

**BOR ATIKLARININ ASFALT KAPLAMALARDA
MİNERAL FİLLER OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİ**

Gülden Şirin SELMAN

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Cahit GÜRER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat, 2015

Bu tez çalışması 14.MUH.06 numaralı proje ile BAP tarafından desteklenmiştir.

T.C.
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BOR ATIKLARININ ASFALT KAPLAMALARDA
MİNERAL FİLLER OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİ

Gülden Şirin SELMAN

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Cahit GÜRER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2015

TEZ ONAY SAYFASI

Gülden Şirin SELMAN tarafından hazırlanan ‘‘BOR ATIKLARININ ASFALT KAPLAMALARDA MİNERAL FİLLER OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ’’ adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve oğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Cahit GÜRER

Başkan : Prof. Dr. Mehmet SALTAN İmza
Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

ye : Yrd. Doç. Dr. Cahit GÜRER İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,

ye : Prof. Dr. Hüseyin AKBULUT İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06/02/2015

İmza

Gülden Şirin SELMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BOR ATIKLARININ ASFALT KAPLAMALARDA MİNERAL FİLLER OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİ

Gülden Şirin SELMAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Cahit GÜRER

İnsan nüfusunun artışıyla birlikte alt yapı ve buna bağlı olarak hammadde ihtiyacı da giderek artmaktadır. Bu yüzden mevcut kaynakların etkili bir şekilde kullanılması son yılların en önemli araştırma konularının başında gelmektedir.

2013 yılında Dünya toplam bor rezerv miktarı Boroksit (B_2O_3) bazında 1,3 milyar tondur. Türkiye bor rezerv durumu bakımından % 73'lük pay ile ilk sırada yer almaktadır. Fakat bor cevherinin çıkarılması ve işlenmesi sırasında her yıl 600 000 tonun üzerinde atığın ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Bu atıkların başta çevre, sonra da işletmeler açısından olumsuz etkileri bulunmaktadır.

Büyük miktardaki bor atıklarının çevresel etkilerinin azaltılması ve ekonomiye kazandırılması için kullanılabilecek en uygun sektörlerin başında inşaat sektörü gelmektedir. İnşaat sektörü hammadde ihtiyacının en fazla olduğu sektörlerin başında gelir. Yol inşaatlarında da önemli miktarlarda agrega hammaddesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bor atıklarının yol inşaatında değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik açısından büyük bir öneme sahip olacaktır.

Bu tez çalışmasında ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne bağlı Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'den alınan bor atığının (Tinkal) kurutulup, öğütüldükten sonra 200 nolu elek altında kalan kısmının bitümlü sıcak karışımlarda filler malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ağırlıkça % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 oranlarında bor atığı filler kullanılarak bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri üretilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçları kıyaslamak için ağırlıkça % 6 kireçtaşı ilaveli mineral filler ile bitümlü sıcak karışım (BSK) numuneleri üretilmiştir. Laboratuvarında Marshall Stabilite ve Akma Deneyleri, Mekanik Marshall Batırma Deneyi, Donma-Çözülme çevriminden sonra Marshall Stabilite ve Akma deneyi, Dolaylı Çekme-Rijitlik Modülü deneyi uygulanarak bor atığı fillerin bitümlü sıcak karışımlarda kullanılabilirliği incelenmiştir. Deney sonuçları bor atıklarının filler malzemesi olarak bitümlü sıcak karışım kaplamaların aşınma tabakalarında kullanılabileceğini göstermiştir.

2015, xii + 84 sayfa

Anahtar Kelimeler: Atık, Bor, Bitümlü Sıcak Karışımlar, Mineral Filler, Çevre.

ABSTRACT

M.Sc Thesis

USING BORON WASTES IN ASFALT PAVEMENTS AS MINERAL FILLER

Gülden Şirin SELMAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Advisor: Assist. Prof. Dr. Cahit GÜRER

With the increase of human population, demand for substructure and raw materials also increase. Therefore, effective using of available resources is one of the most important research topic in recent years.

In 2013 the World's total boron reserves amount is 1.3 billion tons as boron oxide (B_2O_3). Turkey, in terms of availability boron reserves, ranks first with 73 % portion. However, it is estimated that over 600 000 tonnes waste material occurred during the removing and processing of boron ore. There are negative impacts of these wastes especially on the environment and also enterprises.

The construction sector is the most suitable sector to reduce the negative effects of these huge amounts of wastes to the environment and to gain to the economy. Also, these wastes can be redounded to the economy by construction sector. Raw material needs of the construction sector are highest among the industry. The significant amount of aggregate is needed during road construction operations. If a portion of the boron wastes can be reuse in road construction, significant amounts of waste material would

be recycled and also there will be an important contribution for the environmental protection and sustainability.

In this study, boron wastes taken from ETİ Mining Corporation-Kırka Boron Company was dried and grinding and then usability of portion of the wastes that passed to sieve of Number: 200 in bituminous hot mixtures as mineral filler was investigated. Bituminous hot mixture samples were produced using 4, 5, 6, 7, and 8 % by weight boron waste originated mineral filler. Besides in order to correlate the test results of samples with waste boron filler bituminous hot mixture samples with 6 % limestone originated filler by weight produced. Usability of boron wastes as mineral filler in bituminous hot mixtures use investigated with laboratory tests such as Marshall Stability and Flow, Mechanical Marshall Immersion, Marshall Stability and Flow after freezing and thawing cycle, Indirect Tensile-Stiffness Modulus. Test results show that boron wastes can be used in bituminous hot mixture's wearing courses as mineral filler.

2015, xii + 84 page

Key Words: Waste, Boron, Bituminous Hot Mixtures, Mineral Filler, Environment.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusunu belirleyen, tez çalışmamın hem laboratuvar hem de araştırma kısmında destek ve görüşlerini esirgemeyen, her konuda görüşlerini yapıcı şekilde ileten değerli danışman hocam Yrd. Doç.Dr. Cahit GÜRER'e,

Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Afyonkarahisar Belediyesi Asfalt Üretim Tesisi Müdürü Sayın Kubilay AKIN ve Şantiye Sorumlu mühendisi Faik KARAKOÇ'a ve deneysel çalışmalarına katkılarından dolayı Ahmet İBA ve Balı Recep ENGİZ'e, İSFALT Genel Müdür Vekili Sayın İbrahim SÖNMEZ ve İSFALT laboratuvar çalışanlarına,

Bu tez çalışmasına 14.MUH.06 nolu proje ile destek olan Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine maddi desteklerinden dolayı,

Tez çalışmam boyunca her konuda sıkıntımı çeken ve üstesinden gelmemi sağlayan, varlığı ile sürekli yanımda olduğunu hissettiren, sevgili eşim Ahmet SELMAN'a ve bugünlere gelmemi sağlayan sevgili babam İbrahim SOLMAZ, annem Azime SOLMAZ ve ağabeyim Mehmet Edip SOLMAZ'a teşekkür ederim.

Gülden Şirin SELMAN
AFYONKARAHİSAR, 2015

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
3. MATERYAL ve METOT	19
3.1 Materyal.....	19
3.1.1 Agregalar	19
3.1.2 Mineral Filler	20
3.1.3 Bitüm.....	21
3.2 Metot.	21
3.2.1 Atık Malzeme Karakterizasyonu	23
3.2.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi.....	23
3.2.1.2 Kimyasal Analiz.....	23
3.2.1.3 Metilen Mavisi Deneyi	23
3.2.2 Agrega Deneyleri	25
3.2.2.1 Elek Analizi Deneyi	26
3.2.2.2 İri ve İnce Agregalar İçin Özgül Ağırlık Deneyleri	26
3.2.2.3 Filler Malzeme İçin Özgül Ağırlık Deneyleri.....	29
3.2.2.4 Sıkışık ve Gevşek Birim Hacim Ağırlık Deneyleri.....	29
3.2.2.5 Los Angeles Aşınma Deneyi	31
3.2.2.6 Agrega Darbe Dayanımı Deneyi.....	33
3.2.2.7 Agregalar İçin Donma-Çözülme Deneyi.....	34
3.2.3 Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışım Deneyleri	36

3.2.3.1 Penetrasyon Deneyi	36
3.2.3.2 Düktilite Deneyi	38
3.2.3.3 Yumuşama Noktası Deneyi	39
3.2.3.4 Parlama Noktası Deneyi	40
3.2.4 Marshall Deneyi	41
3.2.4.1 Marshall Stabilite ve Akma Deneyi	45
3.2.4.2 Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi	46
3.2.4.3 Marshall Mekanik Batırma Deneyi	48
3.2.4.4 Donma- Çözülme Çevriminden Sonra Marshall Stabilite Akma Deneyi.....	48
3.2.4.5 Dolaylı Çekme-Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi	49
4. BULGULAR.....	51
4.1 Atık Malzeme Karakterizasyonu	51
4.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi Sonuçlar	51
4.1.2 Kimyasal Analiz Sonuçları	52
4.1.3 Metilen Mavisi Deney Sonuçları	53
4.2 Agrega Deney Sonuçları.....	53
4.3 Bitümlü Sıcak Karışım Deney Sonuçları	55
4.3.1 Bitüm Özellikleri.....	55
4.3.2 Marshall Yöntemi ile Sıcak Karışım Asfalt Dizayn Sonuçları.....	55
4.3.3 Marshall Mekanik Batırma Deney Sonuçları	63
4.3.4 Donma-Çözülme Çevrimi Sonrası Marshall Stabilite Değişimleri Sonucu	64
4.3.5 Dolaylı Çekme-Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi Sonuçları.....	65
4.4 Optimum Bor Atığı Filler Miktarının Hesaplanması	66
4.5 Deney Sonuçlarının Maliyet Analizi.....	67
5. SONUÇLAR.....	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ.....	84

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	Alüminyumoksit
B_2O_3	Boroksit
°C	Santigrad
cm	Santimetre
dk	Dakika
F_2O_3	Demir Oksit
gr	Gram
kg	Kilogram
km	Kilometre
lt	Litre
m^3	Metreküp
mg	Miligram
ml	Mili Litre
mm	Milimetre
MPa	Mega Paskal
nm	Nanometre
Pa	Pascal
ppm	Milyonda Bir
SiO_2	Silisyumoksit
μm	Mikron metre

Kısaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	Amerikan Deney ve Malzeme Kurumu
B50/70	Bitüm Penetrasyon Sınıfı
BDB	Bitümlü Dolu Boşluk
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
DM	Döküm Massesi
DSM	Yay Elek
EDX	Enerji Dağılımı X Işınları

ITSM	Dolaylı ekme- Rijitlik Modülü
İSFALT	İstanbul Asfalt Fabrikaları A.Ş.
K	Kireç Taşı Kökenli Agregası Numunesi
MAB	Mineral Agregası Arasında Boşluk Değeri
P	Porland imentosu
POM	Polarize Optik Mikroskop
RM	Kırmızı Tuğla amuru
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SIBA	Sediman Yakma Taban Külü
TG	Termo Gravimetrik Analiz
TS	Türk Standartları
XRD	X Ray Difraktometresi
ZP	Zeta Potansiyeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Bor Kullanım Alanları (Boren 2013).....	4
Şekil 2.2 Dünya'daki Bor Rezervlerinin Ükelere Göre Dağılımı (Int.Kyn.4)	6
Şekil 3.1 K Agregası Yerinin Bulunduğu Harita	19
Şekil 3.2 Karacaören Kireçtaşı Agregası Ocağı	20
Şekil 3.3 Agregası Yıkama İşlemi	20
Şekil 3.4 Türkiye'de Bor Rezervinin Bulunduğu Bölgeler	21
Şekil 3.5 Tez Deneysel Çalışmasına Ait Akış Şeması	22
Şekil 3.6 Metilen Mavisini Deney İçin Hazırlanan Numune	24
Şekil 3.7 Numune Metilen Mavisini Eklenmesi ve Karıştırılması.....	24
Şekil 3.8 Metilen Mavisini Deney Sonlanması	25
Şekil 3.9 Elek Analizi Tayin Aparatları	26
Şekil 3.10 Agregası Numunesinin Su İçerisinde Bekletilmesi	27
Şekil 3.11 Filler Malzemesi ve Malzemenin Piknometre İçerisindeki Durumu.....	29
Şekil 3.12 Los Angeles Aşınma Cihazı ve Deneye Tabi Tutulmuş Numune.....	31
Şekil 3.13 Los Angeles Tamburundan Alınan Numune.....	32
Şekil 3.14 Agregası Darbelenme Değeri Tayini İçin Kullanılan Deney Cihazı.....	33
Şekil 3.15 Bitümlü Bağlayıcının Kıvam Tayini İçin Penetrasyon Cihazı.....	37
Şekil 3.16 Yumuşama Noktası Tayin Cihazı.....	39
Şekil 3.17 Parlama Noktası Tayin Cihazı.....	40
Şekil 3.18 Fraksiyonları Belli Olan Agregası Numunelerinin Hazırlanmış Halleri.....	42
Şekil 3.19 Karışımın Tartılması, Etüve Isıtılması ve Mikserde Homojen Olarak Karıştırılması.....	43
Şekil 3.20 Çalışmada Marshall Deney Numunelerini Sıkıştırmak İçin Kullanılan Otomatik Tokmak	44
Şekil 3.21 Oda Sıcaklığında Bekletilen Numuneler	45
Şekil 3.22 Hidrolik Numune Çıkarıcı ve Su Banyosu	45
Şekil 3.23 Marshall Deney Cihazı ve Numuneler	46
Şekil 3.24 Rijitlik Modülü Deney Düzenegi (Infra Test).....	49

Şekil 4.1 Filler Bor Atığının SEM Morfolojisi.....	51
Şekil 4.2 Filler Bor Atığının Kristalize Hali.....	52
Şekil 4.3 Marshall Stabilite Değeri ve Ağırlıkça Bitüm Yüzdesi İlişkisine Ait Sonuçlar	56
Şekil 4.4 Pratik Özgül Ağırlık ve Ağırlıkça Bitüm Yüzdesi İlişkisine Ait Sonuçlar..	58
Şekil 4.5 Bitümle Dolu Boşluk ve Ağırlıkça Bitüm Yüzdesi İlişkisi	59
Şekil 4.6 Boşluk ve Ağırlıkça Bitüm Yüzdesi İlişkisi	60
Şekil 4.7 Akma Değeri ve Ağırlıkça Bitüm Yüzdesi İlişkisi	61
Şekil 4.8 Mineral Agregalar Arasındaki Boşluk ve Ağırlıkça Bitüm Yüzdesi İlişkisi	62
Şekil 4.9 Marshall Katsayısı ve Ağırlıkça Bitüm Yüzdesi Arasındaki İlişki	63
Şekil 4.10 Marshall Stabilite Kaybı Sonuçları	64
Şekil 4.11 Donma-Çözülme Sonrası Marshall Stabilite Kayıpları	64
Şekil 4.12 10 °C ve 20 °C'deki Rijitlik Modülü Değerleri.....	65
Şekil 4.13 Kırka Bor Tesisinden Alınan Mineral Fillerin Ekonomik Kullanım.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Türkiye’deki Bor Mineralleri ve Bulunduğu Bölgeler (Bor Sekör Raporu 2013)	5
Çizelge 2.2 Ticari Bor Mineralleri (Bor Sektör Raporu 2013)	6
Çizelge 3.1 Yol Kaplamalarında Kullanılacak Aşınma Oranları	32
Çizelge 3.2 Donma-Çözülme ve Donma-Çözülme Sonrası Direnç Kaybı Deneyi İçin Gereken Deney Numunesi Kısımlarının Miktarları	34
Çizelge 3.3 Penetrasyon Değerleri Arasındaki Fark(Gürer 2010).....	38
Çizelge 3.4 Trafik Durumuna Göre Eşdeğer Dingil Yükleri	44
Çizelge 3.5 Marshall Metodu İle Aşınma Tabakası Dizayn Kriterleri (TCK 2013)	47
Çizelge 3.6 Minimum MBA Değerleri	47
Çizelge 3.7 Optimum Bitüm Miktarında Boşluk Yüzdesi (Orhan 2012)	48
Çizelge 4.1 Bor Atığının Kimyasal Analiz (EDX) Sonuçları	52
Çizelge 4.2 Metilen Mavisi Sınır Miktarları	53
Çizelge 4.3 Agrega Özgül Ağırlık ve Su Emme Deneyi Sonuçları.....	54
Çizelge 4.4 Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	54
Çizelge 4.5 Agrega Gradasyon Dizaynı.....	54
Çizelge 4.6 Bitümlü Bağlayıcıya Ait Mühendislik Özellikleri	55
Çizelge 4.7 Filler Olarak Kireçtaşı ve Bor Atığı İçeren Asfaltın İçerik Oran ve Miktarları.....	67
Çizelge 4.8 Bitümün İzmir ve İzmit Rafinerilerinden Nakliye Bedelleri	67
Çizelge 4.9 Afyonkarahisar ve Kırka için Bitüm Maliyetleri (Int. Kyn.9).	68

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, sanayileşme ile paralel olarak yaşanan hızlı kentleşme ve nüfus artışı, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de alt yapı ihtiyacını ve buna bağlı olarak hammadde ihtiyacını da giderek artırmaktadır. Bu yüzden mevcut kaynakların etkili bir şekilde kullanılması ve sürdürülebilirlik son yıllarda üzerinde en çok tartışılan ve araştırılan konularının başında yer almaktadır.

Dünyanın doğal kaynaklarının tükenmesine ilişkin endişeler giderek kendini daha fazla göstermeye başlamış ve 1992'de Rio de Janeiro'da yapılan Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı tarihte görülmuş en büyük devlet başkanları toplantısının yapılmasına neden olmuştur. Bu ve bunu izleyen diğer zirvelerin ardından, sürdürülebilir kalkınma ilkesi Avrupa Birliği'nin Amsterdam Anlaşması'na da dâhil edilmiştir (Akbulut ve Güner 2003).

Birleşmiş Milletler Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu tarafından 1987 yılında yayınlanan Brundtland Raporuna göre: "İnsanlığın, gelecek kuşakların gereksinimlerine cevap verme yeteneğini tehlikeye atmadan, günlük ihtiyaçlarını temin etmesi" sürdürülebilirlik olarak tanımlanmaktadır (Int.Kyn.1). Sürdürülebilirliğin amacı ekonomik ve sosyal gelişim olduğu kadar, tüm bunları sağlarken aynı zamanda çevreye de zarar vermemektir. Sürdürülebilir kalkınma, temel insan ihtiyaçları için doğal çevreye zarar vermeksizin bölgesel ve küresel çabaları içerir (Altunbaş 2003-2004, Kaypak 2011).

Atıklar, sürdürülebilirlik bakımından iki önemli etkiye sahiptir. Birincisi oluşan atıklar, kaynakların ne derece etkin ya da verimli kullanıldığının bir göstergesidir. İkincisi atıkların çevreye duyarlı ve ekonomik biçimde uzaklaştırılması gereğidir. Atık yönetiminin ilk kuralı atık üretilmesinin engellenmesi, aynı zamanda kaynakların korunması anlamına gelmektedir. Atık, yok edilmesi gereken bir madde değil geri kazanılması gereken kaynak olarak görülmelidir. Sürdürülebilir atık yönetiminde hedef, kaynakların kullanımı sonucunda oluşan atıkların faydalı amaçlar doğrultusunda tekrar kullanılmasıdır (Int.Kyn.2, Int.Kyn.3).

Son yıllarda, sanayi faaliyetleri sonucu ortaya çıkan atıkların miktar olarak artması, bertaraf yöntemlerinin büyük maliyetler getirmesi ve bu atıkların değişik üretimlerde değerlendirilebilirliğinin tespiti ile söz konusu atıkların tekrar kullanılmak üzere geri kazanılması benimsenmiş ve uygulanabilir hale getirilmesi için yapılan araştırmalara hız verilmiştir (Karpuzcu vd. 2012).

Gelişmiş ülkelere bakıldığında neredeyse atıkların % 50'lik kısmının tümüyle geri dönüştürülerek ekonomiye kazandırıldığı görülmektedir. Bu bağlamda Türkiye'de de açığa çıkan bor atıklarının geri kazanılabilecek özellikte olması ülke ekonomisine fayda sağlayacağı gibi, çevresel etkileri de en aza indirecektir.

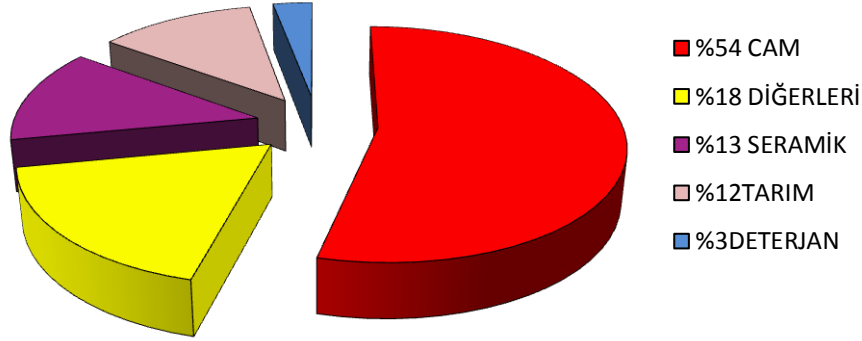
Hammadde ihtiyacı ve ortaya çıkan atık miktarı açısından inşaat sanayisinin tüm sanayi dalları arasında ilk sırayı aldığı bilinmektedir. Oluşan bazı atıkların da yol üstyapılarının yapımında değerlendirilmesi mümkündür. Son yıllarda atık malzemelerinin yapı malzemesi olarak kullanımı konusu ilgi çeken araştırma konuları arasındadır. Yol inşaatı, hammadde ihtiyacının en fazla olduğu inşaat uygulamaları arasında yer alır. Yol yapım aşamasında filler, bitümlü karışımlarda ince agregası oranını artırmak, boşluk miktarını azaltmak ve yüksek sıcaklıklarda karışımın deformasyona karşı dayanımını artırmak için % 3 ile 9 oranları arasında kullanılmaktadır (Çelik vd. 2007, Umar ve Ağar 1994). Ayrıca Gubler (1999) küçük filler daneciklerinin BSK içerisinde oksijen difüzyonunu önleyerek yaşlanmayı geciktirdiğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra, bitüm ile birlikte ince agregaya karşı kayganlaştırma ve bağlayıcı etkisi göstererek harç elde etmeyi sağlar. Bahsedilen bu ikili fonksiyon, mineral fillere özgüdür ve onu diğer agregalardan ayırır (Üstümkol ve Turabi 2010). Fillerin istenilen özelliklerde olmaması durumunda kaplama stabilitesi, asfalt ile doldurulan boşluk yüzdesi ve birim ağırlığı azalır. Ayrıca bitümlü sıcak karışımlarda mineral filler oranının fazla olması durumunda kaplama esneklik özelliğini yitirecek ve bunun sonucunda da kaplamada çatlamlar meydana gelecektir. Geçmişte mineral filler ile ilgili yapılan araştırmalar sonucunda mineral fillerin tipi ve miktarının bitümlü sıcak karışımların performansını etkileyeceği belirtilmiştir (Çelik vd. 2007, Wang *et al.* 2011, Kuity *et al.* 2014). Ülkemizde yalnızca ETİBOR AŞ. Kırka Bor İşletme tesislerinde yıllık 400 000 ton'a yakın atık oluştuğu belirtilmiştir (Karasu vd. 2002). Bu atıklar atık göletlerine ve denizlere boşaltıldığında, zirai sulamaya, yer altı sularına, su canlılarına ve bitkiler üzerinde çeşitli zararlara neden

olabilmekte, işletmelerin yakınlarında atık yığınları ve depolama problemleri meydana gelmektedir. Halbuki bu atıklar işletmelere yakın çevredeki yol inşaatlarında değerlendirilerek kısa süre içerisinde bertaraf edilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında Eti Maden İşletmeleri, Kırka Bor İşletme Müdürlüğü'nden alınan bor (Tinkal) atığı numunelerinin bitümlü sıcak karışımların aşınma tabakalarında filler olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. B50-70 bağlayıcısı kireçtaşı kökenli iri ve ince agregaya ve mineral filler olarak bor atığı kullanılarak bitümlü sıcak karışım numuneleri hazırlanmış ve laboratuvar ortamında deneylere tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında öncelikle atık malzeme karakterizasyonu yapılmış, sonrasında agregaya ve bitümlü sıcak karışım deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel bulgulardan bor atığının orta ve düşük trafik hacimli yol üstyapılarının aşınma tabakalarında ağırlıkça % 5,7 miktarında filler malzemesi olarak kullanılabilmesi ve sıcak karışım asfalt kaplamalardaki davranışının geleneksel filler kullanılarak üretilen BSK numunelerine yakın olacağı sonucuna varılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bor periyodik tabloda (B) simgesi ile gösterilip, Bor'un atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve ergime noktası 2190 °C olup, periyodik sistemin üçüncü grubunun başında yer almaktadır. Bor, yerkabuğunda yaygın olarak bulunan 51. elementtir. Bor ve 250 çeşide ulaşan uç ürünleri, dünyada gelişmiş ülkelerde endüstri ve teknolojik alanlarda kullanılmaktadır. Bor ve bor ürünleri geçmişten günümüze kadar çeşitli alanlarda kullanılmıştır. 4 bin yıl önce ilk kez Tibet'te kullanılan bor, Babiller tarafından ergitici olarak, Mısırlılarda mumyalama işlemlerinde, Eski Yunan ve Romalılar'da temizlik amacıyla, Araplar'da ise bor tuzu ilaç yapımında kullanılmıştır. Bugün bor özellikle cam ve fiberglas, nükleer güç, tarım sektörlerinde özellikle kullanılırken aynı zamanda yangın ve yalıtım malzemeleri, deterjan üretiminde, tıp alanında da kullanılmaktadır (Selman 2013). Bor kullanım alanları Şekil 2.1' de verilmiştir.



Şekil 2.1 Bor kullanım alanları (Boren 2013).

Doğada serbest halde bulunmayan bor genellikle sodyum, kalsiyum ve magnezyum tuzları halinde bulunur. Diğer tuzlar gibi bu tuzlar da hidrojen iyonunun bir baz katyonu ile yer değiştirmesi ile oluşurlar. Bor yatakları genellikle bir alkali katyonu ile birleşmiş, değişik miktarlarda su içeren borat minerallerinden oluşurlar. Ticari açıdan en önemli bor mineralleri tinkal, kolemanit, kernit, üleksit ve sınırlı miktarda probertit'dir (Köseoğlu ve Bayça 2002).

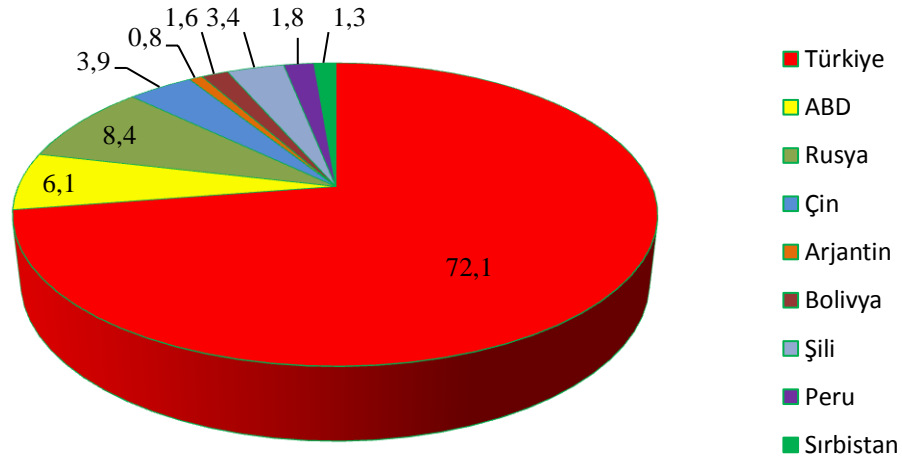
Türkiye'deki bor mineralleri Eskişehir, Balıkesir, Kütahya ve Bursa çevrelerinde bulunmakta olup, bor minerallerinin kontrolü, işletilmesi ve pazarlanması Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından yapılmaktadır (Çizelge 2.1). Çıkarılan bor mineralleri ham bor, konsantre bor, rafine bor ve uç ürün olmak üzere dört grupta sınıflandırılır.

Çizelge 2.1 Türkiye'deki bor mineralleri ve bulunduğu bölgeler (Bor Sekör Raporu 2013).

<i>Cevher</i>	<i>Toplam (Ton)</i>
<i>Emet (Kolemanit)</i>	1 818 264 009
<i>Kırka (Tinkal)</i>	838 152 732
<i>Bigadiç (Kolemanit-Üleksit)</i>	636 287 478
<i>Kestelek (Kolemanit)</i>	5 420 009
<i>Toplam</i>	3 298 124 228

Saf olmayan maddelerin işlenmesi sırasında büyük miktarlarda atık malzeme açığa çıkmakta ve giderek daha büyük bir problem haline dönüşmektedir. Yapılacak farklı uygulamalarla hammadde kaynağı olarak atık kullanmak; hammadde ve stok alanları sıkıntısını, yeni kaynaklar için doğacak talepleri ve aynı zamanda çevre üzerindeki olumsuz etkileri de azaltacak, bu şekilde hem özkaynaklar hem de çevre korunmuş olacaktır (Emrulloğlu ve Emrulloğlu 2002, Kavas ve Önce 2002, Uslu ve Arol 2004, Akbulut ve Gürer 2007, Kardeşin ve Terzi 2007, Safiuddin *et al.* 2010, Yılmaz vd. 2011, Jony *et al.* 2011, Chen *et al.* 2011, Selman 2013).

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği ortalama 10-20 ppm olmakla birlikte ABD'nin batı bölgeleri ve Akdeniz'den Kazakistan'a kadar uzanan yörede yüksek konsantrasyonlarda bulunur. Deniz suyunda 0,5-9,6 ppm, tatlı sularda ise 0,01-1,5 ppm aralığındadır. Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikler olarak daha çok Türkiye ve ABD'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu bölgelerde bulunmaktadır. Dünya'daki bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı Şekil 2.2'de görülmektedir (Int.Kyn.4).



Şekil 2.2. Dünya'daki bor rezervlerinin ülkelere göre dağılımı (Int.Kyn.4).

Türkiye sahip olduğu bor rezervleri bakımından dünyada ilk sırada yer almaktadır. Türkiye'de bulunan bor mineralleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Ticari bor mineralleri (Bor Sektör Raporu 2013).

Mineral	Formül	İçerik, %B ₂ O ₃
Kolemanit	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O	50,8
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ .8H ₂ O	43
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	35,5
Kernit	Na ₂ B ₁₄ O ₇ .4H ₂ O	51
Pandermit	Ca ₄ B ₁₀ O ₉ .7H ₂ O	49,8
Hidroboraksit	CaMgB ₆ O ₁₁ .6H ₂ O	50,5

Özellikleri nedeni ile borun kullanım alanlarındaki keşif süreci halen devam etmektedir. Son yıllarda borun enerji sektörü, tarım, insan ve hayvan sağlığı alanlarında kullanımına yönelik araştırmalar daha da yoğunlaşmıştır (Boren 2013).

Bor elementinin doğada bulunuş itibariyle insan, hayvan ve bitkiler için herhangi bir olumsuz yanının olup olmadığı hakkında birçok araştırma yapılmıştır (Karadeniz 1996, Ünlü 2004, Uygan vd. 2004, Doğan vd. 2005, Demirtaş 2010, Miçillioğlu 2010, Int.Kyn. 5).

Bor tarım ve çevre açısından önemli bir mikro(iz) elementtir. Bor endüstrisi atıkları, göllere ve denizlere boşaltılmaları durumunda suda yaşayan canlılara, zirai sulamada kullanılmaları halinde de bitkilere zarar vermektedir (Aşkın 1998). Bitkiler için genel olarak bor düşük miktarlarda gerekli, yüksek miktarlarda ise toksik etkiye sahiptir. Bitkiler, bora genellikle çok az oranlarda gereksinim duyarlar ancak, bor bitki beslenmesinde önemli bir mikro elementtir. Kök gelişimi, çiçek ve meyve oluşumu üzerinde fizyolojik rollere sahiptir. Bor, bitkilerde önemli metabolik işlevlere sahiptir ve toprakta bor bulunmaması durumunda bitki gelişimi durmaktadır. Bor bitkileri geliştirmek için kullanıldığı gibi bitki gelişimini önlemek için de kullanılabilir. Yabani ot kontrolünde ve toprak sterilizasyonunda kullanılır. Ancak borun eksikliğinde de fazlalığında da bir takım sorunlar ortaya çıkmaktadır. 1 ppm'in üzerinde bor fazlalığı yaprağın görüntüsünü ve boyunu etkilemektedir (Ünlü 2004, Uygan vd. 2004, Doğan vd. 2005, Demirtaş 2010, Miçillioğlu 2010).

Bor bileşikleri; vücuda solunum ve sindirim yolu aracılığı ile girmekte, insanların bora maruz kalması ise en fazla yiyecek ya da su vasıtasıyla olur. İnsan vücudu günlük ortalama 10-20 mg bor almaktadır. Yapılan çalışmalarda borun insan vücudu için çok yararlı etkileri tespit edilmiştir. Borun kalsiyum ve D vitamini olmak üzere vücut minerallerinin düzenlenmesinde, kalsiyum ve magnezyum azalmasını önleyerek kemik yapısını koruduğu belirlenmiştir. Vücuda nasıl girerse girsin, % 90-95 kadarı vücutta birikmeden hemen idrar ile dışarı atılmaktadır. Borun kemoterapi sonrası radyoaktif maddelerin etkisini azaltmak üzere kullandığı bilinmektedir (Ünlü 2004, Uygan vd. 2004, Doğan vd. 2005, Demirtaş 2010, Miçillioğlu 2010).

Hayvanlar üzerinde yapılan çalışmalarda borik asitin hayvanlar için öldürücü dozu, hayvanın türüne bağlı olarak hayvanın her kg'ı için 1,2 - 3,45 gr arasında değişmektedir. Hayvan içme suyunda 2500 mg/lit borik asit bulunması büyümeyi engellediği için zararlıdır. Bor bileşikleriyle temasın kansere yol açmadığı, genleri değiştirmediği ve yüksek yoğunluklarda bile kromozom düzensizliğine sebep olmadığı ispatlanmıştır (Ünlü 2004, Uygan vd. 2004, Doğan vd. 2005, Demirtaş 2010, Miçillioğlu 2010).

Artan tüketim hızı ve nüfus artışı ve buna paralel olarak hızla çoğalan atık ve artık malzemeler ve bu malzemelerin stoklanması, geri kazanımı ve kullanılması günümüzün en önemli sorunları arasında bulunmaktadır. Çok sayıda bilim insanı bu konu üzerinde araştırmalar gerçekleştirmiştir (Karadeniz 1996, Bentli vd. 2002, Gürer vd. 2004, Oruç vd. 2004, Palabıyık ve Altunbaş 2004, Lüy vd. 2007, Batar vd. 2009, Yenmez 2009, Selman 2013, Int. Kyn.2, Int. Kyn.3). Bor cevheri bakımından dünyanın en büyük rezervine sahip ülkemizde de, bor atıkları depolama ve çevresel kaygılar bakımından önemini koruyan çevre sorunları arasındadır. Amerika'daki bor madenlerinin işletilmesi sırasında çevreye zarar verilmemesi için gerekli tedbirlerin alınması en önde gelen aşamalardan biridir (Griffin and Downing 2001).

Bor atıkları genellikle seramik sanayisinde sır ve çini hamuru olarak, yer ve duvar karosunda, çimento, tuğla, kiremit üretiminde, hafif beton ve hafif yapı elemanı olarak, cam, emaye alanında hammadde veya katkı maddesi olarak kullanılabilir. Tez çalışmasının bu kısmında bor atıklarının çeşitli şekillerde değerlendirilmesiyle ilgili yapılmış çalışmalar ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Ediz ve Özdağ (2002) yaptıkları araştırmada bor cevherlerinin ve atıklarının zenginleştirilmesinde kullanılabilecek yeni bir yöntemin geliştirilmesine çalışmışlardır. Bu amaçla endüstride katı-sıvı ayırım işleminde ve malzeme taşımada kullanılan helezon taşıyıcıyı yeniden tasarlamışlar ve Etibor A.Ş. Kırka Boraks İşletmesi konsantratör tesisine beslenen (-25) mm tinal cevheri ile konsantratör atığı olan kil pestilinin doğrudan zenginleştirilmesini sağlamışlardır. Cihaz, değişik zenginleştirme şartlarında denenerek optimum çalışma parametreleri belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, cevherde % 88,66 B₂O₃ çözünürlüğü elde edilmiştir. Kil pestilinde ise maksimum B₂O₃ çözünürlüğü % 87,83 olarak gerçekleşmiştir.

Demir ve Orhan (2002) Kırka Boraks işletmesi bor atıklarının pomza kumu ile belli oranlarda karıştırılarak plastik şekillendirme esasına uygun olarak numuneler hazırlamışlardır. Çalışmada kullanılan kil hammaddesinin mineralojik ve kimyasal analizleri yapılmış, ön deneyler için örnekler üzerinde şekillendirme, kurutma ve pişirme testleri uygulanarak optimum karışım oranı ve pişirme sıcaklıkları belirlenmiştir. Numuneler üzerinde kuruma küçülmesi, toplam küçülme, plastisite, ateş

kaybı vb. fiziksel testler uygulanarak elde edilen sonuçları değerlendirmişlerdir. Pomzanın bor atığı ile ağırlıkça % 50 oranında karışım yapılarak 900 °C sıcaklıkta pişirilmesi ile porozitesi yüksek, birim hacim ağırlığı düşük (hafif) bir malzeme üretilebileceğini belirlemişlerdir. Araştırmacılara göre ürün bünyesinde oluşan yüksek porozitenin normal yapı tuğlalarına göre önemli ölçüde ısı yalıtım özelliği kazandıracığı ifade edilmiştir.

Ediz vd. (2002) yaptıkları çalışmada Etibor Kırka Boraks İşletmesi DSM (Dutch State Mines; yay eleği), elek üstü atığının duvar karosunda dolgu malzemesi olarak kullanımını araştırmışlardır. Duvar karosu içerisinde yer alan silis kumundan % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 25 oranlarında çıkarılıp yerine DSM elek üstü atığı kullanmışlardır. Sonuç olarak duvar karosu bünyesinde silis kumu yerine dolgu malzemesi olarak DSM elek üstü atığının kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır. Ayrıca duvar karosu bünyesinde silis kumu yerine dolgu malzemesi olarak DSM elek üstü atık kullanarak yapılan maliyet analizinde silis kumundan; % 10 \$/tona varan tasarruf sağlanmıştır. Araştırmacılar endüstride duvar karosu üreten işletmelerde silis kumunun % 20 oranlarına kadar kullanıldığını belirterek elde edilecek getirinin daha da yüksek olabileceğini ifade etmişlerdir.

Kavas ve Önce (2002), Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantratör atıklarının yapı tuğlası üretiminde (pres tuğla) ergitici eleman olarak kullanılabilirliği araştırmışlar ve iki farklı bor atığı % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında Afyon bölgesinde üretilen tuğla harmanına ilave edilerek pres tuğla yapımı gerçekleştirmişlerdir. Tuğla numunelerinin pişme kabiliyetleri, pişme sonrası basma ve üç nokta eğilme dayanımları ile su emme, pamuklaşma gibi özelliklerini incelemişler ve bor atıklarının preslenmiş tuğla numunelerinin pişme sıcaklığını önemli oranda düşürdüğü, su emme ve pamuklaşma miktarlarını ise azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Karasu vd. (2002) Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantre ve türev atıklarının duvar karosu bünye özelliklerine etkisi adlı çalışmalarında seramik sektöründe kullanılmak üzere alternatif hammadde kaynakları arayışına ve ülkemiz bor teknolojisinin gelişimine katkıda bulunmak üzere Etibor Kırka Boraks İşletmesi konsantre ve türev atıklarının duvar karosu bünyesinde son ürünün mekanik mukavemet ve su emme değerlerini

bozmadan değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan bu çalışma sonunda konsantre atığının % 10 seviyesinde, aynı şekilde türev atığının da % 5 oranında duvar karosu yapımında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Targan vd. (2002) doğal puzolan olan kula cürufunu, bentonit ve bor minerallerinden birisi olan kolemanit konsantratör atığının birlikte değerlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında doğal puzolanlar ve atıklar çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bu sayede çimento üretiminde enerji tasarrufu sağlanması ve atık maddelerin çevreye verebilecekleri olumsuz etkilerin giderilmesi de amaçlanmıştır. Kula cürufu ve bentonit kütlece % 5, % 10, % 15, % 20, % 25, % 30'luk oranlarda katkı maddesi olarak denenmiştir. Katkıların, çimento priz süresi, hacim genişmesi, eğme dayanımı, basınç dayanımı gibi özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Çimento karışımların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin Türk Standartlarıyla uyum halinde olduğunu belirtmişlerdir.

Emrulloğlu vd. (2002) çalışmalarında, yer karosu bünyesine belirli oranda ilâve edilen Etibor Kırka Boraks Tesisi atığının yer karosunun özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Laboratuvar ölçekli çalışmada, atık malzemenin karakterizasyonu, preste şekillendirme, sinterleme ve ürünlerin özellikleri incelenmiştir. Etibor Kırka Boraks Tesisi atıklarının x-ışını kırınımı analizini yapmışlar ve atığın dolomit, montmorillonit, kalsit ve boraks'dan oluştuğunu belirlemişlerdir. Bu çalışma sonucunda araştırmacılar kırka boraks atığının yer karosu bünyesine katılması durumunda ürün özelliklerinin daha da iyileşeceğini düşünmüşlerdir.

Özdemir vd. (2003) Etibank Kırka Boraks Tesislerinden üretim sırasında oluşan ve çevre kirliliğine neden olan katı atıkların değerlendirilmesi amacı ile konsantratör tesisi atığı boraks şlamp katısından bor trioksitin (B_2O_3) su ile katı-sıvı özütlemeye ile geri kazanılması için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada katı/sıvı oranı, reaksiyon süresi ve reaksiyon sıcaklığı parametrelerinin özütlemeye etkisi araştırılmıştır. En yüksek verim 1/120 g/ml katı/sıvı oranı, 60 dakika reaksiyon süresi ve 75 °C reaksiyon sıcaklığı koşullarında elde edilmiştir. Katı/sıvı oranı arttıkça sıvı faza geçen bor trioksit yüzdesi azalmıştır. Yazarlara göre katı-sıvı karışımındaki katı miktarı arttıkça, ortamda

çözücünün çözebileceğinden daha fazla bor kalmaktadır. Reaksiyon sıcaklığı arttıkça sıvı faza alınan bor trioksit (B_2O_3) verimi, çözünürlüğün artması nedeni ile artmıştır.

Uğurlu vd. (2004) çalışmalarında, tinkal üretimi sırasında boraks minerali konsantre hale getirilirken ortaya çıkan ve kil pestili olarak adlandırılan katı atıkların çimento içerisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Boraks atıkları kil minerali ile aynı bileşenleri içermesi nedeniyle hafif bir puzolanik karakter taşımaktadır. Buradan hareketle, çalışmada söz konusu atık malzemenin çimento içerisinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Boraks içerikli kil pestili atığı çimento, harç ya da beton içerisinde yapısındaki jips nedeniyle geciktirici olarak işlev görmektedir. Araştırmacılar harç içerisine düşük yüzdelerde (% 1,5) kil pestili atığı katılması sonucu basınç ve çekme dayanımında az da olsa artışlar meydana geldiğini belirtmişlerdir. Kil pestili atıklarının harçta kullanımı ile beton içyapısında, herhangi olumsuz bir sorun gözlenmediği aksine düşük yüzdelerdeki kullanımı ile daha yoğun bir içyapı elde edildiği ve bu durumun teorik olarak üretilen malzemenin geçirimsizliğini olumlu yönde etkileyebileceği ve onu durabilite yönünden güçlendireceği belirtilmiştir. Araştırmacılara göre daha önce farklı yapı malzemeleri içerisinde değerlendirilen bu atıklar, harç ve beton içerisinde çimentolu bağlayıcılarla birlikte değerlendirilebilir.

Karacasu vd. (2004) yaptıkları çalışmada boraks, sepiyolit, zeolit, atık lületaşı ve sediman yakma taban külü (SIBA) kirlenmiş nehir tortularını kullanarak asfalt betonunda kullanılabilme olasılığını araştırmışlardır. Burada boraks, sepiyolit, zeolit, lületaşı ve sediman yakma taban külünün (SIBA) dolaylı çekme dayanımı, yoğunluğu, Marshall stabilite ve akma özellikleri incelenmiştir. Asfalt beton karışım hazırlığında karışıma % 0, % 4 % 7 ve % 10 oranlarında boraks, sepiyolit, zeolit, lületaşı eklenmiş ve optimum bitüm miktarında SIBA etkilerine bakılmıştır. Yapılan SIBA etkileri sonucunda eklenen yüzde miktarların dolaylı çekme dayanımını ve yoğunluk değerlerini azalttığı akma değerlerini ise artırdığı tespit edilmiştir. Farklı miktarlarda ve farklı oranlarda hazırlanan numunelerde Marshall stabilite değerinin sepiyolitte artış gösterdiği, boraks, zeolit, lületaşı ve SIBA ile hazırlanan numunelerde ise azaldığı belirtilmiştir.

Elbeyli (2004) B_2O_3 'in atıktan uzaklaştırılmasını ve düşük boron içeriğine sahip B_2O_3 'in bir katkı maddesi olarak, çimentoda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla bor oksit uzaklaştırılması için ve toksit azaltmak için su ile muamele edilmiş, yıkamadan sonra muamele edilmiş ve edilmemiş bor atığı % 5 oranda Portland çimentosuna (PÇ 42,5) ilave etmiştir. Le Chatelier genişleme ve incelik özellikleri belirlenmiş, basınç dayanımı test edilmiş ve sonuçlar Portland çimentosu özellikleri ve Avrupa Standartları (EN 196) ile karşılaştırılmıştır. Yüksek bor seviyesine sahip boroksit (B_2O_3) ve Portland çimento katkısı basınç dayanımında bir azalmaya, bununla birlikte sağlamlık özelliğinde artışa neden olduğu gözlenmiştir. (B_2O_3)'ün suda çözülebilir saf olmayan maddelerin azaltılmasından sonra bir çimento katkı maddesi olarak kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Sağlam ve Emrulloğlu (2004) kırka bor atığının değişik hammaddelerle karıştırılarak kalsine edilmesi sonucu sert porselen bünyesinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Laboratuvar çalışmaları; ham ve atık malzemelerin karakterizasyonu, kalsinasyon deneyleri, döküm tekniği ile şekillendirme, kurutma, sinterleme ve nihai ürünlerin karakterizasyon aşamalarından oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarını üç bölümde yapmışlardır. Birinci bölümde Kırka bor atığının, sert porselen üretiminde kullanılan hammaddelerle karıştırılarak kalsine etmişlerdir. Kalsinasyon çalışmaları sonucunda ideal reçete olarak belirlenen ve % 67,5 oranında Kırka bor atığı içeren reçete, ikinci bölüm çalışmalarında kullanmak üzere çoğaltmışlar ve ideal reçete olarak belirlenen kalsine edilmiş malzeme, porselen döküm massesine % 0, % 2, % 4, % 6, % 8, % 10 gibi artan oranlarda ilave etmişlerdir. Üçüncü aşamada ise porselen plastik masse reçeteleri ile elde edilen numunelere deformasyon, kuru mukavemet, çekme, porozite ve su emme deneyleri yapmışlardır. Örneklerin katkısız porselen örneklerle ve birbirleriyle karşılaştırmışlar ve % 2, % 4, % 6 katkı içeren reçetelerde katkısız reçeteye göre daha düşük çıkan kuru mukavemet değerinin, % 8 katkı içeren reçetede daha büyük olduğunu belirlemişlerdir.

Uslu ve Arol (2004) bor cevherinde açığa çıkan kil atıklarının fazla olması ve bu atıkların hem çevreye etkisi hem de ekonomik açıdan zararlı olması, açığa çıkan bu atıkların bir şekilde bertaraf edilmesi için kırmızı tuğlalarda katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bor bileşikleri açısından zengin olan Kırka Bor

işletmesinden alınan kil içerikli olan bor atığının kırmızı tuğla üretiminde kullanılabilir olup olmadığını araştırmak için bor atığını % 30'a kadar eklemişler, tuğla su absorpsiyonu, basınç dayanım ve yoğunluk gibi özellikleri incelenmiş ve kullanılan atıkların tuğla kalitesini artırdığını görmüşlerdir. Araştırmacılar sonuç olarak 900 °C den az sıcaklıklarda kil atığının tuğla üretiminde kullanılabilineceği sonucuna varmışlardır.

Elbeyli vd. (2004) yaptıkları çalışmada inşaat tuğlası üretiminde katkı olarak boraks atığının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikle atıktaki B₂O₃ miktarı liç prosesi ile soda çözeltisi kullanılarak uzaklaştırılmış ve toksik etkisi düşürülmüştür. Tuğla kompozisyonuna kuru örnek üzerinden % 10, % 20, % 30 oranlarında atık katılıp 10 bar basınçla preslenmiş ve 970 °C, 1000 °C ve 1030 °C'lerde pişirilmiştir. Pişme sıcaklığının ve katkı yüzdesinin inşaat tuğlasının soğukta basma mukavemeti, porozite, su absorpsiyonu, hacim yoğunluğu ve kızdırma kayıpları üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Araştırmacılar atık oranının ve pişme sıcaklığının tuğla kalitesi üzerinde etkili faktörler olduğunu belirtmişlerdir. Elbeyli vd.'ne göre tuğlanın soğukta basma mukavemeti, atığın katkı yüzdesi ve pişme sıcaklığının artmasıyla düşmektedir. İyi kaliteli tuğla üretiminde şartlar % 18 nem içerikli % 10 boraks atığının tuğlaya katılması ve 1000 °C de pişirilmesi şeklinde belirlenmiştir.

Bentli vd. (2004) çalışmalarında ince boyuttaki kolemanit konsantrelerinin genellikle satışının mümkün olmamasının ve stoklanarak bekletilmesi sorununu en aza indirmek için Emet-Hisarçık şlam atık sahasından alınan aldıkları numuneyi, hidrosiklonla zenginleştirilmiş ve daha sonra briketlenerek boyut kazandırmışlardır. Şlam atıklarının hidrosiklon ile zenginleştirilmesi sonucunda % 35,86 B₂O₃ (bor oksit) tenörlü kolemanit konsantresi % 60,62 bor kazanma verimi elde edilmiştir. Zenginleştirilmiş malzemenin satılabilir ürün haline getirilmesi amacıyla yapılan briketleme deneylerinde, konsantrelerin bağlayıcısız ve bağlayıcı olarak boyut kazandırılabilceğini tespit etmişlerdir.

Topçu vd. (2004) tinkal üretimi sırasında boraks minerali konsantre hale getirilirken ortaya çıkan ve kil pestili olarak adlandırılan katı atıkların çimento (dolayısıyla harç ve beton) içerisinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada çimento inceliğinde

öğütülen kil pestili atığı Portland Çimentolu harç içerisine değişik oranlarda katılarak hazırlanan numunelerin salt çimentolu şahit numuneler ile karşılaştırmasını yapmışlar ve TS 24 standardını esas alarak deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Numuneler hazırlanırken biri katkısız diğerleri çimentodan % 1, % 1,5, % 2,5, % 5, % 7,5, % 10, % 15, % 20 eksilti olarak yerine katkı ilave edilen toplam 9 seri numune üretmişler ve tinal üretiminde ortaya çıkan, kil pestili olarak isimlendirilen atık malzemenin çimento, harç ve dolayısıyla beton içerisinde değerlendirilebilirliğini araştırmak üzere yürütülen çalışmalar kapsamında basınç dayanımı, çekme dayanımı, ultra ses geçiş süresi, birim ağırlık ve priz süresi deneylerini yapmışlardır. Araştırmacılar sonuç olarak bor atığının çimento, harç ve dolayısıyla beton içerisinde kullanımının mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

Ediz vd. (2004) çalışmalarında kil pestili atığını firitleştirerek çini karo bünyesindeki albitin (Na-feldispat) yerine kullanmışlardır. Elde edilen ürünlerin reolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri incelemişler, bu yeni malzemenin çini karo bünyesinde alternatif bir ergitici hammadde olarak kullanılabilmesini düşünmüşlerdir. Ayrıca kullanılan bu malzemenin oluşturulan süspansiyonların reolojik özelliklerine olumsuz bir etkisini gözlemlememişler, kil pestili atığının firitleştirilmesi sonrasında ağırlıkça % 56 oranında azalma olduğunu kaydetmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar bu sonucun kil pestili atığı için stok alanı sorununu ortadan kaldıracağını da düşünmüşlerdir.

Kavas (2006) Kırka tesisinden alınan bor kili ve ince atıkların kırmızı tuğla çamuru (RM) üretiminde eritici olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada tuğla üretimi için malzemelerin karakterizasyonu ve endüstriyel ölçekli testleri laboratuvar ortamında benzer kimyasal bileşime sahip olan ancak farklı iki tür ve oksit içeren % 5, % 10 ve Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 ve ağırlıkça % 15 RM (kırmızı tuğla çamuru) eklenip gerçekleştirilmiştir. Numuneler altı farklı türde üretilip, 700 °C, 800 °C ve 900 °C'de ısıtılma işlemine tabi tutularak basınç dayanımı, su emme, dona dayanım ve zararlı kireç testlerinin yüzeyi kuru küçülme etkisine bakılmıştır. Yapılan minerolojik ve mekanik deneyler sonucunda bor atıklarının RM tuğla üretiminde bir ergitici olarak kullanılabilmesine, özellikle de ağırlıkça % 15 eklenen bor kili ve ince atıklarının en iyi davranışı sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Batar vd. (2009) % 0-5 perlit, % 0-2,5 atık kağıt, % 0-5 kalsine tinkal ve % 3,5-17,7 atık kalsine tinkal kullanılarak sıva malzemesi üretmişlerdir. Üretilen malzemelerin mekanik ve ısıl özelliklerini belirleyerek TS 825 2008 ve TS 12808-3 değerleri ve piyasada kullanılan sıva malzemeleri ile karşılaştırmasını yapmışlar, ısıl zenginleştirilme sonucu elde edilen konsantreyi ve atığı ayrı ayrı değerlendirmişlerdir. Elde edilen katkılı ürünler piyasadaki sıva malzemesi ile karşılaştırıldığında ısı geçirgenlik direnci, mukavemet değerlerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Bor atıklarının yeni bir sıva malzemesi olarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Christogerou vd. (2009) seramik sektörünün ağır kil potansiyeline sahip olması ve bor atığının kil kısmının önemli miktarda olması nedeniyle bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar Kırka boraks bor atığını (B_2O_3) ağırlıkça % 12,6 oranında ağır kil karışımı içine % 0, % 5 ve % 15 katarak 800 °C, 850 °C, 900 °C ve 950 °C’de numuneler üretmişler ve referans numuneler ile karşılaştırmasını yapmışlardır. Numuneler üzerinde XRD (X ışını kırımı yöntemi) ve SEM (taramalı elektron mikroskobu) ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar referans olarak hazırlanan numuneler ile ağırlıkça % 5 ve 900 °C’ de benzer özellikler gösterdiğini ve ağırlıkça % 15 ilaveli ve 900 °C’de olan numunede ise deformasyonların başladığını gözlemişlerdir.

Akbulut (2009) Kırka Bor İşletmelerinde açığa çıkan bor içerikli kil atıklarının üçüncü bileşen şartlarında Portland çimentosuna katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla, Portland çimentosuna ağırlıkça % 0, % 1, % 3 ve % 5 oranlarında bor atığı ilave edilerek dört farklı reçete hazırlanmıştır. Hazırlanan reçetelere sırasıyla, özgül yüzey alanı (Blaine), priz süresi (Vicat) , hacim genleşmesi (Le-Chatelier Halkası), zeta potansiyeli (ZP), hidrasyon ısı (Mikrokalorimetre), eğilme ve basma mukavemeti testleri yapılarak mikro yapı (SEM) analizleri incelenmiştir. Elde edilen veriler standart (bor atık katkısız) reçete ile karşılaştırılmış ve bütün bor atık katkılı reçetelerin hidrasyon özelliklerinin ve priz sürelerinin bor atık katkısının artışına paralel olarak kötüleştiği belirlenmiştir. Bununla birlikte aynı numunelerin mukavemet değerleri incelendiğinde % 1 ve 3 oranlarında bor atık katkılı reçetelerin standart reçetenin mukavemet değerlerini yakaladığını görmüşlerdir. Bor atık katkılı reçeteler arasında en iyi mukavemet sonucunu veren % 3 oranında bor atık katkılı

reçeteye üçüncü bileşen olarak % 0,1- 0,3- 0,5 ve 0,7 oranlarında organik katkı (pektin) ilave edilerek olumsuz hidrasyon özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla dört farklı pektin katkılı reçete hazırlanarak deneyler tekrarlanmıştır. Deney sonuçlarına göre pektin katkısının artmasına paralel olarak tüm reçetelerin hidrasyon sürelerinin kısaldığı fakat mukavemet değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Sonuç olarak % 3 oranında bor atık katkısı ve % 0,1 oranında pektin katkısı ile TS EN 196-1 2002 standardında belirlenmiş mukavemet değerine ve TS EN 196-3 2002 standardında belirlenmiş priz süresi değer aralığına ulaşıldığı saptanmıştır.

Ustabaş (2011) bor cevheri türevi olan kolemanit ve üleksitin çimentoda kullanılabilirliği ve bu çimentonun beton yollarda kullanılabilirliği hakkında çalışma yürütmüştür. Yabancı maddelerden arındırılarak öğütülmüş kolemanit ve üleksit, çimento kütlelerinin % 0,5, % 1, % 2, % 3, % 4 ve % 5 oranlarında CEM I 42,5 R sınıfı çimento ile karıştırılıp, karışımın standart kıvam, priz başlangıç ve bitiş süresi ve genleşme sabitlikleri ölçülmüştür. Öte yandan kolemanit ve üleksit klinker ile 1300 °C'de karıştırılarak 2 saat süre ile pişirilip soğutulmuştur. Üretilen çimento numunelerinde 200 mikron (μm), 90 μm ve 45 μm elek üstündeki malzemeler ölçülmüştür. Karışımın standart kıvam, priz başlangıç ve bitiş süresi ve genleşme sabitlikleri ve üretilen numunelerin TS EN 1015-3 2000'e göre yayılma tablası ile kıvamları hesaplanmış, kolemanit ve üleksitin çimentonun priz süresini uzattığı tespit edilmiştir. Bor mineralinin çimentoya direkt olarak ilavesi durumunda da genleşme miktarlarında herhangi bir olumsuzluk görülmemiştir. Ayrıca TS EN 196-1 2002'ye göre üretilmiş olan borlu çimento harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Ustabaş elde edilen bulgulara dayanarak kolemanit ve üleksit kullanımının çimento özelliklerini geliştirmediği sonucuna ulaşmıştır.

Kütük ve Kütük (2012) asfalt betonunda filler malzemesi olarak bor atıklarının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Atıkları değerlendirmek amacıyla yaptıkları çalışmada bor atıklarının asfalt kaplamalarda alternatif filler olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Öncelikle bor atığının fiziksel özelliklerini TG-DTA, XRD ve SEM-EDX yöntemleri ile belirlemişlerdir. Ayrıca, bor yüzey özelliklerini de POM ile tespit etmişlerdir. Araştırmacılar iki grup sıcak karışım asfalt üretimi gerçekleştirmişlerdir. Birinci grupta asfalt betonunda filler malzemesi olarak kireçtaşı agregası, ikinci grupta

ise bor atığını mineral filler malzemesi olarak kullanmışlardır. Her iki grup için de kaba ve ince agrega olarak kireçtaşı kullanmışlardır, Marshall ve diğer mekanik deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda borik asit atığının (boraks atığı) hidrate sodyum borat'a (tinkal konit) benzer kristal yapısının olduğuna ve hidrate sodyum borat'ın (tinkal konit) kullanımının sıcak iklim bölgeleri için kullanım sorunlarını azaltmada etkili olabileceğini belirtmişlerdir. Mineral filler malzemesi olarak bor atığı kullanımının trafik altındaki binder tabakaları için uygun olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çelik (2012) Kırka Bor Madeni (Eskişehir) bor türevleri tesisinde oluşan atıkların duvar karosu üretiminde mermer tozu yerine kullanılabilirliğini araştırmıştır. Araştırmacı atık ilavesinin sıvı faz oluşumunu artırdığını ve daha iyi fiziksel özelliklerin elde edilmesine yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak bor türevleri tesis atıklarının duvar karosu reçetelerinde % 4 oranına kadar kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Pehlivanoğlu vd. (2013) yaptıkları çalışmada bor bileşiklerinin, farklı türde çimentoların hidratasyon sürecine etkilerini ve bu etkilerin kontrol edilebilme olanaklarını araştırmışlardır. Bu amaçla, portland aktif belit ve kalsiyum alüminatlı çimentolar kullanarak ve ayrıca çimento ağırlığının % 0,25 ve % 1 oranında borik asit katarak harç karışımları hazırlamışlardır. Taze harçların priz başlama ve priz sonu sürelerini ölçmüşler ve çalışma sonucunda harçlardaki boroksit konsantrasyonu artıkça, priz sürelerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Borik asidin hidratasyon sürecine olumsuz etkisini bastırmak için ise çimento ağırlığının farklı oranlarda üç farklı stabilizörü karışımlara ilave ederek, priz sürelerini yeniden ölçmüşler ve sonuçları hem kontrol hem de borik asit katkılı ve stabilizör katkısız harç örnekleriyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, borik asit ilave edilen harçlarda optimum işlenebilirlik süreleri dikkate alınarak, amaca uygun stabilizör türü ve kullanım oranlarını belirlemişlerdir.

Terzi vd. (2013) kolemanit atığının filler olarak kullanılmasının asfalt karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmada aynı agrega gradasyonuna sahip numunelere kireç taşı fillerini eklenerek asfalt karışımlar hazırlanmış ve bu karışımlarda optimum bitüm oranı Marshall Stabilitate testi ile belirlenmiştir. Belirlenen bu optimum değere göre 5 farklı filler oranı kullanılarak

kolemanit filler katkılı asfalt betonu hazırlanmış ve optimum bitüm yüzdeleri sonuçları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak kolemanit atığının kireç taşına yakın değerler verdiği şartname içerisinde yer aldığı ve kolemanitin çıkarıldığı bölgelere yakın yerlerde kireç taşı yerine alternatif bir filler malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Elde edilen literatür taramasından da anlaşılabilceği gibi Kırka bor atıklarının bitümlü sıcak karışımlarda mineral filler olarak kullanılabilirliği ile ilgili şimdiye kadar kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bor atığı ile ilgili yapılan çalışmaların önemli bir kısmının da diğer yapı malzemelerinde kullanımıyla ilgili olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında ilk kez ağırlıkça farklı oranlarda bor atığı filler kullanılarak Marshall dizaynı gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar kireçtaşı kökenli numune sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca bitümlü sıcak karışım numunelerinin soyulma, donma-çözülme etkisi altındaki davranışları incelenmiş ve trafik yükleri altındaki davranışlarını anlayabilmek için de dolaylı çekme rijitlik modülü deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda bor atığı fillerin kullanım miktarları da tespit edilmiştir. Deney sonuçları bor atığı filler numunesinin düşük ve orta trafik hacimli yollarda mineral filler olarak 70 km'lik yarıçaplı bir alanda kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

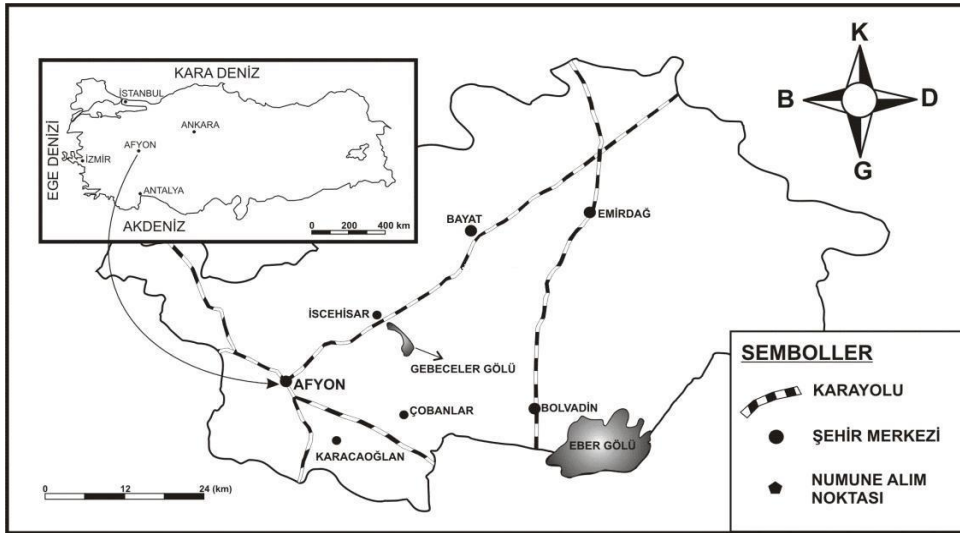
3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Yapılan bu çalışmada materyal olarak agrega, mineral filler ve 50/70 penetrasyon sınıfı (B50/70) bitüm kullanılmıştır. Kullanılan materyallere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.1.1 Agregalar

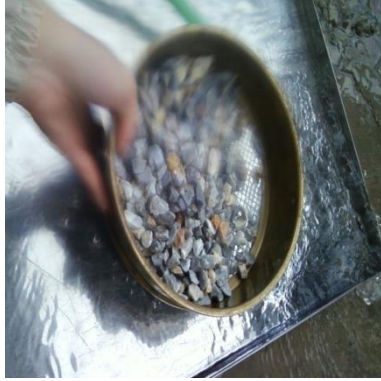
Çalışmada kullanılan kireçtaşı kökenli agrega (K: Kireçtaşı) (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) Afyonkarahisar ili Karaca ören köyündeki ocağından alınmıştır. Hazırlanan agrega karışımında iri agrega (No:4 üstü) ve ince agrega (No:4-200) ve mineral filler olarak K agregası, tozdan arındırılması için yıkama işlemine tabi tutulmuş, etüvde kurutulduktan sonra deneylerde kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.1 K agregası yerinin bulunduğu harita.



Şekil 3.2 Karacaören kireçtaşı agrega ocağı.



Şekil 3.3 Agrega yıkama işlemi.

3.1.2 Mineral Filler

Çalışmada kullanılan mineral filler Eskişehir (Şekil 3.4) ilinin Seyitgazi ilçesine bağlı Kırka beldesinde yer alan Kırka Bor İşletme Müdürlüğünden alınmıştır. Kırka Bor ocakları Dünyanın en büyük tinkal rezervine sahip maden ocağı olup, tinkal cevheri açık işletme yöntemi ile üretilmektedir. Çalışmada kullanılan bor atığı Şekil 3.5’de görülen stok sahasından alınmış ve etüvde kurutulup, 200 nolu elekten elenerek mineral filler malzemesi haline dönüştürülmüştür.



Şekil 3.4 Türkiye’de bor rezervinin bulunduğu bölgeler.

3.1.3 Bitüm

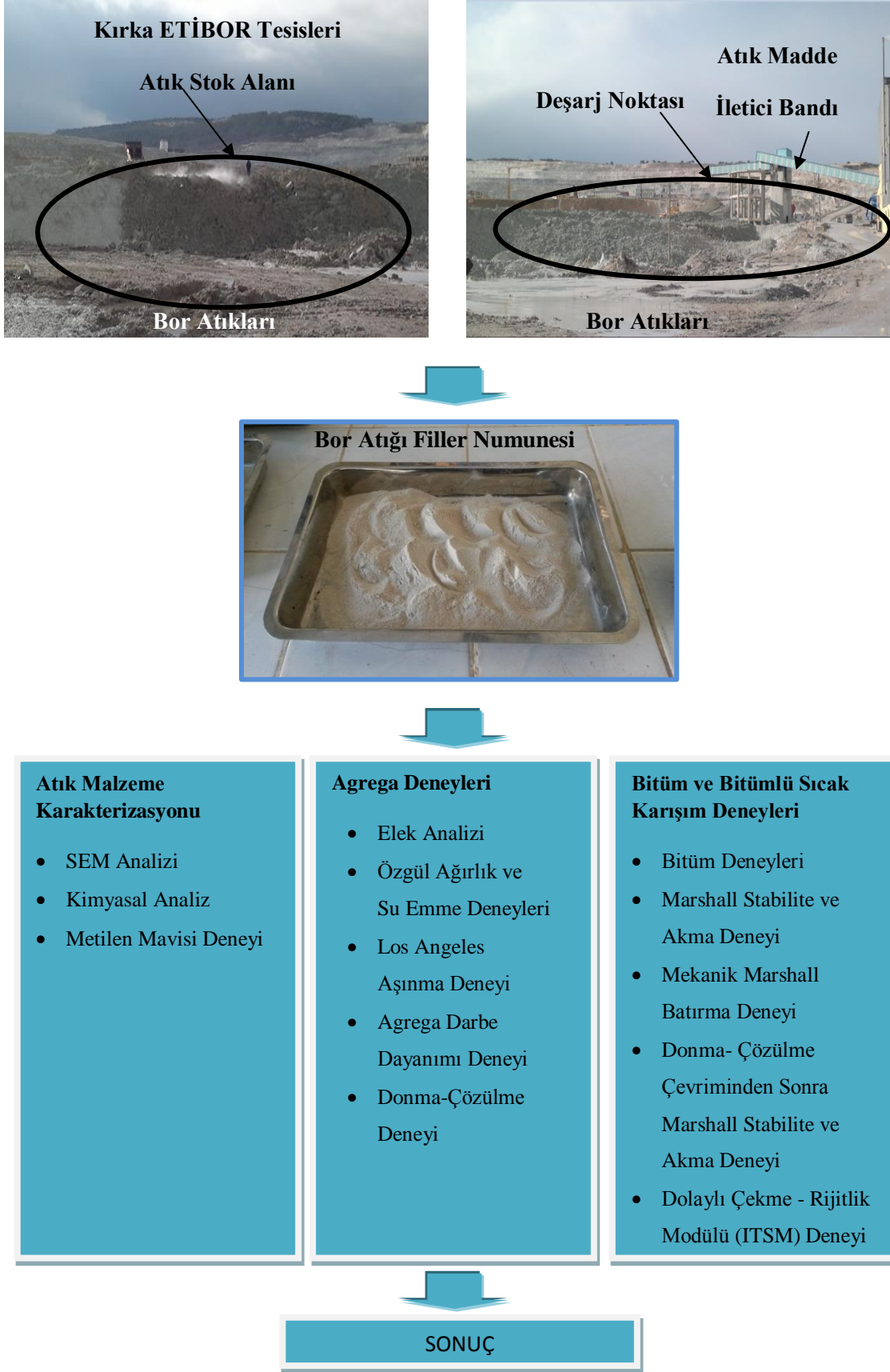
Yapılan çalışmada bağlayıcı olarak, Afyonkarahisar Belediyesi asfalt şantiyesinden elde edilen, Aliğa rafinerisinde üretilmiş penetrasyon bitümü cinsi bağlayıcı kullanılmış olup, söz konusu bitümlü bağlayıcı B50–70 penetrasyonludur.

Ham petrolün rafinerizasyonu sonucu elde edilen katı veya yarı katı bir bağlayıcı olan, ısıtıldığında viskoz bir akışkan haline gelen hidrokarbon karışımı bitüm; yol yapım ve bakımında kullanılmaktadır. Genellikle petrolün yan ürünü olarak elde edilen asfalt, bitüm olarak ifade edilmektedir. Asfalt tabiatta doğal olarak da bulunabilen bir malzemedir.

Bitümler genellikle penetrasyonlara göre sınıflandırılmaktadır. Amerika’da viskoziteye, son yıllarda superpave sistemde performans derecesine göre sınıflandırılmaktadır.

3.2 Metot

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler ve deneysel çalışma yöntemleri Şekil 3.5’de verilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle atık malzeme karakterizasyonu yapılmış, sonrasında agrega, bitüm ve bitümlü sıcak karışım deneyleri yapılarak ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.



Şekil 3.5 Tez deneysel çalışmasına ait akış şeması.

3.2.1 Atık Malzeme Karakterizasyonu

Atık malzeme karakterizasyonu belirlemek amacıyla bazı kimyasal analiz ve tarama elektron mikroskobu analizi yapılmıştır. Tüm kaya ana ve iz element dolgu örneklerinin analizleri ACME Analitik Laboratuvarları (Vancouver) Ltd. tarafından yapılmıştır.

3.2.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi

SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi ile bor filler numunelerinin yüzey morfolojilerinin belirlenmesi, seçilen noktalar üzerinde nokta analizi, nitel çözümleme analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi için LEO 1430 VP modeli SEM cihazı kullanılmıştır.

3.2.1.2 Kimyasal Analiz

Bor ve bor türevi atığı numuneler üzerinde kimyasal analiz gerçekleştirilmiştir. Borun element ve atomik dağılımını belirlemek için de nokta EDX (enerji dağılımı x ışınları) analizleri gerçekleştirilmiştir. Maddenin bileşim ve saflığını saptama işlemi olan kimyasal analiz ACME Analitik Laboratuvarları (Vancouver) Ltd. tarafından yapılmıştır.

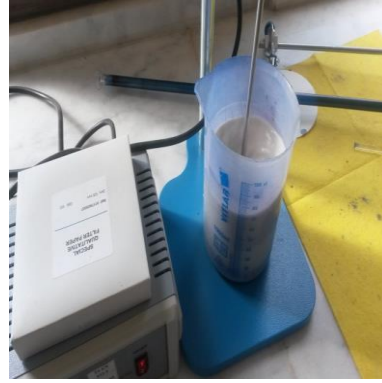
3.2.1.3 Metilen Mavisi Deneyi

Metilen mavisi deneyi zararlı kil minerallerinin miktarı hakkında bilgi vermektedir. Kil minerallerinin negatif yüklü yüzeyleri üzerinde tutunan geniş polar organik bir moleküle sahip olan metilen mavisi boyası, suda yüksek çözünürlüğe sahiptir. Metilen mavisi boyası katyon değişimi ile birlikte kil minerallerinin yüzeyine tutunur. Yüzeyde tutunabilen metilen mavisi boyasını tespit etmek amacıyla yapılan bu deney, TS EN 933-9 şartlarına uygun olarak uygulanmaktadır. 200 gr olarak alınan numune Şekil 3.6'daki gibi hazırlanıp tartılır.



Şekil 3.6 Metilen mavisi deneyi için hazırlanan numune.

Tartılan numune üzerine 500 ml saf su ilave edilir ve 600 devirde 15 dakika süre ile homojen olarak karıştırılır (Şekil 3.7). Sonrasında numuneye 5 ml'lik mavi metilen boyası eklenip 400 devirde 2 dakika karıştırılır.



Şekil 3.7 Numuneye metilen mavisi eklenmesi ve karıştırılması.

Standartlar dâhilinde hazırlanan numune ve su karışımına 5 ml'lik boya eklenir ve her bir ilaveden sonra süzgeç kâğıdına bir leke bırakılır. Merkezi mavi birikintiyi

çevreleyen 1 mm genişliğinde açık mavi halka oluşması ve bu halka varlığını 5 dk koruması durumunda deneye son verilir (Şekil 3.8). Metilen mavisi deney sonucu eşitlik 3.1 ile hesaplanır;

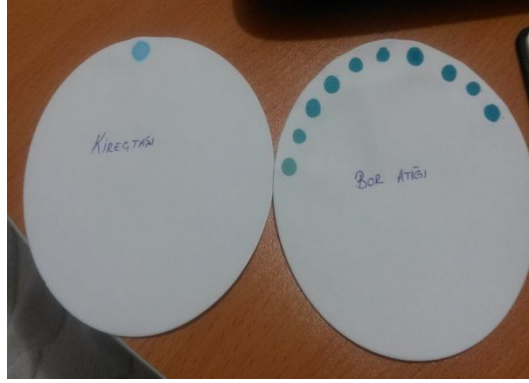
$$M_{metilen} = \frac{M_k * M_g}{M_m} * 10 \quad (3.1)$$

Burada ;

M_k :Metilen mavisinin kaç defa eklenmesi

M_g :Metilen mavisinin kaç gram eklendiği

M_m :Malzeme miktarı'dır (Int.Kyn. 6, Int.Kyn. 7).



Şekil 3.8 Metilen mavisi deney sonlanması.

Kil mineralleri arttıkça, emilen boya miktarı artmakta ve metilen mavisi değerini artırmaktadır. Metilen mavisi değeri arttıkça malzeme içindeki kil ve silt miktarı fazla, mavi metilen değeri azaldıkça kil ve silt miktarı az diyebiliriz.

3.2.2 Agrega Deneyleri

Deneysel çalışmamızın konusu olan farklı gradasyondaki agregaların fiziksel özelliklerinin tespit edilebilmesi için numuneler üzerinde özgül ağırlık ve su emme, Los Angeles aşınma, donma-çözülme sonrası direnç kaybı ve agrega darbe dayanımı deneyi olmak üzere standart kırmataş deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1 Elek Analizi Deneyi

Hem kaplamanın stabilitesine olan büyük katkısı hem de çok büyük miktarda gereksinim duyulmasından dolayı agrega önemli bir yol malzemesidir (Tunç 2007). Dolayısıyla da kullanılacak agreganın gradasyonunu belirlemek amacıyla elek analizi deneyi yapılmaktadır (Şekil 3.9). Konveyör ya da silodan dane çapları farklı olan agregaların hangi aralıkta olacağını belirlemek için numune alınır. Genellikle 0-5, 5-10, 10-20, 20-25 üstü olarak bulunan numuneler şartnamelerde belirtilen aralıklarda ve ASTM C 702'ye göre alınır ve uygun bir şekilde belirli oranlarda çeyrekleme metodu ya da bölgeç ile alınarak etüvde $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulularak gradasyon oluşturulur.



Şekil 3.9 Elek analizi tayin aparatları.

3.2.2.2 İri ve İnce Agregalar İçin Özgül Ağırlık Deneyleri

Agreganın fiziksel özelliğinin göstergesi olan özgül ağırlık deneyleri bize agrega hakkında bilgi vermektedir. Özgül ağırlığı düşük olan bir agrega kullanılması yol kaplamalarında uygun olmayacağı gibi kaplamanın boşluklu ve zayıf olacağını göstergesidir. Yüksek özgül ağırlık ise agreganın kaliteli ve yapılacak olan kaplamanın da yol kaplaması için uygun olacağını gösterir.

Danenin hacim tanımlamasına göre üç çeşit özgül ağırlık vardır. Bunlar;

- Hacim özgül ağırlık
- Zahiri(görünen) özgül ağırlık
- Etkin özgül ağırlık

ASTM C 127 metodu kullanılarak belirlenen 4,75 mm elek üstü agreganın özgül ağırlıkları ve kaba agreganın su absorpsiyonu belirlenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus numunenin karışımın gradasyonunu temsil etmesidir. Temiz ve en az 1000 gr olan agreganın numunesi hazırlanarak Şekil 3.10'da görüldüğü gibi su içerisinde 24 saat bekletilir.



Şekil 3.10 Agreganın numunesinin su içerisinde bekletilmesi.

Süre sonrasında su içerisinde çıkarılan numune emici özelliği bulunan bir bez yardımıyla yüzeyinde su kalmayacak şekilde agreganın daneleri teker teker kurulur. Böylelikle yüzey kuru suya doymuş olan numune tartılır (B_k). Yüzey kuru suya doymuş agreganın numunesi sepete konularak $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 'deki suda tartımı yapılır (C_k). Tel sepet içerisinde dikkatli bir şekilde bir kaba boşaltılan numune $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de etüvde kurutulur. Etüvden çıkarılan numune 1-3 saat aralığına kadar bekletilerek oda sıcaklığına getirilir ve tekrar tartımı yapılır (A_k). İşlemler bittikten sonra numunenin özgül ağırlık ve su emme yüzdesi denklem (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitlikleri ile hesaplanır;

$$\text{Hacim Özgül Ağırlığı} = \frac{A_k}{(B_k - C_k)} \quad (3.2)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \frac{A_k}{(A_k - C_k)} \quad (3.3)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{(B_k - A_k)}{A_k} \quad (3.4)$$

ASTM C 128 metodu kullanılarak 4,75mm elek altı agrega olan ince agreganın özgül ağırlığı ve su absorpsiyonu belirlenir. Karışımdaki gradasyonu temsil edecek şekilde en az 500 gr numune alınır. Daha öncesinden temiz bir şekilde olan malzeme alınarak üzeri su ile kaplanarak 24 saat bekletilir. Bekletilen malzeme herhangi bir malzeme kaybı olmayacak şekilde süzülür ve düzgün bir yüzeye alınır.

Numuneyi yüzey kuru suya doymun hale getirmek için numune sıcak hava akımına tabi tutulur. Bu işlem malzeme rahat bir şekilde dökülünceye kadar devam edilir. Bunu anlayabilmek için de kesik koni metodu kullanılır.

Yüzey kuru suya doymun hale gelen 500 gr numune piknometre içerisine konularak tartılır (Ci). Piknometreye numunenin üzerini kaplayacak kadar su ilave edilir ve piknometre içerisinde hava kabarcıklarının kalmaması için yaklaşık 15-20 dakika çalkalanır. Bu işlemden sonra piknometrenin işaretli kısmına kadar su doldurulur ve 25±1°C’ de su banyosunda bekletilir. 25±1°C’ ye ulaştığında piknometre su banyosundan çıkarılıp tekrar tartılır (Di). İnce agrega piknometreden özenle çıkarılır ve tepsiye boşaltılıp 110±5°C’de etüvde gerekli kadar kurutulur ve tekrar tartılır (Ei). Buradan numunelerin özgül ağırlık ve su emme yüzdeleri eşitlik (3.5), (3.6) ve (3.7)’ye göre hesaplanır;

$$\text{Hacim Özgül ağırlığı} = \left(\frac{E_i}{(B_i - C_i) - (A_i - D_i)} \right) \quad (3.5)$$

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \left(\frac{E_i}{(B_i + E_i - D_i)} \right) \quad (3.6)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = \left(\frac{(C_i - A_i - E_i)}{E_i} \right) 100 \quad (3.7)$$

3.2.2.3 Filler Malzeme İçin Özgül Ağırlık Deneyleri

Filler malzemelerinin ASTM C 854 metodu ile zahiri özgül ağırlıkları belirlenir. 110±5°C etüvde filler malzemesi sabit ağırlığa kadar kurutulur. Kurutulan filler malzemesi Şekil 3.11'deki gibi şişenin üçte biri dolacak şekilde piknometrenin içerisine konularak tartılır (C_f). Piknometre yarısına kadar su doldurulur ve en az 5 dakika yaklaşık 50 mbar vakum sağlayan desikatör içerisinde bırakılarak havası alınır. Havası alınan piknometredeki filler malzemesi tamamen su ile doldurularak 25±1°C' de su banyosunda en az 60 dk bekletilir ve kurularak tartılır (D_f). Filler malzemenin zahiri özgül ağırlığı eşitlik (3.8) ile hesaplanır;



Şekil 3.11 Filler malzemesi ve malzemenin piknometre içerisindeki durumu.

$$\text{Zahiri Özgül Ağırlık} = \left(\frac{(C_f - A_f)}{(B_f - A_f) - (D_f - C_f)} \right) \quad (3.8)$$

3.2.2.4 Sıkışık ve Gevşek Birim Hacim Ağırlık Deneyleri

Agregalarda birim hacim ağırlık sıkışık ve gevşek birim hacim ağırlık olmak üzere ikiye ayrılır. Sıkışık birim hacim ağırlık TS 3529'e göre ağırlığı saptanmış ölçü kabı düz bir zemin üzerine içerisi kuru olmak şartıyla alınır. Agregada gradasyonunu temsil eden numune kabın içerisine 3 tabaka halinde yerleştirilir. Birinci tabaka ölçü kabına konular ve şişleme çubuğu ile numune 25 kez serbest bırakılacak şekilde üzeri şişlenir. Üzeri şişlenmiş olan 1. tabaka üzerine 2. tabaka el küreği ile bırakılır ve aynı işlemler gerçekleştirilir. Bu işlem 3.tabaka için de gerçekleştirilir. Toplamda 3 tabaka halinde 75

kez şişlenen numune üzeri çelik çubuk ile düzeltilir ve tartılır. Yapılan bu işlemler sonunda numune kaptan boşaltılır ve ölçü kabının içerisi su ile doldurulur. Su ile doldurulan kap tartılarak kabın hacmi belirlenir. Eşitlik (3.9) ile sıkışık birim hacim ağırlık hesaplanır;

$$\Delta s = \frac{(W_2 - W_1)}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.9)$$

Burada;

Δs : Sıkışık birim hacim ağırlık (kg/m³)

W_2 : Sıkışık agregaya ile dolu ölçü kabı ağırlığı (gr)

W_1 : Ölçü kabı boş ağırlığı (gr)

V : Ölçü kabının iç hacmi (dm³)'dir.

Agregada gevşek birim hacim ağırlığı TS EN 1097-3'e göre yapılır ve herhangi bir sıkıştırılma olmaksızın, gevşek durumda iken agreganın birim hacim ağırlığı saptanır. Ağırlığı saptanmış ölçü kabı düz bir zemin üzerine içerisi kuru olmak şartıyla alınır ve tartılır. Kabın içerisine su ile doldurularak kabın hacmi saptanır. Hava kurusu halinde olan agregalar ağırlığı tartılarak bulunmuş olunan ölçü kabına 5-10 cm yükseklikten tepeleme olarak el küreği ile dökülür. Agregalar ölçü kabına taşarcasına konulur ve ölçü kabının üst yüzeyi çelik çubuk vasıtasıyla düzeltilir. Ölçü kabı içerisinde agregaya ile birlikte tartılır ve gevşek birim hacim ağırlık hesaplanması (3.10) eşitliği ile yapılır;

$$\Delta g = \frac{(W_2 - W_1)}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.10)$$

Burada;

Δg : Gevşek birim hacim ağırlık (kg/m³)

W_2 : Gevşek agregaya ile dolu ölçü kabı ağırlığı (gr)

W_1 : Ölçü kabı boş ağırlığı (gr)

V : Ölçü kabının iç hacmi (dm³)'dir.

3.2.2.5 Los Angeles Aşınma Deneyi

Yol kaplamalarda bilindiği üzere aşınma ve darbelere maruz kalmaktadır. Los Angeles Aşınma Deneyi agregada aşınma ve darbelenme etkisi ile meydana gelen aşınma miktarının belirlenmesinde uygulanmaktadır. Bu metot ASTM C 131-89'a göre yapılmaktadır. Deneyde kullanılacak numune standartlara göre 10-14 mm arasında kalan 5 kg agregaya ve 11 adet bilye ile yapılmaktadır. Kullanılan elek aralıklarına bağlı olarak bilye sayısı değişkenlik göstermektedir;

- 4-8 mm elek arası malzemede 8 adet bilye kullanılmaktadır.
- 6,3-10 mm elek arası malzemede 9 adet bilye kullanılmaktadır.
- 8-12 mm elek arası malzemede 10 adet bilye kullanılmaktadır.
- 11,2 -16 mm elek arası malzemede 11 adet bilye kullanılmaktadır.

5000 gr numune alınır. Numune aşınma sınıfına göre gerekli eleklerden elenerek her elek üzerinde kalan agregaya kil ve tozlardan iyice temizleninceye kadar kaldığı elek üzerinde yıkanır. Yıkanan agregaya numuneleri suyu sızdırıldıktan sonra etüvde 105°C de değişmez ağırlığa kadar kurutulur. Kurutulan 5 kg numune Los Angeles cihazına (tambur) yerleştirilir ve deney için 31 devir/dk ile 33 devir/dk arasında dönme yapabilen, 11 adet çelik bilye ile aşındırma yapabilen bir tambur kullanılır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Los Angeles aşınma cihazı ve deneye tabi tutulmuş numune.

500 devir sonunda tamburdan alınan numune 1,6 mm elekten geçirilir ve elek üzerinde kalan miktar tartılır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Los Angeles tamburundan alınan numune.

Gerekli işlemler yapıldıktan sonra agregada aşınma dayanıklılığı tespit edilmiş olunur. Los Angeles aşınma kaybı (LA) (3.11) eşitliği ile hesaplanır;

$$LA = \left(\frac{5000 - M}{50} \right) \quad (3.11)$$

Burada;

M: 1,6 mm' lik elek üzerinde kalan fraksiyon ağırlığıdır (gr).

Çizelge 3.1 Yol kaplamalarında kullanılacak aşınma oranları.

<i>Aşınma Miktarı</i>	<i>Aşınma Sınıfı</i>
<15	LA ₁₅
<20	LA ₂₀
<25	LA ₂₅
<30	LA ₃₀
<35	LA ₃₅
<40	LA ₄₀
<50	LA ₅₀
>50	LA _{beyan}

Deney her bir numune için üçer adet yapılmış ve numuneler 500 devirlik aşınma işlemine tabi tutulmuştur. ASTM C 131-89'a göre yol kaplamalarında kullanılacak malzemelerde aşınma (Çizelge 3.1) % 35 değerinden küçük olmalıdır.

3.2.2.6 Agregada Darbe Dayanımı Deneyi

Agreganın ani şok ve darbelere karşı dayanımının belirlenmesini sağlayan ve Los Angeles deneyine alternatif bir deneydir. Bu deney 14 mm BS eleğinden geçip 10 mm BS eleğinde kalan agregalara uygulanır. Agregalar deneyden önce kurutularak yüzey kuru hale getirilir. Darbelenme deneyinde kullanılacak agreganın miktarı iç çapı 75 mm ve iç yüksekliği 50 mm olan bir metal mezür yardımıyla belirlenir. Mezür, en fazla 50 mm yükseklikten dökülecek şekilde 1/3'üne kadar doldurulur ve şişleme çubuğu ile 25 defa şişlenir. Mezür daha sonra 2/3'üne kadar sonra da tamamen doldurulur. Doldurma işleminden sonra şişleme çubuğu mezürün üzerinde gezdirilerek çubuğa temas eden agregalar alınır varsa yüzeydeki boşluklar ele alınan uygun agregalarla tamamlanır. Mezüre giren agreganın ağırlığı tartılarak kaydedilir. Aynı numuneye ait diğer deneyler için aynı miktarda malzeme kullanılır (EN 1097-2, 1998).

Darbelenme deney aleti düzgün ve sağlam bir yüzey üzerine konularak sabitlenir. Mezürle ölçülen miktarda agreganın kalıbına konulur ve kalıp sabitlenir. Daha sonra tokmak ayarlanarak 380 ± 5 mm yükseklikten 15 defa 1 sn'den daha kısa aralıklarla agreganın üzerine 13,5 kg'lık bir ağırlık düşürülür. Şekil 3.14'de darbelenme deney cihazı görülmektedir.



Şekil 3.14 Agregada darbelenme değeri tayini için kullanılan deney cihazı.

Bu işlemden sonra deneye tabi tutulmuş agreganın kalıbından çıkarılarak bir tepsiye alınır ve 8 nolu elekten elenir. Daha sonra No: 8 eleği geçen (B) ve kalan (A), malzemeleri 0,1 gr hassasiyetle tartılır. İnce malzeme yüzdesi (K) 3.12 eşitlik ile hesaplanır. Yüksek kaliteli agregaların darbelenme değeri % 18'den az olmalıdır (Woodside 1998).

$$K = \left(\frac{B}{A} \right) * 100 \quad (3.12)$$

3.2.2.7 Agregalar İçin Donma-Çözülme Deneyi

Esnek yol üst yapılarında aşınma ve darbelenmelere karşı dayanıklılığın arandığı gibi agreganın dona karşıda dayanımı özelliği de aranmaktadır. Özellikle de soğuk hava koşullarının olduğu yerlerde agregalar donma- çözülme etkisi ile parçalanmamalıdır. Sıcak karışım asfalt kaplamaların aşınma tabakasında kullanılan agreganın binder tabakasında kullanılan agregaya oranla dona karşı direnci daha fazla olmalıdır.

Agrega donma-çözülme ve donma çözülme sonrası direnç kaybı deneyi için gerekli deney numuneleri, içerisindeki üst ve alt büyüklük sınırları dışında kalan agregalardan ayıklanmış olan tek tane büyüklüğüne sahip agregalar kullanılmak suretiyle TS EN 932-2 1999' a uygun şekilde azaltılarak elde edilmelidir. Dayanıklılık deneyinin donma-çözülme döngüsünden sonra yapılması düşünülüyorsa bu deney, laboratuvar numunesinden elenerek elde edilen uygun bir agrega büyüklük sınıfı üzerinde yapılmalıdır. Donma deneyi için üç adet deney numunesi kullanılmalıdır. Deney için gereken deney numunesi kısımlarının miktarları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Donma-çözülme ve donma-çözülme sonrası direnç kaybı deneyi için gereken deney numunesi kısımlarının miktarları.

En Büyük Agregata Tane Büyüklüğü(mm)	Agrega Kütleleri ve Hacmi	
	Normal Agregata (g)	Hafif Agregata (Yığın Hacmi) (ml)
4-8	1 000	500
8-16	2 000	1 000
16-32	4 000	1 500
32-63	6 000	-

Numune, toz kaybını ve ayrışmayı önlemek için yeterince ıslatılır. Üç deney numunesi darası alınmış kaplara alınır. Bir deney numunesi 110±5°C' de sabit kütleyle kadar kurutulur, soğumaya bırakılır, tartılır ve kütlesi (M₁) olarak kaydedilir. Hazırlanan deney numuneleri, damıtık su içerisinde bulunan ve metal kutularda 20±3°C'de 24±1

saat süreyle atmosfer basıncında tutulur. Su seviyesi, 24 saatlik tüm ıslatma süresi boyunca deney numunesi kısımlarının en az 10 mm üstünde olmalıdır. Her bir metal kutudaki su seviyesinin deney numunesinin en az 10 mm üzerinde olup olmadığı kontrol edilir ve kutu kapakları kapatılır. Isının mümkün mertebe her taraftan eşit şekilde alınmasını sağlayan, metal kutular ile dolabın yan duvarları arasındaki mesafenin 50 mm'den az olmamasına ve kutuların birbirine değmemesine dikkat edilerek deney numunelerini ihtiva eden metal kutular dolaba yerleştirilir ve dolap ayarı yapılır. Dolaptaki numuneler, aşağıda belirtilen şekilde 10 defa donma-çözülme döngüsüne tabi tutulur. Sıcaklık, 150±30 dakikada 20±3 °C' den 0 °C'ye düşürülür ve 210± 30 dakika süreyle 0 °C'de tutulur. Sıcaklık, 180±30 dakikada 0 °C'den -17,5±2,5 °C'ye düşürülür ve en az 240 dakika süreyle -17,5±2,5 °C' de tutulur. Hiç bir aşamada, hava sıcaklığının -22 °C'nin altına düşmesine izin verilmemelidir. Her bir donma döngüsü tamamlandıktan sonra, kutu muhtevası, yaklaşık 20 °C'deki suya batırılmak suretiyle çözülür. Sıcaklık, (20±3) °C'ye ulaştığında, çözme işlemi tamamlanmış olmalıdır. Her bir çözme aşaması tamamlandıktan sonra kutular (20±3) °C'deki suda en fazla 10 saat süreyle tutulur. Her bir donma-çözülme döngüsü, 24 saat içinde tamamlanmalıdır. 10'uncu döngünün tamamlanmasından sonra her iki kutunun içindeki malzeme, deney numunesini hazırlamak için kullanılan alt elek büyüklüğünün yarısı kadar göz açıklığına sahip bir deney eleğinin üzerine boşaltılır. Numune, belirtilen elek üzerinde elle yıkanır ve elenir. Elek üzerinde kalan agrega (110 ±5) °C'de sabit kütleye kadar kurutulur, daha sonra ortam sıcaklığına kadar soğutulur ve hemen tartılır (M₂). Üç deney numunesinin elek üstü kısımları birleştirilir ve buradan elek altı miktarı hesaplanır, tartılır ve elde edilen kütle, birleştirilen deney numunelerinin kütlece %'si olarak ifade edilir. Donma-çözülme deneyi sonucundaki kütle yüzde kaybı (F), (3.13) eşitliğinden hesaplanır;

$$F = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) * 100 \quad (3.13)$$

Burada;

M₁: Üç deney numunesinin toplam ilk kuru kütlesi (g),

M₂: Belirtilen elekte tutulan üç deney numunesinin toplam nihai kuru kütlesi (g),

F: Donma-çözülme döngüsünden sonra üç deney numunesinin kütlece yüzde kaybıdır.

Donma-çözülme döngüsünden sonra direnç kaybının hesabında ise deney numunesi kısımları için donma-çözülme döngülü ve donma- çözülme döngüsüz olarak elde edilen direnç deneyi sonuçları arasındaki % fark EN 1097-2’de belirtilen aşağıdaki işlemler takip edilerek hesaplanır:

Yüzde olarak direnç kaybı, % 0,1 doğrulukla (3.14) eşitliği ile hesaplanır;

$$\Delta S_{LA} = \left(\frac{S_{LA1} - S_{LA0}}{S_{LA0}} \right) * 100 \quad (3.14)$$

Burada;

S_{LA} : Yüzdece direnç kaybı,

S_{LA0} : Donma-çözülme döngüsü sayısı,

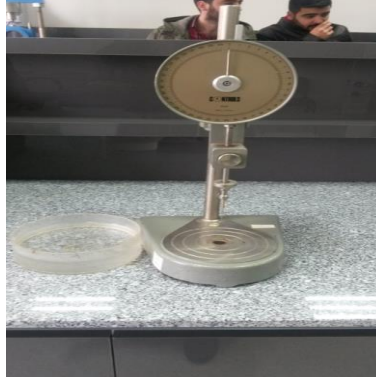
S_{LA1} : Donma-çözülme döngüsünden sonra deney numunesi kısmının Los Angeles katsayısıdır (Int. Kyn.8).

3.2.3 Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışım Deneyleri

Laboratuar çalışmalarında ve inceleme kesimlerinin imalatında kullanılan penetrasyon bitümü sınıfı bağlayıcı numuneleri üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası, dönen ince film halinde ısıtma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.3.1 Penetrasyon Deneyi

Bitümlü bağlayıcıların kıvamlılığı "penetrasyon deneyi" ile tayin edilir. Penetrasyon; standart bir iğnenin belirli yük altında, belirli bir süre içinde, belli sıcaklıktaki bağlayıcıya dikey doğrultuda batma uzunluğudur (Anonim 2009-2010). Penetrasyon deneyi, penetrasyon cinsi bitümlerin standart penetrasyon aralıklarına göre sınıflandırılmasına temel teşkil eden bir deneydir. Deney ASTM D5 yöntemine göre Şekil 3.15’deki cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15 Bitümlü bağlayıcının kıvam tayini için penetrasyon cihazı.

Bitümlü bağlayıcı numunesi yumuşama noktasını geçmeyecek kadar ısıtılıp maksimum 90 °C, kap içerisinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde iyice karıştırıldıktan sonra numune kabına aktarılır. Numune derinliği iğnenin tahmin edilen batma miktarından en az 10 mm daha fazla olacak şekilde numune kabına doldurulmalıdır. Numuneler 5-30 °C ortam sıcaklığı olan bir yerde soğumaya bırakılır. Soğutma süresi hacmi 1,80 cm³'e kadar olan numunelerden derinliği 44 mm'ye kadar olanlar 60–90 dakika, derinliği 45–60 mm arasında olanlar 90-120 dakika süreyle soğumaya bırakılırlar. Hacmi 180 cm³'den fazla olan numunelerin soğutma süresi ise her 100 cm³ için 60–90 dakika arasında olmalıdır. 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 numune deneye hazır hale getirilir.

Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine 1 cm'den daha yakın olmayan noktalardan en az 3 deneme yapılmalıdır. Bu denemeler 2 dakika içinde yapılamazsa numune ve aktarma kabı yeniden su banyosu içine yerleştirilir ve ölçümler yeniden yapılır. İğne her deneyden önce temizlenmelidir. Denemelerin geçerli olabilmesi için penetrasyon değerleri arasında olabilecek en büyük fark Çizelge 3.3'de verilmiştir (Gürer 2010).

Çizelge 3.3 Penetrasyon değerleri arasındaki fark (Gürer 2010).

<i>0,1 mm Olan Penetrasyonlar</i>	≤ 49	50-149	150-249	≥ 250
<i>En Düşük ve En Yüksek Penetrasyon Farkı</i>	2	4	6	8

En büyük fark değerinin aşılması durumunda ikinci bir numune ile deney tekrarlanır. Yapılan deneylerden sonuç alınmazsa aynı deney numunesi ile 3 geçerli ölçüm elde edilinceye kadar deneyler tekrar edilir.

Bu yöntemle bulunan kabul edilebilir ölçümlerin aritmetik ortalaması en yakın tam sayıya yuvarlatılır. Penetrasyon değeri olarak rapor edilir.

3.2.3.2 Düktilite Deneyi

Düktilite deneyi, bitümlü bağlayıcıların uzama kabiliyetini göstermektedir. Bitümlü bir maddenin düktilitesi; standart bir kalıpta hazırlanmış bir bitüm numunesinin her iki ucunda çekilerek uzatılması sonucunda koptuğu andaki mesafenin cm cinsinden ifadesidir.

Deney yapılacak bitüm numunesi mümkün olan en düşük sıcaklıkta ısıtılarak akıcı hale getirilir. Akıcı hale getirilen numune No: 50 elekten süzülür. Yalnız numunenin kalıba dökülmeden önce kalıp, düz bir pirinç levha üzerine yerleştirilir ve numunenin levhaya yapışmaması için gerekli tedbirler alınır (vazelinle yağlanmalıdır). Ayrıca numunenin standart kalıba dökülürken parçalarının birbirinden ayrılmamasına dikkat edilmelidir. Bitüm numunesi standart 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 kalıp içerisindeki numunenin kalıp üzerine taşan kısımları ısıtılmış spatula ile kesilir ve bitüm numunesi ile kalıbın üst kısmı ile aynı seviyeye getirilir. Numune tekrar 25 °C su banyosunda 1,5 saat bekletilir. Kalıp içindeki numune su banyosundan çıkartılır. Kalıbın altındaki pirinç ile yanlardaki kalıplar sökülür ve numune bekletilmeden düktilite cihazına yerleştirilir. Asfalt numunesinin içinde bulunduğu kalıptaki delikler cihazın pimlerine takılır. Numune 5 cm/dk'lık bir hızla kopuncaya kadar çekilir. Asfalt numunesi koptuğu anda

cihazın kenarındaki cetvelden kopma mesafesi tespit edilir. Çekme sırasında duktilite cihazı içindeki su haznesinin numunenin alt ve üstünde en az 2,5 cm'lik bir tabaka oluşturması lazımdır (Anonim 2009-2010).

3.2.3.3 Yumuşama Noktası Deneyi

Bitümlü bağlayıcının sıcaklığa karşı duyarlılığını ölçmek için (hangi sıcaklıkta bitümün akmaya başladığı) yüzük-bilye yöntemi ile yumuşama noktası olarak ifade edilen sıcaklığı belirlenir. Yumuşama noktası çok yüksek bitümlerin viskozitesinde yüksek olduğundan, sıcak karışım yapım sıcaklıkları da yüksek olmaktadır (Orhan 2012). Bu amaçla TS EN 1427-2008 yöntemine göre yumuşama noktası deneyi gerçekleştirilmiştir. Bütün bitümlü malzemelerin yumuşaması belli bir sıcaklıkta gerçekleşmez. 25°C sıcaklıkta aynı penetrasyona sahip 2 bitümlü bağlayıcı numunesi farklı sıcaklıkta farklı özellikler gösterebilirler. Bu davranışları ölçmek için halka ve bilye metodu kullanılmaktadır.



Şekil 3.16 Yumuşama noktası tayin cihazı.

Cam kaba 8,25 cm'lik yüksekliğe ulaşacak şekilde 5 °C'lik saf su konur. İçinde numune bulunan halka suyun içine sarkıtılır. Halkanın alt yüzü cam kabın dibinden 2,52 cm yukarıda, üst yüzey ise su seviyesinden 5,08 cm (2 inç) aşağıda bulunacak şekilde ayarlanır. Cihaza bilyeler su dolu beher içine konulur (Şekil 3.16). Termometre suya batırılır. Termometrenin cıva haznesinin altı halkanın alt yüzeyi ile aynı olacak seviyede ve halkaya yaklaşık 0,5 cm mesafede yerleştirilir. Ardından bilye alet yardımıyla beher tabanından alınarak halka üzerine numunenin ortasına yerleştirilir. Su sıcaklığı dakikada 5 °C artacak şekilde beher ısıtılmaya başlanır. Deneyin ilk 3 dakikadan sonraki en fazla

1 dakika aralıktaki 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 iki numune ile yapılır (Anonim 2009-2010).

3.2.3.4 Parlama Noktası Deneyi

Bu deney Şekil 3.17'deki cihaz kullanılarak ve 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.



Şekil 3.17 Parlama noktası tayin cihazı.

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 kalacak şekilde) doldurulur.

Numune sıcaklığı başlangıçta dakikada 14-17 °C artacak şekilde ayarlanmış numunenin 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 4mm olmalıdır. Numune yüzeyindeki herhangi bir noktada tutuşma görüldüğünde termometreden okunan sıcaklık parlama noktası olarak kaydedilir. Deney

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 saniyeden fazla yanma meydana geldiği anda termometreden okunan sıcaklık yanma noktası olarak kaydedilir (Anonim 2009-2010).

3.2.4 Marshall Deneyi

Bu metot ile dizayn kavramı, Birleşik Devletler, Mississippi Devlet Otoyolları Departmanında çalışan Bruce Marshall tarafından geliştirilip formüle edilmiştir. Birleşik Devletler Mühendislik şirketinin ileri araştırma ve korelasyon çalışmalarıyla, Marshall Deney Yöntemi geliştirilerek bugün kullanılan son halini almıştır. Daha sonra bu dizayn yöntemi, “American Society for Testing and Materials” tarafından standartlaştırılmıştır. Bu yöntem penetrasyon veya viskozite derecesi belli asfalt çimentolarına ve maksimum boyutu 25 mm (1 inç) veya daha az olan agregalar kullanarak yalnızca sıcak karışım asfalt kaplamalara uygulanır (ASTM D 1559-89 1992). Türkiye karayolları bitümlü sıcak karışım dizaynlarında da bu yöntem kullanılmaktadır.

Asfalt kaplamaların karışım dizaynının amaçları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Orhan 2012);

- Sağlam (durabil) bir üstyapı elde etmek için gerekli bitüm miktarını belirlemek,
- Trafik yükleri altında deformasyon göstermeyecek yeterli dayanımı oluşturmak,
- Sıkıştırılmış tabakada, trafik altında oluşabilecek çok az miktarda sıkışmaya; kasma, akma ve stabilite düşüklüğü olmadan sağlayacak, ancak tabakanın içinde rutubet ve fazla hava barındırmayacak ölçüde boşluğu sağlamak,
- Segregasyona olmadan uygun serimi sağlayacak bir işlenebilirliğine sahip ekonomik bir karışım ve agrega gradasyonunun belirlenmesidir.

Marshall Metodu için işlem deney numunelerin hazırlanması ile başlar. Bütün bu işlemlerin başlangıcı için şunlar takip edilir (Uluçaylı 2002);

- Kullanım için önerilen malzemeler proje şartnamelerini sağlamalıdır.

- Agregaların sınıflarının proje şartnamelerinin istekleri doğrultusunda oranlandırılması yapılır.
- Kullanılacak malzemelerin yoğunluk ve boşluk analizleri, karışımda kullanılacak agregaların hacim özgül ağırlıkları ve asfalt çimentosunun özgül ağırlıkları tespit edilir.
- Marshall Metodunda standart, silindirik 64 mm yükseklik 102 mm çapında deney numuneleri kullanılır. Bu numuneler ısıtma-karıştırma ve sıkıştırma işlemlerinden oluşan özel bir prosedürle hazırlanır. Marshall Metodu ile karışım dizaynının en önemli özelliği, sıkıştırılmış deney numunelerinde yoğunluk-boşluk analizi ve stabilite-akma deneyleridir.

Deney aşamaları şu şekilde gerçekleşmektedir;

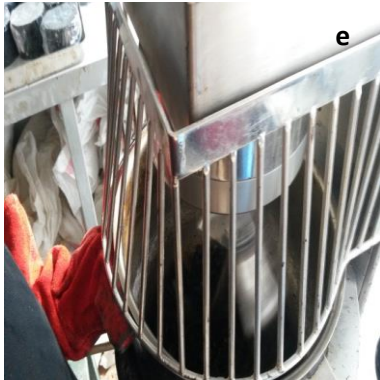
- Deney numunelerinin hazırlanmasındaki ilk aşama, agregalar 105-110 °C’de sabit ağırlığa gelene kadar kurutulur.
- İstenilen fraksiyonlarda hazırlanan ve kurutulan agregalardan ayrı ayrı kaplara olmak üzere 1200 g’lık karışımlar tartılır. Şekil 3.18’de elenip ayrılan numuneler görülmektedir.



Şekil 3.18 Fraksiyonları belli olan agregaların hazırlanmış halleri.

- 1200 gr’lık hazırlanan bu numuneler her ayrı bitüm ve agregaların kombinasyonu için üç adet hazırlanır.
- Hazırlanan agregaların numuneleri ve bitüm, etüve konularak 3-4 saat boyunca yaklaşık 150-160 °C ’ye gelene kadar beklenir.

- Sıkıştırma işlemine geçilmeden yaklaşık yarım saat öncesinde numune kalıpları, mikser karıştırma kabı ve ucu, spatula, el küreği gibi aparatlar da etüve konulur.
- İstenilen ısıya gelen agrega ve belirlenen miktardaki asfalt çimentosu tamamıyla üniform bir hal alıncaya dek homojen olarak yaklaşık 3-5 dakika karıştırılır. Şekil 3.19’da karışımın tartımı, homojen karıştırılması ve karıştırma işleminde kullanılan ısıtıcı mekanik karıştırıcı görülmektedir.



Şekil 3.19 Karışımın tartılması, etüvde ısıtılması ve mikserde homojen olarak karıştırılması.

- Asfalt çimentosu ve sıvı petrol asfaltın 170 ± 20 °C viskozite oluşacak şekilde ısıtılacağı sıcaklık, karıştırma sıcaklığıdır.
- Karışımı sıcak olan kalıbın içerisine yerleştirmeden önce kalıbın tabanına uygun olarak kesilmiş filtre kağıdı yerleştirilir.
- Numuneler 101,6 mm çapında ve 76,2 mm yüksekliğindeki numune kalıbında 457,2 mm'den düşen 4536 g ağırlığındaki özel bir tokmakla sıkıştırılır. Şekil 3.20'de numuneleri sıkıştırma işleminde kullanılan otomatik tokmak görülmektedir.



Şekil 3.20 Çalışmada marshall deney numunelerini sıkıştırmak için kullanılan otomatik tokmak.

Dizayn trafik yüküne bağlı olarak (hafif-orta-ağır), sıkıştırma uygulanacak numunelerin her iki yüzeyine 35-50 veya 75 darbe uygulanır. Bu çalışmada ağır trafik şartlarına göre dizayn yapıldığından 75 darbe uygulanmıştır. Çizelge 3.4'te trafik durumuna göre eşdeğer dingil yükleri görülmektedir. Sıkıştırmadan sonra numuneler oda sıcaklığında hareket esnasında deformasyon yapamayacak duruma gelene kadar soğumaya bırakılır (O'Flaherty 2002). Şekil 3.21'de oda sıcaklığında bekletilen numuneler görülmektedir.

Çizelge 3.4 Trafik durumuna göre eşdeğer dingil yükleri.

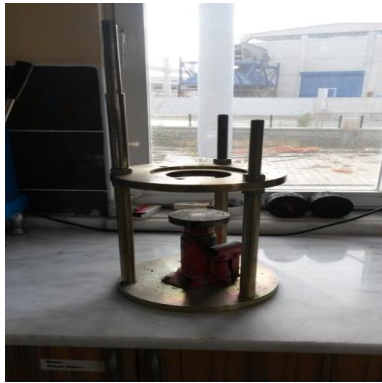
<i>Trafik Durumu</i>	<i>Eşdeğer Dingil Yüğü</i>
<i>Hafif</i>	$<10^4$
<i>Orta</i>	10^4-10^6
<i>Ağır</i>	$>10^6$



Şekil 3.21 Oda sıcaklığında bekletilen numuneler.

3.2.4.1 Marshall Stabilite ve Akma Deneyi

- Oda sıcaklığına kadar soğumuş olan briket numune kalıptan bir numune çıkarma krikosu yardımı ile çıkarılır.
- Çıkarılan numuneler 24 saat süreyle laboratuarda bekletilir.
- Numuneler bir kumpas yardımıyla üç farklı noktadan ölçülür.
- Ölçülen numunelerin havadaki, 25 °C’de sudaki ve yüzey kuru suya doymun durumdaki tartımları yapılır.
- Tartımları yapılan numunelerin stabilite ve akma deneylerine geçmeden önce numuneler 60±1 °C’deki su banyosunda 30-40 dakika bekletilir. Şekil 3.22’de numune çıkarmaya yarayan hidrolik numune çıkarıcı ve su banyosunda deney için bekleme alınmış numuneler görülmektedir.



Şekil 3.22 Hidrolik numune çıkarıcı ve su banyosu.

- Numune çelik bir halkanın iki segmanı arasına yerleştirilir. Akma ölçer yerleştirilerek sıfırlanır. Deneyde; üst segman sabittir. Maksimum yüke erişinceye kadar, alt segmanın hareket etmesiyle dakikada 50,8 mm' lik bir hızla yükleme yapılır.
- Numune kırılıncaya kadar yüklemeye devam edilir ve Marshall Stabilite değeri kaydedilir. "Marshall Stabilitesi" adı verilen bu değer numunenin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır. Ayrıca numunenin çökme yada hareket miktarı olan akma değeri ölçülür. Bu esnada deney numunesinin su banyosundan çıkarılıp, maksimum yük saptamasına kadar geçen süre 30 saniyeden fazla olmamalıdır.
- Numune yüksekliği 63,5 mm'den farklıysa Marshall Stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır. Ayrıca bu deneyle karışımın birim ağırlığı, boşluk oranı ve bağlayıcı ile dolu bulunan agregata boşluğu yüzdesi de saptanır (Önal ve Karaca 1984, Umar ve Ağar 1991, ASTM D 1559-89 1992). Şekil 3.23'te deney de kullanılan numuneler ve Marshall deney cihazı görülmektedir.



Şekil 3.23 Marshall deney cihazı ve numuneler.

3.2.4.2 Optimum Bitüm Yüzdesinin Belirlenmesi

Optimum bitüm yüzdesini hesaplamak için farklı bitüm yüzdelerinde hazırlanmış olan numunelere ait pratik özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk, bitüm ile dolu boşluk, mineral agregatlar içindeki boşluk grafikleri çizilir. Daha sonra yoğunluk ve stabilite eğrilerinin en büyük değerlerine karşı gelen bitüm yüzdeleri, asfaltla dolu boşluğu %

65–78 arasına karşılık gelen, boşluk oranı % 3–5 arasına karşılık gelen bitüm yüzdeleri grafiklerden okunarak bulunan değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak optimum bitüm yüzdeleri tayin edilir. Bu şekilde belirlenen bitüm oranına göre üretilen sıcak asfalt karışımı, şartnamelerde belirtilen özellikleri taşıyacaktır. Daha sonra kontrol için optimum bitüm miktarlarının Karayolları şartnamesinde (2013) (Çizelge 3.5) belirtilen akma ve % MAB'ları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.

Çizelge 3.5 Marshall metodu ile aşınma tabakası dizayn kriterleri (TCK 2013).

Özellikler	Aşınma Tabakası	
	Minimum	Maksimum
Darbe sayısı	75	-
Marshalla stabilite (kg)	900	-
Boşluk (%)	3	5
Asfalt dolu boşluk (%)	65	75
Akma (mm)	2	4
Filler / bitüm oranı	-	1,5
Asfalt çimentosu	4	7
Agregalar arası boşluk (MBA), (%)	14	-

Agregalar arası boşluk değerleri (MBA) Çizelge 3.6'da belirtilen değerlerden fazla olmamalıdır (Tunç 2007). Optimum bitüm yüzdesi belirlenirken, genellikle tabakalardaki boşluk değeri Çizelge 3.7'deki değerler göz önünde bulundurulur (Orhan 2012).

Çizelge 3.6 Minimum MBA değerleri (Tunç 2007).

Nominal (D_{max})	2"	1 ½ "	1"	¾"	½"	3/8"
Minimum (MBA %)	11,5	12	13	14	15	16

Çizelge 3.7 Optimum bitüm miktarında boşluk yüzdesi (Orhan 2012).

<i>Aşınma Tabakası</i>	<i>% 4 boşluk</i>
<i>Binder Tabakası</i>	<i>% 4 - % 5 boşluk</i>
<i>Bitümlü Temel Tabakası</i>	<i>% 5 - % 6 boşluk</i>

3.2.4.3 Marshall Mekanik Batırma Deneyi

Mekanik Marshall batırma deneyi, 60 °C’lik su banyosunda bekletilen Marshall briketlerinin stabilite özelliğinde meydana gelen değişimin ölçülmesi esasına dayanır. Bu deney su etkilerine karşı numunenin dayanımını belirlemede kullanılan bir bitümlü sıcak karışım deneyidir. Aslında soyulmanın dolaylı olarak ölçümü olarak da kabul edilebilir. Çünkü deney sonunda, meydana gelen soyulma neticesinde numunelerin stabilite özelliklerinde de azalmanın olması beklenmektedir. Soyulma deneyleri aynı zamanda bitümlü sıcak karışımların adezyon özellikleri hakkında da fikir verir. Agregabitüm adezyonu iyi olan karışımlarda soyulmanın da daha az olması beklenir. Deney her bir seri numunesi için hesaplanan optimum bitüm miktarına göre üretilen numunelerde gerçekleştirilmiş 3.15 eşitliğine göre Marshall Stabilite kayıpları (S_k) hesaplanmıştır.

$$S_k = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \quad (3.15)$$

Marshall briketlerinin 60 °C sıcaklıktaki su banyosunda 48 saat bırakıldıktan sonra kırılması sonucu elde edilen Stabilite değerlerinin (S_2), herbir seri için optimum bitüm içeriğinde üretilerek normal prosedüre göre kırılarak belirlenen Marshall Stabilite değerlerinden (S_1) farklarının alınması suretiyle bulunan stabilite değeri stabilite kaybı (S_k) olarak adlandırılmaktadır.

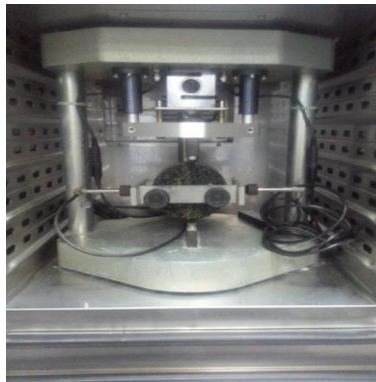
3.2.4.4 Donma- Çözülme Çevriminden Sonra Marshall Stabilite Akma Deneyi

Asfalt kaplamalar servis ömrü boyunca donma-çözülme, kuruma-ıslanma, soğuk-sıcak, kar vb. gibi birçok etki altında kalır. Bu etkiler sonucunda kaplamanın mekanik özelliklerinde zaman içerisinde azalmalar meydana gelebilir, bu da kaplamanın bozulmasıyla sonuçlanır. (Hunter and Ksaibati 2002), asfalt kaplamalardaki donma-

çözülme çevrim sayısının artışı ile birlikte sudan kaynaklı bozulmalarında arttığını belirtmişlerdir. Dolayısıyla Marshall briket numuneleri AASHTO T283-2008 standardında da önerildiği gibi Nüve marka iklimlendirme kabiniinde beş kez donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuşlar ve sonrasında numuneler üzerinde Marshall stabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Bir çevrim iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada numune -18 °C'de 16 saat boyunca dondurulmuş ve ikinci aşamada ise 60 °C'de 24 saat boyunca çözülmeye bırakılmıştır.

3.2.4.5 Dolaylı Çekme - Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi

Bu deney asfalt betonlarının rijitlik modüllerini belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Rijitlik modülü deneyi sıcak karışım asfalt kaplamaların trafik yüklerini dağıtabilme kapasitelerinin dolaylı olarak ölçümüdür ve en önemli sıcak karışım asfalt özelliği olarak kabul edilmektedir. Rijitlik modülü ile trafik yüklerinden kaynaklanan, basınç ve çekme gerilmelerinin oluşturduğu deformasyonlar kontrol edilir. Tek eksenli yükleme altında elde edilen rijitlik modülü genel olarak maksimum gerilmenin maksimum birim şekil değiştirmeye oranı olarak alınır. ITSM deneyi numuneye zarar vermeyen bir deneydir. Bu deney infra Test marka deney cihazı ile İSFALT laboratuvarlarında yapılmıştır (Şekil 3.24). Deney için hazırlanan Marshall numuneleri tek eksenli yüklemenin yapılacağı yükleme aparatına yerleştirilir ve sensörler (LVDT) bağlanır. Taşıt hızları göz önünde bulundurularak yük artış süresi belirlenir. Karışımın tahmini Poisson Oranı (0.35), hedef deformasyon (7µm) ve yük artış süreleri bilgisayara veri olarak girilir ve deney başlatılır.



Şekil 3.24 Rijitlik modülü deney düzeneği (Infra Test).

Deney 20 °C’de periyodu 3000 ms yük artış zamanı 124 ± 2 ms olan 5 darbe esas alınarak deformasyon kontrollü olarak düzenlenmiş ve rijitlik modülünün (S_m) hesaplamasında (3.16) eşitliği kullanılmıştır;

$$S_m = \frac{L * (\nu + 0,27)}{D * t} \quad (3.16)$$

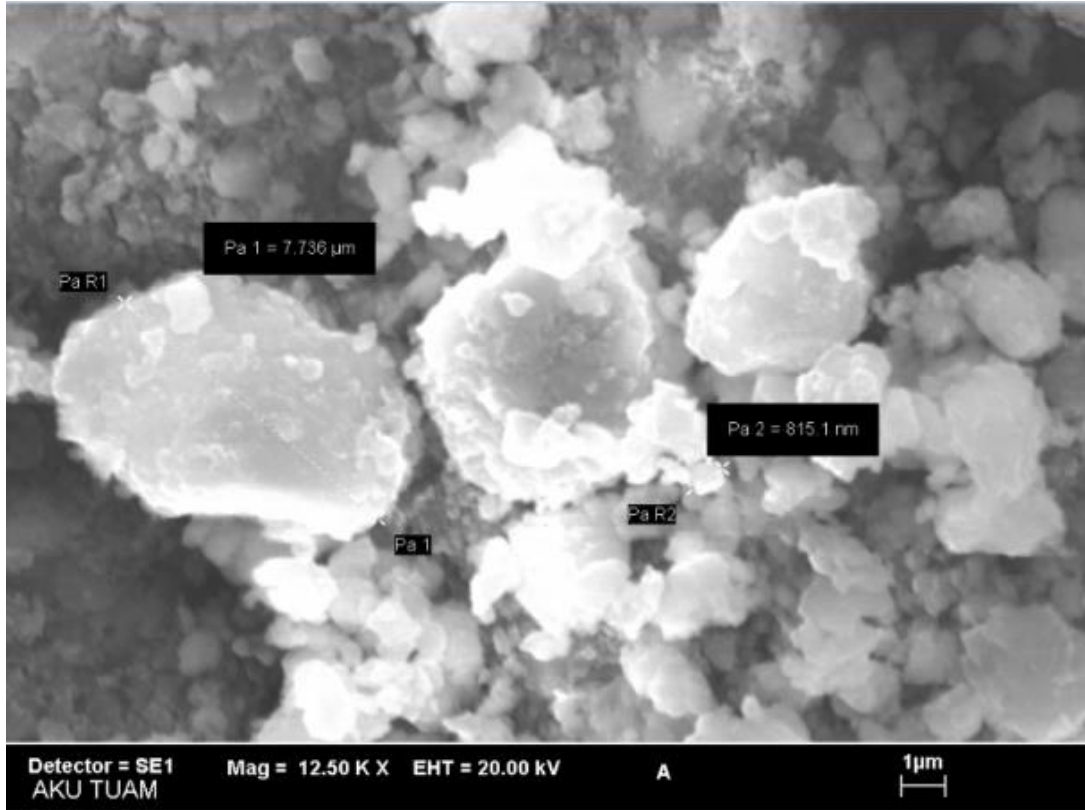
Bu eşitlikte: S_m dolaylı çekme rijitlik modülü (MPa), ν Poison oranı (0.35), L ise düşey yükün maksimum değeri (N), D ortalama yatay deformasyon değeri, t ise ortalama numune kalınlığıdır (mm).

4. BULGULAR

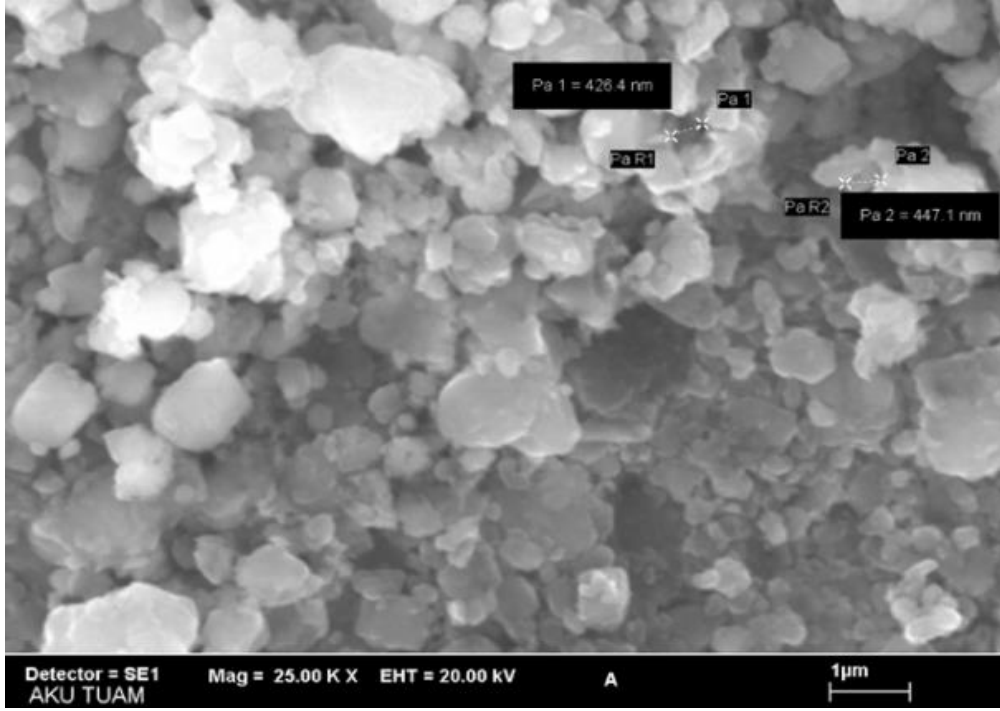
4.1 Atık Malzeme Karakterizasyonu

4.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi Sonuçlar

SEM analizi ile bor filler numunelerinin yüzey morfolojilerinin belirlenmesi, seçilen noktalar üzerinde nokta analizi, nitel çözümleme analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca nokta analizi gerçekleştirilen noktalarda, borun element ve atomik dağılımını belirlemek için de nokta EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde atık filler malzemedeki kristal boyutlarının 7736 μm ile 358 nm arasında, gözenek çaplarının ise 426 nm ile 447 nm arasında olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.1 ve 4.2). Filler malzemenin dane çapı dağılımı ve gözeneklilik durumunun bitüm absorpsiyonunda etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.1 Filler bor atığının SEM morfolojisi.



Şekil 4.2 Filler bor atığının kristalize hali.

4.1.2 Kimyasal Analiz Sonuçları

Kimyasal analiz bor ve türevleri üzerinde yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, kil pestili olarak tanımlanan malzeme; esas olarak, silis, alüminyum ve magnezyum içeren bileşiklerden oluşmaktadır. Analiz sonuçlarına göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Bor atığının kimyasal analiz (EDX) sonuçları.

Bileşen	Bor Atık (Tinkal) %
CaO	11.78
SiO ₂	15.41
Al ₂ O ₃	1.51
Fe ₂ O ₃	0,43
MgO	13.62
Na ₂ O	7.92
K ₂ O	1.20
P ₂ O ₆	0.02
TiO ₂	0,03
MnO	0.01
Cr ₂ O ₃	<0.002
B ₂ O ₃	>20000 ppm

Yapılan bu analizler sonucunda CaO ve SiO₂ değerlerinin diğer bileşenlere oranla yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kalsiyum oksit (CaO) su ile reaksiyona girmesi sonucu kalsiyum hidroksite dönüşmektedir. Kalsiyum hidroksit (CaOH₂) yol yapımında killi zeminlerin stabilizasyonunda, sıcak karışım asfaltta ise soyulma önleyici kimyasal olarak kullanılmaktadır.

Silisli agregalar asidik yapılarından dolayı bitümdeki naftenik asit tepkisine cevap vermezler. Bu nedenle silisli agrega ile bitüm arasında iyi bir bağ kurmak oldukça zordur. Ayrıca silikatların su absorpsiyonu yüksek olduğu için asfalt kaplamalarda soyulma ve sökülme bozulmalarına neden olabilir.

4.1.3 Metilen Mavisi Deney Sonuçları

TS EN 933-9 standartlarına uygun olarak yapılan deney, bor atığı ve kireçtaşı için ayrı ayrı yapılmıştır. Kireçtaşı için deney bir defa yapılmış ve sonuç 0,25 olarak bulunurken, bor atığı için 10 defa tekrarlanan deney sonucu 2,5 olarak tespit edilmiştir. Yapılan deney sonuçları karayolları teknik şartnamesi (2013) sınırları içerisinde yer almaktadır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 Metilen mavisi sınır miktarları (TCK 2013).

		<i>Binder Tabakası</i>	<i>Aşınma Tabakası</i>	<i>Deney Standartı</i>
<i>İnce Agreganın 0/2 mm Kismına</i>		$\leq 1,5$ ile ≤ 3	$\leq 1,5$ ile ≤ 3	
<i>Metilen Mavisi, gr/kg</i>	<i>Öğütülmüş Magmatik Agreganın 0/2 mm Kismına</i>	≤ 3	≤ 3	<i>TS EN 933-9</i>

4.2 Agrega Deney Sonuçları

Kullanılan agrega malzemelerinin, fiziksel özelliklerinin saptanması için standart laboratuvar testleri uygulanmıştır. Özgül ağırlık ve su emme, fiziksel ve mekanik testlerin sonuçları, Çizelge 4.3'de sırasıyla sunulmaktadır. TCK Karayolları

Şartnamesine uygun olarak agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.4 ve aynı gradasyona sahip agregaların dizaynı Çizelge 4.5 'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Agreganın özgül ağırlık ve su emme deneyi sonuçları.

<i>Agrega Deneyleri</i>	<i>Sonuçlar (gr/ cm³)</i>
<i>İri Agreganın Hacim Özgül Ağırlık Deneyi (>No:4)</i>	2.683
<i>İri Agreganın Zahiri Özgül Ağırlık Deneyi (>No:4)</i>	2.710
<i>İnce Agreganın Hacim Özgül Ağırlık Deneyi (No:4-200)</i>	2.671
<i>İnce Agreganın Zahiri Özgül Ağırlık Deneyi (No:4-200)</i>	2.699
<i>Kireçtaşı Filler Agregasının Zahiri Özgül Ağırlık Deneyi</i>	2.738
<i>Bor Atık Filler Agregasının Zahiri Özgül Ağırlık Deneyi</i>	2.608
<i>Su Emme Deneyi (%) (>No:4)</i>	0.37
<i>Su Emme Deneyi (%) (No:4 - No:200)</i>	0.65

Çizelge 4.4 Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri.

<i>Agrega Deneyleri</i>	<i>Değer</i>	<i>Sınır Değerler</i>	<i>Standart</i>
<i>Los Angeles Aşınma Değeri (%)</i>	22,4	< 35	ASTM C131-89
<i>Agreganın Darbe Dayanımı (%)</i>	8,9	< 18	ASTM D3744-03
<i>Donma-Çözülme Kaybı (%)</i>	0.52	< 12	TS EN 1097-2
<i>Donma-Çözülme Sonrası Dayanım</i>	29.6	-	TS EN 1097-2

Çizelge 4.5 Agreganın gradasyon dizaynı.

<i>Elek Numarası (mm)</i>	<i>Geçen (%)</i>	<i>Alt- Üst Sınırlar</i>
3/4" (19.0)	100	100
1/2" (12.5)	92,0	83-100
3/8" (9.5)	80,0	70-90
No:4 (4.75)	48,0	40-55
No:10 (2.00)	32,0	25-38
No:40 (0.42)	15,0	10-20
No:80 (0.180)	11,0	6-15
No:200 (0.074)	7,0	4-10

Bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan agregalarda, üstün aşınma ve dayanıklılık gibi özelliklerin olması tercih edilmektedir. Kullanılan agrega örneklerinin dayanıklılık özellikleri de standart testler ile belirlenmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre, numuneler şartname sınırları içinde yer almaktadır.

4.3 Bitümlü Sıcak Karışım Deney Sonuçları

4.3.1 Bitüm Özellikleri

Çalışmada kullanılan bitümlü bağlayıcıya ait mühendislik özellikleri ve ilgili şartnameye (TCK 2013) ait sınır değerler Çizelge 4.6'da verilmiştir. Buna göre bağlayıcı özelliklerinin şartname sınırları içerisinde olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6 Bitümlü bağlayıcıya ait mühendislik özellikleri.

<i>Özellikler</i>	<i>Değerler</i>	<i>Standartlar</i>
<i>Temin Edilen Yer</i>	<i>Aliğa/Turkey</i>	-
<i>Penetrasyon Derecesi</i>	50/70	-
<i>Penetrasyon Derecesi (25 °C'de)</i>	51	ASTM D5-06e1
<i>Özgül Ağırlık</i>	1,035	ASTM D70-09e1
<i>Yumuşama Noktası (°C)</i>	50	ASTMD36/D36M-09
<i>Isıtma Kaybı (%)</i>	2.0	ASTM D6-95
<i>Parlama Noktası (°C)</i>	297	ASTM D92-05a
<i>Düktilite (5 cm/dk)</i>	>100 cm	ASTM D113-07
<i>Viskozite (135 °C'de)</i>	0,417 Pa s	ASTM D4402-06
<i>Viskozite (165 °C'de)</i>	0,122 Pa s	

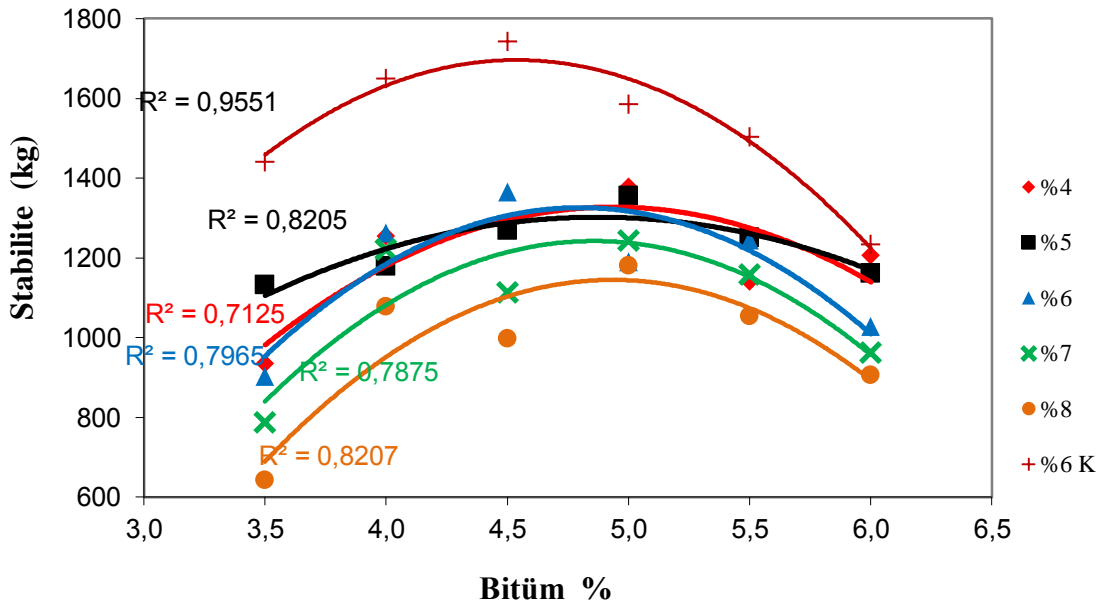
4.3.2 Marshall Yöntemi ile Sıcak Karışım Asfalt Dizayn Sonuçları

Beş farklı miktarda bor atığı ve şahit numune olarak ağırlıkça % 6 kireçtaşı filler kullanılarak (% 6 K) sıcak karışım asfalt numuneleri hazırlanmıştır. Ağırlıkça bor atığı filler değişimleri ve % 6 K numunelerinin her biri için Marshall yöntemi ile sıcak karışım asfalt dizaynı gerçekleştirilmiştir. Kuru agrega karışımları TCK şartnamesi (2013) Tip-1 Aşınma dizayn limitlerinin ortasındaki gradasyon eğrisi esas alınarak

hazırlanmışlardır. Ağırlıkça % 3.5- 4.0- 4.5- 5.0- 5.5- 6.0 bitüm miktarlarının her biri için üç ayrı sıcak karışım asfalt briketleri dökülmüştür. Bu numuneler üzerinde ağırlık hakim ilişkilerini belirlemek maksadıyla havadaki, sudaki ve yüzey kuru suya doymuş ağırlıkları ve ayrıca yükseklik ve çapları ölçülmüştür. Bunlara ilaveten numuneler Marshall Stabilite-Akma deneyine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlardan bazı özelliklerin filler ve bitüm miktarına bağlı olarak nasıl değiştiğini belirlemek maksadıyla grafikler çizilmiştir. Bunlar:

- Stabiliteye karşılık bitüm ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi
- Hacim özgül ağırlığa karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi
- Bitümle dolu boşluk oranına karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi
- Boşluk yüzdesine karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi
- Mineral agregalar arasındaki boşluğa karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi
- Akma değerine karşılık ağırlıkça bitüm yüzdesi değişimi.

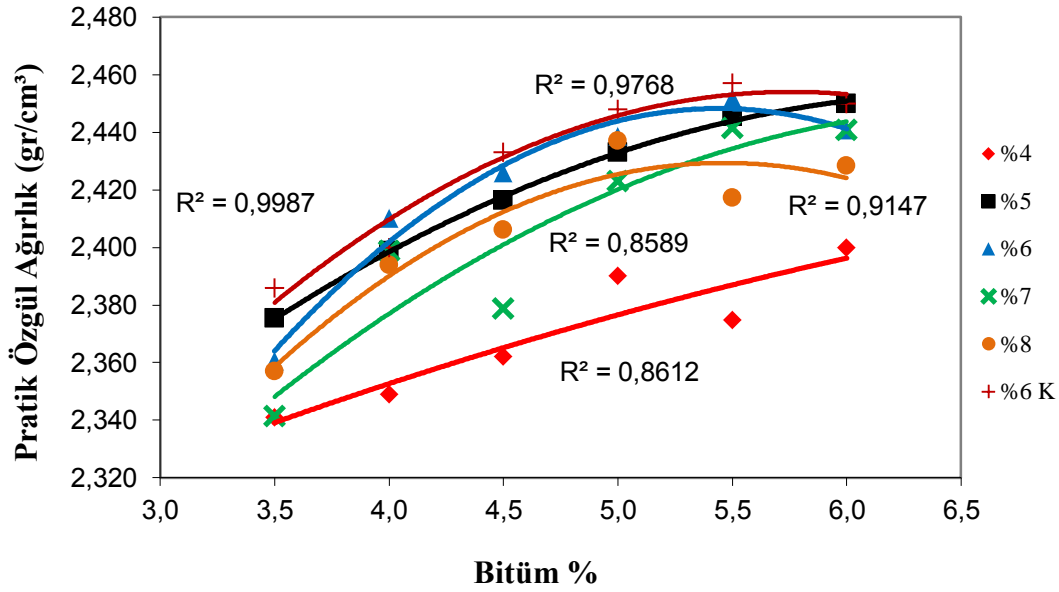
Yapılan her bir dizayn sonunda optimum bitüm miktarları hesaplanmıştır. Sırasıyla % 4- 5- 6- 7- 8 ve 6 K serisi numuneleri için optimum bitüm miktarı % 5.43, 5.04, 4.80, 5.16, 4.99, 4.70 olarak hesaplanmıştır. Marshall Stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki değişimler Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3 Marshall stabilite değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.

Marshall stabilite değeri en önemli sıcak karışım asfalt özelliklerinden birisidir. Stabilite değeri arttıkça sıcak karışım asfalt kaplamaların sürekli dinamik yükler ile taşıtlardan gelen uzun dönem statik yükler, hızlanma ve yavaşlamadan kaynaklı düşey ve yatay gerilmeler (basınç) ile kayma gerilmelerine karşı direnci artar (Whiteoak 1990; Güner 2005). Marshall stabilite deney sonuçlarına göre karışım içerisindeki ağırlıkça bor atığı filler miktarı % 6'yı geçtiğinde Marshall Stabilite değerlerinde biraz azalma görülmüştür. Bunun en önemli nedeni filler miktarının % 6'yı geçmesinin bitüm absorpsiyonunu arttırması, bunun da Marshall Stabilite değerini düşürmesidir. % 4- 5- 6- 7- 8 ve % 6 K serileri için maksimum stabilite değerleri sırasıyla 1320, 1300, 1320, 1160, 1220 ve 1690 kg olarak elde edilmiştir. Tüm numunelerin stabilite değeri, şartnamede aşınma tabakası için önerilen en küçük stabilite sınır değerinden yüksek olmakla birlikte bor atığı filler ile üretilen numunelerde en yüksek stabilite değeri % 4 bor fillerini içeriğinde elde edilmiştir. Bununla birlikte kontrol numunesinin (% 6 K) stabilite değeri tüm numunelerin stabilite değerinden daha yüksek elde edilmiştir.

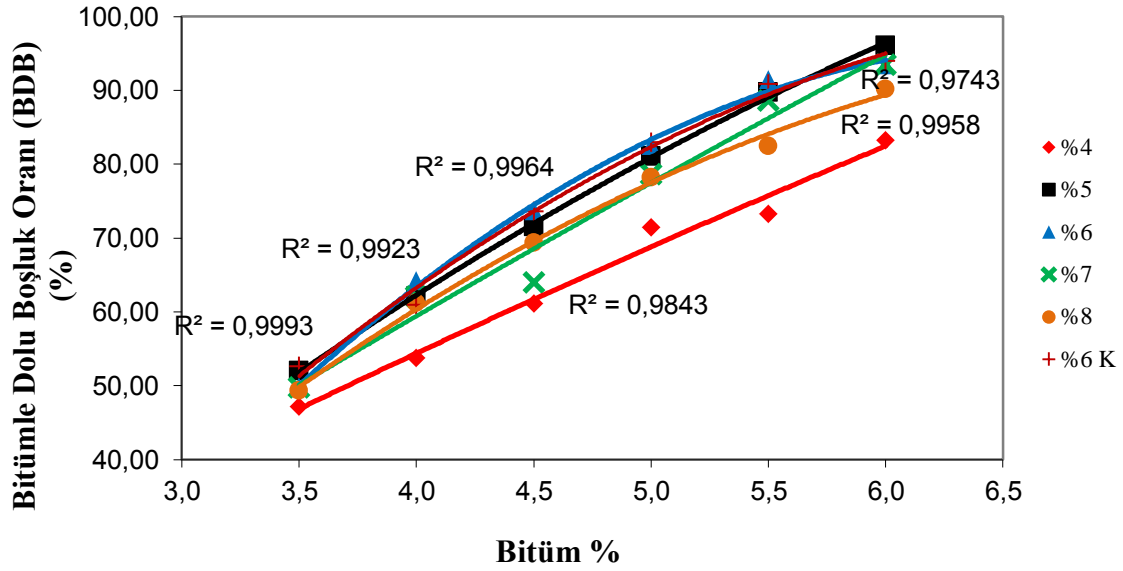
Bitümlü sıcak karışımlar için diğer bir önemli özellik ise yoğunluktur. Yoğunluğun artması ile, durabilite, geçirimsizlik ve stabilite gibi fiziksel özelliklerinin de daha iyi olması beklenir. Yoğunluğu yüksek olan karışımlarda bitüm oksidasyonu ve ultraviyole ışınlar gibi etkiler neticesinde meydana gelen yaşlanma daha yavaş olur ve bunun neticesinde durabilite özelliğinde artış, soyulma sonucu meydana gelen sökölme bozulmalarında azalma beklenir. Tüm serilere ait numunelerde ağırlıkça bitüm yüzdesine karşılık pratik özgül ağırlık değerlerine ait değişimler Şekil 4.4'de görülmektedir. Ağırlıkça bitüm yüzdesi ile pratik özgül ağırlık arasındaki ilişkilerin kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 Pratik özgül ağırlık ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisine ait sonuçlar.

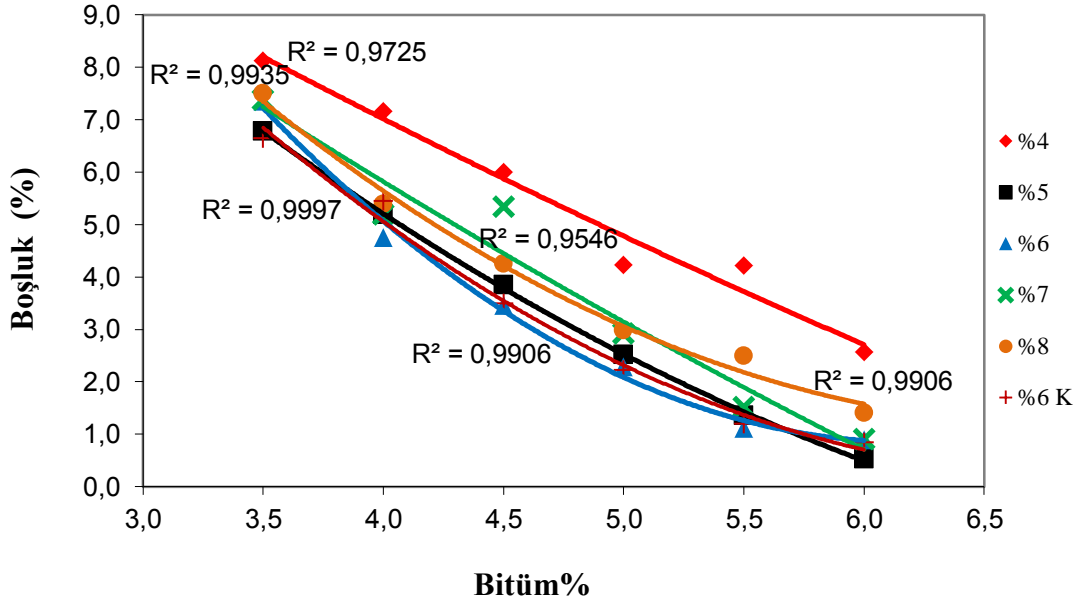
Sırasıyla % 4 % 5 % 6 % 7 % 8 ve % 6 K serileri için en yüksek pratik özgül ağırlık değerleri 2,396- 2,452- 2,444- 2,440- 2,428 ve 2,453 gr / cm³ olarak elde edilmiştir. En yüksek pratik özgül ağırlık değeri kontrol serisine ait (% 6 K) numunelerinde elde edilmiştir. Beklenildiği gibi Marshall stabilite değerinin de % 6 K serisinde en yüksek değerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.4). Bitüm yüzdesine karşılık pratik özgül ağırlık değerlerindeki değişim arasındaki ilişkiler oldukça karardır.

Bitümlü dolu boşluk (BDB), bitümlü sıcak karışımlarda plastisite, durabilite ve kaplamanın sürtünme katsayısı üzerinde etkilili bir özellik olup aynı zamanda agrega daneleri etrafında bitüm filmi oluşumunu sağlar. Bu da kaplamanın durabilitesi açısından oldukça önemli bir husustur (Gürer 2005). Asfalt kaplamaların sürtünme katsayısı kaplamanın yüzey dokusu kadar bitümlü sıcak karışımlardaki bitüm yüzdesi ve boşluk yüzdesiyle de ilgilidir (Umar ve Ağar 1994). % 4- 5- 6- 7- 8 bor atığı filler ve % 6 kireçtaşı kökenli filler ilaveli karışımlarda optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen BDB yüzdesi sırasıyla % 74- % 80- % 82- % 78- % 70 ve % 77 olarak elde edilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre bitümlü dolu boşluk miktarı % 75 ile 65 arasında olmalıdır. Buna göre en iyi değer % 7 bor atığı filler miktarına sahip olan seride elde edilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Bitümle dolu boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

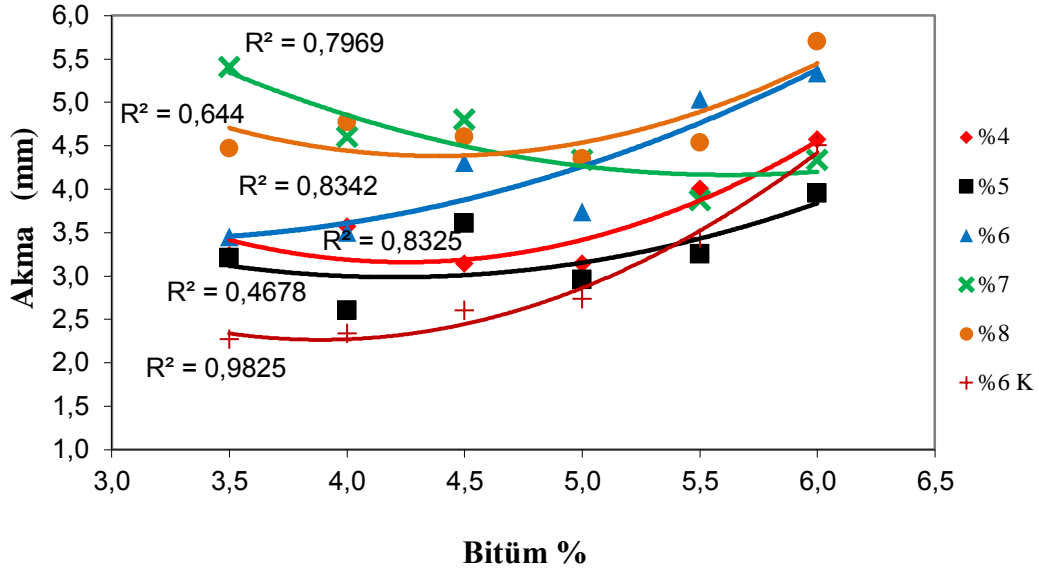
Bitümlü sıcak karışımlar için önemli bir özellik de boşluktur. Bitümlü sıcak karışımlarda boşluk için Karayolları Teknik Şartnamesinde (2013) bir alt ve üst sınır (%3-5) tanımlanmıştır. Bu sınır aralık tanımlanmasının en önemli nedeni bitümlü sıcak karışımlarda olası bir kuma bozulmasını önlemek içindir. Üst sınır belirlenmesinin nedeni ise bitümlü sıcak karışımların alt tabakalara su geçirimsizliğinin, yeterli stabilitesinin sağlanması ve bitüm oksidasyonunun azaltılmasıdır (Ağar ve Umar 1994, Gürer 2005). Oksitlenme neticesinde bitümlü bağlayıcının penetrasyon değeri düşerek kaplamanın bir süre sonara gevrek bir davranış sergilemesine ve kırılğan hale gelmesine yol açabilir (Umar ve Ağar 1994, Gürer 2005). % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 bor atığı filler ve % 6 kireçtaşı filler içeren numuneler için optimum bitüm yüzdesine karşılık gelen boşluk yüzdesi sırasıyla % 3.9- 2.5- 4.0- 3.0- 3.2 ve 3.0 olarak bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre % 5 bor atığı filler içeren numune serisi haricinde tüm numunelerin boşluk miktarlarının şartname sınırları içerisinde olduğu görülmektedir. % 6 bor atığı filler içeren seride boşluk miktarının ideal boşluk miktarı olan % 4.0 olduğu belirlenmiştir. Tüm serilere ait numunelerde ağırlıkça bitüm yüzdesine karşılık boşluk yüzdelerindeki değişimler Şekil 4.6'da görülmektedir. Ağırlıkça bitüm yüzdesi ile boşluk arasındaki ilişkilerin kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6 Boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

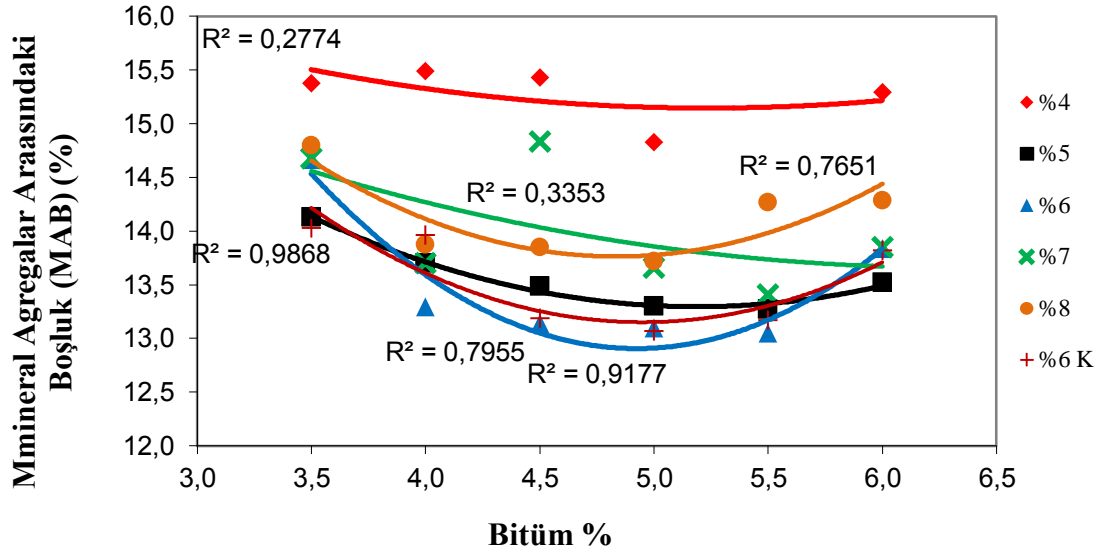
Marshall dizayn yönteminde gerçekleştirilen dizaynın kontrol edilmesi bakımından üç önemli özelliğe ait ilişkinin de grafiklendirilmesi gerekir. Bunlar Akma-Bitüm yüzdesi, mineral agrega içerisindeki boşluk-bitüm yüzdesi ve Marshall katsayısı-bitüm yüzdesi grafikleridir. Bu grafikler bitümlü sıcak karışımın uzun dönem davranışı hakkında önemli fikirler verir.

Akma değeri bitümlü sıcak karışım kaplamaların plastiklik ve esneklik özelliklerini yansıtan bir değer olup Marshall briketlerinin kırıldığı andaki yüke karşılık gelen deformasyon değeri olarak da bilinir. Akma, sıkışmış karışımların iç sürtünmelerinin bir ölçüsüdür. Akma ile iç sürtünme arasında doğrusal ters bir ilişki bulunmaktadır (Gürer 2005). % 3, % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 bor atığı filler kullanılan seriler ve % 6 kireçtaşı filler kullanılan kontrol serisi numunelerin optimum bitüm miktarına karşılık gelen akma miktarı sırasıyla 3.9- 3.1- 4.1- 4.2- 4.5 ve 2.6 mm olarak bulunmuştur. Karayolları Teknik Şartnamesine (2013) göre aşınma tabakasında kullanılacak bitümlü sıcak karışımlar için akma değerinin 2 ile 4 mm arasında olması ön görülmüştür. Deney sonuçlarına göre bor atığı filler ağırlıkça % 5 olarak karışıma ilave edildiğinde, karışımın esneklik özelliğinin daha iyi olacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte kontrol numunesinin akma değerinin bor atığı filler kullanılan serilere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.7).



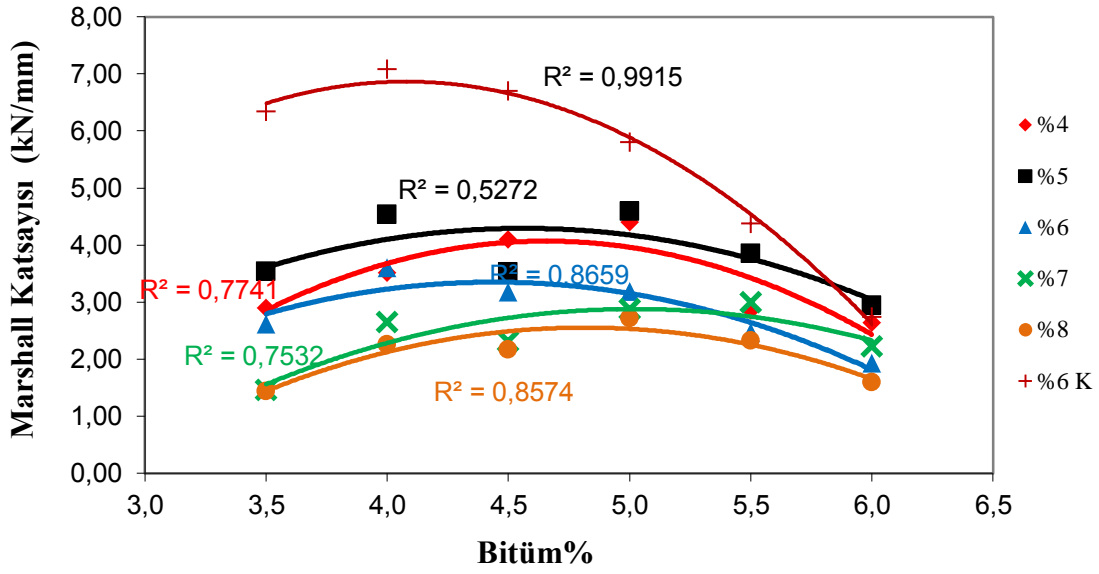
Şekil 4.7 Akma değeri ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

Mineral agregalar arasındaki boşluk değeri (MAB) sıkıştırılmış kaplama karışımları içerisindeki bitümle dolu boşluklar da dâhil olmak üzere agrega danecikleri arasındaki hava boşluklarıdır. Mineral agregalar arasındaki boşluk, karışımdaki bitüm ve hava boşluğu için gerekli olan hacime tekabül eden kullanılabilir hacmi temsil eder. Dolayısıyla mineral agregalar arasındaki boşluk arttıkça agregalar üzerindeki bitüm film kalınlığının artacağı ve karışımın durabilitesinin yükseleceği söylenebilir (Gürer 2005). Bu yüzden Karayolları teknik şartnamesinde aşınma tabakasında kullanılacak agregalar için en düşük MAB değeri % 14 olarak belirlenmiştir. Üretilen bitümlü sıcak karışım numunelerinde % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 bor atığı filler ve % 6 kireçtaşı filler içeriğinde MAB değerleri sırasıyla 15.1- 13.4- 13.0- 13.8- 13.8 ve 13.2 olarak belirlenmiştir. Mineral agregalar arasındaki boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Mineral agregalar arasındaki boşluk ve ağırlıkça bitüm yüzdesi ilişkisi.

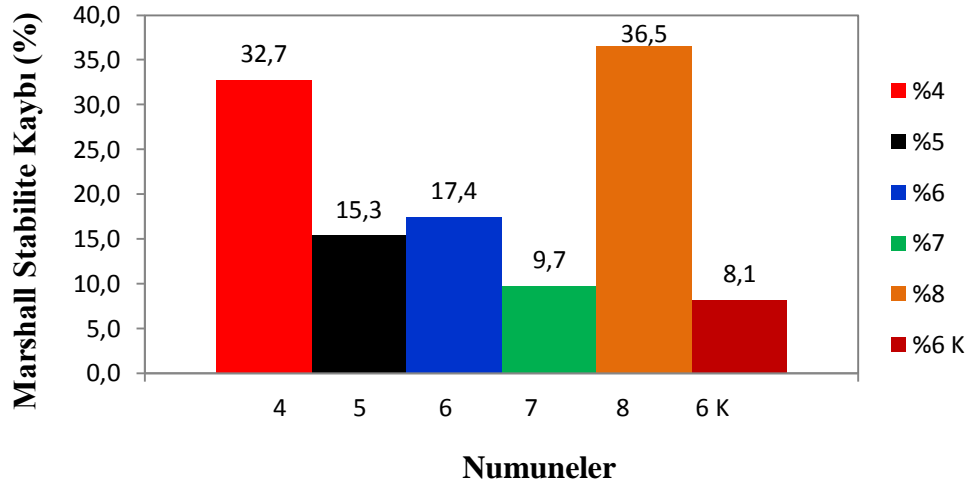
Bitümlü sıcak karışım dizaynında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktör de Marshall katsayısıdır (MK). Marshall Stabilite değerinin akma değerine olan oranı olarak da bilinir. Bitümlü sıcak karışımların rijitlik modüllerinin tahmin edilmesinde kullanılır. Marshall katsayısı değeri yüksek olan numunelerin yüksek deformasyon ile kırılmaları beklenilir (Whiteoak 1990, Lavin 2003, Çelik vd. 2007). Üretilen bitümlü sıcak karışım numunelerinde % 4, % 5, % 6, %7 ve % 8 bor atığı filler ve % 6 kireçtaşı filler içeriğinde Marshall katsayısı değerleri sırasıyla 3.6- 4.2- 4.3- 2.8- 2.6 ve 6.4 kN/mm olarak belirlenmiştir. Marshall katsayısı ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9 Marshall katsayısı ve ağırlıkça bitüm yüzdesi arasındaki ilişki.

4.3.3 Marshall Mekanik Batırma Deney Sonuçları

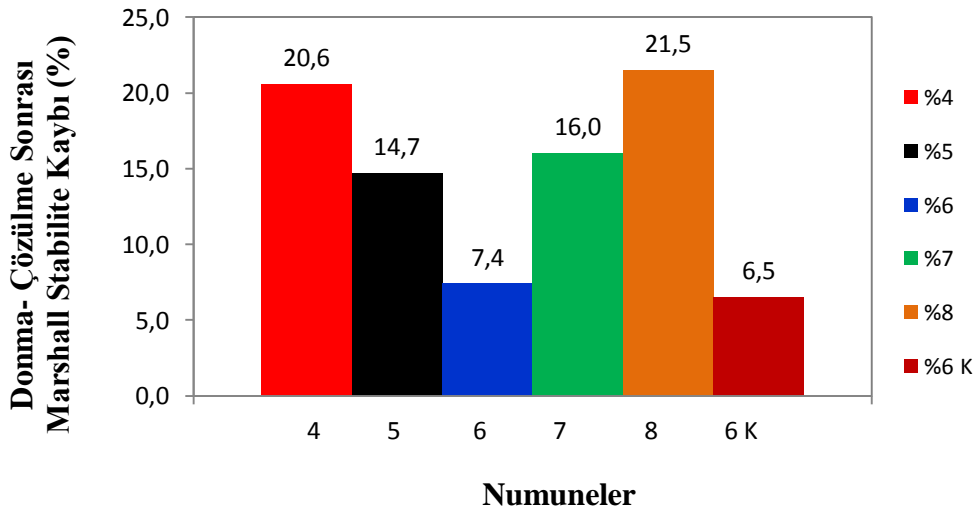
Her bir seriye ait Marshall Stabilite kayıpları hesaplanmıştır. Buna göre en düşük kaybın kontrol numunelerinde, bor atığı filler içeren numunelerde ise % 7 serisinde olduğu görülmüştür. Bor atığı numunelerde filler miktarının düşük olduğu (% 4) ve yüksek olduğu (% 8) numunelerdeki Marshall stabilite kayıplarının diğer numunelere göre daha fazla olduğu fark edilmiştir. Filler miktarının düşük olduğu (% 4) numunelerde yeterli harç fazı oluşamamış, filler oranının yüksek olduğu (% 8) numunelerde ise yüzey alanının artmasına bağlı olarak bitüm film kalınlığı azalmış ve bunların neticesinde stabilite kayıpları artmıştır. Şekil 4.10'da Marshall Stabilite kayıp değerleri verilmiştir.



Şekil 4.10 Marshall stabilite kaybı sonuçları.

4.3.4 Donma-Çözülme Çevrimi Sonrası Marshall Stabilite Değişimleri Sonucu

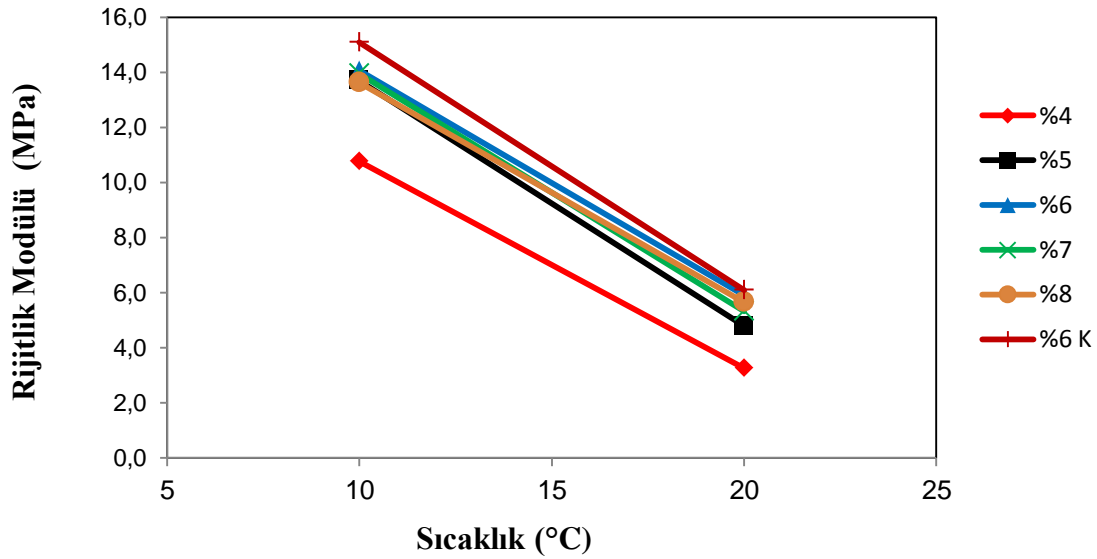
Deney sonuçlarına göre ağırlıkça % 6 oranında kireçtaşı filler içeren numunelerde donma-çözülme çevrimi sonrası Marshall stabilite kaybının en düşük olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte % 6 oranında bor atığı filler kullanılarak üretilen numunelerdeki Marshall stabilite kayıpları da kontrol serisi numune kayıplarına yakındır. Donma-çözülme döngüsünden sonra Marshall stabilite kaybı Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 Donma-çözülme sonrası marshall stabilite kayıpları.

4.3.5 Dolaylı Çekme-Rijitlik Modülü (ITSM) Deneyi Sonuçları

Rijitlik modülü yükseldikçe bitümlü sıcak karışım asfaltta kalıcı deformasyona karşı direnci artmaktadır. 10 °C ve 20 °C sıcaklıklarda en yüksek rijitlik modülü % 6 kireçtaşı kökenli filler ilave edilmiş numunelerde elde edilmiştir. % 6 K serisine ait numunelerin 10 °C ve 20 °C'deki rijitlik modülleri sırasıyla 15,1 ve 6,1 MPa olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte ağırlıkça % 4, % 5, % 6, % 7 ve % 8 bor atığı filler kullanılan numunelerde 10 °C'deki rijitlik modülü değerleri 10,8- 13,7- 14,1- 14,0- 13,6 MPa olarak bulunurken, 20 °C deki rijitlik modülleri ise 3,3- 4,8- 5,9- 5,3- 5,7 MPa olarak bulunmuştur. Ağırlıkça % 6 bor atığı filler kullanılan numunelerinin rijitlik modülleri şahit numune olan % 6 K numunesine yakın elde edilmiştir. Bununla birlikte karışıma aynı miktarda ilave edilen iki farklı filler için rijitlik modülü değerleri Çelik vd.'nin (2007) belirttiği gibi birbirinden farklıdır. Deney sonuçlarından, % 6 bor atığı filler ilaveli bitümlü sıcak karışımların kontrol karışımına yakın davranış sergileyeceği düşünülmektedir. Benzer şekilde Şekil 4.12'de 10 °C ve 20 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen rijitlik modülü deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.12 10 °C ve 20 °C'deki rijitlik modülü değerleri.

4.4 Optimum Bor Atığı Filler Miktarının Hesaplanması

Bor atığı filler kullanılarak üretilen beş farklı seriye ait sıcak karışım asfalt numuneleri için yapılan deney sonuçları esas alınarak karışımdaki ağırlıkça optimum bor atığı filler miktarının ne olması gerektiği belirlenmiştir. Optimum filler yüzdesi belirlenirken şu parametreler gözönünde bulundurulmuştur;

- En yüksek Marshall Stabilite değerine karşılık gelen filler yüzdesi (F_m),
- En yüksek yoğunluk değerine karşılık gelen filler yüzdesi (F_d),
- En düşük bitüm oranında % 4 boşluk değerine karşılık gelen filler yüzdesi (F_v),
- En düşük mineral agregalar arasındaki boşluk (MAB) değerine karşılık gelen filler yüzdesi (F_{ma}),
- Akma değeri 3 mm'ye karşılık gelen filler yüzdesi (F_t),
- Bitümlü dolu boşluk oranı % 70'e karşılık gelen filler yüzdesi (F_{fa}),
- Marshall mekanik batırma deneyi sonuçları esas alınarak en düşük Marshall Stabilite kaybına karşılık gelen filler yüzdesi (F_{mi}),
- Donma-çözülme çevrimi sonrasında en düşük Marshall Stabilite kaybına karşılık gelen filler yüzdesi (F_{ft}),
- En yüksek rijitlik modülü değerini sağlayan filler yüzdesi (F_s)'dir.

Belirtilen parametrelerin aritmetik ortalamaları alınarak, (4.1) eşitliği ile optimum filler yüzdesi 5.7 olarak hesaplanmıştır.

$$F_o = \frac{F_m + F_d + F_v + F_{ma} + F_f + F_{fa} + F_{mi} + F_{ft} + F_s}{9} \quad (4.1)$$

4.5 Deney Sonuçlarının Maliyet Analizi

Eti Kırka Bor İşletmesi merkez alınmak suretiyle geleneksel kireçtaşı filler malzemesi yerine bor atığı filler malzemesinin kullanılmasının kaç km'lik bir yarıçapta ekonomik olabileceği ile ilgili bir analiz gerçekleştirilmiştir. Analizde geleneksel filler malzemesinin (kireçtaşı) kullanıldığı bitümlü sıcak karışım birim maliyet hesaplanmasında, Afyonkarahisar Belediyesi Asfalt Üretim Şantiyesinin birim fiyat verileri kullanılmıştır. Buna göre; 1 m³ bitümlü sıcak karışımın birim hacim ağırlığı ortalama 2680 kg / m³ olarak kabul edilmiştir. Filler olarak kireçtaşı ve bor atığı içeren bitümlü sıcak karışımdaki filler, agrega ve bitümün ağırlıkça oran ve miktarları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Filler olarak kireçtaşı ve bor atığı içeren asfaltın içerik oran ve miktarları.

Filler Tipi	Bitüm	1 m ³ BSK	Filler (%)	1 m ³ BSK	1 m ³ BSK	1m ³ BSK
	Miktarı (%)	İçerisindeki Bitüm		İçerisindeki Filler	İçerisindeki Agrega	Toplam Ağırlığı
Kireçtaşı	4,80	128,64	6	153,08	2398,28	2680
Bor atığı	4,87	130,516	5,7	145,32	2404,16	2680

Maliyet analizinde kullanılan bitüm İzmir ve İzmit rafinerilerinden alınmış olup B50/70 penetrasyonlu bitümdür. Afyonkarahisar için İzmir rafinesi ve Kırka için İzmit rafinesinden ürün temin edildiği düşünülmüştür. 1 kg bitüm 0,644 TL/ kg'dır. 1 kg bitümün birim km taşıma maliyeti: 0,00015 TL'dir. Bitümün İzmir ve İzmit rafinerilerinden kg başına nakliye bedelleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Bitümün İzmir ve İzmit rafinerilerinden nakliye bedelleri.

Rafineri Yeri	Ulaşılan Yer	Mesafe (km)	1 Kg Bitümün 1 Km Nakliye Fiyatı (TL)	Nakliye Fiyatı (TL/kg)
İzmit	Eskişehir Kırka	288	0,00015	0,043
izmir	Afyonkarahisar	387	0,00015	0,058

Bitümün Afyonkarahisar ve Kırka asfalt üretim tesislerine km başına nakliye bedeli Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Afyonkarahisar ve Kırka için bitüm maliyetleri (Int. Kyn.9).

<i>Mevki</i>	<i>Mesafe (km)</i>	<i>Bitüm Miktarı (Kg)</i>	<i>Nakliye Birim Fiyatı (TL/kg)</i>	<i>Toplam TL</i>
<i>Kırka</i>	1	0,644	0,043	0,687
<i>Afyonkarahisar</i>	1	0,644	0,058	0,702

Geleneksel agrega Afyonkarahisar Asfalt Üretim Tesisine ortalama 45 km’lik uzaklıktaki taş ocaklarından taşınmaktadır. Geleneksel agrega ve filler malzemesi birim fiyatı 0,012 TL /kg’dır. Bu bedelin 0,0055 TL’sini ürün bedeli, 0,0065 TL’sini nakliye bedeli oluşturmaktadır.

$$\frac{0,0065}{45} = 0,00014 \text{ TL / kg*km (Geleneksel agreganın 1 km taşını için gerekli bedel)}$$

$$0,00014+0,0055= 0,0056 \text{ TL / kg* km (Geleneksel agreganın ürün ve nakliye bedeli)}$$

Kırka bor işletmesinden kullanılacak olan bor atığı birim fiyatı yalnızca nakliye bedelinden oluşmaktadır. Nakliye bedeli eşitlik (4.1) ile hesaplanmıştır;

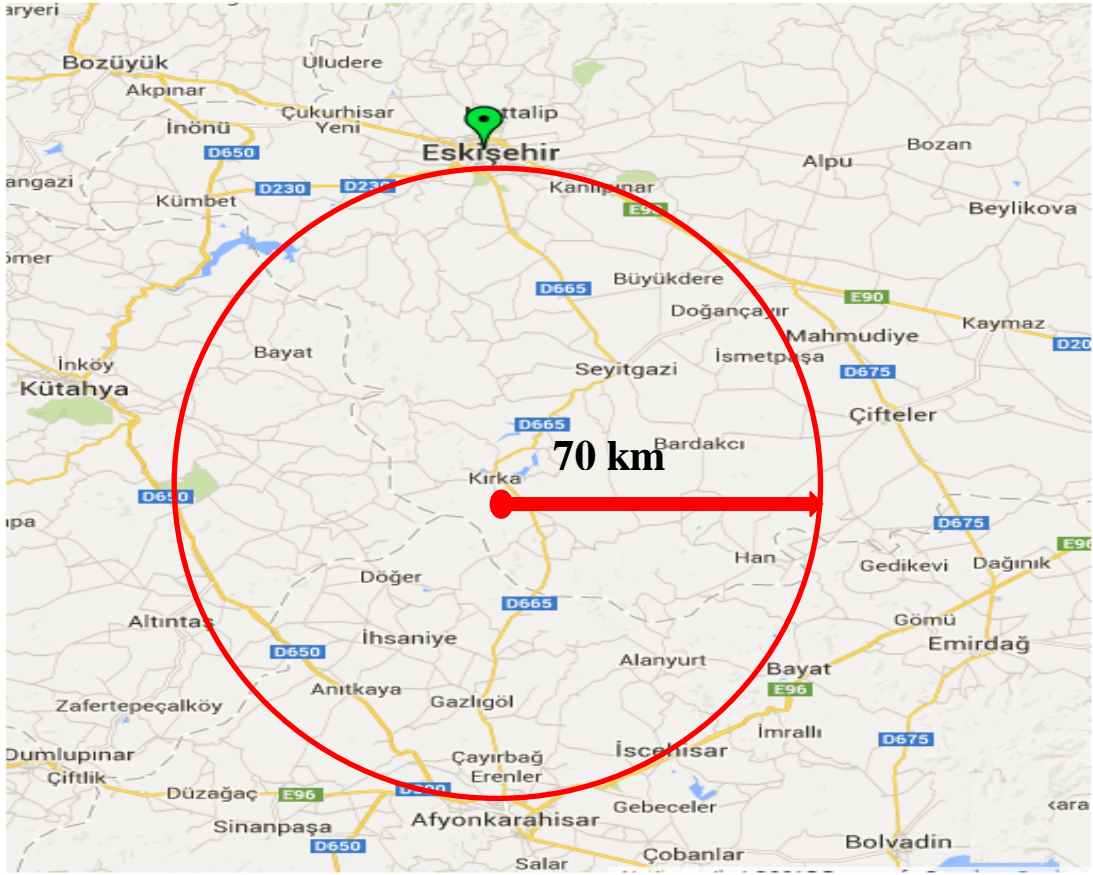
$$\frac{0,0065}{45} = 0,000144 \text{ TL / km'dir.} \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.2) oluşturularak ekonomik taşın mesafesi (X);

$$2551,36*0,0056+128,64*0,702=2404,16*0,0056+130,516*0,687+145,32*0,000144* X$$

$$X = 70 \text{ km} \quad (4.2)$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 Kırka Bor tesisinden alınan mineral fillerin ekonomik kullanım yarıçapı.

Sonuç olarak Kırka Bor Tesisinden alınan bor atığı mineral filler malzemesi bitümlü sıcak karışım üretiminde 70 km yarıçaplı, 15 386 km²'lik bir alanda geleneksel kireçtaşı filler malzemesi yerine kullanılabilceği belirlenmiştir (Şekil 4.13).

5. SONUÇLAR

Bor atığının BSK kaplamalarda mineral filler malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmak ve optimum kullanım miktarını belirlemek amacıyla ağırlıkça beş farklı bor atığı filler ilaveli numuneler hazırlanmış elde edilen sonucu karşılaştırabilmek amacı ile sıcak karışım asfalt kaplamalarda yaygın olarak kullanılan kireçtaşı filler şartname aralığının ortasında yer alan % 6 oranında karışıma katılarak numuneler hazırlanmıştır. Yapılan bir dizi laboratuvar deneyleri neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Her bir seri için optimum bitüm yüzdeleri hesaplanmış ve elde edilen değerlerin ekonomik kullanım sınırları içerisinde olduğu görülmüştür.
- En yüksek olan stabilite değeri % 6 K serisi numunelerde kaydedilmiştir. Serilere ait Marshall stabilite değerleri % 6 K > % 6 > % 4 > % 5 > % 7 > % 8 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, % 6 K kontrol serisinin atmosferik etkilere ve trafikten gelen yüklere karşı daha dirençli olacağı düşünülmektedir. Deneysel çalışma sonuçları filler cinsi ve karşıdaki kullanım miktarının Marshall Stabilite değeri üzerinde oldukça etkili olduğunu da göstermiştir. Nitekim Çelik vd.(2007), Wang vd.(2011) farklı filler malzemelerin ve bunların kullanım miktarlarının karışımlar üzerinde farklı etkiler yapabileceğini belirtmişlerdir.
- Filler, bitümlü sıcak karışımlarda yoğunluğu artırarak kaplamanın geçirimsizliğine katkı sağlamaktadır. Deney sonuçlarına göre % 5 bor atığı filler katkılı bitümlü sıcak karışım numunelerinde en yüksek yoğunluk değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla % 5 serisi numunelerin geçirimsizlik özelliğinin kontrol numuneleri kadar iyi olacağı beklenmektedir.
- Akma sonuçlarına göre, plastik deformasyon oluşumuna karşı en iyi davranışın %5 bor atığı filler katkılı numunelerde görülebileceği düşünülmektedir.
- Yol kaplamalarının yüzeyleri kar, yağmur ve donma- çözülme gibi çok farklı su etkilerine maruz kalmaktadır. Bitümlü sıcak karışım kaplamalardan beklenen en önemli özelliklerden biri de su etkilerine karşı mekanik özelliklerin korunması ve soyulma olmaksızın geçirimsizliğin sağlanmasıdır. Mekanik Marshall batırma

deneyi sonuçlarına göre % 7 bor atığı filler katkısı ile hazırlanan numunelerinsu etkisine karşı diğer numunelere göre daha dayanıklı olduğu ve Marshall stabilitesinde yalnızca % 9,7 oranında bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kontrol numunelerine yakın olmakla birlikte, kontrol numunesinin su etkilerine daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir.

- Bor atığı malzemesinin bitümlü sıcak karışımlarda mineral filler olarak kullanılmasıyla rijitlik modülü değerlerinde kontrol numunesine göre hafif bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bor atığı filler katkılı numunelerin düşük ve orta trafik hacimli kesimlerdeki aşınma tabakalarında en az geleneksel filler kadar iyi davranış sergileyeceği beklenmektedir.
- Yapılan bitümlü sıcak karışım deney sonuçlarına göre karışımda optimum bor atığı filler kullanım yüzdesi % 5,7 olarak hesaplanmıştır. Bor atığı filler ağırlıkça % 5,7 oranında karışıma girdiğinde en iyi bitümlü sıcak karışım davranışının elde edileceği düşünülmektedir.
- Kırka bor tesislerinden alınan bor atığının mineral filler malzemesi olarak bitümlü sıcak karışım üretiminde 70 km yarıçaplı alanda geleneksel kireçtaşı filler malzemesi yerine kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Hammadde ihtiyacının önemli miktarlarda olduğu yol inşaatları, atık malzemelerin değerlendirilmesi açısından da büyük bir potansiyele sahiptir. Yapılan deneysel çalışma sonuçları esas alındığında, bor atıklarının düşük ve orta trafik hacimli yollardaki BSK kaplamaların aşınma tabakalarında mineral filler olarak kullanılabileceği, bu sayede çevrenin korunmasına katkı sağlanacağı gibi bor işletmelerinin yeni stok alanlarına olan ihtiyacı da azalmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- AASHTO T 283-03 (2008). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.
- Anonim, 2007. Türkiye’de Atık Yönetimi, Ulusal Düzenlemeler ve Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi. *Sayıştay Dergisi*, **64**: 134.
- Anonim, 2009-2010. İnşaat Mühendisliği Laboruar-1 Deney Föyü. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum.
- Anonim, 2011. Madencilik Sektöründe Atık Yönetimi Uygulamaları. Tekirdağ Valiliği Çevre Ve Şehircilik İl Müdürlüğü Çevre Yönetimi ve Çevre Denetimi Şubesi Atık Birimi, Tekirdağ.
- Anonim, 2014. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü 2013 Bor Sektör Raporu. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Akbulut, H., Gürer, C. (2007). Use of Aggregates Produced From Marble Quarry Waste in Asphalt Pavements. *Building&Environment*, **42(5)**:1921–30.
- Akbulut, M. E. (2009). Üçüncü Bileşen Şartlarında Bor Atık Katkılı Çimentonun Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.
- Altunbaş, D. (2003-2004). Uluslararası Sürdürülebilir Kalkınma Ekseninde Türkiye’deki Kurumsal Değişimlere Bir Bakış. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, *Yönetim Bilgileri Dergisi*, **1**: 1-2.
- ASTM D5-06e1. (2006). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D70-09e1. (2009). Standard Test Method for Density of Semi-Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method). In Annual Book of ASTM Standards, USA.

- ASTM D36/D36M-09. (2009).Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (ring-and-ball apparatus). In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D6-95. (2006). Standard Test Method for Loss on Heating of Oil and Asphaltic Compounds. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D92-05a. (2010).Standard Test Method for Flash and Fire Points by c Level and Open Cup Tester. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D113-07. (2007). Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D4402-06. (2006). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM C127-88. (1992). Test Method for Specific Gravity and Adsorption of Coarse Aggregate. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM C128-88. (1992). Test Method For Specific Gravity and Adsorption of Fine Aggregate. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D6927-06. (2006).Standart Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures.In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM C131-89. (1992). Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregates by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D3744/D3744M-11. (2011). Standard Test Method for Aggregate Durability Index.In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- ASTM D 6927-06. (2006). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures.In Annual Book of ASTM Standards, USA.
- Aşkın, S. (1998). Bor Endüstri Atıklarının Kullanılması. DoktoraTezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen BilimleriEnstitüsü, Manisa.

- Batar, T., Köksal, N. S., Yersel, Ş.E. (2009). Atık Bor, Atık Kağıt ve Perlit Katkılı Sıva Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Ekoloji*, **18**:72, 45-53.
- Bentli, İ., Özdemir, O., Çelik, M.S., Ediz, N. (2002). Bor Atıkları ve Değerlendirilme Stratejileri.1. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Kütahya, 250-258.
- Bentli, İ., Bursalı, L., Ediz, N., Tatar, İ. (2004). Emet-Hisarcık Şlam Atıklarının Zenginleştirilmesi ve Etiketlenmesi. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 23-25 Eylül, 87-92.
- Boncukçuoğlu, R., Yılmaz, M.T., Kocakerim, M.M., Tosunoğlu, V. (2002). Borocipsden Portland Çimentosu Üretiminde Piriz Geciktirici Olarak Yararlanılması. *Cement and Concrete Research*, **32**:471-475.
- BOREN, 2013. Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, 2013-2017 Stratejik Plan Raporu.
- Buluttekin, M.B. (2008). Türkiye Bor Maden Ekonomisi: Türkiye'nin Dünya Bor Piyasasındaki Yeri, 2. Ulusal İktisat Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Chen, M., Lin, J., Wu, S. (2010). Potential of Recycled Fine Aggregates Powder as Filler in Asphalt Mixture, *Construction and Building Materials*.
- Christogerou, A., Kavas, T., Pontikes, Y., Koyas S., Tabak, Y., Angelopoulos, G.N. (2009). Use of Boron Wastes in the Production of Heavy Clay Ceramics. *Ceramics International*, **35**(1):447-452.
- Çelik, O.N., Yonar, F., Ceylan, S. (2007). Filler Effects on Bituminous Hot Mixture Performance. Proc. 7th National Cong. On Transportation, İstanbul, 196-204.
- Çelik, H. (2012). Eti Maden Kırka Bor Türevleri Tesisi Atıklarının Duvar Karosu Üretiminde Kullanımı. Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 1. Ulusal Geri Kazanım Kongre ve Sergisi, 2 – 4 Mayıs, 339-345.
- Çetin, S. (2007). Afyonkarahisar Bölgesi Volkanik Kayaçların Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarında Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, A.K.Ü., Afyon.

- Demir, İ., Orhan, M. (2002). Bor Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Değerlendirilmesi. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya, 235-239.
- Demirtaş, A. (2010). Bor'un İnsan Beslenmesi Ve Sağlığı Açısından Önemi. Atatürk Üniversitesi, *Ziraat Fakültesi Dergisi*, **41 (1)**: 75-80.
- Doğan, G., Sabah, E., Erkal, T. (2005). Borun Çevresel Etkileri Üzerine Türkiye'de Yapılan Bilimsel Araştırmalar. 19. Uluslararası Madencilik Kongresi, IMCET. İzmir, 425-431.
- Ediz, N. (1999). Tinkal Cevherinin Zenginleştirilmesi ve Borlu Suların Arıtılmasında Tek Kademeli Çözme Helezonu Kullanımı. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ediz, N., Özdağ, H. (1995). KırkaBoraks İşletmesi Atık Killerinin Tuğla Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Madencilik, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayın, Ankara, **34(4)**:27-34.
- Ediz, N., Yurdakul, H., İssi, A. (2002). Eti Bor Kırka Boraks İşletmesi DSM Eleküstü Atığının Duvar Karosu Bünyesinde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Dumlupınar Üniversitesi, 1. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ekim 2002, 246-249.
- Ediz, N., Özdağ, H. (2002).Etibor A.Ş. Kırka Boraks İşletmesi Tinkal Cevheri Ve Atıklarının Doğrudan Zenginleştirilmesi. *Turkish Journal of Engineering and Enviromental Sciences*, **26**:107 - 116.
- Ediz, N., Yurdakul, H., İssi, A. (2004). Firitleştirilmiş Tinkal Atığının Çini Karo Bünye Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 23-25 Eylül, 413-417.
- Elbeyli, İ. Y., Kalpaklı, Y. K., Gülen, J., Pişkin, M., Pişkin, S. (2004). Utilization of BoraxWaste as an Additive in Building Brick Production. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 23-25 Eylül, 431-436.

- Elbeyli, İ. Y. (2004). Utilization of Industrial Borax Wastes (BW) for Portland Cement Production Portland. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, **28**: 281-287.
- Emrulloğlu, Ö.F., Emrulloğlu, C.B., Özçelik, F. (2002). Etibor Kırka Boraks Atığının Yer Karosu Bünye Özelliklerine Etkisi. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 213-218.
- Erdoğan, Y., Bayındır A.T. (2013). Eti Maden Kırka Bor İşletmesi Atıklarının Yapı Analizi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **31**: 39-46.
- Gubler, R., Liu, Y., Anderson, D., Partl, M. (1999). Investigation of the System Filler and Asphalt Binders By Rheological Means. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, **68**: 284-302.
- Gürer, C., Akbulut, H., Kürklü, G. (2004). İnşaat Endüstrisinde Geri Dönüşüm ve Bir Hammadde Kaynağı Olarak Farklı Yapı Malzemelerinin Yeniden Değerlendirilmesi. 5. Endüstriyel Ham Maddeler Sempozyumu, İzmir.
- Gürer, C. (2005). Atık Mermer Parçalarının Bitümlü Yol Kaplamalarında Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Afyonkarahisar.
- Gürer, C. (2010). Sathi Kaplamaların Performansına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi ve Performans Modeli Geliştirilmesi. Doktora Tezi, SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Güyağüler, T. (2001). Türkiye Bor Potansiyeli 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İzmir, 18-19 Ekim, 18-27.
- Griffin, T.S., Downing, T.L. (2001). Rio Tinto Borax's Pond Reprocessing and Sustainable Development. New Developments in Mineral Processing. 9. Balkan Mineral Processing Congress. (Ed.) Önal, Atak, Güney, Çelik ve Yice. İstanbul, 319-324.

- Helvacı C. (2003). Türkiye Borat Yatakları-Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Özel Sayısı*. **5(1)**: 1-41.
- Hunter, E.R., Ksaibati, K., (2002). Evaluating Moisture Susceptibility of Asphalt Mixes. Report for United States Department of Transportation to the Mountain-Plains Consortium, Department Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming: Laramie, WY.
- Jony, H.H., Al-Rubaie, M.F., Jahad I.Y. Eng. & Tech. (2011). 29(1), 44-57.
- Karacasu, M., Koyuncu, H., Bakış, R., Taşpolat, L.T., Yılmaz, G. (2004). The Use of Borax, Sepiolite, Zeolite, Waste Meerscham and Contaminated River Sediment in Asphalt Concrete Mixtures, II.Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir.
- Karadeniz, M., (1996). Cevher Zenginleştirme Tesis Artıklarının Çevreye Etkileri-Önlemler. MTA MAT Daire Başkanlığı, Ankara, 332.
- Karasu, B., Kaya, G., Yurdakul, H. (2002). Etibor Kırka Boraks İşletmesi Konsantre ve Türev Atıklarının Duvar Karosu Bünye Özelliklerine Etkisi. 1. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 224-229.
- Karasu, B., Kaya, G., Karalar, M. (2004). Use of Concentrator Wastes of Etibor Kırka Borax Company in Soft Porcelain Opaque Glazes as an Alternative Fluxing Agent, Euro Ceramics VIII, *Key Engineering Materials*, **264(68)**:2497-2500.
- Karavaşin, M., Terzi, S. (2007). Evaluation of Marble Waste Dust in the Mixture Of Asphaltic Concrete, *Construction & Building Materials*, V. 21, 617-620.
- Karpuzcu, M., Şengül, Ö., Taşdemir M.A., Erkan, O., Delipınar Ş. (2012). Ferrokrom Cürufklarının Asfalt Üretiminde Agregat Olarak Kullanımı. 1. Ulusal Geri Kazanım Kongre Ve Sergisi, Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 2 - 4 Mayıs, 251-258.

- Kavas, T., Önce, G. (2002). The Usage Capacity of Etibor Kırka Borax Company's Wastes in the Production of Structural Bricks as a Flax Material. I. Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya, 219-223.
- Kavas, T. (2006). Use of Boron Waste as a Fluxing Agent in Production of Red Mud Brick. *Building and Environment*, **41(12)**: 1779-1783.
- Kaypak, Ş. (2011). Küreselleşme Sürecinde Sürdürülebilir Bir Kalkınma İçin Sürdürülebilir Bir Çevre. *Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, **13(20)**: 19-33.
- Koyuncu, H., Güney, Y. (2003). Stabilization of Borax Wastes. Proceedings of The First International Conference on Environmental Research and Assessment, Bucharest, Romania.
- Köseoğlu K., Bayça S.U. (2002). Döküm Çamuruna % 10 ve % 20 Kolemanit ve Üleksit Atıkları İlavesinin Viskozite ve Mukavemet Üzerine Etkileri. 1. Uluslararası Bor Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Kütahya, 207-212.
- Kuity, A., Jayaprakasan, S., Das, A. (2014). Laboratory Investigation on Volume Proportioning Scheme of Mineral Fillers in Asphalt Mixture. *Construction and Building Materials* **68**: 637–643.
- Kütük, T., Kütük, S. (2012). Physical and Marshall Properties of Borogypsum Used as Filler Aggregate in Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000580.
- Lavin, P. (2003). *Asphalt Pavements; A Practical Guide To Design, Production And Maintenance For Engineers And Architects*, 1st ed. Spon Press, Taylor & Francis Group.
- Lüy, E., Varınca, K.B., Kemirtlek, A. (2007). Katı Atık Geri Kazanım Çalışmaları; İstanbul Örneği. *Türkey 2007 Avrupa Birliği Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu*.

- Miçillioğlu, S. (2010). Lactuca Sativa Bitkisi Kullanılarak Bor Konsantrasyonu Yüksek Suların Arıtılabilirliğinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Jumaat, N. Md., M.Z., Salam, M. A., Islam, M. S., Hashim, R. (2010). Utilization of Solidwastes in Construction Materials. *International Journal of the Physical Sciences Vol. 5(13):* 1952-1963.
- O'Flaherty, C.A. (2002). Highways, Tordon Hill, Oxford, ISBN: 0 7506 50907.
- Orhan, F. (2012). Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları. Karayolları Genel Müdürlüğü, ARGE Daire Başkanlığı, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 39.
- Oruç, F., Sabah, E., Erkan, Z. E. (2004). Türkiye'de Bor Atıklarının Sektörel Bazda Değerlendirme Stratejileri. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir.
- Önal, M. E., Karaca, S. (1984). Asfalt Betonu ve Diğer Sıcak Karışım Tipleri için Karışım Dizayn Metotları, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı.
- Özdemir, M., Kıpçak, İ., Öztürk, N.U. (2003). Bor Endüstrisi Katı Atıklarından Boraksın Katı-Sıvı Özütleme İle Geri Kazanılması. Balıkesir Üniversitesi, *Fen Bilimleri Dergisi*, 5.1.
- Palabıyık, H., Altunbaş, D. (2004). Kentsel Katı Atıklar ve Yönetimi. Çevre Sorunlarına Çağdaş Yaklaşımlar: Ekolojik, Ekonomik, Politik ve Yönetimsel Perspektifler, C. Marin, U. Yıldırım (Ed.), Beta, İstanbul, 103-124.
- Pehlivanoglu, H.E., Davraz, M., Kılınçarslan, Ş. (2013). Bor Bileşiklerinin Çimento Priz Süresine Etkisi ve Denetlenebilirliği. *Süleyman Demirel Üniversitesi. International Technologic Science*, 5(3): 39-48.
- Sağlam, G., Emrulloğlu, Ö. F. (2004). Kırka Bor Atığının Porselen Döküm Massede Kullanılabilirliğinin Araştırılması. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 23-25 Eylül, 393-404.

- Selman, G.S. (2013). Bor Atıklarının İnşaat Sektöründe Kullanımı. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Semineri, Afyonkarahisar.
- Targan, S., Erdogan, Y., Olgun, A., Zeybek, B., Sevinç, V. (2002). Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi. I.Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya, 259-266.
- TCK (2013). Türkiye Cumhuriyeti Karayolu Teknik Şartnamesi, Ankara.
- Terzi, S., Morova, N., Çolak, N., Serin, S., Saltan, M. (2013). Kolemanit Atıklarının Asfalt Beton Karışımlarda Filler Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. 10. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İzmir, 25-27 Eylül, 449-457.
- Topçu, İ.B., Özdemir, M., Uğurlu, A. (2006). Boraks Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Malzemenin Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, *DSİ Teknik Bülteni*, **103**: 14-23.
- TS 3526 (2003). Agregalarda Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3529 (1980). Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2 (2003). Beton Agregalarında Aşınmaya Dayanıklılık. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 932-5 (2010). Agregaların Genel Özellikleri İçin Deneyler. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2 (2010). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Testleri - Bölüm 2: Parçalanma için Direncin Tayini Yöntemleri. Ankara, Turkey.
- Tunç, A. (2007). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları Kitabı Nobel Yayın Dağıtım.2. Baskı, Ankara.

- Uğurlu, A., Özdemir, M., Topçu, İ.B. (2004). Bor İçeren Kil Atıkların Çimento İçerisinde Değerlendirilmesi. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, 23-25 Eylül, 405-411.
- Uluçaylı, M. (2002). Asfalt El Kitabı. İSFALT yayınları, 500.
- Umar, F., Açar, E. (1994).Yol Üstyapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Yayınları, 1.Baskı, İstanbul.
- Uslu, T., Arol, A.I. (2004). Use Of Boron Waste as An Additive in Red Bricks, *Waste Management* **24**: 217–220.
- Ustabaş, İ. (2011). Kolemanit ve Üleksitin Çimentoda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 20-21 Ekim, 367-375.
- Uygan, D., Çetin, Ö. (2004). Bor'un Tarımsal ve Çevresel Etkileri: Seydisuyu Su Toplama Havzası. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25 Eylül, Eskişehir, 527-540.
- Ünlü, M.İ. (2004). Bor Tuzlarının Çevre Üzerindeki Etkileri Emet Bor İşletme Müdürlüğü Konsantratör Tesisleri ve Emet Borik Asit Fabrikası Örneği. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Üstümkol, F.N., Turabi, A. (2010). Endüstriyel Atık Filler Malzemelerin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* **12(1)**: 3-18.
- Wang, H., Al-Qadi I., Faheem, A.F., Bahia, H.U., Yang, S.H., Reinke, G.H.(2011). Effect of Mineral Filler Characteristics on Asphalt Mastic and Mixture Rutting Potential. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2208, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 33-39.
- Whiteoak, D. (1990.) The Shell Bitumen Handbook.Shell Bitumen: England.
- Woodside, A. R., Lyle, P., Woodward, W., D., H., Perry, M., J., (1998). Possible Problems With High PSV Aggregate of the Gritstone Trade Group, Advances

in Aggregates and Armoustone Evaluation, Geological Society, Engineering Geology Special Puplications. **13**:159-167.

Yaman, C. (1997). Bor Minerali Atıklarının Seramik Endüstrisinde Kullanılabilirliği. VIII.Ulusal Kil Sempozyumu, Dumlupınar Üniversitesi, Işık (Ed.), Kütahya, 345-352.

Yaman, C., Marasoglu, M. (1998). Bor Minerali Atıklarından Üretilen Camsı Maddenin Olası Kullanım Alanları.4.Seramik Kongresi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 97-102.

Yenmez, N. (2009). Stratejik Bir Maden Olarak Bor Minerallerinin Türkiye İçin Önemi. İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü, *Coğrafya Dergisi*. **19**: 59-94.

Yılmaz, M., Kök, B.V., Kuloğlu, N. (2011). *Construction and Building Materials*. **25**: 4279-4286.

Yurdakul, H., Topkaya, A. (2001). Eskişehir Kırka Boraks İşletmesi Konsantre ve Türev Atıklarının Duvar Karosu Bünyesinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Bitirme Projesi, DPÜ Seramik Müh. Bölümü, Kütahya, 66.

Zoorob, S.E., Suparma, L.B. (2000). Laboratory Design and Investigation of The Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plastics Aggregate Replacement (Plastiphalt), *Cement&Concrete Compasites, Elsevier Science*, **22**: 233-242.

İnternet Kaynakları

- 1- http://tr.wikipedia.org/wiki/Birle%C5%9Fmi%C5%9F_Milletler_%C3%87evre_Kalk%C4%B1nma_Komisyonu 08.10.2014
- 2- http://www.cevreonline.com/atik2/geri_donusum.htm 10.12.2014
- 3- www.istac.com.tr/media/.../Entegre%20Kat1%20At1k%20Yonetimi.pdf 10.12.2014
- 4- <http://www.bilgiustam.com/bor-tire-madeni-nedir-onemi-ve-kullanim- alanlari-nelerdir> 12.12.2013
- 5- <http://orhankural.net/wp-content/uploads/2012/05/BORUN-%C3%87EVRE-VE-CANLILAR-%C3%9CZER%C4%B0NDEK%C4%B0-ETK%C4%B0LER%C4%B0.docx> 01.10.2014
- 6- <http://www.insaat.anadolu.edu.tr/kadirkilinc/MLZ204/duyuru/%C3%A7ok%20ince%20malzeme%20kalitesi%20i%C3%A7in%20metilen%20mavisi.pdf> 11.12.2014
- 7- [http://www.thbb.org/Files/File/\[257-270\].pdf](http://www.thbb.org/Files/File/[257-270].pdf) 12.12.2014
- 8- megep.meb.gov.tr 18.10.2014
- 9- <http://www.tupras.com.tr/detailpage.tr.php?redirect=asfaltprices.tr.php&IRedirectPageID=6351> 03.01.2015
- 10- <http://www.etimaden.gov.tr/bor-kullanim- Alanlari-77k.htm> 08.12.2013.
- 11- <http://www.karkim.biz.tr/userfiles/File/158-KAR-CL-90-S-SONMUS-TOZ-KIREC.pdf> 28.11.2014
- 12- <http://upeks.com.tr/yol/tr/ithal/assets/dopnedir.pdf> 28.11.2014

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gülden Şirin SELMAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara – 31.03.1987
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0543 598 13 39
gulden_sirin87@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Etlik Lisesi (YDA), 2001-2005
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2008-2012
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2013-2015

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Hgisi Mimarlık / Afyonkarahisar, 2008-2010

Hgisi Mimarlık Staj, 2010

Afyonkarahisar Belediyesi Staj, 2011

Yayımları (SCI ve diğer) : Gürer C., Selman G.Ş. 2014. Using Boron Wastes of Kırka in Bituminous Hot Mixtures as Mineral Filler. International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians (ICESA-2014). Antalya, Turkey.

Gürer C.(Yürütücü), Selman G.Ş.(Yardımcı Araştırmacı).
“Kırka Bor Atıklarının Bitümlü Sıcak Karışımlarda Mineral Filler Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”. 14.MUH.06 Nolu Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi. (21.05.2014-Devam Ediyor).