

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK ÜSTYAPI KAPLAMALARINDA BİTÜMLE BİRLİKTE
BAĞLAYICI OLARAK GRANÜLER SÜLFÜR KULLANIMININ KALICI
DEFORMASYONA ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ
Mehmet Tahir DENİZ**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Ulaştırma Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK ÜSTYAPI KAPLAMALARINDA BİTÜMLE BİRLİKTE
BAĞLAYICI OLARAK GRANÜLER SÜLFÜR KULLANIMININ KALICI
DEFORMASYONA ETKİSİ**

**DOKTORA TEZİ
Mehmet Tahir DENİZ
(501022203)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Ocak 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Emine AĞAR (İTÜ)
Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN (SDÜ)
Prof. Dr. Zekai ŞEN (İTÜ)
Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK (SÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Doktora çalışmalarımnda değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren ve tez hazırlama aşamasında büyük katkı sağlayan tez danışmanım

Prof. Dr. Abdullah Hilmi LAV'a,

Çalışma süresi boyunca sürekli destek sağlayan tez izleme komitesi üyeleri

Prof. Dr. Emine AĞAR ve Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN'e,

Deneysel çalışmalarımnda imkanlarını seferber eden İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSFALT A.Ş. Genel Müdürü, Genel Müdür Yardımcısı, Kalite Yönetim ve Ar-Ge Müdürü ve başta merkez laboratuvarı şefi olmak üzere, tüm değerli çalışanlarına,

Çalışmaların Ankara bölümünde büyük katkı ve desteklerini esirgemeyen KGM Araştırma Daire Başkanlığı Üstyapı Müdürü, yardımcıları, teknik elemanları ve laboratuvar ekibine,

Tez hazırlama çalışmalarımnda ve diğer konularda değerli tecrübelerinden istifade ettiğim İTÜ araştırma görevlilerine ve ders hocalarıma,

Tez çalışmalarını boyunca maddi ve manevi desteklerini benimle paylaşan aileme,

En içten şükranlarımı sunarım.

Ocak 2009

Mehmet Tahir DENİZ

Y. İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iii
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. YOL ÜSTYAPISINDA OLUŞAN BOZULMALAR VE ALINABİLECEK ÖNLEMLER.....	5
2.1 Çatlaklar	5
2.1.1 Timsah sırtı çatlaklar	6
2.1.2 Yansıma çatlakları.....	6
2.1.3 Büzülme çatlakları.....	6
2.1.4 Kayma çatlakları.....	7
2.1.5 Derz çatlakları	7
2.2 Kalıcı Deformasyonlar.....	7
2.2.1 Tekerlek izi	7
2.2.2 Ondülasyonlar	8
2.2.3 Oturmalar	8
2.2.4 Sökülmeler	8
2.2.5 Kabarmalar.....	9
2.3 Üstyapı Bozulmalarına Karşı Alınabilecek Önlemler	9
3. ESNEK ÜSTYAPILARDA SÜLFÜR KULLANIMI	13
3.1 Üstyapıda Sülfür Kullanımı ve Asfalt Üzerindeki Etkileri.....	13
3.2 Sülfürlü Asfaltla ilgili Laboratuvar Araştırmaları.....	14
3.3 Sülfürlü Asfaltla ilgili Saha Araştırmaları.....	18
3.4 Sülfürlü Asfaltın Çevresel Etkileri	19
4. SÜLFÜRÜN TEKNİK ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI.....	23
4.1 Sülfürün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	24
4.2 Sülfür Kaynakları	25
4.2.1 Doğal kaynaklar	25
4.2.2 Yüksek baca gazları.....	26
4.3 Sülfür Üretimi	26
4.4 Sülfür Rezervleri	27
4.5 Sülfür Tüketimi	31
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
5.1 Kullanılan Malzemeye Uygulanan Deneyler	33
5.1.1 Mineral agrega.....	33
5.1.2 Bitümlü bağlayıcılar	41
5.1.3 Granüler sülfür (GSF).....	47

5.2 Bağlayıcı (GSF-Bitüm) Karışımına Uygulanan Deneyler	50
5.3 Karışım Tasarımı ve Bağlayıcı (GSF-Bitüm) Yüzdesinin Belirlenmesi.....	54
5.4 Sülfürlü Asfalt Karışımına Uygulanan Deneyler.....	58
5.4.1 Marshall stabilitesi ve akma deneyleri.....	72
5.4.2 Performans deneyleri.....	74
5.4.2.1 Statik sünme deneyi	75
5.4.2.2 Dinamik (tekrarlı) sünme deneyi	80
5.4.2.3 Dolaylı çekme deneyi	85
5.4.3 Tekerlek izi deneyi.....	95
6. KALICI DEFORMASYON MODELLEMESİ.....	103
6.1 Statik Sünme Modeli.....	103
6.1.1 GSA 40 deformasyon modeli	103
6.1.2 GSA 50 deformasyon modeli	109
6.2 Tekerlek İzi Modeli.....	114
6.2.1 GSA 40 tekerlek izi modeli	115
6.2.2 GSA 50 tekerlek izi modeli	120
6.3 Model Doğrulama	125
7. MALİYET KARŞILAŞTIRMASI	127
7.1 Sülfür ve Bitüm Maliyetleri.....	127
7.2 Geleneksel Karışım ve Sülfürlü Karışım Maliyetleri	129
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	135
8.1 Sonuçlar.....	135
8.2 Öneriler.....	137
KAYNAKLAR.....	139
EKLER	145
ÖZGEÇMİŞ.....	189

KISALTMALAR

AAMAS	: Asphalt Aggregate Mixture Analyzing System
AC	: Asfalt Çimentosu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışımlar
CMS	: Orta Hızda Kesilen Asfalt Emülsiyonları
CRS	: Çabuk Kesilen Asfalt Emülsiyonları
CSS	: Yavaş Kesilen Asfalt Emülsiyonları
Def₄₀	: GSA 40 numunelerinde oluşan deformasyon
Def₅₀	: GSA 50 numunelerinde oluşan deformasyon
EN	: Avrupa Normları
EVA	: Etil-Vinil-Asetat
GSA	: Granüler Sülfür Bağlayıcılı Asfalt
GSF	: Granüler Sülfür
HMA	: Hot Mix Asphalt
HRB	: Highway Research Board
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	: Karayolları Teknik Şartnamesi
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MC	: Orta Hızda Kür Olan Sıvı Petrol Asfaltı
MQD	: Dizel Kükürt Giderme Ünitesi
NCHRP	: National Cooperative Highway Research Program
PAV	: Pressure Aging Vessel
PG	: Performance Grade
PI	: Penetrasyon Endeksi
RC	: Çabuk Kür Olan Sıvı Petrol Asfaltı
RTFO	: Rolling Thin Film Oven Test (İnce Film Halinde Isıtma)
S	: Sülfür (Kükürt)
SAM	: Sülfürlü asfalt bağlayıcıyı
SBS	: Stiren-Bütadien-Stiren
SC	: Yavaş Kür Olan Sıvı Petrol Asfaltı
SEAM	: Sulfur Extended Asphalt Modifier
SHRP	: Strategic Highway Research Program
SIS	: Stiren-Izopren-Stiren
SUPERPAVE	: Superior Performing Asphalt Pavements
TİO	: Tekerlek İzi Oluşumu
T_{i40}	: GSA 40 Karışımı Tekerlek izi derinliği
T_{i50}	: GSA 50 Karışımı Tekerlek izi derinliği
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
TS	: Türk Standardı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
VFA	: Asfaltla Dolu Boşluk
VMA	: Agregalar Arası Boşluk

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 3.1 : Sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri	16
Çizelge 3.2 : Yorulma deneyi sonuçları	17
Çizelge 3.3 : Emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması	20
Çizelge 4.1 : Rafinerilerdeki kükürt üretim kapasiteleri	30
Çizelge 5.1 : Aşınma tabakası Tip1 gradasyonu elek analizi	36
Çizelge 5.2 : Agregta özellikleri deney sonuçları	40
Çizelge 5.3 : Teknik şartnamelere göre bitüm sınıflandırması	42
Çizelge 5.4 : Sıvı petrol asfaltları	43
Çizelge 5.5 : Asfalt emülsiyonları	44
Çizelge 5.6 : Bitümlü bağlayıcı (B 50/70) deney sonuçları	47
Çizelge 5.7 : Granüler sülfür (GSF) özellikleri	49
Çizelge 5.8 : Granüler sülfür (GSF)-bitüm karışımı deney sonuçları	51
Çizelge 5.9 : Penetrasyon endeksi (PI)	52
Çizelge 5.10 : Marshall tasarımı kriterleri	57
Çizelge 5.11 : Optimum bağlayıcı tasarımı karışım numuneleri	60
Çizelge 5.12 : Optimum bağlayıcı değerleri	69
Çizelge 5.13 : Optimum bağlayıcı (GSF- Bitüm) miktarları	71
Çizelge 5.14 : Marshall stabilitesi ve akma değerleri	73
Çizelge 5.15 : Dolaylı çekme deneyi, 5°C	88
Çizelge 5.16 : Dolaylı çekme deneyi, 25°C	90
Çizelge 5.17 : Dolaylı çekme deneyi, 40°C	92
Çizelge 5.18 : Tekerlek izi numuneleri malzeme miktarları	97
Çizelge 5.19 : Tekerlek izi oluşumu deney sonuçları	99
Çizelge 6.1 : Tanımlayıcı istatistikler, deformasyon - S.sünme GSA 40	104
Çizelge 6.2 : Değişkenler arasındaki korelasyonlar, S.sünme GSA 40	104
Çizelge 6.3 : Model özeti, S.sünme GSA 40	105
Çizelge 6.4 : Varyans analizi (ANOVA), S.sünme GSA 40	105
Çizelge 6.5 : Katsayılar , S.sünme GSA 40	106
Çizelge 6.6 : Tanımlayıcı istatistikler, deformasyon - S.sünme GSA 50	109
Çizelge 6.7 : Değişkenler arasındaki korelasyonlar, S.sünme GSA 50	110
Çizelge 6.8 : Model özeti, S.sünme GSA 50	110
Çizelge 6.9 : Varyans analizi (ANOVA), S.sünme GSA 50	111
Çizelge 6.10 : Model katsayıları , S.sünme GSA 50	111
Çizelge 6.11 : Tanımlayıcı istatistikler, deformasyon - T.izi GSA 40	115
Çizelge 6.12 : Değişkenler arasındaki korelasyonlar, T.izi GSA 40	115
Çizelge 6.13 : Model özeti, T.izi GSA 40	116
Çizelge 6.14 : Varyans analizi (ANOVA), T.izi GSA 40	116
Çizelge 6.15 : Katsayılar , T.izi GSA 40	117
Çizelge 6.16 : Tanımlayıcı istatistikler, deformasyon - T.izi GSA 50	121

Çizelge 6.17 : Değişkenler arasındaki korelasyonlar, T.izi GSA 50	121
Çizelge 6.18 : Model özeti, T.izi GSA 50	122
Çizelge 6.19 : Varyans analizi (ANOVA), T.izi GSA 50	122
Çizelge 6.20 : Model katsayıları , T.izi GSA 50	123
Çizelge 7.1 : Yıllara göre B 50/70 bitüm ve sülfür fiyatları	128
Çizelge 7.2 : Karışım içindeki malzeme miktarları	130
Çizelge 7.3 : 2007 yılı geleneksel ve GSA karışım maliyetleri	130
Çizelge 7.4 : 2008 yılı geleneksel ve GSA karışım maliyetleri	131
Çizelge 7.5 : Geleneksel ve GSA karışımı maliyet farkı	132

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 4.1 :	Doğal ve granüler sülfür (GSF) malzemesi	24
Şekil 5.1 :	KTŞ Tip1 şartname sınırları ve GSA agrega gradasyonu	37
Şekil 5.2 :	Penetrasyon endeksi (PI) nomografi	53
Şekil 5.3 :	Marshall tasarım grafikleri	58
Şekil 5.4 :	Üretilen Marshall numuneleri	60
Şekil 5.5 :	Marshall tasarım grafikleri, geleneksel karışım (Kontrol)	63
Şekil 5.6 :	Marshall tasarım grafikleri, GSF 10	64
Şekil 5.7 :	Marshall tasarım grafikleri, GSF 20	65
Şekil 5.8 :	Marshall tasarım grafikleri, GSF 30	66
Şekil 5.9 :	Marshall tasarım grafikleri, GSF 40	67
Şekil 5.10 :	Marshall tasarım grafikleri, GSF 50	68
Şekil 5.11 :	Optimum bağlayıcı (GSF-Bitüm) grafiği	69
Şekil 5.12 :	Marshall numuneleri bağlayıcı miktarları	71
Şekil 5.13 :	Marshall stabilitesi deney düzeneği	72
Şekil 5.14 :	Marshall stabilitesi	73
Şekil 5.15 :	Akma değerleri	74
Şekil 5.16 :	Statik sünme deneyi düzeneği	75
Şekil 5.17 :	Statik sünme deneyi, 5°C	77
Şekil 5.18 :	Statik sünme deneyi, 25°C	78
Şekil 5.19 :	Statik sünme deneyi, 40°C	79
Şekil 5.20 :	Tekrarlı yük – süre grafiği	80
Şekil 5.21 :	Dinamik sünme deneyi, 5°C	82
Şekil 5.22 :	Dinamik sünme deneyi, 25°C	83
Şekil 5.23 :	Dinamik sünme deneyi, 40°C	84
Şekil 5.24 :	Dolaylı çekme deneyi düzeneği	86
Şekil 5.25 :	Dolaylı çekme deneyi, 5°C	89
Şekil 5.26 :	Dolaylı çekme deneyi, 25°C	91
Şekil 5.27 :	Dolaylı çekme deneyi, 40°C	93
Şekil 5.28 :	Tekerlek izi deney düzeneği	95
Şekil 5.29 :	Tekerlek izi cihazı üniteleri (LCPC)	96
Şekil 5.30 :	Tekerlek izi deney numuneleri	97
Şekil 5.31 :	Tekerlek izi deneyi derinlik ölçümleri (LCPC)	99
Şekil 5.32 :	Tekerlek izi oluşumu deneyi, 60°C LCPC cihazı	100
Şekil 5.33 :	Farklı karışım tiplerine göre tekerlek izi derinlikleri	101
Şekil 5.34 :	Tekerlek izi derinlikleri, kontrol-GSA karşılaştırması	101
Şekil 6.1 :	Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı, Statik sünme GSA 40	107
Şekil 6.2 :	Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği, S.sünme GSA 40	108
Şekil 6.3 :	Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, S.sünme GSA 40	109
Şekil 6.4 :	Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı, Statik sünme GSA 50	112

Şekil 6.5 :	Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği, S.sünme GSA 50	113
Şekil 6.6 :	Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, S.sünme GSA 50	114
Şekil 6.7 :	Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı, T.izi GSA 40	119
Şekil 6.8 :	Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği T.izi GSA 40	119
Şekil 6.9 :	Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, T.izi GSA 40	120
Şekil 6.10 :	Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı, T.izi GSA 50	124
Şekil 6.11 :	Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği T.izi GSA 50	124
Şekil 6.12 :	Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, T.izi GSA 50	125
Şekil 6.13 :	Model doğrulama, T.izi GSA 40	126
Şekil 6.14 :	Model doğrulama, T.izi GSA 50	126
Şekil 7.1 :	Yıllara göre bitüm(B 50/70) – sülfür fiyatları	128
Şekil 7.2 :	2007 yılı geleneksel - GSA karışım maliyetleri	131
Şekil 7.3 :	2007 yılı fiyatlarıyla, GSA – geleneksel karışım maliyet farkları	132

SEMBOL LİSTESİ

CS₂	: Karbon disülfid
D_p	: Hacim özgül ağırlığı
D_t	: Teorik özgül ağırlık
E	: Esneklik modülü
G_{Bitüm}	: Bitüm yoğunluğu
G_{ef}	: Agregat efektif özgül ağırlığı
G_{sb}	: Agregat hacim özgül ağırlığı
G_{sb}	: Agregat karışımının hacim özgül ağırlığı
H₂S	: Hidrojen sülfür
N	: Devir sayısı
P	: Uygulanan yük
P_A	: Ağırlıkça bitüm oranı
P_S	: Ağırlıkça sülfür oranı
S_{GA}	: Bitümün özgül ağırlığı
S_{GS}	: Sülfürün özgül ağırlığı
SO₂	: Sülfür dioksit
V	: Hacim
V_f	: Bitümle dolu boşluk
V_h	: Boşluk yüzdesi
Y	: Tekerlek izi derinliği
α	: Bitüm içeriği katsayısı
Δh	: Geri dönen deformasyon
λ	: Limit momentler oranı
ν	: Poisson oranı

ESNEK ÜSTYAPI KAPLAMALARINDA BİTÜMLE BİRLİKTE BAĞLAYICI OLARAK GRANÜLER SÜLFÜR KULLANIMININ KALICI DEFORMASYONA ETKİSİ

ÖZET

Başta tekerlek izi olmak üzere kalıcı deformasyonlar, asfalt kaplamalarının servis ömrünü azaltan temel bozulmalardan biridir. Kaliteli asfalt karışımlarının kullanılması ve bağlayıcının modifiye edilmesi, asfalt kaplamaları direncinin kalıcı deformasyonlara karşı güçlendirilmesinde etkin yöntemlerdir. Son yıllarda bu problemin araştırılması ve çözümlenmesi amacıyla, çok değişik modifiye edici katkı maddesi kullanılmıştır. Söz konusu katkı maddelerinden biri de sülfürdür.

Bu çalışmada, bitümlü birlikte bağlayıcı olarak kullanılan Granüler Sülfür (GSF)'ün sıcak karışım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Silindirik Marshall numuneleri hazırlanmadan önce, özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, bağlayıcı ve agregaya standart testler uygulanmıştır. Bitümlü sıcak karışım (BSK)'in optimum bağlayıcı miktarını belirlemek için Marshall tasarım yöntemi kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında, geleneksel karışımın yanı sıra, karışıma bitüm yerine %10, %20, %30, %40 ve %50 GSF malzemesi ilave edilerek Marshall ve LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) numuneleri hazırlanmıştır.

Marshall stabilitesi, Performans testleri ve Tekerlek İzi deneyleri, sırasıyla Marshall cihazı, Universal Testing Machine (UTM) ve LCPC test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Geleneksel karışımla sülfürlü asfalt karışımlarına ait deney sonuçları karşılaştırılarak incelenmiştir. Deney sonuçları, %40 ve %50 GSF ilave edilen karışımların statik ve dinamik gerilmelere karşı olduğu gibi, tekerlek izi oluşumuna karşı da geleneksel karışımlara göre daha dirençli olduğunu göstermiştir.

GSF ilave edilen karışımlarla geleneksel karışım arasındaki maliyet farkını belirlemek amacıyla bir maliyet analizi yapılmıştır.

SPSS regresyon programı kullanılarak bir model geliştirilmiştir. Sonuçlar, SPSS esaslı modelin kaplamada servis ömrü boyunca oluşabilecek tekerlek izi potansiyelini hesaplayabileceğini göstermiştir.

Asfalt karışım değişkenleri ile ilgili Laboratuvar test sonuçları tezin "Sonuçlar ve Öneriler" bölümünde verilmektedir.

THE USAGE OF GRANULAR SULFUR WITH BITUMEN AS A BINDER AND ITS EFFECT ON THE PERMANENT DEFORMATIONS

SUMMARY

Permanent deformations, primarily in the form of ruts, are one of the basic asphalt pavement damages impairing its service properties. Application of appropriate asphalt mixtures and binder modification are effective methods for improving asphalt courses resistance. Many kinds of modifiers, in recent years, have been used for dealing and solving this problem. One of these modified materials is sulfur.

In this study, the effects of Granular Sulfur Asphalt (GSF) which used as a binder in place of bituminous binders, on the mix were investigated. Standard tests were applied to binder and aggregate to define their properties before producing of cylindrical samples. Marshall design was used to evaluate the optimum binder in the Hot Mix Asphalt (HMA). Marshall and LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) samples were prepared in the laboratory by adding of 10%, 20%, 30% 40% and 50% GSF replacing with penetration grade B 50/70 bitumen to the mix.

Marshall Stability, Performance tests and rutting test, were carried out using Marshall equipments, Universal Testing Machine (UTM) and LCPC test machine accordingly. Comparisons were made between the conventional and GSF mixes test results. The results of both static and repeated load tests as well as the rutting test indicate that the deformations and strains of the conventional mixes are greater than those of the %50 GSF.

A cost analysis has been applied to define the difference between the mix with and without GSF. The cost provident was obtained for the conventional mix, 40% and 50% content of GSF mix.

A regression analysis program, SPSS, is used in this study to improve a modeling system. The results show that the SPSS-based model can be used effectively to evaluate the rutting potential of in-service pavement.

The laboratory tests results carried on the asphalt concrete samples and mix variables are presented in the “Conclusions” section of the thesis.

1.GİRİŞ

Karayolu üstyapı maliyetleri, yolun toplam yapım maliyeti içerisinde büyük bir paya sahiptir. Bilindiği üzere, üstyapılar, esnek, rijit ve kompozit üstyapılar olmak üzere üç gruba ayrılır. Kaplama türleri içinde en çok kullanılan kaplama sınıfı ise esnek üstyapılarıdır. Esnek üstyapı kaplamalarında kullanılan geleneksel karışım malzemeleri agrega ve bitümdür. Bitüm, aynı zamanda kaplamanın hizmet ömrü ve dış etkilere karşı direnir özellikleri açısından da önemli rol oynamaktadır. Karışım içerisindeki oranı ağırlıkça %5 civarında olmasına karşın, maliyeti en çok etkileyen malzeme de bitümdür. Dolayısıyla bitüm oranının düşürülmesi veya bitümle aynı performansı gösterecek daha ucuz bir katkı maddesinin karışıma ilave edilmesi, karışım maliyetlerini belirli oranlarda düşürecektir.

Sıcak karışımlarda bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, ham petrolün damıtılmasıyla elde edilmektedir. Ülkemizde üretilen ham petrolün yetersiz kalması nedeniyle her yıl sadece TÜPRAŞ kanalıyla 20 milyon tonun üzerinde ham petrol ithal edilmektedir. Bu büyüklükte petrol ithalatının bir diğeri anlamı da, yıllık milyon tonlara varan miktarlarda bitüm ithalatının yapılmakta olduğu gerçeğidir. Son iki yılın TÜPRAŞ kayıtlarındaki bitüm miktarı ise yıllık iki milyon tonun üzerindedir. Bitümlerin en büyük kullanım alanı ise esnek üstyapı kaplamalarıdır. Ancak kullanılan bu yüksek miktardaki bitümlerle yapılan yolların düşük ve yüksek sıcaklıklarda bozulmaya karşı gösterdikleri direnç uzun süreli olmalarına yetmemektedir. Rafineri çıkışlı normal bitümlerin ısıya duyarlı olması nedeniyle iklim koşulları altında meydana gelen ısı değışikliklerine karşı gösterdikleri direnç istenen düzeyde değildir.

Bitümlü bağlayıcıların özelliklerini iyileştirmek için bitüme katkı maddeleri ilave edilerek modifiye edilirler. Bitümün modifiye edilmesindeki temel amaç, kaplamaların yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olmasını sağlamaktır.

Bunun yanı sıra, son yıllarda geliştirilen ileri teknolojiler kullanılarak, bitüm daha kıymetli hidrokarbon ürünlerine dönüştürülebilmektedir. Bu bağlamda, bitümün ham petrolün damıtılması sonucunda, her halükarda ortaya çıkan atık ürün olarak görülmesi mümkün değildir.

Gerek dünyada, gerekse ülkemizde performans artırıcı özellik taşıyan ve doğrudan bitüme ya da bitümlü karışımlara ilave edilen çok sayıda katkı maddesi bulunmaktadır. Geniş ve değişik bir ürün yelpazesine sahip olan modifiye katkı maddelerinin ortak olumsuz yönü ise bir yandan karışımın özelliklerini iyileştirirken, diğer yandan maliyeti artırmalarıdır. Bazı endüstriyel yan ürün ve atıklar, depolama maliyetlerinden tasarruf amacıyla, bitümlü karışımlara ilave edilmektedir. Karışım maliyetlerini azaltmalarına karşın, bu atıkların karışım özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik herhangi belirgin bir etkileri olmayabilir. Bu tür atık maddeleri karışım özelliklerini olumsuz yönde etkilemesi ve bazı özellikleri şartname sınırlarının dışına çıkarması bile söz konusu olabilmektedir. Bu bağlamda, en ideal katkı maddeleri, karışıma ilave edildiğinde, bağlayıcı rolü üstlenerek, kısmen bitümün yerini alan, karışım performans özelliklerini de belirli ölçüde iyileştiren ve karışım maliyetini düşüren maddelerdir.

Araştırma kuruluşları ve üniversiteler tarafından, maliyetleri artıran modifiye edici katkıları yerine, bunlara alternatif olabilecek, maliyetleri düşürürken karışım performansını artıran katkıların geliştirilmesi için de yoğun çalışmalar sürdürülmektedir.

Bitümlü karışımlara ilave edilerek maliyeti düşüren ve karışımın performans özelliklerini artıran nadir katkı maddelerinden biri de sülfürdür. Sülfürün maliyeti bitümlü bağlayıcılara göre yaklaşık beş altı kat daha düşüktür. Günümüzde sülfür üretimi, doğal kükürt kaynakları yerine yüksek fırın bacalarında tutulan kükürttan bol miktarda ve ucuza elde edilebilmektedir. Bu yolla kükürt, ülkemiz rafineri bacalarından da elde edilebilmektedir. Ayrıca, termik santral bacalarında da büyük bir kükürt potansiyeli bulunmaktadır. Sülfür henüz ülkemizde bitümlü sıcak karışımlarda doğrudan veya dolaylı olarak kullanılmamaktadır. Dünyada ise, az sayıda da olsa, sülfür üzerinde değişik araştırmalar ve buna bağlı olarak laboratuvar ortamında deneysel amaçlı çalışmalar yapılmaktadır.

Granüler sülfür (GSF) katkılı asfaltın ele alındığı bu çalışmada temel amaç; bitümlü sıcak karışıma, yapısını bozmadan katılabilecek en yüksek sülfür miktarını ve katılan sülfür miktarına bağlı olarak karışımda meydana gelebilecek performans değişimini incelemek ve bu değişimi geleneksel bitümlü karışım performansı ile karşılaştırmaktır.

Granüler sülfür kullanımı ile yürütülen bu tez çalışmasında, farklı oranlarda granüler sülfür kullanılarak üretilen Marshall numunelerine değişik testler uygulanmış ve bu sonuçlar aynı malzemedeki kontrol amacıyla üretilen numune sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Daha sonra LCPC (Fransa Modeli Tekerlek İzi Cihazı) özel numune kalıpları yardımıyla hazırlanan numunelere de, tekerlek izi testleri uygulanarak, kontrol numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca UTM test cihazı yardımıyla da performans deneyleri yapılarak, karışımın ısı değişimine bağlı gerilmeler gözlenmiş ve kontrol numuneleriyle karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, teknik şartnameler de göz önüne alınarak hazırlanan sülfürlü asfaltlarda, bitüm yerine bağlayıcı olarak granüler sülfür kullanılmasının bitümlü sıcak karışım maliyetlerini düşürürken, kalıcı deformasyona karşı performansını artırdığı gözlenmiştir.

2. YOL ÜSTYAPISINDA OLUŞAN BOZULMALAR VE ALINABİLECEK ÖNLEMLER

Kara ulaşımında yollar, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Altyapı yarma ve dolgulardan oluşurken, üstyapı trafik yüklerini altyapıya yayarak dağıtan ve yolun uzun ömürlü olmasını sağlayan tabakalı yapı sisteminden oluşmaktadır. Üstyapı inşasında temel amaçlardan biri, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi elde etmektir.

Üstyapılar, esas itibariyle alttemel, temel ve aşınma tabakalarından oluşur ve kaplama tabakalarında kullanılan bağlayıcı türüne göre Esnek Üstyapı, Rijit Üstyapı veya ikisinin bir arada olduğu Kompozit Üstyapı olarak üç gruba ayrılırlar [21, 24].

Esnek üstyapı kaplamaları iri agrega, ince agrega ve mineral fillerin, belirli oranlarda bitümlü bağlayıcıyla belirli sıcaklıklarda karıştırılarak, bir veya birden fazla tabaka halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşur. Ülkemizde de en çok kullanılan üstyapı türü, esnek üstyapı kaplamalarıdır. Farklı tabakalar için çeşitli niteliklerdeki malzemelerin kullanılabilir olması sebebiyle bu tip esnek üstyapılar daha ekonomiktir. En genel hali ile bu tür üstyapı tesviye edilmiş zemin üzerine sırasıyla; alttemel tabakası, temel tabakası, binder tabakası ve aşınma tabakasının inşa edilmesi ile oluşturulur [21, 45]. Bu tabakalardan bir kısmı, gerekli görülmemesi durumunda yapılmayabilir.

Genel olarak yol üstyapıları, yol trafiğe açıldıktan sonra, trafik yükleri, çevre ve iklim koşulları ve yol altyapısından kaynaklanan bozulmalara maruz kalırlar. Tabii zeminde meydana gelen oturma yada hareketlenme şeklindeki zayıflıklar kalıcı deformasyon veya çatlakların oluşmasına neden olmaktadır [21, 34]. Çatlak ve kalıcı deformasyonlarla ilgili özet bilgiler aşağıda verilmektedir.

2.1 Çatlaklar

Çatlaklar, tekrarlı trafik yükleri ve sıcaklık değişimi etkisiyle meydana gelen gerilmeler sonucu karışımın yorulması ya da kırılma hali gelmesiyle oluşurlar.

Oluşum nedenleri ve çatlama şekillerine göre değişik isimler alan çatlaklar aşağıda sınıflandırılarak açıklanmaktadır [3, 21, 34].

2.1.1 Timsah Sırtı Çatlakları

Timsah sırtı çatlakları, timsah derisine ya da kümes teline benzer görünümlü bir dizi küçük blok oluşturan birbirine bağlı çatlaklar şeklinde oluşur. Bunlar genellikle yapısal olarak yetersiz, bozuk bir granüler temel ya da zayıf bir tabii zemin üzerine serilmiş olan kaplamalarda görülürler [3, 34].

Timsah sırtı çatlaklarının temel nedenlerinden biri, suya doygun bir temel veya tabii zemin olduğundan, iyi bir drenaj sistemi kurularak önlenebilirler.

2.1.2 Yansıma Çatlakları

Yansıma çatlakları genellikle aşınma tabakalarında görülen ve alt tabakalardaki çatlakların zamanla yükselmesi ile oluşan çatlaklardır. Bu tür çatlaklara genellikle beton kaplamalar ve çimento ile stabilize edilmiş temeller üzerine serilen takviye tabakalarında rastlanmaktadır. Yansıma çatlakları trafik yükleri, sıcaklık ve zemin hareketlerinden kaynaklanan takviye tabakası altındaki kaplamanın düşey ve yatay hareketlerinden meydana gelmektedir. Bu çatlaklar, kaplama altındaki beton plaklardan başlayarak yukarı doğru oluşabildiği gibi, yüzeyden başlayarak aşağıya doğru da gelişebilmektedir [3, 21, 34].

2.1.3 Büzülme Çatlakları

Büzülme çatlakları genellikle keskin köşeler ya da açılar içeren geniş blok kümeleri oluşturan birbirine bağlı çatlaklardan oluşmaktadır. Büzülme çatlakları asfalt karışımının hacmindeki bir değişmeden kaynaklanabildiği gibi, temel veya tabii zeminin hacmindeki değişiklikler nedeniyle de oluşabilmektedir. Bu çatlaklar, daha çok yüksek oranda düşük penetrasyonlu bitüm içeren ince agrega asfalt karışımlarının hacmindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır [3, 21, 34].

Yaşlanma sebebiyle meydana gelen çatlamlar da büzülme çatlakları formundadır. Uzun yıllar boyunca çeşitli etkilere maruz kalan asfalt, elastisite ya da esneklik özelliklerinin bir kısmını yitirebilmektedir. Aynı zamanda, kaplama içerisindeki malzemeler sıcaklık değişimlerinden ötürü sürekli genleşme ve büzülme

gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu süreçler bir büzülme çatlaklarının oluşumuna sebep olabilmektedir.

2.1.4 Kayma Çatlakları

Kayma çatlakları trafik yükleri altında meydana gelen yatay kuvvetlerden kaynaklanan hilal şeklindeki çatlaklardır. Bu çatlaklar, yüzey tabakası ile altındaki tabaka arasındaki zayıf bağdan dolayı ortaya çıkmaktadırlar. Tabakalar arası bağ eksikliği toz, kir gibi nedenlerden veya yapıştırma tabakası bulunmamasından kaynaklanabilmektedir [3, 34].

2.1.5 Derz Çatlakları

İki tip derz çatlağı bulunmaktadır. Bunlardan ilki kenar derz çatlağı olup, kaplama ve banket arasında meydana gelmektedir. Diğeri ise, birbirine bitişik iki şeridin arasında ortaya çıkan şerit derz çatlağıdır [3, 34].

Banket yüzeyinin altında ıslanma ve kuruma ya da donma ve çözülme hareketleri kenar derz çatlağının temel sebebini oluşturmaktadır. Bu ise genellikle kötü drenajın bir sonucudur. Diğeri yandan, şerit derzi çatlakları genellikle kaplamadaki bitişik tabakalar arasındaki zayıf bir yapışma olmasından dolayı meydana gelmektedir.

2.2 Kalıcı Deformasyonlar

Kalıcı deformasyonlar genellikle, hareketli ve duran trafik yükleri altında ve özellikle yavaşlayan, hızlanan ve dönen araçların oluşturduğu yüksek kesme gerilmeleri altında oluşurlar. Bitümlü sıcak karışımların iletkenlik katsayıları düşük olduğundan, çoğunlukla kalıcı deformasyonlar aşınma tabakasında meydana gelmektedir. Kaplama deformasyonları daha çok trafiğin ve özellikle ağır taşıtların yüksek yatay gerilmeler uyguladığı kavşaklar ve durma kalkma alanlarında görülürler [3, 21, 34]. Kaplama tabakalarında meydana gelen kalıcı deformasyon türleri aşağıda açıklanmıştır.

2.2.1 Tekerlek İzi

Tekerlek izi ya da oluklanma asfalt kaplamalarının, özellikle ağır taşıtların geçtiği şeritler üzerinde, tekerleklerin bastığı kısımlarda oluşan, kanal şeklindeki kalıcı

deformasyonlardır. Tekerlek izi oluşumu, trafik hareketleri altında bir veya birkaç alt tabakanın etkileşiminden veya yanal hareketinden ya da aşınma tabakasının şekil değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Yapım sırasında çok az sıkıştırılmış yeni asfalt kaplamalarında ya da yeterli stabiliteye sahip olmayan karışımların plastik hareketlerinden dolayı da oluklanma meydana gelebilmektedir [3, 21, 34, 45,58].

2.2.2 Ondülasyonlar

Ondülasyon ve çökmeler, kaplama yapısı üzerinde meydana gelen dalgalanmalar olarak tanımlanan bir plastik hareket biçimidir. Hem ondülasyon hem de çökme genellikle trafiğin duruş ve kalkış hareketleri yaptığı yerlerde ya da taşıtların sık sık fren yaptıkları inişlerde görülmektedir.

Ondülasyon ve çökmeler aynı zamanda stabilite açısından zayıf asfalt kaplamalarında meydana gelmektedir. Bunun temel sebebi ise, karışım içindeki fazla bitüm miktarı, fazla ince agregası, uygun olmayan gradasyon, yuvarlak ya da düzgün dokulu kaba agregası kullanımıdır [21, 34, 47, 65].

2.2.3 Oturmalar

Oturmalar kaplama yüzeyinde, çatlak oluşumu içeren ya da içermeyen, sınırlı boyuttaki bölgesel alan deformasyonlarıdır. Bu çöküntüler üzerinde su birikmekte ve sadece bir bozulma olmayıp aynı zamanda motorlu taşıt sürücülerini için tehlikelere de yol açmaktadırlar. Oturmalar üstyapının dizayn edildiği trafikten daha ağır trafiğe maruz kalmasından, tabii zemin içindeki hareketler ya da konsolidasyon sonucunda meydana gelmektedir [34, 45,58, 66].

2.2.4 Sökülmeler

Sökülmeler, trafik veya hava koşulları altında aşınma sonucunda sürekli olarak kaplama yüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Genellikle, ilk olarak ince agregalar yıpranarak yüzeyden kopmakta ve kaplama yüzeyi üzerinde küçük çiçek bozuğuna benzer izler bırakmaktadır. Erozyonun etkisinin devam etmesiyle daha büyük parçalar kopmaya başlamakta ve kaplama kaba ve çentikli bir görünüm kazanmaktadır. Sökülme kötü yapım yöntemleri, kalitesiz agregası veya kötü karışım dizaynından kaynaklanmaktadır [21, 21, 34].

2.2.5 Kabarmalar

Kabarmalar, kaplamanın tabii zeminin veya üstyapının bir kısmının şişmesi sonucunda yukarı yönde yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu tip bozulmaların en yaygın sebebi üstyapı içindeki granüler tabakalar veya tabii zemin içinde oluşan buzun genleşmesidir. Kabarma aynı zamanda bazı zemin çeşitlerinde şişmeye neden olan nemden de kaynaklanabilmektedir [3, 34, 45,51].

Buz genleşmelerinin düzeltilmesi için su kaynağının donma sıcaklıklarından izole edilmesi ya da üstyapı altındaki suyun drene edilmesi gerekmektedir. Kaplamaları kabarmaya karşı korumak için, su donma sıcaklığından, üstyapının altına yalıtım tabakaları koymak ya da tabii zemini don derinliğinin altına kadar drenaja uygun granüler malzeme ile değiştirmek suretiyle, izole etmek mümkündür.

2.3 Üstyapı Bozulmalarına Karşı Alınabilecek Önlemler

Geleneksel karışımlarla hazırlanan esnek üstyapı kaplamalarında meydana gelen bozulmaların önlenmesi için farklı alanlarda yapılan araştırmalar devam etmektedir. Günümüzde değişik bozulma türlerine karşı değişik önlemler geliştirilmiştir. Bunların başında, modifikasyon olarak bilinen, bitümü veya bitümlü karışımları iyileştirme yöntemleri gelmektedir. Bitüm veya bitümlü karışımlar katkı maddeleri ilave edilerek iyileştirilmektedir.

Bitümlü bağlayıcıların ve karışımlarının modifiye edilmesinin temelinde üstyapı kaplamasından beklenen performansın geleneksel karışımlarla elde edilememesi yatmaktadır. Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmesi; yol üstyapılarının yüksek sıcaklıklarda yeterli rijitliğe, düşük sıcaklıklarda ise yeterli esnekliğe sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Modifiye edici katkıların birçoğunun çeşitli yol kaplama problemlerine teknik açıdan uygun çözümler getirdiği bilinen bir gerçektir. Modifiye katkı maddelerinin bitüme veya karışıma katılmasıyla üstyapıya rijitlik ve esneklik desteği sağlanmaktadır. Böylece kaplamalar, iklimsel koşulların etki ettiği oluklanma, ötelenme, ondülasyon, çatlak ve kırılmalara karşı daha dirençli hale gelmektedirler [1, 22, 34, 43].

Modifikasyon işlemleri, katkı maddelerinin bitüme katılmasıyla “modifiye bitüm” ya da katkıların doğrudan bitümlü karışımlara ilave edilmesiyle “modifiye karışım” elde etmek için yapılır. Bitümün modifiye edilmesi ek cihazlar gerektirdiğinden ve

modifiye bitümle çalışmanın yol açtığı güçlükler, modifiye karışım yöntemlerinin tercih edilmesine yol açmaktadır. Ancak doğrudan karışıma ilave edilen katkıların bitüm üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve kontrol edilmesi zor olduğundan, bitümlerin modifiye edilmesi daha iyi sonuçlar vermektedir [1, 31, 43].

Modifiye edilmek üzere, bitüme katılacak katkı maddelerinin bitümle karışabilmesi, karıştırma sıcaklıklarında bozulmaması, karıştırma sıcaklıklarında bitümü fazla viskoz, serme ve sıkıştırma sıcaklıklarında ise fazla rijit hale getirmemesi ve tüm mühendislik malzemelerinde olduğu gibi bu katkıların ekonomik olması temel amaçtır. Günümüzde, asfalt sektöründe, birçok değişik modifiye edici katkı maddesi kullanılmakta ve her biri karışıma farklı yönde bir iyileştirme kazandırmaktadır. Bu katkı maddelerinin sınıflandırılması ise çeşitli biçimlerde yapılabilmektedir. Son yıllarda bu alanda sürdürülen araştırma çalışmalarında sınıflandırma yapılırken, polimer olan katkı maddeleri ve polimer olmayan katkı maddeleri şeklinde bir yöntem izlenmektedir. Bu sınıflandırmanın temelinde ise polimer esaslı katkı maddelerinin karışıma iyileştirici yönde daha fazla etkili olduğu yönündeki görüşler yatmaktadır. Yapılan araştırmaların derinleştirilmesi, gerçek trafik altında serildikten sonra gözlenen katkı maddelerinin kullanımı üzerinden yeterli sürelerin geçmiş olması, karışıma katılımlarından kaynaklanan ilk maliyet artışı ve bunların kullanım maliyetine getirdikleri ek yükler ile gerçek arazi performanslarının anlaşılması için, süresel olarak yıllara ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, deneysel çalışmalar sonucunda kaplamanın servis ömrüne olumlu katkı sağladığı saptanan ve kullanımı günden güne yaygınlaşarak artış gösteren değişik katkı maddeleri de mevcuttur. Bilinen en yaygın katkı maddeleri ve yapıları ile ilgili teknik bilgiler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

EVA Kopolimeri, etilen ve vinil asetatın ortak polimerizasyonu ile üretilen düzensiz yapılı termoplastik malzemelerdir. Genellikle termoplastik kauçuklar stirenik blok kopolimerler SBS (stiren-bütadien-stiren) ya da SIS (stiren-izopren-stiren) ardışık polimerizasyon işlemleri ile üretilir. Termoplastik polimerler bitüm ile karıştırıldıklarında ortam sıcaklığında birleşerek bitümün viskozitesini artırır. Ancak, termoplastikler bitümün elastisitesini istenen şekilde artıramamaktadır. Isıtıldıklarında ayrılmakta ve soğuma ile kaba bir dağılıma sebep olmaktadır. Bu katkı maddesinin dünyada ve ülkemizde kullanımı oldukça yaygındır [31].

Organo-manganez bileşiği, bitüme tek başına veya başka bileşiklerle birlikte katılır. Bu malzemenin, karışımların sıcaklığa karşı duyarlılığını ve dolayısıyla Marshall

stabilitesi, kalıcı deformasyona karşı direnç ve dinamik rijitlik gibi fiziksel özelliklerini geliştirdiği belirtilmektedir [1, 65,66].

Termoplastik kauçuklar, mukavemet ve elastikliğini moleküllerin üç boyutlu bir ağa fiziksel olarak çapraz şekilde bağlanmalarından elde edilmektedir. Polimere mukavemet kazandıran bileşen polistiren uç-bloklardır. Orta-blok bileşeni ise malzemeye yüksek bir esneklik sağlamaktadır [1, 31].

Termoset polimerler, biri reçine ve diğeri üç boyutlu bir katılaştırıcıdan oluşan iki sıvı bileşenin karıştırılması ile elde edilir. Bu polimerler uzun yıllar önce geliştirilmiş ve en çok yüzeysel kaplamalarda yapıştırıcı olarak uygulanmıştır [65,66].

Polibutadien bileşenleri, bitüme katılarak, viskozitenin artırılmasına etki etmektedir. Doğal kauçukların da içinde yer aldığı bu grup katkı maddelerinin bitüm içerisindeki dağılımı çok zordur. Bu durum ise yüksek sıcaklıklar ve uzun süreler gerektirmekte ve heterojen bir bağlayıcı oluşturmaktadır [31].

Sülfür, bitümlü karışımlarda kullanıldığı miktara bağlı olarak iki gruba ayrılır. Birinci grup, sülfürlü asfalt olarak bilinen (sulphur extended asphalt) ve sülfürün az miktarda eklendiği uygulamalardır. Bu grupta sülfür, bitümün seyreltilmesi işlevini görmesi için kullanılır. İkinci grupta ise, işlenebilirliği artırmak için, karışıma fazla miktarda sülfür eklenir ve deformasyona karşı yüksek dirençli bir karışım elde edilir. Bitümle reaksiyona giren sülfür miktarı, bitüm kompozisyonu ve karışım sıcaklığına göre değişim göstermektedir. Saf sülfürün erime noktası olan 119°C ile bitümün karışım sıcaklığı olan 150°C sıcaklıklar arasında, reaksiyon genel olarak bitümün reolojik özelliklerinde küçük çaplı değişikliklere neden olmaktadır. Ancak sıcaklığın dikkatli bir şekilde ve kontrollü olarak artırılması ve deneysel çalışmalara uygun test cihazlarının kullanılmasıyla, hem karışımın dengeli dağılımı sağlanabilir hem de zararlı emisyonların açığa çıkması önlenir. Bitümlü sıcak karışımlar soğuduğunda, karışım içinde bulunan fazla sülfür katkısı, mevcut boşluklara kısmen dolar ve agregaların birbirleriyle sürtünmesini artırarak karışıma yüksek mukavemet kazandırır [1,31].

Yukarıda kısaca özetlenen katkı maddeleri, günümüz yol üstyapılarında en çok kullanım alanı bulan ve karışımın teknik özelliklerine olumlu yönde iyileştirme sağlayan modifiye edici katkılardır. Bununla birlikte, asfalt sektöründe seyrek de olsa kullanım alanı bulan, laboratuvar ortamlarında karışıma olumlu yönde büyük katkılar

sağladığı söylenen ve üniversite ya da araştırma merkezleri çalışmalarına dayandırılarak üstünlükleriyle ilgili raporlar hazırlanan pek çok farklı katkı maddeleri de mevcuttur. Ortaya çıkış süreleri henüz uygulamada kendilerini ispatlamaya yetecek uzunlukta olmadığı için burada onlara yer verilmemiştir. Bozulmalara karşı alınabilecek önlemler konusunda bugüne kadar gerçekleştirilen çok sayıda çalışma olmasına karşın daha alınması gereken uzun mesafeler olduğu da unutulmamalıdır [1, 43].

3.ESNEK ÜSTYAPILARDA SÜLFÜR KULLANIMI

Bitümlü karışımlarda sülfür kullanımı 1900'lü yılların başlarına kadar gitmektedir. Ancak o yıllarda henüz bitümlü bağlayıcının özelliklerinin kontrol edilmesinde etkili olabilecek bir yöntem olmadığından, sülfürden sadece bitümlü bağlayıcının niteliklerini iyileştirmede, bir modifiye edici katkı olarak faydalanılmıştır. Sülfürün bitümlü sıcak karışımlarda (BSK) kullanılmasındaki en büyük etken ise petrol krizleri olmuştur. 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizleri, özellikle sanayisi petrole bağlı olan gelişmiş ülkelerde, hidrokarbon kökenli malzemelerin kısıtlı olduğunun daha iyi anlaşılmasına, bundan dolayı da petrol türevlerinin kullanıldığı sahalarda bu malzemelere alternatif olabilecek yeni malzemelerin araştırılmasına neden olmuştur. Petrol türevlerinin kullanıldığı en geniş sahalardan biri de, bitümün bağlayıcı olarak kullanıldığı esnek üstyapı kaplamalarıdır. Uzun süren laboratuvar ve arazi çalışmaları sonucu, bağlayıcı özellik taşıyan sülfürün bitümle birlikte esnek üstyapı kaplamalarında kullanılabileceği görülmüştür. Ancak petrol krizinin sona ermesi ve o dönemde düşük maliyetle kükürt elde etme olanaklarının bulunmaması bu çalışmaların ilerlemesini zorlaştırmıştır [5, 10].

3.1 Üstyapıda Sülfür Kullanımı ve Asfalt Üzerindeki Etkileri

Sülfürlü asfalt karışımları ile ilgili yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. Farklı ülkelerde yapılan araştırmalar, sülfürlü asfalt bağlayıcılı karışımların oldukça yüksek stabiliteye, iyi akma özelliklerine, suya karşı dirence, düşük sıcaklıklara ve yorulmaya karşı dayanımlı yapısal özellikler taşıdığını göstermiştir. Sülfürlü asfalt bağlayıcıların viskozite-sıcaklık karakteristiği, işlenebilirliği olumlu yönde etkileyecek daha geniş bir sıcaklık esnekliğine imkan tanımaktadır. Karıştırma ve serme işlemleri, geleneksel asfalt karışımına göre daha düşük ve geniş aralıklı sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Karışım aşamalarıyla ilgili tüm işlemlerde ve asfalt serim-sıkıştırma prosedürlerinde geleneksel ekipmanlar kullanılabilmektedir [1,13].

Yapılan arazi çalışmalarında, sülfürlü asfalt bağlayıcıların yol inşaatlarında olduğu gibi mevcut geleneksel karışimli yolların bakım ve onarımlarında da başarıyla

kullanılabildiği görülmüştür. Söz konusu farklı çalışmalarla sülfür kullanımının, teknik açıdan olduğu gibi, ekonomik açıdan da geleneksel karışımlara göre daha avantajlı olduğu görülmüştür [10,15].

Karayolu üstyapılarında, bağlayıcı özelliği olan, belirli oranlarda katılması durumunda, en az bitümlü karışımlar kadar dayanım gösteren ve çözücülere karşı dirençli olan sülfür, asfalt karışımlarında ek üretim tesisi veya donanım gereksinim olmaksızın kullanılabilmektedir [55, 61].

3.2 Sülfürlü Asfaltla İlgili Laboratuvar Araştırmaları

Sülfürlü asfaltla ilgili olarak yapılan laboratuvar araştırmalarında farklı çalışmalar yürütülmüş olmasına karşın benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sülfür bağlayıcı asfaltlar, özellikle agregayı kaplaması, işlenebilmesi, sıkıştırılabilmesi, düşük sıcaklıktaki özellikleri ve yorulma özellikleri açısından laboratuvar çalışmaları sırasında, oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Sadece yüksek sıcaklık şartlarında bir sınırlandırmaya gereksinim duyulmaktadır. Çünkü yüksek sıcaklıklar, sülfürün istenmeyen zararlı hidrojen sülfür gazının açığa çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, sülfürlü asfalt çalışmalarındaki ısıl sınırlamalar, bu gazın sıcak karışımda zararlı seviyelere ulaşmasına izin vermemektedir. Özellikle sıcaklığın 149°C ve üzerinde olması durumunda açığa çıkan ve potansiyel tehlike oluşturan hidrojen sülfür (H₂S) gazı nedeniyle deney sırasında sıcaklık üst sınırı olan 149°C sıcaklığa dikkat edilmelidir [13, 55].

Sülfürün 85-100 penetrasyon derecesine sahip bitüm içerisindeki dağılımını göstermek üzere bazı mikroskobik resimler çekilmiştir. Mikroskobik incelemelerde, sülfürlü asfalt bağlayıcıların ortalama parçacık boyutlarında, düzgün ve küçük bir görüntü sergilediği görülmüştür. Bu resimlere göre sülfür taneciklerinin katılaşması ve yerleşim düzeni karışım işleminin başlamasından itibaren üç saat içinde görülebilir hale gelmektedir. Üçer saat aralıklarla kaydedilen fotomikrografilerde daha büyük bir hale gelmiş sülfür tanecikleri, sülfürlü asfalt bağlayıcının stabilitesini sınırlandıran özellikler içermektedir. Stabilitenin artırılması amacıyla sülfür yumuşatıcıların ve diğer katkı malzemelerinin ilave edilmesi yöntemi kullanılmaktadır [12, 54].

Laboratuvar araştırmalarında, %40'a varan oranlarda sülfür katıldığı halde, geleneksel karışımlarla karşılaştırıldıklarında, karışımların -12°C sıcaklığın altındaki ısılarda, rijitlik modülleri arasında önemli bir fark görülmemiştir [12, 64].

Rijitlik modülünden elde edilen bilgilere dayanılarak, ağırlıkça %40'a kadar sülfür kullanımının tatmin edici neticeler verdiği söylenebilir. Karışım sıcaklıklarına ait farklı aralıklarda, sülfürün asfalt içerisindeki çözünürlüğü genellikle %20 ve üzerinde bulunmuştur. Karışım soğuduğunda ise, çözülmemiş sülfürün sülfür kristalleri haline dönüştüğü görülmüştür. Bu kristaller boyutlarına bağlı olarak, karışımın içerisinde mineral filler veya agrega yapısı olarak davranmışlardır [19, 31].

-23 ila -29 C derece arasındaki düşük sıcaklıklar için, kontrol karışımlarının en düşük çekme mukavemetine sahip olduğu ve bunu sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50'lik oranlara sahip sülfürlü asfalt bağlayıcıların takip ettiği görülmüştür. Dolayısıyla sıcak karışımlar için, düşük sıcaklıklardaki çekme mukavemeti açısından %50 oranında sülfür içeren karışımın en uygun karışım oranı olduğu görülmüştür. %10 oranında sülfür ilavesi stabiliteyi düşürürken, oranın %20'ye çıkarılması stabiliteyi tekrar kontrol karışımının sahip olduğu seviyeye çıkarmaktadır. Sülfürün karışımdaki oranı daha da artırıldığında stabilitede gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Örneğin, %50 oranında sülfür içeren karışım stabilitesinde, yaklaşık %50'lik bir artış meydana gelmektedir [12, 66].

Bununla birlikte, sülfürün başka özellikteki bitümle farklı bir davranış sergilemesi mümkündür. Çünkü sülfür çözünürlüğü farklı bitüm sınıflarına göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Geleneksel yöntemlerle ölçülen sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri, özgül ağırlık, yumuşama noktası, penetrasyon, viskozite, duktilite, parlama noktası ve Fraass kırılma noktası olarak değerlendirilmiştir. 85-100 penetrasyon derecesine sahip bitüm ile bağlayıcının, ağırlıkça %0 ila %45 oranları arasında değişen sülfür içeriğine sahip karışımların gösterdiği özellikler Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Yayınlanan bir laboratuvar çalışmasında, ağırlıkça bağlayıcının %50'si oranında sülfür ve %50'si oranında 85-100 penetrasyon derecesine sahip bir asfalt çimentosu içeren bitümlü karışıma ait 60°C derecedeki Marshall deneyi sonuçları ile -18°C derecedeki rijitlik ve yorulma özellikleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışmalarda, akma değerlerinde önemli bir kayıp olmaksızın Marshall stabilitesinin,

sülfür miktarının artması ile doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca düşük sıcaklıklarda da ters bir etki görülmemiştir. Yapılan yorulma deneyi sonuçlarına göre de karışımın yorulma ömrüne etki eden olumsuz bir faktöre rastlanmamıştır [2].

Yapılmış olan başka bir çalışmada ise, sülfürlü asfalt karışımların mühendislik özelliklerini belirlemek üzere statik ve tekrarlı yükler altında endirekt çekme deneyi kullanmıştır. Bu deneye ait değişkenler, 40-50 ve 85-100 penetrasyon dereceli iki ayrı bitümden, 0/100, 20/80 ve 50/50'lik ağırlıkça oranlara sahip üç ayrı sülfür/bitüm oranından ve 10, 24, 38 ve 52°C derece olmak üzere dört ayrı deney sıcaklığından meydana gelmektedir. Yapılan deneyler sonucunda sülfürlü asfalt karışımların, geleneksel asfalt karışımlara göre, daha iyi mühendislik özellikler taşıdığı görülmüştür. Sülfürün karışımdaki oranının %50'ye doğru artışı ile birlikte karışımın yorulma ömründe, elastisite modülünde ve çekme gerilmesi değerlerinde belirgin bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir [15].

Çizelge 3.1: Sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri

Sülfür-Bitüm Numunesi	Karışım oranları ve özellikleri					
Bitüm-Sülfür oranı, % (85-100)	100/0	90/10	80/20	70/30	60/40	55/45
Özgül ağırlık, (15 °C)	1.027	1.055	1.120	1.183	1.232	1.285
Yumuşama noktası, (°C)	44	38	39	42	42	43
Penetrasyon, (25 °C)	92	171	176	181	183	168
Düktilite, (25 °C)	150+	142	101	29	25	47
Parlama noktası, (°C)	293	182	174	174	168	166
Fraass kırılma noktası, (PC)	-16	-14	-15	-12	-13	-14

Kireçtaşı ve volkanik agrega içeren iki ayrı karışım için, 60°C derecedeki Marshall stabilite ve akma değerleri ile bunlara bağlı olarak yapılan yorulma deneylerinin sonuçları araştırılmıştır. Bu çalışmadaki sülfür miktarı, bağlayıcı ağırlığının %0'ından %75'ine kadar olan bir aralıkta kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde, bağlayıcı ağırlığının %26'sına kadar sülfür kullanımının, geleneksel asfalt betonu ile aynı özelliklere sahip olduğu, sülfür miktarının %26'dan daha yüksek oranlara çıkarılması ile sülfür içeren karışımların, geleneksel karışımlara göre daha yüksek bir stabiliteye ve rijitliğe sahip olduğu görülmüştür [17].

Daha önce yapılmış olan diğer laboratuvar araştırmaları aşağıdaki sonuçları ortaya çıkarmıştır [2, 10, 15, 19, 64].

Yumuşama noktası sülfürün asfalta katılmaya başlaması ile önce düşmekte, sülfür miktarının artmasıyla birlikte yavaş yavaş yükselmektedir.

60 ila 138  C derecelik sıcaklık aralığında tespit edilen çeşitli sülfürlü asfalt bağlayıcılara ait viskozite değerleri göz önüne alındığında; 85-100 penetrasyona sahip bir asfalta yapılan ağırlıkça %10 oranında sülfür ilavesi, oluşan karışımın viskozitesini 1557 poise'den 570 poise'ye düşürmektedir. İlave edilen sülfür oranı arttıkça viskozite değeri de artmaktadır. %50 civarında bir orana gelindiğinde salt bitümün başlangıçtaki viskozitesi aşılabilmektedir. Bağlayıcının agregaya katılması ve karışımın serilmesi ile sıkıştırılması işlemleri düşünüldüğünde 200 ila 600 cs'lik (santistok) viskozite değerinin, iyi işlenebilir denilebilecek aralık olduğu düşünülmektedir. Bu da karıştırma ve serme işlemlerinin daha düşük sıcaklıklarda ve daha geniş sıcaklık aralıklarında yapılmasına imkan tanımaktadır.

Düşük sıcaklıklarda şartlarına göre yapılan bazı deneysel çalışmalar neticesinde, sülfürlü asfalt karışımlarla geleneksel karışımların özelliklerinde önemli farklılıkların olmadığı görülmüştür. Bu da, yüksek Marshall stabilitelerine rağmen düşük sıcaklıklarda sülfürlü asfalt bağlayıcı kullanmanın herhangi bir olumsuz etkisinin olmadığını göstermektedir.

Çizelge 3.2: Yorulma deneyi sonuçları

Numune karışım oranları	Bozulmaya dek yük uygulama sayısı (milyon kez)
%6 bağlayıcı, bitüm	1.9
%6.7 S/A bağlayıcı (%25 sülfür)	8.5 (bozulmadan)
%6.0 S/A bağlayıcı (%50 sülfür)	2.7
%7.4 S/A bağlayıcı (%50 sülfür)	0.8

Asfalt betonunun yapısal analizindeki en önemli parametrelerden biri de yorulmadır. Bu konuda yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçları izelge 3.2'de yer almaktadır. Elde edilen verilere göre, 85-100 penetrasyon derecesine sahip bitüme yaklaşık iki milyon defa yk uygulanabilmesine karşın, sülfürlü asfalttan elde edilen çeşitli numunelerin birçoğu daha yüksek değerlere ulaşabilmiştir. Örneğin, ağırlıkça

%25 oranında sülfür içeren, toplam karışımın %6.7'si oranında bağlayıcıya sahip karışıma ait numune sekiz buçuk milyon yüke ulaşmış ve hala bir çatlamaya uğramamıştır. Bu deneyler, 20 psi (138 kPa) yük ile 0.04 sn.'lik uygulama süresi, 88 km/saat trafik hızı, 0.08 sn.'lik bekleme süreleri ve 21°C derecelik şartlar altında gerçekleştirilmiştir [56, 63, 64].

3.3 Sülfürlü Asfaltla İlgili Saha Araştırmaları

Kuzey Amerika'da, 1970'li yılların son yarısında, arazi çalışmalarına imkan tanımak üzere çok sayıda sülfürlü asfalt deney yolları yapılmıştır. Bu arazi çalışmaları, sülfürlü asfalt karışımların yol inşa ayrıntıları ve yol inşaatlarının devamlılığı hakkında bir çok bilgiye ulaşılabildiğini kolaylaştırmıştır [14, 18].

Alberta Otoyollar ve Ulaştırma Departmanı'nın sahip olduğu geleneksel bir karışım plenti uygulama yerinin 4 km. yakınına yerleştirilmiştir. Sülfürlü asfalt bağlayıcıyı hazırlayan tertibat da (SAM) plente entegre edilmiştir. Bitüm, bir depolama tankından, sıvı sülfür ise bir sülfür tankından sağlanmıştır. Burada kullanılan bitüm, 25°C derecede minimum 250 penetrasyona sahip AC 275 asfalt çimentosudur. Asfaltın ve sülfürün önerilen sıcaklıklar arasında tutulması kızgın yağ ile ısıtılan bir sistem aracılığıyla sağlanmıştır. Deney bölgelerinin inşaatları geleneksel ekipmanlarla başarıyla tamamlanmıştır. Orijinal tasarım kalınlığı, Alberta Otoyollar ve Ulaştırma Departmanı tarafından hazırlanmış olan bir taban zemini üzerine 15cm'lik bir asfalt betonu olarak seçilmiştir [56, 61].

Pennsylvania Ulaştırma Departmanı, 1980 yılında üç adet sülfürlü asfalt yol projesini farklı tip agrega karışımı kullanılarak tamamlamıştır. Söz konusu yol projeleri, bu çalışmaların sonuçlarının geniş bir biçimde değerlendirilmesi neticesinde, sülfürlü asfalt bağlayıcının ağırlıkça %30 oranında sülfür ile hazırlanması uygun görülmüştür. 4°C, 25°C ve 38°C sıcaklıklarda yapılan incelemelerde sülfür içeren karışımların elastisite modüllerinin, sülfür içermeyen kontrol karışımlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Hizmete açılmasının ardından inşa edilen bu yollarda geçen bir yıllık sürenin sonunda sülfür içeren ve içermeyen üstyapıların performanslarında önemli bir farklılığa rastlanmamıştır [14, 19,31].

Kullanımda olan üstyapılara ait malzeme özelliklerini belirlemek üzere, Amerika Birleşik Devletleri'nin Nevada, Teksas ve Louisiana eyaletlerinde bulunan dört ayrı

sülfürlü asfalt karışımlı yollar üzerinde arazi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda, Marshall stabilitesi ve akma, elastisite modülü, statik ve tekrarlı yükler altındaki sünme ve yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların genel bir değerlendirmesi yapıldığında, sülfürlü ve sülfürsüz asfalt karışımların, takriben aynı özellikleri ve davranışları sergilediği görülmüştür. Sadece, sülfür içeren karışımların, kullanımda olan yollarda stabilite, elastisite modülü ve yorulma direncinin biraz daha hızlı bir şekilde kayba uğradığı görülmüştür [18, 19].

Bakım ve onarımı, yol üstyapı inşaatlarında çok önemli bir yere sahiptir. Sülfürlü asfalt karışımların yüksek stabiliteye sahip olması, mevcut yolların onarım işlerinde kullanılması konusunda çalışmaların başlatılmasını sağlamıştır. Buna dayanarak Alberta otoyolunun yaklaşık 1.6 km'lik bir kısmının bu yöntemle onarılması planlanmıştır. Bu yol, Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzeyindeki Alaska otoyolunun ana arterlerinden biri olmakla beraber yüksek trafik hacmi ve değişken sıcaklıklara sahip olmasıyla bilinen bir yoldur. Bu tabloya göre çalışılan bölge, elde edilecek veriler açısından oldukça önemlidir. Orijinal yol, ağırlıkça %6 oranında bitüm içeren geleneksel karışım ile yapılmış bir yoldur. Yolun onarımında ise bağlayıcı ağırlığının %40'ı oranında sülfür içeren, toplam karışımın da %7'si oranında bağlayıcıya sahip sülfürlü asfalt bağlayıcılı karışım kullanılmıştır. Tasarım kalınlığı olarak yolun bir yarısında 5 cm, diğer yarısında ise 10cm'lik bir tabaka kalınlığı uygulanmıştır. İnşaat sırasında, bazı zamanlarda yağmur yağmasına rağmen, geleneksel asfalt karışımına kıyasla sülfürlü karışımında ne bir kabuklanma durumu ne de daha hızlı bir katılaşmaya rastlanmıştır. Böylelikle bu onarım işinde de iyi bir başarıya ulaşılmıştır [19, 63, 61].

Windfall'da inşa edilen bir üstyapıdan alınan en önemli sonuçlar, sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı karışımların, rehabilitasyon uygulamaları için büyük bir başarıyla kullanılabilirdiği ve bu karışımların, geleneksel ekipmanlarla ve normal şartlar altında yola uygulandığı görülmüştür [17, 18].

3.4 Sülfürlü Asfaltın Çevresel Etkileri

Sülfür oksitler altı farklı kükürt oksidinden oluşur ve SO_x olarak kolektif bir parametre ile gösterilir. Bunlar; SO, SO₂, SO₃, S₂O₃, S₂O₇ ve SO₄'tür ve aralarında hemen hemen yalnızca SO₂ ve SO₃ önem taşımaktadır. Endüstriyel proseslerde SO₂, çıkış materyali olarak büyük oranlarda görülmez. Fakat SO₂ emisyonu sülfür

bileşiklerinin ve metil merkaptanın (keskin kokulu sülfür içeren organik bileşikler) beraber bulunduğu yerlerde sıkça görülmektedir. Prosesler içindeki sülfür gaz çıkışı sülfür içerikli polimerlerden ve diğer sülfür içerikli kimyasal kullanımlardan, kağıt ve kağıt hamuru üretiminden ya da çok sık kullanılan fosil yakıt tüketimi sebebiyle görülmektedir. Sülfür kullanımının endüstride çok çeşitli olması sebebiyle minimizasyonu için genel bir tavsiye vermek zordur fakat sülfür dioksit suda çözünebilir ve yıkama yöntemi de sülfür dioksit tutmada etkili bir yöntemdir [57, 60, 69, 70].

19/5/2005 tarihinden sonra yapılan her yakıt tedarikinde alınan yakıttaki kükürt oranı kural gereklerini aşmayacak şekilde kullanılmalıdır. Örneğin gemilerde kullanılan herhangi bir akaryakıtın kükürt oranı %4.5 m/m değerini aşamaz [67] .

Daha önce yürütülmüş olan araştırmalarda, çevresel etkilerin belirlenmesi ve takip edilmesi için, sülfür asfalt işlemlerinde emisyon tespit deneyleri yapılmıştır. Asfalt karıştırıcıdan ve serme makinesinden çeşitli örnek karışımlar alınmış ve bu numunelerdeki emisyon ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde hidrojen sülfür (H₂S), sülfür dioksit (SO₂), karbonil sülfid (COS), karbon disülfid (CS₂), merkaptanlar (keskin kötü kokulu, sülfür içeren organik bileşikler-RSH) ve toplam hidrokarbonlar dikkate alınmış ve emisyon değerleri ölçülmüştür. Hidrojen sülfür ve sülfür dioksit ölçümleri yapılırken bazı gaz algılayıcıları ve Kitagawa adı verilen bazı tüpler kullanılmıştır. Karıştırıcıda açığa çıkan emisyon değerleri, geleneksel asfalt ve sülfürlü asfalt için karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.3'te verilmiştir. Sınır değerler µg/m³ cinsinden, ortam sıcaklığı 145°C ve basınç da 101,3 kPa'da tutulmuştur [67, 68, 70].

Çizelge 3.3: Emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması

Hava Kirletici Maddeler	Geleneksel Asfalt	Sülfürlü Asfalt
H ₂ S, (ppm)	0,2	1,8
SO ₂ , (ppm.)	0,1	0,2
RSH, COS, CS ₂ , (ppm)	< 0,1	< 0,1
Toplam hidrokarbonlar	6	6

Çizelgedeki veriler incelendiğinde, geleneksel karışumlu asfalta göre sülfürlü asfaltın H₂S emisyon değeri daha yüksektir. Ancak bu emisyon değeri şartname sınır değerleriyle karşılaştırıldığında oldukça düşük kalmaktadır. Sıcak karışımın dumanında sülfür buharının bulunması, işlemlerin gerçekleştirildiği sıcaklıklar ve sülfürün buhar basıncı düşünüldüğünde anlaşılabilir nitelikte ve normaldir.

Hidrojen sülfür ve Sülfür dioksit maddeleri için belirlenen sınır değerleri kütleli olarak bacalar için sırasıyla 4 kg/saat ve 60 kg/saat, baca dışındaki yerlerde ise 0,4 kg/saat ve 6 kg/saat olarak belirlenmiştir [68, 70]. 100 ton/saat kapasiteli bir asfalt üretim tesisinde asfalt bünyesindeki tüm H₂O ve SO₂ gazlarının açığa çıktığı varsayılırsa, bu miktar sırasıyla 37 gr/saat ve 7,4gr/saat olarak hesaplanmaktadır. Bulunan söz konusu değerler şartname sınır değerlerinin oldukça altındadır. Asfalt karışımı bünyesindeki tüm gazların üretim ve serim-sıkıştırma sırasında açığa çıkması beklenen bir durum değildir. Normal çalışmalarda 145°C sıcaklığın aşılması gerektiği hususu dikkate alındığında bu gazların açığa çıkma riskinin daha da azalacağı görülmektedir.

Diğer sülfür içeren gaz oluşumları belirlenen sınır değerlerinin oldukça altındadır. Toplam hidrokarbon miktarında ise herhangi bir değişime rastlanmamıştır. Geleneksel asfalta kıyasla sülfürlü karışımların sergiledikleri bu değerlerin, sülfür içermelerine rağmen başa baş değerlere sahip olması, sülfürlü karışımların emisyonlarının herhangi bir soruna yol açmayacağı kanıtı olarak değerlendirilmektedir.

Serme makinesi ve diğer çalışma alanlarından alınan örneklerdeki emisyon değerleri, karıştırıcıdan alınan numunelerden elde edilen değerlerden daha düşüktür. Sıcaklığın, bu kısımlarda karıştırıcı içindekinden daha düşük olması emisyon değerlerinin de düşmesine neden olmaktadır.

Buna göre sülfürlü asfalt bağlayıcılar, geleneksel sürekli karışım plantlerinde üretilebilmekte, geleneksel ekipmanlar ile ve normal şartlarda taşınabilmekte, serilip sıkıştırılabilmektedir. Çalışmalar sırasında açığa çıkan emisyon değerleri şartname sınır değerlerinin altında olduğundan, çevre ve insan sağlığı açısından potansiyel bir tehlikeye yol açmamaktadır. Bununla birlikte, çalışma sırasında çevreye yayılan keskin kokular ve göz yaşartıcı gazların çalışanları rahatsız etmemesi için maske kullanılması önerilmektedir.

4.SÜLFÜRÜN TEKNİK ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Kükürt olarak da bilinen ve “S” simgesiyle gösterilen sülfür, limon sarısında, ametal, yalın kimyasal bir elementtir. Doğada yaygın olarak bulunan sülfür, çoğunlukla metallere birleşmiş olarak görülür. Yapılan araştırmalar, bütün bitkilerin ve hayvanların bünyelerinde bir miktar kükürt bulunduğu ve yeryüzünde büyük miktarda kükürt rezervleri olduğunu göstermektedir. Bünyesinde mikro kristaller halinde pirit içeren kükürt cevheri, parlak ve koyu kurşuni renklidir. Ham kükürdün büyük bir bölümü, kükürt dioksit gazı, sülfürik asit ve karbon sülfür üretiminde kullanılır. Kükürten ayrıca kibrit yapımında ve kauçuğun kükürtlenmesinde yararlanır. Sülfürün ilaç endüstrisinde de değişik kullanım alanları olduğu bilinmektedir.

Sülfür, doğada element halde bulunduğu gibi, endüstrinin yan ürünü olarak da elde edilebilmektedir. Sülfür, Hidrojen sülfür (H_2S) ve Sülfür dioksit (SO_2) gazlarının oksitlenmesiyle kükürdün çökmesi sonucu oluşmaktadır. Kükürt kibrit alevine tutulunca katran gibi eriyerek siyah damlacıklar halinde akmaktadır. $119^{\circ}C$ sıcaklıkta eriyen bu maddenin hafif açık mavi renkli alevi vardır ve ısınma sonucu açığa çıkan Sülfür dioksit (SO_2) gazı zehirlidir. Sülfür maddesiyle ilgili bazı tanımlar aşağıda verilmektedir [13, 31, 44, 67].

Doğal sülfür: Doğada ham halde bulunan saf kükürttür.

Elementer sülfür: Doğal kükürt kaynaklarının çeşitli zenginleştirme işlemleri sonucu elde edilen sülfürün saf şeklidir. Genellikle kükürt tenörü en az % 99,5'tir.

Piritler: Demir sülfür minerali olup, FeS_2 formülüyle gösterilir.

Granül sülfür: Kükürdün taşıma kolaylığı açısından su ile soğutularak ince yumrular haline getirilmiş şeklidir.

Granüler sülfür: Bileşiminde sülfür dioksit, hidrojen sülfür ve karbon karası bulunan ve granüler hale gelmesi için bitümle karıştırılan koyu renkli bir malzemedir. Granüler sülfür malzemesi Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1: Doğal ve Granüler Sülfür (GSF) malzemesi

Kazanılmış sülfür: Hidrojen sülfürden, yüksek baca gazlarından ve petrol rafineri gazlarından yan ürün olarak elde edilen kükürttür.

Frasch sülfür: Yeraltı doğal kükürt kaynaklarının sondajlardan verilen sıcak suyla eritilip yukarı çekildiği elementer sülfürdür.

Blok sülfür: Kükürdü su veya hava ile soğutup peletleyerek (topaklar oluşturma) sıkıştırılıp blok haline getirme işlemiyle elde edilen kükürttür.

4.1 Sülfürün Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Sülfür, fiziksel görünüm olarak, reçine parlaklığı özelliğine sahip, tatsız, kokusuz katı bir maddedir. Sertliği 1,5-2,5 arasında değişen sülfürün yoğunluğu da $2,0 \text{ g/cm}^3$ civarındadır. Isı iletkenliği az, elektrik iletkenliği ise hiç yoktur. Ancak nemli veya piritli ortamlarda elektrik iletkenliği yüksektir. Sürtünme sonucu negatif elektrikle yüklenir. Sülfür ısıtıldığında 113° dereceye doğru erimeye başlayarak açık sarı bir sıvıya dönüşür. Bu sıvı daha yüksek sıcaklıkta ağdalı bir kıvama erişerek koyulaşır.

220° dereceye doğru kararır ve akışkanlığını yitirir. Suda çözünmemesine karşın benzende hafif, karbon sülfürde ise tam olarak çözünür. Kimyasal bileşiklerde -2'den +6'ya kadar değişen değerler alır ve oksijen elementinde olduğu gibi özellikle metallerde hemen tepkimeye girer. Asal gazların ve azotun dışında birçok elementle birleşir. 270°C sıcaklıkta yanmaya başlayan sülfürün kaynama derecesi ise, 444°C'dir. Sülfür buharları kaynama noktasında S₈ moleküllerinden oluşurken, sıcaklığın yükselmesiyle birlikte S₆, S₄ moleküllerine, 650°C sıcaklık üzerine çıkınca da S₂ moleküllerine dönüşürler [5, 10, 44, 69].

4.2 Sülfür Kaynakları

Sülfür, doğada element olarak bulunduğu gibi, birçok elementle birlikte bir bileşik oluşturarak, sülfatlar ve organik bileşikler halinde; tortul, metamorfik ve volkanik kayalar ile bütün fosil yakıtlarında da bulunabilmektedir. [5, 10, 44]

Dünya kükürt kaynaklarının çok az bir kısmı yoğunlaşarak işletilmeye uygun haldedir. Bu rezervlerin işletilmesiyle elde edilen kükürt, petrol ve doğal gaz rafineri bacalarından yan ürün olarak elde edilen kükürttten daha pahalıya mal olmaktadır. Türlerine göre sülfür kaynakları aşağıda sınıflandırılmıştır.

4.2.1 Doğal Kaynaklar

Elementer sülfür, dünyanın değişik bölgelerinde farklı cevher rezervlerinden elde edilmektedir. Bu tür kükürtler ağırlıklı olarak ABD ve Meksika'da bulunan tuz domu çökellerinden ve Batı Teksas, Polonya, Sicilya, Rusya ve Irak'ın evaporit basen çökellerinden elde edilmekle beraber, sayısı 10'dan fazla ülkenin volkanik kökenli doğal kükürt cevherlerinden de elde edilebilmektedir. Köklerine göre doğal kükürt yatakları, Tortul Kükürt, Volkanik Kükürt ve Hidro-Termal Kükürt yatakları olmak üzere üç ana gruba ayrılır [9, 44, 59].

Tortul Kükürt Yatakları: Hidrokarbonlarla temas halinde olan jipslerde, kükürt bakterilerinin faaliyetiyle jipslerin biyokimyasal bozulmasından meydana gelirler. Tuz domları ve jips örtü kayaları bünyesinde de işlenebilecek tortul kükürt yatakları bulunmaktadır.

Volkanik Kükürt Yatakları: Poroz ve çatlaklı volkanik kayaların bünyesinde bulunan bu cevher yatakları masif ve kütlelidir. Kayaların, merkezinden dışarıya

doğru kükürt cevheri etrafında piritli ve killi zonlaşmalar görülür. Volkanik H₂S ve SO₂ gazları yeryüzüne faylar üzerinden çıkarak yüzeyde kükürt süblüstasyonları ve kabukları oluştururlar.

Hidrotermal Kükürt Yatakları: Kükürt çiçekleri, doğada küresel veya eliptik şekillerde, fay ve çatlak duvarları üzerinde örtü şeklinde ve toz kükürt çiçekleri olarak da çatlak dolgularında bulunmaktadır. Fayların kesiştiği bölgelerde daha fazla kükürt görülür [5, 10, 44].

4.2.2 Yüksek Baca Gazları

Dünyada doğal kaynaklardan elde edilen kükürt, kullanılmakta olan toplam kükürt miktarının çok az bir kısmını oluşturmaktadır. Günümüzde, kükürt veya bileşikleri, çeşitli şekillerde, baca gazlarından da elde edilebilmektedir. Petrol rafinerisi bacalarından, doğal gaz işleme tesisi bacalarından, termik santral bacalarından ve demir-çelik üretimi yapan yüksek fırın bacalarından elde edilmektedir [5, 9, 11].

Baca gazı kükürtleri, dünyanın değişik bölgelerinde, petrol rafinerilerinden yan ürün olarak üretilmektedir. Bu kükürtler ayrıca Kanada ve Fransa başta olmak üzere, 10'dan fazla ülkede de doğal gaz bacalarından elde edilmektedir [5].

4.3 Sülfür Üretimi

Doğal gaz ve petrolden desülfürizasyon yöntemi kullanılarak kükürt elde edilmektedir. Kükürt, doğal gazda serbest halde, hidrojen sülfür (H₂S) ve sülfür dioksit (SO₂) bileşikleri şeklinde bulunurken, ham petrolde ise organik kükürt bileşiği şeklinde bulunur. Rafine etme işleminde gazların bir kısmı hidrojenasyon süreci ile hidrojen sülfüre dönüşür. Daha sonra bu gazlar, hidrojen sülfür ile karbondioksit gibi gazların ayrıştırılması için bir solüsyon içinden geçirilir. Bu işlem sonucunda, solüsyondaki hidrojen sülfür içeriği konsantre hidrojen sülfür gazı olarak ayrılır. Kükürt elde etmek için değişik üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başında gelen Frasch Yöntemi ile Eritme ve Yüzdürme yöntemleri aşağıda açıklanmıştır [5, 11, 44].

Frasch Yöntemi: Bu yöntemin uygulanabilmesi için, kükürt bulunduran gözenekli bir formasyon, geçirgen olmayan bir örtü kayacı, bol miktarda su ve akaryakıtın sağlanması gerekir. Frasch yöntemiyle, doğal elementer kükürt yataklarında açılan

kuyular içine çok fazla miktarda sıcak su pompalanır. Suyun sıcaklığı ile kuyu cidarı çevresindeki kükürt erir. Erimiş kükürt emilerek, bu amaçla hazırlanmış olan havuzlara, çok saf elementer kükürt halinde toplanır. Bu yöntemle üretilen sülfürün maliyeti oldukça yüksektir [2, 5].

Eritme Yöntemi: Eritme yönteminde, zengin kükürt cevherleri, kırıcılarla 2 cm'lik küçük parçalara ayrılır. Bu parçalar, taşıyıcı bant vasıtasıyla, sıcak eritme havuzlarına aktarılır. Burada, karıştırıcı pervanelerle cevherin süratle eritilmesi sağlanır. Elekler yardımıyla, erimemiş kaba kısımlardan ayrıştırılan sıvı kükürt, ikinci bir havuza gönderilir. Buradan pompayla gönderilen sıvı kükürt filtrelendikten sonra, %99.8 saflıkta, havuzda toplanır [5, 9].

Yüzdürme Yöntemi: Yüzdürme yönteminde, eritme yöntemine göre kükürt içeriği daha az olan cevherler öğütülerek yoğunlaştırıcılara gönderilirler. Yoğunlaştırıcılarda yüzdürülen kükürt köpüğü pervanelerle sıyrılarak, pirit içeriği çökeltilir. Kıvamlaştırma tankından filtre yardımıyla alınan konsantre cevherin ihtiva ettiği rutubet oranı, %15-20'ye kadar düşürüldükten sonra, sıcak eritme havuzlarında sıvı haline getirilir. Sıvı kükürt filtreli pompajlama yoluyla havuzda toplanarak, %99.8 saflıkta tavalara dökülür [5, 10].

Ayrıca, bitümlü kumların, bitümlü şistlerin, kömürlerin bünyelerindeki bitümlerin eritilmesiyle veya hidrojenasyon, sıvı veya gaz haline getirilerek hidrojen sülfür elementer kükürde dönüştürülebilmektedir. Ülkemizde, Keçiborlu Kükürt Fabrikası tesislerinde, sülfür üretiminde yüzdürme yöntemi kullanılmıştır [5, 9].

4.4 Sülfür Rezervleri

Dünyanın en büyük doğal kükürt yatakları Polonya, Amerika, Rusya, Irak, Meksika, Çin ve İtalya'dadır. Türkiye ve Japonya'da, zengin volkanik kükürt rezervleri mevcuttur. Dünyanın en büyük pirit yatakları ise Çin, Rusya, İspanya ve Güney Afrika'da bulunmaktadır [2, 5, 10].

Türkiye kükürt potansiyeli açısından pirit ve jipsin yanısıra, elementer kükürt yatakları bakımından da büyük rezervlere sahiptir.

Rafinerilerimizde işlenen ham petrolün içerdiği ortalama kükürt potansiyeli yıllık yaklaşık 350.000 tondur. Mevcut rafinerilerde kükürt geri kazanım tesislerinin

kurulmasıyla, kükürt üretiminin miktarında büyük artışlar sağlanması ve binlerce ton kükürdün dışarıdan ithal edilmesinin önlenmesi mümkündür.

Endüstriyel üretimlerden yan ürün olarak kükürt üretilme amacıyla, ülkemizde yapılan ilk yatırım, Çayırhan Termik Santraline entegre olarak kurulan baca gazı kükürt arıtma tesisidir. Bu tesis, Kasım 1991'de santralle birlikte çalışmaya başlamıştır. Çayırhanda kurulan tesiste geleneksel kireçtaşı işlemi uygulanmaktadır. Tesisin ilk işletme sonuçlarının başarılı olması, termik santrallerde elektrik enerjisinin az bir maliyetle temiz bir biçimde üretilileceğinin bir kanıtı olmuştur [5, 9].

Artvin-Borçka yöresinde bulunan bakırlı piritler değişik yöntemlerle zenginleştirilerek kullanıma açılabilir. Bu yatakların toplam pirit rezervi 9 milyon ton civarındadır. İşlenebilirlik veriminin %60 olduğu göz önüne alındığında, kullanılabilir pirit miktarı 5,5 milyon ton olarak hesaplanabilir. Aynı yörede, bakır içeriği çok düşük, buna karşılık %46 kükürt içeren 2,5 milyon tonun üzerinde pirit rezervleri de bulunmaktadır. Kastamonu-Küre yöresinde 10 milyon tonun üzerindeki pirit rezervinin, işletilebilir pirit miktarı yaklaşık 6 milyon tondur. Siirt-Şirvan yöresinde bünyesinde bakır içeren 10 milyon tondan fazla pirit rezervi bulunmaktadır. Bu rezervin işletilebilir miktarı ise yaklaşık 6 milyon ton kadardır. Rize - Çayeli yöresinde 14 milyon ton kadar pirit rezervi bulunmaktadır. Bu yatakların yaklaşık 8,5 milyon tonu işletilebilir durumdadır. Trabzon-Giresun pirit yataklarının toplam rezervi ise 6 milyon ton civarındadır [5, 10, 11].

Tüm bu rezervler dikkate alındığında, sülfür yatakları açısından ülkemizin ne kadar zengin bir potansiyele sahip olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.

Ülkemizde işletilebilir tek doğal kükürt maden yatağı Isparta-Keçiborlu'da kurulmuştur. ETİBANK tarafından işletilen bu tesis, ekonomik ömrünü doldurduğu gerekçesiyle 1995 yılında tamamen kapatılmıştır. Türkiye'de, aynı zamanda İzmit, Aliğa ve Orta Anadolu Rafinerilerinde de kükürt üretimi yapılmaktadır. Isparta Keçiborlu Kükürt İşletmesinin 1995 yılında kapatılmasından sonra Türkiye'nin elementer kükürt üretimi sadece TÜPRAŞ (Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş.) tarafından yapılmaktadır. İzmit, İzmir, Kırıkkale ve Batman bölgelerinde kurulmuş olan TÜPRAŞ rafinerilerine ilişkin genel bilgi ve kapasite büyüklükleri aşağıda belirtilmektedir [8, 23, 59].

Sülfür üretimi, TÜPRAŞ bünyesinde, İzmit, İzmir ve Kırıkkale rafinerilerinde yapılmaktadır. Rafinerilerimizde, Avrupa Topluluğu çevre standartlarında üretim gerçekleştirmek amacıyla başlatılan yatırımlardan İzmit Rafinerisi Yeni Reformer Ünitesi (CCR), başarıyla devreye alınmış ve Projenin ikinci büyük ve en önemli halkası olan Yeni Dizel Kükürt Giderme Ünitesi (MQD) de başarıyla devreye alınarak ilk ürünler 2007 yılında tanklarına gönderilmiştir. Böylece 4,500 m³/gün kapasiteli Nafta Arındırma Ünitesi (NHT) ve CCR Platformer ünitesi aktif olarak çalışmaya başlamıştır. Buna bağlı 950 kg/saat kapasiteli Sürekli Katalist Rejenerasyon Ünitesi ve Avrupa Topluluğu'nun öngördüğü 50 ppm'in de altında (10 ppm) kükürt ihtiva eden motorin üreten 8,500 m³/gün kapasiteli Dizel Kükürt Giderme Ünitesinin devreye alınması da tamamlanmıştır. Avrupa Topluluğu'nda 2009 yılının başından itibaren zorunlu olacak spesifikasyonlarda motorin üretimini İzmir ve İzmit Rafinerilerinde sağlanmış olup, Kırıkkale Rafinerisinde yapımı süren benzer ünitelerin devreye girmesiyle bu rafineride de kükürt içeriği düşük motorin üretilmeye başlanacaktır [23].

İzmit Rafinerisi: 11 Ocak 1960 tarihinde kurulan İstanbul Petrol Rafinerisi A.Ş.'nin (İPRAŞ) İzmit Körfezi'nin Tütünçiftlik bölgesinde yaptırdığı rafinerinin, 1961 yılında 1 milyon ton/yıl olan ham petrol işleme kapasitesi zaman içinde gerçekleştirilen 2 teknolojik yapılandırma ve genişletme projesi sonunda 1982 yılında 11,5 milyon ton/yıl olmuştur. Beyaz ürün verimliliğini artırıcı modernizasyon çalışmaları sonucunda değişen ham petrol işleme tasarım kapasitesi, 2007 yılından itibaren 11 milyon ton/yıl olarak tespit edilmiştir [23].

TÜPRAŞ'ın Avrupa Birliği standartlarında üretim yapabilmesi için sürdürdüğü Ana Yatırım Planı'nın önemli kilometre taşlarından biri olan İzmit Rafinerisi Dizel Kükürt Giderme ve Yeni Reformer Ünitesi'nin devreye girmesi ile halen AB standardı olan 50 ppm (tonda 50 gr kükürt)'in de altında 10 ppm (tonda 10 gr kükürt) motorin üretilmektedir. Kullanılan yeni teknoloji ile düşük kükürt içerikli daha temiz ve çevreci motorin ile daha yüksek oktanlı benzin üretimi sağlanmaktadır [8, 23].

Türkiye petrol ürünleri tüketiminin yaklaşık %40'ının gerçekleştiği tüketim merkezinin odağında yer alan İzmit Rafinerisi, yeni üretim ünitesinin devreye girmesiyle birlikte 2009 yılından itibaren uygulanacak AB çevre normlarına uygun Euro-V standartlarında üretim yapabilir hale gelmiştir. Rafineriler için gelişmişlik

göstergesi olan Nelson Kompleksite endeksini de 7,78'e yükselterek Akdeniz Bölgesi'nin en gelişmiş rafinerileri arasında yerini almıştır [23].

İzmir Rafinerisi: Türkiye'de artan petrol ürünleri talebini karşılamak amacıyla İzmir'in Aliğa yöresinde 1968 yılında yapımına başlanan İzmir Rafinerisi 1972 yılında işletmeye alınmıştır. Kuruluşunda 3 milyon ton/yıl olan ham petrol işleme kapasitesi, kademeli olarak uygulanan teknolojik yenilemeler ve 1987 yılında tamamlanan genişletme çalışmaları sonunda 10 milyon ton/yıl'a ulaşmıştır. Distilasyon kapasitesindeki revizyonlar sonucunda artan ham petrol işleme kapasitesi 2007 yılı itibarıyla 11 milyon ton/yıl olarak tespit edilmiştir [23].

Kırıkkale Rafinerisi: Başta Ankara olmak üzere Orta Anadolu Bölgesinin birçok ilinin petrol ürünleri talebini karşılamak amacıyla kurulan Kırıkkale Rafinerisi 25 Ekim 1986 tarihinde işletmeye alınmıştır. Stratejik amaçlarla Kırıkkale yakınlarındaki Hacılar yöresinde inşaatına 1976 yılında başlanılan rafinerinin ham petrol işleme kapasitesi 5 milyon ton/yıldır. Rafinerinin ham petrol ikmali BOTAS'ın Ceyhan Terminalinden 447 km. uzunluk ve 5 milyon ton/yıl kapasitesi olan Ceyhan-Kırıkkale boru hattı ile yapılmaktadır [23].

Batman Rafinerisi: Ülkemizin ilk rafinerisi olan Batman Rafinerisi 330 bin ton/yıl kapasite ile 1955 yılında Batman'da kurulmuştur. Artan bölge talebini karşılamak üzere rafinerinin kapasitesi 1960 yılında tamamlanan teknolojik çalışmalarla 580 bin ton/yıl'a çıkarılmıştır. Yenileme çalışmaları aralıksız devam eden Batman Rafinerisi'nin ham petrol işleme kapasitesi yeni bir ünitenin işletmeye alınması ile 1972 yılında 1,1 milyon ton/yıl olmuştur [23]. Rafinerilerimizde üretilen günlük kükürt miktarları ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Rafinerilerdeki kükürt üretim kapasiteleri

TÜPRAŞ Rafinerileri	Kükürt Üretim Kapasiteleri (m³/gün)
İzmit Rafinerisi	137
İzmir Rafinerisi	113
Kırıkkale Rafinerisi	83
Batman Rafinerisi	Kükürt üretimi yapılmamaktadır

4.5 Sulfür Tüketimi

Kükürt doğrudan veya dolaylı olarak günlük hayatımızın hemen her yerinde vardır. 1999'da yıllık toplam dünya kükürt üretimi 67 milyon ton civarındayken bunun yaklaşık % 88'i sülfürik asit üretiminde kullanılmıştır. 1995-1999 yılları arasında Türkiye'de kükürt üretimi 154.000 ila 221.000 ton arasında hesaplanmıştır. Bu miktar, Türkiye kükürt talebinin ancak yarısını karşılayabilmektedir [5, 10, 12].

Elementer kükürdün, sülfürik asit üretiminden sonra dünyada en çok kullanıldığı alan ise tarımdır. Yıllık yaklaşık 4,6 milyon ton kükürt tarımsal ilaçlamalarında kullanılmaktadır. Dünyada yıllık yaklaşık 64 milyon tonu bulan kükürt tüketiminin diğer kullanım alanları ise, kağıt, demir çelik, deterjan, lastik, kibrit, tekstil gibi sanayi alanlarıdır. Son yıllarda kükürdün hidroklorik asit (hidroklorokarbon) endüstrisinde de kullanımı artış göstermektedir [5, 10, 31].

Türkiye'nin ortalama yıllık kükürt ithalatı 125.000-175.000 ton arasındadır. Yıllık toplam ham petrol ithalatı ise 23 milyon ton civarındadır. İthal edilen ham petrol içindeki ortalama kükürt miktarının %1,5 olduğu göz önüne alındığında, rafinerilerimizde yıllık yaklaşık 345.000 ton kükürt üretilebilir. Petrol rafinerilerinde kükürt üretiminin kademeli olarak artırılmasıyla hem kükürt ithalatının, hem de hava kirliliğinin önüne geçmek mümkündür.

Dünyada termik santrallerin neden olduğu hava kirliliğinin önlenmesi zorunlu olduğu için, baca gazlarından sülfürik asit ve amonyum sülfat yan üretimi yaygın bir hal almıştır [5, 10, 69, 70].

5.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada stabilite, performans ve tekerlek izi oluşumu deneyleri için üretilen numunelerde mineral agrega, bitümlü bağlayıcı ve granüler sülfür malzemesi kullanılmıştır. Karışıma katılmadan önce, kullanılacak malzemelerin özellikleri ve şartnamelere uygunlukları deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir.

5.1 Kullanılan Malzemeye Uygulanan Deneyler

Karışım numuneleri hazırlanmak üzere mineral agrega, B50/70 bitüm ve granül haldeki sülfür malzemesi kullanılmıştır. Malzemeye uygulanan deneyler TS EN ve KTŞ (Karayolları Teknik Şartnamesi) standartları esas alınarak yapılmıştır.

5.1.1 Mineral Agrega

Mineral agrega esnek üstyapı kaplamalarının yük taşıma kapasitelerinde en büyük rolü oynayan ve karışımın performansı üzerinde de büyük oranda etkisi olan bir malzemedir. Yol kaplamalarında kullanılan agregalar doğal ve suni agregalar olmak üzere iki gruba ayrılır. Doğal agregalar, kayalardan fiziksel yolla, değişik yöntemlerle kırılmak suretiyle elde edilir. Kökenlerine göre magmatik, tortul ve metamorfik kayalar olmak üzere üçe ayrılırlar [3, 21, 31].

Magmatik kayalar, yer kabuğu altından yüzeye fıskırmış magmanın soğuyarak kristalleşmesi sonucu meydana gelmiş kayalardır. Bu kayalar dünya kabuğunu oluşturan kaya kitlesinin kaynağı olarak kabul edilirler. Magmatik kayaların bileşimi, tane çapı ve dokusu, erimiş kayanın soğuması sırasında mevcut hava koşullarına göre büyük ölçüde değişiklik gösterirler. Bazalt, andezit, granit, grafit ve diyabaz bu kayaç sınıfına girer. Magmatik kayalar, çok sert bir yapıya sahiptir ve su emme kabiliyetleri genel olarak düşüktür [3, 24, 45].

Tortul kayalar, kayaların parçalanması, aşınması, katı ya da eriyik halde sürüklenerek deniz veya göl dibinde tortullaşması ve zamanla katılaşıp taşlaşması sonucu oluşurlar. Bu kayaların başlıca özelliği tabakalı olmaları ve içlerinde fosil ve

canlıların izlerinin bulunmasıdır. Kum taşı, kalker, anhidrit, kireç taşı ve jips bu kayaç sınıfına girer.

Metamorfik kayaçlar, tortul ya da magmatik kayaçların yüksek basınç, yüksek ısı, su buharı ve değişik gazların etkisiyle veya mekanik olarak şekil değiştirmeleri sonucu mineralojik bileşim kazanmasıyla oluşurlar. Mineraller iç içe geçtiği için bu kayaç türü üstyapı malzemesi olarak kullanılabilir.

Suni agregalar endüstriyel işlemler sonucu elde edilen agregalardır. Suni agregalara cüruf, klinker ve diğer sanayi yan ürünleri örnek olarak verilebilir.

Cüruf, demir çelik sanayinde atık madde olarak yüksek fırınlardan elde edilir. Çok yaygın olmasa da, yol üstyapılarında kullanılmaktadır.

Klinker, fırın küllerinin eriyerek topraklar haline gelmesiyle oluşur. Klinker, çimento üretimi sırasında pişmiş kil ve kalkerlerin birleşiminden oluşan iri taneli malzemedir. Çimentonun bir önceki safhası olarak adlandırılabilir. Yapısında pişirilmiş biçimde %20 kil ve %80 oranında kalker bulunmaktadır. Çimento haline getirilmeden önce ağırlıkça %3-6 oranında alçıtaşı ile karıştırılır ve iyice öğütülür. Klinker çok değişebilen bir malzemedir. Bu nedenle asfalt yapımında kullanılması durumunda uygun şartnameler kullanılır. Bu tür suni agregalar şartnamelere uyması koşuluyla yol üstyapılarında kullanılabilirler [4, 45, 46].

Çimento, standart granülometrik yapıda olması, bünyesinde organik madde bulundurmaması ve bitümle reaksiyona girmemesi nedeniyle yol üstyapısında filler olarak kullanılabilir. Yeni genel çimentolar, TS EN 197-1'de CEM çimentosu olarak adlandırılmıştır. CEM çimentosunun hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu meydana gelmektedir. Çimentonun filler olarak kullanılmasında bağlayıcılık özelliğinin bir önemi yoktur [4, 46].

Yol üstyapı kaplamalarında kullanılan agreganın kökeni magmatik, tortul, metamorfik veya suni kökenli olsa da şartnamelere uygunluğu ve orada belirtilen fiziksel özelliklere uygun olması zorunludur. Karayolu üstyapılarında kullanılan agregalar, boyutlarına göre üç grupta incelenir. Bunlar iri agrega, ince agrega ve filler olarak adlandırılırlar [24].

İri agregalar, agrega karışımının 4,75 mm (No.4) elek üzerinde kalan boyuttaki malzmeden; İnce agregalar 4,75 mm elekten geçip, 0,075 mm (No.200) elek

üzerinde kalan malzemenin; Filler ise tamamı 0,425 mm elekten geçip, ağırlıkça en az %70'i 0,075 mm (No.200) elekten geçen malzemenin oluşmaktadır [4, 32].

Bitümlü karışımlarda iri agrega karışımın mekanik direncini sağlayan bir iskelet oluşturur. Aynı zamanda iri agrega karışımı daha ekonomik hale getirir, harcın yayılmasını sağlar ve karışımın stabilitesini artırır. İnce agrega ise iri agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak daha yoğun bir karışım elde edilmesini sağlar. İnce agrega ayrıca harcın büyük miktarını teşkil etmekte olup, uygulama ve hizmet aşamalarında malzemenin performansını en çok etkileyen bileşendir.

Mineral filler taş tozu, portland çimentosu, kalker tozu ve benzeri maddelerden oluşur. Filler toplam agreganın küçük bir yüzdesini (%6-11 arası) oluşturmasına karşın, karışımın özelliklerinin düzeltilmesinde önemli bir rol oynar. Filler hem ince agreganın gradasyonunu iyileştirir ve agrega parçacıkları arasında daha fazla temas noktası oluşturmak suretiyle daha yoğun bir karışım meydana getirmektedir hem de bitüm ile karışarak ince agregaların kayarak yerleşmesi ve bir harç oluşturmasını sağlamaktadır. Bitüm hizmet aşamasında yüksek viskoziteli visko-elastik bağlayıcı olarak hareket etmektedir [21, 45].

Bu çalışmada İstanbul il sınırları içinde yer alan Ömerli bölgesi taş ocaklarından alınan agrega kullanılmıştır. Agrega temin edilirken, üretilecek toplam numune sayısı dikkate alınarak, olumsuz durumlar ile hasarlı numune üretimi riskine karşı gerekli malzemenin bir buçuk kat fazlası depolanmıştır. Depolanan malzeme miktarının toplam ağırlığı yaklaşık 1,7 ton olarak ölçülmüştür.

Yol kaplamalarında kullanılacak agregaların şartnamelere uygun olması gerekir. Bunu belirlemek için de agregalara şartnameler doğrultusunda değişik testler uygulanmıştır. Bu deneylerin yapılmasıyla, malzemelerin aşınmaya, soyulmaya ve donmaya karşı dirençleri, su emme kabiliyetleri, elek analizleri ve tane şekillerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Bu özelliklerin belirlenmesi için deneyler aşağıda izlenen sırayla yapılmıştır.

Elek Analizi (ASTM C-136, AASHTO T-11): Elek analizi, Türk Standartlarında nitelikleri verilmiş olan elek serisi kullanılarak, agreganın tane büyüklüğü dağılımının tayin edilmesi için kullanılır. Eleme işi elle veya makine ile yapılır. Numuneler elek üzerinde en az 2 dakika elendikten sonra her bir elek üzerinde kalan ve en ince eleği geçen agrega miktarları tartılarak kaydedilir. Deney, kullanılan elek

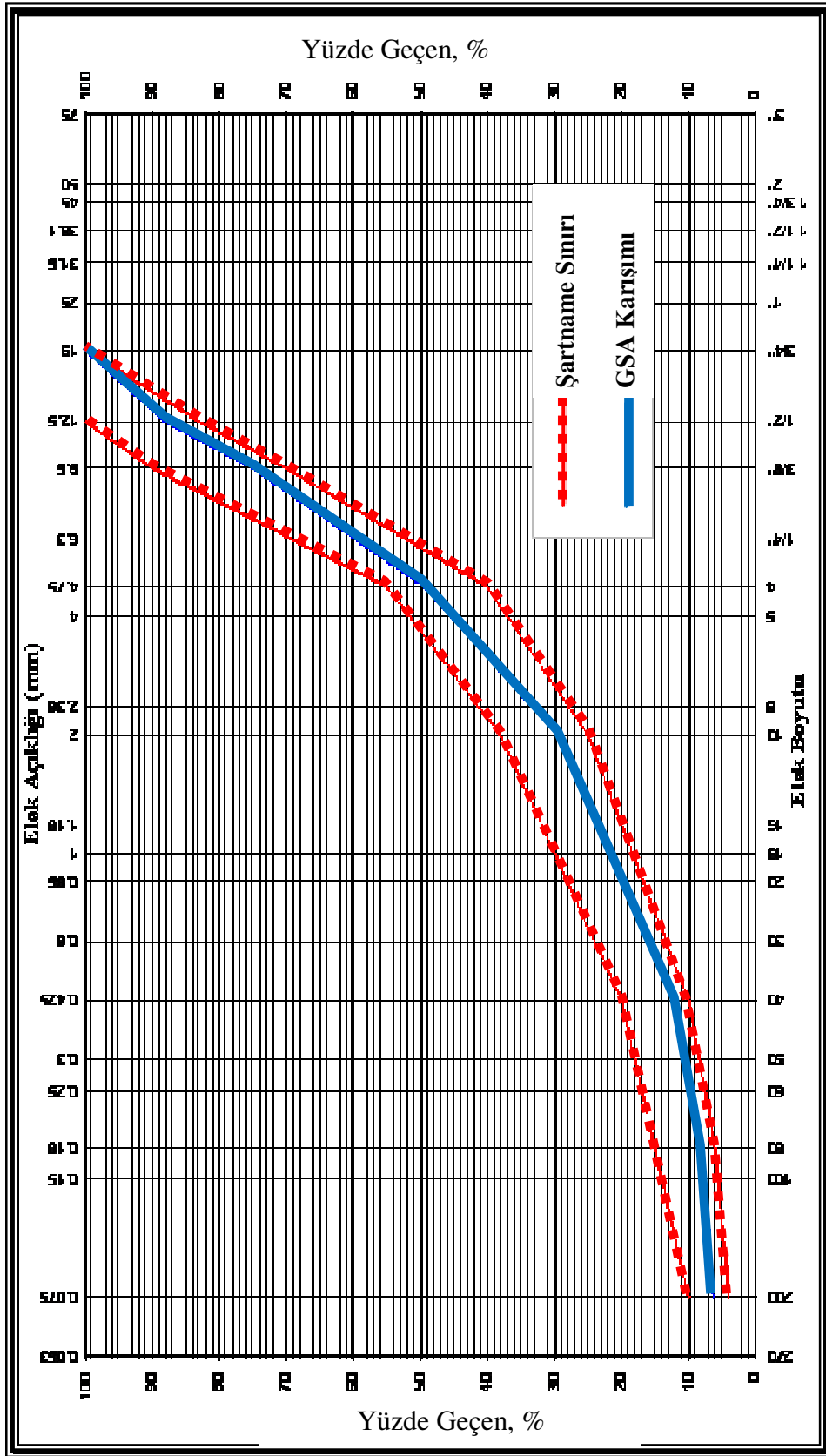
serisi içindeki her bir elekten geçen agrega miktarının, toplam numune miktarına ağırlıkça oranının yüzdesi olarak hesaplanıp, grafik olarak gösterilmesiyle tamamlanır [6, 24, 32].

Ömerli bölgesi taş ocaklarından alınan üç farklı büyüklükteki elek aralığına sahip agregalara, elek analizi uygulanarak, Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS) 2006 Aşınma Tabakası Tip1 gradasyonuna göre sınıflandırılmıştır. Çalışmada kullanılacak numunelerinin üretimi için elenen ve en büyük tane boyutu 19 mm olan agreganın elek analizi test sonuçları, Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1: Aşınma tabakası Tip1 gradasyonu elek analizi

Elek Boyutu		Şartname Sınırları (%)		Geçen (GSA Karışımı)	Elekler Arası	
No.	mm	Üst	Alt	(%)	(%)	(gr)
3/4"	19,0	100	100	100,0	0	0
1/2"	12,50	83	100	88,1	11,9	137
3/8"	9,50	70	90	74,9	13,2	152
No. 4	4,76	40	55	49,3	25,6	294
No. 10	2,00	25	38	29,4	19,9	229
No. 40	0,425	10	20	12,1	17,3	199
No. 80	0,180	6	15	8,2	3,9	45
No. 200	0,075	4	10	6,2	2,0	23
Filler					6,2	71
Toplam						1150

Çizelgede yer alan test sonuçları, elekten geçen agrega miktarının toplam numune miktarına oranı şeklinde hesaplanmış ve grafiğe dönüştürülerek, Şekil 5.1’de ayrıca gösterilmiştir.



Şekil 5.1: KTŞ Tip1 şartname sınırları ve GSA agrega gradasyonu

Aşınma Deneyi (ASTM C-131, AASHTO T-96) : Los Angeles deneyi olarak da bilinen aşınma deneyi, agregaların aşınmaya karşı dayanıklılığını göstermek için yapılır. Los Angeles test makinesi kullanılarak yapılan deneyde aşınma işlemi, çapları 4,68 cm olan çelik kürelerle yapılır. Los Angeles cihazı, iki ucu kapalı, iç çapı ve iç uzunluğu 71x51 cm olan içi boş bir silindirden meydana gelmektedir [21, 28, 32]. Deneyde bulunan sonuçlar Çizelge 5.2’de görülmektedir.

Donma – Çözülme Deneyi (TS EN 1367-1, ASTM C-88, AASHTO T-104) : Donmaya ve çözülmeye karşı direnç deneyi, agregaların donma çözülme etkisiyle donarak ufalanmaya karşı dirençlerini tespit etmek amacıyla yapılır. Deneyde doymuş sodyum sülfat veya magnezyum sülfat kullanılır [21, 28, 32].

Çalışmada kullanılan agregaların tespit edilen donma kaybı değeri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Soyulma Mukavemeti Deneyi : Nicholson Metodu kullanılarak yapılan soyulma mukavemeti deneyi, su ve trafiğin etkisiyle bitümlü bağlayıcının agrega üzerinden ayrılmasına karşı direncini tespit etmek için yapılır [21, 28, 32].

Deney sonunda elde edilen soyulma mukavemeti değeri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Özgül Ağırlık ve Absorbsiyon Deneyi (ASTM C 127-59) : Özgül ağırlık belirli hacimdeki numune ağırlığının aynı hacimdeki +4°C sıcaklıktaki suyun ağırlığına oranı şeklinde tanımlanır. Bu deney, bitümlü karışımlardaki boşluk yüzdesini hesaplamak ve agreganın hacim-ağırlık ilişkilerini saptamak amacıyla yapılır. Absorbsiyon (su emme) yüzdesi ince agregada numunenin doymuş yüzey kuru durumundaki ağırlığıyla kuru ağırlığı arasındaki farkın numune ağırlığına bölünmesiyle bulunur [3, 28, 32].

Deney iki defa tekrarlanarak, bulunan sonuçların ortalaması alınmıştır. Hesaplamalar aşağıdaki yöntem izlenerek yapılmıştır.

Görünür Özgül Ağırlık

$$\begin{aligned} 1.\text{Numune} &= A / (A+D-C) && (5.1) \\ &= 494,12/(494,12+690,25-1007,63) \\ &= 2,796 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2.\text{Numune} &= 494,00/(494,00+692,84-1010,12) \\ &= 2,795 \end{aligned}$$

Görünür Özgül Ağırlık (Ortalama) = 2,7955

$$\begin{aligned} \text{Absorbsiyon} &= \{(B-A)/A\} \times 100 && (5.2) \\ &= 0,56 \end{aligned}$$

Burada;

A: Kurutulmuş malzeme ağırlığı (gr)

B: Doymun yüzey kuru malzeme ağırlığı (gr)

C: Piknometre +su+ kuru numune ağırlığı (gr)

D: Piknometre suyla doldurulduktan sonra numuneyle birlikte ağırlığı (gr)

İri agrega özgül ağırlık deneyi için 4.0 mm'lik elek üzerinde kalan malzemeden 1165 gr alınarak iyice yıkandıktan sonra 25 °C sıcaklıktaki etüvde 12 saat bekletilerek kurutulmuştur. Malzemenin kurutulmuş ağırlığı, doymun yüzey kuru durumdaki ağırlığı ile sudaki ağırlığı tespit edilerek kaydedilmiştir. İri agregaya ait görünür özgül ağırlık ve su emme yüzdesi değerleri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Görünür Özgül Ağırlık} &= A/(A-C) \\ &= 1158,9 / (1158,9-738,8) \\ &= 2,759 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Absorbsiyon} &= \{(B-A)/A\} \times 100 \\ &= \{(1165-1158,9)/1158,9\} \times 100 \\ &= 0,56 \end{aligned}$$

Deney sonucunda bulunan ince agregası, iri agregası ve fillere ait özgül ağırlık ve absorpsiyon değerleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Yassılık İndeksi Deneyi (BS 812) : Yassılık İndeksi deneyi, agregası numunesi içindeki yassı tanelerin numune ağırlığına oranının belirlenmesi için yapılır. Yassılık, deneyde kullanılacak herhangi bir agregası tanesinin kalınlığının nominal boyutuna oranının %60'dan küçük olması şeklinde tanımlanır [21, 28, 32].

Deney sonunda malzeme aşağıdaki şekilde hesaplanarak yassılık indeksi belirlenmiştir. Hesaplanarak bulunan bu değer Çizelge 5.2'de görülmektedir.

$$\text{Yassılık İndeksi} = \{A / (A+B)\} \times 100 \quad (5.3)$$

$$= \{356,3 / (356,3+1216,3)\} \times 100 = \%22,7$$

A: Şablondan geçen agregası miktarı (gr)

B: Şablonda kalan agregası miktarı (gr)

Çizelge 5.2: Agregası özellikleri deney sonuçları

Deney Adı	Deney Metodu	Şartname Değerleri	Deney Sonuçları
Aşınma Kaybı	TSE-3694 ASTM C 131	Mak % 30	25,0
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık	TSE-3655 ASTM C 88	Mak % 10	2,14
Soyulma Mukavemeti	KTŞ EK- A	Min % 50	65-75
Yassılık İndeksi	BS-812	Mak % 30	22,7
Özgül Ağırlık (İri agregası)	ASTM C 127-59		2,76
Su Absorpsiyonu	TS 3526	%	0,56
Özgül Ağırlık (İnce agregası)	ASTM C 127-59		2,80
Su Absorpsiyonu	TS 3526 ASTM C 127	%	1,20
Özgül Ağırlık (Filler)	ASTM C 127-59		2,79

5.1.2 Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm, düşük moleküler ağırlıklı yağlı ortamlar (maltenler) içerisinde çözünmüş veya dağılmış yüksek moleküler ağırlıklı asfalten damlacıklardan (misellerden) oluşan bir süspansiyon sistemi (koloidal sistem) olarak tanımlanmaktadır. Bitümlü bağlayıcılar siyah renkli ve reçine karakterinde organik maddelerden oluşur. Bu organik maddelerin molekülleri zincir şeklinde dizilmiş karbonlu hidrojen monomerlerden oluşur. İrilerine asfaltenler, ufaklarına ise reçineler adı verilir. Bunlar asfaltik bir yağ içinde bulunurlar. Isıtıldıkları zaman katı halden sıvı hale geçiş yavaş ve yumuşama yoluyla olur. Katı halde de belirli bir plastikliğe sahiptirler. Üzerlerine sürüldükleri katı cismin yüzeyine yapışırlar. Suyu dayanıklı, su geçirmeyen asit ve tuzlarla reaksiyon yapmayan, atıl ve izolasyon özelliği yüksek maddelerdir [1, 3, 32, 49].

Bitüm, insanlığın en eski mühendislik malzemelerinden biridir. Geçmiş MÖ. 6000 yıllarına dayanan bitümü ilk kullananlar Akadlar ve Mısırlılar olmuştur. Bu dönemlerde bitüm, daha çok yalıtım ve harç malzemesi olarak kullanılmıştır.

Bitüm kaynaklarına göre doğal asfaltlar ve yapay asfaltlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Doğal asfaltlar genellikle mineral maddelerle karışmış halde bulunurlar. Doğal asfaltların belli başlı olanları, içeriğinde %35 kadar mineral malzeme barındıran göl asfaltları ile %2–3 civarında asfalt barındıran kaya asfaltlarıdır. Doğadaki kaya asfaltlarında bitüm, kumtaşı, kalker, kil ve benzeri minerallerle birlikte karışım halinde bulunur [3, 32, 65, 67].

Yapay asfaltlar ham petrolün damıtılmasından elde edilirler. Petrolün damıtılması, petrol türevlerinin her birinin sahip olduğu değişik kaynama noktalarına kadar ısıtılıp buharlaştırılması ve daha sonra ayrı ayrı yoğunlaştırılarak benzin, gazyağı ve motorin gibi farklı ürünlerinin elde edilmesidir. Bu işlemde ortaya çıkan kalıntı ayrıştırılarak, asfalt elde edilir. Yol üstyapılarında kullanılan asfalt çimentoları, özellik ve kıvam bakımından doğrudan doğruya bu amaçla kullanılmak üzere hazırlanmış petrol kökenli asfaltlardır. Asfalt çimentosu, AC sembolü ile gösterilir.

Asfalt çimentosu, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) eski ve yeni şartnamelerde farklı şekillerde sınıflandırılmış ve buna bağlı olarak farklı sembollerle gösterilmiştir. Önceki isimlendirmede, AC ile gösterilen asfalt çimentoları, kıvamlılığı gösteren ve 10–300 arasında değişen penetrasyon derecelerine göre

sınıflandırılmışlardı. Avrupa Birliği uyum çalışmaları çerçevesi kapsamında değiştirilen ve Türk Standartlarına uyarlanan yeni bitüm sınıflandırmasına göre asfalt çimentosu “AC” yerine bitüm sembolü “B” kullanılarak isimlendirilmiş ve bu sembol 40–220 arasında değişen rakamlarla birlikte gösterilmiştir [32, 49].

Yol kaplamalarında kullanılan Asfalt Çimentoları ve Bitüm penetrasyon dereceleri, yeni ve eski şartnamelere göre Çizelge 5.3’te gösterilmiştir.

Petrolün damıtılması sırasında belirli koşulların yerine getirilmesiyle elde edilen bu farklı sınıflar, malzemenin kullanılacağı bölgedeki iklim şartlarına bağlı olarak seçilmektedir [23, 65].

Çizelge 5.3: Teknik şartnamelere göre bitüm sınıflandırması

Eski Şartname Sınıflandırması	Yeni Şartname Sınıflandırması
10-20 Penetrasyonlu AC (AC 10 – 20)	B 40/60 SICAK İKLİMLER
20-30 Penetrasyonlu AC (AC 20 – 30)	B 50/70 ILIK BÖLGELER
30-40 Penetrasyonlu AC (AC 30 – 40)	B 70/100 ILIK BÖLGELER
40-50 Penetrasyonlu AC (AC 40 – 50)	B 100/150 SOĞUK İKLİMLER
60-70 Penetrasyonlu AC (AC 60 – 70)	B 160/220 EMÜLSİYON ÜRETİMİ
75-100 Penetrasyonlu AC (AC 75 – 100)	
120-150 Penetrasyonlu AC (AC 100 – 150)	
150-200 Penetrasyonlu AC (AC 150 – 200)	
200-300 Penetrasyonlu AC (AC 200 – 300)	

Bitümlü bağlayıcılar, Oksitlendirilmiş asfaltlar, Sıvı petrol asfaltları (Katbek) ve Asfalt emülsiyonları olarak gruplandırılabilir.

Blovn asfalt olarak da bilinen oksitlendirilmiş asfaltlar, asfaltın ısıtılarak içerisine hava üflenmesiyle elde edilirler. Bu işlem için rafinerilerde, malzeme henüz sıvı iken yapılır. Böylece yumuşama noktası yüksek olan oksitlendirilmiş asfalt elde edilir.

Oksitlendirilmiş asfaltlar, gereğinden fazla rijit olduğundan, yol inşaatlarında kullanılmaz. Bu asfaltlar daha çok izolasyon amaçlı, elektrik, otomobil ve boya endüstrisi gibi özel amaçlı alanlarda kullanılır.

Sıvı petrol asfaltları, asfalt çimentosuyla kaynama noktası düşük bir çözücü karıştırılarak elde edilir. Sıvı petrol asfaltları, çabuk kür olan RC sınıfı, orta hızda kür olan MC sınıfı ve yavaş kür olan SC sınıfı olmak üzere üç gruba ayrılır. Gruplandırmada her sınıf kendi içinde, kinematik viskozite değerlerine göre ayrıca tiplere ayrılır. RC, MC ve SC harflerinden sonra gelen rakamlar o tipin kinematik viskozitesinin alt sınırını gösterir. Bu sayılar asfalt kıvamlılığının artmasıyla büyür. Sıvı petrol asfaltları, kür hızına göre sınıflandırılarak, Çizelge 5.4'te gösterilmiştir [3, 32, 49].

Çizelge 5.4: Sıvı petrol asfaltları

Yavaş Kür Olan	Orta Hızda Kür Olan	Çabuk Kür Olan
	MC - 30	
SC - 70	MC - 70	RC - 70
SC - 250	MC - 250	RC - 250
SC - 800	MC - 800	RC - 800
SC - 3000	MC - 3000	RC - 3000

Sıvı petrol asfaltlarının kıvamlılık derecesi, asfalt çimentosuna katılan çözücünün miktarının azalmasına bağlı olarak artar.

Asfalt emülsiyonları, asfalt çimentosunun çok küçük partiküller halinde parçalanıp suda dağılması sonucu akıcı hale gelmesiyle elde edilir. Emülsiyon, birbiri içinde çözünemeyen iki sıvıdan birinin diğeri içerisinde küre tanecikleri halinde dağılmasıdır. Asfalt küreciklerinin birbirine yapışarak sudan ayrılmasını önlemek için emülgatör denilen katkı maddeleri kullanılır. Asfalt emülsiyonları kullanılan emülgatör cinsine göre, katyonik ve anyonik emülsiyonlar olmak üzere iki gruba ayrılır [43, 48, 66].

Bitümden elde edilen gerçek emülsiyonlar 20. yüzyılın ilk yıllarına rastlar. Türkiye’de yol tekniğinde emülsiyonların kullanımı ise 1967 yıllarında başlamıştır.

Sıkıştırma işlemi ve trafik yükleri altında suyun çıkıp gitmesine olanak sağlayacak yüksek boşluk oranlarına ihtiyaç duyulması ve mukavemet artışının oldukça yavaş olması nedeniyle emülsiyon karışımları ancak trafik miktarı az olan yol kaplamalarında tercih edilmektedir [32, 49, 66, 67].

Asfalt emülsiyonu agregayla karıştırıldığı ya da yol yüzeyine püskürtüldüğü zaman, emülsiyon kesilir. Asfalt kürecikleri sıvı ortamdan ayrılarak agreganın üzerine yapışır. Yol kaplamalarında kullanılan asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre üç gruba ayrılır.

- Çabuk kesilen RS asfalt emülsiyonları
- Orta hızda kesilen MS asfalt emülsiyonları
- Yavaş kesilen SS asfalt emülsiyonları

Asfalt emülsiyonları viskozite değerlerine göre gruplandırılarak, Çizelge 5.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5: Asfalt emülsiyonları

Emülgatör Tipi	Yavaş Kesilen	Orta Hızda Kesilen	Çabuk Kesilen
Anyonik Asfalt Emülsiyonları	SS - 1	MS - 1	RS - 1
	SS - 1h	MS - 2	RS - 2
		MS - 2h	
Kasyonik Asfalt Emülsiyonları	CSS - 1	CMS - 2	CRS - 1
	CSS - 1h	CMS - 2h	CRS - 2

Bitüm çok karmaşık bir kimyasal yapıya sahiptir. Asfalt bileşenleri, Karbon %82–88, Hidrojen %8–11, Nitrojen %0–1, Sülfür %1–6, Oksijen %0–1,5 ve çok az miktarda oksit, tuz veya metal içeren organik bileşiklerden meydana gelir [66, 67].

Granüler Sülfür katkılı karışım deneylerinde kullanılmak üzere TÜPRAŞ İzmit Rafinerisinden 50–70 Penetrasyon dereceli bitüm temin edildi. Tüm deneysel

çalışmalarda aynı malzemenin kullanılabilmesi için, üretilecek numunelerde gereken miktar önceden hesaplandı. Yapılacak yanlışlıklar ya da sonradan ilave edilmesi gereken deneysel çalışmalar da göz önüne alınarak, hesaplanan miktardan bir buçuk kat daha fazla bitüm alınıp uygun şartlarda kaplara yerleştirildi. Çalışmada kullanılan bitümden numuneler alınarak özelliklerinin belirlenmesi için değişik deneyler uygulandı. Bağlayıcının teknik şartnamelerde istenilen kurallara uygun olup olmadığının belirlenmesi amacıyla değişik deneyler uygulandı.

Bitümün mekanik özellikleri diğer inşaat malzemelerine göre çok daha karmaşıktır. Yapılan deneyler bitümün düşük sıcaklıktaki mekanik özelliklerinin katı maddelerin elastisite modülüyle benzerlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bitümlü bağlayıcıların özelliklerini belirlemek amacıyla, penetrasyon, düktilite, ısıtma kaybı, Yumuşama noktası, parlama noktası ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır.

Penetrasyon deneyi (TS EN 1426) : Penetrasyon deneyi, bitümün kıvamlılığının ve bağlayıcı sınıfının tayini için yapılır. Deney 100 gr ağırlığındaki standart bir iğnenin 5 saniye süre ile 25°C sıcaklıktaki asfalt numunesine batma miktarının ölçülmesidir [28].

Her 0,1 mm batma miktarı 1 penetrasyon olmak üzere toplam batma miktarı ölçülerek bitümün penetrasyon değeri olarak kaydedilmiştir. Üç farklı noktada batırılan iğnenin batma miktarları kaydedilerek ortalamaları alınmıştır. Ölçülen penetrasyon değeri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Düktilite deneyi (TS EN 13589) : Düktilite deneyi, 25°C sıcaklıkta, dakikada 5 cm hızda uzayacak şekilde bitüm numunesinin kopmadan uzayabileceği miktarın cm cinsinden belirlenmesi için yapılır. Düktilite, standart bir kalıp içinde şekillendirilen asfalt numunesinin düktilite cihazıyla belirli bir ısıda ve belirli bir hızla çekilerek, sünmeye tabi tutulduğunda, kopmanın olduğu andaki uzunluk miktarının cm cinsinden ifadesidir. [6, 28]

TSE teknik kurulunun 03 Mart 2005 tarihli toplantısında alınan karar gereği, TS EN 15589 düktilite deneyi standardı olarak kabul edilmiştir. Bu standardın kabulü ile, daha önce yürürlükte olan TS119 iptal edilmiştir. Düktilite deneyi, 2006 yılı Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTSŞ), “yol yapımında kullanılan kaplama sınıfı bitümlerin özellikleri, (TS 1081 EN 12591)” zorunlu test listesinden çıkarılmıştır.

Düktilite deneyi yapılarak, deney sonunda belirlenen düktilite değerleri Çizelge 5.6'da gösterilmektedir.

İnce Film Halinde Isıtma deneyi (TS EN 12607-2) : Bu deney, Asfalt çimentosu bünyesinde bulunan uçucu maddelerin oranını ve bitümün yaşlanmaya karşı direncini tespit etmek için yapılır. Bitüm numunesi 5 saat süreyle 163°C sıcaklıktaki etüvde bekletilir ve numunenin bu sürede ağırlıkça kaybı saptanır [6, 28]. Deney sonuçları Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Özgül Ağırlık deneyi (TS-1087) : Karışım hesaplarında kullanılan önemli parametrelerden biri de bitümün özgül ağırlığıdır. Bitümün özgül ağırlığı, 25°C sıcaklıkta hacmi bilinen bir bitüm numunesinin aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına bölünmesiyle elde edilir. Piknometre kullanılarak yapılan özgül ağırlık deneyi, su banyosu, termometre ve hassas terazi yardımıyla yapılır [28].

Özgül ağırlık deneyi aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır. Bitüme ait özgül ağırlık değeri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Özgül Ağırlık} &= (C-A) / \{(B-C) - (D-C)\} & (5.4) \\ &= 1,022 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

A: Piknometre ve kapak ağırlığı

B: Suyla dolu piknometre ve kapak ağırlığı

C: Yarısına kadar bitümle dolu piknometre ve kapak ağırlığı

D: Bitüm, su, piknometre ve kapak ağırlığı

Yumuşama noktası deneyi (TS EN 1427) : Yumuşama Noktası deneyi, bitümlü bağlayıcıların farklı sıcaklıklarda gösterdikleri farklı davranışları tespit etmek için yapılır. Deney cam kaptan yapılmış bir deney düzeneği, özel bilyeler ve halkalar yardımıyla yapılır [6, 28].

İki numunenin ortalaması alınarak yumuşama noktası değeri bulunmuş ve deney sonucu Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Parlama Noktası Deneyi (TS EN ISO 2592) : Parlama noktası deneyi, uygulamalar sırasında asfaltın yanmadan hangi ısı derecesine kadar güvenle ısıtılacağı tespit edilmesi için yapılır. Parlama noktası, ısıtılan bitümden çıkan buharın alev

temas ettiği anda geçici olarak parladığı fakat yanmaya başlamadığı en düşük ısıdır. Parlama Noktası deneyi, Cleveland cihazı ve termometre yardımıyla yapılır [28].

Numune yüzeyinde parlama görüldüğü andaki sıcaklık termometreden okunarak kaydedilmiş ve iki deney yapılarak, ortalaması alınmıştır. Hesaplanarak bulunan Parlama Noktası değeri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6: Bitümlü bağlayıcı (B 50/70) deney sonuçları

Deney Adı	Birim	Deney Metodu	Şartname Sınırları	Bulunan Değerler
Penetrasyon (25°C)	Pen	TS EN 1426	50 – 70	64,1
Düktilite (25°C)	cm	TS EN 13589	Min 100	100 cm' de kopmadı
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (163°C)	%	TS EN 12607-2	Mak 0,5	0,06
Yumuşama Noktası	°C	TS EN 1427	46 – 54	51,5
Parlama Noktası	°C	TS EN ISO 2592	Min 230	305,0
Özgül Ağırlık (25°C)	gr/cm ³	TS-1087	-	1,022

5.1.3 Granüler Sülfür (GSF)

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, Shell Kanada grubu tarafından özel olarak geliştirilmiş ve (Sulphur Extended Asphalt Modifier-SEAM) olarak adlandırılan Granüler Sülfür (GSF) maddesi, Kanada'dan getirilmiştir. Granül halde bulunan GSF, sülfürün belli oranlarda bitüm ve karbon karası ile karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Depolanarak numune üretimi için hazır hale getirilen GSF malzemesinin miktarı, hazırlanacak Marshall numune sayısı ve tekerlek izi özel kalıp numuneleri dikkate alınarak hesaplanmış ve hasarlı numune üretimi olasılığına karşı bu miktarın gerektirdiğinden daha fazla malzeme alınmıştır [28, 71].

Granüler sülfürün özgül ağırlığı 1.98 gr/cm³ olarak ölçülmüştür. Bu yoğunluk bitüm özgül ağırlığının yaklaşık iki katıdır. Dolayısıyla aynı oranda sülfür ve bitüm karıştırıldığında, sülfür hacmi bitüm hacminin yarısı kadar olmaktadır. Sülfürlü asfalt karışımları hazırlanırken asfalta katılan sülfür, bağlayıcının özgül ağırlığını artırmaktadır. Sülfürlü asfalt bağlayıcıların özgül ağırlığı, aşağıdaki formül

yardımıyla hesaplanabilir (National Asphalt Pavement Association & United States Bureau of Mines).

$$SG_{SEA} = \frac{100}{\frac{P_S}{SG_S} + \frac{P_A}{SG_A}} \quad (5.5)$$

SG_{SEA} : Sülfürlü asfalt bağlayıcının özgül ağırlığı

P_S : Ağırlıkça sülfür oranı (%)

P_A : Ağırlıkça bitüm oranı (%)

SG_S : Sülfürün özgül ağırlığı (gr/cm^3)

SG_A : Bitümün özgül ağırlığı (gr/cm^3)

Bu çalışmada karışımda kullanılan granüler sülfür, bağlayıcının ağırlıkça % 0, 10, 20, 30, 40 ve 50'si oranlarında seçilmiştir. Seçilen bu miktarlara göre, bağlayıcıların özgül ağırlıkları sırası ile 1.022, 1.061, 1.115, 1.179, 1.254 ve 1.338 gr/cm^3 olarak hesaplanmıştır.

Sülfür genellikle 138°C sıcaklığa kadar ısıtılıp, bitümden sonra sıcak karışıma katılmaktadır. Sülfürün erime noktası 116°C derece civarındadır. Eritilmiş sülfürün veya ısıtılan karışımın sıcaklığı 149°C dereceyi aşması halinde hidrojen sülfür (H_2S) ve sülfür dioksitin (SO_2) istenmeyen emisyonları ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmalar esnasında sülfürün ve karışımın sıcaklığı 145°C dererce civarında tutulmuştur. Marshall numunelerinin sıkıştırılması işlemi de 135°C ila 140°C arasında gerçekleştirilmiştir [28, 60, 71].

Bu karışımda kullanılan granüler sülfüre ilişkin bazı teknik özellikler Çizelge 5.7'de verilmektedir.

Çizelge 5.7: Granüler Sülfür (GSF) özellikleri

Fiziksel Yapısı	Özellikler ve Değerler
Donma Noktası	112 -119 °C
Kaynama Noktası	444 °C
Parlama Noktası	168 °C
Tutuşma Sıcaklığı	190 °C
Yoğunluk	1,98 g/cm ³
Suda Çözünürlük	Suda çözünmez
Sülfür dioksit	2 ppm (1 tonda 2 gr)
Hidrojen sülfür	10 ppm

5.2 Bağlayıcı (GSF-Bitüm) Karışımına Uygulanan Deneyler

Granüler sülfür ile bitümün belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen bağlayıcı karışımının özelliklerini tespit etmek için bağlayıcı karışımı deneyleri yapılmıştır.

Bağlayıcı karışımına uygulanacak deneyler için karışım oranları tespit çalışmalarında, granüler sülfürlü karışımların stabilite ve tekerlek izi değerleri dikkate alınmış ve GSF-bitüm oranları buna göre seçilmiştir. Stabilitesi ve tekerlek izi değerleri geleneksel karışımlara göre düşük ya da kararsız olan GSF karışım oranları deneysel çalışmaların dışında bırakılarak elenmiştir. Bu elemeler sonunda Marshall stabilitesi ve tekerlek izi oluşumuna karşı direnci geleneksel karışımlarla benzer veya daha yüksek olan %40 ile %50 GSF içerikli bağlayıcılar tercih edilmiştir.

Bağlayıcının yaşlandırılması ile ilgili deneysel çalışmalar için ince film halinde ısıtma (RTFO) deneyi yapılmaktadır. Bu deney, Asfalt çimentosu bünyesinde bulunan uçucu maddelerin oranını ve bitümün yaşlanmaya karşı direncini tespit etmek için yapılır. Bitüm numunesi 5 saat süreyle 163°C sıcaklıktaki etüvde bekletilir ve numunenin bu sürede ağırlıkça kaybı saptanır. Sülfür bünyesinde bulunan ısıya duyarlı gazların açığa çıkmaması ve sülfürlü asfalt karışım sıcaklığının 145 °C civarında olması nedeniyle, RTFO deneyi 145 °C sıcaklıkta yapılmıştır.

Isıtma kaybı sonrası penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerini belirlemek üzere, etüvde istenen sıcaklığa gelen bitüme, sülfür ilave edilmiş ve dengeli dağılımın gerçekleşmesi için yüksek devirli (10.000 devir/dak.) bir mikserde karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan bağlayıcı (granüler sülfür ile B50/70 bitüm) karışımı soğumaya bırakılarak dinlendirilmiştir.

RTFO deneyleri için tekrar ısıtılan GSF-B50/70 karışımında homojen dağılımın bozulduğu ve sert bir topaklanmanın oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Sıcaklığın artırılmasıyla erimeyen sert topakların spatula yardımıyla dağılmadığı ve rijit bir tabaka halinde dibe çöktüğü görülmüştür. Granüler sülfür parçacıkları topaklanarak dibe çökmüş olduğundan, yapılan deneyler sağlıklı sonuçlar vermiştir. Karışımda oluşan topaklanma nedeniyle yaşlandırma deneyleri yapılamamıştır.

Farklı oranlarda kullanılan bağlayıcı karışımına uygulanan deneylere ait penetrasyon, ince film halinde ısıtma kaybı ve yumuşama değerleri Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8: Granüler Sülfür (GSF) – Bitüm karışımı deney sonuçları

Deney Adı	Birim	Deney Metodu	B 50/70	GSF 40	GSF 50
Penetrasyon (25°C)	0,1 mm	TS EN 1426	64,1	87,1	120,6
İnce Film Halinde Isıtma Deneyi (145°C) (163 °C 'de kütle değişimi)	%	TS EN 12607-2	0,06	0,25	0,30
Yumuşama Noktası	°C	TS EN 1427	51,5	48,1	50

Bağlayıcı içine ilave edilen granüler sülfür oranı arttıkça penetrasyon değeri yükselmekte ve ısıtma kaybı deneyinde de kütle değişimi değerlerinde küçük de olsa, bir artış gözlenmiştir. Bu artışın temel nedenlerinden biri bünyesinde bulunan Hidrojen sülfür ve Sülfür dioksit gazlarının ısı artışına bağlı olarak buharlaşmasıdır. Yumuşama noktası değerinde ise bir azalma gözlenmiştir. Meydana gelen azalmanın kararlı ve dikkate değer bir değişiklik olmadığı söylenebilir.

Penetrasyon Endeksi (PI) : Bitümlü bağlayıcılar, ısıtıldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında sertleşen özellikler gösterir. Bitümlerin bu özelliğine termoplastik denir. Penetrasyon Endeksi (PI), viskozitenin sıcaklıkla değişimini tanımlamak amacıyla Pfeiffer ve Van Doormaal tarafından geliştirilmiştir. Bu araştırmacılar, yol bitümleri için sıfır civarında bir değer kabul eden, sıcaklık hassasiyetini veren bir ifade geliştirmişlerdir. Geliştirilen ifade kapsamında penetrasyon endeksini (PI) aşağıdaki gibi tanımlamışlardır [43, 66].

$$PI = \frac{20 (1 - 25A)}{1 + 50 A} \quad (5.6)$$

PI: Penetrasyon Endeksi

Burada A değeri, iki sıcaklık noktasında yapılan penetrasyon ölçümlerinden formüller yardımıyla elde edilir. PI değerleri, sıcaklık hassasiyeti yüksek olan bitümler için –3 civarında bir değer ile sıcaklık hassasiyeti düşük olan, hava üflenmiş bitümler için +7 civarında bir değer aralığında değişir [66].

Penetrasyon Endeksi, aşağıdaki denklem yardımıyla bulunabileceğı gibi, özel olarak hazırlanmış nomograflar yardımıyla da bulunabilmektedir.

$$PI = \frac{1952 - 500 \log pen - 20 YN}{50 \log pen - YN 120} \quad (5.7)$$

YN: Yumuşama Noktası

Penetrasyon endeksinin (PI) değeri, ya 25°C deki penetrasyon ve yumuşama noktası sıcaklığından, ya da iki farklı sıcaklıktaki bitüm penetrasyonundan yaklaşık olarak elde edilebilmektedir. Yumuşama noktası sıcaklığında penetrasyonun geręek değerindeki yayılmadan ötürü, bir penetrasyon ve bir yumuşama noktasından hesaplanan penetrasyon endeksi, iki penetrasyondan hesaplanan net değerden farklılık gösterebilir. Bununla birlikte, 25°C deki penetrasyon ve yumuşama noktası genellikle bitüm tanımlama kontrolü için saptandığından, bu Őekillerin kullanılması daha yaygındır [43, 66]. Nomograf yardımıyla bulunan PI değerleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

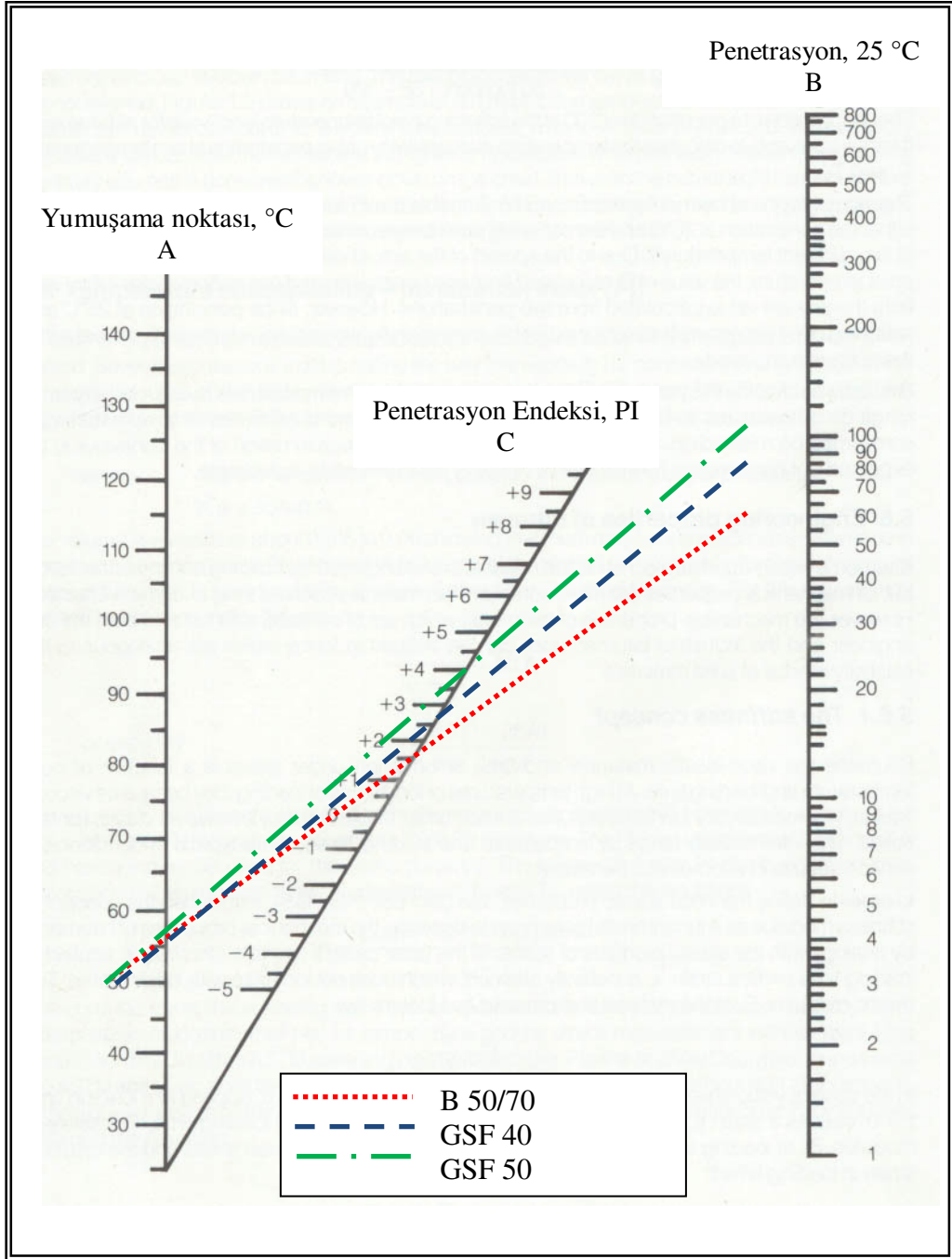
Yapılan ęalıřmada geleneksel karışımlar ile %40 ve %50 granüler sülfür bağlayıcı karışımlara ait penetrasyon endeksi saptanmıştır. Şekil 5.2’de yer alan nomograf üzerinde bulunan PI değerleri ęizelge 5.9’da gösterilmiştir.

ęizelge 5.9: Penetrasyon endeksi (PI)

Bağlayıcı Karışım Oranları	Penetrasyon Endeksi (PI)
Geleneksel Karışım (0/100)	- 0,40
GSA 40 (40/50)	- 0,10
GSA 50 (50/50)	+ 0,12

Penetrasyon endeksi (PI) beklenen davranış için iyi bir yaklaşım elde etmek amacıyla kullanılabilir. Ancak, rijitlik ve viskozite ölçümü ile pekiştirilmesi gerekmektedir.

Nomograf yardımıyla penetrasyon endeksini belirlemek için, yumuşama noktası (A doğrusu) ile penetrasyon (B doğrusu) değerleri arasında bir doğru çizilir. C doğrusu üzerindeki kesişme noktası bitümün penetrasyon endeksini (PI) vermektedir [43, 66].



Şekil 5.2: Penetrasyon endeksi (PI) nomografı

Penetrasyon endeksi (PI) değeri büyüdükçe malzemede sıcaklığa karşı duyarlık özelliği azalır [66]. Çalışmada elde edilen PI değerleri incelendiğinde, sülfürlü asfaltlarda geleneksel karışımlara göre sıcaklık hassasiyetinin kullanılan sülfür oranına bağlı olarak azaldığı görülmüştür.

5.3 Karışım Tasarımı ve Bağlayıcı (GSF-Bitüm) Yüzdesinin Belirlenmesi

Bitümlü sıcak karışımlarda farklı tasarım metotları kullanılarak optimum bitüm yüzdesi tespit edilir. İstenen niteliklere ve şartnamelere uygun bitümlü sıcak karışım üretimi için gereken bağlayıcı miktarının yanı sıra, agrega gradasyonları da bu metotlarla belirlenir [3, 24, 28,].

Dünyada optimum bitüm miktarını belirlemek amacıyla kullanılmakta olan değişik tasarım metotları bulunmaktadır. Bu tasarım metotları arasında en çok bilinen ve kullanım alanı bulanları ise Hubberd Field, Hveem ve Marshall metotlarıdır [51, 66].

Hubberd Field Metodu: Hubberd Field tasarım metodu, bir makaslama deneyi olarak adlandırılabilir. Bu deney için, çapı 15 cm ve yüksekliği 7,5 cm olan silindirik numuneler hazırlanır. Hazırlanan numuneler, çapı 14,33 cm olan Hubberd-Field cihazına yerleştirilerek, piston hızı saniyede 1mm olacak şekilde bir yüklemeye tabi tutulur. Uygulanan yükün etkisiyle numune itilerek cihazın diğer ucundan çıkarılır. Bu yükleme işlemleri, 60°C sıcaklıkta yapılmaktadır. Numunenin çıkmasını sağlayan maksimum yük belirlenerek, Hubberd-Field stabilite değeri olarak alınır [66].

Hveem Metodu: Hveem metodunda kullanılan numuneler 100 mm çapında ve 63,5 mm yüksekliğindedir. Bitümlü sıcak karışım numuneleri, özel bir karıştırıcıda hazırlanarak, elastik bir zarf içerisinde Hveem stabilometresindeki sıvı içine yerleştirilir. Numuneye alttan ve üstten, yükleme hızı dakikada 1 mm olacak şekilde basınç uygulanır [47, 51, 66].

Deney sırasında sıvıda oluşan yanal basınçlar manometreden okunur. Okunan değerlerden yararlanılarak bağıl stabilite bulunur. Deneye başlamadan önce numune sıcaklığının 60°C olması gerekir [51, 66].

SUPERPAVE Metodu: Asfalt çimentoları ve betonların daha iyi tanımlanabilmesi amacıyla, Amerika Birleşik Devletlerin (ABD)'de 1987-1993 yılları arasında Strategic Highway Research Program (SHRP) çalışmaları yürütülmüştür. Yoğun ve uzun süren çalışmalar sonucunda, SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt

Pavements) tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır. Performansın ön planda tutulduğu bu yöntemde, “Asfalt Çimentosu” yerine “Performanslı Bağlayıcı” tanımı kullanılmıştır. Daha önce bitüme standart bir sıcaklıkta uygulanan viskozite, penetrasyon ve duktilite deneylerinin yerine, arazinin gerçek koşullarını yansıtabilen yöntemler kullanılmıştır. Superpave yönteminde, kullanılacak bitüm yaşlanmamış haliyle (orijinal bitüm), hafif yaşlandırılarak ve ileri düzeyde yaşlandırılarak test edilir. Bu yöntemde penetrasyon kavramı yerine, performans sınıfı “PG” (Performance Grade) kavramı getirilmiştir. Aşağıda örnek olarak verilmiş olan Performans Sınıfı gösteriminde, yedi günlük ortalama maksimum kaplama sıcaklığı ile minimum sıcaklık yer almaktadır [43, 66].

“PG 64 – 28”

PG: Performance Grade (Performans sınıfı)

64: Ortalama 7 günlük maksimum kaplama sıcaklığı (°C)

– 28: Minimum kaplama sıcaklığı (°C)

Orijinal bitüm üzerinde Parlama Noktası, dönmeli cihazla Viskozite ve Dinamik Kayma deneyleri yapılmaktadır. Daha sonra bitüm Rolling RTFOT (Thin Film Oven Test-İnce Film Halinde Isıtma Deneyi) ile yaşlandırılmaktadır. Bu deneyden çıkan bitüm numunesine tekrar dinamik kayma testi uygulanmaktadır. Son olarak bitüm numunesi, PAV (Pressure Aging Vessel-Basınçlı Yaşlandırma Kabı) yardımıyla, basınç altında ve belirlenmiş sabit sıcaklıkta içine hava üflenerek yaşlandırılır ve Dinamik Kayma, Sünme Sertliği, Direkt Çekme özelliklerinin belirlenmesi için test edilir [47, 66].

Bu yöntemle, gelişmiş hassas deney cihazları kullanılarak ve iklimsel değişiklikleri benzeten sıcaklıklar ile taşıt hızlarını simüle eden yükleme hızları dikkate alınarak bitümün yol üzerinde göstereceği performansın ölçülmesi amaçlanmaktadır.

Marshall Tasarım Metodu (TS 3720 - ASTM D1559) : Ülkemizde bitümlü sıcak karışımların tasarımı için Marshall tasarım metodu kullanılmaktadır. Bu metot kısaca, bir serbest basınç deneyi olarak tanımlanabilir. Marshall yönteminde, önce bitümün ön optimum tahmini aşağıdaki ampirik yöntemlerden biri yardımıyla yapılır [27, 41, 51].

Karışımında kullanılacak bağlayıcı için ön optimum bitüm yüzdesi belirlendikten sonra, bu yüzdenin üstünde ve altında en az iki bitüm içeriği olacak şekilde bitüm miktarında % 0,5'lik artışlar yapılarak bitüm yüzdeleri hesaplanmaktadır. Her bir farklı karışım için 3'er adet olmak üzere, 15-18 adet numune hazırlanır. Her bir numune karışımında kullanılacak agrega, seri boyutları önceden belirlenmiş uygun elek üstü miktarları tartılarak kaplar içerisinde etüve yerleştirilir [41, 47].

Karışımında kullanılacak bitümlü bağlayıcılar 145-160°C sıcaklığa kadar ısıtılır ve sıcaklığı 150-170°C olan agrega üzerine dökülüp karıştırılarak sıcak karışım hazırlanır. Sıkıştırma işleminde kullanılacak deney araç-gereçleri 95-160°C sıcaklıkta bekletilerek ısıtılır. Karışım, spatula yardımıyla kalıplara doldurularak sıkıştırma işlemleriyle yerleşmesi sağlanır. Karışım, üzerine 4,536 kg ağırlığındaki tokmağın 45,72 cm yükseklikten düşürülmesiyle, tasarım metodunda belirlenen kriterler doğrultusunda sıkıştırılır. Daha sonra kalıp ters çevrilerek numunenin diğer yüzü de aynı şekil ve sayıda tokmaklanır. 101,6 mm çapındaki kalıp içerisinde sıkıştırılan numunenin sıkışmış kalınlığı ideal olarak 63,5 mm olmalıdır. Yüksekliği bu değerden farklı çıkan numuneler için, Marshall düzeltme faktörleri kullanılır. Marshall düzeltme faktörleri Ekler bölümünde verilmiştir [24, 49, 51].

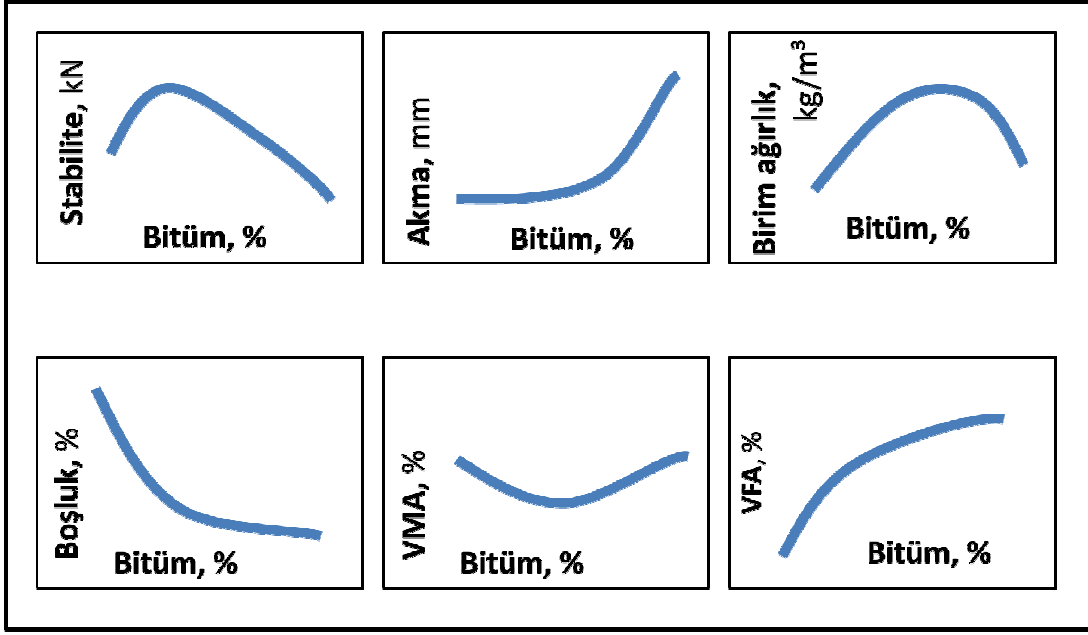
Marshall tasarım kriterleri Çizelge 5.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.10: Marshall tasarımı kriterleri

Tasarım Kriterleri	Hafif ve Orta Trafik				Ağır Trafik ve Otoyollar			
	Binder		Aşınma		Binder		Aşınma	
	Min.	Mak	Min.	Mak	Min.	Mak	Min.	Mak
Darbe Sayısı	50	-	50	-	75	-	75	-
Stabilite (kg)	600	-	600	-	750	-	900	-
Boşluk (%)	4	6	3	5	4	6	3	5
Asfaltla Dolu Boşluk (%)	65	75	75	85	65	75	75	85
Akma (mm)	2,5	4,6	2,5	4,6	2	4	2	4
Bitüm (%)	3,5	6,5	4,0	7,0	3,5	6,5	4,0	7,0
Agregalar arası Boşluk, VMA (%)					13	-	14	-
Filler / Bitüm	-	-	-	-	-	1,4	-	1,5

Numuneler soğuduktan sonra kalıptan çıkarılarak, kür olması için 24 saat süreyle oda sıcaklığında bekletilir. Yoğunlukları ve diğer fiziksel özellikleri saptanan numuneler, test cihazına yerleştirilmeden önce, 60°C sıcaklığındaki su banyosunda 30 dakika süreyle bekletilir. Bu şekilde hazırlanan numunelere, Marshall stabilite cihazı kullanılarak dakikada 50,8 mm hızla yük uygulanır. Numunelerin kırılma anındaki maksimum yüke ulaştığı stabilite ve akma değerleri ölçülerek belirlenir.

Alınan sonuçların grafikleri çizilerek, belirlenen değerler grafik üzerinde işaretlenir ve eğrileri çizilir. Numuneler için en yüksek stabilite, en yüksek yoğunluk, şartname boşluk yüzdesi ve şartname asfaltla dolu boşluk yüzdesi ortalamalarına karşılık gelen bitüm yüzdeleri bulunarak grafikleri çizilir. Marshall tasarım grafikleri Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Grafiklerde gösterilen bitüm miktarlarının ortalaması alınarak, optimum bitüm değeri saptanmış olur [28, 43, 47].



Şekil 5.3: Marshall tasarım grafikleri

5.4 Sülfürlü Asfalt Karışımına Uygulanan Deneyler

Yeterli veri elde edebilmek amacıyla, kullanılacak her bir bitüm içeriği için en az 3 Marshall numunesinin hazırlanması gerekmektedir. Dolayısıyla, 6 bitüm içeriği kullanılarak gerçekleştirilen bir sıcak karışım dizaynı çalışması için, en az 18 adet Marshall numunesinin hazırlanması gerekecektir. 1150 gram'lık, gradasyonu önceden belirlenmiş ve ayarlanmış agrega karışımları, uygun kaplarda etüve yerleştirilirler. Sıcak karışımların hazırlanmasında kullanılacak yeteri miktardaki bitüm ayrı bir ısıtıcıda ısıtılır. İçleri, 1150 gram agrega dolu kaplar, etüvde, karıştırma sıcaklığının 10–15°C üzerindeki bir ısıda yaklaşık 24 saat bekletilir [21, 32, 49, 60]. Bu arada, bitüm ve agrega karışımlarının hazırlanmasında kullanılacak karışım kabı, karışımların içine döküldüğü numune sıkıştırma kalıpları, mikserin karıştırıcı aparatı ve karışımın kalıplara konmasında kullanılacak olan kürek de etüve konulup ısıtılmalıdır. Isıtılmış 1150 gram agrega ve buna ilave edilecek bitüm, ısıtılmış olan karıştırma kabına dökülerek mekanik bir mikserle karıştırılır. Sıcak karışım, fırında ısıtılmış ve içine makine yağı sürülerek, tabanına mumlu kağıt yerleştirilmiş olan numune sıkıştırma kalıbına dökülür. Ardından bir spatula yardımı ile karışım şişlenir ve Marshall Tokmağı ile karışım sıkıştırılır. Bu şekilde gerektiği kadar numune hazırlanır. Karışımlar TS 3720 standartlarının esasları dikkate alınarak

hazırlanır. Briketler numaralandırılarak Briket Kontrol Raporuna işlenir. Briket numuneleri hazırlanırken aşağıdaki adımlar izlenmiştir [21, 32].

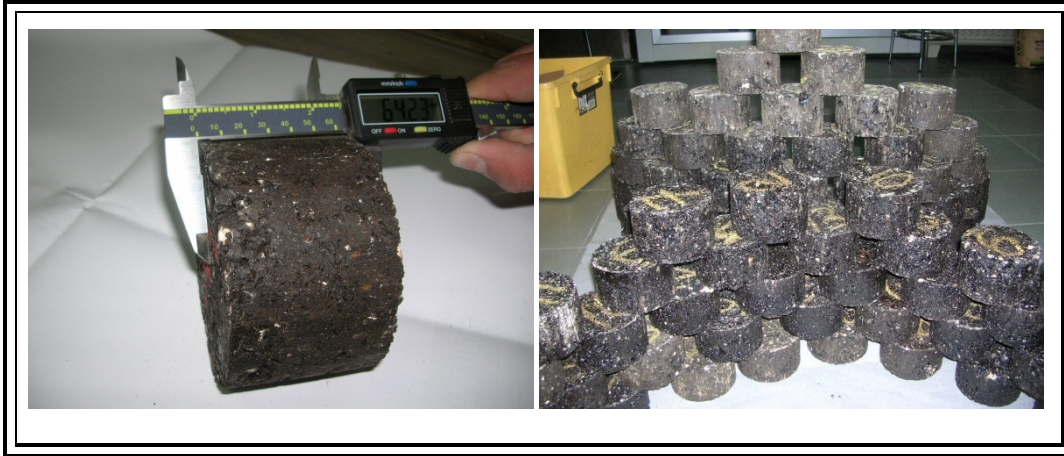
Numune sıcaklığı, granüler sülfürün sıcaklığa duyarlılığı nedeniyle en fazla 145°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin içinde yer alacağı kalıplar önceden 145°C sıcaklıktaki etüvde bekletilmiştir. Böylece karışım numunesi ile kalıpların aynı sıcaklıkta olması sağlanmıştır. Kalıp çapına göre kağıtlar kesilerek kalıbın altına yerleştirilmiştir. Karışım numunesi numune küreğine boşaltılmış ve önce bir miktar numune kalıba aktararak spatula ile karıştırılmıştır. Daha sonra homojen bir şekilde malzemenin tamamı kalıba yerleştirilmiş ve kalıpla malzeme arası kenarlar spatula ile şişlenmiştir. Kalıbın üstüne de kalıp çapına göre kesilmiş kağıt yerleştirilerek malzemenin tokmak yüzeyine yapışması önlenmiştir. Marshall sıkıştırma tokmağı ile kalıbın ön ve arka yüzüne karışım tasarımında belirtildiği üzere 75'er darbe vurulmuştur. Numunelerin sıkıştırma sıcaklıklarının ise, 50–70 penetrasyonlu bitüm kullanıldığından, 135°C civarında olmasına dikkat edilmiştir. Numunenin ön ve arka yüzündeki kağıtlar çıkarılarak, briket 15 – 20 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra numuneler numune çıkarıcı kriko yardımı ile numune kalıplarından çıkarılarak deneysel çalışmalara hazır hale getirilmiştir. Kalıptan çıkarılan briketlerin yüzeyleri yumuşak bir fırça yardımıyla temizlendikten sonra, renkli tebeşirle numaralanarak deneysel çalışmalara tabi tutulmuştur.

Karışım tasarımı ile stabilite-akma ve performans deneyleri üretilen Marshall numuneleri kullanılarak yapılmış ve bu amaçla ayrıntıları aşağıda yazılı olan toplam 276 adet numune hazırlanmıştır.

Farklı bağlayıcı oranlarıyla hazırlanan Marshall numuneleri Şekil 5.4'te görülmektedir. Optimum bağlayıcı tasarımı için hazırlanan numune sayısı Çizelge 5.11'de gösterilmiştir.

Optimum bitüm tayini için; karışıma %4,0, %4,5, %5,0, %5,5, %6,0, ve %6,5 olmak üzere 6 farklı bitüm içeriğiyle ve her birinden 3'er adet olmak üzere toplam 18 numune hazırlanmıştır. Ancak %20 ve üzerinde GSF ilave edilerek hazırlanan karışımlarla Marshall tasarım grafikleri çizildiğinde, en yüksek değere ulaşılmadığı gözlenmiş ve tasarımın yapılabilmesi için bağlayıcı içeriğinin yükseltilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Grafiklerin maksimum değere ulaştıktan sonra parabolik dönüş geçmesi amacıyla %7,0 ve %7,5 bitüm içerikli karışımlarla 3'er adet hazırlanarak

test edilmiş ve grafiklerin tasarıma uygun doğrultuda düzeldiği görülmüştür. Böylece %20'den fazla GSF içerikli karışımlar için hazırlananlarla birlikte toplam numune sayısı 132 adet olmuştur.



Şekil 5.4: Üretilen Marshall numuneleri

Çizelge 5.11: Optimum bağlayıcı tasarımı karışım numuneleri

Bağlayıcılı (GSF-Bitüm) Oranları	Numune Sayısı
Geleneksel (Kontrol) karışımlar	18
%10 GSF ilaveli karışımlar	18
%20 GSF ilaveli karışımlar	18
%30 GSF ilaveli karışımlar	18
%40 GSF ilaveli karışımlar	18
%50 GSF ilaveli karışımlar	18
%20'den fazla GSF içerikli karışımlar	18
Toplam	132

Marshall Stabilitesi ve Performans testleri için her bir karışım 1150 gr malzeme kullanılarak toplam 144 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır.

○ Marshall Stabilitesi ve Akma deneyleri, tüm karışımlar	18
○ Statik Sünme deneyleri, tüm karışımlar	54
○ Dinamik Sünme deneyleri, tüm karışımlar	54
○ Dolaylı Çekme deneyleri, tüm karışımlar	18

Toplam (Performans deneyleri için hazırlanan numuneler) :144

Tasarım hesaplarında kullanılmak üzere karışımların özellikleri belirlenmiş ve çıkan sonuçlar standart formlara işlenmiştir. Bu çalışmalar adım adım şu şekilde gerçekleştirilmiştir. Kaplama karışımı içindeki agrega karışımının hacim özgül ağırlığı (G_{sb}), sıkıştırılmış asfalt karışımının hacim özgül ağırlığı (D_p), agrega karışımının bitüm absorpsiyonu (P_{be}) ve karışımın teorik özgül ağırlığı (D_t) hesaplanarak, Marshall deney formuna işlenmiştir. Karışım içindeki agregalar arası boşluk yüzdesi (VMA), karışım içindeki boşluk yüzdesi (V_h) ve karışım içindeki bitümlü dolu boşluk yüzdesi (V_f) Marshall deney formu yardımıyla, stabilite ve akma değerleri ise TSE 3720'e göre bulunarak kaydedilmiştir.

Stabilite ve akma değerleri dakikada 51mm'lik sabit deformasyon hızı ile kırılma gerçekleşinceye kadar numuneye yük uygulanarak belirlenmektedir. Numunenin kırılması için gerekli olan yük, stabilite değeri olarak kaydedilir. Maksimum stabilite değerine ulaşıncaya kadar meydana gelen deformasyonu gösteren akma değeri de cihazın göstergesinden okunabilmektedir. 63,5 mm'lik standart numune yüksekliği dışındaki numunelerin, ölçülen stabilite değerleri, stabilite korelasyon katsayıları yardımı ile düzeltilir.

Marshall deney formundan elde edilen sonuçlarla stabilite, birim ağırlık, akma, boşluk ve bağlayıcı ile dolu boşluk grafikleri çizilir. Bu grafikler karışımın pratik özgül ağırlığı, stabilitesi, akma değeri, asfaltla dolu boşluk, b ve karışım içindeki agregalar arası boşluk yüzdelерinin karışım içerisinde yer alan bitüm içeriği yüzdesine göre büyüklüklerini göstermektedir.

Hazırlanan Marshall numunelerinin yükseklikleri, stabilite deneyinde kullanmak üzere, kumpas yardımı ile 3 farklı noktadan ölçülerek ve aritmetik ortalaması alınarak, ortalama briket yüksekliği olarak kaydedilmiştir. Deneye başlamadan önce

numuneler 60°C sıcaklıktaki su banyosunda, 30 dakika bekletilmiştir. Su banyosundan çıkarılan numuneler bekletilmeden Marshall deney cihazına yerleştirilerek 51 mm/dak hızla numuneye basınç uygulanmıştır. İşleme en büyük stabilite değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Bu değere ulaşıldığında stabilite cihazı üzerindeki ölçü göstergesinden okunan değer kaydedilmiştir. Okunan değer kN (kilonevton) cinsinden stabilite değeri olduğundan, bu değer Kilogram'a (Kg) çevrilerek formlara işlenmiştir. Çevirme işlemi aşağıdaki formül yardımıyla yapılmıştır.

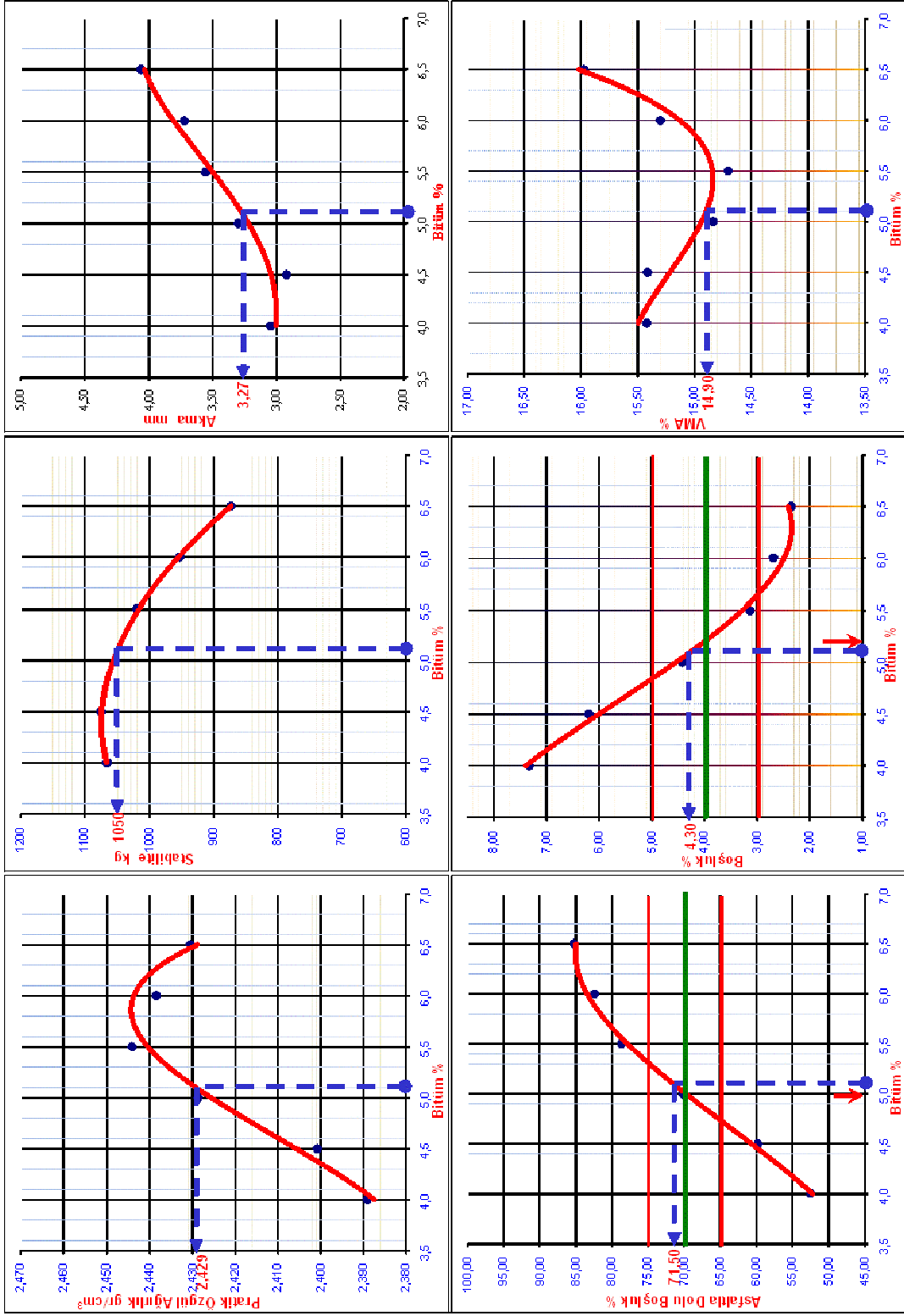
Ayrıca en büyük stabiliteye erişildiği andaki akma değeri de belirlenerek kaydedilmiştir. Bu değer numunenin akma değeridir. Akma değerinin birimi 1/100 inç'tir. (Bir birim 0,254 mm'dir.)

(Örneğin; Okunan değer 15 ise akma değeri mm cinsinden $15 \times 0,254 = 3,81$ olur.)

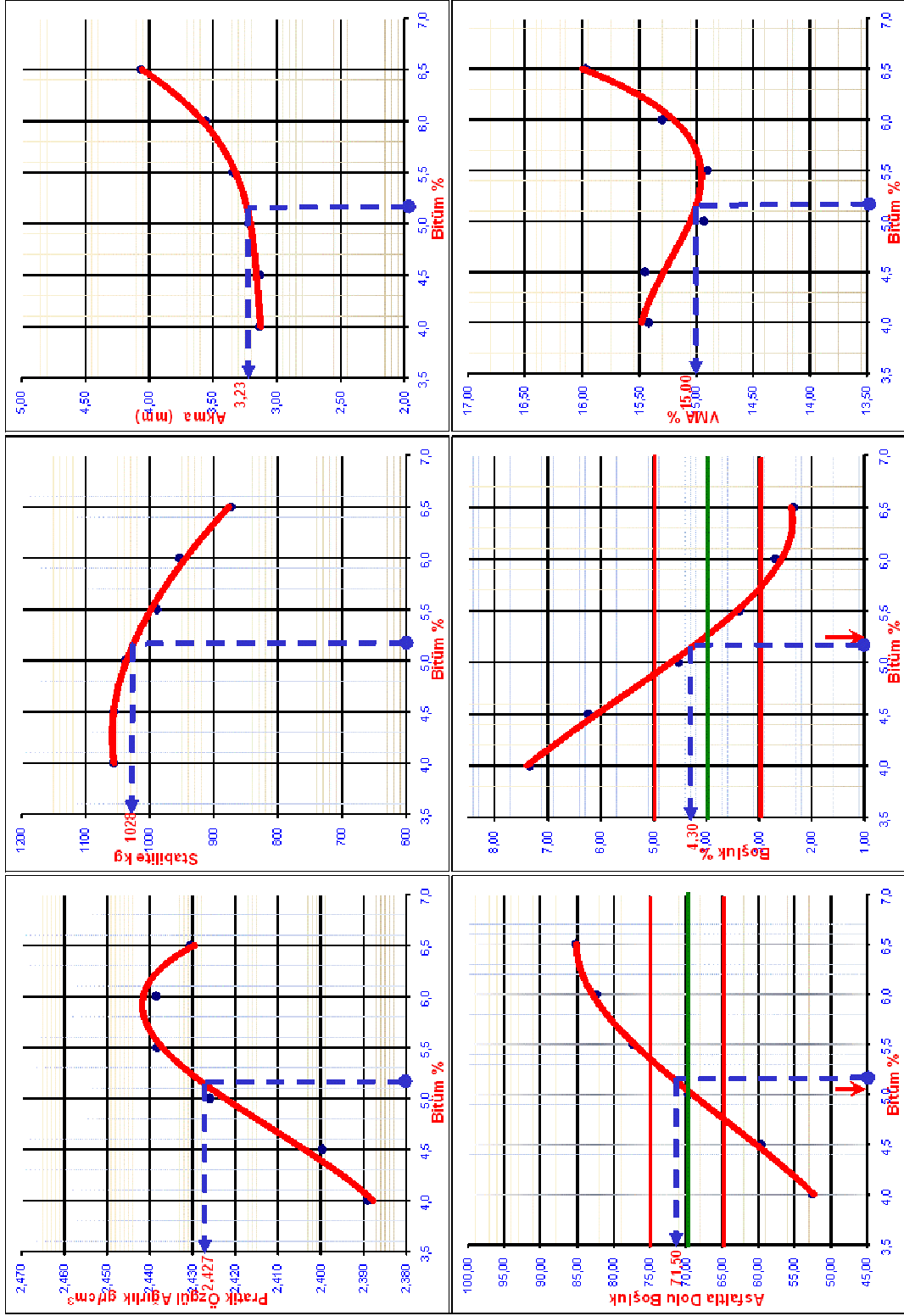
Bulunan stabilite değerleri 63,5 mm kalınlıktaki numuneler için geçerlidir.

- Stabilite - Bitüm içeriği,
- Akma - Bitüm içeriği,
- Yoğunluk - Bitüm içeriği,
- Hava boşluğu yüzdesi - Bitüm içeriği,
- Mineral agrega arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) - Bitüm içeriği,
- Bitümlü bağlayıcı ile dolu boşluk yüzdesi (VFA) - Bitüm içeriği,

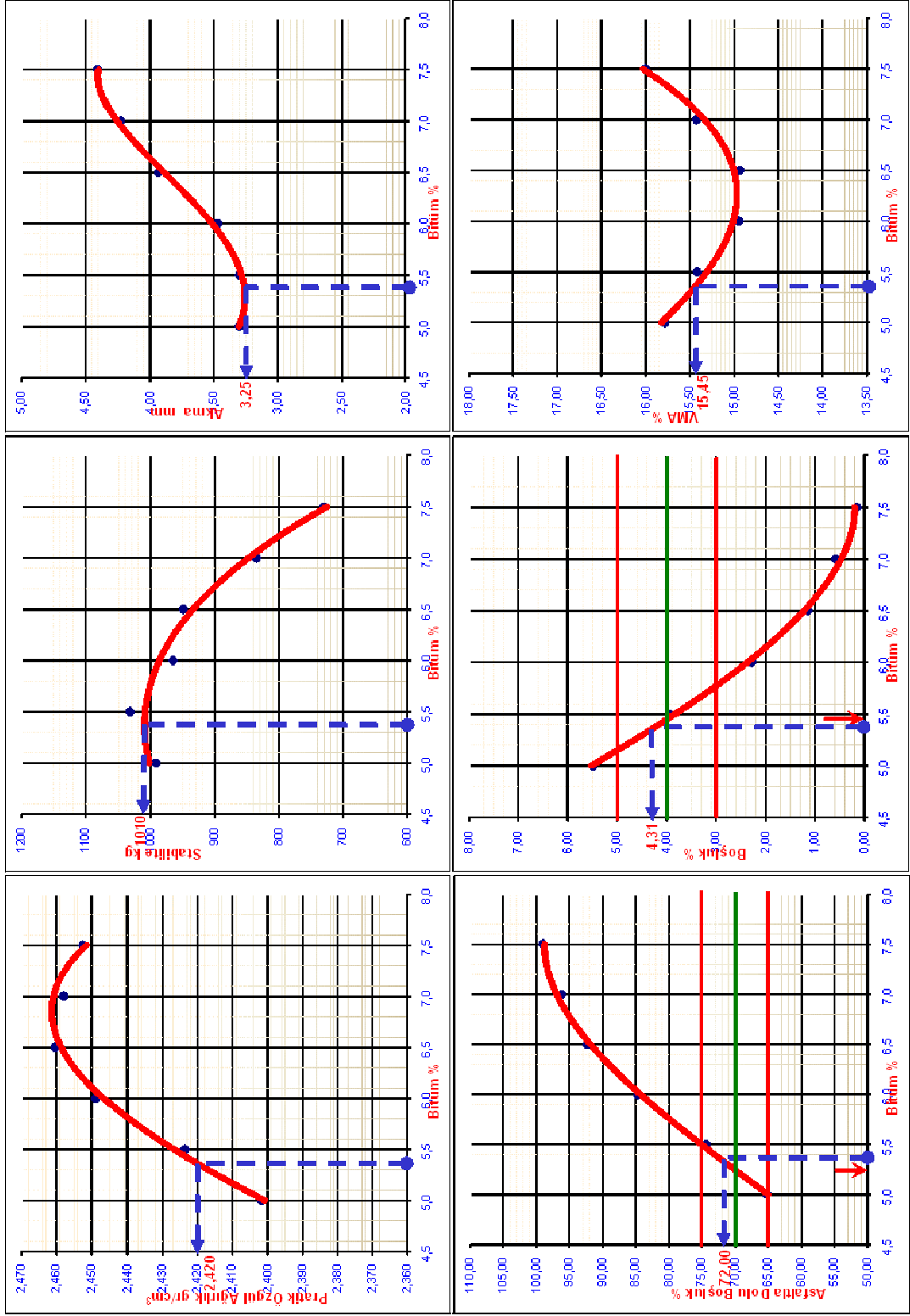
Bu çalışmada geleneksel karışımlar kontrol grubu olarak hazırlanmış olup, bunlara ilaveten %10, %20, %30, %40 ve %50 GSF (Granüler Sülfür) karışımları için de aynı yöntem kullanılmış ve aynı adımlar izlenmiştir. Çizilen Marshall tasarım grafikleri Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8 Şekil 5.9 Şekil 5.10'da ayrı ayrı gösterilmiştir.



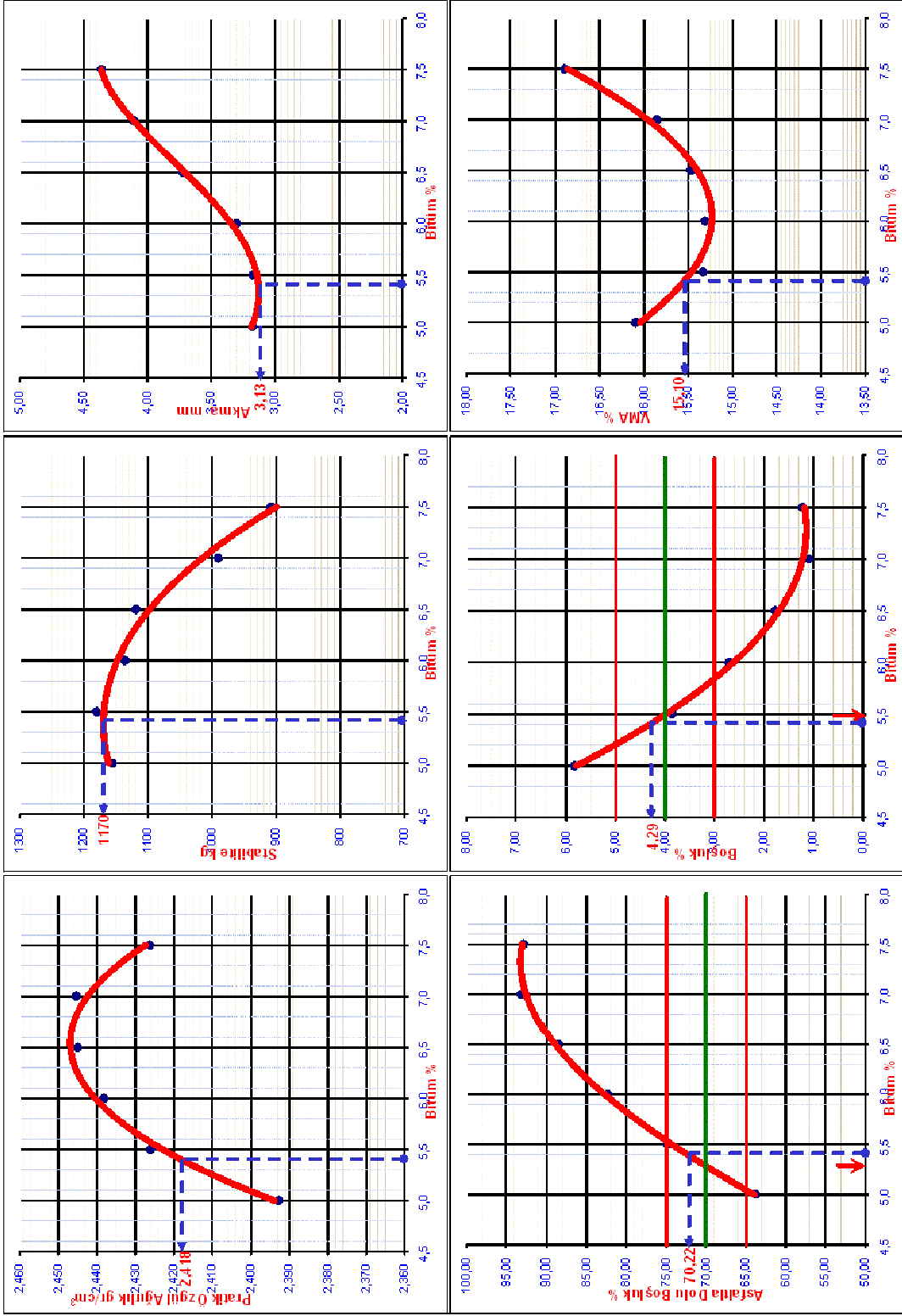
Şekil 5.5: Marshall tasarım grafikleri, Geleneksel karışım (Kontrol)



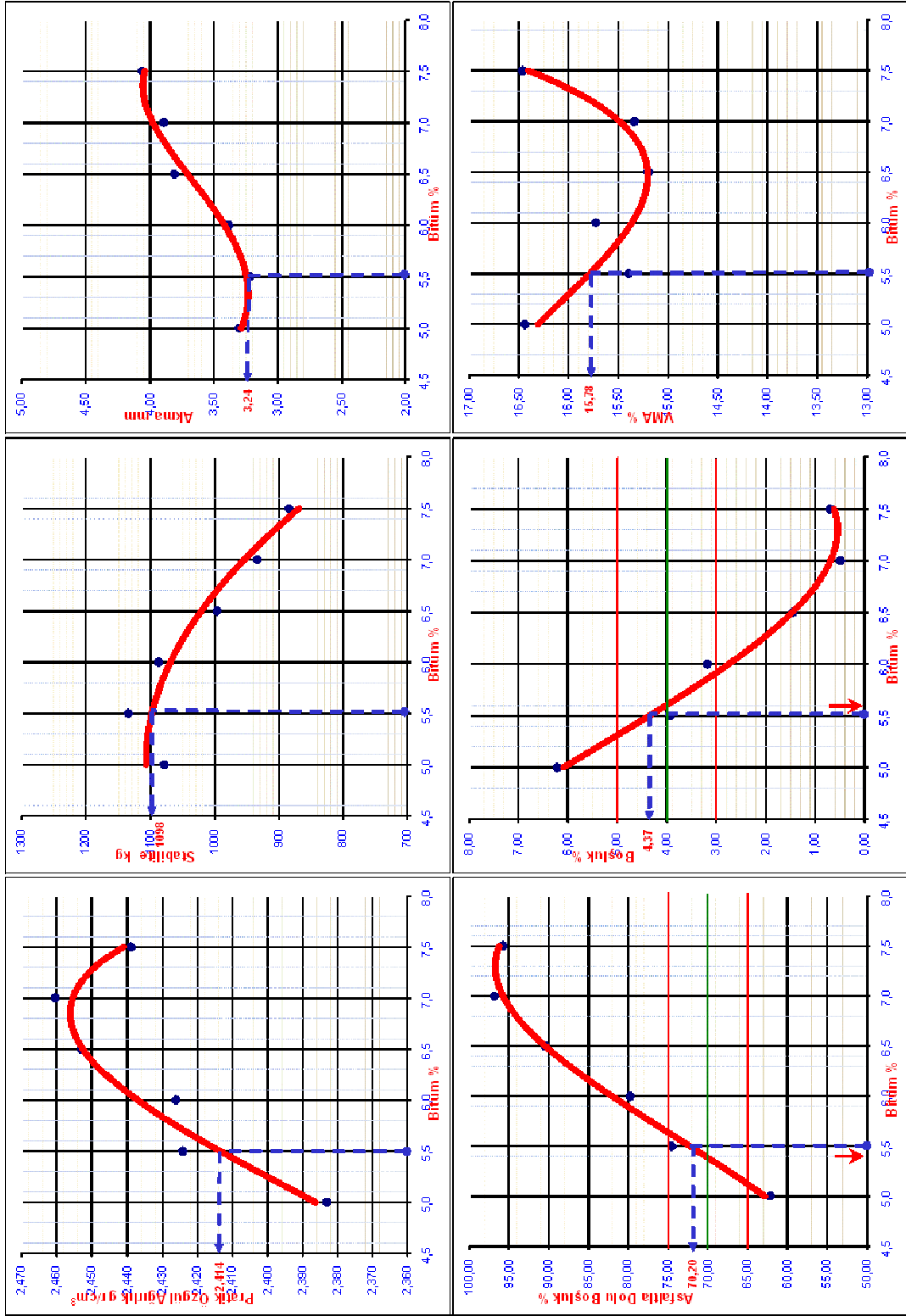
Şekil 5.6: Marshall tasarım grafikleri, GSF 10



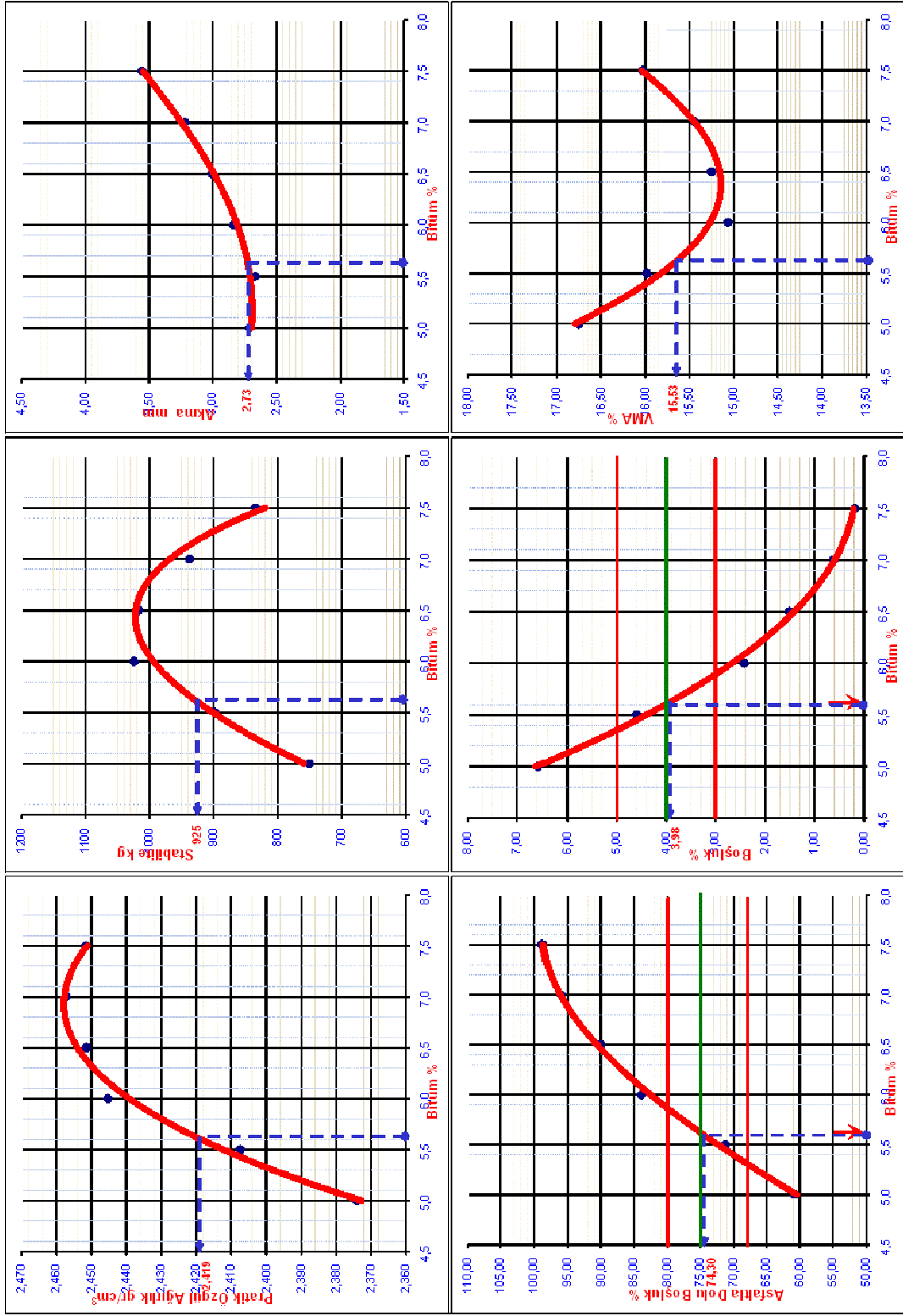
Şekil 5.7: Marshall tasarım grafikleri, GSF 20



Şekil 5.8: Marshall tasarım grafikleri, GSF 30



Şekil 5.9: Marshall tasarım grafikleri, GSF 40



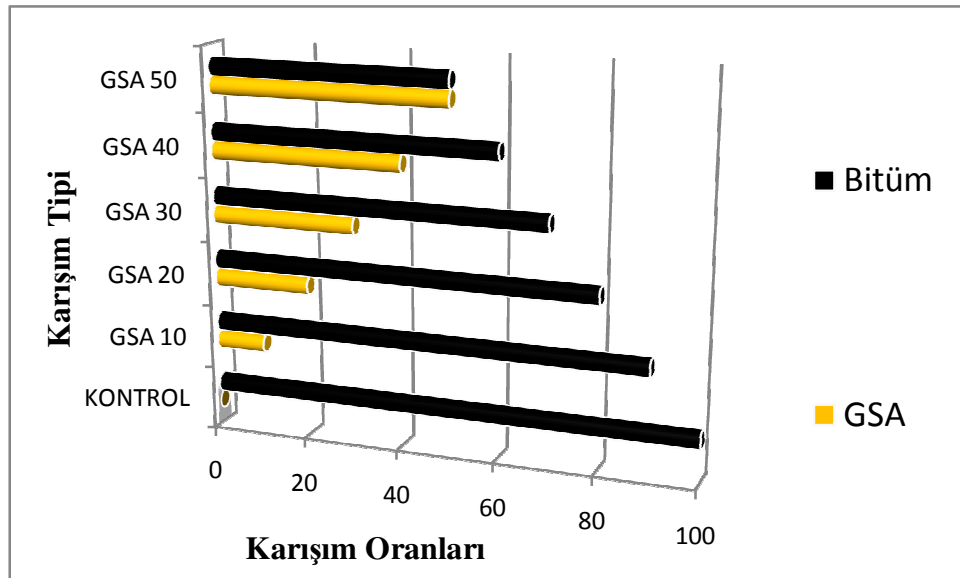
Şekil 5.10: Marshall tasarım grafikleri, GSF 50

Deney sonuçlarında farklı karışım tipleri için bulunan optimum bağlayıcı (granüler sülfür-bitüm) değerleri, Çizelge 5.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12: Optimum bağlayıcı değerleri

Karışım Tipi	Optimum Bağlayıcı Miktarı (%)
Kontrol Grubu (Geleneksel Karışım)	5,10
%10 GSF Karışımı	5,15
%20 GSF Karışımı	5,35
%30 GSF Karışımı	5,40
%40 GSF Karışımı	5,50
%50 GSF Karışımı	5,61

Bulunan optimum bitümün GSF ile karışım oranları, GSF ve bitüm yoğunlukları dikkate alınarak, aşağıdaki formülle hesaplanmıştır. GSF yoğunluğu bitüm yoğunluğunun yaklaşık iki katı olduğundan ve hesaplarda ağırlıkça yüzdeler esas alındığından, karışıma katılacak GSF’nin ağırlıkça yüzde miktarları ayrı ayrı hesaplanarak belirlenmiştir.



Şekil 5.11: Optimum bağlayıcı (GSF-Bitüm) grafiği

$$\text{GSF + Bitüm} = \frac{A100R}{100R - P_S(R - G_{\text{Bitüm}})} \quad (5.8)$$

Burada:

A : Geleneksel karışım içindeki bitüm yüzdesi ağırlığı

R : GSF/Bitüm yoğunluk oranı

P_S : Bitüm içindeki GSF yüzdesi

G_{Bitüm} : Bitüm yoğunluğu

Örneğin %40 GSF ve %60 Bitüm oranları için bir hesaplama yapılacak olursa;

$$A = \%5,3$$

$$P_S = \%40$$

$$R = 2,0/1,015 = 1,97$$

$$\text{GSF+A} \% = \frac{5,3 \times 100 \times 1,97}{(100 \times 1,97) - 40(1,97 - 1,015)} \quad (5.9)$$

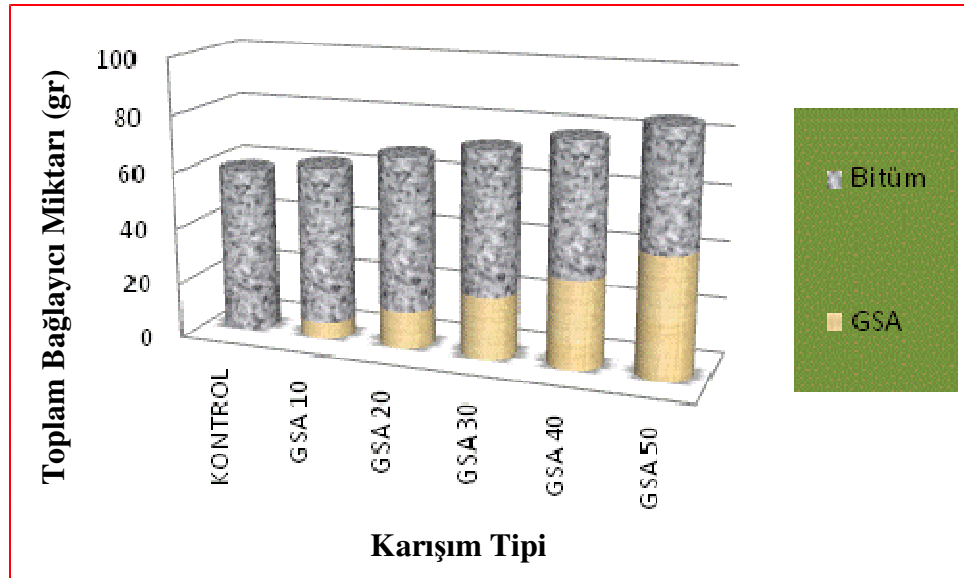
$$= 6.57 \quad (\text{GSF} = \%2.63; \text{Bitüm} = \%3.94) \text{ olarak bulunur}$$

Yukarıda verilen formül yardımıyla bulunan Bitüm-GSF oranları ve bu oranlara göre 1150 gr ağırlığında hazırlanan her bir karışım numunesi için hesaplanan miktarlar, Çizelge 5.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.13: Optimum bağlayıcı (GSF – Bitüm) miktarları

GSF/Bitüm Oranları (%)		Optimum Bitüm	Marshall Numunesi (1150 gr) İçindeki Miktarları			
			GSF		Bitüm	
GSF	Bitüm	%	%	gr	%	gr
0	100	5,10	0	0	5,10	58,7
10	90	5.15	0.54	6.2	4.85	55.8
20	80	5.35	1.18	13.6	4.74	54.5
30	70	5,40	1.90	21.8	4.42	50.9
40	60	5,50	2.73	31.4	4.09	47.1
50	50	5,61	3,70	42,6	3,70	42,6

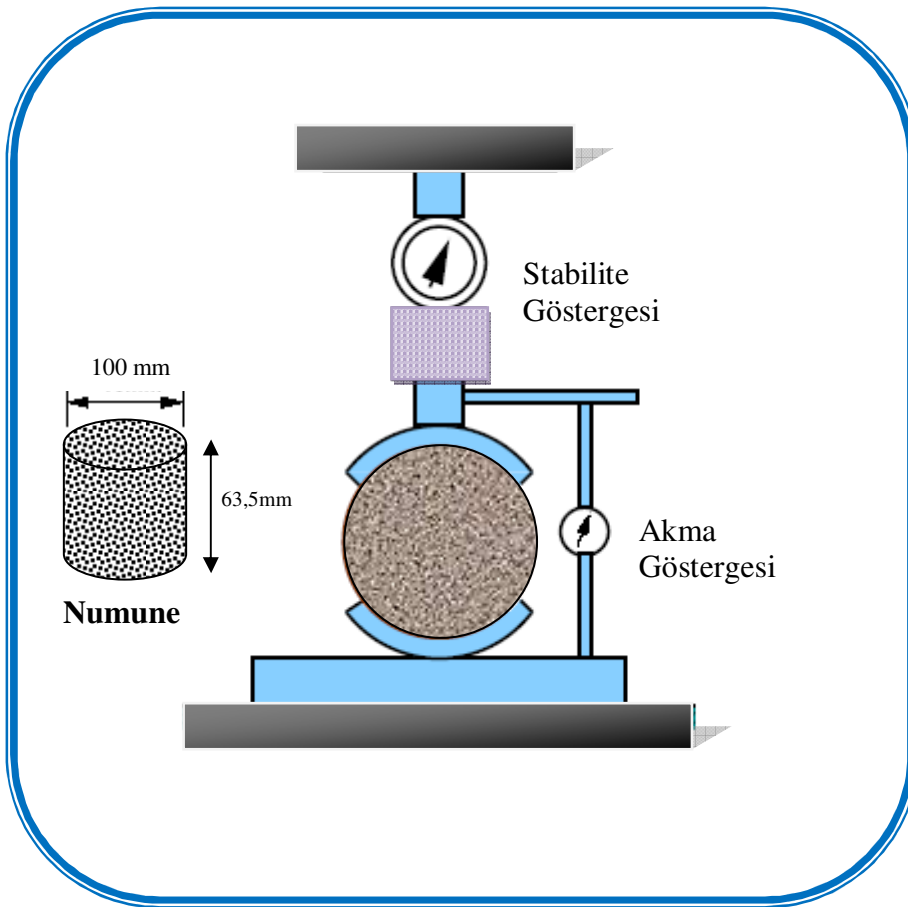
1150 gramlık Marshall numunesi için hesaplanan granüler sülfür ile bitüm miktarları ve numune içindeki toplam değerleri Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Marshall metoduyla yapılan tasarım çalışmalarında elde edilen sonuçlar ise ayrıntılı olarak, Ekler bölümünde her bir karışım grubu için ayrı ayrı çizelgelerde verilmiştir.



Şekil 5.12: Marshall numuneleri bağlayıcı miktarları

5.4.1 Marshall Stabilitesi ve Akma Deneyleri

Marshall stabilitesi bir numunenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum yük, akma değeri ise kırılma anına kadar meydana gelmiş olan maksimum basınç deformasyonudur. Bitümlü karışımların stabilitesinin trafik yüklerini karşılayabilecek kadar yüksek olması beklenir. Rijitliği yüksek olan karışımlarda ise, stabilitenin çok yüksek olması dolayısıyla, oluşabilecek defleksiyonlar sonucu çatlaklar meydana gelebilir. Bundan dolayı, stabilitenin düşük olması istenmediği gibi, çok yüksek olması da istenmez. Stabilitenin, agregalar arası içsel sürtünmeye ve bitümle agrega arasında meydana gelen adezyon (yapışma) özelliğine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla agreganın yüzey dokusunun ve bitümün absorpsiyon özelliğinin iyi olması, stabilitenin yüksek çıkmasına etki edecektir. Yüksek bitüm oranı, fazla miktarda ince agrega ve köşeli agrega yerine yuvarlak agrega kullanılması da stabilite değerinin düşük çıkmasına neden olur [25, 41, 50, 65].



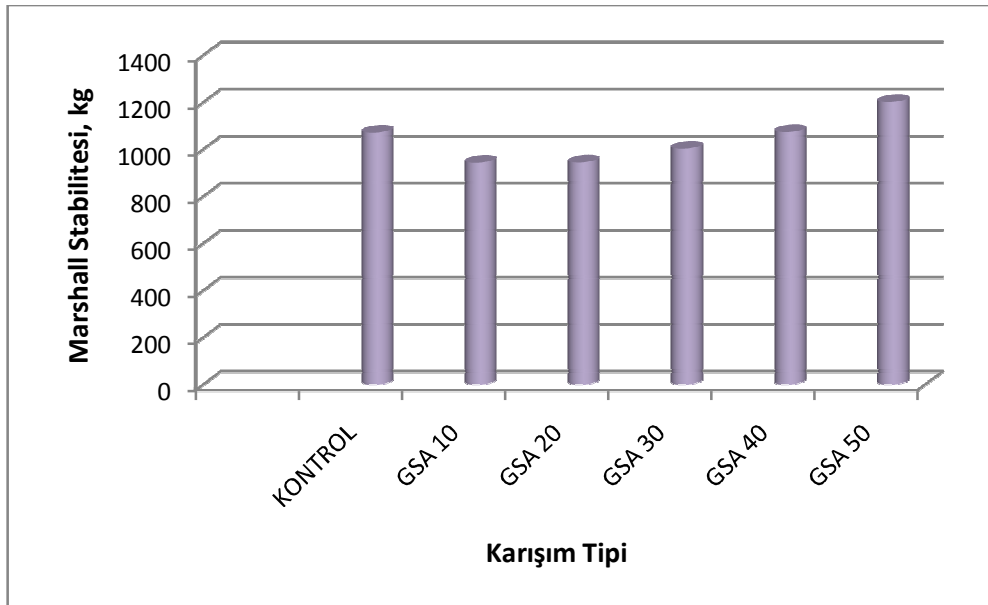
Şekil 5.13: Marshall stabilitesi deney düzeneği

Optimum bitüm ve GSF değerleri kullanılarak hazırlanan Marshall numunelerine Marshall stabilite deneyi uygulanmıştır. Çalışmanın bu aşamasında her bir karışım tipi için üçer adet olmak üzere, toplam 18 adet numune hazırlanmış ve bu numunelere uygulanan deneylerden elde edilen sonuçlarla, optimum bitüm miktarı belirlenmiştir.

Numunelere uygulanan deneyler sonucunda elde edilen Marshall stabilitesi ile akma değerleri Çizelge 5.14, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir.

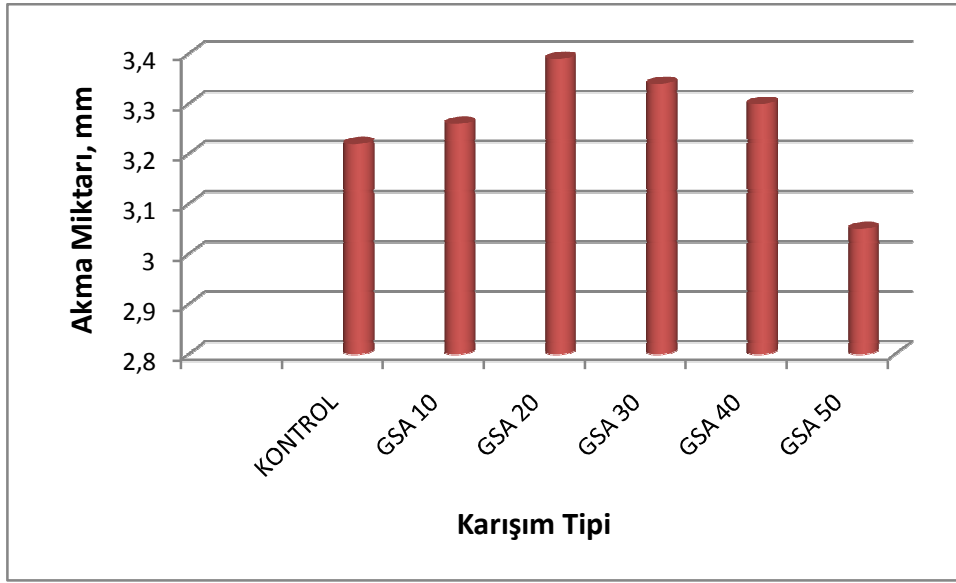
Çizelge 5.14: Marshall stabilitesi ve Akma değerleri

Karışım Cinsi	Stabilite (kg)	Akma (mm)
Kontrol Grubu (Geleneksel Karışım)	1071	3,22
%10 GSF Karışım	943	3,26
%20 GSF Karışım	944	3,39
%30 GSF Karışım	1003	3,34
%40 GSF Karışım	1073	3,30
%50 GSF Karışım	1201	3,05



Şekil 5.14: Marshall stabilitesi

Marshall Stabilitesi değerleri incelendiğinde tüm karışımlarda, şartname alt sınır değerleri olan 900 kg düzeylerinin aşıldığı görülmektedir. Karışıma belli bir miktarın (%40) altında GSF maddesinin ilave edilmesiyle stabilite değerinde bir düşüş meydana gelmektedir. Ancak GSF miktarının artırılmasıyla birlikte stabilite değerinin yükselmeye başladığı ve geleneksel karışım stabilitesinden daha yüksek çıktığı gözlenmektedir. %40 ve üzerinde GSF miktarının ilave edilmesiyle hazırlanan karışımlarda stabilite değeri geleneksel karışım değerlerinden yüksek çıkmıştır.



şekil 5.15: Akma değerleri

Akma grafiği incelendiğinde, hazırlanan karışımlarda akma değerlerinin şartname sınırları olan 3 ila 5 arasında çıktığı görülmektedir. En düşük akma değeri %50 oranında GSF maddesinin ilave edilmesiyle hazırlanan karışımda görülmektedir.

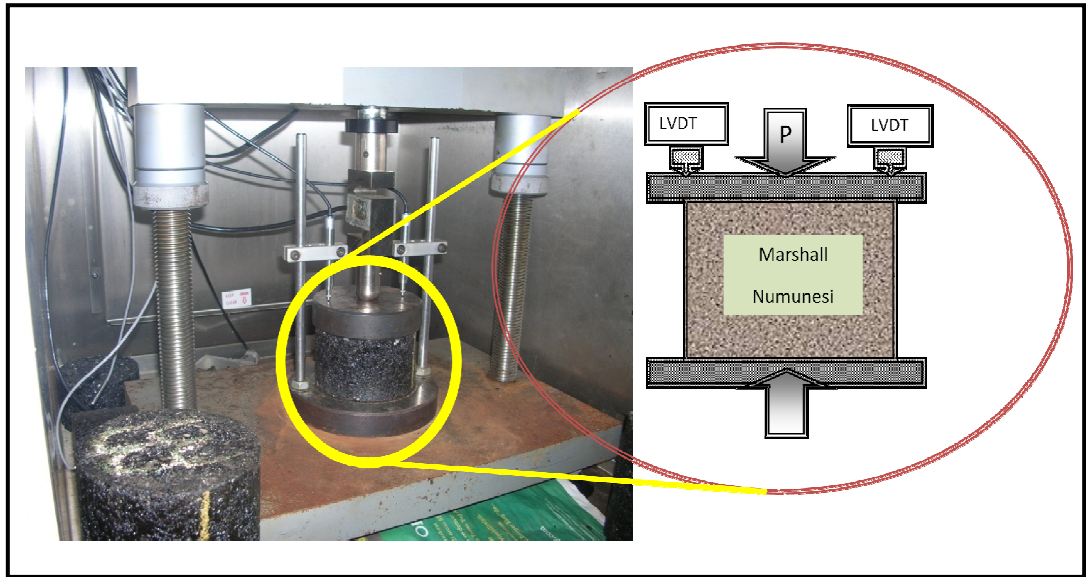
5.4.2Performans Deneyleri

Farklı oranlarda sülfür ilave edilerek hazırlanan numuneler ve karşılaştırma amaçlı kontrol numunelerinin mekanik özelliklerinin tespit edilesi için statik sünme, dinamik snme ve dolaylı çekme deneyleri yapılmıştır. Değişik sıcaklıklar ve farlı yüklemeler altındaki karışımın gerilmelere karşı gösterdiği davranışların incelendiği performans deneyleri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

5.4.2.1 Statik Sünme Deneyi

Bu deneyde silindirik bitümlü sıcak karışımların tek eksenli basınç yüklemesi statik yük altında sünme modülü değerleri belirlenir. Bu deney, asfalt betonu karışımlarının tekerlek izi oluşumuna karşı direnimlerini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Bu deney yöntemi yoğun asfalt karışımlarına ve araziden karot yardımıyla alınmış numunelere uygulanabilmektedir. Bu deneyden elde edilen sünme modülü değerleri, elastik teori veya nonlineer elastik teori yardımıyla ısı ve dingil yüklerine maruz kalan asfalt betonu karışımlarının, tekerlek izi hesaplamaları ve karışım rijitliğinin tahmini çalışmalarında kullanılmaktadır [35, 53, 65].

Belli bir süre zarfında, sabit büyüklükte bir yük, sıkıştırılmış silindirik numune üzerine uygulanır. Numunede meydana gelen düşey deformasyonlar ölçülür ve yükün üzerinde bulunduğu sürenin herhangi bir parçası için bir basınç sünme modülü hesaplanır. Yükün kaldırılmasından sonra, belirli bir süre içinde geri dönen deformasyon da ölçülür. Şekil 5.16'da statik sünme deneyi düzeneği şematik olarak gösterilmektedir.

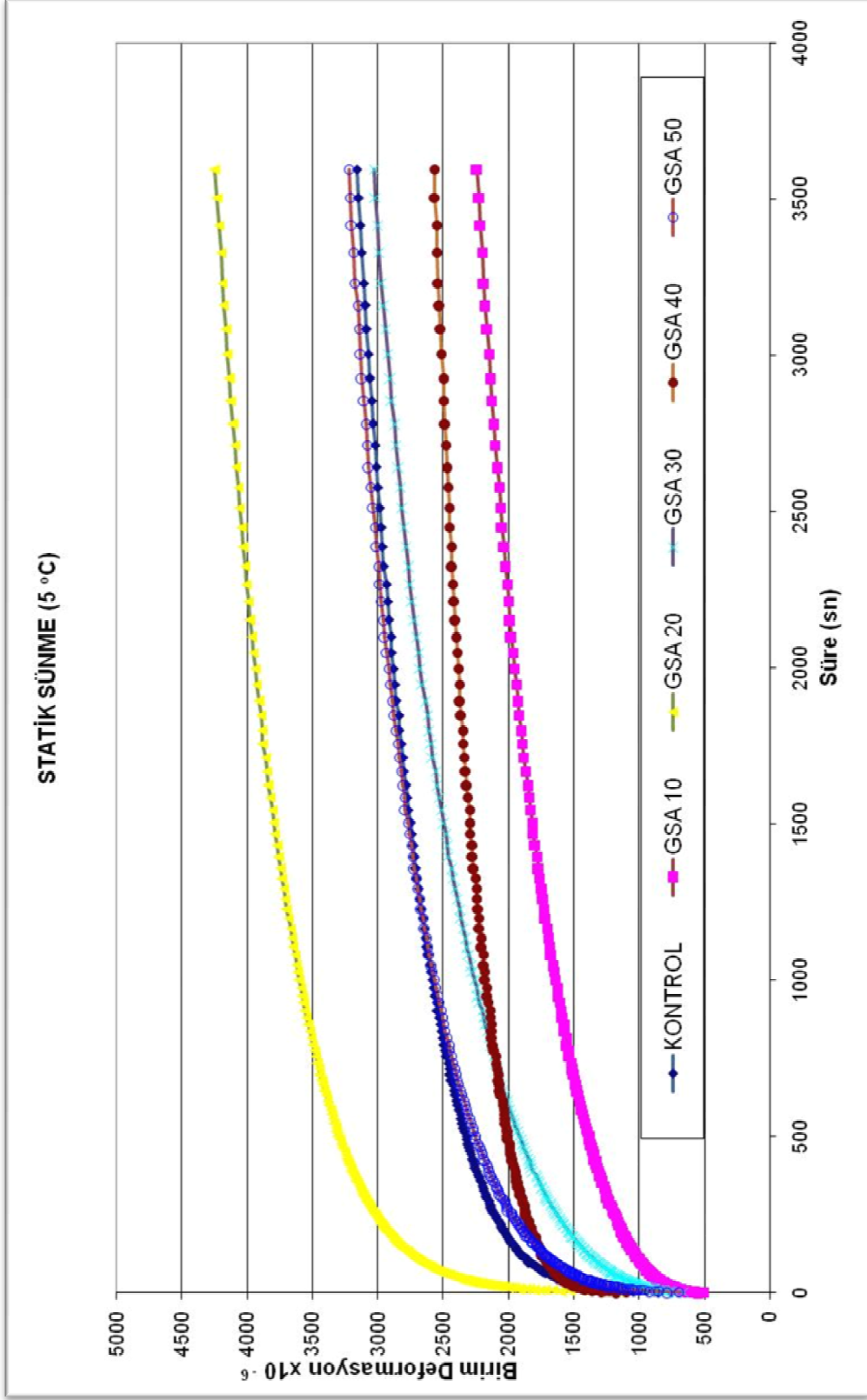


Şekil 5.16: Statik sünme deneyi düzeneği

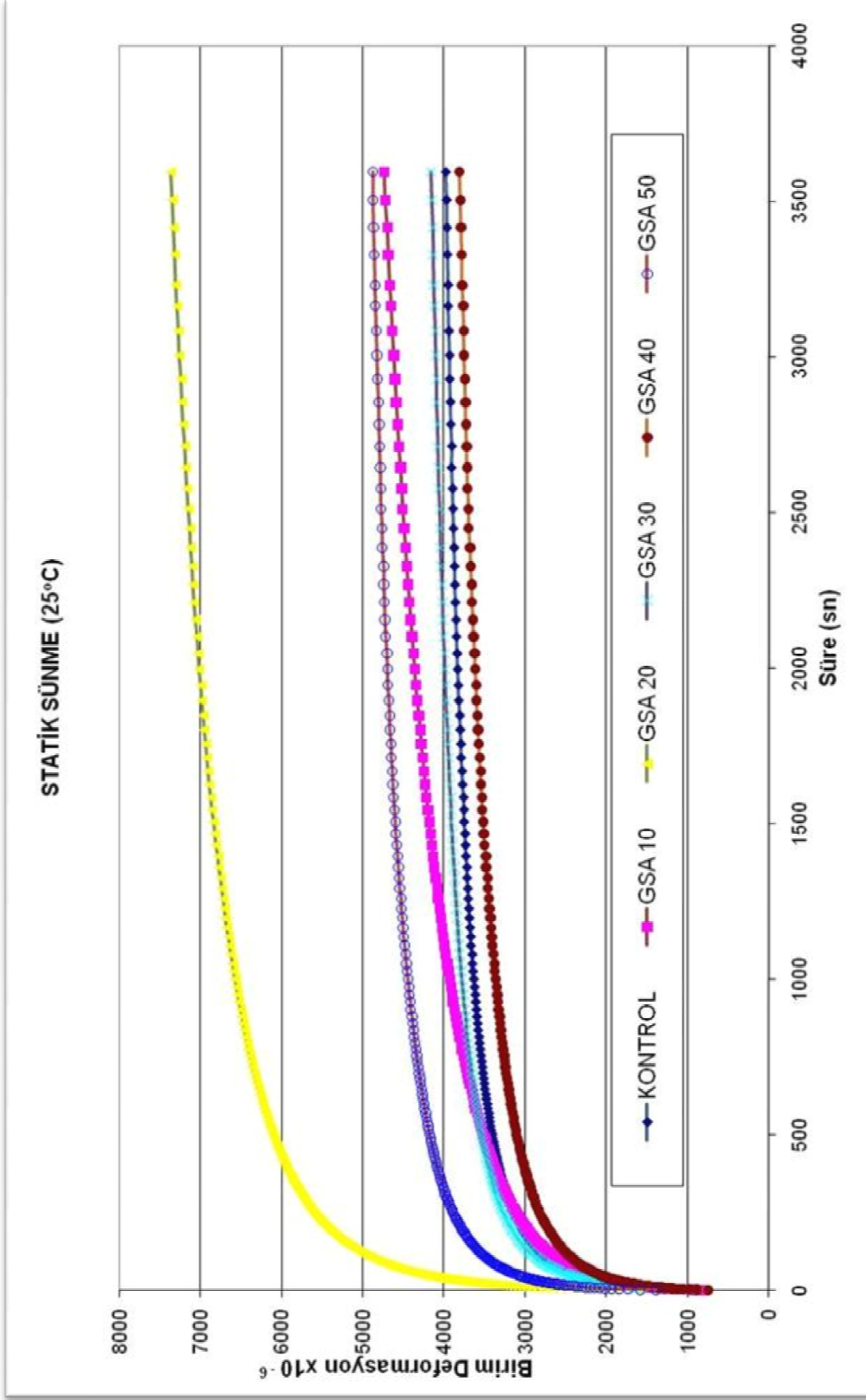
Bu çalışmada, statik sünme deneyi, Universal Test Machine (UTM) kullanılarak yapılmıştır. Deneyde kullanılmak üzere, Marshall tasarım yöntemine uygun olarak hazırlanmış olan silindirik numuneler kullanılmıştır. Ortalama yükseklikleri, hacimleri, boşluk oranları ve birim ağırlıkları tespit edilen numuneler, deney sıcaklığına gelmesi için, test cihazının sıcaklık kontrollü deney kabinde

bekletilerek koşullandırılmıştır. Kabin içindeki ısı kontrol sistemiyle, numunelerin istenen sıcaklığa ulaşması kukla numune içerisine yerleştirilmiş alıcı yardımıyla izlenebilmektedir. Deney sıcaklığına ulaşan numunelere, yatay olarak ön yükleme yapılmıştır. Daha sonra 3600 sn. süreyle sabit yükleme yapılarak, yükleme süresi boyunca düşey deformasyonlar kaydedilmiştir. Düşey deformasyonların yanı sıra, 3600 sn. boyunca yüksüz bırakılarak geri dönen deformasyonlar da ölçülmüştür. Statik sünme deneyleri için üç farklı sıcaklıkta testler yapılmıştır. Her bir sıcaklık için üç numuneye uygulanan deney sonuçlarının ortalaması alınmıştır [35, 53, 65].

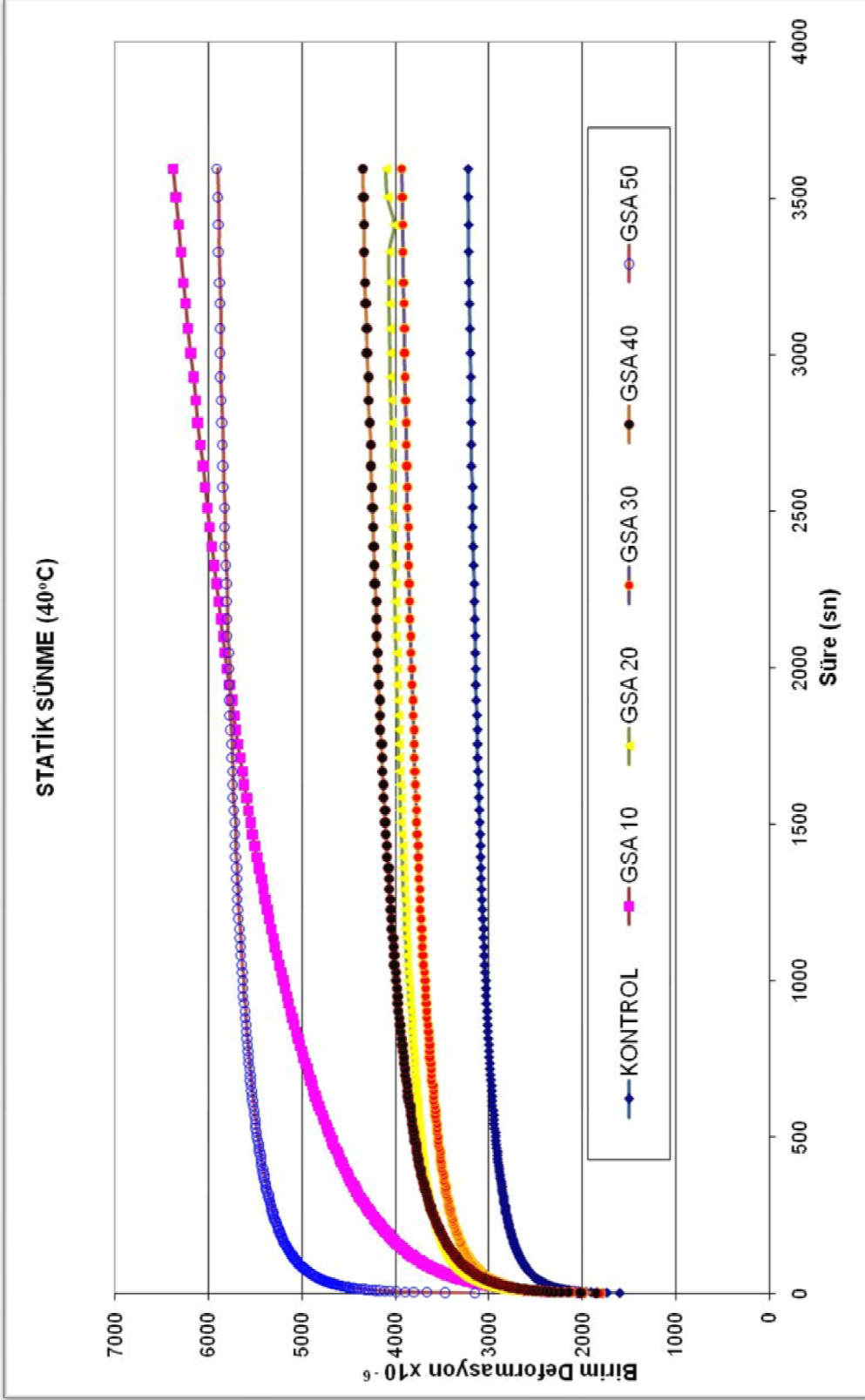
Deney sonuçlarına ilişkin grafikler, deney sıcaklıklarına göre ayrı ayrı Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği sıcaklıklara ilişkin deneysel veri çizelgeleri, her bir karışım için farklı süreler ve yük uygulama periyotlarında çıkan sonuçlarıyla birlikte “Ekler” bölümünde ayrıntılı olarak ayrıca verilmiştir.



Şekil 5.17: Statik sünme deneyi, 5 °C



Şekil 5.18: Statik sünme deneyi, 25°C



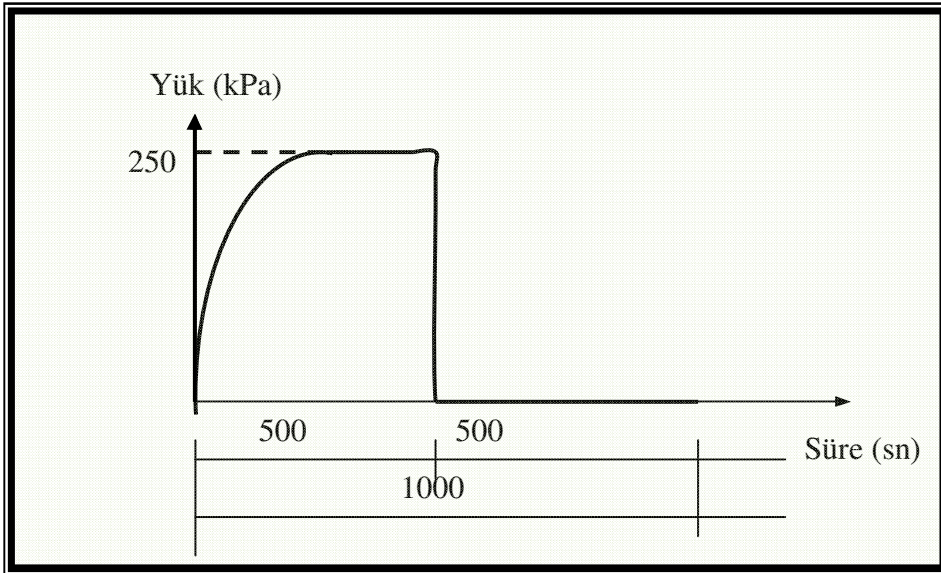
Şekil 5.19: Statik sünme deneyi, 40°C

Yukarıda yer alan şekiller incelendiğinde, numunelere yapılan ilk yüklemeye birlikte hızlı bir deformasyon artışı olduğu, belirli bir süre sonra deformasyon oluşum hızında bir yavaşlama meydana geldiği gözlenmektedir.

Statik sünme deneyinde farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerde farklı gerilme davranışları gözlenmiştir. 5°C sıcaklıkta %20 ve %50 GSF katkılı karışımlarda oluşan deformasyonlar geleneksel karışımlara göre daha yüksek çıkarken, %40, %30 ve %10 katkılı karışımlarda ise daha düşük çıkmıştır. 25°C sıcaklıkta %40 GSF katkılı karışımda oluşan deformasyon geleneksel karışımlara göre daha düşük, bunun dışında kalan karışımlarda ise deformasyon değerleri daha yüksektir. 40°C sıcaklıkta GSF katkılı karışımlarda oluşan deformasyonlar geleneksel karışımlara göre daha yüksektir.

5.4.2.2 Dinamik (Tekrarlı) Sünme Deneyi

Dinamik sünme deneyi, bitümlü karışımların tekerlek izi oluşumuna karşı performansını belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bu deney için kullanılan cihaz, statik sünme deneyinde kullanılan cihazla aynıdır. Statik sünme deneyinden temel farkı ise, hareketli trafik yükünü temsil kabiliyetidir. Şekil 5.20’de dinamik sünme deneyinde süreye bağlı olarak vuruş periyotları çizelge halinde verilmiştir.

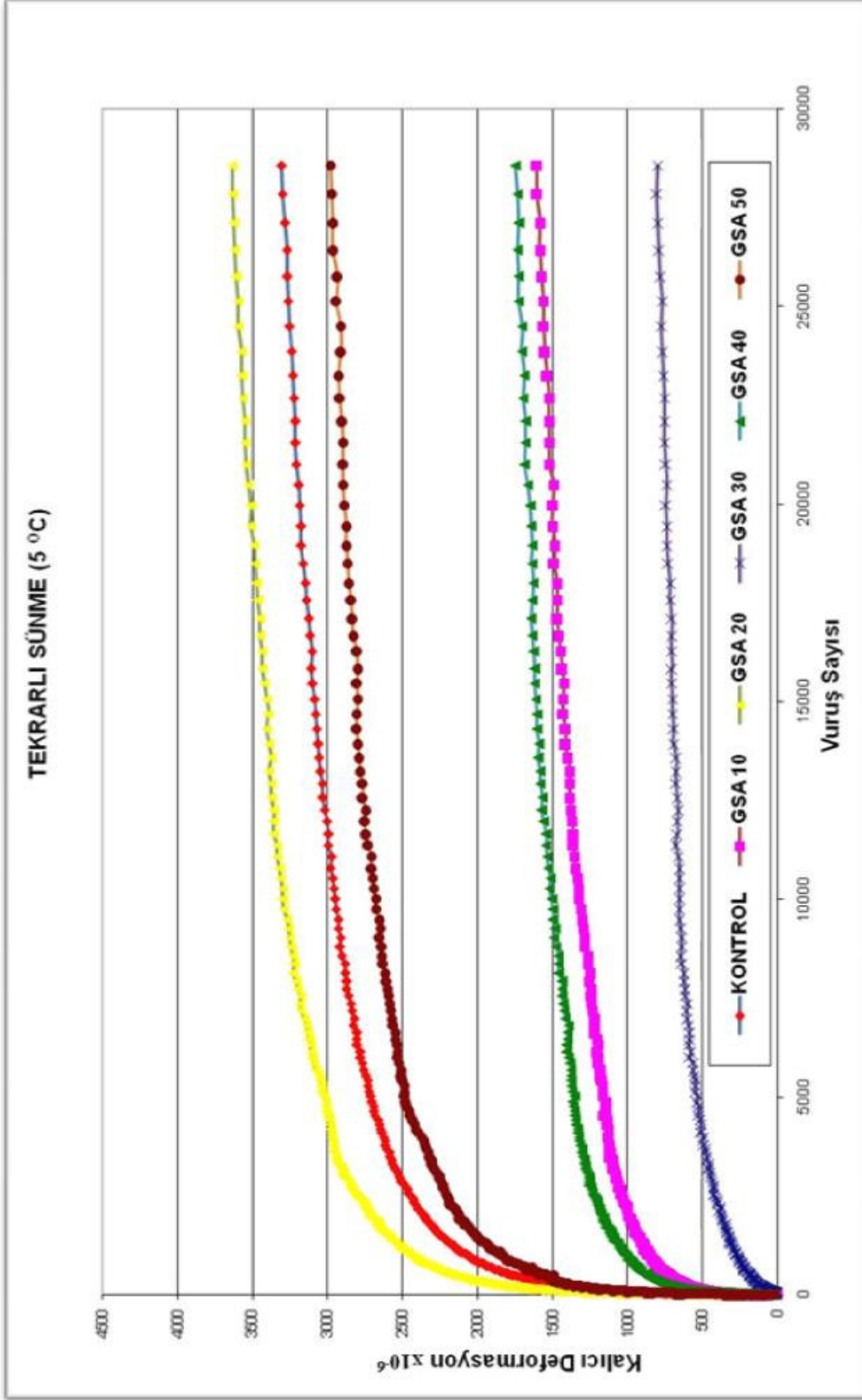


Şekil 5.20: Tekrarlı yük – süre grafiği

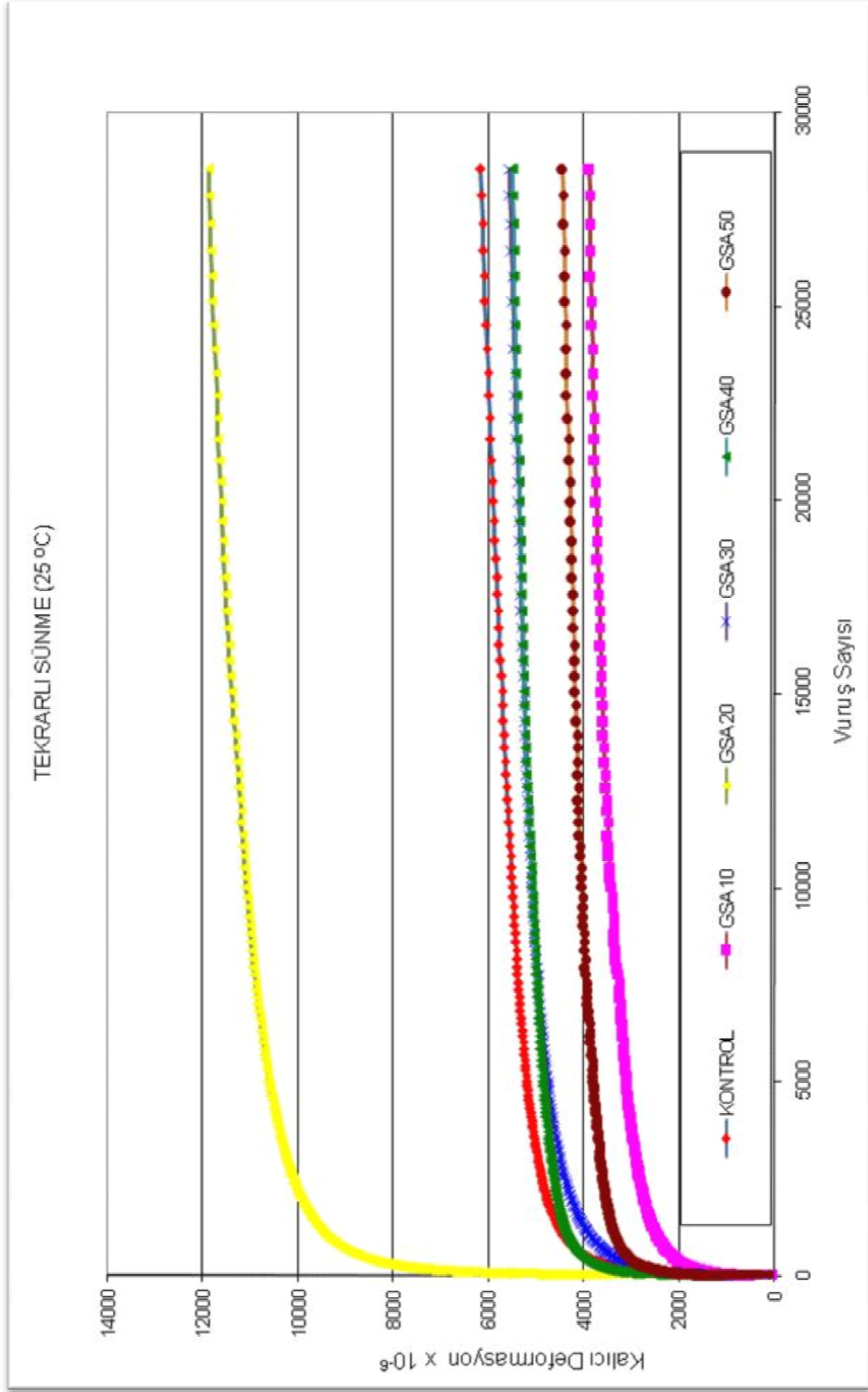
Deneyde numuneler, 5°C, 25°C ve 40°C sıcaklıkta 1000 μ s vuruş periyodu süresince 500 μ s yüklü ve 500 μ s yüksüz olmak üzere 250 kPa’lık tek eksenli basınç yüküne

28800 sn. boyunca maruz bırakılır ve her bir yük tekrarından sonra numune içerisinde oluşan kalıcı deformasyonlar ölçülür [26, 35, 66].

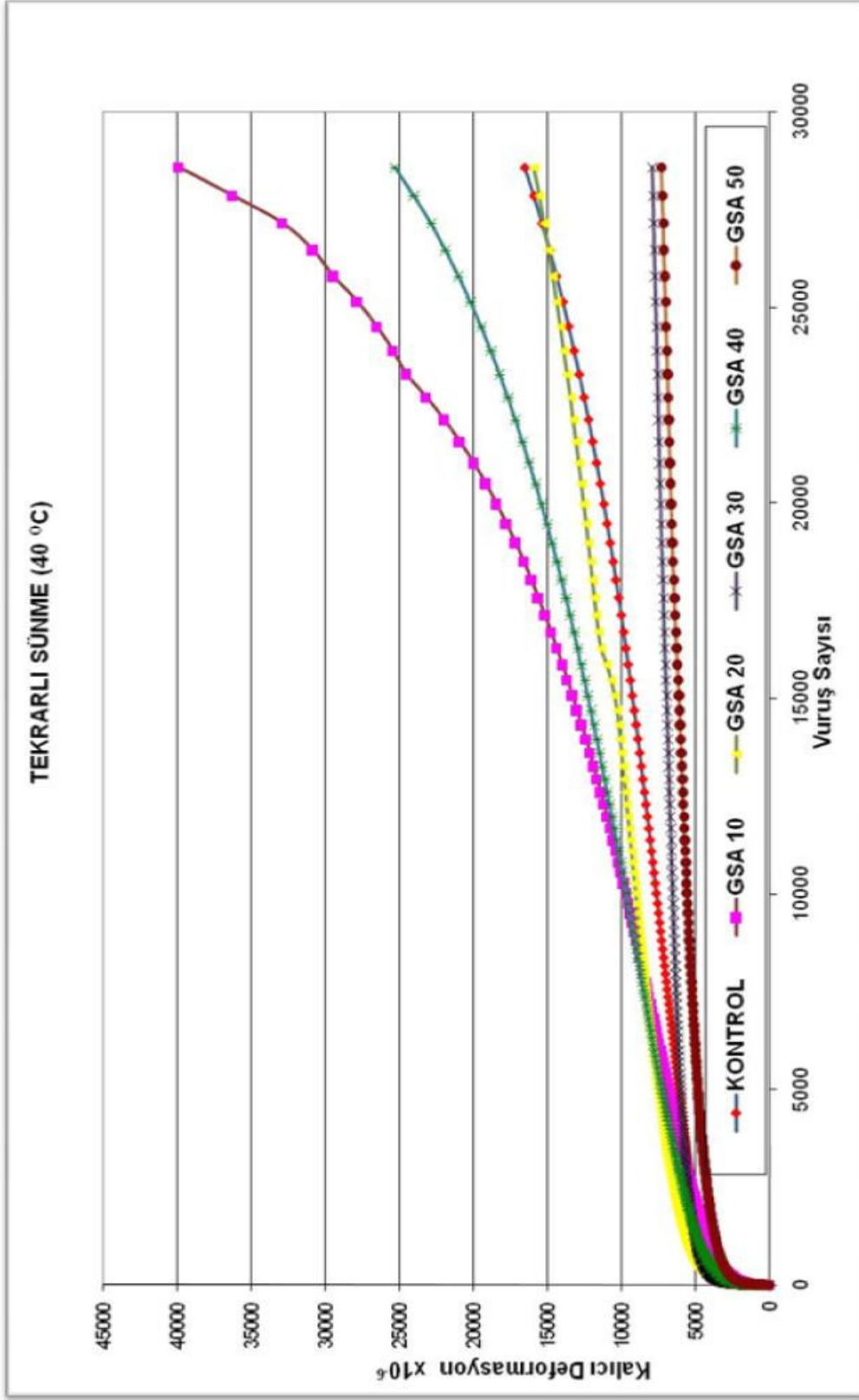
Bu çalışmada, yukarıda belirtildiği gibi, dinamik sünme deneyleri, 5°C, 25°C ve 40°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Her bir sıcaklık için üçer numuneye uygulanan deneylerin ortalama değerleri alınmıştır. Deney sonuçları Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



Şekil 5.21: Dinamik sünme deneyi, 5 °C



Şekil 5.22: Dinamik sünme deneyi, 25°C



Şekil 5.23: Dinamik sünme deneyi, 40 °C

Dinamik sünme deneyinde 5°C sıcaklıkta %20 GSF katkılı numunelerde oluşan deformasyonlar geleneksel karışımlara göre daha yüksek, %10, %30, %40 ve %50 GSF katkılı karışımlarda ise daha düşüktür. 25°C sıcaklıkta da sadece %20 GSF ilave edilen karışımlarda oluşan deformasyonlar geleneksel karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. 40°C sıcaklıkta %10, %40 ve %20 GSF katkılı karışımlarda oluşan deformasyonlar geleneksel karışımlara göre daha yüksek, %30 ve %50 GSF katkılı karışımlarda ise daha düşük çıkmıştır.

5.4.2.3 Dolaylı Çekme Deneyi

Dolaylı çekme deneyinin (ASTM D 4123-82) yapılmasıyla, laboratuarda hazırlanmış Marshall numunelerinin veya araziden alınmış karotların esneklik modülünün belirlenmesi amaçlanmaktadır. Deney, farklı sıcaklıklar ve değişik yükleme periyotları altında yapılmaktadır. Deneyde her bir sıcaklık ve yükleme periyodu için numunelere ait esneklik modülü değerleri belirlenir.

Esneklik modülü değerleri, malzemelerin kalitesini değerlendirmenin yanı sıra, kaplama tasarımını değerlendirme ve analiz yapma amacıyla girdi üretmeye de yaramaktadır. Bu deney yardımıyla sıcaklık, yükleme miktarı ve yükleme süresinin numune üzerindeki etkileri araştırılabilmektedir [35, 52, 53].

Esneklik modülü değerlerinin tespit edilmesi için yapılan deneyde, numunelere yarı sinüzoidal (haversin) basınç yükü uygulanır. Yük, silindirik asfalt numunesi üzerine düşey olarak uygulanmaktadır. Süre-yük eğrisine uygun olarak yapılan deney sonucunda numunenin yatay deformasyonun son hali ölçülür ve uygun bir poisson oranı kabul edilerek numunenin esneklik modülü hesaplanır. Deney düzeneği Şekil 5.24'te görülmektedir.

Elastisite Modülü değerlerinin bulunması için aşağıda yer alan denklem kullanılmaktadır.

$$E = \frac{P \times (v + 0,27)}{h \times \Delta h} \quad (5.10)$$

Burada;

E:Esneklik Modülü (Mpa)

P:Uygulanan yük (kN)

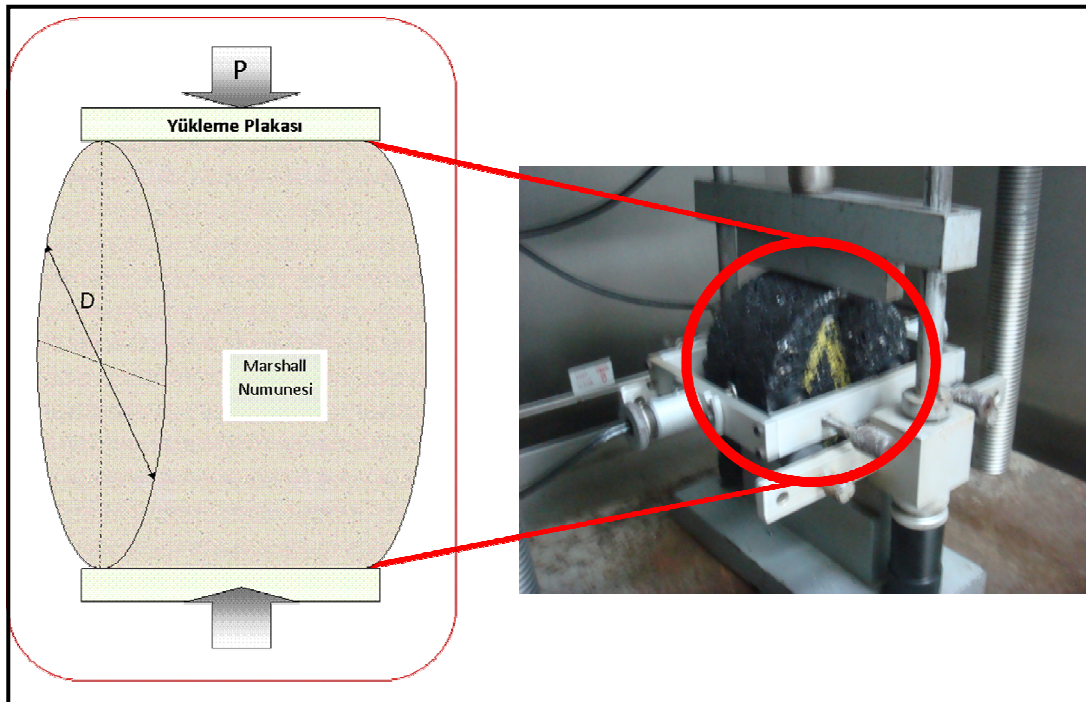
ν :Poisson oranı

h :Numune yüksekliği (in.)

Δh : Geri dönen deformasyon

Numuneler ısı kontrollü kabine yerleştirilerek, deney sıcaklığına gelmesi için şartlandırılır. Numunelerin deney sıcaklığına gelip gelmediği, kabin içindeki suni numune içerisine yerleştirilen bir ısı ölçer yardımıyla izlenebilmektedir.

Numune deney başlığına yerleştirilerek ön yükleme yapılır ve numunenin eksene yerleşmesi sağlanır. Numuneye dolaylı çekme mukavemeti değerinin %10 ila %50'si arasında değişen yük, belirlenen bir periyot boyunca beş kez yarı sinüzoidal (haversin) olarak uygulanır ve numune içerisinde oluşan yatay ve düşey deformasyonlar ölçülür. Deneydeki yük tekrürü için 0,33, 0,5 ve 1 Hz'lik frekansların uygulanması önerilmektedir.



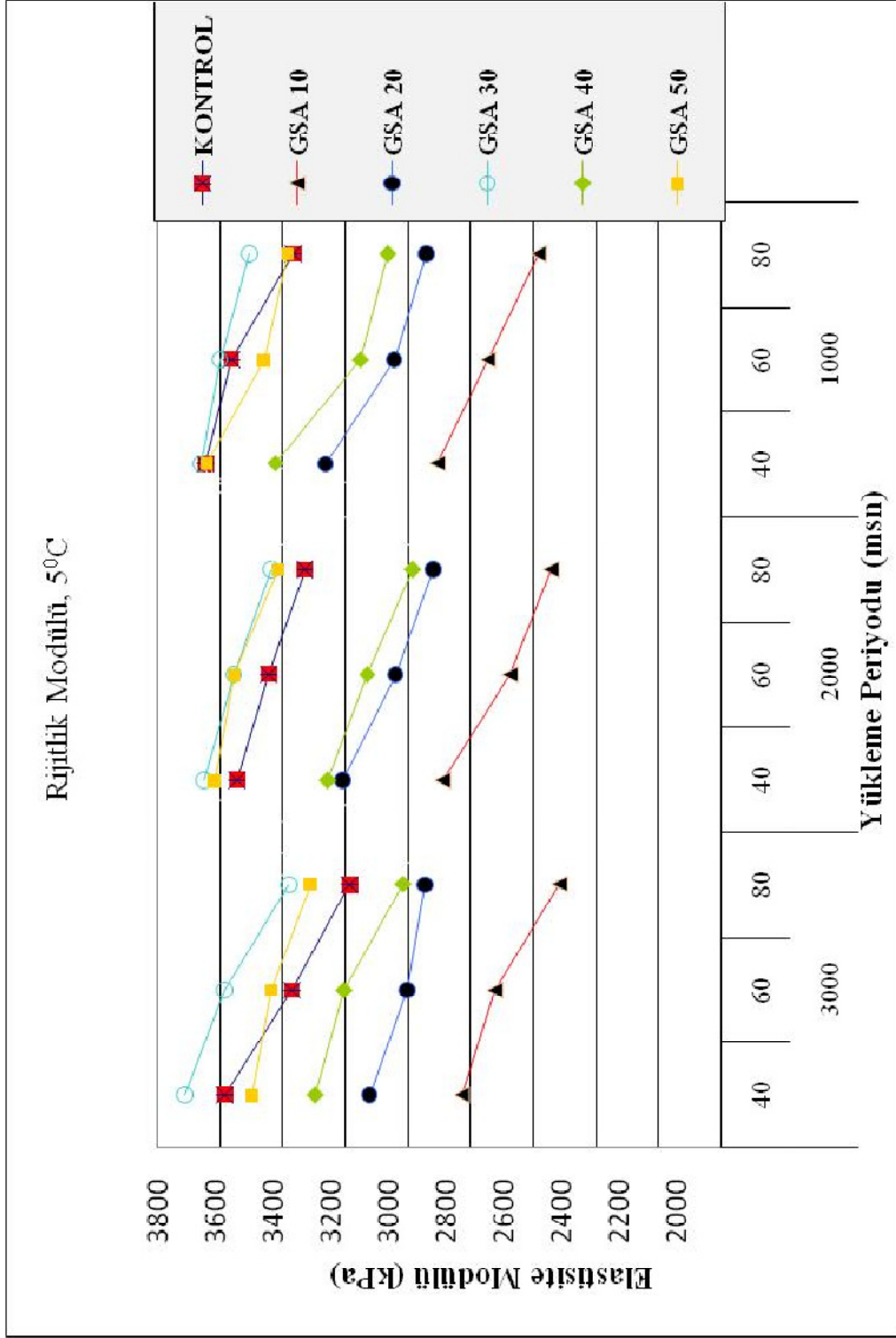
Şekil 5.24 : Dolaylı çekme deneyi düzeneği

Bu çalışmada, yükleme periyodu olarak yüksek yoğunluklu trafik için 1000, düşük yoğunluklu trafik için de 3000 ms'lik yk tekerrür süresi uygulanmıştır. Yükleme hızı olarak ağır dingil hızları için 40, hafif dingil hızları için 80 ms'lik hız değerleri seçilmiştir. Numunelere uygulanan yük ve yük-zaman-deformasyon ilişkisi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Esneklik modülü değeri için bir numune iki defa teste tabi tutulmuştur. İlk deney tamamlandıktan sonra, numune 90° döndürülerek ikinci kez teste tabi tutulmuş ve esneklik modülü değeri olarak bu sonucun ortalaması alınmıştır.

Esneklik Modülü için 5°C, 25°C ve 40°C sıcaklıkta yapılan deneylere ait sonuçlar Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'de ayrı ayrı verilmiştir. Bu deneyin tahribatsız olması nedeniyle, bir numuneye birden fazla testin uygulanması da mümkündür. Dolayısıyla, numunede kalıcı deformasyonları azaltmak için deneye en düşük sıcaklıklarda, en kısa yükleme süresi ve en düşük yük ile başlanmalıdır.

Çizelge 5.15: Dolaylı çekme deneyi, 5 °C

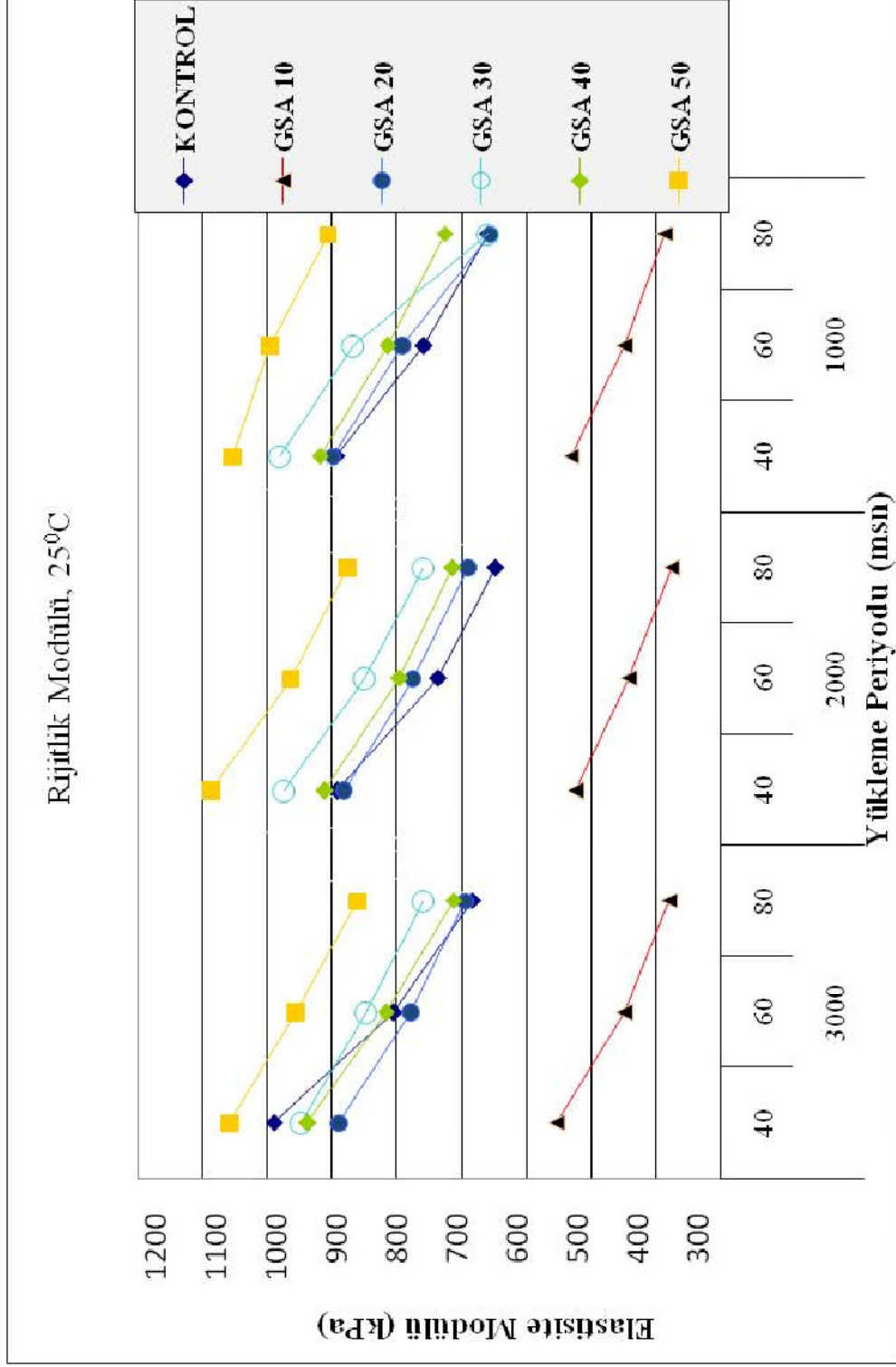
Elastisite E, 5 °C							
(psi)							
Yükleme Periyodu (µs)	Yükleme Hızı (µs)	KONTROL	GSA 10	GSA 20	GSA 30	GSA 40	GSA 50
3000	40	3,58E+06	2,83E+06	3,12E+06	3,71E+06	3,29E+06	3,50E+06
	60	3,37E+06	2,72E+06	3,00E+06	3,58E+06	3,20E+06	3,44E+06
	80	3,18E+06	2,51E+06	2,94E+06	3,38E+06	3,01E+06	3,31E+06
2000	40	3,54E+06	2,89E+06	3,21E+06	3,65E+06	3,25E+06	3,61E+06
	60	3,44E+06	2,67E+06	3,04E+06	3,56E+06	3,13E+06	3,55E+06
	80	3,33E+06	2,54E+06	2,92E+06	3,43E+06	2,98E+06	3,41E+06
1000	40	3,64E+06	2,91E+06	3,26E+06	3,66E+06	3,42E+06	3,64E+06
	60	3,56E+06	2,75E+06	3,04E+06	3,60E+06	3,15E+06	3,45E+06
	80	3,36E+06	2,58E+06	2,94E+06	3,50E+06	3,06E+06	3,38E+06
Elastik Deformasyon, 5 °C							
(µε)							
Yükleme Periyodu (µs)	Yükleme Hızı (µs)	KONTROL	GSA 10	GSA 20	GSA 30	GSA 40	GSA 50
3000	40	6,062	7,516	7,131	5,916	6,422	6,219
	60	6,495	7,857	7,691	6,238	6,799	6,458
	80	6,826	8,492	7,756	6,687	7,213	6,679
2000	40	6,136	7,378	6,928	5,952	6,403	5,962
	60	6,274	8,013	7,827	6,302	6,992	6,265
	80	6,421	8,124	7,829	6,541	7,342	6,582
1000	40	5,857	7,314	6,836	5,961	6,302	5,778
	60	6,099	7,756	7,572	6,201	6,983	6,412
	80	6,523	8,068	7,774	6,357	7,102	6,440



Şekil 5.25: Dolaylı çekme deneyi, 5°C

Çizelge 5.16 : Dolaylı çekme deneyi, 25 °C

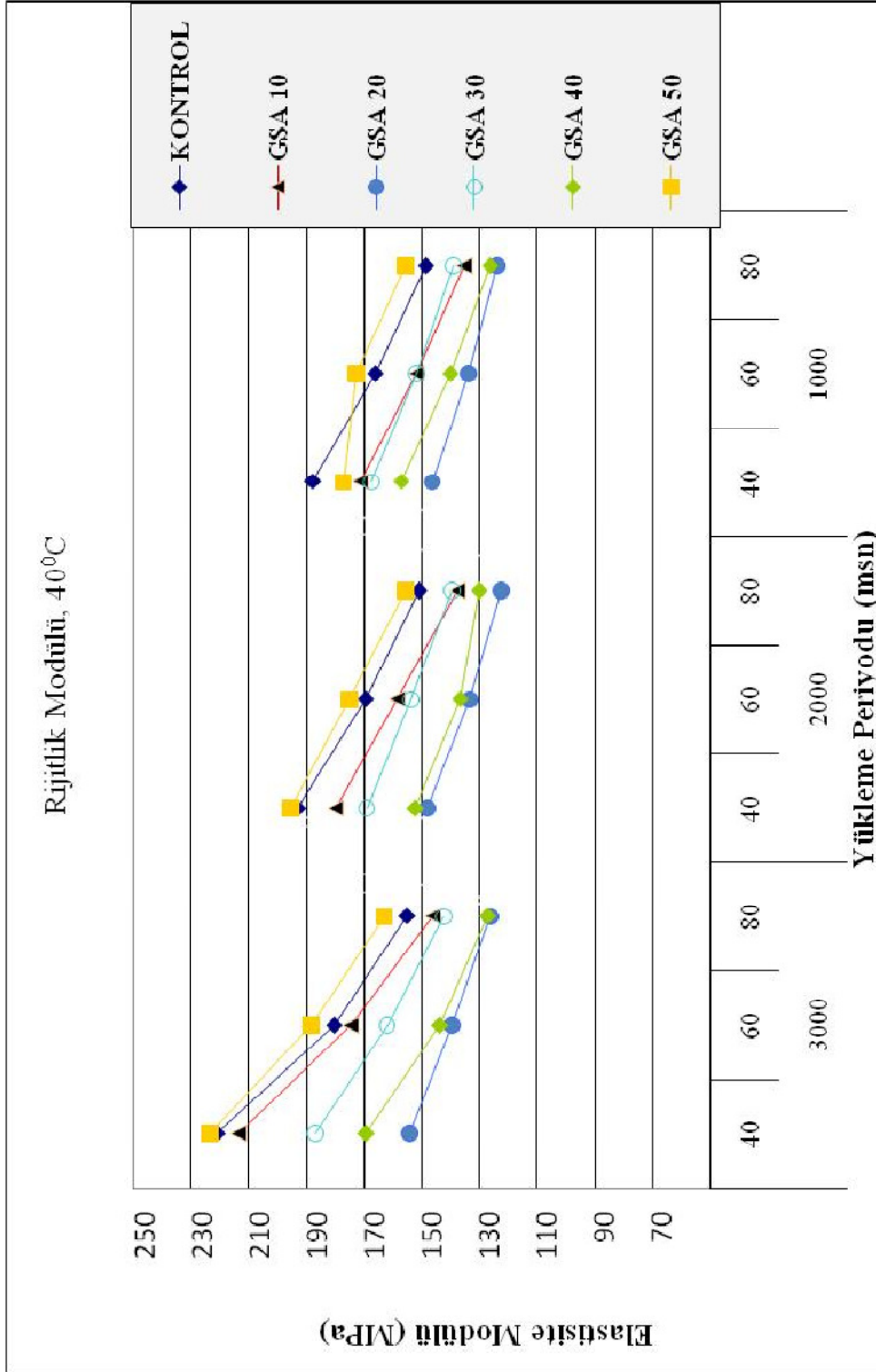
Elastisite E, 25 °C							
(psi)							
Yükleme Periyodu (µs)	Yükleme Hızı (µs)	KONTROL	GSA 10	GSA 20	GSA 30	GSA 40	GSA 50
3000	40	9,90E+05	5,54E+05	8,89E+05	9,46E+05	9,37E+05	1,06E+06
	60	8,05E+05	4,48E+05	7,79E+05	8,48E+05	8,17E+05	9,55E+05
	80	6,83E+05	3,80E+05	6,95E+05	7,60E+05	7,13E+05	8,61E+05
2000	40	8,91E+05	5,23E+05	8,81E+05	9,74E+05	9,10E+05	1,09E+06
	60	7,37E+05	4,41E+05	7,75E+05	8,48E+05	7,96E+05	9,63E+05
	80	6,47E+05	3,77E+05	6,90E+05	7,58E+05	7,15E+05	8,75E+05
1000	40	8,94E+05	5,31E+05	8,99E+05	9,81E+05	9,19E+05	1,05E+06
	60	7,58E+05	4,49E+05	7,92E+05	8,67E+05	8,15E+05	9,96E+05
	80	6,59E+05	3,86E+05	6,56E+05	6,59E+05	7,27E+05	9,05E+05
Şekil Değiştirme, 25 °C							
(µε)							
Yükleme Periyodu (µs)	Yükleme Hızı (µs)	KONTROL	GSA 10	GSA 20	GSA 30	GSA 40	GSA 50
3000	40	22,117	37,609	24,177	23,221	22,374	21,730
	60	26,597	47,012	28,363	26,532	26,505	25,447
	80	31,409	54,685	31,758	28,989	30,351	28,216
2000	40	24,159	40,562	24,297	22,052	22,963	21,298
	60	29,522	48,534	28,924	26,256	27,388	25,309
	80	32,770	54,556	32,126	29,412	30,396	27,958
1000	40	23,570	39,569	23,598	21,822	22,788	20,663
	60	28,474	47,637	28,041	25,843	26,799	24,398
	80	32,356	52,743	30,029	28,685	29,973	26,947



Şekil 5.26: Dolaylı çekme deneyi, 25°C

Çizelge 5.17: Dolaylı çekme deneyi, 40°C

Elastisite E, 40 °C							
(psi)							
Yükleme Periyodu (µs)	Yükleme Hızı (µs)	KONTROL	GSA 10	GSA 20	GSA 30	GSA 40	GSA 50
3000	40	2,21E+05	2,13E+05	1,54E+05	1,87E+05	1,69E+05	2,23E+05
	60	1,80E+05	1,74E+05	1,39E+05	1,62E+05	1,44E+05	1,88E+05
	80	1,55E+05	1,46E+05	1,26E+05	1,42E+05	1,27E+05	1,63E+05
2000	40	1,93E+05	1,80E+05	1,48E+05	1,69E+05	1,52E+05	1,95E+05
	60	1,70E+05	1,59E+05	1,33E+05	1,54E+05	1,37E+05	1,75E+05
	80	1,51E+05	1,38E+05	1,22E+05	1,39E+05	1,30E+05	1,56E+05
1000	40	1,88E+05	1,71E+05	1,46E+05	1,67E+05	1,57E+05	1,77E+05
	60	1,66E+05	1,52E+05	1,34E+05	1,52E+05	1,40E+05	1,72E+05
	80	1,49E+05	1,35E+05	1,24E+05	1,39E+05	1,26E+05	1,55E+05
Şekil Değişirme, 40°C							
(µε)							
Yükleme Periyodu (µs)	Yükleme Hızı (µs)	KONTROL	GSA 10	GSA 20	GSA 30	GSA 40	GSA 50
3000	40	95,319	100,812	140,103	115,022	128,425	111,253
	60	113,367	124,755	160,213	137,238	153,515	137,915
	80	137,820	142,152	175,558	156,065	172,328	155,762
2000	40	107,293	115,327	143,215	127,415	138,547	124,666
	60	127,362	134,820	164,768	145,273	160,012	144,444
	80	141,885	152,630	179,533	160,398	170,932	159,874
1000	40	109,542	120,745	145,173	128,353	135,668	127,482
	60	130,478	141,553	165,052	146,625	155,668	143,912
	80	144,738	155,897	178,457	159,587	172,200	158,843



Şekil 5.27: Dolaylı çekme deneyi, 40°C

5°C sıcaklıkta yapılan dolaylı çekme deneylerinden, %10, %20, %40 ve %50 GSF katkıli numunelere ait olanların esneklik modülü değerlerinin geleneksel karışımlara göre daha düşük, %30 GSF katkıli karışımlarda ise bu değer daha yüksek olduğu görülmüştür.

25°C sıcaklıkta yapılan deneylerde, %20, %30, %40 ve %50 GSF katkılı numunelerin enselik modülü değerleri geleneksel karışımlara göre daha yüksek, %10 GSF katkılı karışımlarda ise bu değer daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.26).

Şekil 5.27 incelendiğinde, 40°C sıcaklıkta %10, %20, %30 ve %40 GSF katkılı numunelerin enselik modülü değerleri geleneksel karışımlara göre daha düşük, %50 GSF katkılı karışımlarda ise bu değer daha yüksek olduğu görülmektedir.

Dolaylı çekme deneylerinin değerlendirilmesinde, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) 338 Asphalt Aggregate Mixture Analyzing System (AAMAS) çalışması neticesinde elde edilen karışımların rijitlik modüllerinin uygunluğu baz alınarak değerlendirilmiştir [65]. Söz konusu çalışmada rijitlik modülü, 2000 ms yükleme periyodu ve 60 ms'lik yükleme hızı için hazırlanmış olan bir nomograf yardımıyla karışım rijitliğinin sıcaklığa bağlı olarak düşük, yüksek veya normal değerlerde bir elastisite modülüne sahip olması belirlenebilmektedir.

Granüler sülfür bağlayıcılı karışımlarla geleneksel karışımların dolaylı çekme deney sonuçları üç farklı sıcaklıkta yapıldığından (5°C, 25°C, 40°C) üç farklı uygunluk aralığı esas alınarak karşılaştırma yapılmıştır.

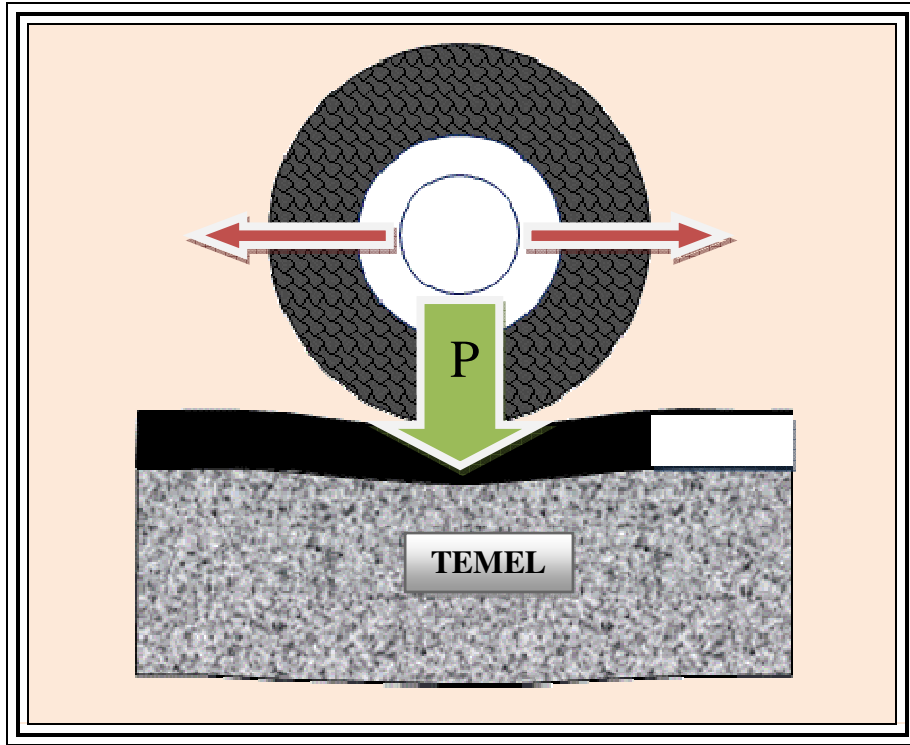
5°C sıcaklık için uygun elastisite modülü aralığı 9×10^2 ile 12×10^2 kPa, olarak verilmiştir. Bu aralığın üzerindeki değerler yüksek altındaki değerler ise düşük elastisite olarak verilmektedir. 25°C ve 40°C sıcaklıklarda ise bu aralık sırasıyla $3 \times 10^2 - 10 \times 10^2$ kPa, ve $1,5 \times 10^2 - 3,5 \times 10^2$ kPa. olarak verilmiştir. Belirtilen aralıkların üzerindeki değerler yüksek, altında kalan değerlerde ise elastisite modülü düşük olarak verilmektedir.

Elastisite modülü ile ilgili deney sonuçlarının yer aldığı Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27 incelendiğinde farklı karışımların farklı rijitlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Şekiller AAMAS nomograf sınır değerleriyle karşılaştırıldığında geleneksel karışım dahil, tüm karışımların düşük sıcaklıklarda (5°C) yüksek rijitlik modülüne sahip oldukları, ancak sıcaklığın artmasıyla beraber uygun bölge aralığına doğru geçtikleri görülmektedir. Orta sıcaklıklarda 25°C karışım numunelerinin hepsinin uygun bölge rijitlik modülü aralığında yer aldığı görülmüştür. 40°C sıcaklıkta ise GSA 20 ve GSA 40 düşük rijitlik modülüne sahip, diğer karışımlar ise uygun bölge rijitlik modülüne sahip oldukları görülmektedir.

5.4.3 Tekerlek İzi Deneyi

Tekerlek izi deneyi (EN 12697-22), yol kaplamalarının dingil yükleri altında meydana gelen kalıcı deformasyonlar ve tekerlek izi oluşumuna direncini belirlemek amacıyla yapılır. Dünyada yaygın olarak kullanılmakta olan tekerlek izi test cihazları LCPC (Fransa), APA (ABD), Hamburg (Almanya) ve Wheel Tracking Apparatus (İngiltere) şeklinde sıralanabilir. Bu cihazların bir kısmında metal tekerlek, bir kısmında lastik tekerlek kullanılmaktadır. Her birinin kendine özgü numune kalıpları ve çalışma yöntemleri bulunmaktadır. Şekil 5.28’de Tekerlek izi düzeneği görülmektedir



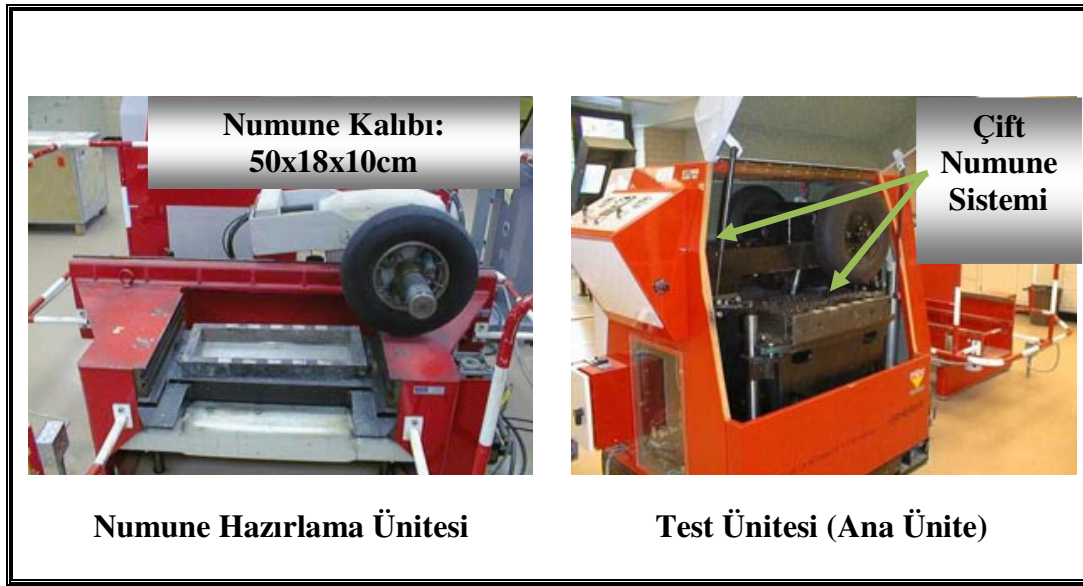
Şekil 5.28: Tekerlek izi deney düzeneği

Ülkemizde KGM Araştırma Daire Başkanlığında Fransa Yollar Laboratuvarı (LCPC)’nın geliştirdiği test cihazı kullanılmaktadır. LCPC test cihazı aynı anda iki farklı numuneyi test edecek ısı ayarlı ana ünite ile numunenin hazırlandığı sıkıştırma ünitesi olmak üzere iki ayrı bölümden oluşmaktadır [39].

LCPC cihazının numune test ünitesinde, ebatları 500mm x180mm x100mm olan iki adet kalıp bulunmaktadır. LCPC cihazının iki ünitesi Şekil 5.29’da görülmektedir.

Bitümlü sıcak karışım numunelerinin toplam ağırlığı, kalıp ebatları ve malzemenin yoğunluğu dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucu belirlenmektedir. Hesaplanan malzeme miktarı kalıpların içine yerleştirildikten sonra belirli bir sistemle sıkıştırılarak hazırlanmaktadır [26, 34, 39].

Hazırlanan numunelerin, test edilmeden önce, deney sıcaklığına gelmesi için ısı ayarlı test kabini içinde 12 saat bekletilmesi gerekmektedir. Deney iki kalıp içerisinde yer alan aynı özellikteki iki karışım numunesine uygulanır ve bulunan iki değer ortalaması alınır.



Şekil 5.29: Tekerlek izi cihazı üniteleri (LCPC)

Bu çalışmada, tekerlek izi deneyi KGM laboratuvarında bulunan LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numunelerde kullanılan optimum bağlayıcı, agrega gradasyonu ve malzeme özellikleri Marshall numuneleri için hazırlanan malzemeyle aynıdır. Deneyde kullanılmak üzere her bir karışım tipi için, 500x180x100 mm boyutlarında 2'şer adet olmak üzere, toplam 12 adet numune hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan tekerlek izi numuneleri Şekil 5.30'da gösterilmiştir. Agregası, bitüm ve granüler sülfür karışımının yoğunluğu optimum bağlayıcı miktarına bağlı olarak hesaplanmış ve numunenin ağırlığı ona göre hesaplanmıştır. Numune ağırlıkları içine yerleştirildikleri kalıp ebatlarına uyacak şekilde 22 kg olarak bulunmuştur. Numune içinde yer alan malzeme ile karışım yüzdeleri ve ağırlıkları Çizelge 5.18'de gösterilmektedir.



Şekil 5.30: Tekerlek izi deney numuneleri

Kalıplara dökülen gevşek haldeki karışımın kalıp üstünden taşarak dağılması için, kalıp alt tabla seviyesi belirli bir miktarda indirilmiştir. Bu miktar numune yüksekliğinin üçte biri kadardır. Sıkıştırma işlemine başlamadan önce cihazın lastik basıncı ile sistem basıncı 1,5 bar olacak şekilde ayarlanmıştır.

Çizelge 5.18: Tekerlek izi numuneleri malzeme miktarları

Numune No	Numune Kodu	GSF/Bitüm Oranı	Agrega Miktarı (kg)	Bitüm Miktarı (gr)	GSF Miktarı (gr)	Toplam Malzeme Miktarı (gr)
1	SA1	0/100	20.932	1.067,55	0,00	22000
2	SA2					
3	SA3	10/90	20.871	1.016,33	112,52	22000
4	SA4					
5	SA5	20/80	20.770	984,32	245,63	22000
6	SA6					
7	SA7	30/70	20.692	915,84	392,25	22000
8	SA8					
9	SA9	40/60	20.594	843,47	562,31	22000
10	SA10					
11	SA11	50/50	20.483	758,74	758,74	22000
12	SA12					

Etüvde 150°C sıcaklıkta bekletilen hazır bitümlü karışım, hızlı bir şekilde birkaç parti halinde kalıba dökülerek spatula yardımıyla düzeltilmiştir. Yüzeyi düzeltilmiş karışımın üniform bir şekilde kalıba yerleşmesi için, lastik tekerlek sırasıyla kalıbın arka kenarı ve orta eksenini doğrultusunda birer kez geçirilmiştir. Lastik tekerleğin geçişleriyle ön sıkıştırma işlemleri tamamlandıktan sonra, basınç miktarı 3 bar'a yükseltilmiştir. Karışımın seviyesi kalıpla aynı düzeye geldikten sonra, numune alt tabla yardımıyla itilerek yaklaşık 5 mm yükseltilmiş ve sıkıştırma işlemine devam edilmiştir.

Lastik ve sistem basıncı en son 5 bar seviyesine çıkarılarak sıkıştırma işlemi düzenli olarak tekrarlanmıştır. Sıkıştırma işlemi, sıkışabilirlik miktarı azalarak yaklaşık 0,5 mm oluncaya kadar sürdürülmüştür. Lastik tekerlek kullanılarak yapılan sıkıştırma işlemi, kalıbın ön ve arka kenarlarından 5'er ve orta ekseninden 3'er kez geçirilmesiyle tamamlanmıştır.

Sıkıştırma işlemi tamamlanan numuneler 12 saat süreyle 25°C sıcaklıkta bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış, havada ve suda tartılarak pratik özgül ağırlıkları (D_p) tespit edilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler GSF içindeki sülfür malzemesinin kararlı sertliğe ulaşması için 10 gün süreyle oda sıcaklığında bekletilmiştir.

Bu süre sonunda, test edilecek numuneler tekrar kalıba yerleştirilerek, deney ünitesine bağlanmıştır. Lastik basıncı her iki kalıp için 6 bar, tabla basıncı için 5 bar olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunenin kalıba oturması ve düzgün bir yüzeye sahip olması için 24°C sıcaklıkta lastik tekerlekle 1000 devir yaptırılmıştır. Bu yüzey seviyesi daha sonra yapılacak tekerlek izi derinliği için referans seviyesi olarak kabul edilmiştir.

Daha sonra numuneler deney sıcaklığı olan 60°C'ye gelmesi için etüvde 12 saat süreyle bekletilmiştir. Devir sayısı saniyede 1devir (1devir/sn) olacak şekilde sabit hızda ayarlanarak geçişler yapılmaya başlanmıştır. Bir geçiş, lastik tekerleğin numune üzerinde bir uçtan diğer uca bir kez gidip gelmesi şeklinde tanımlanmıştır. Numune üzerinde oluşan tekerlek izi derinlikleri 1000, 3000, 10000, 30000 ve 50000 devir sonlarında ölçülerek kaydedilmiştir. Devir geçişleri sonrası yapılan derinlik ölçümleri Şekil 5.31'de görülmektedir.



Şekil 5.31: Tekerlek izi deneyi derinlik ölçümleri (LCPC)

Devir işlemleri tamamlandıktan sonra tekerlek izinde oturma miktarları aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır [34, 39].

$$Y = A \left(\frac{N}{1000} \right)^B \quad (5.11)$$

Burada;

N: Devir sayısı

Y:N devirde oluşan tekerlek izi derinliği (%)

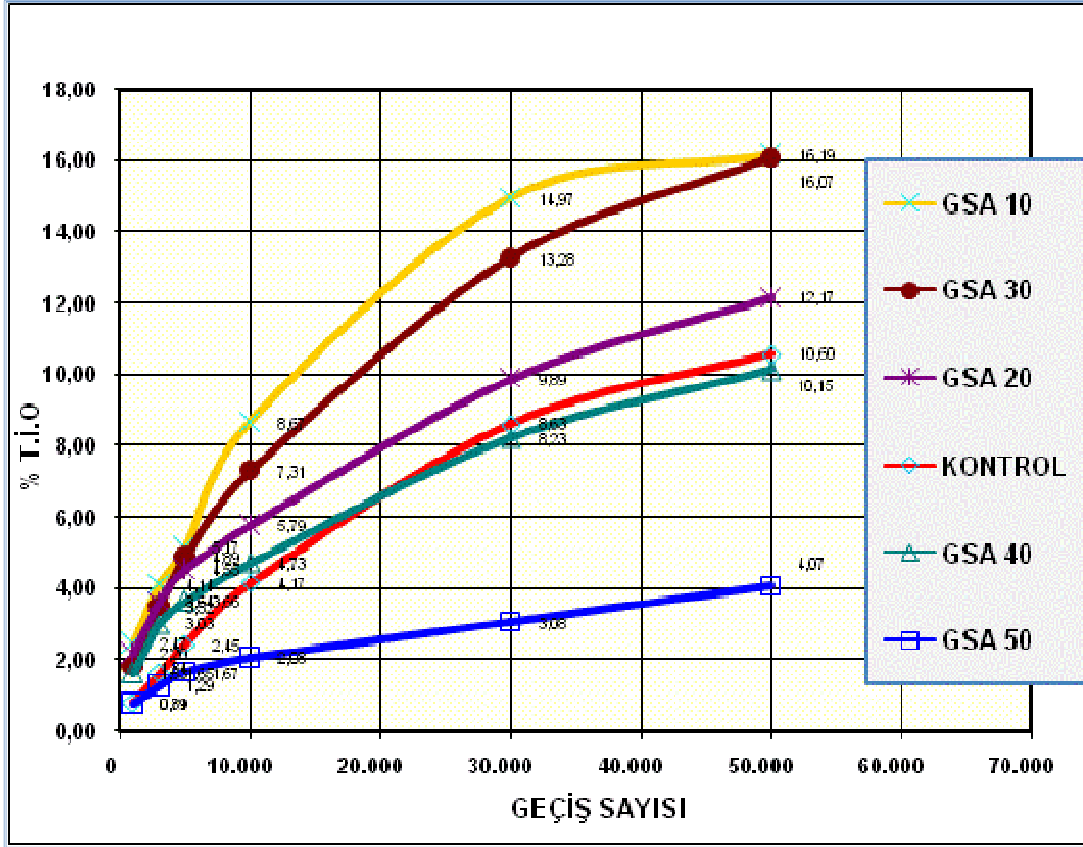
A:1000 devirde oluşan derinlik (%)

B:Logaritmik koordinatlarda doğrusal hattın eğimi

Deney sonuçları Çizelge 5.19'da verilmiştir.

Çizelge 5.19: Tekerlek izi oluşumu deney sonuçları

Karışım Tipi	Devir Sayısı					
	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
	Tekerlek İzi Oluşumu Derinliği (%)					
KONTROL	0,81	1,65	2,45	4,17	8,63	10,60
GSF 10	2,47	4,14	5,17	8,67	14,97	16,19
GSF 20	2,20	3,64	4,55	5,79	9,89	12,17
GSF 30	1,84	3,52	4,89	7,31	13,28	16,07
GSF 40	1,63	3,03	3,66	4,73	8,23	10,15
GSF 50	0,79	1,29	1,67	2,08	3,08	4,07

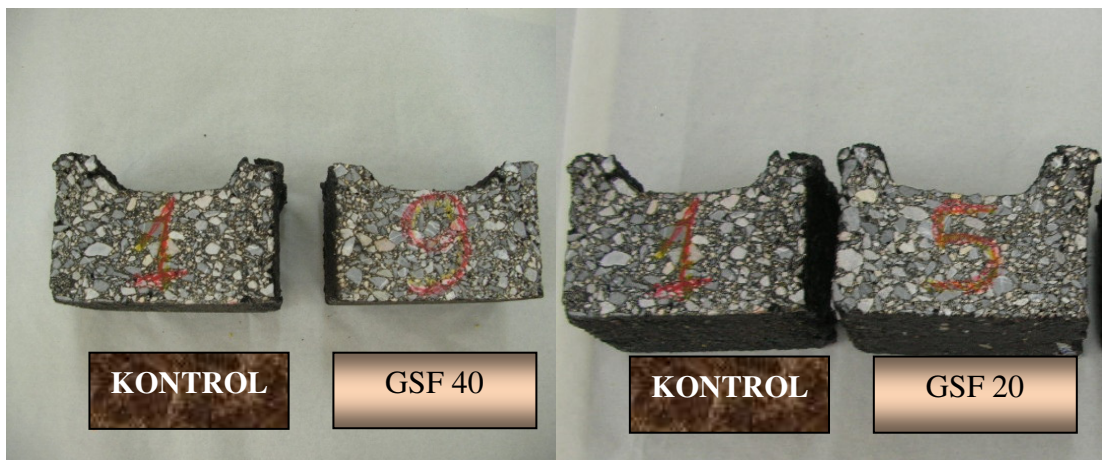


Şekil 5.32: Tekerlek izi oluşumu deneyi, 60°C LCPC Cihazı

Tekerlek izi oluşumu deneyinde %10, %20, ve %30 GSF katkıli karışım numunelerinde oluşan oluklanma derinliği geleneksel karışımlara göre daha yüksek, edilerek hazırlanan numuneler 40000 devire ulaşmadan dağılma eğilimi göstermiş ve deneysel çalışma 50000 devir yapılmadan tamamlanmıştır. Tekerlek izi derinliği numune kalınlığının %16'sının üzerine çıkmaya başlayınca cihaz deneyi otomatik olarak durdurmaktadır. %30 GSF ilave edilerek hazırlanan numunelerde oluşan tekerlek izi derinliği de maksimum derinlik seviyesine yaklaşmış ancak numune dağılma eğilimi göstermeden 50000 devir tamamlanmıştır. Kontrol amaçlı hazırlanmış numuneler ile %20 ve %40 GSF ilave edilerek hazırlanmış numunelerde birbirine yakın derinlik değerleri oluşmuştur. %50 GSF ilave edilerek hazırlanan numunelerde tekerlek izi oluşumu direnci geleneksel karışımlara göre oldukça yüksek çıkmıştır. Numunelerde oluşan tekerlek izi derinlikleri Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'te görülmektedir.



Şekil 5.33: Farklı karışım tiplerine göre tekerlek izi derinlikleri



Şekil 5.34: Tekerlek izi derinlikleri, Kontrol – GSA karşılaştırması

Şekil 5.33'te görüldüğü üzere, %40 GSF ile hazırlanan numunelerde oluşan tekerlek izi derinliği kontrol amaçlı hazırlanan geleneksel numunelere göre bir paralellik göstermekle birlikte daha az olmuştur. %50 GSF ilave edilerek hazırlanan numunelerde ise tekerlek izi derinliğine karşı direncin geleneksel numunelere oranla çok daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.

6.KALICI DEFORMASYON MODELLEMESİ

Sıcaklığa bağı olarak yükleme süresinin sülfürlü asfalt karışımı üzerindeki kalıcı deformasyon etkisini belirlemek üzere regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde sıcaklık ve yükleme süresi bağımsız değişken, deformasyon ise bağımlı değişken olarak belirlenmiştir. Yapılan regresyon analiziyle sıcaklık ve yükleme süresinin sülfürlü asfalt karışım numunesinde oluşan kalıcı deformasyonla ilişkisi araştırılmıştır. Oluşan deformasyonlar regresyon analiziyle modellenmiştir. Regresyon modellemesi istatistiksel analiz çözümleme programı SPSS kullanılarak yapılmıştır.

6.1 Statik Sünme Modeli

Statik Sünme deneyi, Universal Test Machine deney cihazı yardımıyla yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, Marshall tasarım yöntemiyle hazırlanmış olan silindirik numuneler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, 5°C, 25°C ve 40°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Deney cihazının koşullandırma kabini içinde istenen deney sıcaklığına ulaşan numunelere, yatay olarak ön yükleme yapılmıştır. Daha sonra 3600 saniye süreyle sabit yükleme yapılarak, yükleme süresi boyunca meydana gelen düşey deformasyonlar ölçülmüştür. Farklı oranlarda granüler sülfür ilave edilerek hazırlanan numunelere ait deformasyonlar tespit edilmiştir. Statik sünme sonuçları, yükleme sürelerine bağı olarak oluşan deformasyonların gösterildiği grafikler çizilerek geleneksel karışım sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Geleneksel karışımlara göre kalıcı deformasyon değerleri daha düşük olması nedeniyle, modelleme, sülfürlü asfalt karışımlarından GSA 40 (%40 granüler sülfür bağlayıcılı asfalt betonu) ve GSA 50 (%50 granüler sülfür bağlayıcılı asfalt betonu) için yapılmıştır.

6.1.1 GSA 40 Deformasyon Modeli

Statik Sünme deney verileriyle kurulan modelleme sonucu elde edilen tanımlayıcı istatistikler Çizelge 6.1'de, gösterilmiştir.

Çizelge 6.1: Tanımlayıcı istatistikler, Deformasyon – S.sünme GSA 40

Değişkenler	Ortalama	Standart Sapma	N
Deformasyon	2706,07	870,23	645
Sıcaklık	23,33	14,35	645
LogSüre	2,33	0,76	645

Çizelge 6.2’de görüldüğü gibi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki olmadığı için, korelasyon katsayısı sıfırdır.

Değişkenler arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.2’de, model özeti Çizelge 6.3’te, varyans analizi Çizelge 6.4’te, model katsayıları ise Çizelge 6.5’te, gösterilmiştir.

Çizelge 6.2: Değişkenler arasındaki korelasyonlar, S.sünme GSA 40

	Değişkenler	Deformasyon	Sıcaklık	LogSüre
Pearson Korelasyonu	Deformasyon	1,00	0,76	0,62
	Sıcaklık	0,76	1,00	0,00
	LogSüre	0,62	0,00	1,00
Anlamlılık (1-Uçlu)	Deformasyon		0,00	0,00
	Sıcaklık	0,00		0,50
	LogSüre	0,00	0,50	
N	Deformasyon	645	645	645
	Sıcaklık	645	645	645
	LogSüre	645	645	645

Regresyon denkleminin uygunluk ölçüsü olarak da kullanılan çoklu belirtme katsayısı R^2 , birden çok bağımsız değişkenin, bağımlı değişkeni açıklama miktarını vermektedir. R^2 , regresyon modeli ile açıklanabilen değişimin toplam değişim

içindeki yüzdesidir. Bir başka deyişle R^2 , bağımlı değişkenin varyansının regresyon modeli ile açıklanan oranıdır.

Çizelge 6.3: Model özeti^b, S.sünme GSA 40

Model	1	
R	0,98 ^a	
R kare	0,96	
Düzeltilmiş R kare	0,96	
Tahmin Edilen Standart Hata	176,52	
Değişim İstatistikleri	R kare değişimi	0,96
	F değişimi	7504,77
	df1	2
	df2	642
	F değişiminin anlamlılığı	0,00

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogSüre, Sıcaklık

b : Bağımlı Değişken : Deformasyon

Çizelge 6.4: Varyans analizi (ANOVA^b), S.sünme GSA 40

Model		Kareler toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık (p)
1	Regresyon	4,68E+08	2	233848259	7504	0,00 ^a
	Kalıntı	20004689	642	31159		
	Toplam	4,88E+08	644			

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogSüre, Sıcaklık

b : Bağımlı Değişken : Deformasyon

Bu modeldeki R^2 değeri ve düzeltilmiş R^2 değeri 0,959 olarak bulunmuştur. Modelin bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını sınınamaya yarayan ANOVA çizelgesindeki “F” değeri (7504,77), bu modelin bir bütün olarak her düzeyde anlamlı olduğu söylenebilir ($p = 0,00$) [33].

Çizelge 6.5: Katsayılar^a, S.sünme GSA 40

Model	1			
		Sabit	Sıcaklık	LogSüre
Standartlaştırılmamış Katsayılar	B	16,24	46,12	706,75
	Standart Hata	25,12	0,49	9,16
Standart Katsayılar	Beta	-	0,76	0,62
t		0,65	95,14	77,19
Anlamlılık (p)		0,52	0,00	0,00
B için %95 Güven Aralığı	Alt sınır	65,57	45,17	688,77
	Üst sınır	33,09	47,08	724,73
Korelasyonlar	Sıfır der.	-	0,76	0,62
	Kısmi	-	0,97	0,95
	Yarı Kısmi		0,76	0,62
Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	Tolerans	-	1,00	1,00
	VIF	-	1,00	1,00

a : Bağımlı değişken : Deformasyon

Katsayılar çizelgesinde regresyon katsayıları ve bunlara bağlı “t” istatistikleri görülmektedir. Modellemede “t” istatistiği değişkenlerin ayrı ayrı anlamlılıklarını sınamak amacıyla kullanılmaktadır. Çizelgedeki t istatistik değerlerinden, modeldeki “Sıcaklık” ve “Süre” değişkenlerin anlamlı olduğu “p” (anlamlılık) değerlerinden anlaşılmaktadır (p < 0,05 veya 0,01). Beta değerleri bağımsız değişkenlerin önem sırasını göstermektedir. Beta değeri büyük olan değişken daha önemlidir [33]. Statik sünme deneyinde süre ve sıcaklığın deformasyon üzerindeki önemi görülmektedir.

Yüzde 40 granüler sülfür ilave edilerek hazırlanan GSA 40 numunelerine ait katsayılarla (Çizelge 6.10) aşağıdaki model oluşturulmuştur.

$$Def_{40} = 16,24 + 46,12S + 706,75LogZ ; Z \geq 1 \quad (6.1)$$

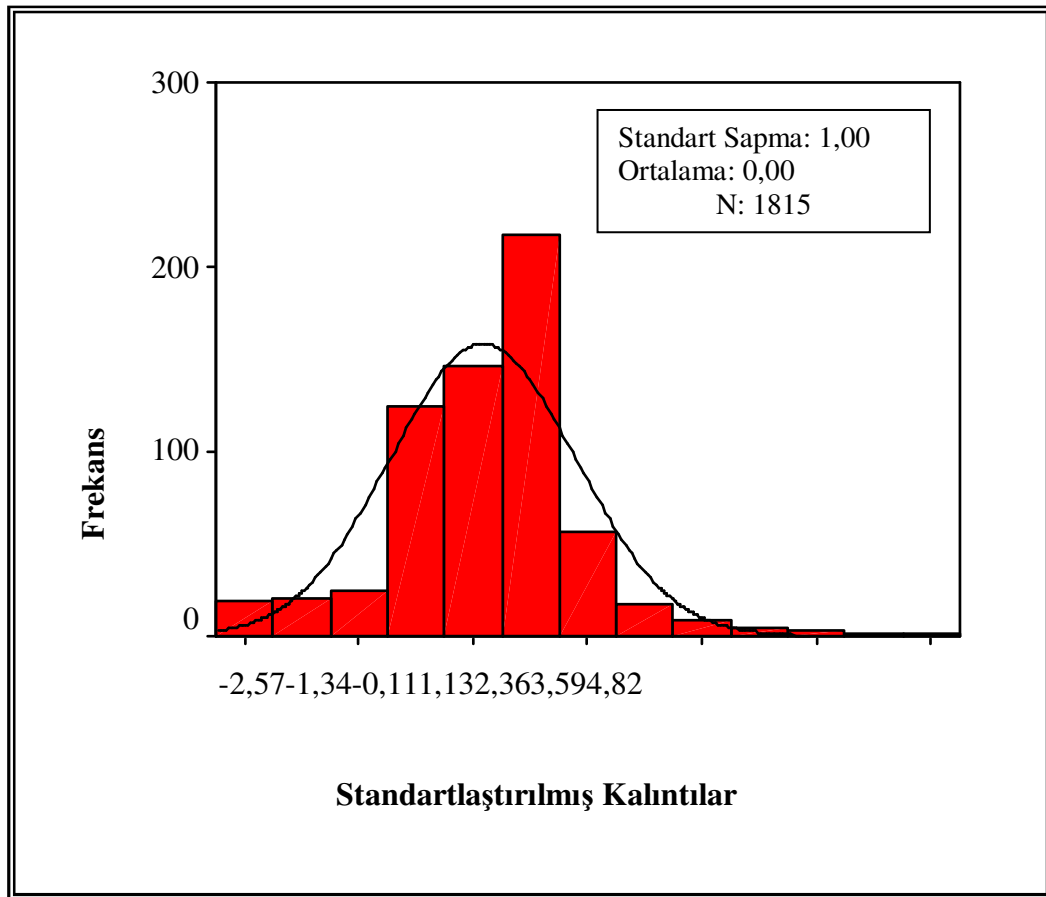
Def₄₀: GSA 40 numunelerinde yükleme sonrası oluşan deformasyon (%)

S: Yükleme sıcaklığı (°C)

Z: Yükleme süresi (sn.)

“Tolerans” ve “VIF” (Variance Inflation Factors – Varyans şişme değerleri) değerleri modelde çoklu doğrusal bağlantı sorunu olup olmadığını göstermektedir. Bağımsız değişkenlere ilişkin korelasyon matrisinin tersinin köşegen öğelerine VIF denilmektedir { $VIF = 1/(1-R^2)$ } [36].

Düşük tolerans ve yüksek VIF değerleri bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı olduğunu gösterir. Tolerans değerleri 0 ile 1, VIF değerleri ise 1 ile ∞ (sonsuz) aralığında değişir. Bu değerlerin 1’e yakın olması çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir [33, 36]. Kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık olmadığı görülmüştür.



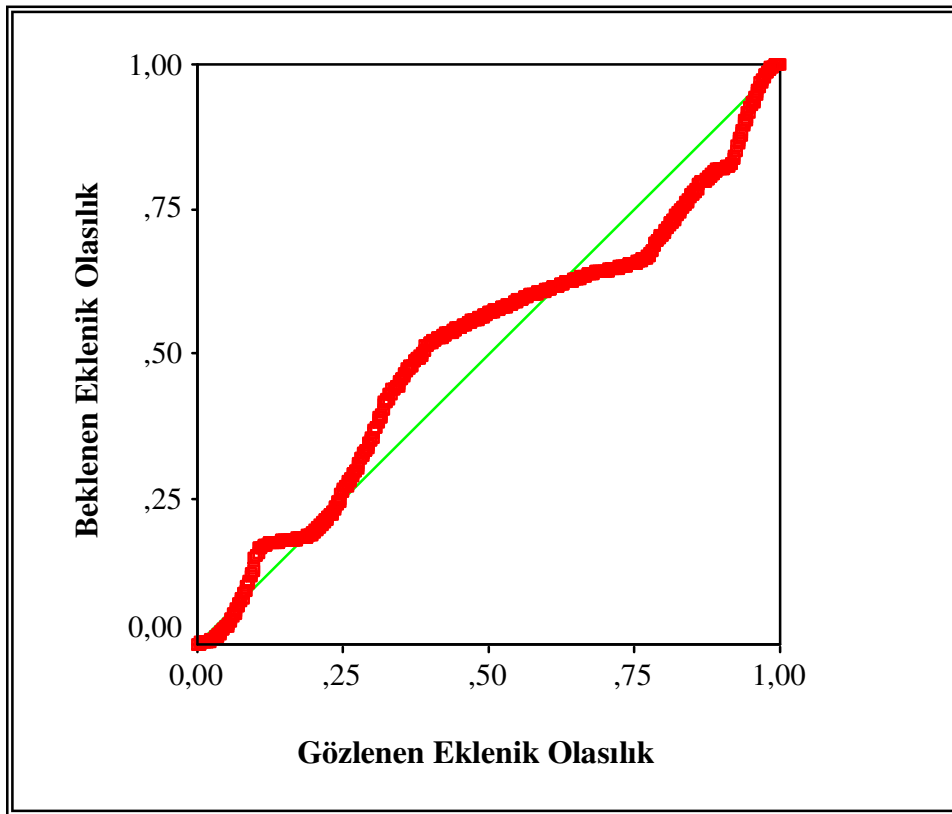
Şekil 6.1: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı, Statik sünme GSA 40

Bilindiği üzere, regresyon çözümlemesinin varsayımlarından biri de hataların normal dağıldığı varsayımdır. Normallikten sapma önemsenmeyecek bir düzeyde

olduğunda sonuçları etkilememektedir. Normallik varsayımının yerine gelip gelmediği kalıntıların incelenmesi ile yapılır. Görsel olarak histogram ve P-P grafiğinden yararlanılabilir [36].

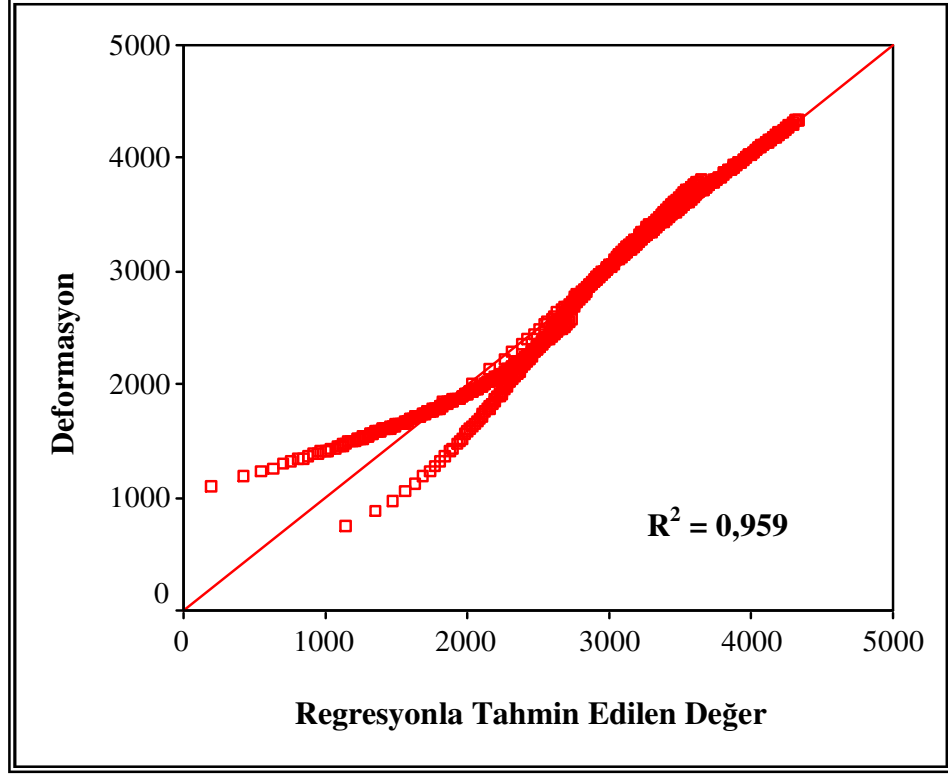
Şekil 6.1 histogramı incelendiğinde, standartlaştırılmış kalıntıların ortalamasının sıfır, standart sapmasının 1 olduğu görülmektedir. Normal dağılımda ortalama sıfır (0), standart sapma bir (1)'dir. Statik Sünme deneyinde kalıntıların normal dağıldığı söylenebilir.

Şekil 6.2'de standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği görülmektedir. Grafikte saçılımın doğru üzerinde veya etrafında kümelenmesi kalıntıların normal dağıldığını göstermektedir [33, 40].



Şekil 6.2: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği, S.sünme GSA 40

Modelde kullanılan gerçek değerler ile bunlara karşılık regresyon modelinin tahmin ettiği değerlerden oluşan saçılma grafiği Şekil 6.3'te görülmektedir. Grafikteki noktaların kümelenmesi modelin gücünü göstermektedir.



Şekil 6.3: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, S.ünme GSA 40

6.1.2 GSA 50 Deformasyon Modeli

Çizelge 6.6: Tanımlayıcı istatistikler, deformasyon - S.ünme GSA 50

Değişkenler	Ortalama	Standart Sapma	N
Deformasyon	3653,66	1459,62	645
Sıcaklık	23,33	14,35	645
LogSüre	2,33	0,76	645

Çizelge 6.7’de görüldüğü gibi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki olmadığı için, korelasyon katsayısı sıfırdır.

Değişkenler arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.7’de, model özeti Çizelge 6.8’de, varyans analizi Çizelge 6.9’da, model katsayıları ise Çizelge 6.10’da, gösterilmiştir.

Çizelge 6.7: Değişkenler arasındaki korelasyonlar, S.sünme GSA 50

	Değişkenler	Deformasyon	Sıcaklık	LogSüre
Pearson Korelasyonu	Deformasyon	1,00	0,89	0,44
	Sıcaklık	0,89	1,00	0,00
	LogSüre	0,44	0,00	1,00
Anlamlılık (1-Uçlu)	Deformasyon		0,00	0,00
	Sıcaklık	0,00		0,50
	LogSüre	0,00	0,50	
N	Deformasyon	645	645	645
	Sıcaklık	645	645	645
	LogSüre	645	645	645

Çizelge 6.8: Model özeti^b, S.sünme GSA 50

Model	1	
R	0,99 ^a	
R kare	0,99	
Düzeltilmiş R kare	0,99	
Tahmin Edilen Standart	147,98	
Değişim İstatistikleri	R kare değişimi	0,99
	F değişimi	31006,56
	df1	2
	df2	642
	F değişkeninin anlamlılığı	0,00

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogSüre, Sıcaklık

b : Bağımlı Değişken : Deformasyon

Modelin bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını sınınamaya yarayan ANOVA çizelgesindeki “F” değeri 31006 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç dolayısıyla modelin bir bütün olarak her düzeyde anlamlı olduğu söylenebilir ($p = 0,00$) [33].

Çizelge 6.9: Varyans analizi (ANOVA^b), S.sünme GSA 50

Model		Kareler	df	Kareler	F	Anlamlılık
1	Regresyon	1,36E+09	2	678988404	31006	0,00 ^a
	Kalıntı	14058654	642	21898		
	Toplam	1,37E+09	644			

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogSüre, Sıcaklık

b : Bağımlı Değişken : Deformasyon

Çizelge 6.10: Model katsayıları^a, S.sünme GSA 50

Model	1			
		Sabit	Sıcaklık	LogSüre
Standartlaştırılmamış Katsayılar	B	-429,91	90,82	843,43
	Standart Hata	21,06	0,41	7,68
Standart Katsayılar	Beta	-	0,89	0,44
t		-20,41	223,47	109,88
Anlamlılık (p)		0,00	0,00	0,00
B için %95 Güven Aralığı	Alt sınır	-471,26	90,02	828,35
	Üst sınır	-388,55	91,62	858,50
Korelasyonlar	Sıfır der.		0,89	0,44
	Kısmi		0,99	0,97
	Yarı Kısmi		0,89	0,44
Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	Tolerans		1,00	1,00
	VIF		1,00	1,00

a : Bağımlı değişken : Deformasyon

Yüzde 50 granüler sülfür bağlayıcılı GSA 50 numunelerine ait katsayılarla (Çizelge 6.10) aşağıdaki model oluşturulmuştur.

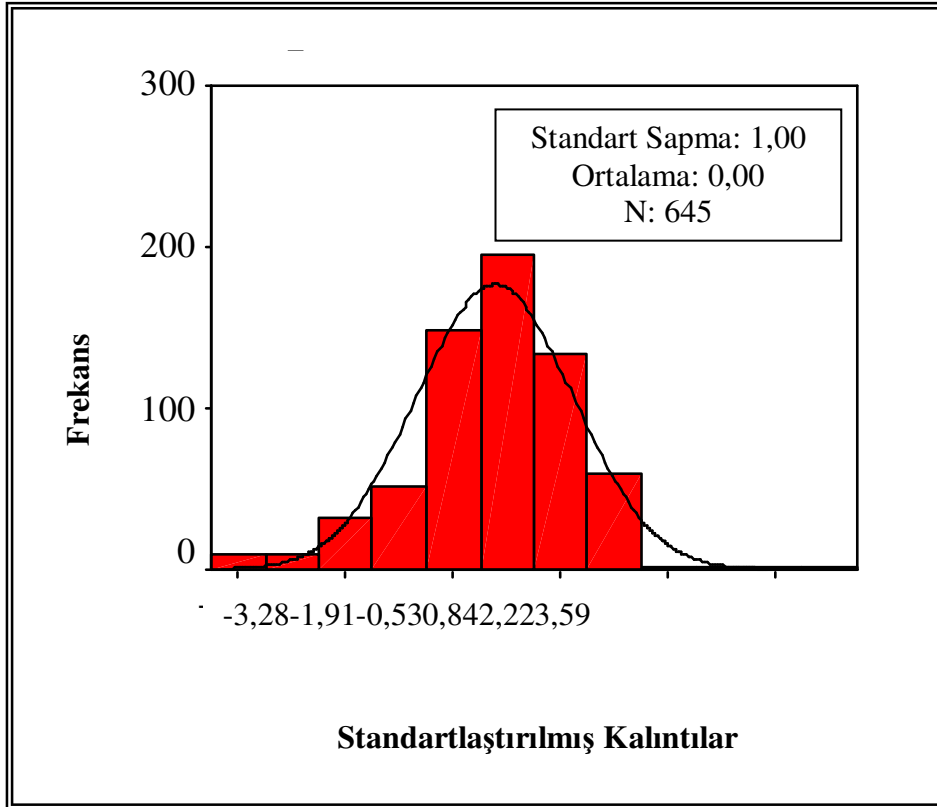
$$Def_{50} = -429,91 + 90,82S + 843,43LogZ; Z \geq 1 \quad (6.2)$$

Def₅₀: GSA 50 numunelerinde yükleme sonrası oluşan deformasyon (%)

S: Yükleme sıcaklığı (°C)

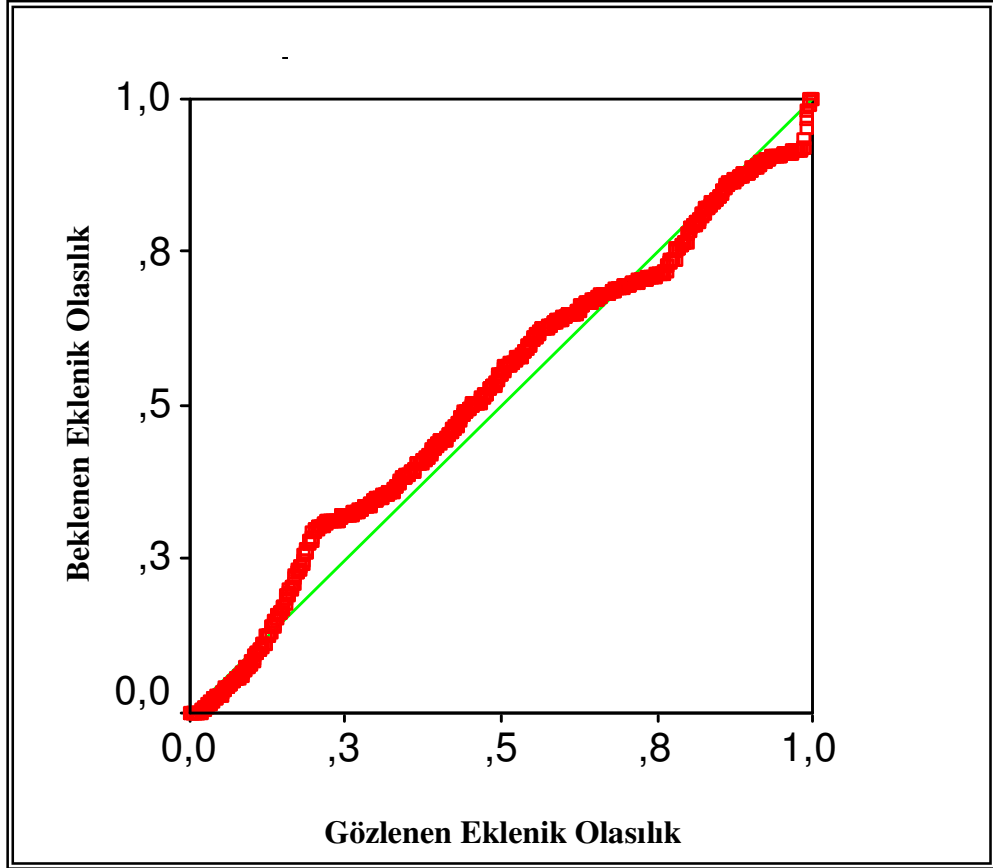
Z: Yükleme süresi (sn.)

“Tolerans” ve “VIF” değerleri modelde çoklu doğrusal bağlantı sorunu olup olmadığını göstermektedir. Düşük tolerans ve yüksek VIF değerleri bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı olduğunu gösterir. (Tolerans değerleri 0 ile 1, VIF değerleri ise 1 ile ∞ (sonsuz) aralığında değişir. Bu değerlerin 1’e yakın olması çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir [33, 36]. Kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık olmadığı görülmüştür.

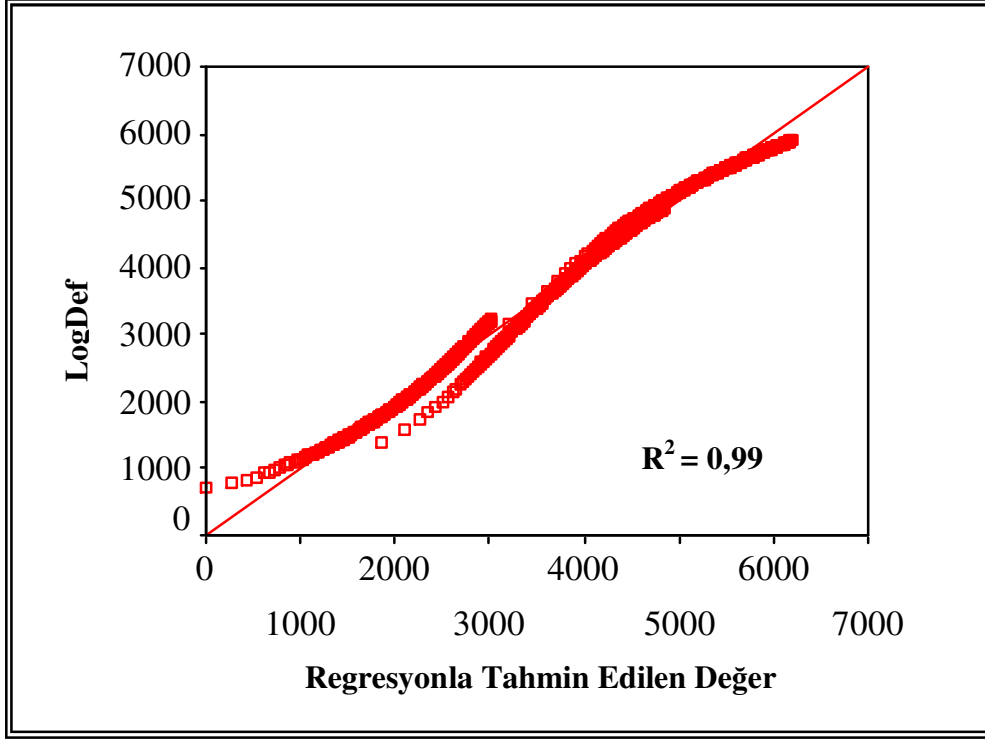


Şekil 6.4: Standartlaştırılmış kalıntıların histogramı, Statik sünme GSA 50

Bilindiği üzere, regresyon çözümlemesinin varsayımlarından biri de hataların normal dağıldığı varsayımdır. Normallikten sapma önemsenmeyecek bir düzeyde olduğunda sonuçları etkilememektedir. Normallik varsayımının yerine gelip gelmediği kalıntıların incelenmesi ile yapılır. Görsel olarak histogram ve P-P grafiğinden yararlanılabilir [36].



Şekil 6.5: Standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği, S.sünme GSA 50



Şekil 6.6: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, S. sünme GSA 50

6.2 Tekerlek İzi Modeli

Granüler sülfürün bitümlerle birlikte bağlayıcı olarak kullanıldığı asfalt karışımı üzerinde, devir sayısına bağlı meydana gelen kalıcı deformasyon etkisini belirlemek üzere regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde, deneysel çalışmaların uygulaması sırasında yapılan devir sayısı bağımsız değişken, devir sayısına bağlı olarak oluşan deformasyon ise bağımlı değişken olarak belirlenmiştir. Analiz yapılarak, devir sayısının farklı oranlardaki granüler sülfür bağlayıcılı karışımlar üzerindeki deformasyonlarla ilişkisi araştırılmıştır. Oluşan deformasyonlar regresyon analiziyle modellenmiştir. Regresyon modellemesi istatistiksel analiz çözüm programları kullanılarak yapılmıştır [29, 36, 37].

Deneysel çalışmalar sonucu geleneksel karışım numunelerine göre daha yüksek stabiliteye ve daha yüksek tekerlek izi oluşumu direncine sahip olmaları nedeniyle, modelleme GSA 40 ve GSA 50 karışımları için yapılmıştır.

Modelleme sonucu elde edilen tanımlayıcı istatistikler Çizelge 6.17’de, değişkenler arasındaki korelasyonlar ise Çizelge 6.18’te gösterilmiştir.

Model özeti Çizelge 6.19’da, varyans analizi Çizelge 6.20’de verilmiştir. Model katsayıları Çizelge 6.21’de, doğrusal bağımlılık durumu ise Çizelge 6.22’de gösterilmiştir.

6.2.1 GSA 40 Tekerlek İzi Modeli

GSA 40 regresyon analizi incelendiğinde, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarının yüksek olduğu görülmektedir. Bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki olmadığı için, korelasyon katsayısı sıfırdır.

Çizelge 6.11: Tanımlayıcı istatistikler, Deformasyon – T.izi GSA 40

Değişkenler	Ortalama	Standart Sapma	N
Log Tizi	0,64	0,29	6
LogDevir	3,89	0,63	6

Değişkenler arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.12’de, model özeti Çizelge 6.13’te, varyans analizi Çizelge 6.14’te, model katsayıları ise Çizelge 6.15’te, gösterilmiştir.

Çizelge 6.12: Değişkenler arasındaki korelasyonlar, T.izi GSA 40

	Değişkenler	Log Tizi	LogDevir
Pearson Korelasyonu	Log Tizi	1,00	0,99
	LogDevir	0,99	1,00
Anlamlılık (1-Uclu)	Log Tizi		0,00
	LogDevir	0,00	
N	Log Tizi	6	6
	LogDevir	6	6

Çizelge 6.12’de görüldüğü gibi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki olmadığı için, korelasyon katsayısı sıfırdır [29, 37].

Çizelge 6.13: Model özeti^b, T.izi GSA 40

Model	1	
R	0,99 ^a	
R kare	0,99	
Düzeltilmiş R kare	0,99	
Tahmin Edilen Standart Hata	2,090E-02	
Değişim İstatistikleri	R kare değişimi	0,99
	F değişimi	970,02
	df1	1
	df2	4
	F değişkeninin anlamlılığı	0,00

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogDevir

b : Bağımlı Değişken : Log Tizi

Regresyon denkleminin uygunluk ölçüsü olarak da kullanılan “Çoklu belirtme katsayısı” R^2 , birden çok bağımsız değişkenin, bağımlı değişkeni açıklama miktarını vermektedir. R^2 , bağımlı değişkenin varyansının regresyon modeli ile açıklanan oranıdır.

Çizelge 6.14: Varyans analizi (ANOVA^b), T.izi GSA 40

Model		Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık (p)
1	Regresyon	0,42	1	0,42	970	0,00 ^a
	Kalıntı	1,747E-03	4	4,367E-04		
	Toplam	0,43	5			

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogDevir

b : Bağımlı Değişken : Log Tizi

Modeldeki bağımsız değişken sayısı arttığında R^2 artar. Fakat serbestlik derecesi azaldığından, tahmin hataları artar. Bu nedenle modelin anlamlılığını ölçerken, R^2 'de

bir düzeltme yapmak gerekir. Bu durumda düzeltilmiş R^2 'ye bakılmalıdır. Çünkü düzeltilmiş R^2 , yalnızca eklenen değişken model ile ilişkili ise artmaktadır [33, 36, 40]. Bu modeldeki R^2 değeri 0,99 ve düzeltilmiş R^2 değeri de 0,99 olarak bulunmuştur.

Çizelge 6.15: Katsayılar^a, T.izi GSA 40

Model	1		
		Sabit	LogDevir
Standartlaştırılmamış Katsayılar	B	-1,14	0,46
	Standart hata	0,06	0,02
Standart Katsayılar	Beta	-	0,99
t		-19,73	31,15
Anlamlılık (p)		0,00	0,00
B için %95 Güven Aralığı	Alt sınır	-1,31	0,42
	Üst sınır	0,98	0,50
Korelasyonlar	Sıfır der.	-	0,99
	Kısmi	-	0,99
	Yarı kısmi		0,99
Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	Tolerans	-	1,00
	VIF	-	1,00

a : Bağımlı değişken : Log Tizi

Modelin bir bütün olarak anlamlı olup olmadığını sınınamaya yarayan ANOVA çizelgesindeki “F” değeri 970 olarak bulunmuştur. Bu modelin bir bütün olarak her düzeyde anlamlı olduğu söylenebilir ($p = 0,00$) [33].

Katsayılar çizelgesinde regresyon katsayıları ve bunlara bağlı “t” istatistikleri görülmektedir. Modellemede “t” istatistiği değişkenlerin ayrı ayrı anlamlılıklarını test etmek amacıyla kullanılmaktadır. Çizelgedeki “t” istatistik değerlerinden,

modeldeki “devir” değişkeninin anlamlı olduğu “p” (anlamlılık) değerlerinden anlaşılmaktadır ($p < 0,05$ veya $0,01$). Beta değerleri bağımsız değişkenlerin önem sırasını göstermektedir. Beta değeri büyük olan değişken daha önemlidir [33]. Tekerlek izi deneyinde devir sayısının kalıcı deformasyon üzerindeki önemi görülmektedir. Çizelge 6.15’te yer alan katsayılarla GSA 40 karışımlarına ait aşığıdaki model oluşturulmuştur.

$$\text{Log}T_{i40} = -1,14 + 0,46\text{Log}D_v \quad (6.3)$$

$$= \text{Log} (0,072444 \times D_v^{0,46})$$

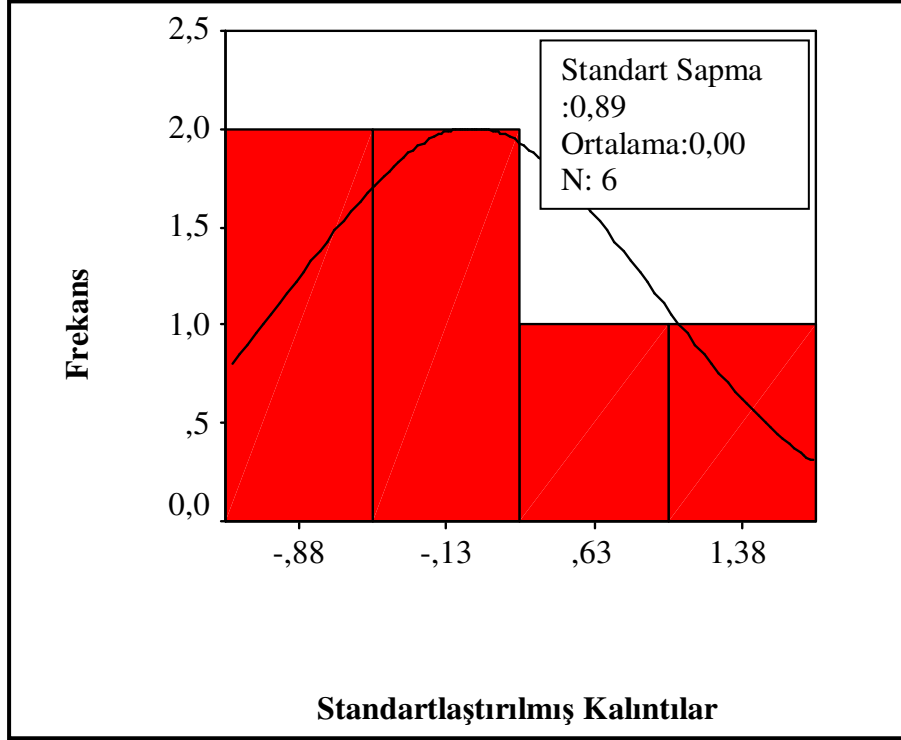
$$T_{i40} = 7,24 \times 10^{-2} \times D_v^{0,46} \quad ; \quad D_v \geq 0 \quad (6.4)$$

T_{i40} : Tekerlek izi derinliği (%)

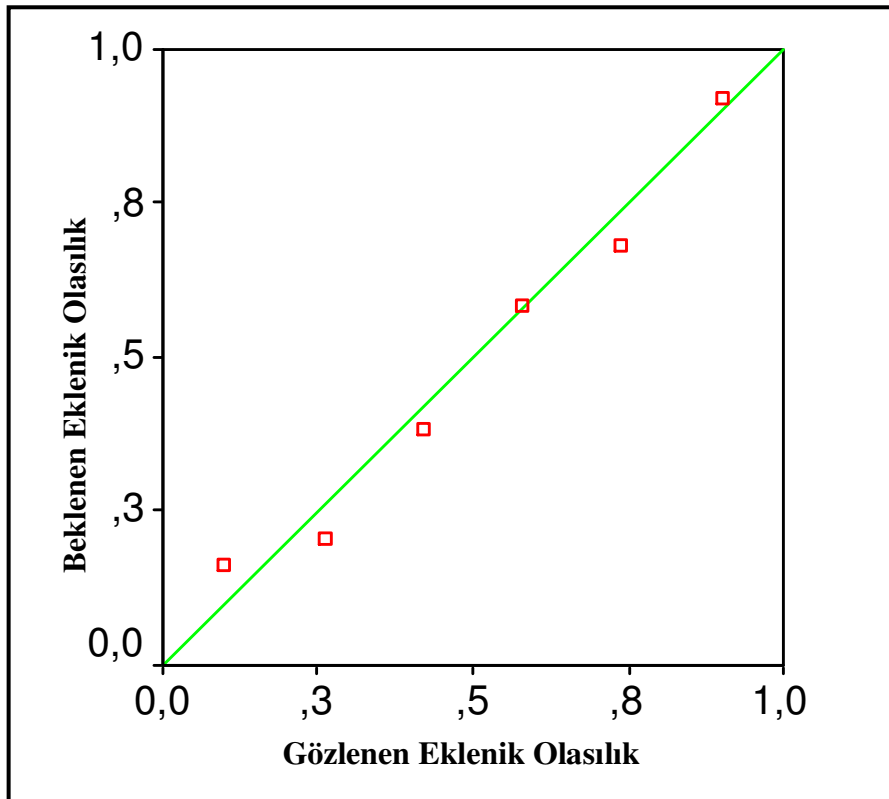
D_v : Tekerlek devir sayısı

“Tolerans” ve “VIF” değerleri modelde çoklu doğrusal bağlantı sorunu olup olmadığını göstermektedir. Düşük tolerans ve yüksek VIF değerleri bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı olduğunu gösterir. Tolerans değerleri 0 ile 1, VIF değerleri ise 1 ile ∞ (sonsuz) aralığında değişir. Bu değerlerin 1’e yakın olması çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir [33, 36]. Tekerlek izi GSA 40 karışımı kalıcı deformasyonu ile ilgili kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık olmadığı söylenebilir.

Bilindiği üzere, regresyon çözümlemesinin varsayımlarından biri de hataların normal dağıldığı varsayımdır. Normallikten sapma önemsenmeyecek bir düzeyde olduğunda sonuçları etkilememektedir. Normallik varsayımının yerine gelip gelmediği kalıntıların incelenmesi ile yapılır. Görsel olarak histogram ve P-P grafiğinden yararlanılabilir [36].



Şekil 6.7: Standartlaştırılmış kalıntılarının histogramı, T.izi GSA 40

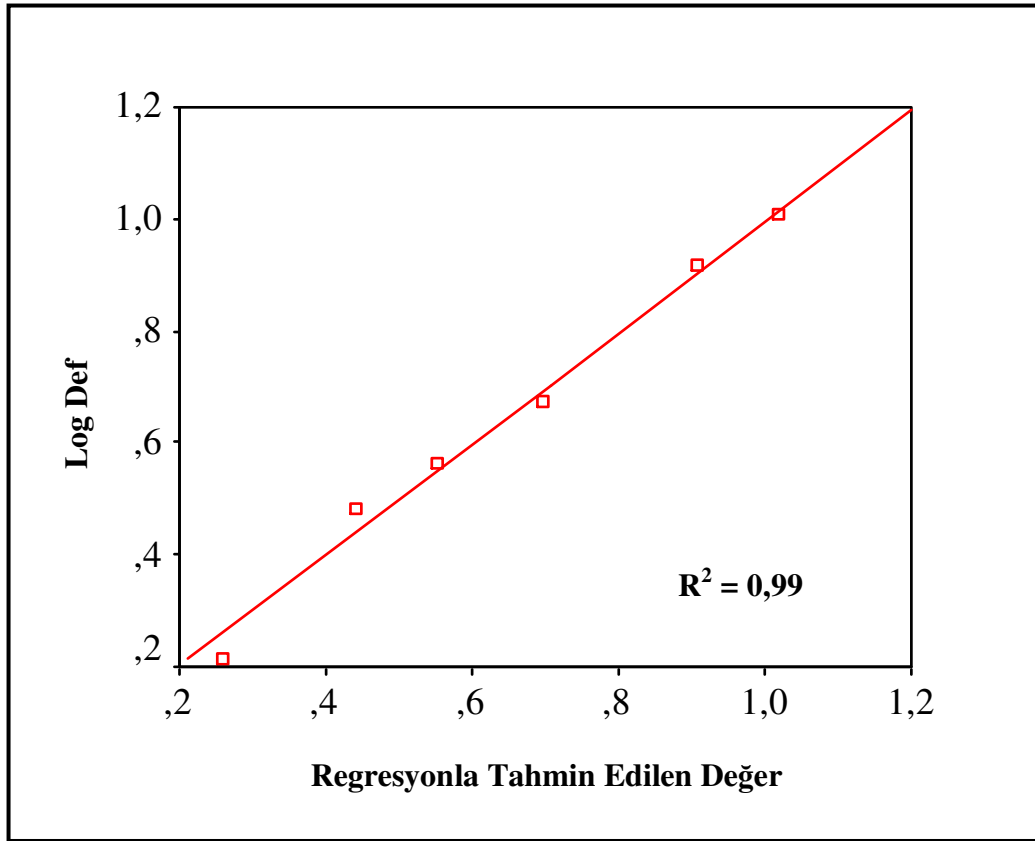


Şekil 6.8: Standartlaştırılmış kalıntılarının normal P-P grafiği, T.izi GSA 40

Şekil 6.7 histogramı incelendiğinde, standartlaştırılmış kalıntıların ortalamasının sıfır, standart sapmasının 0,89 olduğu görülmektedir. Normal dağılımda ortalama sıfır (0), standart sapma bir (1)'dir. Tekerlek izi GSA 40 karışımı deneyinde kalıntıların normal dağıldığı söylenebilir.

Şekil 6.8'de standartlaştırılmış kalıntıların normal P-P grafiği görülmektedir. Grafikte saçılımın doğru üzerinde veya etrafında kümelenmiş olması kalıntıların normal dağıldığını göstermektedir.

Modelde kullanılan gerçek değerler ile bunlara karşılık regresyon modelinin tahmin ettiği değerlerden oluşan saçılma grafiği Şekil 6.9'da görülmektedir. Grafikteki noktaların doğru etrafında kümelenmesi modelin gücünü göstermektedir.



Şekil 6.9: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, T.izi GSA 40

6.2.2 GSA 50 Tekerlek İzi Modeli

Tekerlek izi oluşumuna karşı geleneksel karışım numunelerine göre oldukça yüksek direnç gösteren GSA 50 numuneleri için regresyon analizi yapılmıştır. Söz konusu

regresyon analizi incelendiğinde, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon katsayılarının yüksek olduğu görülmektedir. Bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki olmadığı için, korelasyon katsayısı sıfırdır.

Çizelge 6.16 : Tanımlayıcı istatistikler, Deformasyon – T.izi GSA 50

Değişkenler	Ortalama	Standart Sapma	N
Log Tizi	0,27	0,26	6
LogDevir	3,89	0,63	6

Çizelge 6.17’de görüldüğü üzere, bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki korelasyon katsayıları yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki olmadığı için, korelasyon katsayısı sıfırdır.

Değişkenler arasındaki korelasyonlar Çizelge 6.17’de, model özeti Çizelge 6.18’de, varyans analizi Çizelge 6.19’da, model katsayıları ise Çizelge 6.20’de, gösterilmiştir.

Çizelge 6.17: Değişkenler arasındaki korelasyonlar, T.izi GSA 50

	Değişkenler	Log Tizi	LogDevir
Pearson Korelasyonu	Log Tizi	1,00	0,99
	LogDevir	0,99	1,00
Anlamlılık (1-Uçlu)	Log Tizi		0,00
	LogDevir	0,00	
N	Log Tizi	6	6
	LogDevir	6	6

Çizelge 6.12’de görüldüğü gibi, bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki korelasyon katsayıları yüksektir. Bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki olmadığı için, korelasyon katsayısı sıfırdır [29, 37].

Çizelge 6.18: Model özeti^b, T.izi GSA 50

Model	1	
R	0,99 ^a	
R kare	0,99	
Düzeltilmiş R kare	0,99	
Tahmin Edilen Standart Hata	1,969E-02	
Değişim İstatistikleri	R kare değişimi	0,99
	F değişimi	851,05
	df1	1
	df2	4
	F değişkeninin anlamlılığı	0,00

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogDevir

b : Bağımlı Değişken : Log Tizi

Çizelge 6.19: Varyans analizi (ANOVA^b), T.izi GSA 50

Model		Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Anlamlılık (p)
1	Regresyon	0,33	1	0,33	851	0,00 ^a
	Kalıntı	1,551E-03	4	3,878E-04		
	Toplam	0,33	5			

a : Tahmin edilen değişkenler : (sabit), LogDevir

b : Bağımlı Değişken : Log Tizi

“Tolerans” ve “VIF” değerleri modelde çoklu doğrusal bağlantı sorunu olup olmadığını göstermektedir. Düşük tolerans ve yüksek VIF değerleri bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağlantı olduğunu gösterir. Tolerans değerleri 0 ile 1, VIF değerleri ise 1 ile ∞ (sonsuz) aralığında değişir. Bu değerlerin 1’e yakın olması çoklu doğrusal bağımlılık sorunu olmadığını gösterir [33, 36].

Çizelge 6.20: Model katsayıları^a, T.izi GSA 50

Model	1		
		Sabit	LogDevir
Standartlaştırılmamış Katsayılar	B	-1,30	0,41
	Standart Hata	0,06	0,01
Standart Katsayılar	Beta	-	0,99
t		-23,83	29,17
Anlamlılık (p)		0,00	0,00
B için %95 Güven Aralığı	Alt sınır	-1,45	0,37
	Üst sınır	-1,15	0,44
Korelasyonlar	Sıfır der.	-	0,99
	Kısmi	-	0,99
	Yarı Kısmi		0,99
Doğ. Bağımlılık İstatistikleri	Tolerans	-	1,00
	VIF	-	1,00

a : Bağımlı değişken : Log Tizi

Çizelge 6.20’de yer alan katsayılarla GSA 50 karışımlarına ait aşağıdaki model oluşturulmuştur.

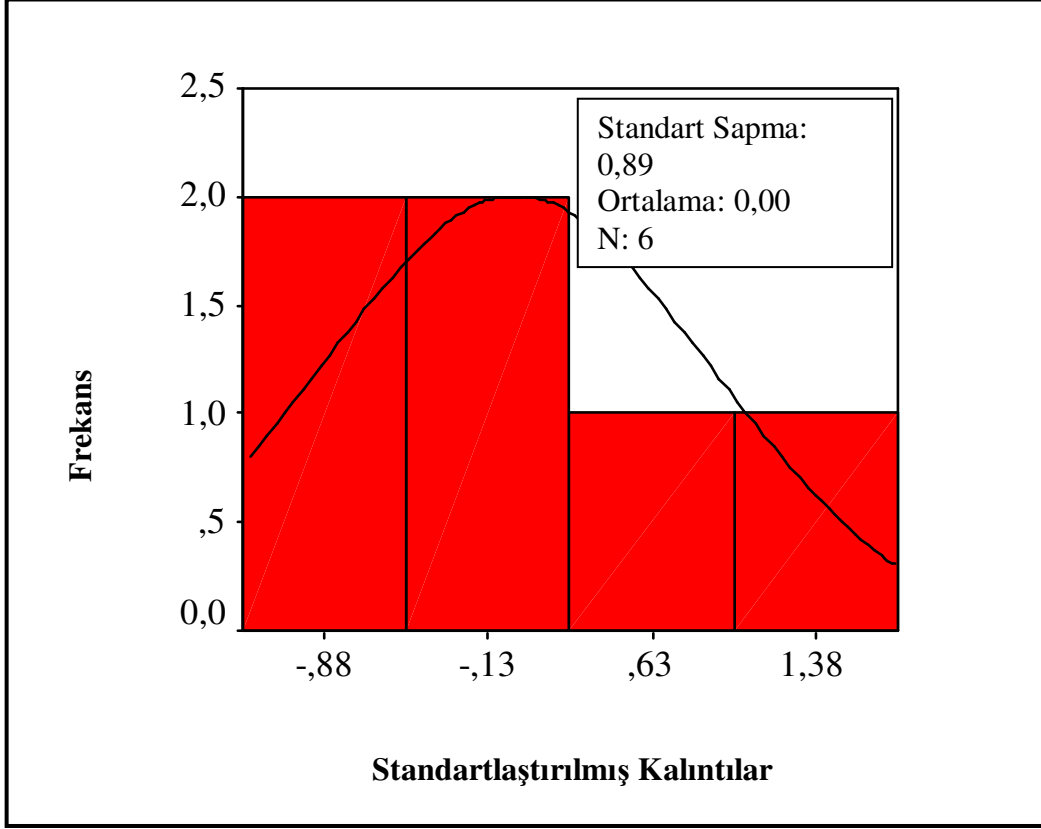
$$\text{Log}T_{i50} = -1,3 + 0,41\text{Log}D_v \quad (6.5)$$

$$= \text{Log} (0,050119 \times D_v^{0,41})$$

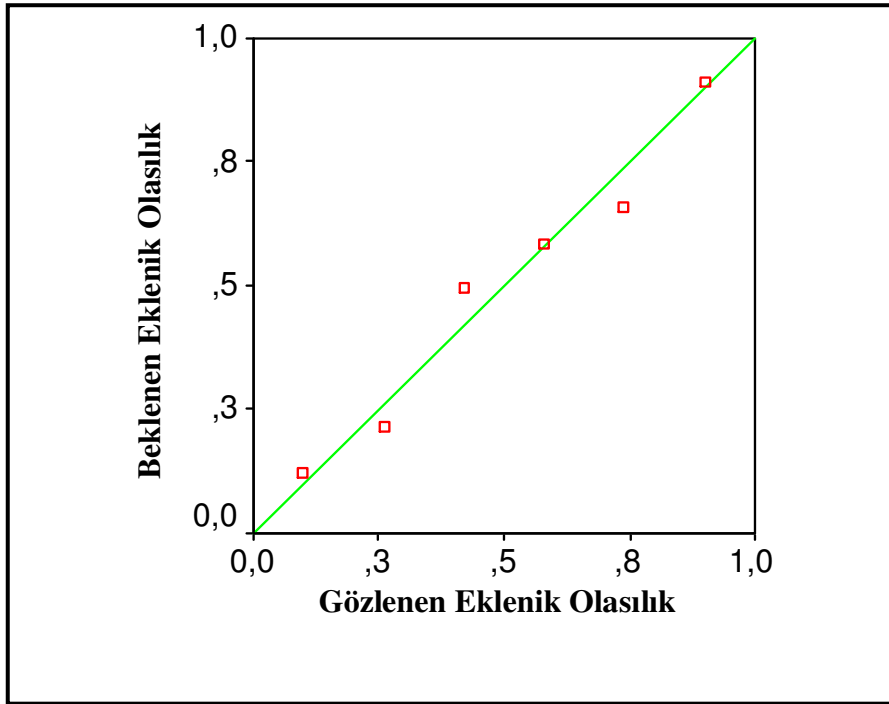
$$T_{i50} = 5,01 \times 10^{-2} \times D_v^{0,41} ; D_v \geq 0 \quad (6.6)$$

T_{i50}: Tekerlek izi derinliği

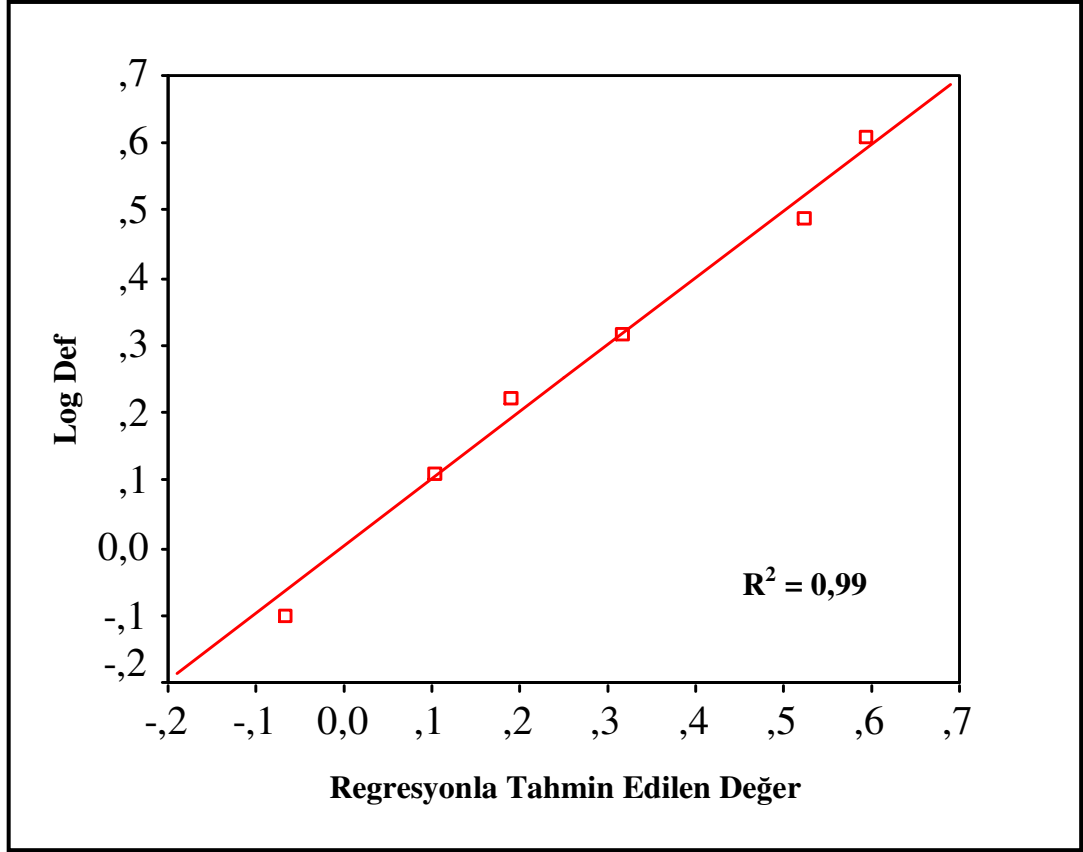
D_v: Tekerlek devir sayısı



Şekil 6.10: Standartlaştırılmış kalıntılarının histogramı, T.izi GSA 50



Şekil 6.11: Standartlaştırılmış kalıntılarının normal P-P grafiği, T.izi GSA 50



Şekil 6.12: Standartlaştırılmış kalıntıların dağılımı, T.izi GSA 50

Tekerlek izi GSA 50 karışımı kalıcı deformasyonu ile ilgili kurulan modelde, bağımsız değişkenler arasında çoklu doğrusal bağımlılık olmadığı söylenebilir.

Bilindiği üzere, regresyon çözümlemesinin varsayımlarından biri de hataların normal dağıldığı varsayımdır. Normallikten sapma önemsenmeyecek bir düzeyde olduğunda sonuçları etkilememektedir. Normallik varsayımının yerine gelip gelmediği kalıntıların incelenmesi ile yapılır. Görsel olarak histogram ve P-P grafiğinden yararlanılabilir [36].

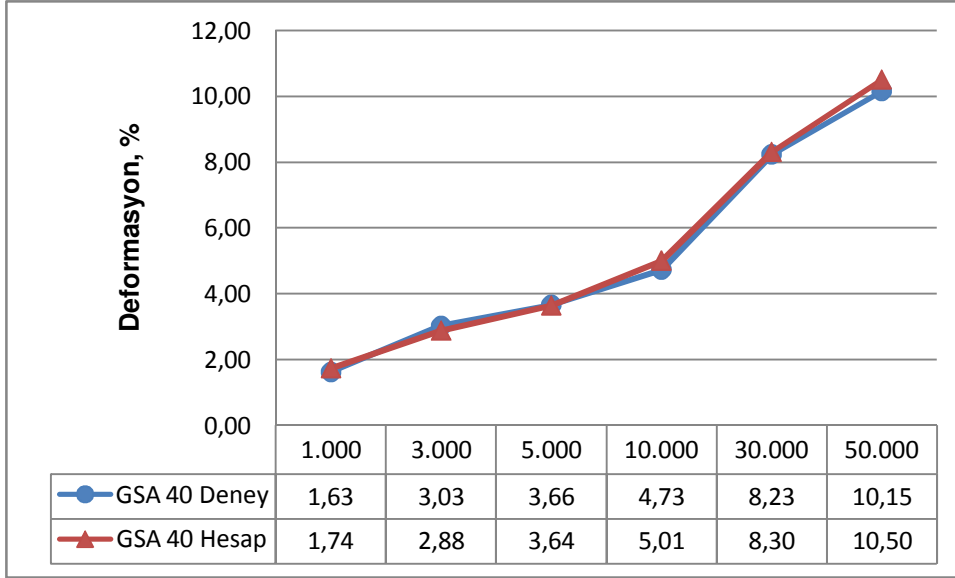
6.3 Model Doğrulama

Bağımlı ve bağımsız değişkenler kullanılarak oluşturulan modelin doğruluğunu belirlemek amacıyla, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen ham veriler modellerde yerlerine yerleştirilerek deformasyon miktarları hesaplanmıştır. Hesap sonucu bulunan değerler grafiğe dökülerek gerçek değerlerle karşılaştırılmış ve modellerin doğruluğu tespit edilmiştir.

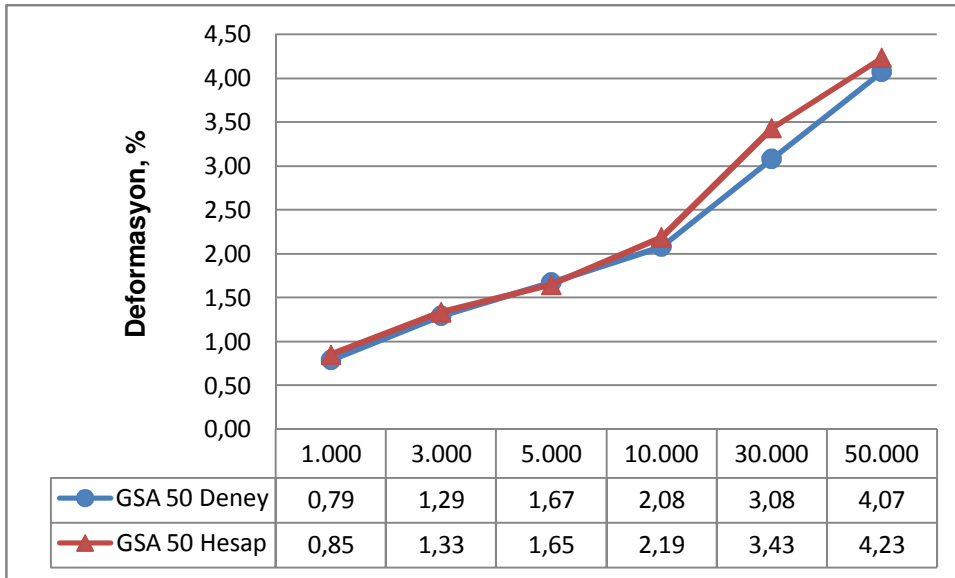
Model doğrulama grafikleri oluşturulurken aşağıda yazılan iki model kullanılmıştır.

$$T_{i40} = 7,24 \times 10^{-2} \times D_v^{0,46} \text{ ve } T_{i50} = 5,01 \times 10^{-2} \times D_v^{0,41}$$

Model hesaplamaları ve deney sonucu çıkan değerler Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13: Model Doğrulama, T.izi GSA 40



Şekil 6.14: Model Doğrulama, T.izi GSA 50

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, model kullanılarak, hesaplanan değerlerin deneysel çalışmalarla elde edilen değerlere çok yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar modellerin doğruluğunu göstermektedir.

7.MALİYET KARŞILAŞTIRMASI

Tez çalışması için hazırlanan karışım numuneleri, bu numunelere uygulanan deneyler ve karışım içerisinde kullanılan malzemelerin maliyet analizi yapılmış ve bu farklı bağlayıcı oranlarına göre hesaplanan toplam maliyetler karşılaştırılmıştır. Maliyet analizi yapılırken tez çalışmalarının başlama tarihi dikkate alınarak, yıllara göre bitüm ve sülfürün satış fiyatları İzmit rafinerisinden alınmıştır. Karışım maliyetleri hesaplamalarında ise İstanbul Büyükşehir Belediyesi iktisadi teşekküllerinden İsfalt'ın asfalt üretim tesislerinde uygulanan malzeme fiyatları baz alınmıştır.

7.1 Sülfür ve Bitüm Maliyetleri

Ülkemizde yılda yaklaşık 28 milyon ton ham petrolün rafinerilerde işlenmesinden elde edilen bitümün büyük bir bölümü yol üstyapı kaplamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca gerek asfalt emülsiyonu, gerekse modifiye asfalt ve farklı pek çok alanda kullanılmak üzere, değişik miktarlarda bitüm ithal edilmektedir. Bu emülsiyon ve modifiye bitümlerin de büyük bir bölümü yol üstyapılarında kullanılmaktadır. Rafinerilerde işlenen ham petrolün destilasyonu neticesinde elde edilen bitümün yanı sıra, sülfür de yan ürün olarak elde edilmektedir.

Rafinerilerde üretilen bitümün satış fiyatı, aynı tesiste üretilen sülfürün satış fiyatından yaklaşık dört kat daha fazladır. TÜPRAŞ İzmit rafinerisinde üretilen kükürt ve B50/70 penetrasyonlu bitümün 2007 yılı satış fiyatları, ton başına sırasıyla; 148.68 YTL ve 610.04 YTL'dir [23].

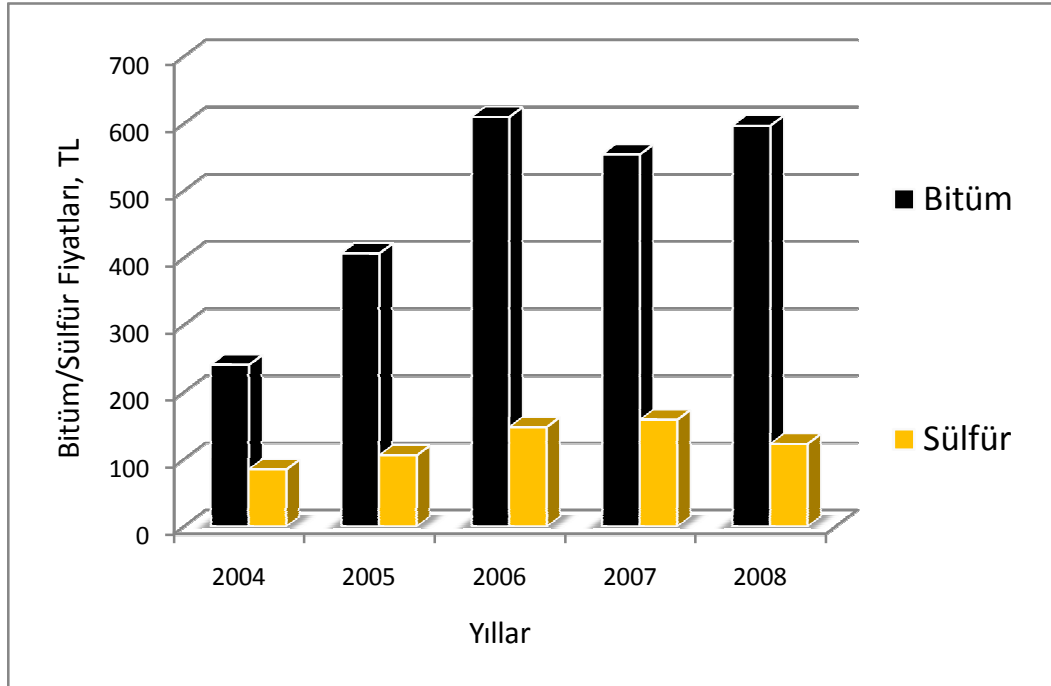
Bitüm ve sülfür fiyatları yıldan yıla farklılık gösterse de, B50/70 bitümün satış fiyatı sülfür fiyatına göre oldukça yüksektir ve bu iki ürün arasındaki fiyat farkları dikkate değer büyüklüktedir. Dolayısıyla bitüm yerine bağlayıcı olarak sülfür kullanılması halinde, stabilite ve tekerlek izi oluşumuna karşı direncin yanı sıra, asfalt karışım maliyetlerinde de belirgin bir düşüşün olacağı açıkça görülmektedir.

Yıllara göre sülfür ve bitüm rafineri satış fiyatları Çizelge 7.1 ve Şekil 7.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1: Yıllara göre B 50/70 bitüm ve sülfür fiyatları

Tarih	İzmit Rafinerisi Ürün Satış Fiyatları (ton)	
	B 50/70 Bitüm	Sülfür
19.11.2004	240.875.790 TL	84.985.545 TL
03.09.2005	407,03 YTL	106,53 YTL
06.07.2006	610,04 YTL	148,68 YTL
05.10.2007	554,49 YTL	159,30 YTL
18.12.2008	597,92 YTL	123,90 TL

Sülfürün rafineri satış fiyatının bitüme göre daha düşük olmasının yanısıra, doldurma boşaltma ve taşıma maliyeti de daha düşüktür. Ayrıca bitümlerin kullanılabilmesi için ısıtılarak sıvılaştırılması gerektiğinden, ilave bir ısı enerjisine gereksinim duyulmaktadır. Bu ek enerji maliyet farkını daha da büyötmektedir.



Şekil 7.1: Yıllara göre bitüm (B 50/70) – sülfür fiyatları

Sülfür nakil işlerinde özel ısıtmalı araçlar gerekmediğinden, asfalt üretim tesislerinin rafineri merkezlerine uzaklığına bağılı olarak değışmekle birlikte, bitüm nakliye fiyatlarından daha düşüktür. Dolayısıyla bitüm-sülfür fiyat farkının çizelgede verilen rafineri satış fiyat farkından daha yüksek olduğı açıkça görülmektedir.

7.2 Geleneksel Karışım ve Sülfürlü Karışım Maliyetleri

Esnek üstyapı kaplama maliyetinin en büyük iki kalemini agrega ve bitüm oluşturmaktadır. Agrega miktarı oran olarak bitüm miktarının onsekiz katından fazla olmasına karşın, ikisinin toplam maliyet içindeki payları birbirine yakındır. Agrega kaynaklarının ve bitümün alındığı rafineri merkezinin asfalt üretim tesislerine olan uzaklığına bağılı olarak, bitüm maliyetinin karışım içindeki payının agrega maliyetinden fazla olması bile söz konusu olabilmektedir. Kaplama tabakalarında kullanılan bitümlü bağlayıcı miktarının azaltılması doğrudan karayolu üstyapı inşaat maliyetlerinin azalmasına etki edecektir.

Bitümlü sıcak karışımlara ait maliyet ve satış fiyatları tespit çalışmalarında, sıcak karışım bünyesine giren malzemenin bedeli olarak agrega ve bitüm fiyatları, bu malzemenin nakliye ve ısıtma bedelleri, üretim genel giderleri ve üretici kar payı gibi çok sayıda farklı kalem dikkate alınarak hesaplamalar yapılmaktadır. Modifiye asfalt üretilmesi durumunda bunlara ek olarak modifiye katkı maddelerinin fiyatları da ilave edilmektedir.

Bu çalışmada maliyet karşılaştırması yapılırken sadece bağlayıcı ve agrega fiyatları dikkate alınmış ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çünkü nakliye, modifiye edici katkı maddeleri ve üretim için kullanılan tesis maliyetleri gibi diğere etkenler çok değışkendir ve bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Ayrıca söz konusu etkenler her iki bağlayıcı için de aynı ek maliyetleri doğurmaktadır. Dolayısıyla bağlayıcı ve agrega fiyatlarıyla yapılan maliyet karşılaştırmaları yeterli görülmüştür. Çalışmada kullanılan bağlayıcı oranlarına bağılı olarak 100 kilogram karışım içindeki agrega, bitüm ve granüler sülfür miktarları belirlenmiştir. Elde edilen miktarların maliyetleri, söz konusu malzemenin İstanbul Büyükşehir Belediyesi İSFALT tesislerinde üretilen asfaltlar için kullanılan fiyatları baz alınarak hesaplanmıştır.

Karışım numunelerinin optimum bağlayıcı miktarına göre bir ton asfalt içindeki granüler sülfür, bitüm ve agrega miktarları Çizelge 7.2'de gösterilmiştir.

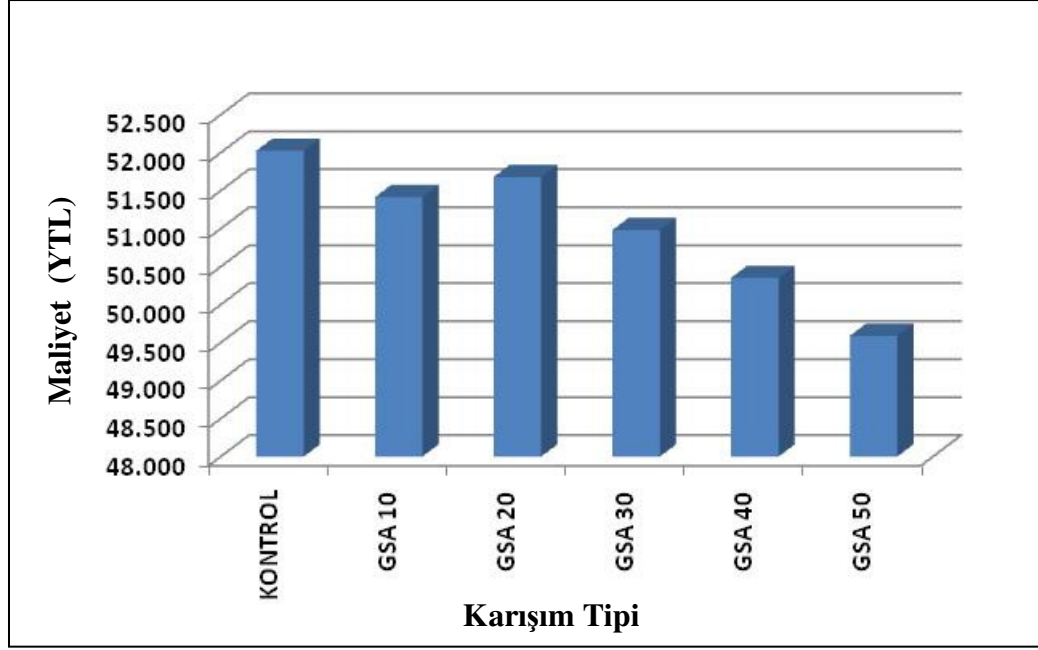
Çizelge 7.2: Karışım içindeki malzeme miktarları

GSF/Bitüm Oran	100 gr BSK içindeki Malzeme Miktarı (gr)			Toplam (kg)	1 ton BSK içindeki Malzeme Miktarı (kg)			Toplam (kg)
	GSF	Bitüm	Agrega	BSK	GSF	Bitüm	Agrega	BSK
0/100	0,00	5,10	94,90	100,00	0,00	51,04	948,96	1.000
10/90	0,54	4,85	94,61	100,00	5,39	48,52	946,09	1.000
20/80	1,18	4,74	94,08	100,00	11,83	47,39	940,78	1.000
30/70	1,90	4,43	93,68	100,00	18,96	44,26	936,78	1.000
40/60	2,73	4,10	93,17	100,00	27,30	40,96	931,74	1.000
50/50	3,70	3,70	92,59	100,00	37,04	37,04	925,91	1.000

Bitüm, granüler sülfür ve agrega miktarlarına bağlı olarak yıllara göre maliyetler çıkarılmıştır. Bir ton asfalt karışımı için yapılan maliyet hesabıyla elde edilen 2007 ve 2008 yıllarına ait değerler Çizelge 7.3, Şekil 7.2 ve Çizelge 7.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.3: 2007 Yılı geleneksel ve GSA karışım maliyetleri

Bağlayıcı Oranları	Miktarlar (Kg) (1 ton karışım içinde)			Birim Fiyatlar (YTL/ton)			Maliyet (YTL/ton)
	Agrega	Bitüm	GSF	Agrega	Bitüm	GSF	2007 Yılı
0/100	948,96	51,04	0	25	554,49	159,30	52.027
10/90	946,09	48,52	5,39	25	554,49	159,30	51.416
20/80	940,78	47,39	11,83	25	554,49	159,30	51.681
30/70	936,78	44,26	18,96	25	554,49	159,30	50.982
40/60	931,74	40,96	27,3	25	554,49	159,30	50.353
50/50	925,91	37,04	37,04	25	554,49	159,30	49.589



Şekil 7.2: 2007 Yılı geleneksel – GSA karışım maliyetleri

Çizelge 7.4: 2008 Yılı geleneksel ve GSA karışım maliyetleri

Bağlayıcı Oranları	Miktarlar (1 ton karışım için-Kg)			Birim Fiyatlar (YTL/ton)			Maliyet (YTL)
	GSF/Bitüm	Agrega	Bitüm	GSF	Agrega	Bitüm	
0/100	948,96	51,04	0	25	597,92	123,90	54.242
10/90	946,09	48,52	5,39	25	597,92	123,90	53.331
20/80	940,78	47,39	11,83	25	597,92	123,90	53.321
30/70	936,78	44,26	18,96	25	597,92	123,90	52.233
40/60	931,74	40,96	27,3	25	597,92	123,90	51.167
50/50	925,91	37,04	37,04	25	597,92	123,90	49.884

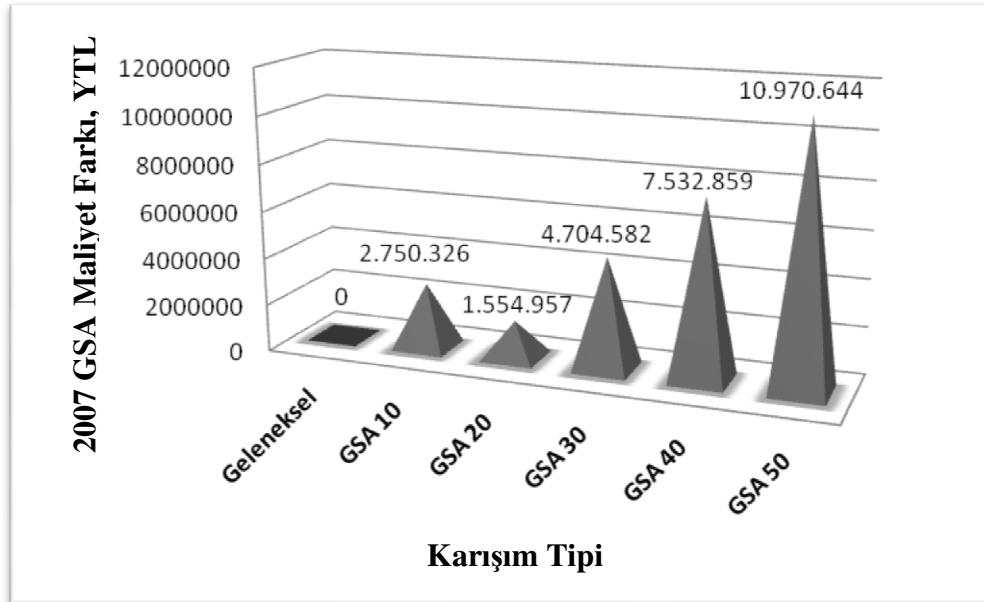
Asfalt karışımlarının 2007 yılı birim fiyatlarıyla, geleneksel karışım ile granüler sülfürlü asfalt karışım maliyet farkları hesaplanmıştır. Karşılaştırma sonucunda granüler sülfür kullanılması halinde farklı karışım oranlarına göre, 2007 yılında elde

edilebilecek ek kazanç ve bu kazançla inşa edilebilecek yol kaplama uzunlukları da hesaplanmıştır.

Karışımda granüler sülfürün %50 oranında kullanılması durumunda, İstanbul ili için yıllık (2007) elde edilebilecek gelir artışları Çizelge 7.5 ve Şekil 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.5: 2007 Yılı geleneksel ve GSA karışımı maliyet farkı

GSF/Bitüm Oranı	2007 Yılı Maliyeti (YTL/ton)	İBB Asfalt Üretimi 2007 Yılı 4.500.000 ton	GSA Maliyet Farkı (YTL)
0/100	52.027	234.121.551	0
10/90	51.416	231.371.225	2.750.326
20/80	51.681	232.566.593	1.554.957
30/70	50.982	229.416.969	4.704.582
40/60	50.353	226.588.692	7.532.859
50/50	49.589	223.150.907	10.970.644



Şekil 7.3: 2007 Yılı fiyatlarıyla GSA – geleneksel karışım maliyet farkları

Çizelgede bitümlü sıcak karışımdaki bitümlü bağlayıcının bir kısmı sülfür ile yer değiştirilmiş ve oransal olarak hesaplanan maliyetleri geleneksel karışım maliyetleri ile karşılaştırılmıştır. Aradaki maliyet farkı her bir GSF/Bitüm oranı için ayrı ayrı gösterilmiştir. Maliyet hesabında baz alınan fiyatlarla oranlara göre artan bu farkların sıcak karışım olarak kazanca dönüştürmesi de hesaplanmış ve %40 GSF ilave edilmesi durumunda 178 km, %50 GSF ilave edilmesi halinde ise 263 km (2x1 şerit ve 5 cm kalınlıkta) uzunluğunda bir yolun aradaki maliyet farkıyla asfalt kaplama yapılabileceği görülmüştür.

Kaplamaların stabilite ve performans değerlerinin pozitif yönde iyileşmesinin yanı sıra maliyette meydana gelen bu düşüşler de dikkate alındığında, granüler sülfürlü karışımların kullanımının ülke yararına olacağı ve deneme amaçlı saha uygulamalarının yapılmasının bu konuda daha gerçekçi sonuçlara ulaşılmasını kolaylaştıracağı söylenebilir.

8.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, esnek üstyapı kaplamalarında bağlayıcı olarak bitümle birlikte, granüler sülfür kullanımının kalıcı deformasyona etkisi incelenmiştir. Bu amaçla hazırlanan numuneler üzerinde Marshall stabilitesi, statik sünme, dinamik sünme, dolaylı çekme ve tekerlek izi deneyleri yapılmış ve deney sonuçlarından yararlanılarak bir model oluşturulmuştur. Araştırmalardan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

8.1 Sonuçlar

1. Karışımlarda kullanılan GSF (Granüler Sülfür) bitümle uyum göstererek bağlayıcı özellik göstermiştir. Bağlayıcı olarak bitümle birlikte kullanılan GSF miktarı %50'ye kadar yükseltildiği halde çıkan deney sonuçları şartname sınırları içinde kalmıştır.
2. Karışım içindeki GSF oranı arttıkça, Marshall stabilitesi artmıştır. Stabilitate, bağlayıcı olarak bitümle birlikte %10 GSF ilavesiyle en düşük, %50 GSF ilavesiyle en yüksek değerine ulaşmıştır. Marshall deneyi sırasında, ölçülen akma değerleri, GSF ilaveli karışımların hepsinde şartname sınırları içinde kalmıştır.
3. Granüler sülfür ilave edilen bitümlerde sıcaklık hassasiyetinin kullanılan GSF oranına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. %40 ve %50 GSF ilave edilerek hazırlanan karışımda, bağlayıcıların penetrasyon endeksi (PI) değerlerinin geleneksel bitümlere göre daha büyük olduğu görülmüştür.
4. GSF malzemesinin doğrudan bitüme ilave edilmesi deneysel çalışmaların yapılmasını güçleştirmektedir. Granüler sülfürün bitüm yerine karışıma katılması daha uygundur. GSF karışimli bağlayıcılar tekrar ısıtıldığında katılmış sülfür topakları dibe çökerek katı bir tabaka oluşturmaktadır.
5. Oransal olarak GSF miktarı arttıkça karışımın işlenebilirlik özelliği artış göstermiştir. Gerek Marshall numuneleri, gerekse LCPC (Laboratoire Central

des Ponts et Chaussées) numuneleri hazırlanırken, daha düşük sıcaklıkta (145°C) olmasına rağmen, karışımın kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırma işlemlerinin uygulanması geleneksel karışımlara göre daha kolay olmuştur.

6. Optimum bağlayıcı belirleme çalışmalarında, karışıma ilave edilen GSF miktarına bağlı olarak toplam bağlayıcı miktarında küçük bir artış görülmüş, ancak bitüm miktarında belirgin bir azalma gözlenmiştir. İlave edilen en düşük GSF (%10) miktarı ile en yüksek GSF (%50) miktarı arasındaki artış farkı yaklaşık % 0,5 olarak belirlenmiştir.
7. %50 GSF ilave edilmiş karışımların kalıcı deformasyon direnci tüm deney sıcaklıklarında (5°C, 25°C ve 40°C) geleneksel karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Tekrarlı Sünme deneyinde düşük (5°C) ve orta (25°C) sıcaklıklarda geleneksel karışımların kalıcı deformasyon direnci sadece %20 GSF ilave edilmiş karışımlara göre yüksek çıkmıştır. Yüksek sıcaklıkta (40°C) geleneksel karışımların kalıcı deformasyon direnci %20, %30 ve %50 GSF ilaveli karışımlara göre daha düşük çıkmıştır.
8. Statik sünme deneyinde test sıcaklığı yükseldikçe, geleneksel karışımların deformasyon direncinde görülen artış, GSF ilaveli karışımlara göre daha yüksek olmuştur. Statik yüklemelerde en düşük deformasyon direnci %10 ve %20 GSF ilaveli karışımlarda görülmüştür.
9. Geleneksel karışımlar dahil, tüm karışımların düşük sıcaklıklarda (5°C) yüksek rijitlik modülüne sahip oldukları, ancak sıcaklığın artmasıyla birlikte uygun bölge aralığına doğru geçtikleri görülmektedir. Esneklik modülü belirleme çalışmalarında, deney sıcaklıklarına bağlı olarak karışımların esneklik modülü değerleri sıralamasında farklılıklar gözlenmiştir. %50 GSF ilaveli karışımların esneklik modülü değerleri, farklı sıcaklıklarda yapılan tüm deneylerde, geleneksel karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır.
10. Tekerlek izi deneyinde ilk 20.000 devir boyunca oluşan kalıcı deformasyon değerlerinde hızlı bir artış gözlenmiştir. Devir sayısı arttıkça kalıcı deformasyon artış hızında bir azalma görülmüştür. %40 GSF ilave edilerek hazırlanan karışımlarda tekerlek izi oluşumuna (TİO) karşı direnç, ilk 20.000 devir için geleneksel karışımlara göre daha düşük çıkmış, devir sayısı arttıkça %40 GSF

karışımının gösterdiği direnç artış göstererek geleneksel karışım direncinden daha yüksek bir değere ulaşmıştır.

11. %50 GSF ilaveli karışımın gösterdiği tekerlek izi direncinin geleneksel karışım direncinden yaklaşık iki buçuk kat daha fazla olduğu görülmektedir. Stabilitate ve tekrarlı sünme deneylerinde olduğu gibi, TİO deneyinde de %50 GSF ilave edilerek hazırlanan karışımın kalıcı deformasyona karşı gösterdiği direnç geleneksel karışımların gösterdiği dirence göre oldukça yüksektir.
12. Karışım içindeki GSF oranına bağlı olarak toplam maliyetlerde düzenli bir azalma olduğu görülmüştür. Granüler sülfür miktarı arttıkça asfalt karışım maliyetleri düşmektedir.

8.2 Öneriler

1. TÜPRAŞ 2007 yılı verilerine göre normal bitümden yaklaşık %70, 2008 yılı verilerine göre ise yaklaşık %80 daha ucuz olan sülfür malzemesinin BSK içinde %40-50 oranında kullanılması stabilite, kalıcı deformasyon ve maliyet açısından yararlı olacaktır.
2. 2009 yılından itibaren AB (Avrupa Birliği) normları gereğince, halen 50 ppm (1 ton motorin içinde 50 gr kükürt) olarak üretilen motorin yerine 10 ppm motorin üretileceğinden, ülkemiz rafinerilerinde açığa çıkacak sülfür miktarında (her bir ton için 40 gr) artış görülecektir. Bu kararlar açığa çıkan sülfür miktarındaki artışlar, fiyatların düşmesine etki ederek, GSF ilaveli BSK maliyetlerini daha da aşağıya düşürebilir.
3. Sülfür maddesinin ısıya duyarlılığı nedeniyle karışım sıcaklığının 145°C civarında olması gerekmektedir. Sülfürün keskin kokulu zararlı gazlarından korunmak için karışım çalışmaları sırasında maske kullanılması ve havalandırma sistemi bulundurulması gerekmektedir.
4. Bu çalışmada bitümlü sıcak karışıma ilave edilen en yüksek GSF miktarı %50 olarak hesaplanmıştır. Benzer çalışmalarla BSK içine daha yüksek oranlarda GSF ilave edilerek kalıcı deformasyonlar incelenebilir.

5. Bu çalışmada en düşük sıcaklık 5°C olarak seçilmiştir. Benzer çalışmalarla daha düşük sıcaklıklarda GSF malzemesinin gerilmelere karşı davranışı araştırılarak geleneksel karışımlara göre güçlü ve zayıf yönleri belirlenebilir.
6. AB normlarıyla uyum yasaları gereği 50 ppm yerine 10 ppm olarak üretilecek motorin çevre sorunları açısından hava kirliliğinin azalmasına katkı sağlayacaktır. Bu kararla açığa çıkan sülfürde bir artış meydana gelecektir. Artan sülfür için uygulama alanlarının bulunması bu kararların uygulanmasında teşvik edici bir rol oynayacaktır.
7. GSF malzemesini bitüme ilave etmek yerine, doğrudan karışıma katmak daha uygundur. Bitüme katılarak hazırlanan bağlayıcının daha sonra ısıtılması durumunda GSF malzemesinin dengeli dağılımı bozulmakta ve topaklanarak dibe çökmektedir.

Sonuç olarak, granüler sülfürün karayolu üstyapılarında bitümle birlikte bağlayıcı olarak kullanılması, kaplamanın kalıcı deformasyonlara karşı direncini artırarak modifiye edici rol üstlendiği gibi, asfalt maliyetini düşürerek ekonomik kazanç da sağlamaktadır. Ayrıca granüler sülfürün taşınması, depolanması ve kullanılması bitüm gibi işlemlerde ek bir ısı gerektirmediğinden ve bitüme göre daha düşük ısıda işlenebildiğinden, enerji tasarrufu alanında kullanıcılara daha fazla avantajlar sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, BSK içinde GSF malzemesinin kullanılmasının kalıcı deformasyon, maliyet ve çevre sorunları açısından yararlı olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Whiteoak, D.**, 2004. *Shell Bitüm El Kitabı*, İsfalt, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- [2] **Jimenez, R., A., Stokes, K., J.**, 1981. Effects of heat and air on the viscosity of sulfur-asphalt mixtures, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **50**, 467-479.
- [3] **Asphalt Institute**, 2002. *Asfalt El Kitabı*, İsfalt, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- [4] **Yeğınobalı, A., Ertün, T.**, 2005. *Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.
- [5] **Şener, F., Özgüner, A.**, 2000. Kimya Sanayii Hammaddeleri (Kükürt), *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, DPT*, ISBN 975 – 19 – 2822 – 2, Ankara.
- [6] **Önal, M., A. ve Kahramangil, M.**, 1993. *Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı*, K.G.M.-Teknik Araştırma Daire Başkanlığı, Ankara.
- [7] **Asphalt Institute**, *Asphalt Cold Mix*, Manual Series No.14 (MS-14), Third Edition.
- [8] **TÜPRAŞ** (Türkiye Petrol ve Rafinerileri Anonim Şirketi), 2003. *Tüpraş Faaliyet Raporu*, , Kocaeli.
- [9] **DPT** (Devlet Planlama Teşkilatı), 2001. *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Cilt I (Fosfat- Kükürt-Alunit)*, Ankara.
- [10] **Er, T.**, 2003. Asfalt kaplamalarda sülfür kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] **Kennepohl, G. A., Logan, A., Bean, D.C.**, 1975. Conventional paving mixes with sulphur-asphalt binders, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **44**, 485-505.
- [12] **Meyer, F., R., P., Hignell, E., T., Kennepohl, G.**, 1977. Temperature susceptibility evaluation of sulfur-asphalt mixtures, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **46**, 452-480.
- [13] **Terrel, R., L., Al-Otaishan, A.**, 1980. Material characteristics and predicted performance of sulphur-asphalt mixtures from in-service pavements, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **49**, 252-265.
- [14] **Fromm, H., J., Kennepohl, G., A.**, 1979. Sulfur-asphalt concrete on three Ontario test roads, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **48**, 135-162.

- [15] **Courval, G., J., Akilli, W.**, 1982. Sulfur-asphalt binder properties determined by the sliding plate rheometer, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **51**, 222-239.
- [16] **Cellard, B., Muller, M., J.**, 1981. Sulphur in Asphalt Paving Mixes, *Proceedings IRF, Symposium, on Sulphur-Asphalt in Pavements*, Bordeaux, France
- [17] **Akilli, W.**, 1981. Sulfur Extended Asphalt Pavements, *Proceedings Sulphur-81, An International Conference, Two Test Roads in Eastern Saudi Arabia*, 161-173 Calgary, Canada.
- [18] **Bean, D., C., Miller, L.**, 1981. Sulfur-asphalt pavement performance and recycling, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **50**, 98-115.
- [19] **Kandhal, P., S.**, 1982. Evaluation of sulfur extended asphalt binders in bituminous mixtures, *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, **51**, 189-221.
- [20] **Yayla, N.**, 2002. *Karayolu Mühendisliği*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [21] **Umar, F. ve Ağar, E.**, 1985. *Yol Üstyapısı*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [22] **Ağar, E., Sütaş, İ. Ve Öztaş G.**, 1998. *Beton Yollar*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [23] **Url-1** <<http://www.tupras.com.tr>>, alındığı tarih 06.07.2007.
- [24] **Ilıcalı, M.**, 2001. *Asfalt ve Uygulamaları*, İsfalt, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, İstanbul.
- [25] **Huang, H., Y.**, 1993. *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [26] **Zhang, J., Cooley, L. A., Kandhal, P. S.**, 2002. Comparison of fundamental and simulative test methods for evaluating permanent deformation of hot mix asphalt, *NCAT Report 02-07*, Auburn, USA.
- [27] **Witczack, M. W. and El-Basyouny, M. M.**, 2004. *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, final document*, Illinois, USA.
- [28] **Sağlık, A. ve Güngör, A. G.**, 2006. *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*, KGM, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- [29] **Powell, R. B.**, 2008. Modeling rutting performance on the NCAT pavement test track, *TRB 87th Annual Meeting*, Washington , January 13-17.USA.
- [30] **Price, S., Mehta, Y. and McCarty, L. M.**, 2007. Evaluation and Modeling of Repeated Load Test Data of Asphalt Concrete for Mechanistic-Empirical Pavement Design, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **19**, No.11, 993-999.
- [31] **Kandhal, S. P.**, 1992. Waste Materials in hot Mix, *NCAT Report No. 92-6* Auburn, Alabama, USA.

- [32] **KTŞ**, 2006. *Karayolu Teknik Şartnamesi*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [33] **Kalaycı, Ş.**, 2005. *SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri*, Asil Yayın Dağıtım, Ankara.
- [34] **Kandhal, P. S., Cooley, L. A.**, 2002. Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using loaded wheel tester, *NCAT Report 02-08*, Auburn, USA.
- [35] **ELE-UMATTA**, 1994. Universal Materials Testing Apparatus for Asphalt and Unbound Specimens, *Reference and Operating Manual*.
- [36] **Alpar, R.**, 2003. *Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemlere Giriş I*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [37] **Archilla, A. R. and Madanat, S.**, 2001. Estimation of Rutting Models by Combining Data from Different Source, *Journal of Transportation Engineering*, **127**, i5, 379-389.
- [38] **Archilla, A. R. and Madanat, S.**, 2001. Statistical Model of Pavement Rutting in Asphalt Concrete Mixes, *Transportation Research Record*, 1764.
- [39] **Aschenbrenner, T.**, 1994. Comparison of Results Obtained from the LCPC Rutting Tester with Pavements of Known Field Performance, *Transportation Research Record*, 1454, 66-73.
- [40] **Bayazit, M.**, 2006. *Çok Değişkenli İstatistik Analiz ve Hidrolojide Uygulamaları*, Su Vakfı Yayıncılık, İstanbul.
- [41] **AASHTO**, 1986. *Guide For Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC-USA.
- [42] **Ağar, E., Sütaş, İ. ve Öztaş, G.**, 1996. Geçirimli esnek üstyapılar, *1. Ulusal Asfalt Sempozyumu*, İstanbul.
- [43] **Ağar, E.**, 1999. *İleri Kaplama Teknolojisi*, Lisansüstü ders notları, İTÜ, İstanbul.
- [44] **Url-2** <<http://www.sulphurinstitute.org/>>, alındığı tarih 03.01.2008.
- [45] **Tunç, A.**, 2001. *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*, Atlas Yayınları, İstanbul
- [46] **TS EN 197-1**, 2005. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü Standart Hazırlama Merkezi*, Ankara.
- [47] **Mathev, T., V., Krishna, K.**, 2007. *Introduction to Transportation Engineering*, Indian Institute of Technology Bombay –India.
- [48] **ASTM D-2041**, 1995. Standard test methods for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures, *American Society for Testing and materials*, PA, USA.
- [49] **TS EN 13108-1**, 2006. Bitümlü Karışımlar-Malzeme Özellikleri, Beton Asfalt, *Türk Standartları Enstitüsü Standart Hazırlama Merkezi*, Ankara.

- [50] **TS EN 13108-20**, 2006. Bitümlü Karışımlar-Malzeme Özellikleri, Tip Deneyler, *Türk Standartları Enstitüsü Standart Hazırlama Merkezi*, Ankara.
- [51] **TS 3720**, 1983. Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları, Marshall ve Hubberd Field Metotlarıyla, *Türk Standartları Enstitüsü Standart Hazırlama Merkezi*, Ankara.
- [52] **Safwat, S.**, 1996. Fatigue and stiffness properties of road base layers using Indirect Tensile Test, *Euroasphalt and Eurobitumen Congress*, Strasbourg, France.
- [53] **AASHTO**, 1986. Pavement Performance Trends, *Guide for design of pavement structure*, Washington, - USA.
- [54] **SNPA** (Societe Nationale des Petroles Aquitaine), 1970. Properties of Sulphur-Bitumen Binders, *VII International Road Federation Meeting*, Munich, Germany.
- [55] **FHWA** First Field Trial With SEA Binders in Maine, 1980. *Federal Highway Administration Report*, TS-80-240, USA.
- [56] **Mahoney, J., P., Cook, J., C.**, 1982. Sulfur Extended Asphalt Pavement Evaluation, *Federal Highway Administration (FHWA) Report*, WA RD. 56.3, Pavement Performance, Washington, USA.
- [57] **Url-3** <<http://www.lennotech.com/periodic-chart-elements/s-en.htm>>, alındığı tarih 15.04.2008. Chemical Properties of Sulphur.
- [58] **Url-4** <<http://training.ce.washington.edu/wsdot/>>, alındığı tarih 10.11.2008. Flexible Pavement Distress.
- [59] **Url-5** <<http://www.maden.org.tr/>>, alındığı tarih 03.01.2008. Kükürt Yataklarına Toplu Bir Bakış.
- [60] **Url-6** <<http://www.nsc.org/>>, alındığı tarih 10.02.2008. Handling and Storage of Solid Sulfur.
- [61] **Kennedy, B., Deme, I.**, 2003. *Use of Sulphur in Asphalt Pavement*, Shell Canada Ltd., Alberta, Canada.
- [62] **Beatty, T., Dunn, K., Harrigan, E.**, 1987. *Field Evaluation of Sulphur-Extended Asphalt Pavements*, Transportation Research Board.
- [63] **McBee, W., Sullivan, T. A.**, 1980. *State-of-the-Art Guideline Manual for Design, Quality Control and Construction of Sulphur-Extended Asphalt (SEA) Pavements*, FHWA-IP-80-14.
- [64] **Deme, I., Kennedy, W., Keenan, K.**, 2004. Performance Properties of Semi-Rigid Sulphur-Extended Asphalt Mixes, *Proceedings, Euroasphalt and Eurobitume Congress*.
- [65] **Özen H.**, 1999. Bitümlü Karışım Değişkenlerinin Performans Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Hizmet Ömrü Tahmini İçin Bir Model Kurulması, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [66] **Asphalt Institute**, 2007. *The Asphalt Handbook*, Manual Series 7th Edition, MS4, Lexington, Kentucky, USA.
- [67] **Shell Bitumen**, 2003. *The Shell Bitumen Handbook*, 5th Edition, London, UK.

- [68] **Url-7** <<http://www.cevreorman.gov.tr/>>, alındığı tarih 20.05.2008. Benzin ve Motorin Kalitesi Yönetmeliği, Uygulama Esasları, Ek IV, 2003/17/AT ile değişik 98/70/AT.
- [69] **EU-Twinning Project TR03-EN-01**, 2006. Air Quality Data Processing, *Faaliyet 3.2: Büyük Yakma Tesisleri Yönetmeliği*, Ankara.
- [70] **Url-8** <<http://www.iso.org.tr/tr/Documents/>>, alındığı tarih 20.06.2008. Hava Kalitesi Değerlendirme ve Yönetimi Yönetmeliği, *Resmi Gazete*, Sayı: 26898, Ek II, Ankara.
- [71] **Shell Canada Limited**, 2005. *Material Safety Data Sheet for Sulphur Extended Asphalt Modifier*, 9050-303, Alberta, Canada.

EKLER

EK A: Marshall Tasarım Hesapları

EK B: Marshall Düzeltme Faktörleri

EK C: Performans Deneyleri

EK D: Tekerlek İzi Deneyleri

EK E: Bitüm ve Sülfür Fiyatları

EK A: Marshall Tasarım Hesapları

Çizelge A.1: Agrega özgül ağırlıkları

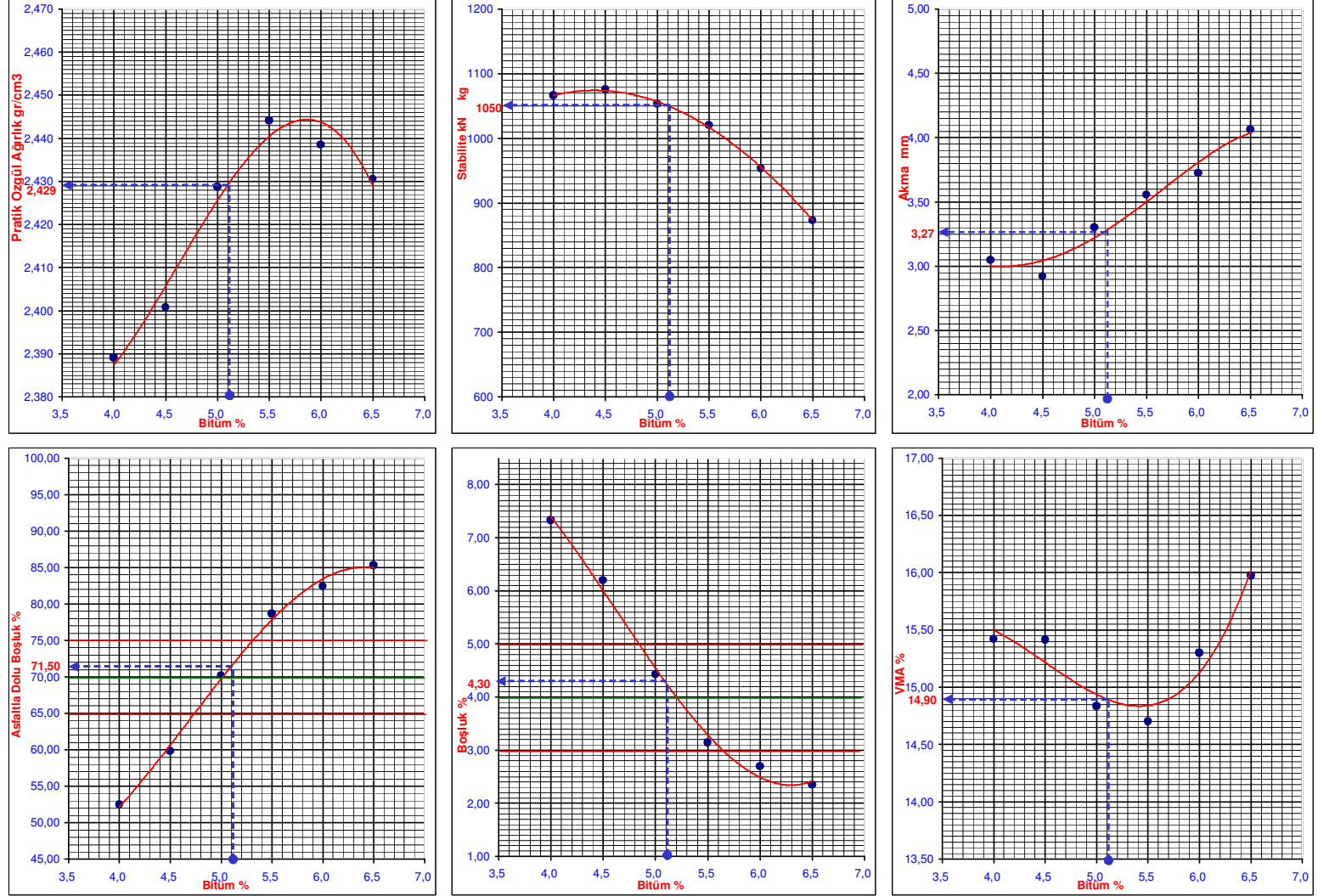
AGREGA ÖZGÜL AĞIRLIĞI ve ABSORBSİYONU			
İri Agrega			
A	Kurutulmuş Malzeme Ağırlığı	1158,9	
B	Doygun Yüzey Kuru Malzeme Ağırlığı	1165,4	
C	Doygun Yüzey Malzemenin Sudaki Ağırlığı	738,8	
$A / (B - C)$	Hacim Özgül Ağırlığı (Kuru)	2,717	
$B / (B - C)$	Hacim Özgül Ağırlığı (Doygun Yüzey, Kuru)	2,732	
$A / (A - C)$	Görünür Özgül Ağırlık	2,759	
$\{(B-A)/A\} \times 100$	% Absorbsiyon	0,56	
İnce Agrega			
A	Kurutulmuş Malzeme Ağırlığı	494,12	494,00
B	Doygun Yüzey Kuru Malzeme Ağırlığı	500,00	500,00
C	Hacimsel Kap + Su + İnce Agrega Ağırlığı	1007,63	1010,12
D	Hacimsel Kabin Su Dolu Ağırlığı	690,25	692,84
E	Hacimsel Kabin Boş Ağırlığı	192,25	194,90
$A / (B + D - C)$	Hacim Özgül Ağırlığı (Kuru)	2,706	2,704
$B / (B + D - C)$	Hacim Özgül Ağırlığı (Doygun Yüzey, Kuru)	2,738	2,736
$A / (A + D - C)$	Görünür Özgül Ağırlık	2,796	2,795
ORTALAMA		2,796	
$\{(B - A)/A\} \times 100$	% Absorbsiyon	1,19	1,21
ORTALAMA		1,20	
Filler			
A	Numune Ağırlığı	20,00	20,00
B	Kap Ağırlığı	191,02	185,60
C	Kap + Su Dolu Ağırlık	472,65	469,24
D	Kap + Su + Numune Ağırlığı	485,47	482,08
$A / (A + C - D)$	Özgül Ağırlık	2,784	2,791
ORTALAMA		2,787	

Çizelge A.2: Geleneksel karışım, Marshall numuneleri fiziksel özellikleri

Sıra No.	Bitüm % (Wa)	Bitüm Mik. (gr)	Yükseklik (mm)	Havadaki Ağırlık (gr) (A)	Doygun Yüzey Ağırlık (gr) (B)	Sudaki Ağırlık (gr) (C)	Hacim (V) (B-C)	Pratik Özgül Ağırlık (Dp) (A / V)	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	4,00	46,0	62,4	1187,8	1199,8	702,3	497,5	2,388	3,05	9,84	1,028	1031
2	4,00	46,0	61,4	1189,4	1198,4	700,7	497,7	2,390	3,18	9,72	1,056	1046
3	4,00	46,0	60,8	1189,7	1199,6	701,8	497,8	2,390	2,92	10,25	1,073	1121
ORTALAMA								2,389	3,05	1066		
4	4,50	51,8	63,4	1198,0	1202,0	702,0	500,0	2,396	2,79	9,33	1,003	954
5	4,50	51,8	63,5	1210,0	1215,0	712,0	503,0	2,406	3,05	10,91	1,000	1112
6	4,50	51,8	62,7	1195,0	1198,0	704,0	494,0	2,419	2,92	9,98	1,021	1039
ORTALAMA								2,407	2,92	1035		
7	5,00	57,5	62,9	1195,0	1197,0	703,0	494,0	2,419	3,56	9,71	1,016	1006
8	5,00	57,5	62,2	1195,0	1196,0	705,0	491,0	2,434	3,30	9,96	1,033	1049
9	5,00	57,5	62,4	1196,0	1197,0	705,5	491,5	2,433	3,05	10,55	1,028	1106
ORTALAMA								2,429	3,30	1053		
10	5,50	63,3	62,3	1195,0	1196,0	707,0	489,0	2,444	3,56	10,12	1,031	1064
11	5,50	63,3	61,3	1197,0	1199,0	710,0	489,0	2,448	3,43	9,62	1,059	1038
12	5,50	63,3	62,2	1196,0	1197,0	707,0	490,0	2,441	3,68	9,11	1,033	959
ORTALAMA								2,444	3,56	1020		
13	6,00	69,0	56,5	1206,5	1208,8	714,2	494,6	2,439	3,81	7,81	1,214	966
14	6,00	69,0	57,3	1204,6	1207,2	712,9	494,3	2,437	3,81	7,95	1,184	960
15	6,00	69,0	57,5	1205,7	1207,8	713,5	494,3	2,439	3,56	7,78	1,178	934
ORTALAMA								2,439	3,73	953		
16	6,50	74,8	58,3	1212,8	1214,6	715,8	498,8	2,431	3,94	7,68	1,152	902
17	6,50	74,8	58,2	1210,5	1212,6	714,0	498,6	2,428	4,06	7,39	1,155	870
18	6,50	74,8	61,1	1211,6	1213,2	715,1	498,1	2,432	4,19	7,82	1,064	848
ORTALAMA								2,431	4,06	873		

Çizelge A.3: Geleneksel karışım, Marshall tasarım çizelgesi

Briket No.	Bitüm			Briket Yüks. Ort.	Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Özg.	Max. Teo.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
	%	%	(gr)		Ağırl. (gr)	Ağırl. (gr)	K.Ağırl.(gr)	(cm ³)	Ağırlık	Öz. Ağırlık	%	Boşluk %	Boşluk %				
	Wa	Wb			A	C	B	V	DP	DT	Vh	VMA	Vf				
1	4,0	3,85	46,0	62,4	1187,8	702,3	1199,8	497,5	2,388	2,578	7,33	15,42	52,48	3,05	9,84	1,028	1031
2	4,0	3,85	46,0	61,4	1189,4	700,7	1198,4	497,7	2,390					3,18	9,72	1,056	1046
3	4,0	3,85	46,0	60,8	1189,7	701,8	1199,6	497,8	2,390					2,92	10,25	1,073	1121
ORTALAMA									2,389					3,05			
4	4,5	4,31	51,8	63,4	1198,0	702,0	1202,0	500,0	2,396	2,559	6,20	15,41	59,80	2,79	9,33	1,003	954
5	4,5	4,31	51,8	63,5	1210,0	712,0	1215,0	503,0	2,406					3,05	10,91	1,000	1112
6	4,5	4,31	51,8	62,7	1195,0	704,0	1198,0	494,0	2,419					2,92	9,98	1,021	1039
ORTALAMA									2,401					2,92			
7	5,0	4,76	57,5	62,9	1195,0	703,0	1197,0	494,0	2,419	2,541	4,42	14,84	70,18	3,56	9,71	1,016	1006
8	5,0	4,76	57,5	62,2	1195,0	705,0	1196,0	491,0	2,434					3,30	9,96	1,033	1049
9	5,0	4,76	57,5	62,4	1196,0	705,5	1197,0	491,5	2,433					3,05	10,55	1,028	1106
ORTALAMA									2,429					3,30			
10	5,5	5,21	63,3	62,3	1195,0	707,0	1196,0	489,0	2,444	2,523	3,14	14,70	78,64	3,56	10,12	1,031	1064
11	5,5	5,21	63,3	61,3	1197,0	710,0	1199,0	489,0	2,448					3,43	9,62	1,059	1038
12	5,5	5,21	63,3	62,2	1196,0	707,0	1197,0	490,0	2,441					3,68	9,11	1,033	959
ORTALAMA									2,444					3,56			
13	6,0	5,66	69,0	56,5	1206,5	714,2	1208,8	494,6	2,439	2,506	2,69	15,30	82,39	3,81	7,81	1,214	966
14	6,0	5,66	69,0	57,3	1204,6	712,9	1207,2	494,3	2,437					3,81	7,95	1,184	960
15	6,0	5,66	69,0	57,5	1205,7	713,5	1207,8	494,3	2,439					3,56	7,78	1,178	934
ORTALAMA									2,439					3,73			
16	6,5	6,10	74,8	58,3	1212,8	715,8	1214,6	498,8	2,431	2,489	2,35	15,97	85,29	3,94	7,68	1,152	902
17	6,5	6,10	74,8	58,2	1210,5	714,0	1212,6	498,6	2,428					4,06	7,39	1,155	870
18	6,5	6,10	74,8	61,1	1211,6	715,1	1213,2	498,1	2,432					4,19	7,82	1,064	848
ORTALAMA									2,431					4,06			



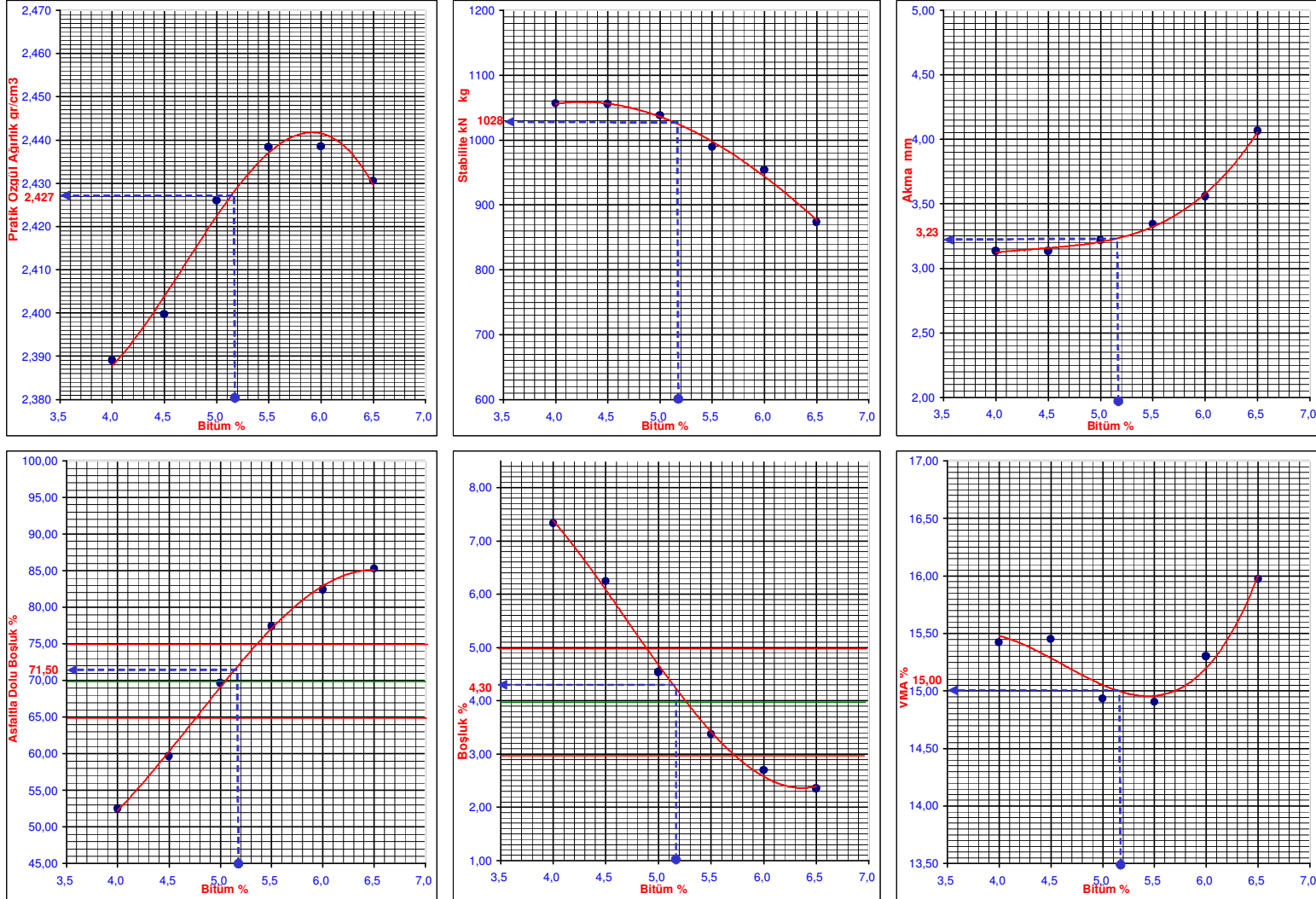
Şekil A.1: Geleneksel karışım, Marshall tasarım grafikleri

Çizelge A.4: %10 GSF katkılı karışım Marshall numuneleri fiziksel özellikleri

Sıra No	Bitüm % (Wa)	Bitüm Mik.(gr)	Yükseklik (mm)	Havadaki Ağırlık (gr) (A)	Doygun Yüzey Ağırlık (gr) (B)	Sudaki Ağırlık (gr) (C)	Hacim (V) (B-C)	Pratik Özgül Ağırlık (Dp) (A/V)	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	4,00	46,0	62,4	1187,8	1199,8	702,3	497,5	2,388	3,05	9,84	1,028	1031
2	4,00	46,0	61,4	1189,4	1198,4	700,7	497,7	2,390	3,18	9,72	1,056	1046
3	4,00	46,0	60,8	1189,7	1199,6	701,8	497,8	2,390	3,18	9,98	1,073	1092
ORTALAMA									2,389	3,13	1056	
4	4,50	51,8	63,8	1197,9	1202,1	703,1	499,0	2,401	3,18	10,32	0,992	1044
5	4,50	51,8	62,9	1199,6	1205,7	705,6	500,1	2,399	3,05	10,50	1,016	1087
6	4,50	51,8	62,4	1198,7	1204,4	704,9	499,5	2,400	3,18	9,88	1,028	1035
ORTALAMA									2,400	3,13	1055	
7	5,00	57,5	62,4	1202,8	1204,6	708,3	496,3	2,424	3,30	9,93	1,028	1041
8	5,00	57,5	62,1	1203,7	1205,3	709,5	495,8	2,428	3,05	9,86	1,036	1041
9	5,00	57,5	62,6	1204,3	1206,6	710,3	496,3	2,427	3,30	9,90	1,023	1032
ORTALAMA									2,426	3,22	1038	
10	5,50	63,3	61,6	1206,2	1207,6	713,2	494,4	2,440	3,56	9,52	1,050	1019
11	5,50	63,3	62,7	1207,3	1209,3	714,4	494,9	2,439	3,05	9,28	1,021	966
12	5,50	63,3	62,0	1204,5	1206,5	712,0	494,5	2,436	3,43	9,29	1,038	983
ORTALAMA									2,438	3,34	989	
13	6,00	69,0	56,5	1206,5	1208,8	714,2	494,6	2,439	3,81	7,81	1,214	966
14	6,00	69,0	57,3	1204,6	1207,2	712,9	494,3	2,437	3,30	7,95	1,184	960
15	6,00	69,0	57,5	1205,7	1207,8	713,5	494,3	2,439	3,56	7,78	1,178	934
ORTALAMA									2,439	3,56	953	
16	6,50	74,8	58,3	1212,8	1214,6	715,8	498,8	2,431	3,94	7,68	1,152	902
17	6,50	74,8	58,2	1210,5	1212,6	714,0	498,6	2,428	4,06	7,39	1,155	870
18	6,50	74,8	61,1	1211,6	1213,2	715,1	498,1	2,432	4,19	7,82	1,064	848
ORTALAMA									2,431	4,06	873	

Çizelge A.5: %10 GSF katkılı karışım Marshall tasarım çizelgesi

Briket No	Bitüm			Briket Yüksekliği	Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Özg.	Max. Teo.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
	%	%			Ağırl. (gr)	Ağırl. (gr)	K.Ağırl.(gr)	(cm ³)	Ağırlık	Öz. Ağırlık	%	Boşluk %	Boşluk %	(mm)	(kN)	Faktörü	Stabilite
	Wa	Wb	(gr)	Ort.	A	C	B	V	DP	DT	Vh	VMA	Vf				(kg)
1	4,0	3,85	46,0	62,4	1187,8	702,3	1199,8	497,5	2,388	2,578	7,33	15,42	52,48	3,05	9,84	1,028	1031
2	4,0	3,85	46,0	61,4	1189,4	700,7	1198,4	497,7	2,390					3,18	9,72	1,056	1046
3	4,0	3,85	46,0	60,8	1189,7	701,8	1199,6	497,8	2,390					3,18	9,98	1,073	1092
ORTALAMA									2,389					3,13	1056		
4	4,5	4,31	51,8	63,8	1197,9	703,1	1202,1	499,0	2,401	2,559	6,24	15,45	59,63	3,18	10,32	0,992	1044
5	4,5	4,31	51,8	62,9	1199,6	705,6	1205,7	500,1	2,399					3,05	10,50	1,016	1087
6	4,5	4,31	51,8	62,4	1198,7	704,9	1204,4	499,5	2,400					3,18	9,88	1,028	1035
ORTALAMA									2,400					3,13	1055		
7	5,0	4,76	57,5	62,4	1202,8	708,3	1204,6	496,3	2,424	2,541	4,53	14,93	69,64	3,30	9,93	1,028	1041
8	5,0	4,76	57,5	62,1	1203,7	709,5	1205,3	495,8	2,428					3,05	9,86	1,036	1041
9	5,0	4,76	57,5	62,6	1204,3	710,3	1206,6	496,3	2,427					3,30	9,90	1,023	1032
ORTALAMA									2,426					3,22	1038		
10	5,5	5,21	63,3	61,6	1206,2	713,2	1207,6	494,4	2,440	2,523	3,37	14,90	77,39	3,56	9,52	1,050	1019
11	5,5	5,21	63,3	62,7	1207,3	714,4	1209,3	494,9	2,439					3,05	9,28	1,021	966
12	5,5	5,21	63,3	62,0	1204,5	712,0	1206,5	494,5	2,436					3,43	9,29	1,038	983
ORTALAMA									2,438					3,34	989		
13	6,0	5,66	69,0	56,5	1206,5	714,2	1208,8	494,6	2,439	2,506	2,69	15,30	82,39	3,81	7,81	1,214	966
14	6,0	5,66	69,0	57,3	1204,6	712,9	1207,2	494,3	2,437					3,30	7,95	1,184	960
15	6,0	5,66	69,0	57,5	1205,7	713,5	1207,8	494,3	2,439					3,56	7,78	1,178	934
ORTALAMA									2,439					3,56	953		
16	6,5	6,10	74,8	58,3	1212,8	715,8	1214,6	498,8	2,431	2,489	2,35	15,97	85,29	3,94	7,68	1,152	902
17	6,5	6,10	74,8	58,2	1210,5	714,0	1212,6	498,6	2,428					4,06	7,39	1,155	870
18	6,5	6,10	74,8	61,1	1211,6	715,1	1213,2	498,1	2,432					4,19	7,82	1,064	848
ORTALAMA									2,431					4,06	873		



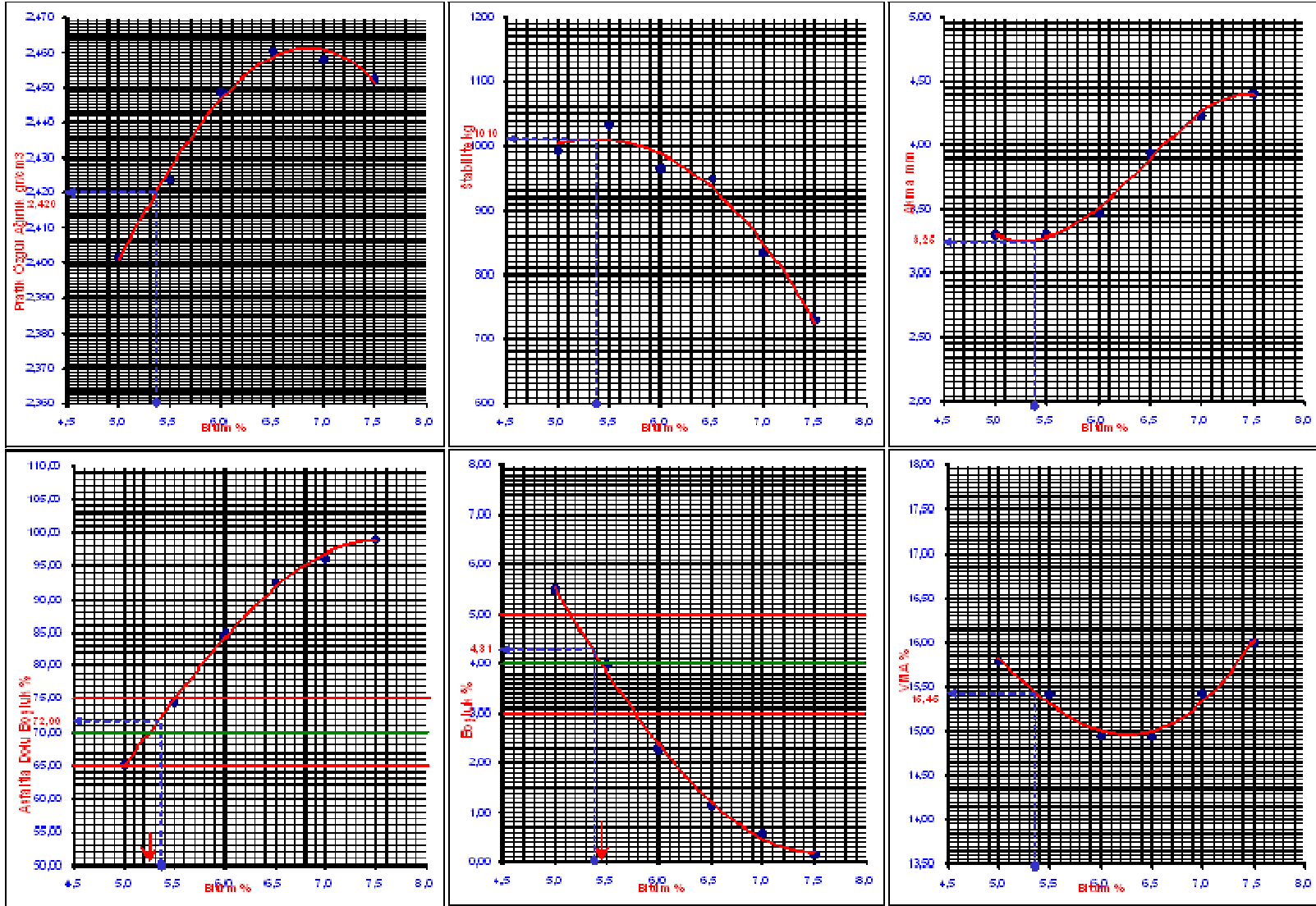
Şekil A.2: %10 GSF katkıli karışım Marshall tasarım grafikleri

Çizelge A.6: %20 GSF katkıli karışım Marshall numuneleri fiziksel özellikleri

Sıra No	Bitim % (Wa)	Bitüm Mik.(gr)	Yükseklik (mm)	Havadaki Ağırlık (gr) (A)	Doygun Yüzev Ağırlık (gr) (B)	Sudaki Ağırlık (gr) (C)	Hacmi, (V) (B - C)	Pratik Özgül Ağırlık (Dp) (A / V)	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü TSE-3720	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	5,00	57,5	58,6	1215,2	1207,8	701,5	506,3	2,400	2,79	9,75	1,143	1136
2	5,00	57,5	62,2	1214,2	1214,3	708,7	505,6	2,402	3,81	9,54	1,033	1005
3	5,00	57,5	62,1	1213,5	1205,1	700,2	504,9	2,403	3,30	9,28	1,036	980
ORTALAMA								2,402	3,30	1040		
4	5,50	63,3	59,8	1223,3	1219,9	715,4	504,5	2,425	3,05	9,23	1,104	1039
5	5,50	63,3	60,4	1221,8	1210,9	706,7	504,2	2,423	3,56	9,75	1,085	1078
6	5,50	63,3	61,9	1220,9	1222,3	718,4	503,9	2,423	3,30	9,26	1,040	982
ORTALAMA								2,424	3,30	1033		
7	6,00	69,0	63,4	1220,8	1221,3	718,1	503,2	2,426	3,81	9,19	1,003	940
8	6,00	69,0	61,8	1222,9	1206,2	708,2	498,0	2,456	3,56	9,33	1,044	993
9	6,00	69,0	63,3	1229,5	1230,0	726,5	503,5	2,442	3,05	9,40	1,006	964
ORTALAMA								2,441	3,47	965		
10	6,50	74,8	61,7	1216,9	1217,0	723,3	493,7	2,465	4,32	8,93	1,047	953
11	6,50	74,8	62,4	1222,2	1222,8	725,2	497,6	2,456	3,94	9,02	1,028	945
12	6,50	74,8	63,4	1231,3	1232,3	726,2	506,1	2,433	3,56	7,45	1,003	762
ORTALAMA								2,451	3,94	887		
13	7,00	80,5	62,3	1219,3	1220,1	726,3	493,8	2,469	4,06	8,42	1,031	885
14	7,00	80,5	62,8	1226,3	1227,1	727,5	499,6	2,455	4,57	8,15	1,018	846
15	7,00	80,5	62,1	1216,9	1218,1	721,4	496,7	2,450	4,06	7,34	1,036	775
ORTALAMA								2,458	4,23	835		
16	7,50	86,3	60,4	1178,8	1179,7	700,5	479,2	2,460	3,30	7,60	1,085	841
17	7,50	86,3	63,0	1220,6	1222,5	725,4	497,1	2,455	5,08	7,20	1,013	743
18	7,50	86,3	64,3	1235,8	1236,4	730,3	506,1	2,442	4,83	7,18	0,980	717
ORTALAMA								2,452	4,40	767		

Çizelge A.7: %20 GSF katkılı karışım Marshall tasarım çizelgesi

Briket No	Bitüm			Briket Yüksekliği Ort.	Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Özg.	Max. Teo.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
	% Wa	% Wb	(gr)		Ağırl. (gr) A	Ağırl. (gr) C	K.Ağırl.(gr) B	(cm ³) V	Ağırlık DP	Öz. Ağırlık DT	% Vh	Boşluk % VMA	Boşluk % Vf				
1	5,0	4,76	57,5	58,6	1215,2	701,5	1207,8	506,3	2,400	2,541	5,49	15,78	65,23	2,79	9,75	1,143	1136
2	5,0	4,76	57,5	62,2	1214,2	708,7	1214,3	505,6	2,402					3,81	9,54	1,033	1005
3	5,0	4,76	57,5	62,1	1213,5	700,2	1205,1	504,9	2,403					3,30	9,28	1,036	980
ORTALAMA									2,402					3,30	992		
4	5,5	5,21	63,3	59,8	1223,3	715,4	1219,9	504,5	2,425	2,523	3,95	15,42	74,36	3,05	9,23	1,104	1039
5	5,5	5,21	63,3	60,4	1221,8	706,7	1210,9	504,2	2,423					3,56	9,75	1,085	1078
6	5,5	5,21	63,3	61,9	1220,9	718,4	1222,3	503,9	2,423					3,30	9,26	1,040	982
ORTALAMA									2,424					3,30	1033		
7	6,0	5,66	69,0	63,4	1220,8	718,1	1221,3	503,2	2,426	2,506	2,28	14,94	84,71	3,81	9,19	1,003	940
8	6,0	5,66	69,0	61,8	1222,9	708,2	1206,2	498,0	2,456					3,56	9,33	1,044	993
9	6,0	5,66	69,0	63,3	1229,5	726,5	1230,0	503,5	2,442					3,05	9,40	1,006	964
ORTALAMA									2,449					3,47	965		
10	6,5	6,10	74,8	61,7	1216,9	723,3	1217,0	493,7	2,465	2,489	1,15	14,94	92,33	4,32	8,93	1,047	953
11	6,5	6,10	74,8	62,4	1222,2	725,2	1222,8	497,6	2,456					3,94	9,02	1,028	945
12	6,5	6,10	74,8	63,4	1231,3	726,2	1232,3	506,1	2,433					3,56	7,45	1,003	762
ORTALAMA									2,461					3,94	949		
13	7,0	6,54	80,5	62,3	1219,3	726,3	1220,1	493,8	2,469	2,472	0,59	15,42	96,18	4,06	8,42	1,031	885
14	7,0	6,54	80,5	62,8	1226,3	727,5	1227,1	499,6	2,455					4,57	8,15	1,018	846
15	7,0	6,54	80,5	62,1	1216,9	721,4	1218,1	496,7	2,450					4,06	7,34	1,036	775
ORTALAMA									2,458					4,23	835		
16	7,5	6,98	86,3	60,4	1178,8	700,5	1179,7	479,2	2,460	2,456	0,16	16,01	99,02	3,30	7,60	1,085	841
17	7,5	6,98	86,3	63,0	1220,6	725,4	1222,5	497,1	2,455					5,08	7,20	1,013	743
18	7,5	6,98	86,3	64,3	1235,8	730,3	1236,4	506,1	2,442					4,83	7,18	0,980	717
ORTALAMA									2,452					4,40	730		



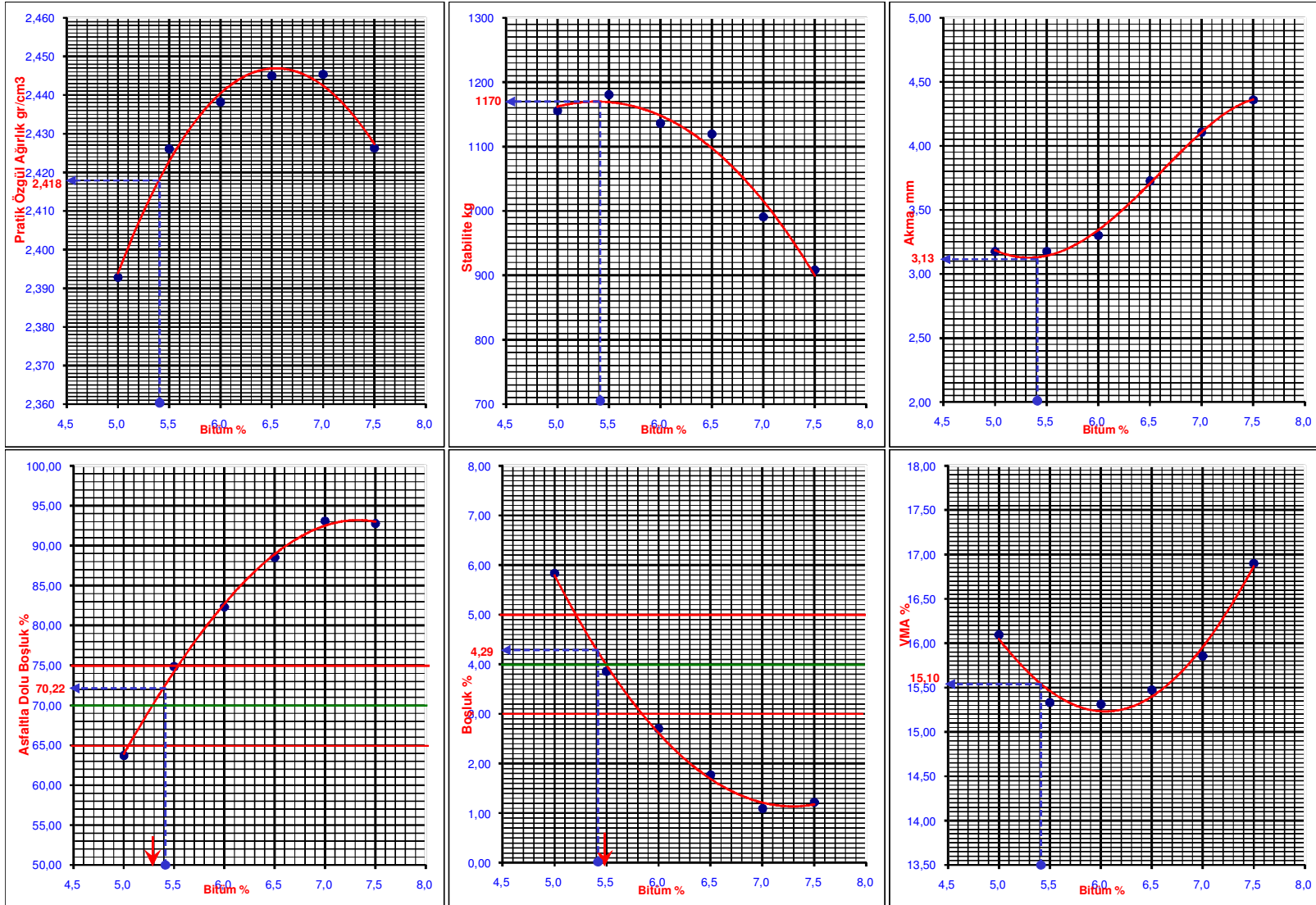
Şekil A.3: %20 GSF katkılı karışım Marshall tasarım grafikleri

Çizelge A.8: %30 GSF katkılı karışım Marshall numuneleri fiziksel özellikleri

Sıra No	Bitüm % (Wa)	Bitüm Mik.(gr)	Yükseklik (mm)	Havadaki Ağırlık (gr) (A)	Doygun Yüzey Ağırlık (gr) (B)	Sudaki Ağırlık (gr) (C)	Hacim (V) (B - C)	Pratik Özgül Ağırlık (Dp) (A / V)	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü TSE-3720	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	5,00	57,5	62,0	1197,2	1206,0	705,7	500,3	2,393	3,05	10,80	1,038	1143
2	5,00	57,5	62,1	1199,9	1210,1	708,9	501,2	2,394	3,18	10,93	1,036	1154
3	5,00	57,5	61,5	1201,2	1211,6	709,3	502,3	2,391	3,30	10,90	1,053	1170
ORTALAMA								2,393	3,18	1156		
4	5,50	63,3	65,3	1196,8	1199,6	707,5	492,1	2,432	3,05	10,92	0,955	1063
5	5,50	63,3	60,4	1195,5	1198,8	704,8	494,0	2,420	3,18	10,73	1,085	1187
6	5,50	63,3	60,0	1206,0	1209,3	707,4	501,9	2,403	3,30	10,50	1,097	1174
ORTALAMA								2,418	3,18	1141		
7	6,00	69,0	61,3	1216,3	1220,4	721,9	498,5	2,440	3,05	10,57	1,059	1141
8	6,00	69,0	61,9	1211,5	1214,2	717,2	497,0	2,438	3,30	10,67	1,040	1131
9	6,00	69,0	65,0	1210,0	1212,9	716,4	496,5	2,437	3,56	9,90	0,962	971
ORTALAMA								2,438	3,30	1081		
10	6,50	74,8	64,3	1214,6	1217,7	720,5	497,2	2,443	3,81	9,90	0,980	989
11	6,50	74,8	60,3	1217,6	1221,3	723,4	497,9	2,445	4,57	10,10	1,088	1120
12	6,50	74,8	60,0	1215,9	1218,3	721,3	497,0	2,446	2,79	10,00	1,097	1118
ORTALAMA								2,445	3,73	1076		
13	7,00	80,5	64,4	1230,5	1235,4	732,6	502,8	2,447	3,81	9,70	0,978	967
14	7,00	80,5	63,3	1225,7	1228,2	727,2	501,0	2,447	4,32	9,90	1,006	1015
15	7,00	80,5	63,8	1221,9	1223,0	722,7	500,3	2,442	4,19	9,80	0,992	991
ORTALAMA								2,445	4,11	991		
16	7,50	86,3	64,0	1250,9	1252,3	736,5	515,8	2,425	4,19	8,27	0,988	833
17	7,50	86,3	60,6	1246,0	1247,6	734,6	513,0	2,429	4,32	8,64	1,079	950
18	7,50	86,3	60,4	1247,1	1248,0	733,7	514,3	2,425	4,57	8,51	1,085	941
ORTALAMA								2,426	4,36	908		

Çizelge A.9: GSF %30, Marshall tasarım çizelgesi

Briket No	Bitüm			Briket Yüksekliği Ort.	Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Özg.	Max. Teo.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
	%	%	(gr)		Ağrl. (gr)	Ağrl. (gr)	K.Ağrl.(gr)	(cm ³)	Ağırlık	Öz. Ağırlık	%	Boşluk %	Boşluk %	(mm)	(kN)	Faktörü	Stabilite
	Wa	Wb			A	C	B	V	DP	DT	Vh	VMA	Vf				(kg)
1	5,0	4,76	57,5	62,0	1197,2	705,7	1206,0	500,3	2,393	2,541	5,84	16,10	63,73	3,05	10,80	1,038	1143
2	5,0	4,76	57,5	62,1	1199,9	708,9	1210,1	501,2	2,394					3,18	10,93	1,036	1154
3	5,0	4,76	57,5	61,5	1201,2	709,3	1211,6	502,3	2,391					3,30	10,90	1,053	1170
ORTALAMA									2,393				3,18	1156			
4	5,5	5,21	63,3	65,3	1196,8	707,5	1199,6	492,1	2,432	2,523	3,86	15,33	74,84	3,05	10,92	0,955	1063
5	5,5	5,21	63,3	60,4	1195,5	704,8	1198,8	494,0	2,420					3,18	10,73	1,085	1187
6	5,5	5,21	63,3	60,0	1206,0	707,4	1209,3	501,9	2,403					3,30	10,50	1,097	1174
ORTALAMA									2,426				3,18	1180			
7	6,0	5,66	69,0	61,3	1216,3	721,9	1220,4	498,5	2,440	2,506	2,71	15,31	82,32	3,05	10,57	1,059	1141
8	6,0	5,66	69,0	61,9	1211,5	717,2	1214,2	497,0	2,438					3,30	10,67	1,040	1131
9	6,0	5,66	69,0	65,0	1210,0	716,4	1212,9	496,5	2,437					3,56	9,90	0,962	971
ORTALAMA									2,438				3,30	1136			
10	6,5	6,10	74,8	64,3	1214,6	720,5	1217,7	497,2	2,443	2,489	1,77	15,48	88,55	3,81	9,90	0,980	989
11	6,5	6,10	74,8	60,3	1217,6	723,4	1221,3	497,9	2,445					4,57	10,10	1,088	1120
12	6,5	6,10	74,8	60,0	1215,9	721,3	1218,3	497,0	2,446					2,79	10,00	1,097	1118
ORTALAMA									2,445				3,73	1119			
13	7,0	6,54	80,5	64,4	1230,5	732,6	1235,4	502,8	2,447	2,472	1,10	15,86	93,09	3,81	9,70	0,978	967
14	7,0	6,54	80,5	63,3	1225,7	727,2	1228,2	501,0	2,447					4,32	9,90	1,006	1015
15	7,0	6,54	80,5	63,8	1221,9	722,7	1223,0	500,3	2,442					4,19	9,80	0,992	991
ORTALAMA									2,445				4,11	991			
16	7,5	6,98	86,3	64,0	1250,9	736,5	1252,3	515,8	2,425	2,456	1,22	16,90	92,78	4,19	8,27	0,988	833
17	7,5	6,98	86,3	60,6	1246,0	734,6	1247,6	513,0	2,429					4,32	8,64	1,079	950
18	7,5	6,98	86,3	60,4	1247,1	733,7	1248,0	514,3	2,425					4,57	8,51	1,085	941
ORTALAMA									2,426				4,36	908			



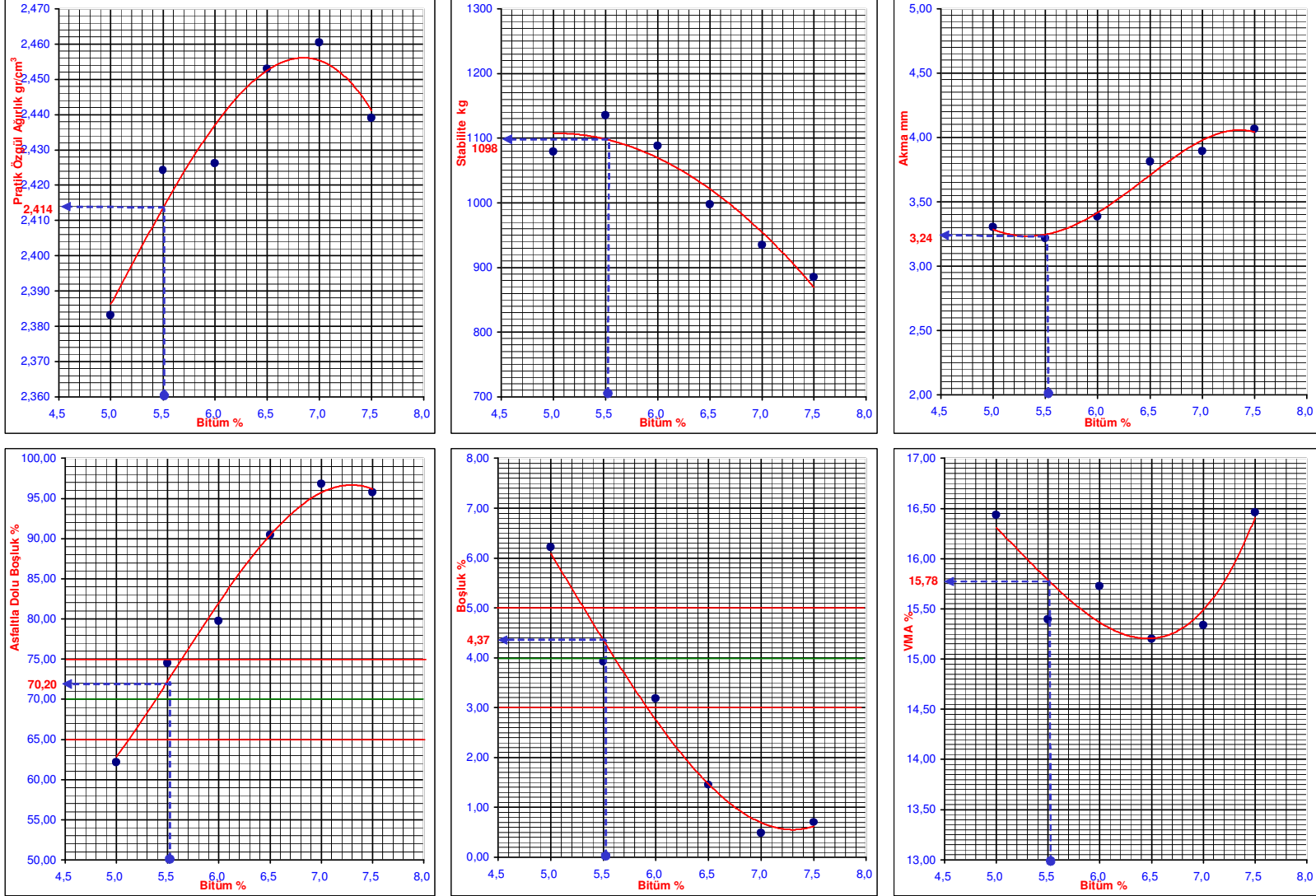
Şekil A.4: %30 GSF katkılı karışımın Marshall tasarım grafikleri

Çizelge A.10: %40 GSF katkılı karışım Marshall numuneleri fiziksel özellikleri

Sıra No	Bitüm % (Wa)	Bitüm Mik.(gr)	Yükseklik (mm)	Havadaki Ağırlık (gr) (A)	Havadaki Ağırlık (gr) Doğru Yüzey (B)	Sudaki Ağırlık (gr) (C)	Hacmi (V) (B-C)	Pratik Özgül Ağırlık (Dp) (A / V)	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	5,00	57,5	63,6	1212,9	1218,9	708,4	510,5	2,376	3,30	10,80	0,998	1099
2	5,00	57,5	65,0	1211,7	1217,2	709,1	508,1	2,385	3,56	10,94	0,962	1073
3	5,00	57,5	64,5	1211,7	1215,0	707,7	507,3	2,389	3,05	10,73	0,975	1066
ORTALAMA								2,383	3,30	1079		
4	5,50	63,3	63,0	1210,7	1211,4	711,9	499,5	2,424	2,29	10,77	1,013	1112
5	5,50	63,3	63,2	1211,6	1211,2	710,6	500,6	2,420	3,56	11,33	1,008	1164
6	5,50	63,3	62,3	1208,3	1209,8	712,3	497,5	2,429	3,81	10,75	1,031	1130
ORTALAMA								2,424	3,22	1135		
7	6,00	69,0	62,6	1224,5	1226,2	720,1	506,1	2,419	3,81	10,78	1,023	1124
8	6,00	69,0	62,5	1221,1	1225,6	721,6	504,0	2,423	3,56	9,83	1,016	1018
9	6,00	69,0	62,6	1224,5	1225,0	722,4	502,6	2,436	2,79	10,76	1,023	1122
ORTALAMA								2,426	3,39	1088		
10	6,50	74,8	63,5	1232,8	1234,5	733,6	500,9	2,461	3,30	9,43	1,000	961
11	6,50	74,8	62,5	1230,0	1232,8	731,8	501,0	2,455	4,06	9,93	1,016	1028
12	6,50	74,8	63,5	1234,7	1236,2	730,7	505,5	2,443	4,06	9,84	1,000	1003
ORTALAMA								2,453	3,81	998		
13	7,00	80,5	61,2	1236,6	1238,3	734,6	503,7	2,455	3,30	8,52	1,062	922
14	7,00	80,5	61,0	1234,6	1236,0	735,3	500,7	2,466	4,06	8,60	1,067	935
15	7,00	80,5	62,6	1239,2	1242,4	733,8	508,6	2,436	4,32	9,07	1,023	946
ORTALAMA								2,452	3,89	935		
16	7,50	86,3	59,2	1256,4	1257,0	738,9	518,1	2,425	3,81	7,31	1,124	838
17	7,50	86,3	58,8	1238,8	1240,4	735,4	505,0	2,453	3,56	7,82	1,137	906
18	7,50	86,3	58,5	1235,8	1236,6	740,2	496,4	2,490	4,83	7,80	1,146	911
ORTALAMA								2,456	4,06	885		

Çizelge A.11: GSF %40, Marshall tasarım çizelgesi

Bir. No	Bitüm			Briket Yüks. Ort.	Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Özg.	Max. Teo. Öz. Ağırlık	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
	%	%	(gr)		Ağırl. (gr)	Ağırl. (gr)	K.Ağırl.(gr)	(cm ³)	Ağırlık	%	Boşluk %	Boşluk %	(mm)	(kN)	Faktörü	Stabilite	
	Wa	Wb			A	C	B	V	DP	DT	Vh	VMA	Vf				(kg)
1	5,0	4,76	57,5	63,6	1212,9	708,4	1218,9	510,5	2,376	2,541	6,22	16,44	62,15	3,30	10,80	0,998	1099
2	5,0	4,76	57,5	65,0	1211,7	709,1	1217,2	508,1	2,385					3,56	10,94	0,962	1073
3	5,0	4,76	57,5	64,5	1211,7	707,7	1215,0	507,3	2,389					3,05	10,73	0,975	1066
ORTALAMA									2,383				3,30	1079			
4	5,5	5,21	63,3	63,0	1210,7	711,9	1211,4	499,5	2,424	2,523	3,93	15,39	74,49	2,29	10,77	1,013	1112
5	5,5	5,21	63,3	63,2	1211,6	710,6	1211,2	500,6	2,420					3,56	11,33	1,008	1164
6	5,5	5,21	63,3	62,3	1208,3	712,3	1209,8	497,5	2,429					3,81	10,75	1,031	1130
ORTALAMA									2,424				3,22	1135			
7	6,0	5,66	69,0	62,6	1224,5	720,1	1226,2	506,1	2,419	2,506	3,18	15,73	79,75	3,81	10,78	1,023	1124
8	6,0	5,66	69,0	62,5	1221,1	721,6	1225,6	504,0	2,423					3,56	9,83	1,016	1018
9	6,0	5,66	69,0	62,6	1224,5	722,4	1225,0	502,6	2,436					2,79	10,76	1,023	1122
ORTALAMA									2,426				3,39	1088			
10	6,5	6,10	74,8	63,5	1232,8	733,6	1234,5	500,9	2,461	2,489	1,45	15,20	90,45	3,30	9,43	1,000	961
11	6,5	6,10	74,8	62,5	1230,0	731,8	1232,8	501,0	2,455					4,06	9,93	1,016	1028
12	6,5	6,10	74,8	63,5	1234,7	730,7	1236,2	505,5	2,443					4,06	9,84	1,000	1003
ORTALAMA									2,453				3,81	998			
13	7,0	6,54	80,5	61,2	1236,6	734,6	1238,3	503,7	2,455	2,472	0,49	15,34	96,81	3,30	8,52	1,062	922
14	7,0	6,54	80,5	61,0	1234,6	735,3	1236,0	500,7	2,466					4,06	8,60	1,067	935
15	7,0	6,54	80,5	62,6	1239,2	733,8	1242,4	508,6	2,436					4,32	9,07	1,023	946
ORTALAMA									2,460				3,89	935			
16	7,5	6,98	86,3	59,2	1256,4	738,9	1257,0	518,1	2,425	2,456	0,70	16,46	95,74	3,81	7,31	1,124	838
17	7,5	6,98	86,3	58,8	1238,8	735,4	1240,4	505,0	2,453					3,56	7,82	1,137	906
18	7,5	6,98	86,3	58,5	1235,8	740,2	1236,6	496,4	2,490					4,83	7,80	1,146	911
ORTALAMA									2,439				4,06	885			



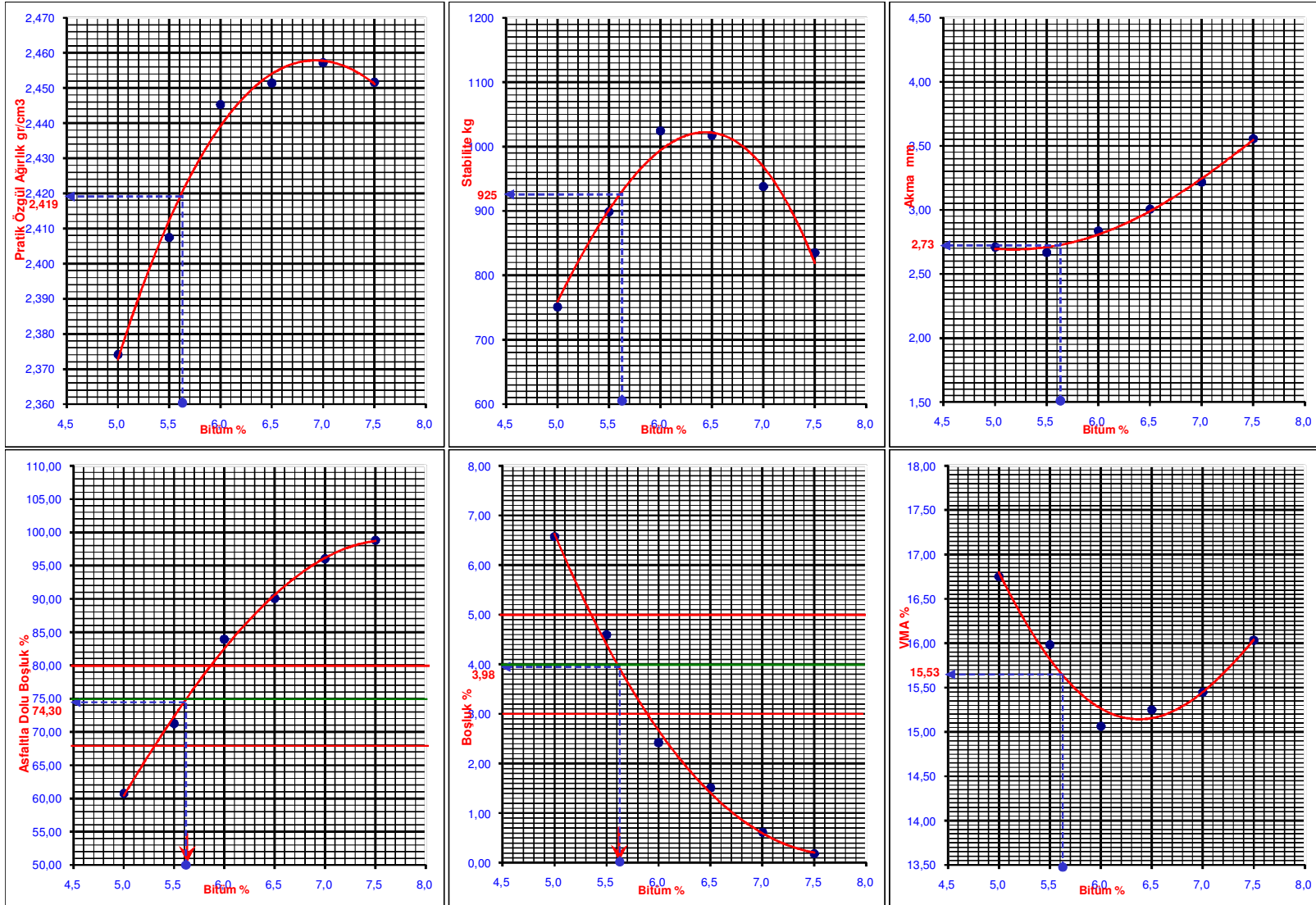
Şekil A.5: %40 GSF katkılı karışımın Marshall tasarım grafikleri

Çizelge A.12: %50 GSF katkılı karışım Marshall numuneleri fiziksel özellikleri

Sıra No	Bitüm % (Wa)	Bitüm Mik.(gr)	Yükseklik (mm)	Havadaki Ağırlık (gr) (A)	Doygun Yüze Ağırlık (gr) (B)	Sudaki Ağırlık (gr) (C)	Hacmi (V) (B - C)	Pratik Özgül Ağırlık (Dp) (A / V)	Akma (mm)	Stabilite (kN)	Düzeltilme Faktörü TSE-3720	Düzeltilmiş Stabilite (kg)
1	5,00	57,5	63,5	1217,1	1222,5	713,8	508,7	2,393	2,79	11,20	1,000	1142
2	5,00	57,5	65,6	1218,2	1227,6	745,3	482,3	2,526	2,79	8,20	0,949	793
3	5,00	57,5	64,7	1225,6	1243,7	723,4	520,3	2,356	2,54	7,17	0,970	709
ORTALAMA								2,425	2,71	881		
4	5,50	63,3	64,8	1229,8	1233,1	722,3	510,8	2,408	2,79	9,40	0,967	927
5	5,50	63,3	64,4	1228,1	1231,1	720,9	510,2	2,407	2,29	8,73	0,978	870
6	5,50	63,3	65,1	1229,3	1232,8	722,2	510,6	2,408	2,92	8,10	0,960	793
ORTALAMA								2,407	2,67	863		
7	6,00	69,0	64,5	1239,0	1240,3	732,7	507,6	2,441	2,92	10,62	0,975	1056
8	6,00	69,0	64,8	1233,2	1233,6	730,2	503,4	2,450	2,79	10,08	0,967	994
9	6,00	69,0	65,1	1238,8	1240,6	725,4	515,2	2,405	2,79	8,03	0,960	786
ORTALAMA								2,432	2,84	945		
10	6,50	74,8	63,9	1243,4	1243,8	738,2	505,6	2,459	3,05	10,15	0,990	1024
11	6,50	74,8	64,4	1242,8	1244,1	735,5	508,6	2,444	2,79	10,55	0,978	1052
12	6,50	74,8	65,4	1244,1	1245,8	727,7	518,1	2,401	3,18	10,05	0,953	976
ORTALAMA								2,435	3,01	1017		
13	7,00	80,5	62,9	1240,7	1246,8	742,2	504,6	2,459	3,05	11,98	1,016	1241
14	7,00	80,5	64,9	1256,8	1257,5	745,7	511,8	2,456	3,81	9,92	0,965	976
15	7,00	80,5	64,7	1249,5	1250,8	729,2	521,6	2,396	2,79	9,10	0,970	900
ORTALAMA								2,437	3,22	1039		
16	7,50	86,3	64,5	1254,3	1258,0	745,5	512,5	2,447	3,81	8,90	0,975	885
17	7,50	86,3	64,0	1255,1	1255,7	746,2	509,5	2,463	3,30	8,28	0,988	834
18	7,50	86,3	65,9	1258,2	1260,3	745,5	514,8	2,444	3,56	8,18	0,943	786
ORTALAMA								2,452	3,56	835		

Çizelge A.13: GSF %50, Marshall tasarım çizelgesi

Briket No	Bitüm			Briket Yüksekliği Ort.	Havadaki	Sudaki	Doy. Yüz.	Hacim	Hac. Özg.	Max. Teo.	Boşluk	Agr.Arası	Asf.Dolu	Akma	Stabilite	Düzeltilme	Düzeltilmiş
	% Wa	% Wb	(gr)		Ağırl. (gr)	Ağırl. (gr)	K.Ağırl.(gr)	(cm ³)	Ağırlık	Öz. Ağırlık	%	Boşluk %	Boşluk %	(mm)	(kN)	Faktörü	Stabilite (kg)
					A	C	B	V	DP	DT	Vh	VMA	Vf				
1	5,0	4,76	57,5	63,5	1217,1	713,8	1222,5	508,7	2,393	2,541	6,58	16,75	60,75	2,79	11,20	1,000	1142
2	5,0	4,76	57,5	65,6	1218,2	745,3	1227,6	482,3	2,526					2,79	8,20	0,949	793
3	5,0	4,76	57,5	64,7	1225,6	723,4	1243,7	520,3	2,356					2,54	7,17	0,970	709
ORTALAMA									2,374					2,71	751		
4	5,5	5,21	63,3	64,8	1229,8	722,3	1233,1	510,8	2,408	2,523	4,60	15,98	71,25	2,79	9,40	0,967	927
5	5,5	5,21	63,3	64,4	1228,1	720,9	1231,1	510,2	2,407					2,29	8,73	0,978	870
6	5,5	5,21	63,3	65,1	1229,3	722,2	1232,8	510,6	2,408					2,92	8,10	0,960	793
ORTALAMA									2,407					2,67	898		
7	6,0	5,66	69,0	64,5	1239,0	732,7	1240,3	507,6	2,441	2,506	2,42	15,06	83,92	2,92	10,62	0,975	1056
8	6,0	5,66	69,0	64,8	1233,2	730,2	1233,6	503,4	2,450					2,79	10,08	0,967	994
9	6,0	5,66	69,0	65,1	1238,8	725,4	1240,6	515,2	2,405					2,79	8,03	0,960	786
ORTALAMA									2,445					2,84	1025		
10	6,5	6,10	74,8	63,9	1243,4	738,2	1243,8	505,6	2,459	2,489	1,51	15,25	90,08	3,05	10,15	0,990	1024
11	6,5	6,10	74,8	64,4	1242,8	735,5	1244,1	508,6	2,444					2,79	10,55	0,978	1052
12	6,5	6,10	74,8	65,4	1244,1	727,7	1245,8	518,1	2,401					3,18	10,05	0,953	976
ORTALAMA									2,451					3,01	1017		
13	7,0	6,54	80,5	62,9	1240,7	742,2	1246,8	504,6	2,459	2,472	0,62	15,45	96,01	3,05	11,98	1,016	1241
14	7,0	6,54	80,5	64,9	1256,8	745,7	1257,5	511,8	2,456					3,81	9,92	0,965	976
15	7,0	6,54	80,5	64,7	1249,5	729,2	1250,8	521,6	2,396					2,79	9,10	0,970	900
ORTALAMA									2,457					3,22	938		
16	7,5	6,98	86,3	64,5	1254,3	745,5	1258,0	512,5	2,447	2,456	0,19	16,03	98,82	3,81	8,90	0,975	885
17	7,5	6,98	86,3	64,0	1255,1	746,2	1255,7	509,5	2,463					3,30	8,28	0,988	834
18	7,5	6,98	86,3	65,9	1258,2	745,5	1260,3	514,8	2,444					3,56	8,18	0,943	786
ORTALAMA									2,452					3,56	835		



Şekil A.6: %50 GSF katkı karışımın Marshall tasarım grafikleri

EK B: Marshall Düzeltme Faktörleri

Çizelge B.1: Marshall numuneleri düzeltme katsayıları

Numune Yüksekliği (mm)	Düzeltilme Faktörü	Numune Yüksekliği (mm)	Düzeltilme Faktörü
60,0	1,097	62,2	1,033
60,1	1,094	62,3	1,031
60,2	1,090	62,4	1,028
60,3	1,088	62,5	1,016
60,4	1,085	62,6	1,023
60,5	1,082	62,7	1,021
60,6	1,079	62,8	1,018
60,7	1,076	62,9	1,020
60,8	1,073	63,0	1,013
60,9	1,059	63,1	1,011
61,0	1,067	63,2	1,008
61,1	1,064	63,3	1,006
61,2	1,062	63,4	1,003
61,3	1,060	63,5	1,000
61,4	1,056	63,6	0,998
61,5	1,053	63,7	0,995
61,6	1,050	63,8	0,992
61,7	1,047	63,9	0,990
61,8	1,044	64,0	0,988
61,9	1,040	64,1	0,975
62,0	1,038	64,2	0,982
62,1	1,036	64,3	0,980

EK C: Performans Deneyleri

Çizelge C.1: Geleneksel karışım, Dolaylı çekme deneyi değerleri, Kontrol

Sıcaklık	Sıra No.	Numune No	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
			40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
			με	E	με	E	με	E	με	E	με	E	με	E	με	E	με	E	με	E
5 °C	S1	1	6,5688	22861	7,5072	19395	8,0039	18488	6,8999	21624	7,3967	19533	7,1207	20696	6,1823	23130	6,7896	21517	7,9488	21117
	S1	1	5,9064	25276	5,8512	24995	6,4031	23222	6,4031	23222	6,2376	24884	6,072	24462	5,5199	26016	5,96115	25603	5,9615	23731
	S2	2	5,9016	23885	6,5688	21897	6,9552	20965	6,3479	23493	6,6792	22520	6,624	21361	6,1271	25022	6,3479	23053	6,5135	21981
	S2	2	6,5688	22766	7,6176	20547	7,3968	19747	6,5136	22892	6,7896	21339	7,2312	19561	6,9352	21626	6,7896	21755	7,2312	20907
	S3	3	5,52	28177	5,4648	27279	5,9064	25034	5,4096	27684	4,968	28505	6,0168	25216	5,2992	27265	5,3543	28508	5,8512	26348
	S3	3	5,9064	25254	5,9616	25285	6,2928	24296	5,244	27714	5,5751	25629	5,4648	26371	5,0783	27701	5,3544	26943	5,6304	25099
25 °C	S1	1	28,483	5197,3	34,886	4220,3	41,013	3617,8	32,678	4529,2	39,136	3709	43,552	3265,8	31,188	4538,3	37,756	3843,7	42,393	3359,7
	S1	1	24,012	6151,1	28,869	4948,9	35,162	4131	26,385	5517,2	31,629	4635,3	34,444	4292,4	21,417	5844,8	29,587	5078,1	34,61	4293,3
	S2	2	20,644	7101	25,392	5621,8	29,642	4765,1	22,08	6391,9	28,869	5289,8	31,408	4533,5	23,349	6282,3	28,317	5267,5	31,132	4589
	S2	2	19,099	7656,2	23,239	6147,1	27,876	5047,8	22,742	6358,9	28,428	5054,3	32,457	4372,4	24,177	6095,2	27,544	5219	31,519	4518,6
	S3	3	21,417	7074,6	24,232	5999	27,103	5205,2	20,037	7079,4	24,067	6014,3	27,268	5185,9	20,258	7108,2	23,239	6077,2	27,103	5322,5
	S3	3	19,044	7770,2	22,963	6389,2	27,655	5485,6	21,031	7002	25,005	5773,5	27,489	5141,8	21,031	7125,7	24,398	5880,8	27,379	5190,9
40 °C	S1	1	96,324	1526,7	117,74	1218,1	146,16	995,84	111,5	1278	133,03	1120,9	148,7	1003,6	111,78	1269,6	140,92	1082,3	153,89	986,8
	S1	1	94,336	1550,7	107,25	1270,3	139,26	1063,9	110,56	1326,9	130,27	1156,7	143,57	1040,2	116,36	1245,1	133,25	1120,6	149,92	995,47
	S2	2	92,736	1627,5	107,86	1305,4	130,16	1147,5	103,05	1399,4	121,44	1228	137	1082,9	105,1	1373,1	124,2	1213,1	137	1071,7
	S2	2	97,704	1440,3	118,23	1186,1	133,14	1054,6	105,92	1302,5	125,08	1155,4	138,11	1015,5	110,34	1253,8	132,64	1111,2	147,16	982,3
	S3	3	87,436	1682	104,76	1349,7	132,7	1132,6	101,67	1413,2	122,65	1233,4	136,5	1095,8	103,05	1361,3	120,88	1219	135,62	1090,7
	S3	3	103,38	1315,8	124,36	1134,5	145,5	1018,1	111,06	1265,2	131,7	1123,5	147,43	1012,3	110,62	1263,2	130,98	1128,5	144,84	1022,8

Çizelge C.2: GSA10, Dolaylı çekme deneyi değerleri

Sıcaklık	Sıra No.	Numune No	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
			40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	S1	1	7,2311	21026	6,9	21913	7,6175	19288	6,624	22123	6,7344	21112	7,3416	19494	6,5687	22142	6,7896	21988	7,3415	19558
	S1	1	6,1823	23281	6,624	22518	8,004	18686	6,6792	21906	7,0656	21454	7,1208	20419	6,624	22346	7,2312	20021	7,3968	19834
	S2	2	8,556	16303	9,0527	15207	9,6047	15942	8,7767	16257	9,3839	14798	9,4391	14249	8,5559	16810	8,8319	15859	9,2736	14527
	S2	2	8,7768	16151	8,9976	15394	9,6048	14215	8,556	16249	9,8256	14693	9,4392	14126	8,2248	16586	9,2736	15422	9,0528	14768
	S3	3	7,5072	19332	7,728	18623	8,2799	17543	6,9552	21098	7,6727	18947	8,1143	17550	7,1207	20843	7,2863	19927	7,9488	18389
	S3	3	6,8448	20900	7,8383	18915	7,8383	18346	6,6792	21776	7,3968	19621	7,2863	19275	6,7896	21510	7,1208	20378	7,3967	19808
25 °C	S1	1	35,99	3966,3	47,692	3043	57,96	2492,7	42,393	3443,3	49,017	2887,6	56,028	2483,1	43,221	3437,2	50,066	2853,4	56,745	2461,9
	S1	1	42,448	3357,8	51,998	2813	59,947	2416,4	41,176	3409,5	50,176	3002,5	57,242	2513,7	40,075	3643,1	50,618	3050,1	54,592	2588,1
	S2	2	37,646	3777,3	47,196	2863,7	58,346	2359	43,111	3302,3	51,391	2713,2	59,064	2325,3	42,062	3300,5	49,128	2808,3	56,356	2436
	S2	2	44,767	3116,1	54,427	2580,3	59,505	2206,2	45,319	3058,3	55,255	2644,9	61,161	2243,6	43,608	3175,7	52,55	2679,6	57,573	2302,9
	S3	3	30,36	4680,5	37,922	3823,2	43,718	3285,3	34,61	4382,9	41,124	3591,6	45,484	3061,5	34,334	4277,5	41,068	3604,3	44,932	3097,4
	S3	3	34,444	4023,4	42,835	3417,2	48,631	2945,1	36,763	4064,2	44,24	3423,2	48,355	2967,1	34,113	4144,3	42,393	3571,9	46,257	3094,9
40 °C	S1	1	91,632	1626,4	112,71	1337,8	123,42	1166,3	95,661	1490,9	112,82	1314,9	126,46	1128,6	98,532	1439,7	119,28	1247,5	130,1	1109,3
	S1	1	97,372	1517,3	120,94	1240,9	146,39	984,66	112,11	1291,1	134,68	1116,8	149,31	961,4	114,48	1244,2	134,24	1133,9	144,78	1003,8
	S2	2	108,41	1310,1	126,46	1136,2	144,01	950,69	115,25	1172,2	132,25	1037,2	164,22	840,67	126,73	1049,5	146,16	945,28	163,99	845,45
	S2	2	128	1068	157,09	894,26	169,4	799,02	141,25	927,44	161,46	892,55	177,78	807,41	146,72	921,82	171,83	836,31	191,26	746,98
	S3	3	96,6	1514,5	119,78	1257,6	137,66	1056,4	119,94	1261,9	136,34	1077,6	153,06	976,84	123,42	1212,3	138,93	1052,1	151,85	954,59
	S3	3	82,86	1794,7	111,55	1349,1	132,03	1080,8	107,75	1299,7	131,37	1119,8	144,95	982,11	114,59	1220,3	138,88	1073,5	153,4	933,47

Çizelge C.3: GSA20, Dolaylı çekme deneyi değerleri

Sıcaklık	Sıra No.	Numune No	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
			40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	S1	1	7,0656	21057	7,8384	19050	7,2864	20464	6,7896	21221	7,1760	20908	7,6728	19483	6,9000	21019	7,1760	20721	7,3968	20005
	S1	1	5,9616	24152	6,0720	24277	6,3480	23275	5,4648	26553	6,4584	23235	6,7896	21823	5,9064	24371	6,4584	23127	6,7896	21975
	S2	2	6,5195	22198	6,8448	21823	6,8448	21763	6,2376	23444	6,9000	21853	6,7896	22073	5,5751	26236	6,6239	22745	6,7343	22324
	S2	2	11,2050	13291	12,4750	12283	12,4750	12163	11,0400	13214	12,1440	12459	12,2540	12350	11,0950	13248	12,0330	12633	12,0330	12526
	S3	3	6,3480	23191	6,3480	23887	7,0104	21569	6,1824	23518	6,4584	23430	6,6240	22990	5,6303	25555	6,6239	22905	6,7895	22536
	S3	3	5,6855	25268	6,5687	22800	6,5687	22617	5,8511	24686	6,29,27	23811	6,8448	22048	5,9064	24499	6,5136	23740	6,9000	22277
25 °C	S1	1	24,508	5971,2	28,372	5289,1	32,016	4652,1	25,336	5769,3	30,47	4972,3	34,058	4310,8	25,005	5693,9	30,249	4956,3	33,506	4491,6
	S1	1	28,152	5138,3	33,561	4439,5	38,695	3840,3	29,697	4924,1	35,99	4192,4	39,964	3729,7	28,041	5091,1	33,782	4432,5	38,088	39,007
	S2	2	23,128	6351,4	29,366	5166,9	32,733	4584,7	25,723	5755,8	30,249	5025,2	32,292	4627,6	23,846	6017,3	28,704	5272	31,85	4762,3
	S2	2	26,054	5772,1	27,655	5399,8	29,145	5088,7	21,031	6768,1	24,453	6167,6	27,71	5502,2	20,865	7113,9	24,067	6349,1	26,496	5747,1
	S3	3	20,037	7119,9	24,232	6288,4	27,655	5560,6	21,196	6870,8	25,226	6115,8	27,876	5436,5	21,307	6815,3	24,729	6117,5	20,589	6984,2
	S3	3	23,184	6440,3	26,992	5647,1	30,304	5025,6	22,797	6357,7	27,158	5589,3	30,856	4938,4	22,521	6454,9	26,716	5650,1	29,642	5110,6
40 °C	S1	1	171,56	831,35	188,67	785,09	206,88	714,23	167,47	836,12	191,37	762,35	212,46	689,37	172,88	828,74	198,16	751,94	217,59	687,46
	S1	1	161,57	880,4	186,85	790,73	206	714,84	166,86	847,11	190,66	775,4	205,62	722,75	160,19	882,3	178,68	817,29	192,04	768,51
	S2	2	115,92	1265,8	135,62	1120,2	148,48	1016,6	123,48	1174,5	142,36	1059,7	154,67	974,82	127,95	1124,4	144,78	1040	157,54	956,85
	S2	2	147,43	985,78	168,8	890,07	183,54	813,65	147,32	974,11	167,64	894,04	180,55	830,14	149,04	994,18	168,3	905,05	179,45	850,19
	S3	3	114,42	1272,7	131,37	1143,4	144,84	1029,3	121,6	1200,5	144,34	1039,8	156,87	953,47	125,41	1157,3	143,02	1056,5	155,49	965,74
	S3	3	129,72	1137,9	149,97	1041,3	163,61	928,51	132,56	1084,3	152,24	986,43	167,03	896,94	135,57	1067,2	157,37	962,43	168,63	898,18

Çizelge C.4: GSA30, Dolaylı çekme deneyi değerleri

Sıcaklık	Sıra No.	Numune No	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
			40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	S1	1	6,0719	24169,0	6,7895	22579,0	7,176	21421,0	6,2928	23384,0	6,6239	23028,0	7,3416	20740,0	6,2928	23576,0	6,624	23046,0	6,9	22067,0
	S1	1	7,0104	21173,0	6,5688	23401,0	6,7344	22993,0	6,7344	22492,0	6,6792	23270,0	6,9552	22322,0	7,2863	20322,0	6,3469	24083,0	6,6791	23165,0
	S2	2	4,6919	31781,0	4,9128	30958,0	5,7959	26635,0	4,9679	30402,0	5,244	29285,0	5,5752	27661,0	4,5816	32394,0	5,4647	28225,0	5,4096	28414,0
	S2	2	5,4647	27257,0	6,1823	24703,0	6,1824	24682,0	5,4648	26566,0	6,0719	25097,0	5,7959	26587,0	5,2992	27631,0	6,1272	25488,0	6,072	25091,0
	S3	3	5,5752	26561,0	6,072	24562,0	6,5136	23032,0	5,796	25298,0	6,0168	25144,0	6,624	22914,0	6,072	24265,0	5,9616	25507,0	6,072	24766,0
	S3	3	6,6791	22553,0	6,8999	22060,0	7,717	21015,0	6,4584	22824,0	7,176	21289,0	6,9552	21849,0	6,2376	23268,0	6,6792	22538,0	7,0104	21449,0
25 °C	S1	1	19,651	7355,1	23,956	6449,1	25,116	5692,7	21,307	7085,0	25,226	6050,5	27,544	5536,9	21,031	7093,1	25,447	6150,5	27,71	559,1
	S1	1	28,98	5188,7	32,678	4726,2	35,769	4278,5	26,661	5524,7	31,464	4905,2	35,107	4397,3	26,385	5612,7	31,519	4880,9	34,555	4465,6
	S2	2	23,791	6530,9	25,557	6101,0	27,268	5583,2	19,375	7467,4	23,846	6375,0	27,379	5590,3	20,037	7253,1	23,57	6560,8	26,606	5843,2
	S2	2	21,638	7098,5	25,833	5950,8	28,372	5321,9	22,135	6631,0	26,44	5812,4	29,697	5163,8	21,969	6652,3	25,668	5923,8	28,372	5371,4
	S3	3	20,865	6901,5	23,239	6424,3	26,772	5633,1	19,761	7334,6	23,018	6524,2	26,164	5761,4	19,099	7573,8	22,411	6722,4	25,392	5940,4
	S3	3	24,398	6062,2	27,931	5445,1	30,636	4921,5	23,073	6273,4	27,544	5436,4	30,58	4906,9	22,411	6408,4	26,44	5640,0	29,476	5082,5
40 °C	S1	1	108,46	1346,2	136,17	1128,0	160,63	949,6	124,42	1173,4	144,18	1060,6	161,18	962,5	127,89	1181,2	145,23	1053,7	157,87	968,8
	S1	1	103,77	1405,5	120,66	1265,4	135,68	1130,0	114,2	1316,1	132,09	1162,6	143,85	1070,1	115,2	1285,2	130,6	1178,6	142,58	1082,6
	S2	2	121,93	1193,4	145,83	1036,3	175,26	862,2	143,29	1033,4	164,22	937,0	187,12	809,1	145,28	1005,1	165,37	914,1	181,16	836,6
	S2	2	138,93	1059,5	164,71	926,5	184,58	815,6	148,59	987,6	168,13	904,3	183,04	831,9	144,95	1002,7	164,49	919,7	177,24	857,7
	S3	3	98,42	1478,9	118,12	1267,9	130,82	1140,6	109,79	1318,6	123,42	1213,1	137,94	1085,9	108,41	1322,4	125,3	1218,4	138,82	1085,7
	S3	3	118,62	1253,1	137,94	1074,7	149,42	994,3	124,2	1164,3	139,6	1074,6	149,26	1009,0	128,39	1129,4	148,76	992,6	159,85	924,3

Çizelge C.5: GSA40, Dolaylı çekme deneyi değerleri

Sıcaklık	Sıra No.	Numune No	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
			40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	S1	1	7,176	19756,0	7,5072	19335,0	8,3351	17419,0	6,5687	20941,0	7,4519	19508,0	8,6663	17134,0	7,3415	20095,0	7,8383	18968,0	8,004	18372,0
	S1	1	6,8999	20416,0	7,5623	19458,0	7,5623	19429,0	6,9551	20734,0	7,6175	19493,0	7,5071	19715,0	6,8999	20947,0	7,6175	19563,0	7,5072	19760,0
	S2	2	6,4032	22798,0	6,7344	22148,0	7,6176	19846,0	6,5136	22815,0	7,4519	20295,0	7,3416	20463,0	5,796	24961,0	7,0104	21822,0	6,8447	22488,0
	S2	2	4,8575	30187,0	5,3543	28481,0	5,6304	26936,0	5,6304	25763,0	5,52	27623,0	5,9616	25842,0	4,5816	31804,0	5,5199	27915,0	6,0167	25332,0
	S3	3	6,5687	21568,0	6,8448	21525,0	6,8999	20962,0	6,4031	22276,0	7,0655	20865,0	7,2312	20111,0	6,1823	22899,0	6,9551	20941,0	6,8447	21083,0
	S3	3	6,624	21533,0	6,7896	21499,0	7,2312	20071,0	6,348	22151,0	6,8448	21734,0	7,3416	20229,0	7,0104	20932,0	6,9551	21173,0	7,3968	19657,0
25 °C	S1	1	24,232	5797,8	26,937	5503,7	29,532	4945,9	23,46	6087,9	27,544	5414,1	30,801	4807,4	23,239	6135,9	27,379	5409,2	30,415	4896,6
	S1	1	21,307	6764,4	26,33	5553,1	30,415	4787,4	22,742	6148,9	28,704	5118,5	31,795	4627,0	23,791	5913,1	26,661	5512,2	31,629	4678,8
	S2	2	23,349	6543,0	24,84	6084,1	28,428	5382,0	21,528	6927,8	25,502	6074,1	27,71	5544,8	21,307	7010,1	25,171	6182,3	27,048	5613,2
	S2	2	19,651	7352,7	24,674	6237,4	28,98	5310,2	21,307	6916,4	25,668	6021,0	28,593	5373,7	21,638	6888,0	25,612	6067,1	28,152	5456,4
	S3	3	23,239	6121,5	28,317	5159,4	32,071	4560,5	23,901	5873,5	28,262	5189,1	31,353	4675,3	23,404	6026,3	28,096	5255,5	31,74	4656,6
	S3	3	22,466	6213,4	27,931	5268,6	32,678	4513,3	24,84	5717,7	28,648	5125,9	32,126	4537,7	23,349	6044,0	27,876	5282,2	30,856	4763,5
40 °C	S1	1	101,67	1427,3	127,23	1166,7	141,8	1034,6	117,96	1188,6	132,75	1089,7	112	1285,4	103,27	1398,9	121,99	1198,5	134,68	1078,4
	S1	1	162,17	878,0	182,71	802,6	201,64	727,2	154,28	912,2	179,84	826,2	188,39	776,8	146,39	958,4	166,75	876,4	180,5	809,4
	S2	2	103,05	1400,9	127,29	1164,0	146,77	1010,5	127,34	1176,9	151,02	1014,7	168,96	904,5	130,76	1135,7	151,41	987,2	165,54	902,2
	S2	2	116,8	1283,0	142,96	1050,0	158,75	942,7	127,95	1132,6	145,34	1031,7	161,95	922,8	130,16	1132,3	148,26	1023,8	162,34	932,2
	S3	3	127,67	1130,3	152,95	976,9	173,76	854,2	140,09	1024,5	162,84	908,2	183,98	805,4	143,74	995,2	165,21	896,3	191,04	766,2
	S3	3	159,19	886,8	187,95	783,0	211,25	693,0	163,66	859,8	188,28	790,6	210,31	690,4	159,69	882,8	180,39	813,6	199,1	738,7

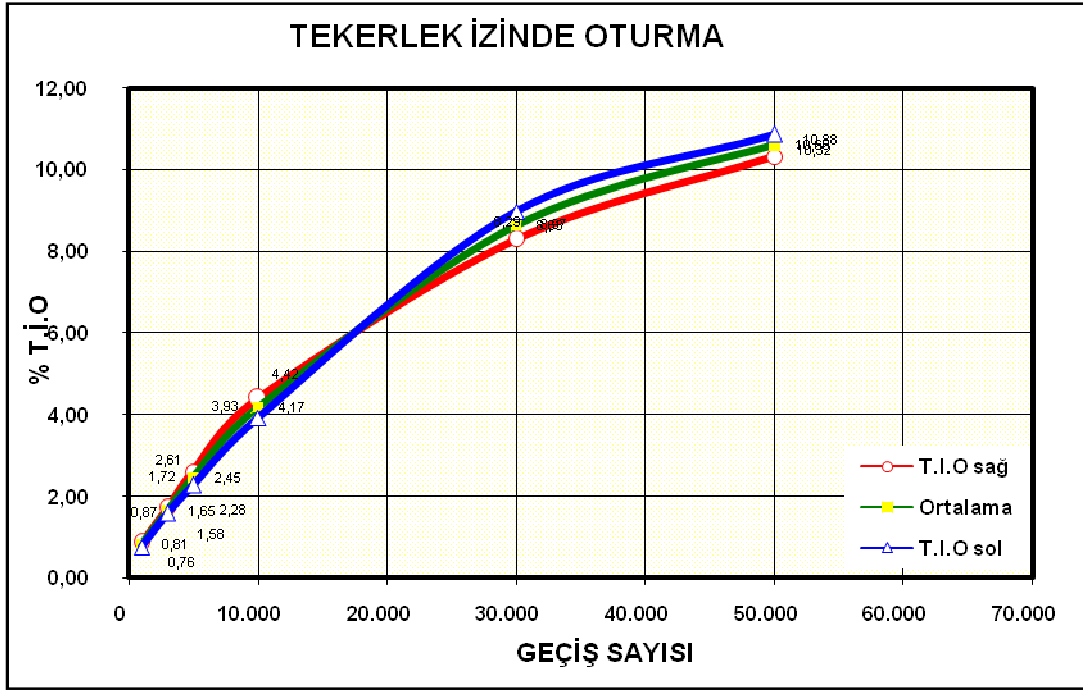
Çizelge C.6: GSA50, Dolaylı çekme deneyi değerleri

Sıcaklık	Sıra No.	Numune No	3000 (3)						2000 (2)						1000 (1)					
			40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)		40 (4)		60 (6)		80 (8)	
			µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E	µε	E
5 °C	S1	1	5,6855	26449	5,5751	28033	5,6855	27221	5,0783	29925	5,4095	28975	5,9063	27659	4,9679	26952	5,6855	27592	5,9615	24308
	S1	1	5,796	27221	6,072	25783	6,1272	25249	5,52	27428	5,52	28165	5,7408	27044	5,1888	29126	6,072	25485	5,6304	27343
	S2	2	7,1207	21695	7,5623	19240	7,6727	18797	6,4584	21685	7,3968	19675	8,004	18032	6,4032	21657	7,5623	19079	7,4519	19490
	S2	2	6,7896	20328	7,176	19657	7,6176	18566	6,6239	21076	7,2311	20077	7,6727	18881	6,8448	20726	7,1208	20105	7,2863	19650
	S3	3	6,072	24291	6,072	25350	6,6792	22853	6,2376	23809	6,1272	24514	6,2376	24353	5,7408	25399	5,796	26180	6,348	23869
	S3	3	5,8511	24745	6,2927	24149	6,2927	24160	5,8511	25569	5,9064	25663	5,9616	25280	5,52	26870	6,2375	24523	5,9615	25285
25 °C	S1	1	18,878	8181,2	19,154	8183,3	20,424	7620,1	15,29	9685,9	18,216	8717,6	19,816	8009,4	15,235	7002,6	17,94	8889,3	19,154	8261,0
	S1	1	15,676	9489,6	17,774	8571,3	19,485	7743,4	15,345	9674,3	18,271	8611,8	19,375	8080,5	15,069	6004,1	17,608	8985,0	19,32	8139,8
	S2	2	30,249	4989,0	37,812	4142,5	42,669	3665,0	31,74	4705,8	37,977	4102,0	42,614	3652,8	30,967	8866,4	37,039	4262,4	41,4	3808,7
	S2	2	28,428	5171,5	34,444	4567,8	38,584	4055,6	27,986	5338,3	33,616	4658,1	37,094	4218,0	26,716	5586,1	31,132	5034,0	34,555	4534,2
	S3	3	17,774	8189,1	21,086	7176,3	23,184	6501,8	18,326	7976,8	21,417	7108,7	23,901	6242,3	17,553	8263,3	20,865	7192,7	23,239	6493,4
	S3	3	19,375	7730,0	22,411	6868,1	24,95	6031,7	19,099	7569,6	22,356	6653,1	24,95	6021,3	18,436	7812,7	21,804	6836,5	24,012	6228,5
40 °C	S1	1	57,794	2614,3	71,98	2183,9	84,29	1850,4	67,62	2194,4	79,819	1950,2	94,944	1644,7	75,016	2049,2	85,56	1851	93,288	1678
	S1	1	74,851	2029,7	92,128	1677,2	106,03	1451	84,511	1769,3	98,642	1580,5	111,06	1411,2	88,154	1765	101,34	1559,7	109,95	1404,9
	S2	2	159,36	860,73	200,43	713,72	227,2	631,11	182,87	763,41	211,02	687,87	236,8	613,68	181,49	168,29	205,73	703,59	236,58	612,68
	S2	2	177,46	785,3	228,08	633,95	243,1	594,31	193,91	705,92	218,2	651,9	233,49	613,6	198,72	716,47	214,89	662,81	226,59	632,18
	S3	3	86,112	1675,1	102,12	1462,6	117,79	1264,5	95,275	1496,5	114,31	1328,8	128,67	1177,1	102,5	1446,5	120,44	1252,1	131,98	1135,9
	S3	3	111,94	1279,9	132,75	1115	156,16	946,5	123,81	1152,3	144,67	1040,3	154,28	976,54	119,01	1185,5	135,51	1108	154,67	968,25

EK D: Tekerlek İzi Deneyleri

Çizelge D.1: Geleneksel karışım, Tekerlek izi oluşumu

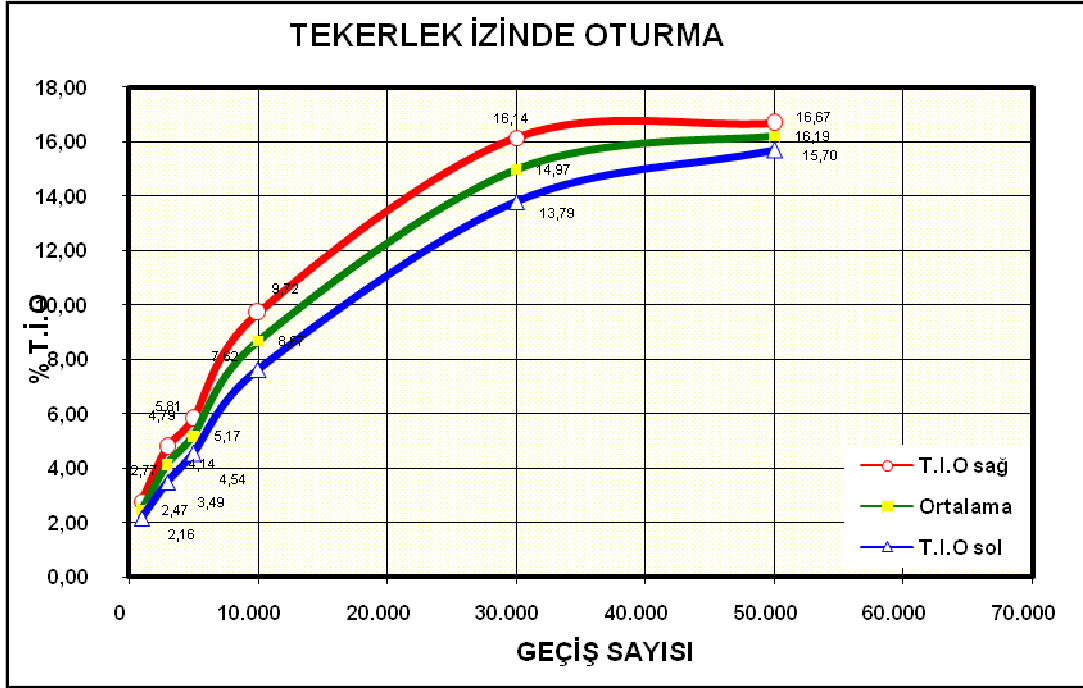
SOL KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	9,45	9,78	10,51	10,98	11,98	16,20	18,76
A2	10,14	10,52	10,64	11,88	13,54	17,67	19,67
A3	9,51	10,15	11,08	12,00	13,19	16,98	18,88
B1	11,12	12,06	12,83	13,50	15,25	21,14	23,54
B2	11,45	12,81	13,94	14,81	16,79	22,51	24,63
B3	11,78	12,73	13,68	13,80	15,35	21,66	23,85
C1	11,23	12,03	12,79	13,31	14,60	19,84	22,05
C2	12,52	13,30	14,42	15,09	16,83	22,97	24,92
C3	11,91	12,39	13,40	14,19	15,39	21,77	23,80
D1	11,36	12,23	12,83	13,63	15,45	20,67	22,38
D2	11,30	12,37	13,31	14,11	16,30	21,59	23,47
D3	11,53	12,16	13,18	14,02	16,57	22,24	24,08
E1	9,45	9,96	10,75	11,17	12,65	16,32	17,46
E2	9,86	10,03	10,95	11,37	13,25	17,17	18,43
E3	8,34	9,82	10,37	11,35	12,77	16,73	18,16
ORTALAMA	10,73	11,49	12,31	13,01	14,66	19,70	21,61
%TİO	-	0,76	1,58	2,28	3,93	8,97	10,88
SAĞ KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	8,75	9,74	10,47	11,28	12,22	15,54	16,08
E2	8,59	9,21	10,08	10,82	11,97	15,15	16,12
E1	8,59	9,57	10,36	10,97	11,92	15,64	16,99
D3	8,59	9,72	10,72	11,35	13,07	17,50	20,51
D2	11,98	12,18	12,46	13,33	15,42	20,31	22,45
D1	11,16	12,49	13,35	14,18	15,84	20,02	22,22
C3	11,20	12,10	13,08	14,23	16,09	20,44	23,68
C2	12,45	12,77	13,96	15,00	16,88	21,72	24,53
C1	11,41	12,24	12,43	13,05	14,68	19,10	21,83
B3	10,41	11,92	12,92	13,86	17,04	21,37	23,18
B2	10,92	11,87	13,22	14,44	16,81	20,49	22,41
B1	11,19	12,14	13,51	14,27	16,63	20,96	23,10
A3	9,92	10,41	11,31	12,08	14,32	16,14	18,63
A2	9,66	10,38	11,26	12,60	13,99	17,30	18,84
A1	10,10	11,20	11,53	12,66	14,27	17,65	19,14
ORTALAMA	10,33	11,20	12,04	12,94	14,74	18,62	20,65
%TİO	-	0,87	1,72	2,61	4,42	8,29	10,32
ORT %TİO	-	0,81	1,65	2,45	4,17	8,63	10,60



Şekil D.1: Geleneksel karışım, Tekerlek izi oluşumu

Çizelge D.2: GSA 10 karışımı, Tekerlek izi oluşumu

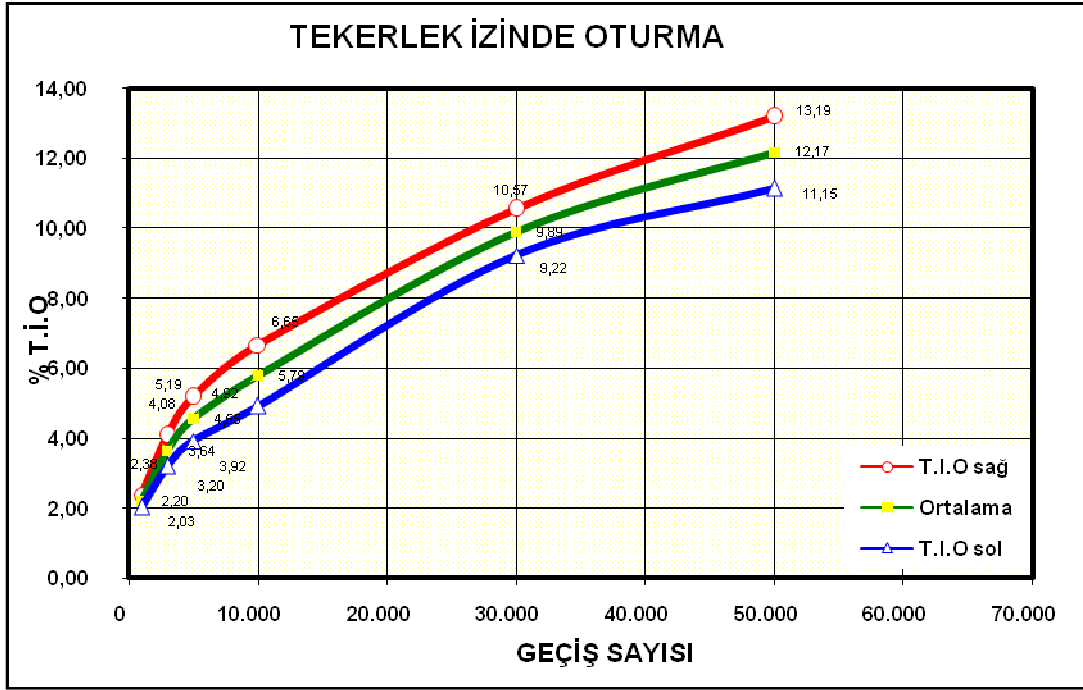
SOL KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	11,76	13,82	14,31	14,89	17,82	22,84	24,16
A2	12,00	15,13	16,59	17,12	19,55	24,25	26,17
A3	12,30	13,97	14,95	15,84	16,91	23,15	25,52
B1	11,38	13,20	14,48	15,46	19,25	29,24	31,13
B2	12,63	15,68	17,62	18,68	22,58	30,68	32,90
B3	13,74	15,76	16,52	17,86	21,71	29,19	31,19
C1	12,24	14,29	15,24	16,64	20,89	28,73	31,01
C2	11,67	15,69	17,15	18,16	21,98	30,69	32,59
C3	13,73	15,33	17,09	17,99	20,99	29,77	31,85
D1	10,43	11,93	13,82	14,40	18,81	24,96	25,30
D2	10,20	12,93	15,33	16,14	20,46	25,43	25,87
D3	11,93	13,96	15,42	16,47	20,42	24,90	25,47
E1	9,31	10,48	11,58	13,78	14,90	18,84	20,83
E2	7,90	10,24	11,33	12,39	14,32	18,33	20,67
E3	9,26	10,52	11,35	12,71	14,13	16,34	21,34
ORTALAMA	11,37	13,53	14,85	15,90	18,98	25,16	27,07
%TİO	-	2,16	3,49	4,54	7,62	13,79	15,70
SAĞ KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	10,06	11,95	13,13	13,93	18,37	23,84	24,65
E2	9,53	12,57	13,84	14,86	17,48	22,22	22,37
E1	9,18	12,20	14,01	15,30	19,02	24,53	24,54
D3	10,20	12,97	15,56	16,92	22,56	29,72	30,21
D2	12,20	15,63	17,92	18,99	22,98	30,77	31,42
D1	11,31	13,79	16,10	18,14	22,41	30,12	30,65
C3	12,48	14,90	16,89	17,84	23,02	31,77	32,38
C2	12,29	15,96	18,30	19,14	24,21	33,33	33,98
C1	12,66	15,54	17,71	19,20	22,95	32,10	32,66
B3	12,13	14,85	17,55	18,29	23,48	29,46	30,30
B2	12,76	16,25	19,18	20,14	24,72	30,45	30,45
B1	11,59	14,18	16,37	17,31	22,00	29,39	29,56
A3	11,72	13,83	15,28	15,74	17,19	23,02	23,80
A2	12,77	15,56	17,09	17,77	19,88	22,49	23,37
A1	11,88	14,17	15,66	16,27	18,30	21,67	22,51
ORTALAMA	11,52	14,29	16,31	17,32	21,24	27,66	28,19
%TİO	-	2,77	4,79	5,81	9,72	16,14	16,67
ORT %TİO	-	2,47	4,14	5,17	8,67	14,97	16,19



Şekil D.2: GSA 10 karışımı, Tekerlek izi oluşumu

Çizelge D.3: GSA 20 karışımı Tekerlek izi oluşumu

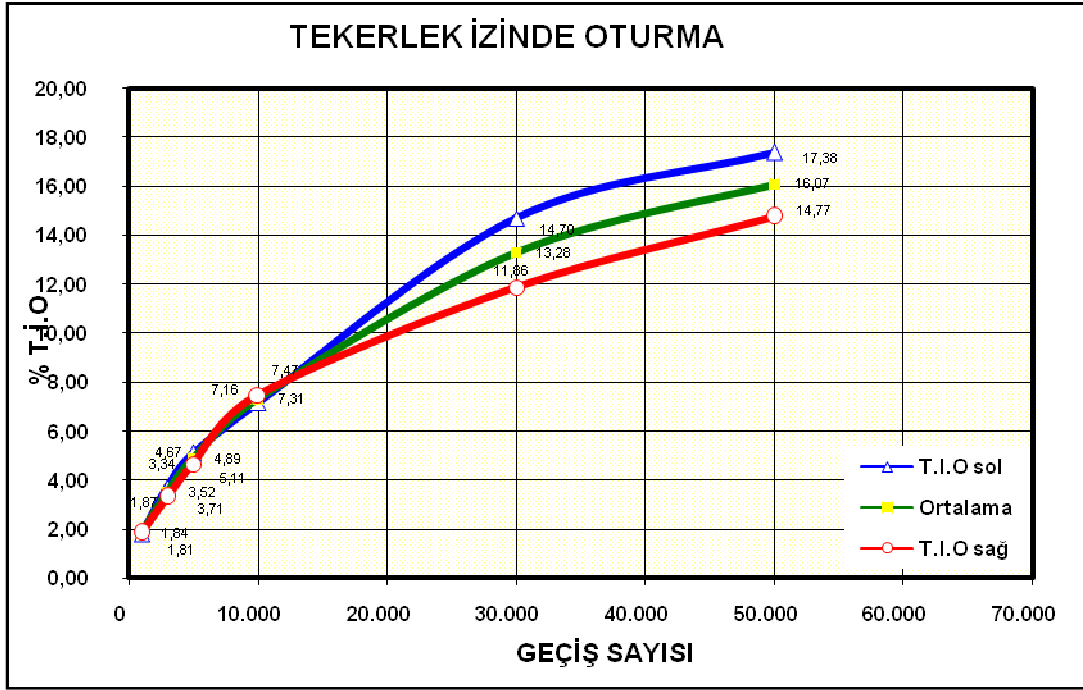
SOL KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	10,80	11,29	12,55	13,16	14,12	16,92	20,15
A2	11,95	14,00	15,05	15,09	15,96	19,14	21,20
A3	10,36	12,87	14,31	14,64	15,28	18,23	18,82
B1	12,58	14,60	15,78	16,42	17,49	21,95	24,64
B2	14,43	16,80	17,96	18,60	19,35	23,58	26,42
B3	12,52	14,71	16,03	16,60	17,94	22,29	25,54
C1	12,18	14,15	15,39	16,07	17,36	23,91	25,95
C2	14,54	17,11	18,53	19,07	20,00	25,51	27,11
C3	13,01	15,24	16,46	17,27	18,40	24,91	26,43
D1	10,94	12,93	13,90	16,45	16,86	21,21	23,16
D2	14,14	16,81	17,99	18,59	19,90	24,32	26,31
D3	12,34	14,50	15,64	16,45	17,81	23,32	25,45
E1	8,49	10,07	11,05	11,54	12,52	16,20	17,42
E2	10,71	12,50	13,54	14,23	15,04	18,08	18,94
E3	11,27	13,17	14,07	14,88	16,04	18,97	19,90
ORTALAMA	12,02	14,05	15,22	15,94	16,94	21,24	23,16
%TİO	-	2,03	3,20	3,92	4,92	9,22	11,15
SAĞ KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	11,70	13,66	15,06	16,18	17,47	21,54	22,75
E2	12,72	13,21	16,62	17,39	18,70	20,33	23,24
E1	11,56	13,13	14,44	15,13	16,51	21,79	22,71
D3	12,76	15,07	16,76	17,86	19,30	24,86	28,14
D2	13,40	16,69	18,25	19,35	20,33	24,87	28,10
D1	13,40	15,73	17,30	18,33	19,96	24,35	26,42
C3	13,11	14,96	16,42	18,02	20,66	24,73	29,56
C2	14,19	17,55	19,22	20,74	22,73	26,80	30,09
C1	12,88	15,17	16,64	17,80	19,43	24,45	28,12
B3	11,70	14,43	16,49	17,57	19,28	24,20	27,31
B2	12,63	16,27	18,23	19,44	21,27	25,50	27,81
B1	12,28	15,17	17,18	18,31	19,93	24,06	26,97
A3	10,71	12,78	13,77	15,29	15,86	18,56	21,16
A2	10,77	13,47	15,22	15,82	17,31	19,14	20,50
A1	11,28	13,44	14,74	15,65	16,16	18,39	19,99
ORTALAMA	12,34	14,72	16,42	17,53	18,99	22,90	25,52
%TİO	-	2,38	4,08	5,19	6,65	10,57	13,19
ORT %TİO	-	2,20	3,64	4,55	5,79	9,89	12,17



Şekil D.3: GSA 20 karışımı, Tekerlek izi oluşumu

Çizelge D.4: GSA 30 karışımı Tekerlek izi oluşumu

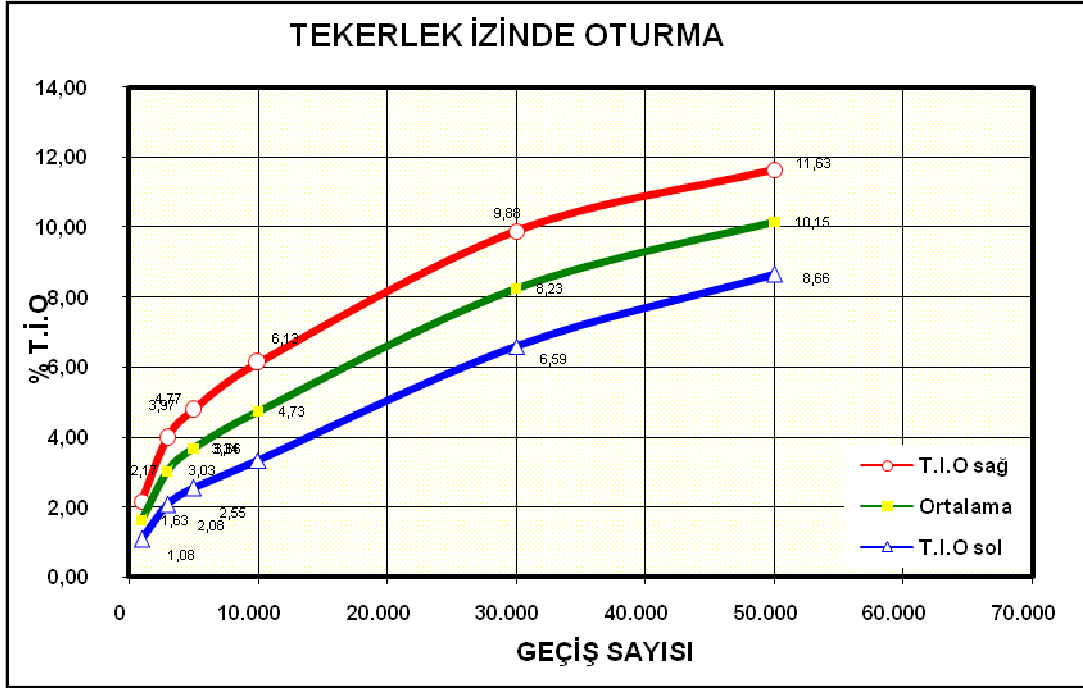
SOL KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	10,16	11,22	12,72	13,80	15,70	20,13	23,67
A2	8,48	9,58	13,01	14,58	16,25	23,24	23,97
A3	10,77	11,94	13,17	14,30	15,55	16,11	23,16
B1	11,31	12,74	14,11	15,41	17,45	26,30	28,29
B2	10,76	13,39	15,09	16,86	18,08	27,54	30,38
B3	11,88	13,54	15,41	16,41	18,93	27,78	30,32
C1	11,41	12,73	14,11	15,72	17,95	27,92	31,07
C2	10,27	12,23	15,26	16,84	19,20	27,60	33,82
C3	12,07	14,09	15,74	16,86	19,04	29,01	33,98
D1	11,46	13,15	15,08	16,44	19,15	29,29	29,51
D2	11,17	14,02	16,48	18,32	20,85	28,70	30,38
D3	11,89	13,77	15,37	16,32	18,85	28,64	30,00
E1	9,89	11,57	12,90	15,28	17,02	23,04	24,87
E2	8,89	11,89	14,53	15,90	17,43	23,43	24,54
E3	10,99	12,67	14,02	15,03	17,29	23,11	24,10
ORTALAMA	10,76	12,57	14,47	15,87	17,92	25,46	28,14
%TİO	-	1,81	3,71	5,11	7,16	14,70	17,38
SAĞ KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	9,72	11,46	12,97	13,02	15,78	20,96	24,30
E2	10,57	12,86	14,56	15,66	17,51	21,69	24,54
E1	10,79	12,35	13,96	14,89	18,85	20,30	23,11
D3	12,21	13,87	14,85	16,55	19,54	24,06	28,11
D2	11,93	14,60	15,95	18,04	18,44	24,81	29,95
D1	12,31	13,87	14,70	17,95	18,12	24,95	26,61
C3	13,18	14,72	16,57	18,26	20,65	27,52	30,17
C2	12,93	15,30	17,67	18,80	21,80	27,04	29,02
C1	13,45	15,03	16,40	17,84	20,51	25,50	30,24
B3	13,05	14,70	16,33	17,47	20,16	25,94	28,53
B2	12,91	15,08	17,41	18,52	20,84	25,96	29,28
B1	13,59	15,36	17,24	18,22	21,05	26,58	29,65
A3	11,70	13,34	14,50	15,37	20,16	20,62	23,53
A2	12,07	14,59	15,83	17,46	20,84	23,44	24,27
A1	12,83	14,15	14,34	15,20	21,05	21,75	23,47
ORTALAMA	12,22	14,09	15,55	16,88	19,69	24,07	26,99
%TİO	-	1,87	3,34	4,67	7,47	11,86	14,77
ORT %TİO	-	1,84	3,52	4,89	7,31	13,28	16,07



Şekil D.4: GSA 30 karışımı, Tekerlek izi oluşumu

Çizelge D.5: GSA 40 karışımı Tekerlek izi oluşumu

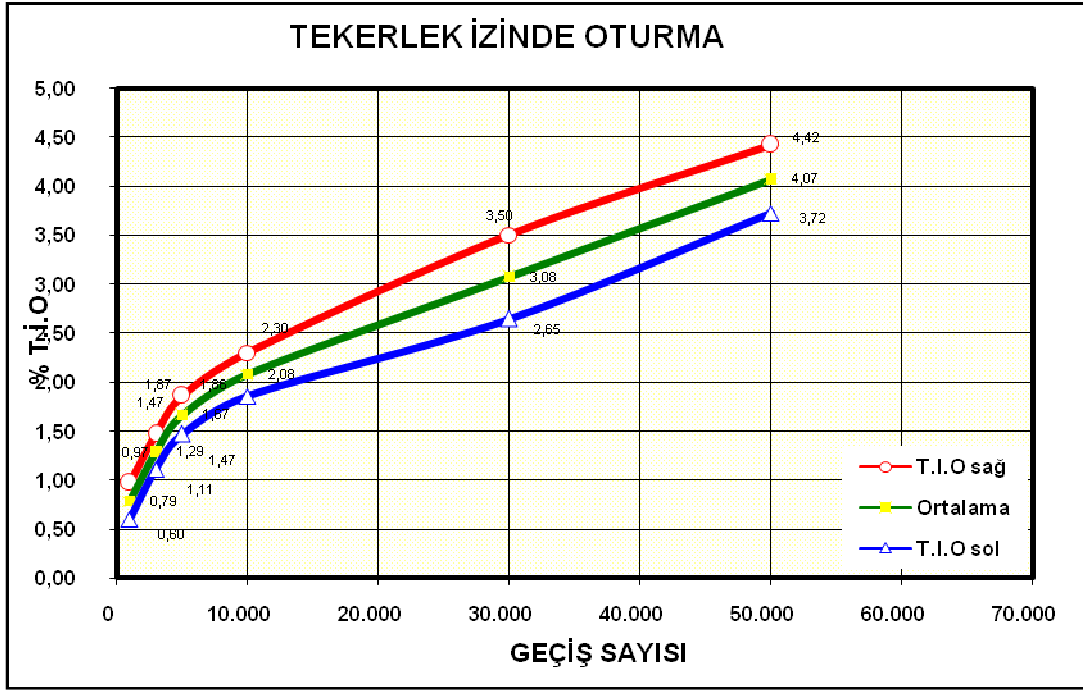
SOL KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	11,29	11,79	12,14	12,30	13,00	15,82	17,71
A2	9,68	11,13	12,20	12,84	13,91	17,30	18,84
A3	10,21	11,34	12,40	12,72	12,89	16,71	18,51
B1	12,42	13,31	14,04	14,27	14,93	18,48	20,19
B2	11,01	12,87	15,24	15,64	16,82	20,69	22,90
B3	13,06	14,09	15,56	15,73	16,59	19,78	21,12
C1	13,64	14,42	15,27	15,99	16,41	19,22	21,34
C2	12,28	13,34	15,11	15,85	16,67	20,31	22,99
C3	13,93	15,02	15,31	16,51	17,27	20,06	22,15
D1	12,57	13,56	14,25	14,93	15,72	18,98	21,11
D2	10,41	12,17	13,04	13,45	14,57	19,00	21,09
D3	12,64	13,36	15,01	15,54	16,55	19,84	22,07
E1	9,53	10,31	11,05	11,26	11,64	14,01	15,79
E2	9,44	11,08	11,94	12,21	13,17	16,17	18,12
E3	11,27	11,81	12,03	12,44	13,27	15,82	19,31
ORTALAMA	11,56	12,64	13,64	14,11	14,89	18,15	20,22
%TİO	-	1,08	2,08	2,55	3,34	6,59	8,66
SAĞ KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	10,61	11,95	12,96	13,48	14,41	18,02	20,25
E2	8,95	11,30	12,76	13,31	14,10	18,72	20,64
E1	8,79	10,49	12,40	13,01	14,54	18,62	20,26
D3	10,23	12,96	13,99	14,91	16,70	21,97	24,69
D2	8,95	13,18	15,73	16,79	18,58	22,24	23,92
D1	11,64	14,09	15,63	16,21	17,44	22,60	24,93
C3	12,46	14,28	16,04	16,91	18,87	22,35	23,61
C2	11,90	15,46	17,95	18,90	19,98	24,14	25,87
C1	12,21	13,98	15,95	16,78	18,13	21,94	24,46
B3	12,11	13,27	15,58	16,14	18,06	21,95	23,77
B2	11,98	14,96	17,32	18,69	20,58	24,10	25,78
B1	12,93	14,71	15,58	17,24	17,45	21,85	23,75
A3	11,52	11,55	13,87	14,91	15,98	18,85	19,38
A2	10,74	13,11	14,76	14,92	16,86	18,10	19,35
A1	10,95	13,25	15,03	15,34	16,29	18,73	19,80
ORTALAMA	11,06	13,24	15,04	15,84	17,20	20,95	22,70
%TİO	-	2,17	3,97	4,77	6,13	9,88	11,63
ORT %TİO	-	1,63	3,03	3,66	4,73	8,23	10,15



Şekil D.5: GSA 40 karışımı, Tekerlek izi oluşumu

Çizelge D.6: GSA 50 karışımı Tekerlek izi oluşumu

SOL KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
A1	10,22	10,84	11,17	11,65	12,47	12,53	13,72
A2	11,43	11,62	12,18	12,30	13,07	13,35	14,70
A3	10,45	11,16	11,49	11,98	11,99	13,32	13,50
B1	11,48	11,98	12,34	12,80	12,82	14,21	14,63
B2	11,24	11,80	12,35	12,50	12,90	13,99	15,24
B3	11,32	12,10	12,40	12,72	12,74	14,13	15,17
C1	11,90	12,30	12,37	13,03	13,66	13,68	15,55
C2	13,24	13,83	14,38	14,63	15,18	15,24	17,19
C3	10,94	11,63	12,34	12,79	14,32	14,42	15,39
D1	9,75	10,26	10,66	10,93	11,07	12,03	12,91
D2	10,56	11,12	11,68	12,10	12,26	13,19	14,80
D3	10,00	10,69	11,70	11,86	12,27	13,80	14,77
E1	6,17	6,99	7,68	8,10	8,27	9,20	10,15
E2	8,52	9,23	9,63	10,13	10,17	10,95	11,70
E3	7,83	8,55	9,33	9,59	9,73	10,73	11,50
ORTALAMA	10,34	10,94	11,45	11,81	12,19	12,98	14,06
%TİO	-	0,60	1,11	1,47	1,86	2,65	3,72
SAĞ KALIP GEÇİŞ SAYISI VE DERİNLİK DEĞERLERİ (mm)							
DEVİR	1.000	1.000	3.000	5.000	10.000	30.000	50.000
°C	24°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C	60°C
E3	10,18	10,59	11,66	12,13	12,53	13,48	14,48
E2	8,42	9,31	10,02	10,53	11,00	12,48	13,64
E1	9,08	9,60	10,01	10,42	10,50	11,56	12,28
D3	10,76	11,30	11,90	12,05	12,90	14,98	15,10
D2	10,16	11,39	12,12	12,53	13,17	15,28	16,34
D1	11,20	12,26	12,44	12,84	13,46	14,37	15,20
C3	11,30	11,97	12,63	12,80	13,05	14,20	14,74
C2	10,62	12,41	12,44	13,05	14,13	15,14	16,17
C1	12,36	13,15	13,77	13,93	14,40	15,23	16,45
B3	10,92	11,74	12,28	12,50	12,76	13,90	14,96
B2	11,32	13,03	13,65	14,09	14,40	15,73	17,03
B1	11,47	12,86	13,11	13,47	13,60	14,45	15,62
A3	10,60	11,00	11,24	12,16	12,38	12,95	13,99
A2	8,58	10,11	10,69	10,95	11,51	12,90	13,67
A1	10,94	11,78	12,06	12,45	12,68	13,83	14,58
ORTALAMA	10,53	11,50	12,00	12,39	12,83	14,03	14,95
%TİO	-	0,97	1,47	1,87	2,30	3,50	4,42
ORT %TİO	-	0,79	1,29	1,67	2,08	3,08	4,07



Şekil D.6: GSA 50 karışımı, Tekerlek izi oluşumu

EK E: Bitüm ve Sulfür Fiyatları

Çizelge E.1: 2007 Yılı bitüm – sulfür satış fiyatları

TÜPRAŞ – ÜRÜNLER						
Güncel Satış Fiyatları						
05.10.2007						
ÜRÜN ADI	SATIŞ FİYATI	ÖTV	KDV HARIÇ	KDV	KDV DAHİL	YÜRÜRLÜK
	YTL/TON	YTL/TON	YTL/TON	YTL/TON	YTL/TON	TARİHİ
PEN ASFALT 50/70						
İzmit	549,00	-	549,00	5,49	554,49	06.09.2007
İzmir	549,00	-	549,00	5,49	554,49	06.09.2007
Kırıkkale	556,00	-	556,00	5,56	561,56	06.09.2007
Batman	556,00	-	556,00	5,56	561,56	06.09.2007
PEN ASFALT (70/100 - 160/220)						
İzmit	543,00	-	543,00	5,43	548,43	06.09.2007
İzmir	543,00	-	543,00	5,43	548,43	06.09.2007
Kırıkkale	549,00	-	549,00	5,49	554,49	06.09.2007
Batman	549,00	-	549,00	5,49	554,49	06.09.2007
MC-30						
İzmit	813,00	-	813,00	146.34	959.34	04.10.2007
İzmir	813,00	-	813,00	146.34	959.34	04.10.2007
Kırıkkale	816,00	-	816,00	146.88	962.88	04.10.2007
Batman	816,00	-	816,00	146.88	962.88	04.10.2007
BAZ YAĞLAR						
SPINDLE OIL	963.41	350,00	1,313.41	236.41	1,549.82	27.09.2007
LIGHT NEUTRAL	953.63	350,00	1,303.63	234.65	1,538.28	27.09.2007
BRIGHT STOCK	1,042.27	350,00	1,392.27	250.61	1,642.88	27.09.2007
SOĞUTMA YAĞI	1,419.00	350.00	1,769.00	318.42	2,087.42	04.10.2007
EXTRACT	623,00	350,00	973,00	175,14	1.148,14	06.09.2007
CLARIFIED OIL	699.00	204.00	903.00	162.54	1,065.54	04.10.2007
WHITE SPIRIT 140/200	1.102,00	1.484,50	2.586,50	465,57	3.052,07	18.08.2007
KÜKÜRT	135,00	-	135,00	24,30	159,30	02.10.2007
KÜKÜRT (SIVI)	133,00	-	133,00	23,94	156,94	02.10.2007

Çizelge E.2: 2008 Yılı bitüm – sülfür satış fiyatları

TÜPRAŞ – ÜRÜNLER						
Güncel Satış Fiyatları						
03.07.2008						
Ürün Adı	Satış Fiyatı (TL/TON)	ÖTV (TL/TON)	KDV Hariç (TL/TON)	KDV (TL/TON)	KDV Dahil (TL/TON)	Yürürlük Tarihi
PEN ASFALT 50/70						
İzmit	923,00	-	923,00	9,23	932,23	03.07.2008
İzmir	923,00	-	923,00	9,23	932,23	03.07.2008
Kırıkkale	952,00	-	952,00	9,52	961,52	03.07.2008
Batman	977,00	-	977,00	9,77	986,77	03.07.2008
PEN ASFALT 70/100						
İzmit	917,00	-	917,00	9,17	926,17	03.07.2008
İzmir	917,00	-	917,00	9,17	926,17	03.07.2008
Kırıkkale	945,00	-	945,00	9,45	954,45	03.07.2008
Batman	970,00	-	970,00	9,70	979,70	03.07.2008
PEN ASFALT 120/150						
İzmir	917,00	-	917,00	9,17	926,17	03.07.2008
PEN ASFALT 160/220						
İzmit	917,00	-	917,00	9,17	926,17	03.07.2008
İzmir	917,00	-	917,00	9,17	926,17	03.07.2008
Kırıkkale	945,00	-	945,00	9,45	954,45	03.07.2008
Batman	970,00	-	970,00	9,70	979,70	03.07.2008
MC-30						
İzmit	1.322,00	-	1.322,00	237,96	1.559,96	03.07.2008
İzmir	1.322,00	-	1.322,00	237,96	1.559,96	03.07.2008
Kırıkkale	1.325,00	-	1.325,00	238,50	1.563,50	03.07.2008
Batman	1.325,00	-	1.325,00	238,50	1.563,50	03.07.2008
BRIGHT STOCK SLACK WAX						
İzmir	1.702,55	-	1.702,55	306,46	2.009,01	12.06.2008
İzmir	1.200,00	224,00	1.424,00	256,32	1.680,32	03.07.2008
WHITE SPIRIT 140/210						
Batman	1.792,00	1.613,50	3.405,50	612,99	4.018,49	01.07.2008
KÜKÜRT						
İzmit	875,00	-	875,00	157,50	1.032,50	27.06.2008
İzmir	875,00	-	875,00	157,50	1.032,50	27.06.2008
Kırıkkale	875,00	-	875,00	157,50	1.032,50	27.06.2008
KÜKÜRT (SIVI)						
İzmit	875,00	-	875,00	157,50	1.032,50	27.06.2008

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Tahir DENİZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Nusaybin – 1964

Adres: Başakşehir / İSTANBUL

Lisans Üniversitesi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- **Deniz, M. T.,** Sönmez İ., Özen H., ve Topcu A., 2005: Asfalt Betonlu Kaplamalarında Cam Kırığının Yol Güvenliği ve Karışım Performansına Etkisi. *Ulusal Kongre – Trafik ve Yol Güvenliği*, 4-6 Mayıs, 2005 Ankara, Türkiye.
- Sönmez İ., **Deniz, M. T.,** Tayfur S., Özen H., Yıldırım S. A., ve Eren B. K., 2005: Modifiye Katkı Maddelerinin Bitümlü Sıcak Karışıma Etkisi ve Performans Üstünlükleri. *Ulusal Kongre – Ulaştırma Kongresi*, 23-25 Mayıs, 2005 İstanbul, Türkiye.
- **Deniz, M. T.,** Sönmez İ., Yıldırım S. A., ve Eren B. K., 2005: Kullanılmış Otomobil Lastiklerinin Bitümlü Sıcak Karışım Performansına Etkisi. *Ulusal Kongre – Ulaştırma Kongresi*, 23-25 Mayıs, 2005 İstanbul, Türkiye.