

133014

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ANTALYA FERROKROM İŞLETMESİ'NİN ELEKTRİK-ARK FIRINI
CÜRUFELARININ VE BACA TOZU ATIKLARININ ASFALT BETONUNDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ALTAN YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

133014

2002

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

**ANTALYA FERROKROM İŞLETMESİ'NİN ELEKTRİK-ARK FIRINI
CÜRUFLLARININ VE BACA TOZU ATIKLARININ ASFALT BETONUNDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

ALTAN YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Bu tez 2001.01.0121.32 proje numarasıyla, Akdeniz Üniversitesi Bilimsel
Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.**

2002

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANTALYA FERROKROM İŞLETMESİ'NİN ELEKTRİK-ARK FIRINI
CÜRUFLLARININ VE BACA TOZU ATIKLARININ ASFALT BETONUNDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

ALTAN YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

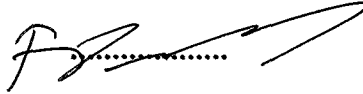
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 22.10.2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından (90.) not takdir edilerek
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

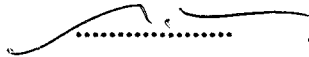
Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ
(Danışman)



Prof. Dr. Fikret TÜRKER



Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN



ÖZET

ANTALYA FERROKROM İŞLETMESİ'NİN ELEKTRİK-ARK FIRINI CÜRUFLARININ VE BACA TOZU ATIKLARININ ASFALT BETONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ALTAN YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ

Mayıs 2002, 76 Sayfa

Bu çalışmada ,Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin (Diğer adıyla ETİ Elektro-metalurji İşletmesinin) elektrik-ark firmı cüruflarının ve baca tozlarının asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu malzemelerin esnek yol üstyapısı bünyesinde klasik filler malzeme olan taş tozuna alternatif olarak kullanım imkanının olup olmadığı incelenmiştir.

Çalışmada öncelikle, her bir filler cinsi için ayrı ayrı olmak üzere, %7 oranında filler ve %3,5-4,0-4,5-5,0-5,5-6,0 ve 6,5 oranında asfalt çimentosu kullanılarak Marshall Karışım Tasarımı yöntemine göre numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyi uygulanmış ve her filler cinsi için optimum bitüm yüzdesi belirlenmiştir. Sonra belirlenen bu optimum yüzde kullanılarak ve toplam agreganın yüzdesi olarak, %0-2,5-5,0-7,0 ve 10 oranlarında farklı filler malzemeler; taş tozu, ferrokrom cürufu ve baca tozu olarak silis dumanı, kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde de akma ve stabilite deneyi uygulanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen tasarım parametrelerine göre incelenen malzemelerin, taş tozu filler'e kıyasla bitümlü karışımlarda kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, Antalya Ferrokrom İşletmesi'nin Ferrokrom cüruflarının bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılması durumunda klasik filler malzeme olan taş tozuna benzer sonuçlar verdiği ve hatta dayanıklılık açısından daha üstün olduğu dolayısıyla filler olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Aynı işletmenin baca tozu olan

dumanlarının ise bitümlü sıcak karışımlarda klasik filler malzemesi olarak kullanılmasının uygun olmayacağı ancak, düşük oranlarda yoğunluğu ve geçirimsizliği artırmak için katkı malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER : Cüruf, Filler, Taş tozu, Silis dumanı, Ferrokrom cürufu, Marshall deney yöntemi, Marshall stabilitesi, Bitümlü sıcak karışım, Asfalt betonu, Baca tozu.

JÜRİ : Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ
Prof. Dr. Fikret TÜRKER
Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN



ABSTRACT

INVESTIGATION of ELECTRIC-ARC FURNACE SLAG and SILICA FUME of ANTALYA FERROCHROME ESTABLISHMENT, AS FILLER MATERIAL in ASPHALT CONCRETE

ALTAN YILMAZ

M.Sc. Thesis in Department of Civil Engineering

Adviser : Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ

May 2002, 76 pages

This study deals with investigation of electric-arc furnace slag and silica fume of Antalya Ferrochrome Establishment, as filler material in asphalt concrete. These materials were examined if they could use in flexible pavement as filler, instead of limestone dust.

Firstly, %7 filler and %3,5 - 4 - 4,5 - 5 - 5,5 - 6 and 6,5 asphalt cement percentages were used to prepare specimens for each filler material, according to Marshall mixture design method. Stability tests were carried out on these specimens and optimum bitumen content was determined for each filler type. Then, bituminous mixture specimens were prepared by using %0 - 2,5 - 5 - 7 and 10 different filler percentages and by using optimum bitumen content. Then, stability tests were carried out on this specimens. According to the results of the tests, design parameters were obtained and usability of filler materials in bituminous mixtures was determined by design parameters.

As a result, it was concluded that Ferrochrome slag could be used in bituminous mixtures, instead of limestone dust, as filler material. Ferrochrome slag tests gave similar results to limestone dust, even higher results in durability. It was recognized that silica fume, another test material, couldn't be used in bituminous mixtures as classical filler material, but it could be used at low rates as an additive material.

KEY WORDS: Slag, Filler, Limestone Dust, Silica Fume, Ferrochrome Slag,
Marshall Design Method, Marshall Stability, Bituminous Mixture, Asphalt
Concrete

COMMITTEE : Prof. Dr. İlhan SÜTAŞ
Prof. Dr. Fikret TÜRKER
Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN



ÖNSÖZ

Son yıllarda karayollarında giderek daha çok bitümlü sıcak karışımlar (asfalt betonu) kullanılmaktadır. Bu tür yol kaplamalarının dayanımı kadar maliyeti de yüksektir. Agregâ, filler ve asfalt çimentosundan oluşan bitümlü sıcak karışımlar, yol inşaatlarında büyük maliyetler oluşturmaktadır. Bunun nedeni sadece bitümlü bağlayıcının maliyetinin yüksek olması değil, aynı zamanda agregâ temininin de oldukça masraflı olmasıdır. Dolayısıyla bitümlü karışımın bünyesindeki filler malzemesinin düşük maliyetli bir kaynaktan ayrıca atıl bir malzemeden temin edilmesinin yarar sağlayacağı açıktır. Bu çalışmada Antalya ETİ Elektrometalurji İşletmesinin atıkları; cürufları ve baca tozları, incelenerek esnek yol üstyapısında filler malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Çalışma konusunun belirlenmesinde ve çalışmanın her aşamasında destek ve görüşlerini esirgemeyen danışman Hocam, Sayın Prof. Dr. İlhan SÜTAS'a (A.Ü. Müh. Fak.), deneysel çalışmaları gerçekleştirdiğim laboratuvarı ve deney ekipmanlarını kullanma imkanı sağlayan A.Ü. TBMYO, İnşaat Programı Koordinatörlüğü'ne, çalışmada kullandığım yapı malzemelerini temin etme konusunda ve gerektiğinde bilgi ve doküman sağlama konusunda yardımcı olan Sayın Serdar ŞİMŞEK'e ve Sayın Baki AKAR'a (K.13.B.M.Arş.Başmüh.), çalışmanın konusunu oluşturan Antalya ETİ Elektrometalurji İşletmesi hakkında bilgi veren, cüruf ve baca tozlarının temin edilmesinde yardımcı olan Sayın Ahmet PİR'e , çalışma konusu hakkında görüşlerini ve kaynaklarını benimle paylaşan Sayın Arş.Gör. Serdal TERZİ'ye (S.D.Ü. Tek.Eğt.Fak.) ve her zaman yanımda olan, üzerimde büyük emeği geçen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol.....	2
1.2. Karayolu Üstyapısı.....	4
1.3. Esnek Üstyapılar ve Asfalt Betonu.....	4
1.4. Filler Malzemenin Önemi.....	6
1.5. Antalya ETİ Elektrometalurji A.Ş. Hakkında Bilgi.....	7
2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI.....	12
2.1. Bitümlü Bağlayıcılar ve Mühendislik Özellikleri.....	12
2.2. Mineral Agregalar.....	14
2.3. Bitümlü Karışımlar ve Özellikleri.....	15
2.4. Elektrometalurji Sanayii'nin Yan Ürünleri.....	17
2.4.1. Cüruflar	17
2.4.2. Baca tozları.....	18
2.5. Konu Hakkında Yapılmış Olan Önceki Çalışmalar.....	19
3. MATERYAL ve METOD	27
3.1. Materyal.....	27
3.1.1. Mineral agrega.....	27
3.1.2. Filler malzeme	27
3.1.2.1. Taş tozu.....	28
3.1.2.2. Elektrik-ark fırını cürufu.....	28
3.1.2.3. Baca tozu (silis dumanı).....	29
3.1.2.4. Asfalt çimentosu.....	30
3.2. Metod.....	30
3.2.1. Agrega deneyleri ve ilgili hesaplar.....	30
3.2.1.1. Elek analizi deneyi ve agrega karışım hesabı	30
3.2.1.2. Los Angeles aşınma deneyi.....	33

3.2.1.3. Agrega özgül ağırlık ve su absorpsiyonu tayini.....	33
3.2.1.4. Filler malzemeler için yapılan deneyler.....	34
3.2.1.5. Farklı fillerler ile oluşturulan agreganın özgül ağırlığının belirlenmesi.....	35
3.2.2. Asfalt çimentosuna uygulanan deneyler.....	37
3.2.2.1. Penetrasyon deneyi.....	37
3.2.2.2. Düktilite deneyi.....	38
3.2.2.3. Yumuşama noktası deneyi.....	39
3.2.2.4. Parlama ve yanma noktası deneyi.....	40
3.2.2.5. Özgül ağırlık deneyi.....	40
3.2.3. Bitümlü karışımlara uygulanan deneyler.....	43
3.2.4. Bitümlü sıcak karışımların Marshall yöntemi ile tasarımı.....	45
3.2.4.1. Çalışmada kullanılan bağıntılar.....	45
3.2.4.2. Marshall stabilite deney numunelerinin hazırlanması.....	47
3.2.4.3. Marshall stabilite deneyi.....	49
3.2.4.4. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi ve grafiklerin çizimi.....	52
3.2.4.5. Farklı filler oranlarında hazırlanan karışımların Marshall deney kriterlerinin belirlenmesi.....	53
4. BULGULAR.....	54
4.1. Mineral Agrega Bulguları.....	54
4.2. Filler Malzemelerin Deney Bulguları.....	54
4.2.1. SEM (Elektron Mikroskopik) görüntü analizleri.....	54
4.2.2. Hidrometre deneyi bulguları.....	58
4.3. Asfalt Çimentosu Bulguları.....	59
4.4. Marshall Deney Bulguları.....	60
4.5. Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi.....	63
4.6. Farklı Filler Oranlarındaki Bitümlü Sıcak Karışımların Deney Bulguları.....	65
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	71
6. KAYNAKLAR.....	73
7. EKLER.....	76
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	: Santigrat derece
gr	: Gram
dk	: Dakika
kg	: Kilogram
KN	: Kilo newton
m	: Metre
mm	: Milimetre
sn	: Saniye
Vh	: Boşluk Yüzdesi
Vf	: Agregalar Arası Bağlayıcı İle Dolu Boşluk Yüzdesi
VMA	: Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi

Kısaltmalar

A.Ü.	: Akdeniz Üniversitesi
Ant. ETİ E.A.Ş.	: Antalya ETİ Elektrometalurji Anonim Şirketi
FeCr	: Ferrokrom
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
K13.BM	: Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü
Min.	: Minimum
Maks.	: Maksimum
S.D.Ü.	: Süleyman Demirel Üniversitesi
SiFeCr	: Silikoferrokrom
TBMYO	: Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu
TS	: Türk Standartları
Y.F. Şartnamesi	: Yollar Fenni Şartnamesi
SEM	: Elektron Mikroskobu İncelemesi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bitümlü Karışımlarda, Agregası, Asfalt ve Boşluk İlişkisi.....	5
Şekil 1.2. Silikoferrokrom ve Ferrokrom Akım Şeması (Ant. ETİ E.A.Ş. Gen. MÜD.)	11
Şekil 3.1. Elek Analizi Grafiği.....	32
Şekil 3.2. Agregası ve Bitümü Karıştıran Mekanik Karıştırıcı.....	48
Şekil 3.3. Otomatik Numune Sıkıştırıcı (Kompaktör)	49
Şekil 3.4. Marshall Deneyine Hazır Numuneler.....	50
Şekil 3.5. Marshall Stabilite Deney Cihazı.....	51
Şekil 3.6. Numuneleri 60 °C Sıcaklığa Getirmek İçin Kullanılan Su Banyosu.....	52
Şekil 4.1. Taş Tozu'nun Elektron Mikroskopunda 5450 Kez Büyültülmüş Hali.....	55
Şekil 4.2. Taş Tozu'nun Elektron Mikroskopunda 963 Kez Büyültülmüş Hali.....	55
Şekil 4.3. FeCr Cürufu'nun Elektron Mikroskopunda 1680 Kez Büyültülmüş Hali....	56
Şekil 4.4. FeCr Cürufu'nun Elektron Mikroskopunda 363 Kez Büyültülmüş Hali.....	56
Şekil 4.5. Silis Dumanı'nın Elektron Mikroskopunda 3130 Kez Büyültülmüş Hali....	57
Şekil 4.6. Silis Dumanı'nın Elektron Mikroskopunda 1810 Kez Büyültülmüş Hali....	57
Şekil 4.7. Silis Dumanı'nın Hidrometre Yöntemi Sonucu Tane Boyu Dağılımı.....	58
Şekil 4.8. Taş Tozu Filler'in Hidrometre Yöntemi Sonucu Tane Boyu Dağılımı.....	58
Şekil 4.9. FeCr Cürufu Filler'in Hidrometre Yöntemi Sonucu Tane Boyu Dağılımı...	59
Şekil 4.10. Pratik Özgöl Ağırlık - Bitüm Yüzdesi Değişimi.....	60
Şekil 4.11. Stabilite - Bitüm Yüzdesi Değişimi.....	61
Şekil 4.12. Akma - Bitüm Yüzdesi Değişimi.....	62
Şekil 4.13. Bağlayıcı ile Dolu Agregası Boşluğu Yüzdesi - Bitüm Yüzdesi Değişimi...	62
Şekil 4.14. Boşluk Yüzdesi - Bitüm Yüzdesi Değişimi.....	63
Şekil 4.15. Pratik Özgöl Ağırlık - Filler Yüzdesi Değişimi.....	67
Şekil 4.16. Stabilite - Filler Yüzdesi Değişimi.....	67
Şekil 4.17. Akma - Filler Yüzdesi Değişimi.....	68
Şekil 4.18. Boşluk Yüzdesi - Filler Yüzdesi Değişimi.....	69
Şekil 4.19. Bağlayıcı ile Dolu Agregası Boşluğu Yüzdesi - Filler Yüzdesi Değişimi....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çalışmada Kullanılan Agregada Gradasyonu.....	27
Çizelge 3.2. Elektrik-Ark Fırını Cürufufların Kimyasal Analizleri (Ant. ETİ E.A.Ş. Gen. MÜD.).....	28
Çizelge 3.3. Baca Tozu Kimyasal Analizleri (Ant. ETİ E.A.Ş. Gen. MÜD.).....	29
Çizelge 3.4. Baca Tozu Elek Analizleri(Ant. ETİ E.A.Ş. Gen. MÜD.).....	29
Çizelge 3.5. Karışıma Girecek Doğal Agregada Gruplarının (Fraksiyonlarının) Elek Analizleri.....	31
Çizelge 3.6. Doğal Agregada Karışımının Sonuç Gradasyonu.....	31
Çizelge 3.7. Çalışmada Kullanılan Agreganın Gradasyonu ve Şartname Limitleri.....	32
Çizelge 3.8. Los Angeles Aşınma Deneyi.....	33
Çizelge 3.9. İri Agregada Özgöl Ağırlık Tayini	33
Çizelge 3.10. İnce Agregada Özgöl Ağırlık Tayini.....	34
Çizelge 3.11. Taş Tozu'nun Zahirî Özgöl Ağırlığının Tayini.....	34
Çizelge 3.12. Elektrik-Ark Fırını Cürufu'nun Zahirî Özgöl Ağırlığının Tayini.....	34
Çizelge 3.13. Silis Dumanı'nın Zahirî Özgöl Ağırlığının Tayini.....	35
Çizelge 3.14. Taş Tozu Fillerli Agregada Karışımının Özgöl Ağırlık ve Absorpsiyon Değerleri	36
Çizelge 3.15. FeCr Cürufu Fillerli Agregada Karışımının Özgöl Ağırlık ve Absorpsiyon Değerleri.....	36
Çizelge 3.16. Silis Dumanı Fillerli Agregada Karışımının Özgöl Ağırlık ve Absorpsiyon Değerleri.....	36
Çizelge 3.17. Asfalt Çimentosu'nun Özgöl Ağırlığının Tayini.....	41
Çizelge 3.18. Yol Üst Yapılarında kullanılan Asfalt Çimentolarının Özellikleri (TS 1081).....	42
Çizelge 3.19. Taş Tozu ile Oluşturulan Sıkıştırılmamış Bitümlü Karışımın Maks. Teorik Özgöl Ağırlığının Tayini.....	43
Çizelge 3.20. FeCr Cürufu ile Oluşturulan Sıkıştırılmamış Bitümlü Karışımın Maks. Teorik Özgöl Ağırlığının Tayini.....	44
Çizelge 3.21. Baca tozu (Silis dumanı) ile Oluşturulan Sıkıştırılmamış Bitümlü Karışımın Maks. Teorik Özgöl Ağırlığının Tayini.....	44
Çizelge 3.22. Asfalt Betonu Karışımların Tasarım Kriterleri (Yollar Fenni Şartnamesi 1994)	51
Çizelge 3.23. Farklı Filler Oranlarına Göre Hazırlanan Agregada Gradasyonları.....	53
Çizelge 4.1. Kullanılan Agregaya Ait Deney Sonuçları.....	54
Çizelge 4.2. Kullanılan 60/70 Penetrasyon Asfalt Çimentosunun Fiziksel Özellikleri	59
Çizelge 4.3. Farklı Filler Oranlarındaki Numunelerin Marshall Deney Sonuçları.....	65
Çizelge 4.4. Farklı Bitüm ve Filler Oranlarındaki Numunelerin Marshall Deney Sonuçları.....	66

1. GİRİŞ

Ulaşım sistemlerinden en yaygın kullanım oranına sahip olanı karayolu ile ulaşımır. Türkiye’de de hem yük hem yolcu taşımacılığı çok büyük oranda karayolları ile sağlanmaktadır. Karayollarının trafik yüklerinden doğrudan etkilenen kısmı üstyapısıdır. Ülkemizde en çok kullanılan üst yapı tipi, tabakalı bir sisteme sahip olan ‘*esnek üstyapı*’dır. Yolun trafik yükleri bu tabakalı sistem sayesinde üstyapının oturduğu taban zeminine aktarılır. Üstyapı genelde üç tabakadan oluşur, bunlar; alttemel, temel ve kaplama tabakalarıdır.

Ülkemizde son yirmi yılda trafik hacimlerinin hızla artması ve dingil yüklerinin de artması sonucunda mevcut devlet yollarının büyük bir çoğunluğu yuvarlanma yüzeyi bakımından sürücü gereksinimlerine ve arzu edilen sürüş konforuna yanıt verememektedir. Bu nedenle son yıllarda karayollarında giderek daha çok bitümlü sıcak karışımlar (asfalt betonu) kullanılmaktadır. Bu tür yol kaplamalarının dayanımı kadar maliyeti de yüksektir. Agregâ, filler ve asfalt çimentosundan oluşan bitümlü sıcak karışımlar, yol inşaatlarında büyük maliyetler oluşturmaktadır. Bunun nedeni sadece bitümlü bağlayıcının maliyetinin yüksek olması değil, aynı zamanda agregâ temininin de oldukça masraflı olmasıdır. Dolayısıyla bitümlü karışımın bünyesindeki filler malzemesinin düşük maliyetli bir kaynaktan ayrıca atıl bir malzemedan temin edilmesinin ekonomik yönden yarar sağlayacağı açıktır.

Günümüzde, giderek artan ve çevresel tehdit oluşturan atıkların kontrolü de ciddi boyutlarda problem yaratmaktadır. Atıkların depo alanlarında biriktirilmesi ençok uygulanan yöntemdir. Ancak daha cazip olanı ise atıkların değerlendirilmesi, kullanılmasıdır. Böylece atıkların oluşturacağı çevre kirliliği önlenabilir ve ülke ekonomisine katkı sağlanabilir. Atıkların yapı malzemesi olarak kullanılması konusu dünya çapında çok yaygın olarak incelenmiştir ve incelenmeye devam etmektedir. Bu çalışmada Antalya ETİ Elektrometalurji İşletmesi’nin (Diğer adıyla Ferrokrom İşletmesinin) atıkları; cürufırları ve baca tozları, incelenerek esnek yol üstyapısında kullanılabilirliği araştırılmıştır.

1.1. Çalışmanın Amacı ve İzlenen Yol

Bu tez çalışmasındaki amaç, Antalya, ETİ Elektrometalurji İşletmesi'nin (Yerel adıyla Ferrokrom Fabrikasının) veya bu tesisin üretim yöntemine benzer şekilde üretim yapan diğer metalürji tesislerinin, elektrik-ark fırın cüruflarının ve baca tozlarının bitümlü sıcak karışımlarda filler malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

Antalya, ETİ Elektrometalurji İşletmesi'nin elektrik-ark fırını cürufları herhangi bir yerde kullanılmamaktadır, yıllardır birikmiş ve neredeyse küçük bir dağ gibi yığılmış olan bu atıklar, hem şehir içinde çevresel kirlilik yaratmakta hem de depolama alanı darlığı nedeniyle sorun yaratmaktadır. Doğaya bırakılmayıp fırınların bacalarında özel filtrelerle toplanan ve diğer bir atıl malzeme grubunu oluşturan baca tozlarının ise bir miktar kullanım alanı vardır. Silis dumanı olarak bilinen ve büyük çoğunluğu oluşturan Silikoferrokrom baca tozları hazır beton santrallerinde kullanılmaktadır, metal içeriği fazla olan diğer baca tozları (Ferrokrom baca tozu) ise birtakım sanayi işletmeleri tarafından alınarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, yukarıda adı geçen tesisin baca tozları ve cürufları, No.200 elekten elenerek, bitümlü sıcak karışımlarda farklı oranlarda kullanılmıştır. Üç farklı filler malzemesi (cüruf, baca tozu ve örnek filler olarak taş tozu) kullanılarak oluşturulan karışımlar üzerinde stabilite ve akma deneyleri yapılmıştır. Marshall Karışım Tasarımı Yöntemi kullanılarak optimum bitüm oranları bulunmuştur. Daha sonra bulunan optimum bitüm oranı sabit tutularak, filler malzemeler çeşitli oranlarda kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde de stabilite ve akma deneyleri yapılarak Marshall tasarım kriterleri olan stabilite, akma, birim ağırlık, boşluk oranı vb. değerler belirlenmiştir. Farklı filler malzemeler kullanılarak belirlenen tasarım kriterleri taş tozuna kıyasla incelenerek üstünlükleri ve eksik yönleri araştırılmıştır.

Çalışmada öncelikle taştözü, ferrokrom cürufu ve (bacatözü olarak) Silis dumanı %7 oranında filler olarak, asfalt çimentosu ise % 3.5 , 4 , 4.5 , 5 , 5.5 , 6 ve 6.5 oranlarında bağlayıcı olarak kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelere Marshall

bağlayıcı olarak kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelere Marshall Karışım Tasarımı yöntemi uygulanarak her bir filler cinsi için optimum bitüm yüzdeleri belirlenmiştir. Bulunan bu farklı optimum bitüm yüzdelerinin aritmetik ortalaması alınarak, tek bir optimum bitüm yüzdesi elde edilmiştir. Sonra belirlenen optimum bitüm yüzdesi kullanılarak, toplam agreganın yüzdesi olarak, ağırlıkça % 0 , 2.5 , 5 , 7 ve 10 oranlarında, farklı filler malzemeler kullanılmak suretiyle Marshall numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen tasarım parametreleri (akma, stabilite, birim ağırlık, boşluk oranı ve bağlayıcı ile dolu boşluk oranı) değerleri her bir filler malzeme için incelenerek yorumlanmıştır. Taş tozu filler'e kıyasla, bu malzemelerin bitümlü karışımlarda kullanılabilirlikleri belirlenmiştir.

Sonuç olarak, Antalya ETİ Elektrometalurji İşletmesi'nin FeCr cürufalarının bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılması durumunda, klasik filler malzeme olan taş tozuna benzer sonuçlar verdiği ve hatta dayanıklılık açısından daha üstün olduğu dolayısıyla FeCr cürufunun filler olarak kullanılabileceği saptanmıştır. Adı geçen işletme bu malzemelerden herhangi bir maddi gelir beklememekte, gereksiz yer işgal eden bu atıklardan kurtulmak için çözüm aramaktadır. Dolayısıyla, üstyapı işlerinde, filler olarak FeCr cürufunun kullanılması, hem ekonomi sağlayacaktır, hem de çevre kirliliği yaratan bu malzemelerin değerlendirilmesini sağlayacaktır. Ayrıca, baca tozu olan silis dumanının bitümlü sıcak karışımlarda, klasik filler malzeme olarak kullanılmasının uygun olmayacağı ancak, yüksek yoğunluk ve geçirimsizlik istenen özel durumlarda ve düşük oranlarda (%2-4 gibi) katkı malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

1.2. Karayolu Üstyapısı

Trafikten kaynaklanan dingil yüklerini altyapının taşıyabileceği değere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen alttemel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısına “Üstyapı” denir. Kaplama, taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yapıya sızan yüzeysel su miktarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilmelerini azaltmak amacıyla temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır. Kaplama altındaki temel tabakası, bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı malzemeyle işlem görmüş olan belirli granülometrideki malzemeden oluşur. Ana görevi, üstyapının yük taşıma yeteneğini artırmaktır. Ayrıca trafik hareketlerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilecek, drenaja yardımcı olabilecek ve don olaylarına karşı da koruma sağlayabilecek özelliklere sahip olmalıdır. Alttemel ise, trafik yüklerinin taban üzerine yayılmasını sağlamak, ince taneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek, ayrıca su ve don etkilerine karşı dayanım sağlamak, tampon bölge görevi yapmak için tesviye yüzeyi üzerine serilen tabakadır.

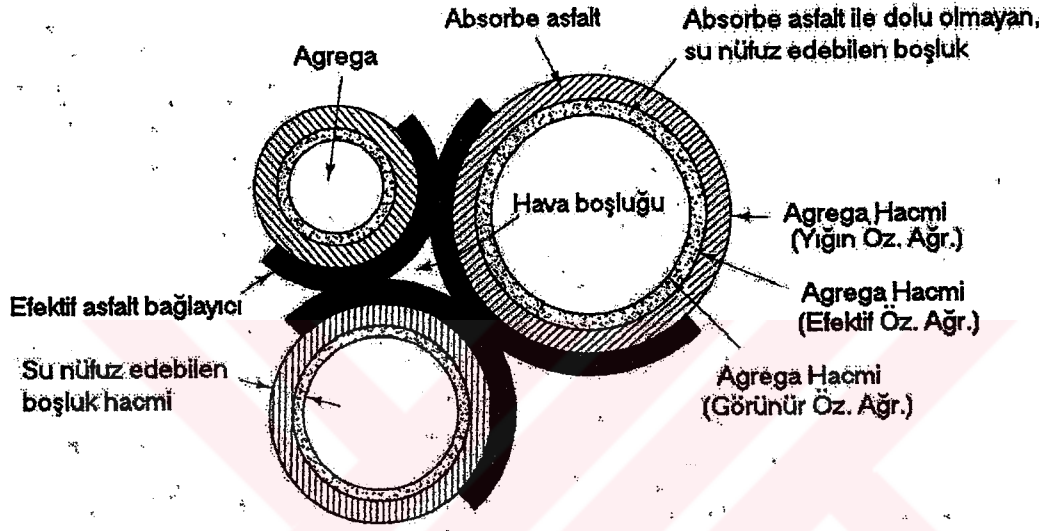
Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, özelliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olarak iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Taban zeminine, trafiğe, çevre koşullarına ve ekonomik hususlara bağlı olarak en uygun üstyapı türü seçilir ve boyutlandırılır.

1.3. Esnek Üstyapılar ve Asfalt Betonu

Bitümlü kaplama tabakalarıyla oluşturulan üstyapılara “Esnek Üstyapı” denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyiyle sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerini, kaplama, temel ve alttemel tabakaları yoluyla taban zeminine dağıtan bir üstyapı şekli olup, stabilitesi, kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi özelliklerine bağlıdır (Umar ve Ağar 1991).

Asfalt Betonu, çok dikkatli şekilde karışım oranları saptanmış bulunan iri agrega, ince agrega ve filler ile asfalt çimentosunun sabit karıştırma tesislerinde sıcaklık, nem

ve bileşim bakımından çok sıkı bir kontrol altında karıştırılmasıyla elde edilen stabilite ve dayanıklılık yönünden yüksek kaliteli bir sıcak karışımdır. Yol yapımında çoğunlukla kaplama tabakalarının yapımında kullanılır. Asfalt betonu, üç fazdan oluşmuş bir sistem olarak düşünülebilir. Bunlar Şekil 1.1.'de de görüldüğü gibi agrega, asfalt ve hava boşluğudur.



Şekil 1.1. Bitümlü Karışımlarda, Agrega, Asfalt ve Boşluk İlişkisi

Değişik kökenli malzemelerin bir araya getirilmesiyle ve çok sayıda yöntem izlenerek tasarlanabilen asfalt betonu, yol üstyapısının “kaplama” tabakasında kullanılır. “Binder” ve “aşınma” tabakalarından oluşan kaplama tabakasında kullanılacak asfalt betonunun aşağıdaki koşulları sağlaması gerekir:

- Araçlar ve sürücüler için düzgün, konforlu, kaymaya karşı dirençli, güvenli bir yol yüzeyi oluşturmaktır.
- Trafikten gelen mekanik tesirlere, yukarıda belirtilen özelliklerini kaybetmeden karşı koyabilmelidir.
- Güneş, su, don gibi dıştan gelecek fiziksel etkilere karşı dayanıklı olmalıdır.

Asfalt betonu kaplamanın bu koşulları sağlaması, büyük ölçüde, bileşimine giren agrega ve asfalt çimentosunun özelliklerine, ayrıca karışımın imalat biçim ve yöntemlerine bağlıdır (Ağar 1996).

1.4. Filler Malzemenin Önemi

Mineral filler, genel anlamı ile tamamı 0.600 mm (No. 30) elekten geçip, ağırlıkça en az % 70'i, 0.075 mm (No. 200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır (ASTM D242).

Filler, toplam agreganın çok küçük bir yüzdesini oluşturmaya karşın, karışımın özelliklerinin düzenlenmesinde önemli rol oynar. Filler genellikle bitümlü karışım içinde %3 ile %9 oranları arasında kullanılır. Belirli bir orana kadar filler boşlukları doldurduğu için, ince agregada gradasyonunu değiştirir ve böylece agregada tanecikleri arasında daha fazla temas noktası sağlayarak daha yoğun karışımların elde edilmesinde rol oynar. Bunun yanı sıra, bitüm ile birlikte ince agregaya karşı kayganlaştırma ve bağlayıcı etkisi göstererek harç elde etmeyi sağlar.

Fillerin birinci görevi, iri ve ince agreganın oluşturduğu iskeletin boşluklarını doldurarak kompasiteyi artırmaktır. Bu durum özellikle yuvarlanma tabakasında önemlidir. Zira, kompasite artışı çok iyi bir geçirimsizlik sağlar. Bununla beraber, fillerin karışımdaki görevi boşluk doldurmaktan daha önemlidir. Belirli bir bağlayıcı cinsi için, kaplamanın karakteristikleri, özellikle rijitliği, agregada danelerini saran bağlayıcı filminin kalınlığına bağlıdır. Bağlayıcı filmlerinin kalınlığı azaldıkça beton asfalt karışımlarının rijitliği artar ve sıcaklığa karşı duyarlılığı azalır. Asfalt filmlerinin kalınlığı ise fillerin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Filler daneleri çok ince olduğu için, büyük özgül alana sahiptir. Beton asfalt karışımında, bağlayıcı malzeme, karışımda mevcut bütün danelerin yüzeyini kaplayacağı için fillerin özgül alanının büyük oluşu asfalt filmlerinin ince olması sonucunu doğurur (Ağar 1996).

Asfalt film kalınlığı, asfalt içeriği, gradasyon, mineral agreganın tipi ve sıkıştırma derecesi gibi faktörlere bağlı olacaktır. Asfalt film kalınlığı çok tartışma konusu olmasına rağmen, literatürde asfalt film kalınlığının 100 mikronla 10 mikron arasında değişebildiğini gösteren kaynaklar vardır. Dolayısıyla kolaylıkla takdir edilebilir ki, bu kalınlığa bağlı olarak, mineral fillerin belirli bir miktarı, yani asfalt filmi kalınlığından daha küçük olan filler tanecikleri, daha büyük agregada taneleri ile birleşmeden asfalt filminin içine yerleşir. İnce filler tanecikleri ve asfaltın oluşturduğu bu karışım, bu film

tabakası, büyük mineral agrega parçacıkları için harç veya bağlayıcı oluşturur. Asfalt film katmanından daha büyük olan filler parçacıkları ise bireysel agrega parçacıkları arasında temas noktasına katkıda bulunacak ve mineral agreganın bir parçası olacaktır. Bu ikili fonksiyon, mineral fillere özgüdür ve onu diğer agregalardan ayırır (Puzinauskas 1983).

Fillerin uygun miktarda seçilmesinin yararlarını şu şekilde özetleyebiliriz:

- 1 – Karışımında terleme sakıncası yaratmadan, kohezyonu ve geçirimsizliği arttıracak biçimde gerekli oranda bağlayıcı kullanma olanağı sağlar.
- 2 – Sıkışmaya ve suya karşı direnci artırır.
- 3 – Isı değişimleri ile karışımın kıvamında doğacak değişimleri azaltır (Umar ve Ağar 1991).

1.5. Antalya ETİ Elektrometalurji İşletmesi Hakkında Bilgi

Ülkemizin yer altı zenginliklerini değerlendirmek amacıyla Türk - Fransız ortaklığı olarak 1958'de kurulmuş olan Antalya, ETİ Elektrometalurji A.Ş. (Diğer adıyla Ferrokrom Fabrikası), Antalya ili Kepezaltı mevkiinde bulunmaktadır. Kepez elektrik santralinin de burada bulunması yer seçiminde önemli rol oynamıştır.

İşletmede, Düşük Karbonlu Ferrokrom, Ferrosilisyum (%75 Si), Karpit, Söderberg hamuru ve Sönmemiş Kireç üretimi yapılmaktadır. Bunlardan, çalışmanın konusunu ilgilendiren, ilk ikisinin üretim süreci hakkında işletmeden alınan bilgiler aşağıda verilmiştir.

Silikoferrokrom Tesisi

Bu tesisin ürünü olan Silikoferrokrom'un büyük bir kısmı bir sonraki üretim aşaması olan ferrokrom üretimde hammadde olarak kullanılmaktadır.

Tesisin :

Kuruluş Tarihi.....: 1960 - 1963

Kuruluş Kapasitesi.....: 6.400 Ton/Yıl

Kullanım Kapasitesi.....: 7.300 Ton/Yıl

Kullanılan Hammaddeler :

Roş Kromit.....: 9.900 Ton/Yıl

Kuarsit.....: 13.150 Ton/Yıl

Metalurjik Kok.....: 6.400 Ton/Yıl

Boksit.....: 1.200 Ton/Yıl

Harcanan Enerji.....: 62.750.000 Kwh/Yıl

Ürünün :

Özgül Ağırlığı.....: 5,21 gr/cm³

Ergime Noktası.....: 1495°C

Üretim Metodu : Silikoferrokrom üretimi; 7500 KVA'lık bir ark-direnç fırınına % 46,5 Cr₂O₃ ihtiva eden krom cevheri (Roş Kromit), Kuvarsit, Metalurjik Kok hammadde silolarından artırarak alınır ve bir karışım halinde fırına beslenir, ayrıca cüruf kompozisyonunu ayarlamak için boksit gibi katkı maddelerinin ilavesi de gerekebilir. Bu fırın içerisinde demir oksitler, Cr₂O₃ ve SiO₂ indirgenerek oluşan SiFeCr alaşımı fırın tabanında birikir. İndirgenemeyen oksitler ile bir kısım SiO₂ metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturur. Metal ve cüruf uygun aralıklarla mal alma oluklarından alınarak birbirlerinden ayrılırlar. Cüruf kalıplara dökülerek soğutulur ve atılır. Metal ise SiC parçacıklarının yüzeye çıkabilmesi için bir süre bekletilir veya dekarbürizasyon işlemine tabi tutulduktan sonra zengin cüruf ile potalarda aktararak silikotermik reaksiyon sonucu elde edilecek ferrokrom için hazır hale getirilir.

Kullanıldığı Yerler : Düşük Karbonlu Ferrokrom üretiminde, vasıflı çelik üretiminde ve döküm sanayiinde alaşım elemanı olarak kullanılır.

Ferrokrom Tesisi

Türkiye’de Düşük Karbonlu Ferrokrom sadece bu tesiste üretilmektedir.

Tesisin :

Kuruluş Tarihi.....: 1960 - 1963

Kuruluş Kapasitesi.....: 8.760 Ton/Yıl

Kullanım Kapasitesi.....: 11.500 Ton/Yıl

Kullanılan Hammaddeler :

Silikoferrokrom.....: 7.265 Ton/Yıl

Kromit Konsantresi.....: 24.000 Ton/Yıl

Kireç.....: 15.500 Ton/Yıl

Ferrokrom Fırını İçin Tüketilen Enerji : 110.000.000 Kwh/Yıl

2001 Yılı Üretimi.....: 9500 Ton

Ürünün :

Özgül Ağırlığı.....: 7,16 gr/cm³

Ergime Noktası.....: 1545°C

Üretim Metodu : Zengin cüruf (Kalsiyum Kromit) üretimi; 6500 KVA gücündeki elektrik ark fırınında yapılır. Bu fırında yapılan işlem konsantre kromit ile (% 48 Cr₂O₃) kireç tozunun (CaO) silolardan alınıp tartılarak fırına beslenmesi ve beraberce eritilerek % 30 civarında Cr₂O₃ ihtiva eden zengin cürufun hazırlanmasıdır. Fırın yaklaşık iki saatte bir boşaltılır. Elde edilen bu zengin cüruf silikoferrokrom eriyiği ile potalarda birbirlerine aktarılacak SiFeCr içerisindeki Si ile zengin cüruftaki demir ve krom oksitlerin indirgenmesi sonucu düşük karbonlu ferrokrom elde edilir. Bu silikotermik reaksiyonlar dışarıya ısı verdikleri için pota sıcaklıkları yükselir. Aktarmalar yolu ile hızlı karışma sağlanarak reaksiyonların kısa sürede tamamlanması sağlanır. Elde edilen eriyik haldeki düşük karbonlu ferrokrom kalıplara dökülür, soğutulduktan sonra kalıplardan çıkarılarak kırma tesisinde piyasa taleplerine göre kırılıp net 500 Kg. ve dökme olarak (istek üzerine sandık ile ambalajlanarak) ayrıca 10-100 mm. ebatlarda özel kırma yapılarak satışa sunulur.

Kullanıldığı Yerler : Paslanmaz, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya mukavim çelik imalinde, askeri alanda; zırh, mermi ve kesici aletler imalinde, kimya sanayiinde krom bileşikleri elde edilmesinde kullanılır. Ürünün yaklaşık %90'ı ihraç edilmektedir.

Ferrosilisyum Tesisi

Tesisin :

Kuruluş Tarihi.....: 1978-1981

Kuruluş Kapasitesi.....: 5.000 Ton/Yıl

Kullanım Kapasitesi.....: 5.000 Ton/Yıl

Kullanılan Hammaddeler :

Kuarsit.....: 9.000 Ton/Yıl

Demir (Cevher+Hurda).....: 900 Ton/Yıl

Metalurjik Kok.....: 4.300 Ton/Yıl

Ürünün :

Özgül Ağırlığı.....: 3.5 gr/cm³

Ergime Noktası.....: 1330°C

Üretim Metodu : İşletmede % 75 Si ihtiva eden Ferrosilisyum üretimi 6000 KVA gücündeki ark-direnç fırına kuvarsit (% 95 SiO₂), demir çelik hurdası veya demir cevheri ile metalurjik kok belirli oranlarda tartılarak karıştırıldıktan sonra fırına gönderilir. Ferrosilisyum fırınında hammadde nakli ve tartımı bilgisayar otomasyonu ile tamamen otomatik olarak yapılmaktadır. Demir-oksitler ve SiO₂ karbon ile indirgenerek ferrosilisyum alaşımını oluşturur. Alaşım fırın tabanında birikir. Biriken bu alaşım mal alma oluklarının uygun zaman aralıklarında açılmasıyla demir kalıplara alınır. Soğuyan bloklar kırılıp net 500 kg'lık sandık ve azami 25 kg'lık parçalarla dökme olarak ayrıca 10-100 mm ebatlarda özel kırma yapılarak satışa sunulur. Biriken stoklar nedeniyle 1999 yılı Ocak ayından beri üretim durdurulmuştur.

Kullanıldığı Yerler : Demir-Çelik sanayiinde oksit giderici, çeliğin korozyon direncini ve mukavemetini arttırmak için alaşım elemanı olarak, transformatör, dinamo ve jeneratör imalinde kullanılan silisyumlu saçların imalinde, yay çeliklerinin imalinde kullanılır (Ant. ETİ E.A.Ş. 2001).

Silikoferrokrom ve Ferrokrom Tesisinin üretim prosesi Şekil.1.2.'de görülmektedir.

2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI

Bu kısımda, bitümlü karışımlar ve bünyesindeki malzemeler hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra bu çalışmanın konusuna benzer konularda daha önceden yapılmış olan çalışmalara değinilecektir.

2.1. Bitümlü Bağlayıcılar ve Mühendislik Özellikleri

ASTM'ye göre Bitüm ; “Doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı ya da pirojenik kökenli (doğal, ısı etkisiyle oluşan ergime sonucu oluşan) hidrokarbonların bir karışımı ya da bunların her ikisinin bir kombinasyonu olup çok kez bunların gaz, sıvı, yarı-katı yada katı halde olabilen, metal dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan ve karbondisülfürde tamamen çözülen madde” olarak tanımlanır.

Bitüm, inşaat ve endüstri sahalarında yapı malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılır. Bu malzemenin mekanik özellikleri oldukça karışıktır. Çok önemli olan noktalardan burada kısaca bahsedilecektir.

Rijitlik Kavramı : Bitümler visko-elastik malzemelerdir ve gerilim altındaki deformasyonları yükleme süresi ve ısının fonksiyonudur. Yüksek sıcaklıklarda yada uzun yükleme sürelerinde viskoz sıvılar olarak, çok düşük sıcaklıklarda yada kısa yükleme sürelerinde elastik katılar olarak davranırlar. Sıcaklık ve yükleme sürelerinin ortalama değerleri için visko-elastik davranış gösterirler.

Bitümlerin visko-elastik özelliklerini tanımlamak için, katıların elastisite modülüne benzer olarak, rijitlik modülü kavramı ileri sürülmüştür. Rijitlik modülünün değeri hem ısıya hem de yükleme süresine bağlıdır.

Bitümün Dayanıklılığı : Uzun dönemdeki çalışmalar; bitümlü kaplamanın tasarım süresi boyunca dayanıklı kalabilmesi için depolama, üretim işlemi ya da yol üzerine uygulama sırasında bitümün aşırı derecede sertleştirilmemesi gerektiğini göstermiştir. Birçok organik maddede olduğu gibi, bitüm de oksijenden, ultraviyole radyasyondan ve

sıcaklıktaki değişimlerden etkilenir. Bu dış etkiler bitümün sertleşmesine, penetrasyonun azalmasına, yumuşama noktasının ve penetrasyon indeksinin (PI) artmasına neden olur.

Bitümün Sertleşmesi (Oksidasyonu) : Birçok organik madde de olduğu gibi bitüm de havayla temas ettiğinde yavaşça oksidasyona uğrar. Oluşan polar oksijen içeren gruplar daha büyük moleküler ağırlıklara sahip miseller halinde toplanır ve bu nedenle bitümün viskozitesi artar. Polar hidroksil, karbonil ve karboksil gruplar oluşur ve bunun sonucunda bitümü daha sert ve daha az esnek yapan geniş ve karmaşık moleküller meydana gelir. Oksidasyon derecesi sıcaklığa, zamana ve bitüm tabakasının kalınlığına bağıdır. Oksidasyon sonucunda sertleşme, uzun süredir yaşlanmanın temel nedeni olarak kabul edilmektedir.

Bitümün Yapışması (Adezyonu) : Bitümün temel fonksiyonlarından birisi, agrega taneciklerini birbirine bağlamak için bir yapıştırıcı olarak davranmaktır.

Su ile temasın olmadığı durumlarda, bitüm ile agreganın tam adezyonu çok fazla sorun yaratmadan sağlanmaktadır. Ancak suyun varlığı söz konusu olduğunda agrega su ile daha kolay ıslandığı için, bir takım güçlükler oluşabilir. Agreganın başlangıçta bitümle örtülmesinde ya da bitümle agrega arasında uygun bir bağ oluşmasında bu güçlüklerle karşılaşılabilir. Bitümün su nedeni ile agrega sathından ayrılmasıyla, oluşmuş bağı zarar görmesine “soyulma” denir (Anonim1 2001).

Bitümle olan ilişkilerindeki farklılıklar nedeni ile agrega türünün bitüm adezyonu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Agregaların büyük bir kısmı hidrofilik (su seven) olarak sınıflandırılır. Yüksek SiO₂ içerikli agrega tiplerini; kuvars ve granit gibi, asidik kökenli agregaları, bitümle örtmek, bazalt ve diabaz gibi temel agregaları örtmekten daha zordur.

2.2. Mineral Agregalar

Yol kaplamalarında kullanılan agregalar genellikle doğal kaya oluşumlarından sağlanır. Kayalar doğada az veya çok çatlaklı bloklar halinde veya “kum”, “çakıl” şeklinde bulunur.

Yol inşaatı açısından agregalar boyutlarına göre üç grupta toplanır:

- Kaba (iri) agreg : 4 No’lu elek üstünde kalan (4,76 mm den büyük olan) danelerden oluşur.
- İnce agreg : 4 No’lu elek ile 200 No’lu elek arasında kalan (4,76 mm ile 0,074 mm arasında) danelerden oluşur.
- Filler : 200 No’lu elekten geçen (0,074 mm den küçük olan) danelerden oluşur.

Çakıl ve kum, iri ve ince agreg gruplarına girer. Filler olarak konkasörde taş kırılması sırasında elde edilen taş tozu, yada onun yerine kireç tozu, çimento, mermer tozu, cüruf veya uçucu kül gibi malzemeler kullanılır.

Çimentonun filler olarak kullanılmasındaki amaç, çimentonun bağlayıcı özelliğinden yararlanmak değildir. Çimento standart granülometrik bileşimi, saflığı ve asfalt çimentosu ile herhangi bir reaksiyona girmemesi sebebiyle filler olarak kullanılmaya çok uygundur. Filler içindeki danelerin şekli önemlidir. Köşeli daneler yassı, düz ve uzun danelere göre daha iyidir. Yassı, düz uzun danelerin yüzdesinin artması fillerin özelliğini düşürür.

Yol kaplamalarının direnci ve yoğunluğu üzerine etkiyen en önemli etken, yapıda ana taşıyıcı görevini üstlenen, agrega olmaktadır. Bu nedenle agregaların yeterince sert ve dayanıklı olması, zararlı madde içermemesi ve dane şekillerinin bir kenetlenme yaparak direnci artıracak şekilde olması istenir. Yolun en üst tabakasında kullanılan agregada ise özellikle yüksek mekanik kalite aranır.

2.3. Bitümlü Karışımlar ve Özellikleri

Bitümlü karışımlar denince genellikle akla sıcak-karışımlar gelir ve bunlar sıcak agrega karışımının, ısıtılmış asfalt çimentosu ile homojen olarak karıştırılması ile elde edilirler. Bitümlü karışımlar, çok pahalı olduklarından yol yapımında çoğunlukla yalnızca kaplama tabakalarının yapımında kullanılırlar, özellikle orta ve ağır trafikli yollarda ve otoyollarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sathi (yüzeysel) kaplamalar ise daha çok düşük trafikli yollarda kullanılır.

Bitümlü karışımlar pahalı oldukları kadar birçok yararlı özelliklere de sahiptir.

- 1- Yol yüzeyi düzgün olur, taşıtların tekerlek sürtünmesi nedeniyle yaptığı gürültü önemli ölçüde azalır. Konfor artar, tekerlekler daha az aşınır.
- 2- Bağlayıcı malzeme agrega danelerini çok iyi şekilde birbirine bağladığı için taşıtların taş fırlatması tehlikesi ortadan kalkar.
- 3- Oldukça geçirimsiz bir yol yüzeyi elde edilir (Umar ve Ağar 1991).

Halen T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından karayollarında kullanılan bitümlü karışım tipleri, sıcak bitümlü temel ve asfalt betonudur.

Bitüm-agrega karışımlarının yol kaplaması olarak kullanılabilmesi için bazı belirli koşulları sağlaması gerekir. Bu koşullar kaplamalarla ilgili teknik şartnamelerde verilmiştir. Karışımların dizayn edilmeleri sırasında şu özellikler dikkate alınır; Stabilité, Durabilité (Dayanıklılık), Esneklik, Yorulmaya karşı direnç, Kaymaya karşı direnç, Geçirimsizlik ve İşlenebilirlik, bu özelliklere aşağıda kısaca değinilmiştir.

Stabilité

Asfalt kaplamanın stabilitesi, trafik yüklerine, ötelenme ve tekerlek izleri oluşmayacak şekilde direnç gösterme yeteneğidir. Stabilité trafik yüklerini karşılayacak kadar yüksek olmalıdır. Ancak çok yüksek stabilite, çok sert bir karışım anlamına gelir ki bu tür kaplamalar trafik yükleri altında oluşan defleksiyonlara uyamayp çatırlar. Bu nedenle düşük stabilite gibi çok yüksek stabilite de zararlıdır.

Stabilite, agregalar arası içsel sürtünmeye ve bitüm-agrega kohezyonuna bağlıdır. Agregalar arası içsel sürtünme agregada danesinin şekli ve yüzey yapısı ile, kohezyon ise asfaltın yapışma özelliği ile ilgilidir. Kohezyon, yükleme hızı, asfaltın viskozitesi arttıkça ve kaplama ısısı azaldıkça artar. Ayrıca asfalt %'sinin bir noktaya kadar artmasıyla kohezyon da artar. Ancak bitüm filmi daha fazla arttığında, içsel sürtünme ile birlikte stabilite de azalır.

Durabilite (Dayanıklılık)

Bir karışımın durabilitesi, karışımındaki asfaltın özelliklerinin değişmesine (oksidasyon, v.s.) , agreganın kırılmasına ve asfaltın agregaya yüzeyinden soyulmasına karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Bu faktörler iklim, trafik veya her ikisinin birleşimi sonucu ortaya çıkar. Yüksek durabilite genellikle üç yöntemle sağlanır. Yüksek asfalt %'si kullanarak, yoğun gradasyonlu, soyulma direnci yüksek agregaya kullanarak ve karışımı en yüksek impermeabilite (geçirimsizlik) verecek şekilde dizayn edip sıkıştırarak.

Geçirimsizlik

Geçirimsizlik, asfalt kaplamanın hava ve su geçişine olan direnci olarak tanımlanabilir. Geçirimsizlik, karışımındaki hava boşluğu %'si ile belirlenir. Karışımındaki boşlukların birbiri ile bağlantılı olması ve boşlukların yüzeye irtibatlı olması, geçirimsizliği etkileyen başlıca faktörlerdir.

İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, karışımın karıştırılması ve sıkıştırılmasındaki kolaylık olarak ifade edilebilir. Çok fazla kaba agregaya bulunduran karışımlar kolay işlenebilir olmazlar. Çok fazla filler de işlenebilirliği düşürür. Ancak işlenebilirliği çok iyi olan karışımlar yumuşak karışımlardır ve bunların trafik yükleri altında deforme olmaları kolaydır.

Esneklik

Esneklik, üstyapının taban zeminindeki geçici oturma ve hareketlere karşı, çatlamaya neden olmadan uyum gösterebilmesidir. Bitüm %'si yüksek, açık gradasyonlu karışımlar, bitüm %'si düşük yoğun gradasyonlu karışımlara göre daha esneklerdir. Ancak bazen, esnekliği yüksek karışımların stabilitesi düşük olabilir.

Yorulmaya Karşı Direnç

Bir üstyapının yorulmaya karşı direnci, trafik yükleri altında oluşan tekrarlanan eğilmeye karşı direncidir. Karışımındaki boşluk %'si ve asfaltın viskozitesi yorulmaya karşı direnç üzerinde çok etkilidir. Yetersiz sıkışma, yüksek boşluk %'si, asfaltın yaşlanması ve sertleşmesi yorulma direncini azaltır. Üstyapının kalınlığı ve mukavemeti, taban zemininin taşıma gücü, üstyapı ömrünü etkileyen diğer faktörlerdendir (Önal ve Kahramangil 1993).

Kayma Direnci

Asfalt kaplama yüzeylerinde, özellikle yağışlı havalarda araç tekerleğinin kaymasına karşı oluşan dirence kayma direnci denir. Kayma direncinin yüksek olması için hem agrega sert ve pürüzlü olmalı hem de asfalt kaplama yüzeyi pürüzlü olmalıdır. Maksimum dane boyutu 1/2 in. veya 3/8 in. olan açık gradasyonlu karışımların kayma direnci yüksek olur.

2.4. Elektrometalurji Sanayii'nin Yan Ürünleri

2.4.1. Cüruflar

Cüruflar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Fırın cürufları demir, bakır, alüminyum, krom ve nikel elde edilen fırınlarda metal filizinin indirgenmesi sırasında istenmeyen safsızlıkları alıp ergiyerek akıcı hale geçen, yoğunluğu ergimiş metalden küçük olduğu için ayrılarak yukarı çıkan bir karışımdır.

Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yönetimine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir.

Tüm cüruflar arasında en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır (YFC). Türkiye'de YFC İskenderun, Karabük, Sivas ve Ereğli Demir Çelik Tesislerinden atık ürün olarak çıkmaktadır. YFC'nun tamamına yakını granüle yüksek fırın cürufu(GYFC) olarak elde edilmektedir. YFC, ergimiş halde fırından çıktığında eğer yavaş soğutulursa kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve agrega olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma uygulanması sonucunda akışkanlığındaki ani azalma kristalleşmeyi engeller ve camı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür hızlı soğutulan cüruflar Granüle Yüksek Fırın Cürufu(GYFC) olarak adlandırılırlar. GYFC bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir. Yani su ile karıştırıldığında çimento gibi sertleşir.

Bu çalışmada kullanılan cüruf ise Ferrokrom üretimi yapan elektrik-ark fırını cürufudur. Açık havada soğumaya bırakıldığı için kristal yapıdadır ve toz halindedir. Anılan malzemenin özellikleri üçüncü bölümde detaylı açıklanmıştır.

2.4.2. Baca tozları

Sanayi tesislerindeki fırınlardan özel filtrelili toz tutucularla toplanan tozlara, "baca tozu" denmektedir. Antalya, ETİ Elektrometalurji İşletmesi'nin üç farklı elektrik-ark fırından üç çeşit baca tozu toplanmaktadır. Bunlar, ferrosilisyum bacatozu, silikoferrokrom baca tozu ve ferrokrom baca tozu'dur. Ferrosilisyum ve silikoferrokrom baca tozlarının, içerdikleri yüksek orandaki (%80-95) SiO_2 miktarı nedeniyle, "Silis Dumanı" olarak nitelendirilmesi mümkündür. Baca tozlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri (Çizelge 3.3 ve 3.4.) üçüncü bölümde daha detaylı açıklanmıştır.

Silis Dumanı : Yüksek saflıktaki kuvarsitin ve roş kromitin, ferrosilisyum ve silikoferrokrom alaşımı üretiminde kullanılan elektrik ark fırınlarında kok kömürü ile 2000 °C'de indirgenmesi sonucu açığa çıkan saf Si buharının havanın oksijeni ile birleşmesi sonucu Silis Dumanı oluşur. Yüksek sıcaklıkta gaz haline geçen SiO_2 soğutma sırasında yükseltgenerek SiO_2 halinde birirmektedir. Ani soğutma nedeniyle

kristalleşemeyen SiO_2 amorf yapıda çok küçük taneler halinde oluşmaktadır. Oluşan amorf SiO_2 taneleri küresel şekildedirler. Yüksek oranda (%85-90) amorf SiO_2 içeren silis dumanı gri renkli bir tozudur.

Silis dumanının büyük bir kısmı ABD'de ve Norveç'te üretilmektedir. Silis dumanı ile ilgili çalışmalar 1952 yılında Norveç'te başlamış ve çalışma sonuçları 1970'lerin başında açıklanmıştır. 1970'lerin sonlarında beton sektöründe pratik olarak kullanılmaya başlanmıştır. Silis dumanı çok ince taneli olması nedeniyle çimento ve beton sanayiinde puzzolan olarak kullanılmaktadır.

Türkiye'de, Silis Dumanı yalnız Antalya'da ETİ Elektrometalurji İşletmesi'nin yan ürünü olarak çıkmaktadır. Türkiye de bu malzeme ile ilgili çalışmalar 1985 yılından itibaren yapılmakta olup, hazır beton sektörünün gelişmesi ile 1987 yılından itibaren pratikte kullanım imkanı doğmuştur. Ayrıca, yalıtım malzemesi olarak ve ateş tuğlası yapımında da bir miktar kullanılmaktadır. Ancak yeterli düzeyde kullanım alanı olduğu söylenemez. Avrupa'da ve Amerika'da oldukça değerli bir malzeme olan Silis dumanını üretmek için, sadece bu iş için kurulmuş, işletmeler vardır.

Silis dumanının yol üstyapılarında, asfalt betonu kaplamalarda kullanım potansiyeli ise henüz açıklık kazanmış değildir. Bu çalışmada Silis dumanının (SiFeCr baca tozu) asfalt betonu kaplamalarda filler malzemesi olarak kullanılabilirliği deneysel çalışmalarla incelenmiştir.

2.5. Konu Hakkında Yapılmış Olan Önceki Çalışmalar

Puzinauskas (1983), Asfalt kaplama karışımlarında fillerin rolünü daha iyi belirlemek için, ayrıca bu yeni belirlemelere göre karışımlarda kullanılan filler malzemelerinin kalitesini daha iyi kontrol etmede gelişmiş testler önermek için çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında dört değişik filler, kireçtaşı tozu, kaolin kili, fuller toprağı, ve kısa lifli asbest, kullanmıştır. İlk üç filler tipini No.200 (0.075 mm) elekten geçirdikten sonra kullanmıştır. Kullanılan asfalt çimentosu 70/80 penetrasyonludur. Çalışmasında, filler-asfalt karışımı ve asfalt kaplama karışımı (Kapalı gradasyonlu asfalt betonu) olmak üzere iki tür karışım denemiştir

Çalışmada, mineral fillerin, asfalt kaplama karışımlarının davranışları ve özellikleri üzerindeki etkisini aşağıdaki yönlerden incelendiği görülmektedir.

- Fillerin, karışımın kompaksiyon karakteristikleri üzerindeki etkisi, Mekanik Döner Kompaktör aracılığı ile incelenmiştir.
- Fillerin, karışımın fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi, Marshall karışım tasarımı testleri ile incelenmiştir. Numuneler Marshall tokmağı ile 50'şer darbe vurularak hazırlanmıştır. Karışımlarda ağırlıkça %7 oranında filler, %3 ila %11 arasında değişen oranlarda asfalt çimentosu kullanılarak denemeler yapılmıştır.
- Fillerin, karışımın suya karşı hassasiyeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Denemelerde, 24 saat 60 °C suda bekletilmiş numunelere stabilite testleri uygulanmıştır.

Çalışmanın sonuçları ve öneriler şu şekildedir:

- 1- Yol kaplama karışımının yoğunluk ve dayanım gibi özelliklerini iyileştirmek için çoğunlukla mineral fillerlere ihtiyaç duyulmaktadır.
- 2- Mineral filler asfalt karışımlarda iki rol oynar: Birincisi, filler, mineral agreganın bir parçasıdır, boşlukları doldurur ve büyük agrega taneleri arasında temas noktaları oluşturur. İkincisi, fillerler asfalt ile karıştığı zaman geniş agrega tanelerini bünyesinde birleştiren, yüksek kıvamlı bir bağlayıcı şeklini almaktadır.
- 3- Kaplama karışımlarında normalden daha az filler kullanıldığı zaman, asfaltın duktilite, penetrasyon ve viskozite gibi özellikleri önemli düzeyde değişikliğe uğramaktadır.
- 4- Gerçek asfalt karışımlarında, genellikle kullanılan filler yoğunluğunda, ortam sıcaklığında, filler-asfalt karışımlarının duktilitesi sıfır değerine yaklaşır. Aynı sıcaklıkta ve yoğunlukta karışımın penetrasyonu ise orijinal değerinin üçte birinden daha aşağı düşmektedir.

- 5- Testler, kaplama karışımını sıkıştırmak için ihtiyaç duyulan sıkıştırma gücü ile bağlayıcı viskozitesi arasında güçlü ve iyi bir korelasyonun varlığını göstermiştir.
- 6- Numuneler aynı hava boşluğu değerinde sıkıştırıldıkları takdirde, genellikle, karışım stabilitesi ile bağlayıcı viskozitesi arasında iyi bir korelasyon elde edilmiştir. Yapılan testler göstermiştir ki numunelerin stabilitelerindeki farklılık asfalt çimentosunun viskozitesindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır.
- 7- Yine testler göstermiştir ki asfalt kaplama karışımının suya karşı duyarlılığı, karışımdaki suya hassas filler oranının düşürülmesi ile veya yok edilmesi ile azaltılabilir.

İshai vd (1980), Bitümlü karışımların optimal davranışları ile filler özelliklerini ilişkilendiren bir model üzerinde çalışmıştır. Bitümlü karışımların optimum bitüm içeriği ve optimum mekanik davranışları, kırılma ve şekil değiştirebilme kriteri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada altı çeşit filler, %0 ile %25 arasında değişen oranlarda, kullanılmıştır. Filler türleri, cam parçacıkları, dolomit, kum taşı, bazalt, kireçtaşı ve hidrate kireçten oluşmuştur.

Sonuçta, İshai vd fillerleri sınıflandırmak için temel bir nicel kriter önerir. Oluşturulan modelde, optimum bitüm miktarı ile filler çeşidi arasındaki ilişkiyi niteleyen bir “a faktörü” nün olduğu ve bu faktörün filler taneciklerinin fiziksel özellikleri ile yakından ilgili olduğu saptanmıştır. Özellikle filler tanelerinin yüzey alanı, optimum bitüm içeriğinin belirlenmesinde büyük önem arz etmektedir. Genellikle karışım içerisindeki filler oranının artması ile optimum bitüm miktarının azalması beklenirken bu çalışmada filler miktarının artması ile optimum bitüm miktarının da arttığı gözlenmiştir. Bu beklenmedik gelişmenin filler yüzey alanı ile karışımdaki VMA (agregalar arası hava boşluğu) değerine bağlı olduğu vurgulanmıştır.

Shahrour ve Saloukeh (1992), Farklı fillerlerin (No.200'den geçen) kalitesinin ve niteliğinin asfalt karışımlardaki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada çimento, hidrate kireç, kireç taşı ve sodyum silikat esaslı fillerler kullanılmıştır. Ağılık esasına göre yapılan karışımlarda 0,5 ve 1,5 filler/bitüm oranlarında farklı filler tipleri kullanılmıştır.

Asfalt karışımlarda kullanılan farklı oranlardaki farklı filler cinslerinin performansı nasıl etkilediğini değerlendirmek için Marshall karışım tasarımı çalışması yapılmıştır.

Dubai'de yapılan bu çalışmanın asıl amacı; en çok problem yaratan tekerlek izi oluşumu ve çatlamalara karşı, sıcak iklim şartlarında dahi üstün performans gösteren asfalt karışımları elde etmektir. Çünkü Dubai'deki sıcak ve çöl iklimlerinde yazın 5-6 ay boyunca 50 °C'ye varan ortam sıcaklıkları görülmektedir, bu sıcaklık kaplama üzerinde 85 °C yi bulmaktadır.

Çalışmanın sonuçları ve öneriler aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- 1- Deney sonuçları göstermiştir ki kullanılan tüm mineral filler tipleri, bağlayıcıda bir genişletici (extender) rolü oynamıştır ve bağlayıcıda minimal sertlik (rijitlik) etkisi göstermiştir.

Yüksek sıcaklıklarda, bağlayıcı özelliklerini anlamlı şekilde modifiye ederek, yüksek sertleştirici (rijitleştirici) etkisi gösteren fillerler, sürekli deformasyon sorunları olan yollar için dikkate alınmalıdır.

- 2- Diğer filler çeşitleri ile karşılaştırıldığında hidrate kireç filler üstün rijitlik (sertlik) özelliği göstermiştir. Hidrate kireç 0,8 filler/bitüm oranında bitüme eklendiği zaman, yumuşama noktasını yükseltmiş, penetrasyonu düşürmüştür. Mevcut asfalt karışımlarda, hidrate kireç fillerin 0,5 ile 0,8 filler/bitüm oranlarında mineral filler ile yer değiştirme şeklinde kullanılması tavsiye edilmektedir.

Anderson vd (1992), No.200 Elek altı agreganın, kapalı gradasyonlu sıcak karışım asfaltın kırılma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yedi farklı kaynaktan alınan agrega ve filler ile hem mastik karışımlar, hem de sıcak karışım asfalt betonu üretilmiştir. %6-8-10 oranlarında filler ve ağırlıkça %5,9 oranında asfalt kullanılarak numuneler oluşturulmuştur.

Numuneler üzerinde yorulma ve kırılma deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar ve öneriler şu şekildedir:

- Mineral filler fraksiyonunun sıcak karışım asfalt betonunun kırılma özellikleri üzerinde anlamlı bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır.
- Elastik zemine oturan kiriş metodu ile sıcak karışım asfaltların yorulma davranışının belirlenmesinin uygun olmadığı anlaşılmıştır. Sıcak karışım asfalt betonunun kırılma dayanımını ölçmek için, 3 noktadan yükleme yapılan, kiriş kırılma deneyleri uygulanmıştır.
- Genellikle toz (filler) eklenmesi ile sıcak karışımın kırılma dayanımı artmıştır.

Anderson vd (1992), Mineral filler-asfalt mastiklerinin reolojik özellikleri ve kaplama performansı üzerindeki önemi hakkında çalışmalar yapmışlardır. Yedi farklı asfalt-filler mastiğin reolojik özellikleri ve kopma-kırılma özellikleri incelenmiştir. Dört asfalt türü ve iki ayrı filler cinsi (kalsit ve kuartz) kullanılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde mastiklerin özellikleri normal asfalt bağlayıcı ile kıyaslanarak, filler eklenmesi ile sonuçların nasıl değiştiği belirlenmiştir. Deneylerde reolojik özellikleri belirlemek için mastiklerin Dinamik Kesme ve Eğilme Sünmesi (flexural creep) incelenmiştir. Kırılma-kopma özelliklerini belirlemek için ise numunelerin Direk Çekme dayanımları incelenmiştir. Sonuçta, Anderson vd. fillerin düşük sıcaklıklardaki kırılma üzerindeki etkisinin filler tipinden bağımsız olduğu sonucuna varmıştır. Dolayısıyla kırılma mekanizmasını asfalt bağlayıcının kontrol ettiği tahmin edilmektedir. Ayrıca fillerlerin tekerlek izi oluşumu direncini artırdığı ve gerilme kontrollü yorulma direncini iyileştirdiği kabul edilmiştir.

Lav (1990), Sülfürik asit üreten fabrikaların yan ürünü olan Pirit Kalsinesi'nin esnek yol kaplamalarında filler malzemesi olarak değerlendirilmesi üzerinde çalışmalar yapmıştır. Pirit kalsinesi kullanılarak üretilen Marshall numuneleri stabilite deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca elektron mikroskopisi yöntemiyle filler malzemelerinin (Normal portland çimentosu, taştuzu, pirit kalsinesi) fotoğrafları çekilmiş ve X ışınları ile kimyasal yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak, stabilite değerleri yönünden kalsinenin, taş tozuna kıyasla bariz üstünlüğe sahip olduğu belirlenmiştir. Pirit kalsinesi'nin diğer klasik filler malzemeler gibi esnek yol kaplamalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kandhal vd (1998), Asfalt kaplama karışımlarının performansı ile bağlantılı olarak mineral fillerlerin karakteristik deneyleriyle ilgili çalışmalar yapmışlardır. Deneylerde tane boyutu ve mineralojik yapısı farklı olan altı çeşit filler malzemesi kullanılmıştır. Karışımlar, asfaltın 0,8 ve 1,5 oranlarında filler kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıcı deformasyon ve yorulma kırılması Superpave Kesme Deneyi ile, neme karşı duyarlılık ise Hamburg Tekerlek İzi ve AASHTO T283 deneyi ile belirlenmiştir.

Tayebali vd (1998), Asfalt Betonunun performansı ve tasarımı üzerinde mineral filler tipinin ve miktarının etkisini belirlemek için çalışmışlardır. Agregaların tanecik şeklini ve yüzey yapısını belirlemek için 3 farklı deney (AASHTO TP33, ASTM D3389 ve Akış Hızı Yöntemi) uygulanmıştır. Tüm deney metotları doğal nehir kumundan, kırılmış agreganın kolayca ayrıldığını göstermiştir. Dört çeşit doğal dere kumu ve öğütülmüş granit kullanılarak hazırlanan karışımların performansı belirlenmiştir. Asfalt-Agrega karışımlarında %20 doğal kum ve %80 öğütülmüş granit içeren filler karışımı, %4,6,8 ve 12 oranlarında kullanılmıştır. Marshall karışım tasarımı yöntemi ve Tekrarlı Kesme Deneyi kullanılmıştır. Sonuçta, filler olarak, %20 doğal kum ve %80 öğütülmüş granit içeren karışımlar, %100 öğütülmüş granit içeren karışımlara kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca mineral filler içeriğindeki artışın, karışımın kesme esneklik modülünü artırdığı, karışımdaki sabit gerilme yığılmasını azalttığı gözlenmiştir.

Ishai ve Craus (1996), Asfalt kaplama karışımlarının davranışı ve durabilitesi üzerindeki bazı agregata ve filler özelliklerinin etkisini incelemişlerdir. Agregata taneciklerinin geometrik düzgünlüğünün (şekil, yüzey yapısı ve köşelilik açısından) nicel bir değerlendirmesi için genel bir düşünce ve deney metodu önermişler ve bu konuda çalışmışlardır. Agregata parametrelerinin, bitümlü karışımların mekanik davranışları ve fiziksel özellikleri ile anlamlı derecede bağlantılı olduğu bulunmuştur. Araştırma sonuçları ve bulgular, fillerin, önemli fizikokimyasal özelliklerinin özel bir değerlendirmesi ve yine fillerin bitümlü kaplama karışımlarının mevcut özellikleri ve uzun vadeli durabilite davranışı üzerindeki anlamlı etkisi, bağlamında özetlenmiştir.

Tapkın (1998), Asfalt-Agrega karışım özelliklerinin portland çimentosu modifikasyonu ile geliştirilmesi üzerinde çalışmıştır. Çalışmanın temeli filler değiştirmesidir. Filler olarak portland çimentosu kullanılarak kapalı gradasyonlu karışımlar üretilmiştir. Bu karışımlar sıradan filler içeren diğer karışımlarla kıyaslanarak tespitler yapılmıştır. Seçilen karışım tipi, %7 filler ve (Standart Marshall Yöntemi ile bulunan) %5,5 optimum asfalt oranı içermektedir. Deneyler sonucunda portland çimentosu ile üretilen numunelerin Marshall stabilitelerinde önemli bir değişim görülmüştür. Bu numunelerde sıradan fillerli numunelere oranla ortalama %15 stabilite artışı ve akma değerinde %21 düşüş görülmüştür. Ayrıca yapılan İndirek Yorulma deneylerinde, portland çimentosu fillerli numunelerin yorulma ömürlerinde sıradan fillerli numunelere oranla ortalama %15 artış görülmüştür. Araştırma sonuçları göstermiştir ki bitümlü karışımlardaki filler malzemenin özellikleri ve miktarı, karışımın davranışını dikkate değer şekilde değiştirebilmektedir

Terzi (2000), Mermer toz atıklarının asfalt betonunda filler malzemesi olarak kullanılması konusunda çalışma yapmıştır. Çalışmasında taş tozu ve mermer tozu, filler olarak kullanılarak Marshall karışım tasarımı yöntemi ile numuneler oluşturulmuştur. Numuneler üzerinde Marshall stabilite ve plastik deformasyon deneyleri yapılarak optimum bitüm ve optimum filler oranları tespit edilmiştir. Daha sonra Isparta'da bulunan mermer fabrikalarının atığı olan, mermer tozları (7 ayrı cins mermer tozu) ile optimum filler ve optimum bitüm oranlarında numuneler oluşturulup birim deformasyonları belirlenmiştir ve sonuçlar taş tozu fillerli deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, mermer atıkları kullanılarak hazırlanan karışımların, birim deformasyonlarının ve Marshall stabilite değerlerinin normal numunelere kıyasla bir farklılık göstermediği saptanmıştır. Dolayısıyla mermer atıklarının taş tozu yerine mineral filler malzemesi olarak kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Güngör (1996), Afşin Elbistan Termik Santralinin uçucu külünün esnek yol kaplamalarında filler olarak kullanımı üzerine bir araştırma yapmıştır. Uçucu külle ile üretilen bitümlü karışımlar klasik filler malzemeleri ile (taş tozu, portland çimentosu) karşılaştırılarak incelenmiştir. Marshall karışım tasarımı neticesinde uçucu külle numunelerin diğer klasik fillerli numunelerle hemen hemen aynı değerleri verdiği

görülmüştür. Bu sonuçlar neticesinde, endüstriyel atık niteliğindeki Afşin Elbistan uçucu külünün asfalt betonu karışımlarda filler olarak kullanılabileceğini kanısına varılmıştır.

Button ve Little (1988), Katkı maddelerinin kaplama performansını artırabileceğinden yola çıkarak bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada, Carbon Siyahı (Diğer adıyla, is) asfalt katkısı olarak kullanılmıştır. Kullanılmadan önce, %92 oranında carbon siyahı ile %8 oranında yağ karıştırılarak pellet haline getirilmiş ve asfalta eklenmiştir. Dere agregası ile birlikte %15 oranında carbon siyahı, AC-5 asfalt türü ile karıştırılarak karışım yapılmıştır ve katkı kullanılmadan üretilen kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Marshall stabilite deneyi sonucunda katkılı numunelerin stabilitesi ve akma değeri kontrol numuneleri ile hemen hemen aynı değerleri vermiştir. Çekme direnci açısından bakıldığında ise %15 Carbon Siyahı katkılı numuneler yüksek sıcaklıklarda deneme numuneleri ile aynı çekme direnci verirken düşük sıcaklıklarda daha düşük çekme dirençleri vermişlerdir.

3. MATERYAL ve METOD

3.1. Materyal

3.1.1. Mineral agregası

Mineral agregası, kaba agregası, ince agregası ve mineral filleri içeren en az üç ayrı dane grubunun düzgün bir derecelenme verecek şekilde belli oranlarda karıştırılmasından oluşur. Karışım agregasının gradasyonu aşınma tabakası için Çizelge 3.1'de ağırlıkça % geçen olarak verilen örnek gradasyon limitlerine uymalıdır.

Çizelge 3.1. Çalışmada Kullanılan Örnek Agregası Gradasyonu (Aşınma Tabakası*)

Elek Boyu	Ağırlıkça Geçen %	
	(min -maks.)	Ortalama
19 mm (3/4")	100	100
12,5 mm (1/2")	83 - 100	91,5
9,5 mm (3/8")	70 - 90	80
4.75 mm (No. 4)	40 - 55	47,5
2.00 mm (No.10)	25 - 38	31,5
0.425 mm (No.40)	10 - 20	15
0.180 mm (No.80)	6 - 15	10,5
0.075 mm (No.200)	4 - 10	7

* Nispeten daha pürüzlü ve tekerlek izlerinin oluşumuna daha dayanıklı bir karışım elde edilmek amacıyla ve Antalya ili civarında yerel iklim ve trafik şartları da dikkate alınarak oluşturulan, Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü'nün kullanılmasını tavsiye ettiği aşınma tabakası gradasyonudur.

3.1.2. Filler malzeme

Mineral filler, genel anlamı ile tamamı 0.600 mm (No. 30) elekten geçip, ağırlıkça en az % 70'i 0.075 mm (No. 200) elekten geçen malzeme olarak tanımlanır (ASTM D242).

Filler, düzgün bir granülometrik bileşime sahip olmalı ve aynı zamanda 0,001mm'den ince boyutlu daneler de içermemelidir. Kimyasal bakımdan atıl olmalı, yani diğer agregası bileşenleri ve bitümlü malzemeler ile reaksiyona girmemelidir.

Plastisite indeksi 4 den fazla olmamalı, kolayca akabilecek kadar kuru olmalı ve özellikle topraklar ihtiva etmemelidir. Kil, toprak, organik madde ihtiva etmemelidir. Ayrıca bitümlü karışımın üretildiği sıcaklıkta bir değişikliğe uğramamalı, bağlayıcıya karşı iyi bir yüzey adezyonu göstermelidir (Yollar Fenni Şartnamesi 1994).

3.1.2.1. Taş tozu

Çalışmada, taş tozu olarak Antalya Hurma mevkiinden temin edilmiş olan kırılmış agreganın No.200 elek altına geçen kısmı kullanılmıştır.

3.1.2.2. Elektrik-ark fırını cürufu

Ferrokrom ve Silikoferrokrom üretimi esnasında indirgenmeyen oksitler ile bir miktar SiO_2 , metal yüzeyinde sıvı bir cüruf tabakası oluşturur ve bu cüruf kalıplara dökülerek atılır. Açık havada soğumaya bırakılan Ferrokrom cürufunun çoğunluğu bir süre sonra toz haline gelmektedir. Silikoferrokrom cürufu ise katı haldedir ve büyük parçalar halindedir. Çalışmada Ferrokrom cürufu kullanılmıştır ve FeCr cürufu şeklinde belirtilmektedir. Ant. ETİ E.A.Ş. günde ortalama 70-80 ton Ferrokrom cürufu ve 26-28 ton silikoferrokrom (SiFeCr) cürufu çıkmaktadır. Cürufların kimyasal analizleri Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Elektrik-Ark Fırını Cürufların Kimyasal Analizleri
(Ant. ETİ E.A.Ş. Gen. Müd.)

Kimyasal Bileşim (%)	Silikoferrokrom fırını	Ferrokrom fırını
Cr_2O_3	0.65	0.52
SiO_2	48.0	31.18
Fe_2O_3	2.0	1.02
Al_2O_3	20.8	8.66
CaO	2.50	45.58
MgO	22.85	12.78
S	0.06	0.08
C	2.77	0.11

3.1.2.3. Baca tozu (Silis dumanı)

Ant. ETİ E.A.Ş.'nin üç farklı elektrik-ark fırından üç çeşit baca tozu toplanmaktadır. Bunlar, ferrosilisyum bacatozu, silikoferrokrom baca tozu ve ferrokrom baca tozu'dur. Bunların kimyasal ve fiziksel özellikleri aşağıdaki Çizelgelerde görülmektedir.

Çizelge 3.3. Baca Tozu Kimyasal Analizleri (Ant. ETİ E.A.Ş. Gen. MÜD.)

Kimyasal Bileşim (%)	Ferrosilisyum fırını	Silikoferrokrom fırını	Ferrokrom fırını
Cr ₂ O ₃	-	1 - 4	30 - 33
SiO ₂	85 - 95	70 - 85	4 - 7
Fe ₂ O ₃	0.5 - 1.0	1 - 2.5	10 - 12
Al ₂ O ₃	1 - 3	2 - 5	8 - 11
CaO	0.8 - 1.2	1 - 2	20 - 30
MgO	1 - 2	4 - 8	13 - 15
S	0.1 - 0.3	1 - 3.5	1 - 4
C	0.5 - 1.0	1 - 1.5	0.3 - 0.6
Kızdırma Kaybı	0.5 - 1.0	0.5 - 1.3	0.2 - 0.6
Yığın Yoğunluk(gr/cm ³)	0.3 - 0.5	0.15 - 0.25	1.3 - 1.5

Çizelge 3.4. Baca Tozu Elek Analizleri (Ant. ETİ E.A.Ş. Gen. MÜD.)

Elek Açıklığı(mm)	Ferrosilisyum Baca Tozu (%)	Silikoferrokrom Baca Tozu (%)	Ferrokrom Baca Tozu (%)
> 0,250	0,3 - 1,0	0,2 - 0,5	0,1 - 1
0,250 - 0,125	0,8 - 2,5	1,5 - 2,5	5 - 8
0,125 - 0,074	0,5 - 2,5	0,5 - 2	15 - 25
0,074 - 0,044	1,0 - 7,5	2,5 - 7,5	35 - 50
0,044 - 0,038	3,0 - 7	3,0 - 7	25 - 35
< 0,038	92 - 80	80 - 92	3 - 6

Yukarıdaki çizelgelerden de görüldüğü gibi ferrosilisyum ve silikoferrokrom baca tozlarının, içerdikleri SiO₂ miktarı nedeniyle, "Silis Dumanı" olarak nitelendirilmesi mümkündür. Özel filtreli toz tutucularla toplanan baca tozlarının (Silis dumanı) miktarı ortalama olarak yılda, 1800 ton FeSi (Ferrosilisyum), 1200 ton SiFeCr(Silikoferrokrom)

baca tozu elde edilmektedir. Ancak 1999 yılından bu yana ferrosilisyum tesisi çalıştırılmamaktadır. Ferrokrom baca tozu ise yüksek oranda metal (Cr, Fe, Al) içerdği için bu çalışmada incelenmemiştir.

Yüksek oranda (%85-90) amorf SiO_2 içeren Silis dumanı gri renkli bir tozdur, ortalama tane çapı itibari ile çimento taneciklerinden 100 kat daha ince bir malzemedir. Özgül yüzeyi $20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ civarındadır. Yığın birim ağırlığı ise $150-250 \text{ kg/m}^3$ civarındadır (Yeğınobalı 1993).

3.1.3. Asfalt çimentosu

Asfalt Çimentosu bitümlü kaplama yapımında doğrudan doğruya kullanılmak üzere kıvam ve kalite bakımından özel şekilde hazırlanmış, penetrasyon derecesi 10-300 arasında değişen bir petrol asfaltıdır. Bu çalışmada 60/70 penetrasyonlu asfalt çimentosu kullanılmıştır, bu malzemenin özellikleri Araştırma Bulguları bölümünde Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

3.2. Metod

Bu bölümde, bitümlü sıcak karışımları oluşturan malzemelerin özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemler, deneyler hakkında bilgi verilecektir.

3.2.1. Agrega deneyleri ve ilgili hesaplar

3.2.1.1. Elek analizi deneyi ve agrega karışım hesabı

Eleme yoluyla ince ve iri agreganın tane boyu dağılımları (gradasyonları) belirlenir. Aşağıdaki çizelgelerde görüldüğü gibi karışım gradasyonu belirlenmiştir.

Çizelge 3.5. Karışıma Girecek Agrega Gruplarının
(Fraksiyonlarının) Elek Analizleri

Elek Boyu	Ağırlıkça Geçen %		
	10-20 (mm)	5-10 (mm)	0-5 (mm)
19 mm	100		
12,5 mm	71,92	100	100
9,5 mm	20,63	99,14	99,93
4,75 mm	0,25	19,37	98,23
2 mm	0,15	2,46	64,13
0,425 mm	0,14	1,66	24,03
0,075 mm	0,13	1,17	8,21

Yukarıdaki üç sınıf agrega:

$$10 - 20 \Rightarrow \%20$$

$$5 - 10 \Rightarrow \%30$$

$$0 - 5 \Rightarrow \%50$$

Oranlarında karıştırıldıklarında elde edilen karışımın gradasyonu aşağıdaki gibidir.

Çizelge 3.6. Kullanılan Agrega Karışımının Sonuç Gradasyonu

Elek Boyu	10-20	5-10	0-5	Sonuç
19 mm	100 x 0,2 +	100 x 0,3 +	100 x 0,5 =	100
12,5 mm	71,92 x 0,2 +	100 x 0,3 +	100 x 0,5 =	94,38
9,5 mm	20,63 x 0,2 +	99,14 x 0,3 +	99,93 x 0,5 =	83,84
4,75 mm	0,25 x 0,2 +	19,37 x 0,3 +	98,23 x 0,5 =	54,97
2 mm	0,15 x 0,2 +	2,46 x 0,3 +	64,13 x 0,5 =	32,83
0,425 mm	0,14 x 0,2 +	1,66 x 0,3 +	24,03 x 0,5 =	12,54
0,075 mm	0,13 x 0,2 +	1,17 x 0,3 +	8,21 x 0,5 =	4,48 *

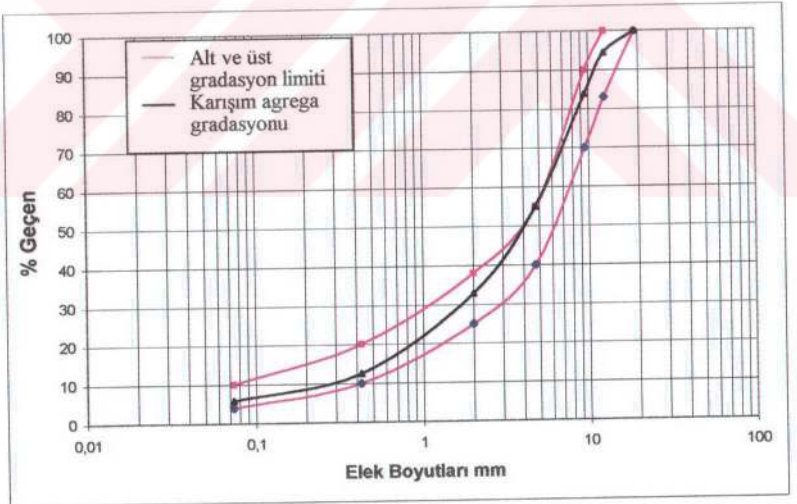
* No200 (0,075 mm) elek altına geçen malzemenin gradasyonunu tam doğru olarak belirlemek için Islak Elek Analizi yapılmıştır. Islak Analiz neticesinde No200 elek altına geçen malzemenin oranı % 1,40 artmıştır. Düzeltilmiş değer %5,88 'dir.

Üç fraksiyonunun karışımı olarak hazırlanan agreganın, sonuç gradasyonu, aşınma tabakası, şartname sınırları ile karşılaştırılmıştır ve Çizelge 3.7.'de de görüldüğü gibi limitler dahilinde kalmıştır.

Çizelge 3.7. Aşınma Tabakası Gradasyon Limitleri ile Karışım Agreganın Karşılaştırılması

Elek Açıklığı mm / in.		Ağırlıkça Geçen %	
		Aşın. Tab. limitleri (min -maks.)	Karışım Agreganın Gradasyonu
19	¾	100	100
12,5	½	83 - 100	94,38
9,5	3/8	70 - 90	83,84
4,75	No.4	40 - 55	54,97
2	No.10	25 - 38	32,83
0,425	No.40	10 - 20	12,54
0,074	No.200	4 - 10	5,88

Çizelge 3.7'deki değerlere göre çizilen elek analizi grafiği Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Elek Analizi Grafiği

3.2.1.2. Los Angeles aşınma deneyi (ASTM C131)

Aşınma deneyi iki farklı agrega sınıfı için ayrı ayrı yapılmış ve iki deneyin ortalaması agreganın aşınma değeri olarak alınmıştır.

Çizelge 3.8. Los Angeles Aşınma Deneyi

Deney No	1 (B)	2 (C)	Ortalama
Toplam Numune ağırl. (gr)	4920	5000	
No12 (1,7 mm) Elek Altında Kalan (gr)	972	1026,8	
Aşınma %'si	19,76	20,54	20,15

B sınıfı agrega: 19 mm – 9,5 mm arası , C sınıfı agrega: 9,5 mm – 4,75 mm arası

3.2.1.3. Agrega özgül ağırlık ve su absorpsiyonu tayini (ASTM C127-C128)

ASTM C127 deney yöntemi kullanılarak, No.4 (4,75 mm) elek üzerinde kalan iri agreganın su absorpsiyonu ve özgül ağırlığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.9. İri Agrega Özgül Ağırlık Tayini

	Numune No	1 (gr)	2 (gr)	Ortalama
A	Kuru malzemenin havadaki ağırlığı	1391	1236	
B	Doygun yüzey kuru malzemenin havadaki ağırlığı	1394,7	1242	
C	Doygun yüzey kuru malzemenin sudaki ağırlığı	878,7	781	
A/(A-C)	Zahiri özgül ağırlığı (Gka)	2,715	2,716	2,716
A/(B-C)	Hacim özgül ağırlığı (Gkb)	2,696	2,681	2,688
100*(B-A)/A	Absorpsiyon yüzdesi	0,27	0,49	0,38

ASTM C127 deney metodu kullanılarak, No.4 (4,75 mm) ile No.200 (0,074mm) elek arasında kalan ince agreganın su absorpsiyonu ve özgül ağırlığı, aşağıdaki bağıntılar kullanılarak, belirlenmiştir.

$$\text{Zahiri özgül ağırlık, } G_{ia} = \frac{E}{B + E - D}$$

$$\text{Hacim özgül ağırlık, } G_{ib} = \frac{C - A}{B + C - A - D}$$

$$\text{Absorpsiyon \% 'si} = \frac{C - A - E}{E} \cdot 100$$

Çizelge 3.10. İnce Agrega Özgül Ağırlık Tayini

	Numune No	1 (gr)	2 (gr)	Ortalama
A	Piknometre ağırlığı	138,75	139,15	
B	Piknometre + su ağırlığı	636,1	653,3	
C	Piknometre + doymun yüzey kuru numune ağırlığı	639,75	640,15	
D	Piknometre + numune + su ağırlığı	949,4	967	
E	Kuru numune ağırlığı	496,1	496,3	
G_{ia}	Zahiri özgül ağırlığı	2,714	2,718	2,716
G_{ib}	Hacim özgül ağırlığı	2,643	2,650	2,646
	Absorpsiyon yüzdesi	0,99	0,95	0,97

3.2.1.4. Filler malzemeler için yapılan deneyler

Mineral filler zahiri özgül ağırlığının tayini (ASTM C854 –BS 812) deney yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.11. Taş Tozu'nun Zahiri Özgül Ağırlığının Tayini

Taş Tozu	Numune No	1 (gr)
A	Piknometre ağırlığı	156
B	Piknometre + su ağırlığı	653,55
C	Piknometre + kuru numune ağırlığı	274,5
D	Piknometre + kuru numune + su ağırlığı	728
G_{fa}	Zahiri özgül ağırlığı = $\frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$	2,690

Çizelge 3.12. Elektrik-Ark Fırını Cürufu'nun Zahiri Özgül Ağırlığının Tayini

	Numune No	1 (gr)
A	Piknometre ağırlığı	138,7
B	Piknometre + su ağırlığı	635,1
C	Piknometre + kuru numune ağırlığı	444,5
D	Piknometre + kuru numune + su ağırlığı	844
G_{fa}	Zahiri özgül ağırlığı = $\frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$	3,156

Çizelge 3.13. Silis Dumanı'nın Zahiri Özgöl Ağırlığının Tayini

	Numune No	1 (gr)
A	Piknometre ağırlığı	65,7
B	Piknometre + su ağırlığı	134,8
C	Piknometre + kuru numune ağırl.	72,1
D	Piknometre + kuru numune + su ağırl.	138,1
G _{fa}	Zahiri özgöl ağırl. = $\frac{C-A}{(B-A)-(D-C)}$	2,065

Çalışmada kullanılan filler malzemelerin fiziksel özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için SEM (elektron mikroskopik görüntü analizi) cihazından görüntüleri elde edilmiştir. Araştırma Bulguları başlıklı 4. Bölümde Şekil 4.1. – 4.6. 'da bu görüntüler mevcuttur.

3.2.1.5. Farklı fillerler ile oluşturulan agregalar karışımının özgöl ağırlığının belirlenmesi

Agrega karışımı, herbiri değişik özgöl ağırlıklara sahip iri, ince agregalar ve mineral fillerden oluştuğundan, toplam agreganın hacim veya zahiri özgöl ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%I}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}} \quad \text{veya} \quad G_{sa} = \frac{100}{\frac{\%K}{G_{ka}} + \frac{\%I}{G_{ia}} + \frac{\%F}{G_{fa}}}$$

$$P_{ba} = 100 \cdot \frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{ef} \cdot G_{sb}} \cdot G_b$$

G_{sb} : Agregalar karışımının hacim özgöl ağırlığı

G_{sa} : Agregalar karışımının zahiri özgöl ağırlığı

P_{ba} : Agregalar bitüm absorpsiyonu

G_{ka}, G_{ib} : Agregaların hacim özgöl ağırlıkları

G_{ka}, G_{ia}, G_{fa} : Agregaların zahiri özgöl ağırlıkları

%K, %I, %F : Agregaların ağırlıkça yüzdesi

G_b : Bitümün özgöl ağırlığı

İri agregaya yüzdesi (%K) = $100 - 47,5 = 52,5$

İnce agregaya yüzdesi (%İ) = $47,5 - 7 = 40,5$

Filler Yüzdesi (%F) = 7

No.4 elek iri agregaya ve ince agregaya ayırımı için baz elektir. No.4 den geçen agregaya yüzdesi yani 47,5 değeri Çizelge 3.1'den alınarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.14. Taş Tozu Fillerli Agregaya Karışımının Özgöl Ağırlık ve Absorpsiyon Değerleri

$G_{sa} (G_{az})$	Agregaya karış.'nın zahiri öz. ağır.	2,714	$= \frac{100}{\frac{525}{2725} + \frac{405}{2716} + \frac{7}{269}}$
G_{sb}	Agregaya karış.'nın hacim öz. ağır.	2,670	$= \frac{100}{\frac{525}{2698} + \frac{405}{2646} + \frac{7}{269}}$
P_{ba}	Agregaya bitüm absorpsiyonu. %	0,613	$100 \cdot \frac{2,714 - 2,67}{2,714 \cdot 2,67} \cdot 1,023$

Çizelge 3.15. FeCr Cürufu Fillerli Agregaya Karışımının Özgöl Ağırlık ve Absorpsiyon Değerleri

$G_{sa} (G_{az})$	Agregaya karış.'nın zahiri öz. ağır.	2,742	$= \frac{100}{\frac{525}{2725} + \frac{405}{2716} + \frac{7}{3156}}$
G_{sb}	Agregaya karış.'nın hacim öz. ağır.	2,698	$= \frac{100}{\frac{525}{2698} + \frac{405}{2646} + \frac{7}{3156}}$
P_{ba}	Agregaya bitüm absorpsiyonu. %	0,562	$100 \cdot \frac{2,738 - 2,698}{2,738 \cdot 2,698} \cdot 1,023$

Çizelge 3.16. Silis Dumanı Fillerli Agregaya Karışımının Özgöl Ağırlık ve Absorpsiyon Değerleri

$G_{sa} (G_{az})$	Agregaya karış.'nın zahiri öz. ağır.	2,657	$= \frac{100}{\frac{525}{2725} + \frac{405}{2716} + \frac{7}{2065}}$
G_{sb}	Agregaya karış.'nın hacim öz. ağır.	2,615	$= \frac{100}{\frac{525}{2698} + \frac{405}{2646} + \frac{7}{2065}}$
P_{ba}	Agregaya bitüm absorpsiyonu %	0,353	$100 \cdot \frac{2,639 - 2,615}{2,639 \cdot 2,615} \cdot 1,023$

3.2.2. Asfalt çimentosuna uygulanan deneyler

Bitümlü bağlayıcılara uygulanan deneyler, bağlayıcının teknik şartnamelerde istenilen özelliklere uygun olup olmadığının belirlenmesi için yapılır. Aşağıda çalışmada kullanılan deneyler anlatılmıştır. Şu anda Türkiye’ de kullanılan ve Yollar Fenni Şartnamesinde verilen bitüm şartnamesi Çizelge 3.18.’de görülmektedir.

3.2.2.1. Penetrasyon deneyi (ASTM D 5-86 , TS 118)

Bitümlü bağlayıcıların kıvamlılığı “penetrasyon deneyi” ile tayin edilir. Penetrasyon; standart bir iğnenin belirli yük altında, belirli bir süre içinde, belirli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultuda batma uzunluğudur. Penetrasyon birimi 0.01 cm’dir. Penetrasyon cihazının göstergesindeki her aralık 0.1 mm’ye eşittir. Penetrasyon değeri 500’e kadar olan bitümlü bağlayıcılarda numuneye 25 °C sıcaklıkta, 5 sn süreyle, 100 gr’lık bir yük uygulanmaktadır.

Deneyin Yapılışı: Deneye tabi tutulacak bitümlü bağlayıcı numunesi, yumuşama noktası sıcaklığını geçmeyecek kadar ısıtılıp(maks. 90 °C) kap içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde iyice karıştırılır sonra numune kabına aktarılır. Numune derinliği iğnenin tahmin edilen batma miktarından en az 10 mm daha fazla olacak şekilde numune kabına doldurulur. Numuneler 5-30 °C ortam sıcaklığı olan bir yerde soğumaya bırakılır. Daha sonra numune kapları aktarma kabının içine konularak sabit sıcaklıktaki su banyosuna yerleştirilir ve 1 - 1.5 saat bekletilir.

İçinde numune kabı bulunan aktarma kabı penetrasyon cihazının tablası üzerine yerleştirilir. İstenilen ağırlık ile yüklenmiş iğne numune yüzeyine temas edecek şekilde ayarlanır. Bir ışıkla numune yüzeyi aydınlatılır. İğnenin ucu ve numunenin yansıma yüzeyi üzerinde uç uca temas edecek fakat numuneye batmayacak şekilde malzeme deneye hazır hale getirilir. Daha sonra, ağırlık ile yüklü olan iğne 5 sn. süre ile numunenin üzerinde serbest bırakılır ve bitümlü bağlayıcının içine batması sağlanır.

Numune üzerinde, kabın kenarına ve birbirine 1 cm'den daha yakın olmayan noktalardan, en az 3 deneme yapılmalıdır. Bu denemeler 2 dakika içinde yapılmalıdır. Yukarıdaki yöntemle bulunan ölçümlerin aritmetik ortalaması en yakın tam sayıya yuvarlatılır. Penetrasyon değeri belirlenmiş olur.

3.2.2.2. Düktilite deneyi (ASTM D 113-86 , TS 119)

Düktilite deneyi, bitümlü bağlayıcıların uzama kabiliyetini göstermektedir. Bitümlü bir maddenin düktilitesi ; standart bir kalıpta hazırlanmış bir bitüm numunesinin her iki ucundan çekilerek uzatılması sonucunda koptuğu andaki mesafenin cm cinsinden ifadesidir. Deney 25 ± 0.5 °C sıcaklıkta 5 ± 0.25 cm/dk'lık çekme hızı ile gerçekleşir.

Deneyin Yapılışı: Deney yapılacak bitüm numunesi mümkün olan en düşük sıcaklıkta ısıtılarak akıcı hale getirilir. Daha sonra No. 50 elekten (297 mikron) süzülür. Yalnız, numunenin kalıba dökülmesinden önce kalıp düz bir pirinç levha üzerine oturtulur ve numunenin levhaya yapışmaması için tedbirler alınır (vazelinle yağlanır). Bitüm numunesi kalıbın üst seviyesini geçinceye kadar doldurulur. Kalıp içerisindeki numune 30-40 dk oda sıcaklığında bekletilir. Soğuduktan sonra da 25 °C 'lik su banyosunda 30 dk bekletilir. Su banyosundan çıkartılan numunenin kalıp üzerindeki, taşan kısımları, ısıtılmış spatula ile kesilir ve bitüm numunesi ile kalıbın üst kısmı aynı seviyeye getirilir. Numune tekrar 25 °C su banyosunda 1.5 saat bekletilir. Numune su banyosundan çıkartılıp, kalıbın altındaki pirinç taban ile yanlarındaki kalıplar sökülür ve bekletilmeden düktilite cihazına yerleştirilir. Numune kalıbındaki delikler cihazın pimlerine takılır. Numune 5 cm/dk'lık bir hızla kopuncaya kadar çekilir. Bitüm numunesi koptuğu anda cihazın kenarındaki cetvelden kopma mesafesi tespit edilir. Çekme sırasında su haznesi içerisindeki numunenin altında ve üstünde en az 2.5 cm'lik bir su tabakası bulunmalıdır.

Yukarıda anlatıldığı şekilde yapılan 3 deney sonucunun ortalaması alınarak numunenin düktilitesi bulunur. Deney sırasında bitüm numunesinin suyun üst yüzeyine veya tabanına temas etmemesi lazımdır. Buna engel olmak için suya metil alkol veya sodyum klorür ilave edilebilir.

3.2.2.3. Yumuşama noktası deneyi (Halka ve bilye metodu) , (TS 120)

Bitümlü bağlayıcıların sıcaklık karşısındaki davranışları farklılıklar göstermektedir. Bütün bitümlü maddelerin yumuşaması belli bir sıcaklıkta gerçekleşmez. 25 °C sıcaklıkta aynı penetrasyona sahip iki bitümlü bağlayıcı numunesi farklı sıcaklıkta farklı özellikler gösterebilirler. Bu davranışları ölçmek için halka ve bilye metodu kullanılmaktadır.

Deneyin Yapılışı: Cam kaba 8.25 cm(3,25 inç)'lik yüksekliğe ulaşacak şekilde 5 °C'lık saf su konulur. İçinde numune bulunan halka suyun içine sarkıtılır. Halkanın alt yüzü cam kabın dibinden 2.54 cm (1 inç) yukarda, üst yüzey ise su seviyesinden 5.08 cm (2 inç) aşağıda bulunacak şekilde ayarlanır. Daha sonra bilya su dolu beher içine konulur. Termometre suya batırılır. Termometrenin civa haznesinin altı, halkanın alt yüzeyi ile aynı olacak seviyede ve halkadan yaklaşık 0,5 cm mesafede yerleştirilir. Ardından bilya bir alet yardımı ile beher tabanından alınarak halka üzerine numunenin ortasına yerleştirilir. Su sıcaklığı dakikada 5 °C artacak şekilde beher ısıtmaya başlanır. Deneyin ilk üç dakikadan sonraki bir dakika aralıkta, müsaade edilen sıcaklık yükselme hızından sapma en fazla 0,5 °C olmalıdır. Halka içindeki bitümlü maddenin cam kabın dibine temas ettiği anda termometrede okunan sıcaklık yumuşama noktası değeridir.

Yumuşama noktası tayini en az iki numune ile yapılır ve iki değerin ortalaması alınır.

3.2.2.4. Parlama ve yanma noktası deneyi (TS 123)

Bu deney parlama noktası 79 °C'nin üstünde olan petrol ürünlerine uygulanır. Parlama noktası, ısıtılan deney numunesinin buharına deney alevinin temas ettirilmesi sonucunda numunenin parladığı fakat yanmaya devam etmediği en düşük sıcaklıktır. Petrol ürünlerinin parlama noktalarının bilinmesi özellikle uygulamalar sırasında doğabilecek tehlikelerin önlenmesi açısından çok önemlidir.

Deneyin Yapılışı: Deney yapılacak bitümlü malzeme çalışma sıcaklığına kadar (140-160 °C) ısıtıldıktan sonra deney kabına yüzeyinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde seviye çizgisine kadar (seviye çizgisi bulunmuyorsa üstten 1 cm aşağıda olacak şekilde) doldurulur. Numune sıcaklığı başlangıçta dakikada 14-17 °C artacak şekilde ayarlanmış numunenin beklenin beklenen parlama noktasına 28 °C yaklaştığı anda sıcaklık dakikada 5-6 °C artacak şekilde ısıtma hızı ayarlanır. Beklenen parlama noktasına en az 28 °C önceden başlanarak sıcaklığın her 3 °C yükselmesinde numune üzerinden deney alevi geçirilir. Deney alevinin çapı 4 mm olmalıdır. Deney alevi kabın üzerinden yaklaşık 1 sn içinde geçmelidir. Numune yüzeyindeki herhangi bir noktada tutuşma görüldüğünde termometreden okunan sıcaklık “parlama noktası” olarak kaydedilir.

Deney sırasında alevinin etrafında zaman zaman oluşabilen mavimsi alevi gerçek parlama ile karıştırmamak lazımdır.

Numunenin yanma noktasını tayin etmek için ısıtmaya aynı hızla devam edilir. Tatbik edilen alev sonucu numune yüzeyinde 5 sn’den fazla bir yanama meydana geldiği anda termometreden okunan sıcaklık “yanma noktası” olarak kaydedilir.

3.2.2.5. Özgül ağırlık deneyi (ASTM D70 , TS 1087)

Bitümlü maddelerin özgül ağırlığı, 25 °C’de hacmi bilinen bir bitüm numunesinin aynı sıcaklık ve hacimdeki suyun ağırlığına bölünmesinden elde edilen orandır. Yüksek viskoziteye sahip sıvı ve yarı-katı bağlayıcılar ve asfalt emülsiyonlarının özgül ağırlık tayininde piknometre yöntemi kullanılır.

Deneyin Yapılışı: Piknometre temizlenip kurutulduktan sonra hassas terazide tartılarak (A) ağırlığı tayin edilir. Piknometreye saf su konulup kapağı kapatıldıktan sonra 25 °C’lik su banyosunda en az 40 dakika bekletilir. Taşan sular temiz bir bezle silinip tartılır ve (B) ağırlığı ölçülür.

Özgöl ağırlığı tayin edilecek bitüm numunesinden piknometrenin yarısını dolduracak miktarda alınır. Isıtılarak akıcı hale getirilen numune kabın üst kısımlarına bulaştırmadan ve hava kabarcığı oluşmamasına dikkat edilerek piknometreye dökülür. Bu işlemten önce piknometre etüvde hafifçe ısıtılmalıdır. Yarısına kadar bitüm numunesi doldurulan piknometre oda sıcaklığına kadar soğutulur. Kapağı ile birlikte tartılır, ağırlığı (C) olarak kaydedilir. Tartılan numuneye su ilave edilerek kapağı kapatılır ve 25 °C'lik su banyosunda 40 dakika bekletilip bir bezle kurulandıktan sonra yeni ağırlık değeri (D) alınır.

$$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)} \quad \text{bağıntısı ile hesaplanır.}$$

ASTM D70 deney yöntemi uygulanarak asfalt çimentosunun özgöl ağırlığı aşağıdaki Çizelge 3.17'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.17. Asfalt Çimentosu'nun Özgöl Ağırlığının Tayini

	Numune No	1 (gr)
A	Piknometre ağırlığı	58,5
B	Piknometre + su ağırlığı	175,7
C	Piknometre + kuru numune ağırl.	90,2
D	Piknometre + kuru numune + su ağırl.	176,4
Gb	$\text{Özgöl ağırlık} = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$	1,023

Asfalt çimentosuna uygulanan deneylerinin sonuçları, 4. Bölümde, toplu halde Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 3.18. Yol Üst Yapılarında kullanılan Asfalt Çimentolarının Özellikleri (TS - 1081)

Sınıflar	Ts No:	10 — 20		20 — 30		30 — 40		40 — 50		60 — 70		75 — 100		120 — 150		150 — 200		200 — 300	
		Min.	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks	Min.	Maks
Penetrasyon, 25°C, 100 g, 5 sn	TS 118	10	20	20	30	30	40	40	50	60	70	75	100	120	150	150	200	200	300
Yumuşama noktası (halka ve bilya metodu), °C	TS 120	63	73	57	67	52	62	49	59	45	55	44	49	40	46	37	44	27	37
Duktilite, 25 °C 5 cm/dak, cm olarak	TS 119	5	—	15	—	40	—	100	—	100	—	100	—	100	—	100	—	100	—
Trikloretilende çözünürlük, %	TS 1090	99,0	—	99,0	—	99,0	—	99,0	—	99,0	—	99,0	—	99,0	—	99,0	—	99,0	—
İnce film halinde ısıtma, (*) 163 °C, 5 saat + Ağırlık kaybı, %	TS 1086	—	0,5	—	0,5	—	0,5	—	0,8	—	0,8	—	1,0	—	1,0	—	1,0	—	1,0
Isıtma kaybindan sonraki penetrasyon (orijinal penetrasyonun % si olarak)		60	—	60	—	60	—	58	—	54	—	50	—	46	—	43	—	40	—
Isıtma kaybindan sonraki duktilite, 25 °C, 5 cm/dak. cm olarak		—	—	—	—	—	—	—	—	50	—	75	—	100	—	100	—	100	—
Parlama noktası (Cleveland açık kap), °C	TS 123	275	—	250	—	250	—	230	—	230	—	230	—	220	—	200	—	175	—
Leke deneyi (**)	TS 1089	Bütün sınıflar için negatif																	
Standart nafta ile		Bütün sınıflar için negatif																	
Nafta - ksilen ile		Bütün sınıflar için negatif																	
Heptan - ksilen ile		Bütün sınıflar için negatif																	

(*) İnce film halinde ısıtma deneyinin kullanılması istege bağlıdır.

(**) Leke deneyinin kullanılması istege bağlıdır. Şart koşullarında, çözücü olarak ağır solvent nafta, nafta - ksilen veya heptan - ksilen çözümlerinden hangisinin kullanılacağı; kışenli çözümlerin kullanılması takdirinde ise ksilen yüzdesinin ne olacağı belirtilmelidir.

3.2.3. Bitümlü karışımlara uygulanan deneyler

Bu aşamada, bünyeye sıkıştırma enerjisi uygulanmamış bitümlü karışımlar ile şartnamesine uygun kompaksiyon yöntemleri ile sıkıştırma enerjisi uygulanmış olan bitümlü karışımların özgül ağırlıkları belirlenecektir.

Farklı filler malzemeleri kullanılarak, oluşturulan sıkıştırılmamış bitümlü karışımların maksimum teorik özgül ağırlıkları, aşağıdaki bağıntılar ve çizelgeler yardımıyla hesaplanmıştır. (ASTM D 2041)

$$\text{Maksimum Teorik Özgül Ağırlık, } D_t = \frac{C - A}{(C - A) - (D - B)}$$

$$\text{Agrega Efektif Özgül Ağırlığı, } G_{ef} = \frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_t} - \frac{W_a}{G_b}}$$

W_a = Kuru agreganın yüzdesi olarak bitüm miktarı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı

Çizelge 3.19. Taş Tozu ile Oluşturulan Sıkıştırılmamış Bitümlü Karışımın Maks. Teorik Özgül Ağırlığının Tayini

	Numune No	1 (gr)	2 (gr)	Ortalama
A	Piknometre ağırlığı	796,1	794,5	
B	Piknometre + su ağırlığı	1951,4	1950,4	
C	Piknometre + sıkışmamış bitümlü malz. ağırl.	1733,35	1804,85	
D	Piknometre + su + sıkışmamış bitümlü malzeme ağırlığı	2519,1	2561,45	
D _t	Maks. teorik özgül ağırl. = $\frac{C - A}{(C - A) - (D - B)}$	2,536	2,530	2,533
W _a	% Bitüm miktarı	4,5	4,5	4,5
G _b	Bitümün özgül ağırlığı	1,023	1,023	1,023
G _{ef}	Efektif özgül ağırl. = $\frac{100}{\frac{100 + W_a}{D_t} - \frac{W_a}{G_b}}$	2,717	2,710	2,714

Çizelge 3.20. FeCr Cürufu ile Oluşturulan Sıkıştırılmamış Bitümlü Karışımın Maks. Teorik Özgül Ağırlığının Tayini

	Numune No	1 (gr)	2 (gr)	Ortalama
A	Piknometre ağırlığı	796,1	794,35	
B	Piknometre + su ağırlığı	1955,6	1951,8	
C	Piknometre + sıkışmamış bitümlü malz. ağırl.	1803,85	1822,25	
D	Piknometre + su + sıkışmamış bitümlü malzeme ağırlığı	2567,8	2578,2	
Dt	Maks teorik özgül ağırl. = $\frac{C - A}{(C - A) - (D - B)}$	2,548	2,560	2,554
Wa	% Bitümün miktarı	4,5	4,5	4,5
Gb	Bitüm özgül ağırlığı	1,023	1,023	1,023
Gef	Efektif özgül ağırl. = $\frac{100}{\frac{100}{Dt} + \frac{Wa}{Gb}} - \frac{Wa}{Gb}$	2,731	2,746	2,738

Çizelge 3.21. Baca tozu (Silis dumanı) ile Oluşturulan Sıkıştırılmamış Bitümlü Karışımın Maks. Teorik Özgül Ağırlığının Tayini

	Numune No	1 (gr)	2 (gr)	Ortalama
A	Piknometre ağırlığı	796	794,5	
B	Piknometre + su ağırlığı	1955,8	1952,7	
C	Piknometre + sıkışmamış bitümlü malz. ağırl.	1800,7	1784,7	
D	Piknometre + su + sıkışmamış bitümlü malzeme ağırlığı	2554	2542	
Dt	Maks teorik özgül ağırl. = $\frac{C - A}{(C - A) - (D - B)}$	2,472	2,470	2,471
Wa	% Bitümün miktarı	4,5	4,5	4,5
Gb	Bitüm özgül ağırlığı	1,023	1,023	1,023
Gef	Efektif özgül ağırl. = $\frac{100}{\frac{100}{Dt} + \frac{Wa}{Gb}} - \frac{Wa}{Gb}$	2,640	2,638	2,639

Yukarıda verilen çizelgelerden en düşük teorik özgül ağırlığın (2,471) ve en düşük efektif özgül ağırlığın (2,639), baca tozları ile oluşturulan karışımda ortaya çıktığı görülmektedir. Taş tozu ve FeCr cürufu ile hazırlanan karışımların deney sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

Sıkıştırılmış bitümlü karışımların hacim özgül ağırlığının ve yoğunluğunun tayini, ASTM D 2726, yöntemi ile bulunur.

3.2.4. Bitümlü sıcak karışımların Marshall yöntemi ile tasarımı

Bu çalışmada, bitümlü sıcak karışımlar için en yaygın olarak kullanılan ve Türkiye’de Karayolları Genel Müdürlüğünce de kabul edilen Marshall sıcak karışım tasarım metodu kullanılmıştır.

Sıkıştırılmış Kaplama Karışımı Analizi Yönteminin Ana Hatları;

- 1 - Kaba agreganın (AASHTO T 85 veya ASTM C 127) ve ince agreganın (AASHTO T 84 veya ASTM C 128) hacim özgül ağırlıkları bulunur.
- 2 - Asfalt çimentosunun (AASHTO T 228 veya ASTM D 70) ve mineral fillerin (AASHTO T 100 veya ASTM C 854) özgül ağırlığı tayin edilir.
- 3 - Kaplama karışımı içindeki agrega karışımının hacim özgül ağırlığı hesaplanır.
- 4 - Gevşek kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı bulunur. (ASTM D 2041)
- 5 - Sıkıştırılmış kaplama karışımının hacim özgül ağırlığı tayin edilir. (ASTM D1188 veya ASTM D 2326)
- 6 - Agreganın efektif özgül ağırlığı hesap edilir.
- 7 - Agreganın bitüm absorpsiyonu bulunur.
- 8 - Kaplama karışımın efektif bitüm miktarı hesaplanır.
- 9 - Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki agregalar arası boşluk %’si bulunur.
- 10 - Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki hava boşluğu yüzdesi hesaplanır.
- 11 - Sıkıştırılmış kaplama karışımının asfaltla dolu boşluk %’si, bulunur.

Bu işlem basamakları uygulandıktan sonra sıkıştırılmış numune üzerinde stabilite ve akma deneyleri yapılmaktadır.

3.2.4.1. Çalışmada kullanılan bağıntılar

Farklı bitüm yüzdeslerinde karışımın maksimum özgül ağırlığı:

Her bir bitüm yüzdesindeki hava boşluğu hesaplanırken, farklı bitüm yüzdesindeki maksimum özgül ağırlığa ihtiyaç duyulur. ASTM D 2041’e göre deney yapılırken en sağlıklı sonucu alabilmek için, karışım numunesi optimuma yakın bitüm yüzdesinde

hazırlanmalı ve maks. özgül ağırlık (D_T) için iki veya üç deney yapılmasına çalışılmalıdır.

Bitüm miktarının değişmesi, bitüm absorpsiyonunu önemli ölçüde değiştirmeden, her bitüm yüzdesi için D_T , aşağıdaki bağıntı ile ayrı ayrı hesaplanabilir.

$$D_T = \frac{100 + \frac{W_a}{G_{ef}}}{\frac{100}{G_b} + \frac{W_a}{G_b}}$$

Bu bağıntıda: D_T = Kaplama karışımının boşluksuz maksimum özgül ağırlığı

W_a = Agreg ağırlığının yüzdesi olarak bitüm

G_{ef} = Agreganın efektif özgül ağırlığı

G_b = Bitümün özgül ağırlığı'dır.

Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki VMA yüzdesi:

VMA, agregalar arası boşluk yüzdesi, efektif bitüm miktarını ve hava boşluğunu içeren, sıkıştırılmış kaplama karışımının agreg daneleri arasındaki boşluk olarak tanımlanır ve toplam hacmin yüzdesi olarak hesaplanır.

VMA, agreganın hacim özgül ağırlığı esas alınarak hesaplanır ve sıkıştırılmış kaplama karışım hacminin yüzdesi olarak ifade edilir. Böylece VMA, sıkıştırılmış kaplama karışımının hacminden agreganın hacim özgül ağırlığı ile hesaplanan hacminin çıkarılmasıyla hesaplanabilir.

Eğer karışım kompozisyonu agreg ağırlığının % si olarak bulunmuşsa,

$$VMA = 100 - \frac{D_p}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + W_a} \cdot 100 \quad \text{bağıntısı ile hesaplanır.}$$

Bağıntıda:

D_p = Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (ASTM D 1188 veya D 2726)

G_{sb} = Agreganın hacim özgül ağırlığı

W_a = Agreganın ağırlıkça yüzdesi olarak bitüm

VMA = Agregalar arası boşluk yüzdesi'dir.

Sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu ve asfaltla dolu boşluk yüzdesinin hesaplanması:

Sıkıştırılmış kaplama karışımı içindeki hava boşluğu V_h , kaplanmış agregada daneleri arasındaki küçük hava boşluklarından ibarettir.

$$V_h = \frac{D_T - D_p}{D_T} \times 100 \quad V_f = \frac{VMA - V_h}{VMA} \times 100$$

Bu bağıntılarda:

V_h = Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu

D_T = Kaplama karışımının maksimum özgül ağırlığı

D_p = Sıkıştırılmış karışımın (briketin) maksimum özgül ağırlığı

V_f = Toplam hacmin yüzdesi olarak asfaltla dolu boşluk'dur.

3.2.4.2. Marshall stabilite deney numunelerinin hazırlanması

Gerçek ortamda, üstyapı kaplama malzemelerinin üzerine sıkıştırma enerjisi uygulandıktan sonra kullanıma açılması sebebiyle, davranış modelini ortaya koyabilmek için, benzerlik ilkesi çerçevesinde bitümlü sıcak karışım numunelerinin de sıkıştırma işlemine tabi tutulması gereklidir. izleyen paragraflar bu süreci açıklamaktadır.

Öncelikle, $63,5 \pm 1,27$ mm ($2,5 \pm 0,05$ in.) yükseklikteki standart deney numunelerini üretebilmek için gerekli agrega miktarı tespit edilir. Bu çalışmada her deney numunesi için 1150 gr agregada kullanılmıştır.

Her bir agregada ve deney numunesi kombinasyonu için en az 3 numune hazırlanır. Asfalt çimentosunun 170 ± 20 cSt viskozite oluşacak şekilde ısıtılacağı sıcaklık, karıştırma sıcaklığıdır. Sıkıştırma sıcaklığı ise asfalt çimentosunda 280 ± 30 cSt viskozite değerinin oluşacağı sıcaklıktır (ASTM D 1559).

Etüvde ısıtılmış agrega, karıştırma kabında iyice karıştırıldıktan sonra tam ortasında oluşturulan çukurluğun içine belirli miktardaki ısıtılmış bitüm dökülür. Biraz elle karıştırdıktan sonra karıştırma kabı mekanik karıştırıcıya yerleştirilir, (Şekil 3.2.) ve tüm agrega tamamen bitümle sarılıncaya kadar karıştırılır. Numunelerin sıkıştırılacağı, 101,6 mm çapındaki ve 76,2 mm yükseklikteki, kalıp ve tokmak 93,3-148,9 °C arasında ısıtılır. Kalıbın dibine kesilmiş filtre kağıdı veya normal kağıt konulur, kalıbın iç çeperi yağlanır.



Şekil 3.2. Agrega ve Bitümü Karıştıran Mekanik Karıştırıcı

Tüm karışım kalıba dökülür ve ısıtılmış spatula yardımıyla 15 kez kenarı, 10 kez de iç bölgesi karıştırılır. Daha sonra kalıp otomatik sıkıştırma tokmağına yerleştirilir ve 457,2 mm (18 in.)'den düşen, 4536 gr (10 lb) ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. (Şekil.3.3.) Bu çalışmada numunelerin her iki yüzüne ağır trafik durumu dikkate alınarak 75 darbe vurulmuştur. Daha sonra numune çıkarıcısı yardımıyla kalıbın içinden numune çıkarılır. Numune oda sıcaklığında bir gece bırakıldıktan sonra stabilite deneyine tabi tutulmak üzere boyu ölçülür, havadaki, sudaki ve doygun yüzey kuru haldeki ağırlığı tartılır.



Şekil 3.3. Otomatik Numune Sıkıştırıcı (Kompaktör)

3.2.4.3. Marshall Stabilite Deneyi

Bu deney, Marshall stabilite deney aleti (Şekil 3.5.) yardımıyla bitümlü kaplama karışımlarından hazırlanan silindirik briketlerin yanıl yüzeylerine yükleme yaparak plastik akmaya karşı direncin ölçümünü kapsar. Deney ASTM D 1559-89 standardında tanımlanmıştır.



Şekil 3.4. Marshall Deneyine Hazır Numuneler

En az bir gece oda sıcaklığında bekletilen deney numuneleri, istenilen deney sıcaklığına getirilmek için 30-40 dakika, 60 ± 1 °C'de su banyosunda bekletilir. (Şekil.3.6.) Su banyosundan alınan numune, çelik bir halkanın iki segmanı arasına yerleştirilir. Maksimum yüke ulaşıncaya kadar, dakikada 50,8 mm (2 in.)'lik bir hızla yükleme yapılır. Maksimum yük ve akma değeri deney aletinin dijital göstergesinden okunur. Deney numunesinin su banyosundan çıkarılıp, maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 sn.'den fazla olmamalıdır. Numune yüksekliği 63,5 mm (2,5 in.)'den farklı ise Çizelge Ek3 kullanılarak, maksimum yük Marshall düzeltme katsayısı ile çarpılarak düzeltme faktörü uygulanır.



Şekil 3.5. Marshall Stabilité Deney Cihazı

Asfalt betonu karışımların tasarımında Çizelge 3.22.'de verilen tasarım kriterleri esas alınır.

Çizelge 3.22. Asfalt Betonu Karışımların Tasarım Kriterleri (Yollar Fenni Şartnamesi 1994)

ÖZELLİKLER	HAFİF VE ORTA TRAFİKLİ YOLLAR				AĞIR TRAFİKLİ YOLLAR, OTOYOLLAR, TIRMANMA ŞERİTLERİ			
	Binder		Aşınma		Binder		Aşınma	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Briket Yapımında Uygulanacak Darbe Sayısı	50	—	50	—	75	—	75	—
Marshall Stabilitesi, Kg.	600	—	750	—	750	—	900	—
Boşluk, %	4	6	3	5	4	6	3	5
Asfaltla Dolu Boşluk, %	65	75	75	85	65	75	75	85
Akma, mm (10^{-2} İn.)	2.5 (10)	4.6 (18)	2.5 (10)	4.6 (18)	2 (8)	4 (16)	2 (8)	4 (16)
Filler/Bitüm Oranı	—	—	—	—	—	1.4	—	1.5
Asfalt Çimentosu (Ağırlıkça, %)	3.5	6.5	4.0	7.0	3.5	6.5	4.0	7.0



Şekil 3.6. Numuneleri 60 °C Sıcaklığa Getirmek İçin Kullanılan Su Banyosu

3.2.4.4. Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi ve grafiklerin çizimi

Her numune için yoğunluk, boşluk, stabilite ve diğer analizler yapıldıktan sonra çeşitli bitüm yüzdelерinde hazırlanmış olan numunelerin, bitüm yüzdesine bağlı olarak pratik özgül ağırlık (D_p), stabilite, asfaltla dolu agregа boşluğu yüzdesi (V_f) ve boşluk yüzdesi (V_h) grafikleri çizilir.

Daha sonra grafiklerden aşağıda belirtilen bitüm yüzdeleri bulunur.

- Maksimum pratik birim ağırlığı veren bitüm yüzdesi,
- Maksimum stabilite değerini veren bitüm yüzdesi,
- %80, asfaltla dolu agregа boşluğu yüzdesini veren bitüm yüzdesi,
- %4 Boşluk oranını veren bitüm yüzdesi, (Şartnamede izin verilen %3-5 arasındaki değer), belirlenir.

Bu dört asfalt yüzdesinin aritmetik ortalaması "*optimum bitüm yüzdesini*" verir (Umar ve Ağar 1991).

Bulunan bu optimum bitüm yüzdesine tekabül eden akma değeri, akma-bitüm yüzdesi grafiğinden bakılarak belirlenir ve şartnamede belirtilen sınırların (2 - 4 mm) arasında olup olmadığı kontrol edilir. Bu şekilde saptanan bitüm oranına göre gerçekleştirilen bir asfalt betonu karışımı şartnamelerde aranan özellikleri taşıyacaktır.

3.2.4.5. Farklı filler oranlarında hazırlanan karışımların Marshall deney kriterlerinin belirlenmesi

Her bir filler cinsi için (Taş tozu, FeCr cürufu ve Silis dumanı) Marshall karışım tasarımı neticesinde bulunan optimum bitüm yüzdesi değerleri toplanıp üçe bölünerek ortalama optimum bitüm yüzdesi bulunur. Ancak Silis dumanı filler ile yapılan karışımların akma değerleri şartname sınırlarını aştığı için bu karışımın optimum bitüm yüzdesi dikkate alınmamıştır, diğer iki filler malzeme için bulunan optimum bitüm yüzdelerinin ortalaması alınmıştır. Daha sonra bu optimum bitüm yüzdesi sabit tutularak, toplam agreganın yüzdesi olarak farklı filler oranları (%2,5 %5,0 %7,0 %10) kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Bu numuneler üzerinde Marshall stabilite ve akma deneyleri yapılmıştır. Farklı filler malzemeleri kullanılarak oluşturulan karışımların deney sonuçları (yoğunluk, stabilite, akma, boşluk oranı ve bağlayıcı ile dolu boşluk oranı değerleri) incelenerek grafikleri çizilmiştir. Üç filler malzeme için toplu halde verilen grafiklerin yorumları yapılarak taş tozu filler'e kıyasla diğer filler malzemelerin kullanılabilirlikleri ve optimum kullanım oranları belirlenmiştir.

Bitüm yüzdesi sabit tutularak, farklı filler oranlarında hazırlanan numuneler için kullanılan, geçen % cinsinden, agrega gradasyonları Çizelge 3.23.'de verilmiştir.

Çizelge 3.23. Farklı Filler Oranlarına Göre Hazırlanan Agrega Gradasyonları

Elek Açıklığı	Filler Yüzdesi (%)				
	0.0	2,5	5.0	7.0	10
3/4"	100	100	100	100	100
1/2"	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5
3/8"	80	80	80	80	80
No.4	47,5	47,5	47,5	47,5	47,5
No.10	30	30,5	31	31,5	32
No.40	12	13	14	15	16
No.200	0	2,5	5	7	10

4. BULGULAR

4.1. Mineral Agregat Bulguları

Karışımlarda kullanılan, Antalya Hurma mevkiinden temin edilen kırılmış agreganın belirlenen malzeme özellikleri Çizelge 4.1.'de toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan Agregaya Ait Deney Sonuçları

İri agregat hacim özgül ağırlığı	G_{kb}	2,698 gr/cm ³
İri agregat zahiri özgül ağırlığı	G_{ka}	2,725 gr/cm ³
İri agregat su absorpsiyonu*	%P	0,37 < 2,0
İnce agregat hacim özgül ağırlığı	G_{ib}	2,646 gr/cm ³
İnce agregat zahiri özgül ağırlığı	G_{ia}	2,716 gr/cm ³
Los Angeles aşınma kaybı*	%	20,15 < 30
Soyulma mukavemeti [♥]	%	72 > 50
Taş tozu, filler zahiri özgül ağırlığı	G_{fa}	2,69 gr/cm ³
FeCr cürufu, filler zahiri özgül ağırlığı	G_{fa}	3,156 gr/cm ³
Silis dumanı, filler zahiri özgül ağırlığı	G_{fa}	2,065 gr/cm ³
İri agregat yüzdesi	%K	52,5
İnce agregat yüzdesi	%İ	40,5
Filler Yüzdesi	%F	7

Y.F. Şartnamesi gereği, ağır trafikli yollarda aşınma tabakası için:

* Agregat aşınma kaybı, %30 dan fazla olmamalıdır.

* İri agregat su absorpsiyonu %2'den fazla olmamalıdır.

♥ Agregat soyulma mukavemeti %50 den az olmamalıdır.

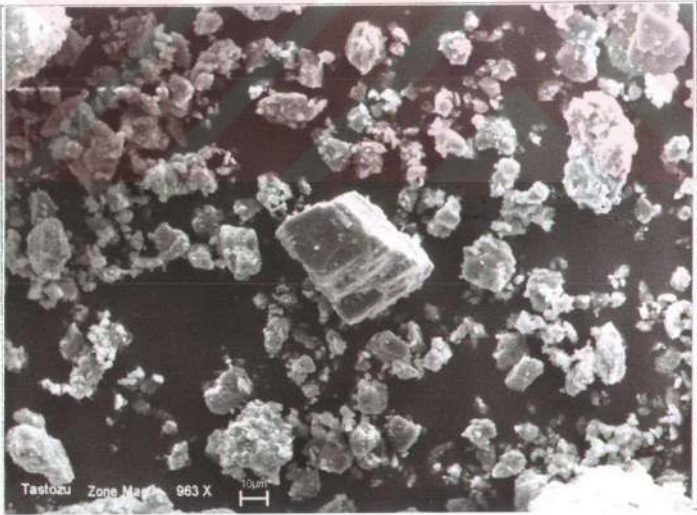
4.2. Filler Malzemelerin Deney Bulguları

4.2.1. SEM (Elektron Mikroskopik) görüntü analizleri

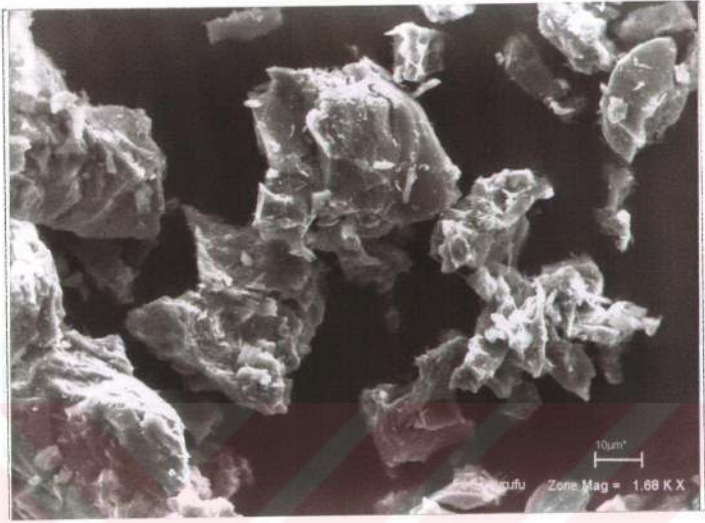
Çalışmada kullanılan üç farklı filler malzeme, Morfoloji Bölümü Histoloji Anabilim Dalı'nda bulunan SEM (Elektron Mikroskopik Görüntü Analizi) cihazında incelenerek görüntüleri kaydedilmiştir. Şekil 4.1 - şekil 4.6.'da bu görüntüler verilmiştir.



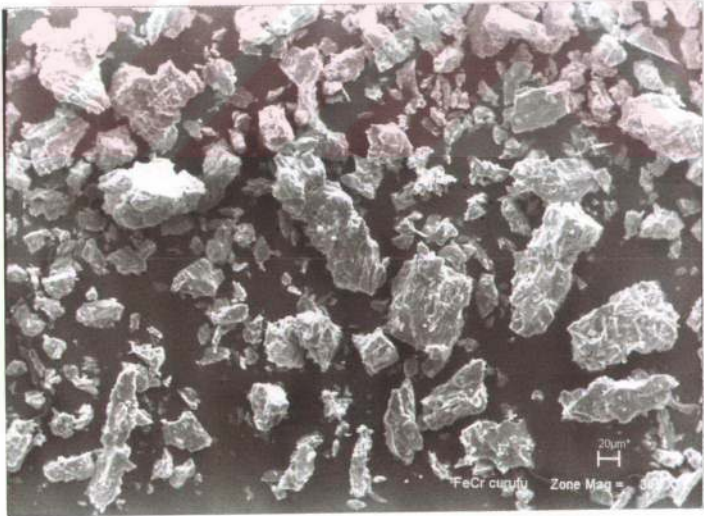
Şekil 4.1. Taş Tozu'nun Elektron Mikroskopunda 5450 Kez Büyültülmüş Hali



Şekil 4.2. Taş Tozu'nun Elektron Mikroskopunda 963 Kez Büyültülmüş Hali



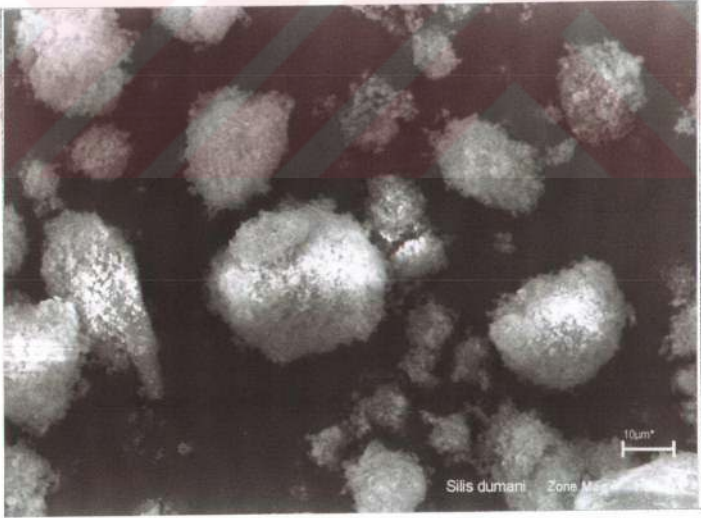
Şekil 4.3. FeCr Cürafu'nun Elektron Mikroskopunda 1680 Kez Büyültülmüş Hali



Şekil 4.4. FeCr Cürafu'nun Elektron Mikroskopunda 363 Kez Büyültülmüş Hali



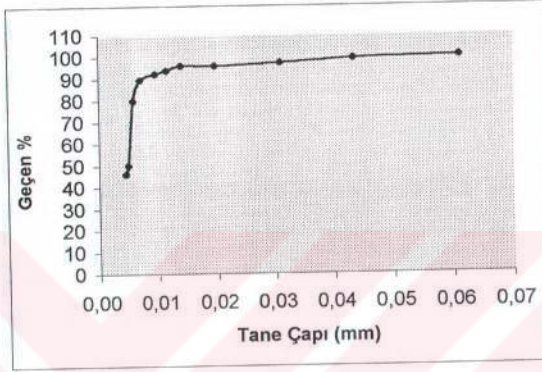
Şekil 4.5. Silis Dumamı'nın Elektron Mikroskopunda 3130 Kez Büyültülmüş Hali



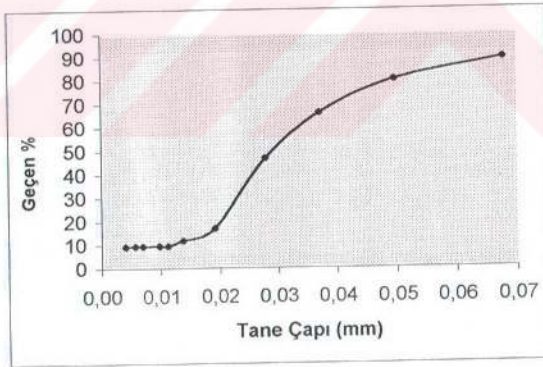
Şekil 4.6. Silis Dumamı'nın Elektron Mikroskopunda 1810 Kez Büyültülmüş Hali

4.2.2. Hidrometre deneyi bulguları

Filler malzemeler üzerinde, TS 1900'e göre yapılan hidrometre deney sonuçları aşağıda Şekil.4.7 - 4.9.'da verilmiştir.

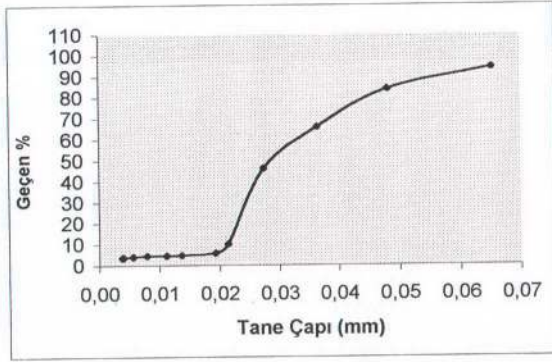


Şekil 4.7. Silis Dumanı'nın Hidrometre Yöntemi Sonucu Tane Boyu Dağılımı



Şekil 4.8. Taş Tozu Filler'in Hidrometre Yöntemi Sonucu Tane Boyu Dağılımı

FeCr cürufu üzerinde hidrometre deneyi uygulamak için öncelikle malzeme No.200 elekten elenmiştir.



Şekil 4.9. FeCr Cüruflu Filler'in Hidrometre Yöntemi Sonucu Tane Boyu Dağılımı

4.3. Asfalt Çimentosu Bulguları

T.C. Karayolları 13. Bölge Müdürlüğü'nden temin edilmiş olup çalışmada kullanılan, asfalt çimentosunun saptanan fiziksel özellikleri Çizelge 4.2.'de toplu halde verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kullanılan, 60/70 Penetrasyon Asfalt Çimentosunun Fiziksel Özellikleri

Özellik	İlgili Standart	Birimi	Sonuç Değer
Penetrasyon, 25°C, 100 gr, 5 sn	TS 118 / ASTM D 5-86	1/10 mm	62
Düktilite, 25 °C, 5 cm/dak.	TS 119 / ASTM D 113-86	cm	100+
Yumuşama Noktası (Halka ve bilya metodu)	TS 120	°C	50,1
Parlama Noktası (Cleveland açık kap)	TS 123	°C	339
Yanma Noktası (Cleveland açık kap)	TS 123	°C	374
Özgül Ağırlık (Piknometre yönt.)	TS 1087 / ASTM D70	gr/cm ³	1,023

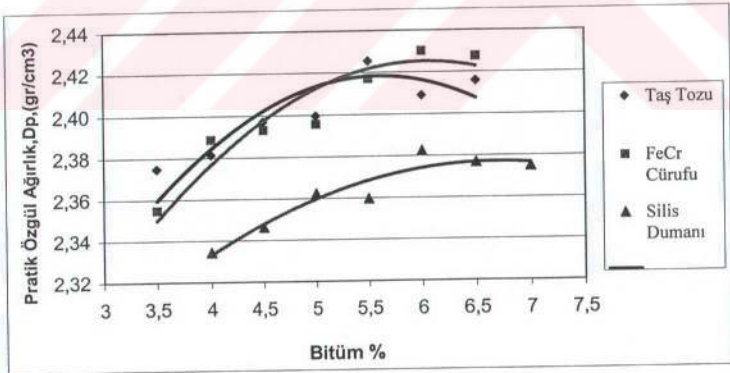
Bu asfalt çimentosu Antalya civarındaki şehirlerarası karayollarının inşasında kullanılmaktadır. Örnek olarak, Antalya-Alanya Karayolu gösterilebilir.

4.4. Marshall Deney Bulguları

Optimum bitüm yüzdesinin belirlenmesi için, ağırlıkça, %3,5 - 4,0 - 4,5 - 5,0 - 5,5 - 6,0 ve 6,5 oranlarında bitüm kullanılarak Marshall numuneleri oluşturulmuştur. Farklı filler malzemeleri ile oluşturulan numuneler deney sonuçları Şekil 4.10 - 4.14'deki grafiklerde görülmektedir. Deney sonuçlarıyla ilgili olarak ayrı ayrı düzenlenen Marshall deney formları ve grafikleri ise Ek1'de verilmiştir.

Silis dumanı filler ile oluşturulan numunelerde, özellikle düşük bitüm yüzdesinde, silis dumanının bitümü emmesi ve agregaları sarmak için yeterli bitüm kalmaması sebebiyle homojen karışım oluşturamama sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple Marshall çalışmasında bitüm oranının minimum değeri olan %3,5 değeri bu karışım için kullanılmamıştır. Üst sınır %6,5'dan %7'ye çıkarılmıştır.

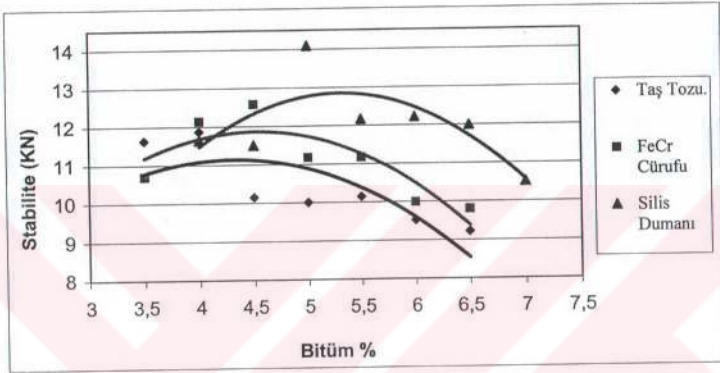
Üç ayrı filler malzeme ile elde edilen Marshall karışım tasarımı sonuçlarını toplu halde görebilmek ve karşılaştırmalı yorumlarını yapabilmek için grafikler birlikte verilmiştir.



Şekil 4.10. Pratik Özgül Ağırlık - Bitüm Yüzdesi Değişimi

Şekil.4.10'dan da anlaşıldığı gibi Taş tozu ve FeCr cürufu ile hazırlanan karışımların birim ağırlık değerleri birbirine yakın ve tutarlı değerler almıştır. Silis

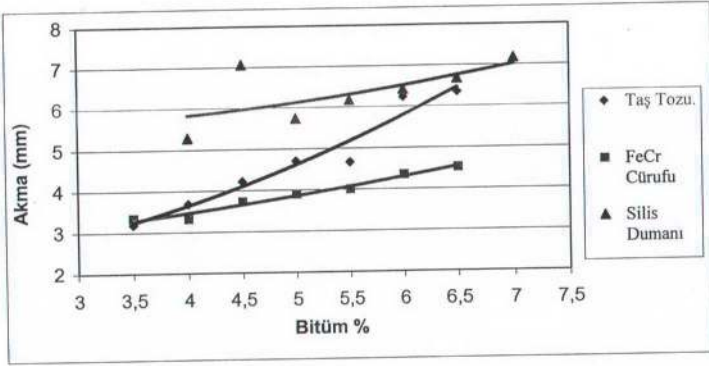
dumanı ile hazırlanan karışımların birim ağırlık değerleri ise diğerlerine kıyasla daha düşüktür. Marshall karışım tasarımı göre maksimum birim ağırlık değerini veren karışımlar tercih edilmektedir. Silis dumanlı karışımların birim ağırlık değerlerinin düşük olmasının sebebi özgül ağırlığının da düşük olmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.11. Stabilite - Bitüm Yüzdesi Değişimi

Şekil 4.11'in incelenmesi sonucunda, bağlayıcı oranı arttıkça Marshall Stabilite değerinin de artmakta olduğu ve bir maksimum noktadan geçtikten sonra tekrar düştüğü anlaşılmaktadır. Taş tozu ve FeCr cürufun birbirine yakın değerler verdiği ve düşük bitüm yüzdeslerinde maks. stabiliteye ulaştığı, silis dumanının ise daha yüksek bitüm yüzdeslerinde maks. stabiliteye ulaştığı görülmektedir. Ekonomik değeri yüksek olan malzemenin bitüm olduğu dikkate alınırsa, düşük bitüm yüzdeslerinde maks. stabiliteye ulaşan filler malzemelerin tercih edilmesi gerektiği ortadadır. Genel görünüş itibariyle FeCr cürufu ve silis dumanı ile oluşturulan numuneler taş tozuna kıyasla daha yüksek stabilite değerleri vermiştir.

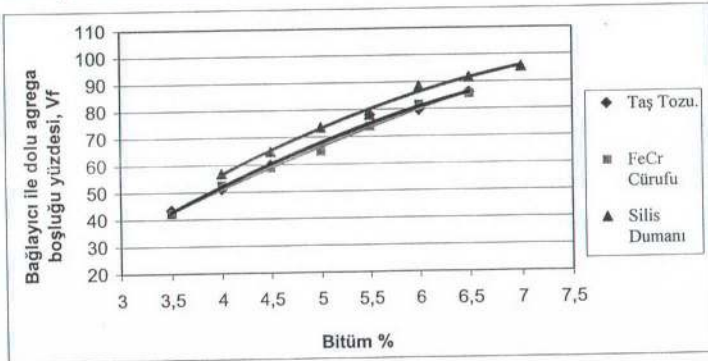
Yollar Fenni Şartnamesi'ne göre ağır trafikli yollarda aşınma tabakası için minimum stabilite değeri 900 kg'dır. Çalışmadaki tüm numuneler minimum sınırın üzerinde değerler vermiştir.



Şekil 4.12. Akma - Bitüm Yüzdesi Değişimi

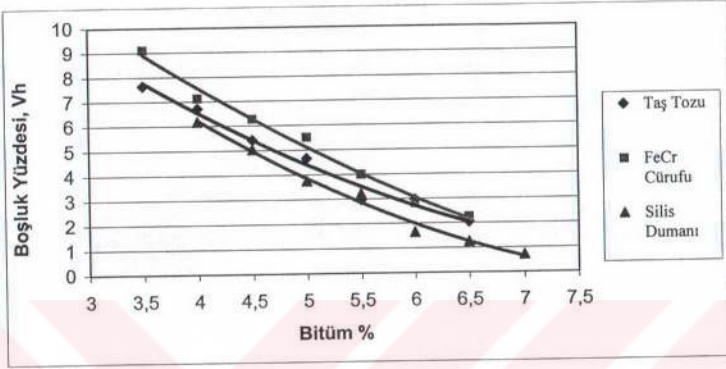
Akma değerleri açısından Şekil 4.12. incelendiğinde, en düşük akma değerleri FeCr cürufu filler ile ortaya çıkmaktadır, sonra sırasıyla taş tozu ve silis dumanı gelmektedir. Akma değerinin belirli bir sınır dahilinde olması istenir. Y.F. Şartnamesine göre bizim karışımımız için verilen sınır değerler 2- 4 mm arasındır. Bu durumda en uygun akma değerlerinin FeCr cürufu filler ile elde edildiği anlaşılmaktadır. Taş tozu fiiller de düşük bitüm yüzdelерinde akma değerleri açısından uygun değerler vermiştir.

Silis dumanı filler ile oluşturulan karışımların akma değerlerinin tümü şartnamedeki maksimum akma sınırının üzerindedir. Dolayısıyla bu karışımın esnekliğinin istenen ve gerekli olan değerden fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bu olgu ilk yaklaşımda baca tozunun bitümlü yol kaplamalarında filler malzemesi olarak kullanılmasının, esnekliğinin fazla olması sebebiyle, uygun olmayacağı sonucuna yönlendirmektedir.



Şekil 4.13. Bağlayıcı ile Dolu Agrega Boşluğu Yüzdesi - Bitüm Yüzdesi Değişimi

Bağlayıcı ile dolu agregada boşluğu yüzdesi açısından filler malzemelerin hepsi birbirine yakın ve tutarlı değerler vermiştir.



Şekil 4.14. Boşluk Yüzdesi - Bitüm Yüzdesi Değişimi

Karışımların boşluk yüzdesinin de belirli alt ve üst sınırlar dahilinde olması istenir. Üst sınır konmasının nedeni, boşluğun artmasının stabilitenin ve birim ağırlığın düşmesine, geçirimsizliğin ise artmasına yol açmasıdır. Diğer taraftan, sıcak aylarda bağlayıcı hacminin artması sonucunda boşlukların tamamen dolması ve kaplamanın bağlayıcıyı kusması sebebiyle boşluk yüzdesi için bir alt sınır konmuştur. Bizim tasarım kriterlerimiz olan ağır trafikli yollarda ve aşınma tabakası için gerekli olan boşluk yüzdesi %3 - 5 arasındır. Şekil 4.14'deki grafiğe bakıldığında üç ayrı filler için de boşluk yüzdesi değerleri birbirine yakın ve tutarlı çıkmıştır. Optimum bitüm yüzdesi için filler malzemelerin hepsi şartname sınırları arasında değerler vermiştir.

4.5. Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi

Marshall deney sonuçlarına ve Y.F. Şartnamesinde verilen (Çizelge 3.22) tasarım kriterlerine göre optimum bitüm yüzdesi belirlenmiştir.

Taş Tozu Filler ile Hazırlanan Numunelerin Optimum Bitüm Yüzdesi Hesabı:

Maksimum pratik birim ağırlığı veren bitüm yüzdesi : 5,5

Maksimum stabilite değerini veren bitüm yüzdesi : 4,0

%80, Asfaltla dolu agregası boşluğu yüzdesini veren bitüm yüzdesi : 5,92

%4 Boşluk oranını veren bitüm yüzdesi : 5,22

$$\text{Optimum Bitüm Yüzdesi : } \frac{5,5 + 4,0 + 5,92 + 5,22}{4} = 5,16$$

Bu orana karşılık gelen akma değeri Şekil 4.12'dan okunduğunda 4,29 mm olduğu görülmektedir. Ancak şartnamede izin verilen akma sınırları 2 ile 4 mm arasındadır. Şartnamede istenilen koşulun sağlanması için 4 mm akma değerine tekabül eden bitüm yüzdesi 4.89 optimum bitüm yüzdesi olarak belirlenmiştir.

FeCr Cürufu Filler ile Hazırlanan Numunelerin Optimum Bitüm Yüzdesi Hesabı:

Maksimum pratik birim ağırlığı veren bitüm yüzdesi : 6,0

Maksimum stabilite değerini veren bitüm yüzdesi : 4,5

%80, asfaltla dolu agregası boşluğu yüzdesini veren bitüm yüzdesi : 5,99

%4 Boşluk oranını veren bitüm yüzdesi : 5,52

$$\text{Optimum Bitüm Yüzdesi : } \frac{6,0 + 4,5 + 5,99 + 5,52}{4} = 5,50$$

Bu orana karşılık gelen akma değeri Şekil 4.12'den okunduğunda 3,57 mm olduğu görülmektedir. Bu değer şartname sınırları arasındadır.

Silis Dumanı Filler ile Hazırlanan Numunelerin Optimum Bitüm Yüzdesi Hesabı:

Maksimum pratik birim ağırlığı veren bitüm yüzdesi : 6,0

Maksimum stabilite değerini veren bitüm yüzdesi : 5,0

%80, asfaltla dolu agregası boşluğu yüzdesini veren bitüm yüzdesi : 5,49

%4 Boşluk oranını veren bitüm yüzdesi : 4,93

$$\text{Optimum Bitüm Yüzdesi : } \frac{6,0 + 5,0 + 5,49 + 4,93}{4} = 5,35$$

Bu orana karşılık gelen akma değeri Şekil 4.12'dan okunduğunda 5,80 mm olduğu görülmektedir. Bu akma değeri şartname sınırları arasında değildir ve baca tozu ile yapılan bu karışımın akma değerlerinin tümü şartnamedeki maksimum akma sınırının üzerindedir. Dolayısıyla bu karışımın esnekliğinin istenen ve gerekli olan değerden fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Ortalama Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi : Çalışmanın ileriki aşamalarında bitümlü karışımların bitüm yüzdesi sabit tutularak, filler oranları değiştirilecektir ve hangi filler oranlarında daha uygun sonuçlar alınabileceği incelenecektir. Bu yaklaşımla, yukarıda üç farklı filler malzemesi kullanılarak ayrı ayrı bulunan optimum bitüm yüzdeslerinin aritmetik ortalaması alınarak tek bir bitüm yüzdesine dönüştürülmesi gerekmektedir. Ancak Silis dumanı filler ile oluşturulan karışımların akma değerleri şartname sınırlarının üzerindedir. Dolayısıyla çalışmanın ileriki aşamalarında kullanılacak olan *optimum bitüm yüzdesi* FeCr cürufu ve taş tozu filler ile oluşturulan karışımların optimum bitüm yüzdeslerinin ortalaması alınarak bulunmuştur. Bu değer $(4,89+5,5)/2 = 5,195$ 'dir.

4.6. Farklı Filler Oranlarındaki Bitümlü Sıcak Karışımların Deney Bulguları

Çalışmanın bu bölümünde, yukarıda Bölüm 4.5'de bulunan optimum bitüm yüzdesi (%5.1) ve Bölüm 3.2.4.5'de verilen Çizelge 3.23'deki agrega gradasyonları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Üç farklı filler malzeme , ağırlıkça, %0,0 - 2,5 - 5,0 - 7,0 ve 10 oranlarında kullanılarak numuneler hazırlanmış ve Marshall stabilite ve akma deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları Çizelge 4.3'de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Farklı Filler Oranlarındaki Numunelerin Marshall Deney Sonuçları

Marshall deney kriterleri	Filler Cinsi ve Kullanım Oranı												
	%0	Taş tozu filler %				FeCr Cürufu filler %				Silis Dumanı filler %			
		2,5	5	7	10	2,5	5	7	10	2,5	5	7	10
Dp (Pratik özgül ağırlık)	2,326	2,377	2,406	2,400	2,427	2,354	2,395	2,396	2,381	2,349	2,364	2,362	*
Stabilite KN	9,6	11,5	11,5	10,0	8,7	10,6	12,5	11,2	11,6	10,1	10,4	14,1	*
Akma, mm	2,46	2,56	3,35	4,20	4,46	3,07	3,24	3,40	2,38	3,28	4,77	5,24	*
Vh	7,44	5,4	4,3	4,7	3,4	7,0	5,4	5,5	6,0	4,2	3,6	3,7	*
Vf	55,4	63,5	69,2	66,6	73,6	59,2	65,6	64,7	63,3	71,7	75,0	73,6	*

* Agrega uygun şekilde bitümle sarılamamıştır.

Vh = Hava boşluğu %'si Vf = Bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu %'si

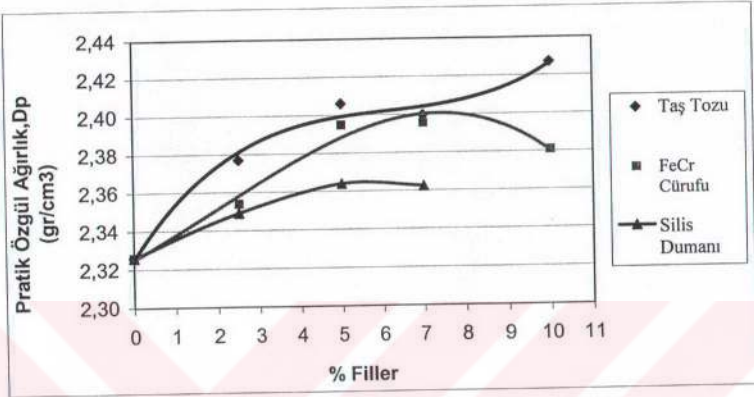
Yukarıda, çizelgede görülen numunelerin detaylı ölçüm değerlerinin olduğu Marshall deney formları Ek2'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı Bitüm ve Filler Oranlarındaki Numunelerin Marshall Deney Sonuçları

Marshall deney kriterleri	Bitüm %'si	Filler Cinsi ve Kullanım Oranı												
		Taş tozu filler %				FeCr Cürufu filler %				Baca tozu filler %				
		0%	2.5	5	7	10	2.5	5	7	10	2.5	5	7	10
Dp, Pratik özgül ağırlık (g/cm ³)	3.5				2.375				2.355				*	
	4				2.381				2.389				2.334	
	4.5				2.397				2.393				2.346	
	5				2.400				2.396				2.362	
	5.1	2.326	2.377	2.406	2.400	2.427	2.354	2.395	2.396	2.381	2.349	2.364	2.362	*
	5.5				2.425				2.417				2.360	
	6				2.409				2.430				2.382	
	6.5				2.416				2.428				2.377	
Stabilite (KN)	7				-				-				2.375	
	3.5				11.64				10.70				*	
	4				11.87				12.15				11.65	
	4.5				10.14				12.58				11.51	
	5				10.01				11.18				14.10	
	5.1	9.59	11.46	11.51	10.01	8.67	10.59	12.51	11.18	11.56	10.07	10.35	14.10	*
	5.5				10.15				11.18				12.17	
	6				9.52				10.00				12.22	
Akma (mm)	6.5				9.22				9.81				12.00	
	7				-				-				10.52	
	3.5				2.69				2.85				*	
	4				3.19				2.83				4.79	
	4.5				3.72				3.23				6.56	
	5				4.20				3.40				5.24	
	5.1	2.46	2.56	3.35	4.20	4.46	3.07	3.24	3.40	2.38	3.28	4.77	5.24	*
	5.5				4.17				3.51				5.68	
Vh, Boşluk yüzdesi	6				5.73				3.85				5.92	
	6.5				5.85				4.02				6.18	
	7				-				-				6.67	
	3.5				7.64				9.11				*	
	4				6.71				7.13				6.17	
	4.5				5.42				6.28				5.04	
	5				4.66				5.52				3.75	
	5.1	7.44	5.42	4.25	4.66	3.44	7.02	5.42	5.52	5.96	4.19	3.56	3.75	*
Vf, Bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi	5.5				2.96				4.00				3.22	
	6				2.97				2.82				1.65	
	6.5				2.04				2.27				1.25	
	7				-				-				0.71	
	3.5				43.38				42.21				*	
	4				51.03				52.48				56.86	
	4.5				60.08				58.90				64.78	
	5				66.61				64.74				73.57	
Bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi	5.1	55.36	63.47	69.15	66.61	73.64	59.15	65.63	64.74	63.32	71.67	74.95	73.57	*
	5.5				78.02				73.91				78.13	
	6				79.55				81.61				88.52	
	6.5				86.16				85.73				91.65	
	7												95.44	

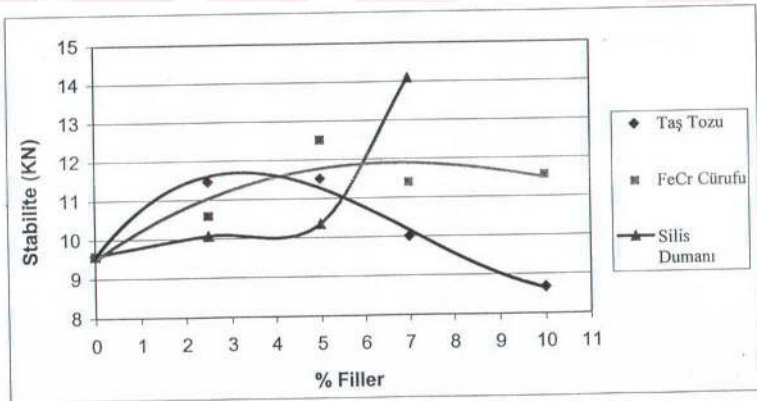
* Agrega uygun şekilde bitümle sarılamamıştır. (Yüksek oranda silis dumanı içeren karışımlar sağlıklı şekilde elde edilememektedir.)

Farklı filler oranlarında hazırlanan numunelere ait birim ağırlık, stabilite, akma, hava boşluğu ve bağlayıcı ile dolu agreganın boşluğu değerleri ile kullanılan filler oranı arasındaki ilişkiyi veren grafikler Şekil 4.15 – 4.19’da verilmiştir.



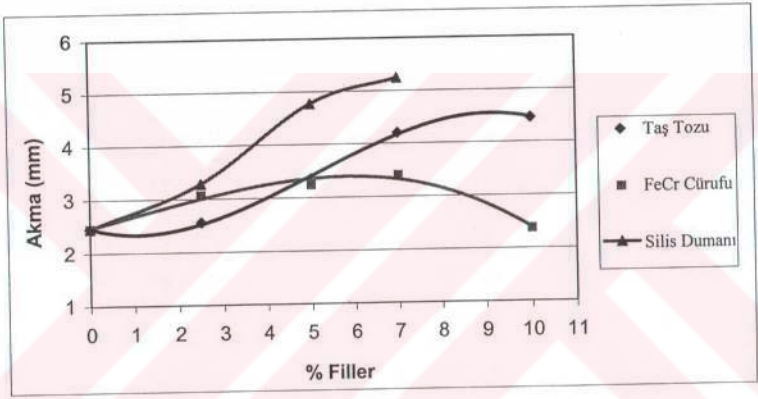
Şekil 4.15. Pratik Özgü Ağırlık - Filler Yüzdesi Değişimi

Şekilden de görüldüğü gibi filler oranlarının artması ile birim ağırlık değerleri de artmıştır. Taş tozu ve FeCr cürufu ile elde edilen birim ağırlık değerleri birbirine yakındır ve silis dumanına kıyasla daha yüksektir. FeCr cürufu ve silis dumanı için belirli bir filler oranından sonra artış durmuş, taş tozunun birim ağırlık değerleri ise %10’a kadar artmaya devam etmiştir.



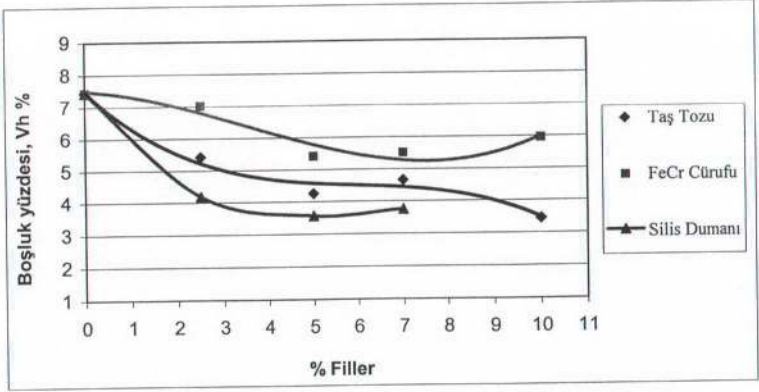
Şekil 4.16. Stabilite - Filler Yüzdesi Değişimi

Stabilite değerleri açısından filler malzemeler arasında bir tutarlılık görülememiştir. Taş tozu ve FeCr cürufu için filler oranının artması ile önce bir stabilite artışı gözlenmiş, sonra belirli bir filler yüzdesinden (%5) sonra artış durmuş, hatta azalma olmuştur. Silis dumanı için ise %5 filler oranına kadar fazla bir stabilite değişimi olmazken %7 oranı için birden büyük bir artış gözlenmiştir. Diğer grafikler ile kıyaslandığında bu durumun tutarlılığının olmadığı anlaşılmaktadır. Çünkü diğer grafiklerde, özellikle de birim ağırlık grafiğinde bu şekilde hızlı bir artış söz konusu değildir.



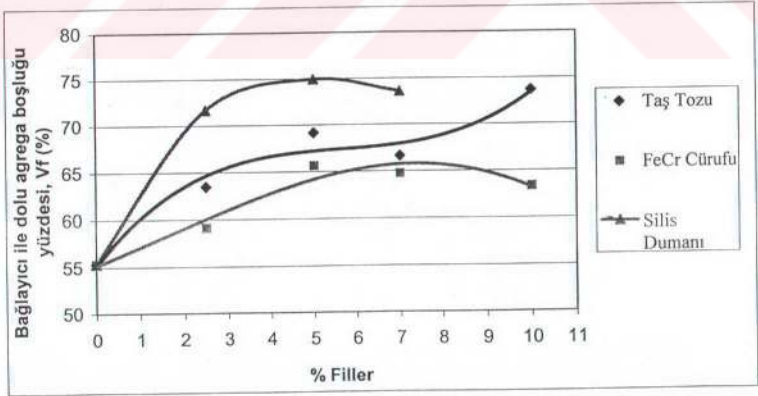
Şekil 4.17. Akma - Filler Yüzdesi Değişimi

Filler yüzdesinin artması ile her üç filler cinsi için de akma değerleri artmıştır. Filler oranının artması, bitüm oranının artmasına benzer şekilde etki etmektedir. En yüksek akma değeri yine silis dumanı için elde edilmiştir ve Y.F. Şartnamesinin maks. akma sınırı olan 4 mm'nin üzerindedir. En uygun akma değerleri FeCr cürufu filler ile elde edilmiştir ve yüksek filler oranlarında dahi akma değerleri şartname sınırlarının arasında kalmaktadır.



Şekil 4.18. Boşluk Yüzdesi – Filler Yüzdesi Değişimi

Filler oranlarının artması ile boşluk yüzdesi değerleri azalmaktadır. En düşük boşluk yüzdesi Silis dumanı filler ile elde edilmiştir. Sonra taş tozu ve FeCr cürufu gelmektedir. Malzemelerin inceliğinin ve tane boyutunun bu durumda etkili olduğu sanılmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe, agregalar arası boşlukların filler malzeme ile doldurulma imkanı artmaktadır.



Şekil 4.19. Bağlayıcı ile Dolu Agrega Boşluğu Yüzdesi - Filler Yüzdesi Değişimi

Filler yüzdelерinin artması ile, her üç filler cinsi için de, bağlayıcı ile dolu agrega boşluğu yüzdesi artmıştır. En fazla artış silis dumanı'nda görölmüştür. Sonra, birbirine oldukça yakın değеrlere sahip olan, taş tozu ve FeCr cürufu gelmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

FeCr cürufu genelde, birim ağırlık, boşluk yüzdesi, bağlayıcı ile dolu boşluk yüzdesi değerleri açısından taştözü ile benzer sonuçlar vermiştir. Stabilite değerleri taş tozuna kıyasla üstün özellik göstermiştir. Özellikle yüksek filler oranlarında hem stabilite, hem de akma değerleri taş tozundan üstündür. Ancak boşluk yüzdesi değerleri diğer filler malzemelere kıyasla daha fazladır. En düşük boşluk yüzdesi silis dumanı ile elde edilmiştir. Bu olgunun nedeninin ilgili malzemenin tane boyutunun çok küçük olmasından ve agregaların arasındaki boşlukları iyi bir şekilde doldurmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

FeCr cürufu'nun akma değerleri bakımından en ideal malzeme olduğu anlaşılmaktadır. %10 filler oranında dahi 2.4 mm akma değeri vermiştir ki şartname sınırları 2-4 mm arasındadır. Diğer filler malzemeler ise yüksek filler oranlarında akma değerleri açısından şartname üst sınırını aşmıştır. Cürufun bu üstün özelliğinin sebebinin tane yapısı ile ilgili olduğu tahmin edilmektedir. Çünkü SEM görüntülerinden cüruf taneciklerinin diğer filler malzemelerin tersine köşeli ve keskin yüzeylere sahip olduğu yani kristal yapıları olduğu görülmektedir. Bu durum, iç sürtünmenin bir ölçüsü olan akma değerinin, cüruf taneciğinin sivri ve köşeli yüzeyleri sebebiyle, düşük çıktığını göstermektedir.

Deneyisel çalışmada, FeCr cürufu'nun filler malzeme olarak %5 – 10 arasındaki oranlarda bitümlü sıcak karışımlarda rahatlıkla kullanılabileceği ve bu filler ile üretilen kaplama tabakalarının dayanıklılığının üstün olacağı anlaşılmıştır. Daha ileri aşamada yüksek (>%10) cüruf oranları ile hazırlanan karışımların davranışlarının incelenmesinde fayda görülmektedir.

Silis dumanı ile üretilen numunelerin dikkat çeken özellikleri, diğer filler malzemelere kıyasla, akma değerlerinin fazla olması, birim ağırlık ve boşluk yüzdesi değerlerinin düşük olmasıdır. Birim ağırlık değerlerinin düşük olmasının nedeni, silis dumanının özgül ağırlığının düşük olmasıdır. Ayrıca yüksek oranlarda kullanıldığı zaman karıştırma ve işlenebilme güçlüğü yaratmıştır. Stabilite açısından tutarlı bir

değişim göstermemektedir. %5 filler oranına kadar düşük stabilite değerleri alırken, %7 filler oranında birden büyük bir artış görülmüştür, diğer parametreler bu ani değişimi desteklememektedir. Öte yandan silis dumanı filler'in akma değerlerinin yüksek olması bu malzeme ile üretilecek kaplama tabakalarının gerekenden daha fazla esnekliğe sahip olacağını göstermektedir. Ayrıca silis dumanı'nın özgül yüzeyinin fazla olması ve ince bir malzeme olması sebebiyle bitümlü karışımlarda bağlayıcı filmi kalınlığını azaltacağı, dolayısıyla karışımın rijitliğinin azalacağı yönünde kanaate ulaşılmaktadır. Bu durumun ilgili deneyler ve arazi çalışmalarıyla doğrulanması gereklidir. Sonuç olarak, yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı, silis dumanının bitümlü sıcak karışımlarda, klasik filler malzeme olarak kullanılmasının uygun olmayacağı ancak, yüksek yoğunluk ve geçirimsizlik istenen özel durumlarda ve düşük oranlarda (%2-4 gibi) katkı malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, Antalya ETİ Elektrometalurji İşletmesi'nin FeCr cürufalarının bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılması durumunda, klasik filler malzeme olan taş tozuna benzer sonuçlar verdiği ve hatta dayanıklılık açısından daha üstün olduğu belirlenmiştir. Adı geçen işletme, bu atık malzemelerden herhangi bir maddi gelir beklememekte, gereksiz yer işgal eden bu atıklardan kurtulmak için çözüm aramaktadır. Dolayısıyla, Antalya şehir merkezinde kalan bu işletmenin, yakın bölgelerindeki üstyapı işlerinde, filler olarak FeCr cürufunun kullanılması, hem ekonomi sağlayacaktır, hem de çevre kirliliği yaratan bu malzemelerin değerlendirilmesini sağlayacaktır. İşletmeye uzak olan şantiyeler için de, taşıma maliyeti dikkate alınarak, bu malzemeden yararlanmak söz konusu olabilir.

Bu çalışmada, optimum bitüm oranı sabit tutularak filler oranları değiştirilmiştir. Ancak değişik filler oranlarında optimum bitüm yüzdesinin nasıl değişeceği incelenmemiştir. Literatürde geçen genel düşünce, filler oranlarının artması ile optimum bitüm yüzdesinin azalmaya geçeceği şeklindedir. Sebep olarak da agregaların arasının filler malzeme ile daha çok dolması sonucu bitüm için fazla boşluk kalmamasıdır. Daha ileri çalışmalarda, artan filler oranlarında optimum bitüm yüzdesinin değişiminin de incelenmesinde fayda görülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACAR, S.O. TAPKIN, S. 1998. Portland Çimentosu Kullanılarak Hazırlanan Marshall Numunelerinin Özelliklerinin İncelenmesi. In: Asfalt'98 2.Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildirileri, s 95-104, Ankara.
- AĞAR, E. 1996. Esnek Yol Üstyapıları, Lisansüstü Ders Notları (Yayınlanmamış), İ.T.Ü. İstanbul.
- ANDERSON, D.A. BAHIA, H. U. DONGRE, R. 1992. Rheological Properties of Mineral Filler-Asphalt Mastics and Its Importance to Pavement Performance. In: Richard C. Meininger(Editor), Symposium on Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM Special Technical Publication, 1147: 131-153, San Diego, USA.
- ANDERSON, D.A. DONGRE, R. CHRISTENSEN, D.W. 1992. Effect of Minus No.200-Sized Aggregate on Fracture Behavior of Dense-Graded Hot Mix Asphalt. In: Richard C. Meininger(Editor), Symposium on Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM Special Technical Publication, 1147: 154-176, San Diego, USA.
- ANONİM1, 2001. Asfalt ve Uygulamaları. İsfalt, İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Seçil Ofset Basımı, 280 ss, İstanbul.
- ANONİM2, 1994. Yollar Fenni Şartnamesi (Yol Alt Yapısı, Sanat Yapıları, Köprü, Tünel ve Üst Yapı İşleri). Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayını: 170/2, 435 ss, Ankara.
- BUTTON, J.W. LITTLE, D.N. 1988. Additives May Improve Pavement Performance. In: Liddle W.(Editor), New Pavement Materials, pp. 16-26, New York, USA.
- GÜNGÖR, M.M. 1996. Afşin Elbistan Uçucu Külünün Esnek Yol Kaplamalarında Filler Olarak Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 68 ss, Elazığ.
- ISHAI, I. CRAUS, J. ve SIDES, A. 1980. A Model for Relating Filler Properties to Optimal Behavior of Bituminous Mixtures. *Proceedings of The Association of Asphalt Paving Technologists*, 49: 416-436.
- ISHAI, I. CRAUS, J. 1996. Effects of Some Aggregate and Filler Characteristics on Behavior and Durability of Asphalt Paving Mixtures. *Transportation Research Record*, 1530: 75-85.
- İLICALI, M. 1988. Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 148 ss, İstanbul.

- KREBS, D.R. WALKER, D.R. 1971. Highway Materials. McGraw-Hill Book Company, 345 pp, New York.
- KANDHAL, P.S. LYNN, C.Y. PARKER, F. 1998. Characterization Tests for Mineral Fillers Related to Performance of Asphalt Paving Mixtures. *Transportation Research Record*, 1638: 101-110.
- KEÇECİLER, A.F. AKKOL, G. GÜMRÜKÇÜOĞLU, A. GÖKÇE, A.F. 1979. Bitümlü Malzemeler Laboratuvar El Kitabı. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları: 239, 156 ss, Ankara.
- LAV, A.H. 1990. Pirit Kalsinesinin Esnek Yol Kaplamalarında Filler Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 123 ss, İstanbul.
- LAV, A.H. SÜTAŞ, İ. 1993. Pirit Kalsinesinin Esnek Yol Kaplamalarında Filler Olarak Değerlendirilmesi. *Teknik Dergi*. 4(1): 631 – 642.
- ÖNAL, M.A. ve KAHRAMANGİL, M. 1993. Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Yayınları, 200 ss, Ankara.
- PUZINAUSKAS, V.P. 1983. Filler in Asphalt Mixtures. Asphalt Institute, Research Record 69(2), 30 pp, Kentucky, USA.
- SCHROEDER, R.L. 1994. The Use of Recycled Materials in Highway Construction. *Public Roads*, 58(2): 32-41.
- SHAHROUR, M.A. ve SALOUKEH, B.G. 1992. Effect of Quality and Quantity of Locally Produced Filler (Passing Sieve No.200) on Asphaltic Mixtures in Dubai. In: Richard C. Meininger(Editor), Symposium on Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM Special Technical Publication, 1147: 187-208, San Diego, USA.
- SHELL BITUMEN. 1990. The Shell Bitumen Handbook. Shell Bitumen Publication, 336 pp. U.K.
- TAYEBALI, A.A. MALPASS, G.A. KHOSLA, N.P. 1998. Effect of Mineral Filler Type and Amount on Design and Performance of Asphalt Concrete Mixtures. *Transportation Research Record*, 1609: 36-43.
- TAPKIN, S. 1998. Asfalt Agregat Karışım Özelliklerinin Portland Çimentosu Modifikasyonu ile Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 120 ss, Ankara
- TERZİ, S. 2000. Mermer Toz Atıklarının Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 54 ss, Isparta.

- UMAR, F. AĞAR, E. 1991. Yol Üstyapısı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 258 ss, İstanbul.
- YEĞİNOBALI, A. 1993. Silis Dumanının Beton Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. In: Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, s 149-167, Ankara.
- WATSON, J. 1989. Highway Construction and Maintance. Longman Scientific&Technical, 232 pp, UK.
- WIGNALL, A. KENDRICK, P.S. ANCILL, R. COPSON, M. 1995. Roadwork, Theory and Practice, 324 pp, Scotland.

EKLER



EK1: Taş Tozu Fillerli Marshall Numunelerine Ait Deney Sonuçları, (MARSHALL DENEY FORMU)

Num. No	Bitüm %	Filler %	Biriktir Yüksekliği (mm)	Ort. Yük.	Havadaki Ağ. (gr)	Sudaki Ağ. (gr)	Doymuş Yüzey Kur. Ağ.	Hacim Özgül Ağ. (Dp)	Max Toz Özgül Ağ.(Dt)	Boşluk % (Vh)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite (KN)	Düzelt. fakt.	Düzelt. Stabilite (KN)
1	3.5	7	64	63.97	1184.7	694.3	1194.2	499.9	2.370				2.86	12.26	0.988	12.11
2	3.5	7	64	63.93	1184.2	693.7	1191.3	497.6	2.380				2.51	11.27	0.99	11.16
3*	3.5	7	65.5	65.9	65.63	4190	691.5	4201	2.386	7.64	13.49	43.38	2.9	9.33	0.963	8.89
Ortalamlar																
4	4	7	62.4	62.9	62.70	1176.5	687	1181.3	494.3				3.78	11.59	1.02	11.82
5	4	7	61.9	62.1	61.97	1170.6	688.3	1179.6	491.3	6.71	13.70	51.03	2.59	11.49	1.038	11.93
6*	4	7	63	63.4	63.03	4191	689.4	4196.4	506.9	2.553			3.3	42.66	4.043	42.71
Ortalamlar																
7	4.5	7	61.6	62	62.05	1185.6	696.7	1188.9	492.2				3.35	10.64	1.04	11.07
8	4.5	7	62.95	62.5	62.65	1186.5	695.1	1191	495.9	5.42	13.58	60.08	3.97	9.9	1.02	10.10
9	4.5	7	62.9	62.9	62.8	1191.8	696.8	1195.5	498.7	2.534			3.84	9.13	1.015	9.27
Ortalamlar																
10	5	7	62.5	62.2	61.9	1202.8	701	1205	504.0				4.31	10.66	1.033	11.01
11	5	7	62.9	63	62.7	1205.4	705.9	1207.5	501.6	4.66	13.94	66.61	4.57	9.28	1.015	9.42
12	5	7	62.8	63	62.2	1201	705.8	1204.3	498.5	2.517			3.72	9.4	1.02	9.59
Ortalamlar																
13	5.5	7	61	60.9	61.033	1175.5	692	1177.5	485.5				4.05	9.85	1.068	10.52
14	5.5	7	60.9	61	60.8	1179.6	696.4	1181.9	485.5	2.96	13.48	78.02	4.28	9.15	1.068	9.77
15*	5.5	7	60.5	60.4	60.4	1179.6	696.6	1180.9	482.3	2.499			4.19	9.19	4.013	9.31
Ortalamlar																
16	6	7	61	60.9	60.97	1182.5	692	1183	491.0				5.69	9.16	1.068	9.78
17	6	7	61.5	61.2	61.53	1188.3	698.7	1190.8	492.1	2.483	14.52	79.55	6.24	7.86	1.062	8.35
18	6	7	61	60.5	60	1162.1	681.5	1165	483.5				5.27	9.49	1.099	10.43
Ortalamlar																
19	6.5	7	61	61.5	61.17	1191.6	702	1194	492.0	2.04	14.73	86.16	5.73	9.08	1.062	9.64
20	6.5	7	62.1	62.5	62.37	1213.5	712.8	1216.4	503.6				5.96	8.56	1.028	8.80
21*	6.5	7	63.9	63.6	63.63	1216.4	706.9	1219.6	513.7				6.01	7.82	0.968	7.89
Ortalamlar																
									2.416				5.85			9.22

NOT: Üstü çizgili rakamlar, fazla sapma gösteren, dolayısıyla hesaplara dahil edilmeyen numunelerdir.

Briketeki Agreg. Miktarı = 1150 gr
Agrega Kar. Efektif Özgül Ağ. (Gef) = 2,714

Agrega Karış. Hacim Özg. Ağ. (Gsb) = 2,67

Bitüm Özgül Ağ. (Gb) = 1,023

EK1: FeCr Cürufu Fillerli, Marshall Numunelerine Ait Deney Sonuçları, (MARSHALL DENEY FORMU)

Num. No	Bütün Filler %	Birikt Yükeklği: (mm)	Ort. Yükl.	Havadaki Ağ. (gr)	Sudaki Ağ. (gr)	Doygun Yüzey Kuru Ağ.	Hacim (Dp)	Max Teo. Özgül Ağ. (Dn)	Boğluk % (Vh)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite (KN)	Düzelt. fakt.	Düzelt. Stabilite (KN)
1*	3.5	7	63.2	63.6	63.43	4184.7	694.6	4194.1	496.6	2.372		2.43	43.66	4.003	43.69
2	3.5	7	64	63.8	63.93	4180.3	690.85	4191.6	500.75	2.357		2.3	10.48	0.99	10.38
3	3.5	7	64.1	64.1	64.20	4186.3	694.7	4198.9	504.2	2.353	15.77	3.4	11.21	0.983	11.02
Ortalamlar															
4	4	7	64	63.5	63.67	4171	689.7	4181.1	491.4	2.383		2.86	11.45	0.995	11.39
5	4	7	63.8	64.1	63.83	4185.8	688.6	4193.8	495.2	2.395		2.8	13.0	0.983	12.91
6*	4	7	62.8	63.1	63.30	4183.1	689.8	4191.36	491.66	2.407	15.00	3.0	13.91	4.006	43.96
Ortalamlar															
7	4.5	7	62.2	62.5	62.60	4182.5	695.6	4190.5	494.9	2.389		3.25	11.98	1.023	12.26
8	4.5	7	63.3	63.7	63.63	4194.2	705	4203.2	498.2	2.397	58.90	3.21	12.94	0.988	12.91
9*	4.5	7	63.1	62.9	63.1	4186.6	696.3	4196.3	600	2.372		3.8	40.75	4.013	40.89
Ortalamlar															
10	5	7	62.5	62.5	62.67	4188.8	700.5	4196.6	496.1	2.396		3.42	10.4	1.02	10.61
11*	5	7	63.9	63.3	63.43	4182.2	699.4	4200.8	601.8	2.376	64.74	3.71	9.86	4.003	9.88
12	5	7	62.1	61.8	61.80	4177.2	692.8	4184.3	491.5	2.395		3.38	11.27	1.043	11.75
Ortalamlar															
13*	5.5	7	63.1	63.1	63.40	4197.2	703.8	4203.4	496.6	2.396		3.62	9.03	4.003	9.06
14	5.5	7	61.9	62	61.97	4191.4	701.4	4194.9	493.5	2.414	73.90	3.51	10.96	1.038	11.38
15	5.5	7	62	62.1	62.2	4201.2	707.85	4204.2	496.35	2.420		3.51	10.61	1.035	10.98
Ortalamlar															
16	6	7	61.2	61.4	61.30	4195.6	706.6	4197.6	491	2.435		4.31	10.95	1.059	11.60
17	6	7	61.9	61.9	62	4195.8	707.3	4198.3	491	2.435	81.61	3.67	8.91	1.04	9.27
18	6	7	62.1	62.1	62.10	4199.9	706.4	4202.2	495.8	2.420	15.33	3.57	8.83	1.035	9.14
Ortalamlar															
19	6.5	7	61.3	61.9	61.50	4198.1	700.8	4190.6	489.8	2.428		3.7	9.26	1.053	9.75
20	6.5	7	61	60.9	61.1	4178.2	694.5	4179.9	485.4	2.427	85.73	3.91	8.71	1.068	9.30
21	6.5	7	61.1	61.1	60.9	4176.9	696	4182	486	2.428	15.87	4.46	9.71	1.068	10.37
Ortalamlar															
												4.02			9.81

NOT: Üstü çizgili rakamlar, fazla sapma gösteren, dolayısıyla hesaplara dahil edilmeyen numunelerdir.

Briketeki Agreg. Miktarı = 1.150 gr
Agrega Kar. Efektif Özgül Ağ. (Gef) = 2,738

Agrega Karş. Hacim Özg. Ağ. (Gsb) = 2,698

Bitüm Özgül Ağ. (Gb) = 1,023

Ek1: Baca Tozu (Silis dumanı) Fillerli Marshall Numunelerine Ait Deney Sonuçları, (MARSHALL DENEY FORMU)

Num. No	Bitüm %	Filler %	Biriktir Yüsekliği (mm)	Orn. Yük.	Havadaki Ağ. (gr)	Sudaki Ağ. (gr)	Doygun Yüzey Kuru Ağ.	Hacim Özgül Ağ. (Dp)	Max Too. Özgül Ağ. (Dt)	Boşluk % (Vh)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite (KN)	Düzel. fakt.	Düzel. Stabilite (KN)
1	4	7	65	65,1	65,15	65,08	691,3	1198,1	506,8	2,339			4,8	12,35	0,96	11,88
2	4	7	65,2	65,7	65,53	1179,6	690,5	1196,8	506,3	2,330			4,77	12	0,953	11,44
3*	4	7	64,9	66,1	64,97	4467,3	682,8	4484,6	501,8	2,436	14,30	56,86	8,3	40,29	0,963	9,64
Ortalamlar																
4	4,5	7	65,4	65,6	65,3	1192,5	695,3	1202,8	507,5	2,350			5,89	11,47	0,954	10,94
5	4,5	7	65	65	65,5	1185,9	689,6	1196,6	507	2,339			8,91	12,5	0,958	11,98
6	4,5	7	66,1	65,6	66,4	1192,3	696	1203,3	507,3	2,350	14,31	64,78	6,99	12,3	0,943	11,60
Ortalamlar																
7*	5	7	66	64,8	64,9	64,9	688	4490,2	502,2	2,367			3,63	44,64	0,663	44,47
8	5	7	64	63,8	63,8	63,9667	1178,75	685,45	500,05	2,357			5,63	14,56	0,99	14,41
9	5	7	63,7	63,5	63,15	1179,9	688,2	1183,3	497,1	2,368	14,18	73,57	4,85	13,78	1,0	13,78
Ortalamlar																
10	5,5	7	63,8	63,95	63,85	63,87	1178	682	1182,2	500,2	2,355		6,3	11,55	0,99	11,43
11	5,5	7	62,9	62,8	62,85	62,85	1174,8	681,5	496,9	2,364	14,73	78,13	5,05	12,72	1,015	12,91
12*	5,5	7	62,66	63,2	63	63,0167	4469,8	677,2	4474,06	496,86			6,46	44,1	4,013	44,24
Ortalamlar																
13	6	7	62,1	62,4	62,1	62,20	1178,8	685,2	1181,8	496,6			5,36	11,53	1,033	11,91
14	6	7	61,9	61,9	62	61,93	1179,8	688,8	1182,2	493,4	14,36	88,52	6,48	12,05	1,04	12,53
15*	6	7	62,9	63	63,4	63,40	4479,1	681,4	4482,4	501			6,74	44,06	4,013	44,18
Ortalamlar																
16	6,5	7	61	61,9	61,1	61,33	1157,1	671,8	1159,7	487,9			6,07	11,81	1,059	12,51
17	6,5	7	61,5	61,1	61,3	61,30	1156,8	673,6	1159,2	485,6	15,01	91,69	6,28	10,86	1,059	11,50
18	6,5	7											-	-	-	-
Ortalamlar																
19	7	7	62	62	62,00	1174,6	682	1177	495	2,373			6,55	10,06	1,038	10,44
20	7	7	60,1	60,2	60,2	60,17	1140,7	682,6	1143	480,4	15,54	95,44	5,7	9,17	1,063	10,02
21	7	7	61,05	61,1	61	61,05	1152	670	1154,6	484,6			7,77	10,4	1,066	11,09
Ortalamlar																
														6,87		10,52

NOT: Üstü çizgili rakamlar, fazla sapma gösteren, dolayısıyla hesaplara dahil edilmeyen numunelerdir.

Briketeki Agreganın Miktarı = 1150 gr
Agrega Kar. Etketif Özgül Ağ. (Gef) = 2,639

Agrega Karış. Hacim Özg. Ağ. (Gsb) = 2,615

Ek2: Farklı Oranlarda Taş Tozu ile Hazırlanan Marshall Numunelerine Ait Deney Sonuçları

Num. No	Bİrdm %	Filler %	Birikt Yüksesliği (mm)	Ort. Yık.	Havadaki Ağ. (gr)	Sudaki Ağ. (gr)	Doğrun Yüzey Kuru Ağ.	Hacim (Dp)	Hacim Örgül Ağ. (Dp)	Max To. Örgül Ağ. (Dx)	Boşluk % (Vh)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite (KN)	Dizel. fakt.	Dizel. Stabilite (KN)
1	5.1	0	64	63.8	64.1	63.97	1179.1	679.2	1187.5	508.3				2.06	9.77	0.988	9.65
2	5.1	0	64	63.9	63.8	63.90	1184	682	1190.8	508.8			55.36	2.20	9.69	0.99	9.59
3	5.1	0	63.9	63.2	63.3	63.47	1182.1	681.7	1188.5	506.8	7.4375	16.66		3.11	9.53	1.0	9.53
Ortalamlar																	
4	5.1	2.5	62.2	62	62.1	62.10	1181.9	690	1186.2	496.2				2.35	10.88	1.035	11.26
5	5.1	2.5	61.9	62.2	62.4	62.17	1176.3	684.3	1180.2	495.9	5.42	14.85	63.47	2.77	11.29	1.033	11.66
6*	5.1	2.5	62.3	62.4	62.6	62.43	1173	682.4	1178.7	496.3				2.24	8.1	1.028	8.33
Ortalamlar																	
7	5.1	5	61.4	61.1	61.1	61.20	1180.8	693.5	1184	490.5				3.3	11.14	1.062	11.83
8	5.1	5	61.1	61.4	61.1	61.20	1179.6	692.2	1182.6	490.4	4.25	13.79	69.15	3.4	10.54	1.062	11.19
9*	5.1	5	61	60.8	61.1	60.97	1177.6	691.5	1179.9	488.4				2.88	9.22	1.07	9.87
Ortalamlar																	
10	5.1	7	62.5	62.2	61.9	62.20	1202.8	701	1205	504.0				4.31	10.66	1.033	11.01
11	5.1	7	62.9	63	62.7	62.87	1205.4	705.9	1207.5	501.6	4.66	13.94	66.61	4.57	9.28	1.015	9.42
12	5.1	7	62.8	63	62.2	62.67	1201	705.8	1204.3	498.5				3.72	9.4	1.02	9.59
Ortalamlar																	
13*	5.1	10	60.9	60.2	60.5	60.5333	1183.7	699.8	1185.4	485.6				5.62	10.18	1.084	11.04
14	5.1	10	61.4	60.9	61	61.1	1183.3	699.1	1186	486.9	3.44	13.06	73.64	3.83	8.15	1.065	8.68
15	5.1	10	61.9	61.5	61.1	61.50	1184.7	698.9	1187.8	488.9				5.08	8.22	1.053	8.66
Ortalamlar																	
														4.46			8.67

NOT: Üstü çizgili rakamlar, fazla sapma gösteren, dolayısıyla hesaplara dahil edilmeyen numunelerdir.

Bitim Örgül Ağ. (Gh) = 1,023

Agrega Kar. Etkitli Örgül Ağ. (Gef) = 2,714

Agrega Karış. Hacim Özg. Ağ. (Gsb) = 2,67

Briketeki Agreg. Miktarı = 1150 gr

VMA = Agregalar Arası Boşluk %'si

Vh = Hava Boşluğu %'si

Vf = Bağl. Dolu Agreg. Boşluğu %'s

Ek2: Farklı Oranlarda FeCr Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Marshall Numunelerine Ait Deney Sonuçları

Num. No	Bütün %	Filler %	Briket Yüksekliği (mm)	Ort. Yük.	Havadaki Ağ. (gr)	Sudaki Ağ. (gr)	Doğan Yüzey Kuru Ağ.	Hacim Özgül Ağ. (Dp)	Max. Teo. Özgül Ağ. (Dh)	Boşluk % (Vh)	VMA %	VF %	Akma (mm)	Stabilite (KN)	Dizel. fakt.	Dizel. Stabilite (KN)
1	5,1	0	64	63,8	64,1	63,97	1179,1	679,2	1187,5	508,3	2,320		2,06	9,77	0,988	9,65
2	5,1	0	64	63,9	63,8	63,90	1184	682	1190,8	508,8	2,327	55,36	2,20	9,69	0,99	9,59
3	5,1	0	63,9	63,2	63,3	63,47	1182,1	681,7	1188,5	506,8	2,332		3,11	9,53	1,0	9,53
Ortalamlar																
4	5,1	2,5	62,5	63	62,9	62,80	1178,4	683,9	1184,5	500,6	2,354		3,15	10,44	1,018	10,63
5	5,1	2,5	63	62,8	62,9	62,90	1181,7	685,5	1187,4	501,9	2,354	59,15	2,99	10,4	1,015	10,56
6*	5,1	2,5	62,1	62,6	62,27	1188,9	694,5	699,0	1192,5	499,0	2,383		3,3	12,38	1,03	12,75
Ortalamlar																
7*	5,1	5	62,5	62,4	62,2	62,47	1182,4	692,8	1189,6	495,8	2,385		3,24	10,18	1,028	10,42
8	5,1	5	61,9	62,1	62,4	62,13	1183,3	693	1187,4	494,4	2,393	65,63	3,52	12,67	1,035	13,11
9	5,1	5	62,1	61,6	62	61,90	1185,7	695,1	1189,9	494,8	2,396		2,96	11,46	1,04	11,92
Ortalamlar																
10	5,1	7	62,5	62,5	63	62,67	1188,8	700,5	1196,6	496,1	2,396		3,42	10,4	1,02	10,61
11*	5,1	7	63,9	63,3	63,1	62,43	1192,2	699,1	1200,9	501,8	2,376	64,74	3,71	9,85	1,003	9,88
12	5,1	7	62,1	61,8	61,5	61,80	1177,2	692,8	1184,3	491,5	2,395		3,38	11,27	1,043	11,75
Ortalamlar																
13*	5,1	10	62,6	62,9	62,3	62,6	1194,1	701,8	1199,9	498,1	2,392		3,40	12,9	1,023	13,20
14	5,1	10	63,5	63,4	64	63,6333	1201,3	705,7	1210	504,3	2,382	63,32	2,5	11,45	1,023	11,71
15	5,1	10	62,7	63	63	62,90	1196,3	700	1202,6	502,6	2,380		2,26	11,23	1,015	11,40
Ortalamlar																
													2,38			11,56

NOT: Üstü çizgili rakamlar, fazla sapma gösteren, dolayısıyla hesaplara dahil edilmeyen numunelerdir.

Bütün Özgül Ağ. (Gb) = 1,023

Agrega Kar. Efektif Özgül Ağ. (Gef) = 2,738

Agrega Karış. Hacim Özg. Ağ. (Gsb) = 2,698

Briketeki Agreganın Miktarı = 1150 gr

VMA = Agregalar Arası Boşluk %

Vh = Hava Boşluğu %'si

Vf = Bağlı. Dolu Agreganın Boşluğu %

Ek2 Farklı Oranlarda Baca Tozu (Silis dumanı) ile Hazırlanan Marshall Numunelerine Ait Deney Sonuçları

Nun.	Bitim No	Filler %	Biriken Yüksekliği (mm)	Ort. Yük.	Havadaki Ağ. (gr)	Sudaki Ağ. (gr)	Doğru Yüzey Kuru Ağ.	Hacim	Hacim Özgül. Ağ. (Dp)	Max. Toz Özgül. Ağ. (Dt)	Boşluk % (Vh)	VMA %	Vf %	Akma (mm)	Stabilite (KN)	Düzel. fakt.	Düzel. Stabilite (KN)
1	5,1	0	64	63,97	1179,1	679,2	1187,5	508,3	2,320					2,06	9,77	0,988	9,65
2	5,1	0	64	63,9	1184	682	1190,8	508,8	2,327	2,513	7,44	16,66	55,36	3,11	9,53	1,0	9,53
3	5,1	0	63,9	63,2	1182,1	681,7	1188,5	506,8	2,332					2,46			9,59
Ortalamlar																	
4	5,1	2,5	61,9	62,1	1163,9	675,7	1168,8	493,1	2,360					3,52	9,69	1,038	10,06
5	5,1	2,5	62,2	62,9	1164,5	672,6	1168,9	496,3	2,346	2,451	4,19	14,77	71,67	2,92	10,08	1,028	9,79
6	5,1	2,5	62,3	62,8	1158,2	670,7	1165,9	495,2	2,339					3,28			10,07
Ortalamlar																	
7*	5,1	5	63,8	63,1	1170,9	677,3	1177,7	500,4	2,340					5,1	10	1,003	10,03
8	5,1	5	64	63,1	1184,2	687,6	1189,4	501,8	2,360	2,451	3,56	14,22	74,95	4,84	10,5	1,005	10,55
9	5,1	5	63	63,3	1184,1	688,5	1188,6	500,1	2,368					4,7	10,04	1,01	10,14
Ortalamlar																	
10*	5,1	7	65	64,8	1183,5	688	1190,3	502,3	2,357					3,53	11,01	0,963	11,47
11	5,1	7	64	63,8	1178,75	685,45	1185,5	500,1	2,357	2,454	3,75	14,18	73,57	5,63	14,56	0,99	14,41
12	5,1	7	63,7	63,5	1176,9	686,2	1183,3	497,1	2,368					4,85	13,78	1,0	13,78
Ortalamlar																	
13	5,1	10							2,362					5,24			14,10
14	5,1	10	Agrega bitim ile tamamen sarılamıştır, sağlıklı numune oluşturulamamıştır.														
15	5,1	10															
Ortalamlar																	

NOT: Üstü çizgili rakamlar, fazla sapma gösteren, dolayısıyla hesaplara dahil edilmeyen numunelerdir.

Birim Özgül. Ağ. (Gb) = 1,023

Agrega Kar. Efektif Özgül. Ağ. (Gef) = 2,639

Agrega Karış. Hacim Özg. Ağ. (Gsb) = 2,615

Briketeki Agreg. Miktarı = 1150 gr

VMA = Agregalar Arası Boşluk %

Vh = Hava Boşluğu %'si

Vf = Bağl. Dolu Agreg. Boşluğu %

Ek.3. Marshall Stabilit  Düzeltme Faktörleri

<u>Boy</u>	<u>Katsayı</u>	<u>Boy</u>	<u>Katsayı</u>	<u>Boy</u>	<u>Katsayı</u>
58,9	1,134	62	1,038	65,1	0,960
59	1,131	62,1	1,035	65,2	0,958
59,1	1,128	62,2	1,033	65,3	0,956
59,2	1,124	62,3	1,030	65,4	0,954
59,3	1,121	62,4	1,028	65,5	0,953
59,4	1,118	62,5	1,025	65,6	0,951
59,5	1,115	62,6	1,023	65,7	0,949
59,6	1,112	62,7	1,020	65,8	0,947
59,7	1,109	62,8	1,018	65,9	0,945
59,8	1,106	62,9	1,015	66	0,943
59,9	1,103	63	1,013	66,1	0,941
60	1,099	63,1	1,010	66,2	0,939
60,1	1,096	63,2	1,008	66,3	0,938
60,2	1,093	63,3	1,005	66,4	0,936
60,3	1,090	63,4	1,003	66,5	0,934
60,4	1,087	63,5	1,00	66,6	0,932
60,5	1,084	63,6	0,998	66,7	0,930
60,6	1,081	63,7	0,995	66,8	0,928
60,7	1,078	63,8	0,993	66,9	0,925
60,8	1,074	63,9	0,990	67	0,923
60,9	1,071	64	0,988	67,1	0,920
61	1,068	64,1	0,985	67,2	0,918
61,1	1,065	64,2	0,983	67,3	0,915
61,2	1,062	64,3	0,980	67,4	0,913
61,3	1,059	64,4	0,978	67,5	0,910
61,4	1,056	64,5	0,975	67,6	0,908
61,5	1,053	64,6	0,973	67,7	0,905
61,6	1,049	64,7	0,970	67,8	0,903
61,7	1,046	64,8	0,968	67,9	0,900
61,8	1,043	64,9	0,963	68	0,898
61,9	1,040	65	0,960	68,1	0,895

ÖZGEÇMİŞ

1975 Yılında Antalya'da dünyaya geldi. İlk ve orta eğitimi Antalya'da aldı ve 1994 yılında Antalya Gazi Lisesini bitirdi. 1995 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girdi ve 1999 yılında mezun oldu. 2000 yılında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı ve yine 2000 yılının Ağustos ayında aynı bölümde araştırma görevlisi kadrosuna atandı ve halen aynı bölümde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Yabancı dili: İngilizce

İlgi alanları : Açık hava sporları, Yüzme, Doğa gezileri ve dağcılık, Bilgisayarlar.