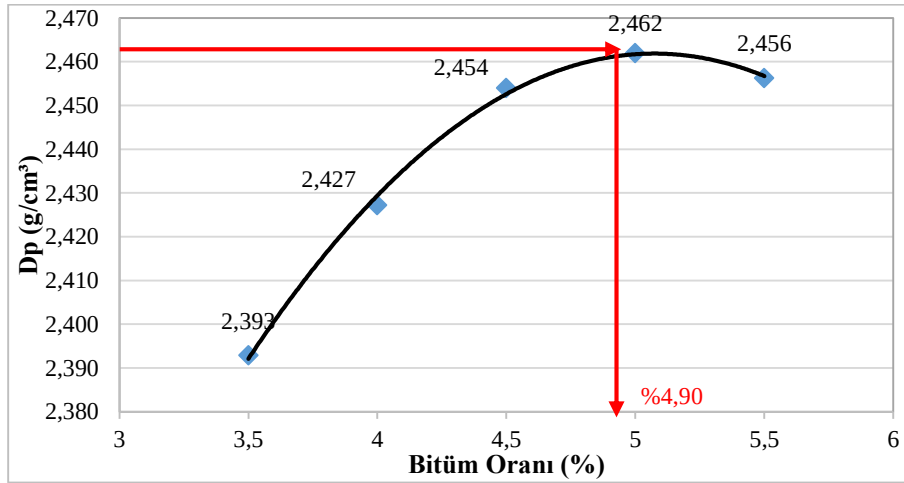
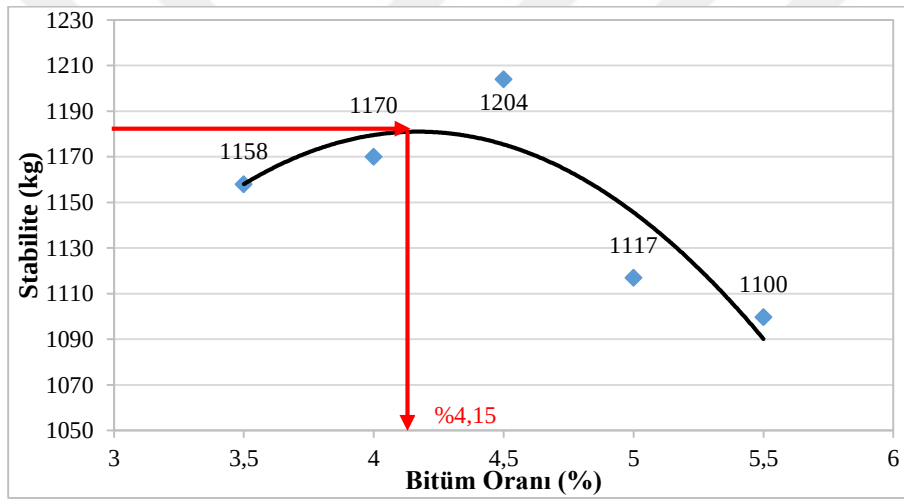
EK-6 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (Taş Mastik Asfalt)**Çizelge 6.3. %3S +1PPA katkılı (TMA) karışımların Marshall test sonuçları**

Numune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltilme Katsayısı	Düzeltilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
%5,0	1	65,9	66,1	65,0	64,8	65,5	1111,1	634,6	1128,0	2,252	2,430	7,7	18,3	58,0	712	3,1	0,953	678,5
	2	65,1	64,5	64,3	65,1	64,8	1111,3	634,0	1128,5	2,247					730	3,2	0,968	706,6
	3	65,0	64,8	65,3	65,5	65,2	1119,8	634,1	1135,0	2,236					720	3,1	0,958	689,8
	4	66,0	65,5	65,3	66,3	65,8	1127,2	640,2	1144,2	2,237					696	2,8	0,947	659,1
%5,5	1	65,2	64,4	64,0	64,6	64,6	1140,6	649,8	1148,0	2,289	2,413	5,9	17,8	66,7	774	3,3	0,973	753,1
	2	66,1	65,1	66,0	66,5	65,9	1136,0	647,1	1145,8	2,278					750	3,6	0,945	708,8
	3	65,2	67,7	66,1	65,0	66,0	1134,8	641,1	1146,7	2,244					740	3,4	0,943	697,8
	4	65,9	65,0	64,2	64,6	64,9	1147,6	651,6	1157,2	2,270					732	3,2	0,965	706,4
%6,0	1	63,5	63,7	62,9	62,8	63,2	1122,7	635,2	1126,6	2,285	2,395	4,4	17,5	74,7	760	3,4	1,008	766,1
	2	63,6	64,6	64,5	63,3	64,0	1147,5	651,9	1152,4	2,293					760	3,4	0,988	750,9
	3	65,1	64,3	63,9	64,4	64,4	1149,5	651,3	1153,5	2,289					751	3,2	0,978	734,5
	4	65,0	64,0	63,5	64,0	64,1	1133,3	642,8	1138,0	2,289					736	3,8	0,985	725,0
%6,5	1	65,3	64,2	64,5	65,8	65,0	1160,2	657,5	1162,9	2,296	2,379	3,4	17,6	80,8	704	3,6	0,963	678,0
	2	64,1	63,2	63,6	64,5	63,9	1145,5	650,9	1148,8	2,301					720	3,8	0,990	712,8
	3	63,9	64,6	63,3	63,3	63,8	1153,9	653,7	1156,5	2,295					712	3,4	0,993	707,0
	4	61,3	62,2	62,8	61,3	61,9	1120,7	635,9	1122,6	2,303					734	3,9	1,040	763,4
%7,0	1	63,3	62,8	62,0	62,5	62,7	1157,9	658,4	1158,7	2,314	2,362	2,1	17,6	88,0	688	3,9	1,020	701,8
	2	63,0	63,9	63,9	62,4	63,3	1148,6	652,1	1149,8	2,308					652	3,9	1,005	655,3
	3	65,2	64,6	64,4	65,0	64,8	1173,5	666,3	1175,0	2,307					642	3,8	0,968	621,5
	4	64,0	63,1	63,6	64,0	63,7	1159,4	660,4	1160,4	2,319					678	3,4	0,995	674,6
%7,5	1	64,6	64,1	63,4	64,0	64,0	1159,3	657,6	1160,6	2,305	2,345	1,8	18,3	90,3	660	3,7	0,988	652,1
	2	64,2	63,0	63,0	64,4	63,7	1170,9	664,8	1171,7	2,310					660	3,9	0,995	656,7
	3	62,2	63,0	61,5	63,2	62,5	1151,6	651,6	1152,7	2,298					656	4,6	1,025	672,4
	4	63,1	63,2	62,2	62,9	62,9	1147,4	650,0	1148,9	2,300					570	4,1	1,015	578,6

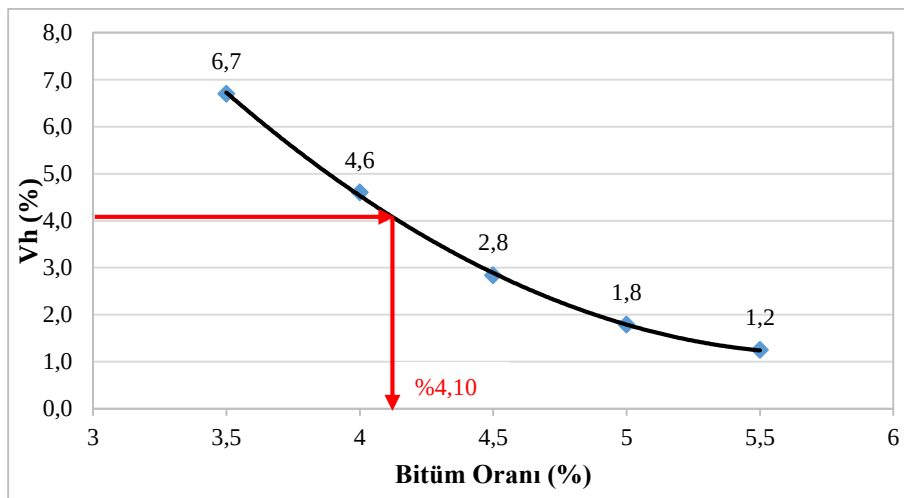
EK-6 Marshall Numunelerinin Fiziksel Özellikleri ve Deney Sonuçları (Taş Mastik Asfalt)
Çizelge 6.4. %Optimum bitüm oranıyla hazırlanan Marshall numunelerinin fiziksel özellikleri

Numune	Yükseklik (mm)					Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	VMA (%)	Vf (%)	Stabilite (kg)	Akma (mm)	Düzeltilme Katsayısı	Düzeltilmiş Stabilite	
	h1	h2	h3	h4	hort	Havada	Suda	DYK										
Saf	1	63,7	62,9	63,8	64,3	63,7	1136,1	642,1	1139,2	2,285	2,387	3,8	17,8	78,7	630	3,9	0,995	626,85
	2	62,0	63,3	64,3	63,7	63,3	1132,5	639,8	1135,0	2,287					480	3,7	1,006	482,88
	3	63,0	62,1	61,4	61,7	62,1	1128,0	641,7	1129,7	2,311					500	3,6	1,036	518,00
	4	64,3	63,9	64,5	65,3	64,5	1164,2	660,0	1165,5	2,303					610	3,8	0,975	594,75
%3S	1	63,3	62,4	61,6	61,9	62,3	1140,4	646,9	1138,9	2,318	2,371	3,0	17,6	82,8	620	3,7	1,031	639,22
	2	63,0	63,6	63,1	62,5	63,1	1136,3	644,2	1138,9	2,297					598	3,7	1,011	604,58
	3	64,3	64,3	62,5	62,6	63,4	1147,5	649,8	1149,6	2,296					568	3,9	1,003	569,70
	4	64,0	64,3	62,9	63,2	63,6	1147,7	648,2	1150,2	2,286					510	4,1	0,998	508,98
%3S +%1PPA	1	63,9	65,2	64,3	63,5	64,2	1167,3	663,8	1168,8	2,311	2,376	3,3	17,8	81,2	686	3,6	0,980	672,28
	2	62,2	63,2	64,3	63,2	63,2	1144,8	647,6	1146,4	2,295					640	3,9	1,008	645,12
	3	64,6	63,4	63,6	65,0	64,2	1142,7	644,3	1145,1	2,282					582	3,9	0,982	571,52
	4	64,2	65,1	63,4	63,3	64,0	1164,8	660,0	1166,8	2,298					686	3,8	0,988	677,77

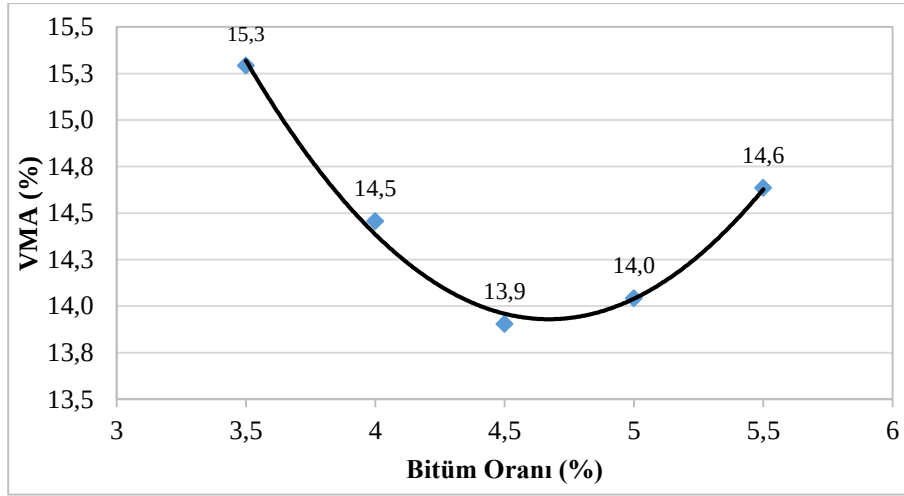
EK-7 BSK Marshall Test Sonuç Grafikleri (Saf Bitüm)

Şekil Ek 7.1. Saf bitüm oranı- D_p (Birim hacim ağırlık) (g/cm^3)

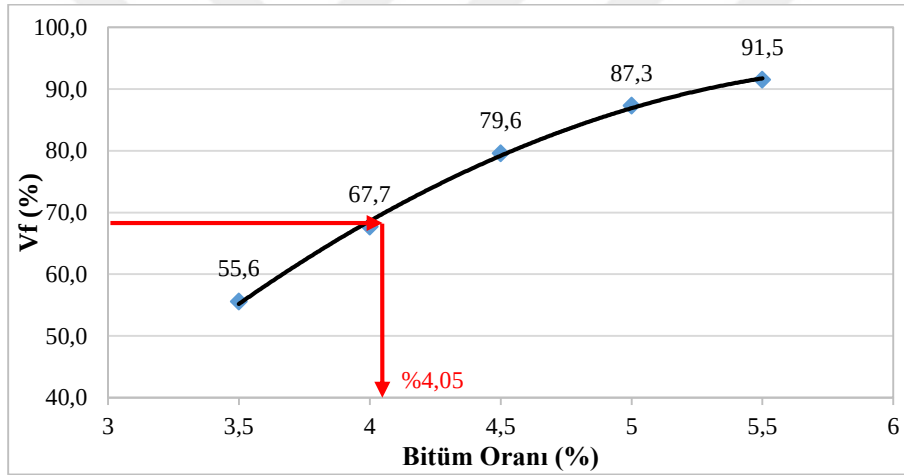
Şekil Ek 7.2. Saf bitüm oranı - Stabilite (kg)

Şekil Ek 7.3. Saf bitüm oranı - V_h (Hava boşluğu) (%)

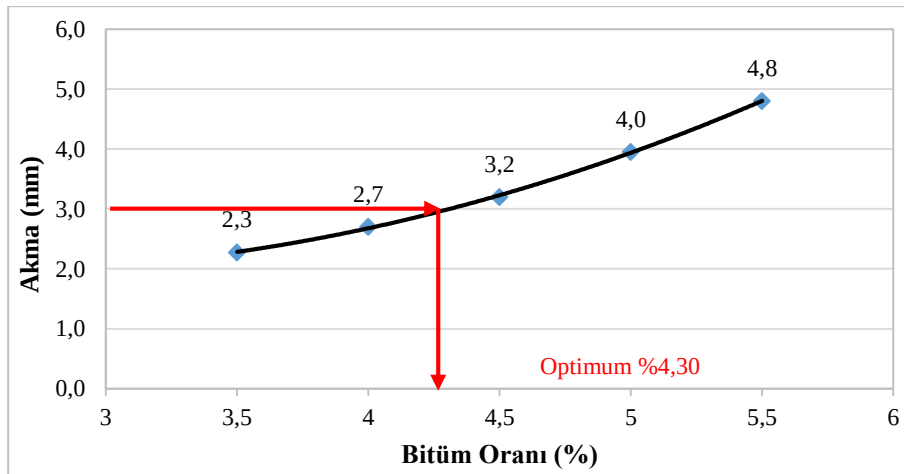
EK-7 BSK Marshall Test Sonuç Grafikleri (Saf Bitüm)



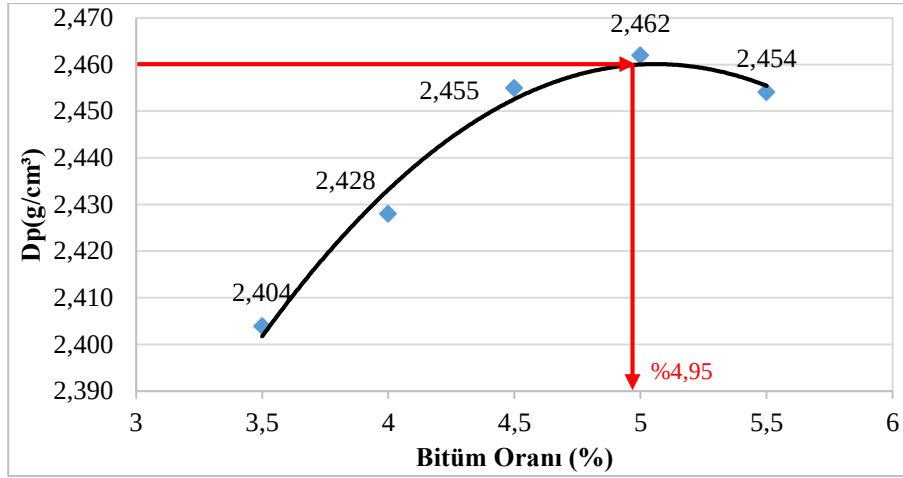
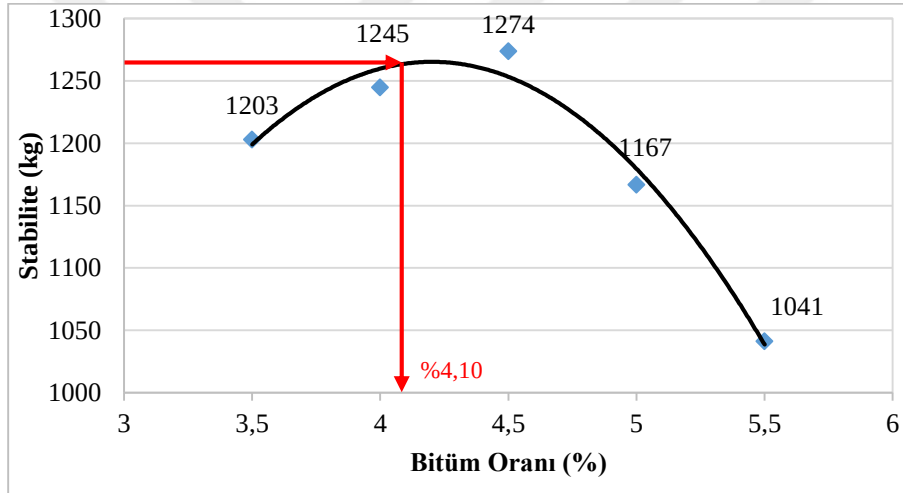
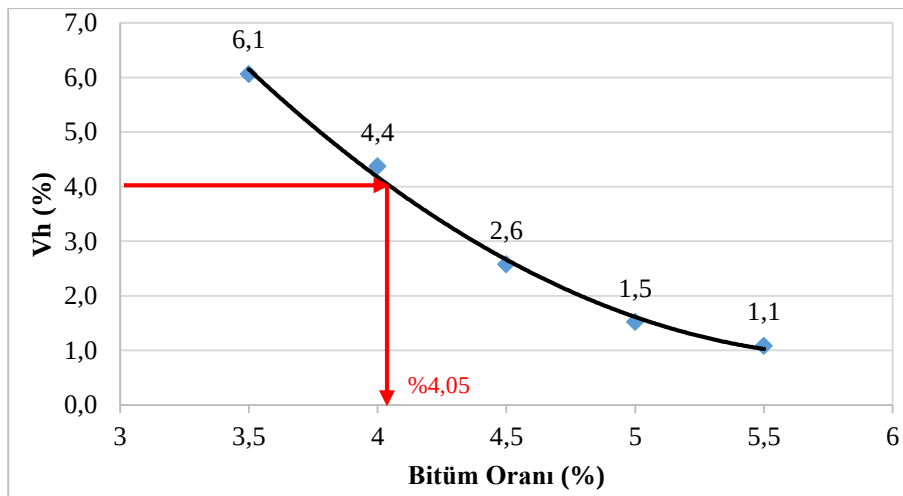
Şekil Ek 7.4. Saf bitüm oranı - VMA (Agregalar arası boşluk) (%)

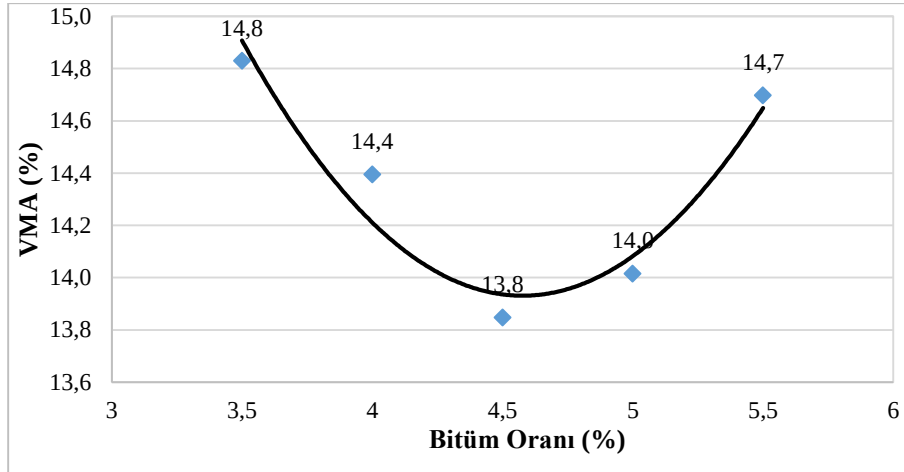
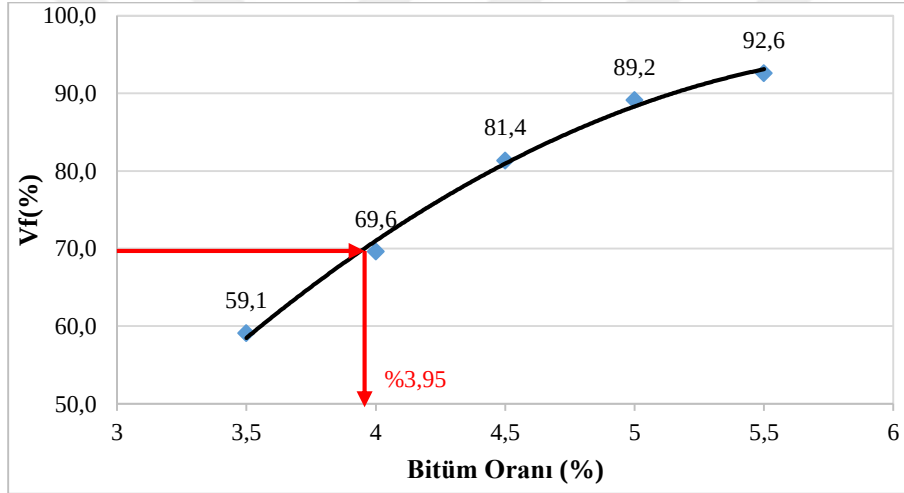
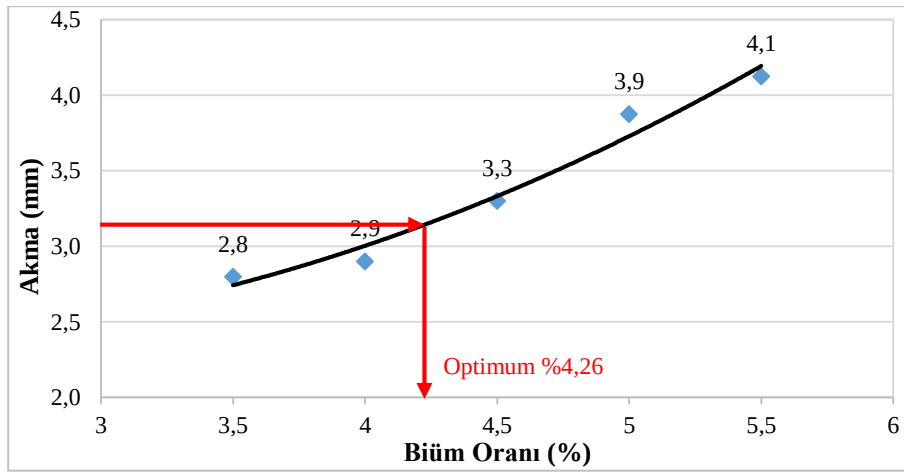


Şekil Ek 7.5. Saf bitüm oranı - Vf (Asfaltla dolu boşluk) (%)

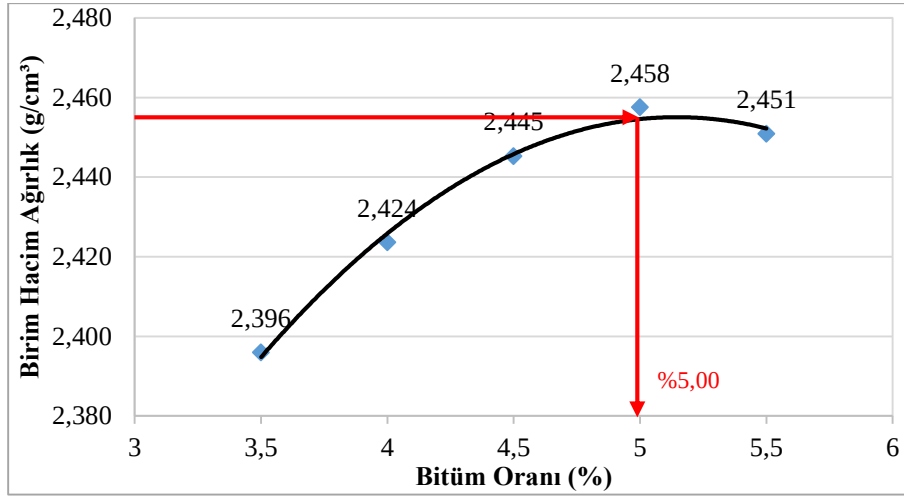


Şekil Ek 7.6. Saf bitüm oranı - Akma (mm)

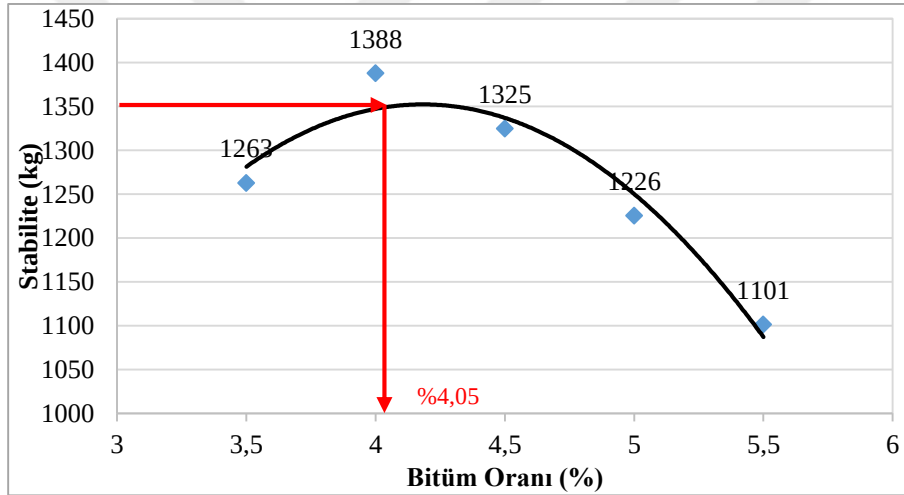
EK-7 BSK Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S Katkılı Bitüm)

Şekil Ek 7.7. %3 modifiyeli bitüm oranı- D_p (Birim hacim ağırlık) (g/cm^3)

Şekil Ek 7.8. %3S modifiyeli bitüm oranı - Stabilite (kg)

Şekil Ek 7.9. %3S modifiyeli bitüm oranı - V_h (Hava boşluğu) (%)

EK-7 BSK Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S Katkılı Bitüm)

Şekil Ek 7.10. %3S modifiyeli bitüm oranı - VMA (Agregalar arası boşluk) (%)

Şekil Ek 7.11. %3S modifiyeli bitüm oranı - Vf (Asfaltla dolu boşluk) (%)

Şekil Ek 7.12. %3S modifiyeli bitüm oranı - Akma (mm)

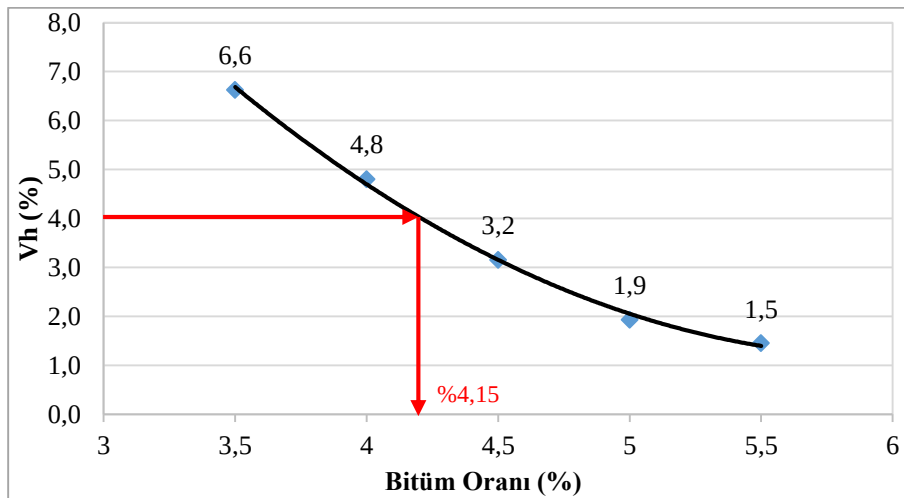
EK-7 BSK Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S+%1PPA Katkılı Bitüm)



Şekil Ek 7.13. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - Dp (Birim hacim ağırlık) (g/cm³)

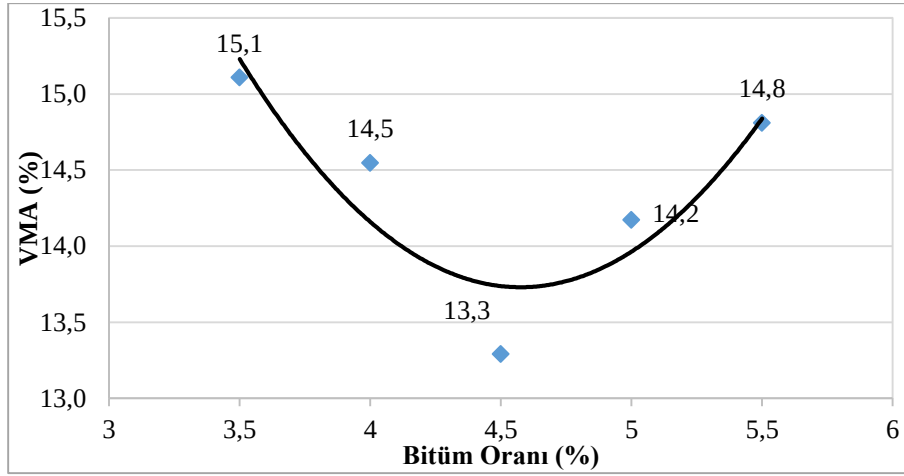


Şekil Ek 7.14. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - Stablite (kg)

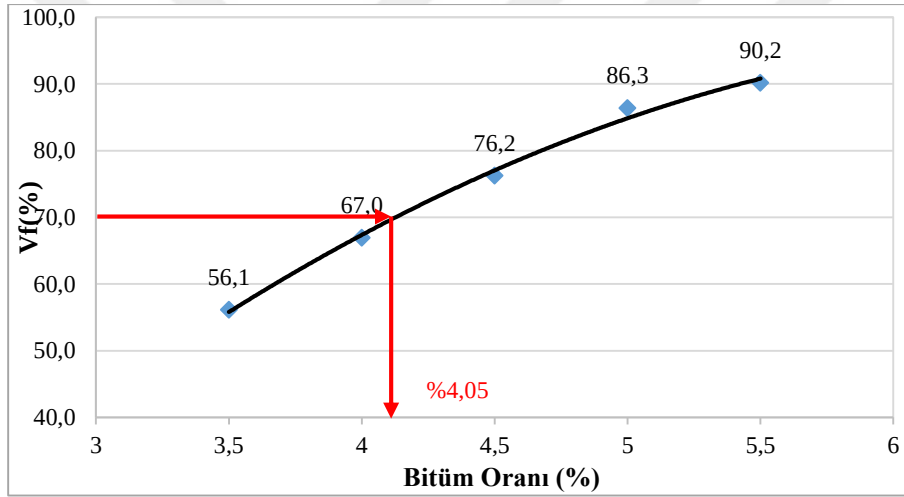


Şekil Ek 7.15. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - Vh (Hava boşluğu) (%)

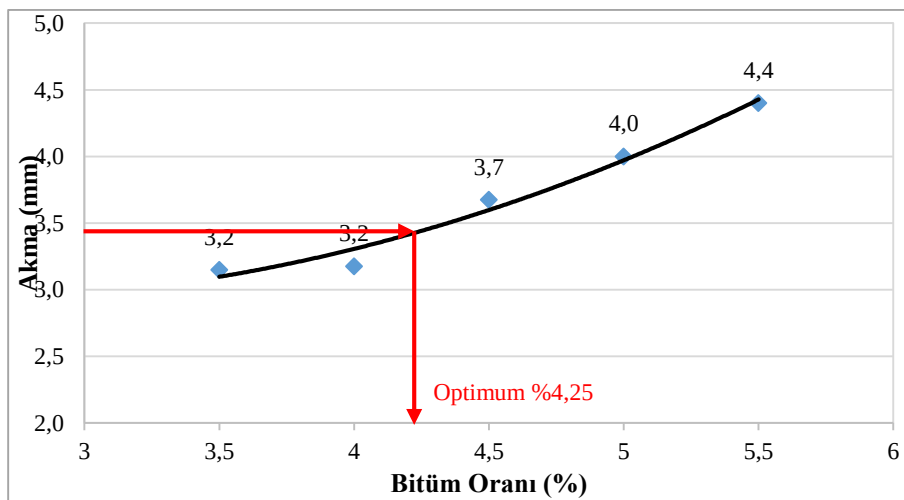
EK-7 BSK Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S+%1PPA Katkılı Bitüm)



Şekil Ek 7.16. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - VMA (Agregalar arası boşluk) (%)

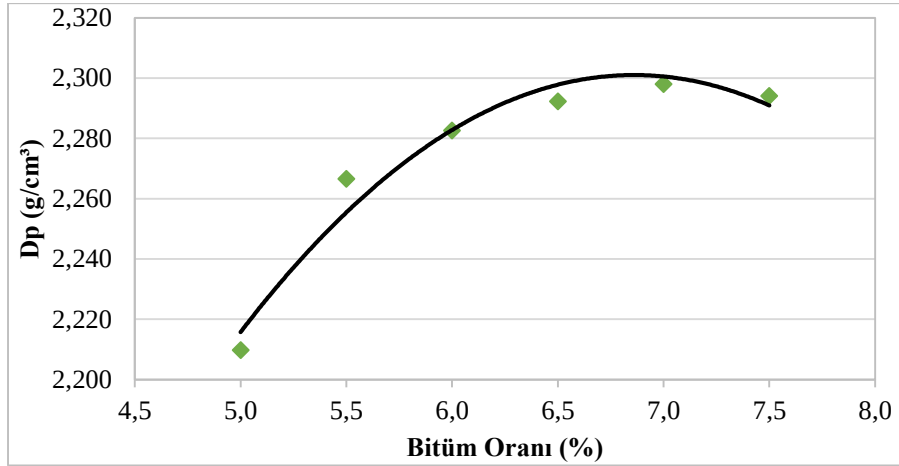


Şekil Ek 7.17. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - Vf (Asfaltla dolu boşluk) (%)

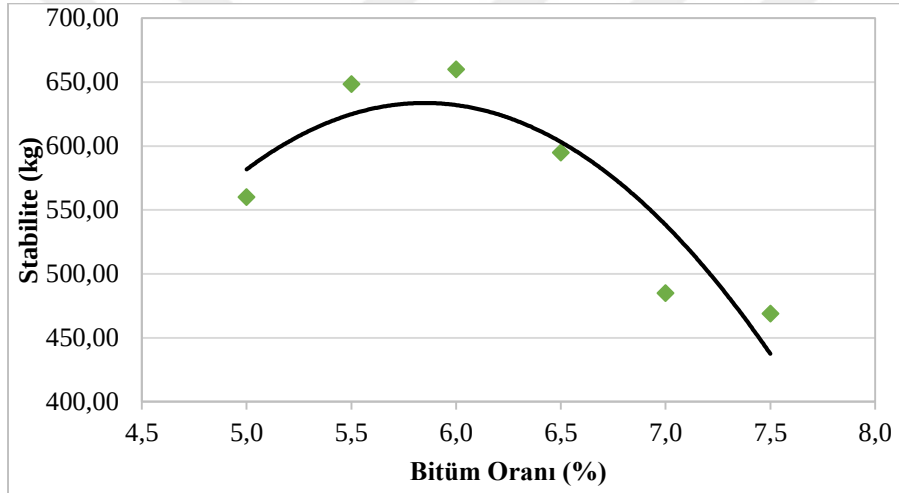


Şekil Ek 7.18. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - Akma (mm)

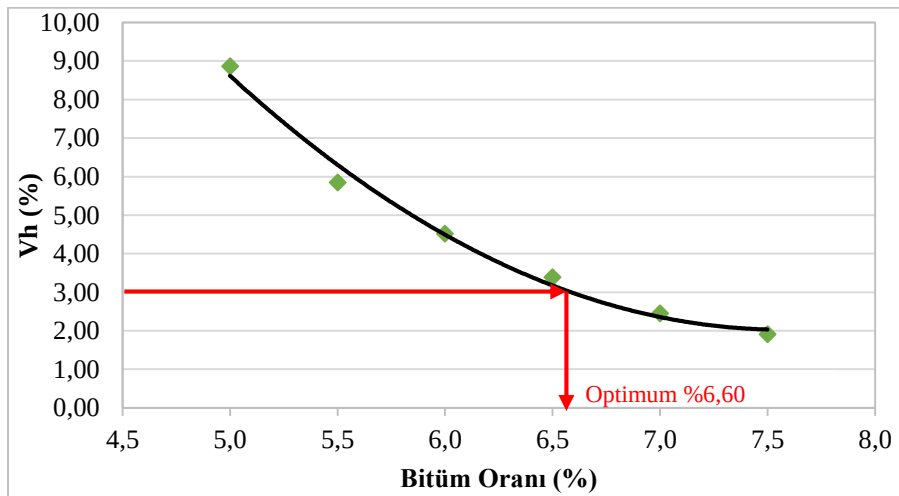
EK-8 TMA Marshall Test Sonuç Grafikleri (Saf Bitüm)



Şekil Ek 8.1. Saf bitüm oranı - D_p (Birim hacim ağırlık) (g/cm^3)

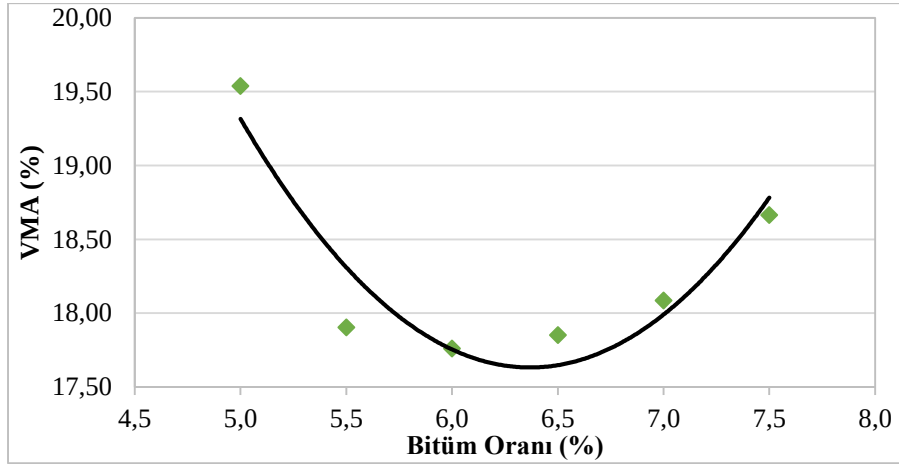


Şekil Ek 8.2. Saf bitüm oranı - Stabilite (kg)

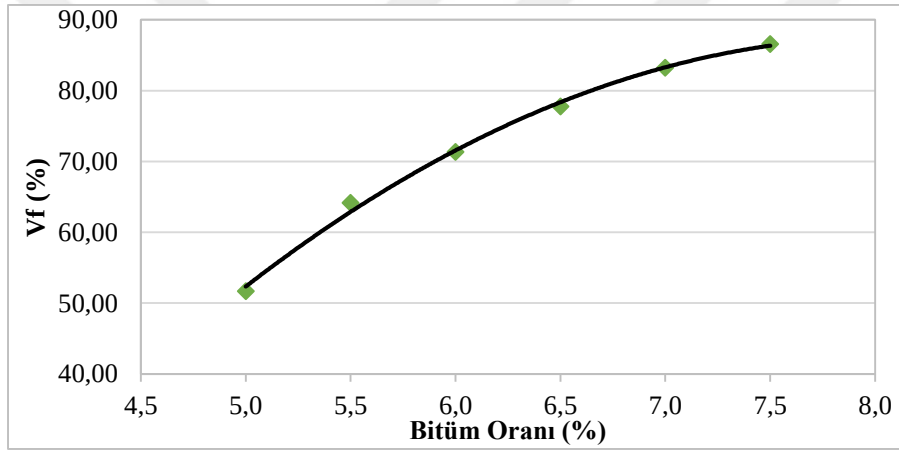


Şekil Ek 8.3. Saf bitüm oranı - V_h (Hava boşluğu) (%)

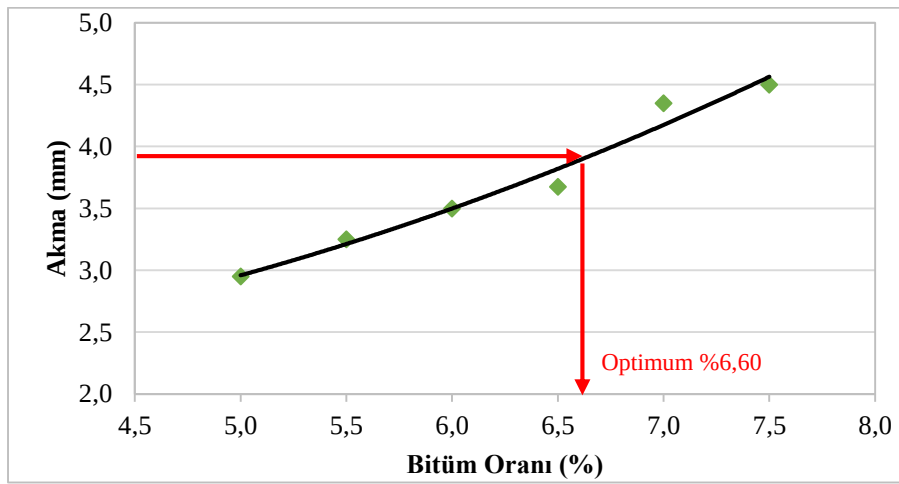
EK-8 TMA Marshall Test Sonuç Grafikleri (Saf Bitüm)



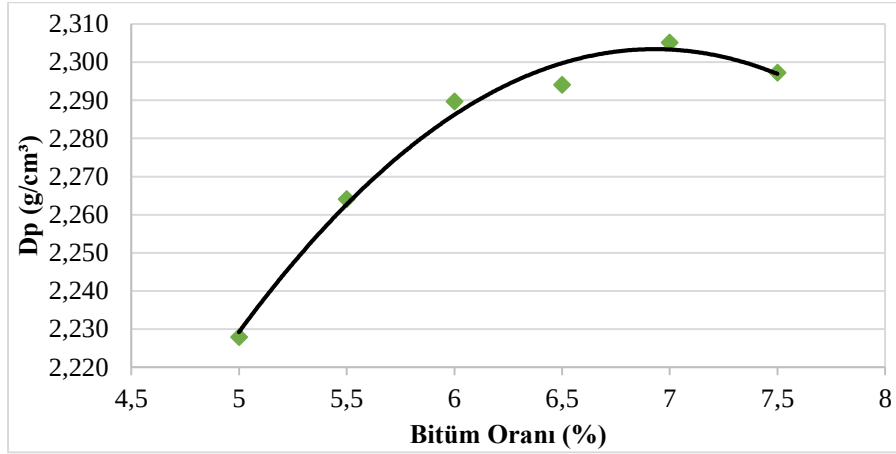
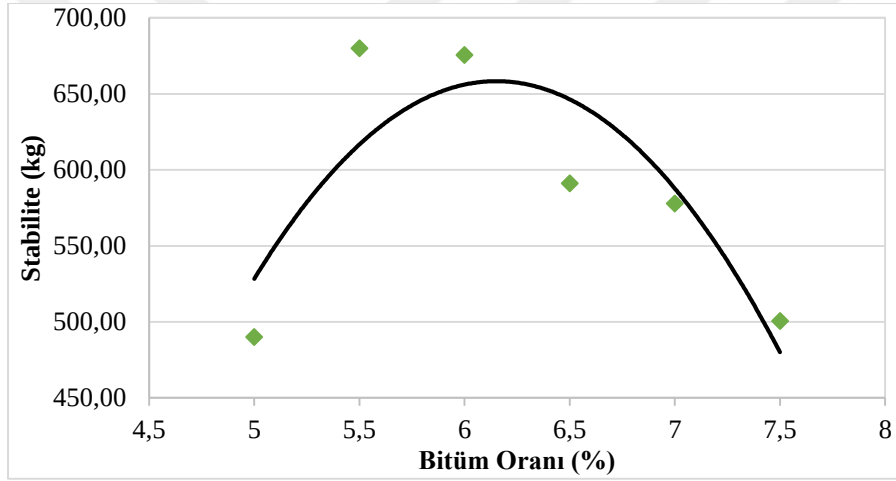
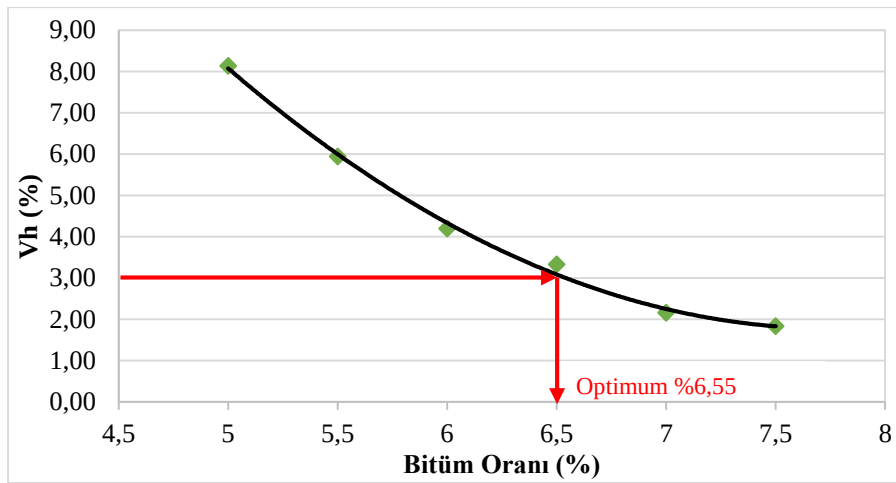
Şekil Ek 8.4. Saf bitüm oranı - VMA (Agregalar arası boşluk) (%)

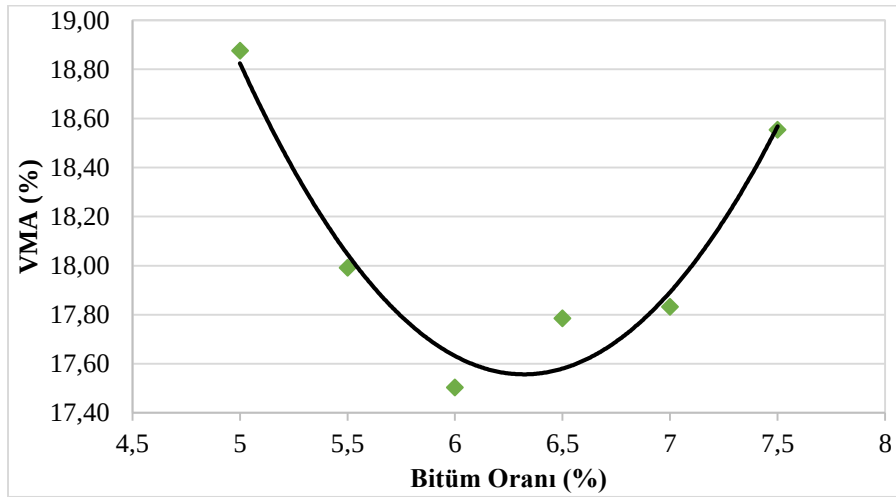
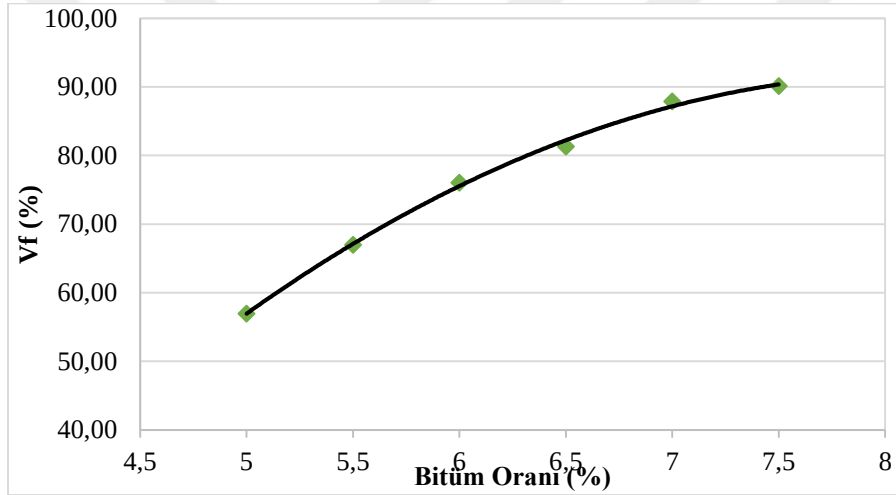
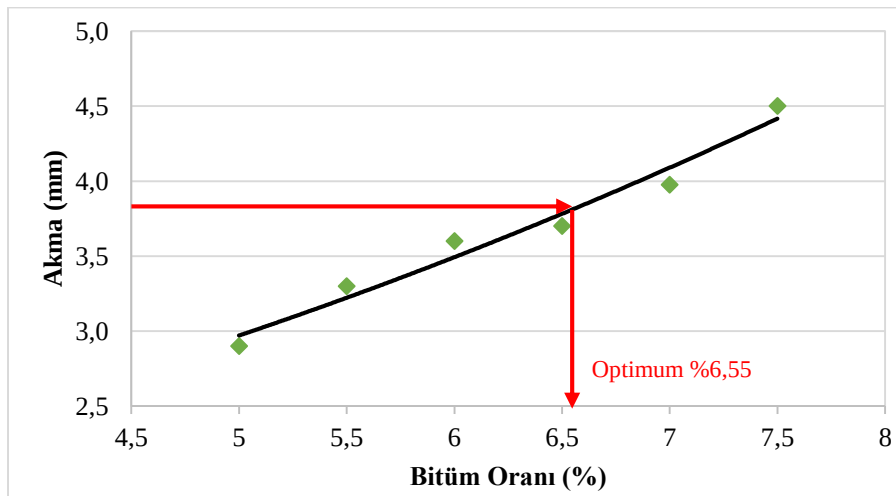


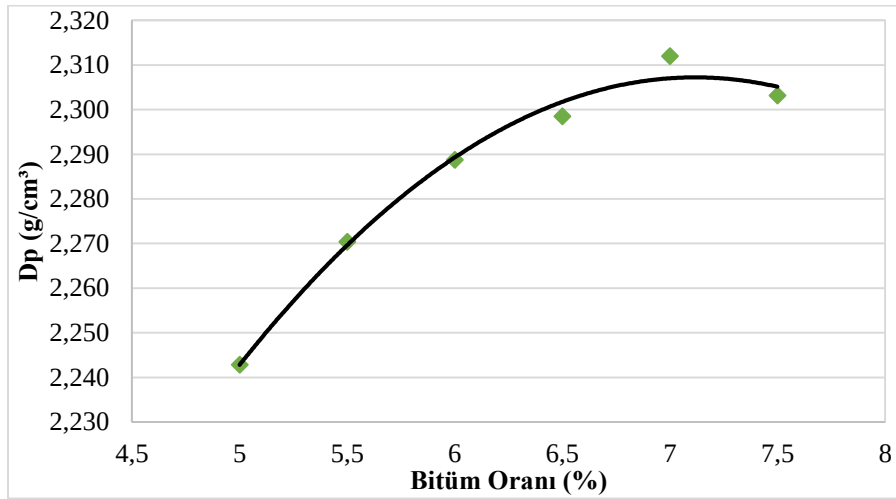
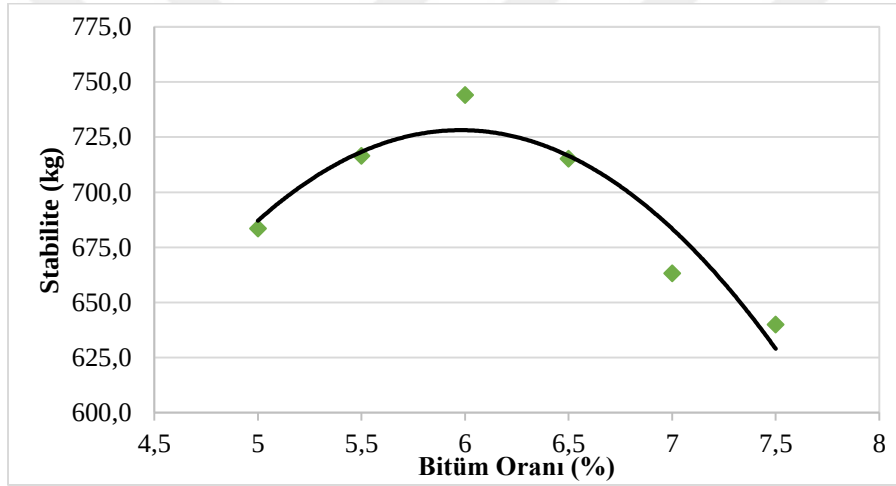
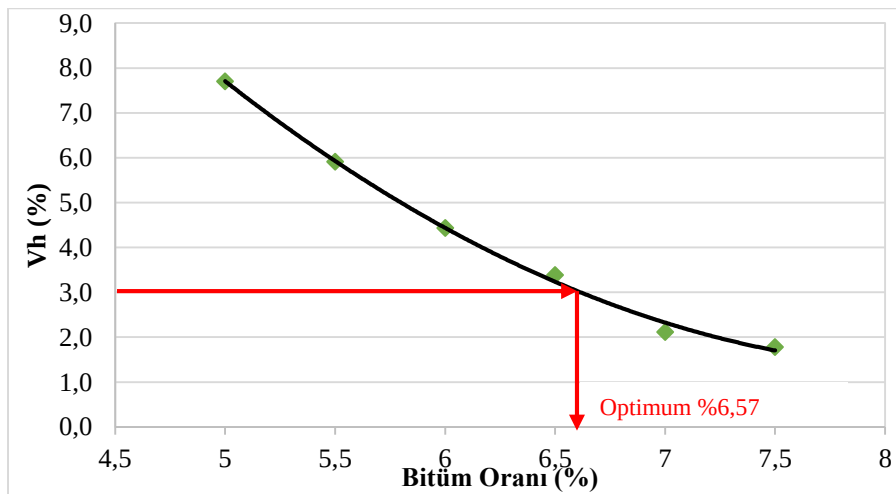
Şekil Ek 8.5. Saf bitüm oranı- Vf (Asfaltla dolu boşluk) (%)



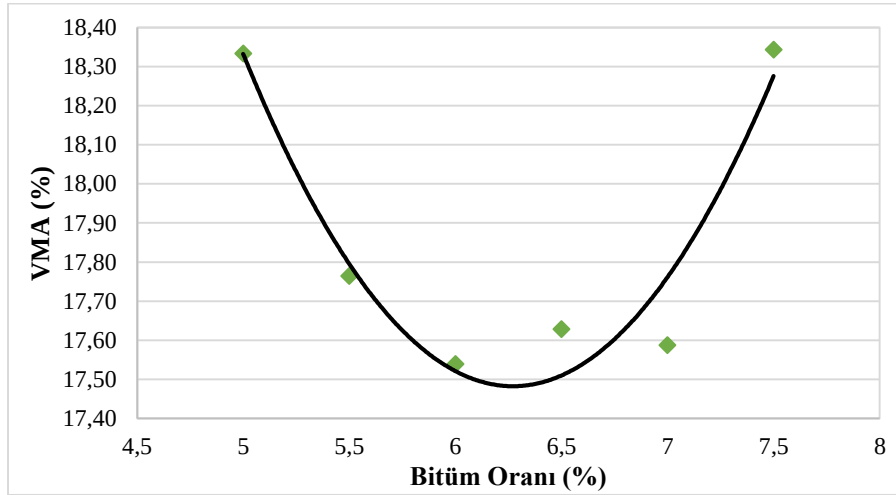
Şekil Ek 8.6. Saf bitüm oranı- Akma (mm)

EK-8 TMA Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S katkılı bitüm)

Şekil Ek 8.7. %3S modifiyeli bitüm oranı- Dp (Birim hacim ağırlık) (g/cm³)

Şekil Ek 8.8. %3S modifiyeli bitüm oranı - Stabilite (kg)

Şekil Ek 8.9. %3S modifiyeli bitüm oranı - Vh (Hava boşluğu) (%)

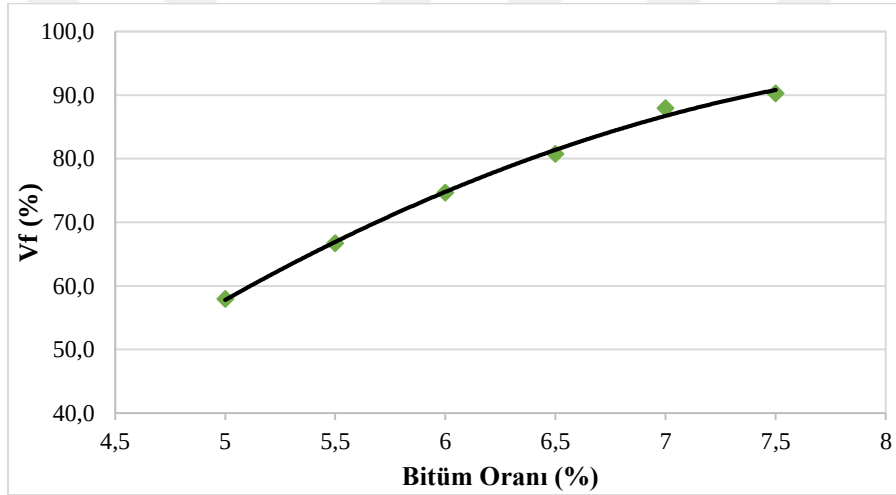
EK-8 TMA Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S katkılı bitüm)

Şekil Ek 8.10. %3S modifiyeli bitüm oranı- Agregalar arası boşluk (VMA) (%)

Şekil Ek 8.11. %3S modifiyeli bitüm oranı- Asfaltla dolu boşluk (Vf) (%)

Şekil Ek 8.12. %3S modifiyeli bitüm yüzdesi- Akma (mm)

EK-8 TMA Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S+%1PPA katkıli bitüm)

Şekil Ek 8.13. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı- D_p (Birim hacim ağırlık) (g/cm^3)

Şekil Ek 8.14. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - Stabilite (kg)

Şekil Ek 8.15. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı - V_h (Hava boşluğu) (%)

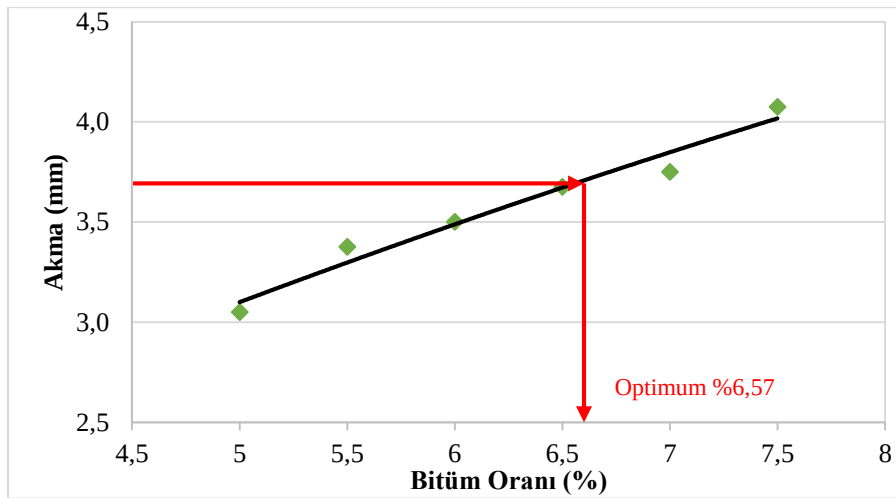
EK-8 TMA Marshall Test Sonuç Grafikleri (%3S+%1PPA katkılı bitüm)



Şekil Ek 8.16. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı- Agregalar arası boşluk (VMA) (%)



Şekil Ek 8.17. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı- Asfaltla dolu boşluk (Vf) (%)



Şekil Ek 8.18. %3S+%1PPA modifiyeli bitüm oranı- Akma (mm)

EK-9 AASHTO-T283 Test Sonucu (BSK)

Çizelge 9.1 AASHTO-T283 Testi Numunelerin Özellikleri ve Test Sonucu (BSK)

Numune	Yükseklik (mm)					Çap (mm)	Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	Doygunluktan sonra		Doygunluk (%)	ITS (kPa)	
	h1	h2	h3	h4	h _{ort}		Kuru	Suda	DYK				Suda	DYK			
Saf Bitüm	1	64,1	65,1	64,6	63,6	64,4	100	1145,7	671	1161,3	2,337	2,521	7,3	679	1171,1	67,5	944,9
	2	65,1	64,6	64,1	64,6	64,6	100	1147,3	674,5	1161,9	2,354	2,521	6,6	682,7	1172,3	72,5	904,2
	3	65,1	64,1	63,6	64,1	64,2	100	1148,7	675,9	1165,3	2,347	2,521	6,9	683,8	1174,6	73,7	952,5
	4	64,1	64,6	65,1	65,1	64,7	100	1153,1	679,1	1170,3	2,348	2,521	6,9	-	-	-	1135,2
	5	63,6	64,6	64,6	63,6	64,1	100	1149,1	674,7	1166,3	2,337	2,521	7,3	-	-	-	988,6
	6	64,1	65,1	64,1	63,6	64,2	100	1148,1	675,4	1163,9	2,350	2,521	6,8	-	-	-	1048,2
%3S	1	63,6	63,1	63,6	63,6	63,5	100	1147,1	673,5	1162	2,348	2,517	6,7	680,9	1171,1	69,6	1036,9
	2	64,1	64,1	64,6	64,6	64,4	100	1146,6	674	1162,9	2,345	2,517	6,8	680,8	1170,3	69,8	981,9
	3	64,1	63,6	63,1	64,1	63,7	100	1146,1	674,1	1161,2	2,353	2,517	6,5	679,8	1170,2	68,7	1011,6
	4	65,1	64,6	64,1	64,6	64,6	100	1148,8	676,2	1167	2,341	2,517	7,0	-	-	-	1019,8
	5	64,6	64,1	65,1	65,6	64,9	100	1148,7	675,5	1165,3	2,345	2,517	6,8	-	-	-	1133,0
	6	64,1	64,1	63,6	63,6	63,9	100	1149,4	677,2	1166,9	2,347	2,517	6,7	-	-	-	1189,1
%3S+%1PPA	1	64,6	64,6	65,1	65,6	65,0	100	1149	675,4	1165,7	2,343	2,523	7,1	683,1	1171,2	67,9	1029,6
	2	64,1	63,6	64,6	64,8	64,3	100	1146,6	676,7	1165,5	2,346	2,523	7,0	684,4	1172,5	77,0	1037,1
	3	65,1	63,1	63,6	64,6	64,1	100	1147,4	674,8	1163,6	2,347	2,523	7,0	681,2	1170,8	67,2	1001,9
	4	65,6	65,6	64,6	64,6	65,1	100	1147	675,2	1166,6	2,334	2,523	7,5	-	-	-	1136,1
	5	66,1	66,1	65,1	64,1	65,4	100	1146,5	674,7	1164	2,343	2,523	7,1	-	-	-	1153,3
	6	66,6	65,6	64,6	65,6	65,6	100	1146,8	676	1165,6	2,342	2,523	7,2	-	-	-	1120,0

Açıklama: 1-3 arası numuneler şartlandırılmış, 4-6 arası numuneler şartlandırılmamış numunelerdir.

EK-9 AASHTO-T283 Test Sonucu (Taş Mastik Asfalt)

Çizelge 9.2 AASHTO-T283 Testi Numunelerin Özellikleri ve Test Sonucu (TMA)

Numune	Yükseklik (mm)					Çap (mm)	Ağırlık (g)			Dp (g/cm³)	Dt (g/cm³)	Vh (%)	Doygunluktan sonra		Doygunluk (%)	ITS (kPa)	
	h1	h2	h3	h4	h _{ort}		Kuru	Suda	DYK				Suda	DYK			
Saf Bitüm	1	64	64,5	64,5	64	64,3	100	1135,9	641,5	1147,7	2,244	2,387	5,99	649,8	1158	68,4	570,9
	2	65,5	64	64	65,5	64,8	100	1137,2	643,4	1149,4	2,247	2,387	5,85	651,3	1157,5	68,2	529,5
	3	64	63	64	64,5	63,9	100	1135,3	640,8	1146,9	2,243	2,387	6,02	647,8	1155,1	62,5	508,0
	4	64,5	63	63,5	63,5	63,6	100	1134,3	641,1	1145,8	2,247	2,387	5,85	-	-	-	700,8
	5	64	64,5	64	63,5	64,0	100	1134	639,8	1145,7	2,242	2,387	6,09	-	-	-	669,7
	6	65,5	64,5	64	65	64,8	100	1133,8	637,7	1145,9	2,231	2,387	6,53	-	-	-	624,1
%3S	1	64,5	63,5	63,5	64	63,9	100	1131,7	636,6	1143,7	2,232	2,371	5,87	645,2	1150,5	67,2	565,5
	2	65	66	65,5	64,5	65,3	100	1136,4	638	1149,2	2,223	2,371	6,24	646,2	1155,3	63,4	553,6
	3	64,5	64	64	64,5	64,3	100	1132,9	636,9	1145	2,230	2,371	5,96	647	1148,6	66,0	579,9
	4	63,5	64,5	65	64,5	64,4	100	1134,7	639,8	1146,5	2,239	2,371	5,55	-	-	-	698,1
	5	66	65,5	65	64,5	65,3	100	1138,6	640,5	1151,1	2,230	2,371	5,95	-	-	-	664,4
	6	65	65,5	65	64,5	65,0	100	1130,9	634,5	1143	2,224	2,371	6,20	-	-	-	672,6
%3S+%1PPA	1	64	63	64,5	65	64,1	100	1135,2	639,5	1146,1	2,241	2,376	5,69	647,2	1155,4	66,4	604,8
	2	65,5	65,5	64,5	64,5	65,0	100	1134,4	636,4	1146,7	2,223	2,376	6,44	645,1	1156,6	65,2	612,3
	3	65	64	64	63,5	64,1	100	1134,8	639,3	1146,6	2,237	2,376	5,85	647	1157,4	68,9	630,2
	4	64,5	64,5	65,5	65,5	65,0	100	1136,2	637,8	1148,5	2,225	2,376	6,36	-	-	-	695,2
	5	65	65	64,5	63,5	64,5	100	1134,9	638,1	1147,6	2,227	2,376	6,25	-	-	-	708,2
	6	64	64,5	64,5	64	64,3	100	1137,5	641,3	1148,9	2,241	2,376	5,68	-	-	-	728,1

Açıklama: 1-3 arası numuneler şartlandırılmış, 4-6 arası numuneler şartlandırılmamış numunelerdir.

EK-10 Üç Eksenli Statik Sünme Deney Numuneleri**Çizelge 10.1.** Üç eksenli statik sünme deney numunelerinin fiziksel özellikleri ve deney koşulları (BSK)

No	Karışım	Kuru (g)	Suda (g)	DYK(g)	Birim Ağ	Gmm	d (mm)	Vh (%)	h1 (mm)	h2 (mm)	h _{ort} (mm)	Eksenel Basınç (kPa)	Çevresel Basınç	Ön yükleme
A1	Katkısız	2792,0	1648,0	2799,8	2,424	2,533	100	4,3	150,2	150,3	150,2	500 kPa	0	90 sn 20 kPa
A2	Katkısız	2793,9	1645,3	2801,8	2,416	2,533	100	4,6	150,0	150,2	150,1	500 kPa	0	90 sn 20 kPa
A3	Katkısız	2820,9	1669,2	2825,3	2,440	2,533	100	3,7	150,0	149,9	150,0	500 kPa	200 kPa	90 sn 20 kPa
A4	Katkısız	2800,0	1650,6	2807,7	2,420	2,533	100	4,5	149,9	150,0	150,0	500 kPa	200 kPa	90 sn 20 kPa
A5	Katkısız	2796,0	1649,1	2805,1	2,419	2,533	100	4,5	150,0	150,2	150,1	300 kPa	0	90 sn 20 kPa
A6	Katkısız	2818,2	1666,7	2825,1	2,433	2,533	100	4,0	150,2	150,1	150,1	300 kPa	0	90 sn 20 kPa
A7	Katkısız	2798,2	1652,8	2808,1	2,422	2,533	100	4,4	150,0	150,0	150,0	300 kPa	100 kPa	90 sn 20 kPa
A8	Katkısız	2801,8	1653,0	2807,5	2,427	2,533	100	4,2	149,8	150,1	150,0	300 kPa	100 kPa	90 sn 20 kPa
S1	%3S	2795,1	1648,6	2805,6	2,416	2,529	100	4,5	150,2	150,6	150,4	500 kPa	0	90 sn 20 kPa
S2	%3S	2805,5	1657,2	2814,1	2,425	2,529	100	4,1	150,5	149,9	150,2	500 kPa	0	90 sn 20 kPa
S3	%3S	2808,9	1657,7	2818,9	2,419	2,529	100	4,4	150,4	150,2	150,3	500 kPa	200 kPa	90 sn 20 kPa
S4	%3S	2804,1	1654,7	2813,8	2,419	2,529	100	4,3	150,7	150,5	150,6	500 kPa	200 kPa	90 sn 20 kPa
S5	%3S	2811,4	1660,1	2820,0	2,424	2,529	100	4,2	150,3	150,3	150,3	300 kPa	0	90 sn 20 kPa
S6	%3S	2798,3	1650,8	2807,5	2,419	2,529	100	4,3	150,5	150,1	150,3	300 kPa	0	90 sn 20 kPa
S7	%3S	2804,4	1653,7	2812,3	2,421	2,529	100	4,3	150,3	150,4	150,3	300 kPa	100 kPa	90 sn 20 kPa
S8	%3S	2798,9	1651,5	2807,9	2,420	2,529	100	4,3	150,3	150,3	150,3	300 kPa	100 kPa	90 sn 20 kPa
P1	%3S+%1PPA	2797,0	1650,0	2806,7	2,418	2,523	100	4,2	150,1	149,9	150,0	500 kPa	0	90 sn 20 kPa
P2	%3S+%1PPA	2785,5	1644,7	2798,7	2,414	2,523	100	4,3	150,0	150,0	150,0	500 kPa	0	90 sn 20 kPa
P3	%3S+%1PPA	2826,0	1674,4	2831,0	2,443	2,523	100	3,2	150,2	150,0	150,1	500 kPa	200 kPa	90 sn 20 kPa
P4	%3S+%1PPA	2765,5	1624,4	2776,9	2,400	2,523	100	4,9	149,7	149,8	149,7	500 kPa	200 kPa	90 sn 20 kPa
P5	%3S+%1PPA	2791,4	1647,4	2801,3	2,419	2,523	100	4,1	150,1	149,8	149,9	300 kPa	0	90 sn 20 kPa
P6	%3S+%1PPA	2806,8	1659,6	2817,3	2,424	2,523	100	3,9	149,8	150,2	150,0	300 kPa	0	90 sn 20 kPa
P7	%3S+%1PPA	2797,5	1651,2	2806,7	2,421	2,523	100	4,0	149,9	149,8	149,8	300 kPa	100 kPa	90 sn 20 kPa
P8	%3S+%1PPA	2804,2	1654,3	2815,2	2,416	2,523	100	4,3	149,9	149,7	149,8	300 kPa	100 kPa	90 sn 20 kPa

Ek 11. Tekerlek İzi Testi Deney Numunelerinin Fiziksel Özellikleri

Çizelge 11.1. BSK-Tekerlek izi testi numunelerin fiziksel özellikleri

No	Karışım	Kuru (g)	Suda (g)	DYK(g)	Birim Hacim Ağr. (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Vh (%)	Numuneler Kesildikten Sonra h1(mm)	h2 (mm)
A1	Saf	4655,6	2700	4677,3	2,355	2,533	7,0	59,8	59,3
A2	Saf	4663,2	2699,8	4684,2	2,350	2,533	7,2	58,9	59,4
S1	%3S	4693,2	2677,2	4670,2	2,329	2,529	6,9	59,4	58,7
S2	%3S	4971	2882,5	4997,7	2,350	2,529	7,1	58,8	59,2
P1	%3S+%1PPA	4954,2	2878,9	4983,4	2,354	2,535	7,1	59,4	59,6
P2	%3S+%1PPA	5015,8	2916,2	5037,7	2,364	2,535	6,7	59,3	59,1

Çizelge 11.2. TMA tekerlek izi testi numunelerin fiziksel özellikleri

No	Karışım	Kuru (g)	Suda (g)	DYK(g)	Birim Hacim Ağr. (g/cm ³)	Gmm (g/cm ³)	Vh (%)	Numuneler Kesildikten Sonra h1(mm)	h2 (mm)
A1	Saf	5037,6	2801,3	5070,8	2,220	2,387	7,0	59,6	59,7
A2	Saf	5054,8	2807,1	5079,2	2,225	2,387	6,8	59,1	59,2
S1	%3S	4937,6	2751,7	4979,4	2,216	2,371	6,5	59,3	58,9
S2	%3S	4773,8	2665,3	4827,7	2,208	2,371	6,9	58,9	59,1
P1	%3S+%1PPA	5074	2823,8	5121	2,209	2,376	7,0	59,2	59,1
P2	%3S+%1PPA	5145,7	2880,8	5199,9	2,219	2,376	6,6	59,7	59,2

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

Francken model parametreleri Microsoft Excel programı kullanılarak belirlenmiştir. Örnek olarak 500 kPa basınç altındaki statik üç eksenli statik sünme test sonuçlarının model parametreleri aşağıda belirtilen adımlara göre belirlenmiştir.

İlk olarak Excel programına Şekil Ek 12.1’de belirtildiği gibi üç eksenli statik sünme testinden elde edilen zamana (saniye) karşı % deformasyon değerleri satırlara eklenir ve model parametrelerinin belirleneceği harfler çalışma sayfasında uygun yere eklenir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0								
4	2	0,491								
5	4	0,915								
6	6	1,270								
7	8	1,600								
8	10	1,880								
9	20	2,955								
10	30	3,726								
11	40	4,335								
12	50	4,852								
13	60	5,301								
14	70	5,699								
15	80	6,063								
16	90	6,410								
17	100	6,715								
18	200	9,323								
19	300	11,795								
20	400	14,818								
21	500	19,264								
22	600	31,356								
23	616	40,035								
24										

Şekil Ek 12.1. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (1. Adım)

Bir sonraki adımda test verilerinin ve belirlenecek model parametrelerinin yer aldığı satır ve sütunlar Şekil Ek 12.2’de görüldüğü gibi seçilir. Formüller sekmesi altındaki “seçimden oluştur” sekmesine tıklanır. Açılan sekmede üst satır seçilir ve tamama tıklanır. Bu adımda yapılan uygulama Şekil 12.2’de yer almaktadır.

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

The screenshot shows the Excel interface with the 'Formüller' tab selected. The 'Seçimden Oluştur' (Create from Selection) dialog box is open, showing the 'Üst satır' (Top row) option selected. The data range is highlighted in the worksheet, showing columns for time (Zaman), deformation (% Deformasyon), model fit (Model uyumu), and the square of the difference (Farkların Karesi).

1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2
3	0	0		
4	2	0,491		
5	4	0,915		
6	6	1,270		
7	8	1,600		
8	10	1,880		
9	20	2,955		
10	30	3,726		
11	40	4,335		
12	50	4,852		
13	60	5,301		
14	70	5,699		
15	80	6,063		
16	90	6,410		
17	100	6,715		
18	200	9,323		
19	300	11,795		
20	400	14,818		
21	500	19,264		
22	600	31,356		
23	616	40,035		
24				

Şekil Ek 12.2. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (2. Adım)

Bir sonraki adımda model parametrelerinin yer aldığı satır ve sütunlar Şekil Ek 12.3' de belirtildiği gibi seçilir. Formüller sekmesi altında yer alan “seçimden oluştur” sekmesine tıklanır. Açılan pencereden sol sütun sekmesi seçilip tamama tıklanır. Bu adımdan sonra model parametreleri formülde kullanılacak hale gelmiştir.

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2
3	0	0		
4	2	0,491		
5	4	0,915		
6	6	1,270		
7	8	1,600		
8	10	1,880		
9	20	2,955		
10	30	3,726		
11	40	4,335		
12	50	4,852		
13	60	5,301		
14	70	5,699		
15	80	6,063		
16	90	6,410		
17	100	6,715		
18	200	9,323		
19	300	11,795		
20	400	14,818		
21	500	19,264		
22	600	31,356		
23	616	40,035		
24				

The 'Model Parametreleri' table is shown in the background, with columns A, B, C, and D. The 'Seçimden Ad Oluştur' dialog box is open, showing the 'Sol sütun' (Left column) option selected.

Şekil Ek 12.3. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (3. Adım)

Bir sonraki adımda Şekil 12.4’de yer aldığı gibi Francken model formülü $\epsilon_p = A n^B + C (e^{D t} - 1)$ y_model sekmesi altındaki satıra yazılır.

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,491	=A_*A4^B_+C_*(ÜS(D_*A4)-1)							
5	4	0,915								
6	6	1,270								
7	8	1,600								
8	10	1,880								
9	20	2,955								
10	30	3,726								
11	40	4,335								
12	50	4,852								
13	60	5,301								
14	70	5,699								
15	80	6,063								
16	90	6,410								
17	100	6,715								
18	200	9,323								
19	300	11,795								
20	400	14,818								
21	500	19,264								
22	600	31,356								
23	616	40,035								
24										

Model Parametreleri	
A_	
B_	
C_	
D_	

Şekil Ek 12.4. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (4. Adım)

Model için yazılan formül ilgili tüm satırlara uygulandıktan sonra, test verileri ve modelden elde edilen değerlerin farklarının kareleri alınır. $(y-y_{\text{model}})^2$ toplamı ilgili sütunun en alt satırına yazılır. y_{model} verilerinin hesaplanabilmesi için model parametrelerine başlangıç değeri yazılır (0,01). Şekil Ek 12.5’de yer alan düzenlemeler tamamlandıktan sonra bir sonraki adıma geçilir.

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,491125224	0,010271569	0,231220238						
5	4	0,914509038	0,010547703	0,817146095						
6	6	1,270151441	0,010799156	1,585968177						
7	8	1,600390816	0,011042992	2,526026505						
8	10	1,879824133	0,011284639	3,49143984						
9	20	2,95521902	0,012518133	8,659488508						
10	30	3,725777561	0,013844558	13,77844662						
11	40	4,335450252	0,015294023	18,66374984						
12	50	4,851978505	0,016886168	23,37811791						
13	60	5,300765348	0,01863912	27,90085749						
14	70	5,698746133	0,020571531	32,24166681						
15	80	6,062856212	0,022703355	36,48344654						
16	90	6,41003094	0,02505629	40,76790128						
17	100	6,714867285	0,027654104	44,71882014						
18	200	9,322911578	0,07443468	85,53432493						
19	300	11,79547305	0,201442328	134,4215484						
20	400	14,81843348	0,54659896	203,6852606						
21	500	19,26396352	1,484772769	316,0996239						
22	600	31,35580524	4,034948532	746,4292115						
23	616	40,03517342	4,734944151	1246,106187						
24				2987,520452						

Şekil Ek 12.5. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (5. Adım)

Model parametrelerini belirleyebilmek için son adımda veri sekmesi altında yer alan “çözücü” sekmesine tıklanır. Şekil 12.6’da yer aldığı gibi “çözücü parametreleri” sekmesinde “hedef ayarla” sekmesinde hedef satır olarak farkların karesi toplamının yer aldığı satır seçilir. Hedef olarak da en küçük değer seçilir. Çözücü parametreleri sekmesinde yer alan “Değişken hücreleri değiştirerek” sekmesinde hedef satırlar olarak model parametrelerinin yer aldığı satırlar seçilir. Çöz sekmesine tıklanır. Çözüm tek seferde gerçekleşmezse çöz sekmesine tekrar tıklanır, farkların karesi sabit değere ulaşınca kadar çözüme devam edilir. Şekil 12.7’de görüldüğü gibi model parametreleri belirlenir.

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

Çözücü Parametreleri

Hedef Ayarla: SDS24

Hedef: ☐ En Büyük ☒ En Küçük ☐ Değeri: 0

Değişken Hücreleri Değiştirerek: \$H\$5:\$H\$8

Kısıtlamalarla Bağlıdır:

☒ Kısıtlanmamış Değişkenleri Pozitif Yap

Çözme Yöntemi Seçin: Doğrusal Olmayan GRG

Çözüm Yöntemi

Düzenli doğrusal olmayan Çözücü Problemleri için GRG Doğrusal Olmayan altyapısını seçin. Doğrusal Çözücü Problemleri için Basit LP altyapısını seçin ve düzensiz olmayan Çözücü problemleri için Açılım altyapısını seçin.

Yardım **Çöz** Kapat

	H	I	J
21	500	19,26396352	1,484772769
22	600	31,35580524	4,034948532
23	616	40,03517342	4,734944151
24			2987,520452

Parametreleri
0,01
0,01
0,01
0,01

Şekil Ek 12.6. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (6. Adım)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

Katkısız Numunenin 500 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametre

Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapmak istediğiniz

Yapıştır Pano Yazı Tipi Hizalama Sayı

Calibri 11 A⁺ A⁻ Metni Kaydır Genel Birleştir ve Ortala % 0,00 0,00 Koşullu Biçimlendirme

O37

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,491125224	0,457778455	0,001112007			Model Parametreleri			
5	4	0,914509038	0,725839873	0,035596054			A_	0,288715337		
6	6	1,270151441	0,950477452	0,102191459			B_	0,665001718		
7	8	1,600390816	1,150870079	0,202068893			C_	5,36191E-07		
8	10	1,879824133	1,33497038	0,296865612			D_	0,02816316		
9	20	2,95521902	2,116689331	0,703132039						
10	30	3,725777561	2,771776057	0,91011887						
11	40	4,335450252	3,356159919	0,959009557						
12	50	4,851978505	3,893032342	0,919577743						
13	60	5,300765348	4,39484665	0,820688686						
14	70	5,698746133	4,869266195	0,688036966						
15	80	6,062856212	5,321429819	0,549713096						
16	90	6,41003094	5,75499501	0,429072069						
17	100	6,714867285	6,172681721	0,293965186						
18	200	9,322911578	9,787355867	0,215708498						
19	300	11,79547305	12,81871741	1,047029029						
20	400	14,81843348	15,56015855	0,55015608						
21	500	19,26396352	18,70034117	0,317670155						
22	600	31,35580524	32,01552254	0,435226908						
23	616	40,03517342	39,03162963	1,007100141						
24				10,48403905						

Şekil Ek 12.7. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (7. Adım)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S Modifiyeli numunenin 500 kPa Basınç Altındaki Model Parametrelerinin Belirlenmesi.xlsx

Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapmalı

Yapıştır Pano Yazı Tipi Hizalama Sayı Stiller

Genel Koşullu Biçimlendirme Tablo Olarak Biçimlendir Hücre Stilleri

M53

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,29636867	0,010271569	0,081851551						
5	4	0,558866634	0,010547703	0,300653651						
6	6	0,79596157	0,010799156	0,616480016						
7	8	0,9991858	0,011042992	0,97642621						
8	10	1,202410031	0,011284639	1,418779699						
9	20	1,989903924	0,012518133	3,910054568						
10	30	2,582641264	0,013844558	6,598716515						
11	40	3,031428106	0,015294023	9,097064806						
12	50	3,429408891	0,016886168	11,64531134						
13	60	3,759648266	0,01863912	13,99514943						
14	70	4,056016935	0,020571531	16,28481961						
15	80	4,326982576	0,022703355	18,52681962						
16	90	4,564077512	0,02505629	20,60271365						
17	100	4,784237095	0,027654104	22,62508175						
18	200	6,308418824	0,07443468	38,86255831						
19	300	7,282201596	0,201442328	50,13715181						
20	400	8,018889432	0,54659896	55,8351249						
21	500	8,670900505	1,484772769	51,64043184						
22	600	9,263637844	4,034948532	27,33919193						
23	616	9,348314607	4,734944151	21,28318696						
24	700	9,822504478	10,96700863	1,309889747						
25	800	10,37290344	29,81027118	377,8112648						
26	900	10,90636704	81,03154319	4917,540329						
27	1000	11,44829832	220,2653731	43604,57074						
28	1100	12,02410031	598,7421426	344238,0611						
29	1200	12,65917603	1627,548649	2607868,01						
30	1300	13,33659013	4424,134663	19455139,64						
31	1400	14,09021332	12026,04359	144287024						
32	1500	14,94544862	32690,17448	1067670592						
33	1600	15,92769907	88861,10597	7893465702						
34	1700	17,17244748	241549,5283	58337878928						
35	1800	18,75590295	656599,6922	4,31099E+11						
36	1900	21,03370787	1784823,01	3,18552E+12						
37	2000	26,84253379	4851651,955	2,35383E+13						
38	2056	39,82009445	8493653,658	7,21415E+13						
39				9,93638E+13						
40										
41										
42										

Şekil Ek 12.8. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki %3S katkılı numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (1. Adım - Çözümünden önce)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S Modifiyeli numunenin 500 kPa Basınç Altındaki Model Parametrelerinin Belirlenmesi.xls										
Dosya	Giriş	Ekle	Sayfa Düzeni	Formüller	Veri	Gözden Geçir	Görünüm	Geliştirici	Ne yapma	
Dış Veri Al	Yeni Sorgu	Tümünü Yenile	Bağlantılar	Özellikler	Bağlantıları Düzenle	Filtre	Temizle	Yeniden Uygula	Metni Sütunlara Dönüştür	Çö
Al ve Dönüştür			Bağlantılar		Sırala	Sırala ve Filtre Uygula		Gelişmiş	Veri Araçları	
M53										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,29636867	0,759068954	0,214091553						
5	4	0,558866634	1,032191578	0,224036503						
6	6	0,79596157	1,235493798	0,19318858						
7	8	0,9991858	1,403587188	0,163540483						
8	10	1,202410031	1,549565945	0,120517229						
9	20	1,989903924	2,107119434	0,013739476						
10	30	2,582641264	2,522141324	0,003660243						
11	40	3,031428106	2,865287798	0,027602602						
12	50	3,429408891	3,163289393	0,070819587						
13	60	3,759648266	3,429639914	0,108905512						
14	70	4,056016935	3,672258715	0,147270372						
15	80	4,326982576	3,896254958	0,185526281						
16	90	4,564077512	4,105147927	0,210616364						
17	100	4,784237095	4,301481461	0,233053002						
18	200	6,308418824	5,849211094	0,210871739						
19	300	7,282201596	7,001286847	0,078913096						
20	400	8,018889432	7,953849331	0,004230215						
21	500	8,670900505	8,781110319	0,012146203						
22	600	9,263637844	9,520549961	0,066003836						
23	616	9,348314607	9,632315176	0,080656323						
24	700	9,822504478	10,19420291	0,138159723						
25	800	10,37290344	10,81636867	0,196661417						
26	900	10,90636704	11,39708374	0,240802875						
27	1000	11,44829832	11,9440206	0,245740573						
28	1100	12,02410031	12,46387311	0,193400113						
29	1200	12,65917603	12,96392724	0,092873298						
30	1300	13,33659013	13,45472424	0,013955668						
31	1400	14,09021332	13,95557811	0,018126639						
32	1500	14,94544862	14,50682242	0,192392944						
33	1600	15,92769907	15,19756588	0,533094471						
34	1700	17,17244748	16,22898578	0,890119981						
35	1800	18,75590295	18,05893051	0,485770583						
36	1900	21,03370787	21,73247376	0,488273773						
37	2000	26,84253379	29,63768227	7,812855027						
38	2056	39,82009445	37,73167328	4,361502978						
39				18,27311926						
40										
41										
42										

Şekil Ek 12.9. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki %3S katkılı numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (2. Adım-Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S+%1PPA Modifiyeli numunenin 500 kPa Basınç Altındaki Model Paramet										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici										
O89										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,321771698	0,010271569	0,097032331						
5	4	0,584269663	0,010547703	0,329156888						
6	6	0,838299951	0,010799156	0,684757566						
7	8	1,066927211	0,011042992	1,114891483						
8	10	1,270151441	0,011284639	1,584745625						
9	20	2,083048363	0,012518133	4,287095435						
10	30	2,675785703	0,013844558	7,085930657						
11	40	3,141507898	0,015294023	9,773213189						
12	50	3,539488683	0,016886168	12,40872848						
13	60	3,869728057	0,01863912	14,830886						
14	70	4,157629051	0,020571531	17,11524492						
15	80	4,420127015	0,022703355	19,33733485						
16	90	4,657221951	0,02505629	21,45695871						
17	100	4,877381534	0,027654104	23,51985615						
18	200	6,342289529	0,07443468	39,28600441						
19	300	7,231395538	0,201442328	49,42024214						
20	400	7,866471259	0,54659896	53,58053048						
21	500	8,374531835	1,484772769	47,46877999						
22	600	8,797915649	4,034948532	22,68585576						
23	616	8,857189383	4,734944151	16,99290575						
24	700	9,162025729	10,96700863	3,257963263						
25	800	9,509200456	29,81027118	412,1334725						
26	900	9,814036802	81,03154319	5071,933215						
27	1000	10,11040547	220,2653731	44165,11044						
28	1100	10,38983879	598,7421426	346158,4334						
29	1200	10,65233675	1627,548649	2614353,684						
30	1300	10,91483472	4424,134663	19476509,26						
31	1400	11,17733268	12026,04359	144357011,3						
32	1500	11,43136297	32690,17448	1067900252						
33	1600	11,69386093	88861,10597	7894218032						
34	1700	11,94789122	241549,5283	58340402754						
35	1800	12,20192151	656599,6922	4,31107E+11						
36	1900	12,4559518	1784823,01	3,18555E+12						
37	2000	12,70998209	4851651,955	2,35384E+13						
38	2056	12,86240026	8493653,658	7,21419E+13						
39	2100	12,97248005	13188157,35	1,73927E+14						
40	2200	13,24344569	35849128,46	1,28516E+15						
41	2300	13,51441133	97448034,46	9,49612E+15						
42	2400	13,80231233	264891221,3	7,01674E+16						
43	2500	14,09021332	720048993,4	5,18471E+17						
44	2600	14,37811431	1957296094	3,83101E+18						
45	2700	14,69141834	5320482406	2,83075E+19						
46	2800	15,00472236	14462570643	2,09166E+20						
47	2900	15,35189709	39313342971	1,54554E+21						
48	3000	15,69907181	1,06865E+11	1,14201E+22						
49	3100	16,08858492	2,90488E+11	8,43836E+22						
50	3200	16,50350106	7,8963E+11	6,23515E+23						
51	3300	16,93535255	2,14644E+12	4,60719E+24						
52	3400	17,42647777	5,83462E+12	3,40428E+25						
53	3500	17,9514737	1,58601E+13	2,51544E+26						
54	3600	18,56114639	4,31123E+13	1,85867E+27						
55	3700	19,2724312	1,17191E+14	1,37338E+28						
56	3800	20,0937958	3,18559E+14	1,0148E+29						
57	3900	21,11838463	8,65934E+14	7,49842E+29						
58	4000	22,48168051	2,35385E+15	5,54062E+30						
59	4100	24,48851979	6,39843E+15	4,094E+31						
60	4200	28,45985996	1,73927E+16	3,02508E+32						
61	4292	40,11053574	4,36435E+16	1,90475E+33						
62			Σ	2,25461E+33						
63										

Şekil Ek 12.10. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA katkılı numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (1. Adım-Çözümde önce)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S+%1PPA Modifiyeli numunenin 500 kPa Basınç Altındaki Model Paramet										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştir										
P94										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,321771698	1,003570468	0,464849562						
5	4	0,584269663	1,300787288	0,513397507						
6	6	0,838299951	1,513935003	0,456482723						
7	8	1,066927211	1,686027662	0,383285369						
8	10	1,270151441	1,83287397	0,316656644						
9	20	2,083048363	2,375696813	0,085643115						
10	30	2,675785703	2,764979792	0,007955586						
11	40	3,141507898	3,079281744	0,003872094						
12	50	3,539488683	3,347474947	0,036869275						
13	60	3,869728057	3,583854538	0,081723669						
14	70	4,157629051	3,796686616	0,130279441						
15	80	4,420127015	3,99123997	0,183944097						
16	90	4,657221951	4,171106909	0,236307834						
17	100	4,877381534	4,338861115	0,290004242						
18	200	6,342289529	5,623855652	0,516147236						
19	300	7,231395538	6,545383813	0,470612087						
20	400	7,866471259	7,289413614	0,332995525						
21	500	8,374531835	7,924292839	0,202715154						
22	600	8,797915649	8,483861637	0,098629922						
23	616	8,857189383	8,567832731	0,083727272						
24	700	9,162025729	8,987687993	0,030393646						
25	800	9,509200456	9,44824457	0,00371562						
26	900	9,814036802	9,874035489	0,003599843						
27	1000	10,11040547	10,27115367	0,025839984						
28	1100	10,38983879	10,64413396	0,064666036						
29	1200	10,65233675	10,99645522	0,118417519						
30	1300	10,91483472	11,33085284	0,173071081						
31	1400	11,17733268	11,64952242	0,222963152						
32	1500	11,43136297	11,95425757	0,273418759						
33	1600	11,69386093	12,24654636	0,305461181						
34	1700	11,94789122	12,52764103	0,336109837						
35	1800	12,20192151	12,79860986	0,356036987						
36	1900	12,4559518	13,06037748	0,365330399						
37	2000	12,70998209	13,31375764	0,364544919						
38	2056	12,86240026	13,45226219	0,347937095						
39	2100	12,97248005	13,55948207	0,344571365						
40	2200	13,24344569	13,79822826	0,307783702						
41	2300	13,51441133	14,03064985	0,266502203						
42	2400	13,80231233	14,25741351	0,207117084						
43	2500	14,09021332	14,47924862	0,151348465						
44	2600	14,37811431	14,69701821	0,101699692						
45	2700	14,69141834	14,91182454	0,048578893						
46	2800	15,00472236	15,12516994	0,01450762						
47	2900	15,35189709	15,33920463	0,000161098						
48	3000	15,69907181	15,55711131	0,020152784						
49	3100	16,08858492	15,78370401	0,092952373						
50	3200	16,50350106	16,02636248	0,227661228						
51	3300	16,93535255	16,29649155	0,408143377						
52	3400	17,42647777	16,61180163	0,663697222						
53	3500	17,9514737	16,99987347	0,905542995						
54	3600	18,56114639	17,50373147	1,118126314						
55	3700	19,2724312	18,19055773	1,1704502						
56	3800	20,0937958	19,16531774	0,86207151						
57	3900	21,11838463	20,59206646	0,277010816						
58	4000	22,48168051	22,72726469	0,060311591						
59	4100	24,48851979	25,97187624	2,200346381						
60	4200	28,45985996	30,9528333	6,214916099						
61	4292	40,11053574	37,90303282	4,873069179						
62			Σ	28,4243266						

Şekil Ek 12.11. Üç eksenli 500 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA katkılı numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (2. Adım-Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

Katkısız Numunenin 500-2										
Dosya	Giriş	Ekle	Sayfa Düzeni	Formüller	Veri	Gözden Geçir	Görünüm	Geliştirici	Ne yapmak istediğinizi so	
X100										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,279433317	0,054482388	0,05060292			Model Parametreleri			
5	4	0,482657548	0,088191908	0,155603141			A_	0,033658		
6	6	0,652011073	0,116892559	0,286351824			B_	0,694856		
7	8	0,779026217	0,142758291	0,404836874			C_	5,32E-08		
8	10	0,906041361	0,166701642	0,546623221			D_	0,002758		
9	20	1,346360528	0,269843822	1,158888217						
10	30	1,617326168	0,357660195	1,586758366						
11	40	1,829018075	0,436802467	1,9382643						
12	50	2,006839277	0,510062764	2,240339929						
13	60	2,150789774	0,578952871	2,47067125						
14	70	2,260869565	0,644409024	2,612944682						
15	80	2,370949357	0,707062307	2,768520114						
16	90	2,472561472	0,767363859	2,9076989						
17	100	2,557238235	0,825650454	2,998396244						
18	200	3,183846279	1,336499588	3,412689796						
19	300	3,607230093	1,771442098	3,370117561						
20	400	3,95440482	2,163422986	3,207615932						
21	500	4,25077349	2,526271266	2,97390792						
22	600	4,538674483	2,867474604	2,792909035						
23	700	4,792704771	3,191670064	2,563312135						
24	800	5,029799707	3,501983318	2,334222918						
25	1000	5,470118873	4,089334534	1,90656539						
26	1100	5,664875427	4,369327831	1,678443576						
27	1200	5,868099658	4,641648815	1,504181669						
28	1300	6,04592086	4,907123437	1,29685957						
29	1400	6,232209738	5,166432467	1,135881191						
30	1500	6,426966292	5,420145527	1,013688053						
31	1600	6,604787494	5,668745413	0,876174778						
32	1700	6,782608696	5,912645914	0,756835241						
33	1800	6,960429897	6,152205154	0,653227235						
34	1900	7,129783423	6,387735756	0,55063474						
35	2000	7,299136948	6,619512726	0,461889083						
36	2100	7,460022798	6,847779658	0,374841662						
37	2200	7,629376323	7,072753671	0,309828777						
38	2300	7,790262172	7,294629407	0,245651838						
39	2400	7,959615698	7,513582285	0,198945806						
40	2500	8,128969223	7,729771198	0,159359063						
41	2600	8,281387396	7,943340769	0,114275522						
42	2700	8,450740922	8,154423253	0,087804161						
43	2800	8,611626771	8,363140186	0,061745583						
44	2900	8,77251262	8,569603815	0,041171983						
45	3000	8,933398469	8,773918385	0,025433897						
46	3100	9,094284319	8,976181316	0,013948319						
47	3200	9,255170168	9,17648432	0,006191463						
48	3300	9,424523693	9,3749145	0,002461072						
49	3400	9,593877219	9,57155548	0,00049826						
50	3500	9,763230744	9,766488621	1,06138E-05						

Şekil Ek 12.12. Üç eksenli 500/200 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

51	3600	9,93258427	9,959794382	0,00074039				
52	3700	10,1019378	10,1515539	0,002461758				
53	3800	10,27129132	10,34185092	0,004978657				
54	3900	10,44064485	10,5307741	0,008123282				
55	4000	10,62693372	10,71842004	0,008369745				
56	4100	10,80475493	10,90489699	0,010028434				
57	4200	10,98257613	11,09032979	0,011610852				
58	4300	11,16886501	11,27486612	0,011236236				
59	4400	11,35515388	11,45868476	0,010718642				
60	4500	11,53297509	11,64200636	0,01188782				
61	4600	11,74466699	11,82510758	0,006470688				
62	4700	11,94789122	12,00833956	0,003654001				
63	4800	12,14264778	12,19215236	0,002450704				
64	4900	12,36280736	12,37712697	0,000205051				
65	5000	12,58296694	12,56401752	0,000359081				
66	5100	12,8115942	12,75380677	0,003339387				
67	5200	13,04868914	12,94777932	0,010182791				
68	5300	13,30271943	13,14761786	0,024056498				
69	5400	13,56521739	13,35553007	0,043968774				
70	5500	13,84465071	13,57441578	0,073026917				
71	5600	14,1325517	13,80808712	0,105277262				
72	5700	14,4543234	14,06155863	0,154264164				
73	5800	14,78456277	14,34142938	0,196367207				
74	5900	15,15714053	14,65638651	0,250754588				
75	6000	15,55512132	15,0178686	0,288640483				
76	6100	15,98697281	15,44093964	0,298152217				
77	6200	16,452695	15,9454406	0,25730703				
78	6300	16,96075558	16,55750655	0,162609779				
79	6400	17,52808989	17,31156564	0,046882749				
80	6500	18,17163328	18,25297276	0,00661611				
81	6600	18,9506595	19,44147952	0,240904286				
82	6700	20,01758671	20,9558061	0,880255625				
83	6800	21,30467351	22,89966494	2,543997689				
84	6900	23,0913532	25,40969711	5,374718476				
85	7000	25,64859143	28,66592892	9,104325482				
86	7100	31,43201433	32,90554903	2,171304515				
87	7154	40,2214623	35,71016468	20,35180625				
88			Σ	98,93987744				

Şekil Ek 12.13. Üç eksenli 500/200 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S Modifiyeli Numunenin 500-200 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerini Belirle										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapma										
L125										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,186288878	0,341731146	0,024162299						
5	4	0,330239375	0,438424855	0,011704098						
6	6	0,448786843	0,507217597	0,003414153						
7	8	0,550398958	0,562478297	0,00014591						
8	10	0,643543397	0,609455223	0,001162004						
9	20	0,948379743	0,781902149	0,027714789						
10	30	1,16007165	0,90458952	0,065271119						
11	40	1,304022146	1,003143377	0,090528034						
12	50	1,43103729	1,086923662	0,118414189						
13	60	1,532649406	1,160545455	0,13846135						
14	70	1,617326168	1,226668952	0,152613061						
15	80	1,685067579	1,286985379	0,158469437						
16	90	1,752808989	1,342645313	0,168234241						
17	100	1,812082723	1,394471513	0,174399123						
18	200	2,193128155	1,78904082	0,163286574						
19	300	2,430223091	2,069757166	0,129935683						
20	400	2,616511969	2,29525453	0,103206342						
21	500	2,760462465	2,486949041	0,074809593						
22	600	2,879009933	2,655400289	0,050001273						
23	700	2,997557401	2,80669497	0,036428468						
24	800	3,099169516	2,944702712	0,023859994						
25	1000	3,285458394	3,19063768	0,008990968						
26	1100	3,370135157	3,301846117	0,004663393						
27	1200	3,446344244	3,406752643	0,001567495						
28	1300	3,531021006	3,506198187	0,000616172						
29	1400	3,59029474	3,600856543	0,000111552						
30	1500	3,674971503	3,691276984	0,000265869						
31	1600	3,742712913	3,777913932	0,001239112						
32	1700	3,801986647	3,861148158	0,003500084						
33	1800	3,878195734	3,941302298	0,003982438						
34	1900	3,945937144	4,018652424	0,005287512						
35	2000	4,005210878	4,093436832	0,007783819						
36	2100	4,056016935	4,165862819	0,012066118						
37	2200	4,115290669	4,236111983	0,01459779						
38	2300	4,174564403	4,304344418	0,016842852						
39	2400	4,233838137	4,37070208	0,018731739						
40	2500	4,293111871	4,435311498	0,020220734						
41	2600	4,343917929	4,498285998	0,023829501						
42	2700	4,394723986	4,559727528	0,027226169						
43	2800	4,445530044	4,619728179	0,03034499						
44	2900	4,504803778	4,678371451	0,030125737						
45	3000	4,555609836	4,735733318	0,032444469						
46	3100	4,606415893	4,791883136	0,034398098						
47	3200	4,657221950	4,847992954	0,036351727						
48	3300	4,708028008	4,900795462	0,037159291						
49	3400	4,758834066	4,953669977	0,037961032						
50	3500	4,809640124	5,005557518	0,038383625						
51	3600	4,860446181	5,056503938	0,038438644						
52	3700	4,902784563	5,106551756	0,041521069						
53	3800	4,95359062	5,155740482	0,040864567						
54	3900	5,004396678	5,204106902	0,039884173						
55	4000	5,055202736	5,251685331	0,03860541						
56	4100	5,106008793	5,298507837	0,037055882						
57	4200	5,148347175	5,344604437	0,038516913						
58	4300	5,199153232	5,390003276	0,036423739						
59	4400	5,241491614	5,434730782	0,037341376						
60	4500	5,292297671	5,478811809	0,034787524						

Şekil Ek 12.14. Üç eksenli 500/200 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

61	4600	5,334636053	5,522269762	0,035206409						
62	4700	5,38544211	5,565126711	0,032286556						
63	4800	5,436248168	5,607403495	0,029294146						
64	4900	5,478586549	5,649119815	0,029081595						
65	5000	5,520924931	5,690294314	0,028685988						
66	5100	5,580198665	5,730944466	0,022724355						
67	5200	5,61406937	5,771087611	0,024654728						
68	5300	5,664875427	5,810739076	0,021276204						
69	5400	5,707213809	5,84991418	0,020363396						
70	5500	5,74955219	5,888627311	0,019341889						
71	5600	5,800358248	5,92689217	0,016010834						
72	5700	5,842696629	5,964721816	0,014890146						
73	5800	5,885035011	6,002128707	0,013710934						
74	5900	5,935841068	6,039124734	0,010667516						
75	6000	5,97817945	6,075721262	0,009514405						
76	6100	6,020517831	6,111929157	0,00835603						
77	6200	6,054388536	6,147758816	0,008718009						
78	6300	6,105194594	6,183220199	0,006087995						
79	6400	6,139065299	6,218322845	0,006281759						
80	6500	6,189871356	6,253075908	0,003994815						
81	6600	6,232209738	6,287488165	0,003055705						
82	6700	6,274548119	6,32156805	0,002210874						
83	6800	6,316886501	6,355323661	0,001477415						
84	6900	6,359224882	6,388762786	0,000872488						
85	7000	6,41003094	6,421892915	0,000140706						
86	7100	6,443901645	6,454721257	0,000117064						
87	7154	6,469304674	6,472325534	9,1256E-06						
88	7200	6,486240026	6,487254756	1,02968E-06						
89	7300	6,528578407	6,519500098	8,24157E-05						
90	7400	6,570916789	6,551463733	0,000378421						
91	7500	6,61325517	6,583151878	0,000906208						
92	7600	6,655593552	6,614570535	0,001682888						
93	7700	6,689464257	6,645725497	0,001913079						
94	7800	6,740270314	6,676622358	0,004051062						
95	7900	6,774141019	6,707266526	0,004472198						
96	8000	6,808011724	6,737663226	0,004948911						
97	8100	6,858817782	6,767817515	0,008281049						
98	8200	6,892688487	6,797734281	0,009016301						
99	8300	6,935026869	6,827418259	0,011579613						
100	8400	6,985832926	6,856874033	0,016630396						
101	8500	7,019703631	6,886106043	0,017848316						
102	8600	7,062042013	6,915118591	0,021586492						
103	8700	7,095912718	6,943915848	0,023103048						
104	8800	7,138251099	6,97250186	0,02747281						
105	8900	7,180589481	7,00088055	0,0322953						
106	9000	7,222927862	7,029055727	0,037586405						
107	9100	7,256798567	7,057031086	0,039907046						
108	9200	7,299136948	7,084810219	0,045935947						
109	9300	7,34147533	7,112396611	0,052477059						
110	9400	7,375346035	7,139793652	0,055484925						
111	9500	7,40921674	7,167004635	0,058666704						
112	9600	7,468490474	7,194032762	0,075327036						
113	9700	7,502361179	7,220881147	0,079231008						
114	9800	7,54469956	7,247552821	0,088296185						
115	9900	7,587037942	7,274050733	0,097960993						
116	10000	7,620908647	7,300377752	0,102740055						
117			Σ	3,836867428						

Şekil Ek 12.15. Üç eksenli 500/200 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümde sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S+%1PPA Modifiyeli Numunenin 500-200 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerini B										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapma										
N91										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,143950497	0,285327016	0,01998732						
5	4	0,270965641	0,369952551	0,009798408						
6	6	0,355642404	0,430657117	0,005627207						
7	8	0,444553004	0,479677291	0,001233715						
8	10	0,524995929	0,521511219	1,21432E-05						
9	20	0,808663084	0,676186954	0,017549925						
10	30	1,007653477	0,787140739	0,048625868						
11	40	1,151603973	0,876738181	0,075551204						
12	50	1,257449927	0,953200842	0,092567506						
13	60	1,350594366	1,020599902	0,108896346						
14	70	1,426803452	1,081289744	0,119379722						
15	80	1,498778701	1,136771173	0,13104945						
16	90	1,558052434	1,188067524	0,136888834						
17	100	1,608858492	1,235912001	0,139089085						
18	200	1,960267057	1,602472855	0,128016691						
19	300	2,167725126	1,865418519	0,091389285						
20	400	2,324377137	2,07752501	0,060823711						
21	500	2,447158443	2,258958806	0,035419103						
22	600	2,561472073	2,418685584	0,020387981						
23	700	2,663084188	2,562512413	0,010114682						
24	800	2,751994789	2,693995997	0,00336386						
25	1000	2,917114476	2,92894653	0,000139997						
26	1100	2,993323563	3,035444325	0,001774159						
27	1200	3,073766488	3,136046895	0,003878849						
28	1300	3,145741736	3,231534078	0,007360326						
29	1400	3,221950822	3,322531522	0,010116477						
30	1500	3,289692233	3,40954986	0,014365851						
31	1600	3,374368995	3,493012004	0,014076164						
32	1700	3,442110405	3,573272694	0,017203546						
33	1800	3,518319492	3,650632792	0,017506809						
34	1900	3,59029474	3,725349973	0,018239916						
35	2000	3,662269989	3,797646843	0,018326893						
36	2100	3,734245237	3,867717204	0,017814766						
37	2200	3,806220485	3,935730966	0,016772965						
38	2300	3,869728057	4,001838027	0,017453044						
39	2400	3,929001791	4,066171392	0,018815499						
40	2500	3,992509363	4,128849693	0,018588685						
41	2600	4,056016935	4,189979251	0,017945902						
42	2700	4,119524507	4,24965577	0,016934146						
43	2800	4,178798241	4,307965753	0,016684246						
44	2900	4,233838137	4,364987675	0,017200201						
45	3000	4,293111871	4,42079298	0,016302465						
46	3100	4,352385605	4,475446921	0,015144087						
47	3200	4,407425501	4,529009278	0,014782615						
48	3300	4,462465397	4,581534973	0,014177564						
49	3400	4,513271454	4,633074597	0,014352793						
50	3500	4,572545188	4,683674869	0,012349806						
51	3600	4,619117408	4,733379034	0,013055719						
52	3700	4,678391142	4,782227208	0,010781929						
53	3800	4,729197199	4,830256687	0,01021302						
54	3900	4,780003257	4,877502207	0,009506045						
55	4000	4,822341638	4,923996185	0,010333647						
56	4100	4,868913858	4,969768927	0,010171745						
57	4200	4,928187592	5,014848812	0,007510167						
58	4300	4,970525973	5,059262458	0,007874164						
59	4400	5,029799707	5,10303487	0,005363389						
60	4500	5,072138088	5,146189569	0,005483622						

Şekil Ek 12.16. Üç eksenli 500/200 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

61	4600	5,11447647	5,188748716	0,005516367					
62	4700	5,161048689	5,230733212	0,004855933					
63	4800	5,203387071	5,272162802	0,004730101					
64	4900	5,245725452	5,313056156	0,004533424					
65	5000	5,29653151	5,353430948	0,003237546					
66	5100	5,338869891	5,393303933	0,002963065					
67	5200	5,381208272	5,432691006	0,002650472					
68	5300	5,43201433	5,471607266	0,001567601					
69	5400	5,470118873	5,510067067	0,001595858					
70	5500	5,508223416	5,548084071	0,001588872					
71	5600	5,554795636	5,585671289	0,000953306					
72	5700	5,592900179	5,622841127	0,00089646					
73	5800	5,63523856	5,659605422	0,000593744					
74	5900	5,68181078	5,695975478	0,000200639					
75	6000	5,719915323	5,731962099	0,000145125					
76	6100	5,758019866	5,767575619	9,13124E-05					
77	6200	5,79612441	5,802825928	4,49103E-05					
78	6300	5,834228953	5,837722501	1,22049E-05					
79	6400	5,872333496	5,872274419	3,49013E-09					
80	6500	5,910438039	5,906490393	1,55839E-05					
81	6600	5,944308745	5,940378783	1,54446E-05					
82	6700	5,982413288	5,973947618	7,16676E-05					
83	6800	6,016283993	6,007204615	8,24351E-05					
84	6900	6,050154698	6,040157193	9,99501E-05					
85	7000	6,088259241	6,072812492	0,000238602					
86	7100	6,117896108	6,105177382	0,000161766					
87	7154	6,143299137	6,122536012	0,000431107					
88	7200	6,156000651	6,137258484	0,000351269					
89	7300	6,189871356	6,169062175	0,000433022					
90	7400	6,223742062	6,200594607	0,000535805					
91	7500	6,257612767	6,231861711	0,000663117					
92	7600	6,29571731	6,262869215	0,001078997					
93	7700	6,329588015	6,293622647	0,001293508					
94	7800	6,36345872	6,324127349	0,001546957					
95	7900	6,393095587	6,354388483	0,00149824					
96	8000	6,435433968	6,384411041	0,002603339					
97	8100	6,465070835	6,41419985	0,002587857					
98	8200	6,503175379	6,443759584	0,003530237					
99	8300	6,532812246	6,473094765	0,003566177					
100	8400	6,566682951	6,502209775	0,00415679					
101	8500	6,604787494	6,531108857	0,005428542					
102	8600	6,634424361	6,559796126	0,005569373					
103	8700	6,664061228	6,588275569	0,005743466					
104	8800	6,697931933	6,616551057	0,006622847					
105	8900	6,731802638	6,644626342	0,007599707					
106	9000	6,765673343	6,672505068	0,008680327					
107	9100	6,79531021	6,700190773	0,009047707					
108	9200	6,824947077	6,727686891	0,009459544					
109	9300	6,854583944	6,754996762	0,009917607					
110	9400	6,892688487	6,782123628	0,012224588					
111	9500	6,922325354	6,809070644	0,012826629					
112	9600	6,956196059	6,835840878	0,01448537					
113	9700	6,981599088	6,862437311	0,014199529					
114	9800	7,011235955	6,888862847	0,014975178					
115	9900	7,04510666	6,915120312	0,016896451					
116	10000	7,074743527	6,941212455	0,017830547					
117			Σ	1,947019492					

Şekil Ek 12.17. Üç eksenli 500/200 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümde sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

Katkısız Numunenin 300 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerini Belirlenmesi.xls										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapmal										
L53										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,005334636	0,009883341	2,06907E-05						
5	4	0,009621397	0,012662893	9,2507E-06						
6	6	0,013146067	0,014638345	2,22689E-06						
7	8	0,015908647	0,016224156	9,9546E-08						
8	10	0,018575965	0,017571586	1,00878E-06						
9	20	0,028197362	0,02251335	3,2308E-05						
10	30	0,034579873	0,026025503	7,31772E-05						
11	40	0,039438202	0,028844916	0,000112218						
12	50	0,043058134	0,03124051	0,000139656						
13	60	0,046201759	0,033344813	0,000165301						
14	70	0,048869077	0,035234183	0,00018591						
15	80	0,051060088	0,036957146	0,000198893						
16	90	0,053155838	0,03854671	0,000213427						
17	100	0,055061065	0,040026469	0,000226039						
18	200	0,066682951	0,051283355	0,000237148						
19	300	0,07363703	0,059283721	0,000206017						
20	400	0,07859062	0,065706085	0,000166011						
21	500	0,082496336	0,071163031	0,000128444						
22	600	0,085830484	0,075956441	9,74967E-05						
23	700	0,088974108	0,080260252	7,59313E-05						
24	800	0,091546165	0,084185006	5,41867E-05						
25	1000	0,09402296	0,091176642	8,10153E-06						
26	1100	0,096404494	0,0943372	4,2737E-06						
27	1200	0,098500244	0,097318132	1,39739E-06						
28	1300	0,100595994	0,100143434	2,0481E-07						
29	1400	0,102501221	0,10283233	1,09633E-07						
30	1500	0,104596971	0,105400486	6,45637E-07						
31	1600	0,106311676	0,107860866	2,39999E-06						
32	1700	0,108121641	0,110224326	4,42128E-06						
33	1800	0,109931607	0,112500068	6,59699E-06						
34	1900	0,111455789	0,114695963	1,04987E-05						
35	2000	0,113075232	0,116818803	1,40143E-05						
36	2100	0,114789936	0,118874498	1,66836E-05						
37	2200	0,116314118	0,120868224	2,07399E-05						
38	2300	0,117933561	0,122804543	2,37265E-05						
39	2400	0,119457743	0,124687501	2,73504E-05						
40	2500	0,121077186	0,126520704	2,96319E-05						
41	2600	0,122410845	0,12830738	3,47691E-05						
42	2700	0,124030288	0,130050434	3,62422E-05						
43	2800	0,125363947	0,13175249	4,08135E-05						
44	2900	0,126888129	0,133415925	4,26121E-05						
45	3000	0,128317049	0,135042905	4,52371E-05						
46	3100	0,12974597	0,136635404	4,74643E-05						
47	3200	0,13117489	0,138195232	4,92852E-05						
48	3300	0,13260381	0,139724048	5,06978E-05						
49	3400	0,134127992	0,141223383	5,03446E-05						
50	3500	0,135461651	0,142694647	5,23162E-05						
51	3600	0,136890572	0,144139145	5,25418E-05						
52	3700	0,138319492	0,14555809	5,23973E-05						
53	3800	0,139748412	0,146952604	5,19004E-05						
54	3900	0,141177333	0,148323737	5,10711E-05						
55	4000	0,142606253	0,149672464	4,99313E-05						
56	4100	0,143939912	0,150999698	4,98406E-05						
57	4200	0,145273571	0,152306294	4,94592E-05						
58	4300	0,146702491	0,153593053	4,74798E-05						
59	4400	0,148131412	0,154860728	4,52837E-05						
60	4500	0,149560332	0,156110025	4,28985E-05						

Şekil Ek 12.18. Üç eksenli 300 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

Sdfs

61	4600	0,150893991	0,15734161	4,15718E-05					
62	4700	0,15222765	0,158556112	4,00494E-05					
63	4800	0,153466048	0,159754124	3,95399E-05					
64	4900	0,154799707	0,160936206	3,76566E-05					
65	5000	0,156133366	0,16210289	3,56352E-05					
66	5100	0,157467025	0,163254676	3,34969E-05					
67	5200	0,158705423	0,164392044	3,23377E-05					
68	5300	0,15994382	0,165515444	3,1043E-05					
69	5400	0,161277479	0,166625307	2,85993E-05					
70	5500	0,162420616	0,167722043	2,81051E-05					
71	5600	0,163754275	0,168806042	2,55204E-05					
72	5700	0,164992672	0,169877675	2,38632E-05					
73	5800	0,166135809	0,170937296	2,30543E-05					
74	5900	0,167469468	0,171985243	2,03922E-05					
75	6000	0,168707865	0,173021841	1,86104E-05					
76	6100	0,169946263	0,174047397	1,68193E-05					
77	6200	0,171089399	0,175062208	1,57832E-05					
78	6300	0,172423058	0,176066557	1,32751E-05					
79	6400	0,173661456	0,177060715	1,1555E-05					
80	6500	0,174804592	0,178044943	1,04999E-05					
81	6600	0,175947728	0,17901949	9,43572E-06					
82	6700	0,177376649	0,179984596	6,80139E-06					
83	6800	0,178519785	0,180940492	5,85982E-06					
84	6900	0,179853444	0,181887398	4,13697E-06					
85	7000	0,18099658	0,182825528	3,34505E-06					
86	7100	0,182139717	0,183755087	2,60942E-06					
87	7154	0,183473376	0,184253555	6,08679E-07					
88	7200	0,184807035	0,184676272	1,70989E-08					
89	7300	0,186045432	0,185589273	2,08081E-07					
90	7400	0,18728383	0,186494275	6,23398E-07					
91	7500	0,188331705	0,187391452	8,84075E-07					
92	7600	0,189760625	0,188280977	2,18936E-06					
93	7700	0,190999023	0,189163014	3,37093E-06					
94	7800	0,192237421	0,190037721	4,83868E-06					
95	7900	0,193475818	0,190905254	6,6078E-06					
96	8000	0,194618955	0,191765759	8,14072E-06					
97	8100	0,195952614	0,192619381	1,11104E-05					
98	8200	0,197286273	0,19346626	1,45925E-05					
99	8300	0,19852467	0,194306528	1,77927E-05					
100	8400	0,199763068	0,195140318	2,13698E-05					
101	8500	0,201191988	0,195967754	2,72926E-05					
102	8600	0,202430386	0,19678896	3,18257E-05					
103	8700	0,203668784	0,197604054	3,6781E-05					
104	8800	0,204811192	0,19841315	4,09443E-05					
105	8900	0,20624084	0,199216361	4,93433E-05					
106	9000	0,207479238	0,200013794	5,57329E-05					
107	9100	0,208717636	0,200805555	6,2601E-05					
108	9200	0,210051295	0,201591746	7,1564E-05					
109	9300	0,211289692	0,202372465	7,95169E-05					
110	9400	0,21252809	0,20314781	8,79897E-05					
111	9500	0,21395701	0,203917873	0,000100784					
112	9600	0,215195408	0,204682746	0,000110516					
113	9700	0,216529067	0,205442517	0,000122912					
114	9800	0,217767465	0,206197273	0,000133869					
115	9900	0,219101124	0,206947096	0,00014772					
116	10000	0,220434783	0,207692069	0,000162377					
117			Σ	0,005432543					

Şekil Ek 12.19. Üç eksenli 300 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümde sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S Modifiyeli Numunenin 300 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerinin Belirlenmesi										
Dosya	Giriş	Ekle	Sayfa Düzeni	Formüller	Veri	Gözden Geçir	Görünüm	Geliştirici	Ne yapma	
M88										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,007144602	0,029207781	0,000486784						
5	4	0,012383977	0,034098316	0,000471513						
6	6	0,016384954	0,037330389	0,000438711						
7	8	0,019719101	0,03980772	0,000403553						
8	10	0,022672203	0,041841951	0,000367479						
9	20	0,032579384	0,048847945	0,000264666						
10	30	0,039342941	0,053478089	0,000199802						
11	40	0,044677577	0,057027019	0,000152509						
12	50	0,048869077	0,059941181	0,000122592						
13	60	0,052393747	0,062432432	0,000100775						
14	70	0,05544211	0,064619362	8,42219E-05						
15	80	0,058299951	0,066575592	6,84862E-05						
16	90	0,060681485	0,068350207	5,88093E-05						
17	100	0,062967758	0,0699777	4,91393E-05						
18	200	0,07925745	0,081694729	5,94033E-06						
19	300	0,090403029	0,089438317	9,30669E-07						
20	400	0,098690767	0,09537365	1,10033E-05						
21	500	0,105644846	0,100247381	2,91326E-05						
22	600	0,111074744	0,10441382	4,43679E-05						
23	700	0,115837811	0,108071306	6,03186E-05						
24	800	0,11993405	0,111342962	7,38068E-05						
25	1000	0,123649243	0,117032748	4,3778E-05						
26	1100	0,126792868	0,119550766	5,2448E-05						
27	1200	0,12974597	0,121896814	6,16092E-05						
28	1300	0,132318026	0,124095602	6,76083E-05						
29	1400	0,134794822	0,126166707	7,44444E-05						
30	1500	0,13679531	0,128125917	7,51584E-05						
31	1600	0,13889106	0,129986167	7,92971E-05						
32	1700	0,140796287	0,131758198	8,16871E-05						
33	1800	0,142510992	0,133451032	8,20829E-05						
34	1900	0,144130435	0,135072329	8,20493E-05						
35	2000	0,145845139	0,136628648	8,49437E-05						
36	2100	0,147083537	0,138125655	8,02436E-05						
37	2200	0,148417196	0,139568282	7,83033E-05						
38	2300	0,149560332	0,140960845	7,39512E-05						
39	2400	0,15079873	0,14230715	7,21069E-05						
40	2500	0,151941866	0,143610569	6,94105E-05						
41	2600	0,152989741	0,144874103	6,58636E-05						
42	2700	0,154132877	0,146100439	6,45201E-05						
43	2800	0,155085491	0,147291992	6,07386E-05						
44	2900	0,156038105	0,148450939	5,75651E-05						
45	3000	0,156990718	0,149579251	5,49298E-05						
46	3100	0,157752809	0,15067872	5,00427E-05						
47	3200	0,158705423	0,15175098	4,83643E-05						
48	3300	0,159658036	0,152797524	4,70666E-05						
49	3400	0,160229604	0,153819719	4,10866E-05						
50	3500	0,160991695	0,154818825	3,81043E-05						
51	3600	0,161753786	0,155796001	3,54952E-05						
52	3700	0,162515877	0,156752318	3,32186E-05						
53	3800	0,163182706	0,157688766	3,01834E-05						
54	3900	0,163849536	0,158606267	2,74919E-05						
55	4000	0,164421104	0,159505674	2,41614E-05						
56	4100	0,165087934	0,160387785	2,20914E-05						
57	4200	0,165754763	0,16125334	2,02628E-05						
58	4300	0,166326331	0,162103035	1,78362E-05						
59	4400	0,166897899	0,162937519	1,56846E-05						
60	4500	0,167374206	0,163757401	1,30813E-05						

Şekil Ek 12.20. Üç eksenli 300 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

61	4600	0,168136297	0,164563253	1,27666E-05					
62	4700	0,168517342	0,165355611	9,99655E-06					
63	4800	0,16975574	0,166134982	1,31099E-05					
64	4900	0,170136786	0,166901843	1,04649E-05					
65	5000	0,170517831	0,167656644	8,18639E-06					
66	5100	0,170898876	0,168399811	6,24533E-06					
67	5200	0,171470445	0,169131744	5,46952E-06					
68	5300	0,17185149	0,169852826	3,99466E-06					
69	5400	0,172327797	0,170563418	3,11303E-06					
70	5500	0,172804104	0,171263862	2,37235E-06					
71	5600	0,173185149	0,171954483	1,51454E-06					
72	5700	0,173661456	0,172635592	1,0524E-06					
73	5800	0,17394724	0,173307483	4,09289E-07					
74	5900	0,174518808	0,173970437	3,00711E-07					
75	6000	0,174899853	0,17462472	7,56987E-08					
76	6100	0,175280899	0,175270587	1,06326E-10					
77	6200	0,175661944	0,175908284	6,06831E-08					
78	6300	0,17604299	0,176538041	2,45076E-07					
79	6400	0,176424035	0,177160082	5,41765E-07					
80	6500	0,176709819	0,17777462	1,1338E-06					
81	6600	0,176995603	0,178381858	1,9217E-06					
82	6700	0,177376649	0,178981992	2,57713E-06					
83	6800	0,177757694	0,17957521	3,30336E-06					
84	6900	0,178043478	0,18016169	4,48682E-06					
85	7000	0,178329262	0,180741605	5,8194E-06					
86	7100	0,178710308	0,181315122	6,78506E-06					
87	7154	0,178996092	0,181622217	6,89653E-06					
88	7200	0,179281876	0,181882399	6,76272E-06					
89	7300	0,179662921	0,182443589	7,73211E-06					
90	7400	0,179948705	0,182998841	9,30332E-06					
91	7500	0,180234489	0,183548295	1,09813E-05					
92	7600	0,180520274	0,184092088	1,27579E-05					
93	7700	0,180806058	0,184630352	1,46252E-05					
94	7800	0,181187103	0,185163214	1,58095E-05					
95	7900	0,181472887	0,185690797	1,77908E-05					
96	8000	0,18166341	0,186213218	2,07008E-05					
97	8100	0,182044455	0,186730592	2,19599E-05					
98	8200	0,182330239	0,187243028	2,41355E-05					
99	8300	0,182711285	0,187750634	2,5395E-05					
100	8400	0,182806546	0,188253512	2,96694E-05					
100	8400	0,182806546	0,188253512	2,96694E-05					
101	8500	0,18309233	0,188751762	3,20292E-05					
102	8600	0,183378114	0,18924548	3,4426E-05					
103	8700	0,183663898	0,189734759	3,68553E-05					
104	8800	0,183854421	0,190219689	4,05166E-05					
105	8900	0,184140205	0,190700359	4,30356E-05					
106	9000	0,184425989	0,191176852	4,55741E-05					
107	9100	0,184616512	0,191649251	4,94594E-05					
108	9200	0,184807035	0,192117635	5,34449E-05					
109	9300	0,185092819	0,192582081	5,6089E-05					
110	9400	0,185378603	0,193042665	5,87378E-05					
111	9500	0,185569126	0,193499459	6,28902E-05					
112	9600	0,185664387	0,193952534	6,86934E-05					
113	9700	0,186140694	0,194401958	6,82485E-05					
114	9800	0,186331216	0,194847798	7,25322E-05					
115	9900	0,186521739	0,195290118	7,68845E-05					
116	10000	0,186712262	0,195728982	8,13012E-05					
117			Σ	0,006632635					

Şekil Ek 12.21. Üç eksenli 300 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S+ %1PPA Modifiyeli Numunenin 300 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerini Belirle										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapma										
M62										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,0041915	0,016637895	0,000154913						
5	4	0,007335125	0,019940639	0,000158899						
6	6	0,010002443	0,022168737	0,000148019						
7	8	0,012098192	0,023899003	0,000139259						
8	10	0,01400342	0,025333573	0,000128372						
9	20	0,021338544	0,030362474	8,14313E-05						
10	30	0,026482658	0,033755071	5,2888E-05						
11	40	0,030388373	0,036389649	3,60153E-05						
12	50	0,033627259	0,038573986	2,44701E-05						
13	60	0,036389839	0,040455701	1,65312E-05						
14	70	0,038866634	0,042118106	1,05721E-05						
15	80	0,040962384	0,043613263	7,02716E-06						
16	90	0,042867611	0,04497608	4,44564E-06						
17	100	0,044582316	0,046231207	2,71884E-06						
18	200	0,056585247	0,055408442	1,38487E-06						
19	300	0,064110894	0,061599588	6,30666E-06						
20	400	0,069731314	0,066407427	1,10482E-05						
21	500	0,074018075	0,070393621	1,31367E-05						
22	600	0,07782853	0,073827561	1,60078E-05						
23	700	0,081067416	0,076861281	1,76916E-05						
24	800	0,083925256	0,079589791	1,87963E-05						
25	1000	0,086592574	0,084367274	4,95196E-06						
26	1100	0,088878847	0,086494281	5,68616E-06						
27	1200	0,09116512	0,088482876	7,19443E-06						
28	1300	0,093070347	0,090352555	7,38639E-06						
29	1400	0,095070835	0,092118812	8,71444E-06						
30	1500	0,096690278	0,093794179	8,38739E-06						
31	1600	0,098309722	0,095388951	8,5309E-06						
32	1700	0,099929165	0,0969117	9,10509E-06						
33	1800	0,101453346	0,098369643	9,50922E-06						
34	1900	0,102882267	0,09976892	9,69293E-06						
35	2000	0,104215926	0,10111148	9,61698E-06						
36	2100	0,105549585	0,102411846	9,8454E-06						
37	2200	0,106692721	0,103664033	9,17295E-06						
38	2300	0,107931119	0,104874851	9,34077E-06						
39	2400	0,109169516	0,106047379	9,74774E-06						
40	2500	0,110217391	0,107184351	9,19933E-06						
41	2600	0,111265266	0,108288204	8,8629E-06						
42	2700	0,112313141	0,109361124	8,71441E-06						
43	2800	0,113265755	0,110405075	8,18349E-06						
44	2900	0,114218368	0,111421836	7,82059E-06						
45	3000	0,115075721	0,112413015	7,09E-06						
46	3100	0,116123596	0,113380078	7,52689E-06						
47	3200	0,116980948	0,114324362	7,05745E-06						
48	3300	0,117647777	0,11524709	5,7633E-06						
49	3400	0,118505129	0,116149388	5,54952E-06						
50	3500	0,119362482	0,117032287	5,42981E-06						
51	3600	0,120124573	0,117896743	4,96322E-06						
52	3700	0,120886663	0,118743637	4,59256E-06						
53	3800	0,121648754	0,119573786	4,30549E-06						
54	3900	0,122410845	0,12038795	4,09211E-06						
55	4000	0,123077675	0,121186834	3,57528E-06						
56	4100	0,123744504	0,121971097	3,14497E-06						
57	4200	0,124601856	0,122741353	3,46147E-06						
58	4300	0,125078163	0,123498177	2,49636E-06						
59	4400	0,125935515	0,124242109	2,86763E-06						
60	4500	0,126411822	0,124973652	2,06833E-06						

Şekil Ek 12.22. Üç eksenli 300 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

61	4600	0,127078652	0,125693283	1,91925E-06					
62	4700	0,12765022	0,126401447	1,55943E-06					
63	4800	0,128317049	0,127098566	1,4847E-06					
64	4900	0,128888617	0,127785037	1,21789E-06					
65	5000	0,129460186	0,128461235	9,97902E-07					
66	5100	0,130031754	0,129127514	8,17649E-07					
67	5200	0,130603322	0,129784211	6,70942E-07					
68	5300	0,13117489	0,130431644	5,52415E-07					
69	5400	0,131651197	0,131070113	3,37658E-07					
70	5500	0,132222765	0,131699907	2,73381E-07					
71	5600	0,132794333	0,132321297	2,23763E-07					
72	5700	0,13327064	0,132934543	1,12961E-07					
73	5800	0,133842208	0,133539892	9,13952E-08					
74	5900	0,134318515	0,134137578	3,2738E-08					
75	6000	0,134890083	0,134727827	2,6327E-08					
76	6100	0,135271128	0,135310853	1,578E-09					
77	6200	0,135652174	0,135886859	5,50772E-08					
78	6300	0,136223742	0,136456043	5,39636E-08					
79	6400	0,136700049	0,13701859	1,01469E-07					
80	6500	0,137176356	0,137574682	1,58664E-07					
81	6600	0,137557401	0,138124488	3,21587E-07					
82	6700	0,138033708	0,138668174	4,02547E-07					
83	6800	0,138510015	0,139205898	4,84253E-07					
84	6900	0,138986321	0,139737811	5,64737E-07					
85	7000	0,139176844	0,140264059	1,18204E-06					
86	7100	0,139748412	0,140784783	1,07406E-06					
87	7154	0,140224719	0,141063724	7,03929E-07					
88	7200	0,140605765	0,141300116	4,82124E-07					
89	7300	0,141082071	0,141810188	5,30154E-07					
90	7400	0,141463117	0,142315124	7,25917E-07					
91	7500	0,141844162	0,142815045	9,42613E-07					
92	7600	0,142225208	0,143310064	1,17691E-06					
93	7700	0,142606253	0,143800296	1,42574E-06					
94	7800	0,142987298	0,144285846	1,68622E-06					
95	7900	0,143273083	0,144766818	2,23125E-06					
96	8000	0,143654128	0,145243314	2,52551E-06					
97	8100	0,144035173	0,14571543	2,82326E-06					
98	8200	0,144511148	0,146183259	2,79484E-06					
99	8300	0,144797264	0,146646892	3,42112E-06					
100	8400	0,145273571	0,147106417	3,35932E-06					
101	8500	0,145559355	0,147561917	4,01026E-06					
102	8600	0,145845139	0,148013476	4,70169E-06					
103	8700	0,146226185	0,148461173	4,99517E-06					
104	8800	0,14660723	0,148905084	5,28013E-06					
105	8900	0,146893014	0,149345283	6,01362E-06					
106	9000	0,147369321	0,149781844	5,82027E-06					
107	9100	0,147559844	0,150214836	7,04898E-06					
108	9200	0,147940889	0,150644326	7,30857E-06					
109	9300	0,148321935	0,151070382	7,55396E-06					
110	9400	0,148512457	0,151493067	8,88403E-06					
111	9500	0,148893503	0,151912442	9,114E-06					
112	9600	0,149274548	0,152328569	9,32704E-06					
113	9700	0,149560332	0,152741506	1,01199E-05					
114	9800	0,149846116	0,15315131	1,09243E-05					
115	9900	0,1501319	0,153558035	1,17384E-05					
116	10000	0,150512946	0,153961738	1,18942E-05					
117			Σ	0,001457863					

Şekil Ek 12.23. Üç eksenli 300 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümde sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

Katkısız Numunenin 300-100 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerini Belirlenmesi										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapma										
M57										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,003619932	0,005394536	3,14922E-06						
5	4	0,006191988	0,007165185	9,47112E-07						
6	6	0,008668784	0,008459363	4,38569E-08						
7	8	0,010669272	0,009517014	1,3277E-06						
8	10	0,012479238	0,010427636	4,20907E-06						
9	20	0,018861749	0,0138503	2,51146E-05						
10	30	0,02314851	0,016351945	4,61933E-05						
11	40	0,026292135	0,018396384	6,23429E-05						
12	50	0,02876893	0,020156616	7,4172E-05						
13	60	0,03086468	0,021719146	8,36408E-05						
14	70	0,032579384	0,023134376	8,92082E-05						
15	80	0,034103566	0,024434631	9,34883E-05						
16	90	0,035246702	0,025642065	9,22491E-05						
17	100	0,036675623	0,026772623	9,80694E-05						
18	200	0,044963361	0,035560203	8,84194E-05						
19	300	0,050012213	0,0419831	6,44667E-05						
20	400	0,053917929	0,047232132	4,46999E-05						
21	500	0,057347338	0,05175147	3,13137E-05						
22	600	0,060395701	0,055763216	2,14599E-05						
23	700	0,063063019	0,059396774	1,34414E-05						
24	800	0,065539814	0,062735138	7,86621E-06						
25	1000	0,068111871	0,068737859	3,9186E-07						
26	1100	0,070207621	0,071473741	1,60306E-06						
27	1200	0,072398632	0,07406638	2,78138E-06						
28	1300	0,074399121	0,076534347	4,55919E-06						
29	1400	0,076494871	0,078892582	5,74902E-06						
30	1500	0,078304836	0,081153314	8,11383E-06						
31	1600	0,080400586	0,083326697	8,56212E-06						
32	1700	0,082401075	0,085421265	9,12155E-06						
33	1800	0,084211041	0,087444276	1,04538E-05						
34	1900	0,086021006	0,089401954	1,14308E-05						
35	2000	0,087926234	0,091299691	1,13802E-05						
36	2100	0,089640938	0,093142188	1,22587E-05						
37	2200	0,091355642	0,094933572	1,28016E-05						
38	2300	0,093070347	0,096677493	1,30115E-05						
39	2400	0,094785051	0,098377194	1,29035E-05						
40	2500	0,096499756	0,10003557	1,2502E-05						
41	2600	0,098023937	0,101655221	1,31862E-05						
42	2700	0,099643381	0,103238491	1,29248E-05						
43	2800	0,101167562	0,1047875	1,3104E-05						
44	2900	0,102787005	0,106304176	1,23705E-05						
45	3000	0,104406448	0,107790273	1,14503E-05						
46	3100	0,106025892	0,109247398	1,03781E-05						
47	3200	0,107550073	0,110677025	9,77783E-06						
48	3300	0,108978994	0,112080507	9,61938E-06						
49	3400	0,110503175	0,113459094	8,73745E-06						
50	3500	0,112027357	0,11481394	7,76505E-06						
51	3600	0,113361016	0,116146117	7,75678E-06						
52	3700	0,114789936	0,117456616	7,11118E-06						
53	3800	0,116218857	0,118746364	6,38829E-06						
54	3900	0,117552516	0,120016222	6,06985E-06						
55	4000	0,118886175	0,121266996	5,66831E-06						
56	4100	0,120219834	0,122499438	5,19659E-06						
57	4200	0,121553493	0,123714255	4,66889E-06						
58	4300	0,122791891	0,12491211	4,49533E-06						
59	4400	0,124030288	0,126093626	4,25736E-06						
60	4500	0,125268686	0,127259389	3,9629E-06						

Şekil Ek 12.24. Üç eksenli 300/100 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

61	4600	0,126507084	0,128409954	3,62092E-06						
62	4700	0,127745481	0,129545842	3,2413E-06						
63	4800	0,128698095	0,130667548	3,87874E-06						
64	4900	0,130127015	0,131775537	2,71762E-06						
65	5000	0,131079629	0,132870252	3,20633E-06						
66	5100	0,132318026	0,133952115	2,67024E-06						
67	5200	0,133461163	0,135021522	2,43472E-06						
68	5300	0,134604299	0,136078853	2,17431E-06						
69	5400	0,135556913	0,137124469	2,45723E-06						
70	5500	0,136700049	0,138158712	2,1277E-06						
71	5600	0,137747924	0,139181909	2,05631E-06						
72	5700	0,138986321	0,140194374	1,45939E-06						
73	5800	0,140034196	0,141196403	1,35072E-06						
74	5900	0,141082071	0,142188282	1,2237E-06						
75	6000	0,142129946	0,143170282	1,0823E-06						
76	6100	0,143177821	0,144142665	9,30924E-07						
77	6200	0,144320957	0,14510568	6,1579E-07						
78	6300	0,145273571	0,146059566	6,17789E-07						
79	6400	0,146226185	0,147004553	6,05857E-07						
80	6500	0,14727406	0,147940861	4,44623E-07						
81	6600	0,148226673	0,1488687	4,12199E-07						
82	6700	0,149274548	0,149788275	2,63915E-07						
83	6800	0,150227162	0,150699781	2,23369E-07						
84	6900	0,151179775	0,151603405	1,79462E-07						
85	7000	0,152037128	0,152499329	2,1363E-07						
86	7100	0,153180264	0,153387726	4,30406E-08						
87	7154	0,154132877	0,153864391	7,20851E-08						
88	7200	0,155085491	0,154268765	6,67041E-07						
89	7300	0,156038105	0,155142608	8,01914E-07						
90	7400	0,156990718	0,15600941	9,62965E-07						
91	7500	0,157943332	0,156869323	1,15349E-06						
92	7600	0,158895945	0,157722492	1,37699E-06						
93	7700	0,159848559	0,158569058	1,63712E-06						
94	7800	0,16061065	0,159409156	1,44359E-06						
95	7900	0,161658525	0,160242918	2,00394E-06						
96	8000	0,162611138	0,161070471	2,37366E-06						
97	8100	0,163754275	0,161891938	3,4683E-06						
98	8200	0,164611627	0,162707437	3,62594E-06						
99	8300	0,165468979	0,163517086	3,80989E-06						
100	8400	0,166326331	0,164320994	4,02138E-06						
101	8500	0,167088422	0,165119271	3,87756E-06						
102	8600	0,168041036	0,165912021	4,5327E-06						
103	8700	0,169088911	0,166699346	5,71002E-06						
104	8800	0,16975574	0,167481346	5,17287E-06						
105	8900	0,170708354	0,168258116	6,00367E-06						
106	9000	0,171660967	0,169029748	6,92331E-06						
107	9100	0,172518319	0,169796335	7,4092E-06						
108	9200	0,173375672	0,170557963	7,93948E-06						
109	9300	0,174137763	0,171314719	7,96958E-06						
110	9400	0,175090376	0,172066684	9,14271E-06						
111	9500	0,17604299	0,17281394	1,04268E-05						
112	9600	0,176805081	0,173556566	1,05528E-05						
113	9700	0,177662433	0,174294638	1,1342E-05						
114	9800	0,178519785	0,175028231	1,2191E-05						
115	9900	0,179377137	0,175757416	1,31024E-05						
116	10000	0,180329751	0,176482265	1,48031E-05						
117			Σ	0,001453105						

Şekil Ek 12.25. Üç eksenli 300/100 kPa basınç altındaki katkısız numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S Modifiyeli Numunenin 300-100 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerini Belirlenmesi										
Dosya	Giriş	Ekle	Sayfa Düzeni	Formüller	Veri	Gözden Geçir	Görünüm	Geliştirici	Ne yapmalı	
M52										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,006191988	0,021254829	0,000226889						
5	4	0,011336102	0,025155246	0,000190969						
6	6	0,015337079	0,027760726	0,000154347						
7	8	0,018575965	0,029771417	0,000125338						
8	10	0,021148021	0,031430789	0,000105735						
9	20	0,030578896	0,037198569	4,38201E-05						
10	30	0,036580362	0,041051448	1,99906E-05						
11	40	0,041248168	0,044024777	7,70956E-06						
12	50	0,044772838	0,046478591	2,90959E-06						
13	60	0,047630679	0,048584689	9,10135E-07						
14	70	0,050202736	0,050439653	5,61297E-08						
15	80	0,052393747	0,052103645	8,41589E-08						
16	90	0,054203713	0,053616898	3,44352E-07						
17	100	0,056013679	0,055007751	1,01189E-06						
18	200	0,067635564	0,065102075	6,41857E-06						
19	300	0,074684905	0,071845089	8,06455E-06						
20	400	0,079829018	0,077048781	7,72972E-06						
21	500	0,084020518	0,081343256	7,16773E-06						
22	600	0,087545188	0,085029187	6,33026E-06						
23	700	0,090784074	0,088275603	6,29243E-06						
24	800	0,093737176	0,091187795	6,49935E-06						
25	1000	0,096404494	0,096270338	1,7998E-08						
26	1100	0,09888129	0,098526659	1,25763E-07						
27	1200	0,101262824	0,100632664	3,97101E-07						
28	1300	0,103453835	0,10260973	7,12513E-07						
29	1400	0,105454323	0,10447482	9,59427E-07						
30	1500	0,107359551	0,106241636	1,24973E-06						
31	1600	0,109264778	0,107921421	1,80461E-06						
32	1700	0,110979482	0,10952352	2,11983E-06						
33	1800	0,112789448	0,111055795	3,00555E-06						
34	1900	0,114218368	0,112524928	2,86774E-06						
35	2000	0,11574255	0,113936647	3,26129E-06						
36	2100	0,11717147	0,115295907	3,51774E-06						
37	2200	0,118695652	0,11660702	4,36238E-06						
38	2300	0,11993405	0,11787377	4,24475E-06						
39	2400	0,121458232	0,119099492	5,56365E-06						
40	2500	0,122506106	0,120287145	4,92379E-06						
41	2600	0,123744504	0,121439365	5,31367E-06						
42	2700	0,124982902	0,122558513	5,87766E-06						
43	2800	0,126126038	0,123646712	6,14706E-06						
44	2900	0,127269174	0,12470588	6,57048E-06						
45	3000	0,128221788	0,125737752	6,17043E-06						
46	3100	0,129364924	0,126743908	6,86972E-06						
47	3200	0,130412799	0,127725789	7,22002E-06						
48	3300	0,131365413	0,128684712	7,18616E-06						
49	3400	0,132318026	0,129621885	7,26918E-06						
50	3500	0,133175379	0,130538421	6,95355E-06						
51	3600	0,133937469	0,131435344	6,26063E-06						
52	3700	0,134890083	0,132313603	6,63825E-06						
53	3800	0,135652174	0,133174073	6,14098E-06						
54	3900	0,136509526	0,134017571	6,20984E-06						
55	4000	0,137176356	0,134844854	5,4359E-06						
56	4100	0,138033708	0,135656626	5,65052E-06						
57	4200	0,138795799	0,136453547	5,48614E-06						
58	4300	0,139367367	0,137236233	4,54173E-06						
59	4400	0,140129458	0,13800526	4,51222E-06						
60	4500	0,140796287	0,138761168	4,14171E-06						

Şekil Ek 12.26. Üç eksenli 300/100 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

61	4600	0,141367855	0,139504467	3,47222E-06					
62	4700	0,142129946	0,140235634	3,58842E-06					
63	4800	0,142701514	0,140955118	3,0499E-06					
64	4900	0,143273083	0,141663345	2,59126E-06					
65	5000	0,143939912	0,142360714	2,49387E-06					
66	5100	0,144511148	0,143047604	2,14293E-06					
67	5200	0,145083048	0,143724375	1,84599E-06					
68	5300	0,145749878	0,144391364	1,84556E-06					
69	5400	0,146321446	0,145048894	1,61939E-06					
70	5500	0,146797753	0,145697272	1,21106E-06					
71	5600	0,147369321	0,146336786	1,06613E-06					
72	5700	0,147940889	0,146967714	9,47069E-07					
73	5800	0,148321935	0,147590319	5,35262E-07					
74	5900	0,148988764	0,14820485	6,14521E-07					
75	6000	0,149465071	0,148811547	4,27093E-07					
76	6100	0,150036639	0,149410638	3,91877E-07					
77	6200	0,150417684	0,150002341	1,7251E-07					
78	6300	0,150893991	0,150586863	9,43278E-08					
79	6400	0,151370298	0,151164404	4,23925E-08					
80	6500	0,151846605	0,151735154	1,24213E-08					
81	6600	0,152418173	0,152299296	1,41318E-08					
82	6700	0,152799218	0,152857004	3,33919E-09					
83	6800	0,153180264	0,153408447	5,20676E-08					
84	6900	0,153561309	0,153953785	1,54038E-07					
85	7000	0,153942355	0,154493174	3,03402E-07					
86	7100	0,154418661	0,155026761	3,69785E-07					
87	7154	0,154894968	0,155312536	1,74363E-07					
88	7200	0,155085491	0,155554689	2,20147E-07					
89	7300	0,155657059	0,156077096	1,76431E-07					
90	7400	0,156038105	0,156594114	3,09147E-07					
91	7500	0,15641915	0,157105871	4,71585E-07					
92	7600	0,156704934	0,157612488	8,23654E-07					
93	7700	0,157085979	0,158114084	1,057E-06					
94	7800	0,157467025	0,158610774	1,30816E-06					
95	7900	0,15784807	0,159102666	1,57401E-06					
96	8000	0,158133854	0,159589868	2,11998E-06					
97	8100	0,158610161	0,160072482	2,13838E-06					
98	8200	0,158895945	0,160550607	2,73791E-06					
99	8300	0,159181729	0,161024338	3,39521E-06					
100	8400	0,159562775	0,161493769	3,72874E-06					
101	8500	0,159848559	0,161958988	4,45391E-06					
102	8600	0,160134343	0,162420083	5,22461E-06					
103	8700	0,160515388	0,162877137	5,57786E-06					
104	8800	0,160705911	0,163330232	6,88706E-06					
105	8900	0,161086957	0,163779446	7,2495E-06					
106	9000	0,161277479	0,164224856	8,68703E-06					
107	9100	0,161658525	0,164666535	9,04813E-06					
108	9200	0,16203957	0,165104555	9,39413E-06					
109	9300	0,162230093	0,165538987	1,09488E-05					
110	9400	0,162611138	0,165969896	1,12813E-05					
111	9500	0,162801661	0,16639735	1,2929E-05					
112	9600	0,163182706	0,166821411	1,32402E-05					
113	9700	0,163373229	0,167242142	1,49685E-05					
114	9800	0,163659013	0,167659603	1,60047E-05					
115	9900	0,163944797	0,168073851	1,70491E-05					
116	10000	0,16413532	0,168484944	1,89192E-05					
117			Σ	0,001309506					

Şekil Ek 12.27. Üç eksenli 300/100 kPa basınç altındaki %3S modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümde sonra-devam)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

%3S+%1PPA Modifiyeli Numunenin 300-100 Kpa Basınç Altındaki Francken Model Parametrelerinin Belirlenmesi										
Dosya Giriş Ekle Sayfa Düzeni Formüller Veri Gözden Geçir Görünüm Geliştirici Ne yapmalı										
K55										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Zaman (s)	% Deformasyon	Model uyumu	Farkların Karesi						
2	t	y	y_model	(y-y_model)^2						
3	0	0	0	0						
4	2	0,002953102	0,010299184	5,39649E-05						
5	4	0,005334636	0,012579644	5,24901E-05						
6	6	0,007239863	0,014141043	4,76263E-05						
7	8	0,009049829	0,015365047	3,9882E-05						
8	10	0,010574011	0,016386958	3,37904E-05						
9	20	0,016289692	0,020015381	1,38808E-05						
10	30	0,020385931	0,022499711	4,46807E-06						
11	40	0,023529555	0,024447215	8,42099E-07						
12	50	0,025911089	0,026073171	2,62703E-08						
13	60	0,028102101	0,027481629	3,84985E-07						
14	70	0,029816805	0,028731659	1,17754E-06						
15	80	0,031436248	0,029860352	2,48345E-06						
16	90	0,032865169	0,030892677	3,89072E-06						
17	100	0,034103566	0,031846329	5,09512E-06						
18	200	0,042962872	0,038897788	1,65249E-05						
19	300	0,04839277	0,043725821	2,17804E-05						
20	400	0,052203224	0,04751059	2,20208E-05						
21	500	0,055156326	0,050670464	2,0123E-05						
22	600	0,057823644	0,053407654	1,9501E-05						
23	700	0,059919394	0,055836956	1,66663E-05						
24	800	0,061919883	0,058030452	1,51277E-05						
25	1000	0,063444064	0,061889989	2,41515E-06						
26	1100	0,065063508	0,06361576	2,09597E-06						
27	1200	0,066492428	0,065233252	1,58552E-06						
28	1300	0,067921348	0,066757493	1,35456E-06						
29	1400	0,069064485	0,068200454	7,46549E-07						
30	1500	0,070207621	0,069571839	4,04219E-07						
31	1600	0,071446019	0,070879636	3,20789E-07						
32	1700	0,072398632	0,072130507	7,1891E-08						
33	1800	0,073541768	0,073330071	4,48159E-08						
34	1900	0,074589643	0,074483115	1,13482E-08						
35	2000	0,075542257	0,075593758	2,65231E-09						
36	2100	0,076494871	0,076665565	2,91365E-08						
37	2200	0,077352223	0,077701651	1,221E-07						
38	2300	0,078400098	0,078704754	9,28153E-08						
39	2400	0,07925745	0,07967729	1,76266E-07						
40	2500	0,080019541	0,080621409	3,62246E-07						
41	2600	0,080972154	0,081539031	3,21349E-07						
42	2700	0,081734245	0,082431875	4,86688E-07						
43	2800	0,082686859	0,083301494	3,77776E-07						
44	2900	0,083163166	0,084149289	9,72439E-07						
45	3000	0,084115779	0,084976533	7,40897E-07						
46	3100	0,084782609	0,085784385	1,00356E-06						
47	3200	0,0855447	0,086573905	1,05926E-06						
48	3300	0,08630679	0,087346061	1,08008E-06						
49	3400	0,086878359	0,088101745	1,49668E-06						
50	3500	0,087830972	0,088841778	1,02173E-06						
51	3600	0,08840254	0,089566918	1,35578E-06						
52	3700	0,089259893	0,090277866	1,03627E-06						
53	3800	0,089831461	0,090975271	1,3083E-06						
54	3900	0,09049829	0,09165974	1,34897E-06						
55	4000	0,091260381	0,092331833	1,14801E-06						
56	4100	0,092022472	0,092992077	9,40135E-07						
57	4200	0,09259404	0,093640962	1,09605E-06						
58	4300	0,093356131	0,094278946	8,51588E-07						
59	4400	0,09402296	0,09490646	7,80572E-07						
60	4500	0,09468979	0,095523909	6,95754E-07						

Şekil Ek 12.28. Üç eksenli 300/100 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 12. Francken Model Parametresinin Belirlenmesi

61	4600	0,095261358	0,096131671	7,57444E-07					
62	4700	0,095928188	0,096730105	6,43071E-07					
63	4800	0,096499756	0,097319548	6,72059E-07					
64	4900	0,097166585	0,097900318	5,38363E-07					
65	5000	0,097642892	0,098472715	6,88606E-07					
66	5100	0,098309722	0,099037025	5,28971E-07					
67	5200	0,09888129	0,099593517	5,07268E-07					
68	5300	0,099548119	0,100142447	3,53226E-07					
69	5400	0,100119687	0,100684057	3,18513E-07					
70	5500	0,100691255	0,101218577	2,78068E-07					
71	5600	0,101262824	0,101746228	2,33679E-07					
72	5700	0,10173913	0,102267217	2,78875E-07					
73	5800	0,102310699	0,102781743	2,21883E-07					
74	5900	0,102977528	0,103289996	9,7636E-08					
75	6000	0,103358574	0,103792156	1,87994E-07					
76	6100	0,103930142	0,104288398	1,28347E-07					
77	6200	0,10450171	0,104778885	7,68259E-08					
78	6300	0,105073278	0,105263775	3,62892E-08					
79	6400	0,105549585	0,10574322	3,74947E-08					
80	6500	0,106025892	0,106217365	3,66622E-08					
81	6600	0,106502198	0,106686349	3,39113E-08					
82	6700	0,106978505	0,107150303	2,95146E-08					
83	6800	0,107454812	0,107609357	2,38843E-08					
84	6900	0,10802638	0,108063634	1,38783E-09					
85	7000	0,108407426	0,10851325	1,11988E-08					
86	7100	0,108978994	0,108958319	4,27436E-10					
87	7154	0,109360039	0,109196805	2,66455E-08					
88	7200	0,109836346	0,109398951	1,91314E-07					
89	7300	0,110217391	0,10983525	1,46032E-07					
90	7400	0,110788959	0,110267317	2,7211E-07					
91	7500	0,111170005	0,110695251	2,25391E-07					
92	7600	0,11155105	0,111119144	1,86543E-07					
93	7700	0,112027357	0,111539087	2,38408E-07					
94	7800	0,112313141	0,111955168	1,28145E-07					
95	7900	0,112884709	0,112367471	2,67535E-07					
96	8000	0,113265755	0,112776078	2,39784E-07					
97	8100	0,113742062	0,113181066	3,14715E-07					
98	8200	0,114027846	0,113582514	1,98321E-07					
99	8300	0,114504152	0,113980493	2,74219E-07					
100	8400	0,114885198	0,114375075	2,60225E-07					
101	8500	0,115266243	0,114766329	2,49914E-07					
102	8600	0,115552027	0,115154323	1,58169E-07					
103	8700	0,116028334	0,115539119	2,39331E-07					
104	8800	0,116314118	0,115920782	1,54713E-07					
105	8900	0,116695164	0,116299371	1,56651E-07					
106	9000	0,117076209	0,116674947	1,61012E-07					
107	9100	0,117361993	0,117047564	9,88654E-08					
108	9200	0,117743039	0,11741728	1,06118E-07					
109	9300	0,118124084	0,117784148	1,15556E-07					
110	9400	0,118409868	0,118148221	6,84594E-08					
111	9500	0,118790914	0,118509548	7,91668E-08					
112	9600	0,119171959	0,118868179	9,22825E-08					
113	9700	0,119648266	0,119224162	1,79864E-07					
114	9800	0,119743527	0,119577543	2,75506E-08					
115	9900	0,120124573	0,119928369	3,84959E-08					
116	10000	0,120505618	0,120276682	5,24116E-08					
117			Σ	0,000432374					

Şekil Ek 12.29. Üç eksenli 300/100 kPa basınç altındaki %3S+%1PPA modifiyeli numunelerin Francken model parametrelerinin belirlenmesi (Çözümünden sonra)

Ek 13. Çalışma kapasında hazırlanan numuneler**Şekil 13.1.** Çalışmada hazırlanan numuneler