İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASFALT KAPLAMALARDA SÜLFÜR KULLANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Tolga ER

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Ulaştırma Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Hilmi LAV

OCAK 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASFALT KAPLAMALARDA SÜLFÜR KULLANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Tolga ER
501991161

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 23 Aralık 2002
Tezin Savunulduğu Tarih: 15 Ocak 2003

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Abdullah Hilmi LAV
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Emine AĞAR
Prof. Dr. İnal SEÇKİN

OCAK 2003

ASFALT KAPLAMALARDA SÜLFÜR KULLANIMI

ÖZET

Sülfür-Asfalt üstyapı tasarımı teknolojisi, 1970'lerin başından itibaren, yüksek enerji maliyetleri, azalan hidrokarbon kaynakları ve artık sülfür hammaddesine bağlı olarak, Kuzey Amerika, Kanada, Avrupa ve Ortadoğu'da geniş bir gelişim sergilemiştir. Bu tip üstyapılar, ekonomik oldukları gibi, performans özellikleri açısından da üstünlükler göstererek, geleneksel üstyapılara bir seçenek olmuştur. Bu yeni karışımın davranışını incelemek üzere, geniş kapsamlı deneysel, arazi ve teorik araştırmalar yapılmıştır. Bu tasarım teknolojisi hakkında, malzeme üretimi, özellikleri ve kalite teminatı, yapısal tasarım ve ekonomik irdelemeleri kapsamak üzere çalışmada bir çok görüş irdelenmiştir. Bu görüşlere ait örnekler de verilmiştir.

Sülfür-Asfalt karışımlar, geleneksel karışımlara göre daha düşük sıcaklık duyarlılığına sahip olabilmeleri amacıyla meydana getirilmiştir ve böylece düşük sıcaklık ve kalıcı deformasyon şartlarına göre, tasarımcıya daha yüksek bir esneklik imkanı sağlamaktadır. Ayrıca, belli şartlar altında, yükselen yorulma ömrü ve azalan üstyapı kalınlıklarına da ulaşmak mümkün olabilmektedir. Sülfür-asfalt karışımların üretim, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri, geleneksel yöntem ve ekipmanlarla yapılabilmektedir.

Bu tez kapsamında, Kuzey Amerika, Kanada, Avrupa ve Ortadoğu'da yapılan bazı arazi çalışmaları araştırılmıştır. Bu tezin temel amacı, sülfür-asfalt tasarım teknolojisine ait laboratuar ve arazi çalışmalarına değinmek ve bu çalışmaların sonuçlarını değerlendirmektir. Tasarım teknolojisine ait; biri malzeme teknolojisi ve diğeri yapısal tasarım olmak üzere, iki temel konu öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, kısaca, sülfür-asfalt kullanımının potansiyel ekonomik faydalarını incelemektedir. Bu fayda, malzeme maliyetlerindeki kazanç, malzemelerin daha iyi muhafaza edilebilmesi ve potansiyel performans faydaları ile açığa çıkmaktadır.

SULPHUR USE IN ASPHALT HIGHWAY PAVEMENTS

SUMMARY

Sulphur-Asphalt pavement design technology has undergone extensive development in North America, Canada, Europe and Middle East since the early 1970's due to high energy costs, dwindling hydrocarbon resources and surplus sulphur accumulation. These pavements represent a viable alternative to conventional asphalt pavements and they offer potential economic and performance advantages. Extensive laboratory, field and analytical investigations have been conducted to verify the design technology. Several major aspects of the technology are addressed, including materials production, properties and quality assurance, structural design and economic considerations. Examples of each aspect are considered.

Sulphur-asphalt mixes have been found to have a lower temperature susceptibility than conventional mixes and they therefore offer the designer increased flexibility with respect to low temperature and permanent deformation requirements. In addidion, increased fatique life and thickness reductions can be achieved under certain conditions. Production, transport, placement and compaction of sulphur-asphalt mixes is done with conventional methods and equipment.

In this thesis content, studies and works of some of the field trials have been researced conducted in North America, Canada, Europe and Middle East. The prinicipal purpose of this thesis is to mention the sulphur-asphalt design technology to date and to provide illustrations of field verifications. Two major components; as materials technology and structural design, of the design technology are addressed.

Finally, this study briefly reviews the potential economic advantages of using sulphur-asphalt. These relate to materials cost savings, conservation of materials and potential performance advantages.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **ii**
SUMMARY ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **iv**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
ÖNSÖZ ..... **xii**

1. GİRİŞ **1**

2. ESNEK YOL ÜSTYAPISI **4**
2.1 Taban Zemini 8
2.2 Alt Temel Tabakası 9
2.3 Temel Tabakası 9
2.4. Kaplama Tabakası 10
2.4.1 Yüzeysel Kaplamalar 10
2.4.2 Asfalt Betonu Kaplamalar 10
2.5 Bitümlü Karışımlardan Beklenen Fizik ve Mekanik Özellikler 11
2.5.1 Stabilite 11
2.5.2 Esneklik 11
2.5.3 Dayanıklılık 11
2.5.4 Kaymaya Karşı Direnç 12
2.5.5 İşlenebilirlik 12
2.5.6 Geçirimsizlik 13
2.6 Üstyapı Takviye Tabakaları 13

3. ESNEK ÜSTYAPIYA GELEN ETKİLER ve BOZULMA TİPLERİ **17**
3.1 Bozulma Ölçütleri 17
3.2 Yol Üstyapısında Oluşan Bozulma Türleri 18
3.2.1 Oturma, Çökme, Ondülasyon ve Kabarmalar 19
3.2.1.1 Oturmalar 19
3.2.1.2 Çökmeler 19
3.2.1.3 Tekerlek İzi Oluşumu (Oluklanmalar) 20
3.2.1.4 Ondülasyonlar 21
3.2.1.5 Kabarmalar 21
3.2.2 Çatlaklar 22
3.2.3 Ayrılma, Ayrışma ve Parçalanmalar 23
3.2.4 Kayma Direnci Kaybı, Cilalanma ve Kusmalar 24

4. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR ve BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU **25**
4.1 Bitümlü Karışımlarda Katkı Maddelerinin Rolü 28
4.2 Bitüm ve Bitümlü Karışımların Modifiye Edilme Sebepleri 29
4.3 Modifikasyon Yöntemleri 31

4.4 Bitüm Katkı Maddelerinde ve Modifiye Bitümlerde Aranılan Özellikler 32
4.4.1 Bitüm Katkı Maddelerinde Aranılan Özellikler 32
4.4.2 Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler 33
4.5 KGM Modifiye Bitüm Özel Teknik Şartnamesi 33

5. SÜLFÜRLÜ ASFALT BAĞLAYICILARIN BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR İÇERİSİNDEKİ YERİ 35
5.1 Literatür İncelemesi 35
5.2 Amaçlar 37
5.3 Malzemeler 38
5.3.1 Agregalar 38
5.3.2 Asfalt Çimentosu 38
5.3.3 Sülfür 39
5.3.4 Deney Numuneleri 41
5.4 Deney İşlemleri 41
5.4.1 Endirekt Çekme Deneyi 41
5.4.2 Marshall Deneyi 42
5.4.3 Idaho Deneyi 43
5.5 Deney Sonuçları ve Tartışma 43
5.5.1 Endirekt Çekme Deneyi 43
5.5.1.1 Taşlı Karışım 43
5.5.1.2 Çakıllı Karışım 47
5.5.2 Marshall Deneyi 51
5.5.3 Idaho Deneyi 52
5.5.3.1 Taşlı Karışım 53
5.5.3.2 Çakıllı Karışım 54
5.6 Arazi Çalışmaları 55
5.6.1 Arazi Değerlendirmesi 55
5.6.2 Laboratuar Değerlendirmesi 57
5.7 Bölüm Özeti ve Sonuçları 59

6. SÜLFÜRLÜ ASFALT BAĞLAYICILARile HAZIRLANAN GELENEKSEL ÜSTYAPI KARIŞIMLARI 62
6.1 Tarihçe 62
6.2 Araştırmanın Amaçları 63
6.3 Araştırma Programının Taslağı 64
6.4 Laboratuar Araştırmaları 64
6.4.1 Sülfürün Asfalt İçerisindeki Dağılımı 64
6.4.2 Sülfürlü Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri 65
6.4.3 Laboratuar Sonuçlarının İrdelenmesi 72
6.5 Sülfürlü Asfalt Bağlayıcı Üretimi 72
6.6 Port Colborne'da İlk Arazi Deneyimi, Ontario, Kanada 73
6.7 Blue Ridge'de Tam Ölçekli Yol İnşaatı, Alberta, Kanada 75
6.8 Windfall Yolu, Alberta, Kanada 79
6.9 Bölüm Sonuçları 80

7. SÜLFÜRLÜ ASFALT KARIŞIMLARIN SICAKLIK DUYARLILIKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 82
7.1 Faaliyet Alanı ve Amaçlar 84
7.2 En Uygun Karışım 84

7.3 Araştırmanın Yaklaşımı 86
7.3.1 Düşük Sıcaklık Deneyimi 89
7.3.2 Yüksek Sıcaklık Deneyimi 91
7.4 Sonuçlar 92
7.4.1 Düşük Sıcaklık 92
7.4.2 Yüksek Sıcaklık 93
7.5 Arazi Araştırmaları 94
7.6 Gerekli Koşullar 95
7.7 Genel Yetenekler ve Sınırlamalar 98
7.8 Bölüm Sonuçları 99

8. ISI ve HAVANIN SÜLFÜRLÜ ASFALT KARIŞIMLARIN VİSKOZİTESİNE OLAN ETKİSİ 100
8.1 Malzemeler ve Deneyler 102
8.1.1 Malzemeler 102
8.1.1.1 Sülfür 102
8.1.1.2 Asfalt 103
8.1.2 Deneyler 103
8.1.2.1 Karıştırma 103
8.1.2.2 Çevre Şartlarına Maruz Kalma 104
8.1.2.3 Viskozite Ölçümleri 104
8.2 Sonuçlar ve Tartışmalar 106
8.3 Bölüm Sonuçları 112

9. SÜLFÜRLÜ ASFALT KARIŞIMLARile ONTARIO, KANADA'DA YAPILAN DENEYSEL AMAÇLI, TAM ÖLÇEKLİ ÜÇ YOL İNŞAATI 113
9.1 Deneysel Yollara Ait Tanımlamalar 116
9.1.1 Birinci Yol 116
9.1.2 İkinci Yol 116
9.1.3 Üçüncü Yol 117
9.2 Karışım Tasarımı Verileri 117
9.2.1 Birinci Yol 118
9.2.2 İkinci Yol 121
9.2.3 Üçüncü Yol 122
9.3 Karışım Üretimi 124
9.4 Yolların İnşaatı 125
9.4.1 Birinci Yol (Kontrat 75-62, Otoyol 653) 125
9.4.2 İkinci Yol (Kontrat 77-53, Otoyol 64) 126
9.4.3 Üçüncü Yol (Kontrat 77-108, Otoyol 2) 127
9.5 Üstyapı Kaplama İşlemleri Sırasında Karşılaşılan Sülfür Dumanı 128
9.6 Deney Bölgelerinden Elde Edilen Sonuçlara Göre Yapılan Gözlemler ve Tartışmalar 129
9.6.1 Üstyapının Çatlaması 129
9.6.2 Yüzey Özellikleri ve Kayma Direnci 130
9.6.3 Tekerlek İzi Oluşumu (Oluklanma) 132
9.7 Genel Tartışma 136
9.8 Bölüm Sonuçları 137

10. KUM ASFALT UYGULAMALARDA SÜLFÜR KULLANIMI 138
10.1 İnceleme 140
10.2 Laboratuar Çalışması 144
10.2.1 Malzemeler 144
10.2.2 Deney Yöntemleri 147
10.2.2.1 Marshall Deneyi 147
10.2.2.2 Elastisite Modülü Deneyi 148
10.2.2.3 Kalıcı Deformasyon Ölçümleri 149
10.3 Sonuçlar ve Tartışma 149
10.3.1 Marshall Deneyi 149
10.3.1.1 Hava Boşlukları 150
10.3.1.2 Stabilite ve Akma Değeri 151
10.3.1.3 Sıkıştırma Sıcaklığı 155
10.3.2 Elastisite Modülü Deneyi 157
10.3.3 Kalıcı Deformasyon Karakteristiği 160
10.4 Bölüm Özeti ve Sonuçları 164

11. SÜLFÜR-ASFALT KARIŞIMLARIN TEKRAR KULLANIMI 166
11.1 Tekrar Kullanımla İlgili Laboratuar Deneyleri 166
11.2 Tekrar Kullanımla İlgili Arazi Deneyleri 167

12. EKONOMİ KİRDELEME 172
12.1 Tanımı ve Sınıflandırma 174
12.2 Dünyada Mevcut Durum 177
12.3 Üretim 178
12.3.1 Mevcut Kapasite ve Kullanım Oranları 178
12.3.2 Üretim Yöntemleri ve Teknoloji 178
12.3.2.1 Doğal Gaz ve Ham Petrolden Sülfür Üretimi 178
12.3.2.2 Doğal Sülfür Yataklarından Sülfür Üretim Yöntemleri 179
12.3.2.3 Piritten Sülfürik Asit Üretimi 180
12.3.2.4 Alçıtaşı, Jips veya Anhidritten Sülfürik Asit ve Çimento Üretimi 180
12.4 Türkiye'de Durum 181
12.4.1 Tüketim 182
12.4.1.1 Tüketim Alanları 182
12.4.1.2 Tüketim Miktarları 183
12.4.2 Üretim 183
12.4.3 Üretim Yöntemi-Teknoloji 184
12.5 Fiyatlar 185
12.6 Bölüm Değerlendirmesi 186

13. GENEL SONUÇLAR 188

KAYNAKLAR 190
ÖZGEÇMİŞ 199

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 5.1	AC 20 Asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri	39
Tablo 5.2	Karışım gradasyonu ve bitüm miktarı	41
Tablo 5.3	Taşlı karışım için çekme mukavemeti verileri, S_T, (psi)	44
Tablo 5.4	Taşlı karışım için rijitlik modülü verileri, S_F, (psi)	44
Tablo 5.5	Çakıllı karışım için çekme mukavemeti verileri, S_T, (psi)	47
Tablo 5.6	Çakıllı karışım için rijitlik modülü verileri, S_F, (psi)	47
Tablo 5.7	Taşlı karışım için Marshall deneyi verileri	51
Tablo 5.8	Çakıllı karışım için Marshall deneyi verileri	51
Tablo 5.9	Idaho deneyi verileri	53
Tablo 5.10	Karışım kompozisyonu ve tasarım verileri	56
Tablo 5.11	Elastisite modülü verileri, M_R, (psi)	57
Tablo 6.1	Sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri	65
Tablo 6.2	Sülfürlü asfalt bağlayıcıların viskozite değerleri	66
Tablo 6.3	Marshall Deneyi verileri	69
Tablo 6.4	Yorulma Deneyi sonuçları	71
Tablo 6.5	Emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması	76
Tablo 6.6	Blue Ridge yolunda kullanılan karışımlara ait veriler	78
Tablo 7.1	Sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri	86
Tablo 8.1	Asfalt çimentosunun karakteristiği	103
Tablo 8.2	Deney formatı	106
Tablo 8.3	$\tau = I_0 . \gamma^c$ formülünü hesaplamak için gerekli veriler	107
Tablo 8.4	Yaşlandırma işleminin ardından asfalt ve sülfürlü asfaltın göreli viskozite değerleri	108
Tablo 8.5	$\eta = I . t^{-b}$ olması durumunda asfalt ve sülfürlü asfalt için sıcaklık-viskozite ilişkisi	110
Tablo 9.1	Asfalt betonunun özellikleri	118
Tablo 9.2	Birinci yola ait agrega gradasyonları	118
Tablo 9.3	Birinci yola ait agrega karışım formülü ve gradasyonları	119
Tablo 9.4	Asfalt çimentosunun özellikleri	119
Tablo 9.5	Birinci yola ait formül ve deneyler, HL-2 kum-asfalt karışımlar, 150-200 penetrasyonlu asfalt çimentosu	120
Tablo 9.6	Birinci yola ait formül ve deneyler, HL-4 yüzey karışımları, 150-200 penetrasyonlu asfalt çimentosu	121
Tablo 9.7	İkinci yola ait agrega ve HL-4 karışımı gradasyonları	121
Tablo 9.8	İkinci yola ait, HL-4 karışımın formül ve deney sonuçları	122
Tablo 9.9	Üçüncü yola ait agrega gradasyonları ve karışımlar	123
Tablo 9.10	Üçüncü yola ait HL-2 ve HL-4 karışımı özellikleri	123
Tablo 9.11	İkinci yol için yapılan sülfürlü asfalt karışımların üretim kontrol verileri	125
Tablo 9.12	İkinci yoldan alınan numunelerin analizleri	127
Tablo 9.13	İkinci yolda, çeşitli yerlerdeki H_2S ve SO_2 emisyonları	128
Tablo 9.14	Birinci yola ait kayma direnci değerleri	131

Tablo 9.15 İkinci yola ait kayma direnci değerleri..... 132
Tablo 9.16 Üçüncü yola ait kayma direnci değerleri..... 132
Tablo 9.17 Birinci yola ait tekerlek izi derinlikleri,
(on ölçüm ortalaması olarak mm)..... 133
Tablo 9.18 İkinci yola ait tekerlek izi derinlikleri,
(on ölçüm ortalaması olarak mm)..... 133
Tablo 9.19 Üçüncü yola ait tekerlek izi derinlikleri,
(on ölçüm ortalaması olarak mm)..... 134
Tablo 9.20 Deney yollarına ait trafik hacimleri..... 135
Tablo 10.1 60-70 penetrasyon dereceli asfalt çimentosunun özellikleri..... 146
Tablo 10.2 Kullanılan sülfürün özellikleri..... 146
Tablo 10.3 Su duyarlılığına bir ölçüt olarak, %100 Jubail kumu kullanılarak,
muhafaza edilen % Marshall stabilitesi..... 155
Tablo 10.4 Su duyarlılığına bir ölçüt olarak, %100 Jubail kumu ve %20 taş
tozu kullanılarak, muhafaza edilen % Marshall stabilitesi..... 155
Tablo 10.5 %100 Jubail kumu kullanılarak,
Elastisite Modülü deney sonuçları..... 157
Tablo 10.6 %90 Jubail kumu ve %10 taş tozu kullanılarak,
Elastisite Modülü deney sonuçları..... 158
Tablo 10.7 %80 Jubail kumu ve %20 taş tozu kullanılarak,
Elastisite Modülü deney sonuçları..... 158
Tablo 10.8 23 C^0'de, %7 bağlayıcı içeren numunelerin
Kalıcı deformasyon özellikleri..... 163
Tablo 10.9 40 C^0'de, %9 bağlayıcı içeren numunelerin
Kalıcı deformasyon özellikleri..... 163
Tablo 11.1 Laboratuar deneyleri gaz emisyonları..... 167
Tablo 11.2 Kazıyıcıdaki gaz emisyonları..... 168
Tablo 11.3 Arazi deneyi, plent gaz emisyonları..... 169
Tablo 11.4 24 saatlik bir sürenin ardından,
tekrar kullanılan 40/60 sülfür-asfaltın karışım özellikleri..... 171

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Esnek üstyapı kesiti	6
Şekil 2.2	Esnek üstyapı tabakaları	7
Şekil 2.3	Kaplama performans eğrileri	15
Şekil 5.1	Sıcaklık-Çekme mukavemeti ilişkisi (Taşlı karışım)	46
Şekil 5.2	Sıcaklık-Rijitlik modülü ilişkisi (Taşlı karışım)	46
Şekil 5.3	Sıcaklık-Çekme mukavemeti ilişkisi (Çakıllı karışım)	49
Şekil 5.4	Sıcaklık-Rijitlik modülü ilişkisi (Çakıllı karışım)	49
Şekil 5.5	Çekme mukavemeti oranı (Taşlı ve Çakıllı karışım)	54
Şekil 5.6	Sıcaklık-Elastisite modülü ilişkisi	59
Şekil 6.1	Brookfield viskozitesi-Sıcaklık ilişkisi	67
Şekil 6.2	Termal analiz (DSC)	68
Şekil 6.3	Marshall tasarımı eğrileri	70
Şekil 6.4	-17.8 C^0'de Sabit oranlı gerilme deneyi sonuçları	71
Şekil 6.5	Karıştırma tesisi	73
Şekil 7.1	Sıcaklık-Karışımrijitliğine ait şematik illüstrasyon	85
Şekil 7.2	Elastisite modülü ve sülfür içeriği arasındaki ilişki	94
Şekil 7.3	Sülfürlü asfalt karışımların sıcaklık duyarlılığının modifikasyonu	96
Şekil 7.4	Sülfürün karışımrijitliğine olan etkisi	97
Şekil 7.5	Sülfürlü asfalt karışımların sıcaklık duyarlılığı	98
Şekil 8.1	Schweyer Reometresi şeması	105
Şekil 8.2	Bekletme süresi ve deney sıcaklığının, asfalt ve sülfürlü asfaltın göreli viskozite değerine olan etkisi	109
Şekil 8.3	Yaşlandırmanın sıcaklık duyarlılığına etkisi	111
Şekil 8.4	Yaşlandırmanın viskozite oranlarına (SEA/AC) etkisi	112
Şekil 9.1	Sülfürlü asfalt karışımların sıcaklık duyarlılığı	114
Şekil 9.2	Üçüncü yola ait basit bir plan	117
Şekil 9.3	Birinci yola ait çatlama diagramı	130
Şekil 10.1	Bağlayıcıda yükselen sülfür miktarının, sülfürlü asfaltın viskozitesine olan etkisi	142
Şekil 10.2	Kullanılan kumların gradasyon eğrileri	145
Şekil 10.3	%100 Jubail kumu ile yapılan numunelerin farklı S/A oranlarındaki Marshall tasarım verileri	151
Şekil 10.4	%90 Jubail kumu ve %10 taş tozu ile yapılan numunelerin farklı S/A oranlarındaki Marshall tasarım verileri	152
Şekil 10.5	%80 Jubail kumu ve %20 taş tozu ile yapılan numunelerin farklı S/A oranlarındaki Marshall tasarım verileri	153
Şekil 10.6	%100 Half Moon Bay kumu ile yapılan numunelerin eğrilerde belirtilen S/A oranlarında, Marshall stabilitesi ve hava boşluğu oranının sıkıştırma sıcaklığı ile olan ilişkisi	156
Şekil 10.7	Sülfür içeriğine bağlı elastisite modülü değişikliği	159
Şekil 10.8	Kür süresine bağlı elastisite modülü değişikliği	160
Şekil 10.9	Kür süresine bağlı elastisite modülü değişikliği	160

Şekil 10.10 40 C^0'de yük sayısına bağlı kalıcı eksenel deformasyon değeri 161
Şekil 12.1 Fiyat oranları 173

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu tez çalışmasında, özellikle ekonomik açıdan sergilediği faydalar, mühendislik özelliklerindeki gelişimi ve ülkemizin şartlarına olan uygunluğu göz önünde bulundurularak, asfalt kaplamalarda sülfür kullanımı konusu geniş bir şekilde araştırılmıştır.

Bu konuda çalışma olanağını bana sağlayan ve beni destekleyen sayın hocam Doç. Dr. Abdullah Hilmi LAV'a, bize çalışmalarımızda destek veren sayın Prof. Dr. Emine AĞAR'a, konu hakkındaki kaynakların temini konusunda yardımlarını esirgemeyen sayın Yüksel TAŞDEMİR'e ve tez çalışmamın çoğaltılması ve ciltlenmesi konusunda bana zaman ayıran tüm Cemil Ozalit personeline teşekkür ederim.

Ayrıca, tezimin hazırlanmasındaki tüm aşamalarda, en az benim kadar emeği olan canım kız kardeşim Esin ER'e, bugün madden ve manen sahip olduğum her ne varsa borçlu olduğum ve bu borcumu ancak baba olduğum zaman çocuğuma ödeyebileceğim, annem Leyla ER ve babam Kenan ER'e teşekkür etmenin yetersiz kalacağını sanıyorum.

Bu çalışmamın, konu ile ilgilenenlere ve memleketimize faydalı olmasını temenni ederim.

Ocak 2003 **Tolga ER**

1. GİRİŞ

Ulaşım, günümüzde insanların yaşamlarında zorunlu ihtiyaçları arasında yer almaktadır. Çağdaş ulaşım sistemleri olmaksızın yaşamın sürdürülebilmesi düşünülemez. Sağlık, eğitim, yiyecek, giyecek, vb. gereksinimlerin karşılanabilmesi, insanların bir yerden bir yere gitme mecburiyetleri, ulaşım hizmetinden yoksun bir toplum için düşünülemez.

Dünyanın bir çok ülkesinde olduğu gibi, bizim ülkemizde de ulaşım hizmetlerinin büyük bir kısmı karayolu taşımacılığı ile gerçekleştirilmektedir. Bugün ülkemizde, yaklaşık olarak altmış bin kilometre uzunluğunda bir devlet ve il yolu ağı mevcuttur. Yollarımızın, yaklaşık olarak tümü esnek üstyapılardan meydana gelmektedir. Ülkemizde yol yapım, bakım, onarım ve iyileştirme çalışmaları Bayındırlık ve İskan Bakanlığına bağlı olan Karayolları Genel Müdürlüğü kontrolünde yürütülmektedir.

Yol yapımı, yüksek maliyetli bir yatırımdır. Bu yolların kısa zamanda bozulması, ülke ekonomisi açısından ciddi maddi kayıplar anlamına gelir. Esnek üstyapılarda görülen bozulmaların ana nedenleri tasarım, yapım, bakım hataları ile çevre ve iklim şartları ve trafik etkileridir. Bu tez kapsamında yapılan literatür araştırmasında, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımlar kullanılarak, yolların, hem maliyetlerinin düşürülmesi hemde performanslarının iyileştirilmesi konuları ayrıntılı bir biçimde irdelenmiştir.

Ülkemizde trafik hacmi ile beraber yüklerin de artması, trafik kompozisyonunun büyük bir kısmını ağır taşıtların oluşturması ve iklim koşullarının olumsuz etkileri, esnek üstyapı kaplamalarında, tekerlek izi ve ondülasyon gibi kalıcı deformasyonların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu tür sorunların çözümünde, esnek üstyapının performansını arttırmak en uygun yöntem olarak görülmektedir. Bitümlü bağlayıcıların modifiye edilmesiyle, asfalt betonu karışımlarının rijitliğini artırmak, yüksek sıcaklıklardaki ve ağır trafik yükü altındaki kalıcı deformasyonları azaltmak ve yol üstyapısının ömrünü uzatmak mümkün olmuştur.

Diğer yandan, artan enerji maliyetleri ve azalan hidrokarbon kaynakları, esnek üstyapılarda kullanılan petrol hammaddesinin gün geçtikçe azalmasına ve maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu noktada, doğada bulunan veya çeşitli işlemlerin bir yan ürünü olan sülfür (kükürt) maddesinin asfalt üstyapılar içerisinde kullanılması gündeme gelmiş ve literatür araştırmasına dayalı bu tez çalışmasının da konusunu oluşturan, ayrıntılı bilimsel çalışmalar yapılmıştır.

Sülfür-asfalt üstyapı tasarımı teknolojisi, 1970'lerin başında, özellikle Kuzey Amerika, Kanada, Avrupa ve Ortadoğu'da geniş ve etkili bir gelişime uğramıştır. Bu tip üstyapılar, ekonomik olduklarını kanıtlamış ve iyi bir performans göstererek geleneksel üstyapılara bir alternatif olmuştur. Bu yeni karışımın davranışını incelemek üzere geniş kapsamlı deneysel ve teorik araştırmalar yapılmıştır.

Sülfür ve asfaltın karıştırılması ile oluşturulan bağlayıcılar ile üretilen karışımlar, SEAM (Sulphur Extended Asphalt Modifier) ve ARP (Asphalt Replacement Pellet) olarak adlandırılır. SEAM, asfalt ile birlikte kullanılırken, ARP, asfalt yerine tamamen sülfürden meydana gelmektedir. Bu tez çalışmasında, ağırlıklı olarak SEAM ele alınacaktır. Tezde, SEAM yerine, Türkçe karşılığı olarak, sülfürlü asfalt veya sülfürlü asfalt bağlayıcı ifadeleri kullanılacaktır. İlerleyen bölümlerde, SA, SEA veya SEAM gibi farklı harflerle gösterilen kısaltmalar da sülfürlü asfalt bağlayıcıları temsil etmektedir.

Sülfürlü asfalt üstyapıların, ekonomik ve performans özellikleri açısından geleneksel asfalt üstyapılara göre bazı üstünlükleri vardır. Bu üstünlük, malzeme maliyetlerindeki tasarruf, malzemelerin korunması ve muhafaza edilmesi ve potansiyel performans üstünlükleri ile açığa çıkmaktadır.

1970'li yılların başından itibaren; enerji maliyetlerinin yükselmesi, hammadde teminindeki sıkıntı ve sülfür hammaddesinin fazlalığı, sülfürlü asfalt kullanımını gündeme getirmiştir. Sülfürün %50'ye varan oranlarda asfaltın yerini alabilmesi bu maddenin önemini daha da arttırmıştır. Ayrıca, üstyapıdaki bağlayıcı maliyetinin %50'ye varan bir kısmının farklı enerji kaynaklarına yönlendirilebilmesine imkan tanıdığından dikkate alınacak bir boyut kazanmıştır.

Sülfürlü asfalt kullanımında ilk çalışmalardan birini, Gulf Oil Canada Limited adındaki bir şirket yapmıştır. Bu çalışma başlangıçta, geniş bir araştırmaya ve çok sayıda laboratuar ve arazi deneylerine dayanmaktadır. İlk olarak 1974 yılında Kuzey

Amerika'da başlayan, yukarıda bahsedilen uygulamayı müteakip, Kuzey Amerika, Kanada, Avrupa ve Ortadoğu'da 20 kadar daha proje uygulamaya konulmuştur.

Sülfürlü asfaltın yapısal tasarım teknolojisinin geliştirilmesi ve oluşan bozulmaların incelenmesi için arazi çalışmalarının yapılması zorunlu olmuştur. Bu nedenle geniş kapsamlı laboratuar çalışmaları da ilave olarak tasarlanmıştır.

Bu uygulamalardan bazılarının amacı da, asfaltın yerine doğrudan sülfür katılarak, maliyetin düşürülebileceğini göstermektir. Ancak diğer çalışmaların birçoğu; sülfür-asfalt oranı, asfalt penetrasyon derecesi, agrega kombinasyonları, temel ve alt temel varyasyonları ve kaplama kalınlıkları gibi daha çok değişkenin de göz önünde bulundurulması ile gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasına; genel bir üstyapı bilgisi, esnek üstyapılardaki bozulmalar ve esnek üstyapıların modifikasyonu konuları ile başlanacaktır. Ardından, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımların ayrıntılı çalışmaları incelendikten sonra, sülfür hammaddesi hakkında çeşitli bilgiler ile sülfürlü asfalt bağlayıcıların ekonomik açıdan irdelenmeleri konuları açıklanacaktır.

2. ESNEK YOL ÜSTYAPISI

Türkiye'de ulaşım hizmetlerinin en büyük ağırlığını karayolları karşılamaktadır. Karayolu taşıtları günümüzde, kişilerin özel yaşantılarından uluslararası endüstri kuruluşlarının faaliyetlerine kadar uzanan geniş yelpaze içindeki her alanda vazgeçilemez işlevler yüklenmiş durumdadır. Karayolu taşımacılığı gün geçtikçe yoğunluk kazanmakta ve dolayısıyla yol üstyapısının önemi daha da artmaktadır. Taşıtların ulaşım yetenekleri, kendi teknik kapasitelerinin yanında, karayolu ulaşımağının büyüklüğü ve karayollarının kullanılabilirlik durumu ile de orantılıdır.

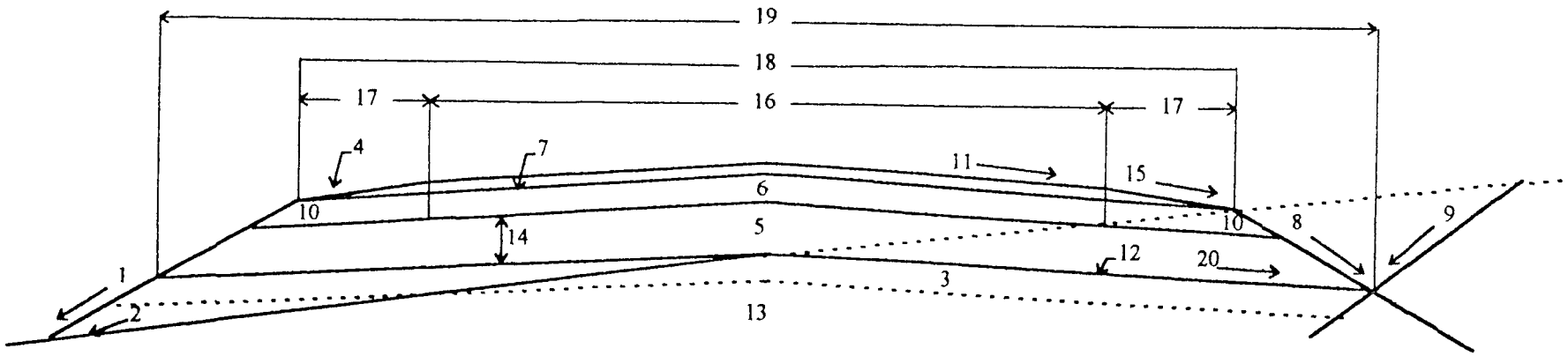
Mühendislik yapıları içerisinde eşi ender görülen özelliği bulunan yol, sonsuz uzunlukta bir yapıdır ve yol üstyapısının oturduğu taban zemini bir noktadan diğerine farklılık gösterebilmektedir. Üstyapı projelendirmesi inşaat mühendisliğinin en karışık ve en çok araştırma gerektiren bir konusu olarak görülmektedir. Yol üstyapısının projelendirilmesinde amaç, proje ömrü boyunca üstyapının üzerinden geçen trafiğin, büyük deformasyonlara ve çatlamalara maruz kalmadan, güvenli bir şekilde taşıyabilecek üstyapının toplam kalınlığının ve tabakalarının tek tek kalınlıklarının belirlenmesi ve kullanılacak malzemelerin özelliklerinin tespit edilmesidir.

Ekonomik açıdan bakıldığı zaman yolların çok yüksek maliyetlerle inşa edildiği görülmektedir. Mevcut karayollarının yüzey kalitesi zaman içinde bozulmakta, dolayısıyla onarıma ya da yenilenmesi durumu söz konusu olmaktadır. Bu durumda yolların yüzey kalitesinin bozulmasını etkileyen faktörlerin saptanarak, bunları kontrol altına almak üzere çalışmaların yapılması gereklidir. Aksi takdirde karayolu hizmet veremez, kullanılamaz hale gelecek ve bu durumda yenilenmesi yoluna gitmek kaçınılmaz olacaktır.

1970'li yıllarda başlayan otomobil artışıyla birlikte büyük hacimde yol üstyapılarının yapımı zorunlu bir hal almıştır. Bu üstyapı tipleri genel anlamda sınıflandırılırsa, esnek üstyapı ve rijit üstyapı olarak iki ana gruba ayrılır. Trafik hacmi yüksek olan yollarda bu iki tip üstyapı tercih edilir. İki üstyapı arasında seçim

yapabilmek için ilk yatırım, bakım masrafları, üstyapı ömrü, enerji kullanımı vb. faktörleri dikkate almak gerekir.

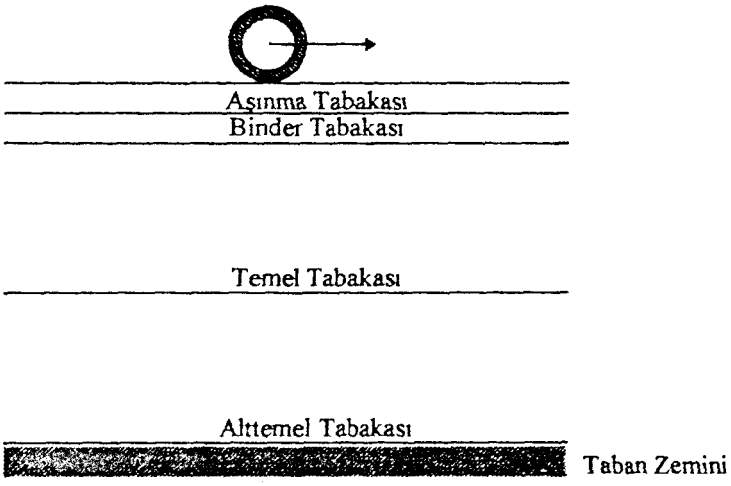
Karayolları Genel Müdürlüğü bütün güncel ilke olarak üstyapı inşaatlarını esnek olarak yapmayı tercih etmiştir. Ülkemizde yaklaşık toplam 60.000 km olan devlet ve il yollarının 42.500 km'lik kısmı asfalt kaplamalı, geri kalanı ise diğer tür kaplamalı, toprak veya stabilize yoldur. 1983-1993 Ulaştırma Ana Planın karayolu planı bölümünde, 'bir yandan ağır taşıt oranın yüksek olması, diğer yandan her bir taşıtın zarar faktörünün oldukça büyük olması nedeniyle, toplam trafiği aynı olan ülkemiz yollarının gelişmiş ülke yollarına oranla 8 kez daha fazla yüklendiğinin, ekonomik ömürlerinin çok azaldığının saptandığı, yol ağımızda mevcut yol üstyapılarının, geleceğin trafik yükleri altında hizmet verir şekilde tutulabilmelerinin, sürekli olan kesimlerinde temel teşkili, periyodik temel takviyeleri ve periyodik üstyapı yenilemeleri ile sağlanacağı, plan dönemi sonunda devlet yollarının tümünün ve il yollarının %70'inin asfalt kaplamalı hale getirileceği belirtilmiştir [105]. Bu nedenle Türkiye açısından esnek üstyapılar ve bunların gerekli periyodik bakımları büyük önem taşır. Esnek üstyapı denildiğinde, arka sayfadaki Şekil 2.1'de görülen, sıkıştırılmış taban zemini üzerine inşa edilen ve dingil yüklerini taban zeminin taşıma gücünü aşmayacak şekilde aktaran aşınma tabakası (asfalt betonu), binder tabakası (asfalt betonu), temel tabakası (asfalt betonu ya da granüler malzeme) ve alt temel tabakalarından (granüler malzeme) oluşan bir üstyapı tipi anlaşılmalıdır.



1. DOLGU ŞEVİ
2. TABİİ ZEMİN
3. SEÇME MALZEME TABAKASI (GEREKLİ OLDUĞU DURUMDA)
4. BANKET KAPLAMASI
5. ALTTEMEL
6. TEMEL TABAKASI
7. KAPLAMA TABAKASI
8. HENDEK ŞEVİ
9. YARMA ŞEVİ
10. BANKET TEMELİ
11. YOLUN ENİNE EĞİMİ
12. TABAN YÜZEYİ (TESVİYE YÜZEYİ)
13. YOL GÖVDESİ (TABAN ZEMİNİ)
14. ÜST YAPI PROJE KALINLIĞI
15. BANKET EĞİMİ
16. TRAFİK ŞERİTLERİ GENİŞLİĞİ
17. BANKET GENİŞLİĞİ
18. YOL GENİŞLİĞİ (PLATFORM GENİŞLİĞİ)
19. ÜST YAPI TABAN GENİŞLİĞİ
20. TABAN YÜZEYİNİN ENİNE EĞİMİ

Şekil 2.1 Esnek üstyapı kesiti

Aşağıdaki Şekil 2.2'de görülen, tabakalı bir sistem olan esnek üstyapının yük taşıma kapasitesi, sistemi oluşturan tabakaların üstyapı direncine katkısı ve yükü yayma özelliklerine dayanır. İyi projelendirilmiş bir üstyapıda tabakalar tarafından yayılan yük, tabana ulaştığında tabanın, büyük deformasyonlara maruz kalmadan taşıyabileceği bir düzeye düşürülmüş olur.



Şekil 2.2 Esnek üstyapı tabakaları

Esnek bir yol üstyapısına etkiyen bütün faktörlerin bir analizi yapılırsa;

- trafik hacmi,
- dingil yükü,
- dingil yüklerinin tekrarlama sayısı,
- taban zemininin taşıma gücü ve suya duyarlılığı,
- üstyapının alt temel, temel ve kaplama tabakalarında kullanılan çeşitli malzemelerin mekanik özellikleri,
- yoldan beklenilen hizmetin kalitesi,
- yolun ekonomik hizmet ömrü,
- yolun yapıldığı yerin iklimi ve diğer bölgesel koşullar gibi etkenlerin bir esnek üstyapı projesi hazırlanırken değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılır.

Üstyapıdaki tabakaları oluşturan malzemeler değişik özelliklere sahiptir. Alt temel ve temel tabakalarında granüler malzemeler kullanılırken kaplama tabakasında özellikleri sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olan, viskoelastik davranış gösteren bitümlü karışımlar kullanılmaktadır. Trafikle ilgili faktörler de çok sayıdadır. Yani projelendirmede değerlendirilecek çok sayıdaki etken de bir çok değişken faktöre bağlıdır. Bu durumda çok parametreli bir problem çıkmaktadır. Değişik ülkelerde çeşitli projelendirme yöntemleri geliştirilmiş olmakla beraber halen üniversal bir projelendirme yöntemi mevcut değildir. 1936-1945 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde geliştirilmiş olan Grup İndeksi ve CBR yöntemleriyle üstyapı tasarımı yapılmış, bu yöntemlerde çoğunlukla ampirik bağıntılardan ve gözlemlerden yararlanılmıştır. 1965-1970 yılları arası yine ABD'de kurulan Deney Yolu verilerinden AASHO 72 yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem 1986 ve 1993 de yeniden gözden geçirilerek daha gerçekçi veri ve parametrelere dayanan AASHTO 86 ve son versiyonu AASHTO 93 yöntemleri oluşturulmuştur. ABD'deki çalışmalara paralel olarak 1980'li yıllarda Avrupa'da Analitik Yöntem, Katalog Yöntemi geliştirilmiştir.

Yol gövdesi altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşur. Altyapı yarma ve dolgulardan, üstyapı ise trafik yüklerini altyapıya (taban zeminine) dağıtan tabakalardan (kaplama, temel ve alt temel) meydana gelirler. Bir üstyapı yapılmadan önce altyapı, üstyapıya istenilen bir destek sağlayacak şekilde şartnamelere uygun olarak hazırlanırlar. Üstyapının performansı taban zeminin fiziksel özellikleri ve durumu ile doğrudan ilgilidir. Yol üstyapısı, trafik yüklerinin ve doğal şartların etkisi altındadır. Trafik yükleri, taşıtların hareketleri sırasında radyal çekme ve basınç gerilmeleri ile düşey basınç gerilmeleri oluşturur. Gerilmelerin şiddeti ve büyüklüğü, dingil yüklerinin tekrarı ile doğrudan ilgilidir.

2.1 Taban Zemini

Bir esnek üstyapının davranışı taban zeminin taşıma gücü ile doğrudan ilgili olduğundan taban zeminin şartnamelere uygun olarak hazırlanması üstyapı projelendirilmesinde çok önemlidir. Taban zeminleri, yarmalarda Yollar Fenni Şartnamesi 12. kısma, dolgularda ise 14. kısma uygun olarak hazırlanmalıdır. [106] Taban zeminlerinde Y.S.S. (yer altı su seviyesi) tesviye yüzeyinin en az 150 cm altında tutulmalı, bunun da sağlanması için uygun yer altı drenajı yapılmalıdır.

Ayrıca uygun drenaj sistemi ile yüzey suyunun yol gövdesini etkilemesi önlenmelidir. Yol gövdesinin, yapım sırasında ve yolun ömrü boyunca stabil kalabilmesi için, etkili ve kalıcı uygun drenaj sistemleri ile sudan korunması sağlanmalıdır. Yol üstyapıları aşırı don kabarması ve tabanın donma çözülme mevsiminde taşıma gücünün azalması ile zarar görebilir. Don olayının yol üstyapısına olan etkisinin azaltılabilmesi için şu faktörlerin incelenmesi gerekir:

- Üstyapı taban zeminin dona karşı duyarlılığı.
- Üstyapının toplam kalınlığı.
- Donma indeksi.
- Yeraltı su seviyesinin üstyapı düzeyinden ölçülen derinliği.
- Güzergahtaki yarma ve dolgu yükseklikleri.

2.2 Alt Temel Tabakası

Alt temel tabakası taban zeminin taşıma gücünü aşabilecek yüksek gerilmeleri ve tabanda oluşacak don etkisinin üstyapıya yansımasını önleyecek niteliklere sahip olması gerekir. Alt temel tabakasının kalınlığı üstyapı projelendirilmesi sonunda belirlenmeli Yollar Fenni Şartnamesinin 66. kısmına uygun olarak, hazırlanmış olan tesviye yüzeyi üzerine serilip, sıkıştırılmalıdır [107]. Minimum alt temel kalınlığı 20 cm. olmalıdır. Alt temel tabakası ekonomik faktörler göz önünde tutularak bölgede bulunan ve şartname kriterlerine uygun yuvarlak malzeme ile teşkil edilmeli, eğer uygun yuvarlak malzeme yoksa kırma taş kullanılmalıdır.

2.3 Temel Tabakası

Temel tabakası üstyapının ana yapısal elemanlarından biri olup, alt temel ve tabana gelen basınç gerilmelerini kabul edilebilir düzeye düşürmesi ve belirli bir esneklik sağlayarak kaplamanın kırılmasını önlemesi gibi işlevleri vardır.

Bu bakımdan temel tabakası belirli özellikleri olan iyi kaliteli malzemeden teşkil edilmelidir. Temel tabakası olarak özellikleri Yollar Fenni Şartnamesinde belirlenmiş olan temel tiplerinden birisi kullanılabilir. Minimum temel kalınlıkları temel tiplerine göre değişmektedir. Minimum granüler ve plent-miks temel kalınlığı

15 cm, çimento bağlayıcılı granüler temel kalınlığı 20 cm ve sıcak bitümlü temel kalınlığı ise 8 cm olmalıdır [108].

2.4 Kaplama Tabakası

Kaplama tabakası üstyapının trafik yüklerine doğrudan maruz kalan en üst tabakasıdır. Trafik yükleri nedeniyle oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede olması nedeniyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarına göre daha yüksek bir elastisiteye sahip olmalıdır. Kaplama tabakasının trafiğin aşındırıcı etkisine karşı koymak, temel tabakasına iletilen basınç ve kayma gerilmelerini azaltmak, yüzey sularının temel tabakasına geçmesini önlemek, düzgün ve emniyetli bir sürüş sağlamak, yolu kalıcı deformasyonlara karşı korumak gibi işlevleri vardır. Kaplama tabakası genellikle bitüm ve agrega karışımı ile elde edilen malzemeden meydana gelir. Karayolları esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberine göre, kaplama tabakası yüzeysel kaplama ya da asfalt betonu kaplama olabilirler.

2.4.1 Yüzeysel Kaplamalar

Yüzeysel kaplama, yolun kabul edilen hizmet süresi boyunca geçecek, tek yönde toplam standart dingil (8.2 ton) sayısı 2×10^6 'dan az olan yollarda uygulanmaktadır. Toplam standart dingil sayısı 500.000'den küçük ise tek kat, bunun üstündeki trafik değerleri için çift kat yüzeysel kaplama yapılır. Toplam standart dingil sayısı 2×10^6-3×10^6 arasında olan yollarda ise sıcak karışım kaplama gerekmekte ise de, ekonomik durumlar göz önüne alınarak ve proje ömrü kısa tutularak çift kat yüzeysel kaplama yapılabilir. Yüzeysel kaplama, hazırlanmış bir temel tabakası üzerine önce bitümlü bağlayıcı, arkasından agrega serilip, sıkıştırılması şeklinde inşa edilir.

2.4.2 Asfalt Betonu Kaplamalar

Proje ömür süresi içinde toplam standart dingil sayısı 3×10^6'dan fazla olan yollarda kaplama olarak asfalt betonu kaplama kullanılmaktadır. Asfalt betonu belirli bir gradasyona sahip kaliteli agreganın asfalt çimentosu ile sıcak karışımından elde edilir. Asfalt betonu stabilitesini kohezyon ve içsel sürtünmeye bağlı olarak kazanır. Kohezyon ve içsel sürtünme ise agrega gradasyonuna, karışımın sıkışma yüzdesine ve bitüm miktarına bağlıdır. Bu nedenle karışımdaki agrega ve sıcak karışım titiz bir

şekilde hazırlanmalı ve Yollar Fenni Şartnamesinin ilgili bölümlerine uygun olmalıdır. Üstyapı kaplama tabakası olarak asfalt betonu kaplama uygulanacak ise bu tür kaplamalar üstte aşınma ve altta binder olmak üzere iki tabaka halinde inşa edilirler. Asfalt betonu kaplama kalınlıkları üstyapı projelendirilmesiyle bulunarak, hesaplanan kalınlıklar aşınma tabakası için 5 cm, binder tabakası için de 6cm'den az olmamalıdır. Asfalt betonu kaplamalarda bitümlü bağlayıcı olarak bölge koşullarına bağlı olmak üzere 40-50, 60-80, 75-100 vb. gibi penetrasyonlu asfalt çimentoları kullanılmaktadır.

2.5 Bitümlü Karışımlardan Beklenen Fiziksel ve Mekanik Özellikler

2.5.1 Stabilite

Stabilite, taşıtlardan gelen sürekli dinamik yükler, uzun süreli statik yükler ile hızlanan veya yavaşlayan tekerlek etkileri altında oluşan basınç, çekme, kesme kuvveti (makaslama) ve sökülmeye karşı bitümlü kaplamanın gösterdiği dirençtir. Stabilite yetersizliği yolda çökme, ondülasyon ve akmaların oluşmasına yol açar. Üstyapı projelendirilmesi açısından bitümlü karışımın en önemli özelliği stabilitedir.

2.5.2 Esneklik

Yolun alt tabakasındaki çökmelerden, bitümlü kaplama tabakalarına geçecek genel deformasyona bitümlü tabakaların çatlamadan karşı koyabilme yeteneğidir. Esneklik azlığı yol yüzeyinde çatlamalara yol açar. Mineral fillerin ve asfalt çimentosunun oranı, asfalt çimentosunun kıvamı, düktilitesi ve sıcaklığa karşı duyarlılığı esnekliğe etki etmektedir. Karalı ve esnek bir bitümlü karışım elde edebilmek için yazın kıvamını koruyabilen, kışın ise kırılgan hale gelmeyen ve yorulmaya karşı dayanıklı bir bağlayıcı gereklidir.

2.5.3 Dayanıklılık

Bir bitümlü kaplamanın dayanıklılığı, trafik, su, hava ve sıcaklık değişikliklerinin etkilerine karşı gösterdiği dirençtir. Bütün bunlara ek olarak, bir bitümlü karışım kaplamanın trafik etkileri karşısında yeterince kararlı olabilmesi için dayanıklılık koşullarının da iyi olması gerekir.

Karışımın aşınmaya karşı direnci doğal olarak agreganın aşınma özelliğine bağlıdır. Aşınma tabakalarında daha sert agrega kullanılarak daha yüksek bir

dayanıklılık sağlanabilir. Şişmeye karşı direnç de yine agreganın şişme karakteristiklerine bağlıdır. Dayanıklılığa etkiyen diğer önemli faktör nemdir. Mevcut nem halinde karışımın soyulmaya karşı direnci agreganın asfalt absorbsiyonu ile ilgilidir.

Asfalt oksitlenmeye karşı direncinde, asfaltın yaşlanma karakteristikleri ve bitümlü karışımdaki boşluk oranı önemli rol oynar. Oksitlenme aynı zamanda kaplamanın kırılmaya karşı direncine de etkir. Çünkü oksitlenme sırasında penetrasyonun düşmesi ile kaplama daha kırılgan hal alır. Bu nedenle, kırılmaların artmasına sebep olan asfaltın oksitlenmesini en alt düzeyde tutmak için bitümlü karışımın boşluk yüzdesinin belirli sınırlar içinde kalması sağlanmalıdır.

2.5.4 Kaymaya Karşı Direnç

Bitümlü kaplama yüzeyinin sürtünme ile taşıtların güvenli bir şekilde durmasını ve hareket etmesini sağlaması, kaplamanın kaymaya karşı olan direncine bağlıdır. Bu özellikler kaplamanın yüzey dokusu kadar beton asfalt karışımındaki asfalt çimentosu oranı ve boşluk oranı ile de ilgilidir. Yumuşak agregalar fazla aşındıkları için düz bir yüzey oluştururlar. Diğer taraftan, karışımda çok fazla asfalt varsa veya yeterli boşluk yoksa, trafiğin oluşturduğu sıkıştırma etkisi ile veya sıcak havalarda agregaların genleşmesi sonunda asfalt yüzeye çıkar ve kaygan bir yol yüzeyi meydana gelir. Bu hale 'kaplamanın terlemesi' denir. Bu sakıncanın ortaya çıkmaması için beton asfalt karışımı homojen olmalı, üretim ve kullanma sırasında, ayrışarak aynı cins ve boyuttaki malzemenin bir araya gelmesi olarak adlandırılan segregasyona uğramamalıdır. Ayrıca karışımda gevrek agrega bulunmamalıdır. Çünkü gevrek malzeme tekerleklerin sürtünme etkisiyle cilalı hale gelir. Cilalanma da kayma direncini azaltıcı niteliktedir.

2.5.5 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, malzemeyi istenilen kıvamda, istenilen üniformlukta, sıkıştırma ile kolayca yerleştirebilmektir. Bu özellik, agrega granülometrisi, asfalt çimentosu oranı, en büyük tane boyutu, tanelerin şekli ve agreganın yüzey dokusu ile çok yakından ilgilidir. Örneğin, 10 numaralı elek altındaki agreganın şekli bitümlü karışımın özellikleri üzerinde gözle görülür şekilde etkilidir. Köşeli tanelere sahip veya kırma taş parçaları içeren kumlar stabiliteyi yükseltirken, yuvarlak taneli kumlar işlenebilirliği arttırırlar. Bazı hallerde iyi derecelenmiş karışım ve yeterli

silindirleme olduğu halde bağlayıcı azlığı sebebiyle istenilen yoğunluk elde edilememektedir. Bu durum asfalt çimentosu oranının bitümlü karışımın işlenebilirliğindeki rolünü açıkça ortaya koyar.

2.5.6 Geçirimsizlik

Bitümlü karışımdan oluşmuş kaplama tabakasının alt tabakalara su geçirmeyecek derecede geçirimsiz olması gerekir.

2.6 Üstyapı Takviye Tabakaları

Yollar yeni inşa edildiklerinde iyi durumdadırlar, fakat trafik yükleri ve iklim koşulları nedeniyle zamanla bozulurlar. Bu bozulmalar başlangıçta çok yavaş olup yolların performansını koruyabilmek için sadece periyodik bakıma ihtiyaç gösterirler. Ancak süre ilerleyip zamanında iyileştirme yapılamazsa bozulmalar artarak çok pahalı iyileştirme alternatiflerine ihtiyaç gösteren sonuçlar doğar. Bu nedenle bozulmaya başlamış yollarda, zamanında yapılmış iyileştirme programları, sınırlı kamu fonlarına azami kazanç sağlar.

Yapılacak olan iyileştirme programları karayolu üstyapısının sağlıklı değerlendirilmesiyle başlar. Bu amaçla bozulmaya yüz tutan yolların mukavemetinin, yüzey bozukluklarının ve üstyapı tabakalarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Gerekli etütler yardımıyla toplanan verilerle bölge bölge analizler yapılarak üstyapı takviye tabakalarının kalınlıkları belirlenir. Takviye tabakalarının belirlenmesinde, esnek bir üstyapının, üzerinden geçen tekerlek yükleri altında, düşey yöndeki geçici deformasyonu olarak adlandırılan sehim yöntemi ve efektif kalınlıklar yöntemi ayrı ayrı ya da iki yöntem aynı anda beraber kullanılabilir. Mevcut durum hakkındaki bilgiler sadece kötü durumda olan yollar için değil aynı zamanda orta ve iyi durumda olanları belirlemek için de kullanılır.

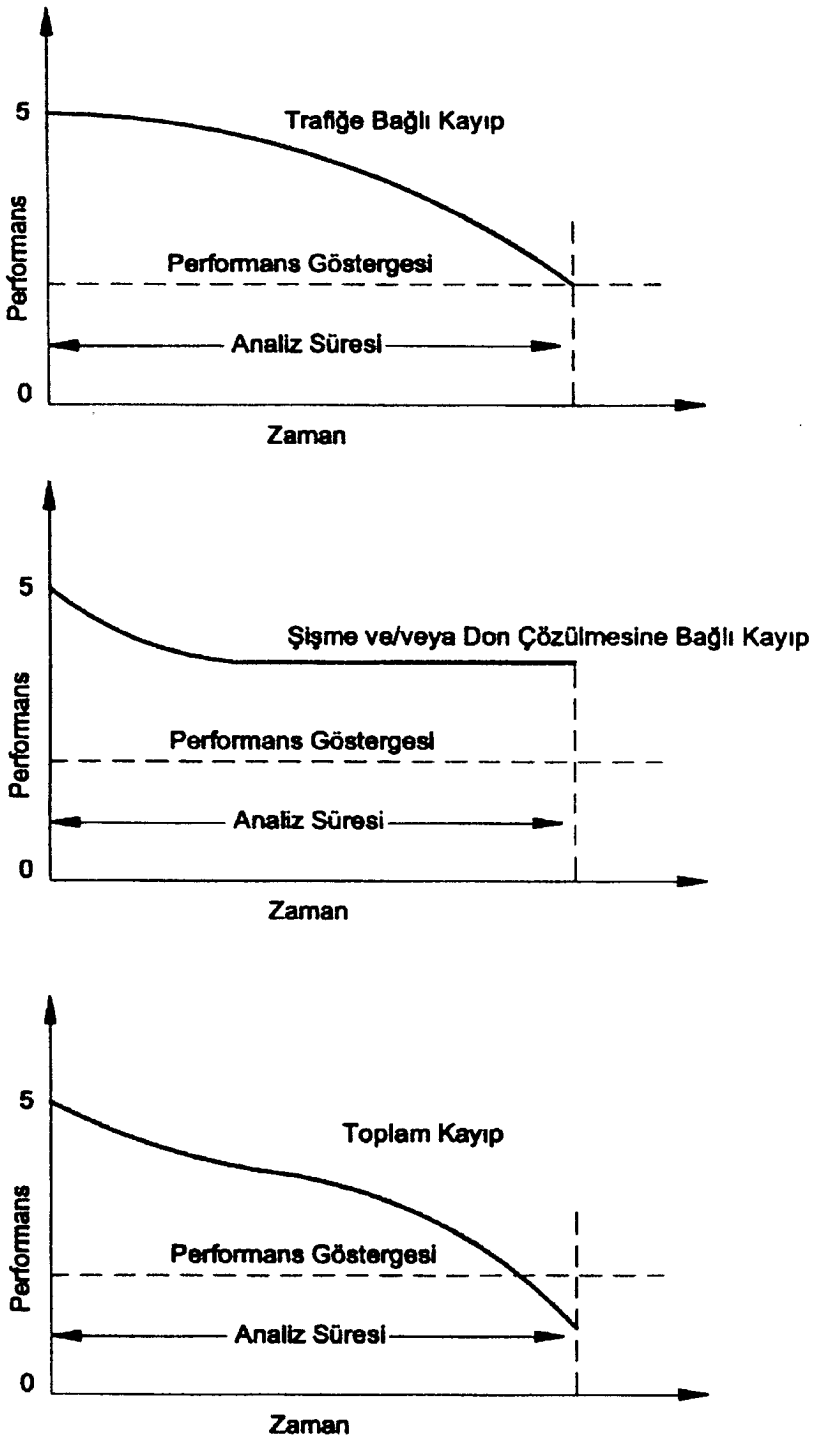
Kaplamanın servis-hizmet kabiliyeti veya başka bir değişle hizmet yeteneği veya performans kavramı, kaplama bozulması ile ilgili problemlerin çözümünde ilk kez 1962 yılında Carey ve Irick isimli araştırmacılar tarafından ortaya atılmıştır [102]. Performans eğrisi, üstyapının ömür sürecine ilişkin bir eğridir. Kaplama performansı son servis yeteneği indeksi olarak da bilinir. Kaplama performansına ait örnekler bir sonraki sayfadaki Şekil 2.3'te verilmiştir. Bir üstyapının hizmet yeteneği derecesi herhangi bir anda ölçülebilir. Servis yeteneği indeksi genellikle 0 ile 5

arasında değişen bir değer ile belirlenir. Örneğin, 5 en düzgün, pürüzsüz sürüş olanağı veren üstyapının hizmet yeteneğini belirtir. Trafik yüklerinin tekrarı ve çevresel etkenler üstyapının bozulmasına neden olur ve hizmet yeteneği oranını düşürür. Bazı noktalarda ise son servis yeteneği indeksine ulaşabilmektedir. Bunun anlamı ise, ilgili üstyapının daha fazla hizmet verememeyeceğidir. Kaplamanın son servis yeteneği indeksini belirlemek ve değerlendirmek çok zor ve zaman alıcı bir iştir. Bu değerler, önceleri, tartışılan fikirlerin birleşiminden ve üstyapıda oluşan ondülasyonların, tekerlek izlerinin, çatlakların vb. gibi değişkenlerin ölçümleri ile belirleniyordu. Günümüzde ise, artık bu değerleri belirlemek için mekanik cihazlar kullanılmaktadır.

Yeni bir üstyapının, genellikle 4.2'den 4.5'e kadar değişen başlangıç servis yeteneği indeksi vardır. Bir üstyapıya trafik ve iklim koşulları olumsuz yönde etkidikçe servis yeteneği indeksi azalır ve en sonunda kabul edilemez seviyelere düşer. Bu seviyeye son servis yeteneği indeksi adı verilir ve bu seviye, karayollarının temel işlevine esas olmak üzere baz olarak seçilir. Bir karayolunun son servis yeteneği indeksi, yolun önemine göre, genellikle 2.0 ile 3.0 arasında alınır. Mevcut yolların servis kabiliyetlerinin arttırılmasında hazırlanacak takviye projeleri şu çalışmaları kapsar.

1. Performans gözlemleri
2. Arazi ve laboratuar çalışmaları
3. Defleksiyon etütleri
4. Trafik analizleri

Esnek üstyapıların takviyelendirilmesi sırasında, takviye edilecek üstyapının mukavemeti ve mevcut üstyapı tabakalarının nitelikleri, tabaka kalınlıklarının hesaplanmasında esas alınmalıdır. Bu nedenle takviye tabakalarının kalınlıklarının hesaplanmasından önce üstyapının mukavemeti, bozulmaların muhtemel nedenleri ve yoldaki mevcut tabakaların özellikleri belirlenmelidir.



Şekil 2.3 Kaplama performans eğrileri

Bozulmaların değerlendirilmesi ayrıca uygulanacak yöntem (onarım, takviyelendirme veya yeniden yapım) için fikir verecektir.

Takviye tabakalarının projelendirilmesi sırasında, önce mevcut üstyapının kaç yıllık bir süre için takviye edileceği belirlenmelidir. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde takviye tabakaları için 10 yıllık bir proje önerilmektedir. Takviye tabakalarının projelendirilmesinde trafik yüklerinin üstyapıya etkisi eşdeğer standart dingil yükü sayısı ile tanımlanır.

3. ESNEK ÜSTYAPIYA GELEN ETKİLER ve BOZULMA TİPLERİ

Yol üstyapısında, meydana gelen gerilmeler, iki gruba ayrılabilir:

- Trafik yüklerinin oluşturduğu gerilmeler ve
- Sıcaklık ve nemin (iklim koşullarının) değişiminden doğan gerilmeler.

Bu gerilmelerin etkisiyle, yolların performansı ilk yapıldıkları yıllara nazaran giderek düşer ve bir müddet sonra yollar kullanılamaz hale gelebilir.

Yolların, bu bozulma sürecinde, yüksek hız ve hacimde trafiğe hizmet edebilme yetenekleri ile sahip oldukları sürüş konforu değerlendirilerek, bir servis yeteneği indeksi kavramı geliştirilmiştir. AASHTO tarafından geliştirilen bu derecelendirme, yol üzerinde yapılan bir dizi fiziksel ölçümler (tekerlek izi oluşumu, çatlak uzunluğu, yama miktarı, vb.) yapılarak saptanır [109, 110].

Bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı bir biçimde incelenecek olan, sülfürün asfalt çimentosuna katılmasının, esnek üstyapılarda oluşan bozulmalar konusunda da çok önemli etkilerinin ve iyileştirmelerinin olduğu görülecektir.

3.1 Bozulma Ölçütleri

Bir asfalt kaplamanın bozulmasına, üç ayrı temel bozulma şekline bakılarak karar verilir. Temel bozulmaların haricinde, soyulma gibi yüzey bozuklukları, yapısal bir bozulma tipi olmadığı için bir sonraki aşama olan değerlendirme aşamasında değerlendirilir. Aşağıda temel bozulma ölçütleri açıklanmaktadır.

1. Tekerlek İzi Derinliği

   Bu tezin genel konusu içerisinde de, tekerlek izi oluşumu ile ilgili ayrıntılı çalışmalar ele alınacaktır. Tekerlek izi derinliğinin, belirli bir düzeyi aşması durumunda, o yol bozulmuş kabul edilmektedir. Tekerlek izi derinliğinin büyüklüğüne göre, bakım yada onarım kararı verilmektedir. Tekerlek izi oluşumu 2,5 cm'yi aşan yollarda, hemen bakım yapılması gereği açıktır.

2. Çatlak oluşumu

Yoldaki çatlak oluşumunun birim alana düşen miktarı, çatlama derecesini vermekte olup, bu değerin belli bir sınırı aşması ile, gerekli bakım yapılması gereği ortaya çıkmaktadır. Genel olarak 6 mm'den büyük genişlikteki çatlakların artması ve trafik altında çatlak kenarlarının kopması, kırılması çatlak açısından yolun bakım gerektirdiğinin bir işareti olarak görülmelidir.

3. Defleksiyon

Defleksiyon; tekerlek izi gibi genel olarak tüm üstyapıyı ve tüm yol gövdesini

ilgilendiren bir bozulma şeklidir. Defleksiyonun belirlenmesi için tüm dünyada birbirinden farklı ölçüm cihazları kullanılmaktadır.

Bunlardan bazıları;

- Dynaflect
- Road Rater
- Dynatest Falling Weight Deflectometer
- KVAB Falling Weight Deflectometer
- Phoenix Falling Weight Deflectometer

olarak sıralanabilir.

Defleksiyon ölçümleri sonucunda bulunan değerlerle birlikte, üstyapı malzemesi ve diğer parametreler kullanılarak, yolun bakıma gereksinimi olup olmadığına karar verilmektedir.

3.2 Yol Üstyapısında Oluşan Bozulma Türleri

Yol üstyapısında meydana gelen bozulma türleri genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

3.2.1 Oturma, Çökme, Ondülasyon ve Kabarmalar

Bu tip bozulmalar, yol satıhında plan ve boy kesitindeki konumuna göre meydana gelen değişiklikler olup çökme, ondülasyon, tekerlek izi, oluk ya da çöküntü, kabarma şeklinde tanımlanırlar.

Bu bozulmalar dengeli bir yapıya sahip olmayan malzemenin kullanıldığı kaplama altındaki tabakaların oturması, çökmesi, büzülmesi ve kabarması gibi nedenlerle meydana gelir.

3.2.1.1 Oturmalar

Kaplama altındaki malzemenin oturması sonucu oluşur. Nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

- Alt tabakaların yetersiz kalınlığı,
- Alt yapıda oturmalar,
- Yan desteklerin olmayışı (banketlerin yetersizliği),
- Yer altı su seviyesinin yüksekliği,
- Yetersiz drenaj,
- Temel ve temel altı malzemelerinin taban zemininden gelen kille karışmasıdır.

Oturmalar, yol eksenine paralel kenar şeritlerde uzunlamasına ya da enlemesine oluşur. Oturma geniş bir yüzeyi kapsadığından, kaplama tabakası aynı şekli almaya çalışacak ve çatlamayacaktır. Ancak düşük sıcaklıklarda rijitlik modülü çok yüksek kaplamalar, alttaki tabakalarda meydana gelen oturmalara uyum gösteremeyeceğinden çatlamalar oluşabilecektir.

3.2.1.2 Çökmeler

Çökmeler, çatlakları içeren ya da içermeyen ve orijinal kaplama yüzeyine göre düşük kotta kalmış küçük çukurluklardır. Derinlikleri 2,5 cm ya da daha fazla olabilmekte ve yağmurlardan sonra içlerine su dolmaktadır. Çapları değişkendir. Çökmeler zamanla genişleyerek, yolun elden çıkmasına da neden olabilirler.

Nedenleri:

- Temel ve alt temelin yetersiz olarak sıkıştırılması,
- Kaplamanın yapımsırasında yetersiz olarak belirli bir bölgede sıkıştırılması,
- Yetersiz drenaj nedeniyle suyun temel altında birikimi,

- Temel ve alt temel malzemelerinin kille karışması,
- Kaplamanın taşıyabileceğinden daha ağır trafik yükü ile karşılaşması.

3.2.1.3 Tekerlek İzi Oluşumu (Oluklanmalar)

Tekerlek izi oluşumu, bitümlü sıcak karışımlar ya da road-mix karışım tipi kaplamalarda, tekerlek etkisiyle oluşmaktadır. İlerleyen kısımlarda, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımların bu konudaki özellikleri ve üstünlükleri incelenecektir.

Oluklanmalar (tekerlek izleri), kaplamanın altındaki bir ya da birden fazla tabakada, trafik etkisinin neden olduğu dansifikasyon ya da yanal hareketlerle oluşan yer değiştirmelerdir. Başka bir ifadeyle oluklanmalar, trafiğin izler boyunca meydana getirdiği kalıcı deformasyonların birikimidir.

Nedenleri üç ana başlık altında sıralanmıştır.

Asfalt Tabakasıyla İlgili Nedenler:

- Yüksek bitümiçeriği,
- Filler malzemesinin fazlalığı,
- Yuvarlak malzemelerin karışımda kullanımı,
- Karışımın yetersiz sıkışması,
- Uygun olmayan gradasyon,
- Ağır trafik ve tek şeritte hareket eden trafik nedeniyle kaplama tabakasının fazla sıkışması,
- Serim kalınlığının fazla olması,
- Kaplamanın taşıt trafiğine erken açılması.

Alt Tabakalarla İlgili Nedenler:

- Alt tabakaların yetersiz kalınlığı,
- Doğal zeminin konsolide oluşu,
- Doğal zeminin ve üst tabakaların yanal hareketleri.

Diğer Nedenler:

- Ağır ve yüksek sayıda tekerrür eden yük,
- Sıcak iklim koşulları.

Ağır taşıt trafiği, iz ve oluklarının oluşumundaki en önemli etkendir. Yüksek dingil yükü, yüksek lastik basıncı, yükün sık tekrarı ve yavaş seyreden hızdaki ağır araçlar olumsuz etkilerdir.

İz ve oluklar, aşağıdaki olumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olurlar.

- Suların toplanmasıyla, su yastığı oluşumu, kayma tehlikesinin artması ve soğuk havalarda ince buz tabakalarının oluşması,
- Seyir konforunun düşmesiyle birlikte, şerit değiştirmek isteyen hızlı araçlar için tehlike oluşması.

3.2.1.4 Ondülasyonlar

Yol üzerinde trafiğin akışına göre enine doğrultuda oluşan ve aralıkları yaklaşık olarak eşit olan dalga şeklinde ortaya çıkan satıh deformasyonları olarak tanımlanırlar.

Ondülasyon, plastik bir hareket sonucu oluşur. Genellikle kaplama tabakası ile ilgili stabilite eksikliği ile serim anında finişer tablasının aşağı yukarı hareket etmesi ve finişerin sık sık durup, hareket etmesinden oluşur.

3.2.1.5 Kabarmalar

Satıh tabakasının lokal olarak yukarıya doğru hareketidir. Genellikle doğal zeminin ve üst tabakaların şişmesiyle ortaya çıkar.

Doğal zeminin şişmesi aşağıdaki durumlarda söz konusudur.

- Doğal zemindeki suyun donması ve çözülmesi,
- Doğal zeminin, su etkisi ile şişme karakterine sahip olması.

3.2.2 Çatlaklar

Çatlaklar, aşırı dingil yüklerinden ve bunların fazla tekrarından oluşurlar. Çatlaklar, dingil yükünün kaplama tabakası altında meydana getirdiği çekme gerilmeleri, kaplama malzemesinin çekme direncini aştığı zaman oluşur.

Ayrıca araçların ani hızlanma ya da yavaşlamalarıyla ortaya çıkan yatay kuvvetler de çatlaklara neden olabilir.

Bu etkilerin dışında bir takım dış etkenler, kendi başlarına ya da trafik etkisiyle de çatlaklar oluşabilir. Şöyle ki;

- Sıcaklık değişimleri, su absorbsiyonu yüksek agrega kullanımı, asfalttaki uçucu maddelerin buharlaşması,
- Nem sıcaklık değişimleri, alt tabakalarda kireç stabilizasyonu yapılırken ya da çimento ile kür olurken doğan hacim değişikliklerinin üst tabakalara yansıması.

Çatlamada, asfaltın çekme mukavemeti en önemli rolü oynar. Hızlı yüklemelerde ve soğuk havalarda çekme mukavemeti artış gösterirken yavaş yüklemelerde ve sıcak havalarda düşmektedir.

Trafik etkeni ve hacim değişiklikleri dışında, çatlamaya neden olan hususlar şunlardır:

- Fazla miktarda yük tekrarı (yorulma),
- Kaplama (satıh) tabakasının yetersiz kalınlığı,
- Kaplama altındaki tabakaların yetersiz kalınlığı,
- Kaplama altındaki tabakaların yüksek deformasyonları nedeniyle, malzemelerin dağılımı ayrışımı,
- Yetersiz drenaj,
- Don tesirine duyarlı olan temel ve alt temel malzemeleri,
- Satıh ve banketlerdeki nem farklılıkları,
- Yanal desteklerin (banketlerin) yetersizliği,
- Araçların ani hızlanma ya da yavaşlamalarından oluşan yatay kuvvetler,
- Karışımtipi kaplamalarda, yapım sırasında finişerin sık sık durması,
- Yol kaplama yapımında (ek yerlerinin) derzlerin dikkatsiz yapılması.

3.2.3 Ayrılma, Ayrışma ve Parçalanmalar

Asfalt tabakasında, agregaların hava etkisi ya da trafiğin aşındırma etkisi ile meydana gelir.

Bu tip ayrışma, parçalanma ve kopmalar çeşitli şekillerde oluşmakta ve buna uygun olarak da değişik isimle almaktadırlar. Sökülme, çanak şekilli çukurlar, bağ eksikliği (adezyon yetersizliği) ve soyulma başlıca bozulma tipleridir.

Genel nedenler aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Mıcır tanelerinin, trafiğin mekanik etkisiyle bitümfilminden ayrılması,
- Karışım kalitesinin düşüklüğü ya da sathi kaplamalarda, bitüm ve mıcırın uygun bir aşınma tabakası oluşturmamaları,
- Bitüm yüzdesinin düşüklüğü,
- Karışım tipi kaplamalarda, filler yüzdesinin çok düşük ya da çok yüksek oluşu,
- Kirli ve kalitesiz mıcır kullanılması,
- Kaplamanın asfalt betonu olması durumunda, bu tabakanın ince olması,
- Kil malzemesinin tabandan, alt temel ve temel malzemeleri içerisine doğru yükselmesi,
- Yetersiz drenaj,
- Sathi kaplama ve öteki bitüm tabakalarının soğuk ve yağışlı havalarda yapılarak adezyonun azalması,
- Sıcak karışım tipi satıh tabakalarının yapımında, karışımın plentte fazla ısıtılması,
- Asfalt betonunun kullanılması, karşımın serilmesi ya da nakliyesi sırasında ayrışım olması,
- Satıh tabakasıyla öteki tabakalar arasında bağ eksikliği,
- Su ve kil etkisiyle soyulma.

3.2.4 Kayma Direnci Kaybı, Cilalanma ve Kusmalar

- Cilalanma

Genellikle, yüzeyde asfalt filminin oluşması ve mıcır tanelerinin zamanla trafiğin etkisiyle cilalanması şeklinde ortaya çıkar.

Bazı agregalar, özellikle kimi kalker türleri, trafik altında daha çabuk cilalı hale gelirler. Doğal olarak çıkarılan cilalı ve düzgün satıhlı çakıllar da kaplama yapımında kırılmadan kullanılırsa kayma tehlikesi oluştururlar. Satıhları, cilalı hale gelmiş olan bu gibi agregalar, ıslandıkları zaman tamamen kaygan hale gelirler.

- Kusma

Bitümün yüzeye doğru hareketiyle oluşan asfalt filmi gözle görülebilecek biçimde oluşur. Güneş ışığı altında satıhın parlaması satıhın kusmaya yüz tutacağının göstergesidir. Kusma sıcak havalarda meydana gelir. Üretim aşamasında optimum bitümden çok daha fazla bitüm kullanılması durumunda ortaya çıkar.

4. BİTÜMLÜ BAĞLAYICILAR ve BİTÜMLÜ KARIŞIMLARIN MODİFİKASYONU

Esnek üstyapı karışımlarında kullanılan bitümlü bağlayıcının, yani asfalt çimentosu, emülsiyonlar, katbekler gibi bağlayıcı çeşitlerinin modifiye edilmesi mümkündür. SEAM'ın açıklamasına bakılacak olursa, orijinal İngilizce ismi, Sulphur Extended Asphalt Modifier'dır. Bu da sülfürün de bir modifiyer olarak kullanıldığını gösterir. Modifiye özellikleri irdelendiğinde, sülfürün asfalt çimentosu üzerindeki etkisinin, en çok bir ekstender, yani asfaltın özelliklerini arttırıcı, genişletici, çeşitlendirici şekilde olduğu görülmektedir. Unutulmaması gereken en önemli husus, bir özelliğin iyileştirilmeye çalışılması sırasında diğer hiçbir özelliğin olumsuz olarak etkilenmemesi gereğidir. Modifiyelerdeki bu temel ilkenin, sülfür modifiyesi tarafından da hiç ihlal edilmediği, hatta ekonomik faydalarının yanı sıra, önemli ilave mühendislik özellikler kattığı ilerleyen bölümlerde görülecektir.

Piyasada çok çeşitli olarak bulunan katkı maddelerinin hepsinin amaçlanan iyileştirmeyi sağlayamadığı görülmektedir. Bunlardan bazıları endüstriyel atıklardan oluşur ve katkı maddesi olarak piyasaya verilir. Diğerleri ise yine bazı endüstri kollarının yan ürünleriyse de bağlayıcılardaki fiziksel ve kimyasal değişimleri sağlamak amacıyla, özellikleri açıkça ortaya koyulmak suretiyle, bitüm modifikasyonlarda kullanılırlar. Her ürünün özellikleri belirli bir problemi çözebilmek için dikkatlice değerlendirilmeli ve bu şekilde istenen iyileştirmeler elde edilmelidir [109, 110].

Bitümlü Sıcak Karışımların (BSK) arazi performansı hakkında üç potansiyel tehlike vardır;

1. Kalıcı Deformasyonlar :

   a) Tekerlek izi (oluklanma)

   b) Çökmeler,

   c) Kabarmalar,

   d) Yığılmalar,

   e) Ondülasyonlar.

2. Çatlamalar :

   a) Tekrarlı yüklerden dolayı, (yorulma çatlakları)

   b) Yüksüz, termal çatlaklar

3. Ayrılmalar :

   a) Sökülme,

   b) Soyulma (Nem)

Bitümlü sıcak karışımlarda görülen bu problemleri gidermek bakımından değişiklik yapabilecek birkaç olasılık şöyle belirtilebilir.

- Kaplama tasarımının geliştirilmesi (Yapısal, Drenaj, Malzeme vb.)
- Üstyapı malzemelerinin ve üstyapıların şartname özelliklerinin gözden geçirilmesi
- İnşaat sürecindeki kalite kontrolün iyileştirilmesi,
- Bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesi.

  İdeal bir bağlayıcı aşağıdaki koşulları sağlamalıdır.

- Yüksek sıcaklıklarda (yaz mevsimi) tekerlek izlerinin en aza indirilmesi için yeterli rijitliğe sahip olmalıdır. Bununla birlikte Bitümlü Sıcak Karışımın (BSK) yorulma ömrü arttırılmalıdır.

- Düşük sıcaklıklarda (kış mevsimi) ise yeterli esnekliğe sahip olup, termal çatlakları engellemelidir.

- İnşaat sırasında sıvı bağlayıcının pompalanması hızlandırılmalı, BSK'nın karıştırılması ve sıkıştırılabilmesi için sertliği (veya viskoziteyi) düşürülmelidir. Yani işlenebilirlik artmalıdır.

- Nemli ortamlarda soyulmayı azaltmak için bağlayıcı ile agrega arasındaki adezyon arttırılmalıdır.

Bu değişik durumlar karşısında karışımın özelliklerinin değiştirilebilmesi için karışım tasarımını değiştirmek veya bitüm miktarıyla oynamak yeterli olur gibi görünmekteyse de katkı kullanımı yeni olasılıklar ve seçenekler ortaya koymaktadır.

Modifiye bitümlerin çoğu genellikler yoğun gradasyonlu BSK'da ve açık gradasyonlu yuvarlanma tabakalarında kullanılmaktadır. Yapay lateks "chip seals" de kullanılırken, doğal lateks genellikle "slurry seal" de kullanılır. Sıkça kullanılan diğer modifiyerler ise işlenmiş kauçuk blok kopolimerler ve soyulma önleyici kimyasal maddelerdir.

Mineral fillerler, genleştiricilerin bazıları, kauçuklar, plastikler, fiberler, oksidanlar ve hidrokarbonlar sertliği yüksek sıcaklıklarda arttırıp, düşük sıcaklıklarda azaltmak için kullanılırlar. Suyun bulunduğu durumlarda bitüm-agrega arsındaki adezyonu arttırmak ve soyulmaya karşı direnç sağlamak için kimyasal maddeler ve kireç kullanılır. Kauçuk ve plastik gibi bazı polimerik maddeler ikinci bir fayda olarak adezyonun artmasına yardımcı olurlar. Bunlara ek olarak mineral fillerler, anti oksidanlar ve hidrokarbonlar bağlayıcının uzun dönemde dayanıklılığını da olumlu yönde etkilerler.

Asfalt çimentolarında kullanılan modifiyerlerin yapımaşamasındaki etkileri çok çeşitlidir ve önceden tahmin edilmesi çok zordur. Herhangi bir modifiyerin klasik asfalt çimentosu üzerindeki etkilerinin bilinmesi uygulayıcının gerekli taşıma, karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını doğru seçmesine yardımcı olacaktır.

Yaklaşık 90^0 C üzerinde, inşaat sırasında çalışabilirliği arttırmak amacıyla viskozite düşürülür. 20-80^0 C arasında oluklanmayı önlemek için viskozite arttırılır.

5^0C'nin altında ise katkılı karışımın sertliği normalden düşüktür. Bu ise düşük sıcaklık çatlamalarına karşı dayanımı artırır.

4.1 Bitümlü Karışımlarda Katkı Maddelerinin Rolü

Bitüm, tüm bitümlü malzemelerin viskoelastik davranışlarının sebebi olduğundan, üstyapı performansının bir çok özelliğinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Kalıcı deformasyonlara ve çatlaklara karşı direnç tipik örneklerdir. Bir bitümlü malzemede maruz kalınan deformasyon oranı, yükleme süresi ve sıcaklıkile birlikte artar.

Basit bir akma testinde bitümlü malzemenin davranışını incelenecek olursa, uygulanan yükle meydana gelen deformasyon, yükleme kaldırılıncaya kadar, zamanla tedrici bir deformasyon artışından sonra bir anlık elastik davranış gösterir. Deformasyondaki zamanla meydana gelen değişim, malzemenin viskoz davranışından dolayıdır. Yükün kaldırılmasıyla, anlık elastik deformasyon ve zamanla bazı ek elastik deformasyonlar da oluşur. Bu "gecikmeli geri dönüş" olarak bilinir. Sonuç olarak, malzemenin viskoz davranışından dolayı bir miktar kalıcı deformasyon söz konusudur.

Bir bitümlü karışımda hareketli trafik yükleri nedeniyle oluşan deformasyon davranışı incelendiğinde, elastik davranışın iki bileşenini birbirinden ayırmak mümkün değildir. Ancak küçük kalıcı deformasyon ve daha büyük elastik deformasyon söz konusudur. Tek yüklemeyle meydana gelen küçük kalıcı deformasyonlar, üst yapıdaki bir kaç milyon yükleme sonucunda büyük bir yığışımla yüzey deformasyonuna, yani oluklanmaya neden olacaktır. Çevre sıcaklığının yüksek olduğu durumda ve trafiğin yavaş hareket ettiği veya durduğu yerlerde niçin fazla deformasyon oluştuğu bu şekilde açıklanmış olmaktadır.

Bitüm katkı maddelerinin asıl rollerinden birisi, bitüm ya da bitümlü karışımın diğer sıcaklıklardaki özelliklerini etkilemeksizin yüksek yol sıcaklıklarındaki direncini arttırmaktadır. Bu hem asfaltın viskoelastik özelliğini azaltan bitüm sertleşmesi ile (buna karşılık gelen kalıcı deformasyonlarda da azalmaya yol açar) hem de bitümün elastik bileşenlerinin arttırılması ile (bu da viskoz bileşenin azalmasına ve yine karşılık gelen kalıcı deformasyonun azalmasına sebep olur) başarılır. İlerleyen çalışmalarda da görüleceği gibi, sülfür, burada

bahsedilen yüksek sıcaklıktaki rijitliği arttırmakla kalmayıp, düşük sıcaklıklarda da daha elastik bir yapıya ulaşılabilmesine imkan vermektedir.

Bitüm sertliğinin artması üstyapının dinamik sertliğinin artmasına da sebep olur. Böylece malzemenin yük yayma kabiliyetinin iyileştirilmesi ile yapısal gücün ve üst yapının beklenen proje ömrünün artması söz konusu olacaktır. Alternatif olarak aynı yapısal gücün daha ince bir tabaka ile de elde edilmesi mümkün olabilir. Bitümün elastik bileşeninin artması da yüksek çekme gerilmelerinin önemli olduğu yerlerde üstyapının esnekliğini iyileştirmiş olacaktır.

Bu tez konusunda incelenen sülfürün, bir katkı malzemesi veya modifiye olarak düşünülmesi durumunda, sülfürün karışıma katacağı özelliklerin en önemlilerini de;

- stabilitede artma,
- özellikle yüksek sıcaklıkta, tekerlek izi direncinde artma,
- işlenebilirlik gelişimi,
- gevreklikte artma,
- suya bağlı bozulma duyarlılığında azalma, vb. şeklinde sıralayabiliriz.

4.2 Bitüm ve Bitümlü Karışımların Modifiye Edilme Sebepleri

Bitüm ve bitümlü karışımların modifiye edilmeleri ile, en genel anlamda yol üstyapılarının yüksek yol sıcaklıklarında yeterli rijitliğe sahip olarak oluklanma, ötelenme ve ondülasyon gibi deformasyonlara karşı dirençli olması, düşük yol sıcaklıklarında da yeterli esnekliğe sahip olarak çatlamalara ve kırılmalara karşı dirençli olmaları amaçlanmaktadır. Ayrıca, trafik yükleri altında yorulma nedeniyle oluşan çatlamalar ile su etkisiyle ortaya çıkan soyulmalara karşı dirençli olması ve kaplama yüzeyinde istenilen düzeyde kayma direncinin elde edilerek seyir güvenliğinin sağlanması amaçlanmaktadır.

Genel anlamda bu şekilde ifade edilebilen, bitümün modifiye edilme sebepleri maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Düşük servis sıcaklıklarında daha yumuşak karışımlar elde etmek ve böylece çatlakları azaltmak, ki sülfürün bu alandaki katkıları da incelenecektir,

2. Yüksek servis sıcaklıklarında daha sert karışımlar elde etmek ve böylece çatlakları (oluklanmayı) azaltmak, burada da yukarıdaki birinci madde ile birlikte, bağlayıcı içerisinde sülfür kullanımının sağladığı en önemli faydalardan ikisini kapsamaktadır,

3. Kayma direnci yüksek kaplama yüzeyi elde etmek,

4. Uygulama sıcaklıklarında viskoziteyi düşürerek işlenebilirliği ve sıkıştırmayı geliştirmek,

5. Karışımların mukavemet ve stabilitesini arttırmak,

6. Karışımların aşınma direncini arttırmak ve çözülmeyi azaltmak,

7. Sertliği kazanmamış yumuşak karışımların sertleşmesini hızlandırmak,

8. Karışımların yorulma direncini arttırmak,

9. Verimi çok düşük olan asfalt çimentoların verimini arttırmak,

10. Yaşlanmış (kullanılmış) bitümlü bağlayıcıları gençleştirmek,

11. Bitümlü bağlayıcıları ve karışımları gençleştirmek,

12. Düşük kaliteli agregaları kullanılır hale getirmek,

13. Ani akmayı önlemek,

14. Agregaların üzerine daha kalın bağlayıcı filmleri oluşturarak, bağlayıcı ve agregaların birbirine yapışma özeliğini iyileştirip soyulmayı azaltmak,

15. Akmayı ve terlemeyi azaltmak,

16. Çatlakların dolmasını sağlamak,

17. Yakıt dökülmelerine karşı dayanımsağlamak,

18. Yaşlanma ve oksidasyona karşı dayanımı arttırmak,

19. Kaplama tabakalarının yapısal kalınlıklarını azaltmak,

20. Yansıma çatlaklarını önlemek,

21. Yapım mevsimini uzatmak,

22. Uygulama alanlarını zenginleştirmek,

23. Absorbsiyonu en aza indirmek,

24. Yapıştırıcı tabaka olarak kullanabilmek,

25. Kaplamaların her bakımdan performansını yükseltmek,

26. Kaplamaların uzun vadede ekonomik olmasını sağlamak.

Üst yapı kaplamasından beklenilen ve klasik bağlayıcılar ile sağlanamayan bu özelliklerden söz konusu proje için özellikle hedeflenenlere ulaşılabilmesi, günümüzün teknolojik olanaklarını da kullanarak, bağlayıcının veya karışımın katkı maddeleriyle modifiye edilmesi sonucunda mümkün olabilmektedir.

4.3 Modifikasyon Yöntemleri

Modifikasyon işlemi genel olarak iki türlü yapılabilmektedir. Bunlar :

- Katkı maddesi bitüme katılarak "modifiye bitüm" elde edilmesi,
- Katkı maddesi, asfalt plentinde doğrudan doğruya katılarak, "modifiye karışım" elde edilmesidir.

Bitümün modifikasyonunda, modifiye bitüme çeşitli standartları test yöntemleri uygulanarak bitüm özelliklerindeki değişmelerin saptanması mümkün olabilmektedir. Böylece, modifiye bitümün özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Ancak, bitümün modifiye edilmesi yönteminde, bu işlemi için genellikle ilave ekipmanlar gerekmekte, hazırlanan modifiye bitümün depolanması, taşınması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır.

Karışımın modifikasyonunda ise, katkı maddesi asfalt plentinde karışıma katılabildiğinden ilave karıştırma ekipmanı gerekmekte, depolama, taşıma vs. gibi

sorunlarla karşılaşılmamakta, ancak bu durumda da karışımdan modifiye bitümü çekerek özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi pratik olmamaktadır.

Bilindiği gibi bağlayıcı özelliklerin belirlenmesinde uygulanan test yöntemleri, karışım özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan test yöntemlerine göre daha pratik ve daha kısa sürelerde yapılabilmektedir. Karışıma yönelik testlerde, daha uzun sürelerde daha fazla işlemlere ve daha kapsamlı test ekipmanlarına gereksinim duyulmakla birlikte üstyapı performansının belirlenmesi ve değerlendirilmesinde daha temsili olmaktadırlar. Ancak, ülkemizde konuyla ilgili kurumlardaki laboratuarlarda karışımlara yönelik test imkanlarının gelişmiş ülkelerdekine göre düşük düzeyde olduğu bilinmektedir. Karışıma yönelik test olanaklarının ülkemize getirilmesi ile gerek klasik üstyapı karışımlarının performanslarının daha sağlıklı bir şekilde saptanması bakımından, gerekse bu karışımların iyileştirilmesinde kullanılacak katkı maddelerinin amacına uygun seçilmelerinde büyük faydalar sağlanacaktır.

Genellikle, modifiye oranları karışımın %10'luk dilimi içerisindeki rakamlardan oluşmaktadır. İlerleyen bölümlerde de görüleceği gibi, sülfür katkı oranlarının, %30, %40, %50 gibi rakamlardan oluşması herhangi bir yanlış anlaşmaya neden olmamalıdır. Çünkü bu oranlar karışımın değil bağlayıcının % oranlarıdır. Örneğin, bağlayıcının %50'si oranında sülfür, toplam karışımın %7 si oranında bağlayıcı içeren karışımın %3.5'i sülfürden oluşmaktadır.

4.4 Bitüm Katkı Maddelerinde ve Modifiye Bitümlerde Aranılan Özellikler

Modifikasyonlarda kullanılacak katkı maddelerinin ve modifiye bitümlerin, uygulamada etkili, pratik ve ekonomik olması bakımından bazı koşulları sağlaması gerekmektedir.

4.4.1 Bitüm Katkı Maddelerinde Aranılan Özellikler

Katkı maddelerinin şu koşulları sağlaması istenir :

- Kolay elde edilebilmelidir,
- Karıştırma sıcaklığında özelliğini kaybetmemelidir,

- Asfalt ile homojen olarak karışabilmelidir,
- Asfaltın, yüksek karıştırma ve serme sıcaklıklarında, çok fazla viskoz hale getirmeden yüksek yol sıcaklıklarında akışkanlığa karşı direncini arttırmalıdır,
- Düşük sıcaklıklarda ise asfaltın çok kırılgan veya sert olmamasını sağlamalıdır,
- Maliyeti ekonomik olmalıdır.

4.4.2 Katkılı Bitümlerde Aranılan Özellikler

Katkı maddelerinin bitümle karıştırılmasından sonra ise şu özelliklere sahip olması istenir :

- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında sahip olduğu özelliklerini korumalıdır,
- Uygun ekipman ile işlenebilirlik özelliğine sahip olmalıdır,
- Depolama, uygulama ve hizmet sırasında fiziksel ve kimyasal olarak dengeli olmalıdır.
- Normal uygulama sıcaklıklarında püskürtülebilme ve agregayı sarabilme akışkanlığını sağlayabilmelidir.

4.5 KGM Modifiye Bitüm Özel Teknik Şartnamesi

KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı tarafından bir modifiye bitüm özel teknik şartnamesi hazırlanmıştır. Şartname, Türkiye'nin koşullarına bağlı olarak, sıcak bölgelerde tekerlek izinde oturma (TİO) oluşmasını azaltmaya, soğuk bölgelerde termal nedenlerle çatlaklar oluşmasını engellemeye yönelik hazırlanmıştır.

Ayrıca, bitüm modifikasyonunun bir başka amacı da kaplama yüzeyinde istenilen düzeyde kayma direncinin sağlanmasıdır. Kayma direnci, kaba agrega oranı fazla ve genelde kesikli gradasyonlu karışımlarla sağlanmaktadır. Bu tür karışımların

dayanıklığı ise film kalınlığı fazla, yapışması, esnekliği ve yumuşama noktası yüksek, kırılma noktası düşük, yüksek oranlı bitümlerle sağlanmaktadır. Bitüm modifikasyonu, normal bitümlerde sağlanamayan bu koşulların sağlanmasına olanak tanımaktadır.

Ülkemiz koşullarını göz önünde bulundurarak, belirtilen bu amaçları sağlayabilmek için hazırlanan modifiye bitüm özel teknik şartnamesi;

- İncelenen kaynaklarda, modifikasyonun çoğu ülkelerde eskiden beri ağırlıklı olarak bitümün önceden iyileştirilmesi yolu ile yapılması,

- Çeşitli ülkelere ait mevcut şartnameler incelendiğinde; çoğu kalite kontrol deneylerinin modifiye bitüm özelliklerine ait olması, buna karşı karışıma ait modifikasyonun kalite kontrol deneylerinin sıkça yer almadığının görülmesi,

- Ayrıca şartnamelerde yaygın olarak yer almayan, karışıma yönelik testler için, KGM laboratuarlarında yeterli test ekipmanlarının olmaması,

- Son yıllarda KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı'na tanıtımı ve kalite kontrolü için verilen malzemelerin ağırlıklı olarak bitüm modifikasyonuna yönelik olması (daha sonra direkt olarak mikserde karıştırılan katkı tipleri de bazı firmalarca önerildiyse de) bu katkılarla agregasız bitümün karıştırılabilmesinin laboratuar şartlarında mümkün olmaması, (zira katkılar bitümiçerisinde erimemiş ve homojen bir karışım sağlanamamıştır.)

- Mevcut laboratuar şartlarında modifiye bitümün, yaygın olarak kullanılan deneylerinin yapılabilmesi ve dolayısı ile orjinal bitüme göre değişken özelliklerinin bire bir değerlendirilebilmesi yapılıp, mevcut şartnamelere göre karşılaştırılmasının yapılabilmesi nedenleriyle bitüm modifikasyonunu içermekte olup, mikserde oluşturulan modifikasyon tipini içermemektedir.

5. SÜLFÜRLÜ ASFALT BAĞLAYICILARIN BİTÜMLÜ KARIŞIMLAR İÇERİSİNDEKİ YERİ

Son zamanlarda, tüm dünyada, etkisi iyice hissedilmeye başlayan enerji krizi ve artan yapım maliyetleri, üstyapı inşa ve onarımında asfalt bağlayıcıların kaynak ve maliyetlerinin tekrar ele alınması gereğini ortaya çıkarmıştır. Yeni teknolojiler ile asfalt hammaddesi yerine kullanılabilecek ve mukayese edilebilir sonuçlar sağlayabilecek hammadde arayışına girilmiştir. Azalmakta olan petrol hammaddesinin fiyatı, enerji krizinin patlak verdiği 1970'li senelerde, tonu 25-30 dolardan, on yıl içerisinde 175-200 dolar civarına kadar çıkmıştır. Bu şartlar altında yapılan araştırma ve çalışmalar sonucu, sülfür, aranan hammadde olarak tespit edilmiştir. Aslında sülfür, o sıralarda büyük miktarlarda temin edilememektedir ve Amerika Birleşik Devletleri'nin bir çok yerinde asfalttan daha ucuz bir malzeme olmamasına rağmen, yakın gelecekte sülfür üretiminin büyük miktarlarda yapılabileceği belirtilmiştir.

Tüm sülfür kullanılan üstyapı uygulamaları araştırıldığında, sülfürlü asfalt karışımların (SEA), optimum (en uygun) sonuçları verdiği görülmüştür. Bu uygulamada, karışımın içerisindeki belli miktarda asfalt, sülfür ile yer değiştirmekte ve böylece o miktardaki petrol hammaddesinin başka alanlarda kullanılabilmesine imkan tanımaktadır.

5.1 Literatür İncelemesi

1970'li yılların özellikle son yarısında, arazi çalışmalarına imkan tanımak üzere Kuzey Amerika'da çok sayıda sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren deney yolları yapılmıştır. Bu arazi çalışmaları, sülfürlü asfalt karışımların tüm inşaat (yapım) ayrıntıları ve inşaatların devamlılığı hakkında bir çok bilgiye ulaşılabilmesine imkan tanımıştır. Böylece, sülfürlü asfalt karışımlar, kolaylıkla ticari miktarlarda üretilebilecek ve geleneksel yöntem ve ekipmanlarla taşınıp, serilip, sıkıştırılabilecektir. Sülfürlü asfalt karışımlar üzerine yapılan bir çok çalışma, bu konuya verilen önemi göstermektedir [1-13].

Örneğin, Kennepohl [2], ağırlıkça bağlayıcının %50'si oranında sülfür ve %50'si oranında 85-100 penetrasyon derecesine sahip bir asfalt çimentosu içeren bir bitümlü karışıma ait 60 C derecedeki Marshall deneyi sonuçları ile -18 C derecedeki rijitlik ve yorulma özellikleri hakkındaki çalışmalarını yayınlamıştır. Bu çalışmalarda görülmüştür ki, akma değerlerinde önemli bir kayıp olmaksızın Marshall stabilitesi, sülfür miktarının artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda da ters bir etki görülmemiştir. Yapılan yorulma deneyi sonuçlarına göre de karışımın yorulma ömrüne etki eden olumsuz bir unsura rastlanmamıştır.

Lytton [14], sülfürlü asfalt karışımların geleneksel asfalt karışımlara göre performanslarını mukayese edebilmek amacı ile VESYS IIM adlı, viskoelastik tabanlı üstyapı analizi yapan bir bilgisayar programı kullanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, sülfürlü asfalt karışımların, geleneksel karışımlara göre daha az tekerlek izi oluşturduğu ve daha yüksek bir hizmet indeksine sahip olduğu görülmüştür. Ancak yorulma çatlaklarına karşı daha duyarlı oldukları da gözden kaçmamıştır. Araştırmacının bu çalışmalarda kullandığı karışım %82 oranında mineral agrega, %3.9 AC 10 olarak adlandırılan asfalt çimentosu ve %4.1 sülfürden meydana gelmektedir.

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

Meyer [16], sülfürlü asfalt karışımların düşük sıcaklıktaki rijitliklerini, -25 ve –10 C derece olmak üzere iki ayrı sıcaklıkta belirlemiştir. Çalışmasında ayrıca, 40-50, 85-100 ve 300-400 penetrasyon derecesine sahip üç çeşit asfalt ve 0/100, 20/80 ve 50/50'lik ağırlıkça sülfür/asfalt oranlarına sahip üç ayrı karışım kullanmıştır. Bu çalışmalar sırasında, rijitliğin, önemli bir ölçüde, yalnızca asfalt penetrasyonu ve sıcaklıktan etkilendiği fark edilmiştir. Penetrasyon ve sıcaklığın yüksel mesiyle rijitlik

düşmektedir. Yani, bağlayıcının düşük sıcaklıktaki çatlama potansiyeli, sülfürlü asfalt bağlayıcının içindeki asfaltın (bitüm) doğal özellikleri tarafından belirlenmektedir.

Mc Bee ve Sullivan [17], kireçtaşı ve volkanik agrega içeren iki ayrı karışım için, Marshall stabilitelerini, 60 C derecedeki akma bilgilerini ve bunlara bağlı olarak yapılan yorulma deneylerinin sonuçlarını yayınlamışlardır. Bu çalışmadaki sülfür miktarı, bağlayıcı hacminin %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 da yüksek oranlara çıkarılması ile sülfür içeren karışımların, geleneksel karışımlara göre daha yüksek bir stabiliteye ve rijitliğe sahip olduğu görülmüştür.

Al Qtaishan ve Terrell [18], kullanımda olan üstyapılara ait malzeme karakterizasyonunu gerçekleştirmek üzere, Amerika Birleşik Devletleri'nin Nevada, Texas ve Lousiana eyaletlerinde bulunan dört ayrı sülfürlü asfalt karışımı ile yapılan yollar üzerinde arazi çalışmaları yapmışlardır. Al Qtaishan ve Terrell, çalışmalarında, Marshall stabilitesi ve akma, elastisite modülü, statik ve tekrarlı yükler altındaki sünme ve yorulma deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaların genel bir değerlendirilmesi 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.

5.2 Amaçlar

Yapılan literatür araştırmasının bu bölümü, sülfürlü asfalt karışımların, bitümlü karışımların içerisindeki yerinin değerlendirilmesi amacı ile yapılmıştır. Araştırma sırasında taş ve çakıl olmak üzere iki farklı agrega ile altı adet, farklı miktarlarda sülfür içeren karışım kullanılmıştır. Burada bahsedilen taş (stone) ve çakıl (gravel) agregalar, doğal taş ve kırma taştır. İlerleyen kısımlarda, orijinal İngilizce isimlerine uygun olmaları düşünülerek, doğal taş, yalnızca taş; kırma taş ise çakıl olarak adlandırılacaktır. Amaç;

1. Aşağıda belirtilen, sıcaklık aralıklarında bulunan yoğun dereceli sülfürlü asfalt kaplama tabakası karışımlarının çekme mukavemeti, rijitlik modülü, elastisite modülü, Marshall stabilitesi, vb. mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesi,

- Düşük sıcaklıklar; (-29, -23, -18 ve –12 C derece)
- Normal sıcaklıklar; (4, 16 ve 25 C derece)
- Yüksek sıcaklıklar; (38 ve 60 C derece)

2. Asfaltın yerine geçen sülfürün, suya bağlı bozulmalara karşı karışımın direnci üzerinde nasıl bir etkisinin olduğunu belirlemektir.

Bu bölümde incelenen çalışmalara göre, her ne kadar ağır sülfürün, karışımdan ayrışmaya ve bu nedenle tam olarak homojen bir yapıya ulaşamama eğilimi olsa da asfaltın yerini alan sülfürün, bağlayıcının reolojik özelliklerine olan etkilerinin tespit edilmesi tasarlanmıştır.

5.3 Malzemeler

5.3.1 Agregalar

Bu çalışmada iki karışım kullanılmıştır. Taşlı karışım, iri agrega ve elekten geçirilmiş kırmataştan, çakıllı karışım ise kırılmış iri çakıl agregası ve doğal kumdan oluşmaktadır. Kırk birinci sayfadaki Tablo 5.2'de, bu agregalara ait gradasyonlar görülmektedir.

5.3.2 Asfalt Çimentosu

Bitümlü karışımı oluşturmak üzere AC 20 asfalt çimentosu kullanılmıştır. Bu malzemenin fiziksel özellikleri, arka sayfadaki Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 AC 20 Asfalt çimentosunun fiziksel özellikleri

4 C derecedeki penetrasyon, 100 gr., 5 sn.	6
15.6 C derecedeki penetrasyon, 100 gr., 5 sn.	23
25 C derecedeki penetrasyon, 100 gr., 5 sn.	67
60 C derecedeki viskozite, Pa.s (poise)	190.3 (1.903)
135 C derecedeki viskozite, mm^2/s (santistok)	404 (404)
Yumuşama noktası, C derece	54
15.6 C derecedeki düktilite, 5 cm/ mm , cm	150 +

5.3.3 Sülfür

Karışımda kullanılan sülfür aşağıda gösterilen özelliklere sahiptir.

Karakteristik	Değer
Saflık, (% kuru hacim)	97.5 min.
Nem, (katı sülfürde)	1.0 max.
Cüruf, (%)	1.0 max.
Karbon, (%)	1.0 max.
Asitlik, (H_2SO_4 cinsinden %)	0.05 max.

Katı sülfürün özgül ağırlığı 1.990 gr/cm^3 (veya t/m^3)'tür. Bu da asfaltın özgül ağırlığının yaklaşık iki katıdır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, aynı ağırlığa sahip sülfür ve asfalt karşılaştırıldığında, sülfürün hacmi asfaltın hacminin yarısı kadar olacaktır. Sülfürlü asfalt karışımları oluşturmak üzere asfaltla karıştırılan sülfür, bağlayıcının özgül ağırlığını arttırmaktadır. Sülfürlü asfalt bağlayıcıların özgül ağırlığı, aşağıda görülen formül ile hesap edilebilir:

$$\text{Sülfürlü asfalt bağlayıcının özgül ağırlığı} = SG_{SEA} = \frac{100}{\frac{P_S}{SG_S} + \frac{P_A}{SG_A}} \qquad (5.1)$$

Bu formülde;

P_S = ağırlıkça sülfür oranı (%),

P_A = ağırlıkça asfalt oranı (%),

SG_S = sülfürün özgül ağırlığı (gr/cm^3),

SG_A = asfaltın özgül ağırlığıdır (gr/cm^3).

Yapılan laboratuar deneylerinde sülfür, bağlayıcının ağırlıkça %0, 10, 20, 30, 40 ve 50'si oranlarında kullanılmıştır. Değişen bu sülfür miktarlarına göre, bağlayıcıların özgül ağırlıkları sırası ile 1.011, 1.063, 1.121, 1.186, 1.259 ve 1.341 olarak hesaplanmıştır.

Biri taş biri de çakıl agregalardan oluşmuş yoğun dereceli iki karışım Tablo 5.2'de verilen değerler kullanılarak oluşturulmuştur. Karışımlar meydana getirilirken, normal olarak kabul edilen seviyedeki boşluk oranlarını muhafaza edebilmek amacı ile toplam bağlayıcının hacimce yarısı asfalt yarısı sülfür olmak üzere tasarlanmıştır. Burada sülfürlü asfaltın eşit hacimdeki miktarını bulmak için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$\text{Sülfürlü asfalt bağlayıcı yüzdesi} = P_{SA} = \frac{\frac{SG_{SA}}{SG_A} \times P_A \times 100}{\frac{SG_{SA}}{SG_A} \times P_A + (100 - P_A)} \qquad (5.2)$$

Bu formülde;

SG_{SA} = sülfürlü asfalt bağlayıcının özgül ağırlığı (gr/cm^3),

SG_A = asfaltın özgül ağırlığı (gr/cm^3),

P_A = ağırlıkça %asfalttır.

Yukarıdaki formül, National Asphalt Pavement Association ve United States Bureau of Mines kurumları tarafından kabul edilen bir formüldür.

Sülfür genellikle 138 C dereceye kadar ısıtılıp, asfalt ile birlikte ısıtılan agregaya katılmaktadır. Sülfürün erime noktası 116 C derece civarındadır. Eritilmiş sülfürün veya tamamlanmış karışımın sıcaklığı 149 C dereceyi aşmamalıdır. Aksi takdirde hidrojen sülfid (H_2S) ve sülfürdioksidin (SO_2) istenmeyen emisyonları ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmalar esnasında sülfürün ve karışımın sıcaklığı 141

ila 143 C derece arasında tutulmuş, Marshall numunelerinin sıkıştırılması işlemi de 135 ila 141 C dereceler arasında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.2 Karışım gradasyonu ve bitüm miktarı

Elek	Elekten geçen yüzde		
	Karakteristik	Taşlı karışım	Çakıllı karışım
12.5 mm (1/2 inch)	100	100	100
9.5 mm (3/8 inch)	80-100	96	93
4.75 mm (No. 4)	45-80	62	62
2.36 mm (No. 8)	30-60	43	40
1.18 mm (No. 16)	20-45	32	26
0.6 mm (No. 30)	10-35	23	16
0.3 mm (No. 50)	5-25	15	11
0.15 mm (No. 100)	4-14	8	8
0.075 mm (No 200)	3-7	5	5
Asfalt içeriği, (%)	4.5-8.0	5.0	6.5

5.3.4 Deney Numuneleri

Deneylerin gerçekleştirilmesi için toplam 360 adet Marshall numunesi kullanılmıştır. Bu numunelerde, daha önce de bahsedildiği gibi iki çeşit agrega, altı farklı seviyedeki sülfür miktarı ile çalışılmıştır. Ayrıca, suya bağlı bozulmaları belirlemek için yapılan Idaho deneyi için de yetmiş iki adet Marshall numunesi kullanılmıştır.

5.4 Deney İşlemleri

Öncelikle kısaca ve basit bir şekilde, uygulanan deney işlemleri ele alınacaktır. Daha sonra ise bu tez çalışması açısından daha büyük bir önem taşıyan deney sonuçlarına değinilecektir.

5.4.1 Endirekt Çekme Deneyi

Bu deney, taş ve çakıl olmak üzere iki ayrı agrega ve altı farklı sülfür içeriğine sahip karışımların karakterizasyonunu belirlemek üzere yapılmıştır.

Çekme mukavemeti ve rijitlik modülü gibi temel karışım özellikleri, -29, -23, -18, -12, 4, 16 ve 25 C derece olmak üzere yedi ayrı sıcaklık değerinde

belirlenmiştir. Burada, rijitlik modülü, zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişkidir. Bir çok asfalt betonu uygulamasında, rijitlik karakteristiği, hem de malzemenin arazideki performansını değerlendirmek amacıyla bilinmelidir [19]. Kısa süreli yüklemelerde ve/veya düşük sıcaklıklarda, asfalt betonunun davranışı hemen hemen elastiktir. Bundan dolayı rijitlik (S_F), elastisite modülüne (E) benzemektedir.

Endirekt çekme deneyinde 101.6 mm çapında 63.5 mm yüksekliğindeki silindirik numunelere basınç yükü uygulanmaktadır. Uygulanan yükün düzgün dağılabilmesi ve sabit bir yükleme alanı yürütülebilmesi amacıyla numune ölçülerinde çelik yükleme ekipmanları kullanılmıştır. Normalde, karışım karakterizasyonunun tespiti için düşük sıcaklıklarda düşük deformasyon oranları, yüksek sıcaklıklar ise yüksek deformasyon oranları kullanılmaktadır.

Bu deney vasıtasıyla, karışımın çekme mukavemeti, Poisson oranı ve rijitlik modülü gibi değerleri hesaplanmakta ve aralarındaki ilişki tespit edilmektedir [20].

5.4.2 Marshall Deneyi

Bu çalışmada uygulanan Marshall deneyi 60 C derecede ASTM D 1559'ye uygun bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Stabilite ve akma değerlerini saptamak üzere otomatik bir kayıt cihazı kullanılmıştır.

Numunelerin hava boşluğu oranları ve teorik olarak boşluksuz durumdaki özgül ağırlıkları tespit edilmiştir.

Aşağıda görülen formüle göre de [21], pound (453 gr.) cinsinden stabilite ve 0.01 inch cinsinden de akma değerlerinin kombinasyonu ile psi (pound/inch^2) cinsinden Marshall rijitlik modülü değeri hesaplanmıştır.

$$\text{Marshall Rijitlik Modülü (psi)} = \frac{Stabilite}{Akma} \times 40 \qquad (5.3)$$

5.4.3 Idaho Deneyi

Bu deneyin uygulanması için, üstyapının, inşaatın hemen ardından sahip olduğu özellikleri tespit etmek üzere Marshall numuneleri sıkıştırılmıştır. Bu numunelere, temelde suya bağlı bozulmalar hakkında bilgi edinebilmek amacıyla su ile çeşitli işlemler uygulanmış, hatta ıslak numuneler bir dondurucuda dondurulmuşlardır. Ardından çeşitli etkilerin tespiti için sıcak su içerisinde bekletilmişlerdir [22]. Bu tip çeşitli işlemler ardından, numuneler, 15.6 C derecede, 1.27 mm/dak.'lık düşey bir deformasyona tabi tutulmuş ve karışımın çekme mukavemeti (S_T) ile rijitlik modülü (S_F) değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak, suya bağlı bozulmaların tespiti için aşağıdaki formüllerin kullanılması uygun görülmüştür.

$$\text{Çekme Mukavemeti Oranı, } TSR = \frac{S_{T(w)}}{S_{T(c)}} \times 100 \qquad (5.4)$$

$$\text{Rijitlik Modülü Oranı, } SMR = \frac{S_{F(w)}}{S_{F(c)}} \times 100 \qquad (5.5)$$

Formüllerde;

$S_{T(w)}$ = Su ile işleme tabi tutulan numunenin çekme mukavemeti (psi),

$S_{T(c)}$ = Kontrol numunesinin çekme mukavemeti (psi),

$S_{F(w)}$ = Su ile işleme tabi tutulan numunenin rijitlik modülü (psi),

$S_{F(c)}$ = Kontrol numunesinin rijitlik modülüdür (psi).

5.5 Deney Sonuçları ve Tartışma

5.5.1 Endirekt Çekme Deneyi

5.5.1.1 Taşlı Karışım

Taşılı karışımın çekme mukavemeti (S_T), ve rijitlik modülü (S_F) bilgileri sırasıyla Tablo 5.3 ve 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.1 ve 5.2 ise sırasıyla üç ve dördüncü tabloların grafikleridir.

Tablo 5.3 Taşlı karışımların çekme mukavemeti verileri, S_T (psi)

Ağırlıkça Sülfür/Asfalt oranı	Deney sıcaklığı, (C^0)						
	-29	-23	-18	-12	4	16	25
0/100	487	524	563	458	260	117	60
10/90	529	542	500	432	224	99	46
20/80	539	573	530	466	242	100	58
30/70	570	584	544	457	261	116	62
40/60	549	560	532	465	238	113	59
50/50	544	574	560	487	277	144	78

1 psi = 6.895 kPa

Tablo 5.4 Taşlı karışımların rijitlik modülü verileri, S_F (psi)

Ağırlıkça Sülfür/Asfalt oranı	Deney sıcaklığı, (C^0)						
	-29	-23	-18	-12	4	16	25
0/100	$5.2x10^5$	$5.0x10^5$	$4.1x10^5$	$3.1x10^5$	$1.6x10^5$	$5.9x10^4$	$3.4x10^4$
10/90	$5.1x10^5$	$5.1x10^5$	$3.5x10^5$	$3.2x10^5$	$1.4x10^5$	$5.1x10^4$	$2.8x10^4$
20/80	$5.3x10^5$	$5.0x10^5$	$4.0x10^5$	$3.1x10^5$	$1.6x10^5$	$5.7x10^4$	$3.4x10^4$
30/70	$5.6x10^5$	$5.2x10^5$	$4.0x10^5$	$3.3x10^5$	$1.8x10^5$	$7.0x10^4$	$3.7x10^4$
40/60	$5.1x10^5$	$5.1x10^5$	$4.0x10^5$	$3.0x10^5$	$1.7x10^5$	$7.8x10^4$	$4.1x10^4$
50/50	$5.8x10^5$	$5.7x10^5$	$4.6x10^5$	$3.8x10^5$	$2.1x10^5$	$1.1x10^5$	$6.2x10^4$

1 psi = 6.895 kPa

Şekil 5.1'e bakılarak çekme mukavemeti ile ilgili aşağıdaki gözlemler ortaya çıkarılmıştır.

a) Sülfür içeriğine bakılmaksızın, sıcaklığın 25 C dereceden aşağı düşürülmesiyle karışımın çekme mukavemeti yükselmektedir. –18 C dereceye ulaşıldığında kontrol karışımı, yani 0/100 sülfür/asfalt oranına sahip karışım, -23 C dereceye ulaşıldığında ise diğer tüm karışımlar doruk noktasına ulaşmaktadırlar.

b) –12 ila 25 C derece aralığında, %0, %20, %30 ve %40 oranında sülfür içeren karışımların çekme mukavemetlerinde belirgin bir farklılık görülmemektedir.

Grafikte görülmektedir ki, bu sıcaklık aralıklarında, yukarıda bahsedilen dört bağlayıcıya göre, %50 oranında sülfür içeren karışımın çekme mukavemeti daha yüksek, %10 oranında sülfür içeren karışımın çekme mukavemeti daha düşük olarak gözlemlenmiştir.

c) –23 ila –29 C derecedeki daha düşük sıcaklık aralıklarında ise, kontrol karışımının, yani %0 oranında sülfür içeren karışımın en düşük çekme kuvvetine sahip olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla, %10, %20, %40, %50 ve %30 oranlarında sülfür içeren karışımlar takip etmektedir.

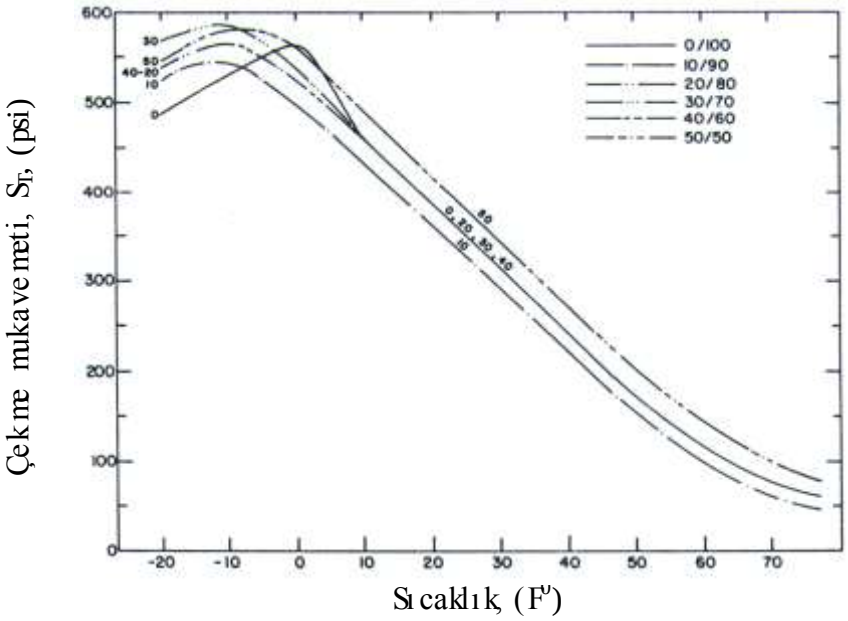
Bu sonuçlara dayanarak, düşük sıcaklıklarda, taşlı karışımlarda çekme mukavemeti açısından %30'luk bir orana sahip sülfürlü asfalt karışımın en uygun karışım oranı olduğu görülmektedir.

Şekil 5.2 incelenecek olursa da, taşlı karışımın rijitlik modülü hakkında aşağıdaki çıkarımlarda bulunmak mümkündür.

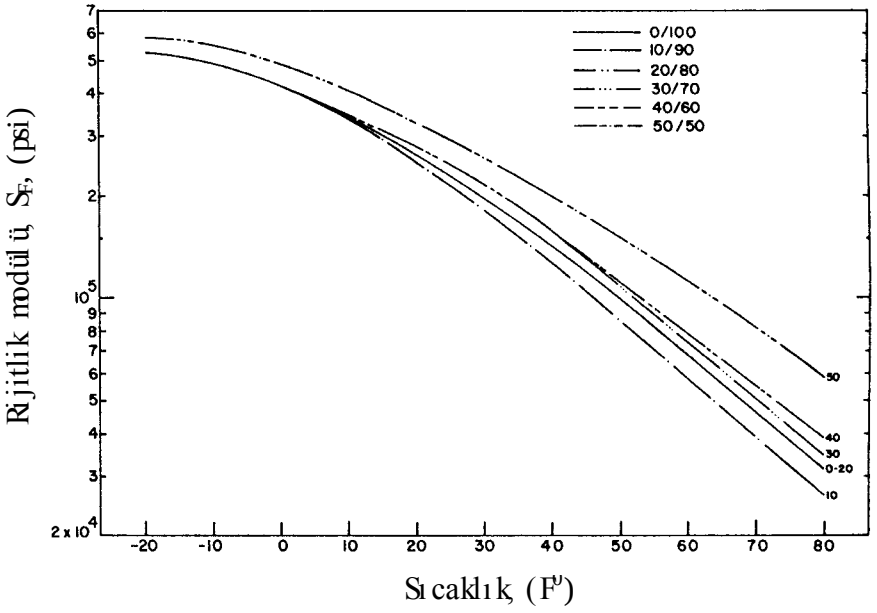
a) Tüm sıcaklık aralıklarında, %50 oranında sülfür içeren asfalt bağlayıcının rijitlik modülü, diğer beş bağlayıcının rijitlik modülünden daha yüksek bir değere sahiptir.

b) Normal olarak kabul edilen ve üstyapı tasarımına en uygun sıcaklık aralığı olan 16 ila 25 C dereceler arasında %10 oranında sülfür içeren asfalt bağlayıcının en düşük rijitliğe sahip olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla %0, %20, %30, %40 ve %50 oranında sülfür içeren karışımlar takip etmektedir.

c) –12 C derece ve daha düşük sıcaklıklarda %0, %10, %20, %30 ve %40 oranında sülfür içeren karışımların rijitlik modülleri arasında kayda değer bir farklılığa rastlanmamıştır.



Şekil 5.1 Sıcaklık-Çekme mukavemeti ilişkisi (Taşlı karışım)



Şekil 5.2 Sıcaklık-Rijitlik modülü ilişkisi (Taşlı karışım)

5.5.1.2 Çakıllı Karışım

Çakıllı karışım için, çekme mukavemeti (S_T) ve rijitlik modülü (S_F) bilgileri Tablo 5.5 ve 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.3 ve 5.4 ise, sırasıyla beş ve altıncı tablolara ait grafiklerdir.

Tablo 5.5 Çakıllı karışım için çekme mukavemeti verileri, S_T (psi)

Ağırlıkça Sülfür/Asfalt oranı	Deney sıcaklığı, (C^0)						
	-29	-23	-18	-12	4	16	25
0/100	494	506	518	473	237	105	53
10/90	524	529	516	441	217	97	47
20/80	585	556	510	430	215	102	48
30/70	598	589	514	474	245	118	59
40/60	596	580	537	477	230	108	48
50/50	613	600	560	483	239	125	58

1 psi = 6.895 kPa

Tablo 5.6 Çakıllı karışım için rijitlik modülü verileri, S_F (psi)

Ağırlıkça Sülfür/Asfalt oranı	Deney sıcaklığı, (C^0)						
	-29	-23	-18	-12	4	16	25
0/100	$4.5x10^5$	$3.9x10^5$	$3.4x10^5$	$2.8x10^5$	$1.4x10^5$	$7.6x10^4$	$2.4x10^4$
10/90	$4.2x10^5$	$3.6x10^5$	$3.6x10^5$	$2.4x10^5$	$1.3x10^5$	$8.5x10^4$	$2.0x10^4$
20/80	$4.2x10^5$	$4.0x10^5$	$3.4x10^5$	$2.6x10^5$	$1.3x10^5$	$1.1x10^5$	$2.2x10^4$
30/70	$3.9x10^5$	$3.8x10^5$	$3.3x10^5$	$2.7x10^5$	$1.5x10^5$	$9.5x10^4$	$3.0x10^4$
40/60	$4.4x10^5$	$4.2x10^5$	$3.5x10^5$	$2.7x10^5$	$1.5x10^5$	$1.1x10^5$	$2.5x10^4$
50/50	$4.7x10^5$	$4.3x10^5$	$3.7x10^5$	$3.2x10^5$	$1.8x10^5$	$1.5x10^5$	$3.6x10^4$

1 psi = 6.895 kPa

Şekil 5.3 incelenecek olursa, çakıllı karışımın çekme mukavemetine ait şu çıkarımlarda bulunabilir.

a) Sülfür içeriğine bakılmaksızın, sıcaklık 25 C dereden itibaren düşürüldükçe, karışımın çekme mukavemeti yükselmektedir. Bu yükselme, kontrol

karışımının –18 C derecede ve %10 oranında sülfür içeren bağlayıcının –23 C derecede doruk noktasına ulaşmasıyla devam eder.

b) –12 ila 25 C derece aralığında %0, %30, %40 ve %50 oranında sülfür içeren karışımların çekme mukavemetlerinde belirgin bir farklılık görülmemiştir. Bunlara birinci grup karışımlar olarak adlandırılsın. Yine aynı sıcaklık aralığında %10 ve %20 sülfür içeren karışımların da çekme mukavemetlerinde belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Bunlar da ikinci grup karışımlar olarak adlandırılırsa, grafikte de görülmektedir ki, birinci grup karışımların çekme mukavemetleri genellikle ikinci grup karışımların çekme mukavemetlerinden daha büyüktür.

c) –23 ila –29 C derece arasındaki düşük sıcaklıklar için, kontrol karışımının en düşük çekme mukavemetine sahip olduğu ve bunu sırasıyla %10, %20, %30, %40 ve %50'lik oranlara sahip sülfürlü asfalt bağlayıcıların takip ettiği görülmüştür.

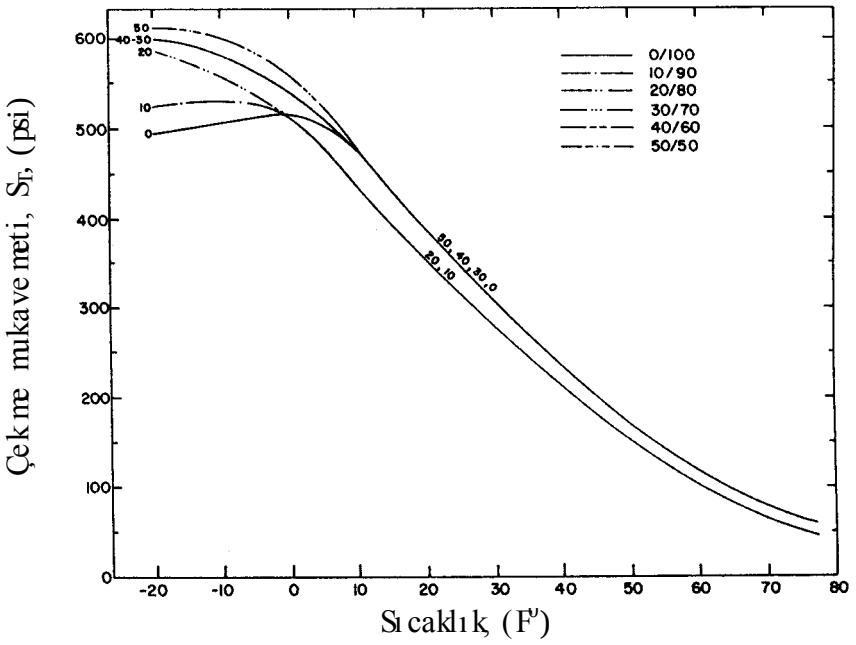
Bu sonuçlara göre ise, çakıllı karışımlar için, düşük sıcaklıklardaki çekme mukavemeti açısından %50 oranında sülfür içeren karışımın en uygun karışım oranı olduğu görülmektedir.

Şekil 5.4 incelenecek olursa, çakıllı karışımın rijitlik modülü hakkında da aşağıda görülen çıkarımlara ulaşmak mümkündür.

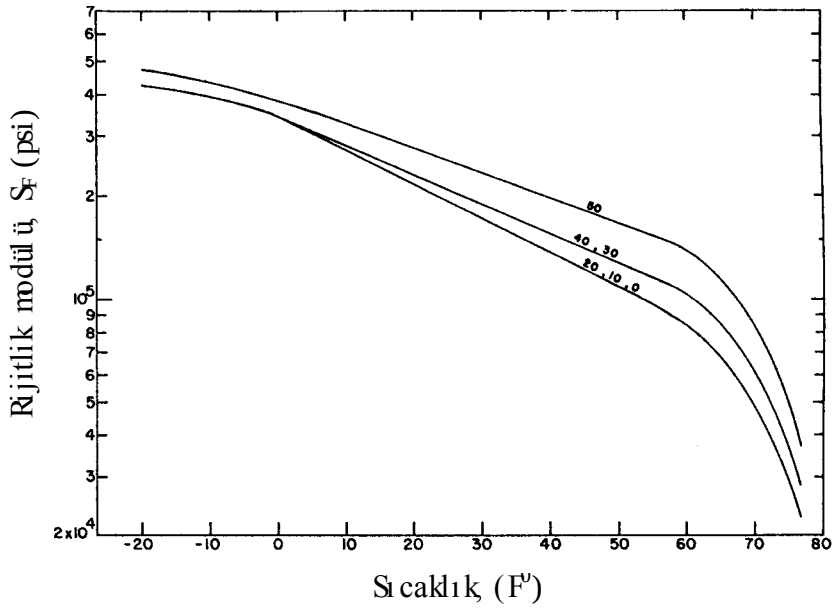
a) Tüm sıcaklık aralıklarında, %50 oranında sülfür içeren bağlayıcının rijitlik modülü diğer beş bağlayıcınınkinden daha yüksek bir değere sahiptir.

b) Normal olarak kabul edilen ve üstyapı tasarımına en uygun sıcaklık aralığı olan 16 ile 25 C derece aralığında %0, %10 ve %20 oranında sülfür içeren bağlayıcıların %30 ve %40 oranında sülfür içeren bağlayıcılara göre rijitlik modülleri daha düşüktür. Bu iki gruba ait karışımların rijitlik modülleri kendi aralarında önemli bir farklılık göstermemektedir.

c) –12 C derece ve daha düşük sıcaklıklarda %50 oranında sülfür içeren karışım haricindeki karışımların rijitlik modüllerinde kayda değer bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 5.3 Sıcaklık-Çekme mukavemeti ilişkisi (Çakıllı karışım)



Şekil 5.4 Sıcaklık-Rijitlik modülü ilişkisi (Çakıllı karışım)

Yukarıda elde edilen verilere göre aşağıdaki genel sonuçlar çıkarılmıştır.

1) %0, %10, %20, %30 ve %40 oranında sülfür içeren karışımların –12 C derecenin altındaki sıcaklıklarda, çekme mukavemetlerinde bir farklılık, çeşitlilik olsa da rijitlik modülleri arasında önemli bir fark görülmemiştir. Çünkü, genelde yüksek çekme mukavemetleri yüksek oranda şekil değiştirmeler ile, düşük çekme mukavemetleri de düşük oranda şekil değiştirmeler ile ilintilidirler.

2) Karışımların çekme mukavemetleri ve rijitlik modüllerinin, düşük sıcaklılarda ilk önce bağlayıcı özelliklerine bağlı olduğu düşünülmesine rağmen, çatlak Marshall numunelerinin gözle görülebilir muayenelerinde, farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerde, -12 C derece civarında agrega yüzey alanında takriben %10'luk bir kırılma meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Bu oran –29 C dereceye inildiğinde takriben %30'lar mertebesine yükselmektedir.

3) Rijitlik modülüne ait elde edilen bilgilere dayanılarak %50 oranında sülfür içeren bağlayıcının, düşük sıcaklık ve yüklenmiş durumdaki kırılmaları dikkate alacak bir tasarımcı için pek de uygun olmadığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca asfalt betonunun rijitlik modülü ile yorulma özellikleri arasındaki ilişki de dikkate alınmalıdır. Her ne kadar karışımın sertliğindeki artış yorulma ömrünü azaltıcı bir etki gösterse de genellikle karışımın sertliği arttıkça daha uzun bir yaşlanma ömrü elde edilebileceği görülmüştür. Buradan varılacak sonuca göre denebilir ki; %50 oranında sülfür içeren asfalt bağlayıcı, 76 mm ve daha düşük kaplama kalınlıkları için pek de yararlı görülmemektedir. Böyle bir karışım, ancak daha kalın kaplamalar için yaralı olacaktır.

4) Rijitlik modülünden elde edilen bilgilere dayanarak, ağırlıkça %40'a kadar olan sülfür kullanımı tatmin edici neticeler vermektedir. Elde edilen sonuçların, bu çalışmada kullanılan asfaltın kaynağına ve özel derecesine (AC 20) ait sonuçlar olduğu da unutulmamalıdır. Yani kullanılan sülfürün çözünürlüğünün diğer asfaltlara göre farklılık göstermesi doğaldır. Karışım sıcaklıklarına ait 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. Bu sülfür kristallerinin, deneylerde kullanılan Marshall numunelerinde de görülmesine rağmen yapılan bu çalışmada dikkate alınmamıştır.

5.5.2 Marshall Deneyi

Taşlı ve çakıllı karışımlar için Marshall deneyi verileri sırasıyla Tablo 5.7 ve 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.7 Taşlı karışımlar için Marshall deneyi verileri

Ağırlıkça Sülfür/Asfalt oranı	Hava boşluğu, (%)	Stabilite, (pound)	Akma, (units)	Marshall rijitlik modülü, (psi)
0/100	3.67	3100	8.8	14091
10/90	3.96	2900	7.7	15065
20/80	3.93	3133	8.7	14405
30/70	3.98	3575	8.0	17875
40/60	3.91	4750	8.2	23171
50/50	3.91	7400	9.0	32889

1 pound = 4.448 N

1 unit (birim) = 0.01 inch = 0.25 mm

1 psi = 6.895 kPa

Tablo 5.8 Çakıllı karışımlar için Marshall deneyi verileri

Ağırlıkça Sülfür/Asfalt oranı	Hava boşluğu, (%)	Stabilite, (pound)	Akma, (units)	Marshall rijitlik modülü, (psi)
0/100	3.61	2800	11.8	9492
10/90	4.06	2717	10.5	10350
20/80	4.20	2800	11.3	9912
30/70	4.32	3200	12.0	10667
40/60	4.36	3375	11.8	11441
50/50	4.32	4300	11.2	15357

1 pound = 4.448 N

1 unit (birim) = 0.01 inch = 0.25 mm

1 psi = 6.895 kPa

Bu verilere göre, elde edilen sonuçlar şu yöndedir.

1. Sülfürün asfalt hacmi ile aynı miktarından elde edilen karışımda hava boşluğu oranı, taşlı karışım için %0.2'den %0.3'e, çakıllı karışımda ise %0.4'ten %0.8'e çıkmaktadır.
2. %10 oranında bir sülfür ilavesi stabiliteyi düşürürken, oranın %20'ye çıkarılması stabiliteyi tekrar kontrol karışımının sahip olduğu seviyeye çıkarmaktadır. Sülfürün karışımdaki oranı daha da arttırılırsa stabilitede de gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Örneğin, %50 oranında sülfür içeren karışımda stabilite, taşlı karışım için, kontrol karışımının iki katını geçerken çakıllı karışımda takriben %50'lik bir artış meydana gelmektedir. Bu fark, farklı agrega yapısından ve/veya taşlı karışımın daha iyi bir agrega gradasyonuna sahip olmasından kaynaklanabilmektedir.
3. %10 oranında sülfür içeren karışımın dışındaki karışımların akma değerlerinde önemli bir fark görülmemektedir.
4. Marshall rijitlik modülü, karışımlarda, özellikle %20 ve %30 oranında sülfür içeren bağlayıcılardan itibaren, hem taşlı hem çakıllı karışımlarda artış eğiliminde bir değişiklik göstermektedir. Karışımdaki sülfür miktarının daha da arttırılmasıyla rijitlik modülü belirgin bir şekilde artmaktadır ki, bu da, üstyapının yüksek sıcaklıktaki performansını arttırdığı gibi oluklanma yani tekerlek izi oluşumunu da minimize etmektedir.

5.5.3 Idaho Deneyi

Kontrol numunesinin ve deneyler aşamasında da bahsedilen şekilde su ile çeşitli biçimlerde işlenmiş numunelerin, 15.6 C derecedeki çekme mukavemetleri, rijitlik modülleri, çekme mukavemetlerinin oranı (TSR) ve rijitlik modülleri arasındaki oranlar (SMR), hem taşlı hem de çakıllı karışımlar için arka sayfadaki Tablo 5.9 belirtilmiştir.

Tablo 5.9 Idaho deneyi verileri

	Ağırlıkça Sülfür/Asfalt oranı					
	0/100	10/90	20/80	30/70	40/60	50/50
Taşlı karışım						
S_T (kontrol), (psi)	84.4	76.6	79.6	79.9	83.1	98.6
S_T (işlenmiş), (psi)	51.4	31.6	31.8	46.3	51.6	64.9
Çekme mukavemetleri oranı, TSR	60.9	41.2	39.9	57.9	62.1	65.8
S_F (kontrol), (psi x 10^4)	3.92	3.24	3.70	3.92	4.36	6.84
S_F (işlenmiş), (psi x 10^4)	2.04	1.13	1.23	1.89	2.23	3.46
Rijitlik modülü oranı, SMR	52.0	34.9	33.2	48.2	51.1	50.6
Çakıllı karışım						
S_T (kontrol), (psi)	71.9	66.6	60.9	64.7	72.2	71.7
S_T (işlenmiş), (psi)	53.0	35.4	30.2	32.2	34.5	26.5
Çekme mukavemetleri oranı, TSR	73.7	53.2	49.6	49.8	47.8	37.0
S_F (kontrol), (psi x 10^4)	2.54	2.28	2.18	2.67	3.40	3.48
S_F (işlenmiş), (psi x 10^4)	1.07	0.76	0.90	0.95	1.00	1.21
Rijitlik modülü oranı, SMR	42.1	33.3	41.3	35.6	29.4	34.8

1 psi = 6.895 kPa

5.5.3.1 Taşlı Karışım

Şekil 5.5'te de görüldüğü gibi, taşlı karışımın, %10 ve %20 oranında sülfür içeren karışımlarında, çekme mukavemeti oranı (TSR), karışımın, suya bağlı bozulmalara karşı olan duyarlılığının artmasıyla azalmaktadır. Bu oran, sülfür miktarının %30 ila %40 civarına çıkmasıyla tekrar kontrol karışımının değerlerine ulaşmakta, %50 oranında sülfür içeren karşımda ise bu değeri de aşmaktadır. Idaho deneyinde dikkat edilecek bir husus da Tablo 5.10'da görüldüğü gibi kontrol karışımı kavramının sülfür içermediği anlamına gelmemesidir. Burada, kontrol numunesinden kasıt, diğer numuneler gibi suyla çeşitli işlemlere tabi tutulmamış olmasıdır.

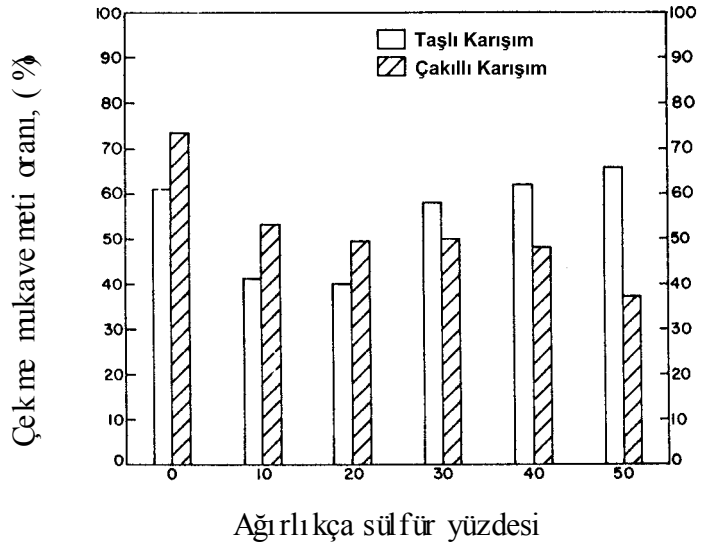
Bu sonuçlara dayanarak, sülfürlü asfalt bağlayıcıların, düşük oranda sülfür içeren karışımlarda bağlayıcı viskozitesinin düşmesiyle ilişkili olarak suya bağlı

bozulmalara karşı daha zayıf olduğu izlenimi ortaya çıkmıştır [23]. Ancak sülfür miktarının arttırılması, karışımın suya bağlı bozulmalara karşı direncini arttırarak bağlayıcının sertleşmesine ve daha mukavim bir hale gelmesine imkan verir.

Taşlı karışımın rijitlik oranı da (SMR), Tablo 5.9'da görüldüğü gibi yaklaşık olarak benzer bir eğilim göstermektedir.

5.5.3.2 Çakıllı Karışım

Şekil 5.5'teki çekme mukavemeti oranı verilerinde de görüldüğü gibi sülfürlü asfalt bağlayıcılar, çakıllı karışımlarda suya bağlı bozulmalara karşı daha zayıftırlar. Çekme mukavemeti oranı, sülfür içeriğinin %50'ye doğru artmasıyla düşmeye devam etmektedir. Bu durumda, çakıl agrega yüzeyi ile sülfürlü asfalt bağlayıcının iyi bir etkileşimi içerisinde olamadığını göstermektedir. Ortaya çıkan bu olay, sülfürlü asfalt bağlayıcıların, farklı agregalar kullanıldığı zaman suya bağlı bozulmalara karşı olan karışım duyarlılığının araştırılması ve denenmesi ihtiyacını doğurmuştur [25, 26].



Şekil 5.5 Çekme mukavemeti oranı (Taşlı ve Çakıllı karışım)

5.6 Arazi Çalışmaları

5.6.1 Arazi Değerlendirmesi

1980 yılında, yüzey kaplama kalınlığı 38 mm olan, yoğun dereceli üç adet sülfürlü asfalt üstyapı karışımı tesis edilmiştir. Bu üç proje, Amerika Birleşik Devletleri'nin Pennsylvania eyaletinde bulunan Washington, Elk ve Mc Kean şehirlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, ağırlıkça %30 oranında sülfür ile %70 oranında AC 20 asfalt çimentosunun birleşiminden elde edilen sülfürlü asfalt bağlayıcı kullanılmıştır. Ancak bazı bölgelerde karşılaştırma değerlendirmeleri yapabilmek üzere hiç sülfür içermeyen kontrol karışımları da inşa edilmiştir. Karışım kompozisyonu ve tasarımına ait bilgiler arka sayfadaki Tablo 5.10'da gösterilmiştir.

Sıvı sülfür, karışım plentine tankerler vasıtasıyla 127 ila 143 C derece sıcaklık aralığında getirilmiştir. Isıtma işlemi, depolama tanklarının alevle temas etmemesi ve sülfürün sıcaklığının 157 C dereceyi aşmaması için buhar kangalı ve sıcak yağ kangalı olarak adlandırılan ekipmanlarla gerçekleştirilmiştir. Sülfür ve sülfürlü asfalt karışımların ısıtılmasıyla açığa çıkan kokular ve zararlı gazlar, sıcaklığın her zaman 149 C derecenin altında tutulması sayesinde kontrol edilebilmektedir.

Genelde sülfürlü asfalt bağlayıcılar, sıralı karıştırıcılarla önceden karıştırılmaktadır. Ancak bu projelerde, işin pratikleştirilmesi amacıyla sülfürün direkt karıştırılması yöntemi kullanılmıştır. Eritilmiş sülfür, ağırlık kovasında (weigh batcher) direkt olarak sıcak asfalta katılmaktadır. Sonra bu sülfürlü asfalt bağlayıcı, karıştırıcı (pugmill) vasıtasıyla ısıtılmış ve kuru şekilde karıştırılmış mineral agregaya katılmaktadır. İstenen 30/70'lik sülfür/asfalt ağırlık oranı, ağırlık kovasında, hem asfaltın hem de sülfürün tartılmasıyla elde edilmektedir.

Washington'da yapılan inşaatlarda, eritilmiş sülfür, tankerlerden direkt olarak ağırlık kovalarına pompalanmıştır. Elk ve Mc Kean'de ise sülfürün depolanması için ayrı, ısıtılmış tanklar kullanılmıştır.

Yüksek korozyon potansiyeline sahip olduğundan, sülfürün, bakır ve bronz ile temas etmesi istenmemektedir. Bu sebeple araç, gereç ve ekipmanlardaki subap ve pompa gibi çalışan kısımlarda bronz kullanılması tavsiye edilmemektedir. Bu tarz bir korozyonu önlemek amacıyla alüminyum veya alüminize edilmiş çelik kullanmak

daha uygundur. Salt çelik ise, sülfürün sıcaklığının, serbest nem oluşumunu engelleyebilecek düzeyde tutulması koşuluile kullanılabilmektedir.

Tablo 5.10 Karışım kompozisyonu ve tasarım verileri

	Washington		Elk ve Mt Kean	
	Kontrol	30/70 S/A bğl.	Kontrol	30/70 S/A bğl.
Kaba agrega	taş	taş	çakıl	çakıl
İnce agrega	taş tozu, doğal kum	taş tozu, doğal kum	doğal kum	doğal kum
Bağlayıcı içeriği, (%)	6.0	7.0	7.2	8.4
Elekten geçen %				
12.5 mm (1/2 inch)	100	100	100	100
9.5 mm (3/8 inch)	94	94	93	93
4.75 mm (No. 4)	57	57	64	64
2.36 mm (No. 8)	40	40	45	45
1.18 mm (No. 16)	30	30	35	35
0.6 mm (No. 30)	21	21	27	27
0.3 mm (No. 50)	12	12	18	18
0.15 mm (No. 100)	8	8	10	10
0.075 mm (No 200)	5	5	5	5
Numunenin özgül ağılığı	2.383	2.396	2.281	2.315
Maximum özgül ağırlık	2.423	2.438	2.357	2.384
Hava boşluğu, (%)	1.7	1.7	3.2	2.9
Stabilite, (pound)	2000	2319	1995	1928
Akma, (unit)	13.2	11.8	12.5	8.0
AC 20 asfalt özellikleri				
25 C°'de penetrasyon	79	79	67	67
60 C°'de viskozite, (p.)	1971	1971	1608	1608
135 C°'de viskozite, (p.)	410	410	345	345

1 pound = 4.448 N

1 unit = 0.01 inch = 0.25 mm

Bu arazi çalışmalarında, sülfürlü asfalt karışımlar için geleneksel serme ve sıkıştırma yöntemleri kullanılmıştır. İnşaat esnasında kontrol karışımlarının ve sülfürlü asfalt karışımlarının davranışları arasında önemli bir fark görülmemiştir. Ayrıca tüm çalışmalarda hidrojen sülfid (H_2S) ve sülfür dioksid (SO_2) gibi zararlı gazların yayılması çok az olmuştur ya da hiç olmamıştır. Bu gazların oluşması nedeniyle sadece, kamyon yükleme platformları ve serme makinalarında çalışan bazı işçilerde küçük göz rahatsızlıklarına rastlanmıştır. Bu sorun da işçilerin, koruyucu gözlükler kullanması ile bertaraf edilmiştir.

Gerçekleştirilen bu üç projenin, dokuz ay ve bir de kış sezonu geçirdikten sonra yapılan görsel değerlendirmelerine göre kontrol karışımları ile sülfürlü asfalt karışımlar performans açısından önemli farklılıklar göstermemiştir. Tabii ki üstyapıların performans ve dayanıklılıkları, inşa edilen yolların devam eden beş senelik hizmet ömürleri boyunca da değerlendirilecektir.

5.6.2 Laboratuar Değerlendirmesi

Laboratuar çalışmalarının başlangıcında bu üç projeye ait , arazide imal edilen karışımlardan alınan Marshall numuneleri sıkıştırılmaktadır. Kontrol karışımları ve sülfürlü asfalt karışımlara ait elastisite modülü bilgileri, 4, 25 ve 38 C dereceler için belirlenmiş ve aşağıdaki Tablo 5.11'de gösterilmiştir.

Tablo 5.11 Elastisite modülü verileri, M_k, (psi)

Deney	Washington		Elk		Mc Kean	
sıcaklığı	Kontrol	SEA	Kontrol	SEA	Kontrol	SEA
4 C°	$3.16x10^6$	$2.58x10^6$	$1.39x10^6$	$1.47x10^6$	$2.03x10^6$	$2.78x10^6$
25 C°	$1.09x10^6$	$4.82x10^5$	$3.73x10^5$	$5.93x10^5$	$5.36x10^5$	$9.49x10^5$
38 C°	$3.73x10^5$	$2.86x10^5$	$1.65x10^5$	$4.71x10^5$	$1.68x10^5$	$7.20x10^5$

1 psi = 6.895 kPa

Elastisite modülünün hesaplanmasında, yükleme süresi 0.1 sn. ve yükleme sıklığı dakikada yirmi kez alınarak arka sayfadaki formül kullanılmaktadır.

$$M_R = \frac{P \cdot (\nu + 0.2732)}{t \cdot \Delta} \qquad (5.6)$$

Formülde;

P = uygulanan yük (N),

ν = Poisson oranı,

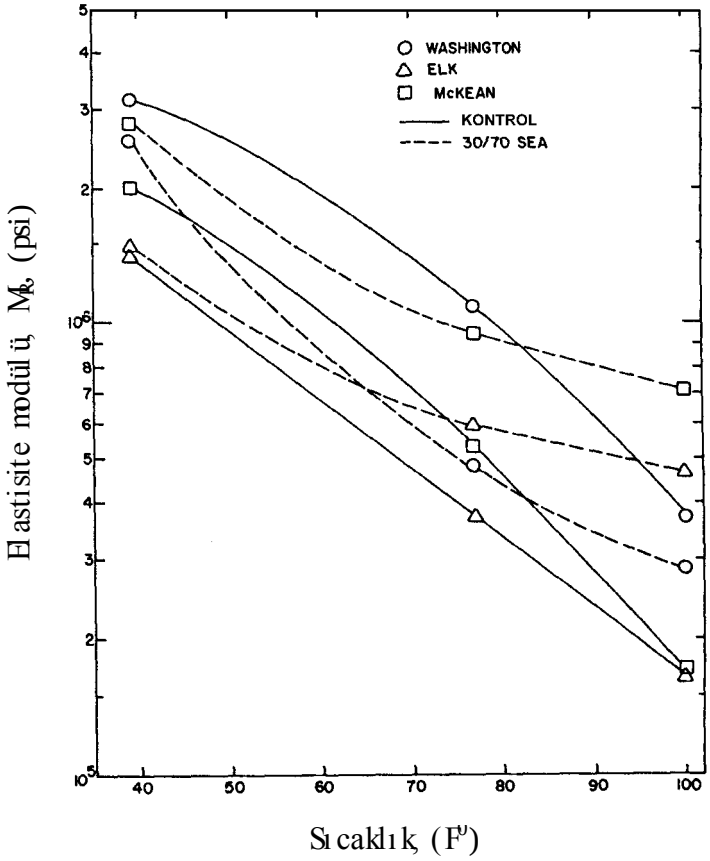
t = numunenin kalınlığı (mm),

Δ = numunenin elastik yatay deformasyonudur (mm).

Tüm hesaplamalar yapılırken Poisson oranı 0.35 olarak alınmıştır.

Karışımda bulunan %30 oranındaki sülfür içeriğinin, karışımın elastisite modülüne olan etkisi Şekil 5.6'de görülmektedir. Asfalt ile sülfürün yer değişiminden elde edilen karışımlarda, genellikle elastisite modülünün artması beklenir. Şekilde görüldüğü gibi Elk ve Mc Kean şehirlerinde yapılan inşaatlardan alınan sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren çakıllı karışımlardan alınan numunelerin incelenmesinde de bu yönde bir eğilim ortaya çıkmaktadır. Ancak Washington'dan elde edilen sonuçlar, taşlı karışımlarda sülfürün asfalt ile yer değiştirmesi ile elastisite modülünün düşmesi yönünde olmuştur. Unutulmamalıdır ki, bu sonuçlara ulaşılmasında, çalışmalar sırasında araziden alınan Marshall numunelerinin soğuma esnasında kristalize olma ve daha sonra laboratuarda ısıtılma işlemi ile de tekrar aynı verimliliğe ulaşılamamış olma ihtimali bulunmaktadır.

Ayrıca, Elk ve Mc Kean şehirlerinden alınan sonuçlar değerlendirilecek olursa, kontrol karışımları ve sülfürlü karışımların elastisite modülleri arasındaki farkın, sıcaklığın artması ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 5.6 Sıcaklık-Elastisite modülü ilişkisi

5.7 Bölüm Özeti ve Sonuçları

Bu çalışma, sülfürlü asfalt bağlayıcıların, bitümlü üstyapı karışımları arasındaki yerinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmıştır. Laboratuar çalışmaları, AC 20 asfalt çimentosu, taş ve çakıl olmak üzere iki çeşit agrega ve bağlayıcının ağırlıkça %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında sülfüre sahip altı ayrı karışım ile yapılmıştır.

Çalışmanın amaçları;

- Sülfürlü asfalt karışımların –29, -23, -18, -12 C derece gibi düşük; 4, 16, 25 C derece gibi orta ve 38 ve 60 C derece gibi yüksek sıcaklıklardaki çekme mukavemeti, rijitlik modülü, elastisite modülü, Marshall stabilitesi, vb. gibi mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesidir.
- Sülfürün, asfaltın belli bir miktarının yerini almasıyla, suya bağlı bozulmalar neticesinde karışımın direncine olan etkilerinin belirlenmesidir.

Bu bölümdeki çalışmalardan elde edilen bilgiler, şu sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır:

1. Sülfür içeriğine bakılmaksızın, taşlı karışımın çekme mukavemeti sıcaklığın 25 C dereceden aşağı düşürülmesiyle yükselmekte, kontrol karışımında –18 C derecede, tüm sülfürlü karışımlarda da –23 C derecede doruk noktasına ulaşmaktadır.

   Çakıllı karışımın çekme mukavemeti ise, sülfürsüz durumda –18 C derecede doruk noktasına ulaşırken, sülfürlü durumda sıcaklığın –29 C dereceye kadar düşürülmesine rağmen yükselmeye devam etmektedir.

2. –12 ila 25 C derece sıcaklık aralığında, taşlı karışımlarda %0, %20, %30 ve %40 oranında sülfür içeren karışımların çekme mukavemetleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Bu sıcaklık aralığında, diğer dört karışıma %50 oranında sülfür içeren karışımın çekme mukavemeti daha yüksek, %10 oranında sülfür içeren karışımın çekme mukavemeti ise daha düşüktür.

3. Daha yüksek sıcaklık seviyelerinde %0, %30, %40 ve %50 oranında sülfür içeren çakıllı karışımların çekme mukavemetlerinde önemli bir fark bulunmamaktadır. %10 ve %20 oranında sülfür içeren çakıllı karışımların çekme mukavemetleri ise genellikle diğer dört karışımınkinden daha düşüktür.

4. Tüm sıcaklık aralıklarında %50 oranında sülfür içeren, hem taşlı hem de çakıllı karışımların rijitlik modülleri diğer beş karışımınkinden belirgin bir şekilde yüksektir. 16 ila 25 C derece aralığında ise, ki bu aralık, normal tasarım ve hizmet sıcaklığı kabul edilen aralıktır, %10 oranında sülfür içeren taşlı karışım en düşük rijitlik modülüne sahiptir. Bunu sırasıyla %0, %20, %30, %40 ve %50 oranında sülfüre sahip karışımlar takip etmektedir. –12 C derece ve altındaki sıcaklıklarda ise %50 oranında sülfür içeren taşlı karışım dışındakilerin tümünün rijitlik modülleri arasında önemli bir fark yoktur.

5. 76 mm ve daha az kalınlığa sahip üstyapı tabakaları için %50 oranında sülfür içeren bir karışım kullanmanın pek de faydalı olmadığı görülmüştür. Bu oranın daha kalın tabakalar için daha uygun olduğu ortaya çıkmıştır.

6. Rijitlik modülü bilgilerine dayanarak sülfür oranının bağlayıcı ağırlığının %40 ve üzerindeki değerleri için tatminkar sonuçlar elde edilmektedir. Ancak

unutmamak gerekir ki, bu sonuç, AC 20 asfalt çimentosu ve kullanılan asfalt kaynağının sahip olduğu şartlar için geçerlidir. Sülfürün başka özellikteki asfaltlarla farklı bir davranış sergilemesi olasıdır. Çünkü sülfürün çözünürlüğü farklı asfalt kaynaklarına göre değişkenlik gösterebilmektedir.

7. 60 C derece gibi yüksek sıcaklıklardaki üstyapılarda Marshall stabilitesi, hem taşlı hem çakıllı karışımlar için %20 ila %30 oranındaki sülfür içeriklerine kadar değişmeksizin kalmaktadır. Bu oranın arttırılmasıyla rijitlik modülü de artmaya başlamaktadır.

8. Bağlayıcının %10 ila %20'si oranında sülfür içeren taşlı karışımın kontrol karışımına göre, suya bağlı bozulmalara karşı daha duyarlı olduğu görülmüştür. Bu karışımların, suya bağlı bozulmalara karşı olan direncinin daha fazla oranda sülfür katılarak sülfürlü asfalt bağlayıcının sertleştirilmesi yöntemi ile arttırılabildiği görülmüştür. Sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren çakıllı karışımların ise her orandaki sülfür miktarında kontrol karışımlarına göre suya bağlı bozulmalara karşı daha duyarlı olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, sülfürlü asfalt karışımların, arazide uygulanmadan önce suya karşı olan duyarlılıklarının denenmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır.

Pennsylvania Ulaştırma Departmanı, 1980 yılında üç adet sülfürlü asfalt yol projesini taşlı ve çakıllı karışımlar kullanarak tamamlamıştır. Yukarıda bahsedilen, bu çalışmanın sonuçlarının geniş bir biçimde değerlendirilmesi neticesinde, sülfürlü asfalt bağlayıcının ağırlıkça %30 oranında sülfür ile hazırlanması uygun görülmüştür. 4, 25 ve 38 C derece sıcaklıklarda yapılan incelemelerde sülfür içeren çakıllı 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. Deneysel amaçla üretilen bu yolların performans ve dayanıklılık özellikleri, en az beş yıl daha değerlendirmelere tabi tutulacaktır.

6. SÜLFÜRLÜ ASFALT BAĞLAYICILAR ile HAZIRLANAN GELENEKSEL ÜSTYAPI KARIŞIMLARI

Araştırmanın bu bölümünde daha ayrıntılı mühendislik özellikleri ele alınarak, laboratuar çalışmalarında elde edilen sonuçlar, arazi çalışmaları ile desteklenmeye çalışılacaktır. Başlangıç olarak, konu hakkında geçmişte yapılan çalışmalara değinilecektir.

6.1 Tarihçe

Sülfürün, asfalt üstyapı karışımlarına katılması teşebbüsleri uzun yıllar önce başlamıştır. 1900'lü senelerin başlarında, hava üflemenin asfalt karakteristiğini değiştiren en büyük etkenlerden biri olmasından önce, asfalt ve üstyapı uzmanları, sülfürü, asfalt üstyapı özelliklerini modifiye edebilmek amacıyla kullanmışlardır. Pitzburg Flugs ve Sulmor, o zamanlarda kullanılan sülfürlü asfalt karışımlara ait birer formülasyon ismidir. Bunlar, 1935 senesinde Ohio Otoyolları Departmanı'nda kullanılan deneysel, asfalt ile tiyokol yani polisülfid grubu sentetik kauçuk ile plastize edilmiş sülfür kompozisyonlarındandır [29, 30].

Son zamanlarda geçmişte araştırılmış olan bu konuya ilginin tekrar artması, daha önce de belirtildiği gibi hidrokarbon kaynaklarında sıkıntıya düşülmesi ve sülfürün de doğada artık madde olmasından kaynaklanmaktadır. Bu ilginin üzerine Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'da, bilhassa sülfür üretimi yapan endüstriyel çevrelerde sülfürün yararlı yanları hakkındaki araştırmalar ve geliştirme çalışmaları önemli ölçüde hız kazanmıştır [31-35].

Bu araştırmaların bir parçası olarak Gulf Oil Canada Limited ismindeki bir şirket 1936'da Bacon ve Bencowitz ismindeki iki bilimadamının yayınladığı temel ilkelere dayanan araştırmalara, değerlendirmelere ve bunlara bağlı bazı üretimlere başlamıştır [36, 37]. Bu ürünler, geleneksel üstyapı karışımlarında bağlayıcı olarak kullanılabilecek sıvı elementel sülfürlerdir.

6.2 Araştırmanın Amaçları

Bu bölümde yapılan çalışmalardaki temel amaç; üstyapılarda kullanılan asfaltın bir bölümünün elementel sülfür ile yer değiştirmesidir. Bu yer değiştirmeden beklenen fayda ise, üstyapının artan nitelikleriyle performansının arttırılması ve özellikle sülfür kaynaklarınca zengin bölgelerde malzeme maliyetinin düşmesidir. Örneğin, normal bir karışım tasarımında %6.5 oranında bağlayıcı kullanıldığı düşünülecek olursa, %50 oranında sülfür içeren bir bağlayıcı ile karışımda kullanılan asfalt miktarı bir anda %3.25'e düşecektir.

Ayrıca bu uygulamanın ekonomik cazibesinin arttırılması ve geleneksel üstyapı teknoloji ve uygulamalarına kolayca uyum sağlayabilmesi için aşağıdaki maddeler de amaçlanmıştır.

1. Bu yeni uygulamaların karışım üretiminde, malzeme işlenmesinde ve üstyapı prosedürlerinde geleneksel karışımlar için kullanılan ekipman ve yöntemler kullanılmalıdır.
2. İnsan gücüne olan ihtiyaç geleneksel üstyapılarınkine göre bir değişiklik göstermemelidir.
3. Tüm yol inşaatı projelerinde yalnızca bağlayıcının içeriği ve tasarımı ile ilgili varyasyonlar olmalıdır.
4. Geleneksel karışımlarda kullanılan bazı ek ve katkı maddeleri mümkün olduğunca kullanılmamalıdır.
5. Özellikle sülfürün açığa çıkardığı bazı kirletici maddeler dikkate alınarak temiz ve güvenli bir çalışma yürütülmelidir.

Dikkat edilmelidir ki, bağlayıcılar içerisinde elementel sülfür kullanımından en üst seviyede fayda elde edebilmek, düşük maliyet ve inşaat gereksinimlerine basitçe uyum sağlanabilmesi durumlarında mümkün olacaktır.

6.3 Araştırma Programının Taslağı

Bu bölümdeki araştırma iki temel kısımdan meydana gelmektedir.

Birinci kısım, sülfürlü asfalt bağlayıcıların laboratuarda incelenmesi ve değerlendirilmesini kapsamaktadır. Bu bölüm ayrıca, sülfürlü asfalt bağlayıcıların değerlendirilmesinin yanı sıra geleneksel ve bazı özel tasarımlı yeni deney yöntemleri ile temel fiziksel özelliklerinin de belirlenmesini kapsamaktadır.

Çalışmanın ikinci kısmı ise sülfürlü asfalt bağlayıcıların üretimi, karışımların üretimi ve işlenebilirliği gibi özelliklerini, hizmet ömrü içerisinde de arazi çalışmaları ile belirleme işlerini kapsamaktadır. Bu çalışmalar Kanada'da gerçekleştirilmiştir.

6.4 Laboratuar Araştırmaları

6.4.1 Sülfürün Asfalt İçerisindeki Dağılımı

Laboratuar çalışmalarının yürütülebilmesi için laboratuar ekipmanları ve bir sülfürlü asfalt bağlayıcı numunesi meydana getirilmiştir. Elementel sülfür yaklaşık olarak 116 C derecede, soluk sarı renkli ve düşük viskoziteli bir sıvıya dönüşerek erimektedir. Sıcaklık 160 C derecenin üzerine çıkarıldığında viskozite sert bir şekilde 10^3 poise [38] civarına yükselmektedir. Sıvı haldeki sülfür asfaltlarla rahatça karışabilecek özelliğe sahiptir. Yeni hazırlanan sülfürlü asfalt bağlayıcılar koyu kahverengi bir renge sahiptir. Mikroskobik incelemelerde, sülfürlü asfalt bağlayıcıların ortalama parçacık boyutlarında, düzgün ve küçük bir görüntü sergilediği görülmüştür. Sülfürün 85-100 penetrasyon derecesine sahip asfalt içerisindeki dağılımını göstermek üzere bazı fotomikroglaflar çekilmiştir. Bu fotomikroglaflara göre sülfür tanecikleriniin katılaşması ve yerleşim düzeni işlemin başlamasından itibaren üç saat sonra görülebilir hale gelmektedir. Üç saat aralıklarla kaydedilen fotomikrografilerde daha büyük bir hale gelmiş sülfür tanecikleri, sülfürlü asfalt bağlayıcının stabilitesini sınırlandıran özellikler içermektedir. Stabilitenin arttırılması amacıyla sülfür yumuşatıcıların ve diğer katkı malzemelerinin ilave edilmesi yöntemi kullanılmaktadır [33].

Bir diğer husus ise sülfürlü asfalt bağlayıcıların depolanmasıdır. Ancak bu bağlayıcıların, karışımda kullanılmadan önce depolanmasının özellikle 149 C derecenin üzerinde açığa çıkan ve potansiyel tehlike oluşturan hidrojen sülfid (H_2S)

gazı nedeniyle uygun olmadığı anlaşılmıştır [39,40,41]. Hidrojen sülfid oluşumunu engelleyen inhibitörler kullanılması ve sıcaklığın kontrol altında tutulmasına rağmen geleneksel depolama ve işleme olanakları ile bölgesel olarak bazı durumlarda sıcaklığın istenen seviyeyi aşmaması sağlanamayabilmektedir [42]. Bu çalışmada kullanılan yöntem ise hidrojen sülfid gazının zararlı seviyelere ulaşacak biçimde açığa çıkmasına ve stabilitede oluşabilecek sorunlara imkan tanımamaktadır.

6.4.2 Sülfürlü Asfalt Bağlayıcıların Fiziksel Özellikleri

Geleneksel yöntemlerle ölçülen sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri, özgül ağırlık, yumuşama noktası, penetrasyon, viskozite, düktilite, parlama noktası ve Fraas kırılma noktası olarak değerlendirilmiştir. 85-100, yani minumum 85 maksimum 100 penetrasyon derecesine sahip asfalt ile bağlayıcının, ağırlıkça %0 ila %60 oranları arasında değişkenlik gösteren sülfür içeriğine sahip karışımların gösterdiği özellikler, Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri

Numune	Kompozisyon, (ağırlıkça %)								
85-100 pen. Asfalt	100	90	80	70	60	55	50	40	-
Elementel sülfür	-	10	20	30	40	45	50	60	100
15 C^0'de özgül ağırlık	1.027	1.055	1.120	1.183	1.232	1.285	1.344	1.434	1.956
Yumuşama nk., (C^0)	44	38	39	42	42	43	44	57	-
25 C^0'deki penetrasyon	92	171	176	181	183	168	70	72	-
25 C^0'deki düktilite	150+	142	101	29	25	47	44	23	-
Parlama noktası, (C^0)	293	182	174	174	168	166	160	163	-
Fraas kırılma nk., (PC)	-16	-14	-15	-12	-13	-14	-	-	-

- **Özgül Ağırlık ve Yumuşama Noktası**

Elementel sülfürün asfalttan daha büyük bir özgül ağırlık değerine sahip olması nedeniyle karışımdaki sülfür miktarı arttıkça karışımın da özgül ağırlığı yüksel mektedir.

Yumuşama noktası ise asfalta sülfür katılmaya başlaması ile önce düşmekte, sülfür miktarının artmasıyla yavaş yavaş yüksel mektedir. Ayrıca, her ne kadar deney sonuçlarının tekrarları ve numunelerin yaşlanmasına da bağlı ise, sülfür içeriğinin

artmasıyla karışımın penetrasyonunda da gözle görülür olumlu yönde bir değişim ortaya çıkmaktadır [33, 36].

- **Viskozite**

60 ila 138 °C derecelik sıcaklık aralığında çeşitli sülfürlü asfalt bağlayıcılara ait viskozite değerleri Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

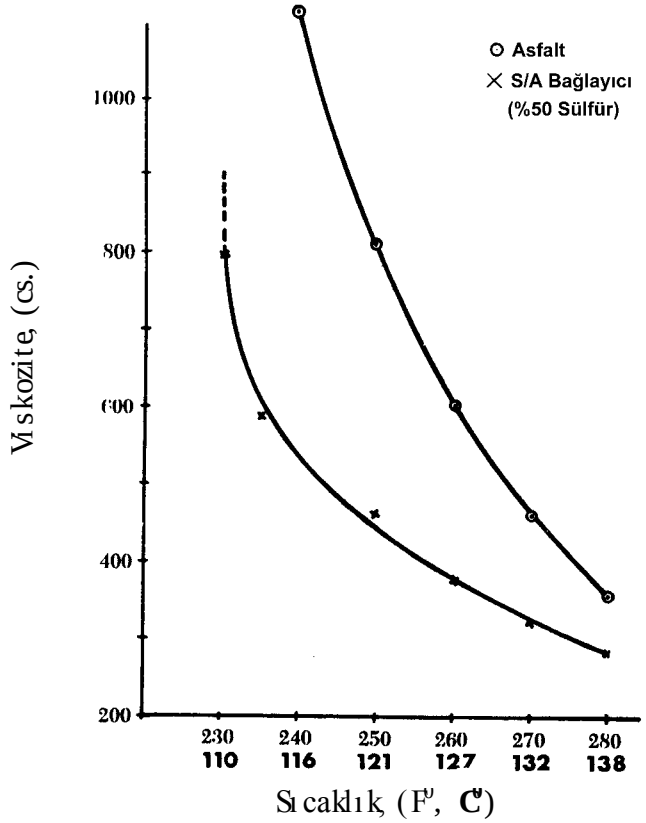
85-100 penetrasyona sahip bir asfalta yapılan ağırlıkça %10 oranında sülfür ilavesi, oluşan karışımın viskozitesini 1557 poise'den 570 poise'ye düşürmektedir. İlave edilen sülfür oranı arttıkça viskozitenin de artmasına rağmen, ancak sülfür ilavesinde ağırlıkça %50 civarında bir orana gelindiğinde salt asfaltın başlangıçtaki viskozitesi aşılabilmektedir.

Tablo 6.2 Sülfürlü asfalt bağlayıcıların viskozite değerleri

		Viskozite değerleri	
Numune	Sülfür içeriği, (ağırlıkça %)	60 °C'de, (poise) ASTM D2171	138 °C'de, (cs) Brookfield
85-100 pen. Asfalt	0	1557	318
S/A bağlayıcı	10	570	205
S/A bağlayıcı	20	691	145
S/A bağlayıcı	30	772	153
S/A bağlayıcı	40	950	148
S/A bağlayıcı	45	1077	168
S/A bağlayıcı	50	2494	380
S/A bağlayıcı	60	5081	583

Arka sayfadaki Şekil 6.1'de, %50 oranında sülfür içeren asfalt bağlayıcıyla 85-100 penetrasyon derecesine sahip asfaltın sıcaklığa bağlı viskozite değerleri görülmektedir. Bağlayıcının agregaya katılması ve karışımın serilmesi ile sıkıştırılması işlemleri düşünüldüğünde 200 ila 600 cs.'lik (santistok) viskozite değerinin, iyi işlenebilir denilebilecek aralık olduğu düşünülmektedir. Belirtilen bu aralıktaki değerlere bakıldığında şekilde de görüldüğü gibi, sülfürlü asfalt bağlayıcının viskozite-sıcaklık eğrisinin, 85-100 penetrasyonlu asfalttan daha düşük sıcaklık değerlerine sahip olduğu ve eğrinin salt asfaltın eğrisi kadar dik olmadığı görülmektedir. Bu da karıştırma ve serme işlemlerinin daha düşük sıcaklıklarda ve daha geniş sıcaklık aralıklarında yapılmasına imkan tanımaktadır.

110 C derecenin altındaki sıcaklık değerlerinde sülfürlü asfalt bağlayıcının da salt asfaltın da viskozite-sıcaklık eğrisi oldukça diktir. Sülfürlü asfalt bağlayıcı, sülfürün erime sıcaklığının altına inildiğinde bile katılaşmamaktadır. 60 C derecelik sıcaklıkta 2494 poise viskozite ile, aynı asfalt gibi sülfürlü asfalt da akışkan bir özellik sergilemektedir.



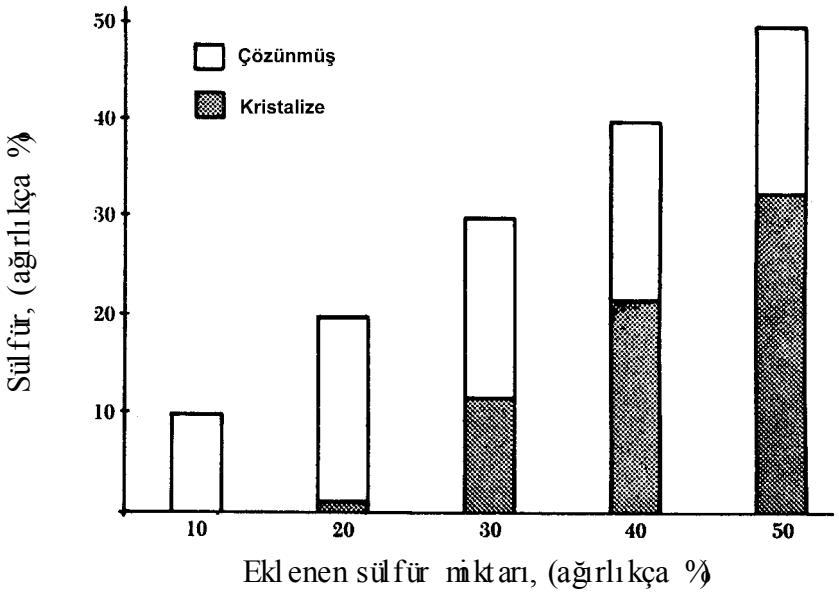
Şekil 6.1 Brookfield Viskozitesi-Sıcaklık ilişkisi

- **Termal Analizler**

Çözünmüş sülfür gibi, ince ince ayrılmış kristalli sülfür de, normal dış sıcaklıklarda sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerini gösterirler. Arka sayfadaki Şekil 6.2'de, çözünen ve kristalize olan sülfür miktarları gösterilmiştir. Görünen değerler, Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) ile tespit edilmiştir. Örneğin, belli bir sıcaklıkta %50 oranında ilave edilen bir sülfürün yaklaşık olarak %19 ila %20'sinin çözündüğü, diğer kısmın kristalize olduğu dikkat çekmektedir. Kristal boyutunun düşük seviyelerde kalması herhangi bir sorun yaratmazken,

boyutların büyümesi sülfürün özelliklerini ve davranışını etkilemektedir. Çözünürlükte karışım sıcaklığının da etkili olduğu hatırlanmalıdır.

Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, bağlayıcıya katılan sülfürün çözünme verimliliği olmalıdır. Şimdiye dek incelenen çalışmalarda, genellikle bağlayıcıdaki sülfür miktarının artması ile karışımın bir çok özelliğinin iyileştiği tespit edilmiştir. Ancak, incelenen bu son konuda, sülfür miktarının yanı sıra, çözünme verimliliğinin de çok önemli olduğu ortaya çıkmaktadır [28, 40, 41, 43-46].



Şekil 6.2 Termal analiz (DSC)

- **Marshall Karışım Tasarım Özellikleri**

Laboratuar değerlendirmelerine göre geleneksel, yüksek performanslı üstyapı karışımları arasında sülfürlü asfalt bağlayıcıların, yollar için iyi özellik gösteren bağlayıcılar olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada Standart Marshall Deneyini (ASTM yöntem D-1559) yapmak üzere, asfalt yerine sülfürlü asfalt bağlayıcılar kullanılmıştır. Karşılaştırmalar yapmak üzere, sülfürlü asfalt bağlayıcı numuneleri ile elde edilen Marshall deneyi verileri Tablo 6.3'te gösterilmiştir. Alınan sonuçların, stabilite dışındaki özelliklerde geleneksel malzemeler ile yapılan deneylerdeki sonuçlar ile benzerlikler gösterdiği fark edilmiştir.

Tablo 6.3 Marshall Deneyi verileri

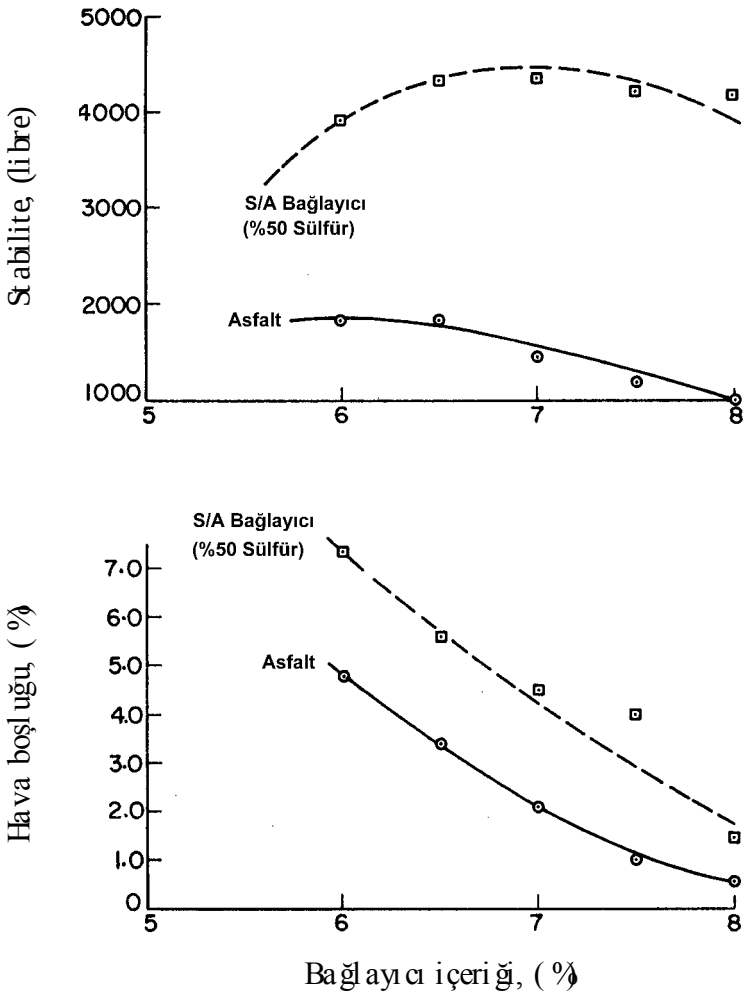
Bağlayıcı içr. (Ağ. %)	Hava bşl. (%)		VMA (%)		Akma (0.01 inch, [mm])		Stabilite (lb. [kg.])	
	AC*	SA**	AC*	SA**	AC*	SA**	AC*	SA**
6.0	4.8	7.3	18.8	18.1	9.5 [2.4]	10.0 [2.5]	1811 [823]	3934 [1788]
6.5	3.4	5.6	18.6	17.4	10.0 [2.5]	8.5 [2.2]	1833 [833]	4351 [1978]
7.0	2.1	4.5	18.4	17.3	11.0 [2.8]	8.5 [2.2]	1398 [635]	4362 [1983]
7.5	1.0	4.0	18.5	17.7	14.0 [3.6]	8.5 [2.2]	1224 [556]	4224 [1920]
8.0	0.6	1.4	19.2	16.2	15.0 [3.8]	9.5 [2.4]	1011 [460]	4209 [1913]

AC* = 85-100 penetrasyon dereceli asfalt çimentosu

SA** = %50 elementel sülfür ile %50 85-100 pen. asfalt içeren bağlayıcı

Şekil 6.3'de de görülen karışımın yüksek içerikli bağlayıcıya sahip olmasının sebebi elementel sülfürün özgül ağırlığının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sülfürlü asfalt bağlayıcılar için, ilave Marshall verilerine göre aşağıdaki çıkarımlarda bulunulmuştur.

1. Sülfürlü asfalt numunelerin stabiliteleri, salt asfaltla yapılan numunelerin stabilitelerine göre belirgin bir miktarda yüksektir.
2. Sülfür içeriğinin artmasıyla stabilite değeri artmaktadır.
3. Yüksek stabilitelere rağmen 60 C derecedeki akma özelliklerinde önemli kayıplara rastlanmamıştır.
4. Düşük kaliteli veya zayıf gradasyonlu agregalar, iyileştirilmeli ve stabiliteleri yükseltilmelidir.
5. Sülfürün suya karşı yüksek direnci dikkate alınarak, numunelerin ıslatılmasından sonraki stabiliteleri göz önünde bulundurulmamıştır.
6. Daha iyi sülfürlü asfalt bağlayıcılar elde etmek için çeşitli penetrasyonlara sahip asfaltlar kullanılabilir.



Şekil 6.3 Marshall tasarım eğrileri

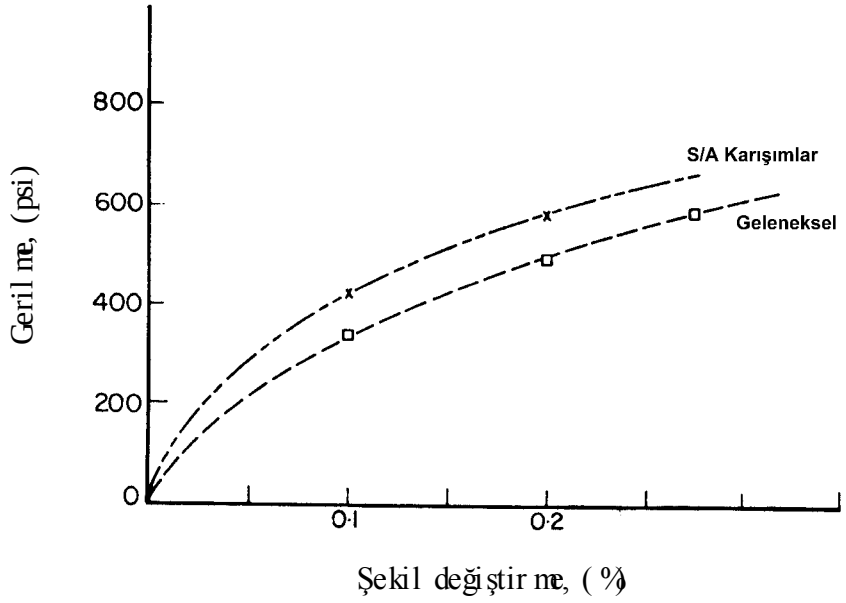
- **Düşük Sıcaklık Özellikleri**

Sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı karışımların Marshall tasarım ölçütlerini tamamlamak amacıyla düşük sıcaklıktaki özellikleri de sınanmıştır.

Yüksek Marshall stabilitesi ve yorulma deneyi değerleri altında, sülfürlü asfalt bağlayıcıların düşük sıcaklıktaki rijitlik özellikleri oldukça önemlidir. Özellikle Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri'nin kuzey kısmı gibi soğuk bölgeler dikkate alındığında, düşük sıcaklıklar ve üstyapılarda oluşan enine çatlamalar, esnek üstyapıların bu tip bölgelerdeki genel kusurlarını göz önüne sermektedir.

Hajek ve Haas'ın da hakkında yayınları bulunan, düşük sıcaklık şartlarına göre yapılan bazı deney ve çalışmalar neticesinde Şekil 6.4'te görülen gerilme-şekil değiştirme eğrisi meydana çıkarılmıştır. Bu sonuçlara göre sülfürlü asfalt

karışımlar ve geleneksel karışımlar, düşük sıcaklık şartlarındaki özelliklerinde önemli farklılıklar olmadığı görülmüştür. Bu da, yüksek Marshall stabilitelerine rağmen düşük sıcaklıklarda sülfürlü asfalt bağlayıcı kullanmanın herhangi bir olumsuz etki yaratmayacağını göstermektedir.



Şekil 6.4 –17.8 C^0'de Sabit oranlı gerilme deneyi sonuçları

- **Yorulma Özellikleri**

Asfalt betonunun yapısal analizindeki en önemli parametrelerden biri de yorulmadır. Bu konuda yapılan bazı deney ve çalışmaların sonuçları Tablo 6.4'te yer almaktadır.

Tablo 6.4 Yorulma Deneyi sonuçları

Numune	Bozulmaya dek yük uygulama sayısı*, (milyon kez)
%6 bağlayıcı, salt asfalt	1.9
%6.7 S/A bağlayıcı (%2.5 sülfür)	8.5 (bozulmadan)
%6.0 S/A bağlayıcı (%5.0 sülfür)	2.7
%7.4 S/A bağlayıcı (%5.0 sülfür)	0.8

* 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.

Elde edilen verilere göre, 85-100 penetrasyon derecesine sahip asfalta yaklaşık olarak iki milyon defa yük uygulanabilmesine karşın, sülfürlü asfalttan elde edilen çeşitli numunelerin bir çoğu 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.

6.4.3 Laboratuar Sonuçlarının İrdelenmesi

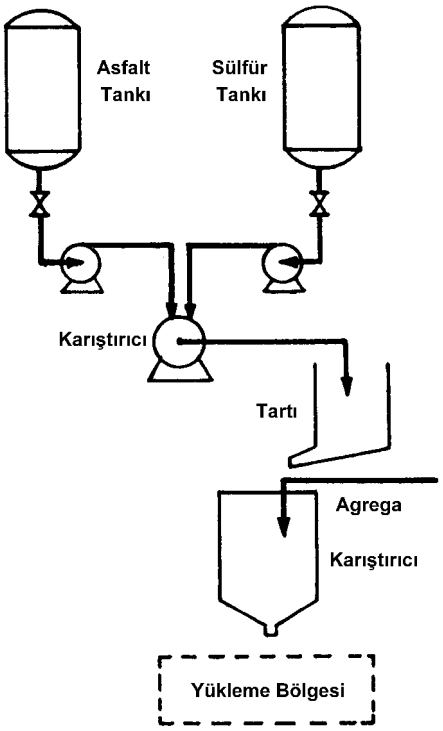
Laboratuar araştırmalarına göre, sülfürlü asfalt bağlayıcıların bir çok olumlu özelliğe sahip olduğu ve geleneksel üstyapılarda kullanıma uygun olduğu açıkça görülmüştür. Sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özelliklerinin ölçülmesi işlemleri, karışıma katılmadan önce, sınırlandırılmış stabilite ve yaşlandırma şartları altında gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma çözünen ve çözünmeden kristal halde kalan sülfürün karışımdaki davranışlarını irdelemek için yapılmıştır. Çalışmalarda ayrıca, sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri ile üstyapının performansı arasında bir korelasyon da oluşturulmaya çalışılmıştır.

Sülfürlü asfalt bağlayıcılar, laboratuar çalışmaları sırasında, özellikle agregayı kaplaması, işlenebilmesi, sıkıştırılabilmesi, düşük sıcaklıktaki özellikleri ve yorulma özellikleri açısından oldukça başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Sadece yüksek sıcaklık şartlarında bir sınırlandırmaya gereksinim duyulmaktadır. Çünkü daha önce de bahsedildiği gibi yüksek sıcaklıklar, sülfürün istenmeyen zararlı hidrojen sülfid gazının oluşmasına imkan vermektedir. Bu nedenle, yapılan sınırlamalar, bu gazın, sıcak karışımda zararlı seviyelere ulaşmasına izin vermemektedir.

6.5 Sülfürlü Asfalt Bağlayıcı Üretimi

Endüstriyel miktarlarda sülfürlü asfalt bağlayıcı üretebilmek için öncelikle geleneksel karışım plentine kolayca entegre edilebilir ve taşınabilir bir Sülfür Asfalt Modülü (SAM) tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Bu modül, asfalt ve sıvı sülfür olmak üzere iki tank ve bu tankları birbirine bağlayan, yirmi beş beygirlik karıştırıcıyı besleyen iki akış kontrollü pompadan oluşmaktadır. Bu karıştırıcının çıkışı ise bir teraziye bağlanmaktadır. Bu modül, 300 ton/saatlik bir plente sülfürlü asfalt bağlayıcı sağlayabilecek şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Sülfürün ve asfaltın akışkanlığını etkileyen sıcaklığı, ayarlamak üzere termostat kontrollü ve elektrikli

ısıtıcılar kullanılmıştır. Bu ısıtıcılar, depolama birimleri ile karıştırıcılar arasında geçen evrelerde meydana gelebilecek ısı kayıplarını engellemek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 6.5 Karıştırma tesisi

Sülfürlü asfalt bağlayıcıların özelliklerinin ve performanslarının daha iyi bir şekilde belirlenebilmesi için bazı arazi çalışmaları da yapılmıştır. Bu araştırmada, bu uygulamalar incelenip, elde edilen veri ve sonuçlar da değerlendirilecektir.

6.6 Port Colborne'da İlk Arazi Deneyimi, Ontario, Kanada

Endüstriyel ölçülerdeki ilk karışım üretimi, Port Colborne'daki dozajlı, ağırlık kovalı (weigh batcher) bir plent ile yapılmıştır. Hazırlanan bu karışım, bir taş ocağının giriş yolunun yapımında kullanılmıştır.

Bu küçük çalışmanın temel amacı, tam ölçekli üretilmiş karışımın fizibilitesinin belirlenmesi ve buradaki geleneksel taşıma, serme ve sıkıştırma ekipmanlarının kullanılabilirliklerini değerlendirmektir.

- **Karışım Üretimi**

Sülfür ile karışımı birleştirmek için hazırlanan düzenek önceki sayfadaki Şekil 6.5'te şematik olarak gösterilmiştir. Agregayla karıştırılmak üzere, öncelikle sülfürlü asfalt bağlayıcı üretilmiştir. Karıştırma işleminde kullanılan bu yöntem, depolama ve taşıma tanklarında açığa çıkabilecek zararlı seviyelerdeki hidrojen sülfid oluşma ihtimaline imkan tanımamaktadır.

Sıcak karışımlar, %40 ve %50 oranında sülfür içeren bağlayıcılar ile üretilmiştir. Üretilen bu karışımlar, agregaları oldukça iyi kaplanmış ve görsel olarak geleneksel asfalt betonu karışımlarından ayırt edilemeyecek bir oluşum meydana getirmiştir. Elementel sülfürün karışımdan ayrışması veya drene olması durumu gözlemlenmemiştir.

- **Taşıma, İşlenebilirlik ve Emisyonlar**

Sıcak karışımlar, geleneksel karışımların taşındığı kamyonlarla taşınmaktadır. Bu işlem sırasında kamyonun depo yüzeylerinde veya diğer ekipmanlarda herhangi bir kabuklanma veya yapışma olayına rastlanmamıştır.

Sülfürlü asfalt bağlayıcılı karışımların kamyonlara yüklenmesinin ardından, ortamdaki hidrojen sülfid ve sülfür dioksid miktarları ölçülmüş ve sınır değerlerin çok altında değerler saptanmıştır. Ancak sıcak karışımlarda, sıcaklığın 149 C derece civarına ulaşması esnasında sülfür buharına rastlamak mümkün olmuştur.

- **Port Colborne'da Yapılan Çalışmaların Sonuçları**

Her ne kadar Port Colborne'da yapılan yol, küçük bir örnek olsa da, sülfürlü asfalt bağlayıcıların geleneksel bir karışım plentinde oldukça rahat bir şekilde üretilebildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca üretilen bu karışımların, geleneksel karışımlarla aynı şekil ve ekipmanlarla taşınabildiği, serilebildiği ve sıkıştırılabildiği de görülmüştür.

Bu çalışmadan elde edilen başarı, Alberta'da başka ve daha kapsamlı bir arazi uygulaması yapılmasında teşvik edici bir rol üstlenmiştir.

6.7 Blue Ridge'de Tam Ölçekli Yol İnşaatı, Alberta, Kanada

- **Faaliyet Alanı ve Amaçlar**

Bir önceki örnekte basit kapsamlı ve küçük bir yol çalışması irdelenmiştir. Alberta'da yapılan bu çalışma ise oldukça geniş kapsamlı olup 1974 yılının yazında tasarlanmıştır. 1974 yılı sonbaharında ise Alberta Otoyollar ve Ulaştırma Departmanı'nın işbirliği ile yaklaşık 160 km uzunluğunda bir yol inşa edilmiştir. Bu yolun inşasında, aşağıdaki temel hususlar amaçlanmıştır.

1. Sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı karışımlar ile yapılan yol inşaatı deneyiminin geliştirilmesi.
2. Deney bölgelerindeki yolların, hizmete açık olduğu sıradaki yapısal davranış ve performansının belirlenmesi.
3. Önemli mühendislik analizleri kullanılarak, sülfürlü asfalt karışımlar için yapısal tasarım teknolojisinin geliştirilmesi.
4. Esnek üstyapılar içerisinde sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı karışımların potansiyel ekonomikliklerinin tahmininin geliştirilmesi.

- **Karışım Üretimi ve İnşaatı**

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. Asfalt, bir depolama tankından, sıvı sülfür ise bir sülfür kamyonundan sağlanmıştır. Burada kullanılan asfalt, Alberta'dan elde edilen 60 C derecede minimum 275, 25 C derecede de minimum 250 penetrasyona sahip AC 275 asfalt çimentosudur. Asfaltın ve sülfürün önerilen sıcaklıklar arasında tutulması sıcak yağ tarafından ısıtılan bir sistem aracılığıyla sağlanmıştır.

İnşaatın genelinde, sülfürlü asfalt bağlayıcılı sıcak karışım üretilirken yaklaşık olarak saatte 200 tonluk bir oran kullanılmıştır. Normal üretim sırasında asfaltın hacmi otomatik olarak kontrol edilmiştir. Ancak daha sonra Sülfür Asfalt Modülü'nün de (SAM) devreye girmesiyle by-pass olan asfalt pompası manuel olarak kontrol edilmeye başlanmıştır.

Deney bölgelerinin inşaatları geleneksel ekipmanlarla başarıyla tamamlanmıştır. Orijinal tasarım kalınlığı, Alberta Otoyollar ve Ulaştırma Departmanı tarafından hazırlanmış bir taban zemini üzerine 150 mm'lik bir asfalt üstyapı betonu olmak üzere seçilmiştir.

- **İnşaat Sırasındaki ve Sonrasındaki Emisyon Deneyleri**

Çevresel etkilerin belirlenmesi ve takip edilmesi için, tüm sülfür asfalt işlemlerinde emisyon deneyleri sürdürülmüştür. Karıştırıcıdan ve serme makinasından çeşitli örnek parçalar alınmış ve bu numunelerdeki emisyon ölçümleri yapılmıştır. Karıştırıcıda açığa çıkan emisyon değerleri, salt asfalt ve sülfürlü asfalt için karşılaştırmalı olarak Tablo 6.5'te verilmiştir. Ölçümlerde hidrojen sülfid (H_2S), sülfür dioksid (SO_2), karnonil sülfid (COS), karbon disülfid (CS_2), merkaptanlar (RSH) ve toplam hidrokarbonlar dikkate alınmış ve emisyon değerleri belirlenmiştir. Hidrojen sülfid ve sülfür dioksid ölçümleri yapılırken bazı gaz algılayıcıları ve Kitagawa adı verilen bazı tüpler kullanılmıştır.

Tablo 6.5 Emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması

Kirletici madde	Asfalt	S/A bağlayıcı
H_2S, (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
H_2S, Kitagawa tüpü ile, (ppm)	<0.1	2-3
SO_2, Kitagawa tüpü ile, (ppm)	<0.1	0.5

Tabloda da görüldüğü gibi, salt asfalta kıyasla sülfürlü asfaltın H_2S emisyon değeri daha yüksektir. Ancak bu 1.8 ppm'lik emisyon değeri bile oldukça düşük bir değer sayılmakta ve herhangi bir soruna neden olmamaktadır. Sıcak karışımın dumanın da ise elementel sülfür buharının bulunması, işlemlerin gerçekleştirildiği sıcaklıklar ve sülfürün buhar basıncı düşünüldüğünde açık ve normaldir. Diğer sülfür içeren gaz oluşumları belirlenene sınır değerlerinin oldukça altındadır. Toplam hidrokarbon miktarında ise herhangi bir değişime rastlanmamıştır. Salt asfalta

kıyasla sülfürlü karışımların sergiledikleri bu değerlerin, sülfür içermelerine rağmen başa baş değerlere sahip olması, sülfürlü karışımların emisyonlarının herhangi bir soruna yol açmayacağının kanıtıdır.

Serme makinası gibi diğer çalışma alanlarından alınan örneklerdeki emisyon değerleri, karıştırıcıda elde edilen değerlerden de düşüktür. Sıcaklığın, bu kısımlarda karıştırıcıdan daha düşük olması ve malzemenin suyun etkisi ile seyrelmesi emisyon değerlerinin daha da düşmesine neden olmaktadır. Daha ileriki tarihlerde karşılaştırmalar yapılabilmesi ve sülfür bakımından yola bağımlı herhangi bir değişim olup olmadığını incelemek için zeminin de çeşitli yerlerinden numuneler alınmış ve incelenmiştir.

- **Deney Bölgelerindeki Donanım**

Deney bölgelerinde değerlendirmeler yapılabilmek üzere farklı bağlayıcı oranına sahip değişik uzunluk ve kalınlıklarda bölümler inşa edilmiştir. Ağırlıkça bağlayıcının %50'si oranında sülfür ve toplam karışımın %7'si oranında sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışım üç ayrı yapısal tasarım kalınlığında inşa edilmiştir. Bunlar, düşük, orta ve yüksek kalınlıklar olmak üzere sırasıyla 100 mm, 150 mm ve 203 mm olarak inşa edilmiştir.

Ayrıca ilave olarak, ağırlıkça bağlayıcının %50'si oranında sülfür ve toplam karışımın %7'si ve %8'i olmak üzere iki ayrı sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren 150 mm kalınlığında iki bölüm daha inşa edilmiştir.

- **Karışım Karakteristiği ve Değerlendirme**

Karışım tasarımı, standart Marshall deneyine göre yapılmıştır. İnşaat sırasında alınan numunelerden elde edilen tipik sonuçlar, arka sayfadaki Tablo 6.7'de gösterilmiştir. Tabloda sülfür içeren karışımların stabilitelerinin salt asfalta göre oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca boşluk oranlarının, araziden alınan numuneler ve laboratuar numuneleri arasında da, az da olsa hem salt asfalt hem de sülfürlü asfaltta farklılık gösterdiği görülmüştür. Yoldan alınan numunelerin boşluk oranları daha yüksektir. Ancak bu fark, laboratuar ortamıyla inşaat sahasındaki sıkıştırma farklılığından kaynaklanmaktadır.

Tablo 6.6 Blue Ridge yolunda kullanılan karışımlara ait veriler

Numune	Standart asfalt (AC 275)	S/A bağlayıcı (ağr. %40 S.)	S/A bağlayıcı (ağr. %50 S.)	S/A bağlayıcı (ağr. %50 S.)
Bağlayıcı içeriği, (%)				
Asfalt	5.9	4.3	3.5	4.0
Sülfür	0	2.8	3.4	3.6
Toplam	5.9	7.1	6.9	7.6
Elek analizi				
19 mm (3/4 inch)	-	100	100	-
16 mm (5/8 inch)	100	97.7	98.2	100
12.5 mm (1/2 inch)	93.1	91.6	88.8	86.6
9.5 mm (3/8 inch)	77.6	78.3	71.8	70.3
4.75 mm (No. 4)	51.6	55.2	46.5	44.9
2.36 mm (No. 8)	38.2	42.2	35.0	34.4
1.18 mm (No. 16)	33.2	34.1	30.4	28.5
0.6 mm (No. 30)	26.7	29.2	24.8	24.7
0.3 mm (No. 50)	19.0	20.9	17.9	18.0
0.15 mm (No. 100)	13.0	11.2	12.6	9.4
0.075 mm (No 200)	5.8	6.1	5.3	5.1
Hava boşluğu, (%)	1.04	0.82	3.24	1.63
VMA, (%)	16.5	16.0	14.5	15.5
Akma, (0.01 in. [mm])	15.0 [3.8]	14.0 [3.6]	16.0 [4.1]	16.0 [4.1]
Stabilite, (lb.[kg])	1455 [661]	2690 [1223]	3470 [1577]	3760 [1709]

- **Planlanmış Yapısal Analizler ve Hizmet Ömründeki Değerlendirme**

Planlanan ilave analizler ve hizmet ömrü içerisindeki değerlendirmenin kapsadığı konular şunlardır.

1. Teorik olarak esnek üstyapının gerilme, şekil değiştirme ve defleksiyon değerlerinin takibi.
2. Oluklanma ve çatlamaların periyodik olarak gözlemlenmesi.
3. Taban zemini ve üstyapıya ait sıcaklık ölçümleri.
4. Üstyapı kalınlığındaki değişikliklerin ölçülmesi.
5. Yüzey ondülasyon değerlendirmesine göre elastisite modülünün ölçülmesi.

- **Blue Ridge Yolundan Elde Edilen Sonuçlar**

Blue Ridge'da yapılan bu deneysel yoldan elde edilen ilk sonuçlar değerlendirildiğinde daha önce ele alınan Port Colborne'da yapılan yoldan elde edilen sonuçlarla genellikle benzerlikler teşkil ettiği saptanmıştır. Buna göre sülfürlü asfalt bağlayıcılar, geleneksel sürekli karışım plentlerinde üretilebilmekte, geleneksel ekipmanlar ile ve normal şartlarda taşınabilmekte, serilip sıkıştırılabilmektedir. Planlanan ilave yapısal analizler ve periyodik olarak yapılacak çeşitli gözlemler, bu üretimlerin davranış ve performansları açısından daha uzun süreli sonuçlara ulaşılabilmesine imkan sağlayacaklardır.

Bu deneysel amaçlı yolda elde edilen başarı, yine Alberta'da, Windfall'da yeni bir üstyapı inşaatının yapılmasına karar verilmesinde önemli rol oynamıştır.

6.8 Windfall Yolu, Alberta, Kanada

Üstyapı bakım ve onarım, yol ve otoyol inşaat endüstrisinde çok önemli bir yer almaktadır. Sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı karışımların yüksek stabiliteye sahip olması, özellikle dingil yüklerindeki artış eğilimine dayanarak, mevcut yolların yeniden kaplanması konusunda çok önemli bir rol oynamaktadır. 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 günlük trafik kompozisyonuna sahip ve değişken sıcaklıklara maruz kalan bir yoldur. Bu tabloya göre çalışılan bölge, elde edilecek veriler açısından oldukça verimli olmaktadır.

Bu arazi çalışması da, Alberta Otoyollar ve Ulaştırma Departmanı'nın işbirliği ile gerçekleştirilmiştir. Karışım üretiminde Blue Ridge'de kullanılan ekipman ve plent, bu bölgeye transfer edilmiş ve kullanılmıştır.

Orijinal yol, ağırlıkça %6 oranında AC 275 asfalt çimentosuna sahip geleneksel karışımle 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. Çalışmalar sırasında trafik, her iki yönü de aksatmayacak şekilde düzenlenmiştir.

Tasarım kalınlığı olarak yolun yarısında 51 mm, diğer yarısında ise 102 mm'lik bir üstyapı kalınlığı uygulanmıştır. İnşaat sırasında, bazı zamanlarda yağmur

yağmasına rağmen, geleneksel asfalt betonuna kıyasla sülfürlü karışımda ne bir kabuklanma olayı ne de daha hızlı bir katılaşmaya rastlanmamış, böylelikle bu onarımışinde de iyi bir başarıya ulaşılmıştır.

Bu çalışmanın devamında yapılacak, hizmet ömrü içerisindeki diğer değerlendirmelerde de yol yüzeyinde oluşması muhtemel oluklanma, aşınma, çatlak yayılımı ve yansıması ve kayma direnci gibi tipik yüzeysel özellikler incelenecek ve adeta bunların haritası çıkarılacaktır. Ayrıca yapısal kapasite ve hizmet yeteneği ölçümleri de gerçekleştirilecektir.

Windfall'da inşa edilen bu üstyapıdan elde edilen en önemli sonuçlar, sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı karışımların, rehabilitasyon uygulamaları için büyük bir başarıyla kullanılabildiği ve bu karışımların, geleneksel ekipmanlar ile ve normal şartlar altında rahatlıkla taşınabildiği, serilip sıkıştırılabildiğinin iyice ortaya çıkmış olmasıdır.

Şimdi araştırmanın bu bölümünde yapılan çalışmalardan elde edilen genel sonuçlara değinilecektir.

6.9 Bölüm Sonuçları

1. Elementel sülfürler, geleneksel esnek üstyapı karışımı oluşturmak üzere, asfaltlar içerisinde dağılabilmektedir.
2. Sülfürlü asfalt bağlayıcıların viskozite-sıcaklık karakteristiği, işlenebilirliği olumlu yönde etkileyecek daha geniş bir sıcaklık esnekliğine imkan tanımaktadır. Karıştırma ve serme işlemleri, geleneksel asfaltlarınkine göre daha düşük ve geniş bir aralıktaki sıcaklıklarda yapılabilmektedir.
3. Sülfürlü asfalt bağlayıcılı karışım numunelerinden elde edilen verilere göre, bu karışımların oldukça yüksek stabiliteye, iyi akma özelliklerine, suya karşı dirence, düşük sıcaklık ve yorulmaya karşı çok iyi yapısal özelliğe sahip oldukları görülmüştür.
4. Sülfürlü asfalt bağlayıcılar, endüstriyel miktarlarda üretilebilmektedir. Karıştırma işlemlerinde, yüksek sıcaklıklardaki zararlı hidrojen sülfid emisyonu oluşumunu engellemek için bir üst sınır tayin edilmiş ve uygulanmıştır.

5. Oluşabilecek herhangi bir zararlı reaksiyonu engellemek için geleneksel karışımlarda kullanılan katkı maddelerinin hiçbiri kullanılmamıştır.
6. Sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı karışımların üretilmesi, malzeme işlemleri ve üstyapı prosedürlerinde geleneksel ekipmanlar kullanılabilmektedir.
7. Yapılan arazi çalışmaları, sülfürlü asfalt bağlayıcıların tam ölçekli bir yol inşaatında olduğu gibi mevcut geleneksel karışımlı yolların rehabilitasyonunda da büyük bir başarı gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.
8. Elementel sülfür kullanımının, teknik açıdan olduğu gibi ekonomik açıdan da çok faydalı olduğu açıkça görülmüştür.
9. Planlanan yapısal analizler ve hizmet ömrü içerisindeki değerlendirmeler ile yapılacak olan diğer arazi çalışmaları, bu tip yolların tasarım ve performans korelasyonlarının yapılmasında bir temel teşkil edeceklerdir.

7. SÜLFÜRLÜ ASFALT KARIŞIMLARIN SICAKLIK DUYARLILIKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bir üstyapı tasarımcısının en önemli görevi, tasarımını yaptığı üstyapının güvenli, konforlu ve ekonomik bir ulaştırmayı sağlayabilmesidir. Bu da, bir çok tasarım alternatifi arasından, elde bulunan kaynaklarla en iyi çözümün tanımlanması gereğini doğurur.

Esnek üstyapı kaplamalarının analizleri yapılırken, tasarım alternatiflerinin değerlendirilmesi gereken üç temel olumsuz etki, kuşkusuz göz önüne alınmalıdır. Bunlar;

- Yorulma,
- Tekerlek izi oluşumu, yani oluklanma,
- Düşük sıcaklıktaki çatlamalardır.

Bu durumda temel amaç, soğuk havalarda büzülmeden kaynaklanan çatlamaları önleyebilecek yeterli elastikliğe sahip ve sıcak havalarda da tekerlek izi oluşumunu engelleyebilecek yeterli rijitliğe sahip karışımlar üretebilmektir.

Kış mevsiminin çok az yaşandığı veya hiç yaşanmadığı sıcak iklimlerde, düşük penetrasyonlu, yani sert asfalt kullanmak, sıcak havalarda yüksek rijitlik elde etme amacını yerine getirmektedir. Diğer taraftan, soğuk iklimlerde de yüksek penetrasyonlu, yani yumuşak asfalt kullanmak da düşük sıcaklıklarda oluşan büzülme çatlakları sorununu en aza indirmektedir. Sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşmaması durumunda da, yorulma ve oluklanmada genellikle herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.

Ancak ılımanı iklimi bölgeler göz önüne alınacak olursa, asfaltın çok sert olması düşük sıcaklıklarda çatlamasına, çok yumuşak olması da yüksek sıcaklıklarda oluklanmasına neden olacaktır. Ayrıca yolun geometrisine, tabakaların özelliklerine, trafik yüklerinin miktarına, vb. bağlı olarak da muhtemelen yorulma çatlakları da meydana gelecektir.

Bahsedilen bu nedenlerle, böyle şartlar altında, araçların şeritlerini muhafaza etmesini zorlaştıracak derin tekerlek izleri oluşması, yol üzerinde birikebilecek su yüzeyinde kızaklanma (hydroplanning) gibi güvenlik sorunlarının aşılabilmesi, çatlamaların daha hızlı bozulmaya neden olmasıyla, meydana gelecek ekonomik sorunların engellenebilmesi ve daha konforlu esnek üstyapılar inşa edebilmek için, daha geniş ve ayrıntılı çalışmaların gerekliliği ortaya çıkmıştır. Genellikle, yollarda güvenlik, en yüksek önem derecesine sahip kriter olarak ele alınmaktadır. Bu nedenle yollarda oluşabilecek çatlamalar, oluklanmalara göre çok daha fazla tolere edilebilecek bir sorundur.

Bu çalışmada, bahsedilen tüm bu hususular dikkate alındığında meydana getirilebilecek "en uygun karışımın" araştırmaları yapılmaktadır [47]. Bu araştırma, düşük sıcaklıklarda çatlamaları önleyebilecek kadar esnek, yüksek sıcaklıklarda oluklanmayı önleyebilecek kadar sert bir karışım tasarımı oluşturulabilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. En uygun karışım oluşturma çalışmalarında, asbest maddesi de kullanılmıştır. Ancak günümüzde asbest kullanımının, insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkileri nedeniyle günümüz şartlarında, bu karışım için ekonomik olarak yaşanabilirliğini veya uygunluğunu kaybetmiştir denebilir. İlerleyen zamanlarda buradaki asbestin görevini üstlenebilecek yeni indikatörler kullanma olasılığına dayanarak ve çalışmanın geneli için fikir verecek özellikler içerdiğinden, bu araştırma da irdelenecek ve değerlendirmelerin içine katılacaktır.

Sülfürün asfalt üstyapı karışımları içerisinde kullanılma girişimleri ve bu yönde yapılan çalışmalar, büyük artış göstermiştir. Bunun en önemli iki nedeninden ilki; çevresel sebeplerden dolayı tüm dünyada, sülfürün, yakıt bazlı malzemelerden uzaklaştırılması ve böylece de ikincisi, sülfürün düşük fiyatlarla sağlanmasına devam edilebileceği ihtimalinin kuvvetlenmesidir [33, 35, 48-51].

Uzun yıllar boyunca yapılan araştırma ve çalışmalara göre, sülfür kullanımının, en uygun karışım diye tabir edilen ve biraz sonra daha ayrıntılı bir şekilde bahsedilecek karışımın sağladığı tüm yararlı özellikleri, yaklaşık olarak barındırdığını meydana çıkarmıştır. Karışımlara yapılan sülfür ilavesinin, yüksek sıcaklıklar için stabilite ve rijitliği arttırdığı, düşük sıcaklıklar için ise salt asfalt ile kıyaslanabilir oranda esneklik sağlayabildiği görülmüştür. Böylece, yumuşak bir asfalt, sülfür katkısı sayesinde düşük sıcaklıklarda daha esnek davranabilirken, yüksek sıcaklıklarda da yeterli mukavemet ve stabiliteyi sağlayabilecektir.

7.1 Faaliyet Alanı ve Amaçlar

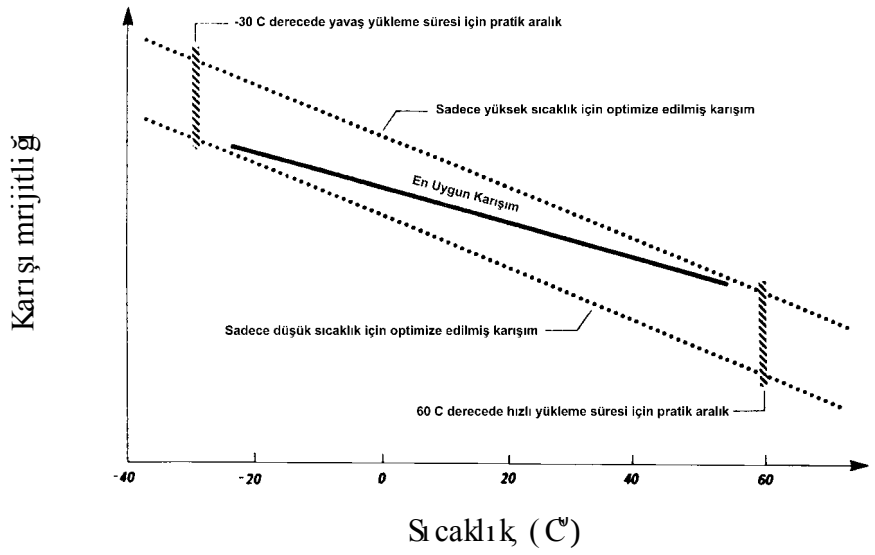
Bu çalışma diğer çalışmalarda da olduğu gibi sülfürlü asfalt karışımların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmadaki diğer hedef ise sülfürlü asfalt karışımların, yol inşaatındaki potansiyel faydalarının da saptanmasını ve;

1. "En uygun karışım" olarak adlandırılan çalışmanın gözden geçirilmesini,
2. En uygun karışıma bağlı olarak sülfürlü asfalt karışımların özelliklerinin ve karakteristiklerinin belirlenmesini,
3. Sülfürlü asfalt karışımların özellikle düşük ve yüksek sıcaklıklardaki ayrıntılı çalışma sonuçlarını,
4. Geleneksel asfalt karışımlar karşısında sülfürlü asfalt karışımların faydalı yanlarının tespit edilmesini,
5. Bu yeni ürünün yeteneklerinin ve sınırlamalarının belirlenmesini

içermektedir.

7.2 En Uygun Karışım

En uygun karışım hakkında Hignell'e ait bir fikir, arka sayfadaki Şekil 7.1'de şematik olarak gösterilmiştir [47]. Grafikte alttaki noktalı çizgi 300-400 penetrasyona sahip asfaltın temsil edebileceği, sadece düşük sıcaklıklar için optimize edilmiş karışımların karakteristiğini, üstteki noktalı çizgi ise 40-50 penetrasyona sahip asfaltın temsil edebileceği, sadece yüksek sıcaklıklar için optimize edilmiş karışımların karakteristiğini göstermektedir. Bu sınırlar arasında görülen sürekli çizgi ise, hem düşük hem yüksek sıcaklık şartlarına göre optimize edilmiş karışımın karakteristiğini simgelemektedir. Dikkat edilecek olursa, bu sürekli çizginin, düşük sıcaklıklarda sınır çizgisinin düşük rijitlikteki kısmına, yüksek sıcaklıklarda ise sınırın yüksek rijitlikteki kısmına daha yakın bir eğilim içerisinde olduğu görülmektedir. Bu da, grafikte temsil edilen bu karışımın, düşük sıcaklıkta diğer karışımlara oranla daha elastik, yüksek sıcaklıkta da diğer karışımlara oranla daha rijit olduğu anlamına gelir. Yani karışım, en uygun, düşük sıcaklıkta 300-400 penetrasyona sahip asfaltınki kadar elastik, yüksek sıcaklıkta da 40-50 penetrasyona sahip asfaltınki kadar stabil ve rijit olmalıdır.



Şekil 7.1 Sıcaklık-Karışım rijitliğine ait şematik illüstrasyon

1972 senesinde yapılan çalışmalarda karışımların düşük sıcaklık özelliklerinin, asbest, fiberler ve mineral filler gibi modifikasyon veya katkılardan bağımsız olduğu, sadece asfalt tipinin bir fonksiyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak yüksek sıcaklık şartlarında, karışıma asbest katılmasının, karışım özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiği ve asfalt-asbest karışımının daha iyi karakteristik özellikler sergilediği görülmüştür.

Bu araştırmada, her ne kadar sülfür ilavesi, yüksek sıcaklıklardaki stabilite ve rijitliği arttırsa da düşük sıcaklıktaki özelliklerin sadece ve sadece asfaltın doğal ve kendine has özelliklerinden etkilendiği düşünülmektedir. Böylece sülfür-asfalt, en uygun karışım kavramına daha değişik bir yaklaşımda bulunacaktır. Örneğin, 300-400 penetrasyonlu bir asfalta sülfür ilavesi yapıldığında, yeni karışımın, düşük sıcaklıklarda yine 300-400 penetrasyonlu salt asfaltın sahip olduğu özellikleri gösterirken, yüksek sıcaklıklarda 85-100 penetrasyonlu salt asfaltın sahip olduğu özellikleri gösterecektir. Sıcak iklimlerde belki de 150-200 penetrasyonlu bir asfalt ile sülfürden elde edilecek bir karışım yüksek sıcaklıklarda yeterli stabilite ve rijitliğe sahip olurken düşük sıcaklıklardaki çatlama sorunlarını çözebilecek kadar da elastik olabilecektir. Halbuki geleneksel asfalt üstyapılarda yüksek sıcaklık için 40-50 penetrasyonlu asfaltlar önerilmektedir ki, bu da düşük sıcaklıklarda çatlamalara yol açmaktadır.

7.3 Araştırmanın Yaklaşımı

Sülfürlü asfalt bağlayıcının oluşturulması, sıvı elementel sülfürün yüksek bir kesme oranı ile sıcak asfalta katılarak karıştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Meydana gelen homojen sülfürlü asfalt bağlayıcının üretilmesi geleneksel karışımların hazırlanma kural ve kaidelerine büyük ölçüde uyumluluk göstermektedir. Sülfürlü asfalt karışımların taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması işlemleri de geleneksel ekipmanlarla gerçekleştirilebilmektedir [35].

Daha önceki tarihlerde bu yeni sülfürlü asfalt bağlayıcıların kimyasal ve fiziksel karakteristiği ile ilgili yapılan araştırma ve çalışmalardan elde edilen sonuçlarda, bu konuda çalışmanın cesaretlendirici bir potansiyele sahip olduğu açıkça görülmektedir. Ölçülen bu özellikler arasında penetrasyon, yumuşama noktası ve Fraas kırılma noktası arasındaki ilişki, aşağıdaki Tablo 7.1'de görülmektedir.

Tablo 7.1 Sülfürlü asfalt bağlayıcıların fiziksel özellikleri

Numune	Kompozisyon, (ağırlıkça %)								
85-100 pen. Asfalt	100	90	80	70	60	55	50	40	-
Elementel sülfür	-	10	20	30	40	45	50	60	100
15 C^0'de özgül ağırlık	1.027	1.055	1.120	1.183	1.232	1.285	1.344	1.434	1.956
Yumuşama nk., (C^0)	44	38	39	42	42	43	44	57	-
25 C^0'deki penetrasyon	92	171	176	181	183	168	70	72	-
Fraas kırılma nk., (PC)	-16	-14	-15	-12	-13	-14	-	-	-

Geleneksel yoğun dereceli sıcak karışımlar, bu yeni bağlayıcılar ile yapılmış, Marshall stabiliteleri ve akma değerleri ölçülmüştür. 60 C derecede yapılan ölçümlerde stabilite değerleri, salt asfalt ile yapılan karışımlarınkine göre %50 ila %100 oranında yüksek, akma değerleri ise makul düzeyde çıkmıştır. Diğer yandan, asfalt içerisinde dağılan sülfürün de fotomikrografларından elde edilen görüntülere dayanarak, tamamen kolloidal yani jelatinimsi bir dağılım tipi sergilediği görülmüştür. [35, 48]

Zaman içerisinde yapılan araştırma ve çalışmalara göre, karışımlarda %50 oranına kadar varan bir sülfür-asfalt yer değişimi uygulamak hem mümkün hem de verimli sonuçlar elde edilebilmesi açısından uygundur. Aslında bu oranı etkileyen bir

çok parametre olduğu ve bu oranın bu parametrelere göre değişkenlik gösterebildiğine daha önce de değinilmiştir.

Ancak, azalan kaynaklarından dolayı petrolün pahalanması, artık madde oluşuna istinaden sülfürün de ucuz bir kaynak olması bu yeni karışımların en azından ekonomik cazibesini çok arttırmaktadır. Sülfür ve sülfürlü asfalt bağlayıcıların ekonomik özellikleri hakkında bazı verilere ilerleyen bölümlerde değinilecektir. Fakat bu cazibenin, sırf ekonomik açıdan oluşmadığını ortaya çıkarmak üzere yürütülen çalışmalara ve yorulma, kalıcı deformasyonlar, büzülme çatlakları, vb. mühendislik özelliklerinin değişik şartlar altındaki davranışlarının incelenmesi sürdürülmeli, bu yeni karışımların en az geleneksel karışımların özelliklerine sahip olduğu ve en az onların gösterdiği kadar performans gösterebildiği ispatlanmalıdır.

Unutulmaması gereken en önemli konu, modifikasyonlardan da bahsederken değinilen, bir özellik iyileştirilirken diğer özelliklerin bozulmaması gerekliliğidir. Ayrıca, elde edilecek ilave özellik ve yapısal başarılar da bu cazibeyi iyice pekiştirecek ve arttıracaktır.

Bu hususlar göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmanın yaklaşımı ve görevleri şu şekilde sıralanabilir:

1. Sülfürlü asfalt karışımların önemli tasarım değişkenlerinin belirlenmesi,
2. Malzeme karakterizasyonu için yöntemler geliştirilmesi,
3. Bu yöntemleri uygulayarak sülfürlü asfalt karışımların, özellikle yorulma ve düşük sıcaklık çatlamaları gibi yapısal analizlerinin yapılması,
4. Yolların hizmet ömrü içerisindeki davranış ve performanslarının değerlendirilmesi,
5. Üç ve dördüncü maddelere dayanarak yeni modeller ön görülmesi ve geliştirilmesi,
6. Sülfürlü asfalt karışımların ekonomik açıdan değerlendirilmelerinin sürdürülmesi.

Sülfürlü asfalt uygulamalara ait potansiyel önemli tasarım değişkenlerinin tanımlanması aşağıda maddeler halinde görülmektedir.

1. Agrega
    - Tip,
    - Gradasyon,
    - Doku,
    - Şekil.
2. Asfalt
    - Tip veya Kaynak,
    - Kıvam-Penetrasyon,
    - Sıcaklık duyarlılığı-Viskozite.
3. Sülfür
    - Miktar.
4. Karışım
    - Bağlayıcı içeriği,
    - Sülfür/asfalt oranı,
    - Hava boşlukları,
    - Yoğunluk,
    - Düşük sıcaklıktaki rijitlik,
    - Elastisite modülü,
    - Yaşlanma,
    - Sıkıştırma tipi,
    - Karıştırma, serme ve sıkıştırma sıcaklığı.
5. Karışım Karakterizasyonu
    - Sıcaklık,
    - Gerilme ve/veya şekil değiştirme seviyeleri,
    - Gerilme ve/veya şekil değiştirme oranları,
    - Deney tipi.

Önceki sayfadaki tabloda görülen ve sülfürlü karışımların potansiyel olarak önemli görülen değişkenleri yardımıyla sülfürlü karışımların, düşük ve yüksek sıcaklıklardaki özelliklerini belirlemek üzere düşük ve yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneme yapılmıştır. Bu deneme, malzeme davranışlarının karakterize edilmesi ve yapısal tepki analizlerinin yapılabilmesi için mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

Bu çalışmada özellikle vurgulanan hususlar, düşük sıcaklık deneyimlerinden elde edilen sonuçlar, düşük ve yüksek sıcaklıklarda elde edilen etkileşimli sonuçlar ve bu sonuçlara dayanan arazi çalışmaları ile bunlardan elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmalardır [53].

7.3.1 Düşük Sıcaklık Deneyimi

Numunelere, deneylerin uygulanarak düşük sıcaklık karakteristiklerini belirlemek amacıyla sabit oranlı gerilme aleti kullanılmıştır. [54, 55].

Düşük sıcaklıklarda asfalt üstyapılar üzerinde yapılan deneylerde, malzemenin düşük sıcaklık karakteristiğini, temelde aşağıdaki üç özelliğin etkilediği sonucuna varılmıştır.

- Asfaltın kıvamı-Penetrasyonu (PEN)
- Sıcaklık (TEMP)
- Sıcaklık duyarlılığı-Viskozite (VISC) [56]

Ayrıca sülfür/asfalt oranının düşük sıcaklıktaki etkisi ve sülfürlü bağlayıcı içeriği de bu deneylerde belirlenmesi amaçlanan faktörlerdendir.

Çalışmalar için 40-50, 85-100 ve 300-400 penetrasyon derecesine sahip olmak üzere üç ayrı asfalt çimentosu seçilmiştir. Asfalt penetrasyonlarının, bu şekilde belirlenmesinin nedeni, numunelerin özellikleri arasında oluşabilecek farklılıkların daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmasını sağlayabilmektir. Yani, örneğin 60-70 penetrasyonlu bir asfalt ile 85-100 penetrasyonlu bir asfalt ile oluşturulacak karışımlar arasındaki farklılıkların algılanabilmesi kuşkusuz daha güç olacaktır.

Çalışmaların ilk önce üç ayrı sıcaklıkta yapılması kararlaştırılmışken, zaman sınırlamaları ve bağlayıcıdan kaynaklanan bazı sorunlar yüzünden, veri kaybını en

aza indirecek şekilde deney yapılacak sıcaklık seviyelerinin, –25 ve 10 C derece olmak üzere iki kademeye indirilmesine karar verilmiştir.

Viskozite de bu çalışmadaki üçüncü değişkendir. Değerleri ise Venezuela, Saskatchevan ve Alberta'dan elde edilen ve yüksek, orta ve düşük viskoziteli olarak seviyelendirilmiştir. Bu üç seviyenin seçilmesi, sülfürlü asfaltın, düşük viskoziteye sahip asfaltların özelliklerini geliştirme ihtimali düşünülerek ortaya çıkmıştır.

Karışımda kullanılacak sülfür oranları, bağlayıcının ağırlıkça %0, %20 ve %50 oranlarında olması belirlenmiştir. Bu değerler sırasıyla sülfür olmayan karışımları, asfaltın içerisinde rahatlıkla çözünebilecek sülfürün limitini ve asfaltın içine katılabilecek sülfürün üst limitini temsil etmektedirler.

Sülfür ve asfaltın özgül ağırlıklarının farklı olmasından dolayı yapılan hesaplamalarda, bağlayıcı içeriği de dikkate alınmıştır. Bu çalışmada uygulanan Marshall karışımtasarımı yöntemine göre, eşit seviyelerdeki hava boşluğu oranları için %0 oranında sülfüre sahip salt asfaltta %6 oranında, %20 oranında sülfür içeren asfaltta %6.5 oranında ve %50 oranında sülfür içeren asfaltta da %8 oranında bağlayıcı bulunmaktadır. Bu deneylerde, bir seviyeden bir diğerine geçişte bir kıvam belirleyebilmek için %20 ve %50 oranında sülfür içeren karışımlarda da %6 oranında bir bağlayıcı kullanılmıştır.

Ayrıca %6 ve %8 oranında bağlayıcı içeren karışımların, bağlayıcı içerikleri arasında oldukça büyük bir fark vardır. Bu nedenle, %50 oranında sülfür içeren karışımın bağlayıcı oranı ortalama bir değer olarak kabul edilen %7'lik bir değer olarak belirlenmiştir.

Böylece sülfür içermeyen karışımda %6 oranında, %20 oranda sülfür içeren karışımda %6 ve %6.5 oranında, %50 oranında sülfür içeren karışımda ise %6, %7 ve %8 oranında bağlayıcı içeren numuneler deneylere tabi tutulmuştur.

Numuneler, Gulf Oil Canada Limited şirketine ait Sheridan Park Araştırma Merkezi'nde California Kneading Compactor olarak isimlendirilen ekipmanlar kullanılarak üretilmiştir. Numunelerin agrega gradasyon ve kompozisyonları benzer olup, %45 oranında taş (9.5 mm), %25 oranında kum, %25 oranında yıkanmış ve elekten geçirilmiş ve %5 oranında sadece elekten geçirilmiş malzemeler içermektedir. Numuneler, oda sıcaklığında otuz gün boyunca bekletilmiştir. Daha sonra numuneler, 40 mm. x 40 mm. x 100 mm. ebadında parçalar oluşturacak şekilde

kesilmiştir. Bu numuneler, daha önce de bahsedilen sabit oranlı germe aleti olarak isimlendirilen aparatta, saatte 0.244 mm oranında bir gerilmeye maruz bırakılmışlardır. Bu oranın, arazi şartlarını, en iyi şekilde temsil eden oran olduğu kabul edilmektedir [54].

7.3.2 Yüksek Sıcaklık Deneyi

Sülfürlü asfalt karışımların yüksek sıcaklıktaki mühendislik özelliklerini belirleyebilmek üzere, endirekt çekme deneyi uygulanmıştır. Bu çalışmada ise;

- Çekme mukavemeti
- Elastisite modülü
- Yorulma ömrü değerleri belirlenmektedir.

Bu deney için Gulf Oil Canada şirketi tarafından, yaklaşık 540 adet Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bunların yarısı mukavemeti değerlendirebilmek için statik olarak, diğer yarısı ise elastisite modülü ile yorulma ömrünün değerlendirilebilmesi için tekrarlı yükler altında deneylere tabi tutulmuştur. Bu numuneler, ASTM D 1559'a göre, her yüze altmış darbe vurulmak suretiyle sıkıştırılarak hazırlanmaktadır [63].

Marshall yöntemine göre, eşit hava boşluğu seviyesi için optimum bağlayıcı içeriği, geleneksel asfalt karışımlar için %6, %20 oranında sülfür içeren karışımlar için %6.5 ve %50 oranında sülfür içeren karışımlar için %8 olarak belirlenmiştir.

Buna göre;

1. Asfalt kıvamı; 40-50 ve 85-100 penetrasyon derecesi olmak üzere iki seviye,
2. Sıcaklık duyarlılığı; düşük ve yüksek viskozite olmak üzere iki seviye,
3. Bağlayıcı içeriği; dört seviye,
4. Sülfür/asfalt oranı; 0/100, 20/80, 50/50 olmak üzere üç seviye,
5. Gerilme; düşük ve yüksek olmak üzere iki seviye,
6. Deney sıcaklığı; -10, 24, 38 ve 52 C derece olmak üzere dört seviye kullanılmıştır.

7.4 Sonuçlar

7.4.1 Düşük Sıcaklık

Yapılan çalışmalarda, düşük sıcaklıkların, malzemelerin özelliklerini nasıl etkilediğini belirleyebilmek için istatistiksel analizler yapılmıştır. Bu tip bir analiz yapılmasının gerekliliği, numuneler üzerinde yapılan çalışmaların, doğal yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmaların, geneli temsil edebilmesi için neredeyse tüm spektrum bilgisi incelenmelidir. Bu mümkün olmadığından, ayrıca hatalı ve zararlı sonuçlara ulaşılması ihtimali bulunduğundan istatistiksel analizlerin yapılması uygun görülmüştür.

Unutulmamalıdır ki, bu tip temsili çalışmalar, temelde önemli değişkenlerin tanımlanması ve bunların etkileşimleri hakkında fikir edinebilmesi amacıyla gerçekleştirilir. Bu çalışmalar tamamlanınca, elde edilen verilere ve ipuçlarına göre de temel tasarım ilişkilerinin araştırılabileceği, daha derin ve ayrıntılı çalışmalar yürütülebileceği görülmüştür.

Bu tarz varyasyonlu bir teknikle yapılan analizlerin sonuçları ise şöyledir:

1. Düşük sıcaklıktaki çatlamalarla direkt olarak ilgili olan rijitlik; ki bu, rijitliğin yükselmesi çatlama potansiyelini veya çatlama sayısını arttırır demektir, %95'ler mertebesindeki önemli bir ölçüde sadece asfaltın penetrasyonu ve sıcaklığından etkilenmektedir. Yani asfaltın penetrasyon ve sıcaklığı yükselirse rijitlik azalmaktadır. Araştırma yapılan sıcaklık ve kısımlarda görülmüştür ki, asfalta sülfür katarak sülfür/asfalt oranını değiştirmek, bağlayıcı içeriğini değiştirmek veya viskozite değerlerini çeşitlendirmek rijitlik üzerinde herhangi bir etki yapmamıştır. Diğer bir deyişle, bir sülfürlü asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıktaki çatlama potansiyeli, tamamen asfaltın doğal özelliklerine bağlıdır.
2. Çalışmalarda bazı etkileşimler dikkat çekmiştir. Örneğin, sülfür/asfalt oranı ile penetrasyon değeri etkileşiminin tüm seviyelerde rijitliği düşürdüğü görülmüştür. Yani, sülfür kullanımı, penetrasyonu yükseltmiş, dolayısıyla rijitliği düşürmüştür. Benzer bir şekilde, sülfür/asfalt oranı ile viskozite etkileşimide, yani yüksek viskoziteli bir asfalta örneğin %20 oranında sülfür katılması da rijitliği düşürmüştür. Bu yöndeki bir çalışmada da görülmüştür ki, yüksek viskoziteli bir asfalt, %50 oranında bir sülfür katkısı ve –10 C

dereceli bir sıcaklık ile oluşturulan kombinasyonda rijitlik düşürülmüştür [54,55,62].

Daha öncede bahsedildiği gibi, tabii ki bu sonuçların, arazi çalışmaları ile de desteklenmesi şarttır. Bu iki sonuç birbiri ile birleştirilecek olursa, sülfür ilavesinin asfalt betonunun düşük sıcaklıktaki karakteristiğine olumsuz yönde herhangi bir etkisinin olmadığı, hatta bazı durumlarda karışım üzerinde olumlu etkiler meydana getirdiği görülmüştür.

7.4.2 Yüksek Sıcaklık

Yüksek sıcaklıkta yapılan istatistiksel analizleri üç ana başlık altında toplamak mümkündür.

1. Yorulma (kontrollü gerilme deneyi);

   %20 oranında bir sülfür ilavesinin, karışımın yorulma ömründe önemli bir artış meydana getirdiği görülmüştür. Ayrıca, aynı sülfür miktarı ile yüksek sıcaklığa karşı duyarlılığı daha farklı bir asfalt kullanılması halinde daha da yüksek bir yorulma ömrü elde edilebileceği tahmin edilmektedir. %50 oranında sülfür içeren bir karışımın kullanılması, %20'lik bir orana sahip karışıma göre yorulma ömrünü daha da arttırmıştır. Bu artış miktarı, yaklaşık olarak 85-100 penetrasyonlu asfalt yerine, 40-50 penetrasyonlu asfalt kullanıldığı zamanki değere eşittir.

2. Rijitlik;

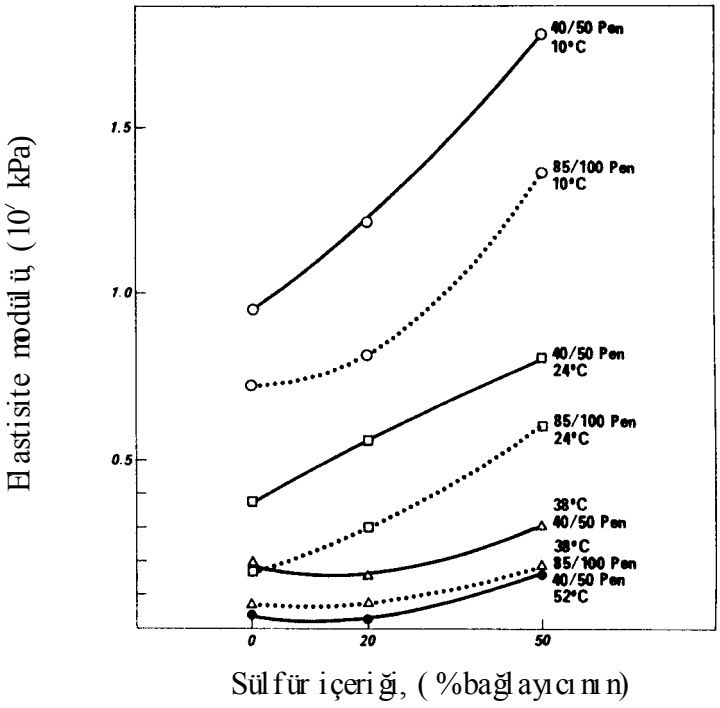
   Sonraki sayfada verilen Şekil 7.2'deki grafiğe bakılacak olursa, sülfür ilavesinin elastisite modülü cinsinden, rijitliği arttırdığı görülmektedir. Bu artış, %50'lik sülfür katkısı değerinde kuvvetliymiş gibi görünse de, bazı durumlarda da %20 ve bu civardaki sülfür oranlarında yükselişlerin daha efektif, verimli olduğu görülmektedir. Bu durum, daha önce de bahsedildiği gibi, sülfürün, asfalt içerisindeki çözünme verimliliği ile doğrudan ilgilidir.

3. Çekme mukavemeti;

   %20 oranında bir sülfür ilavesinin, karışımın mukavemetini önemli bir ölçüde yükselttiği belirlenmiştir. Sülfür katkı oranı, %50'ye çıkınca mukavemet değerindeki artış, 85-100 penetrasyonlu bir asfalt yerine, 40-50 penetrasyonlu

bir asfalt kullanıldığı zaman elde edilebilen artışa yaklaşık olarak eşit olmaktadır.

Elde edilen bu sonuçlar, en uygun karışım kavramını destekler yöndedir. Yüksek sıcaklıktaki karakteristiğin, önemli ölçüde yükseldiği, böylece sülfür ilavesi sayesinde daha yumuşak bir asfaltın, sülfürsüz daha sert bir asfalta benzer bir performans sergileyebileceği görülmüştür.



Şekil 7.2 Elastisite modülü ve sülfür içeriği arasındaki ilişki

7.5 Arazi Araştırmaları

Sülfürlü asfalt karışımlarıyle 1974 senesinde, biri yüzeysel kaplama diğeri ise tam ölçekli olmak üzere, Alberta'da iki, 1975 senesinde Ontario'da bir ve ilerleyen çalışmalar için Saskatchewan'da da bir yol inşaatı gerçekleştirilmiştir. Bu arazi çalışmalarının en önemli amacı, deneysel yollarla veya laboratuarlarda elde edilen sonuçların doğrulanmasıdır. Alberta'da yapılan yolların ayrıntılı çalışmalarına daha önce değinilmiştir. Ontario'da yapılan yolların ayrıntılarına ise ilerleyen bölümlerde değinilecektir.

Devam eden değerlendirmeler ve analizler, düşük ve yüksek sıcaklıklardaki tasarım verilerini sağlamakla yetinmeyip, biraz önce de değindiğimgibi laboratuar çalışmalarının sonuçlarını doğrulanması ve onaylanmasına da imkan tanımıştır.

Düşük sıcaklık çatlamaları göz önüne alındığında, sülfürlü asfalt karışımlar veya geleneksel asfalt karışımlar hakkında herhangi bir ayırım yapmak mümkün olmamaktadır. Belirtildiği gibi Alberta'da yapılan yoldan alınan numunelerin, düşük sıcaklıktaki rijitlik değerleri incelendiğinde, sülfürlü asfalt karışımlarınki ile geleneksel asfalt karışımlarınkiler arasında önemli bir farka rastlanmamıştır [65]. Bu deneyler, iki farklı laboratuarda ve iki farklı yükleme oranında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, düşük sıcaklık özelliklerinin olumsuz olarak etkilenmediği varsayımını destekler yöndedir. Hatta, yoldan alınan numunelere uygulanan çeşitli deneyler, düşük sıcaklıklarda sülfürlü asfalt karışımların özelliklerin, değişkenlerin doğru kombinasyonlarına da dikkat edilerek daha düşük rijitlik değerleri sergileyerek geleneksel karışımlardan çok daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır.

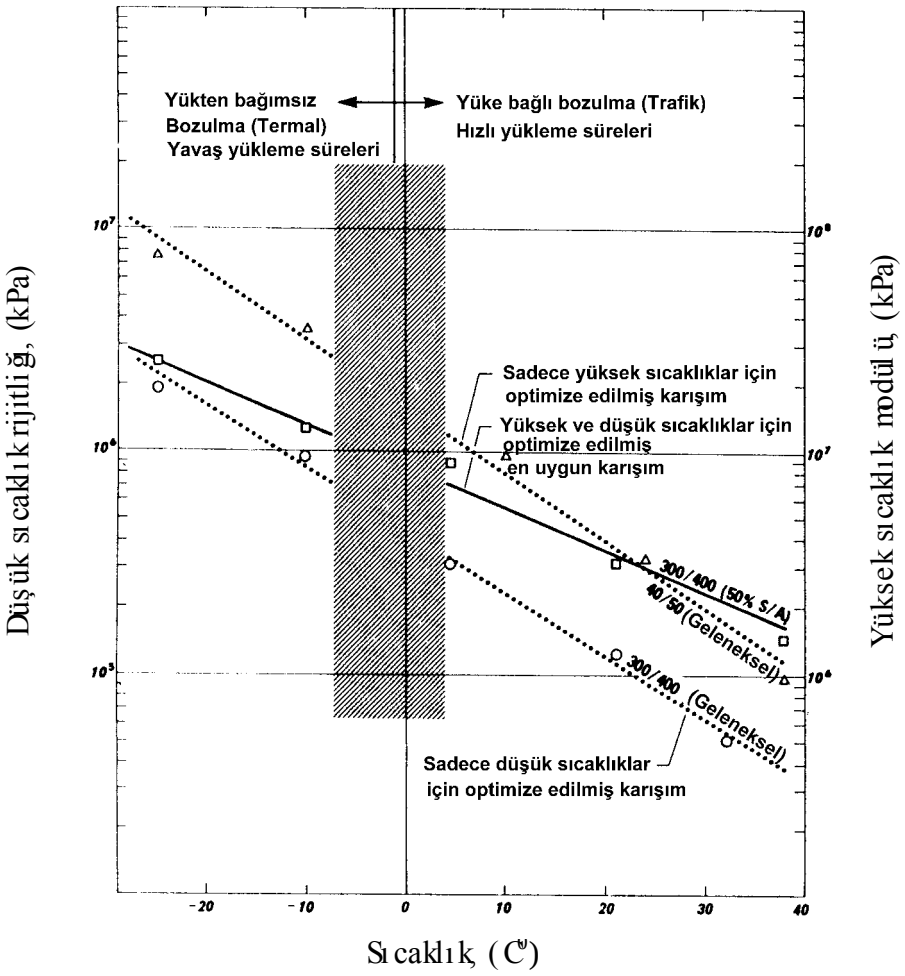
Albeta'daki yoldan alınan numuneler, yüksek sıcaklıklardaki rijitlik modüllerinin de belirlenebilmesi için incelemelere tabi tutulmuştur. Farklı frekans ve sıcaklıklarda yapılan çalışmalarda, sülfürlü asfalt karışımların rijitlik modülünün, geleneksel karışımlarınkinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca diğer tüm değişkenler sabit tutulduğunda da, geleneksel asfalt karışımlarda sülfürlü asfalt karışımlara göre daha derin tekerlek izi oluşumları meydana geldiği görülmüştür.

Böylece laboratuar çalışmalarında, hem düşük hem yüksek sıcaklıklar için elde edilen sonuçlar, arazi çalışmalarında elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır.

7.6 Gerekli Koşullar

Daha önceleri sülfürlü asfalt karışımların, en uygun karışım yaklaşımına eğilim gösterdikleri belirtilmiştir. Arka sayfada görülen Şekil 7.3, nicel olarak bu fikri açıklamaktadır. Şekilde üstteki noktalı çizgi 40-50 penetrasyonlu geleneksel asfalt betonunu, alttaki notalı çizgi 300-400 penetrasyonlu geleneksel karışımı, düz sürekli çizgi ise %50 oranında sülfür içeren 300-400 penetrasyonlu asfalt karışımı temsil etmektedir. Şekle göre, düşük sıcaklıklarda 300-400 penetrasyonlu geleneksel asfalt ile 300-400 penetrasyonlu sülfürlü asfalt karışımın yaklaşık olarak aynı özellikleri taşıdığı, yüksek sıcaklıklarda ise yine 300-400 penetrasyonlu sülfürlü asfalt karışımın, 40-50 penetrasyonlu geleneksel asfalttan dahi daha yüksek rijitliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara dayanarak 300-400 penetrasyonlu asfalt ile sülfürden elde edilen karışımın, düşük sıcaklıklarda 40-50 penetrasyonlu

geleneksel asfalta göre çok daha az çatlamalara maruz kalacağı, yüksek sıcaklıklarda da daha yüksek mukavemet ve stabiliteye sahip olacağı ortaya çıkmıştır.

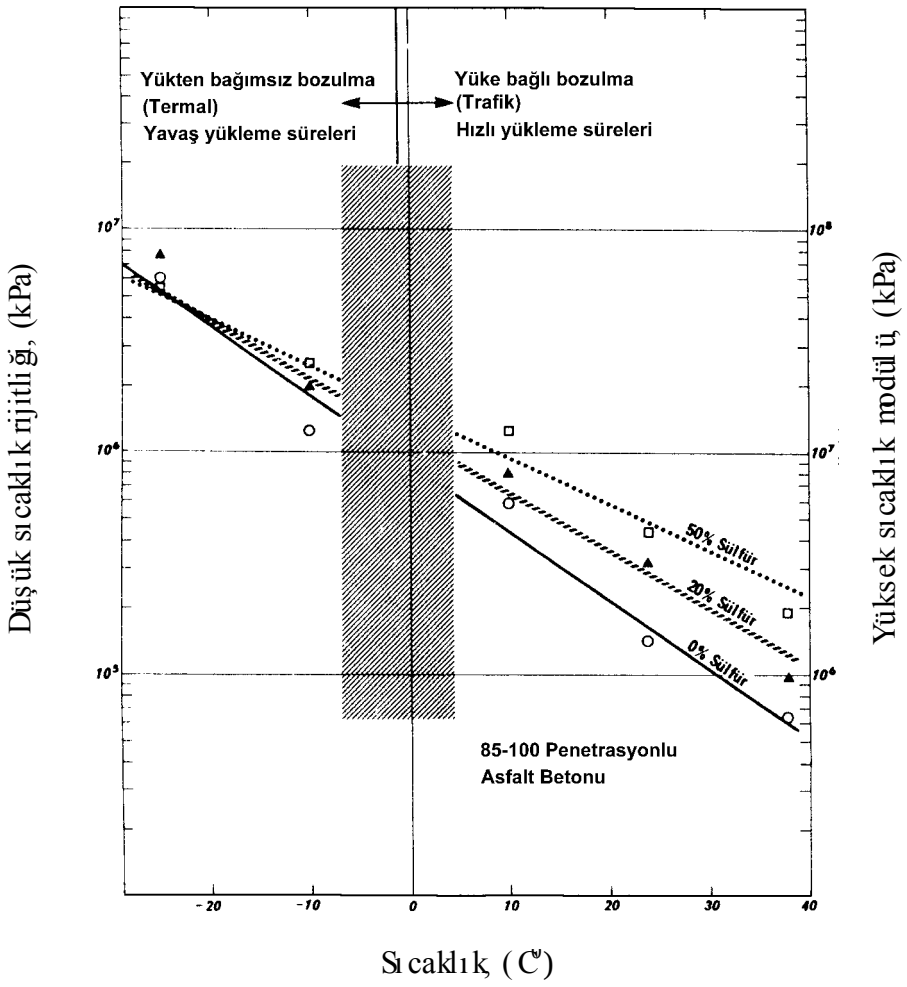


Şekil 7.3 Sülfürlü asfalt karışımların sıcaklık duyarlılığının modifikasyonu

Şekil 7.3'deki bu grafik, pratikte, termal etkilerle meydana gelebilecek yavaş yükleme şartları altındaki düşük sıcaklıktaki rijitlik modülü ile pratikte, trafik yüklerinin meydana getirdiği hızlı yükleme şartları altındaki yüksek sıcaklıktaki rijitlik değerleri görülmektedir. Bu grafikte sağ ve soldaki iki düşey skala birbirinden farklı isimve birimdedirler. –6 ile 4 C derece arasında bir geçiş zonu belirlenmiş ve şekilde taranmıştır. Bu geçiş zonu, iki farklı yükleme şeklini birbirlerinden ayırmaktadır. Bu yöntem, karışımın sıcaklığa karşı duyarlılığının belirlenmesi açısından oldukça kullanışlı bir yöntemdir.

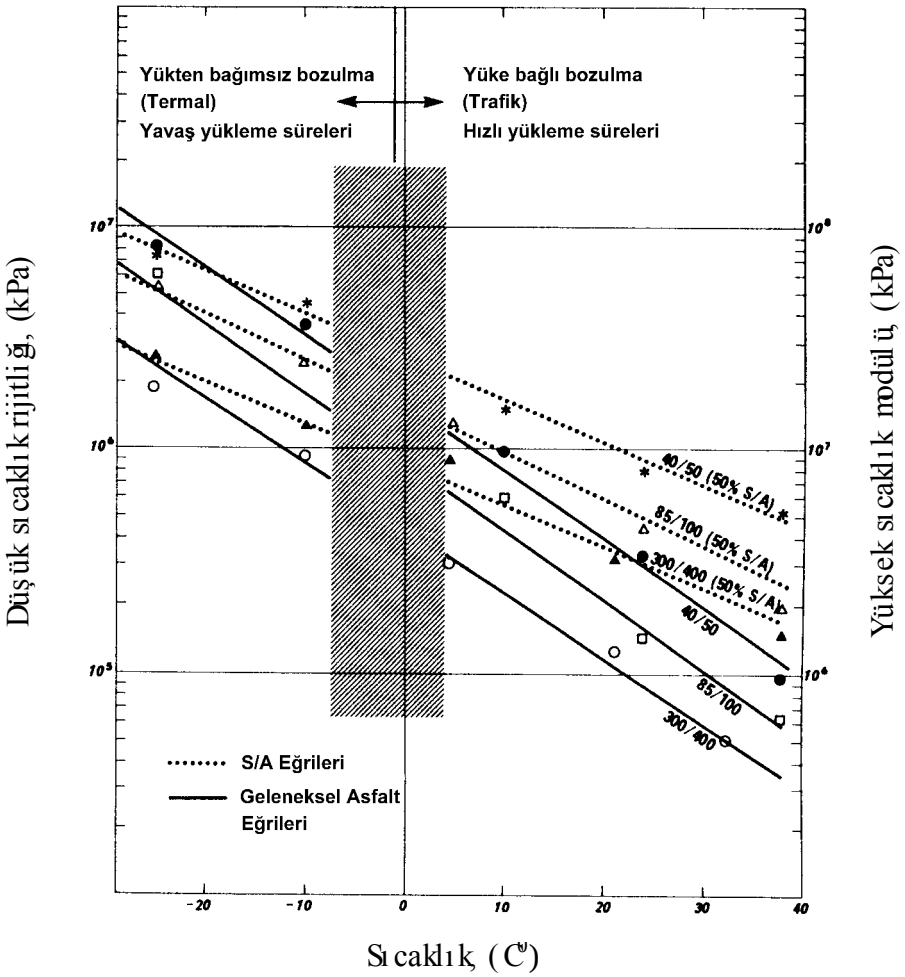
Şekil 7.4 de 85-100 penetrasyonlu bir asfalt bağlayıcıya sülfür katılmasının etkilerini gösteren bir grafiktir. Bu grafikte de düşük sıcaklıkta önemli bir fark

görülmemesine rağmen yüksek sıcaklıkta sülfür içeriğinin artmasıyla rijitliğin de arttığı görülmektedir.



Şekil 7.4 Sülfürün karışım rijitliğine olan etkisi

Arka sayfadaki Şekil 7.5 ise tüm penetrasyon değerlerini ve etkileri içinde barındırmaktadır.



Şekil 7.5 Sülfürlü asfalt karışımların sıcaklık duyarlılığı

7.7 Genel Yetenekler ve Sınırlamalar

Gerek laboratuar gerekse arazide yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, üstyapı tasarımcısının, geleneksel asfalt betonuna alternatif bir çözüm sahibi olduğu kesinleşmiştir. Tasarımcı artık, servis sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklar için asfalt çimentosunun özelliklerini çeşitlendirmek zorunda kalmayıp, sülfür/asfalt oranını çeşitlendirerek yeni çözümlere ulaşabilecektir. Hatta bu yeni çözüm geleneksel çözümlere nazaran, duruma göre, daha yüksek esneklik veya daha yüksek rijitlik elde edebilmek suretiyle üstünlükler sağlama imkanı da verecektir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, sülfürlü karışımların özellikle yaşlanma özellikleri açısından da irdelenmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Araştırmanın ilerleyen bölümlerinde bu özellik ayrıntılı bir biçimde incelenecektir.

Sülfürlü karışımlarda kullanılacak bazı malzemelerde bazı sınırlamaların olması ihtimali ile birlikte bu tip karışımlarda da geleneksel malzemelerin kullanılabildiğini unutmamak gerekir. Ayrıca, sülfürlü karışımların, yapılan tüm araştırma ve çalışmalara göre kayda değer mühendislik ve ekonomik potansiyele sahip oldukları da kesinleşmiştir.

7.8 Bölüm Sonuçları

Tüm bu deneyimlere dayanarak çıkarılabilecek sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. "En uygun karışım" olarak adlandırılan kavram, sülfürlü asfalt bağlayıcılar ile mukayese edilmesi açısından, kesinlikle faydalı bir fikirdir. Sülfürlü asfalt içeren karışımlar geleneksel karışımlara göre, düşük sıcaklıklarda daha az çatlamak üzere, yüksek sıcaklıklarda daha az tekerlek izine maruz kalmak üzere veya daha az yorulma etkilerine maruz kalmak üzere rahatlıkla tasarlanabilirler. Bu nedenlerle, sülfürlü asfalt içeren karışımların, zaman geçtikçe daha uzun periyotlarda çok daha başarılı bir performans sergileyeceği kuşkusuzdur.
2. Sülfür hammaddesinin fazlalığı ve artan petrol fiyatları dikkate alındığında, sülfürlü asfalt karışımların kullanımı önemli bir potansiyel tasarruf yapılabilmesine imkan tanıyacaktır. Bu konudaki ayrıntılı bir inceleme ilerleyen bölümlerde de görülecektir.
3. Sülfürlü asfalt karışımların daha az çatlaması ve daha az oluklanması sayesinde, çok daha pürüzsüz ve güvenli üstyapı yüzeyleri elde etmek mümkün olacaktır.

Böylece, bir üstyapı tasarımının temel amaçlarından olan, daha güvenli, daha konforlu, daha dayanıklı ve daha ekonomik ulaştırma yüzeyleri meydana getirmekte, sülfürlü asfalt bağlayıcılı karışımlar kullanmak daha uygun olacaktır.

8. ISI ve HAVANIN SÜLFÜRLÜ ASFALT KARIŞIMLARIN VİSKOZİTESİNE OLAN ETKİSİ

Sıkça bahsedilen 1970'li senelerin başındaki enerji krizi, 1973 senesinde petrol ambargosu konulması ile devam etmektedir. Bu ambargo, özellikle otoyol inşaatında, asfalt karışımlardaki sülfür kullanımının önemini iyice açığa çıkarmıştır. Sülfürün asfaltın bir modifiyesi olarak veya doğrudan asfaltın belirli bir kısmının yerini alarak kullanımının yaygınlaşması, özellikle ekonomik faktörler, asfaltın muhafaza edilmesi, hava kirliliğinin azalması ve otoyol üstyapılarındaki bağlayıcı özelliklerinin iyileştirilmesi esaslarına dayanmaktadır.

Yapılan diğer çalışmalarda sülfürlü asfalt bağlayıcı ile elde edilen karışımların bir çok özelliği irdelenmiştir. Ancak, yapılan her çalışmada da sülfürlü asfalt bağlayıcılı karışımların, bir de uzun dönemdeki özelliklerinin incelenmesi gereğinden de bahsedilmiştir. Şimdi, bu temel amaca dayanarak, çalışmanın bu bölümünde de uzun hizmet ömrü beklentileri göz önünde bulundurularak, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımların yaşlanma ve dayanıklılık özellikleri ile bu özellikleri birinci dereceden etkileyen viskozite özelliklerini irdelenecek ve değerlendirilecektir.

Ele alınan bu çalışmanın yapıldığı tarihlerde, sülfürlü asfalt bağlayıcı ile yapılmış yolların hizmet ömürleri, henüz üzerinde bazı arazi çalışmalarını yapabilecek kadar uzun değillerdir. Bu nedenle bu çalışma yapılırken, bu yeni malzemenin dayanıklılığı veya yaşlanmaya karşı olan direnci hakkında çeşitli bilgilere sahip olunabilmesi için bazı laboratuar çalışmaları yapılması uygun görülmüştür. Yapılacak bu çalışmalar, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımların uzun dönemdeki performans, yaşlanma ve viskozite değişimleri hakkında tahminlerde bulunulabilmesine imkan tanıyacaktır.

Daha önce, Traxler'in yaptığı bazı çalışmalardan elde edilen verilere göre, asfaltın dayanıklılığı ve yaşlanma karakteristiği prensip olarak ısı ve oksidasyondan etkilenmektedir [68].

Traxler'in yaptığı çalışmadan daha da önce, 1938 yılında Bencowitz ve Boe'nun yaptığı çalışmalarda da sülfürlü asfalt karışımların özelliklerine değinilmiştir [69]. İki yüz gram ağırlığında, 150 C derecede iki saat boyunca sündürülen ve iki dönel bıçakla, dakikada 325 devirde karıştırılarak hazırlanan çeşitli numunelerle yapılan çalışmalarda, yaşlanmanın yumuşama noktası ve penetrasyona olan etkileri irdelenmiştir. Karışımlarda kullanılan bağlayıcılar ağırlıkça %2.5 ve %4.0 oranında sülfür içeren iki ayrı asfalt ile gerçekleştirilmiştir. Bu karışımlar bir buçuk sene müddetince dış ortam şartlarına maruz bırakılmıştır. Bu süre sonunda yapılan incelemeler, sülfürlü asfalt karışımların yumuşama noktalarının salt asfalta oranla daha az bir miktarda yükseldiğini ortaya çıkarmıştır. Sülfürlü asfalt karışımların penetrasyon değerleri de iki saatlik bir karıştırma işleminin sonrasında yapılan ölçümlerde, salt asfaltın değerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Ancak dış ortamda yapılan çalışmalarda, sülfürlü karışımların penetrasyon değerleri salt asfaltınkine oranla daha sert düşüşlere maruz kalmıştır.

Kaynaklarda da adı görülen Lee de asfalt bazlı malzemelerin sülfür ile modifiyeleri hakkında geniş bir araştırmaya sahiptir [43]. Burada da Lee'nin çalışmasının bazı bölümleri kullanılmıştır. Sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımların hava etkilerine karşı olan direncini belirlemek amacıyla bazı deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde ağırlıkça %2, %5 ve %20 oranında üç ayrı miktarda sülfür içeren iki farklı asfalt kullanılmıştır. Bu karışımlar iki yüz elli gramlık asfalt numunelerin 150 C dereceye ısıtılması ve bunların üzerine oda sıcaklığında, toz halindeki sülfürün katılması ile hazırlanmıştır. Yapılan laboratuar çalışmalarında penetrasyon ve viskoziteden etkilenen değişimlerin mukayese edilerek, sülfürlü asfalt karışımların salt asfalt ile elde edilen karışımlara göre daha yüksek penetrasyona ve yaşlanma indeksine sahip oldukları, ancak, laboratuar ortamında gerçekleştirilen hava şartlarına karşı da daha yüksek derecede bir sertleşmeye maruz kaldığı görülmüştür.

İnşaatlarda Sülfür konulu 1. Uluslararası Konferansta da asfalt üstyapılarda sülfürün yeri başlıklı, Pronk ve Soderberg'e ait bir çalışma da gündeme gelmiştir [70]. Bu çalışmada %37.5 oranında sülfür içeren bir asfalt bağlayıcı kullanılmıştır. Çalışma sıcaklığı 60 C derece ve zaman periyotları da 1saat ila 72 saat olarak belirlenmiştir. 60 C derecede yapılan viskozite ölçümlerine göre, karışımın

viskozitesi 1-24 saatlik periyotta 349 p. (35 Pa-s)'den 1022 p. (102 Pa-s)'ye, 72 saate ulaşıldığında ise 2348 p. (235 Pa-s)'ye yükselmiştir.

Böylece bu çalışmanın yapılmasının gerekliliği de, sıcaklık ve hava koşullarının sülfürlü asfalt karışımlar üzerindeki etkisi ve bu etkinin karışımın ve üstyapılarda kullanılan malzemelerin dayanıklılıklarına bir ölçüt olması bakımından açıkça ortaya çıkmıştır.

8.1 Malzemeler ve Deneyler

Çeşitli literatür ve çalışmalar incelendiğinde, sülfürlü asfalt karışımların oluşturulmasında ağırlıkça %30 oranında sülfür, %70 oranında asfalt kullanılmasının en uygun değer olduğu düşünülmüştür. Bu karara varılırken, sülfürün düşük viskoziteli asfaltlar ile kullanımının daha faydalı sonuçlar ortaya çıkarabileceği göz önüne alınmıştır. Bu çalışmada da bu hususlara dikkat edilmiştir [6, 71].

8.1.1 Malzemeler

8.1.1.1 Sülfür

Bu çalışmada %99.5 saflık oranına sahip toz sülfür kullanılmıştır. Parçacık boyutlarına bakıldığında ise sülfürün %92'si 30 no'lu yani 0.59 mm çapındaki, %6'sı ise 200 no'lu yani 0.074 mm çapındaki elekten geçmiştir. Sülfürün özgül ağırlığı yarı katı bitümlü malzemeler için belirlenen kriterlere göre piknometre ile belirlenmiştir. Ağırlık ölçümleri ise 25 C derecede, erimeden yirmi dört saat sonra gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde özgül ağırlık değeri 1.996 olarak belirlenmiştir. Ancak yapılan bazı kimyasal deneylerde, sülfürün ısı etkisiyle meydana gelen hal değişimleri sebebiyle farklı özgül ağırlık değerleri alabildiği görülmüştür [72]. Örneğin, sülfürün önce eritilmesi ve sonra soğumaya bırakılması durumunda, sülfürün kristalize olarak 1.96 değerinde bir yoğunluğa sahip monoklinik bir yapıya büründüğü, daha da sonra yavaş yavaş rombik kristallere dönüştüğü ve yoğunluğunun 2.06'ya çıktığı görülmüştür. Bu kristallenme durumu ile ilgili olarak yapılan çeşitli çalışmalara daha önceki bölümlerde de değinilmiştir. Bu araştırmalara dayanarak, bundan önceki çalışmalarda da %50 oranındaki sülfürün, değişik şartlara göre kristallenme oranının biraz yüksek olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %30 oranında

bir sülfür içeriğinin, bu açıdan da daha verimli sonuçlar ortaya çıkardığı düşünülebilir.

8.1.1.2 Asfalt

Bu çalışmalarda kullanılan asfaltın büyük bir bölümü, Arizona bölgesinde, yaklaşık olarak en düşük viskoziteye sahip AR-1000 diye adlandırılan asfalttan elde edilmiştir. Özellikleri ilerleyen sayfalarda da verilen bir diğer AR-4000 isimli asfalt da seyrek de olsa kullanılmıştır. Bu asfaltlara ait teknik bilgiler aşağıdaki Tablo 8.1'de verilmiştir [73].

Tablo 8.1. Asfalt çimentosunun karakteristiği

	AR-1000		AR-4000
	Standart numune	Deney numunesi	Standart numune
Parlama noktası, (C^0)	205	235	227
Trikloroetilende çözünürlük, (%)	99	-	99
25 C^0'de penetr., (100 gr., 5 sn.)	-	120	-
60 C^0'de viskozite, (p.*)	-	744	-
135 C^0'de viskozite, (cs.)	-	167	-
Numune 75 dk. Bekletildikten sn.;			
25 C^0'de penetr., (100 gr., 5 sn.)	65	78	25
60 C^0'de viskozite, (p.*)	750-1250	1410	3000-5000
135 C^0'de viskozite, (cs.)	140	-	275
25 C^0'de düktilite, (cm)	100	-	75

* 10 p. = 1 Pa-s.

8.1.2 Deneyler

8.1.2.1 Karıştırma

Yaklaşık 300'er gramlık hem sülfür hem asfalt numuneler, 140 C dereceye kadar ısıtılmıştır. Asfalt, 1 poundluk yani 1 librelik (453 gr.) bir kahve kutusunda, sülfür ise cam bir bardakta tutulmuştur. Sıcak sülfür, asfaltın içine ağırlıkça bağlayıcının tam %30'u olacak bir oranda katılmış ve sonra metal bir ıspatula yardımıyla elle üç dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra bu sülfürlü asfalt

karışım, teneke yağ kutularına aktarılmış, sıcaklık ve hava etkilerine maruz bırakılmadan önce bir günlük bir süre için depolanmıştır.

Hazırlanan bu numunelerin, oda sıcaklığında soğumaları sırasında, hazırlanışlarından takriben iki saat sonra elle yapılan muayenelerinde lastiğimsi, kauçuk bir koyulukta olmaları da dikkatleri çekmiştir. Ancak ertesi gün, aynı işlemin 85-100 penetrasyon dereceli asfalt ile yapılması, bu kıvamın da, kullanılan asfaltın cinsine göre farklılık gösterebileceğini gözler önüne sermiştir.

8.1.2.2 Çevre Şartlarına Maruz Kalma

Kullanılacak sülfür ve asfaltın karıştırılma işlemi, sabah saatlerinde yapılmış ve ertesi sabaha kadar herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Böylece oda sıcaklığındaki depolama işlemi, yaklaşık olarak 20 ila 24 saat sürmüştür.

Daha önceki tarihlerde yapılan araştırmalarda, numunelerin, laboratuar ortamında çevre etkilerine maruz kalma işlemi, orijinal adı "Rolling Thin Film Oven Test" (RTFOT) olan ve Hveem tarafından yayınlanan ve Arizona deneyi 501 kurallarına göre uygulanan bir deney ile yapılmaktaymış [74]. Ancak şimdi ele alınan bu çalışmanın yapıldığı tarihte, bu işlem, AASHTO'nun belirlediği kurallar çerçevesinde yapılmaktadır. Bu işlemde göze çarpan en belirgin farklılık ise fırının içindeki havanın, sirküle edilmesi için bir fan kullanılmasıdır. İşlem, 35 gr.'lık numunelerin, 75 ve 225 dakikalık periyotlarla 163 C dereceye ısıtılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sırada malzemenin açığa çıkan yüzeyi, fan yardımıyla üflenen sıcak havanın, malzemenin üzerinde bulunan eski havayı itmesi yardımıyla sürekli olarak yenilenmektedir. Bu işlemin hemen ardından numuneler, viskozite ölçümleri için hazırlanmaktadır.

Sülfürün belirlenen 149-150 C derecelik sıcaklığı, yaklaşık olarak 13 C derece aşılmış olmasına rağmen herhangi bir hidrojen sülfid (H_2S) gazı oluşumuna veya kristalizasyona rastlanmamıştır.

8.1.2.3 Viskozite Ölçümleri

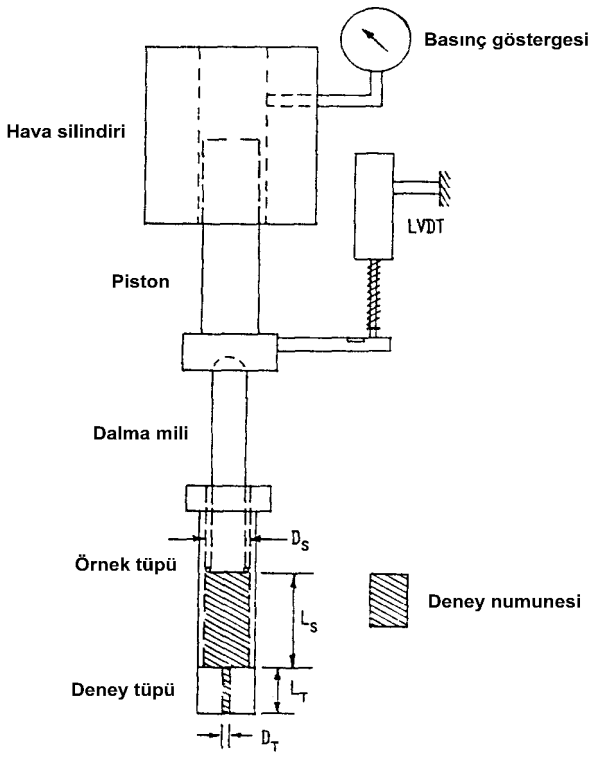
Viskozite ölçümü işlemlerinde, öncelikle göreli viskozite değerlerindeki sertleşmeye veya yaşlanmaya karşı olan duyarlılıklar, birbirleriyle mukayese edilmişlerdir. Bu göreli viskozite, aslında çevre etkilerine maruz bırakılan numunelerin viskozite değerlerinin, ısıtmadan önceki havanın varolduğu ortamdaki

numunelerin, viskozitelerine olan oranıdır. Bu oran aynı zamanda, yaşlanma indeksi olarak da adlandırılır.

Viskozitenin ölçülmesi için Pennsylvania'da bulunan Cannon Instrument Company isimli şirketten satın alınmış, Schweyer Reometresi adında bir viskometre kullanılmıştır. Şekil 8.1'de bu viskometrenin şematik bir çizimi görülmektedir [75,76].

Bu reometre, sabit basınç prensibiyle çalışmaktadır. Schweyer reometresi, asfaltların yüksek viskozite ölçüm işlemlerini hızlandırmak için geliştirilmiştir. Aletin temel parçaları ve çalışma şekli şöyledir:

Şekil 8.1'de de görüldüğü gibi, bir hava silindiri ve piston, diğer bir piston olan dalıcı mili hareket ettirmektedir. Bu mil, numune tüpünde bulunan asfaltı iterek çok ince, kılcal bir deliğin içinden geçmeye zorlamaktadır. Bu ince kılcal delik de deney tüpü olarak adlandırılmaktadır. Bu işlemler sırasında kesme gerilmesi ise, bilinen hava basıncı ile pistonun, dalma milinin, numune ve deney tüpünün ebatları yardımıyla hesaplanmaktadır. Kesme oranı da dalma milinin ölçülen hızı vasıtasıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 8.1 Schweyer Reometresi şeması

Bu çalışmada her karışıma iki deney veya ölçüm yapılmış, her numuneye de en az dört kesme gerilmesi değeri verilmiştir.

Kesme gerilmesi ile kesme oranı arasındaki ilişki, aşağıda parametreleri belirtilen bir güç denklemi aracılığıyla tanımlanmaya çalışılmıştır.

$$\tau = I_O . \gamma^C \qquad (8.1)$$

Formülde;

τ = kesme kuvveti, (Pa)

γ = kesme oranı, (sn^{-1})

I_0 = 10 C derecede, γ'nun 1'e eşit olduğu değerdeki τ değeri,

C = logaritmik koordinat sisteminde düz çizginin eğimidir.

Bu denklem üzerinde yapılan çalışmalarda, kesme oranı γ'nun 1'e çok yakın bir değer olduğu görülmüş ve bu sonuca göre Schweyer'in yayınını onaylanarak I_0 olarak adlandırılan değerin, malzemenin viskozitesi olduğu kararına varılmıştır [76].

Deney değişkenlerinin uygulanma formatı ise aşağıdaki Tablo 8.2'de gösterilmiştir.

Tablo 8.2 Deney formatı

Asfalt tipi	AR-1000						AR-4000					
Sülfür içeriği, (%)	0			30			0			30		
Bekletme süresi, (dk.)	0	75	225	0	75	225	0	75	225	0	75	225
Deney sıcaklığı, (C^0)												
15 C^0	2	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-
25 C^0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
50 C^0	2	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-

8.2 Sonuçlar ve Tartışmalar

Arka sayfada görülen Tablo 8.3, az önce bahsedilen τ denkleminde kullanılan parametreleri ve sahip olduğu şartları göstermektedir.

Tablo 8.3 $\tau = I_0 . \gamma^c$ formülünü hesaplamak için gerekli veriler

Asfalt derecesi	Sülfür içeriği, (%)	Deney sıcaklığı, (C^0)	Bekletme süresi, (dk.)	I_0 (10^4 Pa)	c	n	R^2
AR-1000	0	15	0	473.6	1.526	8	0.943
			75	617.5	1.250	8	0.967
			225	2300	1.258	8	0.839
		25	0	8.395	1.102	8	0.999
			75	18.25	1.135	8	0.997
			225	54.27	1.030	8	0.993
		50	0	0.4834	0.398	7	0.885
			75	0.5257	0.532	7	0.914
			225	0.6547	0.603	6	0.966
	30	15	0	63.05	1.296	8	0.995
			75	222	1.165	8	0.967
			225	3101	1.102	8	0.953
		25	0	3.337	0.892	8	0.991
			75	9.927	0.983	8	0.980
			225	46.32	0.898	8	0.982
		50	0	0.4179	0.368	5	0.960
			75	0.4518	0.455	6	0.920
			225	0.7761	0.574	8	0.967
AR-4000	0	25	0	50.33	1.256	9	0.992
			75	142.6	1.482	6	0.808
			225	181.6	0.798	8	0.879
	30	25	0	9.254	1.086	8	0.989
			75	49.07	1.020	8	0.994
			225	525.1	0.911	8	0.997

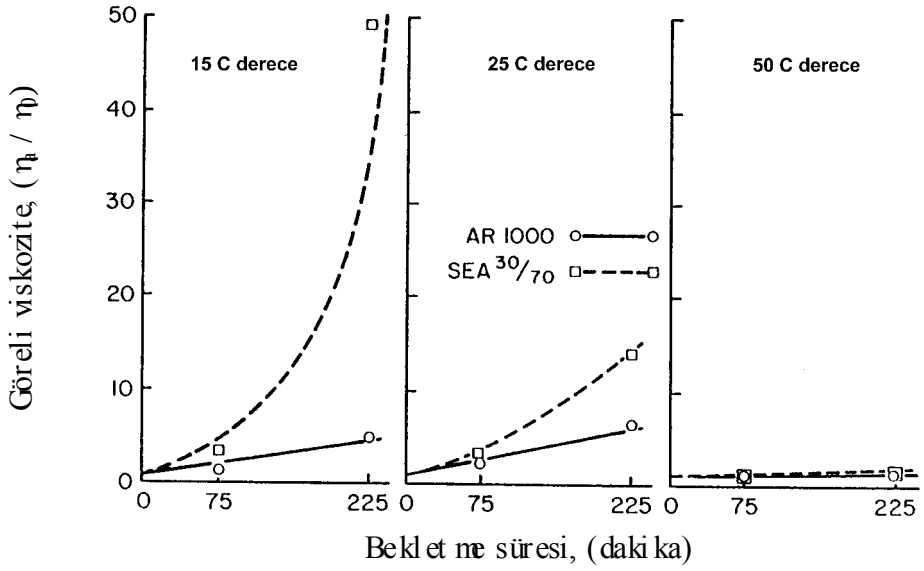
Tablo 8.4 ise, hem salt asfaltın hem de sülfürlü asfaltın göreli viskozite değerlerini göstermektedir. Bu değerlere bakıldığında, en yüksek viskozite değerine, çevre etkilerine maruz bırakılan sülfürlü asfalt karışımların, sahip olduğu

görülmektedir. Ayrıca ilave sülfür katkısının AR-4000 cinsi asfaltlar için AR-1000 cinsi asfaltlara göre daha zararlı olduğu görülmüştür.

Tablo 8.4 Yaşlandırma işleminin ardından asfalt ve sülfürlü asfaltın göreli viskozite değerleri

Asfalt derecesi	Deney sıcaklığı, (C^0)	Bekletme süresi, (dk.)	Göreli viskozite, η_a / η_b	
			Asfalt	30/70 SEAM
AR-1000	15	0	1.00	1.00
		75	1.30	3.52
		225	4.86	49.2
	25	0	1.00	1.00
		75	2.17	2.94
		225	6.46	13.9
	50	0	1.00	1.00
		75	1.09	1.08
		225	1.35	1.85
AR-4000	25	0	1.00	1.00
		75	2.83	5.30
		225	3.61	56.7

Bir sonraki sayfada görülen Şekil 8.2'de üç ayrı sıcaklıkta gerçekleştirilmiş, AR-1000 cinsi asfalt kullanılan karışımların göreli viskoziteleri ile çevre etkilerine maruz bırakılma süreleri arasındaki ilişki görülmektedir. Asfaltların yaşlanma karakteristikleri, göreli viskozite değerleri ile açıklanmıştır. Şekilde, deney sıcaklığının düşürülmesi ile göreli viskozite değerlerinin ve iki karışım arasındaki farkların arttığı görülmektedir.



Şekil 8.2 Beklet me süresi ve deney sıcaklığının, asfalt ve sülfürlü asfaltın göreli viskozite değerine olan etkisi

Arka sayfadaki Tablo 8.5'te ise farklı sıcaklıklardaki viskozite değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken sıcaklık ve viskozite arasındaki;

$$\eta = I \cdot t^{-b} \qquad (8.2)$$

ilişkisi kullanılmıştır. Bu formülde;

η = 1 sn^{-1} kesme oranındaki viskozite, (Pa-sn)

t = sıcaklık, (C derece)

I ve b = regrasyondan elde edilen malzeme sabitleridir.

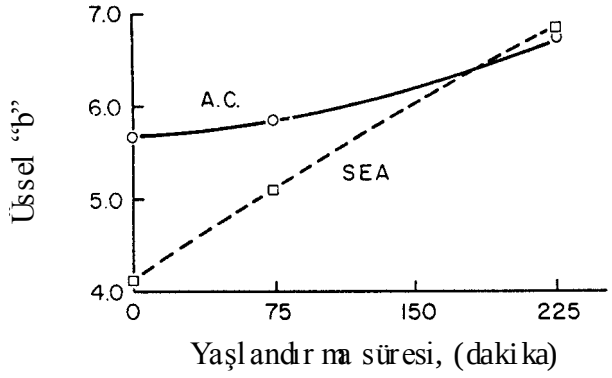
Tablo 8.5 $\eta = I \cdot t^{-b}$ olması durumunda asfalt ve sülfürlü asfalt için sıcaklık-viskozite ilişkisi

Sıcaklık, (C^0)	Asfalt, AR-1000 Denklem & η (10^4 Pa-s.)	30/70 SEAM Denklem & η (10^4 Pa-s.)	Viskozite oranı SEAM/ AC
Yaşlandırma olmadan			
	$\eta = 1.291x10^{13}.t^{-5.628}$	$\eta = 3.062x10^{10}.t^{-4.099}$	
15	310.4	46.26	0.149
25	17.51	5.700	0.325
50	0.3541	0.3326	0.939
60	0.1269	0.1575	1.24
75 dakikalık yaşlandırma ardından			
	$\eta = 3.614x10^{13}.t^{-5.828}$	$\eta = 1.879x10^{12}.t^{-5.107}$	
15	506	185	0.366
25	25.8	13.6	0.527
50	0.454	0.395	0.870
60	0.157	0.156	0.994
225 dakikalık yaşlandırma ardından			
	$\eta = 1.820x10^{15}.t^{-6.757}$	$\eta = 2.570x10^{15}.t^{-6.831}$	
15	2057	2377	1.15
25	65.19	72.54	1.11
50	0.6027	0.6372	1.06
60	0.1758	0.1834	1.04

Şekillerde görülen η-t arasındaki denklemeler, AR-1000 cinsi asfalt kullanılarak, hem sülfürlü hem de sülfürsüz durumda karışımların sıcaklık ve hava şartlarına maruz bırakılmadan önce ve sonra olmak üzere belirlenmiştir.

Salt asfalt ve sülfürlü asfalt arasında yapılan mukayeseye göre, sülfürlü asfaltların, özellikle sıcaklık ve hava şartlarına maruz bırakılmasının 0 ila 75'inci dakikaları arasında, sıcaklığa karşı olan duyarlılıklarının salt asfaltlara göre daha düşük olduğu görülmüştür.

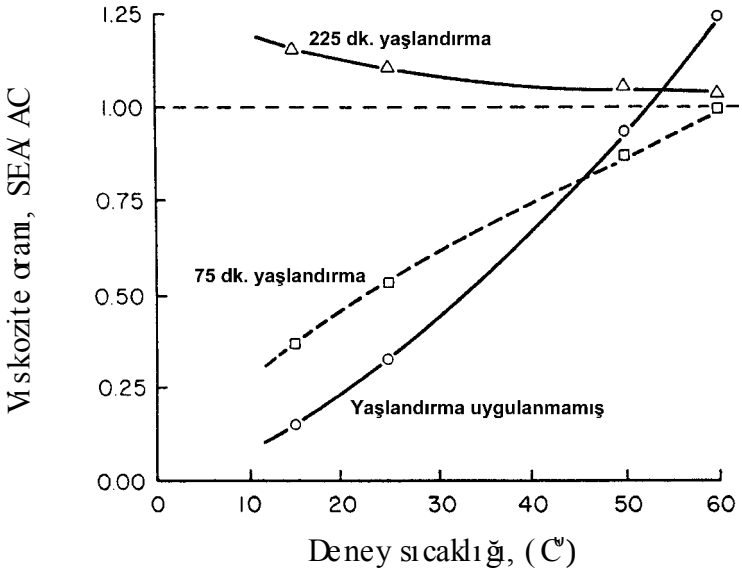
Bir sonraki sayfada verilen, Şekil 8.3'te ise, bu farkın, yaşlanma süresinin artmasıyla azaldığı, hatta tamamen kaybolduğu görülmektedir.



Şekil 8.3 Yaşlandırmanın sıcaklık duyarlılığına etkisi

Az önce değinilen Tablo 8.5'te görülen viskozite değerlerine göre 15 C derecede henüz yaşlandırılmamış sülfürlü karışımın, salt asfaltlı karışıma göre yaklaşık olarak 1/7 oranında bir viskoziteye sahip olduğu görülmektedir. Ancak sıcaklık 60 C dereceye çıkarıldığında sülfürlü karışımın viskozite oranı, salt asfaltınkine göre 1/4 oranında bir fazlalık göstermektedir. Fakat bu düşük veya yüksek sıcaklık değerlerinden elde edilebilecek bazı yararlar, numunelerde 225 dakikalık bir yaşlandırmanın ardından viskozite oranlarının 1 civarında rakamlarda seyretmesi ile ortadan kalkmaktadır. 225 dakikalık bir yaşlandırmanın ardından görülmektedir ki, her iki karışımın da sıcaklığa karşı olan duyarlılıkları yaklaşık olarak aynı görülmekte, sadece sülfürlü karışımların viskozite değerleri, salt asfaltınkilere göre, 15 C derecede yaklaşık olarak 1/6 oranında, 60 C derecede ise oldukça az bir oranda fazlalık gösterebilmektedir. Buradan da, sülfürlü asfalt karışımların, sıcaklık azaldıkça salt asfalt karışımlara göre viskozite değerlerinin arttığı, yani daha elastik davrandıkları ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık ve hava şartlarına maruz kalmanın numunelerin viskozite oranına yaptığı etki, arka sayfadaki Şekil 8.4'te gösterilmiştir.

Deneylerin yapılması esnasında uygulanan yaşlandırma işlemlerinde, sıcaklık ve hava şartlarına 75 dakika boyunca maruz bırakılan numunelerin, gerçek hayatta karışımların, karıştırıcıda karıştırılması ve serilmesi işlemlerini, 225 dakikalık bir yaşlandırmanın ise hizmet ömrü dahilinde geçecek birkaç ayı temsil ettiği varsayılmıştır.



Şekil 8.4 Yaşlandırmanın viskozite oranlarına (SEA/ AC) etkisi

8.3 Bölüm Sonuçları

1. Yaşlandırma işlemlerine henüz tabi tutulmayan numunelerden, 15, 25 ve 55 C derecelik tüm deney sıcaklıkları için sülfürlü karışımların orijinal viskozite değerlerinin, salt asfaltın viskozite değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

2. Ancak daha sonra yapılan her iki süredeki yaşlandırma işlemlerinin ardından, tüm deney sıcaklıkları için sülfürlü karışımların göreli viskozite değerlerinin, salt asfaltınkilere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

3. Sülfürlü asfaltların sıcaklık-viskozite duyarlılıklarının, yaşlandırma işlemleri gerçekleştirilmeden önce salt asfaltlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak 225 dakikalık bir yaşlandırmanın ardından, bu duyarlılık değerlerinin, yaklaşık olarak birbirlerine eşit olduğu görülmüştür.

4. Sülfürlü asfalt karışımların yaşlandırma işlemlerine başlanmadan önceki viskozite değerleri, düşük sıcaklıklarda, düşük olarak tespit edildiyse de yaşlandırma işlemlerinin başlamasıyla birlikte bu değerler, tam tersine dönmüştür. Yani, sülfürlü asfalt karışımlar, yaşlandırma işlemlerinin ardından düşük sıcaklıkta yüksek, yüksek sıcaklıkta da düşük viskozite değerleri sergilemişlerdir.

9. SÜLFÜRLÜ ASFALT KARIŞIMLAR ile ONTARIO, KANADA'DA YAPILAN DENEYSEL AMAÇLI, TAM ÖLÇEKLİ ÜÇ YOL İNŞAATI

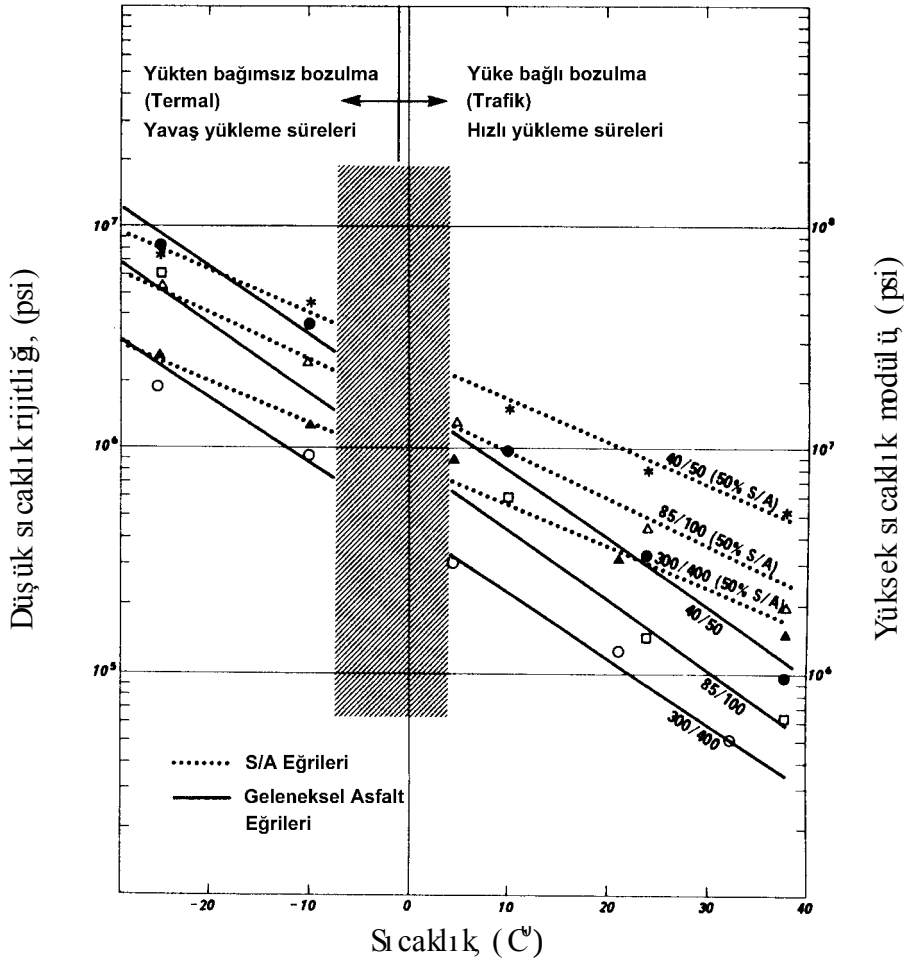
Kanada'nın Ontario kentinde yapılan üç ayrı yol inşaatı, o tarihe kadar yapılmış ve bizim ve şimdiye dek incelediğimiz laboratuar ve diğer arazi çalışmalarını doğrulamak ve sülfürlü karışımların davranış ve performansları hakkında daha ayrıntılı bilgilere sahip olabilmek amacıyla yapılmış en geniş kapsamlı deneysel yol inşaatıdır. Elementel sülfür, Kanada'nın batısındaki bölgelerde oldukça büyük miktarlarda üretilmektedir. Bu üretim, doğal gaz ve petrol ürünlerinin desülfürizasyonu yani kükürdünün çıkarılması işleminin bir sonucudur. Bu işlemler, sıkılaştırılmış çevresel ve kirlilik karşıtı gerek, ihtiyaç ve kurallar gereğince uygulanmaktadır. Böylece bu tez çalışmasının temel hammaddesi olan sülfürün kaynakları da artmaktadır. Ancak bu artışa rağmen bu kaynakların da sınırsız olmadığı ve israf edilmemesi gerektiği açık bir gerçektir.

Sülfür maddesinin kullanılabileceği, faydalanılabileceği kullanım alanları bulmak üzere bir çok araştırma ve çalışmalar yapılmaktadır [77]. Bilindiği gibi sülfürün bir kullanım alanı da, ki bu tez konusunun temelidir, asfalt betonunun içerisinde yer alabilmesidir. Belli bir miktar asfaltın yerine katılan sülfürler, daha önce değinilen ve irdelenmeye devam edilecek faydalı yanları ile yol inşaatlarında kullanılmaktadır. Aşağıda bu yönde yapılmış üç çalışma sıralanmıştır.

- Birinci çalışmada, sülfürün asfalt betonu içerisindeki boşlukları doldurması düşünülmüştür. Anlaşılacağı gibi bu çalışma için büyük miktarlarda ve sıvı halde sülfüre ihtiyaç vardır [1].
- İkinci işlem, sülfürü bir emülsiyonlayıcı (emulsifier) yardımı ile asfalt içerisinde emülsiyonlamak, başka bir değişle sübyeleştirmektir [50].
- Üçüncü işlemise, yine sülfürün asfalt içerisinde emülsiyonlanmasıdır, ancak bu kez herhangi bir emülsiyonlayıcı kullanılmamaktadır [2,47].

Bu çalışmayı asıl ilgilendiren, yukarıdaki sonuncu maddedir. Bu yönde yapılan araştırma ve çalışmalar da sülfürün, asfalt betonunun rijitlik özelliklerini modifiye ettiği, düşük sıcaklıktaki akma özelliklerinin salt asfaltınki ile yaklaşık olarak aynı kaldığı, yüksek sıcaklıktaki özelliklerinin de bir veya daha çok derece sertlikteki salt asfaltınki ile benzer özellikler gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Bu özellikler, daha önce de değinilen ve incelenen, bu çalışmada da bazı ilave çıkarımlarda bulunulabilecek Şekil 9.1'deki grafikte daha net ve belirgin bir şekilde görülmektedir [47]. Burada 300-400 penetrasyonlu asfalt ile %50 oranında sülfürden meydana gelen karışımın mükemmel denebilecek düzeyde düşük sıcaklık akma özelliklerine ve yüksek sıcaklıkta da daha sert derecedeki salt asfaltlarınki kadar, hatta bazı şartlarda daha iyi rijitliğe sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 9.1 Sülfürlü asfalt karışımların sıcaklık duyarlılığı

Böyle özellikler, arazi uygulamalarında daha yumuşak asfalt çimentosu kullanılarak düşük sıcaklıktaki çatlamalara karşı olan direnci arttırırken, yüksek sıcaklıklardaki oluklanma derinliklerinin azaltacak rijitliğe sahip yol inşaatlarının yapılabilmesine imkan tanıyacaktır.

Bu zamana kadar yapılan araştırma ve laboratuar çalışmalarının Ontario'daki deneysel nitelikli yol inşaatlarından elde edilecek sonuçlarla da desteklenmesi ile asfalt betonunda sülfür kullanımının aşağıda belirtilen dört temel yararı belirginleşmektedir.

1. Doğada fazladan bulunan değerli sülfür kaynaklarından yararlanılmış olacaktır.
2. Gitgide pahalılaşan ve nadirleşen bir enerji kaynağı olan asfalt ile belli ölçü ve oranlarda sülfür maddesinin yer değiştirmesiyle önemli bir enerji kaynağından tasarruf edilmiş olacaktır.
3. Sülfür maliyetinin, asfaltın maliyetine göre daha az olması nedeniyle sülfür kullanılan asfalt betonunun da maliyeti düşürülmüş olacaktır.
4. Bu çalışmada da doğrulamaya ve onaylamaya çalışılan, düşük sıcaklıklarda daha az çatlayan, yüksek sıcaklıklarda da daha az oluklanan mükemmel bir ürün elde edilmiş olacaktır.

Bu araştırma ve çalışmalar üzerine Ontario Ulaştırma ve İletişim Bakanlığı, böyle bir ürünün inşa edilecek bazı yollarda denenmesini kararlaştırmıştır.

Biraz önce bu çalışmanın başında da bahsedildiği gibi herhangi bir emülsiyonlayıcı yardımı olmaksızın, sadece sülfürün asfalt içerisine katılmasıyla elde edilen ürünün, bu deneysel amaçlı yollarda kullanılması kararlaştırılmıştır. Aşağıda ayrıntılı özelliklerine değinilecek ve Ontario'da yapılan deneysel amaçlı bu üç adet yol, dört senelik bir sürede inşa edilmiştir.

Şimdi bu yollar, yapılış amaçları ve genel tanımlamaları sırasıyla incelenecektir:

9.1 Deneysel Yollara Ait Tanımlamalar

9.1.1 Birinci Yol

Yapılan ilk yol, 1975 senesinde yeniden inşa edilen bir yolun bir kolu, bir parçası olacak şekilde inşa edilmiştir. O zamanlarda sülfürün, karışımın rijitliğine olan etkileri hakkında çok geniş veya ayrıntılı bilgi mevcut değildir. Şimdiye kadar yapılan ve daha önce de bahsedilen çalışmalara dayanan verilerden yararlanılmış ve aslında bu yol, rijitlik dışındaki diğer özelliklerin daha ayrıntılı bir biçimde belirlenebilmesi için inşa edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda, 40/60 ve 50/50 olmak üzere iki farklı sülfür/asfalt oranı ve yüksek ve düşük olmak üzere de iki farklı bağlayıcı seviyesi kullanılmıştır. Bu yola ait yapılan normal tasarımda soyulma veya sökülmeye karşı bir malzemenin ilavesi bulunmaktadır. Ancak sülfürlü karışımların, soyulma veya sökülmeye karşı herhangi bir katkı maddesine ihtiyacının olmadığı bilindiğinden bu katkı tasarımdan çıkarılmıştır.

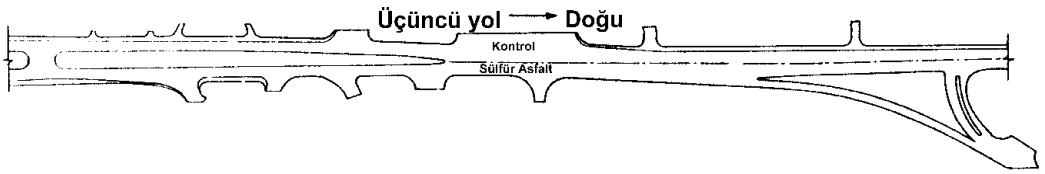
Yapılan bu yol ve yeniden inşa edilen ana yoldan her ikisinde de 150-200 penetrasyon dereceli asfalt çimentosu kullanılmıştır. Sadece yolun bitimindeki kısa bir bölümüne, sülfürle karıştırıldığı zamanki reaksiyonunu belirleyebilmek için 300-400 penetrasyon dereceli asfalt çimentosundan meydana gelmiş karışım serilmiştir. Bu yoldaki trafik, yıllık ortalamaya göre günlük 950 araç civarındadır ve bu rakamın %20'si ağır taşıtlara aittir.

9.1.2 İkinci Yol

İkinci yol da, tekrar inşa edilen yolun bir parçası olarak 1977 senesinde, şehrin kuzey kısmında inşa edilmiştir. Bu yolun inşa edilmesindeki ana amaç, her ikisi de ağırlıkça %40 oranında sülfür içeren, normal değerler denebilecek 150-200 penetrasyona sahip asfalt çimentosunu yumuşak kıvamdaki 300-400 penetrasyonlu asfalta karşı denemektir. Her iki tip asfalt için de 38 mm ve 76 mm olmak üzere iki ayrı tabaka kalınlığı uygulanmıştır. Ayrıca havanın ve yolun sıcaklığını ölçebilen ve kaydedebilen ekipmanlar da kullanılmıştır. Bu yolun da, yıllık ortalamalara göre trafik kompozisyonu, %20'si ağır taşıtlardan oluşmak üzere günlük 1150 araç olarak belirlenmiştir.

9.1.3 Üçüncü Yol

İkinci yoldan elde edilen cesaretlendirici sonuçlara dayanarak, ikinci yolun bitirilmesinin bir yıl ardından şehrin daha sıcak olan güney kısmına, ağır trafik şartlarına göre üçüncü bir yol inşa edilmiştir. Bu yol, tam ölçekli, diğerlerine göre daha fazla ağır taşıt yüzdesine sahip ve senenin her günü bu özellikleri taşıyan bir yoldur. Bu yoldaki yıllık ortalamaya göre günlük trafik miktarı, 11600 taşıttan oluşmaktadır. Bu bölgede genellikle normal değerler dahilinde sayılan 85-100 penetrasyonlu asfalt kullanılmıştır. Daha yumuşak bir asfalt da, termal çatlakların azaltılmasına yardımcı olacaktır. Sülfürlü asfalt karışımları, tam ve kusursuz bir denemeye tabi tutabilmek amacıyla 300-400 penetrasyona sahip asfalt çimentosuna ağırlıkça %40 oranında sülfür katılarak bir karışım meydana getirilmiştir. Bu yol, dört şeritten meydana gelen ve iki bölgeye ayrılan bir yoldur. Bu yolun doğuya doğru giden iki şeridi, 300-400 penetrasyonlu asfalt ile ağırlıkça %40 oranında sülfür içeren karışımla, batıya giden iki şeridi ise kontrol amacıyla 85-100 penetrasyonlu salt asfaltla kaplanmıştır. Burada asfalt üstyapının kalınlığı 127 mm olarak belirlenmiştir. Bu yola ait basit bir diyagram da aşağıdaki Şekil 9.2'de görülmektedir.



Şekil 9.2 Üçüncü yola ait basit bir plan

9.2 Karışım Tasarımı Verileri

Yolların ikisinde HL-2 olarak adlandırılan, kum ve asfalt karışımından oluşan bir bağlayıcı, tümünde de HL-4 ismindeki genel amaçlı bir bağlayıcı içeren karışımlar kullanılmıştır. Bu iki karışıma ait özellikler arka sayfadaki Tablo 9.1'de verilmiştir.

Tablo 9.1 Asfalt betonunun özellikleri

Elek analizi	HL-2	HL-4
16 mm (5/8 inch)	-	100
12.5 mm (1/2 inch)	-	82-95
9.5 mm (3/8 inch)	100	58-83
4.75 mm (No. 4)	85-100	40-67
2.36 mm (No. 8)	70-90	28-67
1.18 mm (No. 16)	50-75	16-60
0.6 mm (No. 30)	30-55	8-47
0.3 mm (No. 50)	15-35	4-27
0.15 mm (No. 100)	5-16	1-10
0.075 mm (No 200)	3-8	0-7
Asfalt içeriği, (ağırlıkça %)	6.0-10.0	5.0-7.0
Marshall stabilitesi, ($60\,C^0$'de, lb.)	500	1200
Marshall akma değeri, (0.01 inch)	9	9
Hava boşluğu, (hacimce %)	2-3	2-4

9.2.1 Birinci Yol

VMA kurallarına göre, agrega olarak kullanılan kum ve taşa başka bir elenmiş kumun da (scalped) eklenmesi gerekli kılınmıştır. Bu üç malzemeye ait gradasyonlar, Tablo 9.2'de görülmektedir.

Tablo 9.2 Birinci yola ait agrega gradasyonları

Elek	Taş	Kum	Elenmiş kum
16 mm (5/8 inch)	100	-	-
12.5 mm (1/2 inch)	76.2	100	-
9.5 mm (3/8 inch)	41.8	99.7	100
4.75 mm (No. 4)	4.6	94.6	97
2.36 mm (No. 8)	2.1	83.7	79.1
1.18 mm (No. 16)	1.7	66.4	60.7
0.6 mm (No. 30)	1.4	42.4	45.0
0.3 mm (No. 50)	1.3	19.9	29.4
0.15 mm (No. 100)	1.0	5.9	15.3
0.075 mm (No 200)	0.7	1.7	7.7

HL-2 ve HL-4 karışımlar ve karışımgradasyonları da aşağıdaki Tablo 9.3'te verilmiştir.

Tablo 9.3 Birinci yola ait agrega karışımformülü ve gradasyonları

Elek	HL-2	HL-4
16 mm (5/8 inch)	-	100
12.5 mm (1/2 inch)	100	89.3
9.5 mm (3/8 inch)	99.8	73.7
4.75 mm (No. 4)	95.6	54.4
2.36 mm (No. 8)	81.9	46.5
1.18 mm (No. 16)	64.1	36.7
0.6 mm (No. 30)	43.4	24.2
0.3 mm (No. 50)	23.7	12.6
0.15 mm (No. 100)	9.7	4.7
0.075 mm (No 200)	4.1	1.9
Taş, (ağırlıkça %)	-	45
Kum, (ağırlıkça %)	60	44
Elenmiş kum, (ağırlıkça %)	40	11

Bu yolun genelinde kullanılan asfalt, 150-200 penetrasyona sahiptir. Yolun sonlarına doğru, iki kısa bölümde 300-400 penetrasyonlu asfalt da kullanılmıştır. Bu asfalt çimentolarının özellikleri de Tablo 9.4'te görülmektedir.

Tablo 9.4 Asfalt çimentosunun özellikleri

Özellikler	Derece					
	85-100		150-200		300-400	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Parlama noktası, (C^0)	450	-	425	-	350	-
25 C^0'de penetrasyon	85	100	150	200	300	400
135 C^0'de viskozite, (cs.)	280	-	200	-	120	-
RTFOT deneyi (163 C^0'de, 5 saatte, 50 gr. Nmn. ile)						
Ağırlıkça %kayıp	-	0.85	-	1.3	-	1.3
25 C^0'de %geri dönebilen penetr.	47	-	42	-	35	-
Kalan kısmın 25 C^0'deki dükt., (mm)	75	-	100	-	100	-
4 C^0'de düktilite, (10 mm./dk.)	6	-	10	-	15	-
Çözünürlük, (%)	99.5	-	99.5	-	99.5	-

Ayrıca bu birinci yolda, aynı bağlayıcı hacmine bağlı kalmak üzere 50/50 oranında sülfür/asfalt bağlayıcılı ve 40/60 oranında sülfür/asfalt içeren yüksek bağlayıcılı karışımlar da kullanılmıştır. Erimiş sülfürün özgül ağırlığının yüksek oluşu ve bu malzemenin 50/50'lik karışımlarda daha fazla miktarlarda kullanılması nedeniyle yüksek bağlayıcılı karışımların yüzde oranları daha farklıdır. Bu çalışmada kullanılan erimiş sülfürün tam erime noktasındaki özgül ağırlığı 1.81 olarak tespit edilmiştir. Düşük bağlayıcılı karışımda, aynı agrega karışımını içermekte ancak daha düşük bir bağlayıcı yüzdesi kullanılmaktadır. Tüm bu karışımlara ait bilgiler, Tablo 9.5 ve 9.6'da görülmektedir. Burada belirtilen bağlayıcı yüzde oranının toplam karışımın yüzdesi olduğu belirtilmelidir. 300-400 penetrasyonlu asfalt ile yapılan karışımlara ait değerler, 150-200 penetrasyonlu asfalt ile yapılan karışımlarınki ile benzer olduğundan ayrıca gösterilmemiştir.

Tablo 9.5 Birinci yola ait formül ve deneyler, HL-2 kum-asfalt karışımlar, 150-200 penetrasyonlu asfalt çimentosu

Özellikler	50/50	40/60	40/60	0/100
	Yüksek bğl.	Yüksek bğl.	Düşük bğl.	Kontrol
Taş, (ağırlıkça %)	-	-	-	-
Kum, (ağırlıkça %)	60	60	60	60
Elenmiş kum, (ağırlıkça %)	40	40	40	40
Sülfür/asfalt oranı	50/50	40/50	40/50	0/100
Bağlayıcı içeriği, (ağırlıkça %)	9.8	9.0	7.3	7.3
Hava boşluğu, (hacimce %)	4.8	4.4	8.5	4.5
VMA, (hacimce %)	22.2	21.2	21.7	21.1
60 C^0'de Marshall stabilitesi, (lb.)	2588	1511	1304	969
Marshall akma değeri, (0.01 inch)	11.5	8.5	8.0	7.0

Tablo 9.6 Birinci yola ait formül ve deneyler, HL-4 yüzey karışımları, 150-200 pen. Asfalt çimentosu

Özellikler	50/50	40/60	40/60	0/100
	Yüksek bğl.	Yüksek bğl.	Düşük bğl.	Kontrol
Taş, (ağırlıkça %)	45	45	45	45
Kum, (ağırlıkça %)	44	44	44	44
Elenmiş kum, (ağırlıkça %)	11	11	11	11
Sülfür/asfalt oranı	50/50	40/50	40/50	0/100
Bağlayıcı içeriği, (ağırlıkça %)	6.7	6.2	5.0	5.0
Hava boşluğu, (hacimce %)	3.7	4.1	6.8	4.6
VMA, (hacimce %)	16.1	16.0	16.2	16.4
60 C°'de Marshall stabilitesi, (lb.)	4288	2280	1706	1278
Marshall akma değeri, (0.01 inch)	10.5	9.5	8.0	8.5

9.2.2 İkinci Yol

İkinci yolda sadece bir tane sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışım kullanılmıştır. Değişkenler, sadece asfalt derecesi ve üstyapı kalınlığıdır. Yine yolun son kısmına kontrol amaçlı standart bir asfalt karışımı inşa edilmiştir. Karışımdaki agrega gradasyonu ve HL-4 karışımı için seçilen agrega içerikleri Tablo 9.7'de gösterilmiştir. Bu yolda HL-2 olarak adlandırılan bağlayıcı hiç kullanılmamıştır.

Tablo 9.7 İkinci yola ait agrega ve HL-4 karışımı gradasyonları

Elek	Taş	Kum	Elenmiş kum	Karışım
16 mm (5/8 inch)	100	-	-	100
12.5 mm (1/2 inch)	84.5	-	-	92.8
9.5 mm (3/8 inch)	55.1	100	100	79.1
4.75 mm (No. 4)	9.2	95.1	95.2	55.0
2.36 mm (No. 8)	3.4	83.9	74.0	45.0
1.18 mm (No. 16)	2.7	65.7	56.9	35.2
0.6 mm (No. 30)	2.3	41.2	43.1	23.3
0.3 mm (No. 50)	1.8	13.0	28.1	9.9
0.15 mm (No. 100)	1.4	3.7	16.5	4.4
0.075 mm (No 200)	0.9	1.2	8.7	2.1
Taş, (ağırlıkça %)	-	-	-	45
Kum, (ağırlıkça %)	-	-	-	42
Elenmiş kum, (ağırlıkça %)	-	-	-	13

Yapılan bu çalışmada, 150-200 ve 300-400 penetrasyonlu asfaltlar, 38 ve 76 mm olmak üzere iki ayrı üstyapı kalınlığında kullanılmıştır. Karışımlara ait karışım tasarım formülasyonları ve laboratuar deney sonuçları, Tablo 9.8'de gösterilmiştir. Kullanılan asfalt çimentoları ise Tablo 9.4'te bilgileri görülen asfalt çimentolarınınki ile aynıdır.

Tablo 9.8 İkinci yola ait, HL-4 karışımının formül ve deney sonuçları

Özellikler	Kontrol	Sülfürlü asfalt	Sülfürlü asfalt
Taş, (ağırlıkça %)	45	45	45
Kum, (ağırlıkça %)	42	42	42
Elenmiş kum, (ağırlıkça %)	13	13	13
Asfalt derecesi	150-200	150-200	300-400
Sülfür/asfalt oranı	0/100	40/60	40/60
Bağlayıcı içeriği, (ağırlıkça %)	5.1	5.7	5.7
Hava boşluğu, (hacimce %)	5.6	6.0	6.2
VMA, (hacimce %)	17.2	16.5	16.7
60 C^0'de Marshall stabilitesi, (lb.)	1145	1633	1605
Marshall akma değeri, (0.01 inch)	8.9	9.5	8.0

9.2.3 Üçüncü Yol

Bu yol, ilk iki yoldan elde edilen çıkarım ve sonuçlara göre inşa edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi bu yol, oldukça yüksek oranda ağır taşıt kompozisyonuna, yüksek trafik kapasitesine sahiptir. Bu şartlar altında sülfürün, karışımdaki yumuşak asfalta olan etkilerinin ve verimlinin görülebilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Yol, bazı kısımlarda bölünmüş bazı kısımlarda ise bölünmemiş dört şeritten oluşmaktadır. Üstyapı, 25 mm'lik bir kumlu asfalt bağlayıcı içeren tabaka, iki adet 32'şer mm HL-4 karışımı tabakası ve 38 mm'lik bir HL-4 aşınma tabakası ile toplam 127 mm'lik bir üstyapı kalınlığına sahip olacak şekilde inşa edilmiştir.

Kullanılan asfalt çimentoları, yine Tablo 9.4'te değerleri verilen asfaltlardır. Agrega gradasyonları ve seçilen karışımlar, bir sonraki sayfadaki Tablo 9.9'da, kullanılan çeşitli karışımların özellikleri de Tablo 9.10'da gösterilmiştir.

Tablo 9.9 Üçüncü yola ait agrega gradasyonları ve karışımlar

Elek	Kaba agrega	Kum	Elenmiş kum	HL-2	HL-4
19 mm (3/4 inch)	100	-	-	-	100
16 mm (5/8 inch)	98.4	-	-	-	99.3
12.5 mm (1/2 inch)	83.3	100	100	100	93
9.5 mm (3/8 inch)	32.2	99	99.6	100	71
6.33 mm (No.3)	10.3	91.9	97.7	93	58
4.75 mm (No. 4)	4.0	83.4	83.0	87	50
2.36 mm (No. 8)	-	70.0	58.2	71	42
1.18 mm (No. 16)	-	54.7	40.3	55	33
0.6 mm (No. 30)	-	32.9	30.2	33	20
0.3 mm (No. 50)	-	8.9	22.2	13	6
0.15 mm (No. 100)	-	4.0	17.1	8	3
0.075 mm (No 200)	98.2	97.3	12.7	6	2.3
Kaba agrega, (ağırlıkça %)	-	-	-	-	42
Kum, (ağırlıkça %)	-	-	-	75	58
Elenmiş kum, (ağırlıkça %)	-	-	-	25	-

Tablo 9.10 Üçüncü yola ait HL-2 ve HL-4 karışımı özellikleri

Özellik	HL-2 Kontrol	HL-2 Sülfürlü asfalt	HL-4 Kontrol	HL-4 Sülfürlü asfalt
Asfalt derecesi, (pen.)	85-100	300-400	85-100	300-400
S/A oranı, (ağırlıkça %)	0/100	40/60	0/100	40/60
Bağlayıcı, (ağırlıkça %)	7.4	8.4	5.5	6.3
Hava boşluğu, (hacimce %)	5.0	5.0	3.0	3.0
VMA, (hacimce %)	19	19	17.4	17.4
60 C^0'de Marshall stabilitesi, (lb.)	930	930	1500	1500
Marshall akma değeri, (0.01 inch)	10.0	10.0	11.0	11.0

9.3 Karışım Üretimi

Elementel sülfürün, üstyapı karışımlarına katılması için, daha önce de adından söz edilen Gulf Oil Canada Limited şirketinin malzeme ve ekipmanları kullanılmıştır.

Bilindiği gibi bu işlemin en önemli özelliği, elementel sülfürün, sıvı haldeki sıcak asfalta katılarak bağlayıcıyı daha farklı bir şekilde nitelendirmek ve sülfürlü asfalttan oluşan yeni bir bağlayıcı elde etmektir. Sülfürlü asfalt bağlayıcı ve sülfürlü asfalt karışımlar ile yapılan oldukça ayrıntılı ve geniş laboratuar ve arazi deneylerine dayanarak, endüstriyel boyutlarda karışım üretiminin gerçekleştirilmesi için sülfür ve asfaltın önceden karıştırılması yöntemi tercih edilmiştir. Sülfürün, üstyapı karışımları ile birleştirilmesi, tekdüzeliği ortadan kaldırdığı gibi, sülfür dağılımını, sülfür/asfalt oranını, agreganın bağlayıcı ile kaplanmasını, sülfür ile asfaltın etkileşimini kontrol ederek aynı zamanda da karışım periyodunun azaltılması yönündeki yaklaşımları da bünyesinde barındırmaktadır [78].

Bu yol inşaatlarında, sülfürlü asfalt bağlayıcı esaslı sıcak karışımların üretilmesinde daha önce de adından bahsedilen, kısaca SAM olarak adlandırılan sülfür-asfalt karıştırma modülü kullanılmıştır. Bu ünite, karışım istasyonuna kolayca entegre edilmiş ve 120 ila 200 ton/saat kapasiteli plentlere adapte edilmiştir. Asfalt besleme ünitesi, by-pass olarak tabir edilen bir geri besleme sistemi uygulanarak, asfalt ve sülfür tankları ile bağlantılı olan sülfür–asfalt karıştırma modülü (SAM) ile yer değiştirilmiştir. Bu sülfür-asfalt karışım modülünün otomatik kontrol üniteleri, karışım plentinin besleme kontrol sistemleri ile ilişkilendirilmiştir. Böylece istenen sülfürlü asfalt veya salt asfalt bağlayıcı miktarı, karışım istasyonunun merkezi kontrol odasındaki plent operatörü tarafından rahatlıkla belirlenebilmekte ve ayarlanabilmektedir.

Sülfürlü asfalt bağlayıcının ve sıcak karışımın kalitesi, plente kurulan bir arazi laboratuarı aracılığıyla kontrol edilmektedir. Sülfürlü asfalt bağlayıcının dağılımı ise mikroskop yardımıyla izlenmektedir. Karışım üretiminde sülfür/asfalt oranı ve bağlayıcı içeriği de Troxler Nükleer Asfalt Ölçer cihazı ile kontrol edilmektedir. Bu cihaz, X-ışınları aracılığıyla belirtilen bu kriterleri ölçebilmektedir. İkinci yola ait tipik, sülfürlü asfalt sıcak karışım üretimi kontrol bilgileri, Tablo 9.11'de verilmiştir. Bu değerler, arazi çalışmalarından Troxler cihazı yardımıyla

alınmış sülfür ve asfalt miktarı okumalarına dayanmaktadır. Bu okumalar, ana laboratuarda solvent emilmesi ve X-ışını uygulaması yöntemleriyle yapılıp gereken hesaplamalarda kullanılmaktadır. Laboratuarda ayrıca, gradasyon tayini ile Marshall verilerinin saptanma işlemleri de gerçekleştirilmektedir.

Tablo 9.11 İkinci yol için yapılan sülfürlü asfalt karışımların üretim kontrol verileri

	Kullanılan malzeme		Sıcak krş.	Karışım	Bağlayıcı	Sülfür
	Asfalt, (lt.)	Sülfür, (lt.)	üretimi, (ton)	sıc., (C^0)	(ağ. %)	(ağ. %)
150-200 pen., %40 S, 38 mm HL-4, temel	17670	6519	540.8	124-146	5.7	39.8
300-400 pen., %40 S, 38 mm HL-4, temel	17675	6569	532.6	132-143	5.6	40.6
150-200 pen., %40 S, 38 mm HL-4, aşınma	34377	12820	1042	121-143	5.9	38.6
300-400 pen., %40 S, 38 mm HL-4, aşınma	26222	9678	800	129-138	5.9	41.4

9.4 Yolların İnşaatı

Daha önce de bahsedilen şekillerde üretilen sülfürlü asfalt karışımlar, diğer geleneksel sıcak karışımlar gibi taşınabilmekte, standart bir serici ile serilebilmekte ve standart yöntemlerle sıkıştırılabilmektedir. Tüm bu yollar için, sıkıştırma işlemlerinde önce 10-12 tonluk bir çelik onarım silindiri, ardından 9 tonluk lastik tekerlekli orta bir silindir ve son olarak yine 10-12 tonluk bir çelik finişer silindiri kullanılmıştır. İnşa edilen bu yollar, farklı malzemeler içerdiği için ve mukayeselere imkan tanıyabilmek amacıyla A, B, C, D gibi bölümlere ayrılmıştır.

9.4.1 Birinci Yol (Kontrat 75-62, Otoyol 653)

Bu yol, 28 Temmuz ile 1 Ağustos 1975 tarihleri arasında inşa edilmiştir. O haftaki hava, 1975 yazının en sıcak haftasıdır. Zaman zaman sıcaklığın 38 C derecenin üzerine çıktığı görülmüştür. 150-200 penetrasyonlu asfalt çimentosu içeren tüm HL-2 karışımları kolaylıkla yerleştirilmişlerdir ve oldukça iyi bir görünüm sergilemektedirler. Ortaya çıkan tek sorun ise, bu bölümün sonunda da bahsedilecek olan sülfür dumanından kaynaklanmaktadır. 50/50 ve 40/60 sülfür/asfalt oranına sahip yüksek oranda bağlayıcı içeren karışımlar da rahatça yerleştirilmiş ve onlar da

gayet iyi bir görünüm sergilemişlerdir. 40/60 sülfür/asfalt oranına sahip düşük oranda bağlayıcı içeren karışımlar ise, oldukça kuru bir görünüm sergilemekle birlikte yer yer kaplanmamış agrega taneleri de göze çarpmaktadır. Bu malzeme, oldukça güzel serilebilmesinin yanı sıra onarım silindiri altında bazı sorunlar (haircheck) ortaya çıkarmıştır. Bu sorunlar, her ne kadar lastik tekerlekli silindir altında biraz giderilmiş ise de neticede kuru ve zayıf dokulu bir görünüme sahip bir yüzey yapısı ile karşılaşılmıştır. 31 Temmuz tarihinde D, E ve F bölümlerine HL-4 tabakaları serildiğinde, hava sıcaklığı en üst değerlerindedir. Bu nedenle, hafif de olsa dalgalanmalara, ondülasyona neden olabileceği için sıkıştırmanın son aşamasında finişer silindiri kullanılmamıştır.

30 Temmuz günü HL-2 tabakası serilirken de hava oldukça sıcaktır. Bu kısımda 300-400 penetrasyonlu asfalt serilmektedir. Havanın çok sıcak olması ve buna bağlı olarak serilen tabakanın soğuyamaması nedeniyle bazı sıkıştırma ve sökülme olaylarıyla karşılaşılmıştır. Bu sorunlar nedeniyle serme işlemi, 661 m sonra durdurulmuştur. İnşa edilen bu uzunluk, planlananın sadece yarısıdır. Sonuç olarak G ve H bölümleri planlandığının sadece yarısı kadar inşa edilebilmiştir.

9.4.2 İkinci Yol (Kontrat 77-53, Otoyol 64)

Bu yol, 1977 senesinin 18 Temmuz ile 20 Temmuz günleri arasında serilmiştir. O sene hava sıcaklıkları, birinci yolun yapıldığı tarihteki sıcaklıklara kıyasla daha normal denebilecek bir seyir izlemiştir. Bu sayede, karışım sıcaklıklarının 150 C derecenin altında tutulabilmesi başarılabilmiş, böylece de sülfür dumanı ile ilgili sorunlar en aza indirilebilmiştir.

Bu yolun yapımında karşılaşılan en büyük sorun, hazırlanan malzemenin sıcaklığının muhafaza edilememesi olmuştur. Bu nedenle serme işlemi, sık sık kesilerek parça parça sıkıştırma işlemine geçilmek zorunda kalınmıştır. İşlemler, teftiş ekiplerinin kontrolünde ancak bu şekilde geçilmiştir.

Bahsedilen bu ufak tefek sorunlar haricinde, ne 150-200 ne de 300-400 penetrasyon dereceli asfalt içeren karışımlarda herhangi bir soruna rastlanmamıştır. Malzeme, oldukça güzel serilebilmiş ve yüksek stabilitesi sayesinde, silindirler altında herhangi bir dalgalanma, ondülasyona imkan tanımamışlardır. Tamamlanan işlemlerin ardından, mükemmel denebilecek derecede bir yüzey yapısı ve görünümü elde edilmiştir. İnşaatın ardından tüm bölümlerden numuneler alınmış, sıkıştırma ve

kalınlık değerleri kontrol edilmiştir. Bu işlemlere ait çalışmanın sonuçları da aşağıdaki Tablo 9.12'de yer almaktadır.

Tablo 9.12 İkinci yoldan alınan numunelerin analizleri

Bölüm	Numune numarası	Planlanan kalınlık, (mm)	Ölçülen kalınlık, (mm)	Hava boşluğu, (hacimce %)	Sıkıştırma, (%)
A	1	38	41	9.5	96.5
	2		38	8.8	97.2
	3		38	9.4	99.1
B	1	76	85	7.9	98.1
	2		93	8.2	97.8
	3		87	9.4	97.1
C	1	76	73	9.1	96.4
	2		81	9.6	96.8
	3		47	9.7	96.2
D	1	38	42	8.5	97.2
	2		49	8.7	96.6
	3		45	9.7	95.4

9.4.3 Üçüncü Yol (Kontrat 77-108, Otoyol 2)

Bu yolun inşaatı da, 1978 senesinin 21 Temmuz ile 26 Temmuz tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. İnşa edilen kontrol bölümü, batıya doğru giden şeritlerde olup, bu inşaat tarihlerinden daha önce başlamış ve sülfürlü bölgelerin serilmesi sırasında tamamlanmıştır. Bu tip bir yöntem uygulanması, doğuya doğru giden yoldaki trafik akışının inşaat sırasında da sağlanması gerekliliğinden ortaya çıkmıştır. Çünkü, daha önce de bahsedildiği gibi bu yol, trafik kapasitesi açısından oldukça ağır yüke sahip bir güzergahta bulunmaktadır. Sonuç olarak, bir şerit trafik için ayrılırken diğer şerit kaplanmakta, daha sonra kaplanan yeni yolun trafiğe açılarak diğer kısmın kaplanması işlemine devam edilmektedir.

HL-2 olarak adlandırılan sülfür-asfalt ve kum karışımı bağlayıcı içeren karışım tabakası, her ne kadar sıkıştırıldıktan hemen sonra trafik yüklerini taşıyabilmekte ise de bazı şüpheler belirmiştir. Ancak bu taze tabakada herhangi bir oluklanmaya yani tekerlek izi oluşumuna rastlanmadığı, dolayısıyla karışımın trafik yükünü karşılayabilecek yeterlilikte stabiliteye sahip olduğu anlaşılmıştır. Kalan tabakaların serilmesinde de herhangi bir olaya rastlanmamıştır.

Yüzey tabakasının, finişer silindiri ile sıkıştırılması sırasında bazı sorunlar ile karşılaşılmıştır. Karışım, silindirin kenarları boyunca sökülme eğilimi göstermiştir. Bu nedenle, silindir kaldırılarak son sıkıştırma işleminden vazgeçilmiştir.

Sonuç olarak bitirilen sülfürlü asfalt bölümler, mükemmel bir görünüme sahip olmakla beraber, sıkı ve pürüzsüz bir yüzey yapısına kavuşmuş ve trafikte konforlu bir sürüş özelliği sergilemiştir.

9.5 Üstyapı Kaplama İşlemleri Sırasında Karşılaşılan Sülfür Dumanı

İnşaatlar esnasında çalışılan bölgelerde, çalışma ekibini rahatsız eden sülfür dumanına rastlanmıştır. Bu durum üzerine, meydana çıkan bu sülfür dumanının, insan sağlığını tehlikeye düşürebilecek bir yapısının olup olmadığının araştırılması amacıyla, birinci yolun yapımı sırasında ortama bir çevresel laboratuar eklenmiştir. Diğer yollarda ise hidrojen sülfid (H_2S) ve sülfür dioksid (SO_2) gazı oluşumlarının belirlenip ölçülebildiği bir tarayıcı kullanılmıştır. Yapılan bu değerlendirmelerde açığa çıkan hidrojen sülfid ve sülfür dioksid konsantrasyonlarının toksik sınırların çok altında olduğu saptanmıştır. İkinci yolda gerçekleştirilen ölçümlere ait konsantrasyon değerleri aşağıdaki Tablo 9.13'te gösterilmiştir.

Tablo 9.13 İkinci yolda, çeşitli yerlerdeki H_2S ve SO_2 emisyonları

Bölge	H_2S, (ppm)	SO_2, (ppm)
Sericinin arkasında	<0.1 ppm	<0.1 ppm
Sericinin henüz geçtiği yerde	1.5 ppm	0.5 ppm
Silindirde	<0.1 ppm	<0.1 ppm
Karıştırıcıda	0.6 ppm	0.2 ppm
Yüklenmiş kamyonun yanında	0.5 ppm	0.1 ppm
Kamyona yükleme sırasında	0.5 ppm	0.1 ppm

Birinci yolun inşası sırasında meydana gelen buharın, çalışanların göz ve gırtlaklarında bazı sorunlara neden olduğu fark edilmiştir. Açığa çıkan bu buhar analiz edilmiş ve elementel sülfür buharı olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu tip rahatsızlıkların görülmesi, özellikle sıcak günlerde ve karışım sıcaklığının 150 C dereceyi aştığı ortamlarda devam etmiştir.

İnşaatın beşinci gününün sonunda, serme makinasına ait dizel motorun radyatörünün, ince sarı sülfür tabakaları ile kaplandığı görülmüştür. Oluşan buhar, serme makinasının operatörü ve diğer çalışanlarına sıkıntı vermektedir. Onarım silindirinin tabakanın üstünden geçmesi ile açığa çıkan beyaz renkli buhar miktarı da artmaktadır. Bu tabaka, çelik silindirin üzerinden geçmesinin ardından, hafif parlak, kahverengimsi bir görüntü almıştır. Bu olay, sülfür dumanının silindirin soğuk yüzeyi ile olan teması ile yoğunlaşarak, tabakanın üzerinde mikro kalınlıkta bir film oluşturduğu fikrini ortaya koymuştur. Ancak bu görüntü sıkıştırma işlemlerinin tamamlanması ile ortadan kaybolmuştur.

Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, meydana çıkan bu dumanı en az seviyede tutabilmek için, karışım sıcaklığının 150 C derecenin altında tutulması ile birlikte iyi sıkıştırılması gerektiği belirlenmiştir.

İkinci yolda, sülfür dumanın neden olduğu sorunlara oldukça nadir rastlanmıştır. Burada da karışım sıcaklığı 150 C derecenin altında tutulmuştur. Üçüncü yolda ise ikinciden daha fazla ancak birinciden daha az dumana rastlanmıştır. Her halükarda çalışanlar için bu dumana karşı bir koruma yöntemi geliştirilmelidir. Örneğin, serici operatörünün bulunduğu bölüme, onu bu dumandan koruyacak elektrikli bir fan monte edilmiştir. Sericinin yakınlarında çalışan diğer elemanlar için de çeşitli önlemler düşünülmüş ve uygulanmıştır. Bunlardan biri de, bu tarz elemanların koruyucu gözlüklerle donatılmış olmalarıdır. Malzemelerin, günlerin ve karışım sıcaklıklarının çeşitlilikler göstererek bu sülfür dumanını azaltmaları, bu tip korumaların her zaman ihtiyaç dahilinde olmamalarına bilelimkan tanımışlardır.

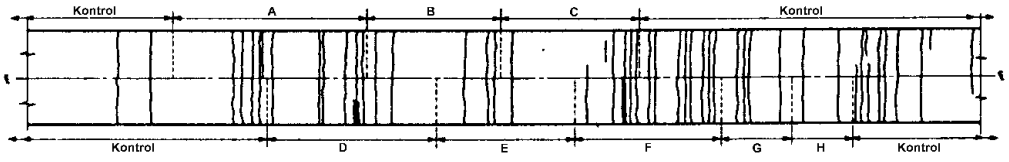
9.6 Deney Bölgelerinden Elde Edilen Sonuçlara Göre Yapılan Gözlemler ve Tartışmalar

9.6.1 Üstyapının Çatlaması

Bu çalışma yapıldığı zaman birinci yol hizmet ömrü dahilinde üç kış geçirmiştir. İlk iki kış müddetince, yolda çeşitli bölgelere hava ve üstyapının sıcaklığını ölçmek üzere ısı ölçer ve kaydeder cihazlar konuşlandırılmıştır. İlk kışın ardından çatlamalar meydana gelmiş ve her geçen yıl bu çatlakların sayılarını

arttırmıştır. A, B, C, D, E ve F bölümlerinde, 150-200 penetrasyon dereceli asfalt ile sülfürden oluşan karışımlardaki çatlamaların, yolun geri kalan kısmında deneysel amaçlı yapılmış kontrol bölümlerinin çatlamaları ile aynı frekansta olduğu görülmüştür. G ve H bölümlerinde ise çatlamalara daha az rastlanmıştır. Bu bölümler her ne kadar daha kısa olsalar ve bitişiğindeki batıya doğru giden yolun üstyapısından etkilenseler de, standart karışımlar ile üretilmişlerdir. Bu yolda kaydedilen en düşük sıcaklık ise –34 C derece olarak belirlenmiştir.

Yolda meydana gelen çatlakların, sıcaklık değerleri ile bir korelasyona sokulması mümkün olmamıştır. Aşağıdaki Şekil 9.3'te çatlamaların belirtildiği bir harita görülmektedir. Bu çatlakların tümü termal çatlaklar olup, kış mevsiminde meydana gelmişlerdir.



Şekil 9.3 Birinci yola ait çatlama diagramı

İkinci yol, hizmet ömründe geçirdiği bir kışın ardından, yalnızca iki çatlakla çıkmayı başarmıştır. Bu çatlaklar A bölümünün doğusunda meydana gelmiştir. Kontrol karışımının da aynı yerinde aynı çatlaklar oluşmuştur. Bu A bölümünde, kontrol karışımında da olduğu gibi 150-200 penetrasyon dereceli asfaltlar kullanılmıştır.

Aynı dönemlerde üçüncü yolda ise, henüz bir kış geçirmediğinden, herhangi bir çatlama olayına rastlanmamıştır.

9.6.2 Yüzey Özellikleri ve Kayma Direnci

İnşa edilen bu üç yolda da, sülfür içeren karışımlardan yapılanların, geleneksel karışımlarla yapılanlara göre daha sıkı, yoğun bir yüzey yapısı sergilediği görülmüştür. Yüzeylerin hafifçe yıkanmasının ardından, bu sıkılık farkı gözle görülür bir biçimde ortaya çıkmıştır. Suyun, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımlar ile inşa edilen üstyapıları diğerleri gibi rahat bir şekilde ıslatamadığı ve içine sızamadığı görülmüştür. Ayrıca sülfürlü üstyapıların geleneksel üstyapılara göre daha hızlı kuruduğu ve kısa sürede yüzeyinde herhangi bir ıslaklık izi veya belirtisi kalmadığı

görülmüştür. Halbuki aynı sürede yapılan gözlemlerde geleneksel karışımlar ile yapılan üstyapıların hala ıslak olduğu dikkat çekmiştir.

Her üç yolun da kayma direnci değerleri ölçülmüştür. Bu çalışmalar özel lastiklerle donatılmış, özel bir frenaj gücü uygulayan ekipman ile gerçekleştirilmiştir [78]. Her üç yolda ve bunlara ait deneysel ve kontrol amaçlı bölümlerde tespit edilen kayma direnci değerleri aşağıdaki Tablo 9.14, 9.15 ve 9.16'da verilmiştir.

Tablo 9.14 Birinci yola ait kayma direnci değerleri

Bölüm	50 km/saat hızla		80 km/saat hızla	
		Ortalama		Ortalama
A	55		47	
		54		46
D	53		45	
B	56		46	
		55		46
E	54		47	
C	56		50	
		56		48
F	56		47	
G	59	59	45	45
H	53	53	43	43
Batı kontrol	54	54	47	47
Doğu kontrol	52	52	41	41

Tablolarda da görüldüğü gibi, sülfürlü karışımlarla yapılan üstyapıların kayma direnci değerlerinin, geleneksel karışımlarla yapılan kontrol bölümlerindeki üstyapıların kayma direnci değerlerinden daha kötü olmadığı görülmektedir. Hatta bazı bölümlerde daha iyi kayma direnci değerlerine ulaşılabildiği de görülmüştür. Birinci ve ikinci yolun, hem deneme hem kontrol amaçlı yapılan bölümlerinden elde edilen kayma direnci değerleri, genel değerlere göre yüksektir. Bu olay, her iki bölümde de kullanılan agregaların doğal köşeli yapılarından kaynaklanmaktadır. Bu kayma direnci değerleri, 1978 yılı yazının sonlarına doğru yapılan ölçümlerle tespit edilmiştir. Bu da, sülfürlü bölümler göz önüne alındığında, zamanla kayma direnci değerlerinde bir kötüleşme olmadığını göstermiştir. Sülfürlü karışımlar, bu zaman kriterine göre geleneksel karışımlar ile yapılan kontrol bölgelerindeki üstyapılara

göre farklı bir davranış sergilemişlerdir. Sülfürlü karışımlar, geleneksel karışımlara göre kayma dirençlerini daha uzun bir süre muhafaza edebilmişlerdir.

Tablo 9.15 İkinci yola ait kayma direnci değerleri

Bölüm	50 km/saat hızla		80 km/saat hızla	
		Ortalama		Ortalama
A (kuzey)	55		47	
		53		46
A (güney)	52		45	
B (kuzey)	55		46	
		53		45
B (güney)	51		45	
C (kuzey)	54		46	
		53		45
C (güney)	52		44	
D (kuzey)	56		46	
		54		45
D (güney)	53		44	
Kuzey	55		45	
		54		46
Kontrol	54		47	
Güney	55		45	
		55		45
Kontrol	55		46	

Tablo 9.16 Üçüncü yola ait kayma direnci değerleri

Bölüm	50 km/saat hızla		80 km/saat hızla	
	1. Ölçüm	2. Ölçüm	1. Ölçüm	2. Ölçüm
Deney bölümü	31	34	25	25
Kontrol bölümü	25	34	20	27

9.6.3 Tekerlek İzi Oluşumu (Oluklanma)

Sülfürlü asfalt karışımlar ile üretilen tüm deneysel amaçlı bölümler ile geleneksel karışımlar ile üretilen kontrol bölümlerinde üstyapıların, özellikle kurbalarda hemiç hemde dış tekerleklerin meydana getirdiği tekerlek izi derinlikleri ölçülmüştür. Meydana gelen izler, yolun da geometrisine bağlı olarak, bazen iç bazen de dış tekerleklerde daha fazla oluklanmalara neden olmaktadır. Böylece, bir ölçüde,

üstyapıya merkezkaç kuvvetinin de etkisi değerlendirilmiş olacaktır. Bu ölçümlerden elde edilecek sonuçlar, sülfürlü karışımlar ile sülfürsüz karışımların stabilitelerinin mukayese edilebilmesine imkan tanıyacaktır. Ölçüm sonuçları aşağıdaki Tablo 9.17, 9.18 ve 9.19'da verilmiştir.

Tablo 9.17 Birinci yola ait tekerlek izi derinlikleri,
(on ölçüm ortalaması olarak mm)

Bölüm	İç tekerlek izi		Dış tekerlek izi		Genel ortalama
		Ortalama		Ortalama	
A	0.0		0.0		
		0.1		0.6	0.35
D	0.2		1.2		
B	0.0		0.2		
		0.0		0.3	0.15
E	0.0		0.4		
C	0.1		0.6		
		0.1		0.6	0.35
F	0.0		0.5		
G	0.0	0.0	0.5	0.5	0.25
H	0.6	0.6	1.6	1.6	1.10
Batı	0.4		1.8		
		0.4		1.4	0.90
Kontrol	0.3		1.0		
Doğu	0.4		0.7		
		0.5		0.4	0.45
Kontrol	0.5		0.0		

Tablo 9.18 İkinci yola ait tekerlek izi derinlikleri,
(on ölçüm ortalaması olarak mm)

Bölüm	Kuzeye giden şerit		Güneye giden şerit		Bölüm ortalaması
	İç tekerlek izi	Dış tekerlek izi	İç tekerlek izi	Dış tekerlek izi	
A	0.4	1.0	0.5	0.8	0.7
B	0.8	0.2	0.2	0.3	0.4
C	1.5	0.7	1.5	0.9	1.2
D	0.0	1.0	2.2	1.3	1.1
Kuzey kontrol	0.6	1.2	2.0	2.0	1.4
Güney kontrol	1.1	1.0	1.4	0.6	1.0

Tablo 9.19 Üçüncü yola ait tekerlek izi derinlikleri,
(on ölçüm ortalaması olarak mm)

Bölüm	Kuzeye giden şerit		Güneye giden şerit		Bölüm
	İç tekerlek izi	Dış tekerlek izi	İç tekerlek izi	Dış tekerlek izi	ortalaması
Deney blm.	1.46	1.45	0.45	1.45	1.19
Kontrol blm.	0.25	1.25	1.40	0.30	0.80

Tablo 9.17'de görülen, birinci yolda yapılan ölçümlerin sonuçlarına göre, sülfürlü karışımların kullanıldığı tüm bölgelerde, kontrol karışımlarının kullanıldığı bölgelere göre çok daha az tekerlek izi derinliklerine rastlanmıştır. Oluşan bu fark, özellikle her ikisinde de 300-400 penetrasyon dereceli asfalt kullanılan G ve H bölümlerinden elde edilen sonuçlar mukayese edildiğinde belirginleşmektedir. G bölümü sülfürlü asfalttan oluşan bir yüzey kaplamasına sahipken, H bölümü salt asfalt ile yapılan bir kaplamaya sahiptir. H bölümünde, hem iç hem de dış tekerlek izleri üzerinde belirgin bir oluklanma tespit edilirken, G bölümünde sadece dış tekerlek izleri üzerinde ve hafif bir oluklanmaya rastlanmıştır. Yani bu yoldaki sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımların stabiliteleri, geleneksel asfalt betonu ile yapılan karışımların stabilitelerine göre önemli bir ölçüde yüksektir.

İkinci yola ait bilgilerin bulunduğu Tablo 9.18'in dikkatli bir yorumlamaya ihtiyacı vardır. Çünkü bu yolun yapımında kullanılan malzemelerin derecelendirilmesi ve hazırlanmasında bazı sorunlarla karşılaşılmıştır. Granüler agreganın taban zemini üzerinde silindirlenmesi işlemi bitirildikten hemen sonra, tabakanın üzerine asfalt karışımı serilmiştir. Granüler agrega trafik etkisi ile herhangi bir sıkıştırmaya maruz kalmamıştır. Bu nedenle, tüm bölümlerde karşılaşılan oluklanma olayının, bir ölçüde, temel tabakalarının sonradan sıkışıp, çökmesi sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir. Tablo 9.18'deki verilere dayanarak, 150-200 penetrasyonlu asfalt ile sülfürden meydana gelen karışım kullanılarak inşa edilen A ve B bölümlerinin, yine 150-200 penetrasyonlu salt asfalt ile yapılan güneydeki kontrol bölümüne göre daha az bir oluklanmaya maruz kaldığı görülmüştür. 300-400 penetrasyon dereceli asfalt ile sülfürden meydana gelen karışım kullanılarak inşa edilen C ve D bölümlerindeki oluklanma değerleri ise,

150-200 penetrasyon dereceli salt asfalt ile yapılan karışımlar kullanılarak inşa edilen kuzeydeki kontrol bölümündeki oluklanma değerlerine göre bile belirgin miktarda daha azdır. Bu sonuçlar göstermektedir ki, 300-400 penetrasyon dereceli asfalt çimentosu daha yumuşak olmasına rağmen, sülfür ile karıştırıldığında, 150-200 penetrasyon dereceli salt asfalt ile yapılan karışımlara göre, tekerlek izi oluşumu ve deplasmanlara karşı daha büyük bir stabiliteye sahip olmaktadır.

A ve Bile C ve D bölümlerindeki oluklanma değerleri mukayese edildiğinde, sırasıyla 38 ve 76 mm'lik farklı kalınlıklar göz önüne alındığında çok önemli farkların oluşmadığı görülmüştür. Yine de C ve D bölümlerindeki yumuşak asfalt, A ve B bölümlerindeki daha sert asfalta göre biraz daha fazla oluklanmıştır.

Tablo 9.19'daki, üçüncü yola ait veriler ise inşaatın bitirilmesinden dört ay sonra tespit edilmiştir.

Bu deneysel yollara getirilen karışımlar, orijinal tasarımlarına göre bir miktar farklılık göstermiştir. Örneğin, tasarlandığından daha yüksek boşluk oranlarına sahip oldukları görülmüştür. Bunun da ortaya çıkan yüksek oluklanma değerlerinin nedenlerinden biri olabileceği düşünülmüştür.

Genel olarak elde edilen oluklanma verilerine dayanarak, Tablo 9.19'dan da çıkarılabileceği gibi 300-400 penetrasyon dereceli asfalt ve sülfürün birleştirilmesiyle hazırlanan karışımların rijitlik değerleri, 85-100 penetrasyon dereceli asfalt ile hazırlanan karışımın değerlerinden çok az bir miktarda düşük ancak Tablo 9.17 ve 9.18'den de çıkarılabileceği gibi 150-200 penetrasyon dereceli asfalt ile hazırlanan karışımlarınkinden yüksektir.

Bu üç deneysel yola ait trafik hacmi verileri de aşağıdaki Tablo 9.20'de gösterilmiştir.

Tablo 9.20 Deney yollarına ait trafik hacimleri

	Birinci yol	İkinci yol	Üçüncü yol
Yıllık ortalamaya göre günlük trafik	950	1150	11650
Ağır taşıt yüzdesi	20-25	20	20

9.7 Genel Tartışma

Bu üç yolun da davranışları incelendiğinde, hem inşaat hem de performans özellikleri bakış açısından, sülfürün asfalt çimentosu ile birleştirilmeye gayet uygun ve pratik bir malzeme olduğu sonucuna varılmaktadır.

Sülfür ilavesi ile daha yoğun bir yüzey yapısına sahip üstyapılar üretilebilmiş ve böylece suyun penetrasyonu düşürülmüştür. Bir başka deyişle, suya bağlı bozulmalar azaltılmıştır. Bu yüzeyler, standart karışımle üretilen yüzeylere göre her ne kadar daha iyi olmasa da en az onlar kadar kayma direncine sahiptirler. Bu özellik, daha önce modifikasyonlar konusunda da bahsedilen gibi bir özelliğin iyileştirilmesi sırasında diğer bir özelliğin, bozulmaması gereğini belirten temel ilkeye olan uyumluluğu göstermektedir. Sülfür, düşük sıcaklıklardaki çatlamaları azaltacak, karışımlarda daha yumuşak asfalt kullanımına imkan sağlamaktadır. Ayrıca bu yumuşak asfalt çimentoları ile sülfürün birleştirilmesi sonucunda elde edilen karışımlar, bir veya daha çok derece sertlikteki salt asfaltlardan bile daha az oluklanma değerleri sergilemişlerdir. Böylece normal üstyapı sıcaklıklarında sülfürün karışıma daha büyük bir mukavemet kattığı da ortaya çıkmıştır. Bu özellik de, daha önce inşa edilen yolların stabilitesine, sülfürlü karışımlar sayesinde daha ince üstyapı tabakalarıyla bile ulaşılabileceğini göstermektedir.

Sülfür hammaddesi, bu çalışmaların yapıldığı tarihlerde de, günümüzde de doğada artık bir madde olma özelliğini sürdürmektedir. Bu durumda, sülfürün üstyapılarda kullanılmasının üç temel yararlı yanını ortaya çıkarmaktadır.

- Birinci ve en önemli özellik, sülfürün daha iyi yol üstyapıları yapılmasına imkan tanımasıdır.
- Doğada artık olan bir malzemenin kullanılması sağlanmaktadır.
- Geleneksel karışımlarda kullanılan petrol ürünlerinin hiç değilse belli bir kısmını, ki bu oranda yapılan araştırmalardan görüldüğü gibi hiç de yabana atılacak bir oran değildir, diğer ihtiyaç ve gereksinimlere ait enerji kaynaklarına yönlendirilmeye imkan tanımaktadır.

Özellikle bu son iki madde, ekonomiye büyük bir katkıda bulunmaktadır. Sülfürlü asfalt bağlayıcıların kullanılması ve hammaddeleri hakkında daha ayrıntılı bir ekonomik irdeleme tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde ele alınacaktır.

9.8 Bölüm Sonuçları

1. Daha yumuşak asfalt çimentosu ile sülfürlü karışımlardan üretilen üstyapılar üzerinde yapılan çalışmalar, laboratuar sonuçlarını teyit etmekle beraber geleneksel karışımlarla üretilen üstyapılara nazaran daha az termal çatlaklar meydana getirmiştir.
2. Sülfürlü asfalt karışımlar, daha sert dereceli salt asfalt ile hazırlanan karışımlarla dahi mukayese edildiğinde, oluklanma ve deformasyonlara karşı direnç gösterecek stabilite değerleri açısından çok daha başarılı sonuçlar ortaya koymuştur.
3. Aynı agregalar kullanılarak hazırlanan sülfürlü asfalt karışımların kayma direnci, geleneksel asfalt karışımlarınkinden yer yer daha iyidir. Ancak, en kötü şartlarda dahi aynı özellikleri göstermiştir. Hiçbir şartta daha kötü değerlere sahip olmamıştır.
4. Asfaltın içerisindeki sülfür varlığı, bağlayıcının ıslak durumlardaki özelliklerini geliştirmekte, böylece soyulma ve sökülmeye karşı ilave işlemlere olan gereksinimi azaltmaktadır.
5. Bağlayıcıya sülfür katılmasının üstyapının performans veya dayanıklılık özellikleri üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi olduğu, hiçbir şart altında görülmemiştir.
6. Üstyapılarda belli miktarlarda asfalt yerine sülfür kullanılabilmesi, o miktar asfaltın, yani petrolün, başka ihtiyaçlara yönlendirilebilmesine imkan tanımaktadır. Kısacası, enerji tasarrufu yapılmasına büyük katkıda bulunmaktadır.
7. Sülfür kullanımı, üstyapılarda daha büyük ve önemli roller üstlendikçe, hem uygun taşıma, eritme, depolama gibi işlemler önem kazanacak, hem de yeni bir pazar oluşturulmuş olacaktır.

10. KUM ASFALT UYGULAMALARDA SÜLFÜR KULLANIMI

Şimdiye dek incelenen bir çok çalışma, Amerika Birleşik Devletleri veya Kanada kaynaklı idi. Ancak başka malzemeler ve kaynaklar düşünüldüğünde, bu sınırların dışını da hesaba katmak ve değerlendirmek gerekliliği ortaya çıkmıştır. Örneğin, Ortadoğu'da bulunan ülkelerin bir çoğu çöl veya yarı çöl özellikteki kara parçalarının üzerlerinde veya yakınlarında yer almaktadır. Bu da, iyi kalitedeki kaba agrega kaynaklarının ve rüzgar yardımı veya diğer doğal şekillerde oluşan, yollarda yüzey malzemesi olarak sıkça kullanılan kumun, bu tip bölgelerde oldukça yakın kaynaklar olduğu anlamına gelir.

Özellikle yol yüzeylerinde sıkça kullanılan kumun, inşaat sahasına olan yakınlığı, malzemelerin taşınma maliyetlerini en aza indirerek, genel inşaat maliyetinin azaltılması konusunda da oldukça etkili olmaktadır. Malzeme kaynaklarının inşaat bölgesine olan uzaklıkları, inşaat maliyetlerinde oldukça etkili bir rol oynamaktadır. Örneğin, bu çalışmanın yapıldığı tarihlerde, kaynağında bir tonu 30 ila 35 dolar olan elementel sülfür hammaddesinin, taşıma mesafelerinin artmasıyla ton başına olan maliyeti, 70 ila 80 dolar civarına kadar ulaşabilmektedir. Durum böyle olunca da belki daha yakın bir kaynaktan ulaşılabilen asfalt, tonu 100 dolar civarında olmasına rağmen tercih edilebilir bir malzeme olacaktır. Halbuki aynı şartlarda sülfür, asfalt hammaddesinin %25 ile %35'ler arasındaki bir değerdeki maliyetine sahiptir.

Biraz önce bahsedilen, malzeme kaynaklarının yakınlığı konusu dışında çok önemli bir husus daha vardır. Bizim gibi, petrol ürünlerinde büyük bir oranda dışa bağımlı ülkelerde, petrol ve asfalt gibi türevlerinin kullanımı daha da önem kazanmaktadır. Çünkü petrol ürünlerinin dışarıdan alınması, taşıma, işleme ve işletme gibi her tür maliyeti arttırdığı gibi ülke ekonomisini de, kendi kaynaklarını değerlendirememek açısından olumsuz yönde etkilemektedir.

Diğer yandan, ister kaba agrega isterse kum türevlerinin kaynakça zengin olduğu Suudi Arabistan ve komşu ülkelerinde, sülfürün yan ürün olarak elde

edilebilmesi, artan otoyol ihtiyacının inşaatlarında geleneksel kumlu asfalt bağlayıcılara bir de potansiyel olarak faydalı yanları tespit edilmiş sülfürün katılmasını gündeme getirmiştir. Çünkü, yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, sülfürün kumlu asfalt karışımların stabilitelerini yükselteceği, sıcaklığa karşı olan duyarlılığını düşüreceği ve otoyol üstyapı inşaatlarında, kumun, asfalt içerisindeki kullanımına daha geniş olanaklar sunacağı öngörülmektedir.

Böylece, bitümlü bağlayıcılı üstyapılarda, sülfürden yararlanılması konusunda iki ana yaklaşım belirmiştir. Bunlar;

- Ayrıntılı bir şekilde ele alınan ve SEAM olarak tabir edilen sülfür ile modifiye edilmiş asfalt, ki genelde kısaca sülfürlü asfalt olarak bahsedilmiştir ve
- Termokaplamalar'dır.

SEAM diye bahsedilen karışımda, asfalta ağırlıkça %50'ye kadar varan değişik oranlarda sülfür katılmaktadır. Bu yaklaşıma göre, asfaltın özelliklerini geliştirecek bir modifiye olarak kullanılan sülfür, asfaltın kullanım alanını ve özelliklerini genişletmekte, kullanım bölgesini uzatmaktadır. Bu özellikler, ayrıca ekonomik olarak SEAM kullanımına ihtiyaç duyulan bölgelerde de bağlayıcı maliyetini düşürerek belli miktarda petrol kaynaklarından tasarruf edilmesini ve bunların başka enerji ihtiyaçlarına yönlendirilmesini sağlamaktadır [1, 2, 50, 79, 80, 81].

Termokaplamalar olarak adlandırılan diğer yaklaşımise SEAM'a göre daha yüksek oranlarda sülfür içeren karışımları içermektedir. Termokaplamalarda sülfürün asfalta olan oranı, 1 ile 5 arasında değişmektedir. Termokaplamalar, daha önce de bahsedilen ve ARP (asphalt replacement pellet) olarak adlandırılan, asfaltın yerine tamamen sülfür kullanılarak elde edilen ürüne bir çıkış noktası niteliği taşımaktadır. Termokaplamalarda sülfür, yalnızca asfaltın değil agreganın da belli bir miktarıyla yer değiştirmektedir. Bu konuda, elde edilen sınırlı faydalar nedeniyle çalışmalar da çok fazla ayrıntılandırılmamış ve çok kapsamlı araştırma ve geliştirmeler sürdürülmemiştir. Belki de bu nedenle, ARP hakkında da SEAM kadar ayrıntılı çalışmalara ve geniş bilgi ağına sahip olunmamaktadır. [1, 81].

Araştırmanın bu bölümünde, SEAM yani şimdiye dek hep ele alınan sülfürlü asfalt bağlayıcılı karışımların bir türevi olan, ülkemizin şartları içinde daha dikkatle ele alınması gereken, SAS diye tabir edilen sülfür-asfalt-kum karışımları ayrıntılı bir

biçimde incelenecektir. Bu çalışmada, sülfür-asfalt-kum karışımları, geleneksel asfalt karışımlarla mukayese edebilmek ve kullanılan malzemeleri karakterize edebilmek amacıyla bir laboratuar deney programı geliştirilmiştir. Bu deney programı, Marshall tasarım özelliklerini, elastisite modülünün belirlenmesini ve tekrarlı yükler altındaki kalıcı deformasyon karakteristiğinin incelenmesi konularını kapsamaktadır.

Yapılan bu deneysel çalışmaların neticesinde genel olarak, sülfürün bir bağlayıcı katkısı olarak kullanılmasının, sülfür-asfalt-kum karışımların mühendislik özellikleri üzerine olumlu etkiler yaptığı görülmüştür. Kısaca, Marshall stabilitesinin yükseldiği, elastisite modülünün azaldığı ve geleneksel kumlu karışımlara göre oluklanmanın da azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece, sülfür katkısının karışım tasarımına olumlu etkiler yaptığı ve üstyapı uygulamalarında kum kullanımına daha geniş çeşitlilikler ve olanaklar sağlayacağı ortaya çıkmıştır.

10.1 İnceleme

Yapılan incelemelere göre sülfür, asfalt emülsiyonunda üç değişik halde bulunur.

1. Sülfürün belli bir bölümü, asfalt ile kimyasal reaksiyona girer.
2. Belli bir kısmı asfaltın içerisinde reaksiyona girmeden kalır.
3. Bu kalıntının belli kısmı da asfalt içerisinde ayrı bir dağılıma sahip farklı bir faz oluşturur [82, 83].

Unutulmamalıdır ki, sülfürlü asfalt karışımlardan bahsedebilmek için, sülfürün, asfalt ile kimyasal reaksiyona girmiş olması gerekmektedir. Ancak bilindiği gibi, asfalta katılan sülfürün tamamı, asfalt ile kimyasal reaksiyona girememektedir. Çalışmanın daha önceki bir bölümünde de ele alınan, hatta kimyasal reaksiyon neticesinde çözülen sülfür oranına ait bir grafiğin de yer aldığı, katılan sülfürün belli oranının asfalt içerisinde çözündüğü, belli kısmının da çözünmeyip kristaller halinde öylece kaldığı belirtilmiştir. Bu husus, asfalta katılan sülfür oranının, en verimli bir şekilde belirlenebilmesi açısından oldukça büyük önem taşımaktadır. Yani, bu oran belirlenirken dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Bu yöndeki çalışmalara göre, ağırlıkça %50'lik bir sülfür katkısının, bazı durumlarda, daha düşük miktarda sülfür içeren karışımlara göre daha verimli olmadığı tespit edilmiştir.

Sülfür ile asfalt arasında meydana gelen bu kimyasal reaksiyonların doğası gereği, sülfürlü asfalt bağlayıcı ve bunlara ait karışımlarda, zamanın bir fonksiyonu olmak üzere, bazı kimyasal ve fiziksel değişiklikler meydana gelmektedir. Ancak buna rağmen yapılan çalışmalar, sülfürün, bu reaksiyona girmiş, çözünmüş ve farklı bir fazda dağılmış üç halinin de asfalt özellikleri üzerinde olumlu etkiler meydana getirdiğini ortaya koymuştur [69, 81-84]. Bu yaralı etkilerin bazıları şöyle belirtilmiştir.

- Penetrasyon değeri artmıştır.
- Fraas kırılma noktası değeri azalmıştır.
- Yumuşama noktası sıcaklığı artmıştır.
- Bağlayıcının düktilitesi artmıştır.

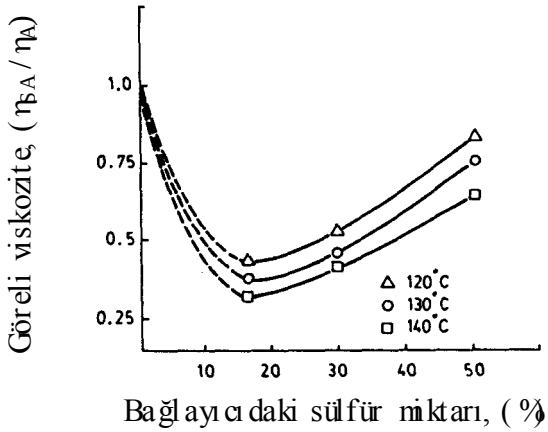
Sülfürlü asfalt bağlayıcıların içerisinde dağılan, yani üçüncü halde bulunan sülfür ise, karıştırma yöntemi, asfalt derecesi ve seçilen sülfür/asfalt oranına bağlı olarak değişebilen parçacık boyutlarında bir dağılım sergileyen küçük damlacıklar halinde bulunmaktadır. Sülfür/asfalt oranının, 30/70 oranının üzerine çıkarılması, az önce bahsedilen bu sülfür damlacıklarının koyulaşarak ve büyüyerek, iğne şeklinde sülfür kristallerine dönüşmesine neden olmaktadır. Sülfürlü asfalt bağlayıcılar içerisinde yer alan sülfürün incelenmesine yönelik yapılan son çalışmalar, kristal hale dönüşmeyen ve 5 ila 10 µm çapındaki sülfür parçacıklarının, yani özellikle sülfürün birinci ve ikinci maddelerde bahsedilen hallerinin homojen dağılımlarının, bilhassa 30/70 ve daha düşük sülfür/asfalt oranlarında başarılı sonuçlar ortaya koyduğu ve sülfürlü asfalt bağlayıcıların morfolojilerini temsil ve karakterize edebildikleri görülmüştür.

30/70'in üzerindeki sülfür/asfalt oranlarında ise büyük damlacıklı, iğne şeklini almış parçacıkların bir araya toplanarak, birikmiş ve gruplaşmış bir görüntüye sahip heterojen bir dağılım gösteren sülfür dikkatleri çekmiştir [85].

Diğer bir konu, Şekil 10.1'de de görüldüğü gibi 120 C derecenin üzerindeki sıcaklıklarda, sülfürlü asfalt karışımların viskozitelerindeki düşüş, asfaltın kendi özelliklerine bağlı olmaktadır. 120 ila 140 C derece arasındaki sıcaklıkta, 80-100 penetrasyon dereceli asfalt kullanılarak hazırlanan sülfürlü asfalt bağlayıcılarda, kullanılan sülfür oranının artmasının karışımların göreli viskozitelerine olan etkisi de

bu şekilde görülmektedir. Ayrıca, sülfürün, göreli viskoziteye olan indirici etkisinin, bağlayıcıya %15 ila %17 oranında sülfür katıldığı bölgelerde en üst seviyeye ulaştığı görülmektedir. Bu değer de asfaltın çözünürlük sınırına tesadüf etmektedir [86]. Bu sınırın ötesine gidildikçe, asfalttaki sülfür miktarının arttırılmasıyla doğru orantılı olarak, üçüncü hal diye belirtilen sülfür damlacıklarının oluştuğu ve hem boyut hem de sayı olarak arttıkları tespit edilmiştir. 60-70 penetrasyon dereceli asfalt kullanılarak yapılan denemelerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Bu şekle dayanarak çıkarılabilecek diğer bir sonuç da, sülfürlü asfalt içeren karışımların geleneksel asfalt betonu içeren karışımlara göre daha düşük sıcaklıklarda karıştırılabileceği, serilebileceği ve sıkıştırılabileceğidir [82].



Şekil 10.1 Bağlayıcıda yükselen sülfür miktarının,
sülfürlü asfaltın viskozitesine olan etkisi

Sülfür ile modifiye edilmiş asfalt (SEAM) kullanılarak orta doğuda dahil olmak üzere dünyanın bir çok yerinde bu tip yollar inşa edilmiştir. Dolayısıyla, bu yollarda laboratuar çalışmalarını doğrulayacak deneme ler ve arazi çalışmaları yapma imkanları da doğmuştur. Bunların bir çoğundan da bahsedilmiştir. Bu yolların geneli, iyi kalitede agregalar kullanılarak ve asfalt betonunda bazı malzemelerde yer değişikliği yapılarak inşa edilmiştir. Agrega içerisinde kum kullanılarak yapılan arazi çalışmaları daha az sayıdadır [4, 6, 11, 87, 88, 89].

Sülfürlü asfaltlar ile yapılan yolların bir çoğundan elde edilen verilere göre, bu yollar geleneksel yolların tasarım, inşaat ve performans özelliklerine büyük

ölçüde uygunluk göstermekle kalmamış, sülfürlü karışımların, geleneksel karışımların üretimi, taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması işlemlerine de büyük uyumluluklar gösterdiği saptanmıştır.

Her ne kadar yapılan çalışmaların bir çoğunda, sülfürlü asfalt karışımların gerek fiziksel gerekse kimyasal özelliklerinin geleneksel asfalt betonu ile aynı hatta, bazı önemli hususlarda da daha üstün oldukları belirtilmiş ise de bazı kaynaklarda da hizmet ömründe stabilitede daha hızlı bir kayba ve daha erken çatlamalara maruz kaldığının tespit edilmiş olması da göz ardı edilmemelidir [18,90]. Ancak ilerleyen çalışmalarda, her ürünün, olumlu ve olumsuz yanları olduğu ve sülfürlü asfalt karışımlarla inşa edilen yolların, geleneksel karışımlarla inşa edilen yollara göre olumlu yanlarının olumsuz yanlarına büyük bir üstünlük sağladığı görülmüştür.

Başlangıçta, sülfür-asfalt-kum içeren karışımlar hazırlanırken, bazı araştırmacılar, sülfürün, bu kez bağlayıcının değil de agreganın belli bir miktarı ile yer değiştirmesi üzerinde durmuş ve çalışmışlardır [1,91,93,94,97]. Ancak bu çalışmada, biraz daha ilerleyen bölümlerinde de görülebileceği gibi, sülfürlü asfalt karışımların (SEA), kum ile birleştirilerek kullanılması konusuna ağırlık ve önem verilmiştir.

Örneğin Sullivan [95], sülfür, asfalt ve kumdan meydana gelen karışımlar hakkındaki bir çalışmasını yayınlamıştır. Karışımda kullanılan, ağırlıkça yüzde oranları %77 kum, %6 asfalt ve %17 sülfürden meydana gelmektedir. Yapılan basit araştırma ve çalışmalarda, böyle bir karışımın sıkıştırılmadan serilmesi durumunda bir üstyapı malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür. Ancak sülfürün, kum ve asfalt ile karıştırılmadan önce disiklopentadien adındaki kimyasal bir malzeme ile modifiye edilmesinin, sülfür-asfalt-kum karışımları da modifiye ettiği ve böylece geleneksel üstyapı ekipmanları ile hem serilebildiği hem de sıkıştırılabildiği meydana çıkmıştır.

Saylak [89] ise, Teksas'da Lufkin'in kuzeyinde US 69 yolu üzerinde, sıcak kum ve sülfürlü asfalt karışımlarla inşa edilen yola ait verileri yayınlamıştır. Bu yoldaki tabaka kalınlıkları, 10 ile 18 cm arasında, bağlayıcı içeriği %6 ile %7 arasında farklı değerlerde olmakta ve sülfür/asfalt oranı 30/70 olarak kullanılmaktadır. Dört yıllık hizmet ömrünün ardından yapılan geniş ve ayrıntılı incelemelerde, sıcak kum-asfalt ile kum-sülfürlü asfalt arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür.

Carey ve Paul de [96], Loisiana'daki LA 22 yoluna serilen 13 cm kalınlığındaki sülfürlü asfalt-kum karışımı üstyapı üzerinde çalışmalar yapmış ve yayınlamışlardır. Üstyapı, %65 kaba kum, %35 ince kum ile 40/60 sülfür/asfalt oranlı %9 oranında bağlatıcı içermektedir. Bu araştırmanın sonuçları da, az önce bahsedilen çalışmaların sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir.

10.2 Laboratuar Çalışması

Laboratuar deney programı, ağırlıklı olarak rüzgar etkisi ile elde edilen ince kumun kullanıldığı sülfür-asfalt-kum (SAS) karışımların hazırlanması, denemesi ve değerlendirilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Bu program prensip olarak, bağlayıcı içerisindeki asfaltın, bir kontinuum, süremolarak kalması üzerine odaklanmıştır. Bu nedenle, en çok ağırlıkça 60/40'lık bir sülfür/asfalt oranı seçilmiştir. Bu oran, sülfürün, toplam bağlayıcının %38 ± 2 oranında bir hacme sahip olduğunu gösterir.

Deney programının içeriğine bir göz atılacak olursa;

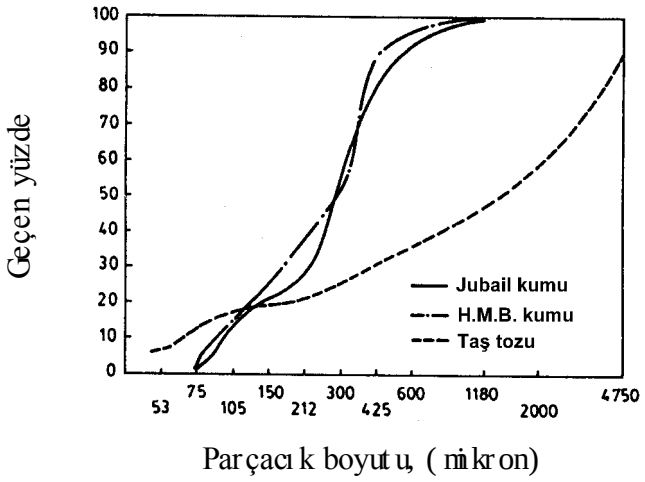
1. Oluşturulan karışım kompozisyonlarının büyük bir çoğunluğunda, Marshall stabilitesi ve akma değerleri; ağırlıkça sülfür/asfalt oranına, karışımdaki bağlayıcı oranına ve SAS Marshall numunelerindeki taş tozu oranına göre değişiklikler göstermektedir.
2. Azaltılmış sıkıştırma sıcaklığının, SAS malzemelerin Marshall stabilitesine, akma değerine ve boşluk oranına olan etkilerinin belirlenebilmesi için hazırlanan ve deneylere tabi tutulan karışımlar, normalin altında sayılan 140 C dereceden 50 C dereceye kadar düşen sıcaklık aralığında sıkıştırılmıştır.
3. Karışım kompozisyonları ve kür yani bekletme süreleri, değiştirilerek SAS numunelerin elastisite modülleri tespit edilmiştir.
4. Simülatif olarak tekrarlanan üç eksenli yükleme şartları altında SAS karışımların kalıcı deformasyon karakteristiği incelenmiştir.

10.2.1 Malzemeler

Deney programını gerçekleştirmek üzere, Suudi Arabistan'ın doğusundaki Jubail ve Half Moon Bay'dan sağlanan, zayıf dereceli, rüzgarın yığdığı iki çeşit kuvars kumu seçilmiştir. Devam eden süreçlerde de bu iki kum kullanılmıştır. Jubail kumu, genellikle bu çalışmanın, yukarıda bahsedilen bir ve ikinci işlemelerinin

uygulamasında kullanılmıştır. Kullanılan bu iki kum cinsinin gradasyon ve doku özellikleri benzerlikler gösterse de, ayrı ayrı ele alınıp tasarlanmalarını haklı çıkaran önemli farklılıklar tespit edilmiştir. Şekil 10.2'de, bu iki kuma ve belli bir miktarda kuvars kumu yerine kullanılacak taş tozunun gradasyon değerlerini gösteren eğriler bulunmaktadır. Karışıma eklenen taş tozu, toplam agrega ağırlığının %20'sine kadar olan değerlerde kullanılmıştır.

Burada taş tozunun kullanılma amacı, stabilitenin arttırılmasına yardımcı olmak ve sıkıştırılmış SAS karışımlardaki hava boşluğu oranını azaltmaktır.



Şekil 10.2 Kullanılan kumların gradasyon eğrileri

Kullanılan asfalt ise, 60-70 penetrasyona sahip olup Suudi Arabistan'ın doğusundaki Ras Tanura rafinerisinden sağlanmıştır. Bu asfalta ait standart laboratuar deney sonuçları arka sayfadaki Tablo 10.1'de gösterilmiştir.

Tablo 10.1 60-70 penetrasyon dereceli
asfalt çimentosunun özellikleri

Deney	Değer
Parlama noktası, (C^0)	333.3
Yanma noktası, (C^0)	371.1+
Yumuşama noktası, (C^0)	119
25 C^0'de penetrasyon	53
135 C^0'de viskozite, (cs.)	630
25 C^0'de düktilite	150+
4 C^0'de düktilite	19.1
Çözünürlük, (%)	99.9
Sulfür içeriği, (%)	4.89
Asfalt içeriği, (%)	14.0

Sülfür özelliklerine gelinecek olursa, çalışmalarda ticari dereceli, ikincil elementel sülfür kullanılmış, karakteristiği de aşağıdaki Tablo 10.2'de gösterilmiştir.

Tablo 10.2 Kullanılan sülfürün özellikleri

Karakteristik	Değer
Saflık, (%)	97.5
Katı sülfürdeki su miktarı, (%)	maks. 1.0
Kül içeriği, (%)	maks. 1.0
Karbon içeriği, (%)	maks. 1.0
Asidite, (% H_2SO_4 olarak)	maks. 0.05
23 C^0'de özgül ağırlık	1.977
150 C^0'de özgül ağırlık	1.777

Sülfürün asfalta göre yüksek olan özgül ağırlığı nedeniyle, sıvı sülfürün asfalta karıştırılması işleminde, sülfür miktarını artışı ile doğru orantılı olarak sülfürlü asfalt bağlayıcının da özgül ağırlığı artmaktadır. Ağırlıkça 0/100, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50 ve 60/40'lık sülfür/asfalt oranlarındaki sülfürlü asfalt bağlayıcıların özgül ağırlıkları sırasıyla 1.021, 1.12, 1.17, 1.23, 1.30 ve 1.37 olarak hesaplanmıştır. Özgül ağırlıklar konusuna, çalışmanın başlarında bir kez daha

değinilmiş ve yaklaşık olarak aynı oranlar için aynı sonuçlar gösterilen formülasyonlarla hesaplanmıştır.

Sülfürlü asfalt bağlayıcılar, ısıtılmış sülfür ile asfaltın 140 ± 2 C derecede karıştırılmaları ile hazırlanmıştır. Sülfürün asfalt içerisindeki dağılımını takip edebilmek için sürekli mikroskop altında periyodik kontroller gerçekleştirilmiştir. Tüm karışımlarda, asfaltın, sülfür damlacıklar ile bir süremyani süreklilik halinde olduğu ve meydana gelen küreciklerin, bağlayıcıdaki sülfür oranına bağlı olarak değişik şekil ve düzende oldukları izlenmiştir. Özellikle 50/50 ve 60/40 oranlı sülfür/asfalt karışımlarda, asfalt içerisindeki sülfür dağılımının, sülfür damlacıklarının boyutlarını büyümesi ve kristalize olan sülfür parçacıklarının oluşturduğu zincirler nedeniyle heterojen bir yapı meydana getirdiği dikkati çekmiştir. Ortaya çıkan bu sonuç, bu çalışmanın inceleme kısmında da ele alınmıştır ve tez konusunun genel sonuçlarının oluşturulmasında da büyük önem taşımaktadır. Çünkü şimdiye dek ele alınan çalışmalarda, sülfür katkı oranının %40, %50 civarında olmasının elde edilen faydayı genelde arttırdığı görülmüştür. Ancak bu çalışmada ve daha önce incelenen sülfürün dağılımı konusunda da görüldüğü gibi, bu değerleri sınırlayan bazı kriterlerle karşılaşılmaktadır. Yani genel sonuçlar ele alınırken, çözünürlük, ekonomik uygunluk gibi konular da en az mühendislik özellikleri kadar dikkate alınmalıdır.

Hazırlanan sülfürlü asfalt bağlayıcılar, hazırlanma işlemine takiben 30 sn. içerisinde daha önceden ısıtılan kumun üzerine dökülmektedir. Sonra, yaklaşık üç dakika boyunca veya agregalar, bağlayıcı ile iyice kaplanana kadar karıştırılmaktadır. Daha sonra, ağırlıkları önceden belirlenmiş SAS karışımlar ısıtılmış kalıplara dökülmekte ve sıcaklıkları yaklaşık olarak 140 C derecede tutularak istenen özelliklere gelinceye dek bir tokmak ile sıkıştırılmaktadır. Sıkıştırma sıcaklığının, bir değişken olmadığı durumlarda da, sıkıştırma işlemleri 135 ila 140 C derece arasında gerçekleştirilmektedir.

10.2.2 Deney Yöntemleri

10.2.2.1 Marshall Deneyi

Standart Marshall ve elastisite modülü deneylerini gerçekleştirmek üzere, SAS karışımlar önceden ısıtılan Marshall kalıplarına yerleştirilir, her iki yüzüne 50 libreliksıkıştırma tokmağı ile 50'şer darbe vurularak Marshall numuneleri hazırlanır.

Bu numuneler, toplam karışımağırlığının %3 ila 5'i arasında bağlayıcı içermektedir. Kullanılan her bağlayıcı oranı için ayrı ayrı, 0/100'den 60/40'a kadar olan sülfür/asfalt oranları uygulanmıştır.

Tüm numuneler, deneylere tabi tutulmadan önce, oda sıcaklığında bir haftalık bir müddetle kürlere bırakılmıştır. Bu bir haftalık bekleme süresi, uzun dönemdeki stabilite ve mukavemet değerlendirmeleri düşünüldüğünde değişik karışımlar arasında daha iyi mukayeseler yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Bir haftalık kürün ardından, kaynaklar bölümünde de gösterilen ASTM D1559 prosedürü takip edilerek, numunelerin, 60 C derecedeki stabilite ve akma değerleri ile özgül ağırlıkları ve hava boşluğu yüzdeleri de tespit edilmiştir.

Sıkıştırma ile sıcaklık duyarlılığı arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için az önce bahsedilen şekilde hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler, sıkıştırma işlemleri gerçekleştirilmeden önce 140 C dereceden 50 C dereceye kadar düşen sıcaklık değerlerinde soğumaya bırakılmıştır.

10.2.2.2 Elastisite Modülü Deneyi

Seçilen SAS Marshall numunelerinin elastisite modülleri, orijinal ismi Diametral Modulus Test olan deney ekipman ve yöntemi kullanılarak belirlenmiştir [27]. Bu yöntemde, silindirik Marshall numunesinin yatay çapı boyunca tekrarlı yatay bir yük uygulanmaktadır. Bu tip bir yükleme, numunenin yatay çapı boyunca, yatay yönde bir çekme ve düşey yönde bir basınç gerilmesi oluşturmaktadır. Daha sonra numunenin yatay çapındaki çizgisel uzama miktarı ölçülmektedir. Uygulanan yükleme süresi 0.1 sn'dir ve dakikada 20 kez uygulanmaktadır. Böylece elastisite modülü M_R;

$$M_R = \frac{P.(\nu + 0.2732)}{t.\Delta} \qquad (10.1)$$

formülü kullanılarak hesaplanır. Bu formülde;

P = uygulanan yük (N),

ν = Poisson oranı,

t = numune kalınlığı (mm),

Δ = numune boyunca, kalıcı olmayan yatay uzama miktarıdır (mm).

Poisson oranı, kum-asfalt karışımlar için 0.35, SAS karışımlar için ise 0.30 olarak kullanılmaktadır. Tüm numunelerin kür ve deney sıcaklıkları, oda sıcaklığı olan 23 ± 2 C derecede gerçekleştirilmiştir. Uygulanan tekrarlı yatay yük ise 15 libredir.

10.2.2.3 Kalıcı Deformasyon Ölçümleri

Dinamik olarak sıkıştırılan SAS numunelerine, tekrarlı, üç eksenli yükleme deneyleri uygulanmıştır. Silindirik SAS numuneleri, sıcak karışımın önceden ısıtılan, 71 mm çapında 150 mm. yüksekliğindeki kalıplara dökülmesiyle yapılmıştır. Sonra, 5.5 libreli k bir tokmağın, belli bir mesafeden düşürülmesi ile numunelerin, üç eşit tabakada sıkıştırılması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işleminin ardından, numuneler, kalıplarında muhafaza edilerek, deneylere tabi tutulmadan önce en az bir haftalık bir süre ile bekletilmişlerdir.

Laboratuar deney yöntemi, gerçek hayattaki trafik yüklerini temsil edebilmek üzere geliştirilmiştir. Üç eksenli, numunelere eksenleri doğrultusunda tekrarlı yükler uygulanmış ve farklı yükleme şartları ve sıcaklıkları altındaki kalıcı deformasyonları ölçülmüştür [97]. Numunelere, yükleme süresi 0.1 sn. ve frekansı dakikada on kez olmak üzere, eksenel tekrarlı gerilmeler uygulanmıştır. Bu işlem, numune üzerindeki gerilmenin artması ve azalması şeklinde bir döngü meydana getirmektedir. Bu gerilme, tüm deneyler için 34.5 kPa (5 psi) ile sınırlandırılmıştır. Deneyler, değişik sıcaklıklarda ve değişen tekrarlı gerilmeler altında yapılmıştır. Deneyler genellikle, en az 10.000 olmak üzere, bazı durumlarda da 100.000 civarında gerilme uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

10.3 Sonuçlar ve Tartışma

10.3.1 Marshall Deneyi

Çeşitli sülfür-asfalt bağlayıcı oranları, karışımdaki bağlayıcı oranları ve karışımdaki taş tozu oranları değişkenlerine göre, Jubail kumu kullanılarak yaklaşık 600 tane Marshall numunesi hazırlanmış ve deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca, Half Moon Bay kumu kullanılarak da bir çok Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bu

numuneler, farklı sıcaklıklarda sıkıştırılarak, düşürülmüş sıkıştırma sıcaklılarının, SAS numunelerinin Marshall özellikleri üzerine olan etkileri irdelenmiştir.

Şekil 10.3, 10.4 ve 10.5'te, bu çalışmalara ait tipik Marshall sonuçları görülmektedir. Şekil 10.3'te, %100 Jubail kumu kullanılarak, farklı sülfür/asfalt oranlarının etkileri görülmektedir. Şekil 10.4'te, %90 Jubail kumu ile %10 oranında taş tozu kullanılarak, Şekil 10.5'te ise, %80 Jubail kumu ile %20 oranında taş tozu kullanılarak elde edilen Marshall özellikleri görülmektedir.

Ortaya çıkan Marshall deneyi sonuçlarına göre, sülfürlü asfalt bağlayıcıların, salt asfalt bağlayıcılar ile eşit ağırlık esasına dayanarak yer değiştirebilecekleri görülmektedir. Ancak aynı şartlar altında, SAS karışımların, sıcak kum-asfalt karışımlara göre daha yüksek hava boşlukları, daha düşük akma değerleri ve daha yüksek stabilite özellikleri sergilediği görülmüştür.

Bu nedenle, sonuçlar değerlendirilirken göz önünde bulundurulacak başlıkların ve şartların ayrı ayrı ele alınması gerektiği düşünülmüştür. Şimdi bu özellikler, ayrı ayrı ele alınacaktır:

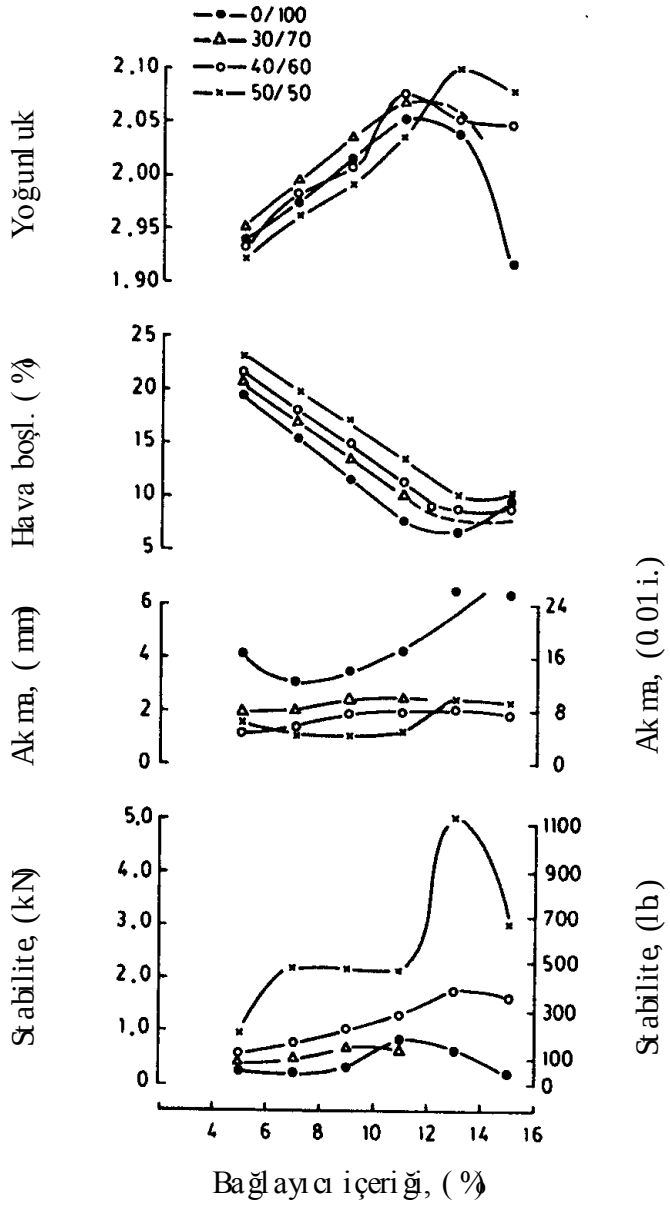
10.3.1.1 Hava Boşlukları

Karışımdaki herhangi bir bağlayıcı oranında, sülfür/asfalt oranı en yüksek olan karışımın hava boşluk oranında en yüksek olduğu görülmüştür. Hava boşluğu oranı; bağlayıcı oranı, sülfür/asfalt oranı ve karışımdaki taş tozu oranına bağlı olarak değişmektedir.

Arazi uygulamaları düşünüldüğünde, SAS karışımlarda ortaya çıkan yüksek hava boşluğu oranları istenen seviyelerde değildir. Ancak sülfürlü asfalt bağlayıcılar, eşit hacim esasına dayanarak kullanıldığında, hava boşluğu oranının kumlu asfalt karışımlarda görülen oranlara kadar geriliediği görülmüştür.

Diğer yandan, SAS karışımların sahip olduğu bu yüksek hava boşluğu oranının, bu karışımların geçirgen oldukları anlamına gelmediği belirtilmelidir. Karışımdaki sülfür dağılımının, bu boşluklar arasındaki bağlantıyı kestiği, yani bu hava boşluklarının, birbirleriyle bağlantılı olmadığı düşünülmektedir.

Shell firmasının, sabit başlıklı bir hava permeametre ile yaptığı ölçümlerden elde edilen verilere göre, SAS karışımlardaki hava boşluğu oranının en yüksek %16 olduğu görülmüştür [1, 82].



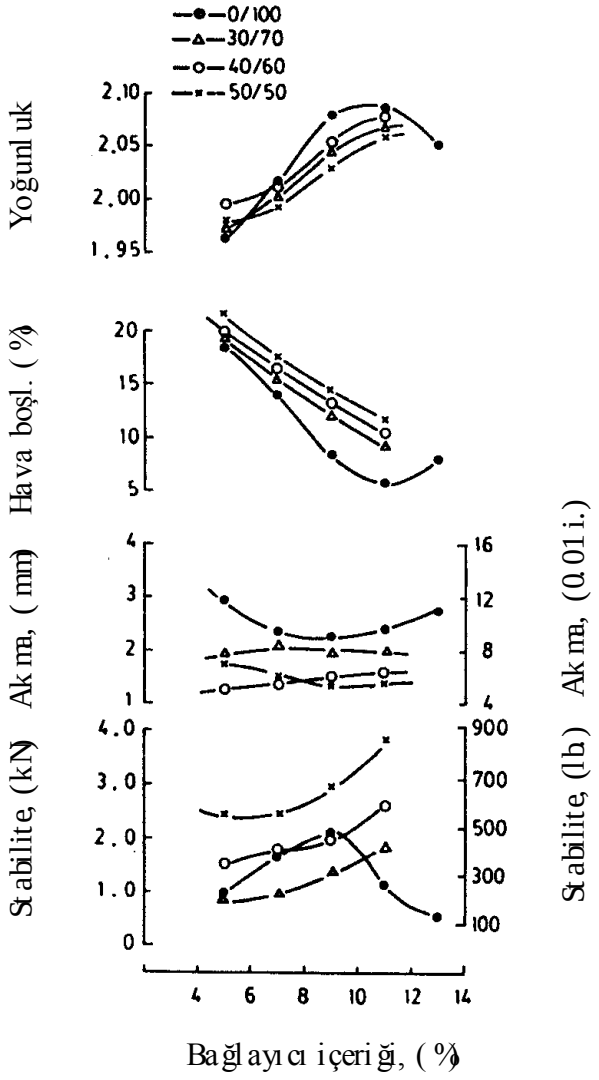
Şekil 10.3 %100 Jubail kumu ile yapılan numunelerin farklı S/A oranlarındaki Marshall tasarım verileri

10.3.1.2 Stabilite ve Akma Değeri

Veriler, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, bağlayıcıların 30/70 sülfür/asfalt oranına dek stabilite değerlerinde yükseltici bir etki sergilediklerinin göstermiştir. Arka sayfadaki Şekil 10.4'te de görüldüğü gibi bazı durumlarda, stabilite değerlerinde düşüşler de görülmüştür.

Grafiklerde karşılaşılan bu tablo, bu tez çalışmasının genel sonuçları açısından büyük önem taşımaktadır. Ortaya çıkan bu sonuçlar, şimdiye dek incelenen

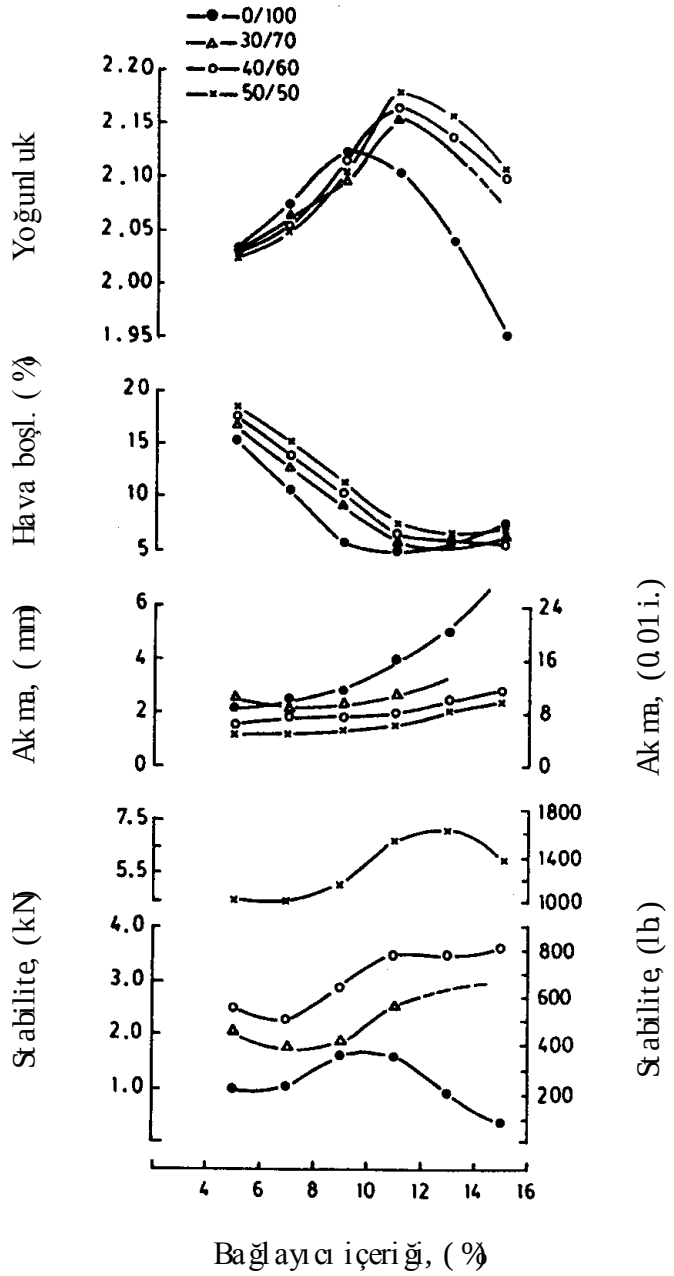
diğer çalışmalarla da birleştirildiğinde, bağlayıcıda ağırlıkça %3.0'a kadar olan orandaki sülfür içeriğinin asıl olarak bir asfalt ekstenderi, yani asfaltın özelliklerini genişleten, yayan, uzatan bir şekilde hizmet verdiği, yapısal özelliklerinin de ikincil bir rol oynadığını destekler yöndedir.



Şekil 10.4 %90 Jubail kumu ve %10 taş tozu ile yapılan numunelerin farklı S/A oranlarındaki Marshall tasarım verileri

%4.0 ve üzerinde sülfür içeriği kullanılan karışımlar ise, daha yüksek stabilite değerlerine sahip olmalarına rağmen, akma değerlerinin düşmesi nedeniyle bu konuda aynı başarıyı gösterememektedir. Bu durum, sülfürün yapısal özelliklerde %4.0 ve üzerindeki oranlarda önem kazanmıştır. Örneğin, Şekil 10.5 incelenecek

olursa %5 ila %11 bağlayıcı oranı değerleri arasında, 40/60 sülfür/asfalt içeren karışımların Marshall stabilitelerinin 2.5 ila 3.5 kN arasında, akma değerlerinin ise 1 ila 2 mm arasında olduğu görülmektedir. Bu değerler, salt asfalt ile elde edilen karışımların değerleri ile kıyaslandığında, aynı aralıklarda, yaklaşık olarak Marshall stabilitelerinin iki misli akma değerlerinin ise yarısı kadar olduğu belirlenmiştir.



Şekil 10.5 %80 Jubail kumu ve %20 taş tozu ile yapılan numunelerin farklı S/A oranlarındaki Marshall tasarım verileri

Şekil 10.3, 10.4 ve 10.5'ten ortak bir çıkarım yapılacak olursa, belirtilen sınırlar aralığında karışım esnekliği (fleksibilite), olumsuz yönde etkilenmediği sürece, bağlayıcının ağırlıkça %3.0 ila %4.0 oranları arasında sülfür içeriğine sahip olması, arzu edilen sonuçlar açısından en uygun değerleri göstermektedir. Sülfür içermeyen karışımlarla mukayese edildiğinde, bahsedilen oranlarda sülfür içeren karışımların stabiliteleri %300'lere varan oranlarda bir artış göstermektedir. Bu artış başlıca, karışımdaki bağlayıcı oranına, seçilen sülfür/asfalt oranına ve karışımdaki taş tozu oranına bağlıdır. Şüphesiz ki kum-asfalt karışımlara sülfür katılması, tasarım çeşitliliğini ve seçilecek alternatifleri genişletmektedir.

Unutulmamalıdır ki, genel bir değerlendirme yapılacağı zaman, bu çalışmada özellikle ele alınan stabilite ve akma değerlerine ek olarak, işlenebilirlik, esneklik, yorulma karakteristiği, vb. gibi daha öncede incelenene özelliklerin de dikkatli bir biçimde göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

SAS karışımlarda, suyun neden olduğu bozulmaların tespiti için, 60 C derecelik bir sıcaklıktaki suyun içerisine batırılıp 24 saat bekletilen Marshall numunelerinin stabilite ve akma değerleri kontrol edilmiştir. Sonuçlar, normal Marshall stabilitesinin belirlendiği, 60 C derecede 30 dakikalık bir suya batırma işleminin sonuçları ile mukayese edilerek, muhafaza edilen yani mevcut değer yüzde stabilite cinsinden belirtilmiştir. Arka sayfadaki Tablo 10.3 ve 10.4 bu sonuçlara ait verileri içermektedir. Bu tablolar incelendiğinde, %20 oranında taş tozu içeren ve 40/60 ve üzerinde sülfür/asfalt oranına sahip, düşük bağlayıcı oranlı karışımlar haricindeki karışımların, 24 saat suda bekletilmiş olmalarına rağmen 30 dakika bekletilen numunelere göre eşit hatta yer yer daha yüksek stabilite değerleri sergiledikleri görülmüştür. Bahsedilen düşük bağlayıcılı, yüksek sülfür oranlı ve taş tozu içeren karışımlara ait bu olumsuz sonuçlar, başka yöntemlerle de denenmiş ve aynı sonuçlara ulaşılmıştır.

Bu sonuçlara göre, SAS karışımlarının taş tozu içerenlerinde, bağlayıcı oranının da belli bir sınır değerin altında olması ile suyun meydana getirdiği bozulmalara karşı olan direncinin zayıf olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 10.3 Su duyarlılığına bir ölçüt olarak, %100 Jubail kumu kullanılarak, muhafaza edilen % Marshall stabilitesi

Sülfür/asfalt oranı (ağırlıkça)	SAS içerisindeki %bağlayıcı oranı				
	5	7	9	11	13
0/100	100	100	100	100	100
30/70	100	100	100	100	-
40/60	98	100	100	98	96
50/50	100	76	81	100	100

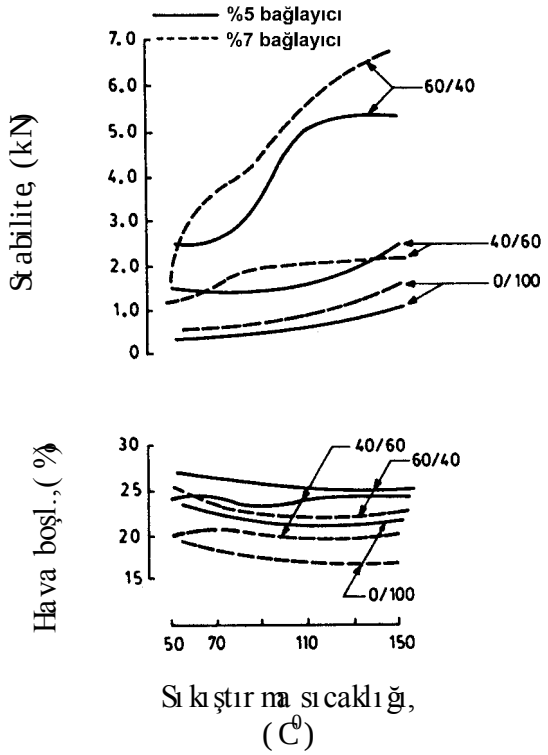
Tablo 10.4 Su duyarlılığına bir ölçüt olarak, %80 Jubail kumu ve %20 taş tozu kullanılarak muhafaza edilen % Marshall stabilitesi

Sülfür/asfalt oranı (ağırlıkça)	SAS içerisindeki %bağlayıcı oranı				
	5	7	9	11	13
0/100	100	100	100	91	71
30/70	89	100	100	100	-
40/60	63	100	100	88	100
50/50	64	84	65	100	86

10.3.1.3 Sıkıştırma Sıcaklığı

Sıcak asfaltlar ile kıyaslandığında, özellikle 120 ila 150 C derece arasındaki bölgede, sülfürlü asfaltların yüksek akışkanlığı, aslında geleneksel yöntemler kullanılarak serme ve sıkıştırma işlemleri için, SAS karışımların uygun olmayan yoğunluk şartlarını tolere edici bir görev üstlenmektedir. Bilhassa yuvarlak ve pürüzsüz kum tanecilleri kullanılarak üretilen karışımlar, silindirleme işlemi sırasında kayma veya akma eğilimi gösterebilirler. Bu nedenle, bu tip sorunlarla karşılaşılmaması için karışımın yoğunluğu arttırılmalıdır. Bu da ancak sıkıştırma sıcaklığının düşürülerek, karışımın akışkanlığının azaltılması ile mümkün kılınabilir.

SAS karışımların, sıcaklığa karşı olan duyarlılıklarını belirleyebilmek üzere bazı Marshall numunelerinin sıkıştırma sıcaklıklarını düşürülmesinin meydana getirdiği etkilerin araştırıldığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma sıcaklığının 140 C dereceden 50 C dereceye kadar düşürülmesinin, %5 ve %7 bağlayıcı içeren Marshall numunelerinin stabilite ve hava boşluğu oranı üzerine olan etkileri, aşağıdaki Şekil 10.6'da görülmektedir.



Şekil 10.6 %100 Half Moon Bay kumu ile yapılan numunelerin eğrilerde belirtilen S/A oranlarında, Marshall stabilitesi ve hava boşluğu oranının sıkıştırma sıcaklığı ile olan ilişkisi

Ortaya çıkan sonuçlar, genel olarak 40/60 ve üzerinde sülfür/asfalt oranı içeren karışımların, sıkıştırma sıcaklığına karşı duyarlı olduklarını ve karışımın 120 C derecenin üzerinde olduğu durumlarda son bir sıkıştırmaya ihtiyaç duydukları yönündedir. 40/60'dan daha düşük sülfür/asfalt oranına sahip karışımlar, kontrol karışımlarınınki ile benzer duyarlılık özellikleri sergilemişlerdir. Bu nedenle, bahsedilen bu karışımların, yani %40'dan az sülfür içeren karışımların normal sıkıştırma sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıklarda yoğunlaşabilecekleri ortaya çıkmıştır.

10.3.2 Elastisite Modülü Deneyi

Elastisite modülü (M_R) deneyini gerçekleştirmek üzere, Jubail kumu kullanılarak farklı kompozisyonlara sahip yüzden fazla Marshall numunesi hazırlanmıştır. Bahsedilen kompozisyonlardaki değişkenler, farklı sülfür/asfalt oranları, farklı bağlayıcı oranları ve farklı oranlardaki taş tozu içeriğidir. Deneye ait tipik sonuçlar, aşağıda görülen Tablo 10.5, 10.6 ve 10.7'de verilmiştir. Şekil 10.7, oda sıcaklığındaki yedi günlük bir kürün ardından, karışımdaki sülfür oranının bir fonksiyonu olarak M_R değerlerindeki değişikleri göstermektedir. Burada karışımdaki sülfür yüzdesi, bağlayıcı yüzdesinden bağımsız olarak verilmiştir.

Tablo 10.5 %100 Jubail kumu kullanılarak,
Elastisite Modülü deney sonuçları*

Sülfür/asfalt oranı	Bağlayıcı içeriği, (%)	Birim ağırlık, (t/m^3)	Hava boşluğu, (%)	M_R	
				(psi.)	(MPa.)
0/100	5	1.94	20.4	$5.5x10^4$	379
0/100	7	1.98	16.2	$5.4x10^4$	372
30/70	5	1.94	21.6	$6.3x10^4$	435
30/70	7	1.99	17.5	$6.8x10^4$	469
30/70	9	2.04	14.0	$7.1x10^4$	490
30/70	11	2.07	10.6	$7.9x10^4$	545
40/60	5	1.93	22.4	$6.3x10^4$	435
40/60	7	1.98	18.6	$8.9x10^4$	614
50/50	7	1.98	19.5	$28.1x10^4$	1938
50/50	9	2.01	17.3	$28.5x10^4$	1965
60/40	7	2.02	27.9	$35.6x10^4$	2452

* Deneyler, oda sıcaklığında bir haftalık kürlerin ardından yapılmıştır.

Tablo 10.6 %90 Jubail kumu ve %10 taş tozu kullanılarak, Elastisite Modülü deney sonuçları*

Sülfür/asfalt oranı	Bağlayıcı içeriği, (%)	Birim ağırlık, (t/m^3)	Hava boşluğu, (%)	M_R (psi.)	M_R (MPa.)
0/100	7	2.02	14.0	$9.8x10^4$	674
30/70	7	2.02	16.2	$12.0x10^4$	830
30/70	9	2.06	12.5	$12.6x10^4$	866
40/60	5	2.00	19.3	$21.9x10^4$	1494
40/60	7	2.02	16.8	$23.4x10^4$	1615
50/50	7	2.01	17.8	$30.4x10^4$	2094
50/50	9	2.04	15.1	$36.9x10^4$	2543
60/40	7	1.99	19.5	$105.9x10^4$	7306

* Deneyler, oda sıcaklığında bir haftalık kürlerin ardından yapılmıştır.

Tablo 10.7 %80 Jubail kumu ve %20 taş tozu kullanılarak, Elastisite Modülü deney sonuçları*

Sülfür/asfalt oranı	Bağlayıcı içeriği, (%)	Birim ağırlık, (t/m^3)	Hava boşluğu, (%)	M_R (psi.)	M_R (MPa.)
0/100	7	2.08	11.1	$8.1x10^4$	558
30/70	7	2.07	13.6	$8.9x10^4$	614
30/70	9	2.11	10.1	$9.5x10^4$	655
40/60	5	2.03	17.7	$15.4x10^4$	1062
40/60	9	2.12	10.7	$16.2x10^4$	1117
50/50	5	2.02	18.3	$22.2x10^4$	1528
50/50	9	2.12	11.5	$32.3x10^4$	2225

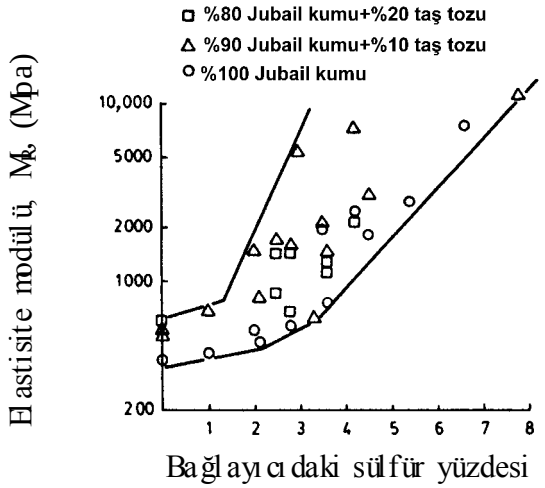
* Deneyler, oda sıcaklığında bir haftalık kürlerin ardından yapılmıştır.

Verilere dayanarak hazırlanan Şekil 10.8 ve 10.9'dan elde edilen çıkarımlara göre;

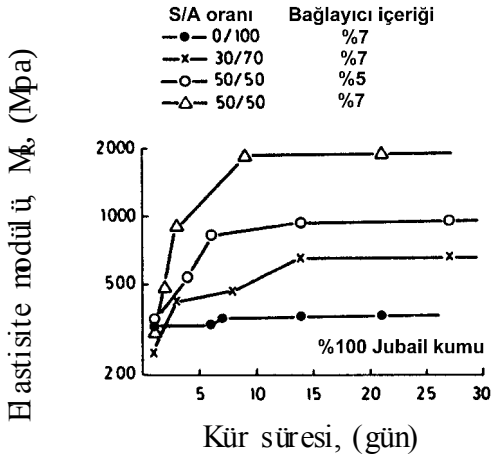
1. Sabit sülfür/asfalt oranı şartlarında, karışımdaki bağlayıcı oranının yükselmesi M_R değerini de yükseltmektedir.
2. Sabit bağlayıcı oranı şartlarında, sülfür/asfalt oranının yükselmesi de M_R değerini yükseltmektedir.
3. Karışımdaki bağlayıcı oranına bakılmaksızın %10 oranında taş tozuna sahip karışımdaki, sülfür oranının %2'ye kadar olan kısmında M_R değerinde de paralele yakın bir yükselme görülmektedir. %2'nin aşılmasıyla artış dikleşmektedir.
4. Hiç taş tozu içermeyen karışımlarda ise, bu ani dikleşmenin %4'lük sülfür oranından sonra gerçekleştiği görülmektedir. Yani aynı M_R değerlerine ulaşabilmek için, taş tozu içermeyen karışımların daha yüksek sülfür oranına ihtiyaç duydukları görülmektedir.

M_R değerleri belirlenirken, oda sıcaklığında iki üç hafta kürlere tabi tutulan numuneler, altı ay gibi uzun dönem kürlerinden elde edilen sonuçları %85 ila %100'lük bir aralıkta temsil etmektedir.

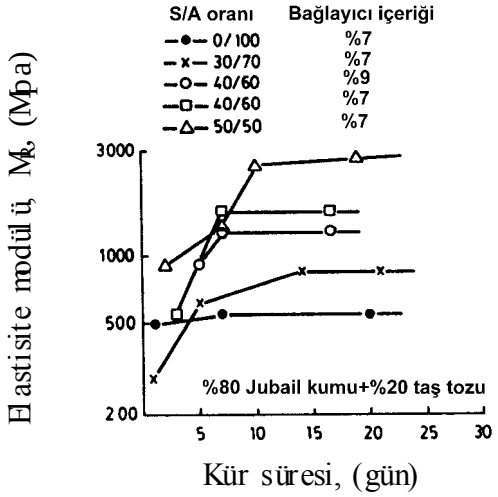
Anlaşılmıştır ki, trafik şartları altında SAS karışımlar, sülfürün, tekrar kristalize olması gibi yapısal özellik değişiklikleri nedeniyle yoğunlaşmalara maruz kalmaktadır. Hiç şüphesiz ki, bu tip arazi kaynaklı modifikasyonlar, SAS karışımların M_R değerleri üzerinde etkili olacaktır.



Şekil 10.7 Sülfür içeriğine bağlı elastisite modülü değişikliği



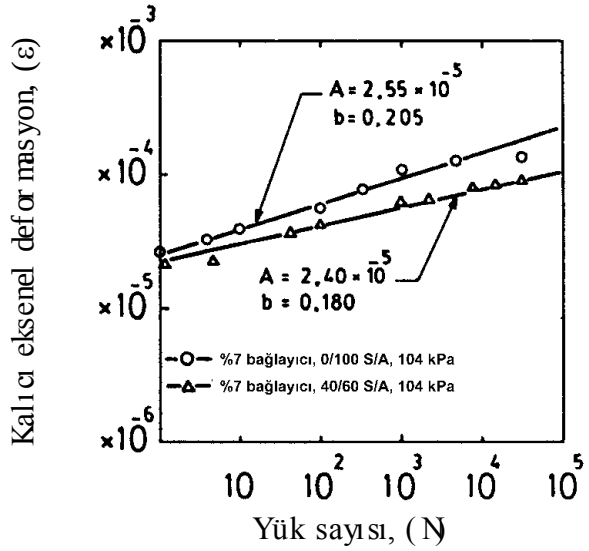
Şekil 10.8 Kür süresine bağlı elastisite modülü değişikliği



Şekil 10.9 Kür süresine bağlı elastisite modülü değişikliği

10.3.3 Kalıcı Deformasyon Karakteristiği

Asfalt karışımların maruz kaldığı tekrarlı yük uygulamalarından elde edilen deneyimlere dayanarak [97, 98, 99], üç eksenli yükleme deneyinden elde edilen veriler Şekil 10.10'da görüldüğü gibi değerlendirilmiştir. Grafik eksenel gerilmelerin, yük uygulama sayılarına karşı olan davranışını sergilemektedir. Bu da kalıcı deformasyon karakteristiği hakkında bilgiler ortaya koymaktadır.



Şekil 10.10 40 C^0'de yük sayısına bağlı kalıcı eksenel deformasyon değeri

Şekilde de görüldüğü gibi, her eğimin bir ara parça A ve eğim b değeri mevcuttur. Bu A ve b değerleri, G Ahlborn isimli bir bilimadamının geliştirdiği ELSYM-5 isimli bilgisayar programına veri girişinde kullanılmaktadır [100, 101]. Bu program, tekerlek izi derinlikleri sayesinde kalıcı deformasyonların belirlendiği bir alt program olarak kullanılmaktadır. Bu eğriler;

$$\varepsilon_a = A.N^b \qquad (10.2)$$

denklemi ile ifade edilirler. Burada;

ε_a = Toplanan, yığılan gerilmeyi,

N = Tekrarlı yük sayısını göstermektedir.

Deneyler, %5, 7, 9 ve 11 oranında bağlayıcı içeren farklı sülfür/asfalt oranına sahip karışımlarla gerçekleştirilmiştir. Numuneler, Half Moon Bay kumu kullanılarak yapılmıştır. Deney sıcaklıkları, 23, 40 ve 50 C derece olarak uygulanmıştır. Uygulanan eksenel tekrarlı gerilme, 34.5 kPa'dan (5 psi) en çok 241.2 kPa'a (35 psi) dek derecelendirilmiştir. Yüksek gerilme seviyeleri yalnızca %40 ve daha fazla sülfür içeren karışımlara uygulanmıştır.

İkinci deney göz önüne alınarak, her yük tekrarında toplanan, yığılan eksenel gerilmede oluşan diferansiyel değişimler;

$$\frac{d\varepsilon_a}{dN} = A.b.N^{b-1} = \Delta\varepsilon_a \quad \text{veya} \quad \Delta\varepsilon_a = k.N^{\alpha} \qquad (10.3)$$

formülleri ile hesaplanmaktadır.

Bu formüllerde;

k = A.b,

α = 1-b'dir.

α teriminin, 0'a eşit olduğu durumda, yükleme sayısının sabit kaldığı, yük başına farklı gerilmelerdeki artış değeri bulunur. Üssel α'nın pozitif olduğu durumlarda, her yük tekrarında $\Delta\varepsilon_a$ değeri küçülecektir. Üssel α'nın negatif olma halinde ise, N'nin üssü pozitif olacağından, her yükleme ardından meydana gelen farklı gerilme değeri de artacaktır.

Tablo 10.8 ve 10.9, sülfür içermeyen kontrol karışımları ile kıyaslandığında, SAS karışımların 23 ve 40 C derecede sahip olduğu k ve α değerlerini göstermektedir. Sabit tekrarlı gerilmeler için, sülfür/asfalt oranı arttıkça α değeri de artmaktadır. Örneğin, Tablo 10.8'de görülen 138 kPa'lık tekrarlı eksenel gerilme altında, karışımdaki sülfür oranının %0'dan %30'a çıkarılmasıyla α değeri 0.414'den 0.675'e çıkmaktadır. %50 oranında sülfüre ulaşıldığında da bu değer, 0.851'e ulaşmaktadır. Bu da, karışımdaki sülfür oranının artması durumunda yük başına meydana gelen $\Delta\varepsilon_a$ gerilmesinin azaldığını göstermektedir. Tablo 10.8 ve 10.9'

dan elde edilen sonuçlara dayanarak, genel olarak SAS karışımların, sülfür içermeyen kontrol karışımlarıyla mukayese edildiğinde tekerlek izi oluşumuna karşı daha az duyarlı oldukları, yani daha mukavim oldukları açıkça ortaya çıkmaktadır.

Tablo 10.8 23 C° de, %7 bağlayıcı içeren numunelerin Kalıcı deformasyon özellikleri*

Sülfür/asfalt oranı	Tekrarlı gerilme seviyesi, (kPa)	Birim ağırlık, (t/m³)	k^*	α^*
0/100	69	1.96	1.40	0.776
0/100	138	1.97	1.95	0.414
0/100	207	1.97	2.70	0.380
30/70	69	1.94	0.76	0.746
30/70	138	1.94	1.21	0.675
30/70	207	1.95	1.61	0.630
50/50	69	1.94	0.57	0.819
50/50	138	1.96	1.33	0.851
50/50	207	1.95	2.21	0.859

* $\Delta\varepsilon_a = k.N^{\alpha}$

Tablo 10.9 40 C° de, %9 bağlayıcı içeren numunelerin Kalıcı deformasyon özellikleri*

Sülfür/asfalt oranı	Tekrarlı gerilme seviyesi, (kPa)	Birim ağırlık, (t/m³)	k^*	α^*
0/100	34.5	2.02	0.98	0.918
0/100	69	1.99	5.62	0.782
0/100	138	1.99	14.74	0.497
30/70	69	1.99	7.18	0.713
30/70	138	1.99	9.30	0.649
30/70	207	2.00	11.73	0.509
50/50	69	1.99	1.37	0.808
50/50	138	1.98	1.76	0.686
50/50	207	1.97	5.05	0.654

* $\Delta\varepsilon_a = k.N^{\alpha}$

10.4 Bölüm Özeti ve Sonuçları

Bu araştırma, rüzgarın yığdığı kumun ve iyi kalitede kaba agreganın bolca ve yakın mesafeli kaynaklarda bulunduğu çöl ve benzer bölgelerde, sülfür-asfalt-kum (SAS) karışımların yol üstyapı malzemesi olarak kullanılmalarını değerlendirmek üzere yürütülmüştür. Bu sülfür-asfalt-kum malzemelerine ve sülfür içermeyen kontrol karışımlarına Marshall tasarımı, elastisite modülü ve tekrarlı yükler altında kalıcı deformasyon karakteristik deneyleri olmak üzere laboratuar karakterizasyon deneyleri uygulanmıştır. Çalışmalarda kullanılan malzemeler, 60-70 penetrasyon dereceli bir çeşit asfalt, Suudi Arabistan'ın doğusundan temin edilen iki çeşit kum, bazı durumlarda kumun belli bir miktarıyla yer değiştirmek üzere taş tozu ve 0/100, 20/80, 30/70, 40/60, 50/50 ve 60/40 olmak üzere altı değişik sülfür/asfalt oranında bağlayıcılardan meydana gelmektedir.

Meydana gelen sonuçları sıralanacak olursa;

1. Ergimiş sülfürün ağırlıkça %60'a kadar olan oranlarda asfalta katılması, toplam bağlayıcı içerisindeki sülfür miktarına da bağlı olarak karışımlara değişik değişik özellikler katmaktadır.

2. Ağırlıkça %30 oranına kadar sülfür içeren asfalt bağlayıcı ile üretilen karışımlardan elde edilen sonuçlara göre Marshall tasarım verilerinin, sülfür içermeyen kontrol karışımları ile önemli farklılıklar göstermedikleri, yaklaşık olarak aynı özelliklere sahip oldukları görülmüştür.

   Ağırlıkça %30 ve %40'a varan sülfür oranlarında, kontrol karışımlarıyla mukayese edildiğinde, sülfürlü asfalt karışımların biraz da olsa düşen elastikliklerinin herhangi bir olumsuz etkisine maruz kalmaksızın stabilite değerlerinde önemli artışlar olduğu görülmüştür.

   Ağırlıkça %40'ın üzerinde sülfür kullanılan karışımların stabilitelerinin, rijitliklerinin önemli ölçüde artmaya devam ettiği, ancak akma değerlerinin yani esnekliklerinin de önemli ölçüde azaldığı dikkatleri çekmiştir.

3. Ağırlıkça %50 ve üzerindeki oranlarda sülfür içeren bağlayıcılı karışımların, sıcaklığa karşı duyarlı oldukları da tespit edilmiştir. Bu şekilde karışımların sıcaklıkları, sülfürün katılaşma sıcaklığının altına inmemelidir. Yani bu malzemeler, 120 C derecenin altındaki sıcaklıklarda sıkıştırılamazlar.

Ağırlıkça %40 veya daha az oranda sülfür içeren bağlayıcılar ile oluşturulan karışımlar, salt asfalt ile oluşturulan kumlu karışımlar ile mukayese edildiğinde benzer, ılımlı bir sıcaklık duyarlılığı sergilemişlerdir. Bu oranlara sahip karışımlarda katılaşma, 120 C derecenin altındaki sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Dolayısıyla daha düşük sıcaklıklarda da sıkıştırılabilirler.

4. Elastisite modülü (M_R) verilerine göre, kum ve bağlayıcının, yani toplam karışımın ağırlıkça %2'sine kadar olan oranda sülfür içeren SAS karışımların M_R değerleri, sülfürsüz kontrol karışımları ile kıyaslandığında, %0'dan %100'e varan aralıklarda artışlar göstermektedir.

   Sülfür oranı, karışım ağırlığının %4'ü ila %5'i arasına çıkarıldığında daha da yüksek M_R değerlerine ulaşılmıştır. İki ila üç haftalık oda sıcaklığındaki kürler ardından M_R değerlerinin sabit bir seviyede kaldığı görülmüştür.

5. 23, 40 ve 50 C derecelerde gerçekleştirilen, yük tekrarının bir fonksiyonu olan kalıcı deformasyon karakteristiklerinin, kum-asfalt karışımlara sülfür katılmasının, tekerlek izi oluşumunda beklenen azalmayı gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu karakteristiğin, ilgili bölümdeki kalıcı deformasyon ile ilgili formülasyonu da desteklediği tespit edilmiştir.

11. SÜLFÜR-ASFALT KARIŞIMLARIN TEKRAR KULLANIMI

Asfalt çimentosunun yüksek maliyeti ve iyi agrega kıtlığındaki artış, eski üstyapıların tekrar değerlendirilip kullanılabilmesi uygulamasına öncülük etmiştir. Bu alanda, bir çok çalışma gerçekleştirilmiş ve tekrar kullanım konusu, yeniden inşa edilen ya da yeniden kaplanan yollarda standart bir uygulama olarak yer almıştır.

Ancak buradaki önemli husus, bu tez çalışmasında, bir çok özelliği ve performansı incelenen sülfürlü asfalt üstyapıların da tekrar kullanıma uygun olup olmadıklarıdır. Uzmanların, bu konuda bazı şüpheleri belirmiştir. Çünkü, soğuk sülfürlü asfalt karışımların, çok yüksek derecede ısıtılmış yeni agregalar ile buluşmaları esnasında meydana gelecek sülfür dumanı veya sülfür gazının, yüksek konsantrasyonlara ulaşmasından ya da arazi şartlarında, karışımda bazı sorunlarla karşılaşılmasından korkulmaktadır. Bu şüphelerin araştırılması ve değerlendirilmesi amacıyla bir laboratuar ve arazi deney programı geliştirilmiş ve uygulanmıştır [6].

11.1 Tekrar Kullanımla İlgili Laboratuar Deneyleri

Deneyler, daha önce de incelenen, Ontario'da yapılan yollar baz alınarak gerçekleştirilmiş ve gerekli malzemeler, bu deneysel amaçlı yollardan elde edilmiştir. Örneğin, bir laboratuar çalışmasının gerçekleştirilmesi için gerekli malzeme, inşa edilen birinci yolun D bölümünden sağlanmıştır. Bu D bölümü, 50/50 sülfür/asfalt oranına sahip yüksek miktarda bağlayıcı içeren bir yapıya sahiptir.

Laboratuar çalışmasının yapıldığı tarihte, bu yol hizmet ömründe beşinci yılını tamamlamış durumdadır. Tekrar kullanılacak malzemelerin bazıları, yeni malzemeler ile yine 50/50'lik bir sülfür/asfalt oranı meydana getirecek şekilde birleştirileceklerdir.

1900 gr. ağırlığındaki yeni agregalar, çelik bir karıştırma kabına konarak 260 C dereceye ısıtılmıştır. Sonra kap, karıştırma tezgahına konarak içerisine 23 C derecedeki 1900 gr. sülfürlü asfalt karışım katılmıştır. Katılma işleminin hemen ardından, karıştırılmaya başlanmıştır. Bu işlem, tekrar kullanılmak üzere elde edilen

malzemenin, plentin ağırlık kabında (weigh batcher) ısıtılmış agregaya katılarak birlikte karıştırıcıya aktarılmalarını temsil etmektedir. Karıştırma işlemi başlar başlamaz hafif bir toz oluşmuş ve hafif bir sülfür kokusu duyulmuştur. Ancak kısa sürede, bu oluşumların ikisi de oldukça azalmış hatta kaybolmuştur.

Taşınabilir, sülfür dioksid (SO_2) ve hidrojen sülfid (H_2S) miktarını ölçebilir araçlar yardımıyla karıştırma kabında yapılan ölçümlerde, karıştırma işleminin başlangıcında oldukça az miktarda gaz oluşumu saptanmıştır. Bu oluşumlar da karıştırma işleminin, asfalt çimentosu katılarak devam ettirilmesi ile ortadan kaybolmuştur.

Oluşan gaz konsantrasyonları, aşağıdaki Tablo 11.1'de görülmektedir.

Tablo 11.1 Laboratuar deneyleri gaz emisyonları

Karışım	Sıcaklık, (C^0)	H_2S, (ppm)	SO_2, (ppm)
Yeni agrega, %50	260	2	40
Tekrar kullanılan, %50	23	0	1

Devam eden deneylerde de aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneylere dayanarak, meydana gelen bu gazların, herhangi bir açıdan en ufak bir olumsuz etkisi tespit edilmemiştir. Laboratuar çalışmasından elde edilen bu sonuçların onanması amacıyla, arazi üzerinde de çalışmalar yapılması kararlaştırılmıştır.

11.2 Tekrar Kullanımla İlgili Arazi Deneyleri

Arazi çalışmalarındaki düzenlemeler, laboratuar çalışmalarında da kullanılan, birinci yolun D bölümünden 30 ton malzemenin kazınarak sökülmesi üzerine yapılmıştır. Sökülen malzeme, Ontario'daki yol inşaatlarından bahsederken de değinilen HL-4 isimli karışımdan oluşan, sadece aşınma tabakasının oluşturduğu malzemedir. Bu nedenle temel tabakasındaki kumlu karışım, bu tekrar kullanımı değerlendirme işlemleri için kullanılmamıştır.

Üstyapı yüzeyinin kazınarak sökülmesi işleminde, yüzeye yüksek ısı uygulanmıştır. Bu nedenle, makinanın yakınlarında bir sülfür kokusunun duyulması normal karşılanmıştır. Ancak, taşınabilir gaz ölçer cihazlarla yapılan ölçümlerde, bu sökme işlemini gerçekleştiren makinanın, dönen milinin kenarlarının içinde yüksek

konsantrasyonda gaza rastlanmıştır. Makinaya ait milin kenarlarının içinde ve dışında yapılan konsantrasyon ölçümleri aşağıdaki Tablo 11.2'de verilmiştir.

Tablo 11.2 Kazıyıcıdaki gaz emisyonları

Konum	H_2S, (ppm)	SO_2, (ppm)	Hidrokarbonlar
Mil kenarlarının dışında,	6-8	0	0
Mil kenarlarının içinde,	>35	<2	25-30
Makina operatörünün bulunduğu bölümde,	2	0	0

Tabloda da görüldüğü gibi, milin hemen dışındaki yolun kenarlarında ölçülen gaz değerleri 0'a kadar inmektedir ve işlemler sırasında çalışanlar üzerinde de herhangi olumsuz bir etkiye rastlanmamıştır.

Kazınan bu malzemeler, iki kamyon vasıtasıyla tekrar kullanım konusunda çalışılan bir plente götürülmüştür. Kullanılan bu plent, tekrar kullanım konusuna ait kural ve kaidelere uygun olarak seçilmiştir.

Küçük bir yanlış anlama nedeniyle, daha önce planlanan ve 30 ton olarak belirlenen sökülmesi gereken tekrar kullanılacak malzeme 20 ton olarak kazınarak sökülmüştür.

Bu işlemler yapılırken, plente, tekrar kullanılacak malzeme ile beslenebilmesi için bir taşıyıcı bant ilave edilmiştir. Plentin karıştırıcısı, içerisine gerekli malzemenin aktarılabilmesi için bir açıklık, menfez ile buna bağlı bir boşaltma oluğuna sahiptir. Bu tip bir yapı, karıştırıcının içerisindeki gaz oluşumunun ölçülebilmesine de imkan tanımaktadır. Gaz oluşumlarının tespiti için, üç adet buhar ölçer cihaz kullanılmıştır. Bu cihazlar, H_2S, SO_2 gazlarını ve hidrokarbonların oluşturduğu buharları ölçerek kaydetmektedir. H_2S ve SO_2 gazlarını ölçmekte kullanılan cihazlar taşınabilir olduğundan, plentin çeşitli yerlerinde konumlandırılarak gaz konsantrasyonları ölçülmüştür.

Bu bölgede yapılacak çalışmalarda, işlemelerin %25 oranında tekrar kullanılacak malzeme ile %75 oranında yeni malzemelerin birbirine katılması şeklinde başlaması düşünülmüştür. Daha sonra ise bu oranının, %40 tekrar kullanılan

malzeme ile %60 yeni malzeme oranına kadar çıkarılması da planlanmıştır. Her ne kadar bu oranın, 50/50'ye kadar çıkarılması düşünülmüşse de, bu orana ait şartlar altında karıştırma sıcaklığının 315 C dereceye çıkarılması gerektiğinden ve bu sıcaklığın malzemelere ve plentin bazı donanımlarına zarar verebileceği endişesi ile vazgeçilmiştir. Sonuçta bu oran, en fazla 274 C derecelik bir karıştırma sıcaklığına ihtiyaç duyan 40/60'lık bir oranla gerçekleştirilmiştir.

Plent, normal oranı sayılan 25/75'lik tekrar kullanılan/yeni malzeme oranı ile çalışırken, karıştırıcıdan açığa çıkan gaz emisyonları ölçülmüştür. Bu ölçümler, diğer oranlar için de emsal teşkil etmiş, hatta 40/60 oranlı bir çalışmaya ait veriler de aşağıdaki Tablo 11.3'te gösterilmiştir.

Tablo 11.3 Arazi deneyi, plent gaz emisyonları

Durum	Sıcaklık, (C^0)	H_2S, (ppm)	SO_2, (ppm)	Hidrokarbonlar
Normal işlem sülfür-asfaltsız	-	0	0	150
Tekrar kullanılan, (boşaltma oluğunun 30 cm uzağında)				
%40 sülfür-asfalt	25	0	0	15-24
%60 yeni	274	-	-	-
Tekrar kullanılan, (karıştırıcıda)				
%40 sülfür-asfalt	25	3	20	135-140
%60 yeni	274	seyrek	seyrek	seyrek
Son karışım, (kamyon kasasında)	130	0	8	-

Bu tablodaki veriler, elde edildikten sonra, işlemler, cihazların filtrelerinin temizlenmesi için kısa bir süreyle durdurulmuştur. Sonra, 25/75 tekrar kullanılan/yeni malzeme oranlı sülfürlü asfalt tekrar kullanılan malzeme denemesi gerçekleştirilmiştir. İşlemler, önce taş sonra tekrar kullanılan sülfürlü asfalt son olarak da kumun yerleştirilmesiyle başlanmıştır. Daha sora bu malzemeler, karıştırıcıya aktarılmış ve karışıma gereği kadar asfalt çimentosu katılmıştır. Ardından, karıştırıcının boşaltma oluğunun 30 cm açığından ölçümler yapılmış ve

yukarıdaki tabloda da görüldüğü gibi sonuçlar ihmal edilebilir büyüklüklerde çıkmıştır.

Taşınabilir cihazlar ile yapılan ölçümlerde, plente kamyonlarla yapılan yüklemeler sırasında da herhangi bir yerde herhangi bir gaz oluşumuna rastlanmamıştır.

İlk kamyonun yüklenmesinin ardından agrega siloları boşaltılmış, kurutucu sıcaklığı yükseltilmiş ve silolar 275 C derecede iken yeniden agrega ile doldurulmuştur.

Sülfürlü asfalt malzemesi bitmeden, 40/60 tekrar kullanım oranlı iki kamyon daha yüklenebilmiştir. İşlemler sırasındaki gaz konsantrasyonları ölçülmüş ve daha önce boşaltma oluklarındaki gibi, şimdi de karıştırıcıdaki değerler de onuncu tabloda verilmiştir. Taşınabilir gaz ölçerler, tekrar plent çevresinde gezdirilmiş ve yine herhangi bir H_2S veya SO_2 gazı oluşumuna rastlanmamıştır.

Bu cihazlar, 0.5 ppm'lik gaz oluşumuna duyarlı cihazlardır. Cihazlardan biri, yüklenmiş kamyonlardan birinin köşesine, 40/60'lık karışım oranlı sülfürlü asfalt yüzeyin hemen üzerine konmuştur. Cihaz, hiç H_2S gazı tespit edemezken, 6 ila 8 ppm'lik bir SO_2 konsantrasyonu ölçmüştür. Kamyonun yanında ise, hiçbir gaz oluşumuna rastlanmamıştır. Kamyondaki yeniden kullanılacak malzemenin sıcaklığı, 130 C derece olarak ölçülmüştür.

Karıştırma işlemleri sırasında, sıcak plentin yakın çevresinde yapılan tüm çalışma ve ölçümlerde herhangi bir olumsuz etki tespit edilememiştir. Kısa bir süre için hafif bir sülfür kokusu duyulmuşsa da, daha sonra bu etki de ortadan kalkmıştır.

Hem 25/75 hem de 40/60'lık tekrar kullanılan/yeni malzeme oranlı karışımlar, ilgili yollara götürülerek standart prosedürleri gereği serilmişlerdir. Kaplama işlemleri sırasında çok az bir kokuya ve rahatsızlık verici etkilere rastlanmıştır. Malzemeler, diğer sülfürlü veya sülfürsüz karışımlar ile aynı yöntemlerle nakledilmişlerdir. Üç kamyonla taşınan malzemeler, ikinci bağlayıcı tabakası olarak serilmiştir. 40/60 tekrar kullanılan/yeni malzeme oranına sahip karışımın özellikleri ise, arka sayfadaki Tablo 11.4'te verilmiştir.

Tablo 11.4 24 saatlik bir sürenin ardından, tekrar kullanılan 40/60 sülfür-asfaltın karışım özellikleri

Özellikler	Değer
Normal özgül ağırlık	2.458
Maksimum özgül ağırlık	2.532
Hava boşluğu, (hacimce %)	2.9
VMA, (%)	15.3
Marshall akma değeri, (mm)	3.3
Marshall stabilitesi, (N)	8237

Yapılan tüm bu işlemler neticesinde, ortaya çıkan verilere dayanarak, sülfürlü asfalt karışımların tekrar kullanıma uygun oldukları tespit edilmiştir. İşlemeler sırasında, plentte hiçbir sorunla karşılaşılmamış ve plent personelini rahatsız edecek hiçbir olumsuz etki meydana gelmemiştir. Aynı durumlar, serme işlemleri için de geçerlidir. Tüm işlemler, diğer standart karışımlarınki ile aynı şekilde gerçekleştirilmiş, hatta meydana gelen sülfür dumanı, yeni olarak inşa edilenlerinkinden daha az miktarda açığa çıkmıştır.

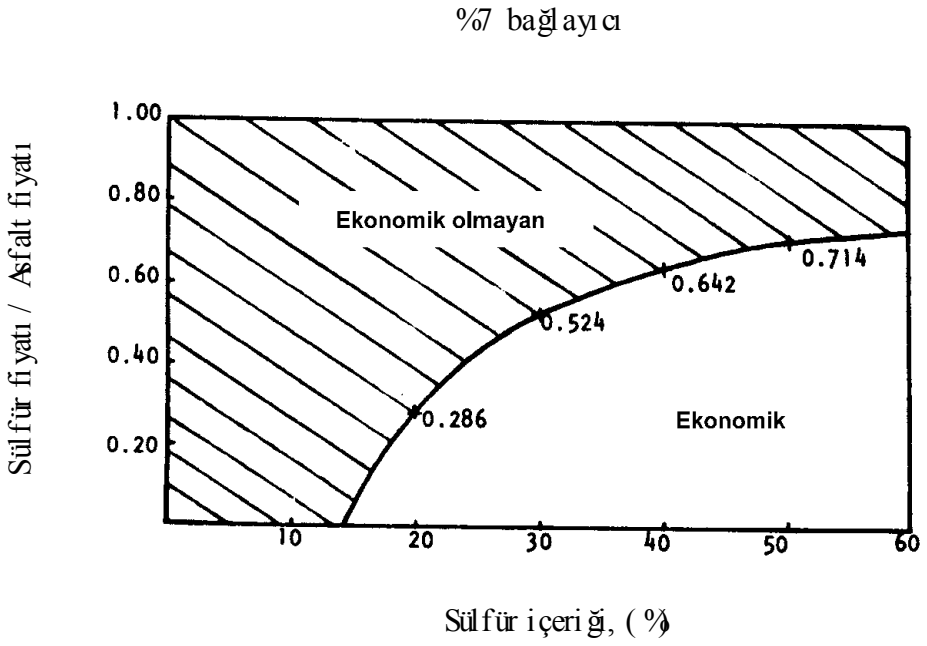
12. EKONOMİK İRDELEME

Sülfürlü asfalt bağlayıcı kullanarak üstyapı imalatlarının yapılmasındaki en önemli amaçlardan biri de, salt asfalt bağlayıcı ile imal edilen üstyapılara göre daha ekonomik olabilmesidir. Bu amaca ulaşılıp ulaşılamadığı tez çalışmasının bu bölümünde irdelenecektir. Öncelikle, çalışmanın başından beri değinilen sülfür hammaddesinin kimyasal özellikleri maddeler halinde ele alınacaktır [116].

- **Formülü:** S
- **Sertliği:** 1 - 2
- **Yoğunluğu:** 2.2
- **Kristal sistemi:** Ortorombik sistemde kristallenir.
- **Bulunuş şekli:** Masif, böbreğimsi ve kayaçlar içinde saçılmış olarak bulunur.
- **Rengi ve çizgi rengi:** Sarı ve beyazımsı sarı renklidir, çizgi rengi ise beyazdır.
- **Tanıma özellikleri:** Konkoidal kırıklı, elmas parıltılı, saydam veya yarı saydamrenkli ve iyi dilinimlidir. 108^0 C de erir. CS_2 de çözünür. Mavi alev çıkararak yanar. SO_2 kokusu yayar. Kristalli, toprağımsı ve taneli olabilir.
- **Bulunduğu yer:** Bazı volkanik merkezlerde sübl imasyon olarak bulunur. Tortul kayaçlarda rastlanır.
- **Kullanım yeri:** Lastik, kimya sanayisinde, zirai ilaç, kibrit ve barut imalatında kullanılır.

Sülfürün maliyeti düşünülürken, asfalt ile aralarındaki özgül ağırlık farkına da dikkat edilmelidir. Sülfürün özgül ağırlığı yaklaşık olarak 2 iken, asfalt çimentosunun özgül ağırlığı yaklaşık olarak 1'dir. Bu da aynı hacimdeki malzemelerde, sülfürün asfaltın iki katı ağırlığında olduğu anlamına gelir. Ama bu araştırmada, diğer tüm çalışmalarda olduğu gibi ağırlık ölçüsü temel alınacak olursa, yapılacak mukayeseler daha anlamlı ve anlaşılır olacaktır.

Diğer bir taraftan, sülfürün maliyeti, bulunduğunuz, yani sülfürün sağlanacağı bölgeye birinci dereceden bağlıdır. Yine de aşağıda, Şekil 12.1'de görülen grafik bu konuda merak edilen hususlara belli bir ölçüde açıklık getirmektedir [16].



Şekil 12.1 Fiyat oranları

Görülen grafikte, göz önünde bulundurulan asfalt içeriği, geleneksel karışımlar için %6, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımlar için %7 olarak seçilmiştir. Düşey eksen, sülfür maliyetinin asfalt maliyetine olan oranıdır. Yatay eksen ise, bağlayıcıdaki, % cinsinden sülfür oranını temsil etmektedir. Eğri ise, sülfür kullanımının ekonomik ve ekonomik olmayan iki bölgesini birbirinden ayırmaktadır. Örneğin, grafik üzerinde bir değerlendirme yapılacak olursa, %30 oranında sülfür içeren ekonomik bir karışım hazırlanması durumunda, böyle bir bağlayıcının maliyeti, salt asfalt kullanılarak elde edilen bir bağlayıcının maliyetinin, en çok 0.524 katı olacaktır. Diğer bir deyişle, %30 oranında sülfür içeren bir karışımda, sülfürün

fiyatının, asfaltınkine olan oranının 0.524'e kadar olan aralığı için, karışımekonomik olarak kabul edilebilir. Dikkat edilecek husus, bu oranın karışımlar arasındaki değil, bağlayıcılar arasındaki fiyat oranı olduğudur. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında daha ayrıntılı bir fiyat analizi ve karşılaştırması yapılacaktır.

Şimdi, tez çalışmasının devameden bölümlerinde sülfür kaynakları, üretimi, tüketimi, maliyeti, ülkemizdeki ve dünyadaki durumu gibi konular ayrıntılı bir biçimde incelenecektir.

12.1 Tanım ve Sınıflandırma

Sülfür, yeryüzünde %0.06-0.09 oranında bulunan, endüstriyel hammaddelere giren bir elementtir. Pratik olarak bütün bitkilerin ve hayvanların bünyelerinde bir miktar sülfür bulunur.

Gerek tabiatta ve gerekse sanayi de elementel sülfürün oluşum mekanizması H_2S ve SO_2 gazlarının oksitlenmesiyle elementel sülfürün çökelmesine dayanır.

Rengi kanarya sarısı, bal sarısı, yeşilimsi sarıdır. Bünyesinde mikro kristalin pirit içeren sülfür cevheri parlak koyu gri renklidir. 119 C derecede ergidiği için en kolay tanıma usulü kibrit alevine tutmaktır. Alevde katran gibi eriyerek siyah damlacıklar halinde damlamaya başlar. Hafif açık mavi renkli alevi vardır ve çıkan SO_2 gazı zehirlidir. H_2S gazı da zehirli olup, zehirlenme gerçekleştikten sonra aniden düşüp bayılma görülür. Reçine parlaklığına sahiptir. Saf sülfür yarı şeffaftır. Kırılması pürüzlü ve konkoidaldir. Beyaz çizgi gösterir. Sertliği 1.0-2.0 arasında değişir. Yoğunluğu 2.03-2.06 gr/cm^3'dür. Isı iletkenliği azdır, elektrik iletkenliği yoktur. Ancak nemli veya piritli ortamlarda elektrik iletkenliği yüksektir. Sürtünme ile negatif elektriklenir. Sıcak havalarda sürtünme ile için için eriyerek hafif mavi alevle yanabilir. Röntgen ışınlarını geçirmez.

Kristal şekli piramidal holoedridir, nadiren de rombik kristaller halinde bulunur. Optik karakteri pozitif ve çift kırması yüksektir.

Sıcakta, elementel sülfür rombik kristaller halinde bulunur. Rombik sülfür ısıtılırsa 95,5 C derecede monoklin sülfüre döner. 95,5 C derece tranzisyon noktasıdır. Yani bu sıcaklığın altında rombik, üstünde monoklin sülfür vardır. Monoklin sülfür soğuyunca yavaş yavaş rombik sülfüre döner. Monoklin sülfür 119

C derecede ergiyerek sıvı hale geçtiğinden sadece 95.5 C-119 C derece arasında mevcuttur.

Suda erimez ve süspansiyon halinde kalır. Petrolde az erir. Amorf modifikasyonları hariç değer çeşitleri karbon sülfür içinde erir.

Sülfür, sulu eriyiklerden rombik sistemde ve magmatik, volkanik eriyiklerden monoklinik sistemde kristalleşir. Kimyasal sembolü S'dir. Atom ağırlığı 16'dir. Kimyasal bileşiklerde 2'den +6'ya kadar değerler alır ve oksijen gibi, özellikle metallerle hemen bileşiklere girer. Asal gazların ve azotun dışında birçok elementle birleşir.

270 C derecede yanar 444 C derecede kaynar. Sülfür buharları kaynama noktasında S_8 moleküllerinden ibarettir. Sıcaklık yükseldikçe S_6, S_4 ve 650 C dereceden sonra da S_2 moleküllerine dönerler.

Dünya sülfür kaynaklarının çok az bir kısmı yoğunlaşarak ekonomik madencilik ve işletmeye uygun rezervler oluşturmaktadır. Bu rezervlerin maden işletmeleriyle ve Frash olarak isimlendirilen yöntemle işletilmesi; sülfürün petrol ve doğal gaz rafinerilerinde yan ürün olarak üretilmesinden daha pahalıya mal olmaktadır.

Element halinde bulunduğu gibi, birçok elementle birleşerek sülfürler, sülfatlar ve organik bileşikler halinde, tortul, metamorfik ve volkanik kayaçlarda ve bütün fosil yakıtlarda bulunmaktadır. Tiplerine göre sülfür kaynakları şöyle sınıflandırılmaktadır.

1. Doğal elementel sülfür yatakları
2. Sülfürlü yataklar (pirit, bakırlı pirit v.s.)
3. Sülfatlı yataklar (jips, alünit v.s. gibi)
4. Doğal gazlar (H_2S ve SO_2 gazları da içerirler.)
5. Petrol ve bitümler, kumlar
6. Kömür

Köklerine göre doğal sülfür yatakları üç ana bölüme ayrılır:

1. Sedimenter sülfür yatakları, jipslerle ara tabakalı veya jipsler bünyesinde yer alırlar. Hidrokarbonlarla kontak halinde olan jipslerde sülfür bakterilerinin

faaliyetiyle jipslerin biyokimyasal bozuşmasından meydana gelir. Tuz domları jips örtü kayaçları bünyesinde de sedimenter sülfür yatakları bulunur.

2. Volkanik sülfür yatakları, poröz ve çatlaklı volkanik ana kayaç bünyesinde metal sülfitlerle beraber yer alır. Cevher yatakları masif ve kütleseldir. Merkezden dışa doğru sülfür cevheri etrafında piritli, opalli, killi zonlaşmalar görülür. Volkanik H_2S ve SO_2 gazları yeryüzüne çıktığı takdirde yüzeyde sülfür emprenyeleri ve kabukları oluşturur.

3. Hidrotermal sülfür yatakları, sülfür çiçekleri, çatlak dolguları ve serpili kristaller halindedir. Doğada küresel veya böbreğimsi, fay ve çatlak duvarları üzerinde örtü olarak ve toz sülfür çiçekleri şeklinde, çatlak dolgusu halinde bulunur.

Elementel sülfür, A.B.D.'nin Gulf kıyıları bölgesinde ve Meksika'da Tehuanlepec'in Isthmus'unda bulunan tuz domu çökellerinden ve Batı Texas, Polonya, Sicilya, eski S.S.C.B. ve Irak'ın evaporit basen çökellerinden elde edilmekle beraber, 12 ülkenin volkanik kökenli tabii sülfür cevherlerinden de işletilmektedir. Ayrıca Kanada, Fransa'nın esas üreticisi olduğu on ülkede tabii gazdan kurtarılmakta ve A.B.D, Japonya, Batı Avrupa ve Ortadoğu petrol ülkelerinin en büyük üretici durumunda bulunduğu 50 ülkede petrol rafinerilerinden yan ürün olarak üretilmektedir. Son yıllarda petrol ve tabii gaz rafinerileri sülfür yan ürünleri, dünyanın en önemli element sülfür kaynağını oluşturmaya başlamıştır. Ayrıca H_2S ve SO_2 gazlarının havaya verilerek neden olacağı hava kirliliği de önlenmiş olmaktadır. Japonya'da petrol bulunmadığı halde, dünyanın, petrolden yan ürün elementel sülfür üreten ikinci büyük ülke olması, konunun önemini belirten çarpıcı bir örnektir.

Eski SSCB, Japonya ve İspanya'nın en büyük üreticileri oluşturduğu 30 ülke pirit üretmektedir. Yaklaşık aynı ülkeler, ferros olmayan tasfiye gazlarından çoğunlukla sülfürik asit yan ürünü halinde sülfürü kurtarabilmektedir. Sülfat mineralleri, bir sülfür kaynağı olarak dokuz ülkede önemli miktarlarda kullanılmaktadır. A.B.D. ve eski S.S.C.B, dünyanın en büyük sülfür üreticisi ve tüketicisidirler. Kanada ve Polonya sırasıyla dünyanın üçüncü ve beşinci üreticisi olup dünya sülfür ihracatında birinci ve ikincidirler. Çin, dünyanın dördüncü büyük sülfür ve birinci pirit üreticisidir. Aynı zamanda dünyanın üçüncü sülfür tüketicisidir.

Element sülfürün çok büyük bir bölümü, gübre sanayiinin sülfat asit ihtiyacı için kullanılmaktadır. Sülfürik asit tüketim miktarları ise bir milletin endüstriyel gelişiminin en güzel göstergelerinden biri kabul edilmektedir. Sülfat asit, aynı zamanda, piritten, baca gazlarından, jips ve anhidritten de üretilmektedir.

Sülfür ve sülfat, asit yapay gübrenin içine sadece amonyum sülfat üretiminde girer fakat esas olarak fosforik asit üretiminde kullanılır. Hidroklorik asit daha ucuz olduğu halde ve diğer asitler de bulunduğu halde sadece sülfürik asit kullanılır. Çünkü, öğütülmüş fosfat kayası sülfürik asitle muamele edildiği zaman oluşan katı jips kristallerini fosforik asitten ayırmak mümkün olmaktadır. Halbuki diğer asitlerin tuzları katı kristal oluşturmadığı için fosforik asitten ayırmak mümkün olmamaktadır.

12.2 Dünyada Mevcut Durum

Dünyanın en büyük doğal sedimenter sülfür yatakları Polonya'da, Amerika'da, Rusya'da, Irak'ta, Meksika'da, Çin'de ve İtalya-Sicilya'da yer almaktadır. Ayrıca Japonya'da ve Türkiye'de magmatik sülfür yatakları vardır. Dünyanın en büyük pirit yatakları ise Çin'de, Rusya'da, İspanya'da, Güney Afrika'da bulunmaktadır.

Bugün dünyadaki yıllık 55-60 milyon ton sülfür tüketimi; başta gübre sanayi için gerekli sülfürik asit üretiminde olmak üzere, kimya, lastik, boya, kağıt, tarım ilaçları, barut, kibrit, demir-çelik, petrol ve diğer sanayilerde kullanılmaktadır.

Petrol, doğalgaz ve baca gazlarından yan ürün olarak elde edilen ucuz elementel sülfür üretimi artmakta ve sülfür tüketiminin %88'i sülfürik asit üretiminde kullanılmaktadır. Dünyanın büyük sülfür tüketicileri, Kuzey Amerika, eski S.S.C.B. ve Batı Avrupa ülkeleridir. Sülfür ve sülfürik asit direkt veya endirekt olarak günlük hayatımıza esas olan hemen hemen herşeyde kullanılmaktadır. Çeşitli endüstriyel, akademik ve kamu araştırma grupları, artan rafine sülfür yan üretimini sarf etmek amacıyla sülfür için yeni kullanım alanları araştırmaktadır. Büyük hacimli potansiyel pazarlara sahip yeni kullanım alanları olarak şunlar sayılabilir:

1. Karayolları üstyapı kaplamalarında dayanıklılık sağlayan, eriticilere karşı dirençli, sülfür-asfalt bileşimleri.
2. Yüksek basınç gücüne ve yalıtkan özelliklere sahip sülfür köpüğü.

3. Gücünü, su ve aşındırıcıya karşı direncini artırmak için çeşitli materyallerle yapılan alaşımlar.
4. Sülfür içeren betonlar, inşaat harçları ve agregalar. (Sülfürün hidrofod özelliğinden faydalanılarak)

12.3 Üretim

12.3.1 Mevcut Kapasite ve Kullanım Oranları

1990'lı yılların başında yıllık toplam dünya sülfür üretimi 55-60 milyon tondur. Bunun yaklaşık %88'i sülfürik asit üretiminde kullanılmaktadır. Bu sülfürik asit %85 oranında gübre sanayinde fosforik asit üretiminde kullanılmaktadır. Sülfürik asidin ikinci olarak dünyada en çok kullanıldığı alan bakır cevheri temizlemesidir. Geri kalan sülfürik asidin üçüncü derecede çok kullanıldığı alan petrol rafinerisinde plastik ve sentetik malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Artan sülfürik asit ise inorganik pigmentlerin, kimyasalların, patlayıcıların v.s. üretiminde kullanılmaktadır.

Elementel sülfürün, sülfürik asit üretiminden sonra dünyada en çok kullanıldığı alan toplam 9 milyon ton ile ziraattır. Bunun 4.6 milyon tonu ziraat ilaçlamada kullanılmaktadır.

12.3.2 Üretim Yöntemleri ve Teknoloji

Elementel sülfür üretiminin büyük bir bölümü, sülfürik asit imalinde kullanıldığı için, sülfürik asidin çeşitli hammaddelerden üretilme teknolojisi de sülfür teknolojisine girmektedir.

12.3.2.1 Doğal Gaz ve Ham Petrolden Sülfür Üretimi

Bu yöntem, doğal gaz ve petrolden desülfürizasyon ile elementel sülfür elde etme şeklidir. Özellikle doğal gazda sülfür; serbest hidrojen sülfürde sülfür dioksit halinde bulunur. Petrolde ise organik sülfür bileşiği olarak yer alır. Rafinasyon fazında; sülfürün alınması gereken rafinasyon gazlarının bir kısmı hidrojenasyon prosesi ile hidrojen sülfüre çevrilir. Hidrojen sülfür içeren bu gazlar, hidrojen sülfür ile karbondioksit gibi diğer gazların ayrılması için absorbant bir solüsyon içinden geçirilir. Daha sonra solüsyonun hidrojen sülfür içeriği konsantre hidrojen sülfür gazı olarak (Asit gaz) ayrılır.

12.3.2.2 Doğal Sülfür Yataklarından Sülfür Üretim Yöntemleri

a) Frash Yöntemi : Bu yöntemin uygulanabilir olmasının şartları, sülfür bulunduran gözenekli bir formasyon, geçirgen olmayan stratigrafik bir örtü kayacı, bol su imkanları ve ucuz akaryakıtın sağlanmasıdır.

Doğal elementel sülfür yatakalarında açılan kuyular içine çok fazla miktarda sıcak su pompalanır. Suyun sıcaklığı ile kuyu çevresindeki sülfür erir. Yeryüzündeki havuzlara emilen bu eriş sülfür çok saf elementel sülfür halinde toplanır.

Frash yöntemi aslında elementel sülfürün 119 C'de ergimesi prensibine dayanmaktadır. Suyun ısıtılma maliyeti işlemin tümü için gerekli masrafların büyük bir kısmını oluşturur.

b) İzabe ve Flotasyon Yöntemleri (Keçiborlu Sülfür Fabrikası): Zengin sülfür cevheri, kırıcılarda 20 mm'ye kadar inceltilir. Taşıyıcı bant vasıtasıyla, buharla ısıtılan eritme havuzlarına verilir. Burada, karıştırıcı pervanelerle cevherin süratle eritilmesi sağlanır. Trommel eleklerde; kaba eriyememiş kısımlardan ayrılan sıvı sülfür, buharla ısıtılan diğer bir havuza gönderilir. Buradan pompajla bir Niagara filtresine gelmiş bulunan sıvı sülfür %99.8 saflıkta, yine buharlı işitilmiş saf sülfür havuzuna akıtılır.

Flotasyon yönteminde; daha fakir sülfür cevheri öğütüldükten sonra konsantratörlere gönderilir. Konsantratörlerde reajanlarla yüzdürülen sülfür köpüğü pervanelerle sıyrılır, pirit içeriği ise çökebilir. Kıvamlaştırma tankından konsantre filtresine alınan konsantre cevherin, ihtiva ettiği rutubet nispeti, %15-20'ye kadar düşürüldükten sonra, buharla ısıtılan eritme havuzlarından sıvı haline getirilir.

Sıvı sülfür pompajla, Niagara filtresine basılarak %99.8 saflıkta tasfiye olunur ve sülfür tavalarına dökülür.

c) Tarkumlarının, bitümlü şistlerin, kömürlerin bünyelerindeki bürümlerin izabesiyle veya hidrojenasyon, sıvılaştırma veya gaz haline getirme işlemleriyle elde edilen hidrojen sülfür elementel sülfüre dönüştürülebilmektedir. Ancak bu yöntemler diğer sülfür kaynakları bulunmadığı zaman kullanılmaktadır ve ekonomiklikleri zayıftır.

12.3.2.3 Piritten Sülfürik Asit Üretimi :

% 40-50 sülfür içeren piritli cevherler, genellikle sülfürik asit fabrikalarında kullanılmak üzere, SO_2 gazı elde etmek için kavrulur. SO_2 gazı kontakt veya kurşun odalar metoduyla sudan geçirilerek sülfürik aside dönüştürülür. Kavrulma işleminde elde edilen demirin cürufu, demir dışı metalleri ayırmak için genellikle liç edilir, bazen de demir cevheri olarak satılır. İyi geliştirilmiş ve geniş kullanımalanı olan bu yöntem, elementel sülfür kaynaklarından ucuza üretim olanağı bulunmayan veya birlikte üretilen mineralleri ve cevher değeri önemli olan piritik yataklara sahip dünya ülkelerine uygulanmaktadır.

Demir dışı metal konsantrelerinden de sülfürik asit üretilebilmektedir. Özellikle Cu, Pb, Zn, Ni kavrulması ve izabesinden elde edilen SO_2 gazları temizlenerek sülfürik aside dönüştürülür. Pirit prosesine benzemesine rağmen, özellikle bakır izabesinde gaz içindeki sülfür yüzdesi, çok farklılıklar gösterdiği için bu yöntem genellikle çevre kirliliğine bağlı olarak kullanılır.

12.3.2.4 Alçıtaşı, Jips veya Anhidritten Sülfürik Asit ve Çimento Üretimi

Jipsin yanında hammadde olarak, kil ve demir oksit de, öğütülerek döner fırınlarda kavrulmaktadır. Kok sülfatı redükleyici olarak kullanılmaktadır. İki ton jipsten bir ton sülfürik asit üretilmektedir.

Fırın ve SO_2 gazının yabancı maddelerden arınmış olabilmesi için yakıt olarak toz kömür püskürtülmesi yerine petrol veya doğal gaz kullanımı doğrudur. Döner fırınlarda, sıcaklık kademeli olarak 700 den 1400 C dereceye kadar artırılmaktadır.

Fırından gelen gazlar, elektrostatik çökelticilerden ve yıkamadan geçerek saflaştırılır ve soğutulur. Daha sonra sülfürik asit fabrikasına gönderilir. Fabrikanın diğer ucundan ise sülfürik asite, ağırlıkça eşit miktarda çimento üretimi çıkar.

Süperfosfat fabrikaları, yan ürünü jipsten de sülfürik asit üretmek mümkün olmakla beraber, daha fazla yakıta ihtiyaç göstermekte ve çimento ürününe giren yabancı maddeler, çimentonun gücünü ve kalitesini azaltmaktadır.

Bu prosesten maksimum randıman alabilmek için; hammadde jips yerine anhitrit kullanımı ve fabrika yerinin anhidrit rezervinin dibinde ve çimento, sülfürik asit pazarlarına yakın bir lokasyonda seçilmesi, fabrikanın büyük kapasiteli (en az

1000 ton/gün) ve yakıtın petrol ve doğal gaz olması gerekmektedir. Anhidrit yerine jips kullanıldığı taktirde, fabrika maliyeti ve üretim maliyeti %10-12 oranında artmaktadır.

Jipse, sülfüre ve pirite dayalı sülfürik asit fabrikaları üretim maliyetleri eşit olduğu halde, jipse dayalı (Sülfürik asit + çimento) fabrika maliyeti 6, pirite dayalı fabrika tesis maliyeti 4, sülfüre dayalı fabrika tesis maliyeti 1'dir. Amerika'da jipse dayalı sülfürik asit çimento fabrikasının yanında, prefabrik duvar, soda külü, amonyumsülfat, kalsiyum klorid, sodyum hidrosülfatın beraberce üreten yüksek kar potansiyeline sahip projeler geliştirilmiştir.

12.4 Türkiye'de Durum

Ülkemizde yegane işletilebilir doğal sülfür maden yatağı, Isparta-Keçiborlu'dadır. 1992 yılı elementel sülfür üretimi, 22.700 ton olmuş ve 100.750 ton tuvanan cevherden üretilmiştir. 1993 Nisan ayı itibariyle toplam 650.000 ton görünür tuvanan cevher rezervi kalmıştır. Yeraltı arama galerileri çalışmalarında, sürpriz rezervler bulunabilmektedir. Ocakların rezervleri tükenmeden önce, arama galerileri çalışmalarına önem verilmelidir.

Türkiye'nin pirit ve bakırlı pirit rezervleri, 52 milyon tonu aştığı ve halen bunlardan sülfürik asit üretilmekte olduğu ve yüzeyde mostra veren çok büyük jips ve anhidrit rezervleri bulunduğu için, Türkiye'nin sülfür potansiyeli açısından, pirit ve hatta jips ve anhidritler, elementel sülfür olanaklarıyla birlikte göz önüne alınmaktadır.

Diğer taraftan Aliağa, İpraş ve Orta Anadolu Rafinerileri sülfür yan ürün üretimlerinin tam kapasite ile çalışmaması ülkemiz için büyük bir kayıptır. Örneğin A.B.D, 1981-1991 yılları arasında rafineri sülfür yan ürün üretimini, ek tesisler kurarak %84 oranında arttırmıştır [103]. Halen ülkemiz rafinerilerinde, yılda 25 milyon ton ham petrol işlenmektedir. Ham petrolde %2 oranında sülfür bulunmaktadır. Dolayısıyla, rafinerilerimizin yıllık sülfür yan ürün potansiyeli 500.000 tondur. İşlerlik verimi %59 olduğuna göre, rafinerilerimizden üretilebilir. Maksimum sülfür miktarı 300.000 ton civarındadadır. Bunun yarısının, rafineri plastik üretiminde sülfürik asit için kullanıldığı düşünülürse, rafinerilerimizden, toplam 150.000 ton element sülfür üretme imkanımızın olduğu anlaşılmaktadır.

Halbuki 1992 yılında, toplam 16.800 ton elementel sülfür üretilmiştir. Rafinerilerde, sülfür kurtarma (recovery) birimleri adetlerinin artırılmasıyla, sülfür yan ürünü üretiminin arttırılması planlanmaktadır. Rafinelerimiz, tam kapasitesi ile sülfür yan ürünü ürettiği zaman, Türkiye'nin sülfür ithal etme ihtiyacının kalmayacağı tahmin edilmektedir.

Türkiye'nin Orhaneli, Soma, Kemerköy, Yatağan Yeniköy Termik Santralleri, baca gazı sülfür arıtma tesislerinin fizibilite raporları hazırlanmış ve kireçtaşı-alçıtaşı yaş yıkama prosesinin en ekonomik olduğu hesaplanmıştır.

Halen Türkiye'deki termik santrallerden Soma ve Yeniköy Termik Santralleri hariç, sülfür arıtma tesislerinin tümü için kireçtaşı-alçıtaşı prosesi öngörülmüştür. Yeniköy Termik Santrali'nde, henüz hava kirliliği için hiçbir proje planlanmamıştır. Halbuki dünyada, hem hava kirliliğini önleyen ve hem de sülfürik asit üreten ek tesise sahip otuz dokuz adet termik santral vardır. Ortalama her bir termik santralin sülfürik asit üretim kapasitesi, yılda iki yüz bin ton kadardır. Buna Wellman-Lord prosesi denilmektedir.

12.4.1 Tüketim

12.4.1.1 Tüketim Oranları

Türkiye'de sülfür kullanım oranları sektörlere göre şöyledir:

Tarım:	%65.2
Kağıt sanayi :	%10
Savaş Endüstrisi :	%9
Kimya Sanayi :	%5.7
Tekstil Sanayi :	%5.5
Deterjan Sanayi :	%2.1
Lastik Sanayi :	%1.2
Diğerleri :	%1.3
Toplam:	%100

12.4.1.2 Tüketim Miktarları

Türkiye'de tüketilen sülfür miktarı; Etibank Keçiborlu Sülfürleri İşletmesi, İpraş, Aliağa ve Orta Anadolu Rafinerilerinden üretilen saf sülfür ile her cins ve şekilde ithal edilen sülfür olarak belirlenmektedir. 1988-1992 yılları arasında, Türkiye'de sülfür tüketimi 140.000 ton ile 200.000 ton arasında değişmektedir. Halen Türkiye sülfür talebinin 3/4 den fazlası ithal edilmek suretiyle karşılanmaktadır.

12.4.2 Üretim

Türkiye'nin yegane doğal sülfür yatağı, 1935 yılından beri Etibank Keçiborlu Sülfür İşletmesi tarafından çalıştırılmaktadır. Maksimum üretim kapasitesi yılda 45000 tondur.

Piritten ve bakırlı piritten sülfürik asit üreten Etibank Bandırma Sülfürik Asit Fabrikası ve Karadeniz Bakır işletmeleri Samsun-Murgul sülfürik asit fabrikaları üretimleri ; Türkiye'nin toplam gübre sanayi sülfürik asit üretimine katkıda bulunmaktadır. Yurdumuzda ayrıca İpraş, Aliağa ve Orta Anadolu Rafinerilerinden sülfür üretimi yapılmaktadır.

İpraş Rafinerisi : İzmit'in Tütünçiftlik mevkiinde 1961 yılında TPAO (%51) ve Coltex (%49) ortaklığınca 8 milyon ton petrol kapasitesiyle kurulmuştur. Ortaklık, 1972 de sona ermiş, Coltex'in hisselerini TPAO satın almıştır. Bundan sonra, rafineriye ek üniteler konmak suretiyle kapasite 13 milyon ton ham petrol yükselmiştir. İpraş rafinerisi bir akaryakıt rafinerisi olup, normal üniteler dışında, kırıcı (cracker) ünitesi olarak FCA ile sülfür üretimi ünitelerini içermektedir.

Aliağa Rafinerisi : İzmir yakıt rafinerisi 1972 yılında, madeni yağ kompleksi ise 1974 yılında deneme işletmesine alınmıştır. FCC ünitesi 1977 yılında deneme işletmesine alınmıştır. Ek tesislerle mevcut kapasitesi 10 milyon tonu geçmiştir.

Orta Anadolu Rafinerisi : İç Anadolu Bölgesinin petrol ürünlerine karşı olan talebini karşılaması için kurulmaktadır. 1983 yılında 3.5 milyon ton/yıl ham petrol kapasiteli etüt başlamış, 5 milyon ton/yıl olarak geliştirilmiştir. Türk-Romen hükümetlerince imzalanan protokolce rafineriyi Romanya şirketi "Industrial Export" kurmaktadır. Bu rafineri, sülfür giderme ve sülfür üretim ünitelerini de içermektedir.

12.4.3 Üretim Yöntemi-Teknoloji

Etibank Keçiborlu Sülfürleri İşletmesi Müessesi'ne bağlı, maden ocaklarından sülfür üretimi, aşağıdan yukarı dilimli " Oda Topuk " yöntemi ile yapılmaktadır.

Cevherleşme zonunun tamamen dışında açılan ana kuyular, genellikle daire kesitli ve betonarme tahkimatlı olup, derinlikleri 70-140 m arasında değişmektedir.

Üretimi yapılan bacaların tahkimatı sökülerek, yerüstünden vagonerlerle ocağa indirilen taş-toprak karışımı malzeme ile dolgu edilmektedir.

Zenginleştirme Yöntemi : Ocaklardan gelen tüvenen cevher flotasyon üniteleri ve direkt izabe ünitesinde zenginleştirme işlemine tabi tutularak saf sülfür elde edilmektedir. Direkt izabe yönteminde, yüksek tenörlü sülfür cevheri işletilmektedir. Ocaktan kamyonlarla taşınan yüksek tenörlü sülfür cevheri, kaba cevher silosuna boşaltılır. Bundan vibratörlü besleyici ile kırıcıya gelen cevher, 0-40 mm'ye kadar kırılarak bant ile ince cevher silosuna boşaltılır. Bant ile ergitme havuzlarına gelen cevher, beş atmosfer basınçta buhar dolaşan serpantinlerle ısıtılarak, yabancı maddelerin ayrılması sağlanır. Ergimiş karışım, Trommel eleklerden geçirilir ve buradan 1 mm'den büyük ganglar ayrılır. Pompa havuzlarına gönderilen bu ergimiş karışım, Niagara filtresine basılarak süzülür. Filtreden sıvı halde %99.8 saflıkta sıvı sülfür ve %54-55 sülfür tenörlü rafine artık (kek) elde edilir. Sıvı sülfür, açık havada soğutma tavalarında soğutularak blok sülfüre dönüştürülür. Bu sülfür, öğütme tesisinde beslenilir ve burada değirmende öğütülerek torba toz elde edilir.

Flotasyon yönteminde ise, ocaklardan gelen düşük tenörlü sülfür cevheri, kırma işleminden sonra değirmen ve spiral klasifikatör devresine gönderilir. Buradan elde edilen öğütülmüş ve suyla bulamaç haline gelmiş karışım, flotasyon selüllerine verilerek konsantre sülfür elde edilir. Tiknerde çökeltme işlemi yapıldıktan sonra disk filtrelerde nemi % 20 oranında düşürülür. Bundan sonraki aşamada, ergitme havuzlarına beslenen konsantre için direkt izabe tesislerindeki işlemler tekrarlanır.

K.B.I. Çakmakkaya Pirit Üretim Tesisi : Açık ocak maden sahalarından 1 m boyutundaki tüvenan cevher, çeneli kırıcılarda 25 cm boyutuna kırılmakta ve stok

sahasına beslenmektedir. Daha sonra bu cevher, %62'si -200 mesh olacak şekilde otojen bir pebble ve spiral klasifikatör sisteminde öğütülmektedir. Öğütülmüş cevher, bulk flotasyon sellerine beslenerek bakır ve pirit konsantratörü bir reaktifle yüzdürülmekte olup, yüzen kısım, ilk beslenen cevherin takriben %10'u olmakta, geri kalan ise artık olarak atılmaktadır. Bulk konsantre ise, bilyeli değirmenlerde %83'ü-325 mesh (44 mikron) boyutuna öğütüldükten sonra kondisyoner tanklarında takriben bir saat kireçle kondisyonlaşmakta ve ph 11-12 civarına ayarlanmaktadır. Daha sonra, bakır flotasyon sellerine gelen bulk konsantreden bakır yüzdürülmekte ve bakır temizleme sellerinde temizlenerek temiz bakır konsantre (%20 Cu) elde edilmektedir. Bakır yüzdürülmesinde, batan kısım ise pirit konsantresi olup %40-43 sülfür içeriklidir.

Bandırma Sülfürik Asit Fabrikasının üretim yönteminde ; Pirit-Bakır konsantre kavurucuları ile konverter baca gazlarından elde edilen sülfür dioksit gazı, konverterde, vanadyum pentaoksit katalizörü yardımıyla sülfür trioksite dönüştürülmekte ve suyla birlikte sülfürik asit elde edilmektedir [113, 114]

12.5 Fiyatlar

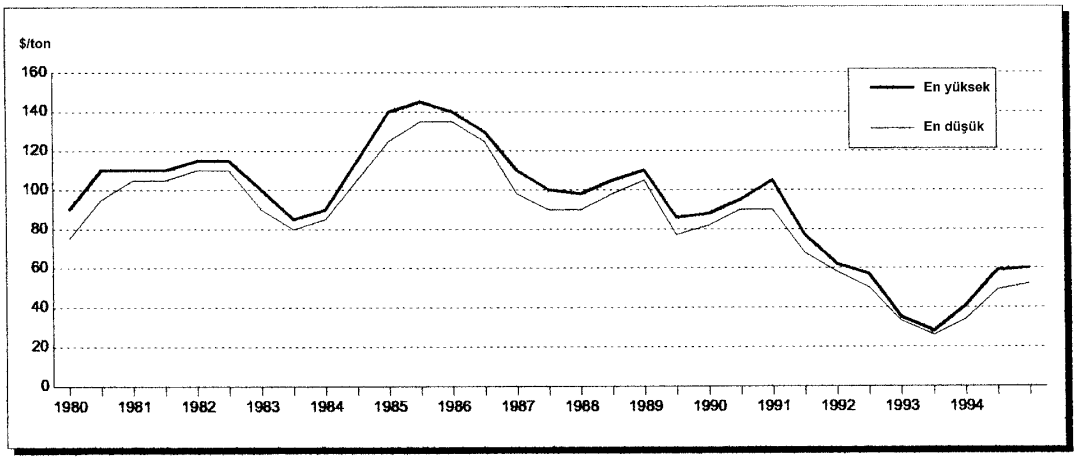
Türkiye'de sülfür fiyatları, aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

SÜLFÜR CİNSİ	ÖLÇÜ	1989	1990	1991	1992	1993
Toz sülfür	TL/ton	61804	108968	218874	314883	347027
Torbalı blok	TL/ton	56236	99253	200255	291181	326425
Blok	TL/ton	53934	93573	191391	247340	209753

Daha akla yatkın bir değerlendirme yapabilmek amacıyla, bu rakamların tespit edildiği tarihlerdeki Merkez Bankası döviz kurları dikkate alındığında, 1993 senesinde üç yüz elli binlira civarında olan sülfürün, ortalama 30 dolar civarında bir

fiyata tekabül ettiği belirlenmiştir [117]. Günümüzde ise, Bandırma'da bulunan Bağfaş Gübre Fabrikaları'ndan elde edilen verilere göre, ülkemizde, elementel toz sülfürün fiyatı, tonu 40-50 dolar civarındadır.

Aşağıdaki şekil ise, verilen yıllar arasında sülfür fiyatlarının Kanada'daki seyrini göstermektedir [104].



12.6 Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümün son kısmına gelindiğinde, kısa bir özet yapılması ve bu ekonomik irdelemenin rakamsal olarak sonuçlandırılması uygundur.

Öncelikle, elde edilen verilere göre, ülkemizde üretilen ve ithal edilen sülfür fiyatları arasında büyük farklar olmadığı görülmüştür. Yaklaşık bir değer hesaplanabilmesi açısından, sülfür ve asfalt için ortalama değerler kullanılacaktır. Asfalt hammaddesi de yurtdışından temin edildiğinden, sülfürün ithal edildiği dahi düşünülecek olursa, burada herhangi bir çelişkili durum meydana gelmemektedir.

Fiyatlar bazında düşünülürse, sülfür hammaddesinin fiyatı, tonu 40, asfalt çimentosu fiyatı ise, tonu 200 dolar olarak ele alınmıştır. Bu rakamlar düşünülerek, yaklaşık bir hesaplama yapılacak olursa;

Bugün ülkemizde, 30 dolar civarında olan üstyapı karışımlarının ton fiyatları baz alındığında, %7 oranında bağlayıcı içeren bir karışımın, asfalt çimentosu maliyetinin yaklaşık olarak 15 dolar olduğu belirlenmektedir. Geri kalan 15 dolar ise agrega vb. malzemelerin fiyatıdır. Kullanılan asfaltın yarısının sülfür ile yer

değiştireceği düşünülürse, bağlayıcıda, yaklaşık 7 dolarlık asfalt ve 1.5 dolarlık sülfür kullanılacağı anlamına gelmektedir. Bu durumda üstyapı karışımı maliyeti;

Asfalt + sülfür + agrega, vb. =

7 + 1.5 + 15 = 23.5 dolar olacaktır.

Her iki karışımda da kullanılan agrega vb. malzemeler aynı olduğu için, fiyatları da aynı olacak şekilde hesaplanmıştır. Bu durumda, bir üstyapı kaplama işleminde, her bir tonluk malzemede 6.5 dolar tasarruf edildiği ortaya çıkar ki, bu yüzdelik bir şekilde ifade edilecek olursa,

(30 –23.5) / 30 = %22'lik bir orana tekabül etmektedir.

Diğer bir deyişle, bu karşılaştırma bir de birim uzunluk için ele alınacak olursa;

1 metre uzunluğunda, 3.5 metre şerit genişliğine sahip 6 şeritli bölünmüş bir yolda, yani 21 m toplam genişlik için, 5 cm kalınlığındaki aşınma tabakalarının fiyatları analiz edilecektir. Malzeme hacimlerinde bir farklılık yoktur.

Hacim = 1 metre x 21 metre x 0.05 metre = 1.05 m^3

Özgül ağırlık = 2.4 t/m^3 = Ağırlık/1.05 m^3 $\Rightarrow$

Ağırlık = 2.52 ton

Bu durumda;

Geleneksel karışımlar için: 30$ x 2.52 = 75.6$ (12.6$/şerit)

Sülfürlü karışımlar için: 23.5$ x 2.52 = 59.2$ (9.8$/şerit) olacaktır.

Yapılan çalışmalarda, arazi şartlarında yapılan deneyler ve daha gerçekçi rakamların kullanıldığı durumlarda, tasarruf edilebilecek oranın %30'lar civarında olduğu tespit edilmiştir. Bir kilometre uzunluğunda bir otoyolun yapım maliyetinin, milyon dolarlar ile ifade edildiği düşünülürse, bulunan bu rakamın ne kadar ciddi bir oran olduğu daha rahat anlaşılabilir. Bunun yanında, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımların, üstyapı karışımlarının mühendislik özelliklerine de önemli katkılarda bulunduğu düşünülecek olursa, sülfürlü asfalt karışımların bitümlü üstyapı karışımları içerisinde, büyük bir önemle ele alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

13. GENEL SONUÇLAR

Şimdiye dek yapılan tüm çalışmalar sonucunda, sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımlara ait en önemli çıkarımlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımlar, daha yumuşak dereceli asfalt çimentosu kullanılabilmesine imkan tanıyarak, hem yapılan laboratuar çalışmalarının sonuçlarını teyit etmekte, hem de normal dereceli asfalt çimentosu ile üretilen karışımlara göre daha az termal çatlak gelişimi sergilemektedirler.
2. Sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımlar, daha sert derecedeki asfalt çimentosu ile üretilen karışımlar ile dahi kıyaslandığında, tekerlek izi oluşumuna ve deformasyonlara karşı direnç gösteren çok daha iyi stabilite değerleri ortaya koymuşlardır.
3. Aynı agregalar kullanılarak üretilen sülfürlü asfalt bağlayıcı içeren karışımlar, salt asfalt çimentosu ile üretilen karışımlara göre, en az onlarla eşit, hatta yer yer daha iyi kayma direnci özellikleri göstermişlerdir.
4. Bağlayıcıdaki sülfür varlığı, karışımın ıslak şartlar altındaki özelliklerini de geliştirerek, sökülmeye karşı kullanılan bazı katkılara olan ihtiyacı da azaltmıştır.
5. Şimdiye dek yapılan çalışma ve araştırmaların hiç birinde, bağlayıcının içerisindeki sülfür varlığının, bu tip üstyapı kaplamalarının performans veya dayanıklılık özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yarattığına dair en ufak bir iz veya izlenime rastlanmamıştır. Ayrıca, bu tip karışımlar, tüm geleneksel ekipmanlar kullanılarak hazırlanabilmekte, taşınabilmekte ve serilip sıkıştırılabilmektedir.
6. Sülfürlü asfalt bağlayıcılar ile üretilen karışımlarda, sülfürün önemli bir miktardaki asfaltın yerine geçebilmesi, önemli miktarda petrolden, dolayısı ile enerjiden tasarruf edilebilmesine imkan tanımaktadır. Ayrıca, tüm çalışmalar ayrıntılı bir biçimde değerlendirildiğinde, karışımlarda kullanılan

sülfür miktarının, bağlayıcının ağırlıkça %30'u oranında kullanıldığı durumlarda optimum çözümlere ulaşılabildiğine karar verilmiştir. Bu kararın verilmesinde, özellikle akma, elastisite modülü ve yumuşama noktası gibi mühendislik özelliklerin, AASHTO ve benzeri yetkili kuruluşların belirlediği, teknik sınırlar içerisinde kalan değerleri etkili olmaktadır.

7. Diğer yandan, doğada artık olarak, yani fazladan bulunan bir malzemenin, özellikle de çok pahalı ve önemli bir başka malzemenin yerine, bırakın bazı özelliklerini bozmayı, çoğu özelliğini de geliştirerek kullanılabilmesi ekonomik açıdan da çok büyük faydalar sağlamaktadır. Tez çalışmasının, ekonomik irdeleme kısmında yapılan hesaplamalara ve şimdiye dek yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, üstyapı maliyetlerinde %30'lara varan bir tasarruf sağlanabilmesi, küçümsenemeyecek çok önemli değerleri ifade etmektedir. Ayrıca, sülfürün üstyapı işlemlerinde daha geniş kullanım alanları bularak önem kazanması ile, sülfürün taşınması, eritilmesi, depolanması, vb. gibi özellikleri de önem kazanarak gelişecek, bu tip bir konuda da yeni pazarlar, yeni iş alanları oluşacaktır.

8. Sülfürlü asfalt bağlayıcı kullanılarak yapılan tüm inşaatlarda, tüm konular çerçevesinde çok az olumsuz etkiye rastlanmıştır. Meydana gelen sülfür dumanına ait yapılan ölçümlerde, zararlı gaz oluşumlarının normal sayılabilecek seviyelerin dahi çok altında, ihmal edilebilecek düzeylerde olduğu saptanmıştır. Meydana gelen ufak tefek rahatsızlıklar ise, dumanı bir vantilatör yardımı ile uzaklaştırmak, işçilerin rahatsızlıklarını bazı filtreli kıyafetler, koruyucu gözlükler, maskeler, vb. malzemeler kullanılması gibi basit önlemlerle giderilebilmektedir.

9. Sülfürlü asfalt bağlayıcı ile üretilen karışımlar, hiçbir sorunla karşılaşılmaksızın, ki buna yüksek karıştırma sıcaklığı sebebi ile plentte oluşan duman da dahildir, rahatlıkla tekrar kullanılabilmekte ve geleneksel yöntemlerle tekrar serilebilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Deme, I., "Processing of Sand-Asphalt-Sulphur Mixes," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **43** (1974), 465-490

[2] Kennepohl, G J. A, Logan, A ve Bean, D. C, "Conventional Paving Mixes with Sulphur-Asphalt Binders," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **44** (1975), 485-518

[3] Gallaway, B. M ve Saylak, D, "Sulphur/Asphalt Mixture Design and Construction Details-Lufkin Field Trials," *Texas Transportation Institute at A&M* (Ocak 1976).

[4] Izatt, J. O, "Sulphur-Extended Asphalt Paving Project-Boulder City, Nevada," *The Sulphur Institute* (Ocak 1977).

[5] Izatt, J. O, "Sand-Asphalt-Sulphur Field Trial, Kenedy County, Texas," *Federal Highway Administration Report No. FHWA-TS-78-204* (1977).

[6] Fromm, H J. ve Kennepohl, G J. A, "Sulphur-Asphaltic Concrete on Three Ontario Test Roads," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **48** (1979), 135-162.

[7] "Sulphur-Asphalt Mixed in Dryer Drum," *Highway and Heavy Construction*, (Temmuz 1979), 45.

[8] "Sulphur Extended Asphalt," *Highway and Heavy Construction*, (Ağustos 1979), 62-63.

[9] McCullagh, F. R, "Using a Dryer-Drum in the Construction of SEA Pavements," *Arizona Department of Transportation Report* (Eylül 1979).

[10] Ingberg, R, "Sulphur-Asphalt Pavements: The Minnesota DOT Projects," *Rural and Urban Roads* (Ekim 1979), 34-36.

[11] Izatt, J. O, "Sulphur-Extended Asphalt Field Trials MH 153 Brazos County, Texas," *Federal Highway Administration Report No. FHWA-TS-80-214* (Aralık 1979).

[12] McBee, W C, "State of the Art Guideline Manuel for Design, Quality Control, and Construction of SEA Pavements," *Federal Highway Administration Report No. FHWA-IP-80-14* (Ağustos 1980).

[13] Gross, A E, "First Field Trial with SEA Binders in Maine," *Federal Highway Administration Report No. FHWA-TS-80-240* (Ağustos 1980).

[14] Lytton, R. L., "Predictions of Sulphur Asphalt Pavement Performance with VESYS IIM," *Proceedings of the Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan (Ağustos 1977).

[15] Kennedy, T. W., "Engineering Evaluation of Sulphur-Asphalt Mixtures," *Transportation Research Board Research Record 659* (1977).

[16] Meyer, R. P., Hignell, E. T., Kennepohl, G. J. A. ve Haas, R. C. G., "Temperature Susceptibility Evaluation of Sulphur-Asphalt Mixtures," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **46** (1977), 452-480.

[17] McBee, W. C. ve Sullivan, T. A., "Direct Substitution of Sulphur for Asphalt in Paving Materials," *U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines Report No. 8303* (1978).

[18] Al-Qaishan, A. T. ve Terrel, R. L., "Material Characteristics and Predicted Performance of Sulphur-Asphalt Mixtures from In-Service Pavements," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **49** (1980), 252-265.

[19] Finn, F. N., "Factors Involved in the Design of Asphalt Pavement Surfaces," *Highway Research Board, National Cooperative Highway Research Program Report No. 39* (1967).

[20] Kennedy, T. W., "Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **46** (1977), 132-150.

[21] McLeod, N. W., "Desigining Standard Asphalt Paving Mixtures for Greater Durability," *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*, **16** (1971).

[22] Lottman, R. P., "Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete," *Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program Report No. 192* (1978).

[23] Draper, H. L., "Modification of Asphalt Cement with Elemental Sulphur," Paper Presented at the *Utah Bituminous Conference*, University of Utah, Salt Lake City (Mart 1979).

[24] Kandhal, P. S., "Evaluation of Baghouse Fines in Bituminous Paving Mixtures," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **50** (1981), 150-210.

[25] Abushihada, A., Discussion in *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* **48** (1979), 158.

[26] Fromm, H. J., "Sulphur-Asphalt Pavements Performance and Recycling," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **50** (1981), 98-115.

[27] Schmidt, R. J., "A Practical Method for Measuring the Resilient Modulus of Asphalt-Treated Mixes," *Highway Research Board Research Record No. 404* (1972).

[28] Abraham, H, *Asphalt Allied Substances*, 6th Edition. New York: D. Van Nostrand Co. Inc., 1961. **II**, 178.

[29] Duecker, W. W, *Proceedings, National Paving and Brick Association* (1937), 60.

[30] Litchiser, R. R. ve Schofield, H. Z., *Proceedings of Highway Research Board* (1936), 182

[31] Shell International Research Maatschaapij, Ger. Offen. 2149676, Brit. Pat. No. 1076866, Canadian Pat. No. 755999.

[32] Deme, I., "The Use of Sulphur in Asphalt Paving Mixes," ACS-CIC, Vancouver, (1973); "Basic Properties of Sand-Asphalt-Sulphur Mixes," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Williamsburg, Va. 1973; "The Development of the Use of Sulphur Asphalt Paving Mixes," *American Chemical Society*, Los Angeles, 1974.

[33] Societe Nationale des Petroles d' Aquitaine, (S.N.P.A.), "Properties of Sulphur-Bitumen Binders," *VII. International Road Federation World Meeting*, Munich (1973).

[34] Vincent, P., "Sulphur Asphalt Concretes," *167th American Chemical Society Meeting*, Los Angeles (1974).

[35] Kennepohl, G. J. A, Logan, A. ve Bean, D. C., "Sulphur-Asphalt Binders in Paving Mixes," *Canadian Sulphur Symposium*, Calgary, Alberta (Mayıs 1974).

[36] Bencowitz, I., American Society for Testing and Materials Preprints No. 95(9), 539 (1938).

[37] Bacon, R. F. ve Bencowitz, I., U.S. Pat. No. 2182837 (1939).

[38] Meyer, B, *Elemental Sulphur*. New York: Interscience Publishers, 1965, 95.

[39] Ariano, R, *Strade* (1941), 119.

[40] Quarles, J. J., *Brennstoffe-Chemie Bd.* 43(6), 173 (1962); *ibit Bd.* 45(1), 1 (1965).

[41] Petrossi, U, *Int. Eng. Chem Prot. Res. Develop.*, 11(2), 214 (1972); *La Chimica E, L'Industria*, 55(5), 425 (1973).

[42] Idemitsu Kosan Co. Ltd., Japan Patent Kokai, 74 42713 (1972), PR47272 86, 634.

[43] Lee, D. Y., "Modification of Asphalt and Asphalt Paving Mixtures by Sulphur Additives," Iowa State University ERI Project 834-S, Ames, Iowa, (Mart 1971)

[44] Fairbrother, F., *J. Polym. Scie.* 14 459 (1955).

[45] Gardner, D. M, *J. Amer. Chem. Soc.*, 78 3279 (1956).

[46] Currel, B. R., "Plasticization of Sulphur," *167th American Chemical Society Meeting*, Los Angeles (1974)

[47] Hignell, E. T., Hajek, J. J. ve Haas, R. C. G, "Modification of Temperature Susceptibilities of Asphalt Paving Mixtures," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Cleveland, **41** (1972)

[48] Kennepohl, G. J. A., Logan, A. ve Bean, D. C., "Conventional Paving Mixes with Sulphur Asphalt Binders," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Phoenix, **44** (1975)

[49] Saylak, D. ve Gallaway, B. M., "Beneficial Use of Sulphur in Sulphur-Asphalt Pavements," Final Research Report Prepared for U.S. Department of the Interior Bureau of Mines and Sulphur Institute, Texas A&M Research Foundation, (Eylül 1975).

[50] Pronk, F. E., Soderberg, A. F. ve Frizell, R. T., "Sulphur Modified Asphaltic Concrete," *Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association*, Toronto **XX** (1975), 135.

[51] Deme, I., "Processing of Sand-Asphalt-Sulphur Mixes," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Williamsburg, Virginia **44** (1974)

[52] Haas, R. C. G., "Continuing Research and Development on Sulphur/Asphalt Materials," Technical Memo to D. D. Zakaib, Gulf Oil Canada, (Nisan 1975).

[53] Kennedy, T. W, Haas, R. C. G., Smith, P., Kennepohl, G. J. A. ve Hignell, E. T., "An Engineering Evaluation of Sulphur- Asphalt Mixtures," a paper prepared for presentation to Transportation Research Board, Washington, D. C., 1977.

[54] Hajek, J. J., "A Comprehensive System for Estimation of Low Tempatature Cracking Frequency of Flexible Pavements," *University of Waterloo, Transport Group Report*, (Temmuz 1971)

[55] Haas, R., "A Method for Desigining Asphalt Pavements to Minimize Low Temperature Shrinkage Cracking," *Asphalt İnstitute Research Report 73-1* (Ocak 1973)

[56] Fromm, H. J. ve Phang, W. A., "Temperature Susceptibility Control in Asphalt Cement Specifications," *Report IR 35, Department of Highways of Ontario* (Kasım 1970). (şimdiki ismi; Ministry of Transportation and Communications, Ontario).

[57] ASTM D1561-71, "Standart Method for Preparation of Test Specimens of Bituminous Mixtures by Means of the California Kneading Compactor."

[58] Miller, L. J., "Engineering Evaluation of Sulphur-Asphalt Mixes," unpublised Interim Report, (Mart 1976), Gulf Oil Canada Ltd., Sheridan Park, Ontario

[59] Davies, O. L., *The Design and Analysis of Industrial Experiments*. London: Oliver ve Boyd, (1967).

[60] Draper, N. P. ve Smith, H, *Applied Regression Analysis*. New York: Willey&Sons, (1966).

[61] Kennedy, T. W, Haas, R. C. G. ve Meyer, F. R. P., "Characterization of Pavement Materials for Fundamental Structural Analysis," presented to 4. İnter-American Conference on Materials Technology, Caracus, Venezuela, (1975).

[62] Meyer, F. R. P. ve Haas, R. C. G, "Low Temperature Evaluation of Sulphur-Asphalt Mixtures," unpublised report prepared for Gulf Oil Canada Ltd., Sheridan Park, (Mayıs 1976).

[63] ASTM D1559-62T, "Plastic Flow, Resistence to, of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus."

[64] Bean, D. C., "1975 Sulphur-Asphalt Binder Test Road in Ontario," unpublised interimreport, Gulf Oil Canada Ltd., Sheridan Park, (Ocak 1976).

[65] Meyer, F. R. P. ve Haas, R. C. G, "Engineering Evaluation of Sulphur/Asphalt Mixes and Applications," unpublised report prepared for Gulf Oil Canada Ltd., Sheridan Park, (Nisan 1975)

[66] Lee, D. Y., "Modification of Asphalt and Asphalt Paving Mixtures by Sulphur Additives," *Ing. Eng. Chem, Res. Dev.* **11**, No. 3 (1975).

[67] Pickett, D. E., Saylak, D., Lytton, R. L., Conger, W. E., Newcomb, D. ve Schapery, R. A., "Extension and Replacement of Asphalt Cement with Sulphur," Report No. FHWA-RD-78-95, *Federal Highway Administration* (Mart 1978).

[68] Traxler, R. N, "Pavement Performance and Durability as Affected by Asphalt Properties," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **32** (1963), 229-236.

[69] Bencowitz, I. ve Boe, E. S., "Effect of Sulphur Upon Some of the Properties of Asphalts," *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, **38** (1938), 539-550.

[70] Pronk, F. E. ve Soderberg A. F.," Sulphur in Asphalt Paving," *Proceedings, International Conference on Sulphur in Construction*, Ottawa, Ontario, **2**, (12-15 Eylül 1978).

[71] Kennedy, T. W ve Haas, R, "Sulphur-Asphalt Pavement Technology: A Review of Progress," preprint prepared for presentation to the Transportation Research Board Meeting (Ocak 1980)

[72] *The Merck Index*, Sixth Edition, (1952)

[73] *Supplemental to Standart Spesifications for Road and Bridge Construction*, Arizona Department of Transportation, (1975)

[74] Hveem, F. N, Zube, E ve Skog, J., "Proposed New Tests and Spesifications for Paving Grade Asphalts," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **32** (1963), 271-327.

[75] Schweyer, H. E. ve Busot, J. C, "Experimental Studies on Viscosity of Asphalt Cements at 77^0 F," *HRR 361, Highway Research Board*, (1971).

[76] Jimenez, R. A, "Testing Asphalt-Rubber with the Schweyer Rheometer," report submitted to the National Science Foundation, (Ocak 1980).

[77] International Conference on Sulphur in Construction, Ottawa, Ontario, (12-15 Eylül 1978)

[78] Kennepohl, G. J. A ve Miller, L. J., "Sulphur Asphalt Binder Technology for Pavements," *173rd American Chemical Society Meeting*, New Orleans (1977).

[79] McBee, W. C, Sullivan, T. A ve Saylak, D, "An Overview of Sulphur-Extended-Asphalt Usage," *American Society for Testing and Materials Special Technical Publication 724*, (1981).

[80] Garrigues, C ve Vincent, P., "Sulphur/Asphalt Binders for Road Construction," *New Uses for Sulphur (Advances in Chemistry Series 140). American Chemical Society*, Washington, D. C. (1975), 130.

[81] Deme, I.,"Sulphur as an Asphalt Diluent and a Mix Filler," *New Use of Sulphur-II (Advances in Chemistry Series 165). American Chemical Society*, Washington, D. C. (1978), 172.

[82] Rennie, W. J., "Sulphur Asphalts," *New Uses for Sulphur Technology Series No. 2*, Sulphur Development Institute of Canada (1979).

[83] Kennepohl, G. J. A ve Miller, L. J., "Sulphur Asphalt Binder Technology for Pavements," *Advances in Chemistry*, **165** (1978), 113-134.

[84] Petrossi, U., Bocca, P. L. ve Pacor, P., "Reactions and Technological Properties of Sulphur Treated Asphalt," *Industrial and Engineering Chemistry,* **11** (1962), 214.

[85] Courval, G. J. ve Akili, W., "Sulphur-Asphalt Binder Properties Determined by the Sliding Plate Rheometer," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists,* **51** (1982), 222-239.

[86] Muller, J. M., Cellard, B., de la Taile, B. ve Schneck, P., "Sulphur in Asphalt Paving Mixes," *Proceedings, I.R.F. Symposium on Sulphur-Asphalt in Pavements,* Bordeaux, France (1981).

[87] Akili, W. ve Dabbagh, A. E., "The Middle East-A Potential Market for Sulphur-Asphalts and Concretes," *Proceedings, Sulphur-81,* An International Conference, Calgary, Canada (Mayıs 1981), 61-73.

[88] Akili, W., "Sulphur-Extended-Asphalt Pavements: Two Test Roads in Eastern Saudia Arabia," *Proceedings, Sulphur-81,* An International Conference, Calgary, Canada (Mayıs 1981), 161-173.

[89] Saylak, D., Jakobs, C. ve Galloway, B. M., "Post Construction Evaluation of U.S. 69 Sulphur-Extended-Asphalt (SEA) Pavement Test Section in Lufkin, Texas," *Federal Highway Administration Report No.* FHWA-TS-80-235 (Ağustos 1980).

[90] Shields, B. P., Chiristison, J. T. ve Palast, D. P., "Alberta Experience with Sulphur-Extended-Asphalt Pavements," *Proceedings, Sulphur-81,* An International Conference, Calgary, Canada (Mayıs 1981), 147-159.

[91] Hammond, R., Deme, I. ve McManus, D., "The Use of Sand-Asphalt-Sulphur Mixes for Road Base and Surface Applications," *Proceedings, Canadian Technical Asphalt Association,* **16** (1971), 27.

[92] Shane, G. ve Burgess, R. A., "The Thermopave Process," *Proceedings, Symposium on New Uses for Sulphur and Pyrites,* Madrid, Spain (Mayıs 1976), 17.

[93] Saylak, D. ve Galloway, B. M., "The Use of Sulphur in Sulphur-Asphalt Aggregare Mixes," *Proceedings, Fourth Inter-American Conference on Material Technology,* Caracas, Venezuela (Temmuz 1975), 636-646.

[94] Izatt, J. O., "Sulphur-Asphalt-Sand Paving Project-Highway LA-108, Sulphur, Louisiana," *Sulphur Institute* (Ocak 1977).

[95] Sullivan, T. A., McBee, W. C. ve Rasmussen, K. L., "Studies of Sand-Sulphur-Asphalt Paving Materials," *Bureau of* Mines Report no. RI 8087 (Kasım 1975).

[96] Carey, D. E. ve Paul, H. R., "Sulphur-Extended-Asphalt on La 22," *Research and Development Section, Louisiana Department of Transportation,* Research Report No. FHWA/LA-80/144 (Mayıs 1980).

[97] Akili, W ve Monismith, C L, "Permanent Deformation Characteristics of Cement-Emulsion Stabilized Sand," *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **47** (1978), 252-265.

[98] Van de Loo, P. J., "A Practical Approach to the Prediction of Rutting in Asphalt Pavements, the Shell Method," *Transportation Research Record No. 616* (1972), 15-21.

[99] Verstraeten, J., Romain, J. E ve Veverka, V., "The Belgian Road Research Center's Overall Approach to Asphalt Pavement Structural Design," *Proceedings, 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, University of MIchigan (1977), 298-324.

[100] Ahlborn, G, *ELSYM 5-Computer Program for Determining Stresses and Deformation in a Five-Layer Elastic System*, University of California, Berkeley (1971).

[101] Akili, W, "A Predictive Method for Permanent Deformation in Bitumen Emulsion Treated Sand," *Australian Road Research*, **10**, No. 3 (1980), 281-300.

[102] Carey, W ve Irick, P., "The Pavement Serviceability-Performance Concept," *Highway Research Board Special Report*, ASSHO Road Test (1962).

[103] Sulphur No. 222, *The Sulphur Institute*, (Eylül-Ekim 1992), 16-19.

[104] Canadian Minerals Yearbook, 1994, Vancouver Contract, *National Resources Canada*.

[105] 1983-1993 Ulaştırma Ana Planı, T.C Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, K.G.M. Matbaası, Ankara, (1982).

[106] Fincanoğlu, A ve Karaşahin, M, "Esnek Yol Üstyapı Bakım İşletim Sistemleri," *Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İstanbul (1996), 269.

[107] Yollar Fenni Şartnamesi, T.C Bayındırlık Bakanlığı K.G.M, K.G.M. Matbaası (1978).

[108] Ataman, B. G, Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi, T.C Bayındırlık ve İskan Bakanlığı K.G.M. Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Üstyapı Şubesi Müdürlüğü, Ankara (1995).

[109] Umar, F. ve Yayla, N, Yol İnşaatı, T.C İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul (1992).

[110] Umar, F. ve Ağar, E, Yol Üstyapısı, T.C İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul (1985).

[111] www.rockbinders.com

[112] www.shell.ca

[113] http://washingtonart.com/Gehle/TSI

[114] www.maden.org.tr

[115] www.isfalt.comtr

[116] www.kimyaokulu.com

[117] www.tcmb.gov.tr

Küçükağa sokak Ar apart manı
No: 7/3 81070
Suadiye – İSTANBUL
tolgaer75@superonline.com

Telefon (0216) 357 02 13
(0532) 622 99 73

TOLGA ER

Kişisel Bilgi

* Milliyet : T.C.
* Doğum yeri : Düsseldorf – Almanya
* Doğum tarihi : 10.02.1975

Eğitim

1999 - 2003
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Fakültesi
Yüksek Lisans (Uçaştırma Mühendisliği)
Maslak – İstanbul

1995 – 1999
İstanbul Üniversitesi
Müh. Fak. İnşaat Mühendisliği
Avcılar – İstanbul

1989 – 1994
Haydarpaşa Alman Ana. Tek. Lisesi
Otomatik Kumanda Bölümü
Üsküdar – İstanbul

Dil

İngilizce, Almanca

İş deneyimi

2000 – 2001
Akfen Tepe Ünimetal (ATÜ) A.Ş.
Atatürk Havalimanı Dışhatlar Terminali
Satış Temsilciliği
Yeşilköy – İstanbul

1998 – 1999
Protek Proje Mühendislik Bilgi İşlem
İnşaat Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.
AutoCad Operatörlüğü
Kızıltoprak – İstanbul

Katıldığı kurslar	1999 – 2000	İstanbul Teknik Üniversitesi Prep Class (A Level) - İngilizce	
	1996 – 1998	Marmara Üniversitesi Yabancı Diller Bölümü – İngilizce	
Yaz çalışmaları	1998	Gürsel Yapı Kooperatifi	Bahçeşehir – İst.
	1997	Pi Mühendislik Ltd. Şti.	Caddebostan –İst.
	1992	Rabak A.Ş.	Kocaeli
İlgi alanları		Bilgisayar; Windows uygulamaları, Office prg, AutoCad, vs.	
Hobileri		Basketball, motor sporları, otomobiller	