

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ARK OCAĞI ÇELİKHANE CÜRUFUNUN KARAYOLU ESNEK
ÜSTYAPI TABAKALARINDA KULLANIMININ VE KARIŞIM
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Fatih YONAR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ERGÜN

OCAK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ARK OCAĞI ÇELİKHANE CÜRUFUNUN KARAYOLU ESNEK
ÜSTYAPI TABAKALARINDA KULLANIMININ VE KARIŞIM
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Fatih YONAR
(501072403)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ERGÜN
Eş Danışman: Prof. Dr. H. Attila DİKBAŞ**

OCAK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501072403 numaralı Doktora Öğrencisi Fatih YONAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “Elektrik Ark Ocağı Çelikhane Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Tabakalarında Kullanımının ve Karışım Performansının Araştırılması” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat ERGÜN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. H. Attila DİKBAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK**
Konya Selçuk Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Şükrüye İYİNAM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. M. Sinan YARDIM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Onuralp YÜCEL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa GÜRSOY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 29 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 09 Ocak 2017

Büyükannem Merhume Güner Yonar ve Büyükbabam Merhum Hüseyin Ordu'ya,

ÖNSÖZ

Öncelikle son derece sıkıntılı geçen bu süreçte bana karşı sabrını ve inancını bir kez bile yitirmemiş herkese sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatımda tereddütsüz her zaman bana destek olan aileme teşekkür ederim. Tezimde bana destek olan danışmanlarım Doç. Dr. Murat ERGÜN ve Prof. Dr. Attila DİKBAŞ'a; jüri üyelerim Prof. Dr. Osman Nuri ÇELİK, Yrd. Doç. Dr. Şükrüye İYİNAM, Yrd. Doç. Dr. M. Sinan YARDIM, Prof. Dr. Onuralp YÜCEL ve Doç. Dr. Mustafa GÜRİSOY'a; fikirleri ile bana destek olan Öğr. Gör. Dr. Adem Faik İYİNAM'a, çevresel etki değerlendirmesi konusunda çalışmama destek olan Prof. Dr. Emine UBAY ÇOKGÖR'e teşekkürlerimi borç bilirim. Bu süreçte beraber çalışma imkanı bulduğum ve desteklerini her zaman gördüğüm KGM Ar-Ge Dairesi Başkanı Sayın Birol DEMİR, Kalite Yönetim ve Ar-Ge Şubesi Müdürü Sayın Ahmet SAĞLIK, Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürü Sayın Muhammet KOMUT, Bitümlü Karışımlar Şefi Sayın Nedim TUTAN, KGM Ar-Ge Daire Başkanlığı çalışanları, Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü, Ar-Ge Başmühendisliği Üstyapı Geliştirme Şefi Sayın Nursal HACIOSMANOĞLU, Karayolları 1. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge Baş Mühendisliği çalışanları, Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge Başmühendisi Sayın Ercan EPSİLELİ, Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge Başmühendisliği çalışanları ve Karayolları 2. Bölge Müdürlüğü Ar-Ge Başmühendisliği çalışanlarına teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarında tüm huysuzluğumu ve titizliğimi tolere eden Murat ŞAHİN ve Onur DEMİR'e, "elementer" deneylerde bana destek olan Göker AKSOY'a teşekkür ederim.

Dostalarım SEL ve iki CEVGİN ailesine hayatımda oldukları için teşekkür ederim.

Bu doktora tez çalışması Karayolları Genel Müdürlüğü'nün "Çelikhane Cürufunun Karayolu İnşaatında Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Önerisinin Oluşturulması" adlı Ar-Ge projesi bünyesinde yapılmıştır. Bahsi geçen proje ile tezimin başlamasına büyük desteği olan Çolakoğlu Holding Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Hasan ÇOLAKOĞLU ve TÇÜD Genel Sekreteri Dr. Veysel YAYAN'a teşekkür ederim.

Kasım 2016

Fatih YONAR
İnş. Yük. Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET	xxix
SUMMARY	xxxii
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç	4
1.2 Kapsam.....	8
1.2.1 Malzeme.....	8
1.2.2 Üstyapı tipi	11
1.3 Literatür Taraması	14
1.4 Kısıtlar	24
1.4.1 Hukuki kısıtlar.....	24
1.4.2 Teknik kısıtlar	24
1.4.3 Ekonomik kısıtlar	27
1.5 Hipotez	28
2. MALZEME	33
2.1 EAO Çelikhane Cürufu	33
2.1.1 XRD Analizi	35
2.1.2 Fiziksel özelliklerin analizi	35
2.2 Doğal Agrega	38
2.2.1 XRD Analizi	38
2.2.2 Fiziksel özelliklerin analizi	38
2.3 Bağlayıcı.....	40
2.4 Selülozik Elyaf	40
3. YÖNTEM	41
3.1 Fiziksel Özelliklerin Sınanması	43
3.2 Kimyasal Analiz	43
3.3 Çevresel Etki Analizi	43
3.4 Granüler Tabakaların Hazırlanması	44
3.4.1 Alttemel.....	45
3.4.2 Temel	46
3.4.2.1 Granüler temel.....	46
3.4.2.2 Plent miks temel.....	48
3.5 Granüler Tabakaların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	49
3.6 Genleşme Potansiyelinin İncelenmesi.....	50
3.7 BSK Tasarımlarının Planlanması	51

3.8 BSK Tasarım Yaklaşımının Belirlenmesi	54
3.9 Tasarım Sıcaklığının ve Malzeme Miktarının Belirlenmesi	57
3.10 Karışımların Üretimi	59
3.11 Teorik Birim Hacim Ağırlıkların Ölçülmesi ve Modellenmesi	60
3.12 Optimum Bağlayıcı Oranlarının Belirlenmesi.....	60
3.13 Kontrol Briketlerinin Üretimi.....	61
3.14 Performans Deney Numunelerinin Üretimi.....	61
3.15 Lottman Deneyi	62
3.16 Tekerlek İzinde Oturma Deneyi	63
3.17 Yorulma Ömrünün Tayini	64
3.18 Ekonomik Analiz.....	66
4. BULGULAR	67
4.1 Fiziksel Özelliklerin Sınanması.....	67
4.1.1 Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu tayini	67
4.1.2 Organik madde içeriği tayini.....	68
4.1.3 Atterberg limitlerinin tayini	68
4.1.4 Metilen mavisı deneyi	69
4.1.5 Kil topağı ve dağılabilen tane oranının tayini	69
4.1.6 Yassılık indeksi tayini	70
4.1.7 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık tayini	70
4.1.8 Parçalanmaya karşı direnç tayini.....	70
4.1.9 Cilalanma mukavemeti tayini	71
4.1.10 Soyulma mukavemeti tayini.....	71
4.2 Kimyasal Analiz	71
4.3 Çevresel Etki Analizi.....	72
4.4 Granüler Tabakaların Mekanik Özellikleri	73
4.4.1 Alttemel tabakaları	73
4.4.2 Temel tabakaları	78
4.4.2.1 Granüler temel.....	78
4.4.2.2 Plent miks temel	84
4.5 Potansiyel Genleşme	89
4.6 BSK Tasarımları.....	90
4.6.1 Temel veriler	91
4.6.1.1 Doğal agrega aşınma tabakası	91
4.6.1.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası.....	93
4.6.1.3 Doğal agrega TMA tabakası	94
4.6.1.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası	96
4.6.1.5 Doğal agrega binder tabakası	97
4.6.1.6 Çelikhane cürufu binder tabakası	99
4.6.1.7 Doğal agrega bitümlü temel tabakası	100
4.6.1.8 Çelikhane cürufu bitümlü temel tabakası.....	102
4.6.2 Maksimum teorik birim hacim ağırlık	103
4.6.2.1 Doğal agrega aşınma tabakası	104
4.6.2.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası.....	105
4.6.2.3 Doğal agrega TMA tabakası	105
4.6.2.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası	106
4.6.2.5 Doğal agrega binder tabakası	107
4.6.2.6 Çelikhane cürufu binder tabakası.....	108
4.6.2.7 Doğal agrega BT tabakası	108
4.6.2.8 Çelikhane cürufu BT tabakası	109

4.6.3 İkincil veriler	110
4.6.3.1 Doğal agrega aşınma tabakası	110
4.6.3.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası	112
4.6.3.3 Doğal agrega TMA tabakası	114
4.6.3.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası	116
4.6.3.5 Doğal agrega binder tabakası	118
4.6.3.6 Çelikhane cürufu binder tabakası	120
4.6.3.7 Doğal agrega BT tabakası	122
4.6.3.8 Çelikhane cürufu BT tabakası	124
4.6.4 Optimum bağlayıcı oranlarının tespiti	126
4.7 Kontrol Briketleri	129
4.8 Lottman Deneyi	137
4.9 Tekerlek İzinde Oturma	140
4.9.1 Doğal agrega aşınma tabakası TİO deneyi	140
4.9.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası TİO deneyi	142
4.9.3 Doğal agrega TMA tabakası TİO deneyi	144
4.9.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası TİO deneyi	146
4.10 Yorulma Ömrünün Belirlenmesi	148
5. TARTIŞMA	157
5.1 Fiziksel Özellikler	157
5.1.1 Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu	157
5.1.2 Organik madde içeriği	160
5.1.3 Atterberg limitleri	160
5.1.4 Metilen mavisi deneyi	161
5.1.5 Kil topağı ve dağılabilen tane oranı	161
5.1.6 Yassılık indeksi	162
5.1.7 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık	163
5.1.8 Parçalanmaya karşı direnç	164
5.1.9 Cilalanma mukavemeti	165
5.1.10 Soyulma mukavemeti	165
5.2 Kimyasal Analiz	166
5.3 Çevresel Etki Analizi	168
5.4 Granüler Tabakaların Mekanik Özellikleri	173
5.5 Potansiyel Genleşme	175
5.6 BSK Tasarımları	177
5.6.1 Aşınma tasarımlarının karşılaştırılması	177
5.6.2 TMA tasarımlarının karşılaştırılması	181
5.6.3 Binder tasarımlarının karşılaştırılması	185
5.6.4 Bitümlü temel tasarımlarının karşılaştırılması	189
5.6.5 Optimum bağlayıcı oranları doğrultusunda değerlendirme	192
5.7 Lottman Deneyi	196
5.8 Tekerlek izinde oturma deneyi	198
5.9 Yorulma Ömrü Analizi	201
5.10 Ekonomik Analiz	204
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	211
6.1 Çevresel Etki	211
6.2 Kimyasal Özellikler	212
6.3 Fiziksel Özellikler	214
6.4 Ekonomik Katkı	216
6.5 Karışım Performansları	217

6.6 Genel Değerlendirme.....	218
6.7 Öneriler.....	219
KAYNAKLAR.....	221
ÖZGEÇMİŞ.....	227

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
BHA	: Birim hacim ağırlık
BOF	: Bazık oksijen fırını
BSK	: Bitümlü sıcak karışım
BT	: Bitümlü temel
ÇBGT	: Çimento bağlayıcılı granüler temel
EAO	: Elektrik ark ocağı
EPA	: Environmental Pollution Agency
GT	: Granüler temel
İÇM	: Dolaylı çekme mukevemeti
İÖ	: İndüksiyon ocağı
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LL	: Likit limit
MQ	: Marshall oranı
PI	: Plastisite indeksi
PMT	: Plent miks temel
PO	: Pota ocağı
PSV	: Polished stone value
SA	: Su absorpsiyonu
SHRP	: US Strategic Highway Program
TİÖ	: Tekerlek izinde oturma
TMA	: Taş mastik asfalt
USEPA	: United States Environmental Protection Agency
XRD	: X-ışını kırınım
YF	: Yüksek fırın

SEMBOLLER

G_{sa}	: Zahiri özgül ağırlık
G_{sb}	: Hacim özgül ağırlık
G_b	: Bitüm özgül ağırlık
W_a	: Ağırlıkça bağlayıcı oranı
G_{mb}	: Pratik birim hacim ağırlık (D _p)
G_{mm}	: Teorik birim hacim ağırlık (D _t)
VA	: Karışımdaki boşluk yüzdesi (V _h)
VMA	: Agregalar arası boşluk yüzdesi (V _{ma})
VFA	: Bağlayıcı ile dolu boşluk yüzdesi (V _f)
γ_k	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
MQ	: Marshall oranı
G_{eff}	: Efektif özgül ağırlık

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Elektrik ocaklı çelik üretim tesislerinin kapasiteleri ve 2015 yılı üretim miktarları.....	10
Çizelge 2.1 : Çelikhane cürufu XRD analiz sonuçları.	35
Çizelge 2.2 : Çelikhane cürufu BHA ve SA deney sonuçları.	36
Çizelge 2.3 : XRD analiz sonuçları-1.	38
Çizelge 2.4 : Doğal agrega BHA ve SA deney sonuçları.	39
Çizelge 3.1 : KTŞ 2013 alttemel malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.	45
Çizelge 3.2 : KTŞ 2013 temel malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.	47
Çizelge 3.3 : KTŞ 2013 PMT malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.	48
Çizelge 3.4 : KTŞ 2013 BT Tip-A malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.	52
Çizelge 3.5 : KTŞ 2013 Binder malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.	52
Çizelge 3.6 : KTŞ 2013 Aşınma Tip-I malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.	53
Çizelge 3.7 : KTŞ 2013 Aşınma Tip-I malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.	54
Çizelge 4.1 : Tane dağılımına göre çelikhane cürufu ve doğal agrega su absorpsiyonu değerleri ve KTŞ 2013 limitleri.	68
Çizelge 4.2 : Organik madde içeriği ve KTŞ 2013 limitleri	68
Çizelge 4.3 : Atterberg değerleri ve KTŞ 2013 limitleri.....	69
Çizelge 4.4 : Metilen mavisi sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri	69
Çizelge 4.5 : Dağılılabilen tane oranı deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.	69
Çizelge 4.6 : Yassılık indeksi deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.	70
Çizelge 4.7 : Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri	70
Çizelge 4.8 : LA deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.....	70
Çizelge 4.9 : Cilalanma mukavemeti deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.....	71
Çizelge 4.10 : Soyulma mukavemeti deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.....	71
Çizelge 4.11 : XRD analiz sonuçları.	71
Çizelge 4.12 : Kimyasal analiz sonuçları.	71
Çizelge 4.13 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega parametre konsantrasyonu.	72
Çizelge 4.14 : Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik limitleri.....	73
Çizelge 4.15 : KTŞ 2013 Alttemel granülometri limitleri ve düzeltilen ideal eğri değerleri.	74

Çizelge 4.16 :KTŞ 2013 Granüler Temel granülometri limitleri ve düzeltilmiş ideal eğri değerleri.	78
Çizelge 4.17 :KTŞ 2013 PMT granülometri limitleri ve düzeltilmiş ideal eğri değerleri.	85
Çizelge 4.18 :Doğal agrega aşınma tabakası Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	92
Çizelge 4.19 :Çelikhane cürufu aşınma tabakası Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	94
Çizelge 4.20 :Doğal agrega TMA Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	95
Çizelge 4.21 :Çelikhane cürufu TMA tabakası Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	97
Çizelge 4.22 :Doğal agrega binder tabakası Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	98
Çizelge 4.23 :Çelikhane cürufu bünder tabakası Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	100
Çizelge 4.24 :Doğal agrega BT tabakası Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	101
Çizelge 4.25 :Çelikhane cürufu BT tabakası Marshall briketlerinden elde edilen sonuçlar.....	103
Çizelge 4.26 :Doğal agrega aşınma tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	110
Çizelge 4.27 :Doğal agrega aşınma tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	110
Çizelge 4.28 :Çelikhane cürufu aşınma tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	112
Çizelge 4.29 :Çelikhane cürufu aşınma tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	112
Çizelge 4.30 :Doğal agrega TMA tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	114
Çizelge 4.31 :Doğal agrega TMA tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	114
Çizelge 4.32 :Çelikhane cürufu TMA tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	116
Çizelge 4.33 :Çizelge 4.33 : Çelikhane cürufu TMA tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	116
Çizelge 4.34 :Doğal agrega binder tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	118
Çizelge 4.35 :Doğal agrega binder tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	118
Çizelge 4.36 :Çelikhane cürufu binder tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	120
Çizelge 4.37 :Çelikhane cürufu binder tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	120
Çizelge 4.38 :Doğal agrega BT tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	122
Çizelge 4.39 :Doğal agrega BT tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	122
Çizelge 4.40 :Çelikhane cürufu BT tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	124

Çizelge 4.41 : Çelikhane cürufu BT tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.....	124
Çizelge 4.42 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre doğal agrega aşınma tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	126
Çizelge 4.43 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre çelikhane cürufu aşınma tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	127
Çizelge 4.44 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre doğal agrega TMA tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	127
Çizelge 4.45 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre çelikhane cürufu TMA tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	127
Çizelge 4.46 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre doğal agrega binder tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	128
Çizelge 4.47 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre çelikhane cürufu binder tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	128
Çizelge 4.48 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre doğal agrega BT tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	128
Çizelge 4.49 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre çelikhane cürufu BT tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.....	128
Çizelge 4.50 : Doğal agrega aşınma tabakası kontrol briketleri.....	129
Çizelge 4.51 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası kontrol briketleri.....	130
Çizelge 4.52 : Doğal agrega TMA tabakası kontrol briketleri.....	131
Çizelge 4.53 : Çelikhane cürufu TMA tabakası kontrol briketleri.....	132
Çizelge 4.54 : Doğal agrega binder tabakası kontrol briketleri.....	133
Çizelge 4.55 : Çelikhane cürufu binder tabakası kontrol briketleri.....	134
Çizelge 4.56 : Doğal agrega bitümlü temel tabakası kontrol briketleri.....	135
Çizelge 4.57 : Çelikhane cürufu bitümlü temel tabakası kontrol briketleri.....	136
Çizelge 4.58 : Doğal agrega aşınma briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	137
Çizelge 4.59 : Doğal agrega aşınma briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	137
Çizelge 4.60 : Çelikhane cürufu aşınma briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	138
Çizelge 4.61 : Çelikhane cürufu aşınma briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	138
Çizelge 4.62 : Doğal agrega TMA briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	138
Çizelge 4.63 : Doğal agrega TMA briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	138
Çizelge 4.64 : Çelikhane cürufu TMA briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	138
Çizelge 4.65 : Çelikhane cürufu TMA briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	139
Çizelge 4.66 : Doğal agrega binder briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	139
Çizelge 4.67 : Doğal agrega binder briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	139
Çizelge 4.68 : Çelikhane cürufu binder briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	139
Çizelge 4.69 : Çelikhane cürufu binder briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	139
Çizelge 4.70 : Doğal agrega BT briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	140
Çizelge 4.71 : Doğal agrega BT briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	140
Çizelge 4.72 : Çelikhane cürufu BT briketleri koşullu İÇM sonuçları.....	140
Çizelge 4.73 : Çelikhane cürufu BT briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.....	140
Çizelge 4.74 : Ortalama yorulma ömürleri.....	155
Çizelge 5.1 : CBR sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.....	175
Çizelge 5.2 : Hamburg sıkıştırma cihazı verileri ile hesaplanan sıkıştırma enerjileri.....	200
Çizelge 5.3 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu numuneleri eğilme rijitliği değerleri.....	203
Çizelge 5.4 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu numuneleri sönmelenen toplam enerji miktarları.....	204

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Doğrusal ve döngüsel sistemler	3
Şekil 1.2 : AB çelikhane cürufu kullanım alan ve oranları	8
Şekil 1.3 : Türkiye 2015 sıvı ham çelik üretim miktarı ve kapasitesi.	9
Şekil 1.4 : Esnek üstyapı kesiti ve ortalama tabaka kalınlıkları.	12
Şekil 2.1 : Çelikhane cürufu numuneleri.	34
Şekil 3.1 : Analizin akış şeması.	42
Şekil 3.2 : Alttemel Tip-A tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.....	45
Şekil 3.3 : Alttemel Tip-B tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.....	46
Şekil 3.4 : Temel Tip-A tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.	47
Şekil 3.5 : Temel Tip-B tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.....	47
Şekil 3.6 : Temel Tip-C tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.....	48
Şekil 3.7 : PMT Tip-I tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.	49
Şekil 3.8 : PMT Tip-II tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.....	49
Şekil 3.9 : BT Tip-A tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.	52
Şekil 3.10 : Binder tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.	53
Şekil 3.11 : Aşınma Tip-I tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.....	53
Şekil 3.12 : TMA Tip-IA tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.	54
Şekil 3.13 : Curufun suyu absorbe etmiş hali (a), yüzeyin bitüm ile kaplanmış hali (b), izole edilen iç boşluklar (c).	55
Şekil 3.14 : Yüksek karışım sıcaklığındaki boşluk durumu (a), düşük karışım sıcaklığındaki boşluk durumu (b).	55
Şekil 3.15 : Bütün tane yüzeylerinin kaplandığı Aşınma karışımı (145 – 150 °C). ..	58
Şekil 3.16 : Numunenin G_{mm} ölçümü için hazırlanması	60
Şekil 3.17 : Dolaylı çekme mukavemeti deneyi yük eksen ve çekme alanı.	63
Şekil 3.18 : Doğal agrega aşınma tabakası TİO grafiği (mm).	64
Şekil 3.19 : Çolakoğlu TMA yorulma numuneleri.	65
Şekil 3.20 : Yükleme test cihazı detayları	65
Şekil 4.1 : Doğal agrega Alttemel Tip-A Proctor deneyi grafiği.....	74
Şekil 4.2 : Doğal agrega Alttemel Tip-A CBR grafiği.	75
Şekil 4.3 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-A Proctor deneyi grafiği.....	75
Şekil 4.4 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-A CBR grafiği.....	76
Şekil 4.5 : Doğal agrega Alttemel Tip-B Proctor deneyi grafiği.	76
Şekil 4.6 : Doğal agrega Alttemel Tip-B CBR grafiği.	77
Şekil 4.7 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-B Proctor deneyi grafiği.....	77
Şekil 4.8 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-B CBR grafiği.	78
Şekil 4.9 : Doğal agrega Temel Tip-A Proctor deneyi grafiği.	79
Şekil 4.10 : Doğal agrega Temel Tip-A CBR grafiği.....	79
Şekil 4.11 : Çelikhane cürufu Temel Tip-A Proctor deneyi grafiği.	80
Şekil 4.12 : Çelikhane cürufu Temel Tip-A CBR grafiği.....	80
Şekil 4.13 : Doğal agrega Temel Tip-B Proctor deneyi grafiği.....	81

Şekil 4.14 : Doğal agrega Temel Tip-B CBR grafiği.	81
Şekil 4.15 : Çelikhane cürufu Temel Tip-B Proctor deneyi grafiği.	82
Şekil 4.16 : Çelikhane cürufu Temel Tip-B CBR grafiği.	82
Şekil 4.17 : Doğal agrega Temel Tip-C Proctor deneyi grafiği.	83
Şekil 4.18 : Doğal agrega Temel Tip-C CBR grafiği.	83
Şekil 4.19 : Çelikhane cürufu Temel Tip-C Proctor deneyi grafiği.	84
Şekil 4.20 : Çelikhane cürufu Temel Tip-C CBR grafiği.	84
Şekil 4.21 : Doğal agrega PMT-I Proctor deneyi grafiği.	85
Şekil 4.22 : Doğal agrega PMT-I CBR grafiği.	86
Şekil 4.23 : Çelikhane cürufu PMT-I Proctor deneyi grafiği.	86
Şekil 4.24 : Çelikhane cürufu PMT-I CBR grafiği.	87
Şekil 4.25 : Doğal agrega PMT-II Proctor deneyi grafiği.	87
Şekil 4.26 : Doğal agrega PMT-II CBR grafiği.	88
Şekil 4.27 : Çelikhane cürufu PMT-II Proctor deneyi grafiği.	88
Şekil 4.28 : Çelikhane cürufu PMT-II CBR grafiği.	89
Şekil 4.29 : Çelikhane cürufu genleşme grafiği (mm).	89
Şekil 4.30 : Çelikhane cürufu genleşme oranı grafiği	90
Şekil 4.31 : Doğal agrega aşınma tabakası W_a - G_{mb} grafiği.	92
Şekil 4.32 : Doğal agrega aşınma tabakası W_a -Stabilite grafiği.	92
Şekil 4.33 : Doğal agrega aşınma tabakası W_a -Akma grafiği.	93
Şekil 4.34 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası W_a - G_{mb} grafiği.	93
Şekil 4.35 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası W_a -Stabilite grafiği.	94
Şekil 4.36 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası W_a -Akma grafiği.	94
Şekil 4.37 : Doğal agrega TMA tabakası W_a - G_{mb} grafiği	95
Şekil 4.38 : Doğal agrega TMA tabakası W_a -Stabilite grafiği.	95
Şekil 4.39 : Doğal agrega TMA tabakası W_a -Akma grafiği.	96
Şekil 4.40 : Çelikhane cürufu TMA tabakası W_a - G_{mb} grafiği.	96
Şekil 4.41 : Çelikhane cürufu TMA tabakası W_a -Stabilite grafiği.	97
Şekil 4.42 : Çelikhane cürufu TMA tabakası W_a -Akma grafiği.	97
Şekil 4.43 : Doğal agrega binder tabakası W_a - G_{mb} grafiği	98
Şekil 4.44 : Doğal agrega binder tabakası W_a -Stabilite grafiği.	98
Şekil 4.45 : Doğal agrega binder tabakası W_a -Akma grafiği.	99
Şekil 4.46 : Çelikhane cürufu binder tabakası W_a - G_{mb} grafiği.	99
Şekil 4.47 : Çelikhane cürufu binder tabakası W_a -Stabilite grafiği.	100
Şekil 4.48 : Çelikhane cürufu binder tabakası W_a -Akma grafiği.	100
Şekil 4.49 : Doğal agrega BT tabakası W_a - G_{mb} grafiği.	101
Şekil 4.50 : Doğal agrega BT tabakası W_a -Stabilite grafiği.	101
Şekil 4.51 : Doğal agrega BT tabakası W_a -Akma grafiği.	102
Şekil 4.52 : Çelikhane cürufu BT tabakası W_a - G_{mb} grafiği.	102
Şekil 4.53 : Çelikhane cürufu BT tabakası W_a -Stabilite grafiği.	103
Şekil 4.54 : Çelikhane cürufu BT tabakası W_a -Akma grafiği.	103
Şekil 4.55 : Doğal agrega aşınma tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	104
Şekil 4.56 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	105
Şekil 4.57 : Doğal agrega TMA tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	106
Şekil 4.58 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	107

Şekil 4.59 : Doğal agrega binder tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	107
Şekil 4.60 : Çelikhane cürufu binder tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	108
Şekil 4.61 : Doğal agrega BT tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	109
Şekil 4.62 : Doğal agrega BT tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.	110
Şekil 4.63 : Doğal agrega aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	111
Şekil 4.64 : Doğal agrega aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	111
Şekil 4.65 : Doğal agrega aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	112
Şekil 4.66 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	113
Şekil 4.67 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	113
Şekil 4.68 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	114
Şekil 4.69 : Doğal agrega TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	115
Şekil 4.70 : Doğal agrega TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	115
Şekil 4.71 : Doğal agrega TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	116
Şekil 4.72 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	117
Şekil 4.73 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	117
Şekil 4.74 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	118
Şekil 4.75 : Doğal agrega binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	119
Şekil 4.76 : Doğal agrega binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	119
Şekil 4.77 : Doğal agrega binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	120
Şekil 4.78 : Çelikhane cürufu binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	121
Şekil 4.79 : Çelikhane cürufu binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	121
Şekil 4.80 : Çelikhane cürufu binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	122
Şekil 4.81 : Doğal agrega BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	123
Şekil 4.82 : Doğal agrega BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	123
Şekil 4.83 : Doğal agrega BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	124

Şekil 4.84 : Çelikhane cürufu BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.	125
Şekil 4.85 : Çelikhane cürufu BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.	125
Şekil 4.86 : Çelikhane cürufu BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.	126
Şekil 4.87 : Doğal agrega aşınma kontrol briketi kesit-1.	129
Şekil 4.88 : Doğal agrega aşınma kontrol briketi kesit-2.	130
Şekil 4.89 : Çelikhane cürufu aşınma kontrol briketi kesit-1.	130
Şekil 4.90 : Çelikhane cürufu aşınma kontrol briketi kesit-2.	131
Şekil 4.91 : Doğal agrega TMA kontrol briketi kesit-1.	131
Şekil 4.92 : Doğal agrega TMA kontrol briketi kesit-2.	132
Şekil 4.93 : Çelikhane cürufu TMA kontrol briketi kesit-1.	132
Şekil 4.94 : Çelikhane cürufu TMA kontrol briketi kesit-2.	133
Şekil 4.95 : Doğal agrega binder kontrol briketi kesit-1.	133
Şekil 4.96 : Doğal agrega binder kontrol briketi kesit-2.	134
Şekil 4.97 : Çelikhane cürufu binder kontrol briketi kesit-1.	134
Şekil 4.98 : Doğal agrega cürufu binder kontrol briketi kesit-2.	135
Şekil 4.99 : Doğal agrega bitümlü temel kontrol briketi kesit-1.	135
Şekil 4.100 : Doğal agrega bitümlü temel kontrol briketi kesit-2.	136
Şekil 4.101 : Çelikhane cürufu bitümlü temel kontrol briketi kesit-1.	136
Şekil 4.102 : Çelikhane cürufu bitümlü temel kontrol briketi kesit-2.	137
Şekil 4.103 : Doğal agrega aşınma tabakası TİO grafiği (mm).	141
Şekil 4.104 : Doğal agrega aşınma tabakası TİO grafiği (%).	141
Şekil 4.105 : Doğal agrega aşınma sol ve sağ TİO numuneleri.	142
Şekil 4.106 : Doğal agrega aşınma tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.	142
Şekil 4.107 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası TİO grafiği (mm).	143
Şekil 4.108 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası TİO grafiği (%).	143
Şekil 4.109 : Çelikhane cürufu aşınma sol ve sağ TİO numuneleri.	144
Şekil 4.110 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.	144
Şekil 4.111 : Doğal agrega TMA tabakası TİO grafiği (mm).	145
Şekil 4.112 : Doğal agrega TMA tabakası TİO grafiği (%).	145
Şekil 4.113 : Doğal agrega TMA sol TİO numunesi.	146
Şekil 4.114 : Doğal agrega TMA tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.	146
Şekil 4.115 : Çelikhane cürufu TMA tabakası TİO grafiği (mm).	147
Şekil 4.116 : Çelikhane cürufu TMA tabakası TİO grafiği (%).	147
Şekil 4.117 : Çelikhane cürufu TMA sol ve sağ TİO numuneleri.	148
Şekil 4.118 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.	148
Şekil 4.119 : Doğal agrega aşınma tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.	149
Şekil 4.120 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.	149
Şekil 4.121 : Doğal agrega TMA tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.	150
Şekil 4.122 : Çelikhane cürufu TMA tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.	150
Şekil 4.123 : Doğal agrega aşınma tabakası numuneleri sönümlenen enerji grafiği.	151
Şekil 4.124 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası numuneleri sönümlenen enerji grafiği.	151
Şekil 4.125 : Doğal agrega TMA tabakası numuneleri sönümlenen enerji grafiği.	152
Şekil 4.126 : Çelikhane cürufu TMA tabakası numuneleri sönümlenen enerji grafiği.	152

Şekil 4.127 : Doğal agrega aşınma tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.	153
Şekil 4.128 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.	153
Şekil 4.129 : Doğal agrega TMA tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.	154
Şekil 4.130 : Çelikhane cürufu TMA tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.	154
Şekil 5.1 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen Gsa değerleri.	158
Şekil 5.2 : Fraksiyonlara göre çelikhane cürufu ve doğal agrega su absorpsiyonu değerleri.	159
Şekil 5.3 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen SA değerleri.	159
Şekil 5.4 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen yassılık indeksi değerleri.	162
Şekil 5.5 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen hava tesirlerine karşı dayanıklılık değerleri.	163
Şekil 5.6 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen aşınmaya karşı direnç değerleri.	164
Şekil 5.7 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen cilalanmış taş değerleri.	165
Şekil 5.8 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen soyulma mukevemeti değerleri.	166
Şekil 5.9 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega karşılaştırmalı bileşik oranları.	167
Şekil 5.10 : Hidratasyon tepkimelerinin başlamış olduğu cüruf taneleri.	169
Şekil 5.11 : Zırhlanmanın gözlemlenebildiği cüruf tanesi (sol), taze cüruf tanesi (sağ).	170
Şekil 5.12 : Granüler tabakaların w_{opt} değerleri.	173
Şekil 5.13 : Granüler tabakaların γ_k değerleri.	174
Şekil 5.14 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen granüler tabakaların CBR değerlerinin karşılaştırılması.	175
Şekil 5.15 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.	177
Şekil 5.16 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin VA değerlerinin karşılaştırılması.	178
Şekil 5.17 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin VMA değerlerinin karşılaştırılması.	178
Şekil 5.18 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.	179
Şekil 5.19 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.	179
Şekil 5.20 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin Stabilitate değerlerinin karşılaştırılması.	180
Şekil 5.21 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin MQ değerlerinin karşılaştırılması.	181
Şekil 5.22 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.	181
Şekil 5.23 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin VA değerlerinin karşılaştırılması.	182
Şekil 5.24 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin VMA değerlerinin karşılaştırılması.	182
Şekil 5.25 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.	183

Şekil 5.26 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.	183
Şekil 5.27 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin Stabilite değerlerinin karşılaştırılması.	184
Şekil 5.28 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin MQ değerlerinin karşılaştırılması.	185
Şekil 5.29 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.	185
Şekil 5.30 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin VA değerlerinin karşılaştırılması.	186
Şekil 5.31 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin VMA değerlerinin karşılaştırılması.	186
Şekil 5.32 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.	187
Şekil 5.33 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.	187
Şekil 5.34 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin Stabilite değerlerinin karşılaştırılması.	188
Şekil 5.35 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin MQ değerlerinin karşılaştırılması.	188
Şekil 5.36 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.	189
Şekil 5.37 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin VA değerlerinin karşılaştırılması.	190
Şekil 5.38 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin VMA değerlerinin karşılaştırılması.	190
Şekil 5.39 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.	191
Şekil 5.40 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.	191
Şekil 5.41 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin Stabilite değerlerinin karşılaştırılması.	192
Şekil 5.42 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının optimum bağlayıcı oranlarının karşılaştırılması.	193
Şekil 5.43 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının optimum bağlayıcı miktarlarının karşılaştırılması.	193
Şekil 5.44 : Karışım sıcaklığının düşürülmesinin optimum bağlayıcı oranlarına etkisi.	194
Şekil 5.45 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.	195
Şekil 5.46 : Optimum bağlayıcı oranlarındaki doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının stabilite değerlerinin karşılaştırılması.	196
Şekil 5.47 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının koşullu ve koşulsuz İÇM oranları.	197
Şekil 5.48 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının ortalama İÇM değerlerinin karşılaştırılması.	198
Şekil 5.49 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen aşınma karışımlarının TİO oranı grafiği.	199
Şekil 5.50 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen TMA karışımlarının TİO oranı grafiği.	199

Şekil 5.51 : Numunelerin 30.000 tekrardaki deformasyon oranları.	200
Şekil 5.52 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega aşınma kirişleri yorulma deneyi gerilme grafiği.	201
Şekil 5.53 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega aşınma kirişleri yorulma deneyi sönümlenen enerji grafiği.	202
Şekil 5.54 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega TMA kirişleri yorulma deneyi gerilme grafiği.	202
Şekil 5.55 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega TMA kirişleri yorulma deneyi sönümlenen enerji grafiği.	203
Şekil 5.56 : Cürufun bertaraf edilmesi durumunda yıllara göre maliyet grafiği.	206
Şekil 5.57 : Cürufun yapay agrega olarak işlenmesi durumunda yıllara göre maliyet grafiği.	207
Şekil 5.58 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega taşıma mesafesi – nakliye bedeli grafiği.	208
Şekil 6.1 : Deneysel ve geleneksel yaklaşım ile çelikhane cürufu karışımlarında elde edilen optimum bağlayıcı oranları.	215
Şekil 6.2 : Karışım sıcaklığının düşürülmesinin optimum bağlayıcı oranlarına etkisi.	215

ELEKTRİK ARK OCAĞI ÇELİKHANE CÜRUFUNUN KARAYOLU ESNEK ÜSTYAPI TABAKALARINDA KULLANIMININ VE KARIŞIM PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Hızla artan dünya nüfusu, gelişen teknoloji ve bu ikisine paralel olarak artan ihtiyaçlar doğrultusunda kaynaklarımızın tüketimi, çağımızda yeni bir ivme kazanmıştır. Bu süreçte insanlığın karşılaştığı felaketler ile kaynaklarımızın sınırsız olmadığı ve gelecek nesillere de yaşama hakkı tanınması gerekliliği net bir şekilde anlaşılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak geri dönüşüm yaklaşımları benimsenmiş, içinde bulunduğumuz 21. yüzyılda ise sürdürülebilirlik, üretimimizin vazgeçilmez bir koşulu olmuştur.

Sürdürülebilirlik kapsamında yapılan araştırmalar ile üretimdeki enerji ve hammadde tüketimleri her geçen gün azalmaktadır. Geleneksel geri dönüşüm yaklaşımlarının yanı sıra bileşik ya da kompozit ürünlerin de geri dönüşümü sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak, herhangi bir sektörde üretim sonrası ortaya çıkan atıklar, yan ürün olarak aynı veya farklı bir sektörde değerlendirilmeye başlanmıştır.

Bu yaklaşımlar doğrultusunda, gelişmiş pek çok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de çevresel etkinin ve doğal kaynak tüketiminin azaltılması için alternatiflerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda, son dönemde gösterdiği büyük ilerleme ile çelik sektörü dikkat çekmektedir.

Türkiye, dünyanın en büyük 8. çelik üreticisi konumundadır ve yıllık üretimin %75’i elektrik ark ocaklı tesislerde yapılmaktadır. Buna rağmen çelik üretiminde elde edilen çelikhane cürufu, ülkemizde halen atık konumunda olup sadece %1’i kilitli parke taşı imalatında kullanılmaktadır. Çevresel etkinin azaltılması açısından daha yoğun bir kullanım alanının tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda inşaat sektörü Türkiye’de en çok hammaddeye ihtiyaç duyan öncü sektör olarak dikkat çekmektedir.

Yapılan araştırmalar ile çelikhane cürufu, gelişmiş ülkelerde atık olmaktan çıkartılmıştır. Özellikle karayolu inşaatında yapay agrega olarak pek çok ülkede kullanılmaktadır. Uluslararası örneklerden yola çıkılarak, bu doktora tezi çalışması kapsamında çelikhane cürufunun karayolu üstyapı inşaatında yapay agrega olarak kullanım olanakları ve performansı incelenmiştir.

Tez kapsamında kullanılan çelikhane cürufu, Türkiye’nin en büyük üçüncü elektrik ark ocaklı çelik üreticisi olan Çolakoğlu Metalürji A. Ş.’nin Dilovası’ndaki tesislerinden temin edilmiştir. Çelikhane cürufunun doğal agrega ile karşılaştırılabilmesi için Ömerli-Alyans taş ocağından da dolomitik kalker taşı alınmıştır.

İlk olarak temin edilen çelikhane cürufunun ve doğal agreganın bileşenleri X-ışını kırınım yöntemi ile incelenmiştir. Her iki numunenin fiziksel özellikleri, Karayolları

Teknik Şartnamesi 2013'te tanımlanan deneyler uyarınca araştırılmıştır. Elde edilen kimyasal ve fiziksel veriler ile iki numune tanımlanmıştır.

İkinci aşamada her iki numunenin, fiziksel özellikler kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçları, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 limitleri ile karşılaştırılmıştır. Cürufun kullanımı açısından büyük öneme sahip olan metalik demir ve serbest kireç içerikleri kimyasal analiz ile belirlenmiştir. Çelikhane cürufunun çevresel etkisi, eluat ve orijinal malzeme üzerinden test edilmiştir. Çevresel etki incelemesi kapsamında çelikhane cürufu için ölçülen parametreler, karşılaştırma için doğal agregada da gözlemlenmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'te tanımlanan granüler tabakalara göre ideal tane dağılımı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık, optimum su muhtevası ve California taşıma oranı değerleri belirlenmiştir. En kötü senaryoyu canlandırabilmek için en yüksek kuru birim hacim ağırlığa sahip olan numune, Agregaların Hidratasyondan Potansiyel Genleşmesi Deneyi için seçilmiştir. Deney, ASTM D4792 standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. En uygun karışım sıcaklığı belirlenmiş ve Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 doğrultusunda, ideal granülometride, Marshall yöntemi ile aşınma, taş mastik asfalt, binder ve bitümlü temel karışımları üretilmiştir. Optimum bağlayıcı oranları, maksimum teorik birim hacim ağırlığın hesaplandığı geleneksel yöntem ve maksimum teorik birim hacim ağırlığın ölçüldüğü deneysel yöntem ile belirlenmiş, her iki yaklaşım ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. En uygun sonuçların deneysel yaklaşım ile elde edildiğine karar verilmiş, bu yaklaşım ile elde edilen optimum bağlayıcı oranları kullanılarak kontrol briketleri üretilmiştir. Kontrol briketlerinden elde edilen sonuçlar, hedeflenenlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların benzer olduğu belirlenmiş, performans deneyi numuneleri üretilmiştir. Performans deneylerine, karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara dirençlerinin belirlenebilmesi için Lottman deneyi ile başlanmıştır. İkinci olarak tekerlek izinde oturma deneyi Hamburg yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak numunelerin yorulma ömürleri belirlenmiştir.

Üçüncü aşamada, elde edilen deney sonuçları kendi içlerinde ve literatür ile kıyaslanmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 limitleri dışında kalan deney sonuçları irdelenmiştir. Ekonomik analiz kapsamında, çelikhane cürufunun birim fiyatı, ekonomik taşıma mesafesi ve karışım maliyetleri hesaplanmıştır.

Son olarak çevresel etki, kimyasal içerik, fiziksel özellikler, ekonomi ve performans açısından çelikhane cürufunun kullanımı irdelenmiş, öneriler sunulmuştur.

INVESTIGATION OF ELECTRIC ARC FURNACE SLAG UTILIZATION IN FLEXIBLE HIGHWAY LAYERS AND MIXTURE PERFORMANCE

SUMMARY

Resource consumption has gained a new momentum in our era by the effect of rising needs, parallel to population growth and technological advances. In this period with the effects of disasters mankind have understood that our resources are not unlimited and posterity have the right to live. In this context recycling approaches have been adopted. With the beginning of 21st century, sustainability has been an irreplaceable condition of production.

Energy and raw materials consumption has started to decrease day by day with the researches about sustainability. Alongside conventional recycling approaches, recycling of composite products has been provided. In addition to these, waste of an industry has started to be evaluated as the raw material of another industry.

In line with these developments, to reduce the environmental impact of raw material production and consumption of natural resources in Turkey, alternatives should be taken into consideration as have been in many developed countries. Accordingly steel industry attracts attention with developments in recent years.

Turkey is the 8th biggest steel producer in the world and 75% of annual steel production is obtained from electric arc furnaces. However just 1% of steel slag occurred from total steel production is used for manufacturing interlocking paving stones. Another high volume area of utilization should be specified in order to reduce the environmental impact. In this context construction industry attracts attention as the highest consumer of raw materials and leader sector in Turkey.

Steel slag has been removed from waste group and accepted as a by-product in developed countries. It is used as an artificial aggregate in many countries especially in highway construction. On the basis of international examples, utilization probabilities and performance of electric arc furnace steel slag as an artificial aggregate in flexible highway superstructure has been investigated in this thesis.

Electric arc furnace steel slag used in this thesis is obtained from Turkey's 3rd biggest electric arc furnace steel producer Çolakoğlu Metalürji A. Ş. Steel Plant in Dilovası. For comparison dolomitic limestone is obtained from Ömerli-Alayn quarry in Istanbul.

Firstly components of steel slag and natural aggregate are investigated by X-Ray diffraction method. Main components of steel slag are accepted as total iron, MgO, SiO₂, MnO, total lime and Al₂O₃ according to literature. These components are researched in both natural aggregate and steel slag.

In order to determine physical properties of samples, tests identified in Highway Technical Specifications 2013 are chosen. These tests include; unit weight, water absorption, organic material content, Atterberg limits, methylene blue, clay lumps and

friable particles, flakiness index, soundness of aggregates b sodium sulphate, resistance to degradation, polishing resistance and stripping resistance. All tests are performed for both samples. Test results are compared with each other and Highway Technical Specifications 2013 limits. Water absorption and friable particle content of steel slag were beyond the limits of Highway Technical Specifications 2013.

Cooling steel slag by water spray is a general process in electric arc furnace steel producing facilities in Turkey. In this process; especially the surface of hot slag (1.100 – 1.500 °C) is immediately cooled. Gases are trapped inside the slag in this cooling process. Therefore steel slag takes a porous structure. High water absorption values originates from this porous structure. Besides high friable particle content originates from free lime.

Porous structure problem may be solved by different cooling processes. However these processes need sizable investment and new infrastructure. Therefore scope of this thesis based on the utilization of steel slag with its present physical properties and minimum investment.

Free lime originates from purification process of scrap with lime in ladle. It is a small amount of total lime in steel slag and can be removed by weathering.

Chemical analyses are performed in order to determine metallic iron and free lime content of steel slag. These contents are accepted as critical compounds of slag because of oxidation and expansion probability. Oxidation of metallic iron may cause adhesion loss and free lime may cause expansion with hydration by the effect of water.

Ecological analysis of steel slag is investigated from eluate and original material according to national solid waste disposal specifications. Fluoride, sulphate, total dissolved material, dissolved organic carbon, chloride, copper, barium, mercury, nickel, antimony, arsenic, cadmium, total chrome, lead, selenium, molybdenum, zinc, phenol index, pH, total organic carbon, loss of ignition, BTEX, mineral oil and derivatives and PCB parameters are researched. According to test results, it is determined that steel slag is in non-hazardous waste class. Two parameters were above the limits of inert waste class. These parameters are total dissolved material and nickel concentration. It is predicted that the total dissolved material amount is based on free lime content. Therefore this problem may be solved by weathering. In weathering process, lime hydrates and becomes Ca(OH)_2 . If the weathering process is long enough, with the effect of CO_2 , Ca(OH)_2 becomes CaCO_3 . CaCO_3 is a tough structure that have low solubility in water. Formation of CaCO_3 is called as armoring process. After armoring process, leaching of metals decreases.

Granular layers are examined according to Highway Technical Specifications 2013 granulometry limits. Steel slag is not accepted as a by-product in Turkey. Hence particle distribution differs according to facility's requirements. Therefore ideal granulometry is used for each granular layer. There are two main types of granular layers in Highway Technical Specifications 2013; subbase and base. Subbase has two different types. Base has two subtypes as granular base and plant mix base which have three and two types respectively. All granular layers are investigated in this thesis to determine their properties as well as to choose the worst sample for expansion test. Optimum water content, maximum dry density and California bearing ratios of all granular layers determined for steel slag and natural aggregate.

Sample with the highest maximum dry density is chosen for potential expansion of aggregates from hydration test for the worst scenario case. Test is performed according

to ASTM D4792 standard. Expansion ratio is determined in the limits of ASTM D4792 standard

Four types of bituminous mixtures are produced. There are bituminous base, binder, wearing course and stone matrix asphalt. Mainly used types of these mixtures are produced. As specified in granular layers, ideal granulometry is used in mix designs.

In order to decrease optimum bitumen content due to high water absorption, two approaches adopted. Firstly mixing temperature is decreased to 145 – 150 °C range. Through binder would behave more viscous and isolate voids instead of filling them. Secondly experimental approach introduced. In experimental approach, maximum theoretical weight is measured instead of calculation.

Optimum binder contents are determined by both experimental approach in which maximum theoretical weight is measured and conventional approach in which maximum theoretical weight is calculated. Results obtained from both approaches are compared. According to comparison it is decided that the best results are obtained from experimental approach.

Control mixtures are produced with optimum binder contents obtained from experimental approach. Results obtained from control mixtures are compared with projected data. According to comparison it is observed that the results were close.

Performance test specimens are produced according to optimum binder contents obtained from experimental approach.

Performance tests are started by Lottman tests for determination of resistance to water damage. Secondly rutting tests are performed according to Hamburg method. Lastly fatigue life of samples are determined.

In third phase, test results are compared between each other and with the literature. Obtained test results beyond Highway Technical Specifications 2013 limits are criticised. Unit price, economical hauling distance and mixture costs of steel slag are calculated in economical analysis.

Lastly utilization of steel slag is examined according to ecological effect, chemical content, physical properties, economy and performance besides suggestions are presented.

1. GİRİŞ

Avrupa’da Sanayi Devrimi, 18. yüzyılın ilk yarısında üretimin makineleşmesi ve otomatikleşmesiyle başlamıştır. Bilim adamları; İngiltere’de 1733 yılında John Kay’in pamuklu dokuma tezgahlarında mekik atma işlemini otomatikleştiren uçan mekik (flying shuttle) sistemini üretime dahil etmesi sonucu, dokuma işlemini kolaylaştırması ve artırmasını, Sanayi Devriminin miladı olarak kabul etmektedirler [1]. 19. yüzyıl ortalarına kadar devam eden bu süreçte teknolojik gelişmenin de etkisi ile yeni üretim yöntemleri benimsenmiş, devletler hızla sanayileşmişlerdir. Üretimdeki bu hızlı artış, bilinçsiz kaynak tüketimini de beraberinde getirmiştir. Ayrıca meydana gelen bu gelişmeler kullanılabilir yeni kaynakların ortaya çıkmasını ve bilinen kaynakların kullanım alanlarının genişlemesini sağlamıştır. Doğal kaynakların tüketimine dayalı üretim yaklaşımı ilk olarak 2. Dünya Savaşı’nda değişmeye başlamıştır. Savaş sırasında yoğun kaynak ihtiyacı sebebiyle geri dönüşüm kampanyaları hayata geçirilmiştir. Doğal kaynaklar bakımından fakir olan gelişmiş ülkelerde geri dönüşüm ve buna bağlı olarak kaynak koruma kampanyaları savaştan sonra da devam etmiştir. Bu gelişmelere karşın 1970’lere kadar hızlı kaynak tüketiminin çevresel etkileri göz ardı edilmiştir. Çevresel sorunların giderek artmasıyla birlikte 1970’li yılların başından itibaren bu konuda farkındalık ancak oluşmaya başlamıştır. Bu dönemde yayınlanan kitaplar ve uluslararası düzeyde düzenlenen toplantılarla, var olan ekonomik sistem sorgulanmış, ekolojik sistemin işleyişini bozmayan yeni bir ekonomik sistemin geliştirilmesi gerektiği dile getirilmiştir. 1972 yılında İsveç’in başkenti Stockholm’de BM Çevre ve Kalkınma Konferansı’nda “Tek bir dünyamız var.” görüşü benimsenmiş, 1987 yılında hazırlanan Brundtland Raporu’nda ise sürdürülebilir gelişme düşüncesi tanımlanmıştır [2].

Sürdürülebilir gelişme, ekonomik gelişmenin sürdürülebilirlik sınırları içerisinde sağlanmasını öngören bir modeldir. Bir başka deyişle sürdürülebilir gelişme, ekonomik büyüme ile çevresel dengeyi birlikte ele almakta, gelecek kuşakların gereksinimlerini gidermelerini tehlikeye atmadan bugünkü gereksinimlerin karşılanmasına özen göstermektedir [2].

Sürdürülebilir gelişme düşüncesinin, tüketim alanına yansması, “sürdürülebilir tüketim” düşüncesidir. Özellikle gelişmiş ülkelerde son yıllarda tüketim düzeyinin sürekli yükselmesi, doğal kaynakların tükenme tehlikesiyle karşı karşıya olduğunu ortaya çıkararak, tüketimin çevresel etkilerinin sorgulanmasını gerektirmiş ve var olan tüketim davranışlarının sürdürülebilir tüketim davranışlarına dönüştürülmesi sık sık dile getirilmiştir [2].

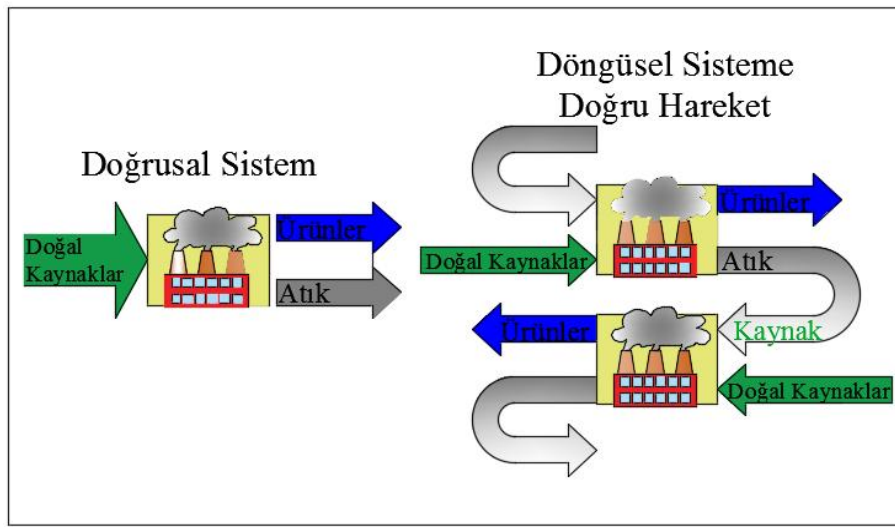
Sürdürülebilir tüketim kavramının tanımlanması, sürdürülebilir tüketim hareketinin yaygınlaşmasında oldukça önemli bir role sahiptir. Kısaca, sürdürülebilir tüketim, “Öbür tüketim davranışlarına oranla çevresel etkileri oldukça az olan tüketim davranışı biçimidir.” [3].

Norveç Çevre Bakanlığı (1994) tarafından yapılan ve OECD (2002) raporunda yayınlanan tanımlamaya göre sürdürülebilir tüketim, gelecek kuşakların gereksinimlerini dikkate alarak, yaşam döngüsü bakışıyla doğal kaynakların, toksik maddelerin, atık salınımlarının ve çevreyi kirletici maddelerin kullanımını en aza indirgerken temel gereksinimleri karşılayan ve daha iyi bir yaşam kalitesi sunan malların ve hizmetlerin kullanımudur [4]. 1994 yılında Norveç Çevre Bakanlığı tarafından yapılan sürdürülebilir tüketim tanımına bakıldığında, sürdürülebilirliğin ekonomik, sosyal ve çevresel olmak üzere üç temele bağlı olduğu görülmektedir. Sosyallik unsuru nesiller içindeki ve arasındaki eşitlikçiliğin yanı sıra tüketicinin korunmasıyla ilgilidir [2].

Sürdürülebilir tüketim, ürünler ve yaşam biçimleri olmak üzere birbiriyle ilişkili olan iki boyutta tanımlanabilir [5]. Ürün boyutuna göre sürdürülebilir tüketim; geliştirilen ürünlerin, daha az doğal kaynak ve enerji kullanılarak, daha az atık oluşturacak, büyük ölçüde geri dönüşebilecek veya geri dönüşme de atıkları çevreye zararlı olmayacak, kullanımında en az doğal kaynak tüketimi gerektirecek, dayanıklı ve onarılabilecek biçimde üretilen ürünlerin tüketimidir. Sürdürülebilir yaşam biçimi ise, çevreyi öbür yaşam biçimlerine oranla daha az incitecek davranışları sergileyen ve toplumsal eşitsizliklere daha az bağlı olacak biçimde tüketim davranışlarının sergilenmesi sonucu oluşmaktadır [5].

Bu yaklaşımların yanı sıra 1989 yılında Frosch ve Gallopoulos tarafından tanımlanan endüstriyel ekoloji ve endüstriyel ekosistem yaklaşımları ile sürdürülebilirlik yeni bir boyut kazanmıştır. Frosch ve Gallopoulos’a göre endüstriyel ekosistem biyolojik

ekosistem gibi çalışmalıdır, bu da endüstriyel ekolojinin temelidir. Diğer bir ifadeyle, endüstriyel bir ekosistemde bir endüstriyel işletme tarafından üretilen atık diğeri tarafından kaynak olarak kullanılmalı ve sistemden hiç atık çıkmamalı, olumsuz bir çevresel etki oluşmamalıdır [6]. Bu kavramların tanımlanması ile sürdürülebilirlik algısında doğrusaldan döngüsel yapıya geçiş sağlanmıştır (Şekil 1.1) [7]. Döngüsel yapı ile üretim yapan tesislerin, geri dönüşüm ile hammadde kazanımı ve kendi yan ürünlerini değerlendirmesinin yanı sıra, elde edilen yan ürünlerin doğrudan ya da fiziksel, kimyasal, biyolojik işlemlerden geçirilerek farklı endüstri kolları tarafından da kullanımına ilişkin araştırmalara ağırlık verilmiştir.



Şekil 1.1 : Doğrusal ve döngüsel sistemler [7].

Sürdürülebilirlik araştırmaları kapsamında dikkat çeken sektörler genellikle en yüksek kapasiteli, en çok hammadde üreten-tüketen ve atıkların depolanmasına dair ağır şartların bulunduğu sektörlerdir. Yüksek kapasiteli sektörler ülke stratejilerine göre farklılık göstermekle birlikte, dünya genelinde hammadde tüketiminde inşaat sektörü, hammadde üretiminde ise doğal taş ocakları ilk sırada yer almaktadır. Doğal agrega, nicelik olarak %58'lik pay ile tüm maden üretimi içerisinde birinci sıradadır. 92 milyar avroluk pazar değeri ile petrol, doğalgaz ve kömürden sonra dördüncü sırada yer almaktadır [8]. Ortalamalar dikkate alındığında; bir okul için 2.800 ton, bir otel için 1.100 ton, 1 km otoyol için 30.000 ton, 1 km çift demiryolu hattı için 16.000 ton ve nükleer güç santrali için 6-12 milyon ton agrega gerekmektedir [9]. Tüketilen agrega, civardaki taş ocaklarından ve diğer kaynaklardan temin edilmektedir. İhtiyacı karşılamak için açılan her yeni taş ocağı, çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Dünya çapında doğal agreganın yüksek miktarda kullanılması ve yeni taş ocaklarının olası çevresel etkileri nedeniyle, uluslararası örneklerde kaynak tüketiminin ve çevresel etkilerin azaltılması için geri kazanım, yeniden değerlendirme ve doğal agrega yerine kullanılabilecek yapay agrega alternatifleri değerlendirilmektedir.

Belirtilen bu hususlar doğrultusunda ve sürdürülebilirlik kapsamında; ülkemizde de özellikle yapay agrega için yeni seçeneklerin dikkate alınması, doğal kaynak tüketimini azaltarak çevreye olan olumsuz etkiyi de alt seviyelere çekebilecektir.

1.1 Amaç

İnşaat sektörü ülkemizde ekonominin lokomotif konumundaki sektörlerin başında gelmektedir. Cumhuriyet'in ilk yıllarında demiryolu hatları ile başlayan Türk inşaat sektörü, 2000'li yıllarda rekabet gücümüzün birincil örneği haline gelmiştir. Diğer yandan sektör, ülke içindeki stratejik yatırımlardan biridir ve 200'e yakın yan sektörüyle ülkemizin büyümesinde oldukça büyük bir rol oynamaktadır. İnşaat sektörü, konut başta olmak üzere, okul, fabrika, hastane gibi her türlü bina ile yol, köprü, baraj gibi her türlü altyapı hizmetlerini de içermektedir. Bu sebeple ekonominin genel eğilimleri, inşaat sektörünün gelişme hızı ile doğru orantılı bir seyir izlemektedir. 2011 yılında ülkemizin genel büyüme rakamı % 8,5 iken, inşaat sektörü % 11,2 büyüme oranı ile ülke ekonomisi adına da bir mihenk taşı olduğunu ispatlamıştır [10]. Ayrıca İnşaat Malzemeleri Sektör Görünüm Raporu 2011'de, Temel Öngörüler başlığı altında, Türkiye'nin önümüzdeki dönemlerde inşaat sektöründe % 8,5 oranında büyüme beklentisi ile "çok olumlu ülkeler" arasında yer aldığı belirtilmiştir [11]. 2015 yılında büyüme %1,65'e kadar gerilemiş 2016 ilk çeyrekte ise inşaat sektörünün büyüme hızı % 6,6 olmuştur. [12].

Yukarıda belirtildiği gibi İnşaat sektörü, ülke ekonomisine paralel bir şekilde, kimi dönemlerde düşük bir ivme ile de olsa büyümeye devam etmektedir. Ayrıca son dönemde artan altyapı yatırımları dikkat çekmektedir. Bu iki temel duruma bağlı olarak inşaat sektöründeki ham madde ihtiyacı da sürekli artmaktadır.

İnşaat sektörünün temel ham maddesi olan agrega, dünya genelinde tüm maden üretimi içinde birinci sıradadır. Ülkemizde yıllık doğal agrega üretimi 450 milyon ton civarındadır [13]. Bu üretimin yaklaşık 40 milyon tonu çakıl ve kum, 410 milyon tonu ise doğal kırma taştır. Gelişmekte olan inşaat sektörü doğrultusunda agrega

retimindeki yıllık artış beklentisi % 6-8 aralığındadır. Ayrıca yıllık kişi başi agrega tüketimimiz 6 ton civarındayken AB lkelerinde bu miktar 16 ton/kişiye kadar çıkmaktadır [13]. Bu ngrler kapsamında ülkemizdeki agrega üretiminin, artış eğilimini uzun bir süre devam ettireceği aşıkrdır. Agregaya olan talebin artması doğal kaynak tüketimini hızlandıracaktır. İnşaat sektöründe kullanıma uygun doğal agrega bakımından ülkemizde yoğun rezerv bulunmasına karşın, kaynaklarımızın sürdürülebilirliği açısından kontrollü tüketim önem taşımaktadır. Ayrıca yoğun kaynak tüketimi ile açılacak yeni taş ocaklarının, evre üzerinde olumsuz etkileri olacaktır. Bu etkiler; ulaşımın sağlanması ve depolama alanlarının düzenlenmesi esnasında doğal çevrenin yok edilmesi, tozlaşma ile ortaya çıkacak hava ve yakın evre kirliliği, gürültü ve görüntü kirliliği ile patlatmalar esnasında meydana gelecek titreşimlerden etkilenecek ekoloji olarak sıralanabilir.

Gelişmiş pek çok ülkede olduğu gibi, Türkiye’de de kaynakların ve doğal alanların tüketimini azaltabilmek ve çevresel etkilerin olumsuz sonuçlarını en aza indirebilmek için, konuyla ilgili farklı seçenekler değerlendirmeye alınmıştır. Giriş bölümünde belirtildiği gibi agreganın geri kazanımı ve yeniden değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar ve uygulamalar devam etmektedir. Fakat oluşabilecek çevresel etkiler nedeniyle, yapay agregalar, ülkemizde sınırlı olarak üretime dahil edilebilmiştir.

Yapay agrega, ısıl veya diğer uygulamaları ihtiva eden bir endüstriyel işlem sonucunda elde edilen mineral kökenli agrega olarak tanımlanmaktadır. Uluslararası çalışmalarda en çok kullanılan yapay agregalar; yüksek fırın cürufu, elikhane cürufu, uçucu kül, inşaat ve yıkım atıklarıdır [14].

Özellikle elik üretiminde nc konumdaki ülkelerde, yüksek fırın cürufu ve elikhane cürufu, en çok kullanılan yapay agregalardır. Yüksek fırın cürufu, entegre tesislerde demir cevherinin, sıvı ham demire indirgenmesi, elikhane cürufu ise bazık oksijen fırınlarında (BOF) sıvı ham demirin, sıvı ham çeliğe ya da elektrik ocaklarında (elektirik ark ocağı ya da indüksiyon ocağı) hurdanın sıvı ham çeliğe indirgenmesi sırasında elde edilmektedir. Uluslararası uygulamalar incelendiğinde, öncelikle yapay agrega olarak, demir-elik cürufunun, aşağıda sunulan pek çok alanda kullanımının sağlandığı belirlenmiştir [15]:

- Bitümlü karışımlarda yapay agrega,
- Çimento betonu agregası ve imento bileşeni,

- Kayma-sürtünmeyi arttıran yüzeysel kaplama agregası,
- Şev ve banketlerde stabilize malzeme uygulamaları,
- Granüler temel uygulamaları,
- Stabilize yollar ve demiryolunda balast uygulamaları,
- Maden suyunun uzaklaştırılması ve endüstriyel sıvı atıkların nötralizasyonu,
- Tarımsal kullanımlar (toprak mineralizasyonu, pH düzenleme vb.),
- Dolgu (park alanları, boru ve tank geri dolgusu),
- Endüstriyel inşaat uygulamaları,
- Katı atık düzenli depolama sahaları günlük örtü malzemesi,
- Üstyapı ile dolgu arasında yer alan tesviye tabakası agregası,
- Drenaj hendeği ve dren malzemesi,
- Çatılarda granüler tabaka uygulamaları,
- Mineral yün (amyant vb.) üretimi,
- Kıyı-liman dolguları ve dalgakıranlar.

Türkiye dünyanın en büyük 8. çelik üreticisi konumundadır. 2015 yılı istatistiklerine göre Türkiye’de 31 milyon 517 bin ton çelik üretilmiştir. Belirtilen üretimin 11 milyon 35 bin tonu, birincil kaynaklardan olan demir cevherinden (entegre tesisler), 20 milyon 482 bin tonu ise hurda olarak adlandırılan, başlıca bileşeni demir olan kullanılma ömürlerinin sonuna gelmiş malzemelerin ve sektörde üretim esnasında oluşan yan ürünlerin değerlendirilmesiyle (elektrik ark ocağı, indüksiyon ocağı) elde edilmektedir [18]. Çelik üretim tesisleri Marmara Bölgesi, Karadeniz Bölgesi, İzmir Bölgesi ve İskenderun Bölgesi olmak üzere dört ana bölgede bulunmaktadır. Bu bölgelerde 24 adet elektrik ark ocağı (EAO), 4 adet indüksiyon ocağı (İO) ve 3 adet entegre tesis mevcuttur.

Sıvı ham demir üretiminde entegre tesislerde ortaya çıkan yüksek fırın cürufu, betonun uzun dönem dayanımını ve mukavemetini arttırması, beton geçirimsizliğini azaltması nedeniyle ülkemizde de ticari değeri olan bir yan ürün konumundadır [16]. Çelikhane cürufu ise uluslararası literatürde yan ürün olarak kabul edilmesine karşın ülkemizde halen katı atık konumunda ele alınmakta ve yapay agrega olarak

değerlendirilmemektedir. Çelik üretiminden elde edilen yan ürünler bakımından en düşük paya sahip olan pota cürufuna ilişkin uluslararası çalışmalar halen devam etmektedir.

BOF, EAO ya da İO'larda 1 ton sıvı ham çelik üretiminde % 12 ila 15 oranında çelikhane cürufu ortaya çıkmaktadır. İçeriğinde % 12'ye kadar metalik demir bulunabilen çelikhane cürufu, bazı üreticiler tarafından kırılarak içindeki metalik demir geri kazanılmaktadır. Bakiye cüruf ise stok sahalarında atıl olarak bekletilmekte ya da katı atık sahalarında bertaraf edilmektedir. Çelikhane cürufunun depolanması, tesis alanını daraltmakta, bertaraf edilmesi ise doğal alanların tüketimini ve aynı zamanda çelik üreticisinin maliyetini arttırmaktadır.

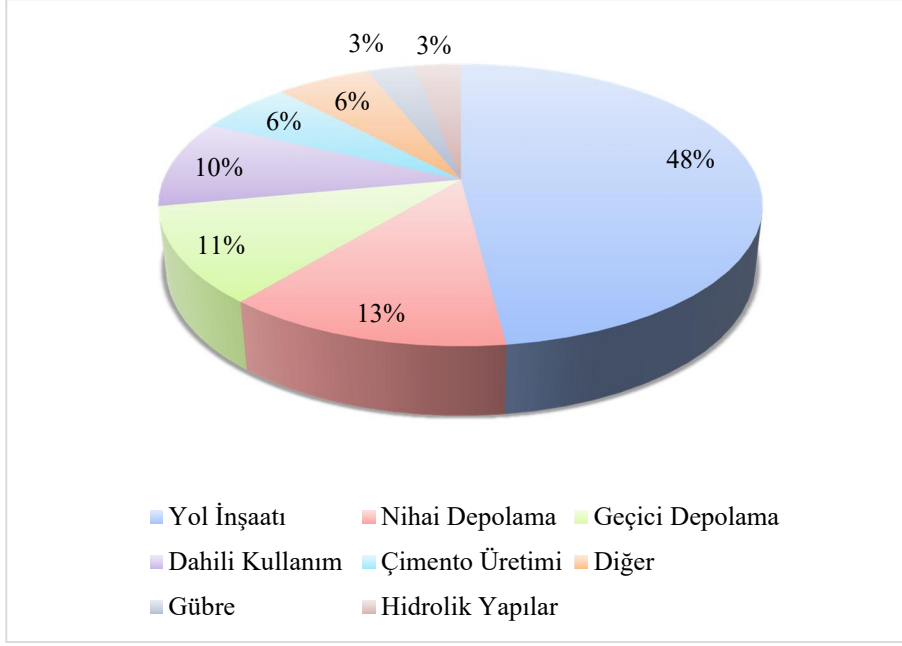
Ülkemizde şu ana kadar demir-çelik üretiminden 55 ila 65 milyon ton çelikhane cürufunun elde edildiği, bu yan ürünün büyük kısmının bertaraf edildiği ya da atıl durumda saklama alanlarında bekletildiği ve her yıl 4 milyon tondan fazla çelikhane cürufunun bu atıl yığına eklendiği bilinmektedir.

Tanımlanan çevresel ve iktisadi nedenlerden ötürü, çelikhane cürufunun, ülkemizde de yoğun, etkin ve ekonomik kullanım alanlarının belirlenmesi, sürdürülebilirlik kapsamında büyük önem taşımaktadır.

Uluslararası literatürde tehlikesiz ve durağan yan ürün sınıfındaki çelikhane cürufu, özellikle gelişmiş ülkelerde hammadde olarak yeniden üretim döngüsüne alınmakta ve birçok alanda kullanılmaktadır. Avrupa Birliği (AB) dahilinde kurulmuş olan ve çelik üretiminden elde edilen cürufların geri kazanımına ilişkin çalışmalar yürüten Avrupa Cüruf Birliği'nin (European Slag Association) son yayınladığı istatistiklere göre çelikhane cüruflarının kullanım alanları Şekil 1.2'de sunulmuştur.

Şekil 1.2'de görüldüğü üzere; AB'de çelikhane cürufunun en yoğun kullanım alanı karayolu inşaatıdır. Bunun yanı sıra Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde de çelikhane cürufunun karayolu inşaatında yapay agrega olarak kullanımının, sürdürülebilir malzeme kullanım ölçütleri bakımından olumlu sonuçlar verdiği araştırmalar ile saptanmış bulunmaktadır.

Ülkemizde çelikhane cürufunun yapay agrega olarak karayolu inşaatında kullanımına ilişkin araştırmalar yapılırsa da uygulamaya yönelik karşılaştırmalı, ekonomik ve performansa dayalı bir değerlendirme söz konusu olmamıştır.



Şekil 1.2 : AB çelikhane cürufu kullanım alan ve oranları [17].

Yapılan değerlendirmeler doğrultusunda, bu tez çalışmasının temel amacı; çelik tesislerinin yan ürünü olan ve mevzuatta henüz bir tanımı olmayan çelikhane cürufunun, esnek yol üstyapısında yapay agrega olarak değerlendirilmesine yönelik ekonomik bir yaklaşımın ortaya çıkarılması ve bu yaklaşım uyarınca çelikhane cürufu ile üretilen granüler ve bağlayıcı karışımların mekanik özelliklerinin, performanslarının incelenerek, doğal agregaya oranla yarar ve kısıtlarının belirlenmesidir. Bu sayede doğal alanların korunmasına, kaynakların sürdürülebilirliğine ve ülke ekonomisine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

1.2 Kapsam

Amaç bölümünde belirtildiği üzere; sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin indirgenebilmesi amacıyla bu tez çalışması kapsamında çelik üretiminden elde edilen çelikhane cürufunun, yapay agrega olarak karayolu esnek üstyapısında kullanılması amaçlanmıştır.

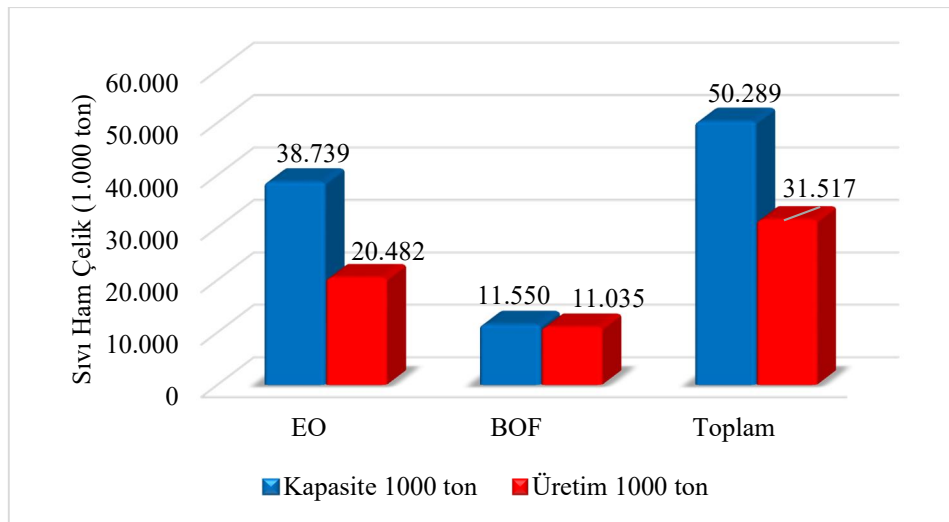
1.2.1 Malzeme

Çelik genel anlamda demirin karbonla düşük oranlarda yaptığı bir alaşımdır. Günümüzde, dünya genelinde çelik üretiminin 2/3 kadarı demir cevherinden, diğer bölümü ise hurdanın ve sektörde üretim esnasında oluşan atıkların yeniden değerlendirilmesiyle elde edilmektedir [18].

Cevherden çelik üretimi, karmaşık-bileşik tesislerde (entegre) yapılabilir. Bu tesislerin ham çelik üretimi için gerekli olan ana bileşenleri, yüksek fırın (YF) ve bazik oksijen fırınıdır (BOF). Demir cevheri YF’de işlenerek sıvı ham demir ve yüksek fırın cürufu elde edilmektedir. Sıvı ham demir, BOF’a yönlendirilmekte ve buradaki metalürjik işlemler ile sıvı ham çeliğe dönüştürülmekte, yan ürün olarak da çelikhane cürufu elde edilmektedir. Üretilmek istenen çelik özellikleri doğrultusunda ikinci metalürjik işlemler pota ocağında (PO) tamamlanarak üretim sonlandırılmakta ve son yan ürün olan pota cürufu açığa çıkmaktadır.

Demir ve çelik içeren hurdanın ergitilerek yeniden çelik elde edilmesi, son yıllarda üretimde önemli bir yer edinen EAO ve İO’lu tesislerde yapılmaktadır. EAO ile yapılan çelik üretiminde temel olarak hurda elektrik arkı yardımıyla ergitilmekte, içindeki safsızlıkların uzaklaştırılması için cüruf yapıcı maddeler ocağa katılmakta ve sıvı ham çelik ile EAO çelikhane cürufu elde edilmektedir. Entegre tesislerde olduğu gibi son aşamada çeliğe istenen özelliklerin verilebilmesi için, sıvı ham çelik pota ocağına aktarılmakta ve amaçlanan ürün ile pota cürufu ortaya çıkmaktadır. İO’ların üretim aşamaları EAO’lara benzer olmakla birlikte temel fark; İO’ların, metal içinde manyetik alan oluşturmak için bir bobinden geçen alternatif akımı kullanması ve indüklenen akım ile hızlı ısıtma ve ergitme sağlanmasıdır.

Genel eğilimden farklı olarak ülkemizdeki elektrik ocaklarının üretimdeki payı, entegre tesislere oranla daha yüksektir. 2015 yılı istatistikleri incelendiğinde 50 milyon 289 bin tonluk sıvı ham çelik kapasitesinin 38 milyon 739 bin tonluk kısmı elektrik ocaklarına aittir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 : Türkiye 2015 sıvı ham çelik üretim miktarı ve kapasitesi.

Türkiye’de çelik üretiminde, elektrik ocaklarının etkin olması nedeniyle bu tez çalışmasında elektrik ocaklarından elde edilen çelikhane cürufunun kullanılmasına karar verilmiştir. Üretim yapan 28 elektrik ocaklı tesisin 24’ü EAO olduğundan EAO çelikhane cürufu çalışma kapsamına alınmıştır. Elektrik ocaklı tesislerin kapasiteleri ve 2015 üretim miktarları Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1 : Elektrik ocaklı çelik üretim tesislerinin kapasiteleri ve 2015 yılı üretim miktarları.

Tesis Adı	Kapasite (1000 ton)	Üretim (1000 ton)
MKEK	60	1
EgeDemir	80	73
Platinum	96	85
Egemen	128	105
Çemtaş	180	141
Bilecik Demir Çelik	200	120
Asil Çelik	485	403
Sivas D.Ç.	550	175
Özkan	700	383
Sider	720	259
Çebitaş	750	122
Ede	780	0
Koç Çelik	883	551
Yazıcı	1.100	1.013
Yeşilyurt	1.100	767
Ekinciler	1.150	548
Nursan	1.200	852
Kaptan	1.350	962
Diler	1.500	1.024
İzmir D.Ç.	1.500	1.206
Ege Çelik	2.000	427
Tosçelik	2.000	1.046
Yolbulan Baştuğ	2.000	1.462
MMK	2.400	0
Kroman	2.500	1.144
Çolakoğlu	3.000	1.802
Habaş	4.800	2.872
İçdaş	5.527	2.939
Toplam	38.739	20.482

Amaç bölümünde (Bölüm 1.1) belirtildiği üzere, hurda ve demir cevherinin çelik ocaklarında işlenmesi ile ana ürün olarak demir-çelik elde edilmekte, ayrıca atık olarak filtre tozu, ocak kalıntıları ve yan ürün olarak cüruf oluşmaktadır. Tesis tipine göre değişmeksizin her ton sıvı ham çelik üretiminde % 12-15 oranında çelikhane cürufu ortaya çıkmaktadır. Şekil 1.3 ve Çizelge 1.1’den de görüldüğü üzere, ülkemizdeki üretim kapasitesinin ¾’ü EAO tesislerine aittir. Çelik üretim miktarının % 12 ila 15’i

oranında cüruf elde edildiği yaklaşımı ile 2015 yılında çelik üretiminden ortaya çıkan 4 milyon 254 bin ton cürufun, 2 milyon 765 bin tonunun EAO tesislerine ait olduğu hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamında EAO çelikhane cürufu esas alınmıştır.

Bütün EAO tesislerinin çalışmaya dahil edilmesi mümkün olmadığından, en büyük üç EAO tesislerinin bir tanesinden numune alınmasına karar verilmiştir. Bu kapsamda; “Çelikhane Cürufunun Karayolu İnşaatında Kullanımı, Performansı ve Mevzuat Önerisinin Oluşturulması” adlı Ar-Ge projesinin de paydaşı olan Çolakoğlu Metalürji A. Ş. tercih edilmiş ve EAO çelikhane cürufu numunesi bu tesisten alınmıştır.

Çolakoğlu Metalürji A. Ş.’nin Kocaeli, Dilovası’nda bulunan tesisinde, çelikhane cürufunun içindeki metalik demirin geri kazanılması için kırma, eleme ve manyetik ayırıştırma tesisi mevcuttur. Bu nedenle temin edilen numune içinde metalik demir oranı düşüktür. Ayrıca istenen boyutlarda olmasa da, çelikhane cürufu, boyutlarına göre gruplandırılmıştır. Tesiste yaşlandırma için ek bir işlem yapılmadığından alınan numunenin taze olduğu kabul edilmiştir. Kıyaslamalar için, ağırlıklı olarak karayolu agregası üretimi yapılan Ömerli-Alyans taş ocağından dolomitik kalker numunesi alınmıştır.

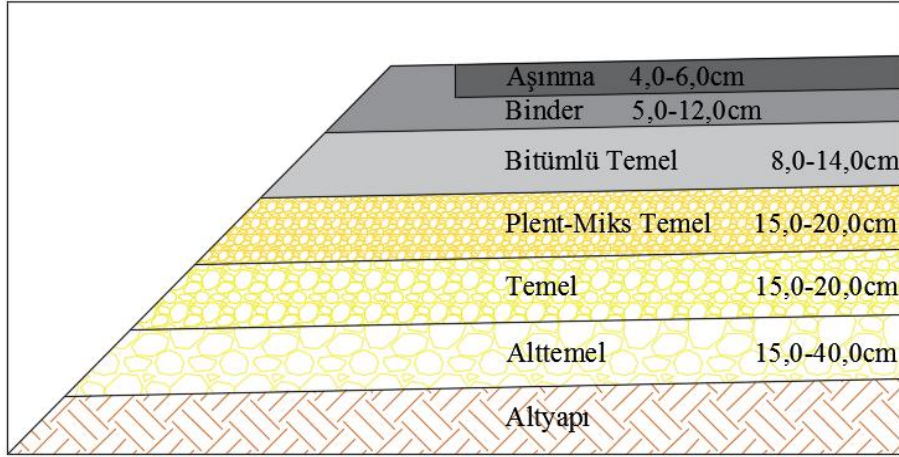
1.2.2 Üstyapı tipi

Amaç bölümünde (Bölüm 1.1) Şekil 1.2’de verilen istatistikler uyarınca EAO çelikhane cürufunun karayolu inşaatında kullanılması hedeflenmiştir. Uluslararası uygulamalarda özellikle üstyapı tabakalarında yapay agrega olarak kullanılan çelikhane cürufunun nitelikli özellikleri nedeniyle dolguda kullanılmamasına karar verilmiştir.

Üstyapı tipinin seçiminde çelikhane cürufunun alkali yapısı göz önüne alınmıştır. Alkali yapı nedeniyle meydana gelebilecek alkali-silika reaksiyonları göz önüne alınarak “rijit üstyapı” ve çimento bağlayıcı tabakalar çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Buna ek olarak esnek üstyapı, uygulama kolaylığı ve yolun trafiğe kısa sürede açılabilmesi gibi nedenlerle, Türkiye’de ağırlıklı olarak tercih edilmektedir. Esnek üstyapı tip enkesiti Şekil 1.4’te sunulmuştur.

Bu doğrultuda EAO çelikhane cürufunun karayolu esnek üstyapısında, alttemel, granüler temel, bitümlü temel, binder, aşınma ve taş mastik asfalt (TMA) tabakalarında

kullanımının araştırılmasına karar verilmiştir. Bu tabakaların tanımları aşağıda sunulmuştur.



Şekil 1.4 : Esnek üstyapı kesiti ve ortalama tabaka kalınlıkları.

Alttemel tabakası, KTŞ 2013'te; “belirtilen gradasyon limitleri içerisinde (kullanılması durumunda kazınmış asfalt malzemesi kullanımı dâhil) sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin su ile karıştırılarak, ince tesviyesi tamamlanmış dolgu veya yarmadan oluşan üstyapı tabanı üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabaka” olarak tanımlanmaktadır [19].

Temel tabakası; üstyapının oturduğu doğal zemin olan taban zeminini koruyan, bir veya birden fazla tabakadan oluşabilen, kaplama tabakasından gelen trafik yüklerini alt tabakalara ileten tabakadır. Temel tabakasının asıl görevi kaplama tabakasına dayanak sağlayarak, taşıtların geçişlerinden dolayı oluşan gerilmeleri, taban zemininin taşıma gücü sınırları içinde yaymaktır. Temel tabakası duruma göre çimentolu veya bitümlü bağlayıcıli karışım, stabilize edilmiş veya dikkatle seçilmiş granüler malzeme olabilir. Trafik hacminin yüksek olduğu kesimlerde bitümlü karışımlar daha yaygın olarak kullanılmaktadır [20].

Karayollarında aşağıda tanımları verilen dört farklı temel tipi uygulanmaktadır.

Granüler temel (GT); “çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış doğal cüruf veya kırmataş ile ince malzeme kullanılarak, verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin, su ile karıştırılması ve şartnamesine uygun olarak hazırlanmış taşıma gücü yeterli taban veya alttemel tabakası üzerine bir veya birden

fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabaka” olarak tanımlanmaktadır [19].

Plent Miks Temel (PMT); “kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak, verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin, belirtilen şekilde hazırlanmış yüzey üzerine projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak bir ya da birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabaka” olarak tanımlanmaktadır [19].

Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT); “çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak, verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin uygun oranlarda çimento ve su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan ve yeterli bir alttemel tabakası üzerine, bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabaka” olarak tanımlanmaktadır [19]. Çimento bağlayıcılı granüler temelde çelikhane cürufunun kullanımı durumunda alkali-silika reaksiyonu olasılığı nedeniyle çalışma kapsamından çıkartılmıştır.

Bitümlü Temel (BT); genellikle bağlayıcısız granüler temel üzerine yoğun gradasyonlu bitümlü sıcak karışımın uygulandığı bir tabakadır. Günümüz yollarında bitümlü temel tabakası, karayollarının vermiş olduğu dingil yükü miktarına göre hesaplanarak kalınlığı belirlenir [20]. Karayolları Teknik Şartnamesi 2013’te ise; “kırılmış ve elenmiş kaba agrega, ince agrega ve mineral fillerin belli gradasyon limitleri arasında, işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak yeterli temeller veya diğer bitümlü kaplamalar ile beton kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak ve projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak oluşturulan tabaka” olarak tanımlanmaktadır [19].

Asfalt betonu kaplamalar, karışım formülüne uygun olarak, karışım sıcaklığında, asfalt plentinde üretilen, temel tabakası üzerine serilen binder ve aşınma ya da binder ve taş mastik asfalt kaplamadan oluşmaktadır. Teknik ve ekonomik engeller nedeniyle temel üzerine sadece aşınma ya da taş mastik asfalt tabakası veya kademeli inşaat sebebiyle başlangıçta sadece binder tabakası uygulamaları da mevcuttur.

Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'te ise aşınma ve binder tabakası; “kırılmış ve elenmiş kaba agregâ, ince agregâ ve mineral fillerin belli gradasyon limitleri arasında işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak yeterli temeller veya diğer bitümlü kaplamalar ile beton kaplamalar üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde sıcak olarak ve projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak imal edilen asfalt betonu kaplaması” olarak tanımlanmaktadır [19].

Taş mastik asfalt; “kırılmış ve elenmiş kaba agregâ, ince agregâ ve mineral fillerin belli gradasyon limitleri arasında işyeri karışım formülü esaslarına uygun olarak, bitümlü bağlayıcı ile bir plentte karıştırılarak yeterli bitümlü kaplamalar ve beton kaplamalar üzerine bir tabaka halinde sıcak olarak, projesindeki plan, profil ve enkesitlere uygun imal edilen kaplama” olarak tanımlanmıştır [19].

KTŞ 2013'te binder ve bitümlü temel hariç yukarıda tanımlanan tüm tabakaların alt sınıfları mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında granüler tabakalar için tüm alt sınıflar, aşınma ve TMA tabakaları için ise Türkiye’de en çok kullanılan tipler dikkate alınmıştır. Ayrıca yine tanımlarda görüldüğü üzere, “cüruf” kelimesi birden fazla kez geçmektedir. KTŞ 2013 kapsamında doğal cüruf; volkanik cürufu, sıfat verilmeden kullanıldığında ise yüksek fırın cürufunu ifade etmektedir.

Kapsam başlığı altında verilen bilgiler ve yapılan kabuller ışığında; bu tez çalışmasında, Çolakoğlu Metalürji A. Ş.’den alınan çelikhane cürufunun, karayolu esnek üstyapısında, alttemel, temel, PMT, bitümlü temel, binder, aşınma ve TMA tabakalarında doğal agregâ yerine kullanımının araştırılmasına karar verilmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi için de Ömerli-Alyans taş ocağından dolomitik kalker numunesi temin edilmiştir.

1.3 Literatür Taraması

Huang (2007) tarafından yapılan çalışmada, çelikhane cürufunun, sertliği, köşeli ve dokulu yapısı ile stabilite, tekerlek izinde oturma ve sürtünme katsayısı kapsamında doğal agregânın yerini almaya başladığı belirtilmiştir. US Strategic Highway Program (SHRP) ve Suudi Arabistan Petrol ve Mineraller Üniversitesi bu konuda ortak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ince kireçtaşı ile karıştırılan iri agregâ boyutundaki çelikhane cürufunun, polimer katkısı ile neme ve yorulmaya daha

dayanıklı olduğu belirlenmiştir. 1994'te Oregon'da % 30 çelikhane cürufu içeren bir deneme yolu yapılmış ve 5 yıl süre ile gözlemlenmiştir. Deneme kesimi, laboratuvar karışımlarında gözlemlendiği oranda tekerlek izine yüksek direnç ve yüksek sürtünme katsayısı gösterememiştir. Sonuç raporunda bu durum, 6,3-12,7 mm aralığında cüruf eksikliğine dayandırılmıştır. Ayrıca çelikhane cürufunun kullanımı ile artan birim hacim ağırlığın ve karıştırma sıcaklığının ekonomik dezavantajları ele alınmıştır. İngiltere'de Transportation Research Laboratory (TRL) tarafından gerçekleştirilen 3 yıllık gözlem sonucunda BOF cürufunun, cilalanmış taş değerinin (PSV) en az 60 istendiği yollarda uygulanmasının uygun olduğu belirtilmiştir. Nottingham Centre for Pavement Engineering (NCPE), çelikhane cürufu içeren bitümlü sıcak karışımların (BSK) rijitlik modülü, kalıcı deformasyona karşı direnci, yorulma çatlaklarına karşı direnci, yaşlanma ve nem hasarı hassasiyeti üzerine bir çalışma yapmıştır. % 71 çelikhane cürufu, % 21 yüksek fırın cürufu içeren TMA tabakası tasarlanmıştır. Kum taşı içeren kontrol karışımına oranla rijitlik modülünün aynı zamanda da yoğunluk ve yaşlanma hassasiyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Çin'de yapılan bir diğer çalışmada ise TMA tabakasında, genleşmesi % 1'den küçük olan çelikhane cürufu % 62, bazalt ise % 38 oranında kullanılmıştır. Sonuç olarak, yüzey dokusu, sürtünme katsayısı, tekerlek izine ve düşük sıcaklık çatlaklarına direncin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmalar derlendiğinde; iri agrega yerine çelikhane cürufunun kullanımının sürtünme katsayısı ve stabilite açısından en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir. Bağlayıcı oranının yüksek tutulması tavsiye edilmektedir. Çelikhane cürufunun yüksek birim hacim ağırlığının, karışımın yoğunluğunu etkileyerek taşıma maliyetini arttırdığı belirtilmiştir. İçeriğindeki serbest CaO ve MgO'nun genleşmeye neden olduğu ve suya hassasiyeti arttırdığı belirlenmiştir. Genleşmenin önüne geçmek için 12 ila 18 ay yaşlandırma süreci tavsiye edilmektedir. Çevresel açıdan ise çelikhane cürufunun pH değeri, iletkenliği ve krom konsantrasyonunun dikkat edilmesi gereken parametreler olduğu vurgulanmıştır [21].

Sorlini (2012) tarafından yapılan çalışmada, Feralpi S.p.A. firmasından EAO çelikhane cürufu numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler, deneylere tabi tutulmuş ve 0-20 mm ve 14-32 mm gruplarında % 30 ve 40 oranlarında bitümlü temel, binder ve aşınma tabakalarına ilave edilmiş ve tasarımlar yapılmıştır. Çelikhane cürufunun parçalanmaya karşı direnci % 22-23, aşınmaya karşı direnci % 6,5-9,5 ve su absorpsiyonu % 1,5-2,2 aralığında bulunmuştur. Çelikhane cürufu ile üretilen

karişımların mekanik özelliklerinin doğal agrega karişımlarından daha iyi (stabilite > 16 kN, ortalama akma 2,8mm) olduğu belirlenmiştir. Kimyasal açıdan içerikler; krom < 4.850 mg/kg, baryum < 1.413 mg/kg, alüminyum 30.000-35.000 mg/kg, demir < 359.353 mg/kg ve mangan 28.000-33.000 mg/kg'dır. Süz len kirletici maddeler, limitler dahilinde olmakla birlikte civa 0,9  g/L, vanadyum 180  g/L, krom 30  g/L,  z nm ş organik karbon 29,7  g/L'dir. Serbest kireç ve magnezyum oksit bileşikleri ise sırası ile % 16-22 ve % 2-3 aralığındadır. 15 günlük numunede genleşme % 0,62 olarak belirlenmiştir [22].

Yıldırım (2011) tarafından yapılan çalışmada; EAO elikhane cürufunda, çakıl b y kl ğindeki tanelerde düşük küreselliğe sahip keskin kenarlı bir yapı gözlemlendiği, ince tanelerde ise belirgin kristal yapılar ile aşırı p r zly doku gözlemlendiği belirtilmiştir. Yapılan morfolojik inceleme sonucunda EAO elikhane cürufu numunelerinin yüksek sürtünme sağlayabileceği belirlenmiştir. EAO elikhane cürufu içerisinde bulunan serbest CaO ve MgO'nun su ile reaksiyonu sonucu hacimsel kararsızlık göstereceği belirtilmiştir [23].

Pasetto (2010) tarafından yapılan çalışmada, karişımlarda agrega yerine tamamen EAO elikhane cürufu kullanılmıştır. EAO elikhane numunelerinin, doğal agregaya eş değer fiziksel ve mekanik özellikler gösterdiği, hidrokarbonlu bağlayıcılar ile tam kimyasal uyum sergilediği ve zararlı süzülme yapmadığı belirtilmiştir. Marshall stabilitesi ve oranlarında, yoğunlaşma ve işlenebilirlikte sorunla karşılaşılmadan iyi sonuçlar elde edilmiştir. Tekrarlı eksenel yük deney sonuçları uyarınca, elikhane cürufu ile imal edilen karişımların, kalıcı deformasyona daha hassas olduğu kanaatine varılmıştır. Yavaş, kanallandırılmış trafiği simüle eden düşük frekanstaki dinamik analizde, rijitlik ve yorulma direnci bakımından elikhane cürufu ile imal edilen numunelerin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu numunelerin sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Deneyler, elikhane cürufu ile karişımın iskeleti oluşturulduğunda, sonuçların tatmin edici olduğunu göstermektedir [24].

Sofilic (2010) tarafından yapılan çalışmada; EAO elikhane cüruf numunlerine ilişkin deneylerde, ana mineraal fazların v stit, dikalsiyum ve trikalsiyum silikat, brovnmilerit ve mayenit olduğu belirtilmiştir. Numunelerde CaO ve MgO içeriğinin düşük olması nedeniyle inşaat uygulamalarında kolaylık sağlayacağı düşünülmektedir. Kimyasal analizde içerik; CaO % 33,2, Fe₂O₃ % 29,64, SiO₂ % 10,08, MgO % 13,09, Al₂O₃ %

1,66, Na₂O % 0,02 ve K₂O % 0,06 olarak belirlenmiştir. Elaut analizlerinde çelikhane cürufunun tehlikesiz olduğu gözlemlenmiştir. Radyoaktif çekirdek taramasında, radyoaktivitenin limitler altında olduğu ve inşaat uygulamalarında EAO çelikhane cürufunun kullanılabileceği belirtilmiştir. Çelikhane cürufunun geometrik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, BSK'lar için gerekli tüm şartları sağladığı belirlenmiştir [25].

Wu (2006) tarafından yapılan çalışmada, TMA tabakasının tamamında , 13 mm'den küçük EAO çelikhane cürufu kullanılmıştır. Kontrol karışımında ise bazalt kullanılmıştır. Çelikhane cürufunun su absorpsiyonu % 1,29, bazaltın ise % 0,68'dir. Yapılan tasarımlarda çelikhane cürufu karışımının optimum bağlayıcı oranı % 6,4, bazalt karışımının optimum bağlayıcı oranı % 6,2 bulunmuştur. Sonuç olarak; TMA'da EAO çelikhane cürufu kullanıldığında, karışımın şartnamelerdeki limitleri sağladığı, bazalta oranla bağlayıcı oranındaki artışın az olduğu, 3 yıl yaşlandırma sürecinden sonra cüruftaki genleşmenin % 1'in altında olduğu, cüruf karışımlarının kalıcı deformasyona ve düşük sıcaklık çatlaklarına daha dayanıklı olduğu, 2 yıl süreyle gözlemlenen deneme yolunun performansının iyi olduğu, deneme yolunda ortalama PSV'nin 55 ve ortalama doku derinliğinin 0,8 mm olduğu belirlenmiştir [26].

Pasetto (2011) tarafından yapılan çalışmada, 0/5, 5/10 ve 10/15 mm boyutlarında iki farklı EAO çelikhane cürufu ve kireçtaşı kullanılmıştır. İlk aşamada, EAO çelikhane cürufu numunelerinin kimyasal içerikleri incelenmiş, çevresel analizleri yapılmıştır. Aşınma tabakası için tasarımlar yapılmıştır. Tasarımlarda sırası ile % 100 kireç taşı, % 30 EAO çelikhane cürufu-% 70 kireç taşı, % 60 EAO çelikhane cürufu-% 40 kireç taşı ve % 90 EAO çelikhane cürufu-% 10 mineral filler, 70/100 penetrasyonlu bitüm ile kullanılmıştır. Karışım tasarımları Marshall metoduna göre yapılmıştır. Karışımlarda sırası ile optimum bağlayıcı oranları % 4,90, % 5,00, % 5,12 ve % 5,25 olarak belirlenmiştir. En büyük stabilite, % 90 EAO çelikhane cürufuna sahip sonunca karışımında elde edilmiştir. Performans deneyleri kapsamında; sünme, rijitlik modülü, yorulma ve sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak; EAO çelikhane cürufunun fiziksel ve mekanik özellikler bakımından genel olarak yok inşaatlarında kullanılan doğal agrega ile kıyaslanabilir özellikleri olduğu, bağlayıcı ile uyumlu olduğu, çevresel açıdan herhangi bir sorun yaratmadığı, karışımlarda yüksek stabilite ve Marshall oranı sağladığı, karışım yoğunluğu ve işlenebilirlikte ciddi bir problem yaratmadığı, kalıcı deformasyona dirençli sağladığı, rijitlik modülü ve yorulmaya karşı dirençte olumlu sonuçlar sunduğu, EAO çelikhane

cürufu ile üretilen karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara daha dirençli olduğu, en yüksek EAO çelikhane cürufuna sahip karışımın en iyi sonuçları sunduğu belirtilmiştir [27].

Abut (2013) tarafından yapılan çalışmada, Çolakoğlu Metalürji A. Ş.'den alınan çelikhane cürufu BSK'larda kaba agrega olarak kullanılmıştır. Karışımlar % 100 kalker ve % 51 EAO çelikhane cürufu, % 49 kalker kullanılarak üretilmiştir. Bağlayıcı olarak 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. Tasarımlar, Aşınma Tip-I tabakası için Marshall metodu ile yapılmıştır. Optimum bağlayıcı oranları sırası ile % 4,70 ve % 4,75 bulunmuştur. Performans deneyi olarak, sıkıştırılmış BSK'ların sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci ele alınmıştır. Sonuçlarda; EAO çelikhane cürufu ile üretilen numunelerin sudan kaynaklanan bozulmalara daha hassas olduğu, BSK'lar içinde çelikhane cürufunun daha düşük oranlarda kullanılması gerektiği, çelikhane cürufu ile üretilen karışımların nakliye maliyetlerinin artacağı belirtilmiştir [28].

Kök (2009) tarafından yapılan çalışmada, Sivas Divriği Demir-Çelik Fabrikasından temin edilen EAO çelikhane cürufu, filler ve 200/100 no'lu elek aralığındaki mineral agrega yerine kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak 50/70 ve 160/220 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. İnceleme açısından 160/220 penetrasyonlu bitüm doğrudan ve stiren-butadien-stiren (SBS) ile modifiye edilerek kullanılmıştır. Modifiye edilen bağlayıcıda % 3 SBS katkısının en ideal sonuçları verdiği saptanmıştır. BSK'ların karşılaştırılması için % 100 kalker ile 50/70 penetrasyonu bitüm, % 100 kalker ile 160/220 penetrasyonlu bitüm, % 100 kalker ile 160/220 penetrasyonlu modifiye bitüm, cüruf-kalker karışımı ile 50/70 penetrasyonlu bitüm ve cüruf-kalker karışımı ile 160/220 penetrasyonlu modifiye bitüm karıştırılarak tasarımlar yapılmıştır. Optimum bağlayıcı oranları sırası ile % 4,91, % 4,89, % 4,91, % 5,22 ve % 5,22 bulunmuştur. En yüksek stabilite birinci karışımda elde edilmiştir. Kalıcı Marshall stabilitesi ve akma ölçümü, dolaylı çekme rijitlik modülü, sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç deneyleri performans deneyleri kapsamında ele alınmıştır. Sonuç olarak; Sivas-Divriği Demir Çelik Fabrikası EAO çelikhane cürufunun, BSK'larda agrega olarak kullanılması durumunda, servis ömrünün ile dönemlerinde iyi performans sergileyeceği, ilerleyen yıllarda ise özellikle nem hasarı nedeniyle kötü performans sergileyeceği, bu tip karışımlarda polimer modifiye bitüm kullanımının performans üzerinde önemli bir etkisinin olmayacağı ve soyulma önleyici katkı maddelerinin kullanılması ile bu tip

karışımların özellikle nem hasarına karşı performanslarının arttırılabileceği belirtilmiştir [29].

Pasetto (2012) tarafından yapılan çalışmada, ilk olarak iki farklı EAO çelikhane cürufu örnekleğinin kimyasal, toksik, fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. İkinci olarak en büyük tane boyutu 15 mm olan iki farklı TMA tasarımı, tamamen kireç taşından ve kireçtaşı-cüruf karışımından üretilmiştir. Bağlayıcı olarak SBS ile modifiye edilmiş 50/70 penetrasyonlu bitüm kullanılmıştır. İlk karışımda % 9 filler içeriği ile tamamen kireç taşı, ikinci karışımda % 9 filler içeriği ve % 26 cüruf katkısı, üçüncü karışımda % 11 filler içeriği ile tamamen kireç taşı, dördüncü karışımda ise % 11 filler içeriği ve % 59 cüruf katkısı kullanılmıştır. Optimum bağlayıcı oranları sırasıyla % 5,50, % 5,58, % 5,52 ve % 5,64 olarak belirlenmiştir. Sünme, rijitlik modülü, yorulma direnci ve sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnç, performans deneyleri kapsamında ele alınmıştır. Sonuç olarak; EAO çelikhane cürufunun fiziksel ve mekanik özellikler bakımından genel olarak yok inşaatlarında kullanılan doğal agrega ile kıyaslanabilir özellikleri olduğu, bağlayıcı ile uyumlu olduğu, çevresel açıdan herhangi bir sorun yaratmadığı, karışımlarda yüksek stabilite ve Marshall oranı sağladığı, karışım yoğunluğu ve işlenebilirlikte ciddi bir problem yaratmadığı, kalıcı deformasyona, doğal agrega karışımlarına oranla daha hassas olabileceği, rijitlik modülü ve yorulmaya karşı dirençte olumlu sonuçlar sunduğu, EAO çelikhane cürufu ile üretilen karışımların sudan kaynaklanan bozulmalara daha dirençli olduğu, en yüksek EAO çelikhane cürufuna sahip karışımın en iyi sonuçları sunduğu belirtilmiştir [30].

Kehagia (2009) tarafından yapılan çalışmada, agrega olarak EAO çelikhane cürufu, gabro ve diabaz, fiziksel özellikler bakımından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. % 100 gabro, cüruf-0/5 mm malzeme kireç taşı, cüruf-0/5 mm malzeme kireç taşı ve SBS modifiyeli bitüm ile en büyük tane boyutu 12,5 mm olan 3 farklı aşınma tabakası karışımı yapılmıştır. Bağlayıcı oranları sırası ile % 4,5-4,6, % 4,7-4,8 ve % 4,55 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise % 100 cüruf ve 0/5 mm kireçtaşı-5/12,5 mm cüruf karışımından hazırlanan 4 farklı aşınma tabakası ile deneme yolu kesimleri inşa edilmiştir. Bu kesimlerde sürtünme değerleri ve doku derinlikleri ölçülmüştür. Sonuç olarak; EAO çelikhane cürufu ile üretilen aşınma tabakalarının sürtünme değerlerinin doğal agregaya oranla yüksek olduğu, cürufun yüksek birim hacim ağırlığı, köşeli yapısı ve sert yüzeyi nedeniyle bozulmalara daha dayanıklı olacağı,

güçlü kenetlenme özellikleri nedeniyle yüksek rijitlik ve deformasyona direnç sağlayacağı belirtilmiştir [31].

Sofilic (2009) tarafından yapılan çalışmada; ilk olarak EAO çelikhane cürufunun, sert agrega olarak diabazın ve genel olarak yol inşaatında kullanılan kireçtaşının temel özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın devamında cüruf ve kireçtaşı ile aşınma tabakası tasarımları yapılmıştır. Bağlayıcı oranları sırası ile % 5,1 ve % 5,4 olarak belirlenmiştir. Boşluk oranları % 6,9 ve % 4,1'dir. En yüksek stabilite değeri cüruf karışımında elde edilmiştir. Sudan kaynaklanan bozulamalara karşı direnç, dolaylı çekme mukavemeti ve rijitlik modülü deneyleri, performans deneyleri kapsamında ele alınmıştır. EN 12697-22 standardı uyarınca yapılan tekerlek izinde oturma deneyinde cüruf ile imal edilen karışımın deformasyonu 0,09 mm/1.000 tekrar, kireç taşı karışımının deformasyonu 0,53 mm/1.000 tekrar olarak belirlenmiştir. Bu karışımlar ile deneme kesimleri inşa edilmiştir. Deneme kesimlerinde yapılan ölçümlerde sürtünme değerleri 48 ve 50, doku derinlikleri ise 0,40 mm ve 0,39 mm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak; EAO çelikhane cürufunun, yol inşaatında kullanılan agregalardan beklenen geometrik, fiziksel ve mekanik özellikleri karşılayabildiği, deneme kesimlerinin inşaatında herhangi bir problem ile karşılaşılmadığı, EAO çelikhane cürufu ile imal edilen karışımın tekerlek izinde oturmaya daha dayanıklı olduğu, elde edilen sürtünme değerlerinin yeterli olduğu belirtilmiştir [36].

Liapis (2012) tarafından yapılan çalışmada; EAO çelikhane cürufu 2,5 cm kalınlığında, yüksek sürtünme özelliklerine sahip ince aşınma tabakası imalatı için kullanılmıştır. Karışımında % 72 oranında 6,35/10 mm, % 23 oranında 0/2 mm ve % 5 oranında filler, çelikhane cürufundan temin edilmiştir. İlk olarak cürufun fiziksel özellikleri incelenmiştir. Karışımında 5/70 penetrasyonlu modifiye bitüm kullanılmıştır. Üretilen karışımla 12 km'lik bir deneme kesimi inşa edilmiştir. Bu kesimden elde edilen sonuçlar benzer şekilde andezit ile üretilen ince kaplama ile 30. ve 41. aylarda ölçülen değerler ışığında kıyaslanmıştır. Sonuç olarak; % 100 cürufun kullanıldığı kaplamanın inşaat sonrası gerekli özellikleri sağladığı, 30. ve 41. aylarda da gerekli limitleri sağladığı, trafik etkisi ile cüruf karışımı yüzeyindeki bağlayıcının yırtılması sonucu sürtünme değerlerinin arttığı, cüruf ile üretilen aşınma tabakasının geçirgenliğinin daha fazla olduğu, cürufun andezite oranla doku derinliğinin daha fazla olduğu belirlenmiştir [33].

Aiban (2006) tarafından yapılan çalışmada; EAO çelikhane cürufunun granüler temellerde, doğal agrega yerine kullanımı incelenmiştir. İlk olarak cürufun çevresel etkileri incelenmiş ve Environmental Pollution Agency (EPA) limitleri uyarınca kullanımının tehlikesiz olduğu belirlenmiştir. İkinci olarak kireç taşı, marn ve cürufun fiziksel özellikleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Üçüncü olarak 6 farklı tane dağılımına göre, cüruf-kireçtaşı-marn karışımları incelenmiştir. Son olarak Dammam Sanayi Bölgesinde bir uygulama yapılmış ve Dynaflect cihazı yardımıyla esneklik modülleri inşaattan sonraki ikinci gün ve altıncı ayda ölçülmüştür. Sonuç olarak; cürufun farklı mühendislik uygulamalarında doğal agreganın yerine ya da doğal agrega ile birlikte kullanımının olumlu sonuçlar vereceği, cüruf kullanımının çevreyi olumsuz etkilemeyeceği, uygun tane dağılımı seçildiğinde cürufun, doğal agregaya oranla iki kata kadar daha yüksek CBR değerleri verdiği ayrıca doğal nem muhtevasının sıkışmayı etkilemediği, granüler tabakalarda % 100 cürufun kullanımı durumunda drenajın daha rahat olduğu, CBR değerlerinin marn ya da kum katkısı ile daha da arttırılabileceği bu durumun da taşıma maliyetlerini dengeleyeceği, cüruf karışımına eklenecek marn oranının plastisite ve agrega kalitesi ile sınırlandığı, deneme kesiminde yüksek performans elde edildiği belirtilmiştir [34].

Ali (1992) tarafından yapılan çalışmada; EAO ve Open-Heart (OH) ocak cürufu ile üretilen aşınma karışımları, doğal agrega aşınma karışımı ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama için 8 agrega karışımı hazırlanmıştır. Karışımlardan ikisi % 100 EAO çelikhane cürufundan oluşmaktadır. EAO aşınma karışımında optimum bağlayıcı oranı % 7 olarak belirlenmiştir. İkinci karışımın bağlayıcı oranı karşılaştırma için % 6,5'e çekilmiştir. Rezilyans modülünün tayini, sünme, dolaylı çekme mukavemeti, yorulma ömrü tayini ve nemden kaynaklanan bozulmalara karşı hassasiyet deneyleri, performans deneyleri kapsamında ele alınmıştır. Sonuç olarak; EAO çelikhane cürufunun yapay agrega olarak BSK'larda kullanılabileceği, cürufu karışımların, geleneksel karışımlara göre daha iyi sonuçlar verdiği, doğru tasarım yaklaşımı ile cürufun sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direnci arttırılabileceği, cürufun BSK'ların yorulma ömrünü uzatabileceği ve kalıcı deformasyona karşı direnci arttırılabileceği belirtilmiştir [35].

Kaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, EAO çelikhane cürufu Aşınma tabakası tasarımında yapay agrega olarak kullanılmıştır. Karışım tamamen EAO cürufundan, kontrol karışımı da kalkerden üretilmiştir. Sonuç olarak bağlayıcı oranı % 6,3, pratik

birim hacim ağırlık (G_{mb}) 2,873, bağlayıcı ile dolu boşluk (VFA) % 61,4, boşluk (VA) % 10,26 ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) % 26,5 bulunmuştur. EAO çelikhane cürufu ile üretilen karışımda, cürufun poroz yapısı nedeniyle boşluğun şartname limitinin üzerinde kaldığı belirlenmiştir. Optimum bağlayıcı oranında stabilite 10,05 kN, akma 2,7 mm olarak belirlenmiştir [20].

Mutlugeldi (2015) tarafından yapılan çalışmada, EAO çelikhane cürufu Bitümlü Temel (BT) tabakası tasarımı yapay agrega olarak kullanılmıştır. Karışım tamamen EAO cürufundan, kontrol karışımı da kalkerden üretilmiştir. Sonuç olarak bağlayıcı oranı % 4,91, pratik birim hacim ağırlık (G_{mb}) 2,950, bağlayıcı ile dolu boşluk (VFA) % 67,09, boşluk (VA) % 5,0 ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) % 16,05 bulunmuştur. EAO cürufu BT briketlerinin akma değerlerinin doğal agregayla kıyasla 0,5 mm daha düşük olduğu, bunun yanında stabilitesinin doğal agrega karışımına oranla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Optimum bağlayıcı oranında stabilite 26,50 kN, akma 2,32 mm olarak belirlenmiştir [37].

Özügürlü (2015) tarafından yapılan çalışmada, EAO çelikhane cürufu binder tabakası tasarımı yapay agrega olarak kullanılmıştır. Karışım tamamen EAO cürufundan, kontrol karışımı da kalkerden üretilmiştir. Sonuç olarak bağlayıcı oranı % 4,70, pratik birim hacim ağırlık (G_{mb}) 2,940, bağlayıcı ile dolu boşluk (VFA) % 65,60, boşluk (VA) % 5,0 ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) % 16,40 bulunmuştur. Doğal agrega ile hazırlanan karışımların pratik özgül ağırlığı 2,450 - 2,500 aralığında iken EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımların pratik özgül ağırlığının 2,900 ile 3,000 arasında olduğu belirlenmiştir. Agregalar arası boşluğun (VMA), EAO cürufu agregası ile hazırlanan karışımlarda, doğal agrega ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek olduğu, bu farkın, farklı yüzey yapılarında olan, dolayısıyla farklı içsel sürtünme kuvvetlerine sahip, karışımların aynı enerji ile sıkıştırılması sonucu ortaya çıktığı, agregalar arası boşluk miktarının fazla olmasının karışımın stabilitesini olumsuz yönde etkileyen bir etken olduğu, karışım içerisindeki agregalar arası boşluk miktarının azaltılmasının, karışımı oluşturan gradasyon limitlerinde yapılacak değişim ile veya karışımın sıkıştırılmasında uygulanacak enerjinin artırılması ile elde edilebileceği belirtilmiştir. Optimum bağlayıcı oranında stabilite 22,39 kN, akma 3,00 mm olarak belirlenmiştir [38].

Washington Eyaleti Ulaştırma Bölümü (2015) tarafından yapılan çalışmada Amerika Birleşik Devletleri'nde çelikhane cürufunun karayolu inşaatında kullanım olanakları,

avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Çelikhane cürufunun yapay agrega olarak Illinois, Indiana, Iowa, Minnesota, Missouri, Ohio, Pennsylvania, Güney Carolina, Washington ve Batı Virginia eyaletlerinde aktif olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Yapılan uygulamalar doğrultusunda çelikhane cürufunun yol inşaatında kullanımının avantajları; yüksek sürtünme katsayısı, cilalanmaya karşı direnç, yüksek stabilite, soyulmaya karşı direnç, tekerlek izinde oturmaya karşı direnç, yüksek rijitlik, ve yorulmaya karşı direnç olarak sıralanmıştır. Uygulamalarda belirlenen dezavantajlar ise genleşme olasılığı, % 24 ila 30 oranında daha fazla bağlayıcı ihtiyacı, yüksek taşıma maliyeti ve yüksek uygulama bedelidir [39].

Rohde (2003) tarafından yapılan çalışmada, EAO çelikhane cürufu farklı granülometrideki granüler tabakalarda, standart sıkıştırmada incelenmiştir. Farklı gradasyonlar için düzenli ve düzensiz eğriler gözlemlendiği, karışımların maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının 23 - 26 kN/m³ aralığında, optimum su muhtevasının ise % 3 - 6 aralığında olduğu belirtilmiştir [40].

Bagampadde (1999) tarafından yapılan çalışmada BOF çelikhane cürufu aşınma tabakasında, % 100 oranında ve kalker menşeli filler ile karıştırılarak kullanılmıştır. Cürufun, Suudi Arabistan'da aşınma tabakası agregası için belirtilen limitleri karşıladığı, taş tozu ile karıştırılan cürufun, karışımın rijitliği ve çekme dayanımını arttırdığı, kireç taşının filler olarak kullanıldığı polimer modifiyeli karışımlarda uzun yorulma ömrü, kalıcı deformasyona karşı yüksek direnç ve neme karşı yüksek direnç elde edildiği, tamamen cüruftan elde edilen karışımların ise körfez bölgesi için uygun olmadığı belirtilmiştir [41].

Alataş (2006) tarafından yapılan çalışmada, BOF çelikhane cürufu Binder Tip-II karışımı için yapay agrega olarak kullanılmıştır. Yapılan tasarımda, bağlayıcı oranı % 5,10, pratik birim hacim ağırlık (G_{mb}) 2,546, bağlayıcı ile dolu boşluk (VFA) % 70,82, boşluk (VA) % 5,14 ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) % 17,88 bulunmuştur. Cürufu numunelerden elde edilen stabilite değerlerinin, kalker numunelerine göre daha yüksek; akma değerlerinin ise daha düşük olduğu, en yüksek rijitlik modülü ve sünme sertliği modülü değerlerine cürufu numunelerde ulaşıldığı, cürufun kalkere oranla daha pürüzlü olmasının daha iyi adezyon sağladığı, bundan dolayı akma değerlerinin de daha düşük olduğu belirtilmiştir [42].

1.4 Kısıtlar

Kapsam bölümünde (Bölüm 1.2) belirtildiği üzere bu tez çalışmasının kapsamı, EAO çelikhane cürufunun karayolu üstyapısında, granüler ve bağlayıcı tabakalarda, yapay agrega olarak kullanım olanaklarının ve performansının araştırılmasıdır. Bu kapsam doğrultusunda yapılan çalışmada, doğrudan ve dolaylı yoldan öne çıkan hukuki, teknik ve ekonomik kısıtlar aşağıda sunulmuştur.

1.4.1 Hukuki kısıtlar

Çelikhane cürufu ülkemizde halen atık konumunda olan bir malzemedir. Temel olarak çelikhane cürufunun atık durumunun sona ermesi; işlenmesi-uygulanması sırasında çevreye ve insan sağlığına etkisinin olmadığı belirlenmesi ve kullanım alanlarının tanımlanması ile mümkün olmaktadır.

Literatür taramasında, çelikhane cürufunun durağan bir yan ürün olduğu, gerekli tedbirlerin alınması durumunda insan sağlığına ve çevreye zararının olmadığı farklı araştırmalar ile belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan çelikhane cürufunun ise tehlikesiz atık sınıfında yer aldığı ayrıca basit uygulamalar ile durağan atık sınıfına da girebileceği “Bulgular” (Bölüm 4) ve “Tartışma” (Bölüm 5) bölümlerinde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. İnsan sağlığı ve çevre üzerinde etkisinin olmadığı belirlenen malzeme, ihtiyaç doğrultusunda, ilgili bakanlıklar ve kamu kurumlarının çalışmaları ile şartname kapsamında tanımlanmakta ve kullanım alanları belirlenmektedir.

KTŞ 2013 “Esnek Üstyapılar” kapsamında; yüksek fırın cürufu ve doğal cürufa ilişkin tanımlar ve kullanım alanları belirtilmiş olup, çelikhane cürufu hakkında herhangi bir açıklama bulunmamaktadır. Fakat çelikhane cürufunun şartname dahiline alınmasına ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Bu doğrultuda, yol gösterici ve çelikhane cürufu için tanımlanacak malzeme özelliklerinde bir başlangıç noktası olması açısından KTŞ 2013’te doğal agrega için tanımlanmış hususlar, deneyler ve limitler, çalışmanın hukuki kısıtını oluşturmaktadır.

1.4.2 Teknik kısıtlar

EAO çelikhane cürufu, içindeki metal oksitler nedeniyle birim hacim ağırlığı yüksek bir malzemedir. Buna ek olarak ocaktaki gazların ve soğutma işlemlerinin etkisi ile gözenekli bir yapıya sahip olmaktadır. Cürufun yan ürün olarak kullanıldığı ülkelerde, farklı işleme yöntemleri ile cürufun daha az gözenekli yapıya sahip olması

sağlanabilmektedir. Fakat malzemenin doğası gereği, yüksek birim hacim ağırlık (BHA) ile ilgili herhangi bir çözüm mümkün olamamaktadır.

Yukarıda bahsi geçen gözenekli yapının ortadan kaldırılması için tavlama değirmeninde su ile soğutma, kademeli soğutma, doğal soğutma ve cürufun nakli sırasında yavaş soğutma işlemleri uygulanabilmektedir. Tavlama değirmeninde, sıcak halde değirmene boşaltılan cüruf su püskürtülerek soğutulmakta ve granüle hale getirilmektedir. Bu yöntemin ilk yatırım maliyeti yüksek olup, tesis sahasında ek düzenlemeler gerektirmektedir. Ayrıca atık su miktarını arttırarak üreticiye ek maliyetler getirmektedir. Kademeli soğutma işlemi 4 adımda uygulanmaktadır. İlk aşamada, cüruf, sıg haznelerde soğutularak kalınlığı 100 mm'ye kadar azaltılmaktadır. İkinci aşamada, yaklaşık 20 dakika boyunca, cürufun sıcaklığı 500 °C'ye düşene kadar su püskürtülmektedir. Üçüncü aşamada, 4 dakika boyunca cürufun sıcaklığı 200 °C'ye ulaşana kadar su püskürtülmektedir. Son olarak su havuzuna daldırılmakta ve sıcaklığı 60 °C'ye düşürülmektedir. Fakat aşamalarından da görüldüğü üzere, kademeli soğutma, ek işlemler ve yeni düzenlemeler gerektiren maliyetli bir yöntemdir. Yavaş soğutma yönteminde, ocaktan boşaltılan cüruf, sıcaklığı 800 °C'nin altına inene kadar ocak altındaki cüruf boşaltma alanında bekletilmektedir. Maliyet gerektirmeyen bir yaklaşım olsa da yüksek kapasiteli tesislerde uygulanması olası değildir. Cürufun nakli sırasında soğutulması, ülkemizde entegre tesislerde üretim işlemlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Fakat EAO tesislerinde bu yöntemin uygulanması için gerekli taşıyıcılar bulunmamaktadır. Taşıma işleminin raylı sistem ile yapılması durumunda altyapı yatırımlarına ve çeşitli düzenlemelere ihtiyaç duyulacaktır. Taşıma işlemi için lastik tekerlekli araçların tercih edilmesi en uygun yaklaşımdır. Lastik tekerlekli taşıyıcı fiyatı ortalama 6 milyon TL'dir. Kötü olasılıklara karşın her tesiste ocak kapasitesine göre iki taşıyıcı bulunması gerekmektedir. Buna ek olarak özellikle yüksek kapasiteli tesislerde cürufun boşaltıldığı alanın genişliği taşıyıcının pota çapından küçük kalabilmekte, bu da tesis içi yeni düzenlemeler ve ek yatırımlar gerektirmektedir.

Belirtilen bu hususlar kapsamında üretilmekte olan EAO çelikhane cürufunun mevcut fiziksel durumu (yüksek BHA ve gözeneklilik), çalışmanın ilk kısıtı olarak tanımlanmıştır.

Teknik kısıtlar kapsamında ikinci olarak EAO çelikhane cürufunun kimyasal içeriğinde bulunan serbest CaO ve MgO ele alınmıştır. Cüruf içindeki serbest CaO ve MgO, malzemenin genleşmesine ve üretimlerin zarar görmesine neden olmaktadır.

Cürufun herhangi bir uygulamada kullanılmadan önce bu iki bileşiğin kabul edilebilir derecede hidrate olması gerekmektedir. Yaşlandırma olarak tanımlanan bu hidratasyon tepkimesi Bugular (Bölüm 4) ve Tartışma (Bölüm 5) bölümlerinde detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çelikhane cürufunun yan ürün olarak kullanıldığı ülkelerde farklı yaşlandırma yöntemleri uygulanmaktadır. Bunlardan ilki ve en çok kullanılanı, su püskürterek yaşlandırmadır. Temel olarak cüruf stok sahasında küçük parçalar ve yığınlar halinde istiflenmekte su püskürtülerek, atmosferin de etkisi ile yaşlandırılmaktadır. Büyük bir yatırım gerektirmeyen bu yöntemle, yaşlandırma, uygun koşullarda 6 ay içinde tamamlanabilmektedir. İkinci yöntem, cürufa oksijen üflenmesi ve silika kumu eklenmesidir. Bu yöntemde, eriyik halinde bulunan cüruf ayrı bir potaya dökülerek, eriyiğe silika kumu eklenmekte ve oksijen üflenmektedir. Böylece CaO ve SiO_2 oranları düşmektedir. Serbest kireç kimyasal olarak bağlanmakta ve serbest kireç oranı düşürülmektedir. Bu işlem, kimyasal olarak serbest MgO 'yu bağlamak için de kullanılabilir. Fakat bu yöntem ek bir potaya ihtiyaç duymakta ve hammaddelerin tüketimini arttırmaktadır. Üçüncü yöntem, cürufun kademeli soğutulmasıdır. İlk teknik kısıt dahilinde açıklanan bu yöntem ile serbest kireç içeriği % 2-4 olan ve içinde MgO bulunmayan cüruf elde edilebilmektedir. Fakat maliyetli bir yöntemdir. Son 10 yıllık süreçte, cürufun buharla yaşlandırılması için farklı çalışmalar yapılmaktadır. Buharın, sıcaklığı ve nüfuz etme yeteneği sayesinde yaşlandırma süreleri de kısaltılabilmektedir. Bu doğrultuda en çok kullanılan iki yöntem tesis stok sahasında buhar çadırları ile yaşlandırma ve basınçlı buhar tanklarında (otoklav) yaşlandırmadır. Basınçlı buhar tanklarında yaşlandırma süresi 72 saate kadar düşürülebilmektedir. Fakat yatırım maliyetleri yüksektir. Buhar çadırlarının yatırım maliyeti düşük olmakla birlikte uygun yaşlandırma ölçütlerinin belirlenebilmesi için araştırma geliştirme faaliyetleri gerektirmektedir.

Yukarıda açıklanan yaşlandırma yöntemleri ve bu yöntemlerin ülkemizde uygulanabilirliği doğrultusunda ikinci teknik kısıt; çelikhane cürufunun doğrudan ya da su püskürtme ile yaşlandırılmış halinin kullanımı olarak belirlenmiştir.

Teknik kısıtlar kapsamında üçüncü olarak EAO çelikhane cürufunun tane dağılımı ele alınmıştır. Çelikhane cürufunun içinde % 12'ye kadar metalik demir bulunabilmektedir. Metalik demirin cüruf içinden alınarak yeniden üretime katılabilmesi için kırma, eleme ve manyetik ayrıştırma işlemlerini gerçekleştirebilecek

ek bir tesise ihtiyaç duyulmaktadır. Ülkemizdeki çelik üreticilerinin % 30'unda söz konusu tesis mevcuttur. Metalik demirin cüruf içinden alınması, tesise ek hammadde sağlamanın yanı sıra, cürufun birim hacim ağırlığının ve bağlayıcı ile adezyonunun, metalik demirden olumsuz etkilenmesini de engelleyecektir. Bu yaklaşımla, cüruf içerisindeki metalik demirin, teknik imkanlar doğrultusunda, mümkün olan en düşük seviyede olması üçüncü teknik kısıt olarak tanımlanmıştır. Kırma işlemi, manyetik ayırtırmadan en çok verimin alınabilmesi için yapılmaktadır. Eleme işlemi de aynı şekilde verimin artırılabilmesi için iri tanelerin yeniden kırıcıya girmesini sağlamaktadır. Fakat çelikhane cürufu, ülkemizde yan ürün konumunda olmadığından, eleme işlemi, üreticinin ihtiyacı doğrultusunda yapılmaktadır. Kısaca cüruf, uygulamalarda ihtiyaç duyulan tane boyutlarında kırılmamaktadır. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında üretilen granüler ve bağlayıcı tabakalar, ideal tane dağılımları ile üretilmiştir. İdeal tane dağılımı, dördüncü teknik kısıt olarak ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında, ülkemizde en çok kullanılan üstyapı tabakalarında çelikhane cürufunun kullanımının araştırılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda bağlayıcı tabakalardan Binder, Bitümlü Temel Tip-A, Aşınma Tip-I ve TMA Tip-IA karışımlarının yapılmasına karar verilmiştir. Fakat granüler tabakalara uygulanacak Genleşme Potansiyeli Deneyi için en kötü senaryonun dikkate alınmasının uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Bu nedenle deneyde en düşük boşluk oranına sahip granüler tabakanın kullanılması hedeflenmiştir. Bu tabakanın bulunabilmesi için KTŞ 2013'te tanımlanan tüm üstyapı granüler tabakaları çalışma kapsamına alınmıştır. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, en kötü senaryonun dikkate alınabilmesi için tüm üstyapı granüler tabakalarının incelenmesi, beşinci teknik kısıt olarak ele alınmıştır.

1.4.3 Ekonomik kısıtlar

Bu bölümde, üretici ve uygulayıcı için ekonomik dengenin sağlanabilmesi amacıyla ekonomik kısıtlar tanımlanmıştır. Üretici açısından bakıldığında, çelikhane cürufunun mümkün olan en yüksek miktarının kullanılması, bertaraf maliyetlerini en aza indirgeyecektir. Bu nedenle cürufun, karışımlarda kaba agrega, ince agrega ya da filler yerine kullanılmasından ziyade karışımın tamamının cüruftan imal edilmesi ilk ekonomik kısıt olarak ele alınmıştır. Üretici açısından maliyetleri indirmeye yönelik diğer bir yaklaşım da Teknik Kısıtlar'da belirtilen metalik demirin yeniden üretimde kullanımıdır. Cüruf içindeki metalik demir üretici için bir hammadde konumunda

olmalıdır. Ayrıca yine Teknik Kısıtlar'da bahsedildiği üzere metalik demirin adezyon ve BHA üzerindeki olumsuz etkilerini indirmek gerekmektedir. Buna ek olarak geri kazanılmış metalik demir ile düşen BHA, ekonomik taşıma mesafesini arttırmakta ve uygulayıcıya da katkı sağlamaktadır. Bu nedenlerle teknik kısıtlarda da yer aldığı üzere, cüruf içerisindeki metalik demirin geri kazanılmış olması, bir başka deyişle en az metalik demir içeriğine sahip olması ikinci ekonomik kısıttır.

Uygulayıcı açısından dikkate alınan ekonomik sorunlar; çelikhane cürufunun gözenekli yapısı nedeniyle daha fazla bitümü absorbe etmesi ve yüksek birim hacim ağırlığı ile orantılı taşıma maliyetidir. Birim hacim ağırlığın azaltılmasına yönelik tek seçenek metalik demirin geri kazanılması olup, bu durumda dahi içeriğindeki metal oksitler nedeniyle birim hacim ağırlığı doğal agregadan yüksektir. Teknik Kısıtlar'da belirtildiği üzere, gözenekli yapının giderilmesine ilişkin uygulamaların kısa sürede hayata geçirilmesi mümkün gözükmemektedir. Bu doğrultuda, uygulayıcının maliyetlerinin azaltılması amacıyla, teknik ölçütler dahilinde en uygun tasarım yaklaşımının benimsenmesi ve belirlenen performans doğrultusunda kullanım durumunun optimize edilmesi üçüncü ekonomik kısıt olarak ele alınmıştır.

Çelikhane cürufunun granüler ve bağlayıcı tabakalarda kullanımıyla, doğal agregaya oranla daha iyi performans sonuçları verdiği literatürde belirtmekte ayrıca bitümün DOP haricinde bir katkı maddesi ile modifiye edilmesinin ek bir yarar sağlamadığı vurgulanmaktadır. Belirtilenler doğrultusunda ve bitümün modifiye edilmesinin uygulayıcıya ek mali yük getirmesi nedeniyle dördüncü ekonomik kısıt; kolay elde edilebilir katkısız bitümün karışımlarda bağlayıcı olarak kullanımıdır.

1.5 Hipotez

Bu tez çalışması, ülkemizde EAO çelikhane cürufunun tüm esnek üstyapı tabakalarında doğal agrega yerine kullanımına yönelik, çevresel, kimyasal ve fiziksel incelemeleri, karışım tasarımlarını, performans sonuçlarını bünyesinde barındıran ayrıca EAO çelikhane cürufunun karayolu inşaatında güvenle kullanılabilmesi için öneri ve şartları sunan ilk çalışma olma niteliğini taşımaktadır.

Ülkemizde üretim eğilimine zıt olarak ağırlıklı BOF çelikhane cürufunun yol inşaatında kullanımı araştırılmıştır. EAO çelikhane cürufunun değerlendirilmesine ilişkin çalışmalar ise son dönemlerde gerçekleştirilmiştir. Uluslararası çalışmalarda ise

dünya çelik üretiminin eğilimi doğrultusunda BOF çelikhane cürufları esas alınmıştır. EAO çelikhane cürufu ile yapılan çalışmalarda, çoğunlukla cürufun doğal agrega ile karıştırılması yaklaşımı esas alınmıştır.

Çalışma kapsamında, literatürde belirtilen karışım özelliklerinde gözlemlenen farklılıkların incelenmesine yönelik olarak teorik birim hacim ağırlıklar bütün karışımlar ve bağlayıcı oranları için ölçülmüştür. Bunlara ek olarak Literatür Taraması bölümünde (Bölüm 1.3) yapılan çalışmalardan da görüldüğü üzere, yüksek miktarda bağlayıcı gerektiren EAO çelikhane cürufunun bağlayıcı oranının azaltılmasına yönelik öneriler de çalışma kapsamında yer almaktadır.

Kapsam bölümünde (Bölüm 1.2) belirtildiği üzere; bu çalışma, Çolakoğlu Metalürji A.Ş.’den alınan EAO çelikhane cürufunun, karayolu esnek üstyapısında yapay agrega kullanım olanaklarını, “Kısıtlar” bölümünde tanımlanan hukuki, teknik ve ekonomik şartlar dahilinde ele almakta ve doğal agrega ile karşılaştırmaktadır. Kapsam ve kısıtlar dahilinde, literatür incelemesi doğrultusunda, sonuçlara ilişkin öngörüler aşağıda sunulmuştur.

Uluslararası literatürde durağan yan ürün konumunda olan çelikhane cürufu, ek bir kontaminasyon olmadığı durumda, genel olarak benzer özellikler göstermektedir. Ülkemizde katı atık sınıfında yer alan bu ürünün, mevcut mevzuat uyarınca tehlikesiz ya da durağan özellikler göstermesi, içeriğinde bulunan, insan sağlığı ve çevre açısından sakıncalı parametrelerin konsantrasyonlarının, temel uygulamalar ile azaltılabileceği ya da kullanım şartlarının netleştirilmesi ile etkilerinin indirgenebileceği beklenmektedir.

Çelikhane cürufunun ana bileşenleri kireç ve demir oksitlerdir. Demir oksitler, cürufun birim hacim ağırlığını arttırırken diğer bir açıdan malzemeye dayanım ve sertlik sağlamaktadır. Yüksek BHA, ekonomik taşıma mesafesini kısaltmaktadır. Fakat halihazırda yan ürün olarak ortaya çıkan cürufun, işlenme maliyetleri dikkate alındığında dahi maliyetinin doğal agregadan düşük olması beklenmektedir. Kireç ve bir diğer bileşen olan MgO’nun (periklas) serbest halde cüruf içinde bulunması, suyun etkisi ile genleşmeye neden olmaktadır. Temel yöntemlerle bu iki bileşiğin hidrate edilebilerek genleşmenin limitler içine alınabileceği, hidrate olan kirecin ise soyulma mukavemetini arttırıcı bir etki göstereceği değerlendirilmektedir. Bu sayede ekonomik kısıtlar çerçevesinde üretici için en düşük maliyet koşulu da yerine getirilmiş olacaktır.

Olumlu etkisinin olması beklenen bir bileşik de SiO_2 'dir. SiO_2 'nin karışımların dayanımını arttırması ve cilalanmayı azaltması, bir başka deyişle sürtünme katsayısı daha yüksek yüzeyler oluşturması beklenmektedir. Cürufun bileşenleri arasında yer alan metalik demirin geri kazanılması, üreticiye katkı sağlayacaktır. Düşen BHA ile ekonomik taşıma mesafesi arttırılabilecek ve metalik demirin bağlayıcı tabakalardaki olumsuz etkisi ortadan kalkacaktır.

Çelikhane cürufunun fiziksel özelliklerinin, yol inşaatında kullanılabilmesi açısından yeterli olduğu literatürde belirtilmektedir. Bu çalışmada kullanılan numunenin de yeterli özellikleri göstermesi, yetersiz kalması durumunda ise temel düzenlemeler ile iyileştirilebileceği ya da uygulamalarda herhangi bir olumsuzluğa neden olmadan, şartname limitlerinin, çelikhane cürufu için düzenlenebileceği düşünülmektedir.

Literatür taramasında, karışımlar içindeki çelikhane cürufu oranının artması ile dayanım ve performansın arttığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda, ekonomik kısıtlar dahilindeki “mümkün olan en yüksek kullanım oranı” da dikkate alınarak % 100 cüruf kullanımı ile doğal agrega karışımlarına nazaran daha iyi performans sonuçlarının elde edilmesi hedeflenmektedir. Granüler tabakalarda, sert ve pürüzlü yapısı nedeniyle çelikhane cürufu karışımlarının daha yüksek taşıma gücü oranları vermesi beklenmektedir. Bağlayıcı tabakalarda ise yüksek stabilite, kalıcı deformasyona karşı yüksek direnç ve yüksek rijitlik öngörüler arasında yer almaktadır.

BSK'larda karşılaşılabilecek beklenen en önemli ekonomik sorunlar; çelikhane cürufunun aşırı gözenekli yapısı nedeniyle fazla bitüm absorbe etmesi ve yüksek birim hacim ağırlığı doğrultusunda daha fazla bağlayıcı kullanımını gerektirmesidir. Yüksek birim hacim ağırlığın düşürülmesi konusunda metalik demirin geri kazanımı haricinde herhangi bir düzenleme yapılamamaktadır. Bu nedenle absorbe edilen bağlayıcı miktarının düşürülmesi hedeflenmiştir. İlk olarak optimum bağlayıcı oranının, karışımın maksimum teorik birim hacim ağırlığının (G_{mb} , D_t) ölçümü ile belirlenmesine karar verilmiştir. Karışım sıcaklığının düşürülmesi ile bağlayıcının daha viskoz davranması ve bazı boşlukların bitümle doldurulması yerine izole edilmesi öngörülmüştür. Bu sayede gerekli bağlayıcı oranının düşürülmesi amaçlanmıştır. Ekonomik kısıtlar doğrultusunda; ağırlıklı olarak kullanılan, kolay elde edilebilen bir tip bağlayıcı ile literatürde belirtildiği gibi istenilen sonuçlara ulaşılabileceği öngörülmüştür.

Açıklanan tüm bu öngörüler doğrultusunda ana varsayım; maliyeti düşük, kaliteli yapay agrega ile çevreci, ekonomik ve performans ömrü daha uzun yolların yapılabilceği ve ölkemize katma değeri sağlanabileceğidir.

2. MALZEME

Bu bölümde, tez kapsamında kullanılan EAO çelikhane cürufu, doğal agrega, bitüm ve selülozik elyaf malzemelerinin tanımları verilmiştir. Çalışma, EAO çelikhane cürufunun, doğal agrega yerine kullanımını incelediğinden, doğal agrega ve cürufun kimyasal ve fiziksel özellikler detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

2.1 EAO Çelikhane Cürufu

Çelikhane cürufları, farklı çelik üretim tesislerinden elde edilen yan ürün gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri, elde edildikleri tesisin ana ürün tipine, üretim yöntemine ve cürufun işlenme sürecine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Ülkemizde kullanılan üç farklı üretim tesisi tipinden (YF+BOF, EAO ve İO) farklı özellikte çelikhane cürufları elde edilmekle birlikte bu gruplar içerisinde üretim yapan her firmanın da cüruf özellikleri farklılık gösterebilmektedir.

Cüruf, metal ve alaşımların üretimi esnasında hedeflenen metal dışında kalan, safsızlık olarak adlandırılan ve istenmeyen metallerin oksidasyonu sonucu oluşturulan oksit ve silikatların meydana getirdiği karmaşık bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan üründür. Demir çelik fabrikaları yan ürünlerinden olan cüruf, çelik üretim işleminde, ergimiş haldeki demirin safsızlıklardan arındırılması aşamasında oluşmaktadır. Genel olarak koyu-açık gri renkte, gözenekli ve pürüzlü bir yapıya sahiptir (Şekil 2.1).

Çelikhane cürufunun kimyasal içeriği ilk olarak kullanılan hammaddeye bağlıdır. BOF'larda, sıvı ham demir birincil, hurda ikincil hammaddedir. EAO ve İO'larda ise temel hammadde hurdadır. Bu iki tip tesisten (entegre ve elektrik ocakları) farklı kimyasal özelliklerde cüruf elde edilmektedir. Elektrik ocakları ise kendi içlerinde elektrik arkı ve indüksiyon yöntemlerini kullanan EAO ve İO'lar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu tesislerde de elektriğin kullanım yöntemindeki farklılıklar nedeniyle kimyasal içerikler farklılık göstermektedir. Kimyasal bileşenler EAO tesisleri özelinde ele alındığında; hammaddeler aynı olduğu için büyük farklılıklar

gözlemlenmemektedir. Fakat üretim için kullanılan hurdanın saflık durumu, cüruf yapıcı olarak saf kireç ya da dolomitik kalker kullanımı, bileşenlerde küçük farklılıklar yaratmaktadır. Üçüncü olarak cürufun yaşlandırılması, CaO ve MgO bileşenlerinin kısa vadede Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 'ye, uzun vadede ise CaCO_3 ve MgCO_3 'e dönüşmesini sağlamaktadır. Son olarak, soğutma yöntemi, bileşenlerin oranlarını etkilememekte fakat kristal yapılarının farklılık göstermesine neden olmaktadır.



Şekil 2.1 : Çelikhane cürufu numuneleri.

Cürufun fiziksel özelliklerini etkileyen faktörler, kimyasal özelliklere benzer bir sıralama ile ele alınamamaktadır. Fakat kimyasal bileşenlerin fiziksel özellikleri büyük oranda etkilediği bilinmektedir. Cüruf içindeki metalik demir, birim hacim ağırlığı ve aynı zamanda dayanımı yükseltmektedir. Demir oksitler ve SiO_2 ise sertliği etkilemektedir. Kimyasal bileşenlerin yanı sıra, özellikle cürufun soğutulma yöntemi, geometrik yapıyı, sertliği, yüzey pürüzlülüğünü, su absorpsiyonunu ve kırılabilirliği büyük ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışmada kullanılan çelikhane cürufu Çolakoğlu Metalürji A. Ş.'den temin edilmiştir. Ocaktan döküm alanına 1.100-1.500 °C sıcaklıkta boşaltılan cüruf, su püskürtülerek bir miktar soğutulmuş ve loderler yardımıyla kamyonlara yüklenerek cüruf işleme tesisine nakledilmiştir. Burada su püskürtme işlemine devam edilmiş ve malzeme tamamen soğutulmuştur. Soğutulan malzeme kırma-eleme tesisinde kırılmış, içindeki metalik demir geri kazanılmış ve boyutlarına göre gruplara ayrılmıştır.

İşlenmesi tamamlanan cüruf, tesis içinde, açık alanda depolanmıştır. Deneylerde kullanılan çelikhane cürufu bu yığından alınmıştır.

2.1.1 XRD Analizi

Numunelerin bileşik analizi, XRD (X-Ray Diffraction) deney yöntemi ile yapılmıştır. XRD spektroskopisi isminden de anlaşılacağı üzere X-ışını kullanılarak yapılan analizi temel alır. XRD ile yapılan karakterizasyonda, numunenin türüne göre hangi minerallerden oluştuğu belirlenir. Çalışma prensibi; öğütülmüş numuneye X-ışını gönderilerek kırılma ve dağılma verilerinin toplanmasıdır. Kristal yapısına göre ışını, farklı açılarda ve şiddette kıran örnekler çok hassas biçimde ve çok kısa sürede izlenebilmektedir. Literatürden elde edilen veriler doğrultusunda, temel bileşenler olan; demir oksitler, SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO ve MnO araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.1’de sunulmuştur.

Çizelge 2.1 : Çelikhane cürufu XRD analiz sonuçları.

Numune Adı:	Toplam Fe	Toplam CaO	SiO_2	MgO	MnO	Al_2O_3
Cüruf	% 20,02	% 19,78	% 12,86	% 9,36	% 4,58	% 7,84

Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere, alınan numunenin temel bileşenleri; demir oksitler ve kalsiyum oksitlerdir. Demir oksitler hammaddenin oksitlenmesinden, kalsiyum oksitler ise cüruf yapıcı olarak kullanılan kireçten gelmektedir. Diğer metalik oksitler, hurda bünyesinde bulunan diğer metallerden kaynaklanmaktadır. Granüler tabakalar ve bitümlü sıcak karışımlarda olumsuz etkiler yaratabilen metalik demir ve serbest CaO oranları, kimyasal analiz ile belirlenmiş, Bulgular (Bölüm 4) bölümünde sunulmuştur. Bu bileşenlerin gözlemlenen etkileri ise Tartışma (Bölüm 5) bölümünde ele alınmıştır.

2.1.2 Fiziksel özelliklerin analizi

Tez çalışmasının kapsamı; çelikhane cürufunun, kararyolu esnek üstyapısında yapay agrega olarak kullanımı olduğundan ve hukuki kısıtlar uyarınca; çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri, KTŞ 2013’te tanımlanan deneyler ile belirlenmiştir.

Bu doğrultuda çelikhane cürufuna birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu, organik madde içeriği, Atterberg limitleri tayini, metilen mavisi, kil topağı ve dağılabilen tane oranı, yassılık indeksi tayini, hava tesirlerine karşı dayanıklılık, parçalanmaya karşı direnç, cilalanma mukavemeti ve soyulma mukavemeti deneyleri yapılmıştır.

Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu tayini: Temin edilen çelikhane cürufu, elenerek 25/19 mm - 19/12,5 mm - 12,5/9,5 mm - 9,5/4,75 mm - 4,75/2 mm - 2/0,425 mm - 0,425/0,180 mm - 0,180/0,075 mm ve filler gruplarına ayrılmıştır. Ülkemizde çelikhane cürufu henüz bir ürün konumunda olmadığından her boyut aralığının birim hacim ağırlığı (BHA) ve su absorpsiyonu (SA), ASTM D7370 standardı uyarınca vakum cihazı ve piknometre kabı ile ölçülmüştür. Karışım tasarımlarında oluşabilecek hataları en aza indirmek amacıyla; 4,75 mm'den küçük taneler, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 (KTS 2013) Aşınma Tip-I ideal tane dağılımına göre karıştırılmış ve fillerin su absorpsiyonu ve kuru hacim özgül ağırlık değerleri (G_{sb}), karışımdan elde edilen sonuçlardan çekilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.2'de sunulmuştur.

Çizelge 2.2 : Çelikhane cürufu BHA ve SA deney sonuçları.

Fraksiyon	Zahiri Özgül Ağırlık, G_{sa}	Hacim Özgül Ağırlık-Kuru, G_{sb}	Su Absorpsiyonu (%)
25-19	3,746	3,369	2,99
19-12,5	3,717	3,358	2,87
12,5-9,5	3,667	3,379	2,32
9,5-4,75	3,792	3,547	1,82
4,75-2	3,588	3,397	1,57
2-0,425	3,678	3,483	1,53
0,425-0,180	3,532	3,355	1,49
0,180-0,075	3,401	3,256	1,31
Filler	3,442	3,291	1,34

Organik madde içeriği tayini: Organik madde içeriği tayini AASHTO T-21 standardı uyarınca, NaOH çözeltisi ile çelikhane cürufuna uygulanmıştır. Numunede, organik madde içeriği beklenmemekle birlikte stok sahasında cürufun kontamine olup olmadığının belirlenmesi amacıyla deney yapılmıştır. Sonuç olarak, numunede organik madde içeriğine rastlanmamıştır.

Atterberg limitleri tayini: Kil, silt ve benzeri madde özellikleri gösterme eğiliminde olan kirleticilerin, numuneye karışma olasılığı göz önünde bulundurularak ASTM D4318 standardı uyarınca Atterberg limitleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, numunede plastik davranışa neden olacak bir malzemeye rastlanmamıştır. Numune non-plastik davranış sergilemektedir. Likit limiti mevcut değildir.

Metilen mavisi deneyi: Metilen mavisi boyası, kil minerallerinin negatif yüklü yüzeyleri üzerinde tutunan, geniş polar, organik bir moleküldür ve suda yüksek çözünürlüğe sahiptir [44]. Metilen mavisi boyası katyon değişimi ile kil mineralleri yüzeyinde tutunmaktadır. Her bir kil grubunun farklı katyon değiştirme kapasitesi

vardır. Kilin katyon değiştirme kapasitesi değeri aşıldığı zaman, fazla metilen mavisi yzeyde tutulamamaktadır. Yzeyde tutunabilen metilen mavisi boyasını tespiti ynelik olan bu deney, metilen mavisi boyasının 5 ml’lik zeltiller halinde standartta belirtilen miktarlarda hazırlanan deney numunesi ve su karışımı olan szpansiyona karıştırılarak ilave edilmesi ve her bir ilave edilişten sonra szgez kağına bir leke deneyi yaparak, serbest boyanın varlığının belirlenmesi metoduna gze yapılmaktadır [45].

Çelikhane cürufuna ASTM C837 uyarınca uygulanan metilen mavisi deneylerinde sonuç 0,25 bulunmuştur.

Kil topağı ve dağılabilen tane oranının tayini: Atterberg limitleri kapsamında; çelikhane cürufu içerisinde kil, silt vb. malzeme bulunmadığı belirlenmiştir. Bu deneyin yapılmasındaki asıl amaç; cüruf içerisinde bulunan serbest CaO ve MgO bileşenlerinin 24 saatlik koşullandırma sürecinde su ile etkileşimi sonucu dağılan tane oranının belirlenmesine yneliktir. Deney ASTM C142 standardı uyarınca yapılmış ve dağılabilen tane oranı % 0,20 olarak belirlenmiştir.

Yassılık indeksi tayini: Çelikhane cürufu numunesine yassılık indeksi deneyi BS 812 standardı kapsamında yapılmıştır. 6,35 mm’ye kadar her boyuttan alınan numunelerin ortalama yassı tane oranının % 8 olduğu belirlenmiştir.

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık tayini: Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi, çelikhane cürufuna Na₂SO₄ zeltisi ile ASTM C88-05 standardı uyarınca uygulanmıştır. 5 çevrim sonunda parçalanan tane oranı % 1,88 olarak belirlenmiştir.

Parçalanmaya karşı direnç tayini: Parçalanmaya karşı direnç tayini deneyi, ASTM C131 standardı uyarınca çelikhane cürufuna uygulanmıştır. Sonuç olarak, parçalanan tane oranı % 24,95 olarak belirlenmiştir.

Cilalanma mukavemeti tayini: Cilalanma mukavemeti deneyi ASTM D3319-11 standardı uyarınca çelikhane cürufuna uygulanmıştır. Sonuç olarak cilalanmış taş değeri (PSV) 58,2 olarak belirlenmiştir.

Soyulma mukavemeti tayini: KTş 2013 Kısım 403 Ek-A uyarınca çelikhane cürufuna DOP katkılı ve katkısız soyulma mukavemeti deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, katkı kullanılmayan deneyde soyulmaya direnç % 60-70, DOP katkı maddeli deneyde ise soyulmaya direnç % 90-100 olarak belirlenmiştir.

2.2 Doğal Agregat

Bu çalışmada karşılaştırma için kullanılan doğal agregat, Ömerli-Alyans taş ocağından temin edilen dolomitik kalkerdir. Ömerli-Alyans taş ocağı, İstanbul il sınırları içinde bulunmakta ve ağırlıklı olarak karayolu inşaatı için malzeme temin etmektedir.

2.2.1 XRD Analizi

Doğal agreganın bileşik analizi, XRD (X-Ray Diffraction) deney yöntemi ile yapılmıştır. İçeriğinde, karşılaştırma açısından çelikhane cürufunun temel bileşenleri olan; demir oksitler, SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO ve MnO araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.3'te sunulmuştur.

Çizelge 2.3 : XRD analiz sonuçları-1.

Numune Adı:	Toplam Fe	Toplam CaO	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃
Doğal Agregat	% 0,78	% 32,50	% 0,92	% 22,05	% 0,05	% 0,42

Çizelge 2.3'te görüldüğü üzere, araştırılan altı bileşik arasında en büyük orana sahip olanlar CaO ve MgO'dur. Metalik demir ve serbest CaO oranları, kimyasal analiz ile belirlenmiş, Bulgular (Bölüm 4) bölümünde sunulmuştur. Bileşenlerin çelikhane cürufu sonuçları ile karşılaştırılması Tartışma (Bölüm 5) bölümünde ele alınmıştır.

2.2.2 Fiziksel özelliklerin analizi

Doğal agreganın fiziksel özellikleri, KTŞ 2013'te tanımlanan deneyler ile belirlenmiştir. Bu doğrultuda doğal agregaya birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu, organik madde içeriği, Atterberg limitleri tayini, metilen mavisi, kil topağı ve dağılabilen tane oranı, yassılık indeksi tayini, hava tesirlerine karşı dayanıklılık, parçalanmaya karşı direnç, cilalanma mukavemeti ve soyulma mukavemeti deneyleri yapılmıştır.

Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu tayini: Temin edilen doğal agregat numunesi, elenerek 25/19 mm - 19/12,5 mm - 12,5/9,5 mm - 9,5/4,75 mm - 4,75/2 mm - 2/0,425 mm - 0,425/0,180 mm - 0,180/0,075 mm ve filler gruplarına ayrılmıştır. Her boyut aralığının BHA'sı ve SA'sı, ASTM D7370 standardı uyarınca ölçülmüştür. Karışım tasarımlarında oluşabilecek hataları en aza indirmek amacıyla; 4,75 mm'den küçük taneler, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 (KTŞ 2013) Aşınma Tip-I ideal tane dağılımına göre karıştırılmış ve fillerin su absorpsiyonu ve kuru hacim

özgül ağırlık değerleri (G_{sb}), karışımdan elde edilen sonuçlardan çekilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.4'te sunulmuştur.

Çizelge 2.4 : Doğal agregata BHA ve SA deney sonuçları.

Fraksiyon	Zahiri Özgöl Ağırlık, G_{sa}	Hacim Özgöl Ağırlık-Kuru, G_{sb}	Su Absorbsiyonu (%)
25-19	2,891	2,862	0,35
19-12,5	2,891	2,858	0,40
12,5-9,5	2,884	2,856	0,34
9,5-4,75	2,889	2,859	0,36
4,75-2	2,877	2,846	0,38
2-0,425	2,883	2,851	0,39
0,425-0,180	2,893	2,860	0,40
0,180-0,075	2,872	2,839	0,40
Filler	2,868	2,835	0,40

Organik madde içeriği tayini: Organik madde içeriği tayini AASHTO T-21 standardı uyarınca, NaOH çözeltisi ile doğal agregaya uygulanmıştır. Sonuç olarak, numunede organik madde içeriğine rastlanmamıştır.

Atterberg limitleri tayini: Kil, silt ve benzeri madde özellikleri gösterme eğiliminde olan kirleticilerin, numuneye karışma olasılığı göz önünde bulundurularak ASTM D4318 standardı uyarınca Atterberg limitleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, numunede plastik davranışa neden olacak bir malzemeye rastlanmamıştır. Numune non-plastik davranış sergilemektedir. Likit limiti mevcut değildir.

Metilen mavisi deneyi: Doğal agregaya ASTM C837 uyarınca uygulanan metilen mavisi deneylerinde sonuç 0,50 bulunmuştur.

Kil topağı ve dağılabilen tane oranının tayini: Atterberg limitleri kapsamında; doğal agregata içerisinde kil, silt vb. malzeme bulunmadığı belirlenmiştir. Bu deney, elde edilen sonuçların çelikhane cürufu ile karşılaştırılması için yapılmıştır. Deney ASTM C142 standardı uyarınca yapılmış ve dağılabilen tane oranı % 0,58 olarak belirlenmiştir.

Yassılık indeksi tayini: Doğal agregata numunesine yassılık indeksi deneyi BS 812 standardı kapsamında yapılmıştır. 6,35 mm'ye kadar her boyuttan alınan numunelerin ortalama yassı tane oranının % 17,68 olduğu belirlenmiştir.

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık tayini: Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi, doğal agregaya Na_2SO_4 çözeltisi ile ASTM C88-05 standardı uyarınca uygulanmıştır. 5 çevrim sonunda parçalanmış tane oranı % 1,50 olarak belirlenmiştir.

Parçalanmaya karşı direnç tayini: Parçalanmaya karşı direnç tayini deneyi, ASTM C131 standardı uyarınca doğal agregaya uygulanmıştır. Sonuç olarak, parçalanmış tane oranı % 18,56 olarak belirlenmiştir.

Cilalanma mukavemeti tayini: Cilalanma mukavemeti deneyi ASTM D3319-11 standardı uyarınca doğal agregaya uygulanmıştır. Sonuç olarak cilalanmış taş değeri (PSV) 53,4 olarak belirlenmiştir.

Soyulma mukavemeti tayini: KTŞ 2013 Kısım 403 Ek-A uyarınca doğal agregaya DOP katkılı ve katkısız soyulma mukavemeti deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, katkı kullanılmayan deneyde soyulmaya direnç % 60-70, DOP katkı maddeli deneyde ise soyulmaya direnç % 90-100 olarak belirlenmiştir.

2.3 Bağlayıcı

Ekonomik kısıtlar doğrultusunda, BSK tasarımlarının kolay ulaşılabilir ve ağırlıklı olarak kullanılan bağlayıcı ile yapılmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda 50/70 penetrasyonlu bitüm, BSK'lar için bağlayıcı olarak tercih edilmiştir. 50/70 penetrasyonlu bitüm Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş'den (TÜPRAS) temin edilmiştir. Yapılan deneylerde, bitümün birim hacim ağırlığı 1,037, penetrasyonu 63 dmm ve yumuşama noktası da 49,8 °C olarak belirlenmiştir.

2.4 Selülozik Elyaf

KTŞ 2013, 408.03.02 Bitümlü Malzemeler bölümü uyarınca TMA karışımındaki bitümün drenajını önlemek için TMA tabakasında, karışıma ağırlıkça % 0,3 ila 1 oranında elyaf ilave edilmesi gerekmektedir [19]. Bu doğrultuda TMA karışımlarında Fibrocel selülozik elyaf kullanımı tercih edilmiştir.

Söz konusu selülozik elyaf, 5-7 mm çapında, 10-12 mm uzunluğunda pelet formundadır. Birim hacim ağırlığı 0,38'dir ve % 10 doğal asfalt içermektedir.

3. YÖNTEM

Doktora tezi kapsamında, çelikhane cürufunun yapay agrega olarak karayolu inşaatında doğal agrega yerine kullanım olanaklarının belirlenebilmesi için ilk olarak literatür taraması yapılmıştır. Literatür taramasında doğrudan EAO çelikhane cürufunun kullanımına ilişkin 28, dolaylı 41 olmak üzere toplamda 69 kaynak taranmıştır.

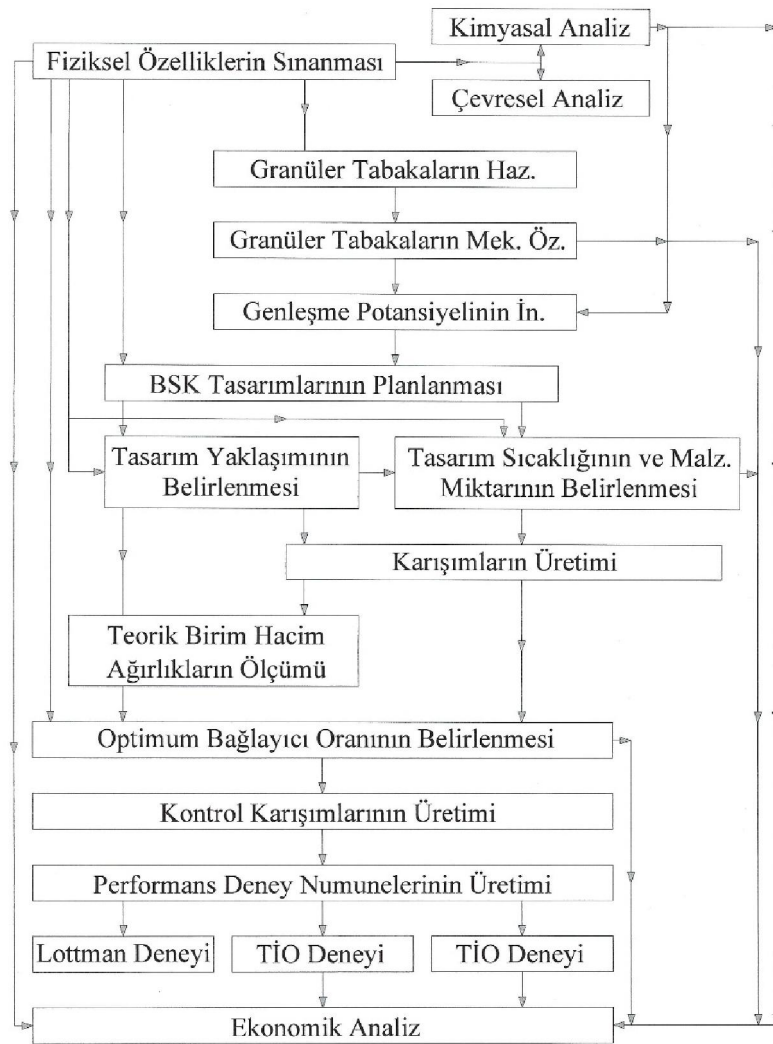
Taranan kaynaklar ve incelenen raporlar kapsamında, ana hipotez; maliyeti düşük, kaliteli yapay agrega ile çevreci, ekonomik ve performans ömrü daha uzun yolların yapılabileceği ve ülkemize katma değer sağlanabileceğidir.

Kapsam bölümünde (Bölüm 1.2) belirtildiği üzere, ülkemizdeki çelik üretiminin $\frac{3}{4}$ 'ü EAO tesislerinde yapıldığı için örneklemede EAO çelikhane cürufu esas alınmıştır. Bu doğrultuda, ülkemizin en büyük üçüncü EAO tesisi olan Çolakoğlu Metalürji A. Ş., cüruf işleme tesisinin de mevcudiyeti nedeniyle tercih edilmiştir.

Temin edilen çelikhane cürufunun karayolu inşaatında kullanımının araştırılması için yapılan laboratuvar çalışmalarında aşağıdaki adımlar esas alınmıştır. Aşağıda sunulan tüm aşamalar, detaylı bir şekilde bu bölümde açıklanmış ve akış şeması verilmiştir (Şekil 3.1).

- Fiziksel özelliklerin sınanması.
- Kimyasal analiz.
- Çevresel etki analizi.
- Granüler tabakaların hazırlanması.
- Granüler tabakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi.
- Genleşme potansiyelinin incelenmesi.
- BSK tasarımlarının planlanması.
- BSK tasarım yaklaşımının belirlenmesi.

- Tasarım sıcaklığının ve malzeme miktarının belirlenmesi.
- Karışımların üretimi.
- Teorik birim hacim ağırlıkların ölçülmesi ve modellenmesi.
- Optimum bağlayıcı oranlarının belirlenmesi.
- Kontrol briketlerinin üretimi.
- Performans deney numunelerinin üretimi.
- Sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncin tayini.
- Tekrarlı yük altında kalıcı deformasyonun tespiti.
- Yorulma ömrünün tayini.
- Ekonomik analiz.



Şekil 3.1 : Analizin akış şeması.

3.1 Fiziksel Özelliklerin Sınanması

Bu aşamada, KTŞ 2013 kapsamında tanımlanan, çelikhane cürufu ve doğal agrega numunelerine uygulanarak sonuçları, Malzeme (Bölüm 2) bölümünde sunulan verilerin, KTŞ 2013 limitleri ile karşılaştırması yapılmıştır.

KTŞ 2013'te, farklı esnek üstyapı tabakalarında kullanılacak agregalar için farklı limitler tanımlanmış olup, çelikhane cürufunun hangi tabakalarda kullanılacağına ilişkin genel bir yaklaşım sunmaktadır. KTŞ 2013'te verilen limitlerin sağlanamadığı hallerde, bu durumun olası etkileri ve sonuçların istenilen seviyeye getirilebilmesi için yapılabilecek işlemler Tartışma (Bölüm 5) bölümünde irdelenmiştir.

3.2 Kimyasal Analiz

Bu aşamada, Malzeme (Bölüm 2) bölümünde elde edilen XRD deney sonuçları karşılaştırmalı olarak doğal agrega ve çelikhane cürufu için yeniden sunulmuştur. XRD sonuçlarına ek olarak, karışımlarda olumsuz etkilere neden olabilen serbest CaO ve metalik demir içerikleri kimyasal analiz ile belirlenmiştir. Bu sonuçlar da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

3.3 Çevresel Etki Analizi

Çevresel etki değerlendirmesi, 26 Mart 2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiş olan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2'de verilen "Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri" uyarınca çelikhane cürufuna ve karşılaştırma için doğal agregaya yapılmıştır.

Bu yönetmelik uyarınca, florür, sülfat, toplam çözünmüş madde (180 °C), çözünmüş organik karbon, klorür, bakır, baryum, cıva, nikel, antimon, arsenik, kadmiyum, toplam krom, kurşun, selenyum, molibden, çinko, fenol indeksi, toplam organik karbon, yanma kaybı (550 °C), pH, BTEX, mineral yağ ve türevleri, PCB'ler, nem oranı ve bunlara ek olarak yönetmelik haricinde, vanadyum parametresi araştırılmıştır.

Florür, sülfat, toplam çözünmüş madde, çözünmüş organik karbon, klorür, bakır, baryum, cıva, nikel, antimon, arsenik, kadmiyum, toplam krom, kurşun, selenyum, molibden, çinko, fenol indeksi, nem oranı ve vanadyum parametreleri, EN 12457-4 standardı uyarınca eluat içinde araştırılmıştır. Eluat, yine aynı standart kapsamında, 10

mm'den küçük hale getirilmiş 1 kg numunenin 24 saat boyunca, 20 ± 2 °C sıcaklıkta, 10 lt su içerisinde sarsılması ile hazırlanmıştır.

Toplam organik karbon parametresi, EN 13137 standardı uyarınca araştırılmıştır. Bu standart doğrultusunda, kuru numunenin içindeki inorganik karbon, fosforik asit yardımı ile numuneden uzaklaştırılmaktadır. Kurutulduktan sonra bakiye numunenin ağırlığı kaydedilmekte ve numune 900-1.500 °C aralığında etüve alınarak organik karbon yakılmaktadır. İlk ağırlık ile son ağırlık arasındaki fark, numunedeki organik karbon miktarını vermektedir.

Yanma kaybı SM 2540 standardı uyarınca araştırılmıştır. Bu standart doğrultusunda numune ilk olarak 103-105 °C sıcaklıkta kurutulmaktadır. Numune desikatörde soğutularak tartımı yapılmakta ve 550 °C'lik etüve yerleştirilmektedir. Etüvde 15 dakika süreyle tutulmaktadır. Bu süre sonunda yeniden desikatöre alınarak soğutulmakta ve ikinci kez aynı işlem tekrar edilmektedir. Her iki yakma işleminden sonra kayıplar arasındaki fark % 4'ten küçük ise yanma kaybı kayıt altına alınarak deney sonlandırılmaktadır.

pH parametresi, ISO 10390 standardı uyarınca araştırılmıştır. 5 ml numune, 4 katı hacme sahip distile su ile 20 ± 2 °C sıcaklıkta, 60 ± 10 dakika boyunca karıştırılmış ve pH ölçer ile karıştırma işlemi devam ederken değer okunmuştur.

BTEX parametresi adından da anlaşılacağı üzere benzen, toluen, etil benzen, ksilen varlığının araştırılmasına yönelik bir deneydir. EPA 5021 standardı uyarınca kromatografik analiz ile üst katman analizörü vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

Mineral yağ ve türevleri kromatografik analiz ile EN 14039 standardı uyarınca araştırılmıştır.

PCB'ler açık adı ile poliklorlu bifeniller de kromatografik analiz ile EN 15308 standardı uyarınca araştırılmıştır.

3.4 Granüler Tabakaların Hazırlanması

Teknik kısıtlarda belirtildiği üzere, çelikhane cürufunun ülkemizde henüz bir ürün konumunda olmaması ve tane dağılımının çelik tesisinin ihtiyaçlarına yönelik düzenlenmesi nedeniyle incelenen tüm granüler tabakalar için KTŞ 2013'te belirtilmiş olan alt ve üst tane dağılımı limitlerinin ortalaması dikkate alınmıştır.

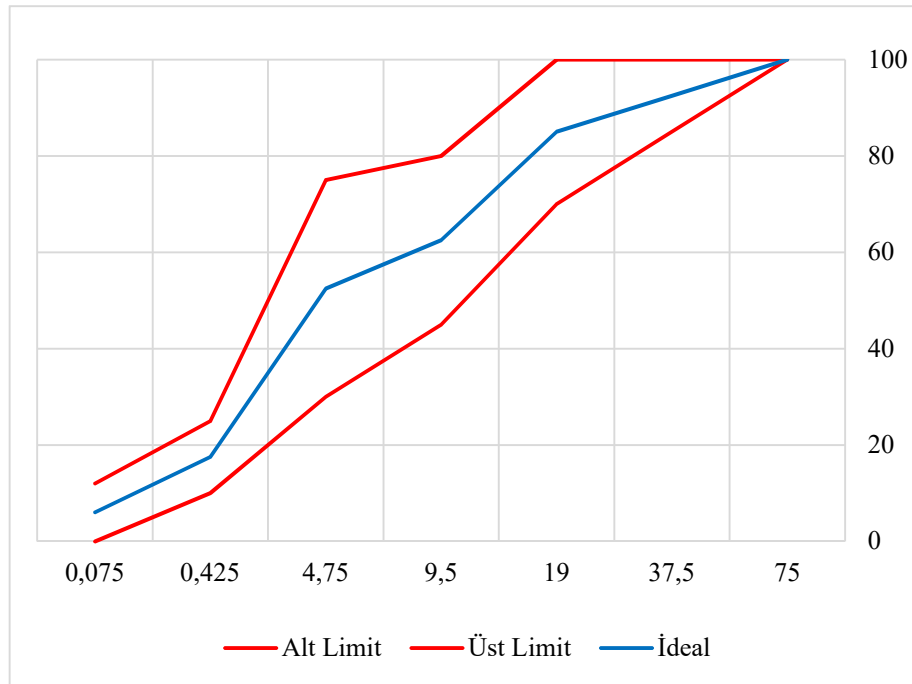
3.4.1 Alttemel

KTŞ 2013'te alttemel tabakaları Tip-A ve Tip-B olmak üzere iki farklı tane dağılımında tanımlanmıştır [19]. Doğal agrega ve çelikhane cürufunda alt ve üst limit ortalamaları alınarak ideal eğriye göre tasarım yapılmıştır. KTŞ 2013 Alttemel Tip-A ve Alttemel Tip-B granülometri limitleri, ideal eğri değerleri ile birlikte Çizelge 3.1'de sunulmuştur.

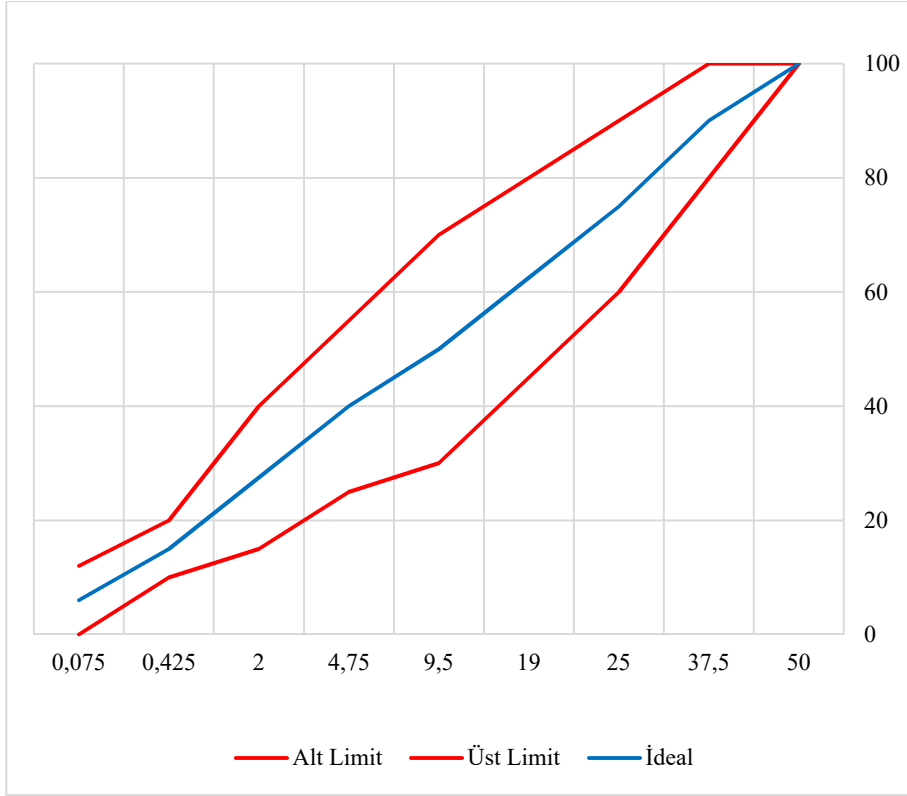
Çizelge 3.1 : KTŞ 2013 alttemel malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.

Elek Açıklığı		Tip-A		Tip-B	
mm	inç	Geçen (%)	İdeal (%)	Geçen (%)	İdeal (%)
75	3	100	100,0	-	-
50	2	-	-	100	100,0
37,5	1 1/2	85 - 100	92,5	80 - 100	90,0
25	1	-	-	60 - 90	75,0
19	3/4	70 - 100	85,0	45 - 80	62,5
9,5	3/8	45 - 80	62,5	30 - 70	50,0
4,75	No.4	30 - 75	52,5	25 - 55	40,0
2	No.10	-	-	15 - 40	27,5
0,425	No.40	10 - 25	17,5	10 - 20	15,0
0,075	No.200	0 - 12	6,0	0 - 12	6,0

Çizelge 3.1'de verilen tane dağılımlarına ilişkin grafikler, Alttemel Tip-A için Şekil 3.2'de, Alttemel Tip-B için Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.2 : Alttemel Tip-A tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.



Şekil 3.3 : Alttemel Tip-B tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.

3.4.2 Temel

Temel tabakaları KTŞ 2013'te kendi içinde üç farklı alt gruba ayrılmaktadır. Bunlar; granüler temel (GT), plent-miks temel (PMT) ve çimento bağlayıcılı granüler temel (ÇBGT)'dir [19].

Son dönemde ÇBGT'nin kullanımı fazlasıyla azaldığından ve Kapsam bölümünde (Bölüm 1.2) belirtildiği üzere alkali yapıda olan çelikhane cürufunun alkali-silika reaksiyonu şüphesi nedeniyle bu çalışmada GT ve PMT ele alınmıştır.

3.4.2.1 Granüler temel

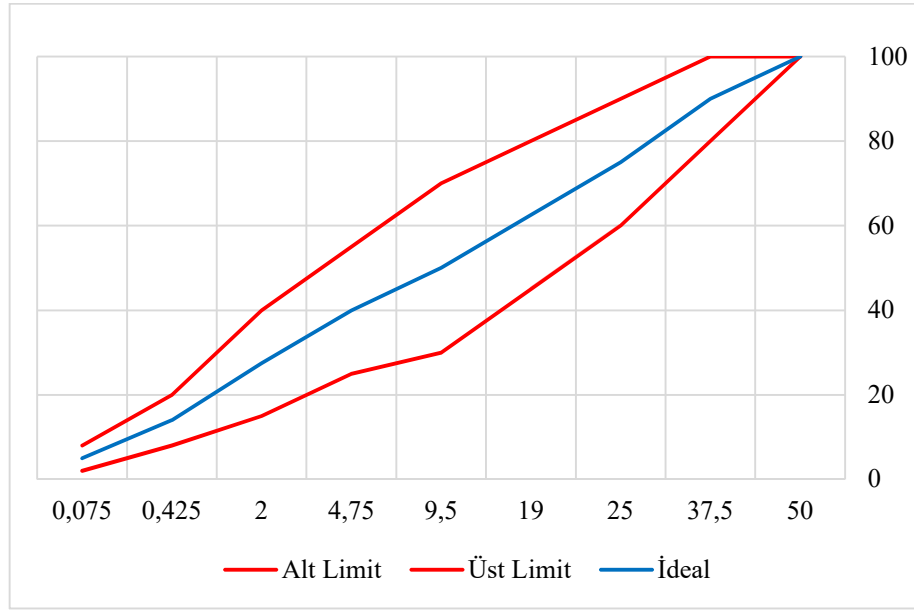
KTŞ 2013'te GT tabakaları Tip-A, Tip-B ve Tip-C olmak üzere üç farklı tane dağılımında tanımlanmıştır. Doğal agrega ve çelikhane cürufunda, alt ve üst limit ortalamaları alınarak ideal eğriye göre tasarım yapılmıştır.

KTŞ 2013 Temel Tip-A, Temel Tip-B ve Temel Tip-C granülometri limitleri, ideal eğri değerleri ile birlikte Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

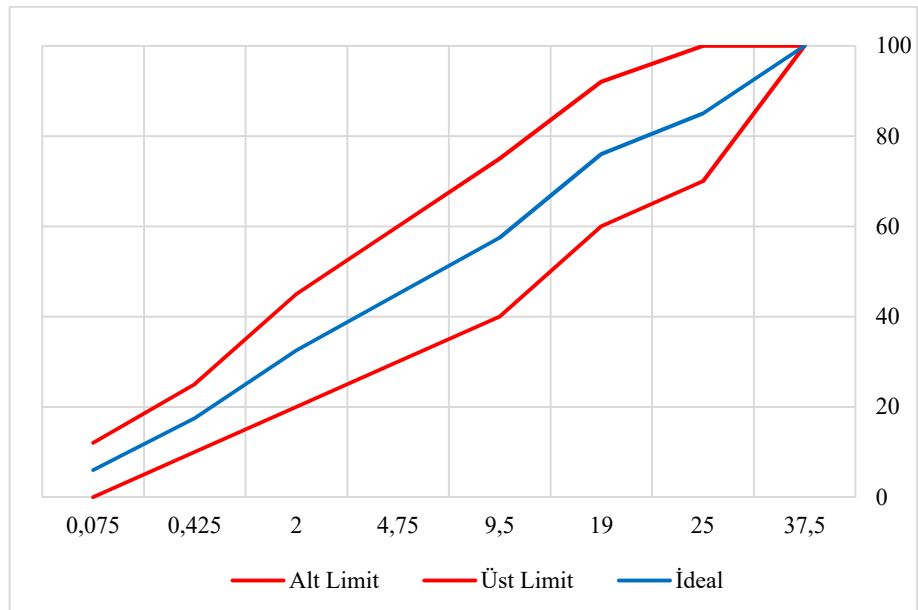
Çizelge 3.2'de verilen tane dağılımlarına ilişkin grafikler, Temel Tip-A için Şekil 3.4'te, Temel Tip-B için Şekil 3.5'te ve Temel Tip-C için Şekil 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.2 : KTŞ 2013 temel malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.

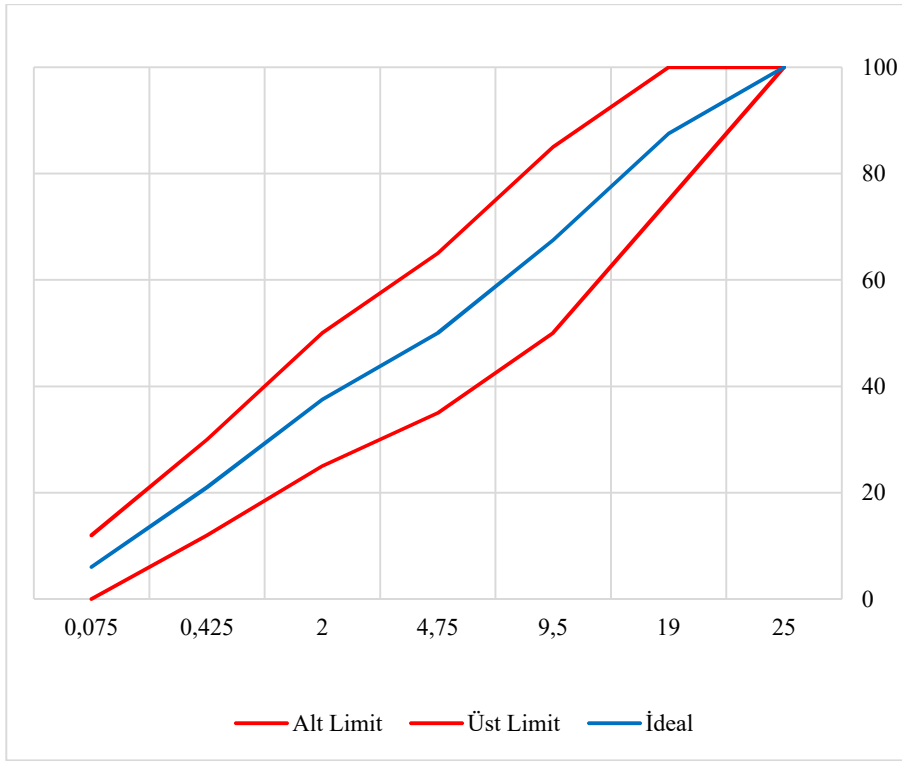
Elek Açıklığı mm	inç	Tip-A		Tip-B		Tip-C	
		Geçen (%)	İdeal (%)	Geçen (%)	İdeal (%)	Geçen (%)	İdeal (%)
50	2	100	100,0	-	-	-	-
37,5	1 1/2	80 - 100	90,0	100	100,0	-	-
25	1	60 - 90	75,0	70 - 100	85,0	100	100,0
19	3/4	45 - 80	62,5	60 - 92	76,0	75 - 100	87,5
9,5	3/8	30 - 70	50,0	40 - 75	57,5	50 - 85	67,5
4,75	No.4	25 - 55	40,0	30 - 60	45,0	35 - 65	50,0
2	No.10	15 - 40	27,5	20 - 45	32,5	25 - 50	37,5
0,425	No.40	8 - 20	14,0	10 - 25	17,5	12 - 30	21,0
0,075	No.200	2 - 8	5,0	0 - 12	6,0	0 - 12	6,0



Şekil 3.4 : Temel Tip-A tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.



Şekil 3.5 : Temel Tip-B tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.



Şekil 3.6 : Temel Tip-C tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.

3.4.2.2 Plent miks temel

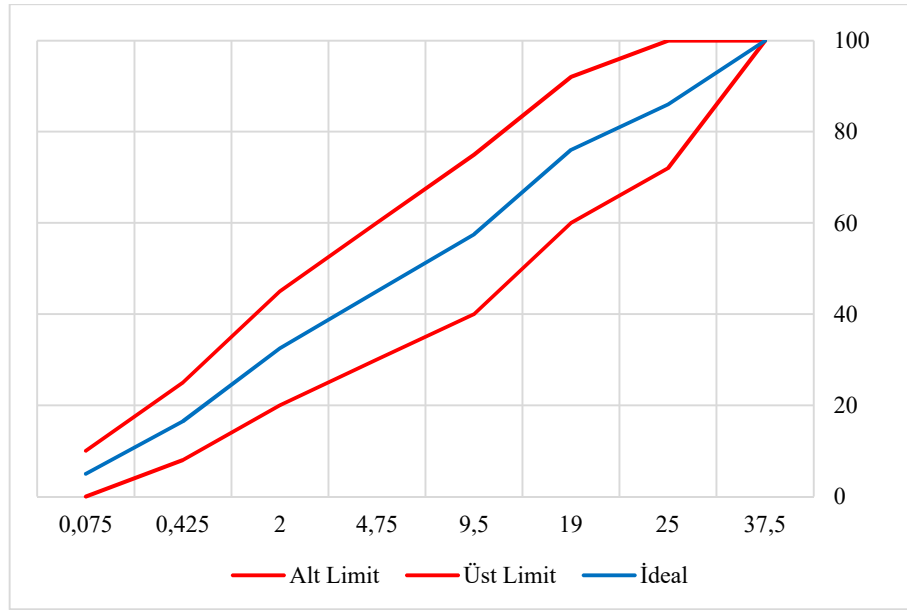
KTŞ 2013'te PMT tabakaları, PMT Tip-I ve PMT Tip-II olmak üzere iki farklı tane dağılımında tanımlanmıştır [19]. Doğal agrega ve çelikhane cürufunda alt ve üst limit ortalamaları alınarak ideal eğriye göre tasarım yapılmıştır.

KTŞ 2013 PMT Tip-I ve PMT Tip-II granülometri limitleri, ideal eğri değerleri ile birlikte Çizelge 3.3'te sunulmuştur.

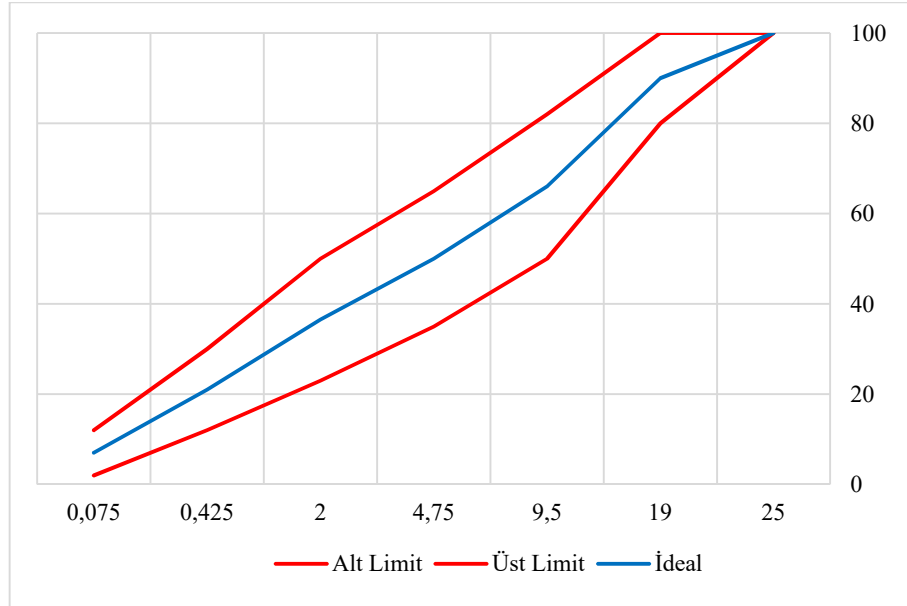
Çizelge 3.3 : KTŞ 2013 PMT malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.

Elekt Açıklığı mm	inç	Tip-I		Tip-II	
		Geçen (%)	İdeal (%)	Geçen (%)	İdeal (%)
37,5	1 1/2	100	100,0	-	-
25	1	72 - 100	86,0	100	100,0
19	3/4	60 - 92	76,0	80 - 100	90,0
9,5	3/8	40 - 75	57,5	50 - 82	66,0
4,75	No.4	30 - 60	45,0	35 - 65	50,0
2	No.10	20 - 45	32,5	23 - 50	36,5
0,425	No.40	8 - 25	16,5	12 - 30	21,0
0,075	No.200	0 - 10	5,0	2 - 12	7,0

Çizelge 3.3'te verilen tane dağılımlarına ilişkin grafikler, PMT Tip-I için Şekil 3.7'de ve PMT Tip-II için Şekil 3.8'de sunulmuştur.



Şekil 3.7 : PMT Tip-I tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.



Şekil 3.8 : PMT Tip-II tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.

3.5 Granüler Tabakaların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Dolgu ve granüler temel uygulamalarında kullanılan malzemenin, yeterli kesme kuvveti, sıkışma, geçirgenlik vb. mühendislik özelliklerini sağlayabilmesi veya bu özelliklerin iyileştirilebilmesi için sıkıştırılması gerekmektedir. Sıkıştırma işlemi ile malzeme daha sıkı bir yerleşime sahip olmakta ve birim hacim ağırlığı artmaktadır. Tanelerin birbirine yaklaşması ve sıkışması, uygulanan statik ve dinamik yükler altında tanelerin birbirine göre hareket edebilmeleri ile mümkün olmaktadır. Tanelerin birbirine göre hareket edebilme yetenekleri ise uygulanan yüklerin yanı sıra zemin

içindeki su miktarına bağlıdır. Fakat zemin içindeki su miktarının düşük olması durumunda taneler arası sürtünme yüksek olacak ve sıkışma sağlanamayacaktır. Tam tersi durumda ise taneler arası sürtünme düşük olacak, uygulanan yükler ile boşluk suyunda basınç artışları meydana gelecek ve sıkıştırma mümkün olmayacaktır. Bu iki durum uyarınca, en iyi sıkışma ancak zemin içinde yeterli miktarda su bulunması halinde gerçekleşebilecektir [46].

İdeal tane dağılımında hazırlanan çelikhane cürufu ve doğal agrega granüler tabaka karışımlarının optimum su muhtevaları, ASTM D1557 standardı doğrultusunda modifiye Proctor deneyi ile belirlenmiştir. Söz konusu standart uyarınca 19 mm'den büyük malzeme, tane oranları doğrultusunda 19 mm altındaki malzemeye dağıtılmıştır [47].

Optimum su muhtevaları belirlenen karışımlar, ASTM D1883 standardı doğrultusunda sıkıştırılmış, su muhtevası kontrolü için numune alınmış, 4 gün boyunca oda sıcaklığında su içerisinde bekletilmiş ve şişme durumları gözlemlenmiştir. Su banyosundan çıkartılan karışımların, California Taşıma Oranı (CBR) cihazında 1,27 mm/dk yükleme hızında deplasman-kuvvet verileri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler ile grafik çizilmiş, grafiğe atanan eğilim çizgisi ile gerekli düzeltmeler yapılmıştır.

Doğal agrega ve çelikhane cürufuna uygulanan Proctor ve CBR deney sonuçları Bulgular bölümünde (Bölüm 4) sunulmuş, karşılaştırmalı değerlendirme ise Tartışma bölümünde (Bölüm 5) ele alınmıştır.

3.6 Genleşme Potansiyelinin İncelenmesi

Çelikhane cürufu, içeriğindeki serbest CaO ve MgO nedeniyle genleşme potansiyeli olan bir malzemedir. Cürufun, karayolu inşaatında kullanılabilmesi için bu iki bileşiğin hidratasyonu sağlanarak, genleşme oranının kabul edilebilir seviyelere çekilmesi gerekmektedir. Ayrıca yeterli hidratasyonun sağlandığını ispatlayan deney yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Dünya çapında bu konuya ilişkin iki temel yöntem öne çıkmaktadır. Bunlardan ilki, sıcak su ile cürufun genleşmesini desteklemektedir. Bu kapsamda tanımlanmış ASTM D4792 ve JIS A 5011 standartları mevcuttur. İkincisi ise su buharı ile genleşmenin desteklendiği, EN 1744-1 standardında tanımlanmış olan yöntemdir.

Bu çalışma kapsamında ASTM D4792 standardı, çelikhane cürufunun genleşmesinin ölçülmesi için esas alınmıştır. Bu standart uyarınca; optimum su muhtevası ile karıştırılan granüler tabaka malzemesi, CBR kalıbında, tercihen 2,49 kg'lık tokmak ile sıkıştırılarak, deneye esas numune oluşturulmaktadır. Kalıbın üzerine 4,54 kg'lık sürşarj yükü yerleştirilerek, kalıbın altından ve üstünden su girişine izin verecek şekilde su havuzuna yerleştirilmektedir. Numune, kalıp ile su havuzuna yerleştirildikten sonra kalıp üzerine deplasman saati yerleştirilerek, su sıcaklığı 70 ± 3 °C'ye ayarlanmaktadır. Su sıcaklığı 70 °C'ye ulaştıktan 30 dakika sonra (ölçüm cihazlarının da genleşmesi tamamlandıktan sonra) deplasman saati 0'a ayarlanarak deneye başlanmaktadır. Deplasman ölçümleri günlük olarak kaydedilmektedir. Standart deney süresi 7 gündür. Fakat genleşme eğiliminin devam etmesi durumunda deney süresinin, eğilim sona erene kadar uzatılması tavsiye edilmektedir [48].

Granüler Tabakaların Hazırlanması bölümünde (Bölüm 3.4) belirtildiği üzere, KTŞ 2013'te tanımlanmış olan tüm granüler üstyapı tabakaları tez kapsamında ele alınmıştır. En kötü senaryonun göz önüne alınabilmesi amacıyla ASTM D4792 deneyi için bu yedi karışımdan minimum boşluk – maksimum kuru birim hacim ağırlık değerine sahip granüler tabaka tercih edilmiştir. Genleşme limiti olarak, ASTM D4792 standardında çelikhane cürufunun kullanımı için önerilen % 0,5 değeri kabul edilmiştir. Deney sonuçları Bulgular bölümünde (Bölüm 4), sonuca ilişkin değerlendirmeler Tartışma bölümünde (Bölüm 5) ele alınmıştır.

3.7 BSK Tasarımlarının Planlanması

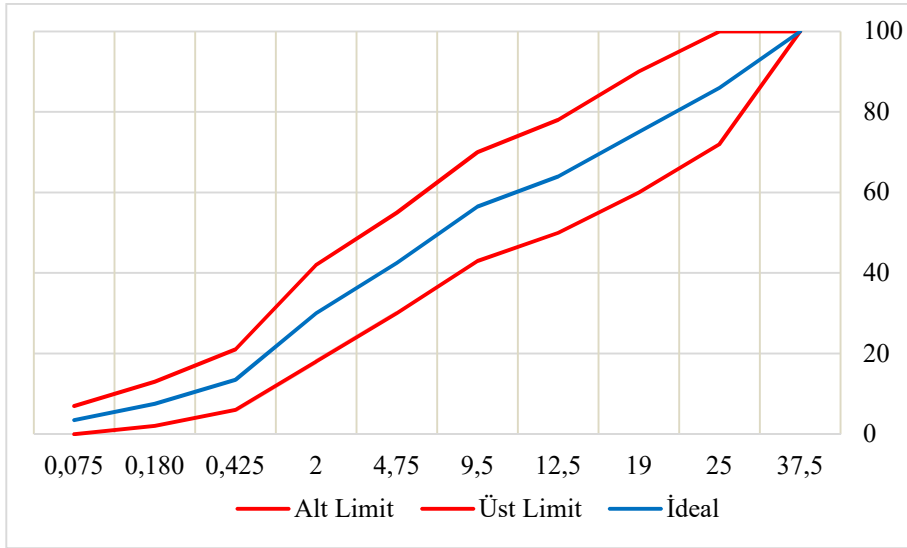
Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilecek briketlerde, ülkemizde uygulaması en çok tercih edilen tabakalar dikkate alınmıştır. KTŞ 2013'te binder tek tip tane dağılımında, bitümlü temel (BT) Tip-A ve Tip-B olmak üzere iki tip tane dağılımında, aşınma tabakası, Tip-I, II ve III olmak üzere üç tip tane dağılımında, TMA tabakası ise Tip-IA, IB ve II olmak üzere 3 tip tane dağılımında tanımlanmıştır. KTŞ 2013'te binder tabakasında tek tip tane dağılımı mevcuttur.

Ülkemizde BT Tip-A, Aşınma Tip-I ve TMA Tip-IA ağırlıklı olarak tercih edildiği için binder de dahil olmak üzere bu dört farklı tabakanın tasarımlarının yapılmasına karar verilmiştir. KTŞ 2013 BT Tip-A granülometri limitleri, ideal eğri değerleri ile birlikte Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4 : KTŞ 2013 BT Tip-A malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.

Elek Açıklığı		Tip-A	
mm	inç	Geçen (%)	İdeal (%)
37,5	1 1/2	100	100,0
25	1	72 - 100	86,0
19	3/4	60 - 90	75,0
12,5	1/2	50 - 78	64,0
9,5	3/8	43 - 70	56,5
4,75	No.4	30 - 55	42,5
2	No.10	18 - 42	30,0
0,425	No.40	6 - 21	13,5
0,180	No.80	2 - 13	7,5
0,075	No.200	0 - 7	3,5

Çizelge 3.4’te verilen tane dağılımlarına ilişkin grafik, Şekil 3.9’da sunulmuştur.



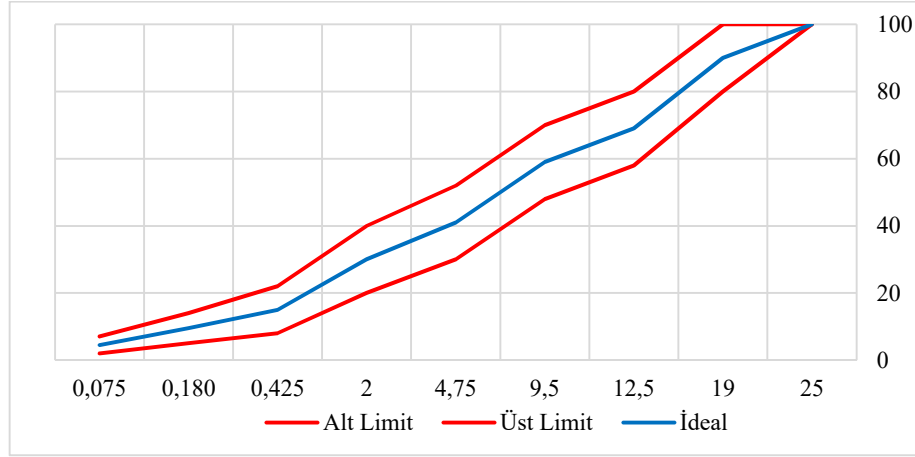
Şekil 3.9 : BT Tip-A tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.

KTŞ 2013 Binder tabakası granülometri limitleri, ideal eğri değerleri ile birlikte Çizelge 3.5’te sunulmuştur.

Çizelge 3.5 : KTŞ 2013 Binder malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.

Elek Açıklığı		Binder	
mm	inç	Geçen (%)	İdeal (%)
25	1	100	100,0
19	3/4	80 - 100	90,0
12,5	1/2	58 - 80	69,0
9,5	3/8	48 - 70	59,0
4,75	No.4	30 - 52	41,0
2	No.10	20 - 40	30,0
0,425	No.40	8 - 22	15,0
0,180	No.80	5 - 14	9,5
0,075	No.200	2 - 7	4,5

Çizelge 3.5'te verilen tane dağılımlarına ilişkin grafik, Şekil 3.10'da sunulmuştur.



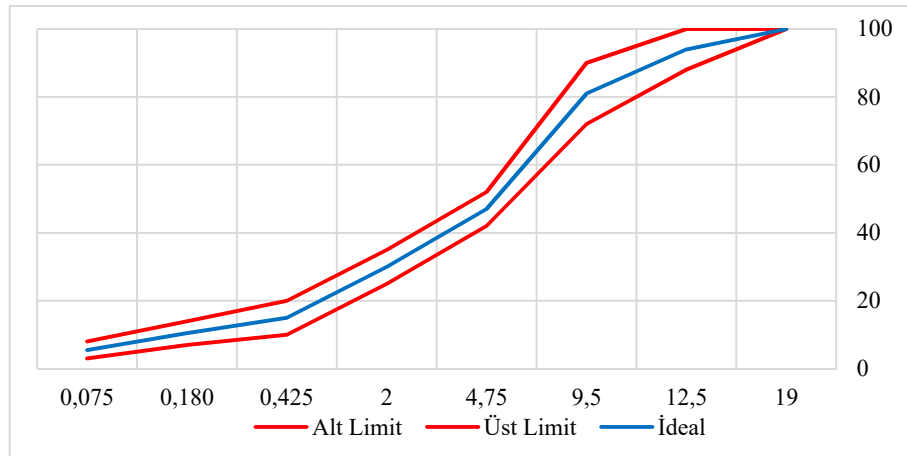
Şekil 3.10 : Binder tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.

KTŞ 2013 Aşınma Tip-I granülometri limitleri, ideal eğri değerleri ile birlikte Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.6 : KTŞ 2013 Aşınma Tip-I malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.

Elek Açıklığı		Tip-I	
mm	inç	Geçen (%)	İdeal (%)
19	3/4	100	100,0
12,5	1/2	88 - 100	94,0
9,5	3/8	72 - 90	81,0
4,75	No.4	42 - 52	47,0
2	No.10	25 - 35	30,0
0,425	No.40	10 - 20	15,0
0,180	No.80	7 - 14	10,5
0,075	No.200	3 - 8	5,5

Çizelge 3.6'da verilen tane dağılımlarına ilişkin grafik, Şekil 3.11'de sunulmuştur.



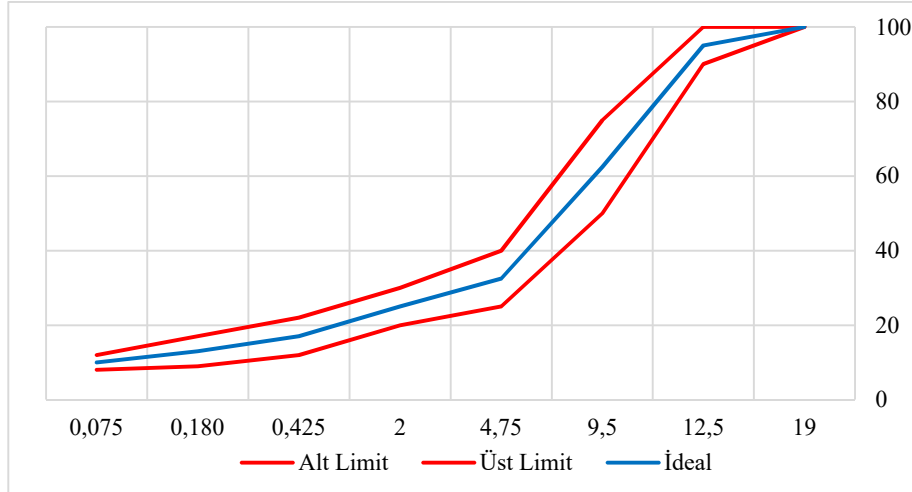
Şekil 3.11 : Aşınma Tip-I tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.

KTŞ 2013 TMA Tip-IA granülometri limitleri, ideal eğri değerleri ile birlikte Çizelge 3.7’de sunulmuştur.

Çizelge 3.7 : KTŞ 2013 Aşınma Tip-I malzemesi tane dağılımı limitleri ve ideal eğri değerleri.

Elek Açıklığı		Tip-IA	
mm	inç	Geçen (%)	İdeal (%)
19	3/4	100	100,0
12,5	1/2	90 - 100	95,0
9,5	3/8	50 - 75	62,5
4,75	No.4	25 - 40	32,5
2	No.10	20 - 30	25,0
0,425	No.40	12 - 22	17,0
0,180	No.80	9 - 17	13,0
0,075	No.200	8 - 12	10,0

Çizelge 3.7’de verilen tane dağılımlarına ilişkin grafik, Şekil 3.12’de sunulmuştur.



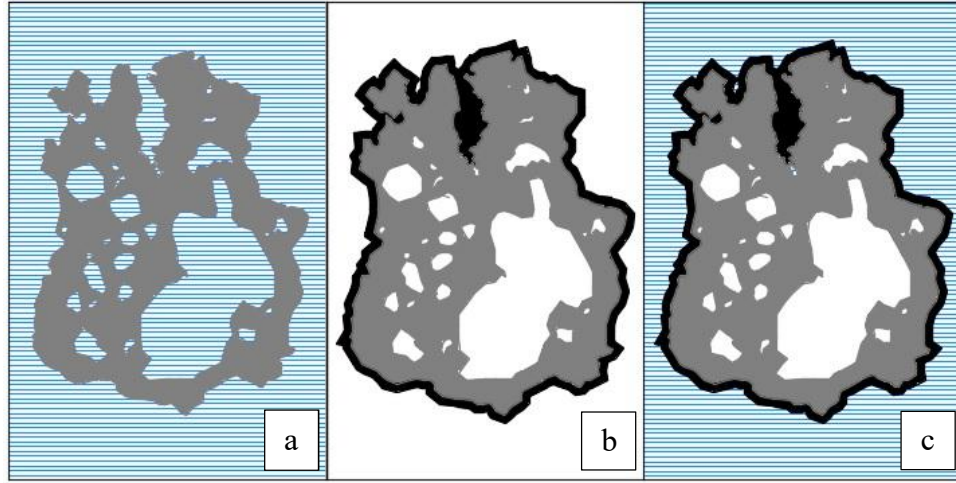
Şekil 3.12 : TMA Tip-IA tane dağılımı limitleri ve ideal eğri.

Tasarımlarda, Aşınma, Binder ve BT tabakalarında bağlayıcı oranlarının % 4 ila % 6 arasında alınmasına, % 0,5 fark ile her bağlayıcı oranından 3 briket üretilmesine karar verilmiştir. TMA tabakasında ise bağlayıcı oranı % 5,5 ile başlatılmış, % 7,5’te sonlandırılmıştır. TMA karışımlarına karışımın % 0,3’ü oranında selülozik elyaf katılmıştır.

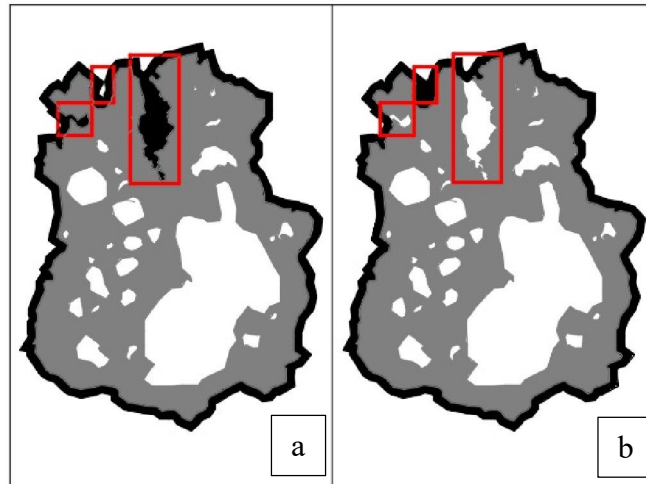
3.8 BSK Tasarım Yaklaşımının Belirlenmesi

Çelikhane cürufu, doğal agreganın tersine, çok gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle bağlayıcı absorpsiyonunun doğal agregadan fazla olacağı açıktır. Yüzeyde gözlemlenen bu gözenekli yapıya ek olarak, tanelerin içinde de soğutma sırasında

hapsolan gazların oluşturduğu boşlukların bulunduğu belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu deneyi ASTM D7370 standardı uyarınca vakum kabı ile 30 mmHg iç basınçta yapıldığından, bu boşlukların da su absorpsiyonu değerlerini etkilediği Malzeme bölümü (Bölüm 2), Çizelge 2.2’de görülmektedir. Fakat sudan daha viskoz bir sıvı olan bitümün cüruf içindeki boşluklara ulaşamaması nedeniyle tasarımda bu boşlukların dikkate alınmaması gerekmektedir (Şekil 3.13a, 3.13b, 3.13c). Ayrıca bu koşuldan yola çıkılarak, cürufun kullanıldığı karışımlardaki optimum bağlayıcı oranının bir miktar daha azaltılabilmesi için karışım sıcaklığının düşürülmesi hedeflenmiştir. Bu sayede bağlayıcı, daha viskoz bir halde olacak ve gözenekler içine dolmak yerine girişi kapatarak bu boşlukları izole edecektir (Şekil 3.14a, 3.14b).



Şekil 3.13 : Cürufun suyu absorbe etmiş hali (a), yüzeyin bitüm ile kaplanmış hali (b), izole edilen iç boşluklar (c).



Şekil 3.14 : Yüksek karışım sıcaklığındaki boşluk durumu (a), düşük karışım sıcaklığındaki boşluk durumu (b).

BSK tasarımlarında, dünyada ve ülkemizde genel olarak Marshall MS-2 tasarım yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemle göre, ilk olarak üretilen briketlerin pratik birim hacim ağırlıkları (D_p , G_{mb}) ölçülmekte, teorik birim hacim ağırlıkları (D_t , G_{mm}) ise hesaplanarak bulunmaktadır. Kontrol için ise optimum bağlayıcı oranında üretilen karışımın G_{mm} (D_t) değeri ölçülmektedir. Geleneksel yaklaşımda G_{mm} (D_t) değeri Formül 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$G_{mm}(D_t) = \frac{100 + W_a}{\frac{100}{G_{eff}} + \frac{W_a}{G_b}} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de; W_a ağırlıkça bitüm oranını, G_{eff} agrega efektif özgül ağırlığını ve G_b bitümün özgül ağırlığını belirtmektedir. Agregada efektif özgül ağırlığı, agrega karışımının efektif özgül ağırlığını belirtmekte olup, Formül 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$G_{eff} = \frac{G_{sa} + G_{sb}}{2} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de görüldüğü üzere efektif özgül ağırlık, agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı (G_{sa}) ile hacim özgül ağırlığının (G_{sb}) ortalamasıdır. Zahiri birim hacim ağırlık (G_{sa}), adından da anlaşılacağı üzere görünen birim hacim ağırlıktır ve eğer mevcutsa sadece geçirimsiz boşlukları kapsamaktadır. Hacim özgül ağırlık (G_{sb}) ise geçirgen olan ve olmayan tüm boşlukları içeren birim hacim ağırlıktır. Bu açıklamalar doğrultusunda, formül 3.2’den yola çıkarak, G_{eff} değerinin bağlayıcının ulaşabileceği boşlukların % 50’sini G_{mm} (D_t) hesabına dâhil ettiği anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle geçirgen boşlukların yarısının bitüm ile dolduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşım, aşırı özellikler göstermeyen her türlü doğal agrega için kabul edilmektedir. Fakat bu tez çalışması kapsamında kullanılan çelikhane cürufu, aşırı gözenekli bir yapıya sahiptir. Buna ek olarak, karışım sıcaklığının düşük tutulması bitümün absorbe edilme oranlarını değiştirecektir.

Bu bağlamda özellikle çelikhane cürufu ile üretilen karışımlarda, cürufun gözenekli yapısının ve karıştırma sıcaklığının düşürülmesinin tasarım hesaplarına yansıtılması gerekmektedir. Yapılan araştırmalarda; NCHRP’nin (National Cooperative Highway Research Program) 673 numaralı raporu dikkat çekmektedir. Bu rapor uyarınca, su absorpsiyonu yüksek, gözenekli agregalar ile yapılacak BSK tasarımlarında, G_{mm} değerlerinin hesaplanması yerine ölçülmesi tavsiye edilmektedir. Ayrıca yine bu rapor

kapsamında, gözenekli agregalarda karışım özgül ağırlığının hacim oranlarına göre hesaplanması önerilmektedir [49].

Yapılan araştırmalar ve değerlendirmeler ışığında, karışım tasarımlarında Marshall MS-2 yönteminin kullanılmasına, G_{mm} değerlerinin, her bağlayıcı oranında üretilen karışımın G_{mm} ölçümleri ile oluşturulan doğrusal modelden alınmasına karar verilmiştir. G_{mm} 'nin hesaplandığı, agrega karışım özgül ağırlık değerlerinin ağırlıkça ele alındığı yaklaşım “geleneksel”, G_{mm} 'nin modellendiği, agrega karışım özgül ağırlık değerlerinin hacimce hesaplandığı yaklaşım “deneysel” olarak isimlendirilmiştir. Tasarımlar, karşılaştırma amacıyla, doğal agrega ve çelikhane cürufu için her iki yaklaşıma göre yapılmıştır. Kontrol briketleri ve performans deneyleri numune üretimlerinde deneysel yaklaşımdan elde edilen sonuçlar esas alınmıştır.

3.9 Tasarım Sıcaklığının ve Malzeme Miktarının Belirlenmesi

Cürufun gözenekli yapısı, doğal agregaya oranla daha fazla bitümün absorbe edilmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle ekonomik açıdan en uygun tasarım yaklaşımının benimsenmesi ve belirlenen performans doğrultusunda kullanım alanlarının optimize edilmesi, ekonomik kısıtlar içinde tanımlanmıştır. Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) öngörüldüğü ve BSK Tasarım Yaklaşımının Belirlenmesi bölümünde (Bölüm 3.7) belirtildiği üzere tasarımlarda “Geleneksel” yöntem yerine “Deneysel” yöntemin kullanılması, gerçek boşluk oranlarını ortaya çıkaracak ve bağlayıcıdan bir miktar tasarruf edilmesini sağlayacaktır. Bunun yanı sıra karışım sıcaklığının azaltılması da maliyetin düşmesine katkı sağlayacaktır.

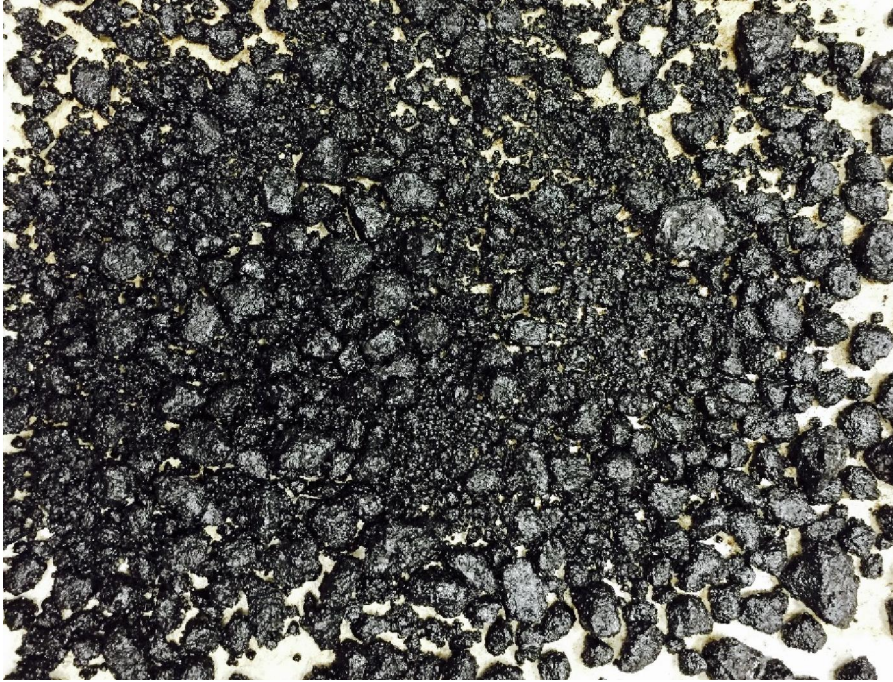
Karışım sıcaklığının belirlenmesine yönelik çalışmaların yapılabilmesi, optimum briket yüksekliği için gerekli cüruf miktarının belirlenmesine bağlıdır. Doğal agrega ile üretilen briketlerde, her iki yüze 75 darbe vurulan aşınma, binder ve bitümlü temel (BT) karışımlarında 1.200 gr agrega kullanılmaktadır. Darbe sayısının 50 + 50 olduğu TMA karışımlarında ise agrega miktarı 100 gr azaltılmaktadır.

Çelikhane cürufunun birim hacim ağırlığı doğal agregadan yüksektir (Çizelge 2.2 ve 2.4) ayrıca sıkışma davranışları net bilinmemektedir. Bu nedenlerden Aşınma tabakası deneme için seçilmiş, briketlerin üretileceği bağlayıcı oranlarının ortalaması olan % 5 oranındaki bitüm, 1.250 gr, 1.300 gr, 1.350 gr, 1.400 gr, 1.450 gr çelikhane cürufu ile

155 – 160 °C aralığında karıştırılmış ve 5 adet briket üretilmiştir. Üretilen briketlerin yükseklikleri ölçülmüş, ideal yükseklik olan 63,5 mm'ye en yakın değerlerin 1.400 gr cüruf kullanılan brikette elde edildiği belirlenmiştir. Dolayısıyla Aşınma, Binder ve BT karışımlarında 1.400 gr, TMA karışımında ise 1.300 gr cüruf kullanılmasına karar verilmiştir.

Karışım sıcaklığının belirlenebilmesi için araştırma iki aşamalı olarak yapılmış ve % 5 bağlayıcı oranına sahip aşınma karışımları esas alınmıştır. İlk aşama, tüm yüzeylerin bağlayıcı ile kaplanması durumunun gözlemlenmesi, ikinci aşama, boşluk oranları arasındaki farkın incelenmesidir.

Geleneksel karışımlardaki 155 – 160 °C karışım sıcaklığı üst limit olarak kabul edilmiş, ılık asfalt karışım sıcaklığı üst limiti olan 135 – 140 °C aralığı, alt limit olarak kabul edilmiştir. Bu doğrultuda 135 – 140 °C, 140 – 145 °C, 145 – 150 °C, 150 – 155 °C ve 155 – 160 °C sıcaklıkta 1.400 gr cüruf % 5 bitüm ile karıştırılmıştır. Üretilen karışım sıkıştırılmadan temiz bir tepsiye yayılmış ve tanelerin tüm yüzeylerinin kaplanma durumu gözlemlenmiştir. 135 – 140 °C ve 140 – 145 °C aralığında yapılan karışımlarda tanelerin tamamen bitüm ile kaplanmadığı, tanelerin tüm yüzeylerinin kaplandığı en düşük sıcaklık aralığının ise 145 – 150 °C olduğu gözlemlenmiştir. 145 – 150 °C sıcaklık aralığında karıştırılan numune Şekil 3.15'te sunulmuştur.



Şekil 3.15 : Bütün tane yüzeylerinin kaplandığı Aşınma karışımı (145 – 150 °C).

İkinci aşamada, tane yüzeylerinin tamamen kaplanmadığı 135 – 140 ve 140 – 145 °C sıcaklık aralığında karıştırılan numuneler elenmiş, kalan 3 numunenin G_{mm} (D_t) ölçümleri ASTM D2041 standardı uyarınca yapılmıştır. 145 – 150, 150 – 155 ve 155 – 160 °C sıcaklık aralıklarında 3 karışım daha üretilmiş ve ortalama 10 °C sıcaklık kaybı ile tokmaklanarak briket haline getirilmiştir. Üretilen briketlerin G_{mb} (D_p) değerleri ölçülmüş ve boşluk oranları (V_A , V_h) saptanmıştır. Boşluk oranları sırası ile % 4,10, % 4,39 ve % 4,24 olarak belirlenmiştir. KTŞ 2013'te Aşınma tabakası için boşluk limitleri % 3 – 5 olarak tanımlanmıştır. İdeal boşluk kabul edilen % 4'e yaklaşılması için en az bağlayıcıya ihtiyaç duyan karışım, ekonomik kısıtlar bakımından en uygun karışım olarak kabul edilmiştir.

Bu iki yaklaşım doğrultusunda karışım sıcaklığı 145 – 150 °C olarak kabul edilmiştir. Düşük karışım sıcaklığı, ısıtma maliyetlerini azaltacak fakat mikserdeki elektrik sarfiyatını arttıracaktır.

3.10 Karışımların Üretimi

Aşınma tabakası karışımları, 1.400 gr cüruf ve % 4,0 – 4,5 – 5,0 – 5,5 ve 6,0 oranlarında bitüm kullanılarak, her bağlayıcı oranından 3 adet briket için, 3 adet de G_{mm} ölçümü için 145 – 150 °C sıcaklıkta karıştırılarak hazırlanmıştır. Briket üretimlerinde ortalama 10 °C sıcaklık farkı ile her yüze 75 darbe vurulmuştur.

TMA tabakası karışımları, 1.300 gr cüruf ve % 5,5 – 6,0 – 6,5 – 7,0 ve 7,5 oranlarında bitüm, karışım ağırlığının % 0,3'ü kadar selülozik elyaf kullanılarak, her bağlayıcı oranından 3 adet briket için, 3 adet de G_{mm} ölçümü için 145 – 150 °C sıcaklıkta karıştırılarak hazırlanmıştır. Briket üretimlerinde ortalama 10 °C sıcaklık farkı ile her yüze 50 darbe vurulmuştur.

Binder tabakası karışımları, 1.400 gr cüruf ve % 4,0 – 4,5 – 5,0 – 5,5 ve 6,0 oranlarında bitüm kullanılarak, her bağlayıcı oranından 3 adet briket için, 2 adet de G_{mm} ölçümü için 145 – 150 °C sıcaklıkta karıştırılarak hazırlanmıştır. Briket üretimlerinde ortalama 10 °C sıcaklık farkı ile her yüze 75 darbe vurulmuştur.

BT tabakası karışımları, 1.400 gr cüruf ve % 4,0 – 4,5 – 5,0 – 5,5 ve 6,0 oranlarında bitüm kullanılarak, her bağlayıcı oranından 3 adet briket için, 2 adet de G_{mm} ölçümü için 145 – 150 °C sıcaklıkta karıştırılarak hazırlanmıştır. Briket üretimlerinde ortalama 10 °C sıcaklık farkı ile her yüze 75 darbe vurulmuştur.

3.11 Teorik Birim Hacim Ağırlıkların Ölçülmesi ve Modellenmesi

G_{mm} değeri ölçümü, ASTM D2041 standardı uyarınca yapılmıştır. G_{mm} ölçümü için hazırlanan numuneler el yordamıyla karıştırılarak soğutulmuş ve mümkün olduğunca taneli hale getirilmiştir. Karışım, su ile vakum kabına aktarılmış, hava basıncı 30 mmHg'ye düşürülmüş ve 15 ± 2 dk sarsma tablası ile BSK-su süspansiyonundan hava çekilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 : Numunenin G_{mm} ölçümü için hazırlanması [50].

Boş vakum kabı, su ile dolu vakum kabı ve süspansiyon ile dolu vakum kabı ağırlıklarından G_{mm} değerleri elde edilmiştir [51]. Her bir tasarım için, farklı bağlayıcı oranlarından elde edilen G_{mm} değerleri kullanılarak doğrusal bir model oluşturulmuş ve tasarımın ilerleyen safhalarında bu modelden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

3.12 Optimum Bağlayıcı Oranlarının Belirlenmesi

Optimum bağlayıcı oranları, BSK Tasarım Yaklaşımının Belirlenmesi bölümünde (Bölüm 3.8) tanımlanan geleneksel ve deneysel yaklaşımların her ikisiyle de belirlenmiştir.

Çelikhane cürufu, içi boşluklu ve yüzeyi gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu yapısı nedeniyle bitüm absorpsiyonu doğal agregaya nazaran fazladır. Fakat bağlayıcının iç

boşluklara girmesi mümkün olamamaktadır. Su absorpsiyonu deney sonuçlarına net bir etki yapan bu boşluklar, geleneksel yöntemde tasarım hesabına dâhil olmakta ve bağlayıcı oranını arttırmaktadır. Fakat deneysel yöntemde, özellikle agreganın tüm yüzeyinin bağlayıcı ile kaplanabildiği bağlayıcı oranlarında, iç boşluklar bitüm ile izole edilmiş olacaktır. Bu sayede G_{mm} ölçümü esnasında bu boşluklara artık su da nüfuz edemeyecek ve bitümün zaten ulaşamadığı iç boşluklar tasarımda devre dışı kalacaktır. Bu sayede karışıma gereğinden fazla bağlayıcı girişinin önüne geçilmiş olacaktır.

Üretilen karışımlar için KTŞ 2013'te tanımlanan boşluk aralığının ortalaması hedeflenmiştir. Tasarım Sıcaklığının ve Malzeme Miktarının Belirlenmesi bölümünde (Bölüm 3.9) ideal boşluk oranı olarak tanımlanan bu değerler, Aşınma için % 4,0, Binder ve BT için % 5,0, TMA için % 3,0'tür.

3.13 Kontrol Briketlerinin Üretimi

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum bağlayıcı oranları belirlenen tüm karışımlardan, Karışımların Üretimi bölümünde (Bölüm 3.10) tanımlanan şartlar uyarınca 6'şar kontrol briketi üretilmiştir.

Üretilen briketlerin G_{mb} , boşluk (V_A , V_h), agregalar arası boşluk (V_{MA} , V_{ma}), bağlayıcı ile dolu boşluk (V_{FA} , V_f) değerleri kontrol edilmiş ve optimum bağlayıcı oranının belirlendiği model verileri ile kıyaslanmıştır.

Kıyaslamada, model verileri ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçların tutarlılığı netleştirilmiş, performans deneyleri için karışım üretimleri yapılmıştır. Kontrol briketleri görsel kontrol için kesilmiştir. Kesit fotoğrafları, Tartışma bölümünde (Bölüm 5) sunulmuştur.

3.14 Performans Deney Numunelerinin Üretimi

Tartışma bölümünde (Bölüm 5) detaylı bir şekilde verildiği üzere; doğal agrega ile üretilen karışımların deneysel ve geleneksel tasarım sonuçları arasında bir fark olmadığı fakat çelikhane cürufu karışımlarında iki yaklaşımın farklı sonuçlar sunduğu belirlenmiştir. Çelikhane cürufu için her iki yaklaşım ile elde edilen optimum bağlayıcı oranlarının karşılaştırılması sonucunda deneysel yaklaşımın esas alınmasına karar verilmiştir.

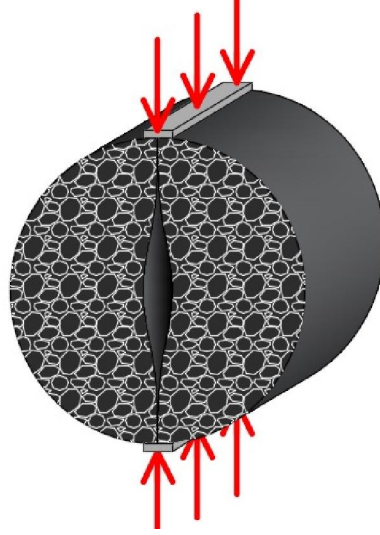
Deneyisel yöntem doğrultusunda çelikhane cürufu ve doğal agrega ile tasarlanan Aşınma ve TMA karışımlarının optimum bağlayıcı oranları doğrultusunda performans deney numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin sayısına ve boyutlarına ilişkin genel bilgiler Lottman Deneyi, Tekerlek İzinde Oturma Deneyi, Yorulma Ömrünün Analizi bölümlerinde (Bölüm 3.15, 3.16 ve 3.17) sunulmuştur. Üretilen numunelerin özellikleri ise deney sonuçları ile birlikte Bulgular bölümünde (Bölüm 4) verilmiştir.

3.15 Lottman Deneyi

Bünyesinde bulunan serbest MgO ve CaO nedeniyle çelikhane cürufu suya hassasiyeti olan bir malzemedir. Dolayısıyla cürufun BSK'larda kullanım olanaklarının belirlenebilmesi için sudan kaynaklanan bozulmalara karşı direncinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla doğal agrega ve çelikhane cürufu briketlerine Lottman deneyinin yapılması öngörülmüştür. Lottman deneyi, KTŞ 2013'te "Sıkıştırılmış Bitümlü Karışımların Sudan Kaynaklanan Bozulmalara Karşı Direnci" olarak tanımlanmaktadır.

ASTM D4867 standardı uyarınca yapılan bu deney için her tasarımdan, ideal boşluk oranına sahip 6 Marshall briketi hazırlanmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için en yakın boşluk oranına sahip briketler, ikişer ikişer sınıflandırılmıştır. Her ikili gruptan 1 briket koşullandırma için seçilmiştir. Bu sayede koşullandırma için 3 briketlik yeni bir grup oluşturulmuştur. Koşullandırılacak olan briketler, boşluklarının % 60 ila 80'i su ile dolacak şekilde vakumlu bir kapta doygun hale getirilmiştir. Yeterli doygunluğa sahip numuneler ince bir poşet içine yerleştirilip, poşet içine 3 ml distile su eklenmiştir. Poşetlerin ağzı kapatılarak numuneler, -18 °C sıcaklıkta soğutucuya yerleştirilmiştir. Soğutucuda 15 saat bekletildikten sonra çıkartılarak 24 saat beklemek üzere 60 °C'lik sıcak su banyosuna yerleştirilmiştir. 24 saat sonunda çıkartılan numuneler, 25 °C'lik su banyosuna yerleştirilerek burada 1 saat bekletilmiştir. Bu süreç sonunda briketlerin dolaylı çekme mukavemeti (İÇM) ölçümleri yapılmıştır. Koşullandırılmamış numuneler ise üretimden en az 24 saat sonra 25 °C'lik su banyosunda 20 dakika bekletilmiş ve deneye tabi tutulmuştur [52].

Dolaylı çekme deneyinde, briketler, Marshall cihazına benzer bir şekilde dikey olarak yüklenmektedir. Fakat yükleme, tüm briket kesitinde bir çekme alanı oluşturacak şekilde, ince bir hatta yapılmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Dolaylı çekme mukavemeti deneyi yük eksen ve çekme alanı.

ASTM D4867 standardına göre aynı gruptaki koşullu ve koşulsuz numunelerin mukavemet oranları en az % 80 olmalıdır. KTŞ 2013'te de mukavemet oranı için limit en az % 80 olarak verilmiştir [19].

Yukarıda detayları verilen deney kapsamında; doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma, TMA, binder ve BT tasarımlarından toplam 48 briket üretilmiştir.

3.16 Tekerlek İzinde Oturma Deneyi

Tasarımları yapılan karışımlardan aşınma ve TMA tabakasına, tekrarlı yükler altında deformasyon olasılıklarının belirlenebilmesi için tekerlek izinde oturma (TİO) deneyleri uygulanmıştır. TİO deneyi için KTŞ 2013'te Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) yöntemine göre 30.000 tekrarlı yük için limitler tanımlanmıştır [19]. Fakat karışımların sıkıştırılması, deplasmanların ölçülmesi vb. durumlarda meydana gelebilecek hataların önüne geçmek için bu çalışmada Hamburg yöntemi tercih edilmiştir.

Hamburg test cihazı, ağır trafikli yollarda, kaplamaların tekerlek izinde oturma dirençlerini ve trafik etkisi ile meydana gelen soyulmayı belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. TİO deneyi için 260 mm genişliğinde, 320 mm boyunda ve 50 mm kalınlığında, 4160 cm³ hacminde iki dikdörtgen prizma numune kullanılmaktadır. Deney, 25 – 70 °C sıcaklık aralığında su altında ya da havada gerçekleştirilebilmektedir. Cihazda bulunan tekerlek 47 mm genişliktedir ve 705 N'luk bir kuvvet uygulamaktadır. Tekerleğin hareket hızı ortalama 0,33 m/sn'dir [53]. Şekil 3.18'de Hamburg cihazının genel görünüşü verilmiştir.



Şekil 3.18 : Doğal agreg a aşınma tabakası TİO grafiği (mm).

Bölüm başında belirtildiği gibi KTŞ 2013'te LCPC yöntemi için 30.000 tekrarlı yük için limitler verilmiştir [19]. Yapılan araştırmalarda LCPC yönteminde 30.000 tekrarlı yükte meydana gelen deplasmanların Hamburg yönteminde 20.000 tekrarlı yükte meydana geldiği belirlenmiştir [53].

Çelikhane cürufu ve doğal agregadan 4.160 cm³ hacminde her karışımdan iki adet olmak üzere aşınma ve TMA numuneleri üretilmiştir. Her bir deney için sol ve sağ olmak üzere 2 numune kullanılmıştır. Numuneler deney başlamadan önce 4 saat boyunca 60 °C'de koşullandırılmıştır. Deney, 60 °C sıcak hava etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Doğal agreg a ve çelikhane cürufu numuneleri arasındaki karşılaştırmanın daha net yapılabilmesi için deney, 30.000 tekrarlı yüke kadar devam ettirilmiştir.

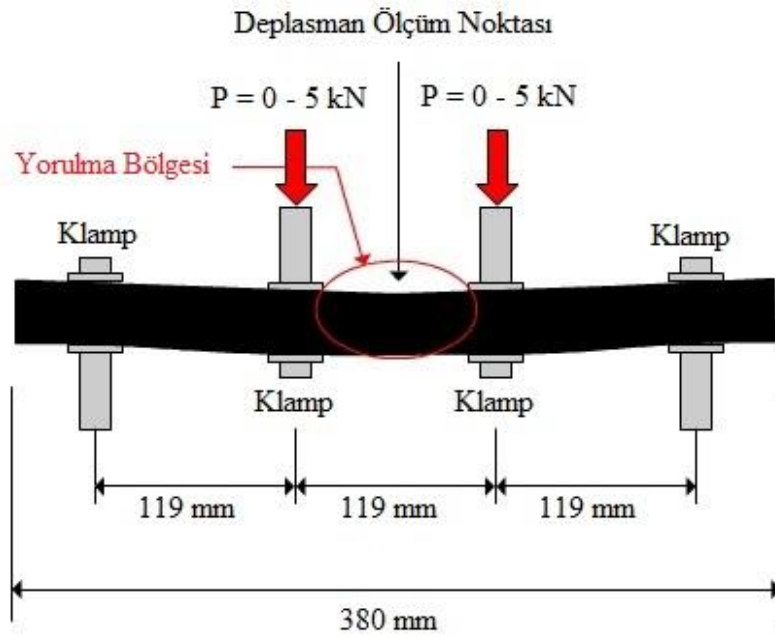
3.17 Yorulma Ömrünün Tayini

Performans deneyleri kapsamında son olarak doğal agreg a ve çelikhane cürufu ile üretilen aşınma ve TMA karışımlarının yorulma ömürleri belirlenmiştir. Optimum bağlayıcı oranında üretilen numunelerin G_{mb} değerleri ölçülmüş ve 5 x 5 cm'lik kirişler halinde kesilmiştir. Kesilen kirişlerin G_{mb} değerleri yeniden kontrol edilmiştir. Numuneler, hızlı kurutma amacıyla içinde silika jel bulunan kutulara yerleştirilmiştir. Çolakoğlu TMA yorulma numuneleri Şekil 3.19'da sunulmuştur.



Şekil 3.19 : Çolakoğlu TMA yorulma numuneleri.

Kurutulan numuneler, 4 noktalı yorulma cihazına yerleştirilmiştir. Cihaz, 20 °C sıcaklığa, 20 Hz yükleme frekansına ve 200×10^{-6} birim uzamaya (200 microstrain) karşılık gelen sabit deformasyona ayarlanmıştır. Deney, kirişin eğilme rijitliğinin ilk değerinin % 50'sine indiği yüklemede sonlandırılmıştır. Yorulma test cihazına ilişkin resim Şekil 3.20'de sunulmuştur.



Şekil 3.20 : Yükleme test cihazı detayları [54]

Sıkıştırılan numuneler kesilerek kirişler elde edildiği için kirişlerin G_{mb} değerlerinin, ilk G_{mb} değerlerinden büyük olması gerekmektedir. Bu koşul doğrultusunda numuneler elenmiş ve kalan numunelerin yorulma ömürleri belirlenmiştir.

3.18 Ekonomik Analiz

Son olarak Tartışma bölümünde (Bölüm 5), Teknik ve ekonomik kısıtlar doğrultusunda, çelikhane cürufunun kırma, eleme, manyetik ayrıştırma ve yaşlandırma işlemlerinin maliyetleri, bertaraf maliyetleri ile karşılaştırılmıştır. Manyetik ayrıştırma ile geri kazanılan metalik demirin ekonomik katkısı incelenmiştir. Çelikhane cürufunun tesisten teslim birim fiyatı (nakliye hariç) doğal agrega birim fiyatı ile kıyaslanmıştır. Granüler ve bağlayıcı tabakaların, cüruf ya da doğal agrega kullanımı durumunda ortalama birim fiyatları belirlenmiştir. Performans deneyleri doğrultusunda karışımların tahmini performans ömrü tayinleri yapılmıştır. Çelikhane cürufunun ekonomik taşıma mesafesi hesaplanmıştır.

4. BULGULAR

Bu bölümde yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar, Yöntem bölümünde (Bölüm 3) belirlenen akışa sadık kalınarak, sırasıyla Fiziksel Özelliklerin Sınanması, Kimyasal Analiz, Çevresel Etki Analizi, Granüler Tabakaların Mekanik Özellikleri, Genleşme Potansiyeli, BSK Tasarımları, Kontrol Briketleri, Lottman Deneyi, Tekerlek İzinde Oturma Deneyi ve Yorulma Ömrünün Tayini başlıkları altında verilmiştir.

4.1 Fiziksel Özelliklerin Sınanması

Bu bölümde, KTŞ 2013 kapsamında tanımlanan, çelikhane cürufu ve doğal agrega numunelerine uygulanarak sonuçları, Malzeme (Bölüm 2) bölümünde sunulan verilerin, KTŞ 2013 limitleri ile karşılaştırması yapılmıştır.

Uygulanan deneylere göre bu bölüm, sırasıyla Birim Hacim Ağırlık ve Su Absorbsiyonu Tayini, Organik Madde İçeriği Tayini, Atterberg Limitlerinin Tayini, Metilen Mavisı Deneyi, Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranının Tayini, Yassılık İndeksi Tayini, Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Tayini, Parçalanmaya Karşı Direnç Tayini, Cilalanma Mukavemeti Tayini ve Soyulma Mukavemeti Tayini alt başlıklarına ayrılmıştır.

KTŞ 2013'te fiziksel özelliklere ilişkin limitler her tabaka için ayrı belirtilmiştir. Dolayısıyla tüm tabakaların limitleri de çizelgelerde sunulmuştur.

4.1.1 Birim hacim ağırlık ve su absorbsiyonu tayini

Çelikhane cürufu ve doğal agrega, elenerek 25/19 mm - 19/12,5 mm - 12,5/9,5 mm - 9,5/4,75 mm - 4,75/2 mm - 2/0,425 mm - 0,425/0,180 mm - 0,180/0,075 mm ve filler gruplarına ayrılmıştır. Ülkemizde çelikhane cürufu henüz bir ürün konumunda olmadığından her boyut aralığının BHA'sı ve SA'sı, ASTM D7370 standardı uyarınca ölçülmüştür. Karşılaştırma yapılabilmesi için aynı uygulama doğal agrega için de tekrarlanmıştır.

KTŞ 2013'te üstyapı tabakalarında kullanılacak agreganın BHA'sına ilişkin herhangi bir limit bulunmamaktadır. Su absorpsiyonuna ilişkin limitler ise her üstyapı tabakası için farklı belirtilmiştir. KTŞ 2013'teki limitler ile karşılaştırma yapılabilmesi için elde edilen SA değerlerinin, her tabakada kullanılan fraksiyon oranına göre ağırlıklı ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, KTŞ 2013 limitleri ile birlikte Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 : Tane dağılımına göre çelikhane cürufu ve doğal agrega su absorpsiyonu değerleri ve KTŞ 2013 limitleri.

Tabaka:	Tane Grubu:	KTŞ 2013 Limitleri (%)	Doğal Agregası (%)	Çelikhane Cürufu (%)
Alttemel	İnce	≤ 3,5	0,39	1,51
	Kaba	≤ 3,5	0,37	2,31
Granüler Temel	İnce	≤ 3,0	0,39	1,50
	Kaba	≤ 3,0	0,37	2,27
Bitümlü Temel	İnce	≤ 2,5	0,39	1,51
	Kaba	≤ 2,5	0,37	2,29
Binder	İnce	≤ 2,5	0,39	1,51
	Kaba	≤ 2,5	0,37	2,37
Aşınma	İnce	≤ 2,0	0,39	1,52
	Kaba	≤ 2,0	0,36	2,06
TMA	İnce	≤ 2,0	0,39	1,51
	Kaba	≤ 2,0	0,35	2,14

4.1.2 Organik madde içeriği tayini

Organik madde içeriği tayini AASHTO T-21 standardı uyarınca, NaOH çözeltisi ile çelikhane cürufu ve doğal agregaya uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, KTŞ 2013 limitleri ile birlikte Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 : Organik madde içeriği ve KTŞ 2013 limitleri

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri	Doğal Agregası	Çelikhane Cürufu
Alttemel	Negatif	Negatif	Negatif
Granüler Temel	Negatif	Negatif	Negatif
Bitümlü Temel	Negatif	Negatif	Negatif
Binder	Negatif	Negatif	Negatif
Aşınma	Negatif	Negatif	Negatif
TMA	Negatif	Negatif	Negatif

4.1.3 Atterberg limitlerinin tayini

Kil, silt ve benzeri madde özellikleri gösterme eğiliminde olan kirleticilerin, numuneye karışma olasılığı göz önünde bulundurularak ASTM D4318 standardı uyarınca Atterberg limitleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, KTŞ 2013 limitleri ile birlikte Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3 : Atterberg değerleri ve KTŞ 2013 limitleri

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri	Doğal Agregaya	Çelikhane Cürufu
Alttemel	$LL \leq 25, PI \leq 6$	Non-plastik	Non-plastik
Granüler Temel	Non-plastik	Non-plastik	Non-plastik
Bitümlü Temel	Non-plastik	Non-plastik	Non-plastik
Binder	Non-plastik	Non-plastik	Non-plastik
Aşınma	Non-plastik	Non-plastik	Non-plastik
TMA	Non-plastik	Non-plastik	Non-plastik

4.1.4 Metilen mavisi deneyi

Çelikhane cürufu ve doğal agregaya ASTM C837 uyarınca uygulanan metilen mavisi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, KTŞ 2013 limitleri ile birlikte Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4 : Metilen mavisi sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri

Metilen Mavisi (ASTM C837)			
Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri	Doğal Agregaya	Çelikhane Cürufu
Alttemel	$\leq 4,0$	0,50	0,25
Granüler Temel	$\leq 3,0$	0,50	0,25
Bitümlü Temel	$\leq 2,0$	0,50	0,25
Binder	$\leq 1,5$	0,50	0,25
Aşınma	$\leq 1,5$	0,50	0,25
TMA	$\leq 1,5$	0,50	0,25

4.1.5 Kil topağı ve dağılabilen tane oranının tayini

Atterberg limitleri kapsamında; çelikhane cürufu ve doğal agregaya içerisinde kil, silt vb. malzeme bulunmadığı belirlenmiştir. Bu deneyin yapılmasındaki asıl amaç; cüruf içerisinde bulunan serbest CaO ve MgO bileşenlerinin 24 saatlik koşullandırma sürecinde su ile etkileşimi sonucu dağılan tane oranının belirlenmesine yöneliktir.

Deney ASTM C142 standardı uyarınca yapılmış ve elde edilen sonuçlar, KTŞ 2013 limitleri ile birlikte Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 : Dağılabilen tane oranı deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri	Doğal Agregaya (%)	Çelikhane Cürufu (%)
Alttemel	$\leq 2,0$	0,58	0,20
Granüler Temel	$\leq 1,0$	0,58	0,20
Bitümlü Temel	$\leq 0,3$	0,58	0,20
Binder	$\leq 0,3$	0,58	0,20
Aşınma	$\leq 0,3$	0,58	0,20
TMA	Negatif	0,58	0,20

4.1.6 Yassılık indeksi tayini

Çelikhane cürufu ve doğal agregaya yassılık indeksi deneyi, BS 812 standardı kapsamında yapılmıştır. 6,35 mm'ye kadar her boyuttan alınan numunelerin ortalama yassı tane oranları ve KTŞ 2013 limitleri Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6 : Yassılık indeksi deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri (%)	Doğal Agregası (%)	Çelikhane Cürufu (%)
Alttemel	≤ 35	17,68	8,00
Granüler Temel	≤ 30	17,68	8,00
Bitümlü Temel	≤ 30	17,68	8,00
Binder	≤ 30	17,68	8,00
Aşınma	≤ 25	17,68	8,00
TMA	≤ 25	17,68	8,00

4.1.7 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık tayini

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi, çelikhane cürufu ve doğal agregaya Na₂SO₄ çözeltisi ile ASTM C88-05 standardı uyarınca uygulanmıştır. 5 çevrim sonunda elde edilen sonuçlar ve KTŞ 2013 limitleri Çizelge 4.7'de sunulmuştur.

Çizelge 4.7 : Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri (%)	Doğal Agregası (%)	Çelikhane Cürufu (%)
Alttemel	≤ 25	1,50	1,88
Granüler Temel	≤ 20	1,50	1,88
Bitümlü Temel	≤ 18	1,50	1,88
Binder	≤ 18	1,50	1,88
Aşınma	≤ 16	1,50	1,88
TMA	≤ 14	1,50	1,88

4.1.8 Parçalanmaya karşı direnç tayini

Parçalanmaya karşı direnç tayini deneyi, ASTM C131 standardı uyarınca çelikhane cürufu ve doğal agregaya uygulanmıştır. Parçalanmış tane oranları ve KTŞ 2013 limitleri Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8 : LA deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri (%)	Doğal Agregası (%)	Çelikhane Cürufu (%)
Alttemel	≤ 45	18,56	24,95
Granüler Temel	≤ 35	18,56	24,95
Bitümlü Temel	≤ 30	18,56	24,95
Binder	≤ 30	18,56	24,95
Aşınma	≤ 27	18,56	24,95
TMA	≤ 25	18,56	24,95

4.1.9 Cilalanma mukavemeti tayini

Cilalanma mukavemeti deneyi ASTM D3319-11 standardı uyarınca çelikhane cürufu ve doğal agregaya uygulanmıştır. Deney sonucunda ölçülen cilalanmış taş değerleri (PSV) ve KTŞ 2013 limitleri çizelge 4.9’da sunulmuştur.

Çizelge 4.9 : Cilalanma mukavemeti deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri	Doğal Agreg	Çelikhane Cürufu
Binder	≥ 35	53,4	58,2
Aşınma	≥ 50	53,4	58,2
TMA	≥ 50	53,4	58,2

4.1.10 Soyulma mukavemeti tayini

KTŞ 2013 Kısım 403 Ek-A uyarınca çelikhane cürufu ve doğal agregaya DOP katkılı ve katkısız soyulma mukavemeti deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen soyulmaya karşı direnç değerleri ve KTŞ 2013 limitleri Çizelge 4.10’da sunulmuştur.

Çizelge 4.10 : Soyulma mukavemeti deney sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.

Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri (%)	Doğal Agreg (%)	Çelikhane Cürufu (%)
Bitümlü Temel	≥ 60	60-70	60-70
Binder	≥ 60	60-70	60-70
Aşınma	≥ 60	60-70	60-70
TMA	≥ 60	60-70	60-70

4.2 Kimyasal Analiz

Çelikhane cürufunun ve doğal agreganın bileşen analizi XRD yöntemi ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Bölüm 2.1.1 ve 2.2.1’de sunulmuştur. Çizelge 4.11’de bileşenlerin karşılaştırması yapılmıştır. Granüler tabakalar ve bitümlü sıcak karışımlarda olumsuz etkiler yaratabilen metalik demir ve serbest CaO oranları, kimyasal analiz ile belirlenmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.12’de sunulmuştur. Bu bileşenlerin gözlemlenen etkileri Tartışma bölümünde (Bölüm 5) ele alınmıştır.

Çizelge 4.11 : XRD analiz sonuçları.

Numune Adı:	Toplam Fe	Toplam CaO	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃
Cüruf	20,02	19,78	12,86	9,36	4,58	7,84
Doğal Agreg	0,78	32,50	0,92	22,05	0,05	0,42

Çizelge 4.12 : Kimyasal analiz sonuçları.

Numune Adı:	Serbest CaO	Metalik Fe
Cüruf	5,80	0,48
Doğal Agreg	0,17	0,24

4.3 Çevresel Etki Analizi

Çevresel etki değerlendirmesi kapsamında temin edilen cürufta ve cüruftan hazırlanan eluatta, 26 Mart 2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiş olan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2’de verilen “Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri” dâhilinde tanımlanan parametreler ve bunlara ek olarak Vanadyum parametresi ölçülmüştür.

Çelikhane cürufu ve doğal agrega numunesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.13’te sunulmuştur.

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2’de verilen “Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri” dâhilinde tanımlanan limitler de Çizelge 4.14’te sunulmuştur.

Çizelge 4.13 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega parametre konsantrasyonu.

Parametre	Birim	Numuneler	
		Cüruf	Doğal Agrega
Florür	mg/L	0,8	0,3
Sülfat	mg/L	26,0	<5,0
Toplam Çözünmüş Madde (180 °C)	mg/L	2052,0	<10,0
Çözünmüş Organik Karbon (DOC)	mg/L	2,9	6,1
Klorür	mg/L	15,0	10,0
Bakır	mg/L	<0,05	<0,05
Baryum	mg/L	1,00	0,03
Civa	mg/L	<0,0002	<0,0002
Nikel	mg/L	0,100	0,002
Antimon	mg/L	<0,005	<0,005
Arsenik	mg/L	0,001	0,001
Kadmiyum	mg/L	<0,0005	<0,0005
Toplam Krom	mg/L	<0,05	<0,05
Kurşun	mg/L	<0,01	<0,01
Selenyum	mg/L	0,002	<0,001
Molibden	mg/L	0,020	<0,001
Çinko	mg/L	<0,05	<0,05
Fenol İndeksi	mg/L	0,03	<0,03
Toplam Organik Karbon	%	1,90	0,21
LOI (Yanma Kaybı), (550 °C)	%	1,3	1,7
BTEX (Benzen, Toluen, Etil Benzen, Ksilen)	mg/kg	<0,25	<0,25
Mineral Yağ ve Türevleri	mg/kg	130	<100
PCBs (toplam)	mg/kg	<0,1	<0,1
pH (25 °C)		11,40	10,02
Nem Oranı (%)	%	0,19	<0,10
Vanadyum	mg/kg	0,013	0,020

Çizelge 4.14 : Atıkların düzenli depolanmasına dair yönetmelik limitleri [55].

PARAMETRE	Sınır Değerler			
	Birim	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3
Florür	mg/L	50	15	1
Sülfat	mg/L	5000	2000	100
Toplam Çözünmüş Madde (180 °C)	mg/L	10000	6000	400
Çözünmüş Organik Karbon (DOC)	mg/L	100	80	50
Klorür	mg/L	2500	1500	80
Bakır	mg/L	10	5	0,2
Baryum	mg/L	30	10	2
Civa	mg/L	0.2	0.02	0.001
Nikel	mg/L	4	1	0.04
Antimon	mg/L	0,5	0,07	0,006
Arsenik	mg/L	2,5	0,2	0,05
Kadmiyum	mg/L	0,5	0,1	0,004
Toplam Krom	mg/L	7	1	0,05
Kurşun	mg/L	5	1	0,05
Selenyum	mg/L	0,7	0,05	0,01
Molibden	mg/L	3	1	0,05
Çinko	mg/L	20	5	0,4
Fenol İndeksi	mg/L	-	-	0.1
pH (25 °C)		-	-	-
Toplam Organik Karbon	%	6	-	-
LOI (Yanma Kaybı), (550 °C)	%	10	-	-
BTEX (Benzen, Toluene, Etil benzen, Ksilen)	mg/kg	-	-	6
Mineral Yağ ve Türevleri	mg/kg	-	-	500
PCBs (toplam)	mg/kg	-	-	1

4.4 Granüler Tabakaların Mekanik Özellikleri

Çelikhane cürufunun, ülkemizde henüz bir ürün konumunda olmaması ve tane dağılımının çelik tesisinin ihtiyaçlarına yönelik düzenlenmesi nedeniyle bu bölümde incelenen tüm granüler tabakalar için, Yöntem bölümünde (Bölüm 3) belirtildiği üzere, KTŞ 2013'te tanımlanmış olan alt ve üst tane dağılımı limitlerinin ortalaması alınarak, ideal tane dağılımında deneyler gerçekleştirilmiştir.

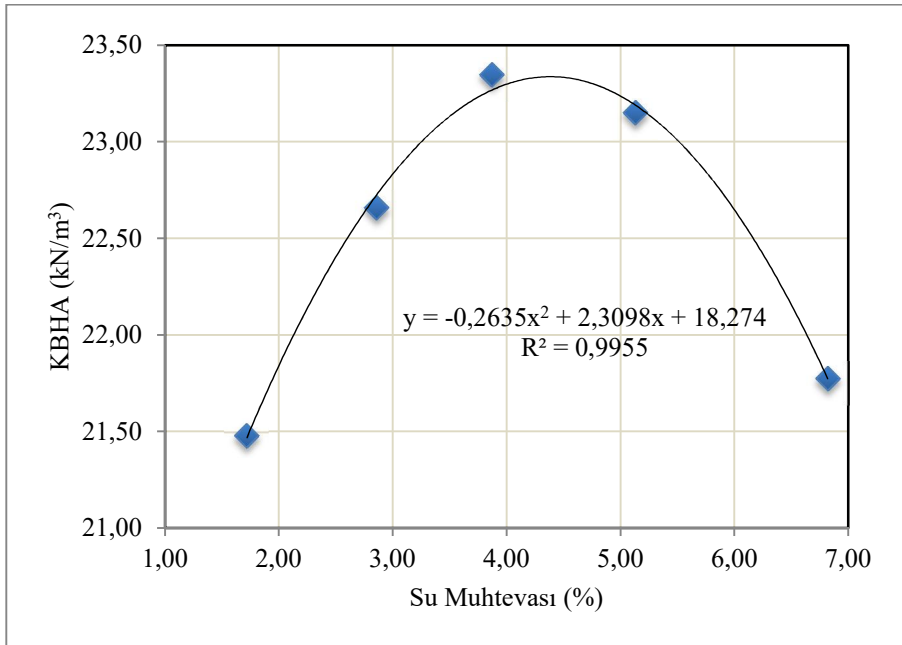
4.4.1 Alttemel tabakaları

KTŞ 2013'te alttemel tabakaları Tip-A ve Tip-B olmak üzere iki farklı tane dağılımında tanımlanmıştır [19]. Doğal agrega ve çelikhane cürufunda alt ve üst limit ortalamaları alınarak ideal eğriye göre tasarım yapılmıştır. ASTM D1557 uyarınca; 19 mm'den büyük malzeme, tane oranları doğrultusunda, 19 mm altındaki malzemeye dağıtılmıştır [47]. Bu koşula göre düzenlenen ideal eğriye ait tane dağılımları, KTŞ 2013 tane dağılımı limitleri ile birlikte Çizelge 4.15'te sunulmuştur.

Çizelge 4.15 : KTŞ 2013 Alttemel granülometri limitleri ve düzeltilen ideal eğri değerleri.

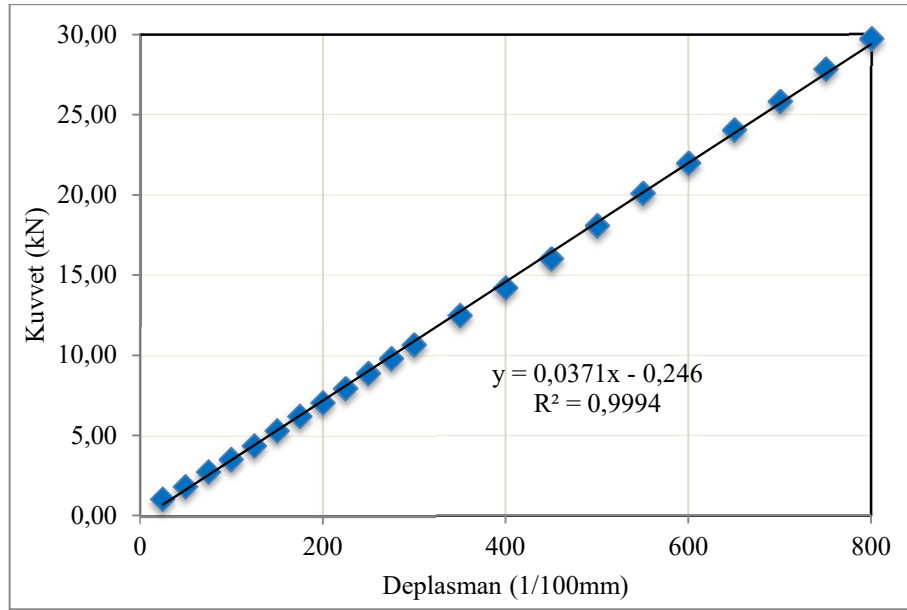
Elek No	KTŞ 2013 Limitleri		İdeal Eğri Değerleri	
	Tip-A	Tip-B	Tip-A	Tip-B
	Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)
3"	100		100,0	100,0
2"	-	100	100,0	100,0
1 1/2"	85-100	80-100	100,0	100,0
1"	-	60-90	100,0	100,0
3/4"	70-100	45-80	100,0	100,0
3/8"	45-80	30-70	73,5	80,0
4	30-75	25-55	61,8	64,0
10	-	15-40	-	44,0
40	10-25	10-20	20,6	24,0
200	0-12	0-12	7,1	9,6

Doğal agrega Alttemel Tip-A tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde optimum su muhtevası (w_{opt}) % 4,38, maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_k) 23,34 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.1’de sunulmuştur.



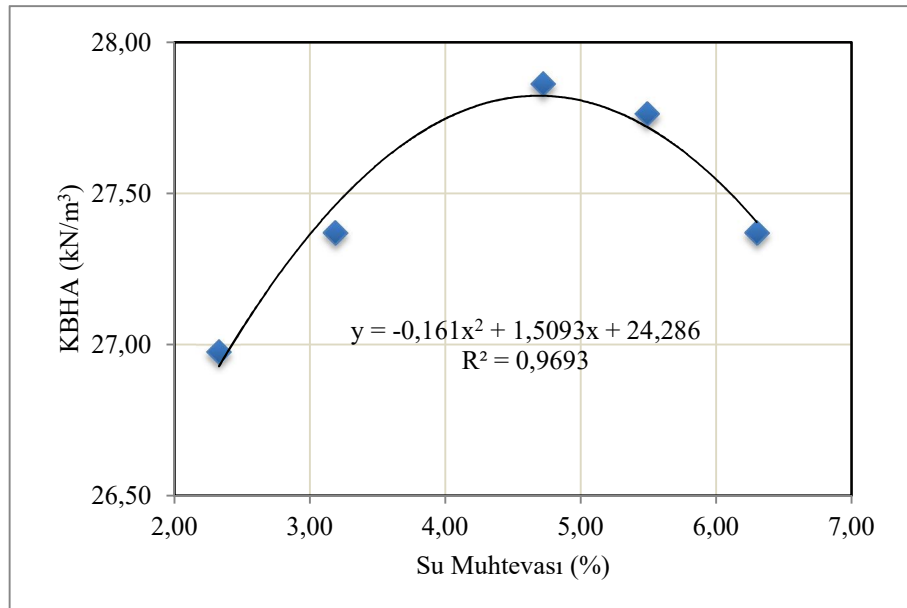
Şekil 4.1 : Doğal agrega Alttemel Tip-A Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numune 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 69, 5 mm deplasmanda % 93 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % 93 olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.2’de sunulmuştur.



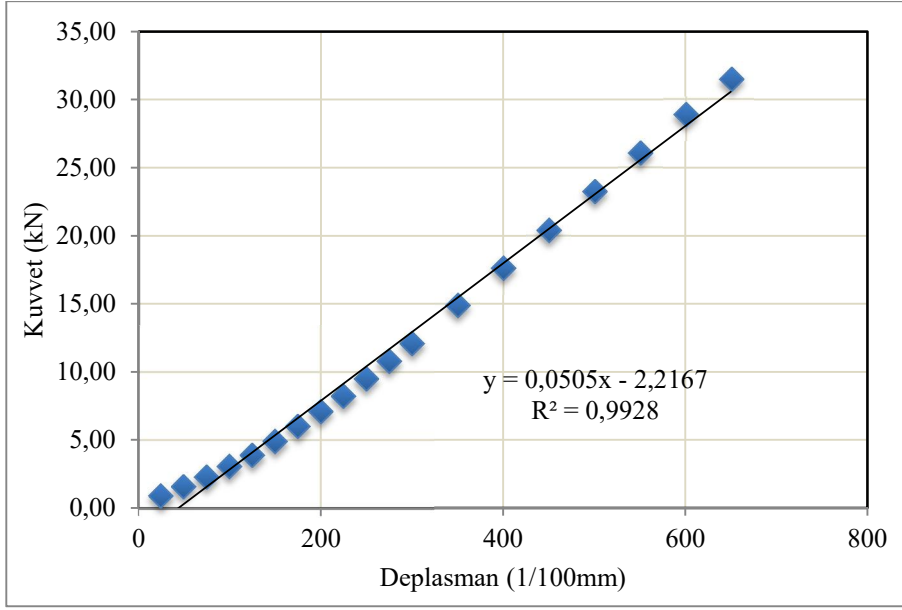
Şekil 4.2 : Doğal agrega Alttemel Tip-A CBR grafiği.

Çelikhane cürufu Alttemel Tip-A tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 4,69, γ_k 27,82 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.3'te sunulmuştur.



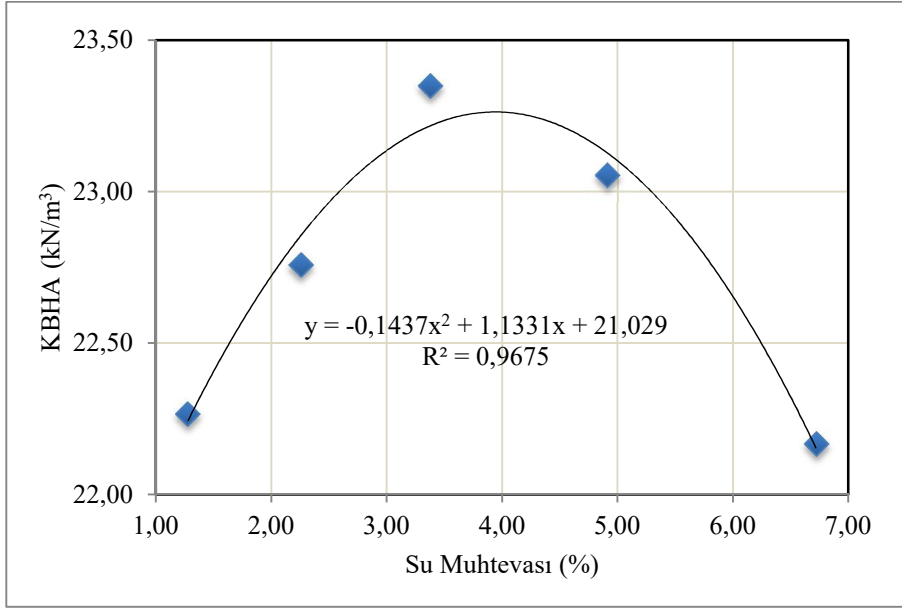
Şekil 4.3 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-A Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 94, 5 mm deplasmanda % 126 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % **126** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.4'te sunulmuştur.



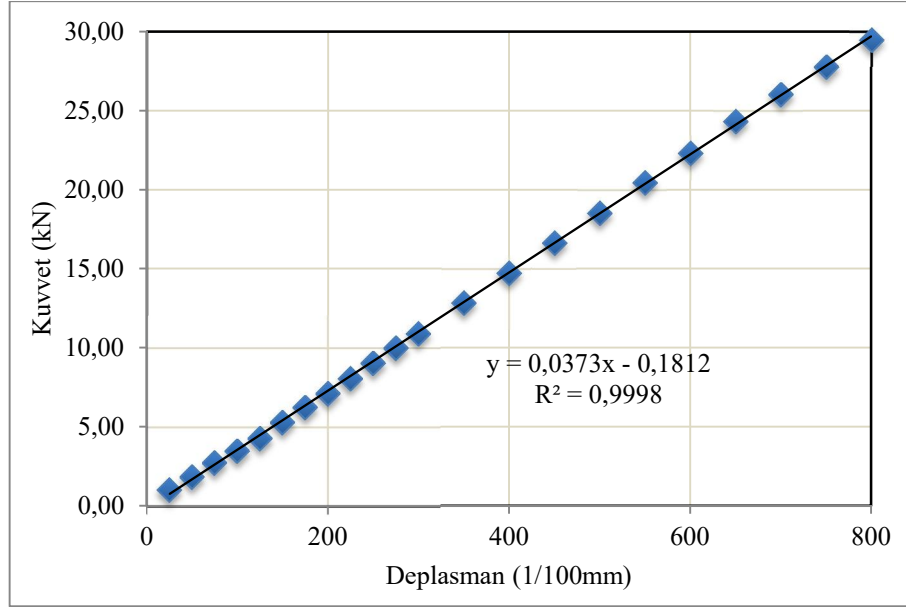
Şekil 4.4 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-A CBR grafiği.

Doğal agregat Alttemel Tip-B tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 3,94, γ_k 23,26 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.5'te sunulmuştur.



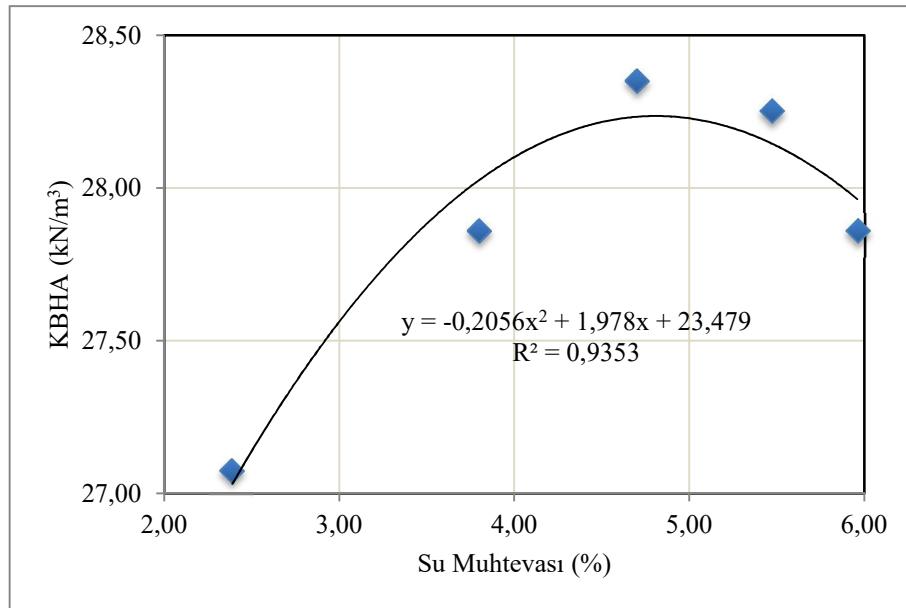
Şekil 4.5 : Doğal agregat Alttemel Tip-B Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 70, 5 mm deplasmanda % 93 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % 93 olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.6'da sunulmuştur.



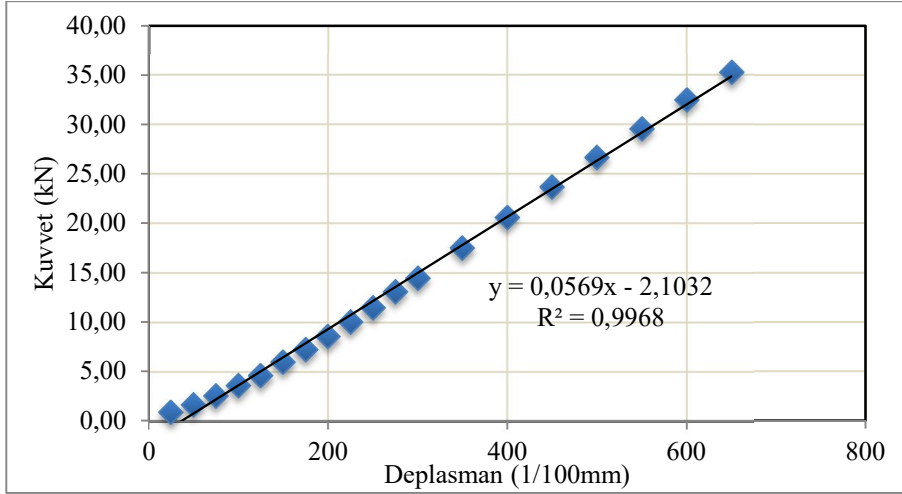
Şekil 4.6 : Doğal agrega Alttemel Tip-B CBR grafiği.

Çelikhane cürufu Alttemel Tip-B tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 4,81, γ_k 28,24 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.7’de sunulmuştur.



Şekil 4.7 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-B Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 106, 5 mm deplasmanda % 142 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % **142** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.8’de sunulmuştur.



Şekil 4.8 : Çelikhane cürufu Alttemel Tip-B CBR grafiği.

4.4.2 Temel tabakaları

Temel tabakaları KTŞ 2013'te kendi içinde üç farklı alt gruba ayrılmaktadır. Bunlar; granüler temel (GT), plent-miks temel (PMT) ve çimento bağlayıcılı granüler temel (ÇBGT)'dir [19]. Kapsam bölümünde (Bölüm 1.2) belirtildiği üzere, cürufun alkali yapısının etkisi ile meydana gelebilecek alkali-silika reaksiyonları nedeniyle ÇBGT çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

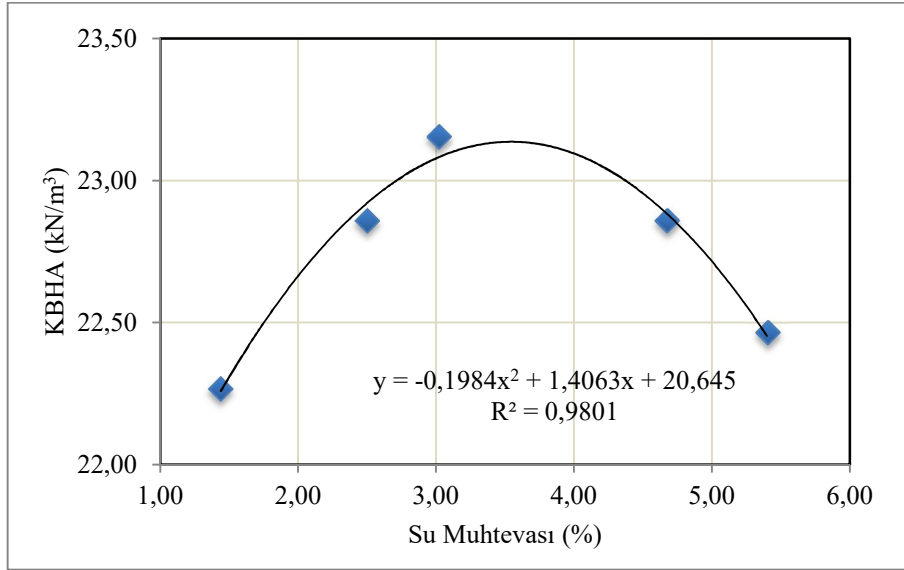
4.4.2.1 Granüler temel

KTŞ 2013'te GT tabakaları Tip-A, Tip-B ve Tip-C olmak üzere üç farklı tane dağılımında tanımlanmıştır. Doğal agrega ve çelikhane cürufunda, alt ve üst limit ortalamaları alınarak ideal eğriye göre tasarım yapılmıştır. ASTM D1557 uyarınca; 19 mm'den büyük malzeme, tane oranları doğrultusunda 19 mm altındaki malzemeye dağıtılmıştır [47]. Bu koşula göre düzenlenen ideal eğriye ait tane dağılımları, KTŞ 2013 tane dağılımı limitleri ile birlikte Çizelge 4.16'da sunulmuştur.

Çizelge 4.16 : KTŞ 2013 Granüler Temel granülometri limitleri ve düzeltilmiş ideal eğri değerleri.

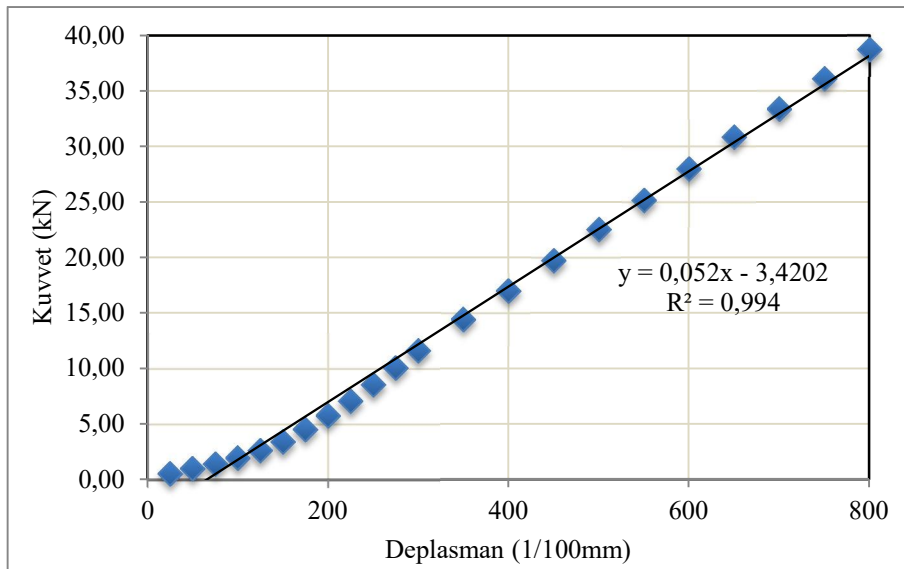
Elek No	KTŞ 2013 Limitleri			İdeal Eğri Değerleri		
	Tip-A	Tip-B	Tip-C	Tip-A	Tip-B	Tip-C
	Geçen (%)	Geçen (%)		Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)
2"	100	100	100	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	80-100	100	100	100,0	100,0	100,0
1"	60-90	70-100	100	100,0	100,0	100,0
3/4"	45-80	60-92	75-100	100,0	100,0	100,0
3/8"	30-70	40-75	50-85	80,0	75,7	77,1
4	25-55	30-60	35-65	64,0	59,2	57,1
10	15-40	20-45	25-50	44,0	42,8	42,9
40	8-20	10-25	12-30	22,4	23,0	24,0
200	2-8	0-12	0-12	8,0	7,9	6,9

Doğal agrega Temel Tip-A tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 3,54, γ_k 23,14 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.9’da sunulmuştur.



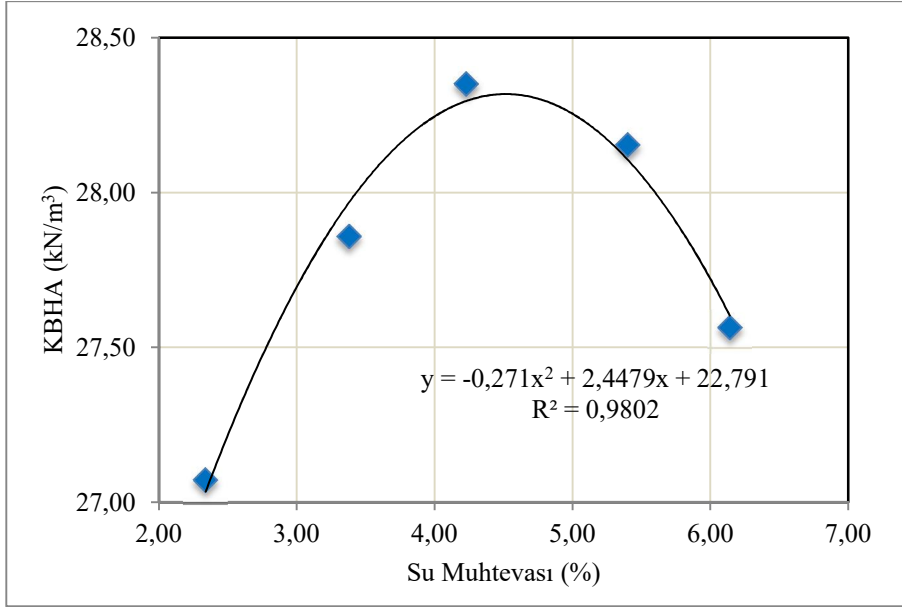
Şekil 4.9 : Doğal agrega Temel Tip-A Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede, 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 97, 5 mm deplasmanda % 130 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % **130** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.10’da sunulmuştur.



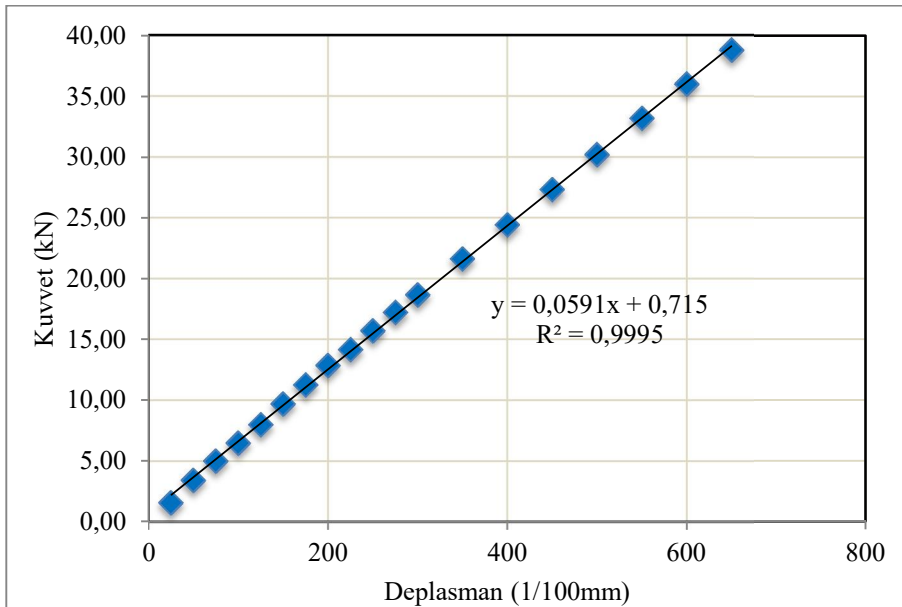
Şekil 4.10 : Doğal agrega Temel Tip-A CBR grafiği.

Çelikhane cürufu Temel Tip-A tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 4,52, γ_k 28,32 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.11’de sunulmuştur.



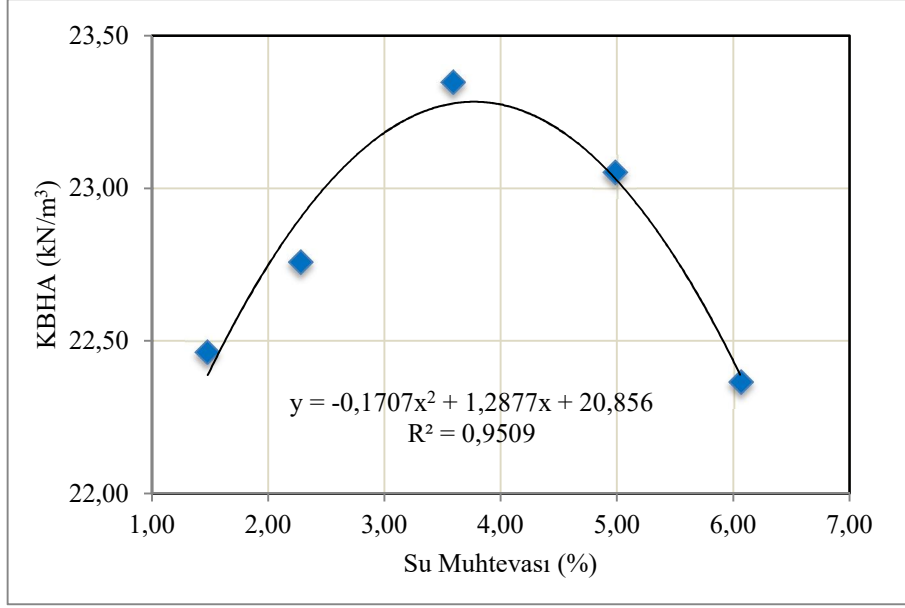
Şekil 4.11 : Çelikhane cürufu Temel Tip-A Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 111, 5 mm deplasmanda % 147 olarak hesaplanmış ve CBR değeri **% 147** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.12’de sunulmuştur.



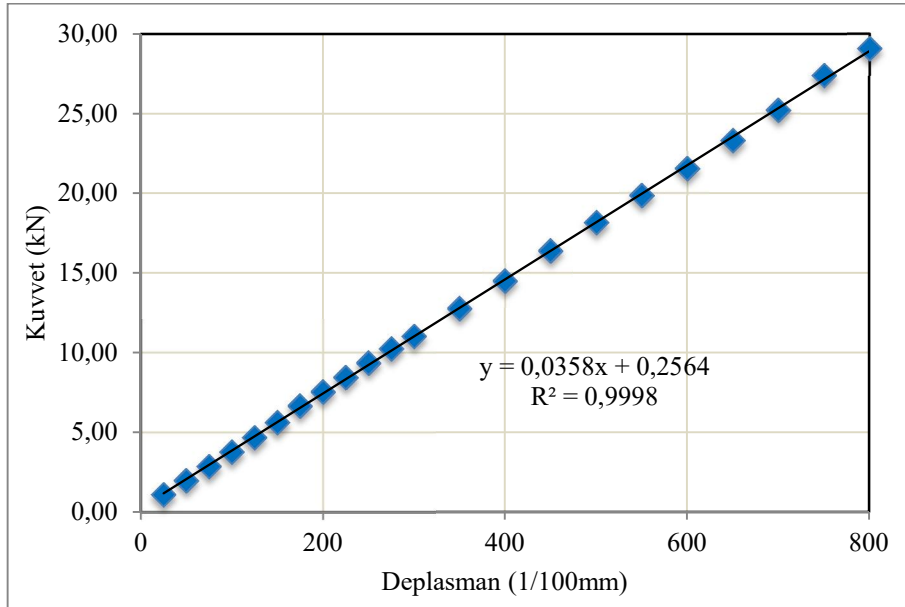
Şekil 4.12 : Çelikhane cürufu Temel Tip-A CBR grafiği.

Doğal agregata Temel Tip-B tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 3,77, γ_k 23,28 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.13’te sunulmuştur.



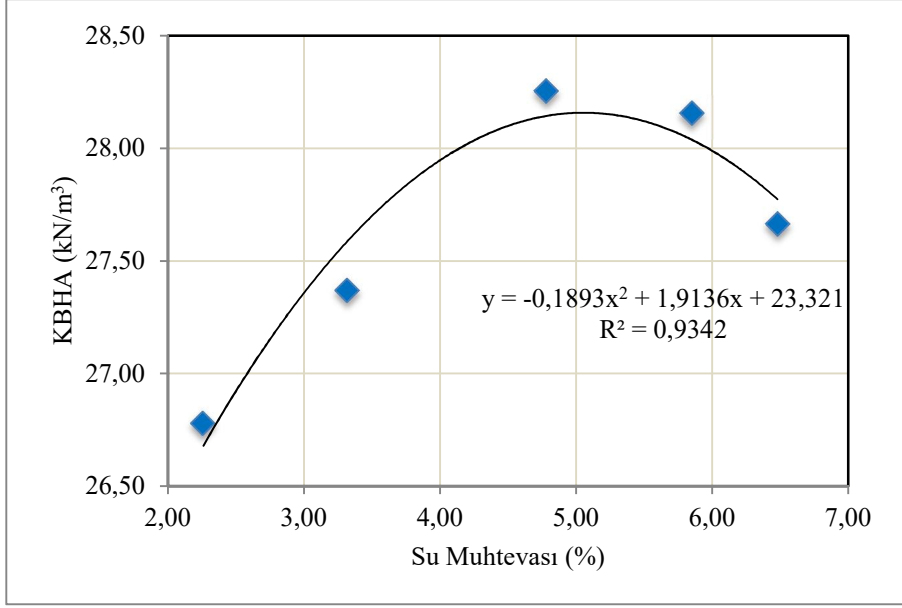
Şekil 4.13 : Doğal agrega Temel Tip-B Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 67, 5 mm deplasmanda % 89 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % 89 olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.14'te sunulmuştur.



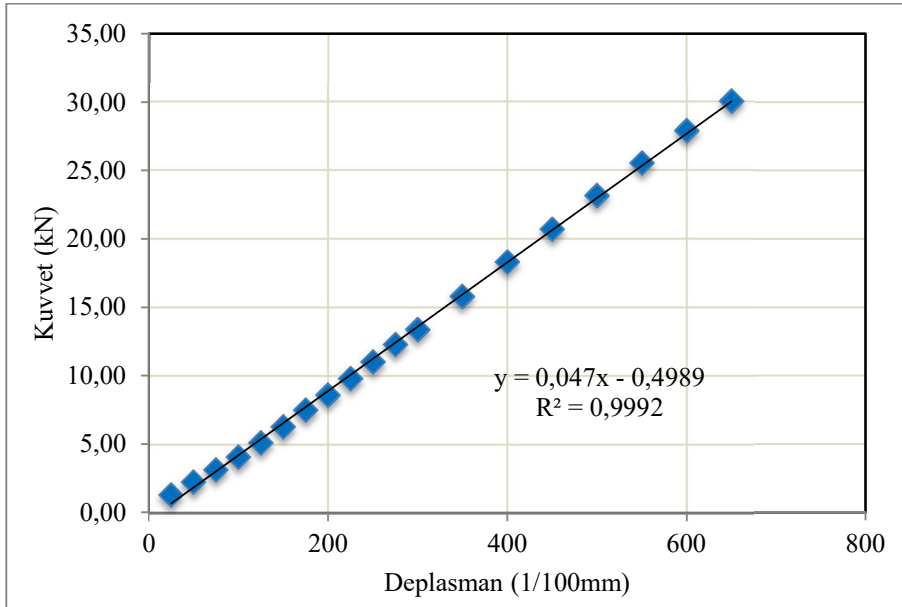
Şekil 4.14 : Doğal agrega Temel Tip-B CBR grafiği.

Çelikhane cürufu Temel Tip-B tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 5,05, γ_k 28,16 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.15'te sunulmuştur.



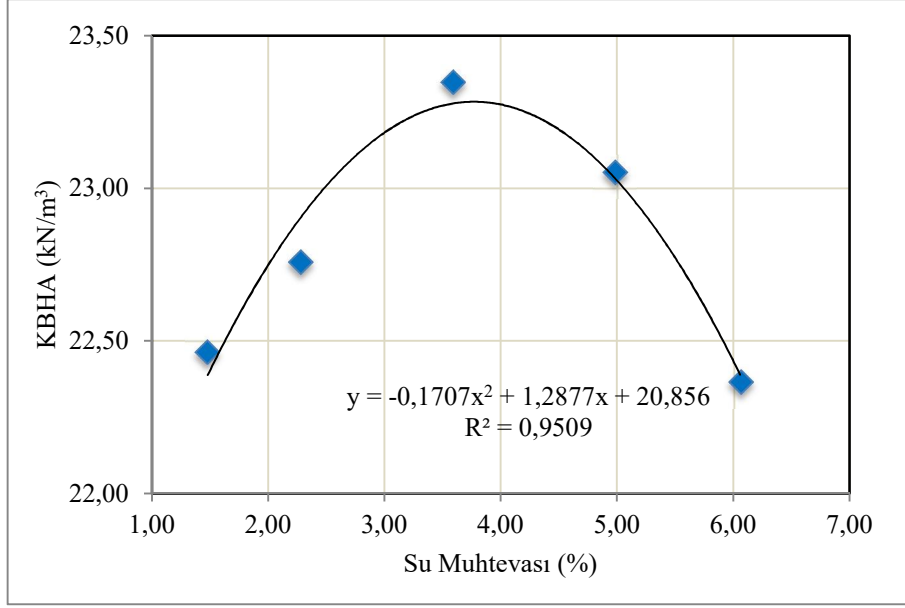
Şekil 4.15 : Çelikhane cürufu Temel Tip-B Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 88, 5 mm deplasmanda % 117 olarak hesaplanmış ve CBR değeri **% 117** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.16'da sunulmuştur.



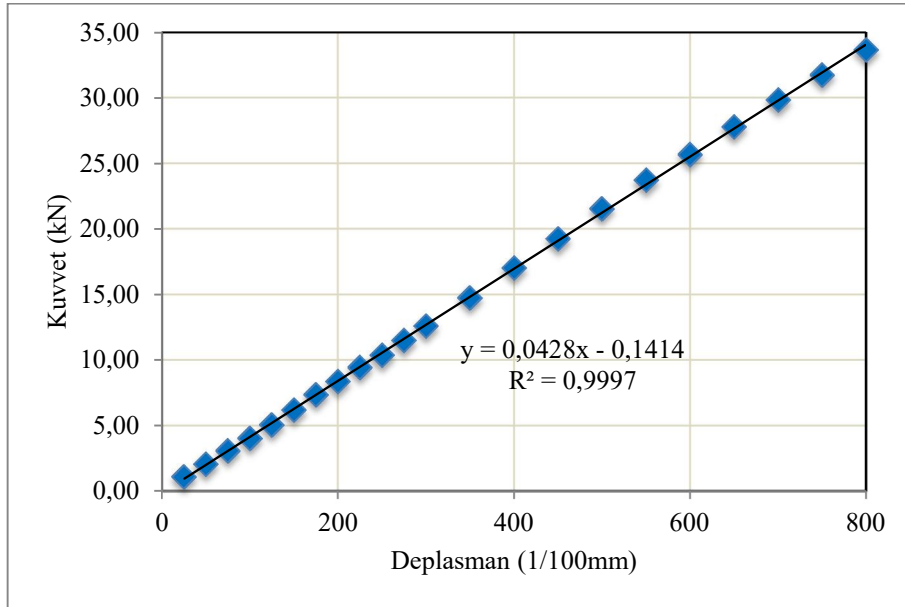
Şekil 4.16 : Çelikhane cürufu Temel Tip-B CBR grafiği.

Doğal agregata Temel Tip-C tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 3,18, γ_k 23,31 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.17'de sunulmuştur.



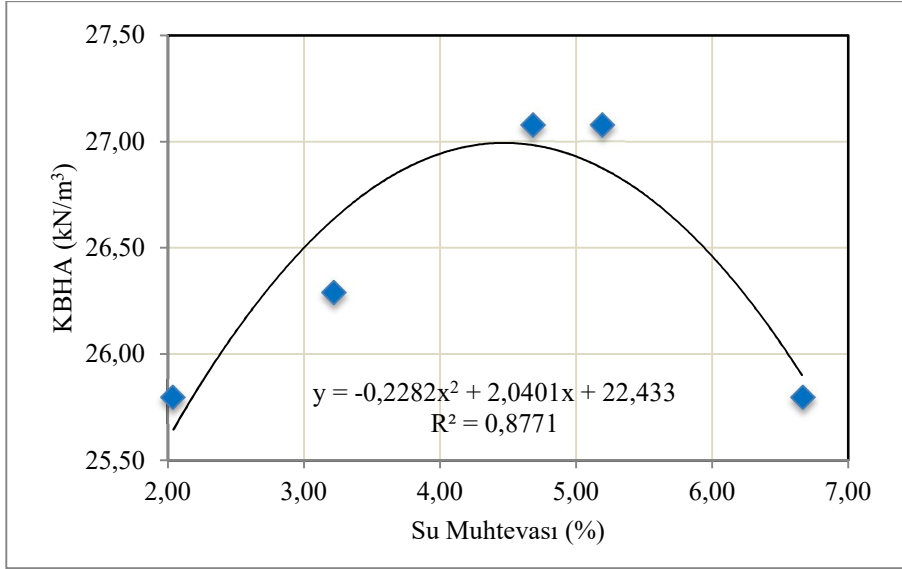
Şekil 4.17 : Doğal agrega Temel Tip-C Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 80, 5 mm deplasmanda % 107 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % 107 olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.18’de sunulmuştur.



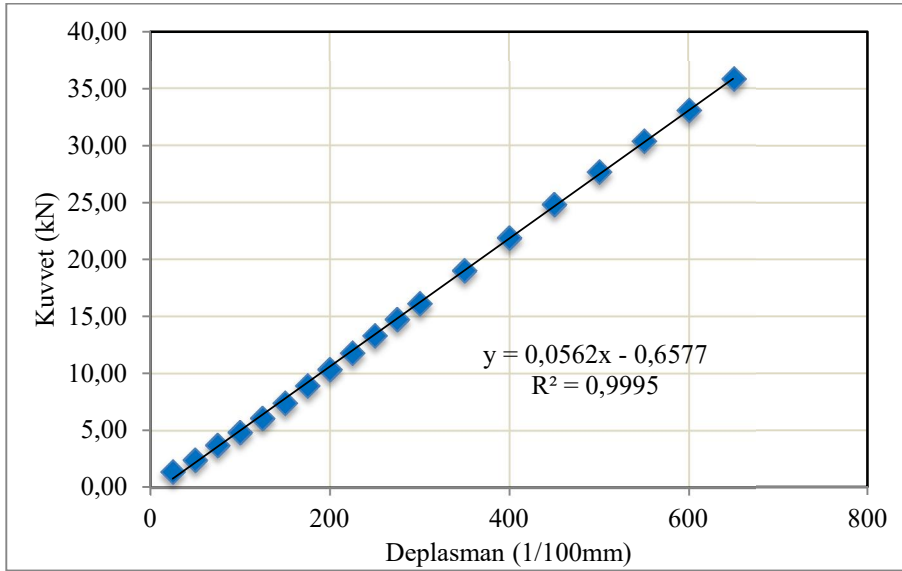
Şekil 4.18 : Doğal agrega Temel Tip-C CBR grafiği.

Çelikhane cürufu Temel Tip-C tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 4,47, γ_k 26,99 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.19’da sunulmuştur.



Şekil 4.19 : Çelikhane cürufu Temel Tip-C Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 105, 5 mm deplasmanda % 140 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % 140 olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.20’de sunulmuştur.



Şekil 4.20 : Çelikhane cürufu Temel Tip-C CBR grafiği.

4.4.2.2 Plent miks temel

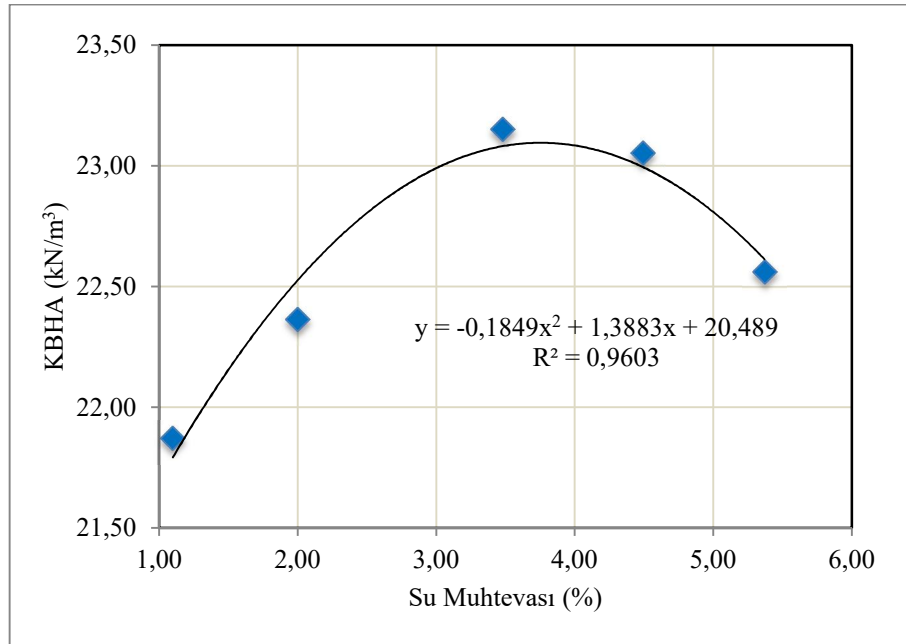
KTŞ 2013’te PMT tabakaları PMT-I ve PMT-II olmak üzere iki farklı tane dağılımında tanımlanmıştır [19]. Doğal agrega ve çelikhane cürufunda alt ve üst limit ortalamaları alınarak ideal eğriye göre tasarım yapılmıştır. ASTM D1557 uyarınca; 19 mm’den

büyük malzeme, tane oranları doğrultusunda 19 mm altındaki malzemeye dağıtılmıştır [47]. Bu koşula göre düzenlenen ideal eğriye ait tane dağılımları, KTŞ 2013 tane dağılımı limitleri ile birlikte Çizelge 4.17’de sunulmuştur.

Çizelge 4.17 : KTŞ 2013 PMT granülometri limitleri ve düzeltilmiş ideal eğri değerleri.

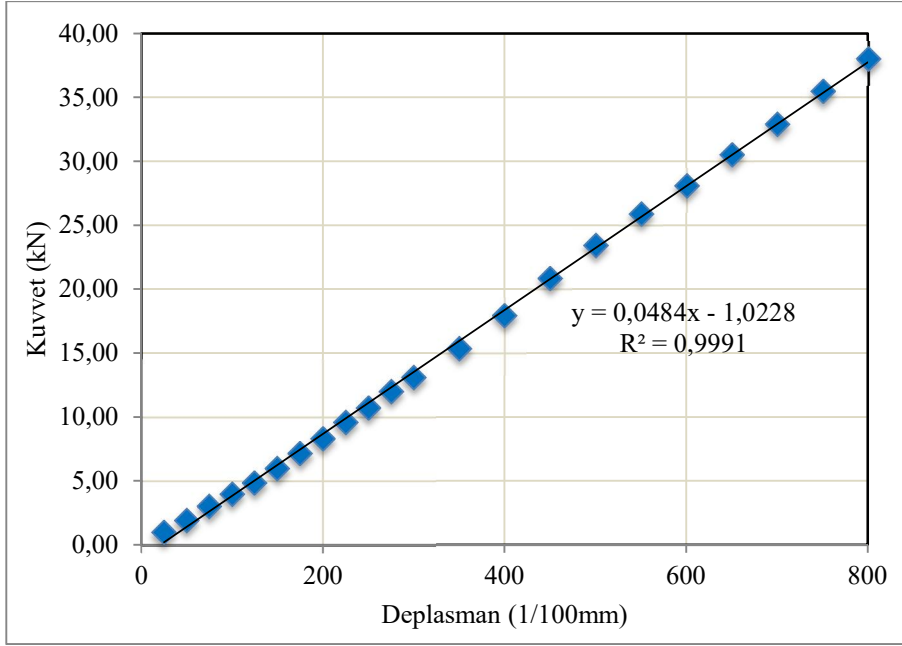
Elek No	KTŞ 2013 Limitleri		İdeal Eğri Değerleri	
	PMT-I	PMT-II	PMT-I	PMT-II
	Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)
1 1/2"	100	100	100,0	100,0
1"	72-100	100	100,0	100,0
3/4"	60-92	80-100	100,0	100,0
3/8"	40-75	50-82	75,7	73,3
4	30-60	35-65	59,2	55,6
10	20-45	23-50	42,8	40,6
40	8-25	12-30	21,7	23,3
200	0-10	2-12	6,6	7,8

Doğal agrega PMT-I tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 3,75, γ_k 23,09 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.21’de sunulmuştur.



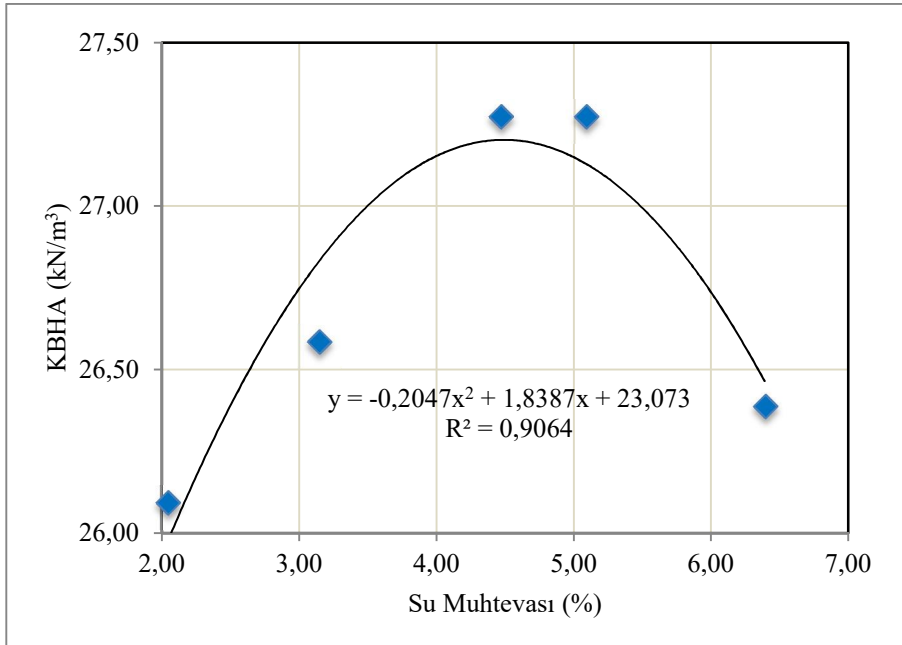
Şekil 4.21 : Doğal agrega PMT-I Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede, 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 91, 5 mm deplasmanda % 121 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % **121** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.22’de sunulmuştur.



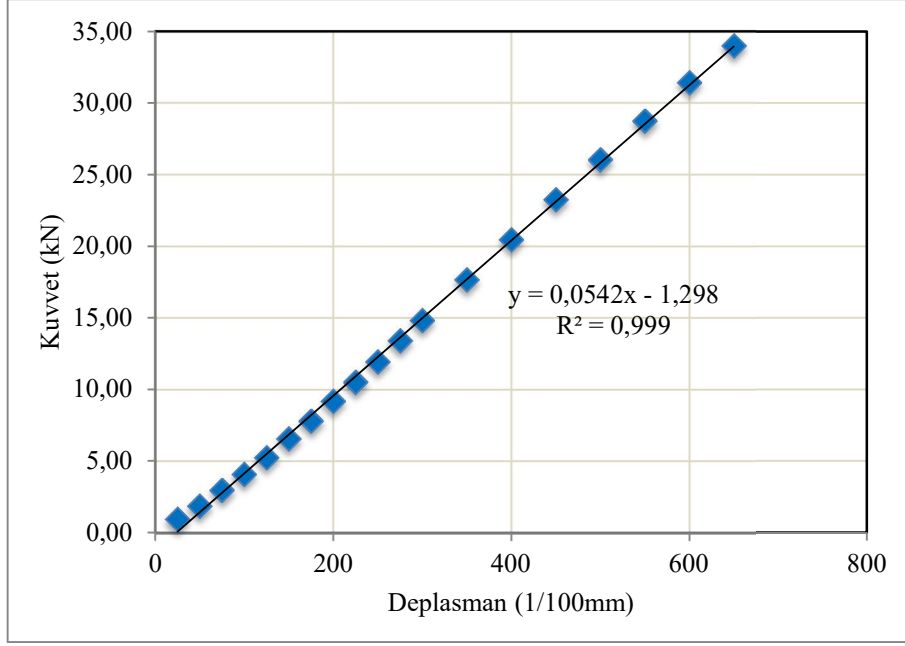
Şekil 4.22 : Doğal agrega PMT-I CBR grafiği.

Çelikhane cürufu PMT-I tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 4,49, γ_k 27,20 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.23'te sunulmuştur.



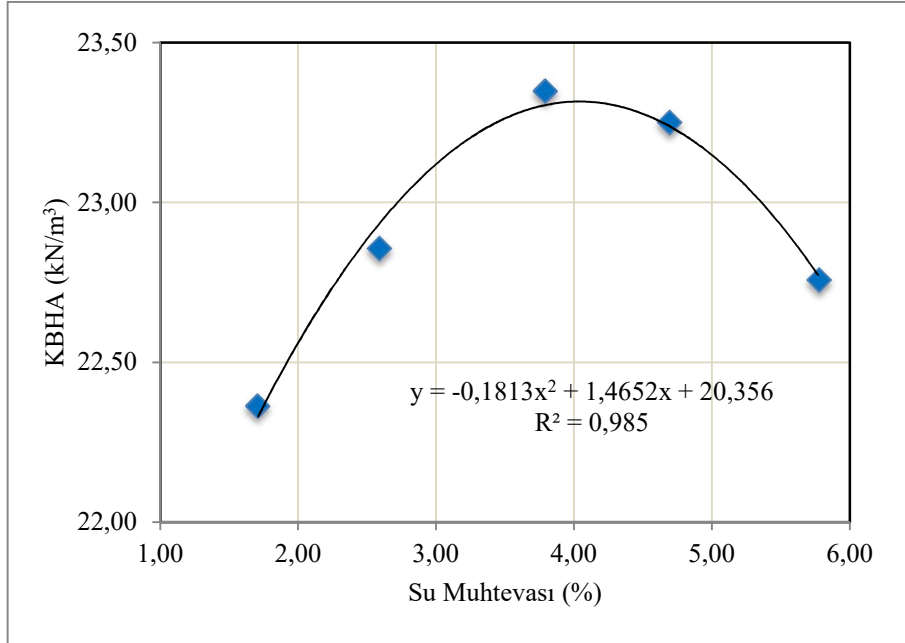
Şekil 4.23 : Çelikhane cürufu PMT-I Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numune 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 101, 5 mm deplasmanda % 135 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % **135** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.24'te sunulmuştur.



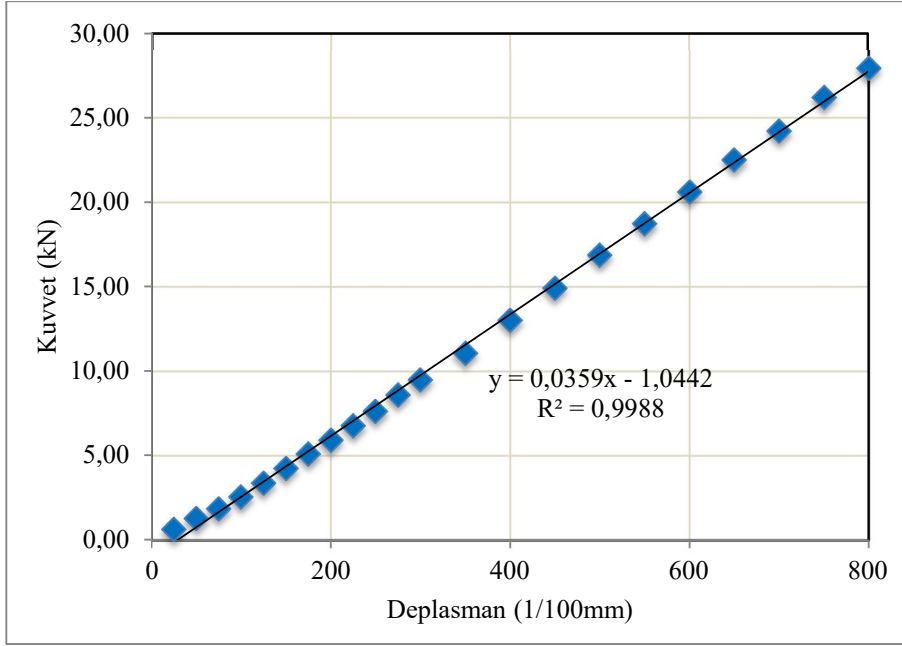
Şekil 4.24 : Çelikhane cürufu PMT-I CBR grafiği.

Doğal agregata PMT-II tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 4,04, γ_k 23,32 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.25'te sunulmuştur.



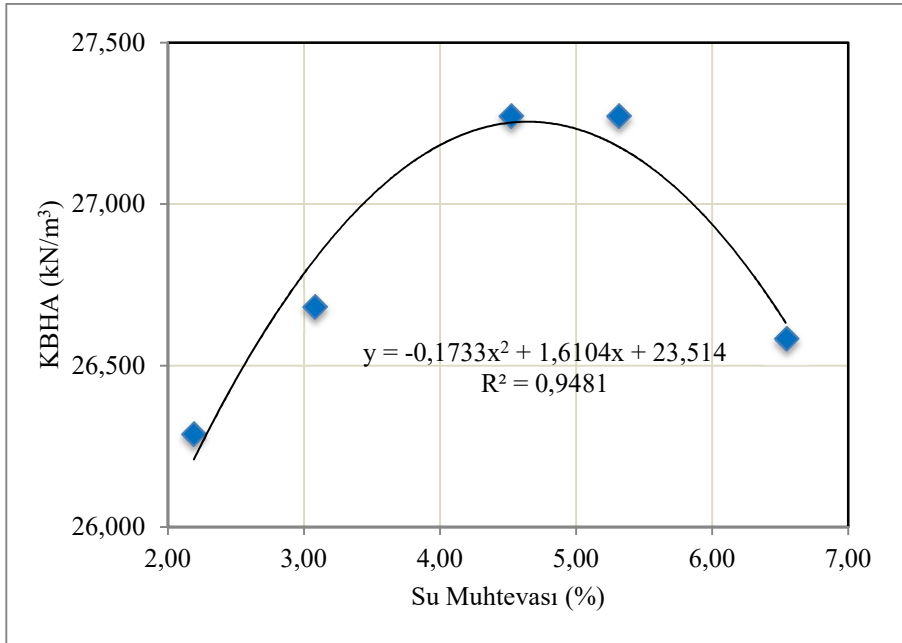
Şekil 4.25 : Doğal agregata PMT-II Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 67, 5 mm deplasmanda % 90 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % 90 olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.26'da sunulmuştur.



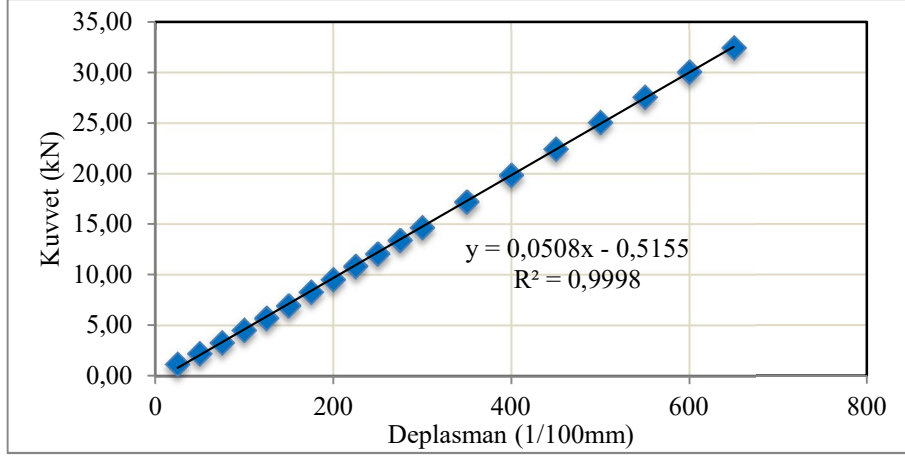
Şekil 4.26 : Doğal agrega PMT-II CBR grafiği.

Çelikhane cürufu PMT-II tabakası için yapılan modifiye Proctor deneyinde w_{opt} % 4,65, γ_k 27,26 kN/m³ olarak belirlemiştir. Deney grafiği Şekil 4.27’de sunulmuştur.



Şekil 4.27 : Çelikhane cürufu PMT-II Proctor deneyi grafiği.

Optimum su muhtevasında sıkıştırılan numunede, 96 saat içinde şişme gözlemlenmemiştir. ASTM D1883 standardı uyarınca yapılan modifiye CBR deneyinde, taşıma oranları; 2,5 mm deplasmanda % 95, 5 mm deplasmanda % 127 olarak hesaplanmış ve CBR değeri % **127** olarak kabul edilmiştir. Deney grafiği Şekil 4.28’de sunulmuştur.

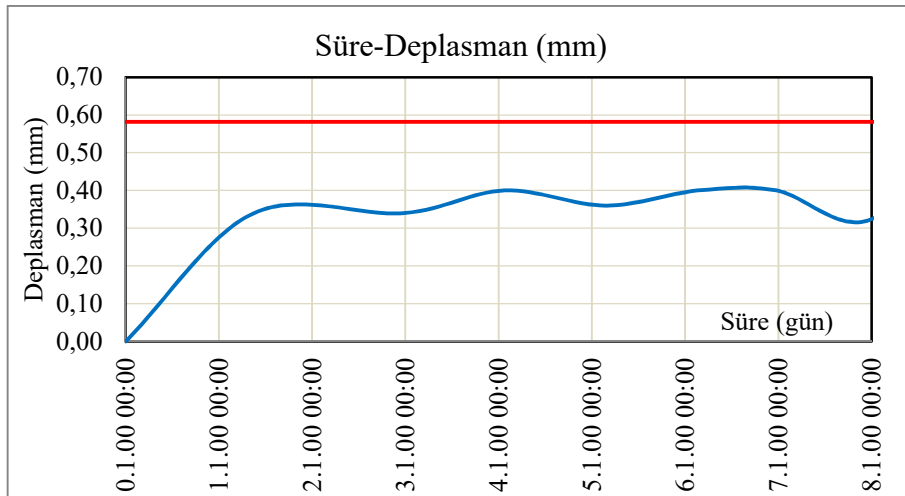


Şekil 4.28 : Çelikhane cürufu PMT-II CBR grafiği.

4.5 Potansiyel Genleşme

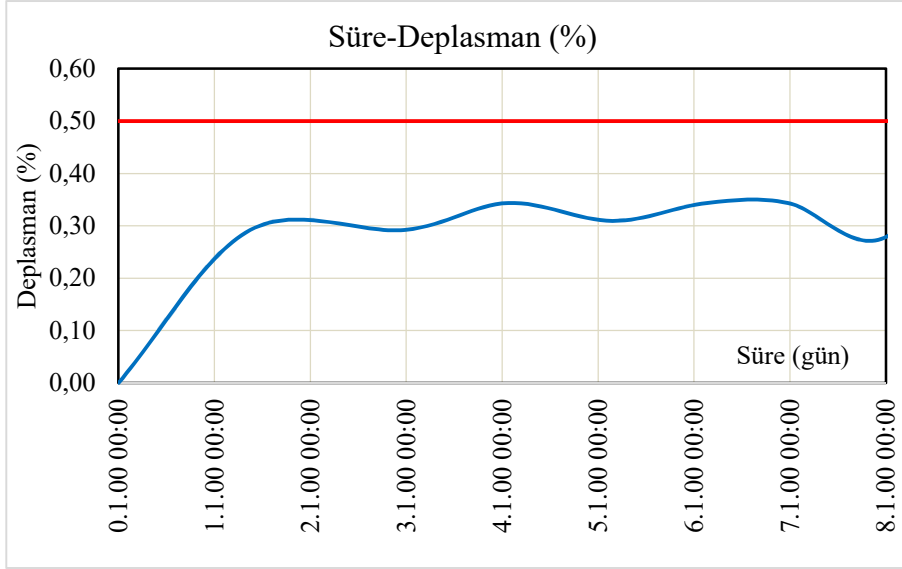
Çelikhane cürufunun genleşme potansiyelinin belirlenebilmesi için ASTM D4792 standardında tanımlanan yöntem kullanılmıştır. En kötü senaryonun göz önüne alınabilmesi için minimum boşluk oranına sahip granüler tabaka tercih edilmiştir. Granüler Tabakaların Mekanik Özellikleri bölümünde (Bölüm 4.4) elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıklar değerlendirildiğinde; 28,32 kN/m³'lük kuru birim hacim ağırlığı ile en düşük boşluk oranına sahip olduğu düşünülen Alttemel Tip-A tabakası, genleşme deneyi için sıkıştırılmıştır.

Hazırlanan numune, 7 gün boyunca 70 °C sıcaklıktaki suda şartlandırılmış ve meydana gelen deplasman günlük olarak kayıt altına alınmıştır. Deney sonuç grafiği, ASTM D4792 standardının çelikhane cürufunun kullanımı için önerdiği % 0,5 genleşme limiti ile birlikte Şekil 4.29 ve 4.30'da sunulmuştur.



Şekil 4.29 : Çelikhane cürufu genleşme grafiği (mm).

Şekil 5.31’de görüldüğü üzere 5. ve 7. günlerde genleşme eğrisi zirve yapmıştır. Bu durumun artan bir eğilime gidip gitmediğini kontrol etmek amacıyla deney 8. günde sonlandırılmıştır.



Şekil 4.30 : Çelikhane cürufu genleşme oranı grafiği

4.6 BSK Tasarımları

BSK Tasarımlarının Planlanması bölümünde (Bölüm 3.7) belirtildiği üzere, ülkemizde uygulaması en çok tercih edilen binder, BT Tip-A, Aşınma Tip-I ve TMA Tip-IA tabakalarının tasarımları, doğal agrega ve çelikhane cürufu ile yapılmıştır. Tüm tasarımlarda ideal granülometri eğrisi değerleri kullanılmıştır.

Tasarımlarda, Aşınma, Binder ve BT tabakalarında bağlayıcı oranlarının % 4 ila % 6 arasında alınmasına, % 0,5 fark ile her bağlayıcı oranından 3 briket üretilmesine karar verilmiştir. TMA tabakasında ise bağlayıcı oranı % 5,5 ile başlatılmış, % 7,5’te sonlandırılmıştır. Bağlayıcı olarak 50/70 penetrasyonlu TÜPRAŞ bitümü, TMA karışımlarında katkı olarak karışımın % 0,3’ü oranında selülozik elyaf kullanılmıştır.

Çelikhane cürufu kullanılarak üretilen karışımlarda Aşınma, Binder ve BT karışımlarında 1.400 gr cüruf, TMA karışımında ise 1.300 gr cüruf kullanılmasına karar verilmiştir. Doğal agrega kullanılarak üretilen karışımlarda Aşınma, Binder ve BT karışımlarında 1.200 gr agrega, TMA karışımında ise 1.100 gr agrega kullanılmasına karar verilmiştir. Karışım sıcaklığı 145 – 150 °C’dir. Sıkıştırma, karışım sıcaklığından en fazla 10 °C sıcaklık kaybı ile yapılmıştır.

Karışım tasarımları, her iki malzeme için de geleneksel ve deneysel yaklaşımlar ile yapılmıştır. Karşılaştırma kolaylığı açısından, üretilen briketlerin pratik birim hacim ağırlığı (G_{mb} , D_p), stabilite ve akma değerleri, bu çalışma kapsamında temel veriler olarak kabul edilmiştir. G_{mb} , stabilite ve akma değerleri doğrudan ölçümlerden elde edildiği için tasarım yaklaşımlarının değiştirilmesi durumunda dahi sabit kalacaklardır. Belirtilen bu değerler, “Temel Veriler” başlığı altında incelenmiştir.

G_{mm} değeri, geleneksel yaklaşımda hesaplanarak bulunmuş, deneysel yaklaşımda ise ölçülmüştür. İki sonucun da farklılık göstermesi ve boşluk (V_A , V_h), mineral agregalar arası boşluk (V_{MA} , V_{ma}), bitümle dolu boşluk (V_{FA} , V_f) oranlarının hesabını doğrudan etkileyen bir veri olduğu için “Maksimum Teorik Birim Hacim Ağırlık” başlığı altında ele alınmıştır.

V_A , V_{MA} ve V_{FA} değerleri G_{mb} ve G_{mm} değerlerinden türetildiği için ikincil veriler olarak kabul edilmiş ve “İkincil Veriler” başlığı altında incelenmiştir.

Son olarak deneysel yaklaşım ile her iki malzemenin kullanıldığı dört farklı karışımının optimum bağlayıcı oranları belirlenmiştir. Optimum bağlayıcı oranları, ideal boşluk oranlarına göre V_A grafiklerinden elde edilmiştir. G_{mb} ve G_{mm} değerleri ise optimum bağlayıcı oranına göre grafiklerdeki eğilim çizgileri ile hesaplanmıştır. Hesaplanan G_{mb} ve G_{mm} değerleri ile V_A , V_{MA} ve V_{FA} değerleri elde edilmiştir. Söz konusu sonuçlar, “Optimum Bağlayıcı Oranının Tespiti” bölümünde ele alınmıştır.

4.6.1 Temel veriler

Üretilen briketlerin pratik birim hacim ağırlığı (G_{mb} , D_p), stabilite ve akma değerleri bu bölümde sırasıyla Doğal Agregat Aşınma Tabakası, Çelikhane Cürufu Aşınma Tabakası, Doğal Agregat TMA Tabakası, Çelikhane Cürufu TMA Tabakası, Doğal Agregat Binder Tabakası, Çelikhane Cürufu Binder Tabakası, Doğal Agregat BT Tabakası ve Çelikhane Cürufu BT Tabakası başlıkları altında incelenmiştir.

4.6.1.1 Doğal agregat aşınma tabakası

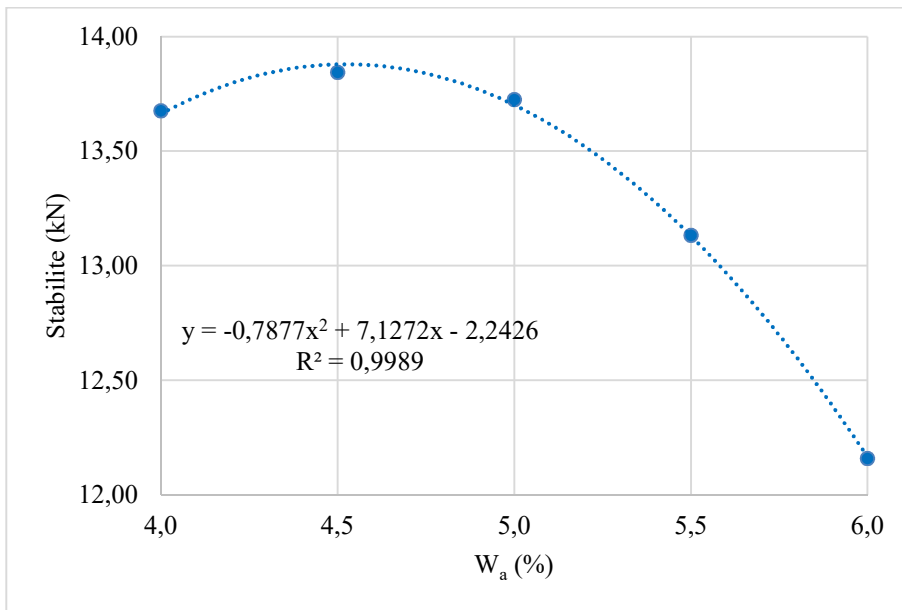
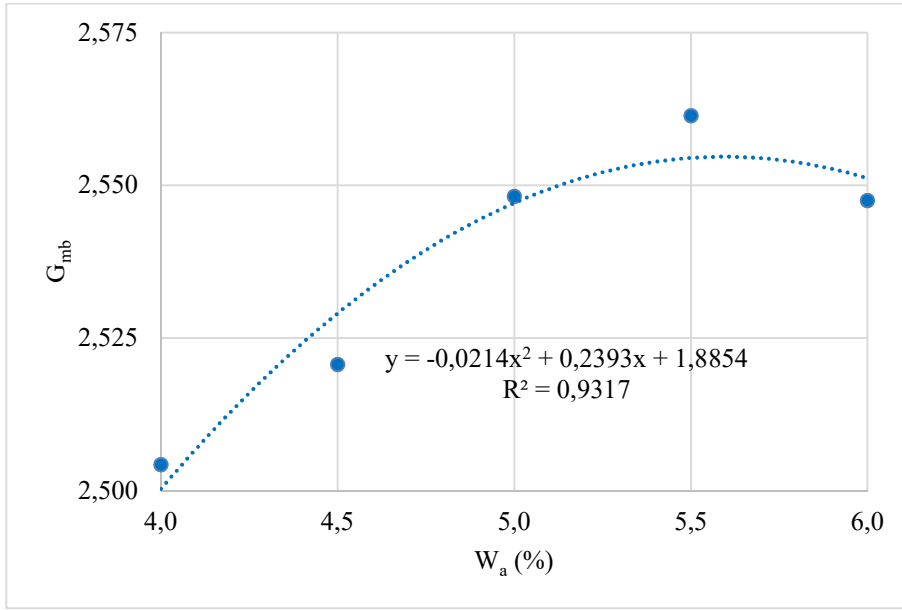
Doğal agregat aşınma tabakası tasarımında 1.200 gr agregat kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 4,0 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 6,0 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

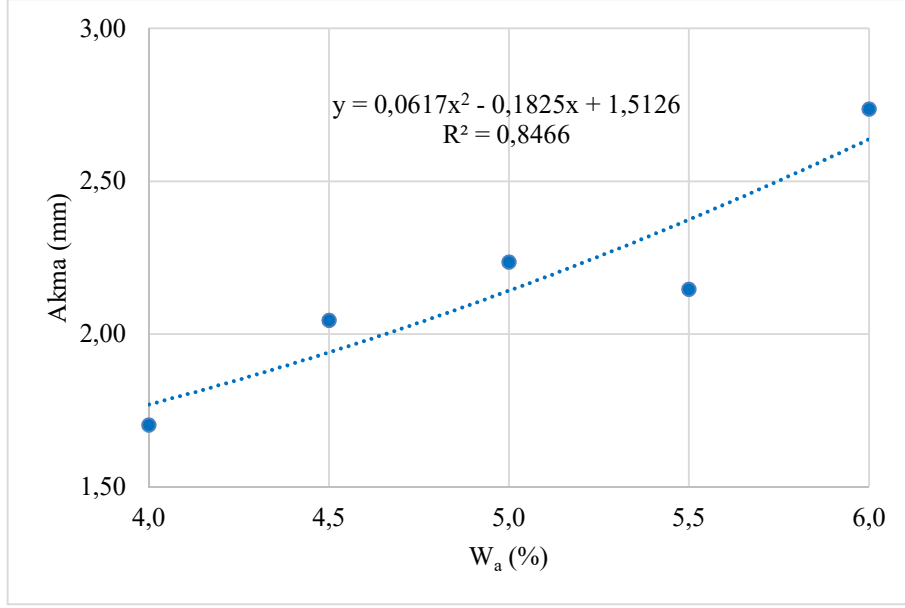
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.18’de sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb} , stabilite ve akma değerlerinin

grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33'te sunulmuştur.

Çizelge 4.18 : Doğal agrega aşınma tabakası Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar

W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
4,0	2,504	1,70	13,68
4,5	2,521	2,04	13,84
5,0	2,548	2,24	13,73
5,5	2,561	2,15	13,13
6,0	2,548	2,74	12,16



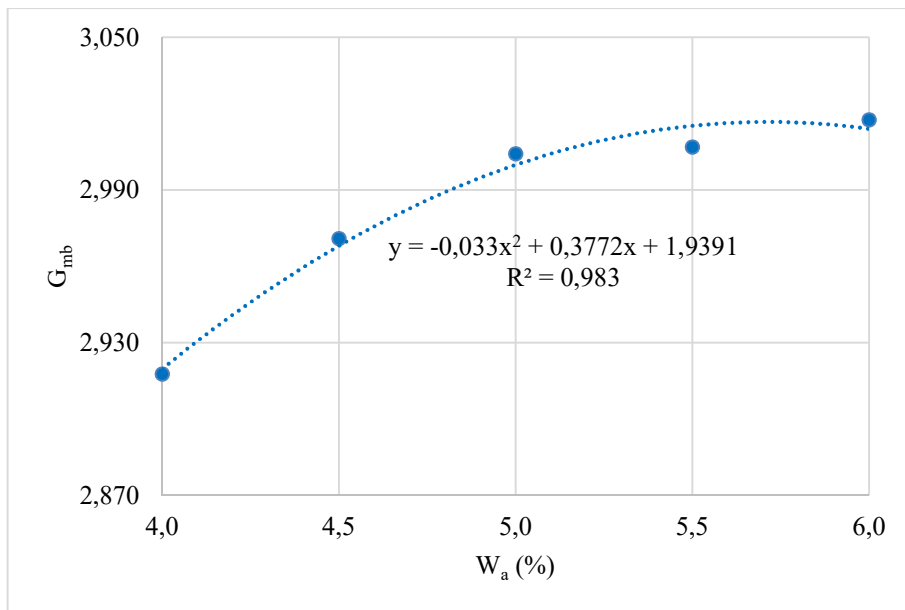


Şekil 4.33 : Doğal agrega aşınma tabakası W_a -Akma grafiği.

4.6.1.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası

Çelikhane cürufu aşınma tabakası tasarımında 1.400 gr cüruf kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 4,0 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 6,0 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

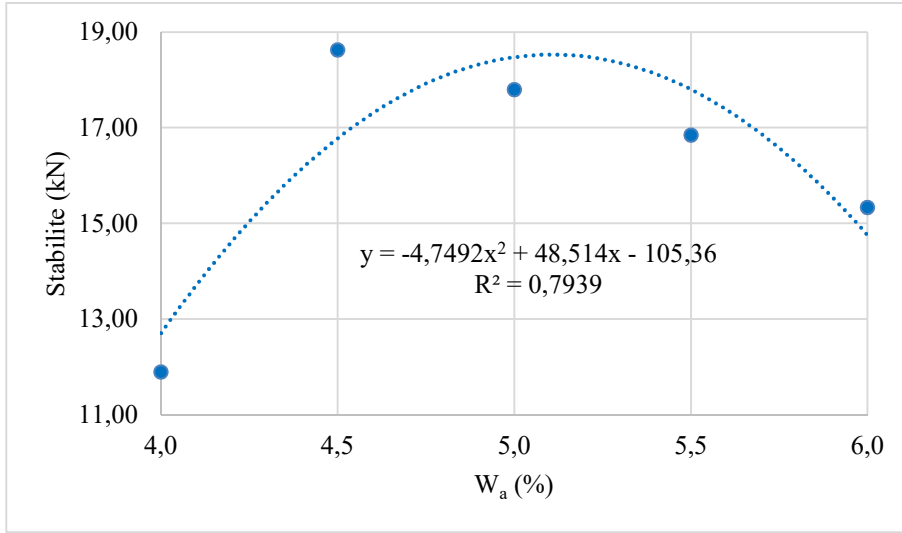
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.19’da sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb} , stabilite ve akma değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36’da sunulmuştur.



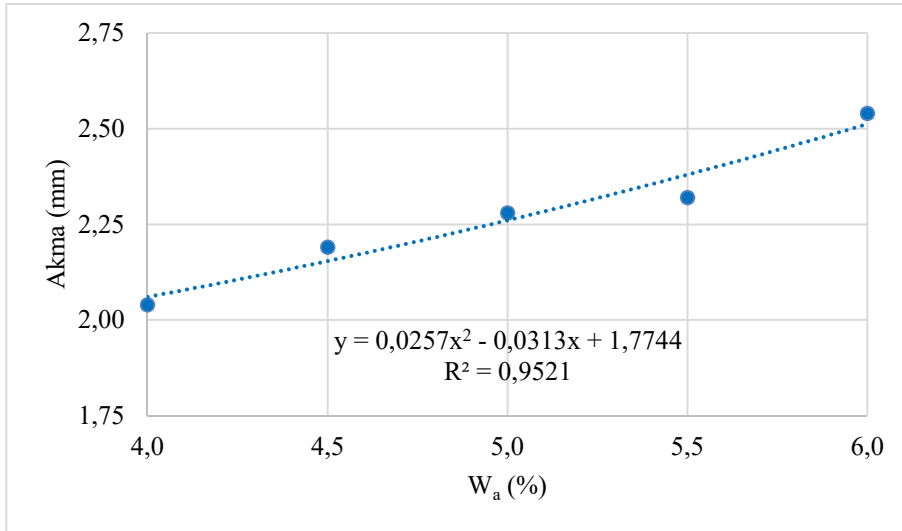
Şekil 4.34 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası W_a - G_{mb} grafiği.

Çizelge 4.19 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar

W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
4,0	2,918	2,04	11,89
4,5	2,971	2,19	18,63
5,0	3,004	2,28	17,80
5,5	3,007	2,32	16,85
6,0	3,018	2,54	15,34



Şekil 4.35 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası W_a -Stabilite grafiği.



Şekil 4.36 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası W_a -Akma grafiği.

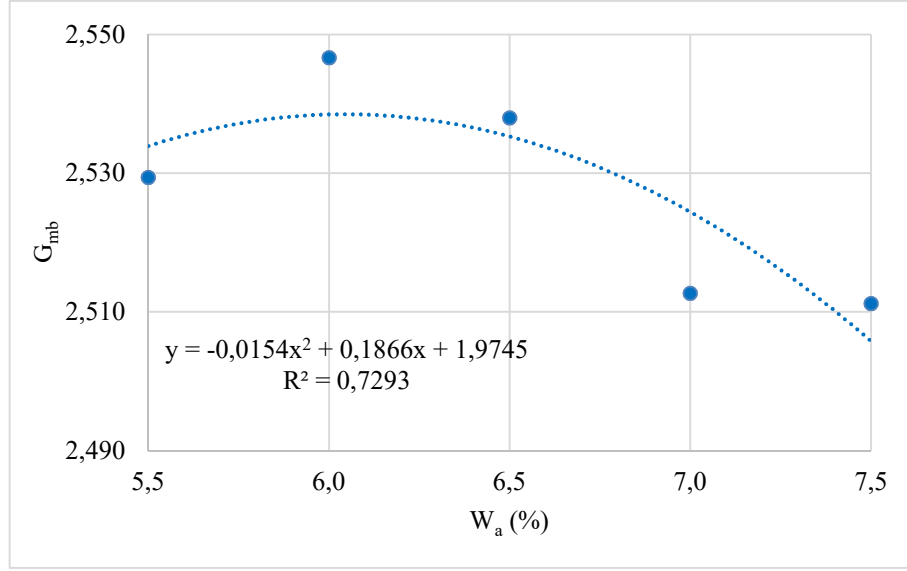
4.6.1.3 Doğal agrega TMA tabakası

Doğal agrega TMA tabakası tasarımında 1.100 gr agrega ve karışımın ağırlıkça % 0,3'ü oranında selülozik elyaf katkısı kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 5,5 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 7,5 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

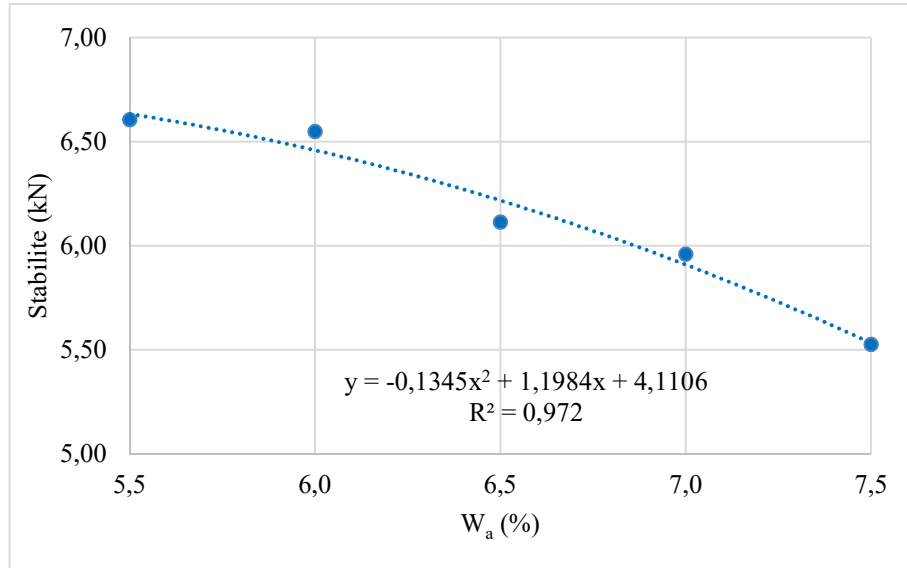
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.20’de sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb} , stabilite ve akma değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.37, 4.38 ve 4.39’da sunulmuştur.

Çizelge 4.20 : Doğal agrega TMA Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar.

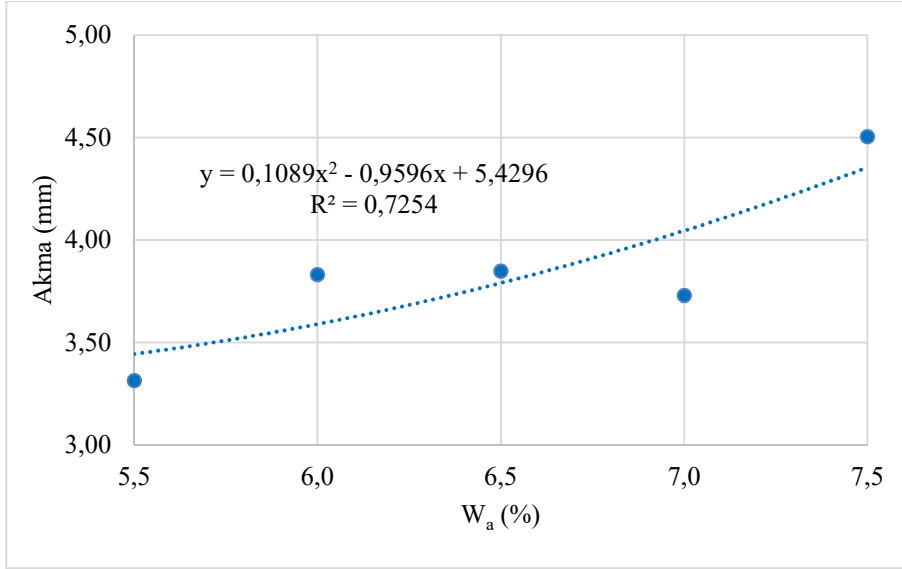
W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
5,5	2,529	3,31	6,61
6,0	2,547	3,83	6,55
6,5	2,538	3,85	6,11
7,0	2,513	3,73	5,96
7,5	2,511	4,50	5,53



Şekil 4.37 : Doğal agrega TMA tabakası W_a - G_{mb} grafiği



Şekil 4.38 : Doğal agrega TMA tabakası W_a -Stabilite grafiği.

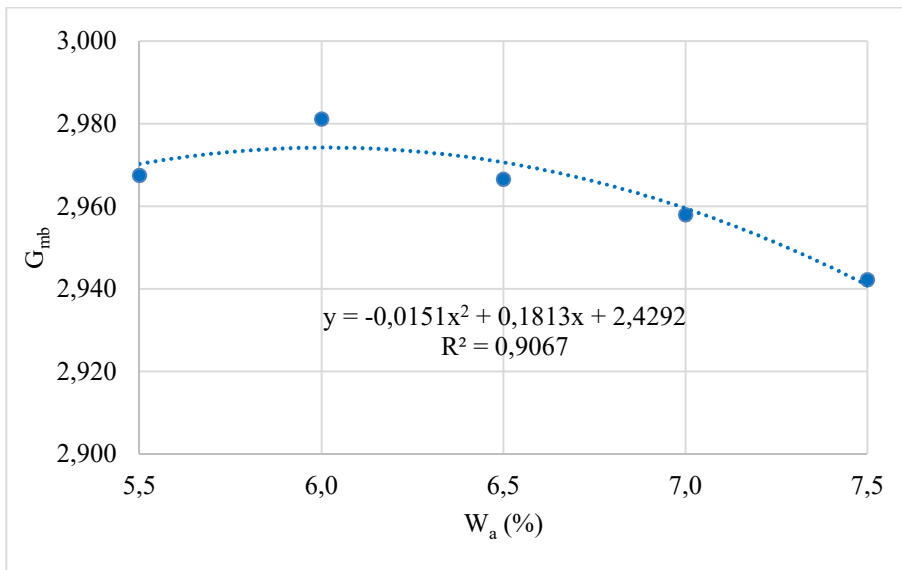


Şekil 4.39 : Doğal agrega TMA tabakası W_a-Akma grafiği.

4.6.1.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası

Çelikhane cürufu TMA tabakası tasarımında 1.300 gr cüruf, karışımın ağırlıkça % 0,3'ü oranında selülozik elyaf katkısı kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 5,5 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 7,5 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

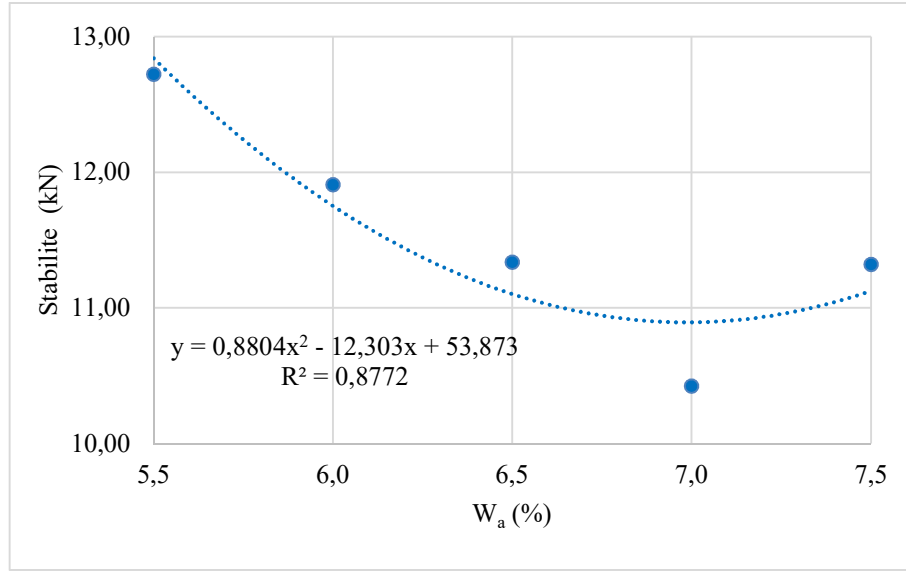
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.21'de sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb}, stabilite ve akma değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.40, 4.41 ve 4.42'de sunulmuştur.



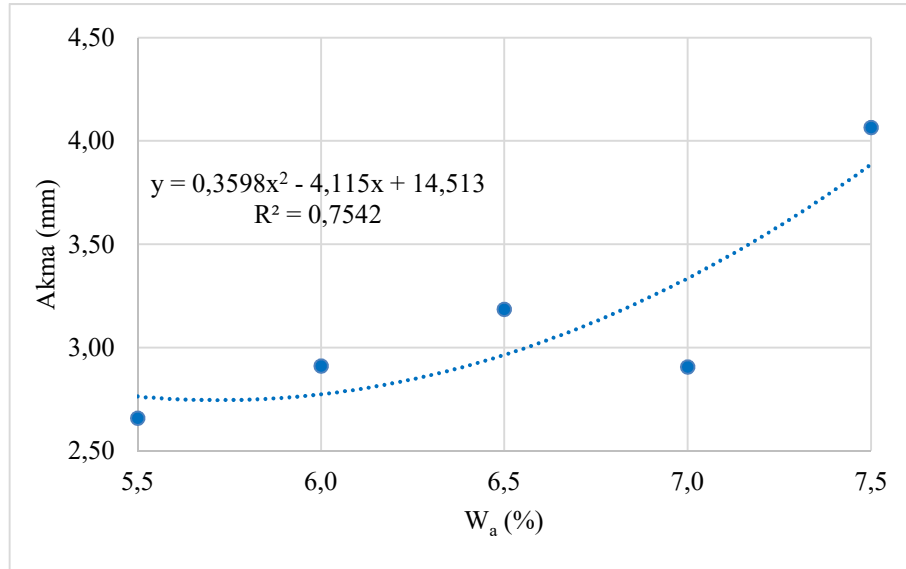
Şekil 4.40 : Çelikhane cürufu TMA tabakası W_a-G_{mb} grafiği.

Çizelge 4.21 : Çelikhane cürufu TMA tabakası Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar.

W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
5,5	2,968	2,66	12,72
6,0	2,981	2,91	11,91
6,5	2,967	3,19	11,34
7,0	2,958	2,91	10,43
7,5	2,942	4,07	11,32



Şekil 4.41 : Çelikhane cürufu TMA tabakası W_a -Stabilite grafiği.



Şekil 4.42 : Çelikhane cürufu TMA tabakası W_a -Akma grafiği.

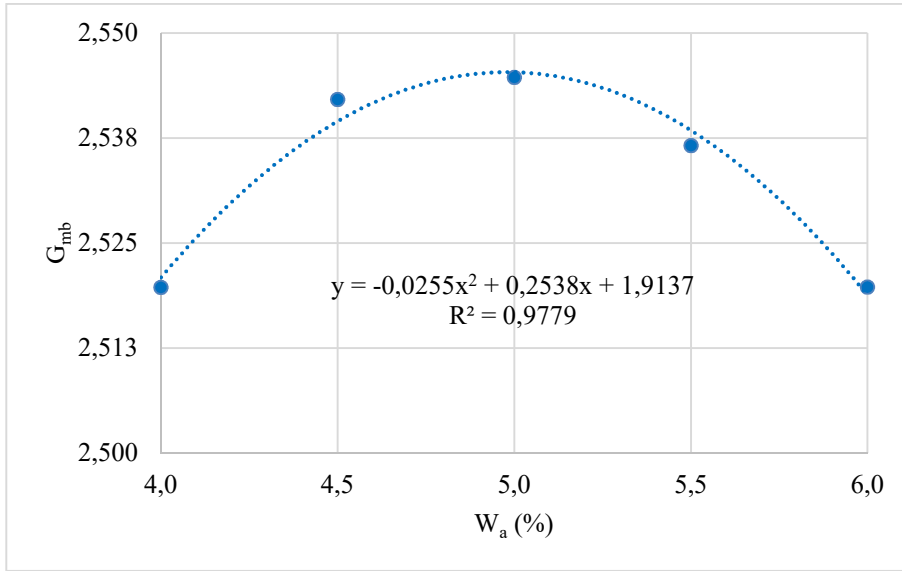
4.6.1.5 Doğal agrega binder tabakası

Doğal agrega binder tabakası tasarımında 1.200 gr agrega kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 4,0 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 6,0 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

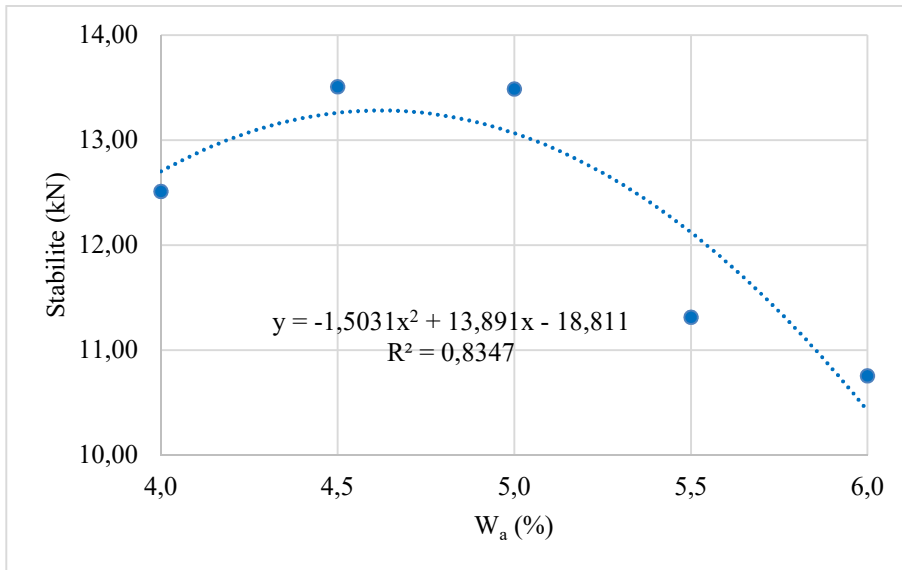
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.22’de sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb} , stabilite ve akma değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.43, 4.44 ve 4.45’te sunulmuştur.

Çizelge 4.22 : Doğal agrega binder tabakası Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar.

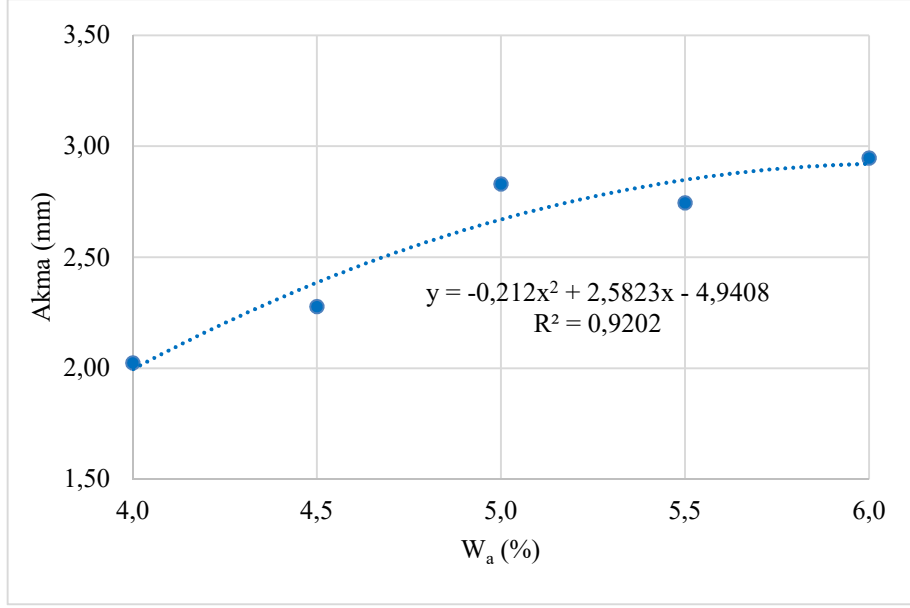
W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
4,0	2,520	2,02	12,51
4,5	2,542	2,28	13,51
5,0	2,545	2,83	13,49
5,5	2,537	2,75	11,32
6,0	2,520	2,95	10,76



Şekil 4.43 : Doğal agrega binder tabakası W_a - G_{mb} grafiği



Şekil 4.44 : Doğal agrega binder tabakası W_a -Stabilite grafiği.

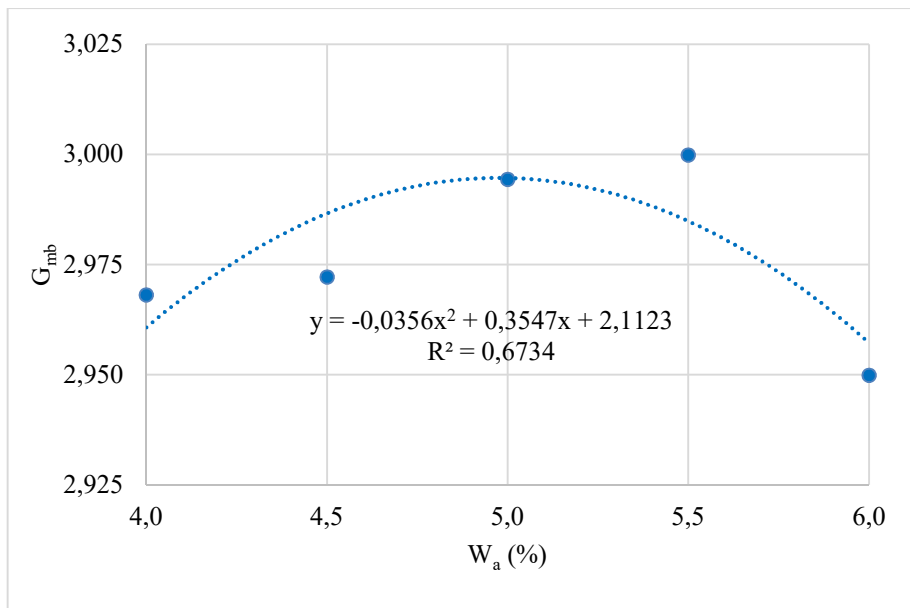


Şekil 4.45 : Doğal agrega binder tabakası W_a-Akma grafiği.

4.6.1.6 Çelikhane cürufu binder tabakası

Çelikhane cürufu binder tabakası tasarımında 1.400 gr cüruf kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 4,0 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 6,0 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

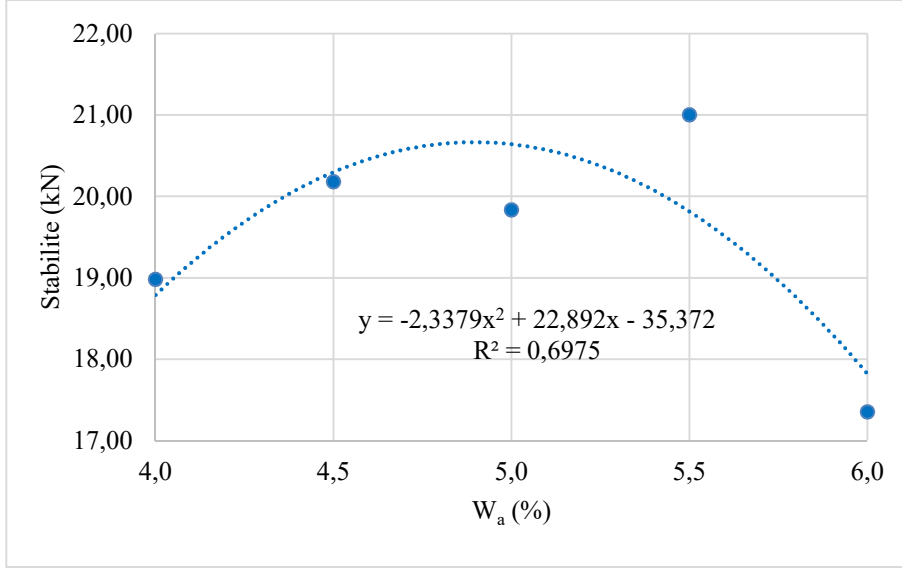
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.23'te sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb}, stabilite ve akma değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.46, 4.47 ve 4.48'de sunulmuştur.



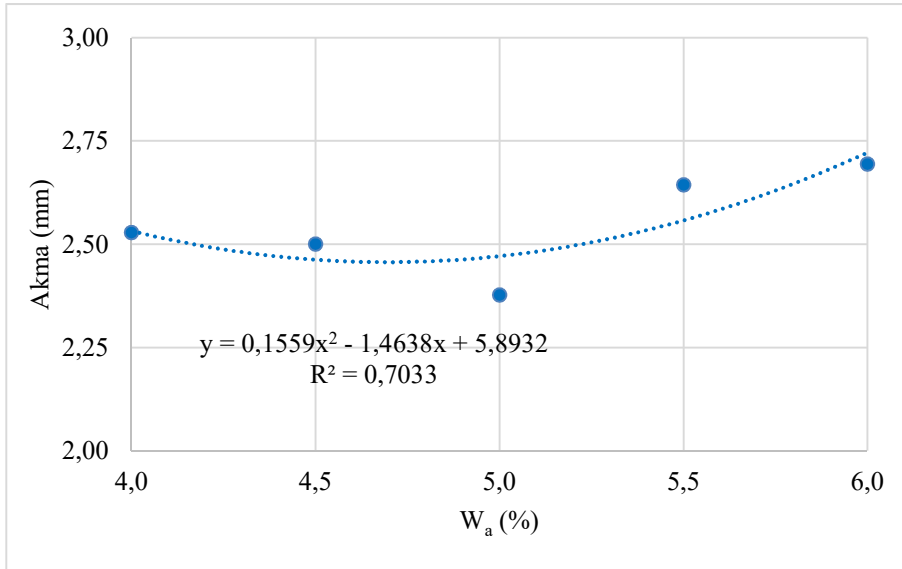
Şekil 4.46 : Çelikhane cürufu binder tabakası W_a-G_{mb} grafiği.

Çizelge 4.23 : Çelikhane cürufu bündler tabakası Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar.

W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
4,00	2,968	2,53	19,14
4,50	2,972	2,50	20,35
5,00	2,994	2,38	19,99
5,50	3,000	2,64	21,18
6,00	2,950	2,69	17,36



Şekil 4.47 : Çelikhane cürufu binder tabakası W_a -Stabilite grafiği.



Şekil 4.48 : Çelikhane cürufu binder tabakası W_a -Akma grafiği.

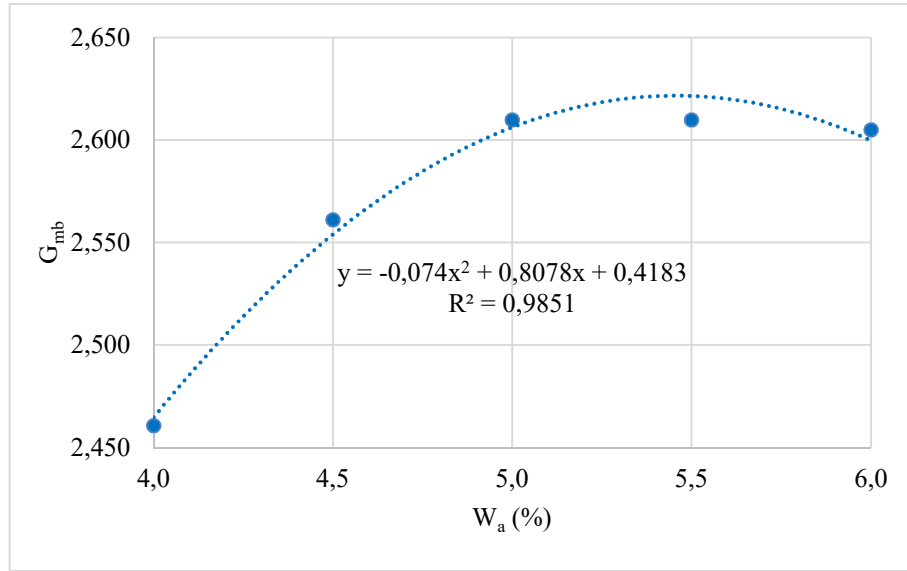
4.6.1.7 Doğal agregaya bitümlü temel tabakası

Doğal agregaya bitümlü temel tabakası tasarımında 1.200 gr agregaya kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 4,0 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 6,0 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

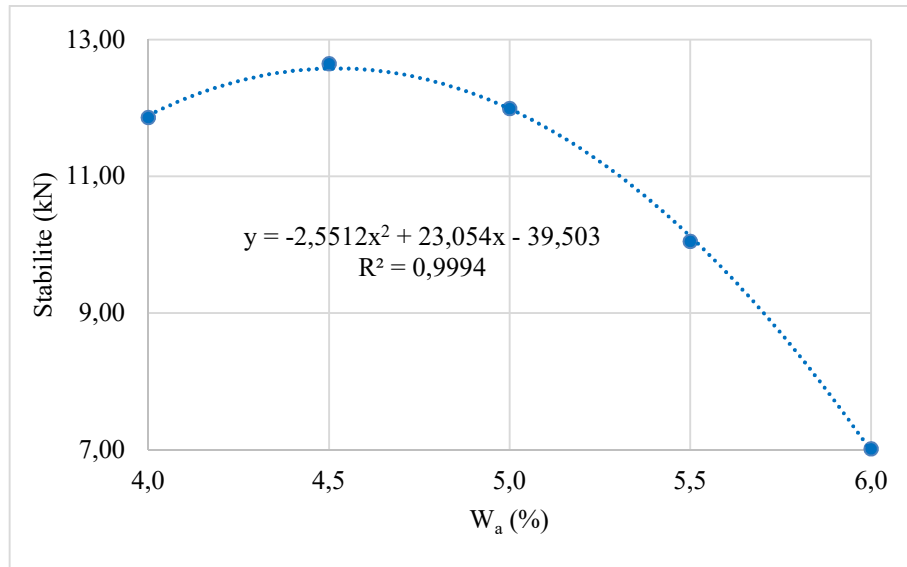
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.24'te sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb} , stabilite ve akma değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.49, 4.50 ve 4.51'de sunulmuştur.

Çizelge 4.24 : Doğal agrega BT tabakası Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar.

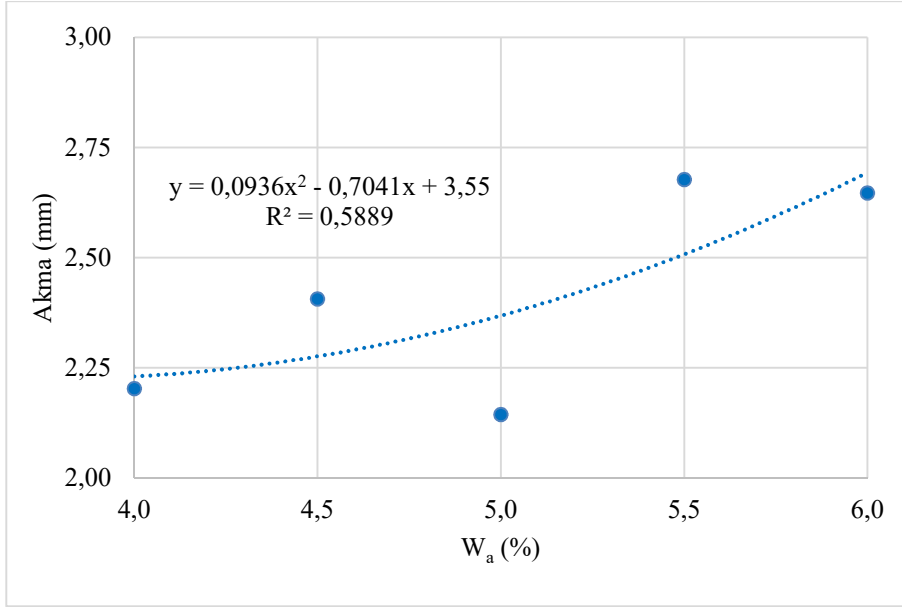
W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
4,00	2,461	2,20	11,86
4,50	2,561	2,41	12,65
5,00	2,610	2,14	11,99
5,50	2,610	2,68	10,05
6,00	2,605	2,65	7,01



Şekil 4.49 : Doğal agrega BT tabakası W_a - G_{mb} grafiği.



Şekil 4.50 : Doğal agrega BT tabakası W_a -Stabilite grafiği.

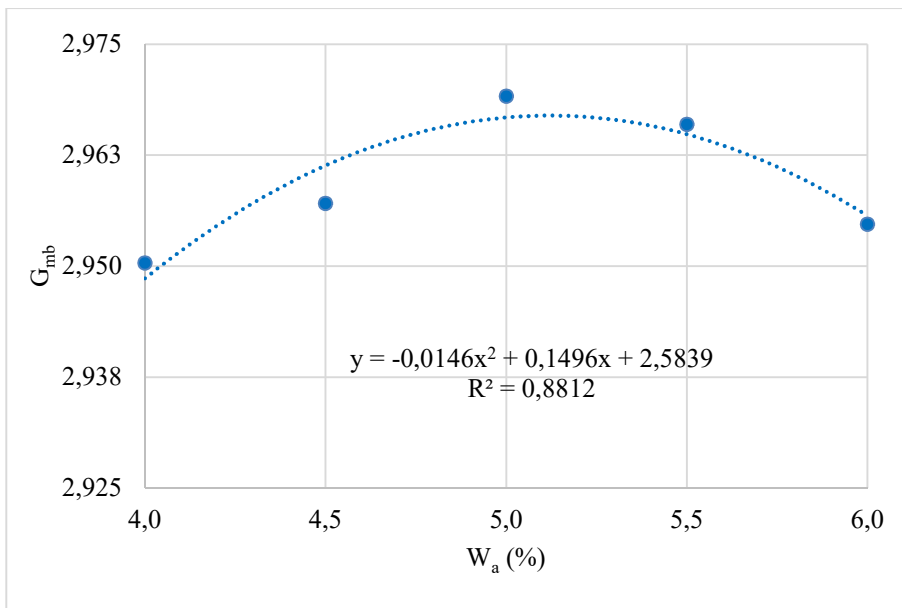


Şekil 4.51 : Doğal agrega BT tabakası W_a-Akma grafiği.

4.6.1.8 Çelikhane cürufu bitümlü temel tabakası

Çelikhane cürufu BT tabakası tasarımında 1.400 gr cüruf kullanılmıştır. Karışım tasarımına ağırlıkça % 4,0 bağlayıcı oranı ile başlanmış ve her grupta % 0,5 artışla tasarım, % 6,0 bağlayıcı oranında sonlandırılmıştır.

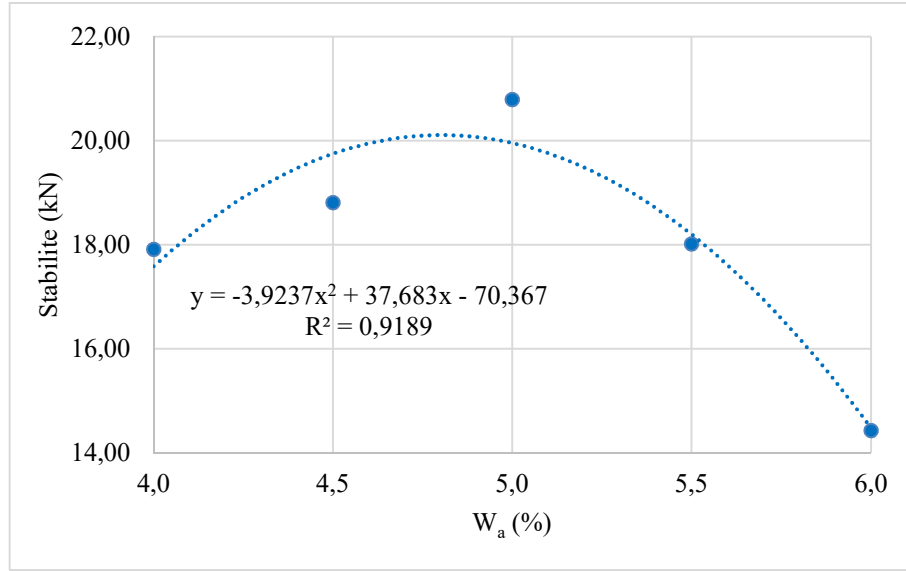
Üretilen briketlere ait temel veriler, Çizelge 4.25'te sunulmuştur. Model oluşturulabilmesi için briketlerden elde edilen G_{mb}, stabilite ve akma değerlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafiklere ikinci derece eğilim çizgileri atanmıştır. Grafikler Şekil 4.52, 4.53 ve 4.54'te sunulmuştur.



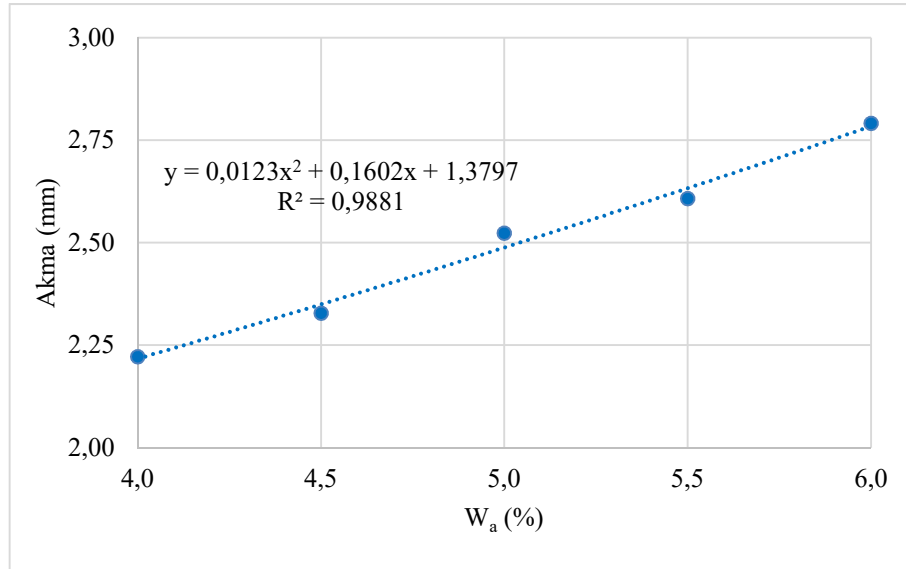
Şekil 4.52 : Çelikhane cürufu BT tabakası W_a-G_{mb} grafiği.

Çizelge 4.25 : Çelikhane cürufu BT tabakası Marshall briketlerinden elde edilen temel sonuçlar.

W_a (%)	G_{mb}	Akma (mm)	Stabilite (kN)
4,00	2,950	2,22	17,91
4,50	2,957	2,33	18,81
5,00	2,969	2,52	20,79
5,50	2,966	2,61	18,02
6,00	2,955	2,79	14,43



Şekil 4.53 : Çelikhane cürufu BT tabakası W_a -Stabilite grafiği.



Şekil 4.54 : Çelikhane cürufu BT tabakası W_a -Akma grafiği.

4.6.2 Maksimum teorik birim hacim ağırlık

Bu bölümde çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen her tabakanın, agrega karışımına ait hacmen ve ağırlıkça zahiri özgül ağırlık (G_{sa}) ve hacim özgül ağırlık

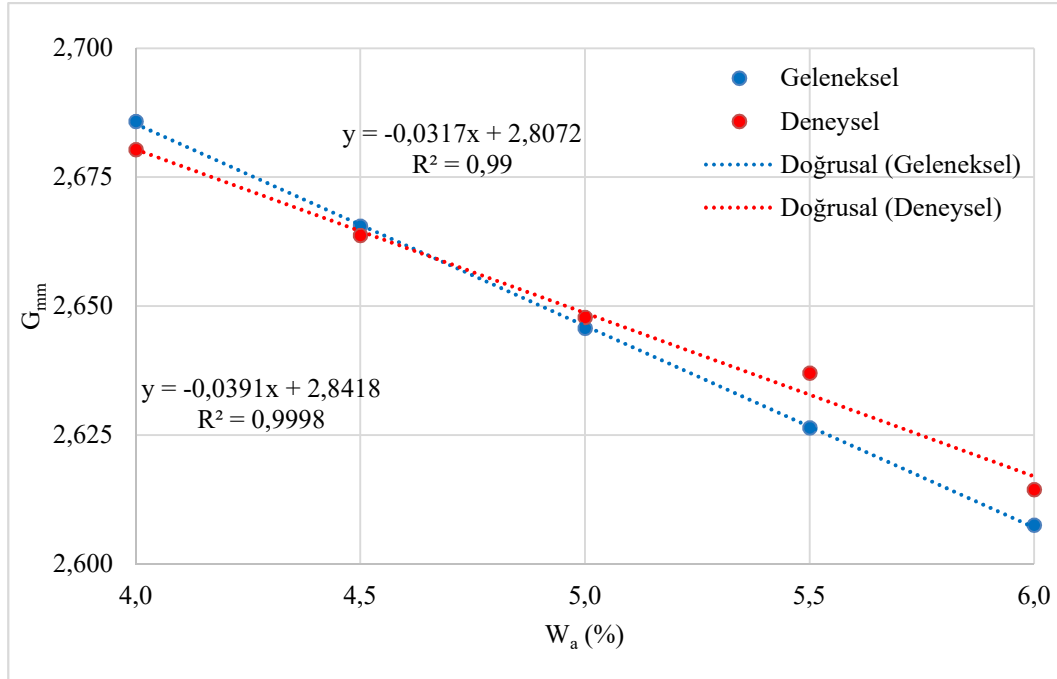
(G_{sb}) hesapları, bu veriler kullanılarak hesaplanan agrega karışımı efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) değerleri sunulmuştur.

Geleneksel yaklaşımda G_{sa} ve G_{sb} değerleri granülometriye göre ağırlıkça hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler ile G_{mm} değerleri elde edilmiştir. Deneysel yaklaşımda G_{sa} ve G_{sb} değerleri granülometriye göre hacmen hesaplanmıştır. G_{mm} değerleri ölçülmüştür.

4.6.2.1 Doğal agrega aşınma tabakası

Doğal agrega aşınma tabakası tasarımında, agrega karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; sırasıyla 2,884 ve 2,853 olmak üzere aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 2,868 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında eğilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.55'te sunulmuştur.

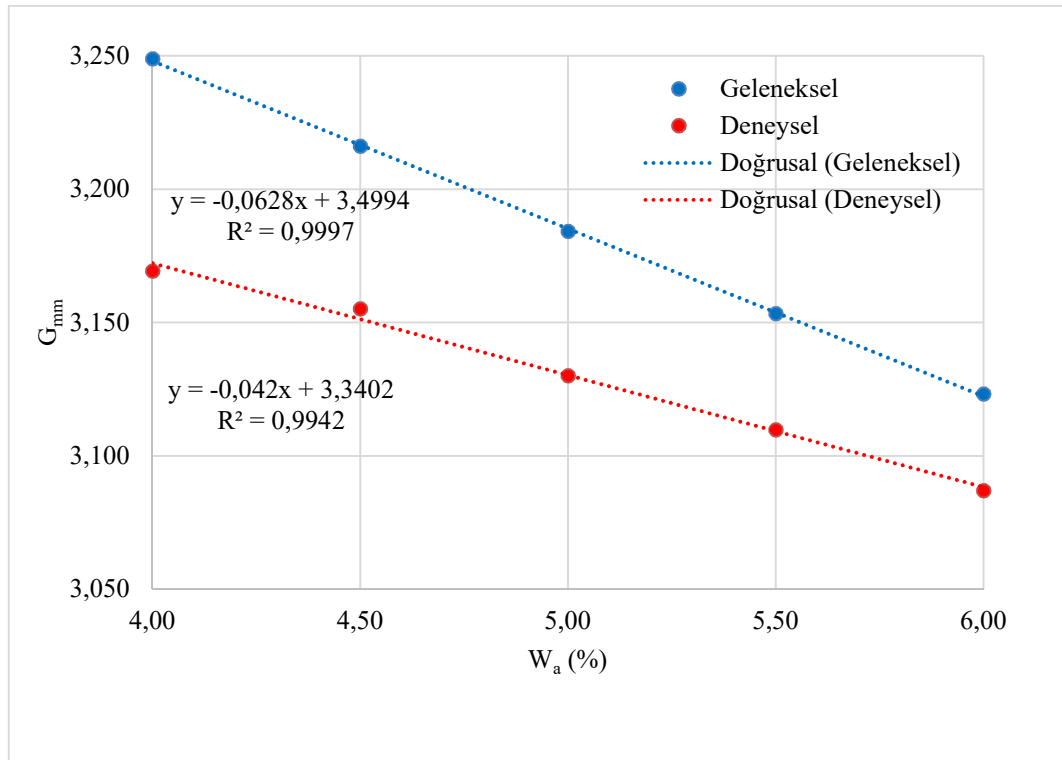


Şekil 4.55 : Doğal agrega aşınma tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.2.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası

Çelikhane cürufu aşınma tabakası tasarımında, cüruf karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; G_{sa} değerleri, sırasıyla 3,661 ve 3,665, G_{sb} değerleri ise 3,436 ve 3,439 bulunmuştur. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 3,552 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında eğilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.56’da sunulmuştur.

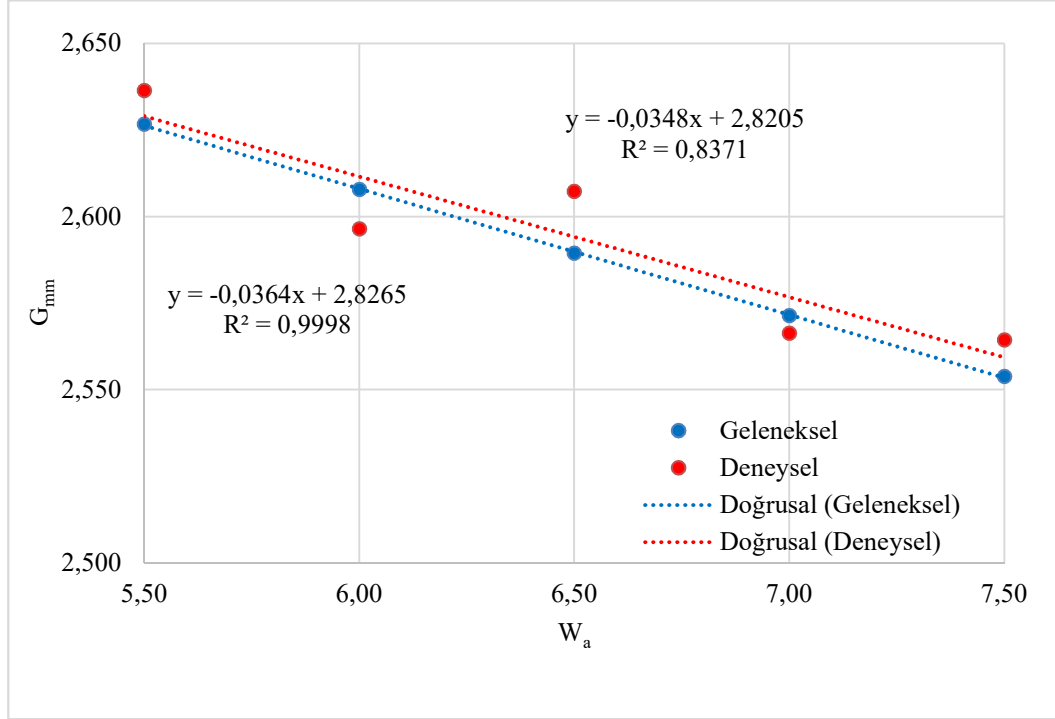


Şekil 4.56 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.2.3 Doğal agregat TMA tabakası

Doğal agregat TMA tabakası tasarımında, agregat karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; sırasıyla 2,884 ve 2,853 olmak üzere aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 2,869 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında eğilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.57’de sunulmuştur.

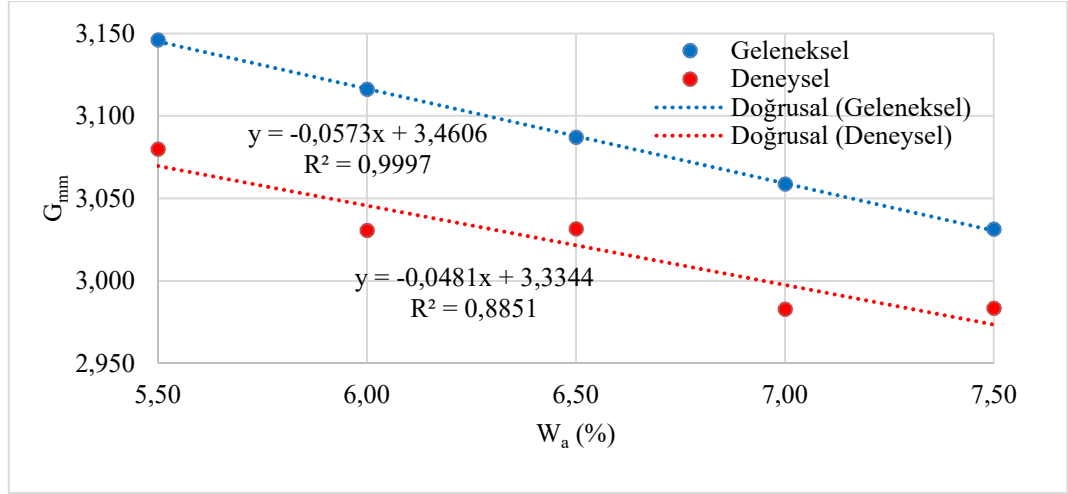


Şekil 4.57 : Doğal agrega TMA tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.2.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası

Çelikhane cürufu TMA tabakası tasarımında, cüruf karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; G_{sa} değerleri, sırasıyla 3,659 ve 3,662, G_{sb} değerleri ise 3,420 ve 3,422 bulunmuştur. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 3,452 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında, eğilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.58’de sunulmuştur.

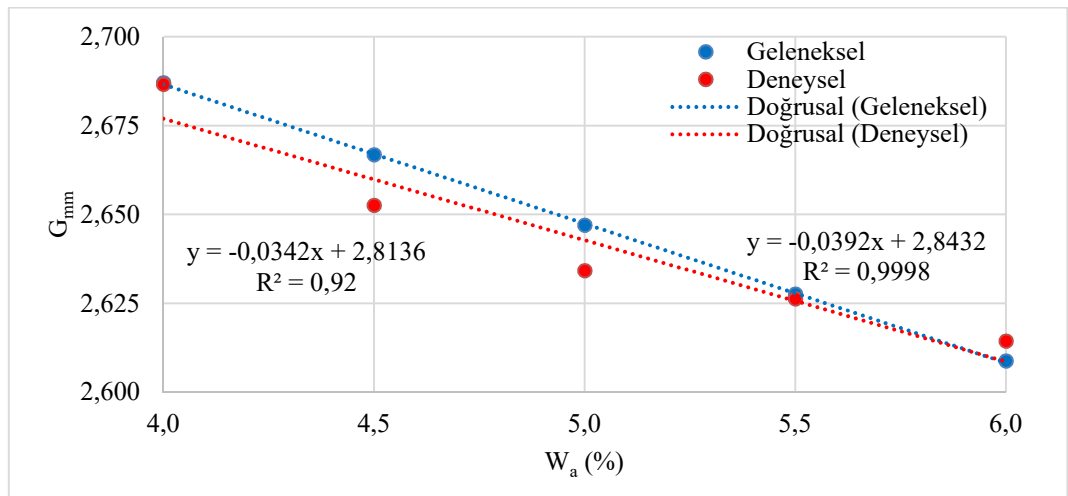


Şekil 4.58 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.2.5 Doğal agreg a binder tabakası

Doğal agreg a binder tabakası tasarımında, agreg a karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; sırasıyla 2,885 ve 2,854 olmak üzere aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 2,870 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğ ilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında eğ ilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.59’da sunulmuştur.

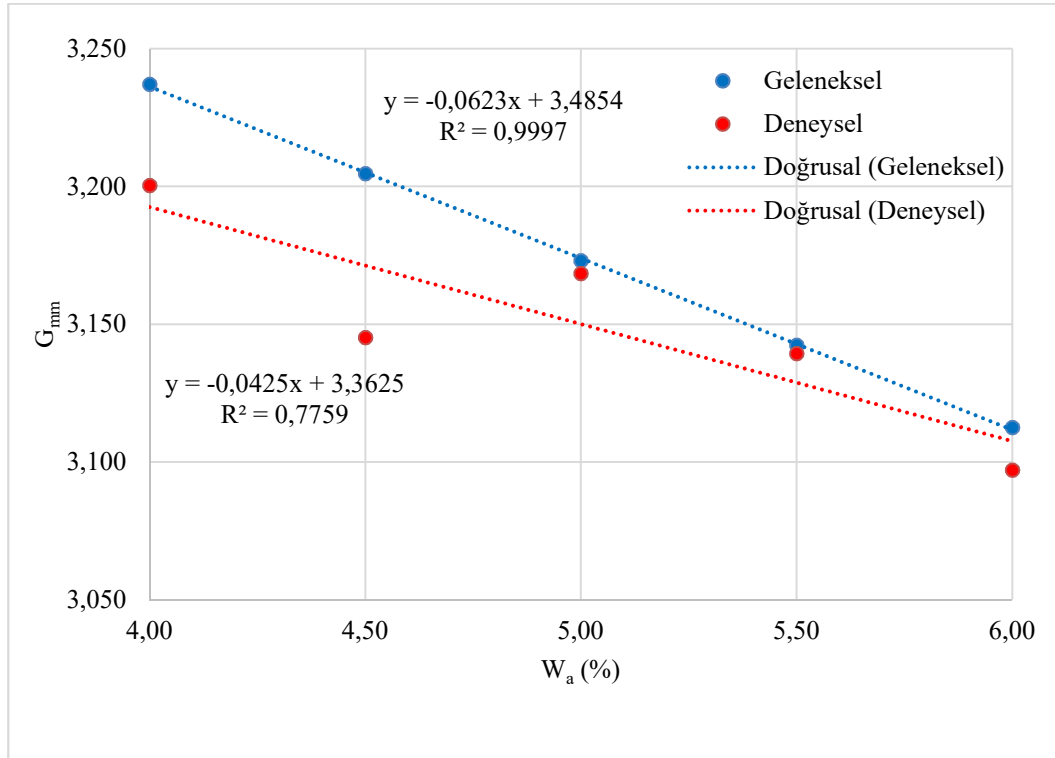


Şekil 4.59 : Doğal agreg a binder tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.2.6 Çelikhane cürufu binder tabakası

Çelikhane cürufu binder tabakası tasarımında, cüruf karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; G_{sa} değerleri, sırasıyla 3,688 ve 3,667, G_{sb} değerleri ise 3,406 ve 3,408 bulunmuştur. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 3,537 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında eğilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.60'ta sunulmuştur.

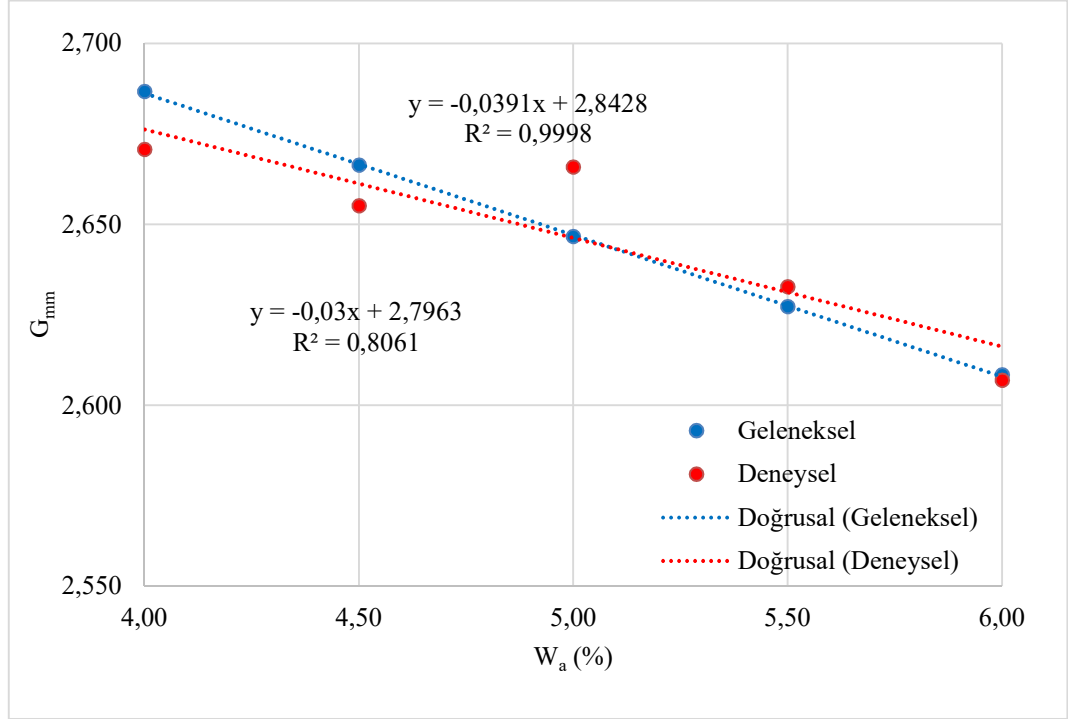


Şekil 4.60 : Çelikhane cürufu binder tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.2.7 Doğal agrega BT tabakası

Doğal agrega binder tabakası tasarımında, agrega karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; G_{sa} 2,889 ve 2,885, G_{sb} ise her iki agrega karışımı için de 2,854 olarak elde edilmiştir. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 2,869 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında eğilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.61’de sunulmuştur.

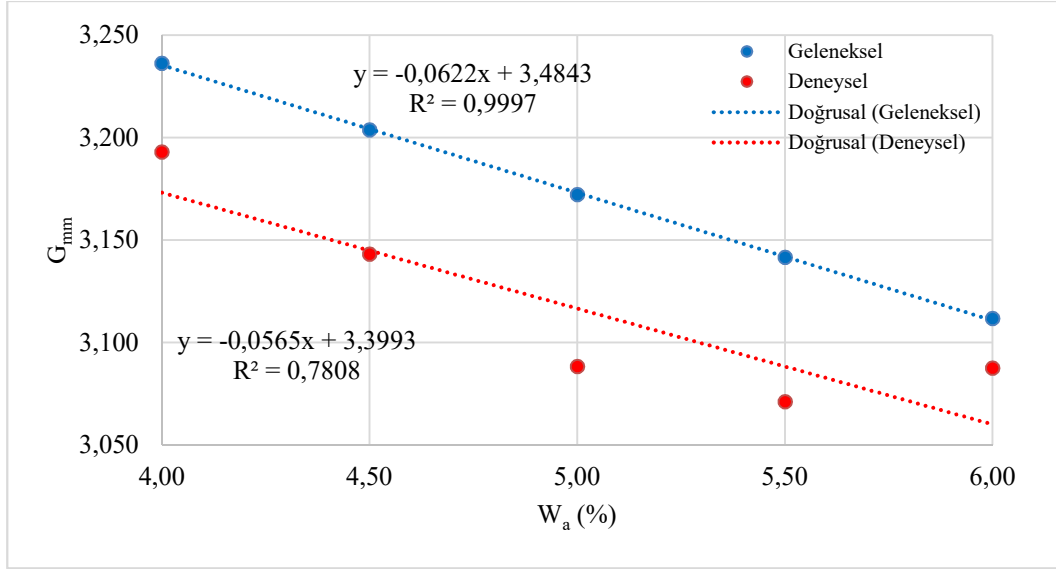


Şekil 4.61 : Doğal agrega BT tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.2.8 Çelikhane cürufu BT tabakası

Çelikhane cürufu binder tabakası tasarımında, cüruf karışımı için hacmen ve ağırlıkça yapılan G_{sa} ve G_{sb} hesaplarında; G_{sa} değerleri, sırasıyla 3,688 ve 3,660, G_{sb} değerleri ise 3,410 ve 3,412 bulunmuştur. Bu durumda geleneksel yaklaşımla, karışımın efektif birim hacim ağırlığı (G_{eff}) 3,536 olarak belirlenmiştir.

Geleneksel yöntemde kullanılacak G_{mm} değerleri hesaplanmıştır. Deneysel yöntemde ise G_{mm} değerleri, ASTM D2041 standardı uyarınca ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar grafiğe işlenmiş ve doğrusal eğilim çizgisi atanmıştır. Deneysel tasarımın ileriki aşamalarında eğilim çizgisi denkleminde elde edilen sonuçlar esas alınmıştır. Geleneksel ve deneysel yöntemde elde edilen G_{mm} değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.62’de sunulmuştur.



Şekil 4.62 : Doğal agrega BT tabakası, hesaplanan ve ölçülen G_{mm} değerlerinin karşılaştırması.

4.6.3 İkincil veriler

G_{mb} ve G_{mm} değerlerinden türetilen ve ikincil veriler olarak tanımlanan VA (V_h), VMA (V_{ma}) ve VFA (V_f) sonuçları bu bölümde incelenmiştir. Geleneksel ve deneysel yöntemden elde edilen sonuçlar aynı grafikler içerisinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

4.6.3.1 Doğal agrega aşınma tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.26 ve 4.27'de sunulmuştur.

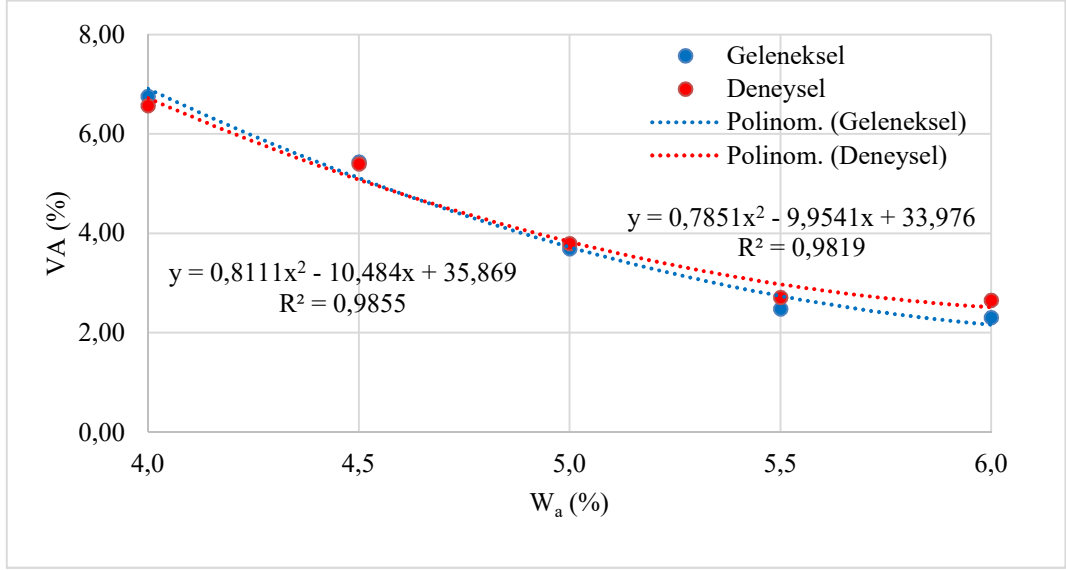
Çizelge 4.26 : Doğal agrega aşınma tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	6,76	15,59	56,68
4,50	5,43	15,45	64,86
5,00	3,69	14,93	75,33
5,50	2,48	14,90	83,39
6,00	2,30	15,76	85,39

Çizelge 4.27 : Doğal agrega aşınma tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

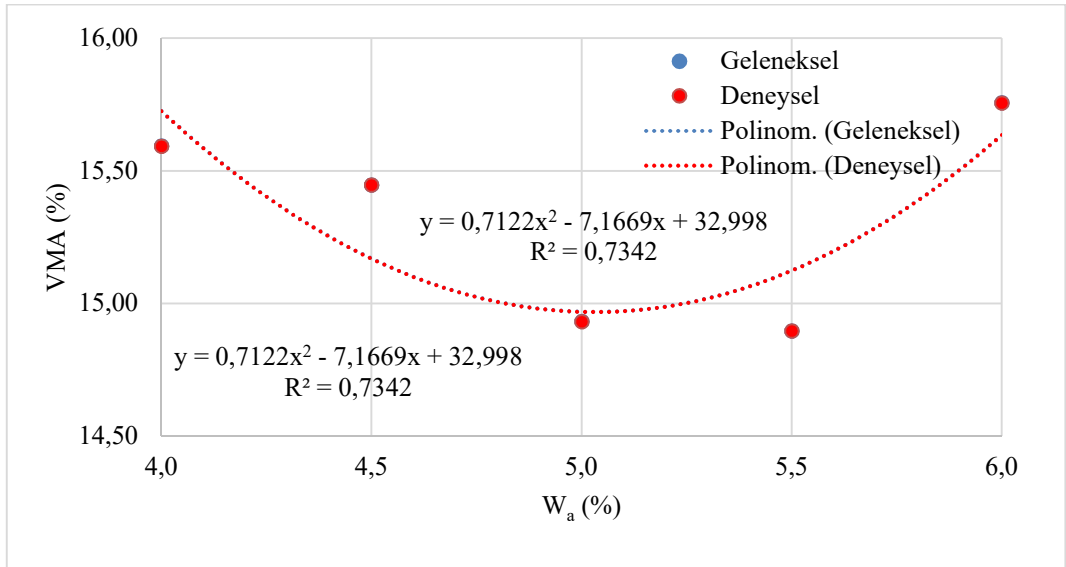
W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	6,57	15,59	57,88
4,50	5,40	15,45	65,08
5,00	3,79	14,93	74,61
5,50	2,71	14,90	81,79
6,00	2,65	15,76	83,16

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.63, 4.64 ve 4.65'te sunulmuştur.



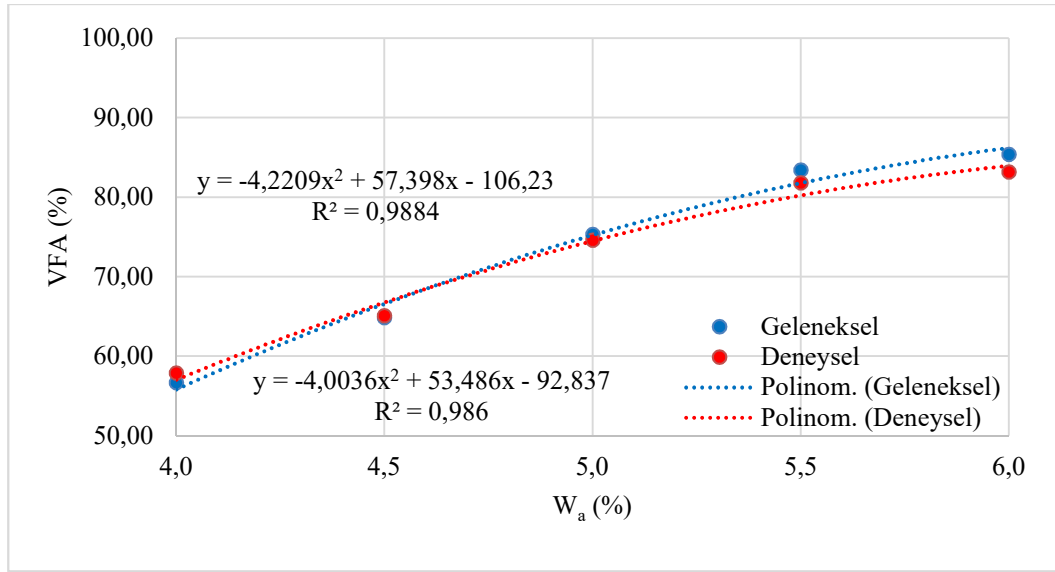
Şekil 4.63 : Doğal agrega aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.

Her iki tasarım yöntemiyle yapılan hesaplarda; VA değerlerinde büyük bir fark olmadığı fakat % 5,5 ve % 6 bağlayıcı oranlarına sahip briketlerde, absorbe edilen bitümün, hesaplanandan fazla olması nedeniyle boşluk oranının, geleneksel yaklaşıma oranla daha yüksek olduğu Şekil 4.63'te görülmektedir.



Şekil 4.64 : Doğal agrega aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Her iki tasarım yaklaşımı ile hesaplanan VMA değerlerinin tamamen örtüştüğü Şekil 4.64'te görülmektedir.



Şekil 4.65 : Doğal agrega aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

Özellikle yüksek bağlayıcı oranlarında (% 5,5 - 6,0), agregalar tarafından absorbe edilen bitüm nedeniyle bağlayıcı ile dolu boşluk değerleri, geleneksel yöntemle elde edilen sonuçlardan daha düşüktür.

4.6.3.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.28 ve 4.29’da sunulmuştur.

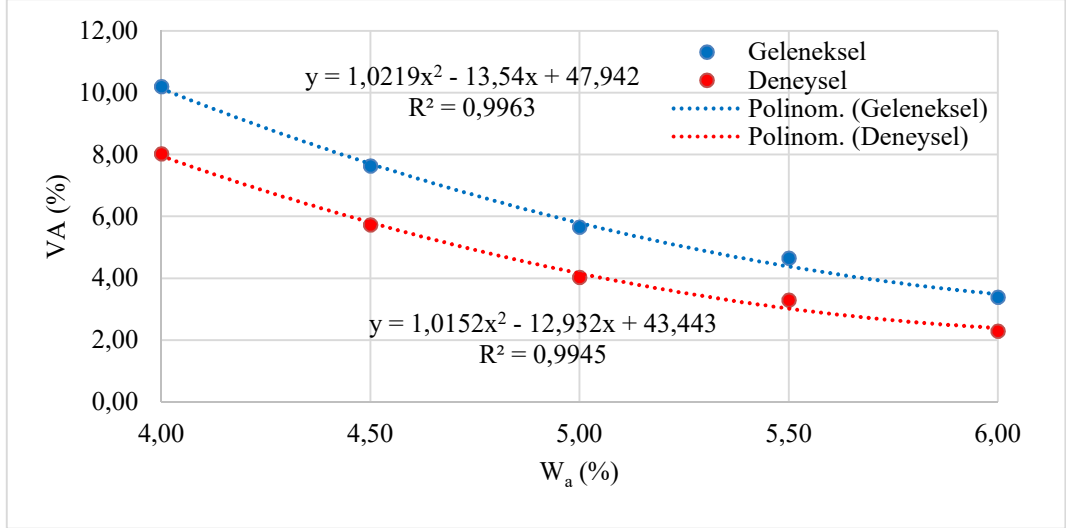
Çizelge 4.28 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,0	10,19	18,42	44,65
4,5	7,63	17,33	56,02
5,0	5,65	16,80	66,35
5,5	4,64	17,12	72,92
6,0	3,38	17,22	80,35

Çizelge 4.29 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

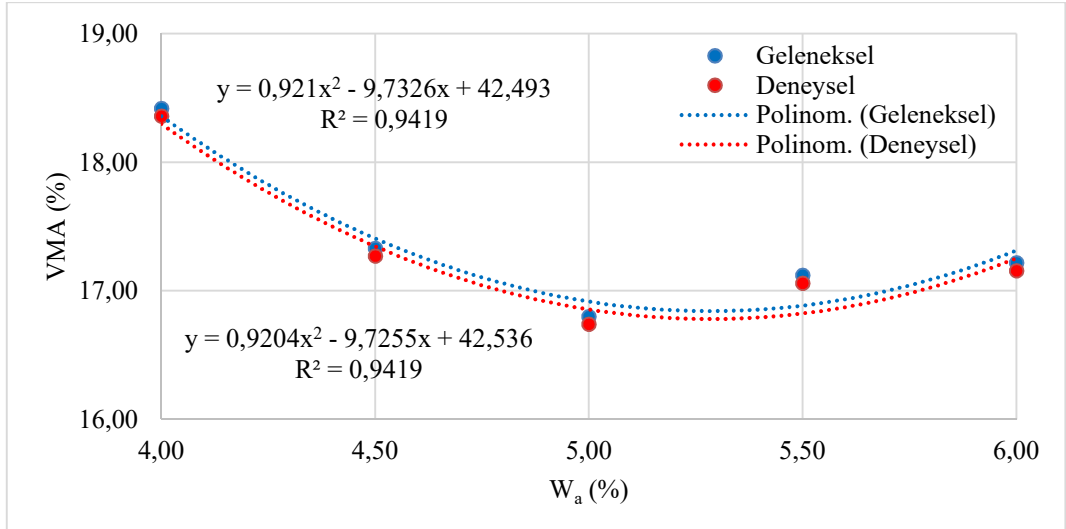
W_a	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	8,02	18,36	56,31
4,50	5,72	17,27	66,89
5,00	4,02	16,74	75,96
5,50	3,29	17,06	80,76
6,00	2,29	17,16	86,68

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.66, 4.67 ve 4.68’de sunulmuştur.



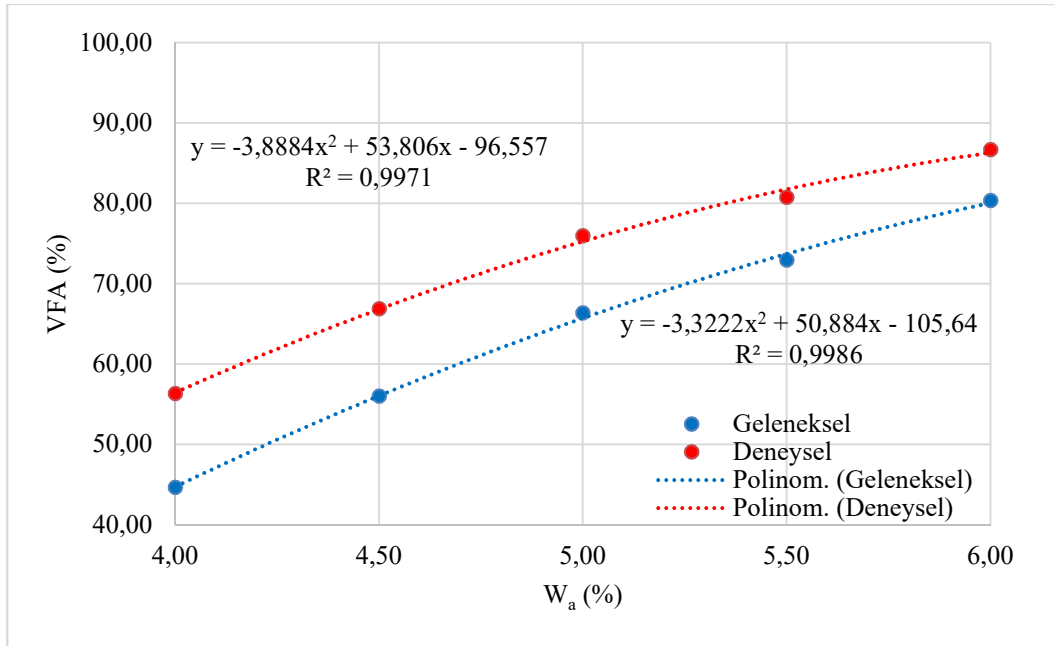
Şekil 4.66 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.66’da görüldüğü üzere VA değerleri arasında büyük farklılık bulunmaktadır. Geleneksel tasarımda boşluk oranlarının daha yüksek olması, cüruf içindeki boşlukların, öngörüldüğü gibi bitüm ile doldurulamamasından kaynaklanmaktadır. Deneysel yaklaşımda ise izole edilen boşlukların bitümle doldurulamayacağı kabulüyle, karışım boşlukları esas alınmıştır.



Şekil 4.67 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.67’de görüldüğü üzere, VA değerlerindeki farklılıkların aksine VMA değerleri arasında büyük fark gözlemlenmemektedir. Absorbe edilen bitümün tahmin edilenden az olması nedeniyle deneysel yaklaşımdaki VMA değerleri, geleneksel yaklaşımdaki VMA değerlerinden düşüktür.



Şekil 4.68 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

İki tasarımın VFA değerleri arasında büyük fark bulunmaktadır. VA karşılaştırmasında (Şekil 4.66) da gözlemlendiği üzere; geleneksel tasarımda, cüruf içinde bitümün ulaşamayacağı boşlukların dikkate alınması, bağlayıcı ile dolu boşluk oranını düşük göstermektedir.

4.6.3.3 Doğal agrega TMA tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.30 ve 4.31’de sunulmuştur.

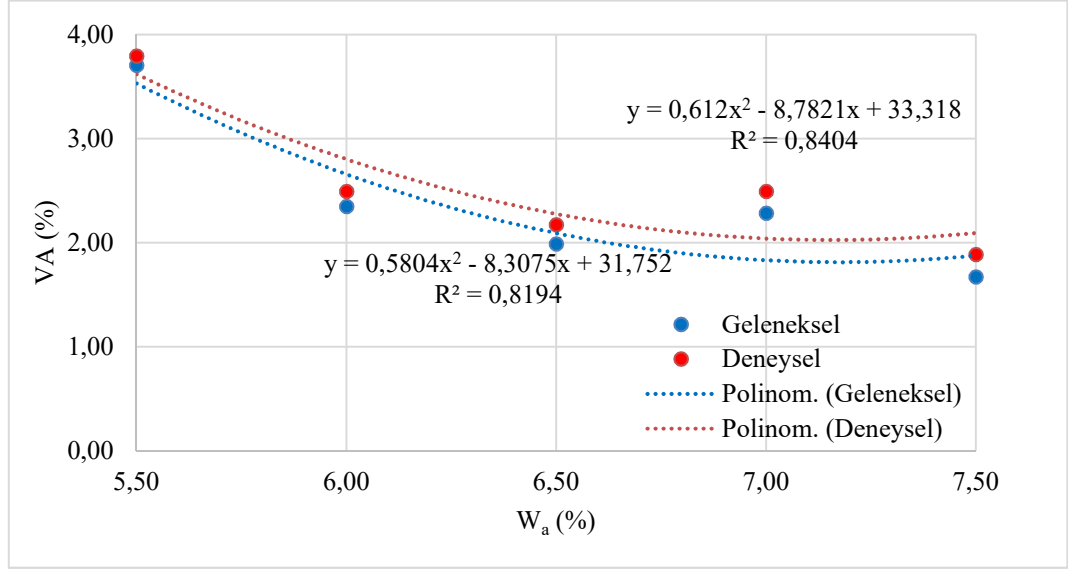
Çizelge 4.30 : Doğal agrega TMA tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
5,50	3,70	15,98	76,83
6,00	2,35	15,80	85,16
6,50	1,99	16,48	87,95
7,00	2,28	17,70	87,10
7,50	1,67	18,13	90,80

Çizelge 4.31 : Doğal agrega TMA tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

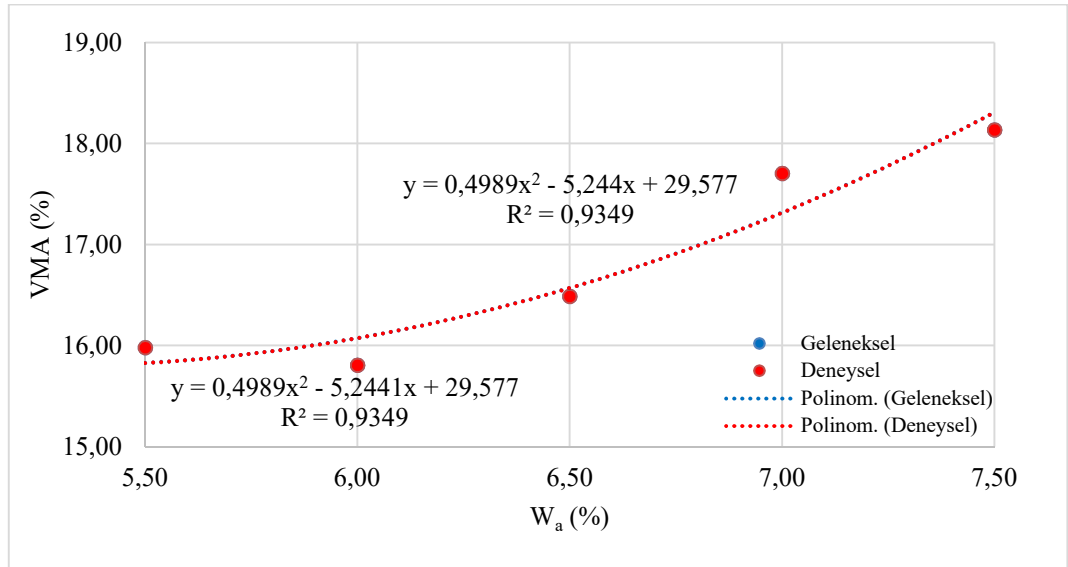
W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
5,50	3,79	15,98	76,27
6,00	2,49	15,80	84,25
6,50	2,17	16,48	86,83
7,00	2,49	17,70	85,93
7,50	1,89	18,13	89,60

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.69, 4.70 ve 4.71’de sunulmuştur.



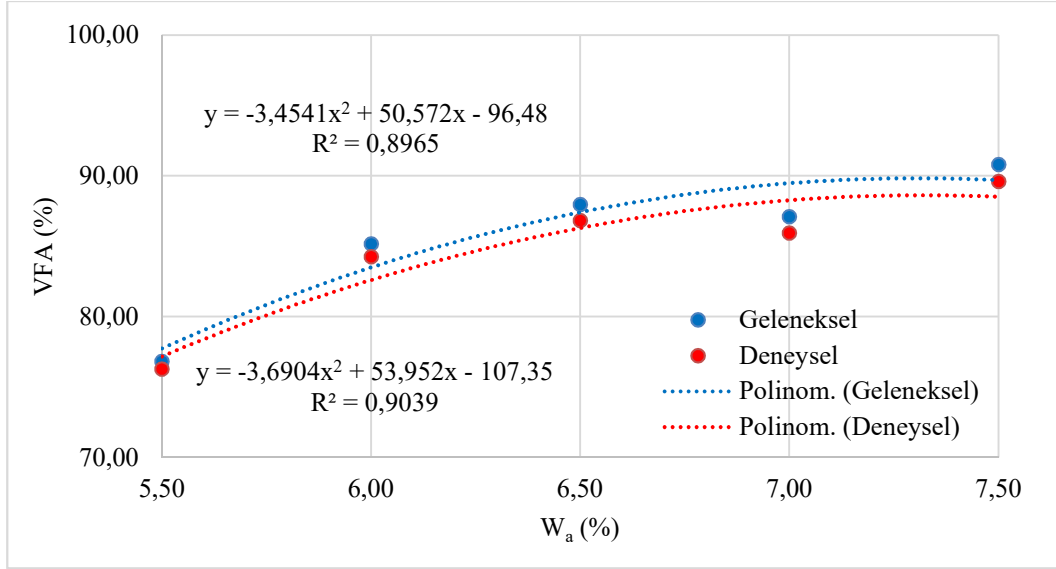
Şekil 4.69 : Doğal agrega TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.

Her iki tasarım yöntemiyle yapılan hesaplarda; VA değerlerinde büyük bir fark olmadığı, fakat deneysel yaklaşımda absorbe edilen bağlayıcı oranının, tahmin edilenden fazla olması nedeniyle boşluk oranlarının, geleneksel yaklaşıma oranla daha yüksek çıktığı Şekil 4.69’da görülmektedir.



Şekil 4.70 : Doğal agrega TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Her iki tasarım yaklaşımı ile hesaplanan VMA değerlerinin tamamen örtüştüğü Şekil 4.70’te görülmektedir.



Şekil 4.71 : Doğal agrega TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

Agregalar tarafından absorbe edilen daha fazla bitüm nedeniyle, deneysel yaklaşımdaki bağlayıcı ile dolu boşluk oranları, geleneksel yöntemle göre daha düşüktür.

4.6.3.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.32 ve 4.33'te sunulmuştur.

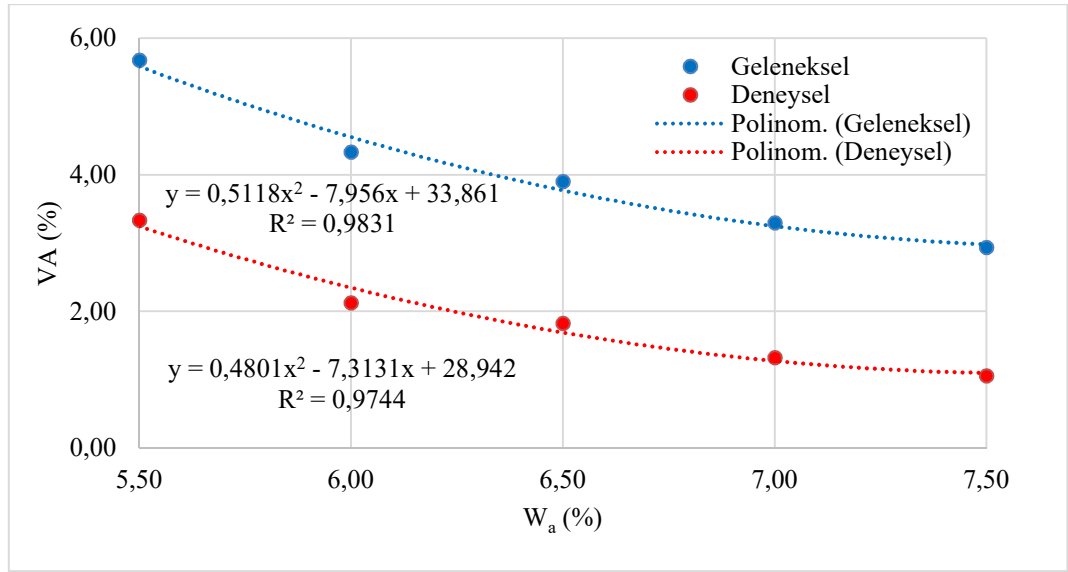
Çizelge 4.32 : Çelikhane cürufu TMA tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
5,50	5,67	17,80	68,32
6,00	4,33	17,82	75,78
6,50	3,90	18,60	79,03
7,00	3,29	19,21	82,86
7,50	2,94	20,02	85,35

Çizelge 4.33 : Çizelge 4.33 : Çelikhane cürufu TMA tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

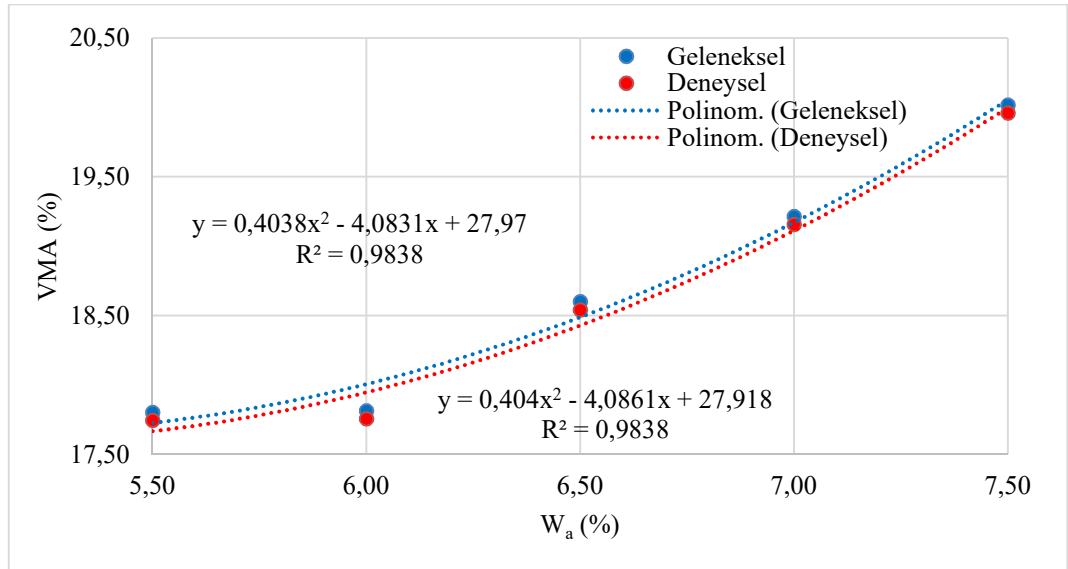
W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
5,50	3,33	17,74	81,43
6,00	2,12	17,76	88,15
6,50	1,82	18,54	90,16
7,00	1,32	19,16	93,10
7,50	1,05	19,96	94,74

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.72, 4.73 ve 4.74'te sunulmuştur.



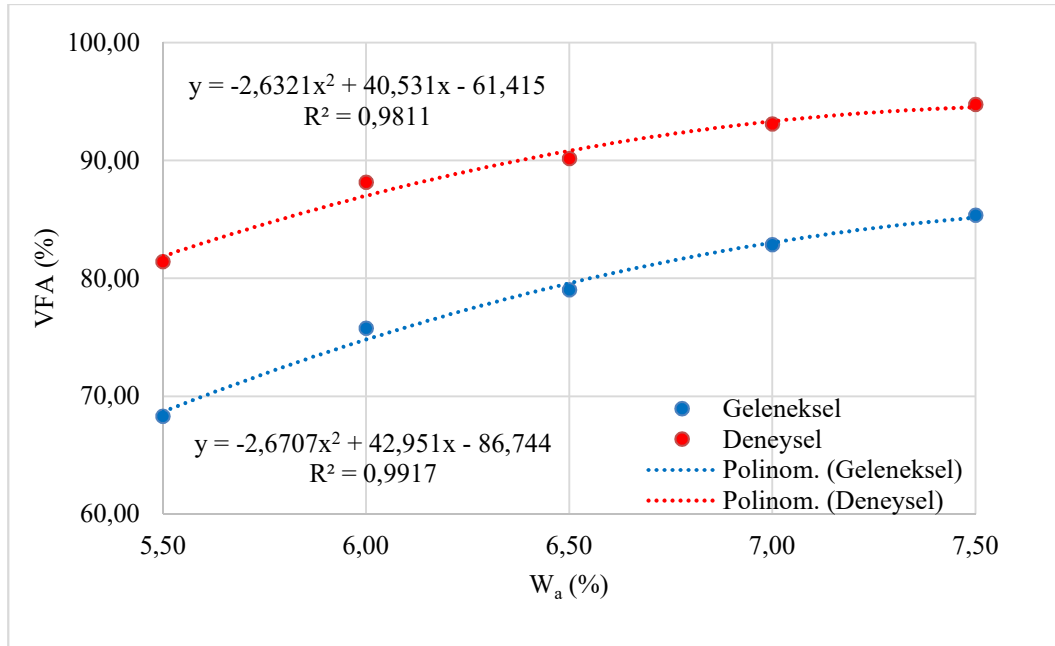
Şekil 4.72 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.68’de görüldüğü üzere VA değerleri arasında büyük farklılık bulunmaktadır. Geleneksel tasarımda boşluk oranlarının daha yüksek olması, cüruf içindeki boşlukların, öngörüldüğü gibi bitüm ile doldurulamamasından kaynaklanmaktadır. Deneysel yaklaşımında ise bu boşlukların bitümle doldurulamayacağı kabulüyle, karışım boşlukları esas alınmıştır.



Şekil 4.73 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.73’te görüldüğü üzere, VA değerlerindeki farklılıkların aksine VMA değerleri arasında büyük fark gözlemlenmemektedir. Bitümün beklenenden daha az absorbe edilmesi nedeniyle deneysel yaklaşımdaki VMA değerleri daha düşüktür.



Şekil 4.74 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

İki tasarımın VFA değerleri arasında büyük fark bulunmaktadır. VA karşılaştırmasında (Şekil 4.72) da gözlemlendiği üzere geleneksel yaklaşımda, cüruf içinde bitümün ulaşamayacağı boşlukların dikkate alınması, bağlayıcı ile dolu boşluk oranını düşük göstermektedir.

4.6.3.5 Doğal agrega binder tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.34 ve 4.35'te sunulmuştur.

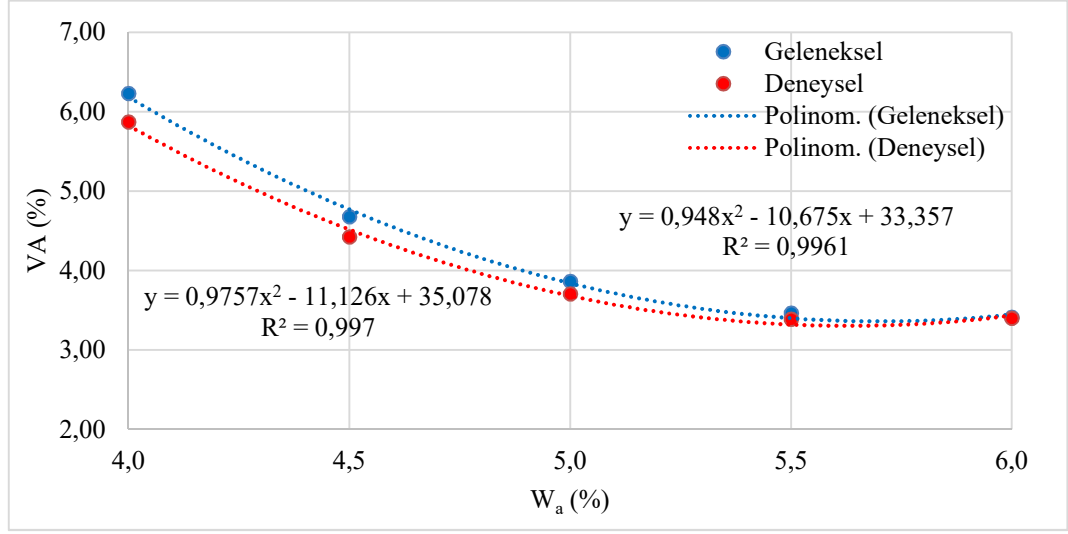
Çizelge 4.34 : Doğal agrega binder tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W _a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,0	6,23	15,11	58,79
4,5	4,67	14,77	68,35
5,0	3,86	15,09	74,40
5,5	3,46	15,76	78,02
6,0	3,41	16,71	79,59

Çizelge 4.35 : Doğal agrega binder tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

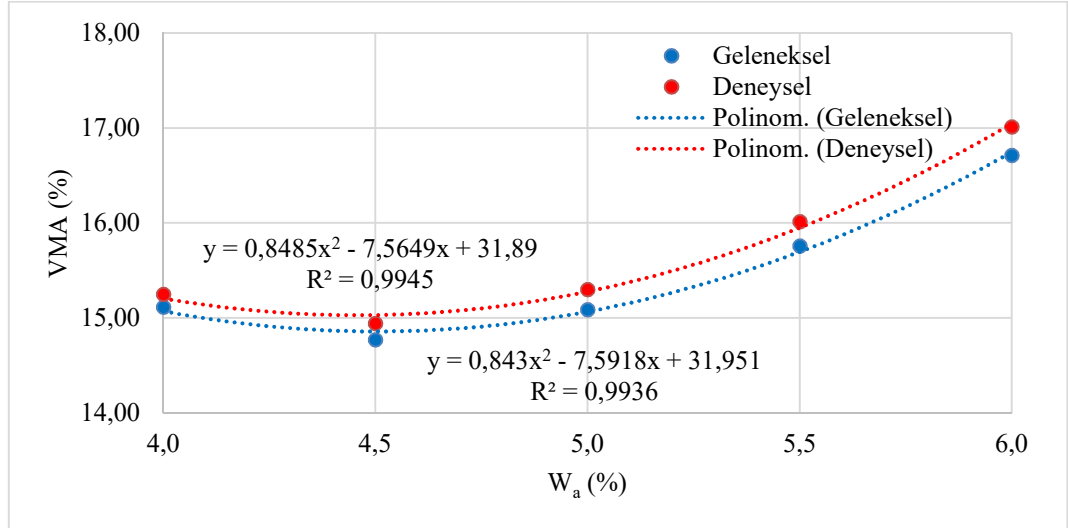
W _a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,0	5,87	15,25	61,52
4,5	4,42	14,94	70,41
5,0	3,70	15,30	75,80
5,5	3,39	16,01	78,86
6,0	3,40	17,01	80,03

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.75, 4.76 ve 4.77’de sunulmuştur.



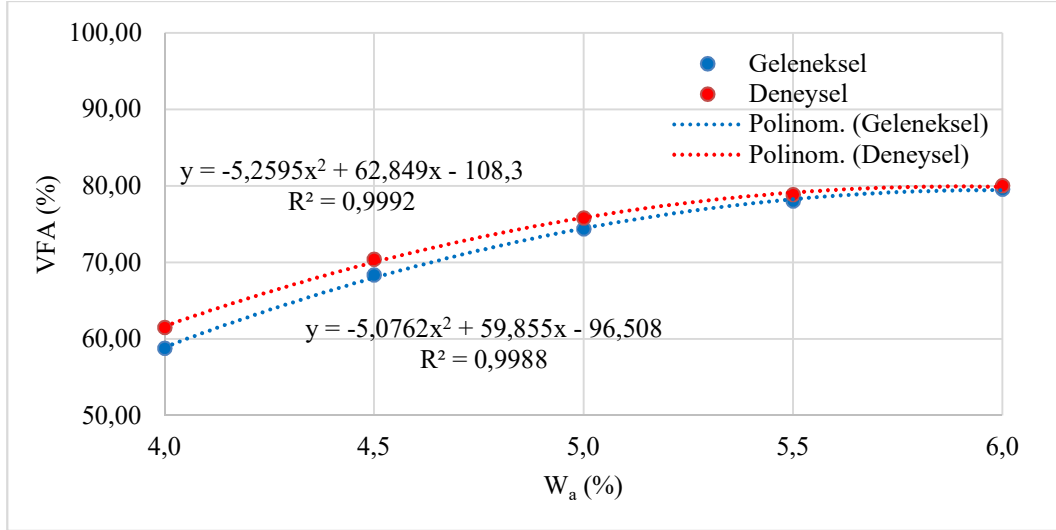
Şekil 4.75 : Doğal agreg a binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değ erlerinin karşı laştırılması.

Her iki tasarım yöntemiyle yapılan hesaplarda; VA değ erlerinde büyük benzerlik görülmektedir. Deneysel yaklaşımda, boşluk oranı, başlangıçta düşük bulunmuştur. % 6 bağlayıcı oranında VA değ erleri eş itlenmiştir. Beklenenden daha az bitümün absorbe edilmesi, boşluk oranlarını başlangıçta düşürmektedir.



Şekil 4.76 : Doğal agreg a binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değ erlerinin karşı laştırılması.

Her iki tasarım yaklaşımı ile üretilen briketlerde, VMA değ erleri, paralellik göstermektedir. Beklenenden az bitümün absorbe edilmesi, deneysel yaklaşım sonuçları ile çiz ilen VMA eğ ilim çizgisini ötelemiştir.



Şekil 4.77 : Doğal agrega binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

Deneysel yaklaşım ile elde edilen VFA değerleri başlangıçta yüksek olmakla birlikte, grafiğin sonunda geleneksel yaklaşım ile çakışmaktadır. Beklenenden daha az bitümün absorbe edilmesi, bağlayıcı ile dolu boşluk oranını başlangıçta yükseltmiştir.

4.6.3.6 Çelikhane cürufu binder tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.36 ve 4.37’de sunulmuştur.

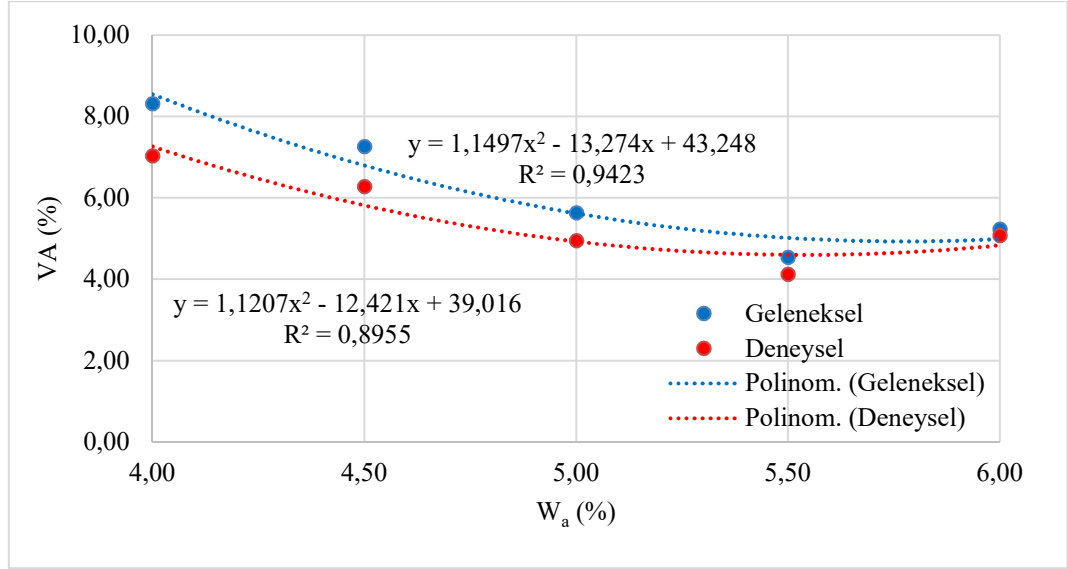
Çizelge 4.36 : Çelikhane cürufu binder tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W _a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	8,31	16,26	48,89
4,50	7,26	16,54	56,15
5,00	5,63	16,32	65,51
5,50	4,54	16,57	72,65
6,00	5,23	18,34	71,50

Çizelge 4.37 : Çelikhane cürufu binder tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

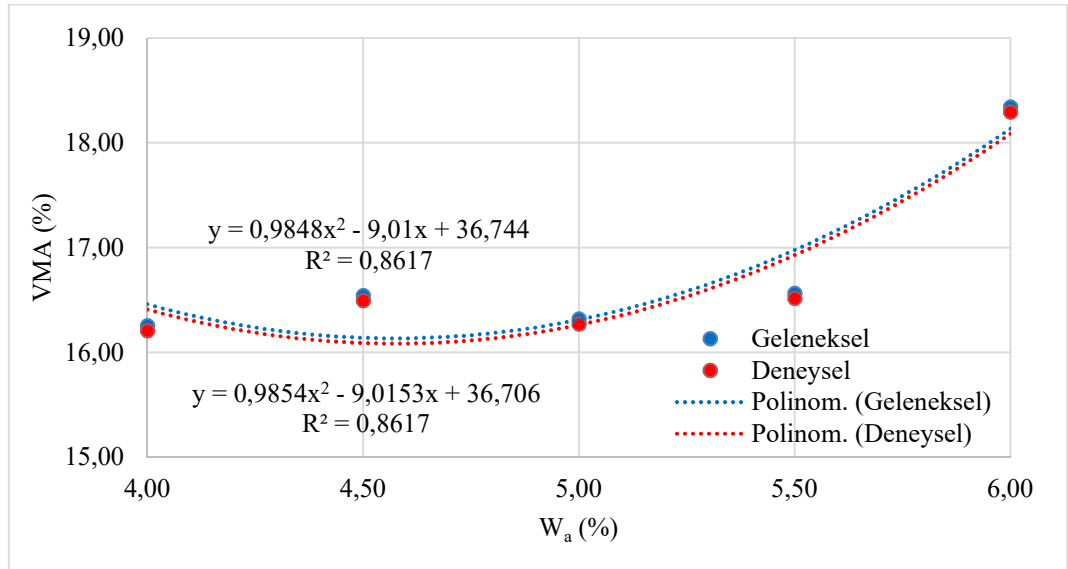
W _a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	7,03	16,21	56,65
4,50	6,28	16,50	61,94
5,00	4,94	16,27	69,65
5,50	4,12	16,52	75,09
6,00	5,07	18,29	72,27

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.78, 4.79 ve 4.80’de sunulmuştur.



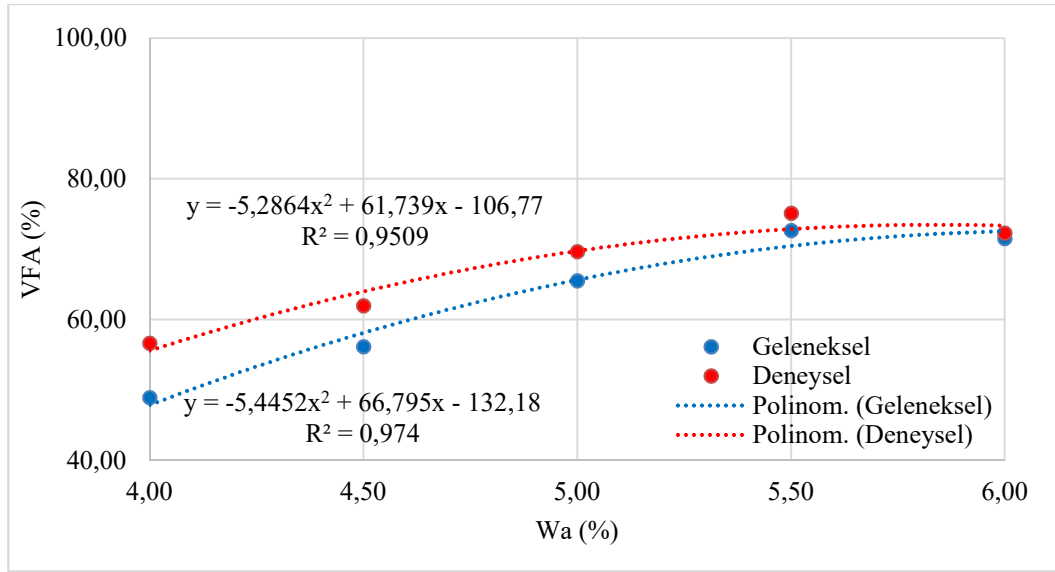
Şekil 4.78 : Çelikhane cürufu binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.78’de görüldüğü üzere VA değerleri arasında farklılık bulunmaktadır. Geleneksel tasarımda boşluk oranlarının daha yüksek olması, cüruf içindeki boşlukların, bitüm ile doldurulamamasından kaynaklanmaktadır. Deneysel yaklaşımda ise izole edilen boşlukların bitümle doldurulamayacağı kabulüyle, karışım boşlukları dikkate alınmıştır.



Şekil 4.79 : Çelikhane cürufu binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.79’da görüldüğü üzere, VA değerlerindeki farklılıkların aksine VMA eğilim çizgileri büyük benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.80 : Çelikhane cürufu binder tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

İki tasarımın VFA değerleri arasında fark bulunmaktadır. VA karşılaştırmasında (Şekil 4.78) da gözlemlendiği üzere geleneksel tasarımda, cüruf içinde bitümün ulaşamayacağı boşlukların dikkate alınması, bağlayıcı ile dolu boşluk oranını düşük göstermektedir.

4.6.3.7 Doğal agregalı BT tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.38 ve 4.39'da sunulmuştur.

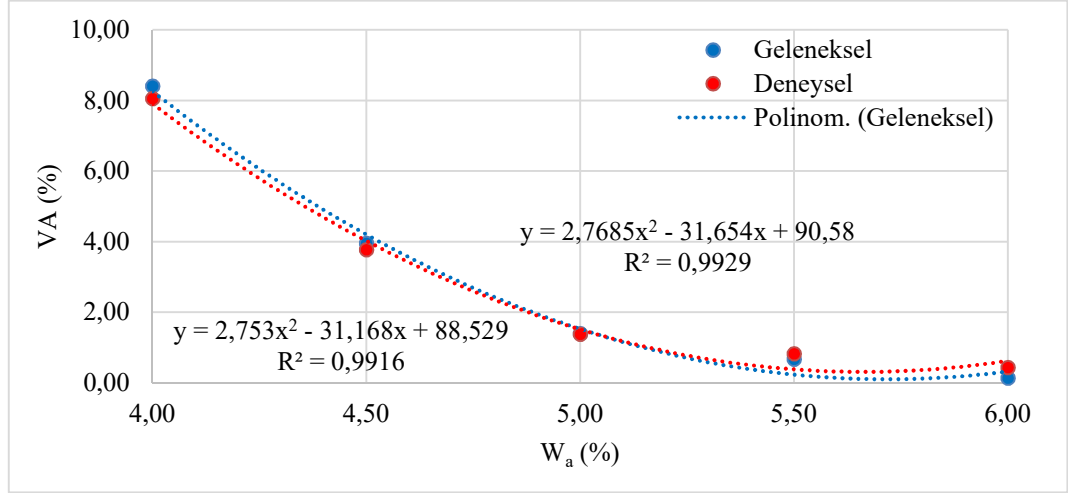
Çizelge 4.38 : Doğal agregalı BT tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W _a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,0	8,41	17,09	50,79
4,5	3,95	14,12	72,03
5,0	1,39	12,90	89,25
5,5	0,67	13,32	95,00
6,0	0,13	13,88	99,07

Çizelge 4.39 : Doğal agregalı BT tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

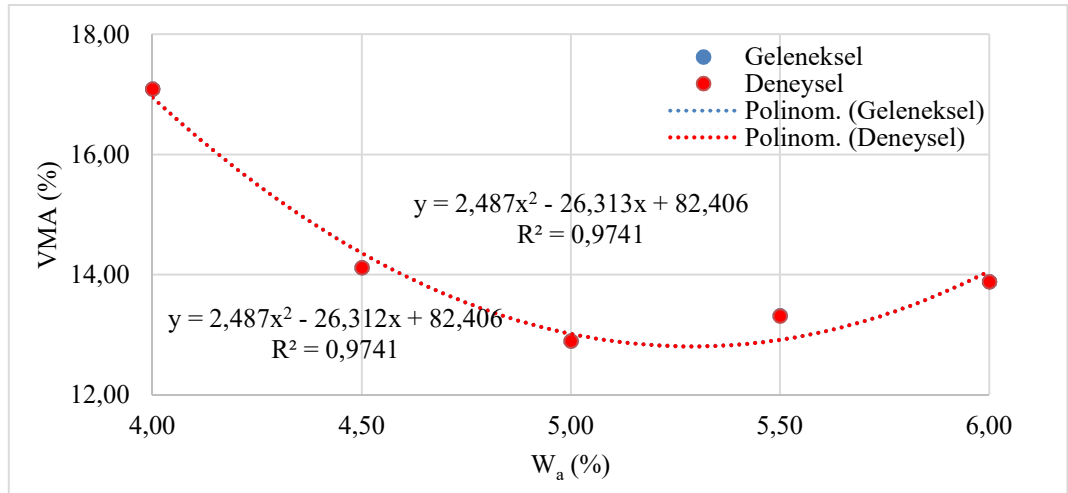
W _a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	8,05	17,09	52,87
4,50	3,77	14,12	73,33
5,00	1,38	12,90	89,33
5,50	0,82	13,32	93,86
6,00	0,43	13,88	96,90

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.81, 4.82 ve 4.85'te sunulmuştur.



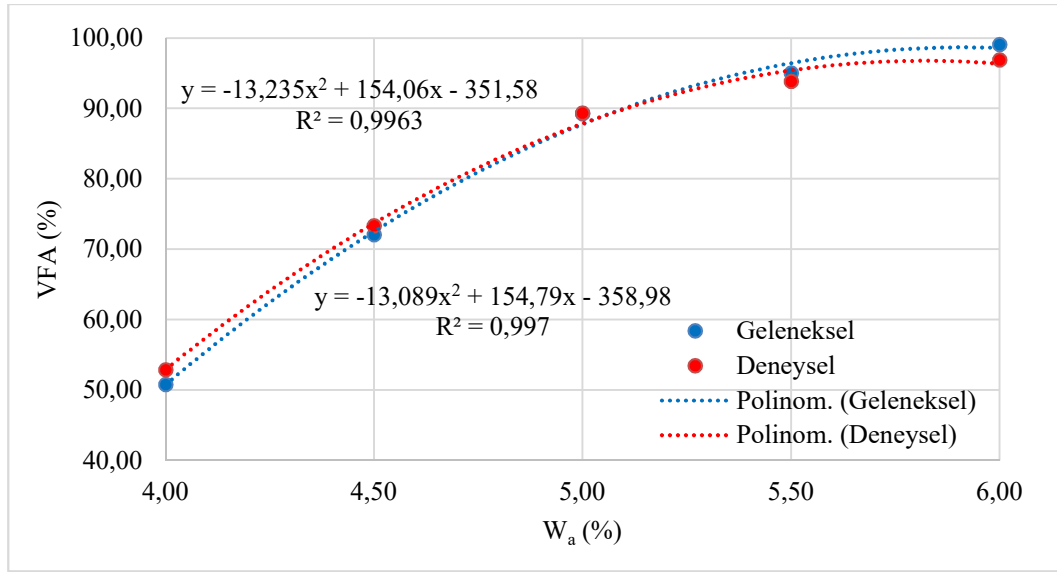
Şekil 4.81 : Doğal agrega BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.

Her iki tasarım yaklaşımıyla yapılan hesaplarda; VA değerlerinde büyük fark bulunmamaktadır. Deneysel yaklaşımda, boşluk oranı, başlangıçta düşük bulunmuştur. Beklenenden daha az bitümün absorbe edilmesi, karışım boşluk oranlarını düşürmektedir. Grafiğin sonunda artan bağlayıcı oranı ile daha fazla bitüm absorbe edilmiş ve deneysel yaklaşımda boşluk oranları, geleneksel yaklaşım sonuçlarına oranla yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.82 : Doğal agrega BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Her iki tasarım yaklaşımı ile üretilen briketlerde, VMA değerleri tamamen örtüşmektedir.



Şekil 4.83 : Doğal agrega BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

Deneysel yaklaşım ile elde edilen VFA değerleri başlangıçta yüksek olmakla birlikte, grafiğin sonunda geleneksel yaklaşım değerlerinin altına düşmektedir. Başlangıçta daha az bitüm absorbe edilmiş, artan bağlayıcı oranı ile absorbe edilen bitüm de artmış ve deneysel yaklaşımda elde edilen VFA değerleri, geleneksel sonuçların altına düşmüştür.

4.6.3.8 Çelikhane cürufu BT tabakası

Geleneksel ve deneysel yaklaşımdan elde edilen G_{mm} değerleri ile hesaplanan ikincil veriler Çizelge 4.40 ve 4.41’de sunulmuştur.

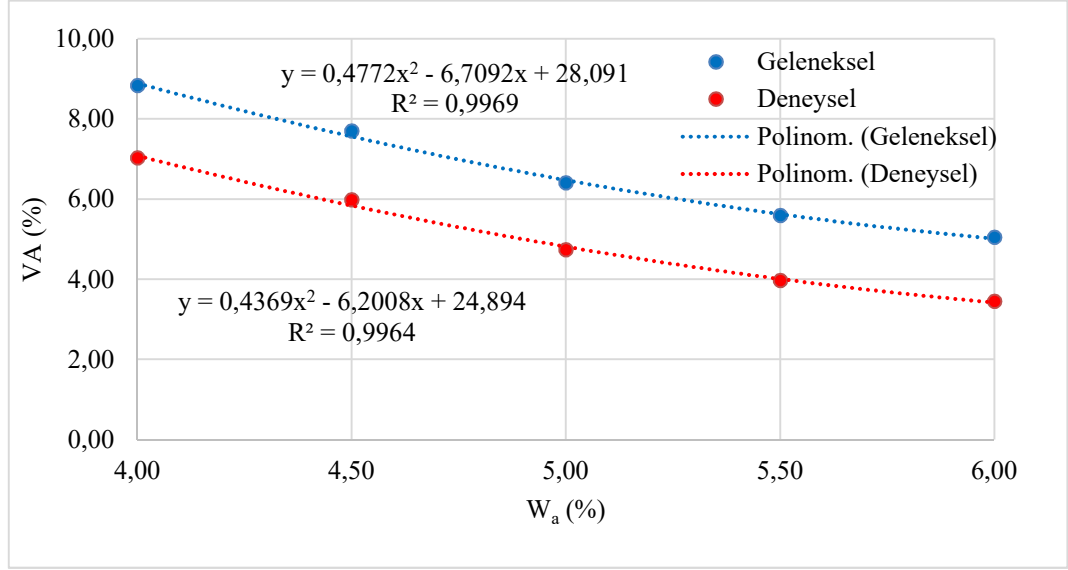
Çizelge 4.40 : Çelikhane cürufu BT tabakası için geleneksel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	8,83	16,86	47,60
4,50	7,70	17,07	54,89
5,00	6,40	17,12	62,63
5,50	5,59	17,61	68,26
6,00	5,05	18,30	72,44

Çizelge 4.41 : Çelikhane cürufu BT tabakası için deneysel yaklaşımla elde edilen ikincil veriler.

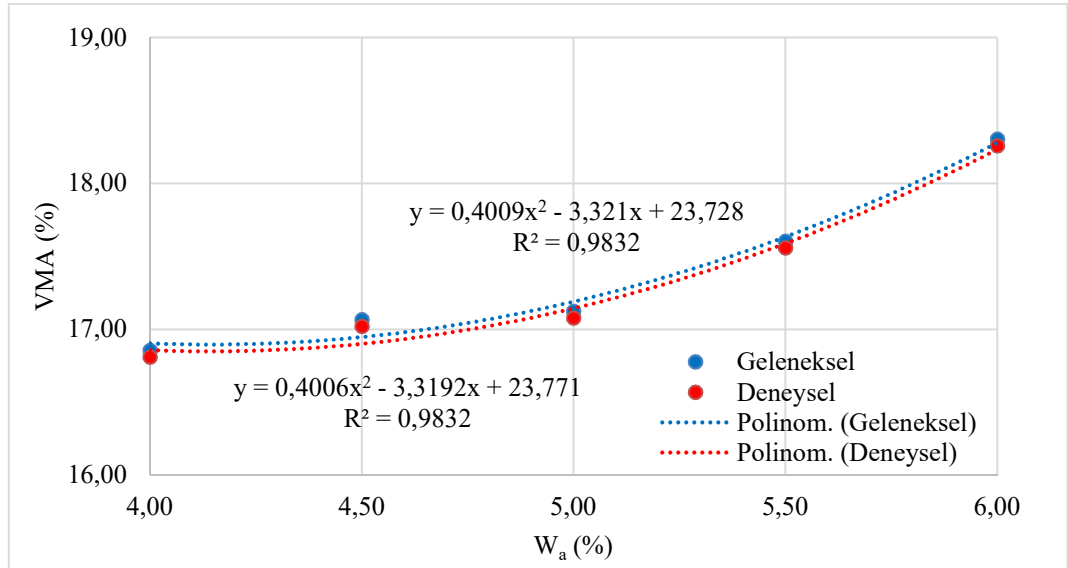
W_a (%)	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)
4,00	7,02	16,81	58,21
4,50	5,98	17,02	64,88
5,00	4,74	17,08	72,26
5,50	3,97	17,56	77,40
6,00	3,45	18,26	81,11

İkincil verilerin kıyaslanabilmesi için her iki tasarım yöntemi ile hesaplanan ikincil verilere ait grafikler Şekil 4.84, 4.85 ve 4.86’da sunulmuştur.



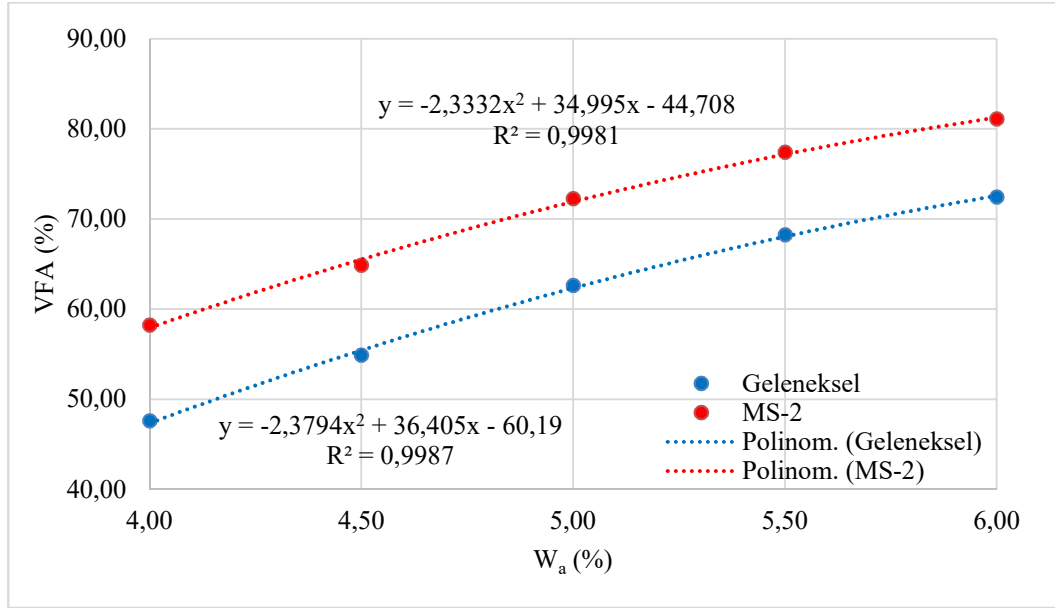
Şekil 4.84 : Çelikhane cürufu BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.84’te görüldüğü üzere VA değerleri arasında farklılık bulunmaktadır. Geleneksel tasarımda boşluk oranlarının daha yüksek olması, cüruf içindeki boşlukların, bitüm ile doldurulamamasından kaynaklanmaktadır. Deneysel yaklaşımda ise izole edilen boşlukların bitümle doldurulamayacağı kabulüyle, karışım boşlukları dikkate alınmıştır.



Şekil 4.85 : Çelikhane cürufu BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.85'te görüldüğü üzere, VA değerlerindeki farklılıkların aksine VMA eğilim çizgileri büyük benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.86 : Çelikhane cürufu BT tabakası, geleneksel ve deneysel yaklaşımla elde edilen VFA değerlerinin karşılaştırılması.

İki tasarımın VFA değerleri arasında büyük fark bulunmaktadır. VA karşılaştırmasında (Şekil 4.84) da gözlemlendiği üzere geleneksel tasarımda, cüruf içinde bitümün ulaşamayacağı boşlukların dikkate alınması, bağlayıcı ile dolu boşluk oranını düşük göstermektedir.

4.6.4 Optimum bağlayıcı oranlarının tespiti

Optimum bağlayıcı oranları, ideal boşluk oranlarına göre VA grafiklerinden elde edilmiştir. G_{mb} ve G_{mm} değerleri ise optimum bağlayıcı oranına göre grafiklerdeki eğilim çizgileri ile hesaplanmıştır. Hesaplanan G_{mb} ve G_{mm} değerleri ile VA, VMA ve VFA değerleri elde edilmiştir. Hesaplamalar geleneksel ve deneysel yöntemlere göre ayrı ayrı yapılmıştır. Sonuçlar KTŞ 2013 limitleri ile birlikte Çizelge 4.42, 4.43, 4.44, 4.45, 4.46, 4.47, 4.48 ve 4.49'da sunulmuştur.

Çizelge 4.42 : Geleneksel ve deneysel yönetime göre doğal agrega aşınma tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	4,90	2,544	2,650	4,00	14,99	73,30	2,10	13,77
Deneysel	4,92	2,545	2,651	4,02	14,98	73,19	2,11	13,76
KTŞ 2013	-	-	-	3-5	14-16	65-75	2-4	min.8,83

Doğal agrega aşınma tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 0,02 puanlık bir fark mevcuttur. Dolayısıyla diğer veriler de birbirine çok yakındır. Elde edilen tüm sonuçlar, KTŞ 2013 limitlerine uymaktadır.

Çizelge 4.43 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre çelikhane cürufu aşınma tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	5,68	3,017	3,143	4,00	16,99	76,44	2,43	16,98
Deneysel	5,05	3,002	3,128	4,02	16,83	76,12	2,27	18,52
KTŞ 2013	4-7	-	-	3-5	14-16	65-75	2-4	min.8,83

Çelikhane cürufu aşınma tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 0,63 puanlık bir fark mevcuttur. Diğer verilerde de bu oranda farklar olduğu görülmektedir. Her iki yaklaşımda da VMA ve VFA değerleri, KTŞ 2013 limitleri dışındadır.

Çizelge 4.44 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre doğal agrega TMA tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	5,76	2,538	2,617	3,00	15,89	81,13	3,52	6,55
Deneysel	5,83	2,539	2,618	3,01	16,18	81,43	3,54	6,53
KTŞ 2013	min.5,80	-	-	2-4	min.16	-	-	-

Doğal agrega TMA tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 0,07 puanlık bir fark mevcuttur. Dolayısıyla diğer veriler de çok yakındır. Geleneksel yaklaşımda W_a ve VMA değerleri, KTŞ 2013 limitleri dışındadır.

Çizelge 4.45 : Geleneksel ve deneysel yöntemle göre çelikhane cürufu TMA tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	7,54	2,938	3,029	3,00	20,17	85,13	3,94	11,16
Deneysel	5,64	2,971	3,063	2,99	17,74	83,13	2,75	12,49
KTŞ 2013	min.5,80	-	-	2-4	min.16	-	-	-

Çelikhane cürufu TMA tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 1,90 puanlık bir fark mevcuttur. Diğer verilerde de bu oranda farklar olduğu görülmektedir. Deneysel yaklaşımda W_a değeri, KTŞ 2013 limitleri dışındadır.

Çizelge 4.46 : Geleneksel ve deneysel yönetime göre doğal agrega binder tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	4,41	2,537	2,670	4,99	14,87	66,42	2,32	13,22
Deneysel	4,30	2,534	2,667	4,99	15,05	66,86	2,24	13,13
KTŞ 2013	3,5-6,5	-	-	4-6	13-15	60-75	2-4	min.7,36

Doğal agrega binder tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 0,11 puanlık bir fark mevcuttur. Dolayısıyla diğer veriler de birbirine çok yakındır. Deneysel yaklaşımda VFA değeri, KTŞ 2013 limitleri dışındadır.

Çizelge 4.47 : Geleneksel ve deneysel yönetime göre çelikhane cürufu binder tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	6,15	2,947	3,102	5,00	18,53	73,03	2,79	16,99
Deneysel	4,93	2,996	3,153	4,99	16,18	69,17	2,47	20,66
KTŞ 2013	3,5-6,5	-	-	4-6	13-15	60-75	2-4	min.7,36

Çelikhane cürufu binder tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 1,22 puanlık bir fark mevcuttur. Diğer verilerde de bu oranda farklar olduğu görülmektedir. Her iki yaklaşım ile elde edilen VMA değerleri, KTŞ 2013 limitleri dışındadır.

Çizelge 4.48 : Geleneksel ve deneysel yönetime göre doğal agrega BT tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	4,39	2,538	2,671	4,97	14,79	66,40	2,26	12,54
Deneysel	4,35	2,532	2,666	5,02	14,97	66,47	2,26	12,51
KTŞ 2013	-	-	-	4-6	12-14,5	55-75	2-5	min.5,89

Doğal agrega BT tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 0,04 puanlık bir fark mevcuttur. Dolayısıyla diğer veriler de birbirine çok yakındır. Her iki yaklaşım ile elde edilen VMA değerleri, KTŞ 2013 limitleri dışındadır.

Çizelge 4.49 : Geleneksel ve deneysel yönetime göre çelikhane cürufu BT tabakası optimum bağlayıcı oranı ve KTŞ 2013 limitleri.

Yöntem	W _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	VA (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kN)
Geleneksel	5,99	2,956	3,112	5,00	18,26	72,62	2,78	14,57
Deneysel	4,89	2,966	3,123	5,02	17,07	70,61	2,46	20,08
KTŞ 2013	3-5,5	-	-	4-6	12-14,5	55-75	2-5	min.5,89

Çelikhane cürufu BT tabakası tasarımında geleneksel ve deneysel yaklaşım ile bulunan optimum bağlayıcı oranları arasında 1,10 puanlık bir fark mevcuttur. Diğer verilerde de bu oranda farklar olduğu görülmektedir. Her iki yaklaşım ile elde edilen VMA değerleri, KTŞ 2013 limitleri dışındadır. Ayrıca geleneksel yaklaşım ile elde edilen optimum bağlayıcı oranı KTŞ 2013 üst limitinden yüksektir.

4.7 Kontrol Briketleri

Doğal agrega ve çelikhane cürufu ile deneysel yaklaşımdan elde edilen optimum bağlayıcı oranı uyarınca yapılan tasarımlarda istenilen sonuçlara ulaşıp ulaşılmadığının değerlendirilmesi amacıyla kontrol briketleri üretilmiştir. Her karışımdan optimum bitüm oranı uyarınca 7 briket hazırlanmış bir tanesi kesilerek fotoğrafları çekilmiştir. Doğal agrega aşınma tabakası kontrol briketlerine (W_a % 4,92) ait sonuçlar Çizelge 4,50’de sunulmuştur.

Çizelge 4.50 : Doğal agrega aşınma tabakası kontrol briketleri.

Numune No	Havada (gr)	SDYK (gr)	Suda (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA(%)
1	1255,0	1255,8	765,3	2,559	2,651	3,48
2	1258,3	1259,8	765,6	2,546	2,651	3,96
3	1254,9	1256,4	763,3	2,545	2,651	4,00
4	1256,5	1257,9	765,5	2,552	2,651	3,74
5 (kesit)	1257,3	1258,4	767,1	2,559	2,651	3,47
6	1256,9	1258,1	766,3	2,556	2,651	3,59
7	1256,0	1257,6	762,6	2,537	2,651	4,29

Çizelge 4.50 görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, aşınma tabakası için KTŞ 2013’te belirtilen % 3-5 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 5 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.87 ve 4.88’de sunulmuştur.



Şekil 4.87 : Doğal agrega aşınma kontrol briketi kesit-1.



Şekil 4.88 : Doğal agrega aşınma kontrol briketi kesit-2.

Çelikhane cürufu aşınma tabakası kontrol briketlerine (W_a % 5,05) ait sonuçlar Çizelge 4.51’de sunulmuştur.

Çizelge 4.51 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası kontrol briketleri.

Numune No	Havada (gr)	Suda (gr)	SDYK (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
1	1460,6	977,5	1465,1	2,995	3,128	4,24
2	1466,6	981,1	1471,6	2,990	3,128	4,41
3	1462,6	975,8	1463,4	3,000	3,128	4,11
4	1455,0	974,5	1459,1	3,002	3,128	4,01
5	1446,6	970,5	1450,0	3,017	3,128	3,55
6	1457,7	979,1	1461,0	3,025	3,128	3,30
7 (kesit)	1452,3	973,7	1458,6	2,995	3,128	4,25

Çizelge 4.51’de görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, aşınma tabakası için KTŞ 2013’te belirtilen % 3-5 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 7 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.89 ve 4.90’da sunulmuştur.



Şekil 4.89 : Çelikhane cürufu aşınma kontrol briketi kesit-1.



Şekil 4.90 : Çelikhane cürufu aşınma kontrol briketi kesit-2.

Doğal agregat TMA tabakası kontrol briketlerine (W_a % 5,83) ait sonuçlar Çizelge 4.52’de sunulmuştur.

Çizelge 4.52 : Doğal agregat TMA tabakası kontrol briketleri

Numune No	Havada (gr)	Suda (gr)	SDYK (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
1	1160,2	705,0	1162,0	2,539	2,618	3,03
2	1163,6	706,2	1165,1	2,536	2,618	3,15
3 (kesit)	1159,2	702,2	1160,4	2,530	2,618	3,37
4	1163,4	706,3	1164,2	2,541	2,618	2,95
5	1167,3	708,7	1168,0	2,541	2,618	2,92
6	1163,5	706,2	1164,2	2,540	2,618	2,96
7	1164,1	707,3	1165,4	2,541	2,618	2,94

Çizelge 4.52’de görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, TMA tabakası için KTŞ 2013’te belirtilen % 2-4 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 3 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.91 ve 4.92’de sunulmuştur.



Şekil 4.91 : Doğal agregat TMA kontrol briketi kesit-1.



Şekil 4.92 : Doğal agrega TMA kontrol briketi kesit-2.

Çelikhane cürufu TMA tabakası kontrol briketlerine (W_a % 5,64) ait sonuçlar Çizelge 4.53'te sunulmuştur.

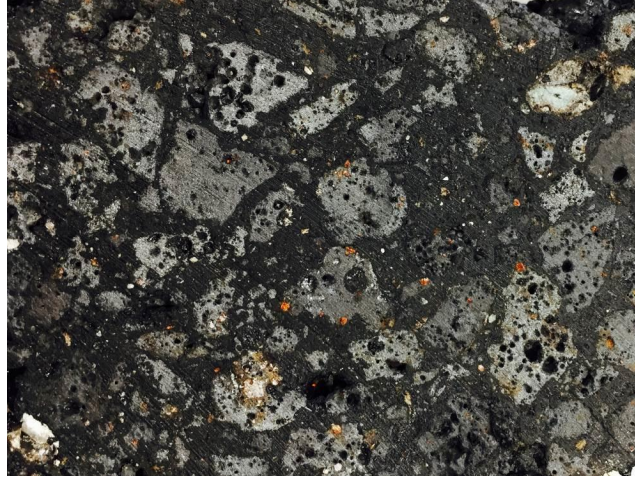
Çizelge 4.53 : Çelikhane cürufu TMA tabakası kontrol briketleri.

Numune No	Havada (gr)	Suda (gr)	SDYK (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
1	1365,5	909,1	1368,0	2,976	3,063	2,85
2	1375,4	914,0	1378,2	2,963	3,063	3,27
3	1372,0	912,6	1376,0	2,961	3,063	3,34
4	1373,8	911,8	1376,7	2,955	3,063	3,52
5 (kesit)	1373,5	910,7	1376,3	2,950	3,063	3,69
6	1369,2	911,7	1373,0	2,968	3,063	3,10
7	1373,3	911,3	1377,5	2,946	3,063	3,83

Çizelge 4.53'te görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, TMA tabakası için KTŞ 2013'te belirtilen % 2-4 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 5 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.93 ve 4.94'te sunulmuştur.



Şekil 4.93 : Çelikhane cürufu TMA kontrol briketi kesit-1.



Şekil 4.94 : Çelikhane cürufu TMA kontrol briketi kesit-2.

Doğal agreg a binder tabakası kontrol briketlerine (W_a % 4,30) ait sonuçlar Çizelge 4.54'te sunulmuştur.

Çizelge 4.54 : Doğal agreg a binder tabakası kontrol briketleri

Numune No	Havada (gr)	Suda (gr)	SDYK (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
1	1247,7	758,7	1251,8	2,530	2,667	5,12
2	1246,8	758,5	1251,0	2,532	2,667	5,08
3	1250,3	760,2	1253,6	2,534	2,667	4,99
4	1249,8	760,5	1253,1	2,537	2,667	4,87
5 (kesit)	1248,2	757,6	1253,1	2,519	2,667	5,55
6	1250,3	761,3	1254,5	2,535	2,667	4,95
7	1246,0	760,6	1249,6	2,548	2,667	4,46

Çizelge 4.54'te görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, binder tabakası için KTŞ 2013'te belirtilen % 4-6 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 5 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.95 ve 4.96'da sunulmuştur.



Şekil 4.95 : Doğal agreg a binder kontrol briketi kesit-1.



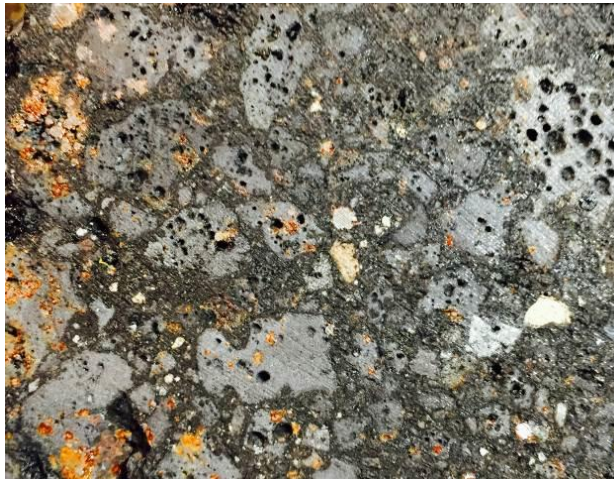
Şekil 4.96 : Doğal agrega binder kontrol briketi kesit-2.

Çelikhane cürufu binder tabakası kontrol briketlerine (W_a % 4,93) ait sonuçlar Çizelge 4.55’te sunulmuştur.

Çizelge 4.55 : Çelikhane cürufu binder tabakası kontrol briketleri.

Numune No	Havada (gr)	Suda (gr)	SDYK (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
1	1454,3	975,5	1458,2	3,013	3,153	4,45
2	1425,8	953,4	1430,1	2,991	3,153	5,14
3	1466,3	980,3	1471,4	2,986	3,153	5,30
4	1463,0	978,2	1467,6	2,989	3,153	5,19
5	1453,4	971,4	1456,8	2,994	3,153	5,04
6	1453,9	972,3	1460,0	2,981	3,153	5,45
7 (kesit)	1456,1	976,2	1458,7	3,018	3,153	4,29

Çizelge 4.55’te görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, binder tabakası için KTŞ 2013’te belirtilen % 4-6 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 7 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.97 ve 4.98’de sunulmuştur.



Şekil 4.97 : Çelikhane cürufu binder kontrol briketi kesit-1.



Şekil 4.98 : Doğal agreg a cürufu binder kontrol briketi kesit-2.

Doğal agreg a bitümlü temel tabakası kontrol briketlerine (W_a % 4,35) ait sonuçlar Çizelge 4.56’da sunulmuştur.

Çizelge 4.56 : Doğal agreg a bitümlü temel tabakası kontrol briketleri

Numune No	Havada (gr)	SDYK (gr)	Suda (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
1	1242,6	1249,7	760,4	2,540	2,666	4,74
2	1244,8	1252,6	760,7	2,531	2,666	5,08
3	1249,9	1256,7	764,0	2,537	2,666	4,84
4 (kesit)	1241,8	1250,2	757,9	2,522	2,666	5,38
5	1247,1	1253,7	761,0	2,531	2,666	5,06
6	1243,8	1250,6	758,6	2,528	2,666	5,17
7	1247,2	1255,4	763,0	2,533	2,666	4,99

Çizelge 4.56’da görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, bitümlü temel tabakası için KTŞ 2013’te belirtilen % 4-6 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 4 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.99 ve 4.100’de sunulmuştur.



Şekil 4.99 : Doğal agreg a bitümlü temel kontrol briketi kesit-1.



Şekil 4.100 : Doğal agrega bitümlü temel kontrol briketi kesit-2.

Çelikhane cürufu bitümlü temel tabakası kontrol briketlerine (W_a % 4,89) ait sonuçlar Çizelge 4.57’de sunulmuştur.

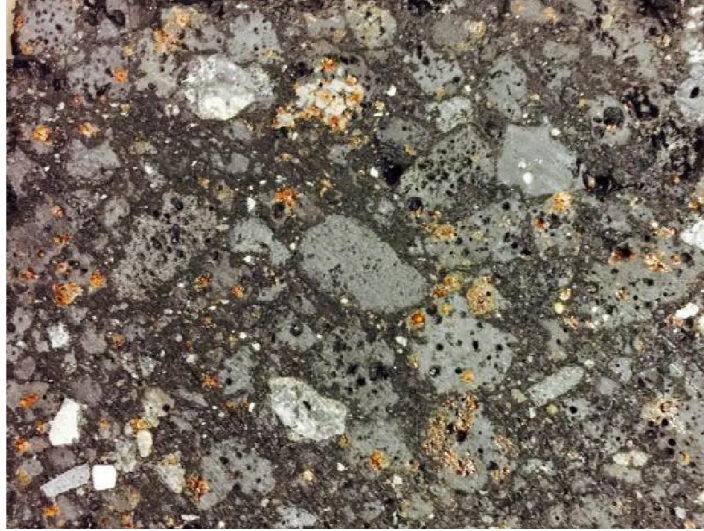
Çizelge 4.57 : Çelikhane cürufu bitümlü temel tabakası kontrol briketleri

Numune No	Havada (gr)	Suda (gr)	SDYK (gr)	G_{mb}	G_{mm}	VA (%)
1	1455,7	967,6	1458,5	2,965	3,123	5,05
2	1460,7	970,6	1464,7	2,956	3,123	5,34
3	1457,3	971,6	1462	2,972	3,123	4,85
4	1453,3	969,1	1458	2,973	3,123	4,82
5	1453,5	965,8	1458,4	2,951	3,123	5,52
6	1453,3	973,5	1459,8	2,988	3,123	4,31
7 (kesit)	1436,7	960,8	1440,3	2,996	3,123	4,06

Çizelge 4.57’de görüldüğü üzere boşluk oranlarında sapmalar mevcut olsa da, bitümlü temel tabakası için KTŞ 2013’te belirtilen % 4-6 boşluk oranı limitleri, tüm numunelerde sağlanmaktadır. Kesimi yapılan 7 numaralı numunenin fotoğrafları Şekil 4.101 ve 4.102’de sunulmuştur.



Şekil 4.101 : Çelikhane cürufu bitümlü temel kontrol briketi kesit-1.



Şekil 4.102 : Çelikhane cürufu bitümlü temel kontrol briketi kesit-2.

4.8 Lottman Deneyi

ASTM D4867 deneyi kapsamında; doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma, TMA, binder ve BT tasarımlarından toplam 48 briket üretilmiştir.

Deney için üretilen doğal agrega aşınma tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-6, 2-3 ve 4-5 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.58 ve 4.59’da sunulmuştur.

Çizelge 4.58 : Doğal agreaga aşınma briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	2,563	61,6	6,00	611,02
2	2,546	62,6	9,09	910,24
4	2,547	62,6	9,94	995,22

Çizelge 4.59 : Doğal agreaga aşınma briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşulsuz İÇM (kPa)
6	2,554	62,0	9,02	910,63
3	2,545	62,2	10,72	1079,57
5	2,551	62,7	10,52	1050,94

Çizelge 4.58 ve 4.59’daki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 82,7 olarak hesaplanmıştır.

Deney için üretilen çelikhane cürufu aşınma tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-5, 2-4 ve 3-6 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.60 ve 4.61’de sunulmuştur.

Çizelge 4.60 : Çelikhane cürufu aşınma briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	3,006	62,1	8,78	885,42
2	3,014	61,1	7,82	801,81
3	2,998	63,0	9,04	899,09

Çizelge 4.61 : Çelikhane cürufu aşınma briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşulsuz İÇM (kPa)
5	2,999	63,0	10,22	1016,67
4	3,019	61,6	11,04	1121,99
6	2,994	63,2	10,22	1012,92

Çizelge 4.60 ve 4.61'deki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 82,1 olarak hesaplanmıştır.

Deney için üretilen doğal agrega TMA tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-3, 2-4 ve 5-6 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.62 ve 4.63'te sunulmuştur.

Çizelge 4.62 : Doğal agrega TMA briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	2,539	59,5	6,51	686,35
2	2,541	59,0	6,45	684,49
5	2,545	58,7	6,21	662,85

Çizelge 4.63 : Doğal agrega TMA briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşulsuz İÇM (kPa)
3	2,540	58,9	6,98	742,63
4	2,540	58,7	6,90	736,16
6	2,543	58,5	6,99	749,18

Çizelge 4.62 ve 4.63'teki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 91,3 olarak hesaplanmıştır.

Deney için üretilen çelikhane cürufu TMA tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-3, 2-4 ve 5-6 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.64 ve 4.65'te sunulmuştur.

Çizelge 4.64 : Çelikhane cürufu TMA briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Numune No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	2,986	60,5	49,44	511,79
3	2,952	61,0	67,98	698,70
4	2,950	61,1	58,57	600,60

Çizelge 4.65 : Çelikhane cürufu TMA briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Numune No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
2	2,969	61,1	69,55	713,28
5	2,957	61,5	66,81	680,65
6	2,945	61,5	70,04	713,63

Çizelge 4.64 ve 4.65'teki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 85,9 olarak hesaplanmıştır.

Deney için üretilen doğal agrega binder tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-2, 3-6 ve 4-5 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.66 ve 4.67'de sunulmuştur.

Çizelge 4.66 : Doğal agrega binder briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	2,535	62,9	7,44	740,75
3	2,539	62,4	7,18	720,69
4	2,527	62,7	7,79	778,40

Çizelge 4.67 : Doğal agrega binder briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşulsuz İÇM (kPa)
2	2,534	62,8	9,65	963,65
6	2,539	62,2	7,99	804,43
5	2,528	62,9	8,95	890,77

Çizelge 4.66 ve 4.67'deki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 84,2 olarak hesaplanmıştır.

Deney için üretilen çelikhane cürufu binder tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-2, 3-6 ve 4-5 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.68 ve 4.69'da sunulmuştur.

Çizelge 4.68 : Çelikhane cürufu binder briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	3,003	62,6	8,42	842,94
3	2,991	62,7	9,10	909,29
4	2,992	61,7	8,23	835,40

Çizelge 4.69 : Çelikhane cürufu binder briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşulsuz İÇM (kPa)
2	2,995	62,4	9,50	953,04
6	2,990	63,4	9,82	970,50
5	2,993	63,6	9,21	907,53

Çizelge 4.68 ve 4.69'daki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 91,4 olarak hesaplanmıştır.

Deney için üretilen doğal agrega bitümlü temel tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-5, 2-4 ve 3-6 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.70 ve 4.71’de sunulmuştur.

Çizelge 4.70 : Doğal agrega BT briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	2,535	63,6	9,18	904,32
2	2,531	63,2	9,68	959,51
3	2,526	63,4	7,51	741,93

Çizelge 4.71 : Doğal agrega BT briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşulsuz İÇM (kPa)
5	2,538	63,8	10,19	1000,43
4	2,529	63,5	10,64	1050,32
6	2,529	63,4	8,91	880,27

Çizelge 4.70 ve 4.71’deki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 88,9 olarak hesaplanmıştır.

Deney için üretilen çelikhane cürufu bitümlü temel tabakası briketleri, boşluk oranlarına göre 1-6, 2-4 ve 3-5 olarak gruplandırılmıştır. Elde edilen deney sonuçları, Çizelge 4.72 ve 4.73’te sunulmuştur.

Çizelge 4.72 : Çelikhane cürufu BT briketleri koşullu İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşullu İÇM (kPa)
1	2,975	62,3	8,01	805,66
2	2,943	62,8	7,92	789,47
3	3,029	62,3	8,72	877,60

Çizelge 4.73 : Çelikhane cürufu BT briketleri koşulsuz İÇM sonuçları.

Briket No	G _{mb}	H (mm)	Kuvvet (kN)	Koşulsuz İÇM (kPa)
6	2,975	63,0	9,04	898,61
4	2,964	63,1	10,99	1091,62
5	2,980	62,7	9,02	900,47

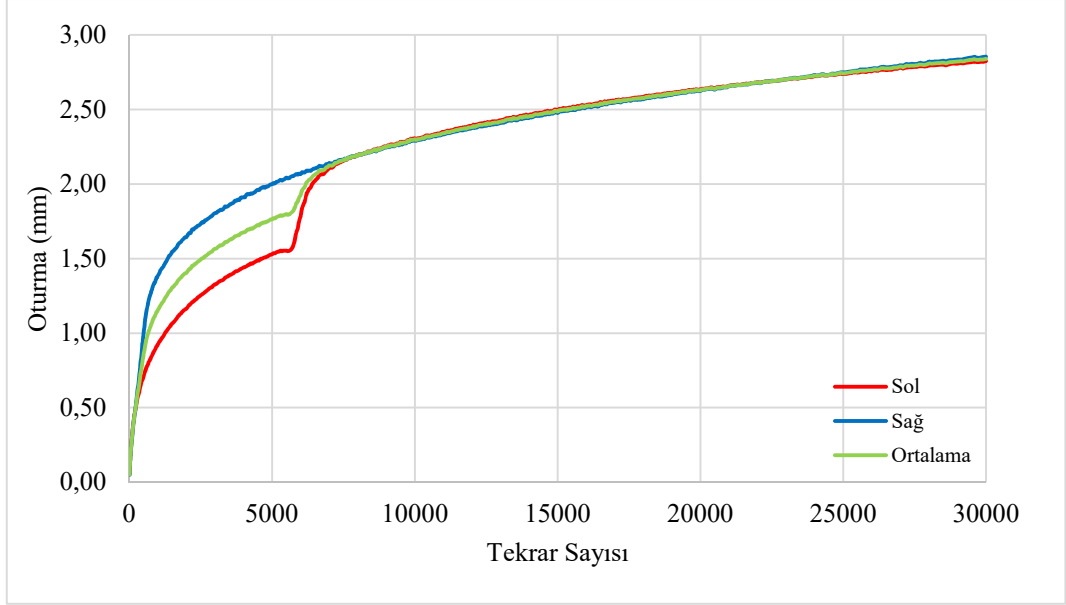
Çizelge 4.72 ve 4.73’teki İÇM sonuçları kıyaslandığında; koşullu numune ortalamaları ile koşulsuz numune ortalamalarının oranı % 85,5 olarak hesaplanmıştır.

4.9 Tekerlek İzinde Oturma

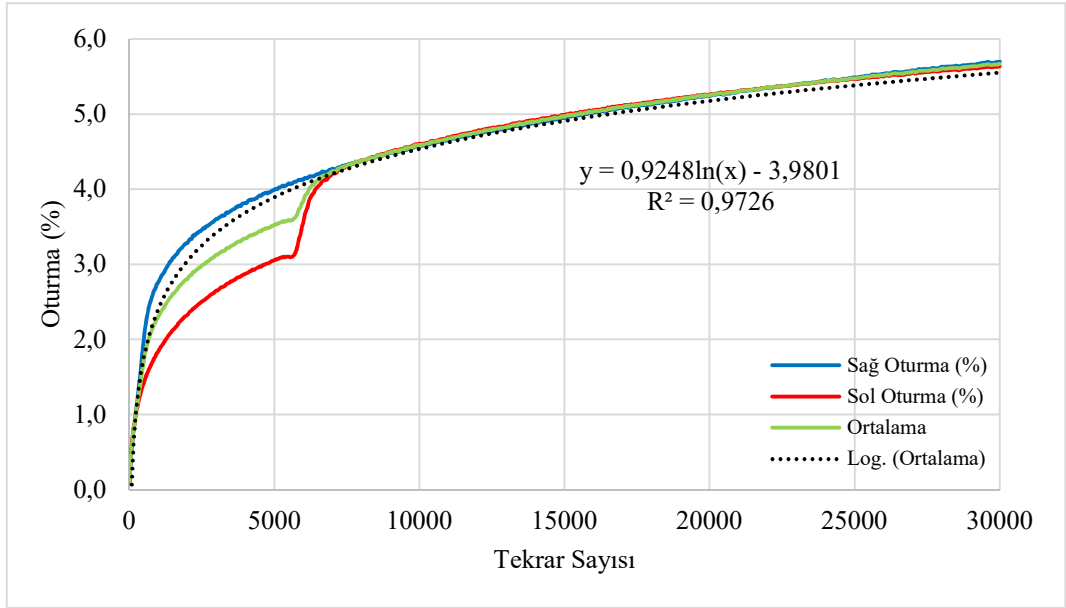
4.9.1 Doğal agrega aşınma tabakası TİO deneyi

Doğal agrega aşınma tabakası tasarımına göre TİO numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde pratik birim hacim ağırlıklar 2,533 (sol) ve 2,538 (sağ) olarak bulunmuştur. Boşluklar sırasıyla % 4,45 ve % 4,26’dır. Sıkışmalar % 99,5 ve %

99,7'dir. Üretilen her iki numunenin de yüksekliği 50,09 mm'dir. Şekil 4.103'te tekrar sayısı-oturma (mm), Şekil 4.104'te ise tekrar sayısı-oturma oranı (%) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.103 : Doğal agrega aşınma tabakası TİO grafiği (mm).



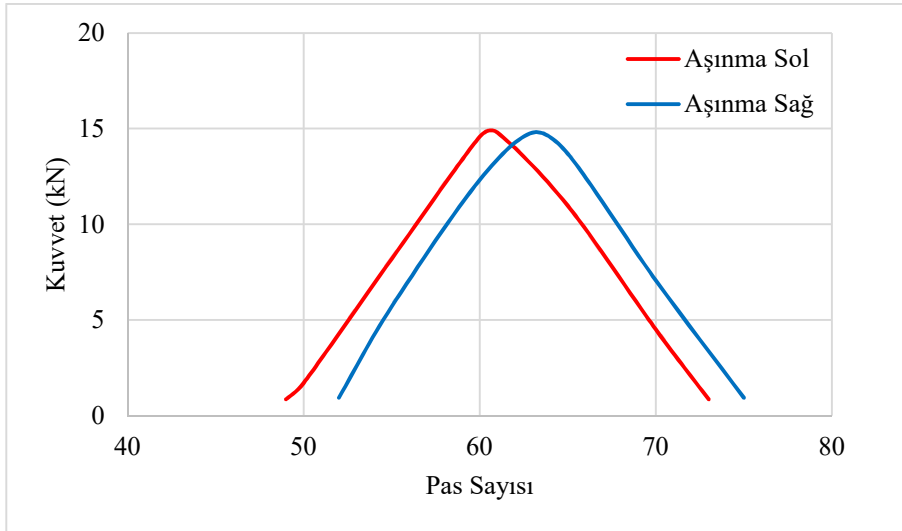
Şekil 4.104 : Doğal agrega aşınma tabakası TİO grafiği (%).

Deney sonucunda, 20.000 tekrarda sol numunenin oturması 2,63 mm, sağ numunenin oturması 2,62 mm olarak belirlenmiştir. Numune yükseklikleri ile oranlandıklarında sol numune oturması % 5,26, sağ numune oturması ise % 5,24 olarak hesaplanmıştır. Ortalama oturma oranı ise % 5,25 bulunmuştur. TİO deneyinden sonra numunelerin fotoğrafları Şekil 4.105'te sunulmuştur.



Şekil 4.105 : Doğal agrega aşınma sol ve sağ TİO numuneleri.

Ayrıca her iki numunenin Hamburg sıkıştırma cihazı verileri alınarak, Ekonomik Analiz bölümünde işlenebilirlik açısından değerlendirme yapılabilmesi için pas sayısı-kuvvet grafikleri çizilmiştir. Grafik, Şekil 4.106’da sunulmuştur.

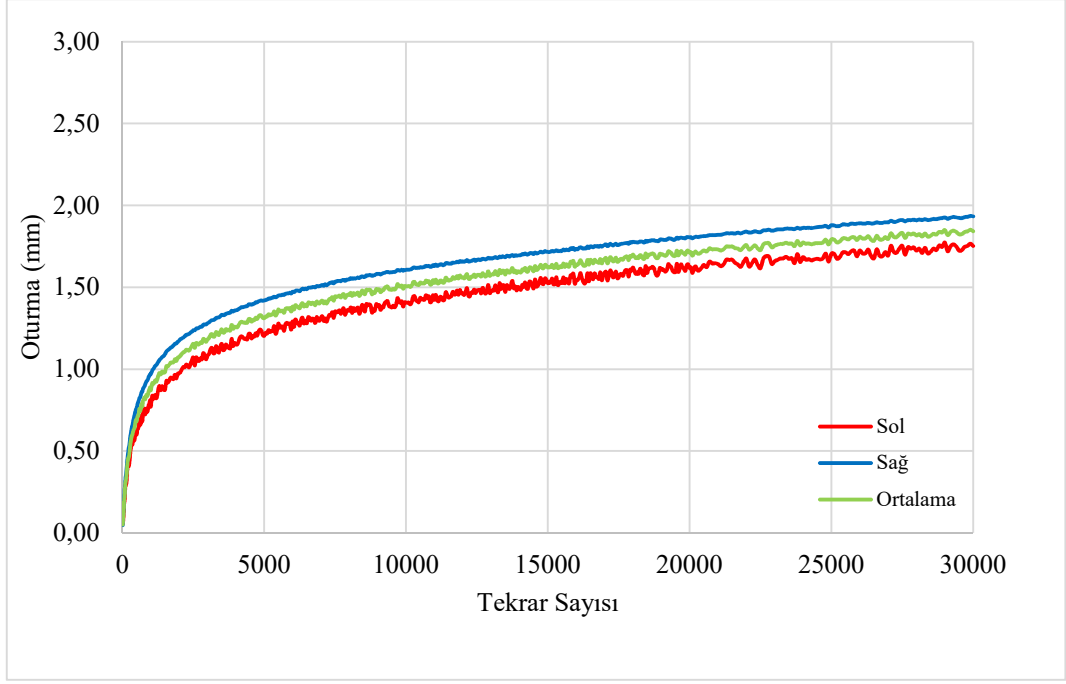


Şekil 4.106 : Doğal agrega aşınma tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.

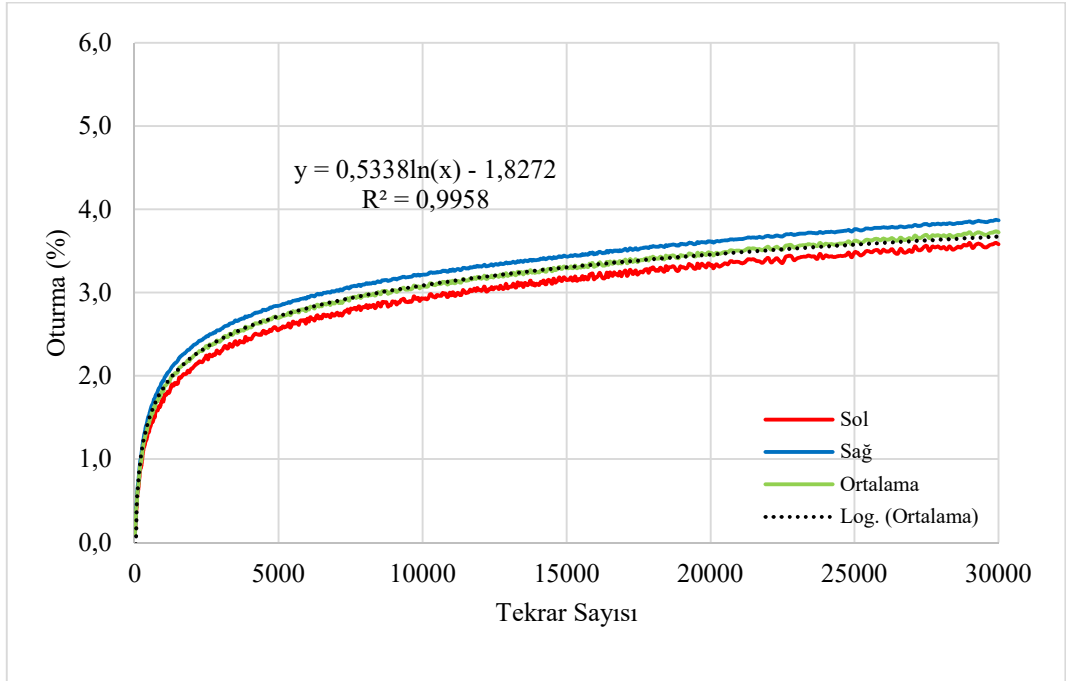
Sıkıştırma işlemi sol numune için 49. pasta, sağ numune için 52. pasta başlamıştır. Bunlardan önceki paslar, numune yüzeyinin düzeltilmesi için atılmış olup, uygulanan kuvvet maksimum 2,79 kN’dur.

4.9.2 Çelikhane cürufu aşınma tabakası TİO deneyi

Çelikhane cürufu aşınma tabakası tasarımına göre TİO numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde pratik birim hacim ağırlıklar her iki numune için de 3,005 olarak bulunmuştur. Boşluk değerleri her iki numunede de % 3,94’tür. Sıkışma değerleri % 100,1’dir. Üretilen sol numunenin yüksekliği 51,43 mm, sağ numunenin yüksekliği 49,96 mm’dir. Şekil 4.107’de tekrar sayısı-oturma (mm), Şekil 4.108’de ise tekrar sayısı-oturma oranı (%) grafikleri verilmiştir.

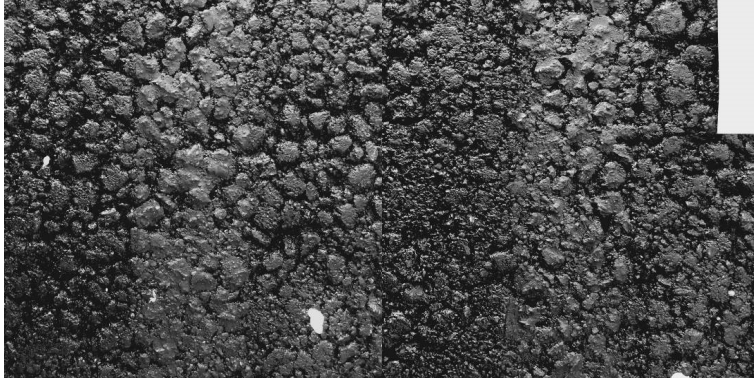


Şekil 4.107 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası TİO grafiği (mm).



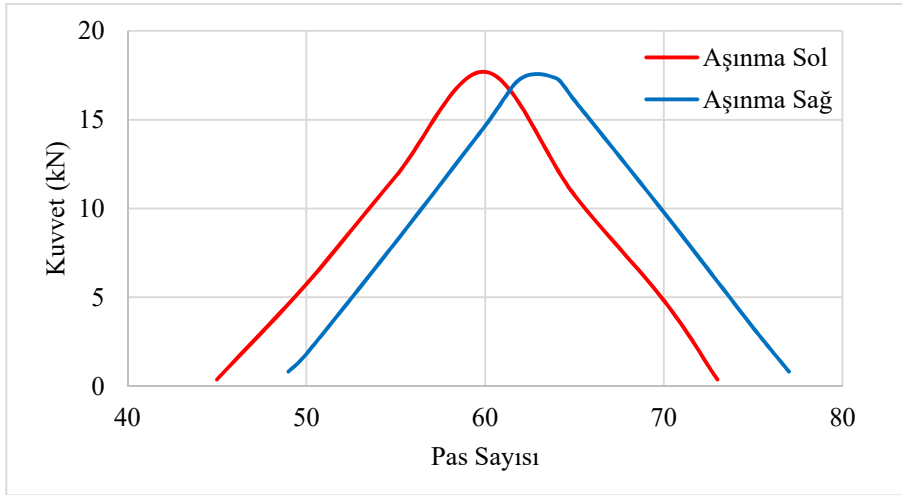
Şekil 4.108 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası TİO grafiği (%).

Deney sonucunda, 20.000 tekrarda sol numunenin oturması 1,62 mm, sağ numunenin oturması 1,80 mm olarak belirlenmiştir. Numune yükseklikleri ile oranlandıklarında sol numune oturması % 3,33, sağ numune oturması ise % 3,61 olarak hesaplanmıştır. Ortalama oturma oranı ise % 3,47 bulunmuştur. TİO deneyinden sonra numunelerin fotoğrafları Şekil 4.109’da sunulmuştur.



Şekil 4.109 : Çelikhane cürufu aşınma sol ve sağ TİO numuneleri.

Ayrıca her iki numunenin Hamburg sıkıştırma cihazı verileri alınarak, Ekonomik Analiz bölümünde işlenebilirlik açısından değerlendirme yapılabilmesi için pas sayısı-kuvvet grafikleri çizilmiştir. Grafik, Şekil 4.110’da sunulmuştur.

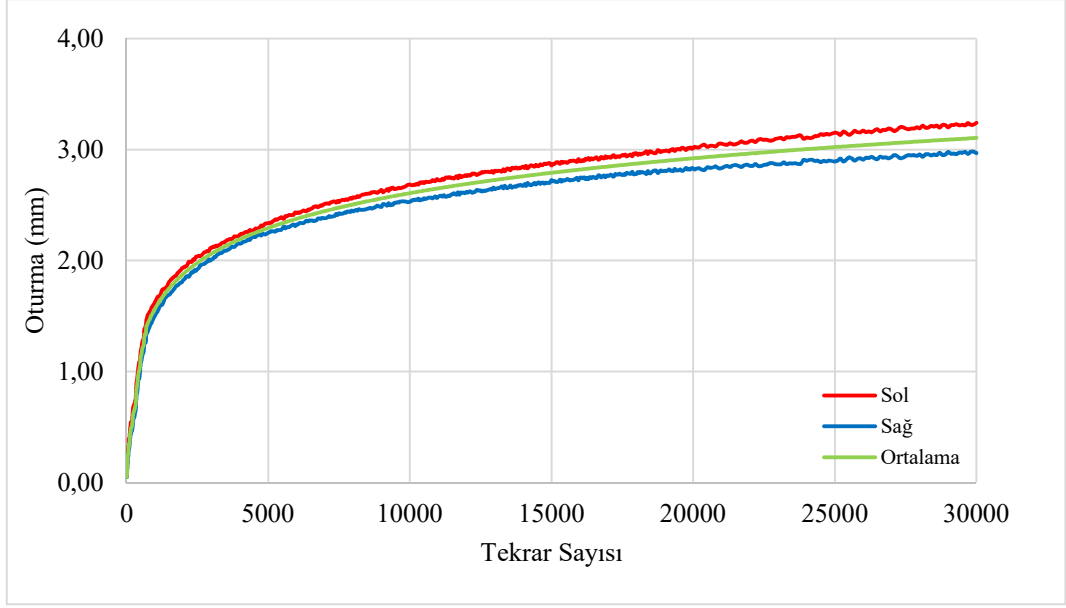


Şekil 4.110 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.

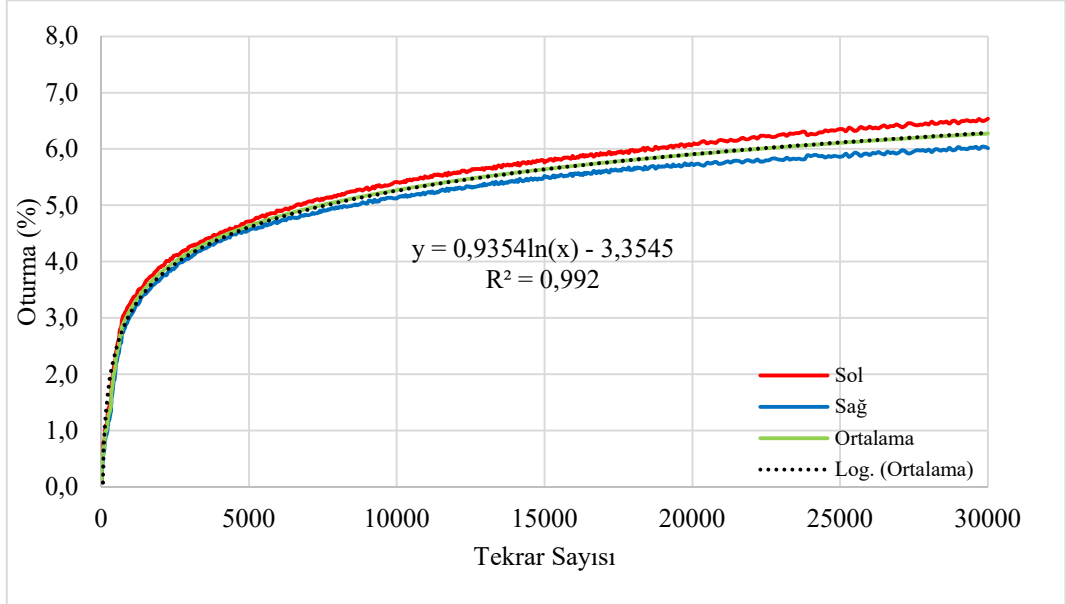
Sıkıştırma işlemi sol numune için 45. pasta, sağ numune için 49. pasta başlamıştır. Bunlardan önceki paslar, numune yüzeyinin düzeltilmesi için atılmış olup, uygulanan kuvvet maksimum 2,81 kN’dur.

4.9.3 Doğal agregat TMA tabakası TİO deneyi

Doğal agregat TMA tabakası tasarımına göre TİO numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde pratik birim hacim ağırlıklar 2,525 (sol) ve 2,512 (sağ) olarak bulunmuştur. Boşluklar sırasıyla % 3,55 ve % 4,05’dir. Sıkışmalar % 98,5 ve % 99,3’tür. Üretilen numunelerin yükseklikleri 49,58 mm ve 49,35 mm’dir. Şekil 4.111’de tekrar sayısı-oturma (mm), Şekil 4.112’de ise tekrar sayısı-oturma oranı (%) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.111 : Doğal agrega TMA tabakası TİO grafiği (mm).



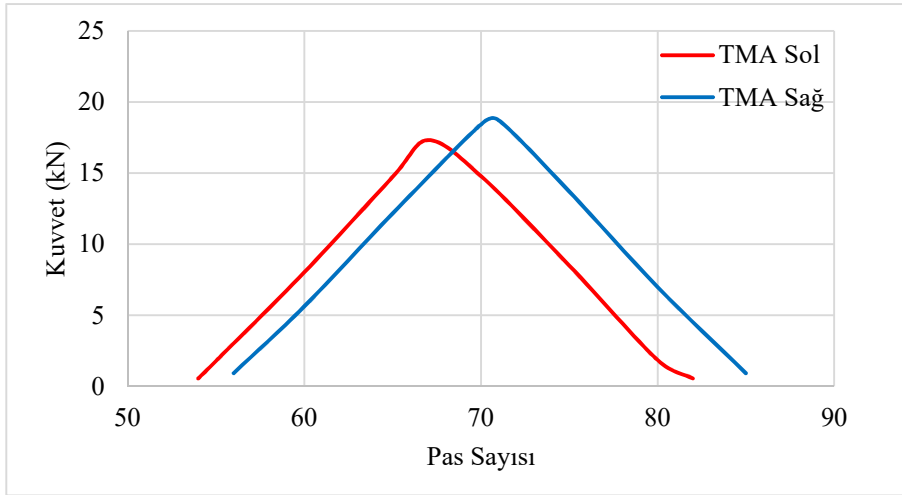
Şekil 4.112 : Doğal agrega TMA tabakası TİO grafiği (%).

Deney sonucunda, 20.000 tekrarda sol numunenin oturması 3,01 mm, sağ numunenin oturması 2,83 mm olarak belirlenmiştir. Numune yükseklikleri ile oranlandıklarında sol numune oturması % 6,07, sağ numune oturması ise % 5,73 olarak hesaplanmıştır. Ortalama oturma oranı ise % 5,90 bulunmuştur. TİO deneyinden sonra sol numunenin fotoğrafı Şekil 4.113'te sunulmuştur.



Şekil 4.113 : Doğal agrega TMA sol TİO numunesi.

Ayrıca her iki numunenin Hamburg sıkıştırma cihazı verileri alınarak, Ekonomik Analiz bölümünde işlenebilirlik açısından değerlendirme yapılabilmesi için pas sayısı-kuvvet grafikleri çizilmiştir. Grafik, Şekil 4.114'te sunulmuştur.

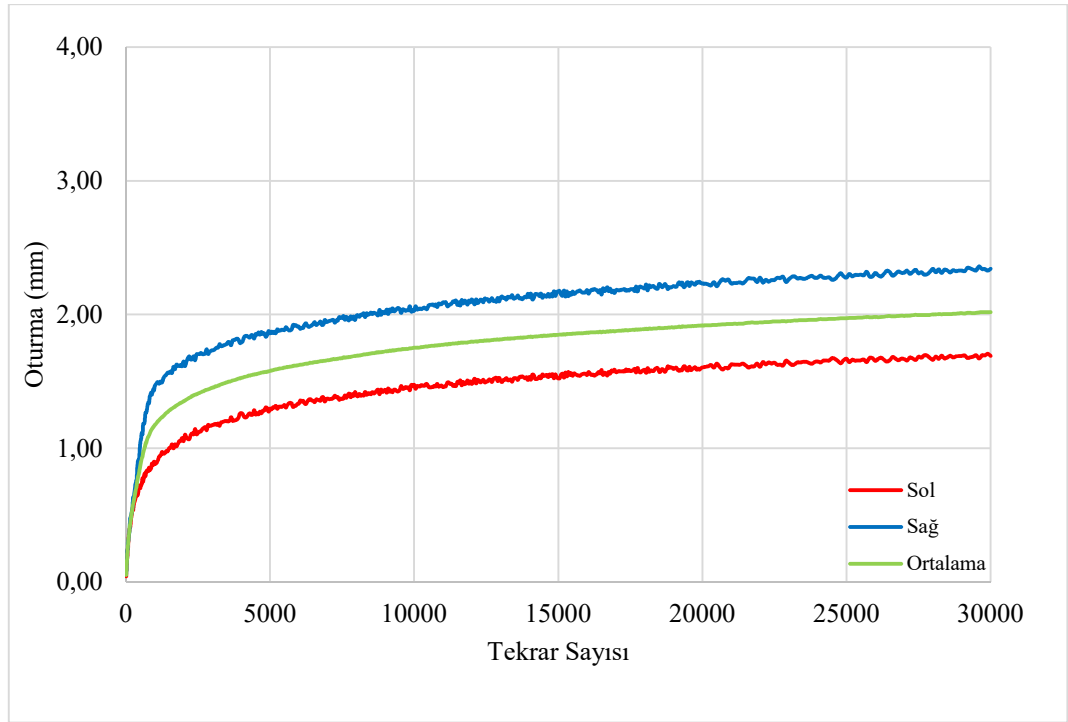


Şekil 4.114 : Doğal agrega TMA tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.

Sıkıştırma işlemi sol numune için 54. pasta, sağ numune için 56. pasta başlamıştır. Bunlardan önceki paslar, numune yüzeyinin düzeltilmesi için atılmış olup, uygulanan kuvvet maksimum 3,05 kN'dur.

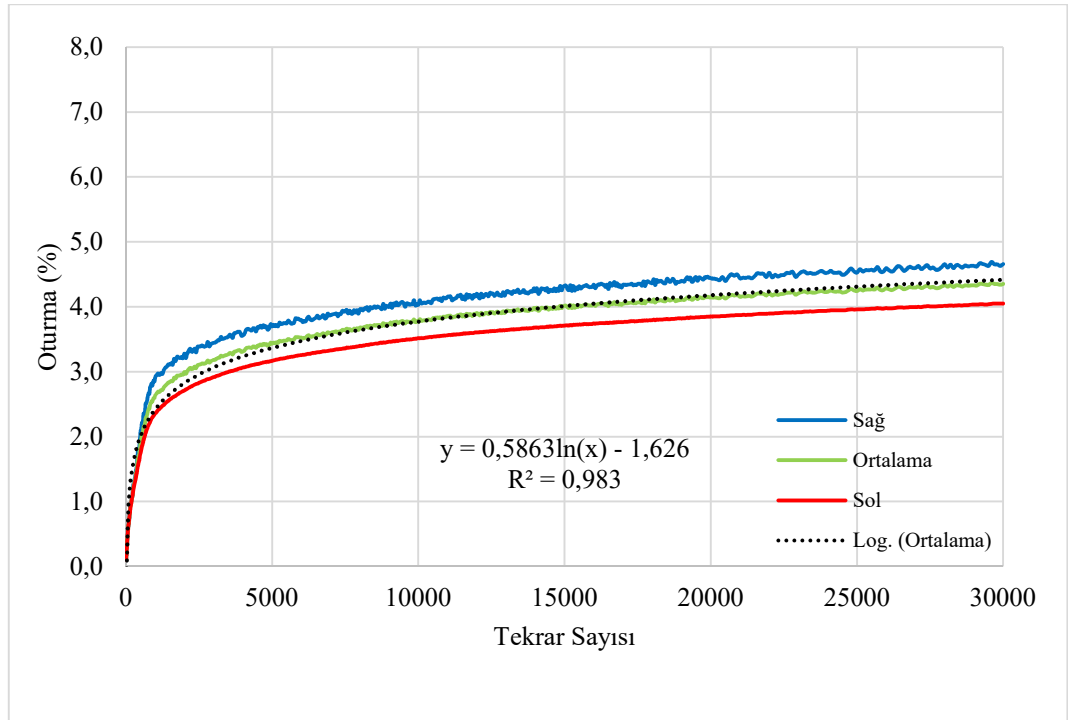
4.9.4 Çelikhane cürufu TMA tabakası TİO deneyi

Çelikhane cürufu TMA tabakası tasarımına göre TİO numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerde pratik birim hacim ağırlıklar 2,926 (sol) ve 2,949 (sağ) olarak bulunmuştur. Boşluklar sırasıyla % 4,47 ve % 3,72'dir. Sıkışmalar % 98,5 ve % 99,3'tür. Üretilen numunelerin yükseklikleri 49,83 mm ve 50,30 mm'dir. Şekil 4.115'te tekrar sayısı-oturma (mm), Şekil 4.116'da ise tekrar sayısı-oturma oranı (%) grafikleri verilmiştir.

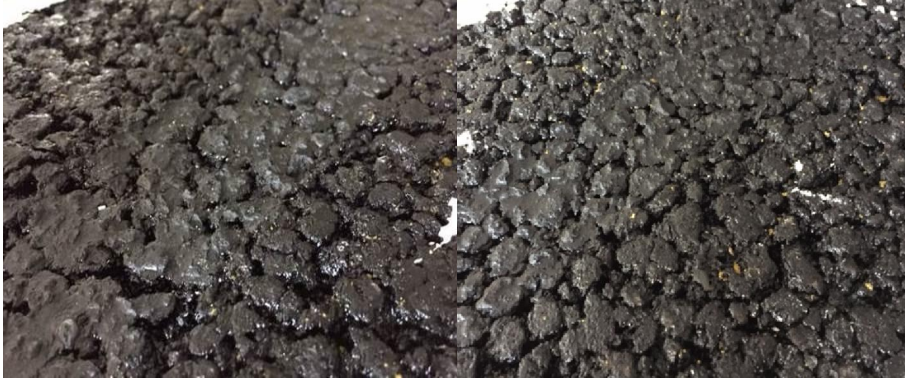


Şekil 4.115 : Çelikhane cürufu TMA tabakası TİO grafiği (mm).

Deney sonucunda, 20.000 tekrarda sol numunenin oturması 1,60 mm, sağ numunenin oturması 2,23 mm olarak belirlenmiştir. Numune yükseklikleri ile oranlandıklarında sol numune oturması % 3,85, sağ numune oturması ise % 4,44 olarak hesaplanmıştır. TİO deneyinden sonra numunelerin fotoğrafları Şekil 4.117'de sunulmuştur.

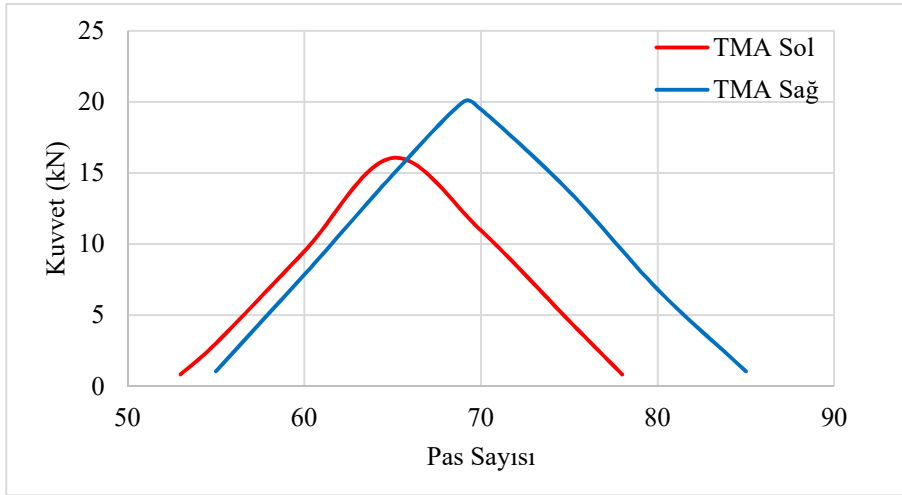


Şekil 4.116 : Çelikhane cürufu TMA tabakası TİO grafiği (%).



Şekil 4.117 : Çelikhane cürufu TMA sol ve sağ TİO numuneleri.

Ayrıca her iki numunenin Hamburg sıkıştırma cihazı verileri alınarak, Ekonomik Analiz bölümünde işlenebilirlik açısından değerlendirme yapılabilmesi için pas sayısı-kuvvet grafikleri çizilmiştir. Grafik, Şekil 4.118’de sunulmuştur.



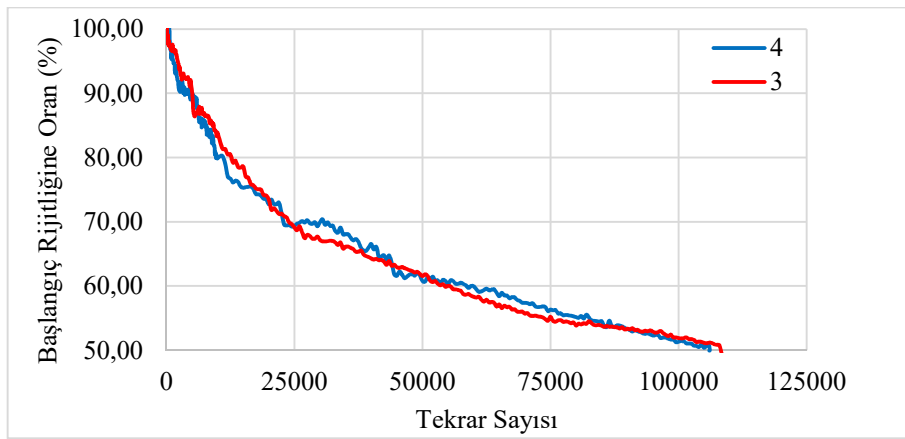
Şekil 4.118 : Çelikhane cürufu TMA tabakası, pas sayısı-kuvvet grafiği.

Sıkıştırma işlemi sol numune için 53. pasta, sağ numune için 55. pasta başlamıştır. Bunlardan önceki paslar, numune yüzeyinin düzeltilmesi için atılmış olup, uygulanan kuvvet maksimum 3,4 kN’dur.

4.10 Yorulma Ömrünün Belirlenmesi

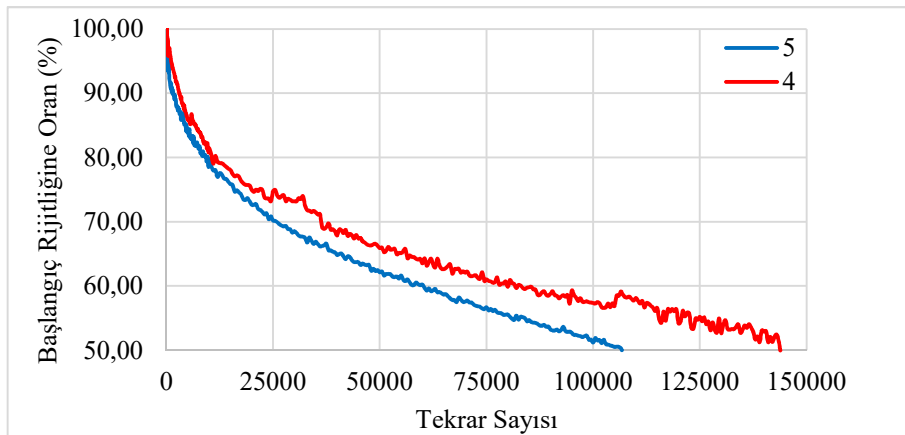
Bitümlü Sıcak Karışımlar bölümü kapsamında son olarak doğal agrega ve çelikhane cürufu ile üretilen aşınma ve TMA tasarımlarının yorulma ömrü belirlenmiştir. Optimum bağlayıcı oranında üretilen numunelerin G_{mb} değerleri ölçülmüş ve 5 x 5 cm’lik kirişler halinde kesilmiştir. Kesilen kirişlerin G_{mb} değerleri yeniden kontrol edilmiştir.

Sıkıştırılan numuneler kesilerek kirişler elde edildiği için kirişlerin G_{mb} değerlerinin, ilk G_{mb} değerlerinden büyük olması gerekmektedir. Bu koşula uymayan numuneler ilk aşamada elenmiştir. İkinci eleme, veri kontrolleri doğrultusunda yapılmıştır. Numunelerde meydana gelen gerilmelerin ve gözlemlenen eğilme rijitliklerinin davranışları incelenmiştir. Süreksizliklerin mevcut olduğu numuneler dikkate alınmamıştır. Bu yaklaşım ile her 5 kirişlik gruptan 2 kiriş değerlendirme kapsamına alınmıştır. Deney kirişin eğilme rijitliğinin, başlangıç değerinin % 50'sine indiği yüklemde sonlandırılmıştır. Doğal agrega aşınma tabakasına ait 3 ve 4 numaralı kirişlerin yorulma ömürlerine ait grafik, Şekil 4.119'da sunulmuştur.



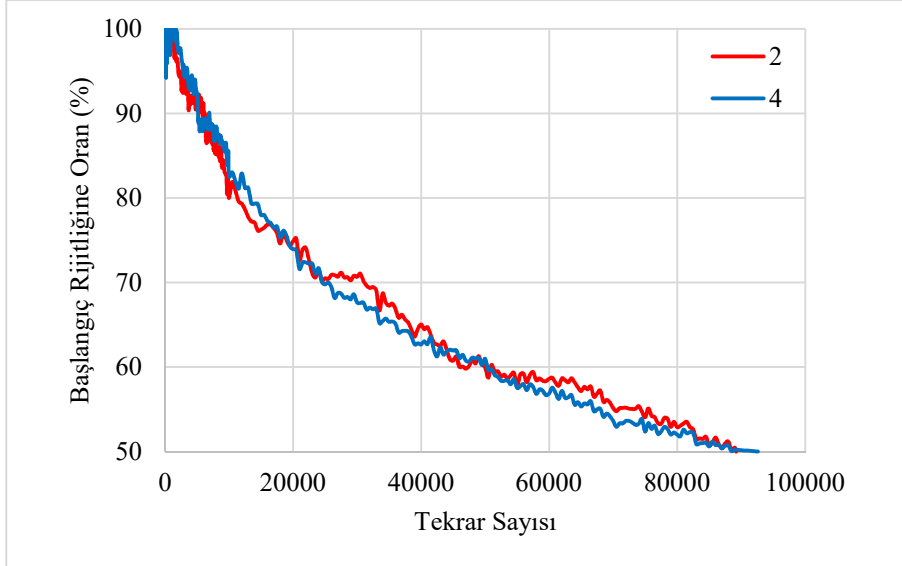
Şekil 4.119 : Doğal agrega aşınma tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.

Şekil 4.119'da görüldüğü üzere 3 numaralı numunenin yorulma ömrü 108.399 tekrar, 4 numaralı numunenin yorulma ömrü 106.047 tekrardır. Çelikhane cürufu aşınma tabakasına ait 4 ve 5 numaralı kirişlerin yorulma ömrüne ait grafik, Şekil 4.120'de sunulmuştur.



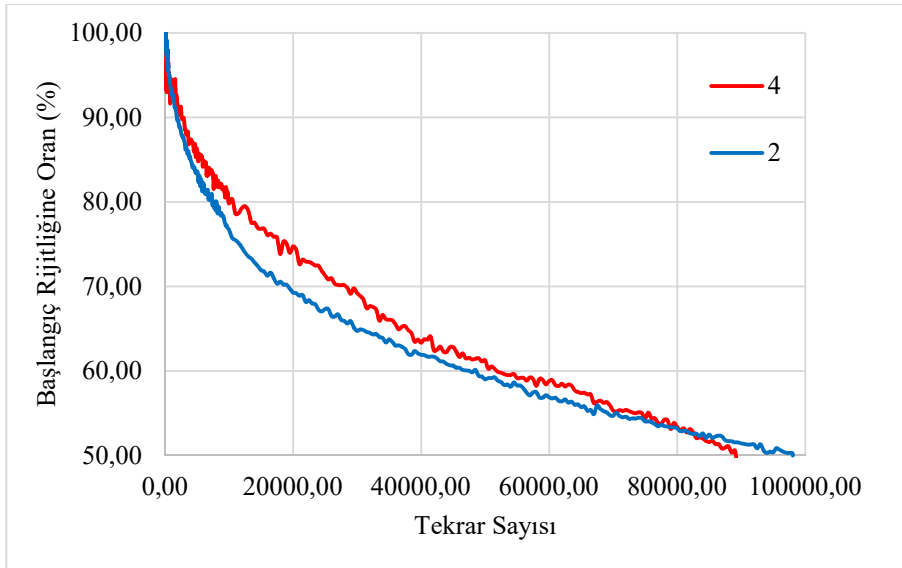
Şekil 4.120 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.

Şekil 4.120’de görüldüğü üzere 4 numaralı numunenin yorulma ömrü 143.851 tekrar, 5 numaralı numunenin yorulma ömrü 106.715 tekrardır. Doğal agrega TMA tabakasına ait 2 ve 4 numaralı kirişlerin yorulma ömürlerine ait grafik, Şekil 4.121’de sunulmuştur.



Şekil 4.121 : Doğal agrega TMA tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.

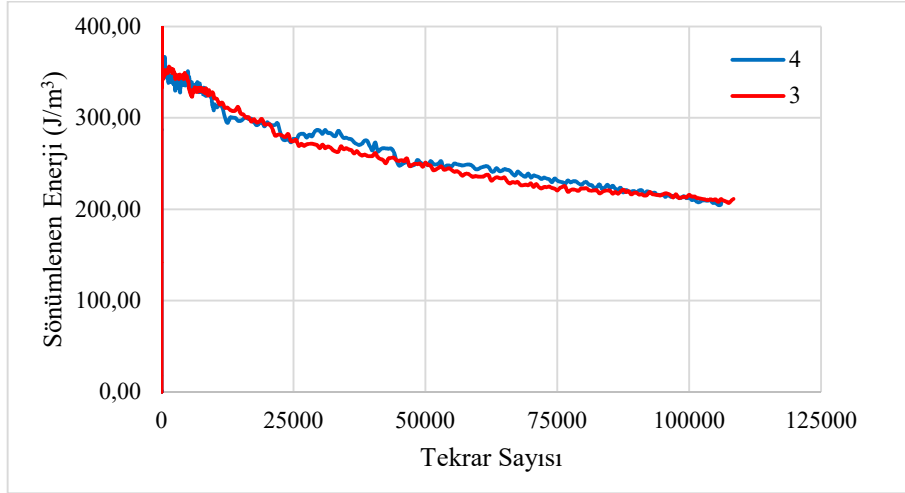
Şekil 4.121’de görüldüğü üzere 2 numaralı numunenin yorulma ömrü 89.220 tekrar, 4 numaralı numunenin yorulma ömrü 92.614 tekrardır. Çelikhane cürufu TMA tabakasına ait 2 ve 4 numaralı kirişlerin yorulma ömürlerine ait grafik, Şekil 4.122’de sunulmuştur.



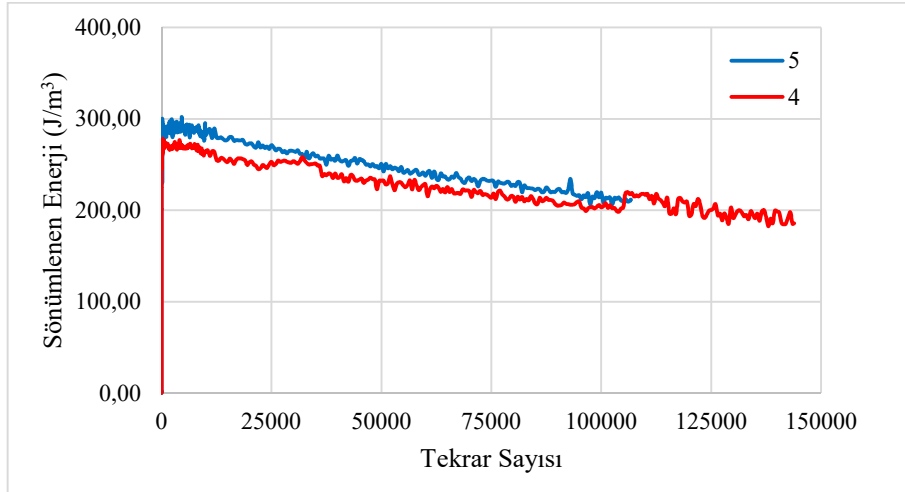
Şekil 4.122 : Çelikhane cürufu TMA tabakası numuneleri yorulma ömrü grafiği.

Şekil 4.122’de görüldüğü üzere 2 numaralı numunenin yorulma ömrü 98.055 tekrar, 4 numaralı numunenin yorulma ömrü 89.215 tekrardır.

Kirişler tarafından her yüklemede sönmömlenen enerji miktarına ilişkin grafikler, doğal agrega aşınma tabakası için Şekil 4.123’te, çeliklane cürufu aşınma tabakası için Şekil 4.124’te, doğal agrega TMA tabakası için Şekil 4.125’te ve çeliklane cürufu TMA tabakası için Şekil 4.126’da sunulmuştur.

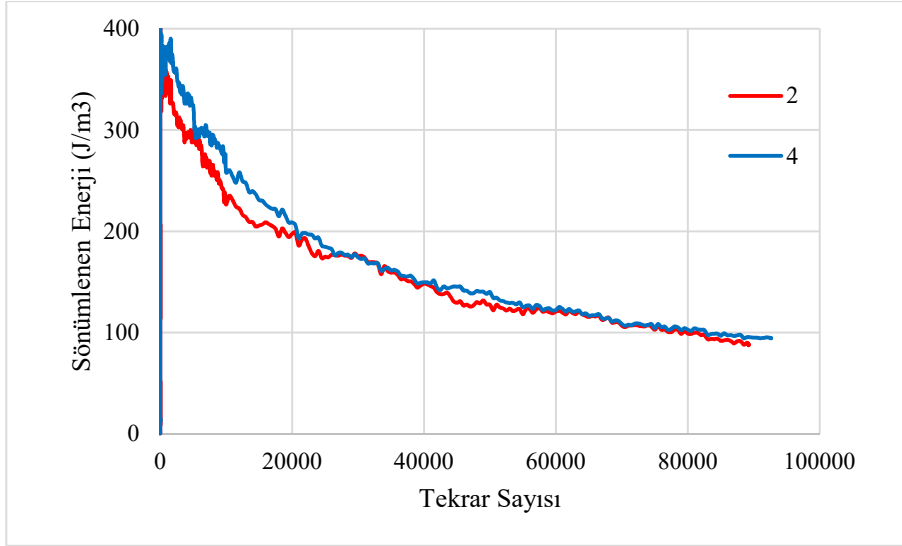


Şekil 4.123 : Doğal agrega aşınma tabakası numuneleri sönmömlenen enerji grafiği.

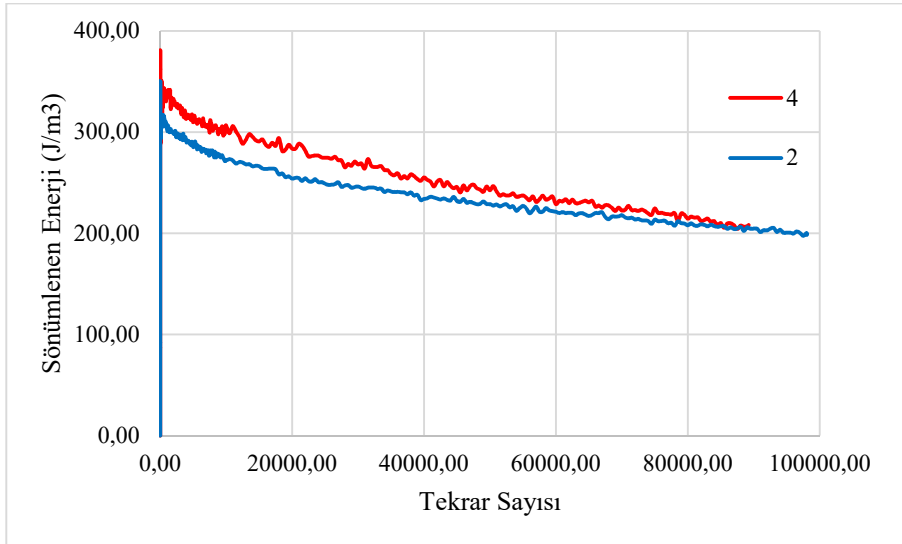


Şekil 4.124 : Çeliklane cürufu aşınma tabakası numuneleri sönmömlenen enerji grafiği.

Şekil 4.123 ve 4.124’te görüldüğü üzere, doğal agrega aşınma tabakası numunelerinde her tekrarda sönmömlenen enerji miktarı 350 J/m³ dolaylarında başlamakta, 200 j/m³ dolaylarında eğilme rijitliğinin % 50 seviyesine inmesi ile sona ermektedir. Çeliklane cürufu aşınma tabakası numunelerinde ise her tekrarda sönmömlenen enerji miktarı 300 J/m³ dolaylarında başlamakta, 200 j/m³ dolaylarında sona ermektedir.



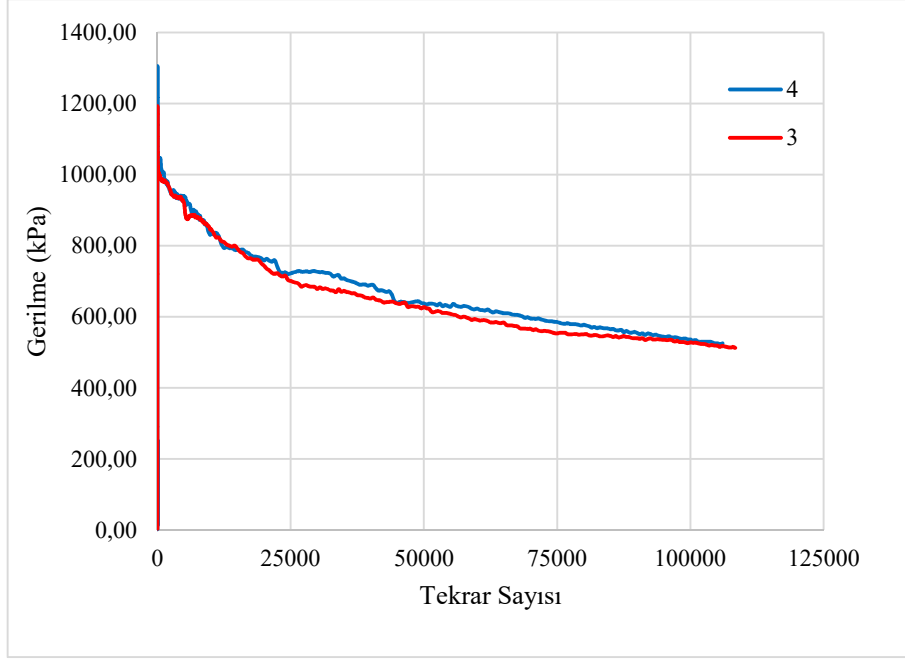
Şekil 4.125 : Doğal agrega TMA tabakası numuneleri sönümlenen enerji grafiği.



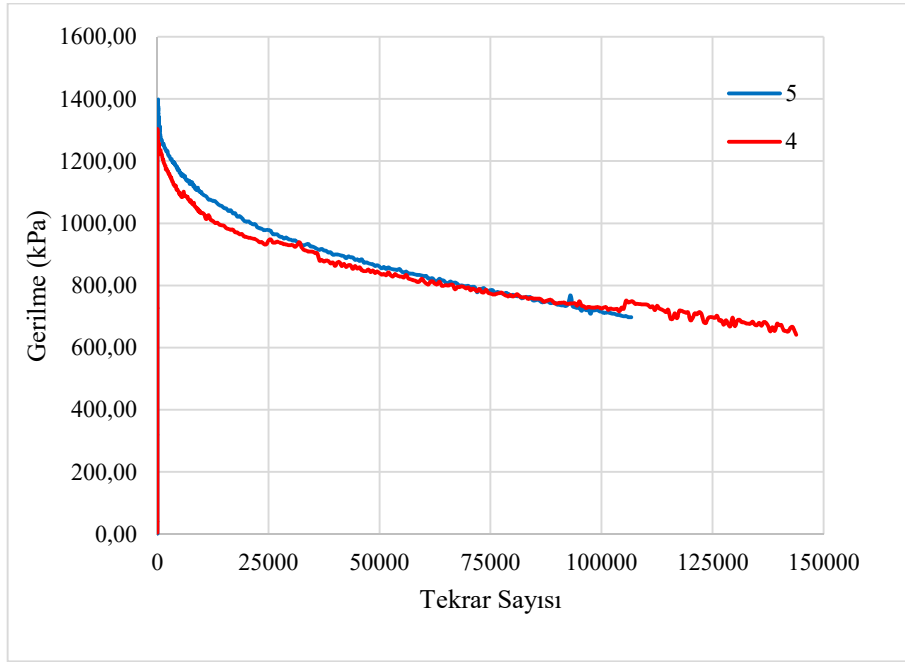
Şekil 4.126 : Çelikhane cürufu TMA tabakası numuneleri sönümlenen enerji grafiği.

Şekil 4.125 ve 4.126’da görüldüğü üzere, doğal agrega TMA tabakası numunelerinde her tekrarda sönümlenen enerji miktarı 350 J/m^3 dolaylarında başlamakta, 100 J/m^3 dolaylarında eğilme rijitliğinin % 50 seviyesine inmesi ile sona ermektedir. Çelikhane cürufu TMA tabakası numunelerinde ise her tekrarda sönümlenen enerji miktarı 350 J/m^3 dolaylarında başlamakta, 200 J/m^3 dolaylarında sona ermektedir.

Her yüklemede kirişlerde meydana gelen gerilmelere ilişkin grafikler, doğal agrega aşınma tabakası için Şekil 4.127’de, çelikhane cürufu aşınma tabakası için Şekil 4.128’de, doğal agrega TMA tabakası için Şekil 4.129’da ve çelikhane cürufu TMA tabakası için Şekil 4.130’da sunulmuştur.

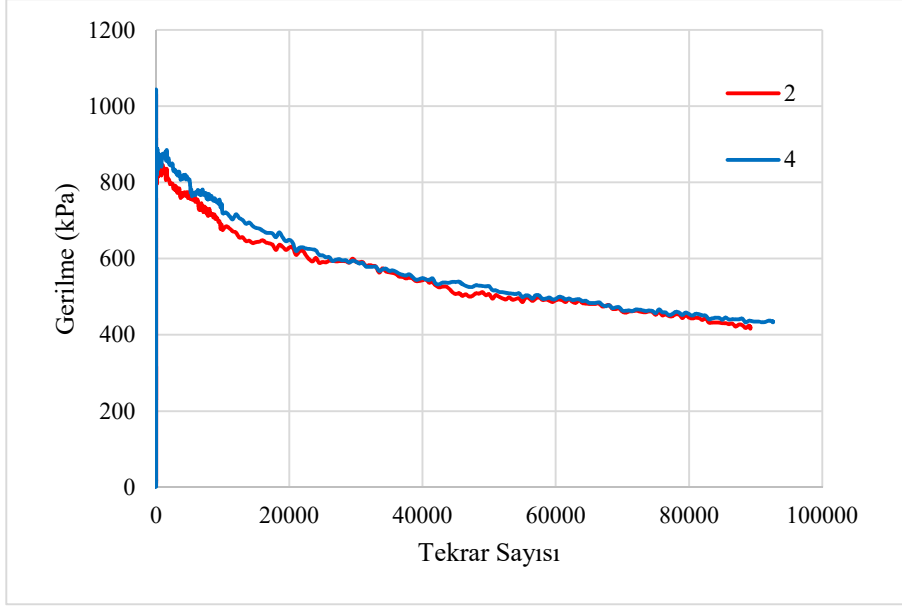


Şekil 4.127 : Doğal agrega aşınma tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.

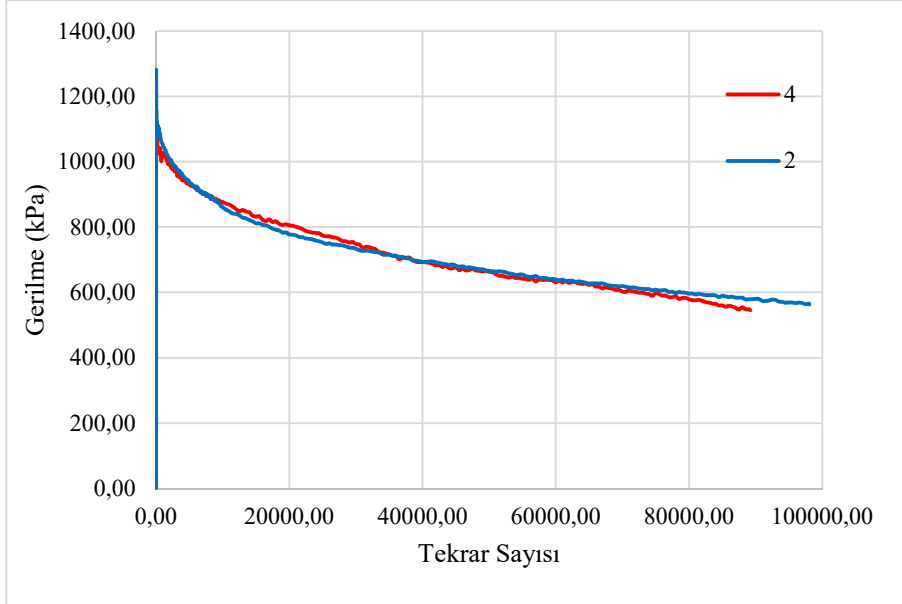


Şekil 4.128 : Çelikhane cürufu aşınma tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.

Şekil 4.127 ve 4.128’de görüldüğü üzere, doğal agrega aşınma tabakası numunelerinde her tekrarda meydana gelen gerilme 1.000 kPa dolaylarında başlamakta, 500 kPa dolaylarında eğilme rijitliğinin % 50 seviyesine inmesi ile sona ermektedir. Çelikhane cürufu aşınma tabakası numunelerinde ise her tekrarda meydana gelen gerilme 1.300 kPa dolaylarında başlamakta, 700 kPa dolaylarında sona ermektedir.



Şekil 4.129 : Doğal agrega TMA tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.



Şekil 4.130 : Çelikhane cürufu TMA tabakası numuneleri iç gerilme grafiği.

Şekil 4.129 ve 4.130’da görüldüğü üzere, doğal agrega TMA tabakası numunelerinde her tekrarda meydana gelen gerilme 900 kPa dolaylarında başlamakta, 400 kPa dolaylarında eğilme rijitliğinin % 50 seviyesine inmesi ile sona ermektedir. Çelikhane cürufu TMA tabakası numunelerinde ise her tekrarda meydana gelen gerilme 1.100 kPa dolaylarında başlamakta, 600 kPa dolaylarında sona ermektedir.

Yapılan deneyler doğrultusunda doğal agrega ve çelikhane cürufu ile imal edilmiş aşınma ve TMA tabakası numunelerine ait yorulma ömürleri Çizelge 4.74’te sunulmuştur.

Çizelge 4.74 : Ortalama yorulma ömürleri.

Tabaka Tipi	Malzeme	Numune No	Yorulma Ömrü	Ortalama Yorulma Ömrü
Aşınma	Doğal	3	108.399	107.223
	Agrega	4	106.047	
	Çelikhane	4	143.851	125.283
	Cürufu	5	106.715	
TMA	Doğal	2	89.220	90.917
	Agrega	4	92.614	
	Çelikhane	2	98.055	93.635
	Cürufu	4	89.215	

5. TARTIŞMA

Bu bölümde, Bulgular bölümünde (Bölüm 4) sunulmuş olan inceleme sırası esas alınarak, elde edilen sonuçların doğal agrega ve çelikhane cürufu kapsamında karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca uluslararası literatürde benzer çalışmalarda elde edilen veriler de çalışmadaki sonuçlarla kıyaslanmıştır. Bunlara ek olarak bu bölümün sonunda Ekonomik Analiz yapılmıştır.

5.1 Fiziksel Özellikler

Fiziksel özellikler kapsamında doğal agrega ve çelikhane cürufundan elde edilen sonuçlar Malzeme bölümünde (Bölüm 2) verilmiştir. Bu sonuçların KTŞ 2013 limitleri ile karşılaştırması ise Bulgular bölümünde (Bölüm 4) yapılmıştır.

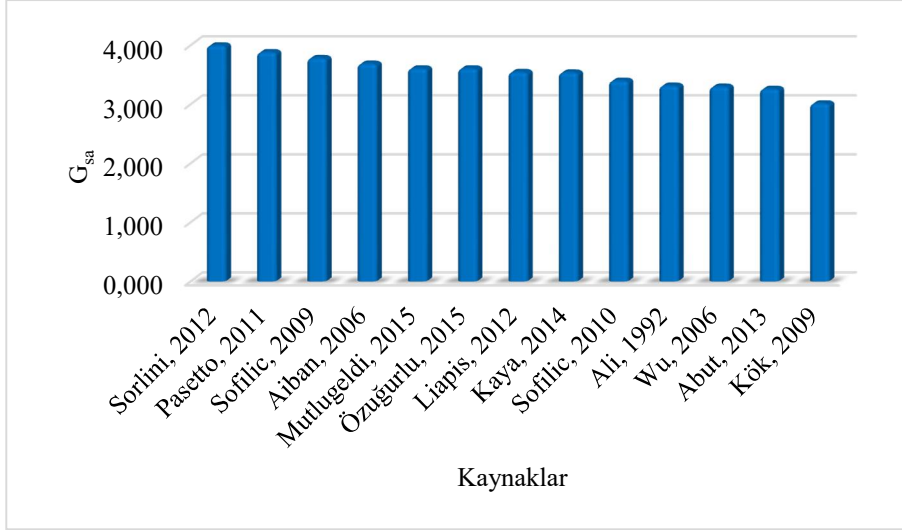
Bu bölümde, Bulgular bölümündeki (Bölüm 4) sıraya sadık kalınarak, çelikhane cürufu ve doğal agreganın fiziksel deney sonuçları, literatürde bulunan sonuçların da ışığında değerlendirilmiştir.

5.1.1 Birim hacim ağırlık ve su absorpsiyonu

Bulgular bölümü (Bölüm 4), Çizelge 4.1 incelendiğinde, doğal agrega ve çelikhane cürufunun BHA ve SA değerlerinin birbirinden çok farklı olduğu ve çelikhane cürufunun, aşınma ve TMA agregası için KTŞ 2013'te tanımlanan su absorpsiyonu limitlerini aştığı görülmektedir.

Cürufun BHA değerini yükselten ana etken, içeriğindeki metalik demir ve demir oksitlerdir. Metalik demir, manyetik ayrıştırma ile cüruf içinden büyük oranda alınabilmektedir. Fakat çelik üretiminin doğası gereği meydana gelen demir oksitlerin, cüruf içinden uzaklaştırılması mümkün değildir. FeO ve Fe₂O₃ formunda cüruf içinde bulunan bu bileşenlerin yoğunlukları sırasıyla 5,745 gr/cm³ ve 5,242 gr/cm³'tür. Her ne kadar karayolu inşaatında kullanılacak olan agreganın BHA değerleri ile ilgili bir limit olmasa da uygulamada taşıma mesafesini kısaltacağı ve maliyetleri arttıracığı açıktır.

Uluslararası çalışmalarda elde edilen G_{sa} değerleri Şekil 5.1’de sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan çelikhane cürufunun G_{sa} değerleri ise 3,401 ila 3,792 aralığında bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar ve Şekil 5.1 karşılaştırıldığında, BHA değerleri bakımından çelikhane cürufunun genel bir tutarlılık gösterdiği açıktır.



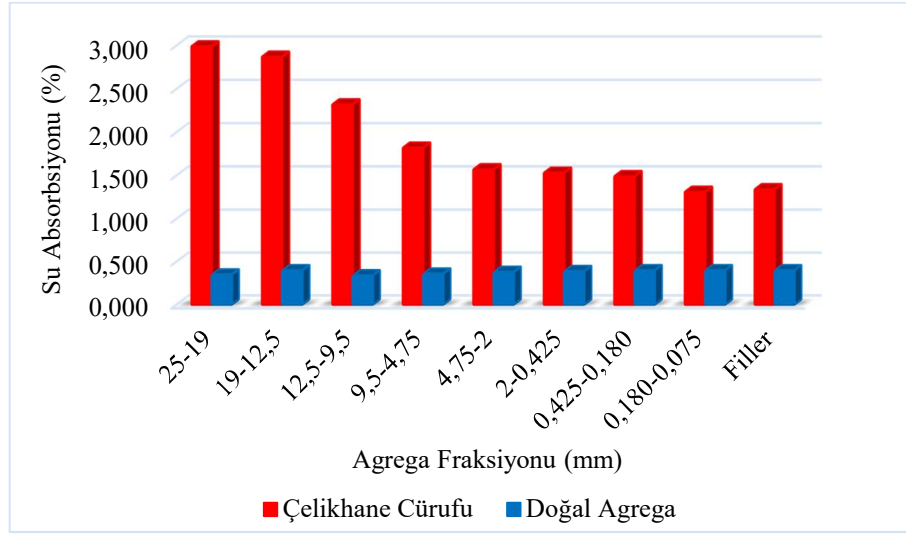
Şekil 5.1 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen G_{sa} değerleri.

Çelikhane cürufu ve doğal agrega SA değerlerinde, BHA değerlerine oranla çok daha büyük farklılıklar gözlemlenmektedir. SA değerinin yüksek olması, dolaylı yoldan BSK’larda kullanılan bağlayıcının da daha fazla absorbe edileceğini ve imalat maliyetinin artacağını ifade etmektedir. KTŞ 2013’te karışımlarda kullanılacak agregalar için su absorpsiyonu limitleri bulunmakla birlikte, ekonomik ve teknik nedenlerle su absorpsiyonu yüksek agreganın kullanılma zorunluluğu doğarsa, idarenin onayı ve özel laboratuvar karışımı hazırlamak koşulu ile su absorpsiyonu yüksek agregaların üretimde kullanılabileceği belirtilmiştir [19].

Çelikhane cürufunda gözlenen yüksek SA değerleri malzemenin gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Bu yapı, cürufun hızlı bir şekilde su püskürtülerek soğutulması sırasında, eriyik içinde hapsolan gazların uzaklaşamamasından kaynaklanmaktadır. Bu sorun, farklı cüruf işleme yöntemleri ile çözülebilmektedir. Fakat Ekonomik Kısıtlar bölümünde (Bölüm 1.4.3) de belirtildiği üzere; bu doğrultuda cürufun işlenmesi, ilk yatırım maliyeti yüksek bir uygulamadır.

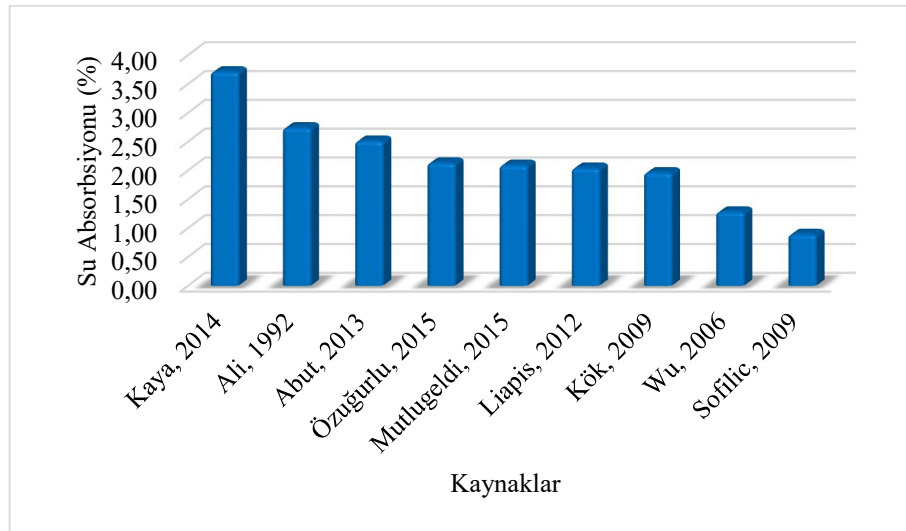
Bu bölüm kapsamında dikkat çeken bir diğer husus da, çelikhane cürufunun tane boyutu küçüldükçe SA değerlerinin düşmesi, doğal agregada ise artmasıdır. Bu durum, ince taneli doğal agregada kohezyondan, cürufta ise ince tanelerin daha az gözenekli

olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.2’de fraksiyonlara göre çelikhane cürufu ve doğal agreganın su absorpsiyonu değerleri verilmiştir.



Şekil 5.2 : Fraksiyonlara göre çelikhane cürufu ve doğal agrega su absorpsiyonu değerleri.

Farklı çalışmalarda kullanılan EAO çelikhane cüruf numunelerinin su absorpsiyonu değerleri Şekil 5.3’te sunulmuştur. Şekil 5.2 ve 5.3 karşılaştırıldığında, Şekil 5.3’te ilk yedi kaynakta elde edilen SA değerlerinin, bu çalışmada kullanılan numune ile benzerlik gösterdiği, son iki kaynakta kullanılan cürufların ise ek işlemden geçirildiği açıktır.



Şekil 5.3 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen SA değerleri.

Su absorpsiyonu değerlerinde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da su ile tepkimeye giren CaO ve MgO’nun cüruf içinde kalması durumunda tanelerin

ağırlıklarının artmasına neden olmasıdır. 1 mol CaO 56,08 gr iken su ile tepkime sonucu meydana gelen 1 mol Ca(OH)_2 74,09 gr'dır. Aynı durum MgO için de geçerlidir. 1 mol MgO 40,30 gr iken tepkime sonucu oluşan Mg(OH)_2 'nin 1 molü 58,32 gr'dır. Belirtilen durum, SA deneyi sırasında kütle artışına neden olabilmekte ve SA sonuçlarının gerçekte olduğundan yüksek çıkmasına sebep olabilmektedir.

5.1.2 Organik madde içeriği

Organik madde içeriği tayini AASHTO T-21 standardı uyarınca, NaOH çözeltisi ile çelikhane cürufu ve doğal agregaya uygulanmıştır. Her iki numunede de organik madde ile karşılaşılmamıştır.

KTŞ 2013'te, alttemel, granüler temel, bitümlü temel, binder, aşınma ve TMA tabakalarında kullanılacak agregada organik madde içeriği istenmemektedir [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agregası, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

Fakat bazı özel durumlarda üretim sırasında cüruf içine inorganik karbonun kaçtığı belirtilmektedir. Bu da NaOH çözeltisi ile yapılan deneylerde, çözelti renginin değişmesine neden olabilmektedir.

Özel durumlar haricinde çelikhane cürufu içeriğinde, üretim sıcaklıkları nedeniyle organik madde bulunma olasılığı yoktur. Fakat stok sahasında cürufun kontamine olma olasılığı mevcuttur. Bu nedenle karayolu inşaat veya farklı uygulamalarda kullanılacak olan cürufun ilk olarak tesis nezdinde atık yaklaşımından çıkarılması, cürufa özel, temiz ve düzenli stok sahalarının tesis edilmesi gerekmektedir.

5.1.3 Atterberg limitleri

Kil, silt ve benzeri madde özellikleri gösterme eğiliminde olan kirleticilerin, her iki numuneye de karışma olasılığı göz önünde bulundurularak ASTM D4318 standardı uyarınca Atterberg limitleri belirlenmiştir.

KTŞ 2013'te alttemel tabakasında kullanılacak agreganın likit limit (LL) değerinin % 25'ten, plastisite indeksinin (PI) % 6'dan küçük olması, granüler temel, bitümlü temel, binder, aşınma ve TMA tabakasında kullanılacak agreganın ise non-plastik olması istenmektedir [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agregası, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

Çelikhane cürufu içeriğinde, kil, silt ya da benzer özellikler gösterebilecek maddeler yer almamaktadır. Fakat hafriyat veya diğer kirletici unsurların cüruf ile aynı alana boşaltılması ya da stok sahasının temiz olmaması çelikhane cürufunun kontamine olmasına neden olabilmektedir. Organik Madde İçeriği bölümünde (Bölüm 5.1.2) belirtildiği gibi, cürufun ilk olarak tesis nezdinde atık kapsamından çıkarılması, cürufa özel, temiz ve düzenli stok sahalarının tesis edilmesi gerekmektedir.

5.1.4 Metilen mavisi deneyi

Çelikhane cürufu ve doğal agregaya ASTM C837 uyarınca uygulanan metilen mavisi deneylerinde sonuçlar sırasıyla 0,25 ve 0,50 bulunmuştur. KTŞ 2013'te alttemel tabakasında kullanılacak agreganın metilen mavisi deney sonucunun 4'ten, granüler temel tabakası için 3'ten, bitümlü temel tabakası için 2'den, binder, aşınma ve TMA tabakası için 1,5'ten küçük olması istenmektedir [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agrega, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

Metilen mavisi deneyi, Atterberg limitlerinden daha detaylı bir şekilde malzeme bünyesindeki kil minerallerinin tespitini sağlamaktadır. Atterberg Limitleri bölümünde (Bölüm 5.1.3) belirtildiği gibi; çelikhane cürufunda kil, silt vb. içerikler bulunmamaktadır. Cürufun, kirleticilerden etkilenmemesi için özel, temiz ve düzenli stok sahalarında depolanması gerekmektedir.

5.1.5 Kil topağı ve dağılabilen tane oranı

Atterberg limitleri ve metilen mavisi deneyleri kapsamında; çelikhane cürufu ve doğal agrega içerisinde kil, silt vb. malzeme bulunmadığı belirlenmiştir. Bu deneyin yapılmasındaki asıl amaç; özellikle cüruf içerisinde bulunan serbest CaO ve MgO bileşenlerinin 24 saatlik koşullandırma sürecinde su ile etkileşimi sonucu dağılan tane oranının belirlenmesidir.

KTŞ 2013'te alttemel tabakasında kullanılacak agregada en fazla % 2, granüler temel agregasında % 1, bitümlü temel, binder ve aşınma tabakası agregasında % 0,3 oranında dağılabilen tane kabul edilmektedir. TMA tabakasında ise dağılabilen tanelerin bulunmaması istenmektedir [19].

Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere doğal agregadaki dağılabilen tane oranı cüruftan yüksek bulunmuştur. Bu durum, doğal agrega taneleri üzerine yapışmış fillerden kaynaklanmaktadır. Metilen mavisi ve Atterberg limitleri

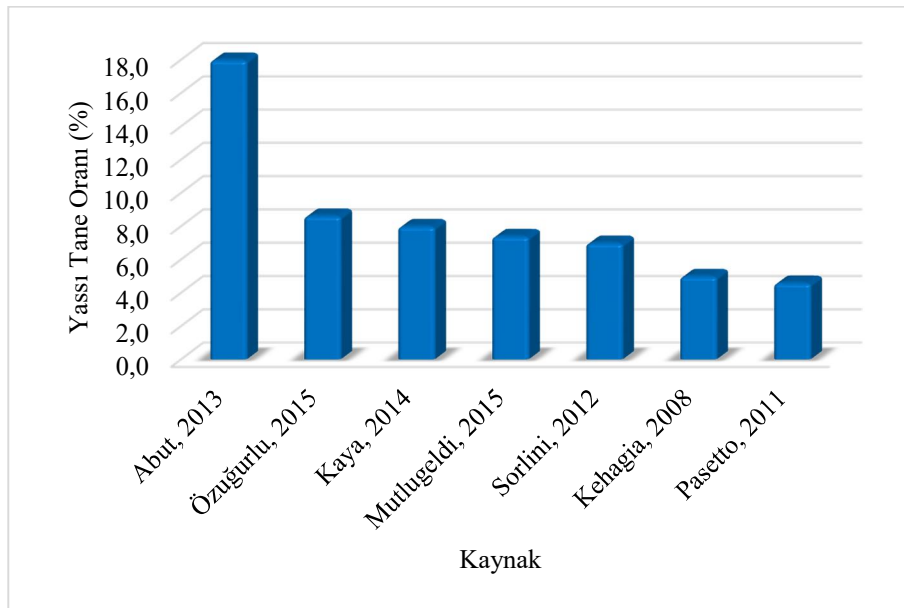
deneylerinden elde edilen sonuçlar ışığında doğal agreganın tüm üstyapı tabakalarında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

Çelikhane cürufunda dağılabilen tane oranı % 0,20 olarak belirlenmiştir. KTŞ 2013 uyarınca; TMA tabakasında dağılabilen tanelere sahip agregaların kullanılamayacağı belirtilmiştir. Fakat elde edilen dağılabilen tane oranı; serbest CaO'nun hidrate olmasından kaynaklanmakta, yaşlandırma işlemi ile bu oran düşürülebilmektedir. Buna ek olarak sönmüş kireç, soyulma önleyici katkı maddesi olarak BSK'larda kullanılmaktadır. Bu nedenlerle çelikhane cürufu içindeki dağılabilen tanelerin, malzemenin karayolu üstyapı tabakalarında kullanımına engel teşkil etmediği kararına varılmıştır.

5.1.6 Yassılık indeksi

Her iki numuneye de yassılık indeksi deneyi BS 812 standardı kapsamında yapılmıştır. Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere doğal agregadaki yassı tane oranı, çelikhane cürufuna oranla daha fazladır. Cürufun ani bir şekilde soğutulması sırasında tanelerin daha kübik ve küresel formda parçalanmalarının bu durumun temel nedeni olduğu düşünülmektedir.

Nitekim literatür taramasında da çelikhane cürufunun yassılık indeksi değerlerinin düşük olduğu Şekil 5.4'te de görülmektedir. Yalnızca ilk kaynakta, çelikhane cürufunun yassılık indeksinin doğal agregaya benzer olduğu tespit edilmiştir.



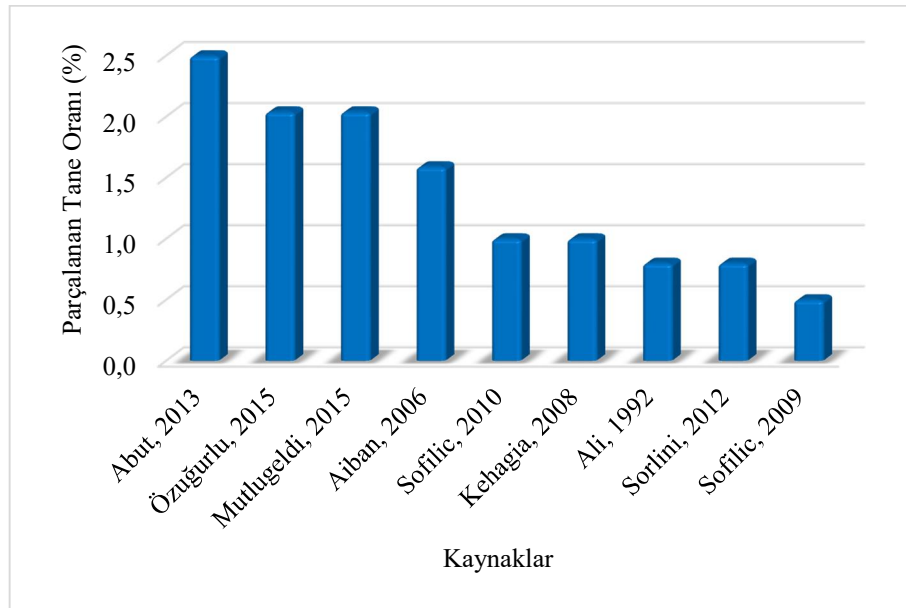
Şekil 5.4 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen yassılık indeksi değerleri.

Çelikhane cürufunun pürüzlü ve sert yapısı, işlenebilirliği düşürmektedir. Fakat yassılık indeksinin bu denli düşük olmasının işlenebilirliği dengeleyebileceği düşünülmektedir.

KTŞ 2013'te alttemel tabakasında kullanılacak agregada en fazla % 35, granüler temel, bitümlü temel ve binder agregasında % 30, aşınma ve TMA tabakası agregasında % 25 oranında yassı tane kabul edilmektedir [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agrega, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

5.1.7 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık

Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi, her iki numuneye de Na₂SO₄ çözeltisi ile ASTM C88-05 standardı uyarınca uygulanmıştır. Çelikhane cürufunun poroz yapıya sahip olmasına karşın donma çözünmeden aşırı etkilenmediği Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.7'de görülmektedir. Bu durum; cürufun mukavemetinin doğal agregaya oranla yüksek olması fakat ani soğutma sırasında oluşan gözenekler nedeniyle daha narin bir yapı göstermesi olarak açıklanabilir. Nitekim bu husus, incelenen literatürde elde edilen sonuçlarla da örtüşmektedir (Şekil 5.5).



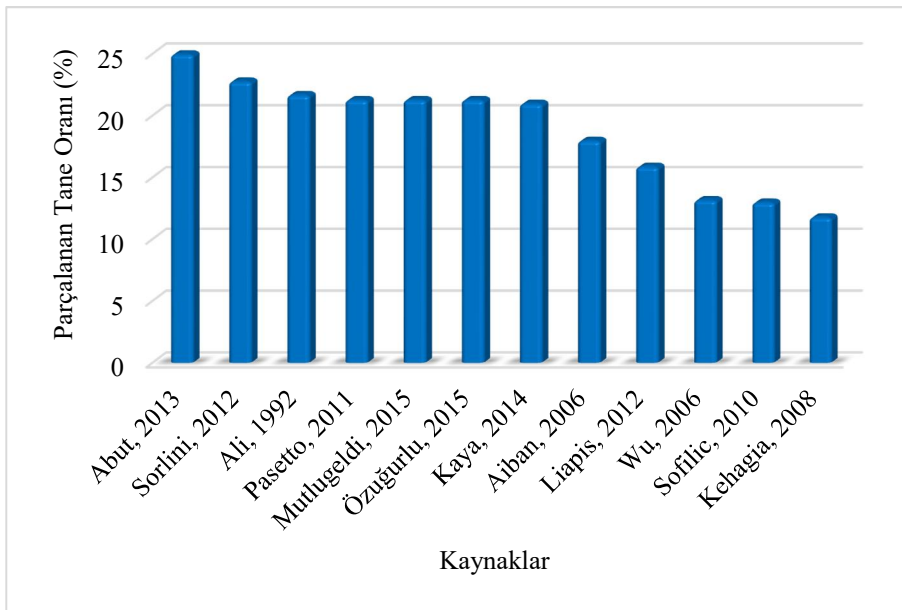
Şekil 5.5 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen hava tesirlerine karşı dayanıklılık değerleri.

KTŞ 2013'te hava tesirleri ile parçalanmış tane oranı, alttemel tabakasında kullanılacak agrega için en fazla % 25, granüler temel agregası için % 20, binder ve bitümlü temel agregası için % 18, aşınma tabakası agregası için % 16 ve TMA tabakası agregası için

% 14'tür [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agrega, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

5.1.8 Parçalanmaya karşı direnç

Parçalanmaya karşı direnç tayini deneyi, ASTM C131 standardı uyarınca her iki numuneye de uygulanmıştır. Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.8'de görüldüğü üzere doğal agreganın parçalanmaya karşı direnci cüruftan daha yüksektir. Bu durum gözenekli cüruf tanelerinin daha narin davranmasından kaynaklanmaktadır. Uluslararası çalışmalarda elde edilen parçalanmaya karşı direnç deneyi sonuçları Şekil 5.6'da sunulmuştur. Şekil 5.6'da görüldüğü üzere, EAO çelikhane cüruflarının aşınmaya karşı direnç değerleri, sunulan on iki kaynağın yedisinde % 20 – 25 aralığındadır. Aşınmaya karşı direnci yüksek son beş kaynağın ikisinin işlenmiş olduğu Birim Hacim Ağırlık ve Su Absorbsiyonu bölümünde (Bölüm 5.1.1) belirtilmiştir.



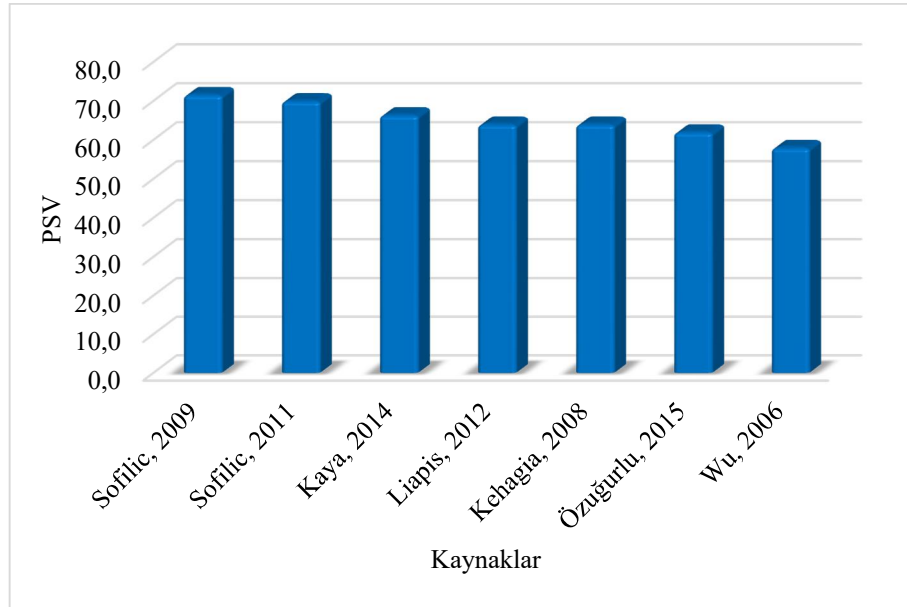
Şekil 5.6 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen aşınmaya karşı direnç değerleri.

KTŞ 2013'te Los Angeles deneyinde parçalanmış tane oranı, alttemel tabakasında kullanılacak agrega için en fazla % 45, granüler temel agregası için % 35, binder ve bitümlü temel agregası için % 30, aşınma tabakası agregası için % 27 ve TMA tabakası agregası için % 25'tir [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agrega, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

5.1.9 Cilalanma mukavemeti

Cilalanma mukavemeti deneyi ASTM D3319-11 standardı uyarınca her iki numuneye de uygulanmıştır. Cilalandırılmış numunelerde, İngiliz pandülü ile yapılan ölçümlerde cüruf numunesinin, doğal agregaya oranla cilalanma mukavemetinin daha yüksek olduğu Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.9’da görülmektedir. Cürufun yol üst yapısında aşınma ve TMA tabakalarında kullanımı durumunda sürtünme katsayısı daha yüksek, dolayısıyla daha güvenli yolların inşaatına olanak sağlayacağı açıktır.

Şekil 5.7’de farklı kaynaklarda elde edilen cilalanmış taş değerleri sunulmuştur. Şekil 5.7’den görüldüğü üzere, EAO çelikhane cürufunun cilalanmaya karşı direnci yüksektir. Çelikhane cürufunun pürüzlü-gözenekli yapısı ve bünyesindeki SiO₂ yüksek cilalanma direncini sağlamaktadır.



Şekil 5.7 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen cilalanmış taş değerleri.

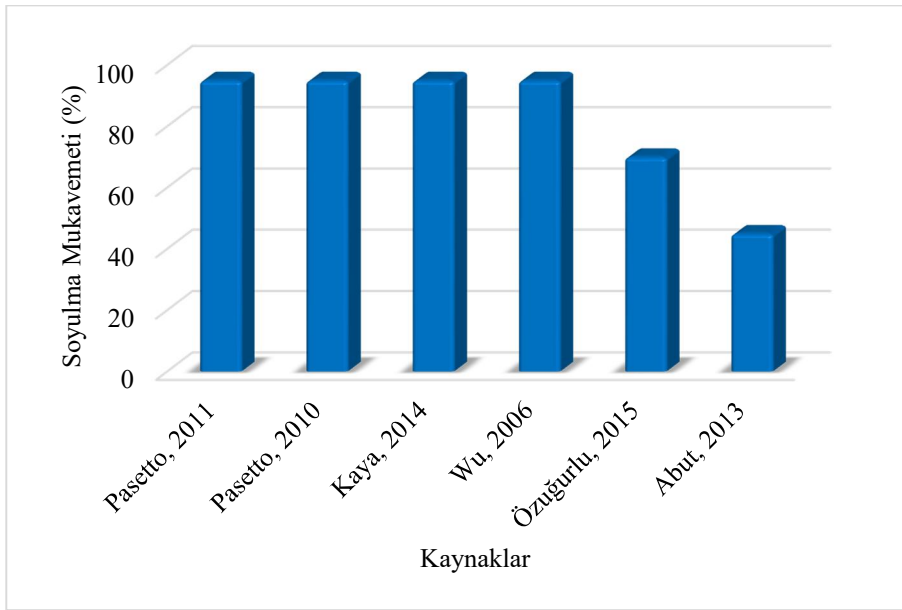
KTŞ 2013’te PSV, binder tabakası agregası için en az 35, aşınma ve TMA tabakası agregası için en az 50 istenmektedir [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agregası, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

5.1.10 Soyulma mukavemeti

KTŞ 2013 Kısım 403 Ek-A uyarınca her iki numuneye de DOP katkılı ve katkısız soyulma mukavemeti deneyleri uygulanmıştır. Her iki numunede de aynı sonuçların elde edildiği Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.10’da görülmektedir. Yüksek

metalik demir içeriğine sahip cüruf numunelerinin soyulma mukavemetlerinin düşük olduğu yapılan farklı deneylerde gözlemlenmiştir. Bu tez kapsamında kullanılan Çolakoğlu Metalürji A.Ş. EAO çelikhane cürufunun düşük metalik demir içeriği (% 0,48), soyulma mukavemetinin istenen düzeyde kalmasını sağlamıştır. Buna ek olarak yaşlandırılmış cüruf içinde bulunan Ca(OH)_2 soyulma önleyici bir katkı maddesi olarak BSK’larda kullanılmaktadır.

Şekil 5.8’de farklı çalışmalarda elde edilen soyulma mukavemeti değerleri sunulmuştur. Şekil 5.8’de görüldüğü üzere, EAO çelikhane cürufunun soyulma mukavemeti genel olarak yüksektir.



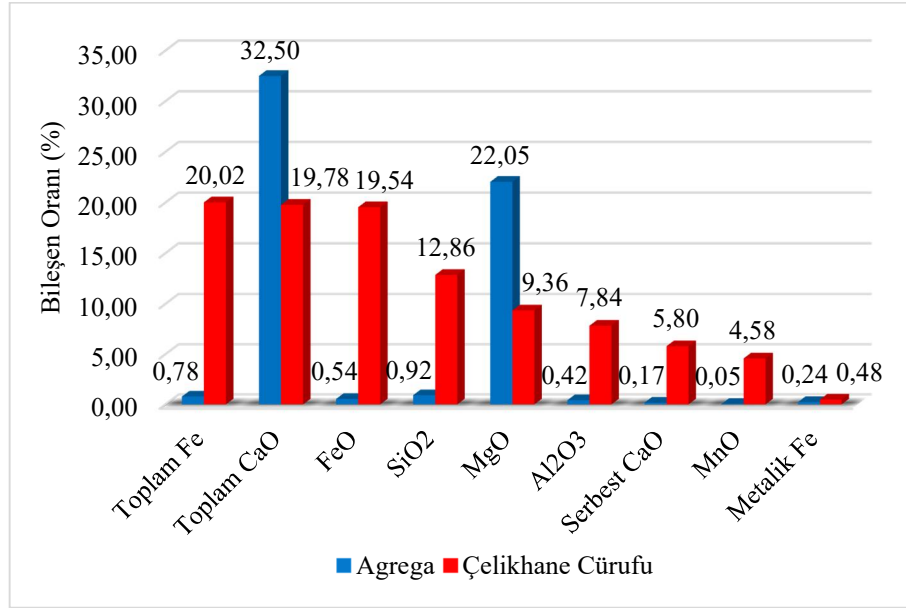
Şekil 5.8 : EAO çelikhane cürufunun farklı çalışmalarda elde edilen soyulma mukavemeti değerleri.

KTŞ 2013’te soyulma mukavemeti, bitümlü temel, binder, aşınma ve TMA tabakası agregası için en az % 60 istenmektedir. [19]. Bu çalışmada ele alınan çelikhane cürufu ve doğal agregası, belirtilen koşulları sağlamaktadır.

5.2 Kimyasal Analiz

Çelikhane cürufu ve doğal agreganın bileşen analizi, XRD yöntemi ile yapılmıştır. Bileşen analizinde cürufun temel bileşikleri olan toplam Fe, SiO_2 , Al_2O_3 , toplam CaO, MgO ve MnO dikkate alınmıştır. Granüler tabakalar ve bitümlü sıcak karışımlarda olumsuz etkiler yaratabilen metalik demir ve serbest CaO oranları, kimyasal analiz ile

belirlenmiştir. Sonuçlar, Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.11, 4.12’de ve karşılaştırmalı olarak da Şekil 5.9’da sunulmuştur.



Şekil 5.9 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega karşılaştırmalı bileşik oranları.

İncelenen bileşikler arasında cürufun yapay agrega olarak kullanımını etkileyen en önemlileri; serbest CaO ve MgO’dur. Serbest CaO hidrate olarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ’ye dönüşmekte ve bu sırada genleşmeye neden olmaktadır. Genleşmeye neden olan bir diğer bileşik de MgO’dur. MgO de hidrate olarak $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ’ye dönüşmektedir. Fakat XRD analizinde MgO ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ayrımı yapılamamaktadır. Doğal agrega, genleşme eğilimi göstermediğinden, içeriğindeki MgO’nun tamamına yakını $\text{Mg}(\text{OH})_2$ olarak kabul edilmektedir. Çelikhane cürufunda ise XRD ile ölçülen MgO içeriğinin % 5’in üzerinde olmasının genleşme olasılığını arttırdığı kabul edilmektedir [56]. Cürufun herhangi bir inşaat uygulamasında kullanılabilmesi için bu iki bileşiğin de hidrate edilerek genleşmenin kabul edilebilir değerlere indirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada kullanılan doğal agrega ile çelikhane cürufu arasında kimyasal içerik bakımından en dikkat çeken fark toplam Fe içeriğidir. Çelikhane cürufundaki toplam Fe içeriğinin % 2,4’ü metalik demirden, geri kalanı ise Fe_2O_3 ve FeO’dan oluşmaktadır. Metalik demirin tamamen alınması durumunda dahi demirin oksitli bileşenleri cüruf içerisinde kalacaktır. Yoğunlukları sırasıyla 5,242 gr/cm³ ve 5,745 gr/cm³ olan bu iki bileşik, çelikhane cürufunun birim hacim ağırlığını arttırmaktadır. Artan BHA ise ekonomik taşıma mesafesini kısaltmaktadır.

Çelikhane cürufunun kimyasal içeriğinde bulunan SiO_2 , karayolu mühendisliği açısından dikkat edilmesi gereken bir bileşiktir. SiO_2 'in doğal hali kuvars olarak isimlendirilmektedir. Kuvarsın sertliği, Mohs göstergesine göre 7'dir. Aynı göstergede çeliğin sertliği 4-4,5 arasında değişmektedir. Bu denli sert bir bileşiğin cürufun içinde yer alması, trafik altında, cürufun cilalanma direncini arttıracaktır.

5.3 Çevresel Etki Analizi

Çevresel etki değerlendirmesi kapsamında temin edilen cürufta ve cüruftan hazırlanan eluatta, 26 Mart 2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiş olan Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2'de verilen "Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri" dâhilinde tanımlanan parametreler ve bunlara ek olarak Vanadyum parametresi ölçülmüştür. Çelikhane cürufu ve doğal agrega numunesinde elde edilen sonuçlar, Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.13'te sunulmuştur. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik EK-2'de verilen "Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri" dâhilinde tanımlanan limitler de Bulgular bölümü (Bölüm 4) Çizelge 4.14'te sunulmuştur.

Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik – EK 2/2B'de verilen "Tehlikesiz Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri" uyarınca, II. sınıf düzenli depolama tesisi; "belediye atıkları ile tehlikesiz atıkların depolanması için gereken altyapıya sahip tesislerde depolanması hali" için değerlendirildiğinde, çelikhane cürufu için esas numune ve eluatında ölçülen tüm parametrelerin konsantrasyonlarının yönetmelikte verilen sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir.

Elde edilen deney sonuçlarının, 26 Mart 2010 tarih ve 27533 sayılı Resmi Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiş olan "Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik"te EK 2/2A'da verilen "İnert Atıkların Düzenli Depolanabilme Kriterleri" uyarınca, III. sınıf düzenli depolama tesisi için değerlendirilmesi durumunda ise cürufun nikel konsantrasyonunun ve toplam çözünmüş madde miktarının durağan atık için belirtilen limitleri aştığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda; uluslararası literatürde yan ürün konumunda olan çelikhane cürufunun, elde edilen konsantrasyonlar doğrultusunda, iki parametre nedeniyle durağan yerine tehlikesiz atık sınıfına girdiği belirlenmiştir.

Çelikhane cürufunun inşaat uygulamalarında kullanılabilmesi için bünyesinde bulunan ve genişlemeye neden olan serbest CaO ve MgO bileşiklerinin hidrate edilmesi bir başka deyişle yaşlandırılması gerekmektedir. Bu işlem esnasında hidrate olmuş CaO büyük oranda cürufun bünyesinden uzaklaşmaktadır.

Temin edilen çelikhane cürufunun herhangi bir yaşlandırma işleminden geçirilmediği kabul edilmiştir. Bu nedenle hidrate olmamış serbest CaO bileşeninin çözünmüş madde miktarını etkilediği kanaatine varılmıştır.

İnert atık limitlerini aşan bir diğer parametre de Nikel konsantrasyonudur. Cüruf içeriğinden süzülen metaller çevre için ciddi bir risk oluşturmaktadır.

Cürufun yaşlandırma işlemi esnasında, ilk aşamada CaO ve MgO hidrate olarak Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 'ye dönüşmektedir. Şekil 5.3'te hidratasyonun başladığı cüruf taneleri görülmektedir.



Şekil 5.10 : Hidratasyon tepkimelerinin başlamış olduğu cüruf taneleri.

Yaşlandırma işleminin yeterince uzun tutulması durumunda ise CO_2 'nin etkisi ile Ca(OH)_2 , CaCO_3 'e ve Mg(OH)_2 de MgCO_3 'e dönüşmektedir. Bileşenlerin bu evrilme sırasına göre su ile etkileşimleri her tepkime ile azalmaktadır. CaO ve MgO su ile tepkimeye girerken, Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 su ile tepkimeye girmeyen fakat 25 °C sıcaklıkta su içindeki çözünürlükleri sırası ile 1,73 g/L ve 0,000064 g/L olan bileşiklerdir. Bir sonraki aşamada oluşan CaCO_3 'ün çözünürlüğü 0,013 g/L, MgCO_3 'ün ise 0,00106 g/L'dir. Karbonatların meydana geldiği üçüncü aşamada cüruf tanelerinin etrafında çözünürlüğü çok düşük bir tabaka oluşmaktadır [57]. Bu tabaka, metallerin cüruf içinden süzülme hızını yavaşlatmakta ve zaman içinde oluşumunu devam ettirmektedir. Bu doğrultuda cüruf ne kadar uzun süreyle yaşlandırılırsa, uygulamada metallerin ve Ca(OH)_2 'nin süzülme miktarı o kadar düşmektedir [58]. Dolayısıyla cürufun yaşlandırılması çevresel açıdan da bir koşuldur. Kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonatın cüruf taneleri etrafında oluşumuna “zırhlama”

denilmektedir [57]. Şekil 5.4'te zırhlanmanın gözlemlenebildiği bir cüruf tanesi ile taze bir cüruf tanesi görülmektedir.



Şekil 5.11 : Zırhlanmanın gözlemlenebildiği cüruf tanesi (sol), taze cüruf tanesi (sağ).

EAO çelikhane cüruflarının karayolu inşaatında yapay agrega olarak kullanımında, olası çevresel etkiler konusunda yapılan uluslararası laboratuvar çalışmaları bulunmaktadır. Bu doğrultuda özellikle cürufun çevreye olan zehirlilik etkisini ölçmek üzere ekotoksisite analizleri yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçlarına göre EAO çelikhane cürufları tehlikesiz yan ürün kategorisinde değerlendirilmektedir [59].

Amerikan Ulusal Cüruf Birliği (1998) tarafından çelikhane cüruflarının yeniden kullanımından kaynaklanabilecek riskler, kötü durum senaryosu yaklaşımıyla hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda çelikhane cüruflarının kullanımının halk ve çevre sağlığı açısından anlamlı bir risk içermediği bildirilmiştir [15].

Bu çalışmayla ilgili temel sonuçlar şu şekildedir:

- Cüruf içeriğindeki metallerin, sıvı ortama verdikleri bileşikler önemsiz düzeylerde kaldığı için yer altı ve yüzeysel içme suyu kaynakları için tehlike oluşturmamaktadır.
- Çelikhane cürufunun flora ve fauna üzerinde belirli bir etkisi bulunmamaktadır. Cüruf içeriğindeki metaller, besin zincirinde birikmemektedir.
- Çelikhane cürufları, nehirler ve göller gibi su ortamlarının kalitelerine ve sucul yaşama olumsuz etkisi olmadığından buralarda güvenle kullanılabilir. Ancak hacimce küçük su ortamlarında yeterli seyrelme sağlanamama ihtimaline karşı pH, alüminyum ve baryum konsantrasyonları izlenmelidir [15].

Cüruflar dolgu malzemesi olarak kullanıldıklarında, suyla temas halinde bazı durumlarda yeşil veya sarı sızıntı suyu oluşumuna neden olabilmektedir. Oksitlenmeden kaynaklanan bu durum genellikle yüksek fırın cüruflarının kullanımında gündeme gelmekle birlikte, oksitlenme birkaç gün içinde sona ermektedir. Bu durum yeterince yaşlandırılmamış, taze ve ince tanecikli çelikhane cüruflarında da ortaya çıkmaktadır. Buna önlem olarak taze cürufların yaşlandırılması ve kullanıldığı ortamlarda gerekli drenaj koşullarının sağlanması gerekmektedir [57].

Newcastle Üniversitesi tarafından çelikhane cüruflarının stabilize yollarda kullanımıyla ilgili yapılan bir araştırmada, cüruf uygulamasından sonra bazı durumlarda sülfür kokusu olduğu, ayrıca sızıntı suyunda da sülfür kokusu oluşabildiği belirtilmiştir. Ancak bunun geçici bir durum olduğu gözlenmiştir. Yeterince yaşlandırılmış cüruflarda sülfür kokusu sorununun oluşmadığı tespit edilmiştir [57].

Çelikhane cürufundan sızan metallerin miktarı, doğal toprakta bulunan metal miktarından fazla olduğunda çevreye ve biyolojik yaşama zararlı olabilmektedir [68]. Cüruf içindeki bazı metaller doğal toprakta bulunandan daha yüksek konsantrasyonlara sahip olabilirler. Bu olasılık kapsamındaki metaller; antimon, berilyum, kadmiyum, krom, bakır, mangan, molibden, nikel, selenyum, gümüş, talyum, kalay, vanadyum ve çinkodur [60]. Özellikle krom, çelikhane cürufunda yüksek konsantrasyonlarda bulunabilen bir bileşendir. Fakat krom iyonlarının mineral fazlar ile arasındaki bağıntı kuvvetli olduğundan sızıntı oranı düşüktür [61]. Ayrıca cürufun fazlasıyla alkali yapısı sızan metal miktarını azaltmaktadır [62]. Fakat cüruftan elde edilen eluatlarda ve cüruf stok sahası yer altı suyu numunelerinde yüksek pH değerleri gözlemlenmiştir. pH değerindeki bu değişim cüruf içindeki alkali maddelerin suya sızması nedeniyle meydana gelmektedir. Bu nedenle cüruf stok sahaları gibi, çelikhane cürufunun kitle halinde bulunduğu ya da kullanıldığı bölgelerde pH değerindeki değişimin ekosistem üzerindeki etkileri incelenmelidir [63-65].

1998’de yapılan bir risk değerlendirme çalışmasında, çelikhane cürufunun pek çok uygulama alanında ekoloji ve insan sağlığı üzerine herhangi bir olumsuz etkisinin bulunmadığı belirlenmiştir [62]. Bu çalışmaya göre “makul maksimum maruz kalma” ve “en makul maruz kalma” durumları Environmental Pollution Agency (EPA) kıstaslarında incelenmiştir. Bu değerlendirme kapsamında tüm yol ve senaryolardan

maruz kalınabilecek ortalama dozlar hesaplanmıştır [62]. Berilyum, kadmiyum ve nikelin farklı formları potansiyel kanserojen olarak dikkate alınmıştır. Cürufun farklı kullanımlarından oluşabilecek potansiyel sağlık etkilerini tanımlayan risk karakterizasyonunun oluşturulabilmesi için maruz kalma ve toksisite durumları birlikte ele alınmıştır. Makul maksimum maruz kalma durumuna göre teorik kanser riski on milyarda 2 ile on milyarda 8 aralığında hesaplanmıştır. Bu da milyonda 1 ile on binde 1 aralığından küçük olduğundan, EPA tarafından göz ardı edilebilir olarak kabul edilmektedir [66].

Zarar indeksi, tüm yollardan birikmeli maruz kalma durumundaki potansiyel zarar temel alınarak hesaplanmaktadır. Toplam zarar indeksi 1'den büyük olduğu durumda potansiyel zarar söz konusu olmakta ve daha fazla çalışmanın yapılması gerekmektedir. Makul maksimum maruz kalma durumunda, uygulama alanındaki bir çocuk ve EAO cürufu ile uygulama yapan bir işçi senaryoları dikkate alınmıştır. Bu durumlarda zarar indeksi 0,07 ile 1 arasında değişmektedir. Aynı bireyler için en makul maruz kalma durumunda zarar indeksinin 0,01 ile 0,5 arasında olduğu belirlenmiştir [62]. Hesaplanan tüm zarar indeksi değerleri 1'e eşit ve 1'den küçük olduğu için cürufun insan sağlığına herhangi bir zararı olmadığı kanaatine varılmıştır [66].

Exponent Firması tarafından yapılan ekolojik risk değerlendirmesi sonuçlarına göre; olası çevresel durumlar ve uygulama senaryoları ele alındığında, cüruf tanelerinin ya da çözeltilisinin doğal toprak veya suya karışması durumunda ekolojik alıcılar yönünden hiçbir zarar teşkil etmediği belirlenmiştir. Tek potansiyel risk, yüksek alüminyum konsantrasyonuna sahip cürufun tatlı su kaynaklarına yakın kesimlerde uygulanmasıdır. Alüminyum konsantrasyonun doğal su kaynağını etkileyecek derecede yüksek olması ve özellikle cüruf / su oranının yüksek olması durumunda özel incelemelerin yapılması gerekmektedir [62].

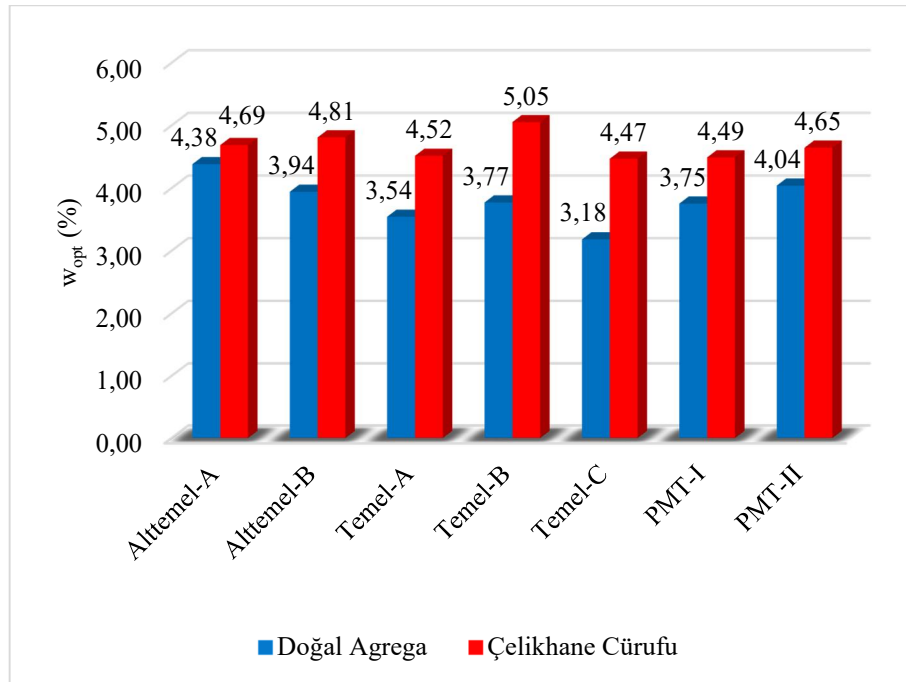
Aiban (2006) tarafından yapılan çalışmada, çelikhane cürufu ile üretilen eluatta arsenik, baryum, kadmiyum, krom, kurşun, selenyum, gümüş ve civa parametreleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, United States Environmental Protection Agency (USEPA) limitleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak EAO çelikhane cürufunun tehlikesiz yan ürün olduğu belirtilmiştir [34]. Bulgular bölümü (Bölüm 4), Çizelge 4.13'te elde edilen konsantrasyonlar USEPA limitleri ile karşılaştırılmıştır. Gümüş hariç USEPA'da belirtilen tüm parametrelerin incelendiği ve bu tez çalışmasında

kullanılan çelikhane cürufunun USEPA limitleri doğrultusunda da tehlikesiz yan ürün sınıfına girdiği belirlenmiştir.

Sofilic (2009) tarafından yapılan çalışmada, çelikhane cürufu ile üretilen eluatta arsenik, baryum, kadmiyum, toplam krom, bakır, civa, molibden, nikel, kurşun, antimon, selenyum, çinko, kloritler, folritler, sülfatlar, çözünmüş organik karbon ve toplam çözünmüş madde parametreleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, DIN 38414-S4 limitleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak EAO çelikhane cürufunun tehlikesiz yan ürün olduğu belirtilmiştir [32]. Bulgular bölümü (Bölüm 4), Çizelge 4.13'te elde edilen konsantrasyonlar DIN 38414-S4 limitleri ile karşılaştırılmıştır. DIN 38414-S4'de belirtilen tüm parametrelerin incelendiği ve bu tez çalışmasında kullanılan çelikhane cürufunun DIN 38414-S4 limitleri doğrultusunda da tehlikesiz yan ürün sınıfına girdiği belirlenmiştir.

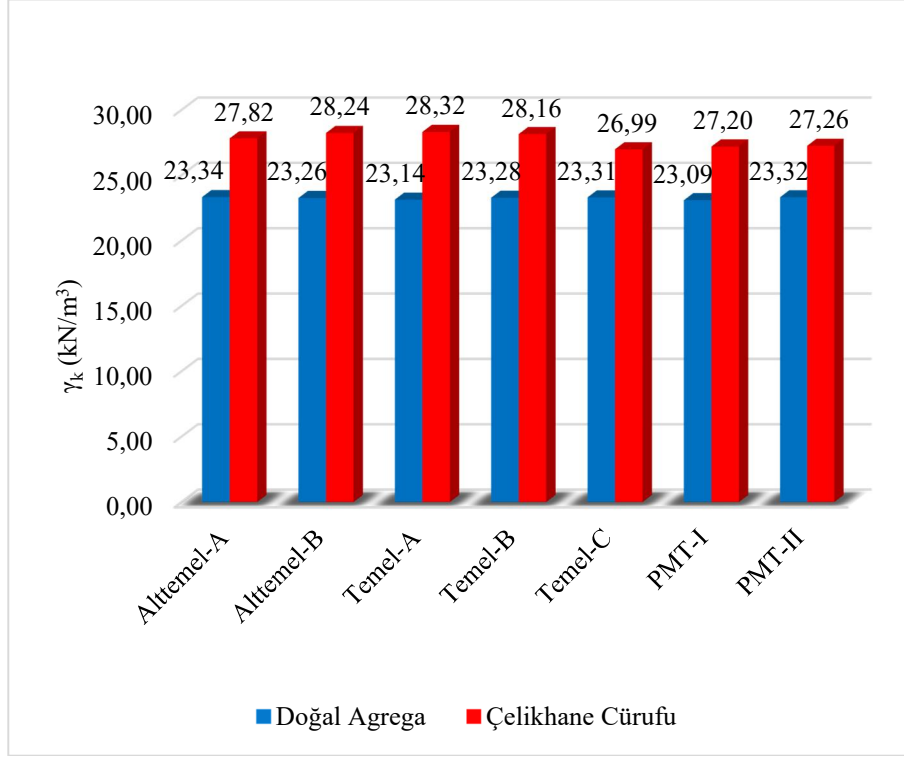
5.4 Granüler Tabakaların Mekanik Özellikleri

KTŞ 2013'te tanımlanmış olan granüler tabakalar, doğal agrega ve çelikhane cürufu için ideal tane dağılımı uyarınca hazırlanmış ve tüm karışımlara modifiye Proctor deneyi yapılmıştır. Bu deney sonucunda w_{opt} ve γ_k değerleri elde edilmiştir. Doğal agrega ve çelikhane cürufu ile üretilmiş granüler tabakalarda elde edilen w_{opt} ve γ_k değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.5 ve 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.12 : Granüler tabakaların w_{opt} değerleri.

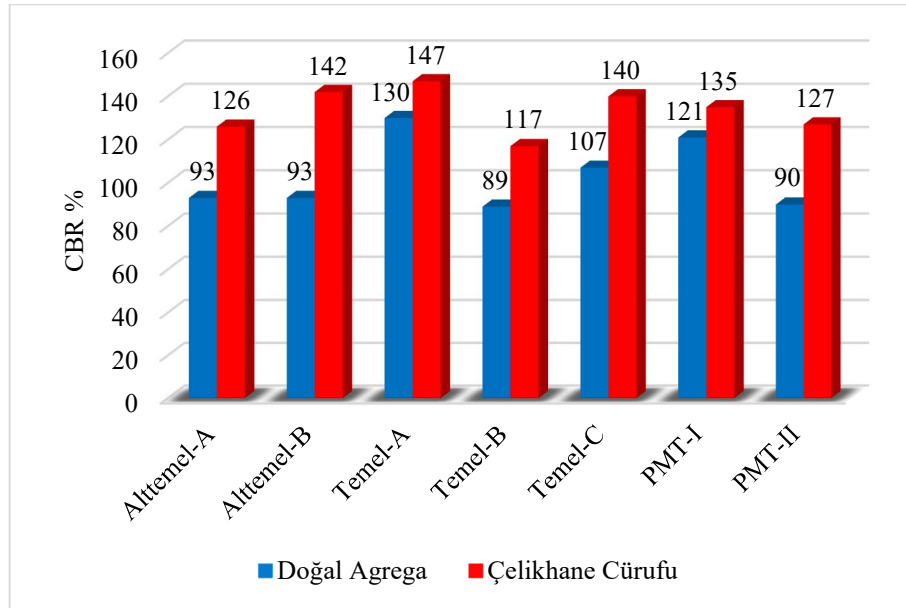
Şekil 5.5'te görüldüğü üzere, doğal agrega ve çelikhane cürufu ile üretilen granüler tabakaların optimum su muhtevaları arasında en fazla 1,29 puanlık bir fark mevcuttur. Bu durum, hem cürufun gözenekli yapısından hem de pürüzlü dokusundan kaynaklanmaktadır. Cürufun sıkıştırılması için ihtiyaç duyulan ek su miktarı Ekonomik Analiz bölümünde (Bölüm 5.10) ele alınmıştır.



Şekil 5.13 : Granüler tabakaların γ_k değerleri.

Şekil 5.6'da görüldüğü üzere, çelikhane cürufu ile üretilen granüler tabakaların maksimum kuru birim hacim ağırlıkları, doğal agregaya oranla ortalama % 19 daha fazladır. Kısaca aynı hacimde, çelikhane cürufu ile yapılacak uygulamada % 19 daha fazla malzemeye ihtiyaç duyulacaktır. Bu durum Ekonomik Analiz bölümünde (Bölüm 5.10) ele alınmıştır.

Numuneler, elde edilen optimum su muhtevası ile CBR deneyi için sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılan CBR numuneleri, 96 saat oda sıcaklığındaki suda bekletilmiş ve şişme durumları gözlemlenmiştir. Numunelerde şişme meydana gelmemiştir. Sudan çıkartılan numunelere 1,27 mm/dk yükleme hızı ile CBR deneyi uygulanmıştır. Elde edilen CBR sonuçları, çelikhane cürufu ve doğal agrega için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.14'te, KTŞ 2013 limitleri ile karşılaştırmalı olarak da Çizelge 5.1'de sunulmuştur.



Şekil 5.14 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen granüler tabakaların CBR değerlerinin karşılaştırılması.

Çizelge 5.1 : CBR sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.

CBR Deney Sonuçları (ASTM D1883)			
Tabaka:	KTŞ 2013 Limitleri	Doğal Agregat	Çelikhane Cürufu
Alttemel Tip-A	≥ 30	93	126
Alttemel Tip-B	≥ 50	93	142
Temel Tip-A	≥ 100	130	147
Temel Tip-B	≥ 100	89	117
Temel Tip-C	≥ 100	107	140
PMT Tip-I	≥ 120	121	135
PMT Tip-II	≥ 120	90	127

Çizelge 5.4’te görüldüğü üzere; çelikhane cürufu KTŞ 2013’te belirtilmiş olan tüm CBR limitlerini karşılamıştır. Fakat doğal agreganın taşıma gücü Temel Tip-B ve PMT Tip-II’de yetersiz kalmıştır.

5.5 Potansiyel Genleşme

Çelikhane cürufunun çeşitli inşaat uygulamalarında kullanımının önüne geçen en büyük etken malzemenin genleşme potansiyelidir. Çelikhane cürufunun yapay agrega olarak herhangi bir uygulamada kullanılmasından sonra meydana gelecek genleşme istenmeyen iç gerilmelere ve hatta yapının bozulmasına neden olacaktır [58].

Cürufun içeriğindeki serbest MgO ve CaO, su etkisi ile hidrate olarak genleşme reaksiyonunu başlatmaktadır. Genleşme; CaO’dan kaynaklanan kısa süreli ve MgO’dan kaynaklanan uzun süreli genleşme olarak iki sürece ayrılabilir [58].

Kısa süreli genleşme; su ile serbest kirecin reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Özellikle hidrolik bağlayıcılı rijit karışımlarda, genleşme nedeniyle meydana gelen gerilmenin 200 MPa seviyelerine ulaştığı hesaplanmıştır [67]. Serbest kireç, çok kısa sürelerde hidrate olarak hacmini değiştirebilmektedir. $17,25 \text{ cm}^3$ hacmindeki 1 mol serbest CaO, su ile reaksiyonu sonunda $33,07 \text{ cm}^3/\text{mol}$ hacme sahip Ca(OH)_2 'e dönüşmektedir. Bu reaksiyon ile hacimde meydana gelen artış % 91,7'dir. Doğrudan su etkisinde kalan CaO'nun hidratasyonu genellikle birkaç gün içinde tamamlanmaktadır. CaO'nun cüruf içinde hapsolması durumunda ise reaksiyon gecikmekte ya da gerçekleşmemektedir [58].

Uzun süreli genleşme: MgO, magnezyum karbonatın $1.150 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kalsinasyonu sonucunda oluşmaktadır [68]. Uzun süreli genleşme, MgO ve suyun etkileşimi sonucu bazen yıllar içerisinde meydana gelmektedir. MgO'nun su ile reaksiyonu sonucu Mg(OH)_2 oluşmaktadır. 1 mol MgO'nun hacmi $11,25 \text{ cm}^3$ iken su ile reaksiyonu sonucu oluşan Mg(OH)_2 'in 1 molünün hacmi $24,71 \text{ cm}^3$ 'tür. Bu durum, MgO'nun su ile reaksiyonu sonucu % 119,6 oranında genleşebileceğini göstermektedir [67].

Almanya'da yapılan araştırmalar; % 7'ye kadar MgO içeren çelikhane cüruflarının granüler tabakalarda, % 4'e kadar MgO içeren çelikhane cüruflarının ise BSK tabakalarında kullanılabileceğini belirtmektedir [59].

Bu çalışma kapsamında, çelikhane cürufunun genleşme potansiyelinin belirlenebilmesi için ASTM D4792 standardındaki yöntem tercih edilmiştir. En kötü senaryonun göz önüne alınabilmesi için minimum boşluk oranına sahip granüler tabaka tercih edilmiştir. Maksimum kuru birim hacim ağırlıklar değerlendirildiğinde; $28,32 \text{ kN/m}^3$ 'lük kuru birim hacim ağırlığı ile en düşük boşluk oranına sahip olduğu düşünülen Alttemel Tip-A tabakası, genleşme deneyi için sıkıştırılmıştır.

Hazırlanan numune, 7 gün boyunca $70 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki suda şartlandırılmış ve meydana gelen genleşme günlük olarak kayıt altına alınmıştır. Deney sonucunda numunenin genleşmesinin, ASTM D4792 standardında belirtilen % 0,5 limitinden düşük olduğu belirlenmiştir. Genleşme potansiyeli bakımından, bu çalışmada kullanılan çelikhane cürufunun, karayolu uygulamalarında kullanılabileceği kanaatine varılmıştır. Elde edilen bu deney sonucuna karşın, Bölüm 5.1 ve 5.3'te belirtilen hususlar kapsamında; çelikhane cürufunun yaşlandırılarak kullanılması en güvenli yaklaşım olacaktır.

5.6 BSK Tasarımları

BSK Tasarımları bölümünde (Bölüm 4.6) çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen karışımların geleneksel ve deneysel yaklaşım doğrultusunda özellikleri ve optimum bağlayıcı oranları belirlenmiştir. Doğal agrega karışımlarında geleneksel ve deneysel yaklaşımlardaki veriler birbirine çok yakın olmakla birlikte, çelikhane cürufu karışımlarında deneysel yaklaşımda optimum bağlayıcı oranlarının düştüğü, karışım özelliklerinin ise KTŞ 2013 limitlerine yaklaştığı belirlenmiştir.

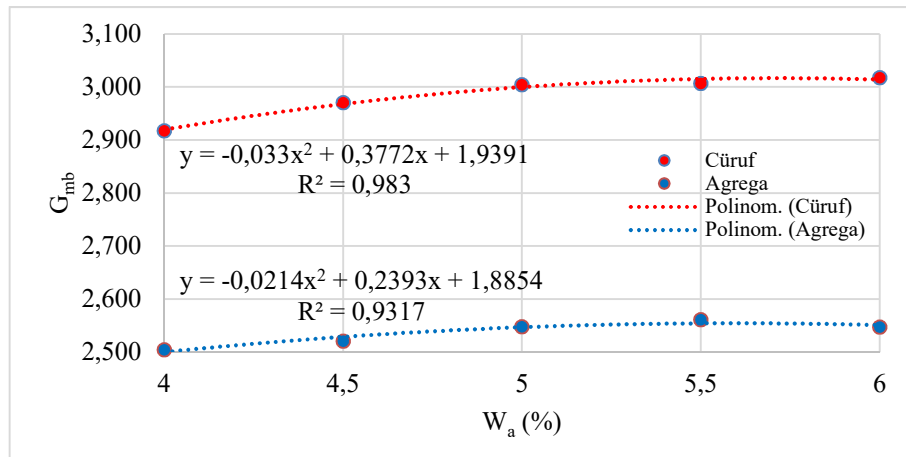
Kontrol Briketleri bölümünde (Bölüm 4.7), deneysel yaklaşımla elde edilen optimum bağlayıcı oranları doğrultusunda çelikhane cürufu ve doğal agrega ile karışımlar üretilmiştir. Bu karışımlardan elde edilen sonuçlar, beklenen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırmada hedeflenen sonuçların elde edildiği belirlenmiş ve her iki malzeme için de deneysel yaklaşımın esas alınmasına karar verilmiştir.

Aşağıda çelikhane cürufu ve doğal agrega ile hazırlanmış Aşınma, TMA, Binder ve BT tabakalarının deneysel yaklaşım ile elde edilen verileri karşılaştırılmıştır.

5.6.1 Aşınma tasarımlarının karşılaştırılması

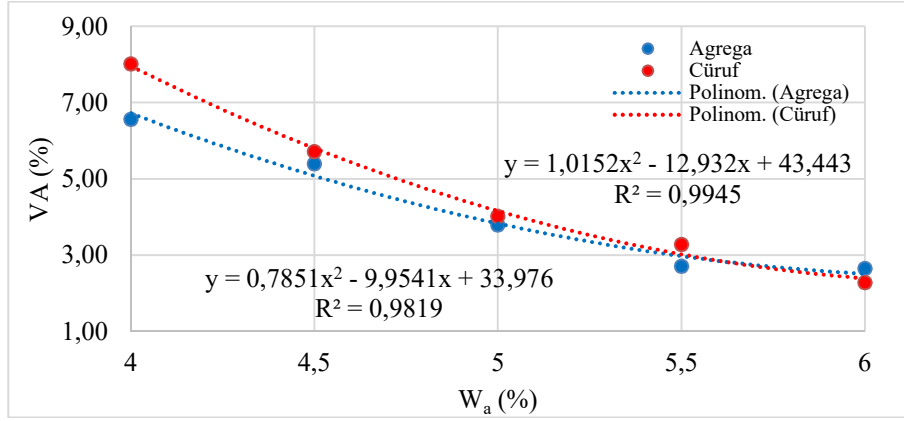
Bu bölümde; doğal agrega ve çelikhane cürufu ile imal edilen aşınma briketlerinin temel verileri ve deneysel yaklaşım ile elde edilen ikincil verileri kıyaslanmıştır.

Doğal agrega ve çelikhane cürufu briketlerinin pratik birim hacim ağırlıkları arasında büyük fark mevcuttur (Şekil 5.15). Verilerin ortalaması dikkate alındığında; çelikhane cürufu ile imal edilecek aşınma tabakasında, ağırlıkça % 17,6 daha fazla malzeme kullanılması gerekmektedir. Bu fark, üretim maliyetlerini arttıracaktır.



Şekil 5.15 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.16’da her iki numuneye ait briketlerin VA değerleri karşılaştırılmıştır.

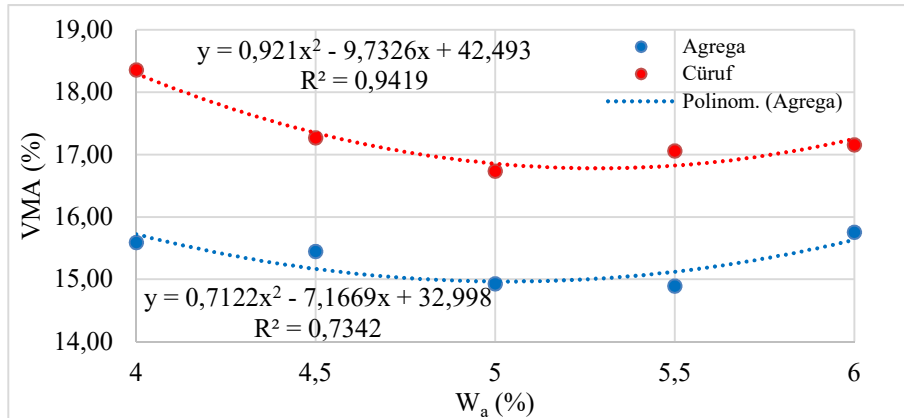


Şekil 5.16 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin VA değerlerinin karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile üretilmiş ilk briketlerde, bağlayıcının yetersiz kaldığı ve boşluk oranının yüksek olduğu Şekil 6.16’da görülmektedir. % 6 bağlayıcı oranına sahip briket grubunda ise çelikhane cürufu karışımı boşluk oranının, doğal agregaya oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durumun ana nedeni; ağırlıkça karışıma katılan bitüm miktarının, çelikhane cürufunun BHA’sı nedeniyle doğal agregaya oranla fazla olmasıdır.

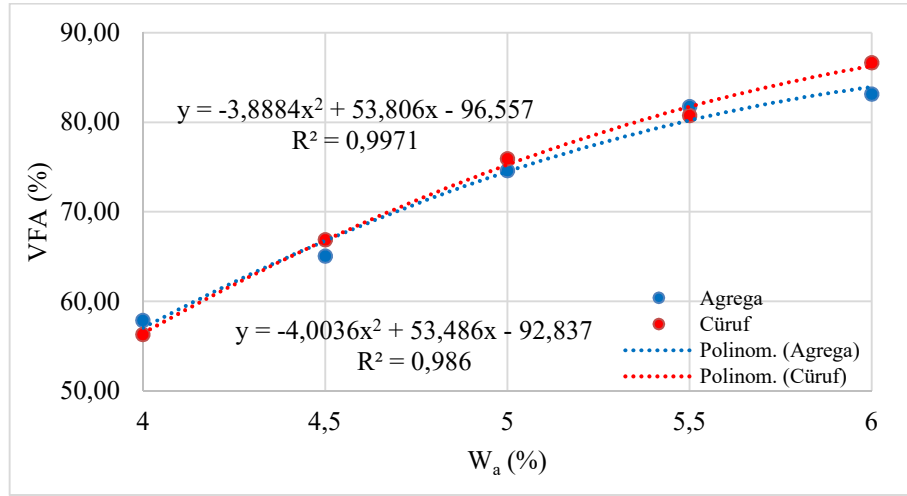
Şekil 5.17’de her iki numuneye ait briketlerin VMA değerleri karşılaştırılmıştır.

Çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin VMA değerleri, KTS 2013’te verilen limitler dâhiline girememektedir. Atanan eğilim çizgisi, % 5,28 bağlayıcı oranında en düşük VMA değeri olan % 16,78’e ulaşabilmektedir ki bu değer de limitler dışındadır. Bu durum, çelikhane cürufunun gözenekli ve pürüzlü yapısından kaynaklanmaktadır. Yüksek bağlayıcı oranlarında ise bitümün etkisi de dâhil olmaktadır (Şekil 6.17).



Şekil 5.17 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin VMA değerlerinin karşılaştırılması.

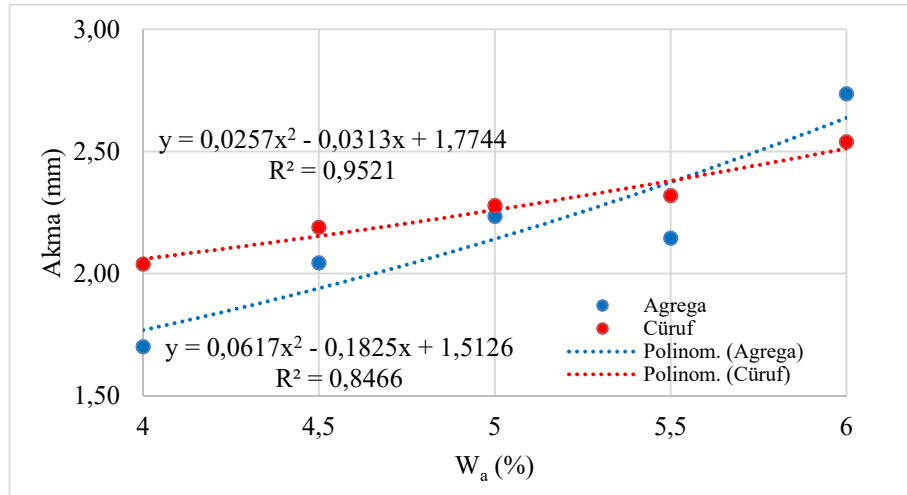
Şekil 5.18’de her iki numuneye ait briketlerin VFA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.18 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal agreg aşınma briketlerinde % 5,5 ve % 6 bağlayıcı oranları dikkate alındığında bağlayıcı ile dolu boşluk oranının, azalan bir eğilimle arttığı görülmektedir. Çelikhane cürufu ise gözenekli yapısı nedeniyle bağlayıcıyı absorbe etmeye devam etmekte ve bu eğilime daha yüksek bağlayıcı oranlarında girebilmektedir.

Şekil 5.19’da her iki numuneye ait briketlerin Akma değerleri karşılaştırılmıştır.

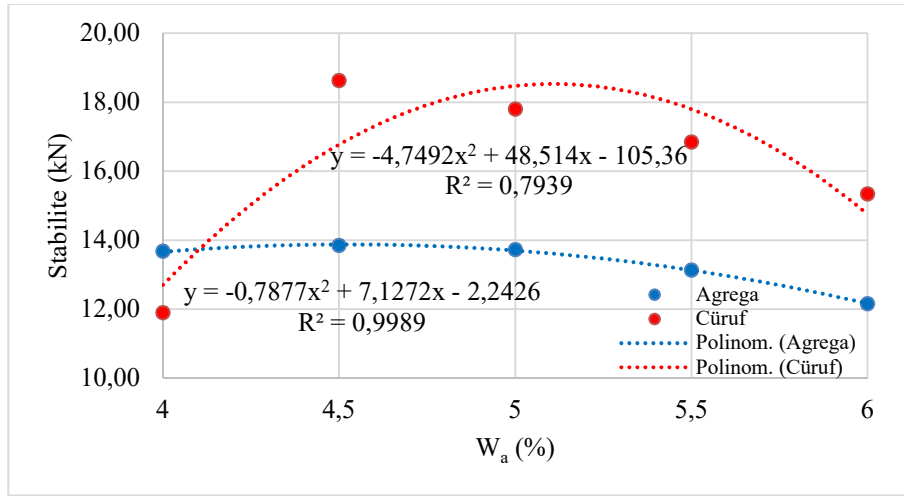


Şekil 5.19 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin akma değerleri, ilk 4 bağlayıcı oranında doğal agreg briketlerinden elde edilen sonuçlardan yüksektir. Bu durum; bağlayıcı miktarının, doğal agreg karışımlarına nazaran fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Fakat % 6 bağlayıcı oranında, doğal agreg briketlerinin akma değerleri ortalaması,

çelikhane cürufu briket sonuçlarını geçmektedir. Ayrıca eğilim çizgileri incelendiğinde, doğal agrega numunelerinin daha dik bir artış sergilediği de görülmektedir. Çelikhane cürufu numunelerinin akma değerlerinin, artan bağlayıcı oranına rağmen daha durağan bir artış göstermesinin, absorbe edilen bağlayıcı miktardan ve yüksek içsel sürtünme açısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu değerlendirmeler ışığında; çelikhane cürufunun yüksek içsel sürtünme açısının yorulma ömrünü etkileyebileceği düşünülmektedir.

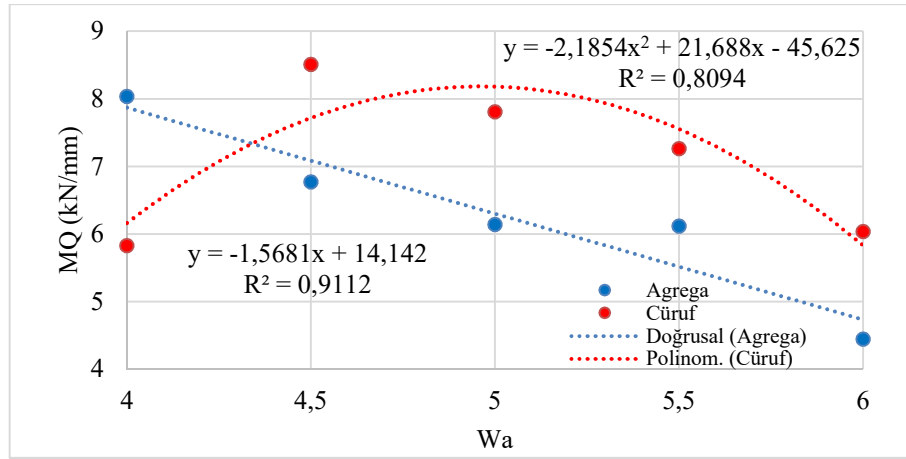
Şekil 5.20’de her iki numuneye ait briketlerin Stabilitate değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.20 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin Stabilitate değerlerinin karşılaştırılması.

% 4 bağlayıcı oranında çelikhane cürufu briketlerinin stabilitesinin, doğal agrega briketleri sonuçlarına göre düşük olduğu Şekil 5.20’de görülmektedir. Cüruf taneleri için % 4 bağlayıcı oranının yetersiz kaldığı ve yapıyı bir bütün halinde tutamadığı anlaşılmaktadır. % 4,5 bağlayıcı oranından sonra ise stabilite değerlerindeki azalma eğilimi, her iki numunede de benzerdir. Fakat doğal agregaya oranla yüksek bağlayıcı miktarı, çelikhane cürufundaki azalma eğilimini daha fazla etkilemektedir. Tüm briketlerin stabilite ortalamaları kıyaslandığında; çelikhane cürufu ile imal edilen aşınma briketlerinin, doğal agrega briketlerinden % 21 oranında daha yüksek stabiliteye sahip olduğu saptanmıştır.

Bu bölüm kapsamında son olarak üretilen briketlerin Marshall oranları (MQ) kıyaslanmıştır. Rijitlik oranı olarak da tanımlanan MQ, stabilitenin akmaya oranıdır ve dolaylı olarak kalıcı deformasyona karşı direnci ifade etmektedir. Şekil 5.21’de her iki numuneye ait briketlerin MQ değerleri karşılaştırılmıştır.

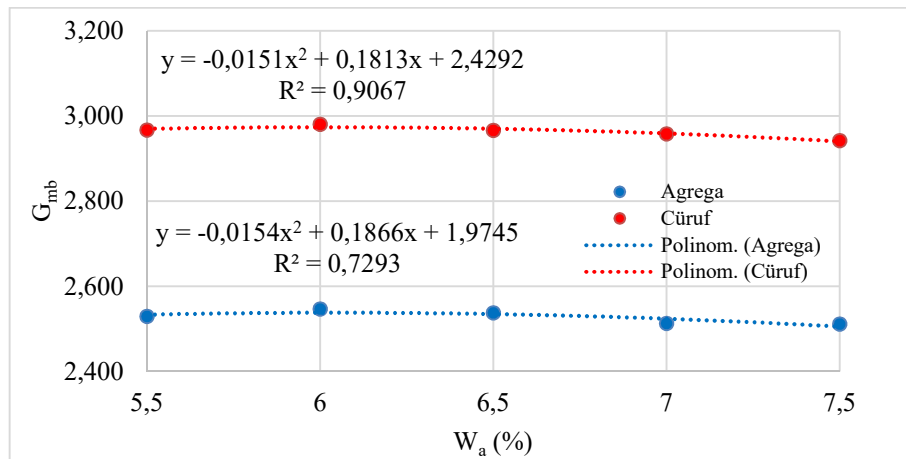


Şekil 5.21 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu aşınma briketlerinin MQ değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal agrega briketlerinde, doğrusal bir eğilimle, bağlayıcı oranı arttıkça kalıcı deformasyon olasılığı artmaktadır. Çelikhane cürufu karışımlarında ise % 4 bağlayıcı oranının yetersiz olduğu Şekil 5.21’de de görülmektedir. Çelikhane cürufu briketlerinde bağlayıcı miktarının fazla olması, yüksek bağlayıcı oranlarında kalıcı deformasyona elverişli bir yapı oluşturmaktadır. Belirtilen bu iki sebepten; çelikhane cürufu MQ grafiği, dış bükey parabol çizmiştir. Ortalama MQ değerleri ele alındığında; çelikhane cürufu ile üretilen aşınma tabakasının, doğal agrega ile üretilen karışıma oranla kalıcı deformasyona daha dayanıklı olması beklenmektedir.

5.6.2 TMA tasarımlarının karşılaştırılması

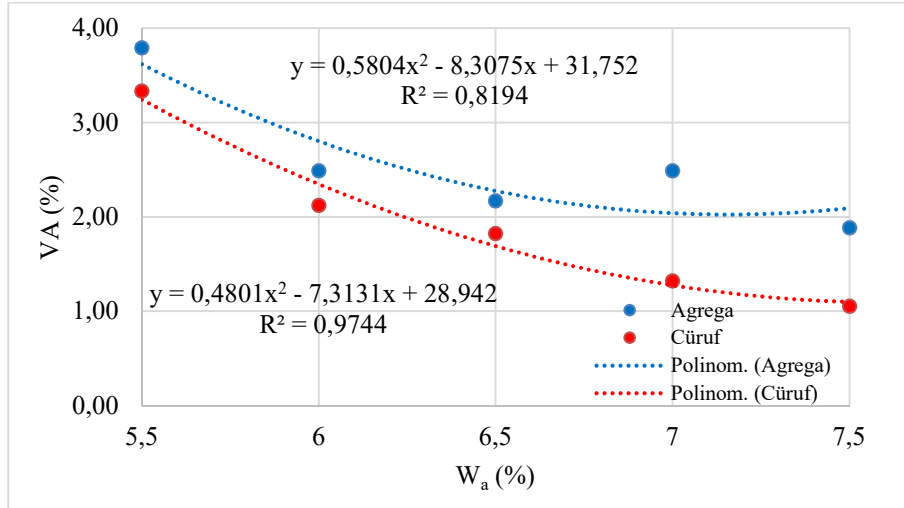
Bu bölümde; doğal agrega ve çelikhane cürufu ile imal edilen TMA briketlerinin temel verileri ve deneysel yaklaşım ile elde edilen ikincil verileri kıyaslanmıştır. Şekil 5.22’de her iki numuneye ait briketlerin G_{mb} değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.22 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal agreg ve çelikhane cürufu briketlerinin pratik birim hacim ağırlıkları arasında büyük fark mevcuttur. Verilerin ortalaması dikkate alındığında; çelikhane cürufu ile imal edilecek TMA tabakasında, ağırlıkça % 17,2 daha fazla malzeme kullanılması gerekecektir. Bu farkın, üretim maliyetlerini arttıracakı düşünülmektedir.

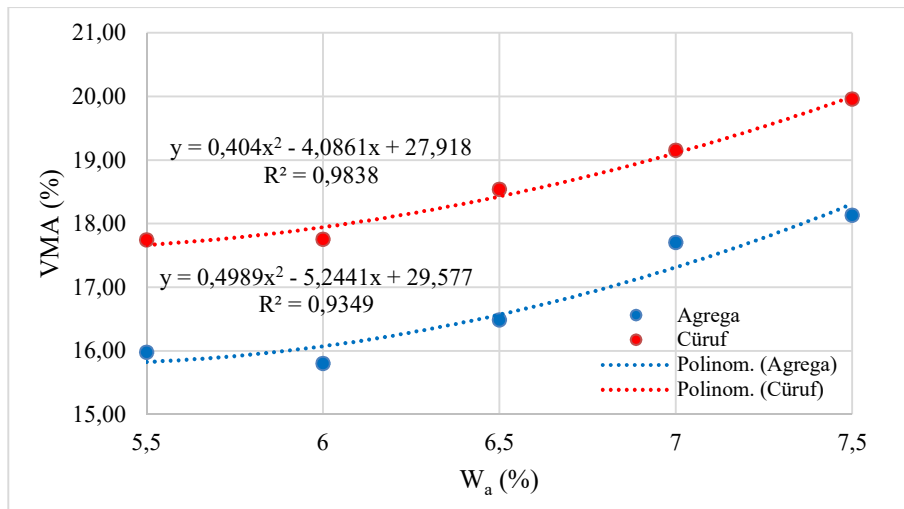
Şekil 5.23'te her iki numuneye ait briketlerin VA değeri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.23 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin VA değeri karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile üretilmiş briketlerde; boşluk oranı, doğal agreg numunelerinden daha düşüktür. Bu durum, cürufun yüksek BHA'sı oranınca karışıma katılan bitüm miktarının, doğal agregaya nazaran fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

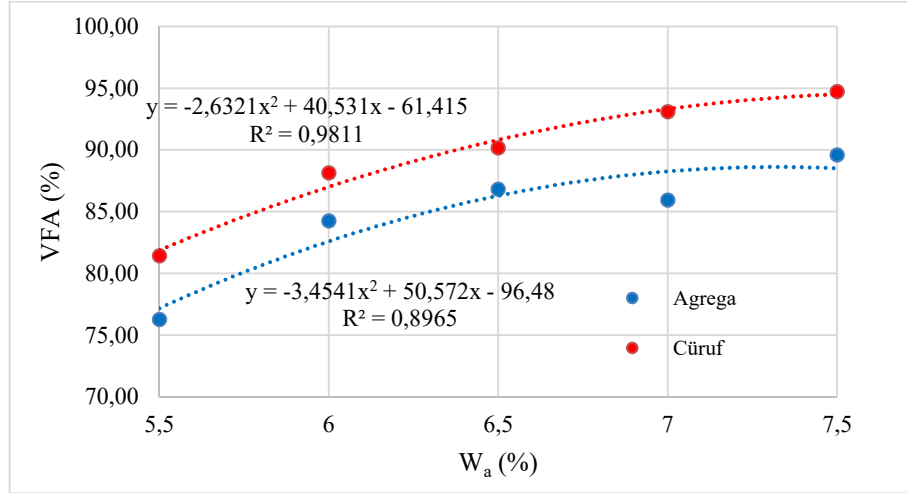
Şekil 5.24'te her iki numuneye ait briketlerin VMA değeri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.24 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin VMA değeri karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin VMA değerleri, KTŞ 2013'te verilen limitler dâhilindedir. Fakat doğal agrega briketlerinde elde edilen VMA değerlerine kıyasla, ortalama 1,81 puan ötelenmiştir. Bu durum, cürufun gözenekli ve pürüzlü yüzeyinden ayrıca çelikhane cürufunun yüksek BHA'sı oranınca eklenen bağlayıcıdan kaynaklanmaktadır.

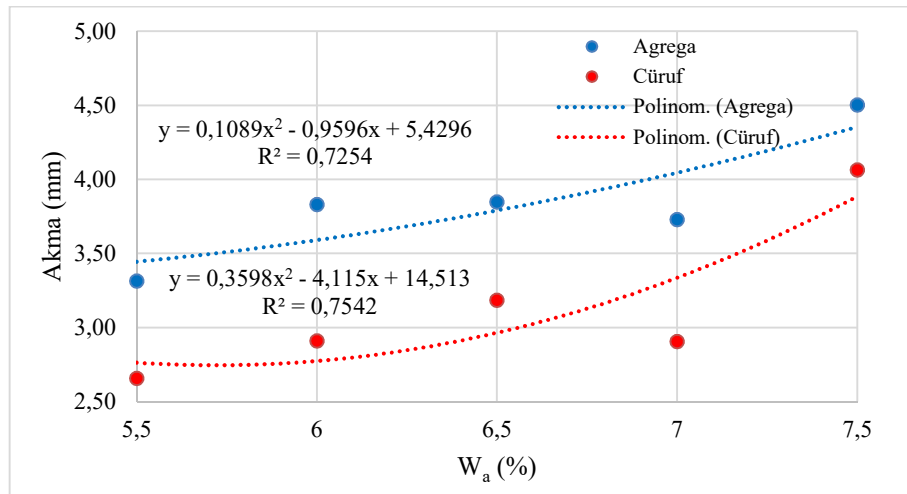
Şekil 5.25'te her iki numuneye ait briketlerin VFA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.25 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile üretilmiş briketlerin VFA değerleri, ortalama 4,95 puan ötelenmiştir. Bu durum da çelikhane cürufu karışımlarının bağlayıcı miktarının, doğal agrega karışımlarına oranla fazla olmasından ileri gelmektedir.

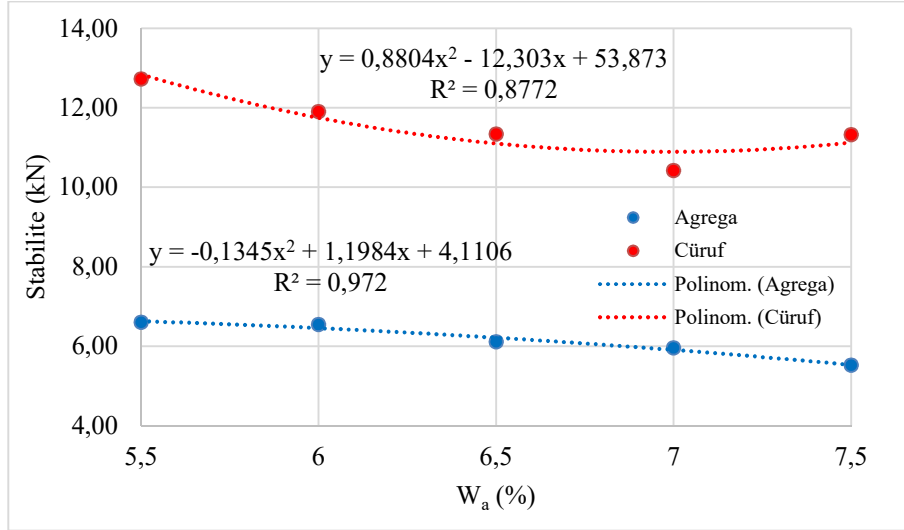
Şekil 5.26'da her iki numuneye ait briketlerin Akma değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.26 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.

KTŞ 2013'te TMA için akma ile ilgili herhangi bir limit bulunmamaktadır. Ek değerlendirmeler için akma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Çelikhane cürufu karışımlarında bağlayıcı miktarının fazla olmasına karşın akma değerleri, doğal agregadan düşüktür. Bu durumun absorbe edilen bağlayıcı miktarından ve yüksek içsel sürtünme açısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat eğilim çizgileri incelendiğinde, artan bağlayıcı oranı ile çelikhane cürufu briketlerindeki akma değerleri daha dik bir artış sergilemektedir. Bu değerlendirmeler ışığında; çelikhane cürufunun yüksek içsel sürtünme açısının yorulma ömrünü, doğal agregaya kıyasla olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir.

Şekil 5.27'de her iki numuneye ait briketlerin Stabilité değerleri karşılaştırılmıştır.

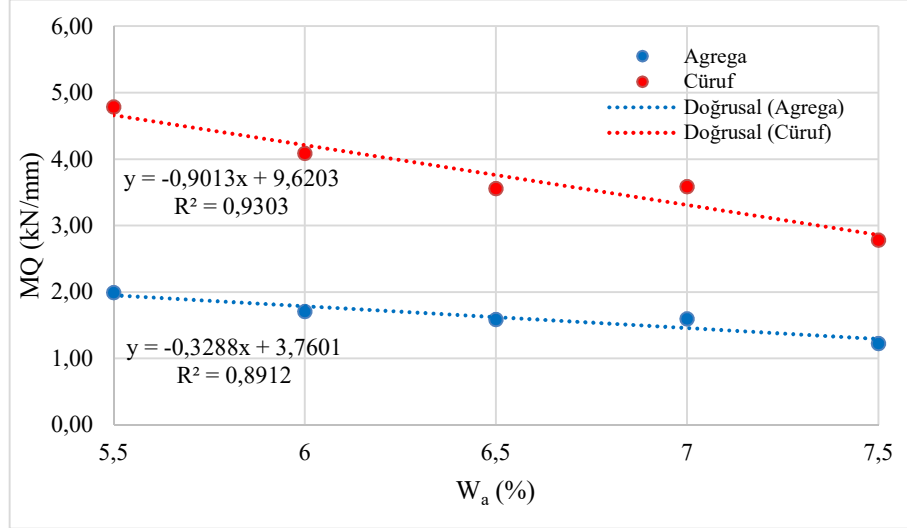


Şekil 5.27 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin Stabilité değerlerinin karşılaştırılması.

KTŞ 2013'te TMA için stabiliteye ilişkin herhangi bir limit bulunmamaktadır. Ek değerlendirmeler için stabilite ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.27'de görüldüğü gibi iki karışımın stabilite değerleri arasında büyük fark vardır. Ortalamalar ele alındığında, çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin stabilite değerleri, doğal agrega briketlerine oranla % 87,6 fazladır. Bu sonuç; çelikhane cürufu ile imal edilen TMA tabakasının daha rijit davranma ihtimali olduğunu göstermektedir. Nihai değerlendirme, performans deney sonuçları ile yapılmıştır.

Bu bölüm kapsamında son olarak üretilen briketlerin Marshall oranları (MQ) kıyaslanmıştır. Şekil 5.28'de her iki numuneye ait briketlerin MQ değerleri karşılaştırılmıştır.

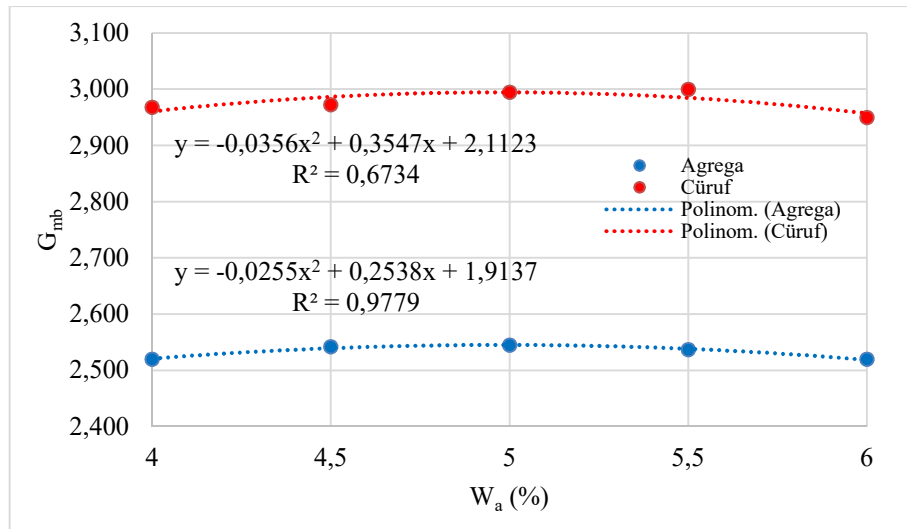
Her iki grupta da, doğrusal bir eğilimle, bağlayıcı oranı arttıkça kalıcı deformasyon olasılığı artmaktadır. Artan bağlayıcı oranı ile eğilim çizgilerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Ortalama MQ değerleri ele alındığında; çelikhane cürufu ile üretilen aşınma tabakasının, doğal agregaya ile üretilen karışıma oranla kalıcı deformasyona daha dayanıklı olması beklenmektedir.



Şekil 5.28 : Doğal agregaya ve çelikhane cürufu TMA briketlerinin MQ değerlerinin karşılaştırılması.

5.6.3 Binder tasarımlarının karşılaştırılması

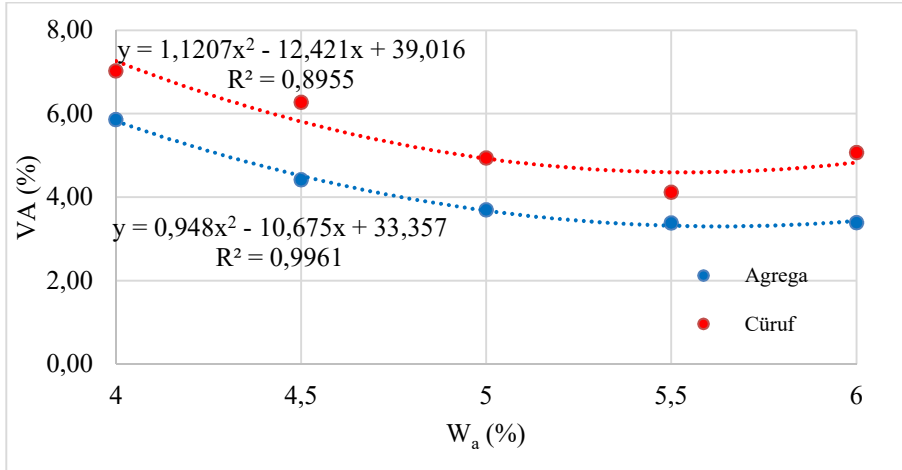
Bu bölümde; doğal agregaya ve çelikhane cürufu ile imal edilen binder briketlerinin temel verileri ve deneysel yaklaşım ile elde edilen ikincil verileri kıyaslanmıştır. Şekil 5.29’da her iki numuneye ait briketlerin G_{mb} değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.29 : Doğal agregaya ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal agrega ve çelikhane cürufu briketlerinin pratik birim hacim ağırlıkları arasında büyük fark mevcuttur. Verilerin ortalaması dikkate alındığında; çelikhane cürufu ile imal edilecek binder tabakasında, ağırlıkça % 17,5 daha fazla malzeme kullanılması gerekecektir. Bu farkın, üretim maliyetlerini arttıracığı düşünülmektedir.

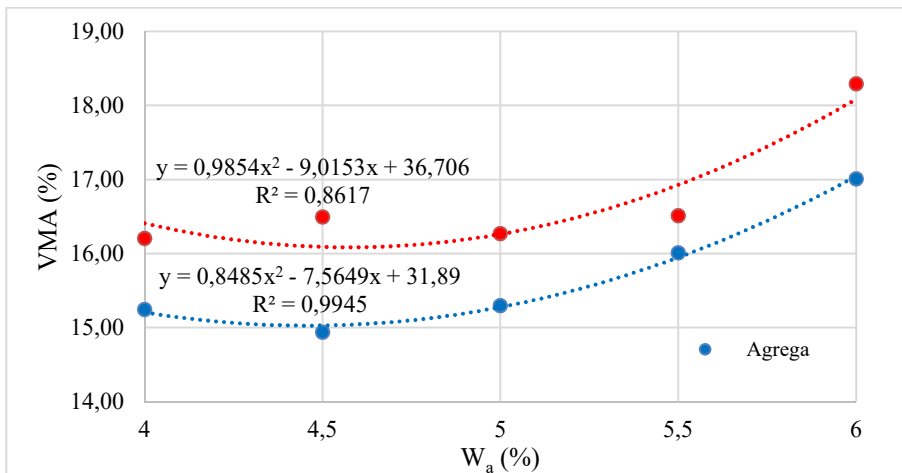
Şekil 5.30’da her iki numuneye ait briketlerin VA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.30 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin VA değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal agrega ve çelikhane cürufu ile imal edilmiş briketlerin VA eğilim çizgileri paralellik göstermektedir. Fakat aşınma tabakasından farklı olarak çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin boşluk oranları doğal agregadan daha yüksektir. Bu durumun; binder tabakasında, diğer karışımlara oranla daha fazla bulunan kaba agreganın gözenekli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

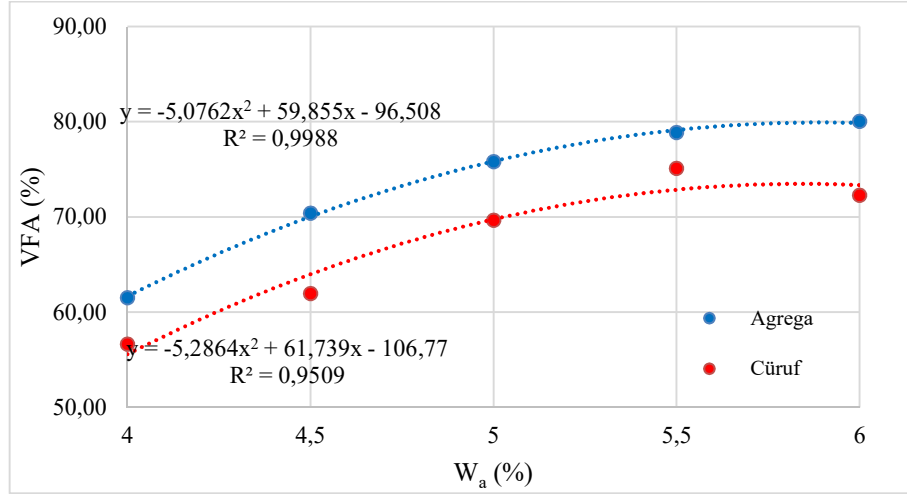
Şekil 5.31’de her iki numuneye ait briketlerin VMA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.31 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin VMA değerleri, KTŞ 2013'te verilen limitler dâhiline girememektedir. Atanan eğilim çizgisi, % 4,57 bağlayıcı oranında en düşük VMA değeri olan % 16,09'a ulaşabilmektedir ki bu değer de limitler dışındadır. Bu durumun; VA karşılaştırmasında (Şekil 5.30) belirtildiği gibi kaba agreganın aşırı gözenekli yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir.

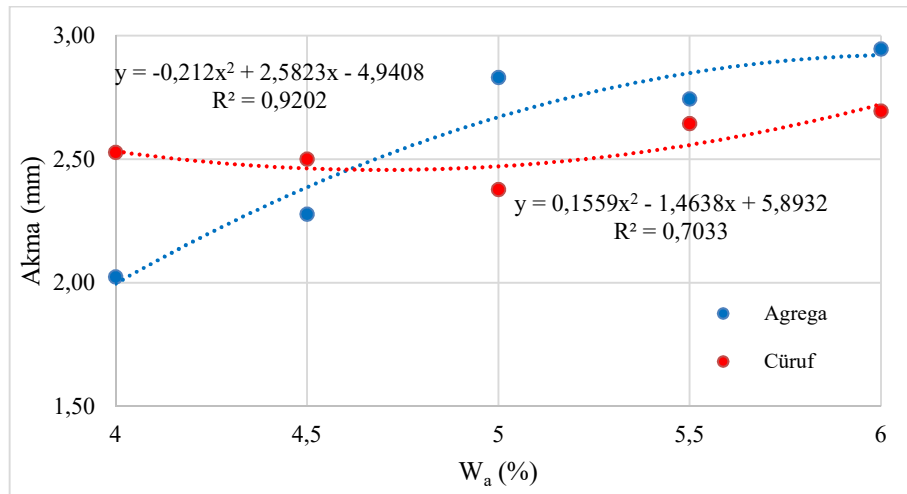
Şekil 5.32'de her iki numuneye ait briketlerin VFA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.32 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.

VA ve VMA karşılaştırmalarında belirtildiği gibi kaba cüruf tanelerinin, çelikhane cürufu briketlerindeki bağlayıcı miktarının fazla olmasına rağmen, VFA değerlerini aşağıya çektiği düşünülmektedir.

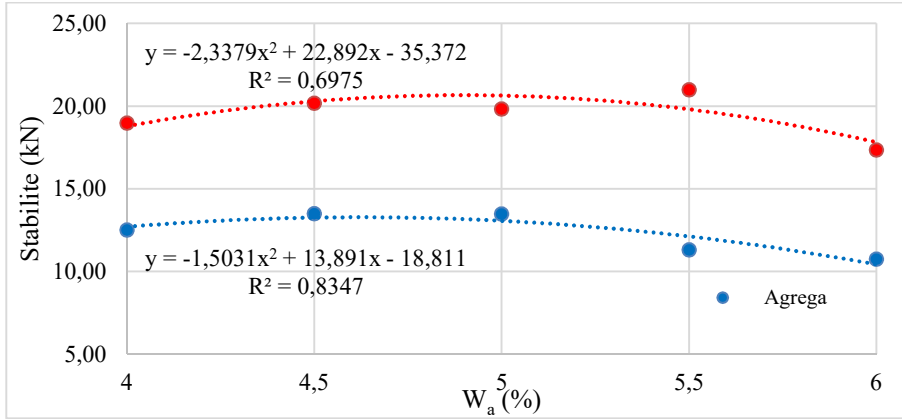
Şekil 5.33'te her iki numuneye ait briketlerin Akma değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.33 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin akma değerleri, ilk 2 bağlayıcı oranında doğal agrega briketlerinden elde edilen sonuçlardan yüksektir. Fakat yataya çok yakın eğilim göstermektedir. Bu durumun binder içindeki kaba tanelerin, daha rijit bir yapı oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

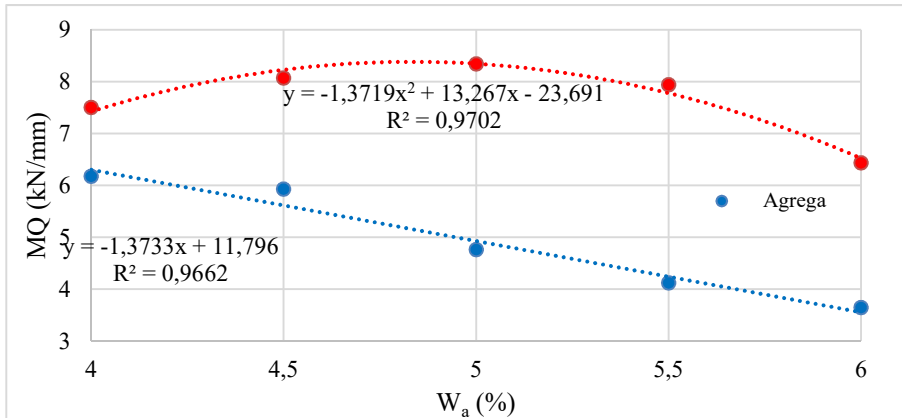
Şekil 6.34’te her iki numuneye ait briketlerin Stabilité değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.34 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin Stabilité değerlerinin karşılaştırılması.

İri agreganın karışımın rijitliğine etkisi Şekil 5.34’te daha net görülmektedir. Tüm bağlayıcı oranlarında, çelikhane cürufu binder briketlerinin stabilite değerleri, doğal agrega sonuçlarına oranla yüksektir. Ortalamalar dikkate alındığında çelikhane cürufu numunelerinin stabilite değerleri, doğal agrega numunelerine oranla % 58 daha fazladır.

Bu bölüm kapsamında son olarak üretilen briketlerin Marshall oranları (MQ) kıyaslanmıştır. Şekil 5.35’te her iki numuneye ait briketlerin MQ değerleri karşılaştırılmıştır.



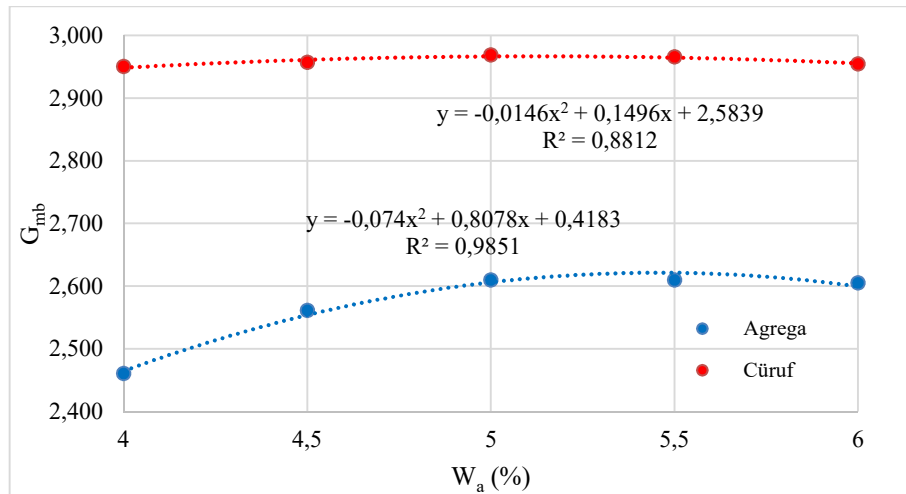
Şekil 5.35 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu Binder briketlerinin MQ değerlerinin karşılaştırılması.

Kademeli inşaat uygulamalarında, binder tabakası serildikten sonra, bir ya da daha fazla sezon için yol trafiğe açılabilir. Bu gibi uygulamalar nedeniyle, binder tabakasının da yeterli dayanım ve kayma-sürtünme özelliklerine sahip olması istenmektedir. Bu çalışma kapsamında binder tabakasına dolaylı çekme mukavemeti (İÇM) haricinde performans deneyi yapılmamıştır. Kalıcı deformasyona dayanımı dolaylı yaklaşım ile bu bölümde açıklanmıştır.

Şekil 5.35'te görüldüğü üzere, doğal agrega briketlerinde bağlayıcı oranı arttıkça kalıcı deformasyon olasılığı doğrusal bir eğilimle artmaktadır. Çelikhane cürufu numunelerinde ise MQ grafiği dış bükey parabol oluşturmuştur. Bir başka deyişle; grafiğin her iki ucunda da kalıcı deformasyona hassasiyet artmaktadır. Bu durum; % 4 bağlayıcı oranında, bitümün yetersiz kalarak esnek bir yapı oluşturamaması, % 6 bağlayıcı oranında ise içsel sürtünme açısının fazla bitüm nedeniyle yitirilmesi şeklinde açıklanabilir. Fakat bu iki bağlayıcı oranında dahi kalıcı deformasyona hassasiyetin doğal agrega numunelerinden yüksek olduğu dikkat çeken bir ayrıntıdır.

5.6.4 Bitümlü temel tasarımlarının karşılaştırılması

Bu bölümde; doğal agrega ve çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin temel verileri ve deneysel yaklaşım ile elde edilen ikincil verileri kıyaslanmıştır. Şekil 5.36'da her iki numuneye ait briketlerin G_{mb} değerleri karşılaştırılmıştır.

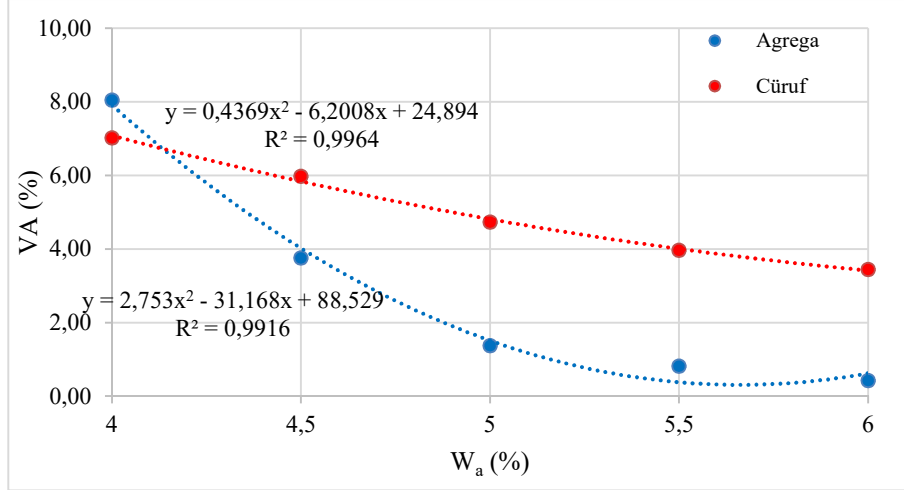


Şekil 5.36 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal agrega ve çelikhane cürufu briketlerinin pratik birim hacim ağırlıkları arasında büyük bir fark mevcuttur. Verilerin ortalaması dikkate alındığında; çelikhane cürufu

ile imal edilecek bitümlü temel tabakasında, ağırlıkça %15,2 daha fazla malzeme kullanılması gerekecektir. Bu farkın, üretim maliyetlerini arttıracığı düşünülmektedir.

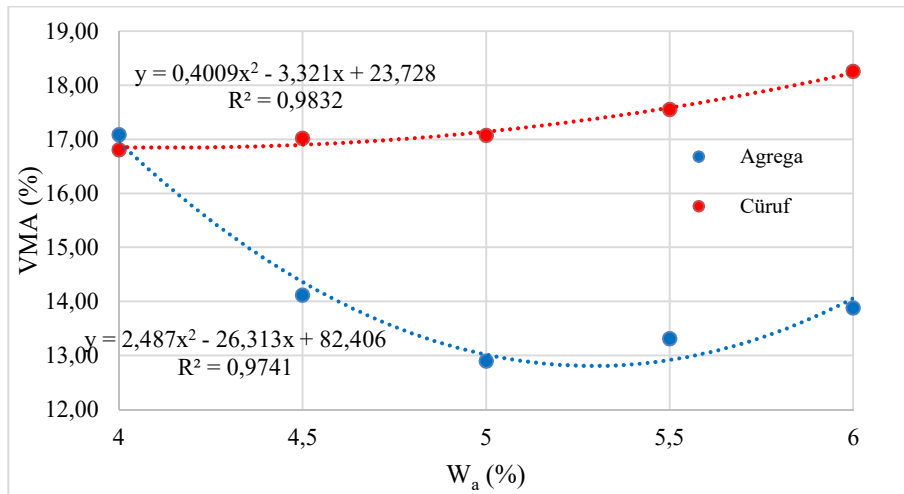
Şekil 5.37’de her iki numuneye ait briketlerin VA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.37 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu BT briketlerinin VA değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal agreg ve çelikhane cürufu ile imal edilmiş briketlerin VA eğilim çizgileri farklılık göstermektedir. Aşınma tabakasından farklı, binder tabakasına benzer olarak çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin boşluk oranları, %4,5 bağlayıcı oranı hariç, doğal agreg briketlerinden daha yüksektir. Bu durum; bitümlü temel tabakasında, diğer karışımlara oranla daha fazla bulunan kaba agreganın gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır.

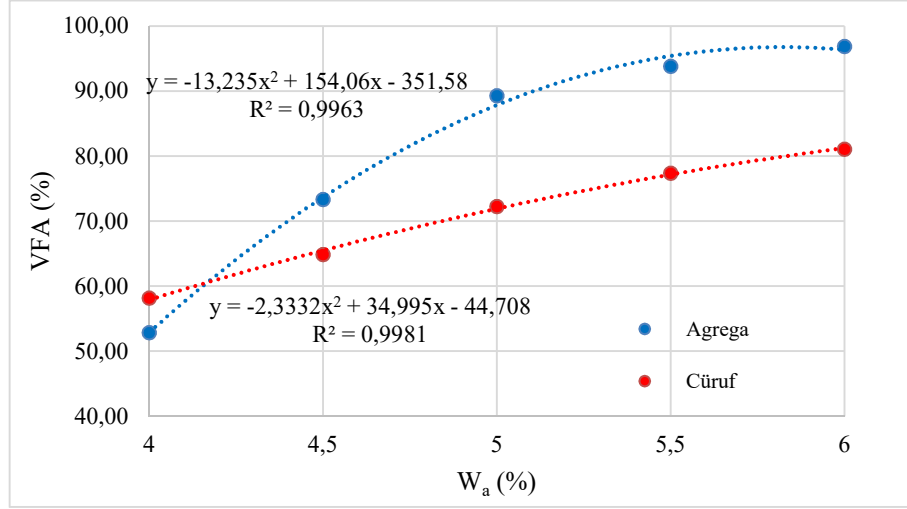
Şekil 5.38’de her iki numuneye ait briketlerin VMA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.38 : Doğal agreg ve çelikhane cürufu BT briketlerinin VMA değerlerinin karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin VMA değerleri, KTŞ 2013'te verilen limitler dâhiline girememektedir. Atanan eğilim çizgisi, % 4 bağlayıcı oranında en düşük VMA değeri olan % 16,86'ya ulaşabilmektedir ki bu değer de limitler dışındadır. Bu durum; kaba agreganın aşırı gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır.

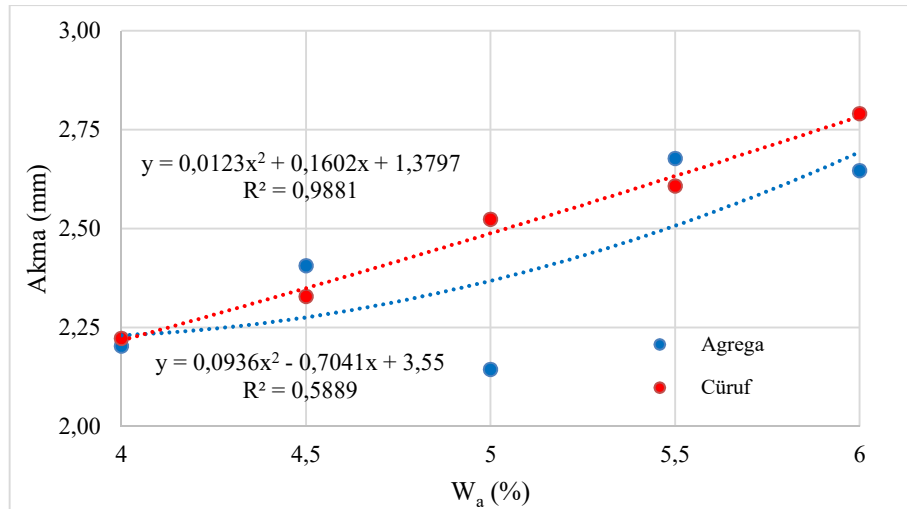
Şekil 5.39'da her iki numuneye ait briketlerin VFA değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.39 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin VFA değerlerinin karşılaştırılması.

VA ve VMA karşılaştırmalarında belirtildiği gibi kaba agrega içeriğinin, çelikhane cürufu briketlerindeki bağlayıcı miktarının fazla olmasına karşın, VFA değerlerini aşağıya çektiği görülmektedir.

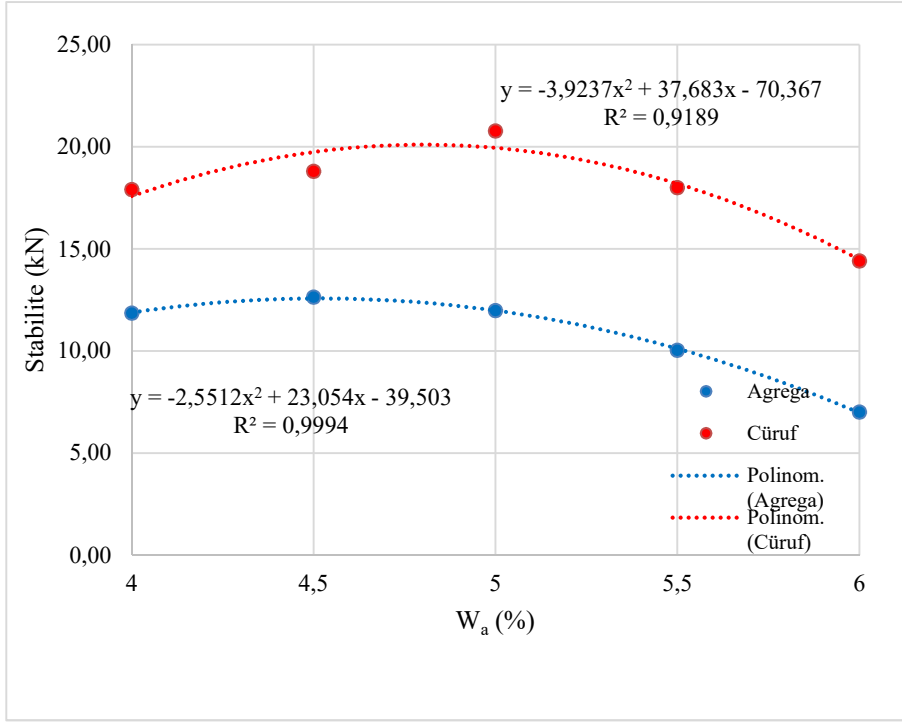
Şekil 5.40'ta her iki numuneye ait briketlerin Akma değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.40 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin Akma değerlerinin karşılaştırılması.

Binder tabakasının tersine, çelikhane cürufu ile üretilen bitümlü temel briketlerinde akma değerleri, doğal agrega sonuçlarından yüksek ve daha istikrarlıdır.

Şekil 5.41’de her iki numuneye ait briketlerin Stabilité değerleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.41 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu BT briketlerinin Stabilité değerlerinin karşılaştırılması.

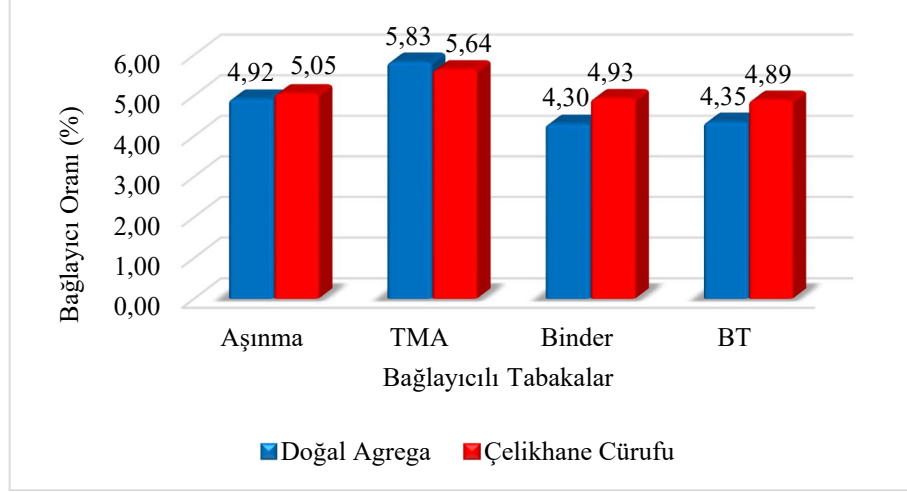
İri agreganın karışımın rijitliğine etkisi Şekil 5.41’de görülmektedir. Tüm bağlayıcı oranlarında, çelikhane cürufu bitümlü temel briketlerinin stabilite değerleri, doğal agrega sonuçlarına oranla yüksektir. Ortalamalar dikkate alındığında çelikhane cürufu numunelerinin stabilite değerleri, doğal agrega numunelerine oranla % 68 daha fazladır.

Bitümlü temel tabakası, yüzey tabakası olarak kullanılmadığından Marshall oranlarının (MQ) karşılaştırması yapılmamıştır.

5.6.5 Optimum bağlayıcı oranları doğrultusunda değerlendirme

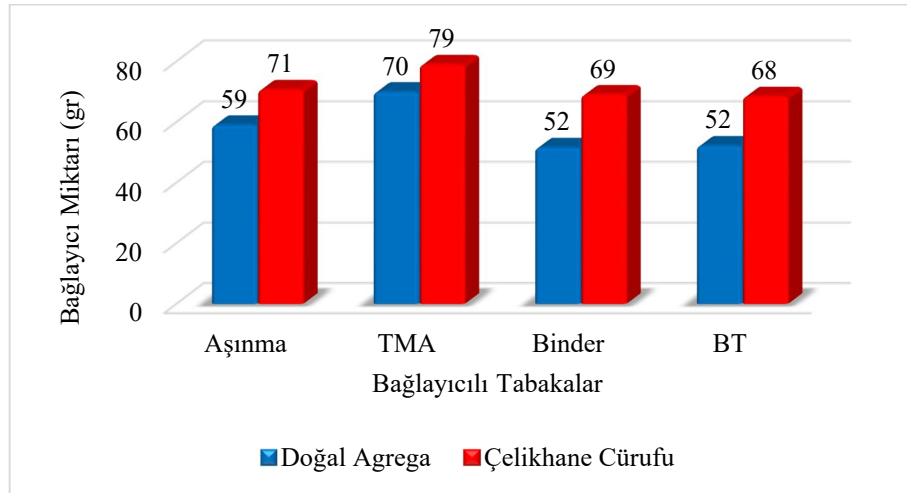
Bu bölümde, tasarımları yapılan doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının, optimum bağlayıcı oranları doğrultusunda, ekonomik analizin de altlığının oluşturulması amacıyla, karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmada optimum bağlayıcı oranları, optimum bağlayıcı miktarları, pratik birim hacim ağırlıkları ve stabilite değerleri dikkate alınmıştır.

İlk olarak karışımların optimum bağlayıcı oranları karşılaştırmalı olarak Şekil 5.42’de sunulmuştur. Şekil 5.42’de görüldüğü üzere, doğal agrega ve çelikhane cürufu ile üretilen Aşınma ve TMA tabakalarının optimum bağlayıcı oranları birbirine yakındır. Maksimum tane boyutunun 25 mm ve 37,5 mm olduğu Binder ve BT tabakalarında ise fark artmıştır. Binder ve BT tabakalarındaki bu farkın temel nedeni, çelikhane cürufu tanelerinin büyüdüğü daha gözenekli bir yapı göstermesidir.



Şekil 5.42 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının optimum bağlayıcı oranlarının karşılaştırılması.

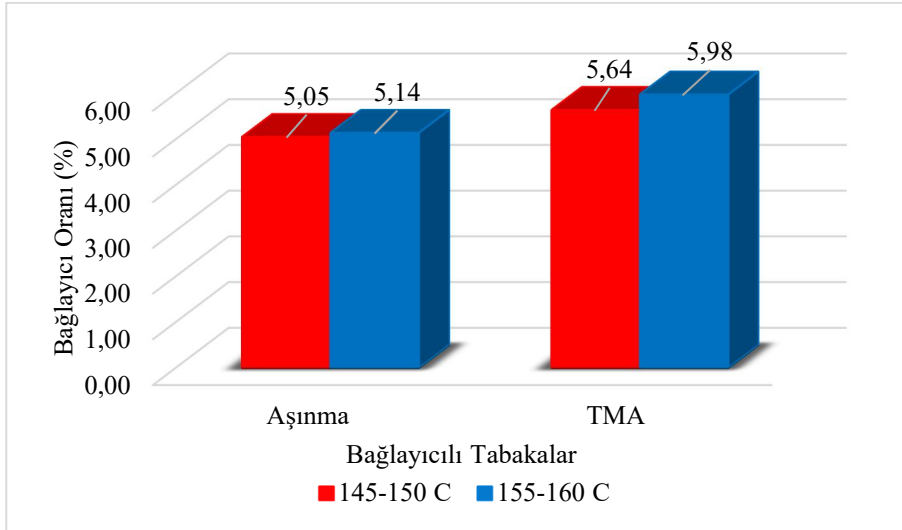
Çelikhane cürufu ile üretilen Aşınma, Binder ve BT karışımlarında 1.400 gr cüruf, TMA karışımında ise 1.300 gr cüruf kullanılmıştır. Doğal agrega ile üretilen karışımlarda ise bu miktarlar 1.200 gr ve 1.100 gr’dır. Dolayısıyla bağlayıcı oranının yanı sıra bağlayıcı miktarlarının da karşılaştırılması gerekmektedir. Söz konusu kıyaslama Şekil 5.43’te sunulmuştur.



Şekil 5.43 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının optimum bağlayıcı miktarlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.43'te görüldüğü üzere, Aşınma ve TMA tabakalarının optimum bağlayıcı oranlarının birbirine yakın olmasına rağmen bağlayıcı miktarları, kullanılan agrega miktarı nedeniyle büyük farklılık göstermektedir. Bağlayıcı miktarı, çelikhane cürufu aşınma tabakasında % 20, TMA tabakasında % 13, Binder tabakasında % 33 ve BT tabakasında % 31 artış göstermiştir.

Bağlayıcı oranları açısından son değerlendirme, sıcaklık farkı ile tasarruf edilen bitüm miktarı hakkında yapılmıştır. Aşınma ve TMA karışımları kontrol için seçilmiş, karışım sıcaklığı haricindeki tüm parametreler sabit tutulmuştur. Karışım sıcaklığı, standart olarak kabul edilen 155 – 160 °C'dir. Bu durumda elde edilen optimum bağlayıcı oranları, 145 – 150 °C sıcaklığında üretilen karışımların optimum bağlayıcı oranları ile Şekil 5.44'te karşılaştırılmıştır.



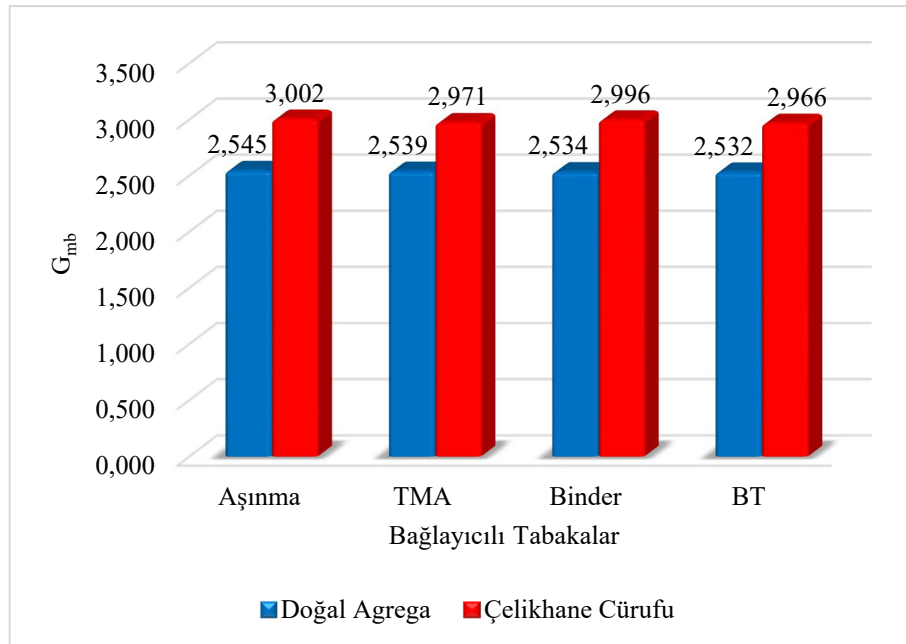
Şekil 5.44 : Karışım sıcaklığının düşürülmesinin optimum bağlayıcı oranlarına etkisi.

Şekil 5.44'te görüldüğü üzere, karışım sıcaklığının düşürülmesi, aşınma tabakasında % 1,8, TMA tabakasında % 6 oranında bağlayıcı tasarrufu sağlamıştır. Bu da 1 ton aşınma karışımında 1 kg, 1 ton TMA karışımında 4 kg'lık bağlayıcı tasarrufuna denk gelmektedir.

Literatür taramasında elde edilen optimum bağlayıcı oranları, çelikhane cürufunun karışım içindeki oranına ve karışım tipine göre farklılıklar göstermektedir. Pasetto (2011) tarafından yapılan çalışmada, aşınma tabakasında % 30 – 60 – 90 işlenmiş cüruf oranları için optimum bağlayıcı oranları % 5,00 – 5,12 ve % 5,25 bulunmuştur [27]. Ali (1992) tarafından yapılan çalışmada, aşınma tabakasında % 100 cüruf kullanılmış ve optimum bağlayıcı oranı % 7 bulunmuştur [35]. Sofilic (2010) tarafından yapılan

çalışmada, aşınma tabakasında % 100 cüruf kullanılmış ve % 6,9 boşluk için bağlayıcı oranı % 5,1 bulunmuştur [36]. Pasetto (2011) tarafından yapılan çalışmada, işlenmiş cürufun % 26 ve 59 oranlarında kullanıldığı TMA karışımlarında optimum bağlayıcı oranları % 5,58 ve 5,64 olarak belirlenmiştir [30]. Kök (2009) tarafından yapılan çalışmada, 0,075-0,180 mm agrega ve filler yerine çelikhane cürufunun kullanıldığı aşınma tabakası için optimum bağlayıcı oranı % 5,22 bulunmuştur [29]. Pasetto (2010) tarafından yapılan çalışmada, işlenmiş farklı iki cürufun % 51 oranlarında kullanıldığı aşınma karışımlarında optimum bağlayıcı oranları % 4,58 ve 4,68 olarak belirlenmiştir [24]. Abut (2013) tarafından yapılan çalışmada, kaba agrega yerine (% 51) çelikhane cürufunun kullanıldığı aşınma tabakası için optimum bağlayıcı oranı % 4,75 bulunmuştur [28]. Literatürdeki mevcut sonuçlar, çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) de ifade edildiği gibi teorik birim hacim ağırlığının ölçülmesi ve sıcaklığın optimize edilmesi ile en düşük bağlayıcı oranlarının elde edildiği görülmektedir.

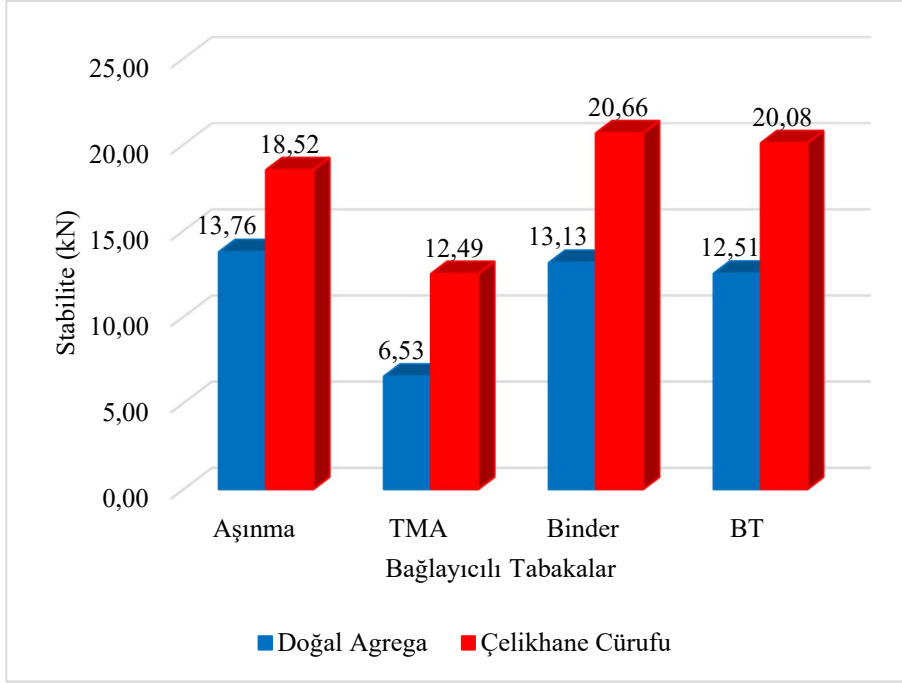
Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen karışımların G_{mb} karşılaştırması Şekil 5.45'te sunulmuştur. Şekil 5.45'te görüldüğü üzere, çelikhane cürufu karışımlarının G_{mb} değerleri doğal agrega karışımlarına oranla ortalama 0,5 puan fazladır.



Şekil 5.45 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının G_{mb} değerlerinin karşılaştırılması.

Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen karışımların stabilite değerlerinin karşılaştırması Şekil 5.46'da sunulmuştur. Şekil 5.46'da görüldüğü üzere, çelikhane

cürufu karışımlarının stabilite değerleri doğal agrega karışımlarına oranla Aşınma tabakasında % 35, TMA tabakasında % 91, Binder tabakasında % 57, BT tabakasında ise % 61 oranında fazladır.



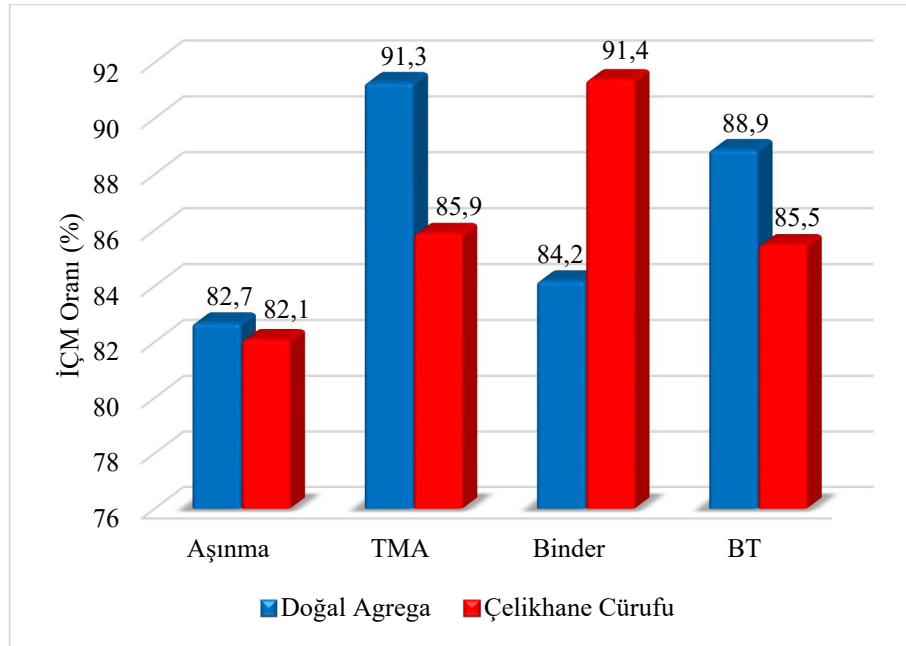
Şekil 5.46 : Optimum bağlayıcı oranlarındaki doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının stabilite değerlerinin karşılaştırılması.

5.7 Lottman Deneyi

Çelikhane cürufu ve doğal agrega ile üretilen karışımların koşullu ve koşulsuz İÇM sonuçlarının oranları Şekil 5.47’de sunulmuştur. ASTM D4867 standardına göre aynı gruptaki koşullu ve koşulsuz numunelerin mukavemet oranları en az % 80 olmalıdır. KTŞ 2013’te de mukavemet oranı için limit en az % 80 olarak verilmiştir [19].

Şekil 5.47’de görüldüğü üzere, çelikhane cürufu ile imal edilen briketlerin suya hassasiyeti doğal agrega briketlerine oranla daha yüksektir. Tek istisna binder tabakasında gözlemlenmiştir.

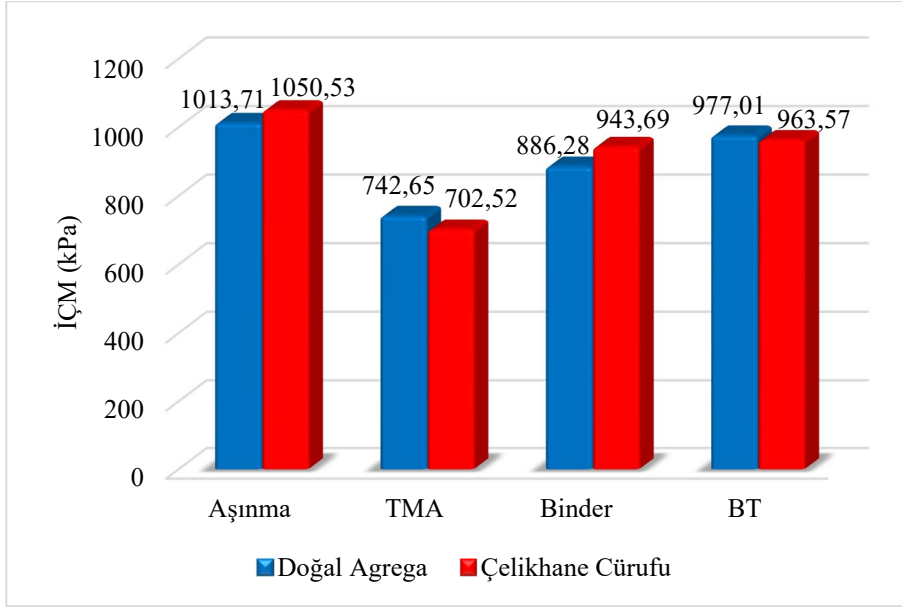
Bölüm başında belirtildiği gibi, bu durumun cüruf bünyesindeki serbest MgO ve CaO’dan kaynaklandığı ayrıca metalik demirin oksidasyonunun da etkisi olabileceği kanaatine varılmıştır. Özellikle donma-çözünme etkisi ile bitüm filminin yırtılması sonucu suyun, cüruf içine nüfuz ederek, cüruf bünyesindeki metalik demirin oksidasyonunu hızlandırdığı, bu durumun da daha geniş bir alanda adezyonu ortadan kaldırdığı düşünülmektedir.



Şekil 5.47 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu karışımlarının koşullu ve koşulsuz İÇM oranları.

Abut (2013) tarafından yapılan çalışmada, kaba agrega yerine (% 51) çelikhane cürufunun kullanıldığı aşınma tabakasında İÇM oranı % 33 olarak belirlenmiştir [28]. Pasetto (2011) tarafından yapılan çalışmada, % 30 – 60 – 90 işlenmiş cüruf oranları ile hazırlanan aşınma tabakası numunelerinde İÇM oranları sırasıyla % 83, 87 ve 90 bulunmuştur [27]. Pasetto (2011) tarafından yapılan çalışmada, işlenmiş cürufun % 26 ve 59 oranlarında kullanıldığı TMA karışımlarında İÇM oranları % 86 ve 89 olarak bulunmuştur [30]. Kök (2009) tarafından yapılan çalışmada, 0,075-0,180 mm agrega ve filler yerine çelikhane cürufunun kullanıldığı aşınma tabakasında İÇM oranı % 58 bulunmuştur [29]. Bu doğrultuda, çalışmada elde edilen İÇM oranlarının uluslararası literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

BSK'ların çekme mukavemetleri, çatlak tipi bozulmalarla ilişkilidir. Dolaylı çekme mukavemeti deneyi; karışımların çatlak oluşumu ile ilişkilendirilen çekme özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Düşük sıcaklık çatlakları, yorulma ve tekerlek izi iç gerilmeleri etkileyen üç ana faktördür. Bu gibi nedenlerle meydana gelen yüksek iç gerilmeleri tolere edebilen karışımlar çatlamlara karşı daha dayanımlıdır. Kısaca; yüksek çekme mukavemeti, çatlamlara karşı daha iyi bir direnç sağlamaktadır [69]. Bu kapsamda, tasarlanan karışımların çatlaklara karşı hassasiyetlerinin değerlendirilebilmesi için koşullandırılmamış numunelerin İÇM değerleri Şekil 5.48'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.48 : Doğal agregası ve çelikhane cürufu karışımlarının ortalama İÇM değerlerinin karşılaştırılması.

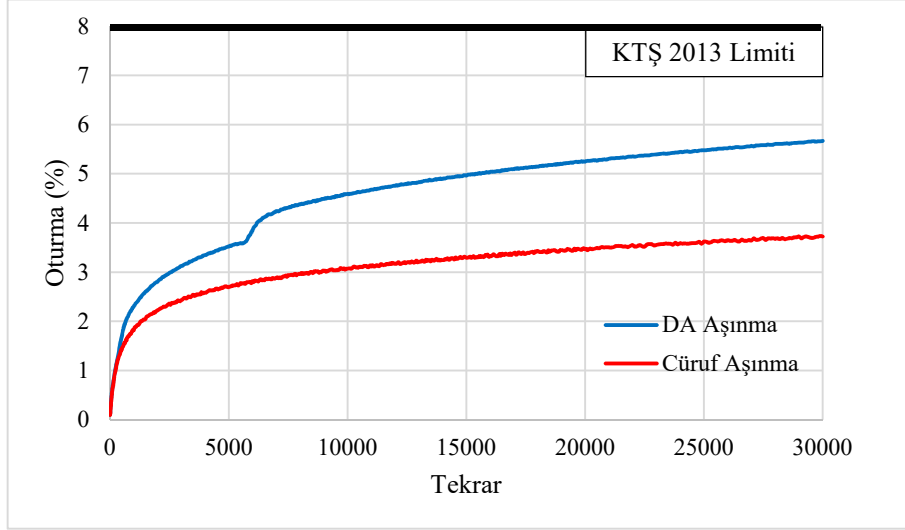
Şekil 5.48’de görüldüğü üzere; doğal agregası ve çelikhane cürufunun farklı karışımlarda elde edilen İÇM değerleri birbirine benzer ve yakındır. Bu doğrultuda, çelikhane cürufu ile imal edilen BSK’ların, çatlak tipi bozulmalara karşı doğal agregası ile benzer hassasiyete sahip olduğu düşünülmektedir. Yorulma deneyleri ile bu durum detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

Abut (2013) tarafından yapılan çalışmada, kaba agregası yerine (% 51) çelikhane cürufunun kullanıldığı aşınma tabakasında İÇM 610,6 kPa olarak belirlenmiştir [28]. Pasetto (2011) tarafından yapılan çalışmada, % 30 – 60 – 90 işlenmiş cüruf oranları ile hazırlanan aşınma tabakası numunelerinde İÇM değerleri sırasıyla 1.400, 1.460 ve 1.550 kPa bulunmuştur [27]. Pasetto (2011) tarafından yapılan çalışmada, işlenmiş cürufun % 26 ve 59 oranlarında kullanıldığı TMA karışımlarında İÇM değerleri 1.490 ve 1.570 kPa olarak bulunmuştur [30]. Kök (2009) tarafından yapılan çalışmada, 0,075-0,180 mm agregası ve filler yerine çelikhane cürufunun kullanıldığı aşınma tabakasında İÇM 700 kPa civarında bulunmuştur [29]. Bu doğrultuda, çalışmada elde edilen İÇM oranlarının ulusal literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Literatürden görüldüğü üzere, işlenmiş çelikhane cürufu, İÇM değerlerini iyileştirmektedir.

5.8 Tekerlek izinde oturma deneyi

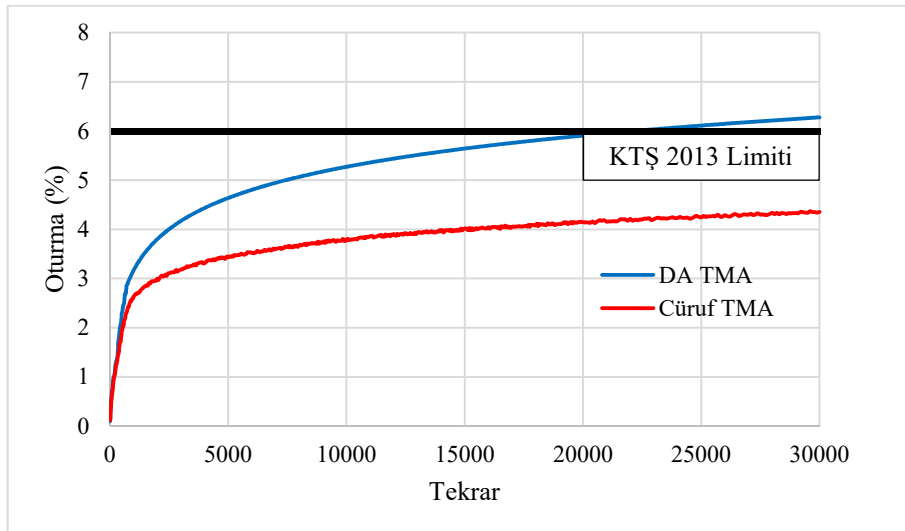
Çelikhane cürufu ve doğal agregadan 4.160 cm³ hacminde her karışımdan iki adet olmak üzere aşınma ve TMA numuneleri üretilmiştir. Her bir deney için sol ve sağ

olmak üzere 2 numune kullanılmıştır. Numuneler deney başlamadan önce 4 saat boyunca 60 °C’de koşullandırılmıştır. Deney, 60 °C sıcak hava etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Çelikhane cürufu ve doğal agregadan üretilen aşınma numunelerinin, tekerlek yükü altında karşılaştırmalı deformasyon grafiği Şekil 5.49’da sunulmuştur.



Şekil 5.49 : Çelikhane cürufu ve doğal agregadan üretilen aşınma karışımlarının TİO oranı grafiği.

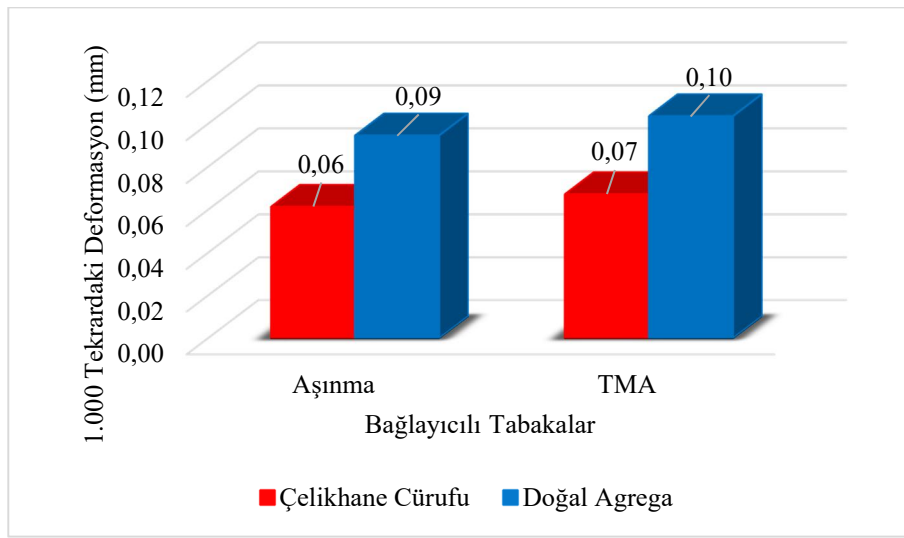
Çelikhane cürufu ve doğal agregadan üretilen TMA numunelerinin, tekerlek yükü altında karşılaştırmalı deformasyon grafiği Şekil 5.50’de sunulmuştur.



Şekil 5.50 : Çelikhane cürufu ve doğal agregadan üretilen TMA karışımlarının TİO oranı grafiği.

Deneye tabi tutulan numunelerin 1.000 tekrardaki deformasyon miktarları kıyaslanmıştır. Karşılaştırma, sütun grafik ile Şekil 5.51’de sunulmuştur. Çelikhane

cürufu aşınma ve TMA tabakası, doğal agregaya nazaran tekerlek izine % 35,1 daha fazla direnç göstermiştir. Bu da cürufun yapay agrega olarak kullanımı ile aşınma ve TMA tabakalarının, tekrarlı yükler altında kalıcı deformasyona direnç bakımından performans ömürlerinin benzer oranlarda arttırılabileceğini göstermektedir. Literatür taramasında tamamen EAO çelikhane cürufunun kullanıldığı ve tekerlek izinde oturma deneyinin uygulandığı bir örnek bulunmuştur. Sofilic (2010) tarafından yapılan bu çalışmada aşınma tabakasında 1.000 tekrardaki oturma 0,09 mm olarak belirlenmiştir [36]. Bu tez çalışmasında ise aşınma tabakasında 1.000 tekrardaki oturma 0,06 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.51 : Numunelerin 30.000 tekrardaki deformasyon oranları.

Bu verilere ek olarak, Tekerlek İzinde Oturma bölümünde (Bölüm 4.9) belirtildiği üzere Hamburg sıkıştırma cihazının pas sayısı – kuvvet grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler doğrultusunda ekonomik analizde kullanılmak üzere sıkıştırma enerjisi hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2 : Hamburg sıkıştırma cihazı verileri ile hesaplanan sıkıştırma enerjileri

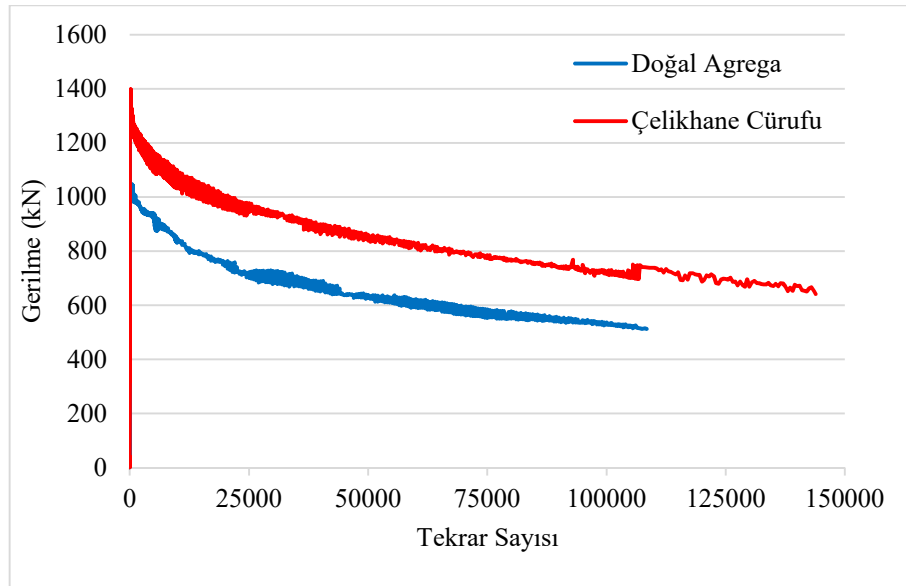
Malzeme	Tabaka Tipi	Numune No	Sıkıştırma Enerjisi (Pas.kN)	Ortalama Sıkıştırma Enerjisi (Pas.kN)
Doğal Agregas	Aşınma	1	167,4	163,4
		2	159,4	
	TMA	1	234,9	246,6
		2	258,2	
Çelikhane Cürufu	Aşınma	1	242,5	236,7
		2	231,0	
	TMA	1	190,4	237,4
		2	284,4	

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere, aşınma tabakasında en az % 98 sıkışmanın yakalanabilmesi için doğal agrega numunesine uygulanan enerji ile çelikhane cürufu numunesine uygulanan enerji arasında % 45 oranında fark mevcuttur. Buna rağmen TMA tabakasında uygulanan enerjiler benzerdir. Bu durumun da çelikhane cürufu TMA karışımındaki yüksek bağlayıcı miktarından ileri geldiği düşünülmektedir.

5.9 Yorulma Ömrü Analizi

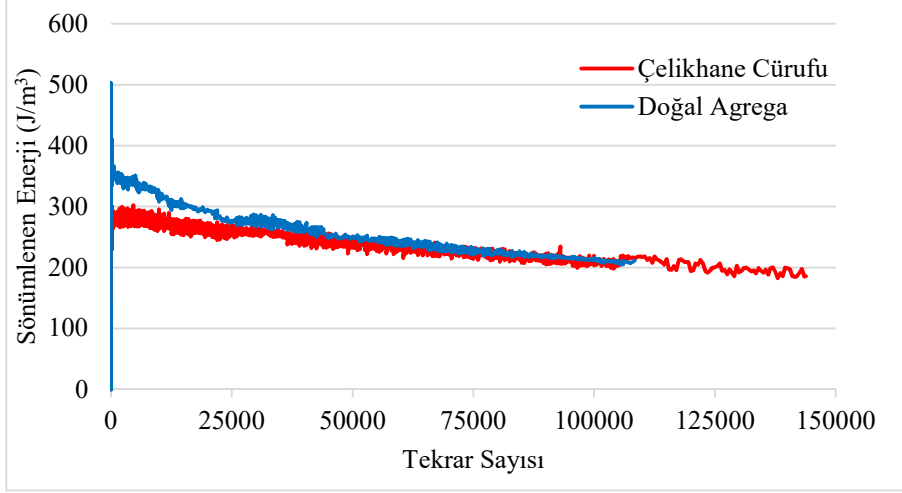
Performans deneyleri kapsamında son olarak doğal agrega ve çelikhane cürufu ile üretilen aşınma ve TMA karışımlarının yorulma ömürleri belirlenmiştir. Optimum bağlayıcı oranında üretilen numunelerin G_{mb} değerleri ölçülmüş ve 5 x 5 cm’lik kirişler halinde kesilmiştir. Numuneler, 4 noktalı yorulma cihazına yerleştirilmiştir. Cihaz, 20 °C sıcaklığa, 20 Hz yükleme frekansına ve 200×10^{-6} birim uzamaya (200 microstrain) karşılık gelen sabit deformasyona ayarlanmıştır. Deney, kirişin eğilme rijitliğinin ilk değerinin % 50’sine indiği yüklemde sonlandırılmıştır.

Çelikhane cürufu ve doğal agrega karışımları arasında bir karşılaştırma yapılabilmesi için aynı karışımlar için üretilen numunelere ait veriler üst üste bindirilmiş, gerilme ve sönümlenen enerji grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.52’de doğal agrega aşınma karışımı 3 ve 4 numaralı numuneler ile çelikhane cürufu aşınma karışımı 4 ve 5 numaralı numunelerin tekrar sayısı - gerilme grafiği verilmiştir.



Şekil 5.52 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega aşınma kirişleri yorulma deneyi gerilme grafiği.

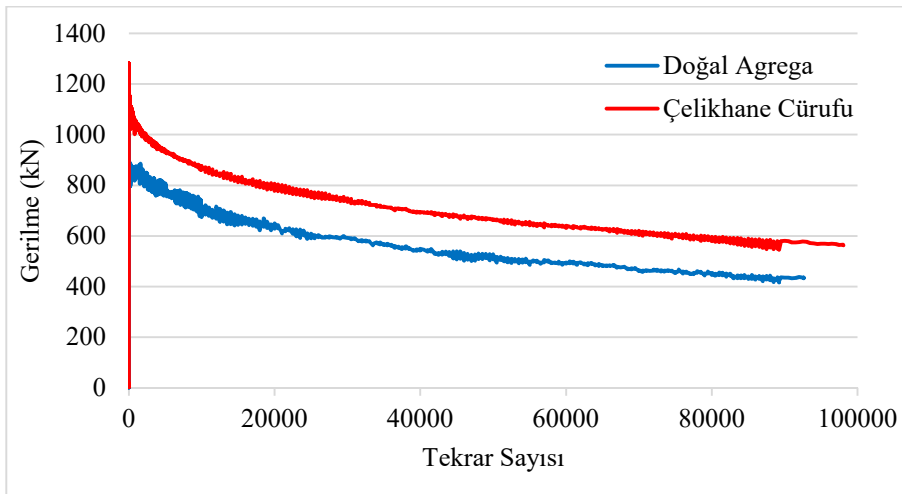
Şekil 5.53'te doğal agrega aşınma karışımı 3 ve 4 numaralı numuneler ile çelikhane cürufu aşınma karışımı 4 ve 5 numaralı numunelerin tekrar sayısı – sönümlenen enerji grafiği verilmiştir.



Şekil 5.53 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega aşınma kırımları yorulma deneyi sönümlenen enerji grafiği.

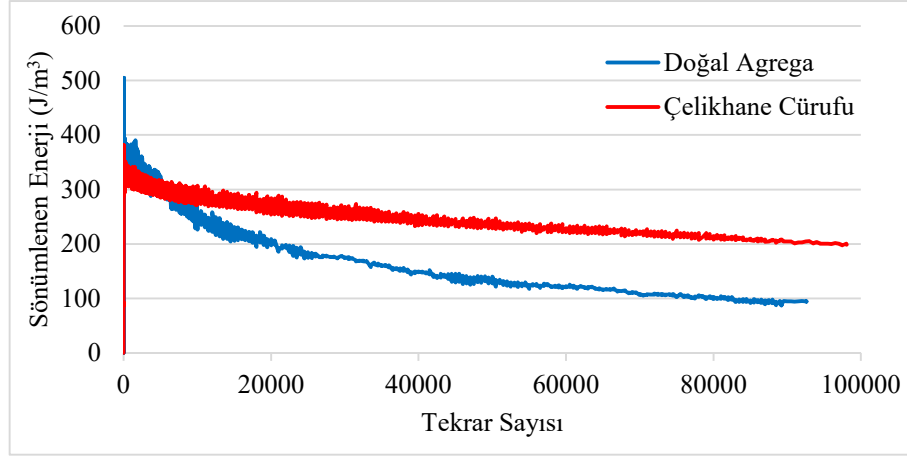
Şekil 5.52'de görüldüğü üzere, çelikhane cürufu kırımlarında oluşan gerilmeler, sürekli olarak doğal agrega kırımlarından 200 kPa dolayında fazladır. Sönümlenen enerjide değerlerinde başlangıçta 50 J/m³ dolayında bir fark mevcutken, 75.000 tekrar itibarı ile iki karışımın da aynı seviyeye geldiği Şekil 5.53'te görülmektedir.

Şekil 5.54'te doğal agrega TMA karışımı 2 ve 4 numaralı numuneler ile çelikhane cürufu TMA karışımı 2 ve 4 numaralı numunelerin tekrar sayısı - gerilme grafiği verilmiştir.



Şekil 5.54 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega TMA kırımları yorulma deneyi gerilme grafiği.

Şekil 5.55'te doğal agrega TMA karışımı 2 ve 4 numaralı numuneler ile çelikhane cürufu TMA karışımı 2 ve 4 numaralı numunelerin tekrar sayısı – sönmölenen enerji grafiği verilmiştir.



Şekil 5.55 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega TMA kirişleri yorulma deneyi sönmölenen enerji grafiği.

Şekil 5.54'te göröldüğü üzere, çelikhane cürufu kirişlerinde oluşan gerilmeler, sürekli olarak doğal agrega kirişlerinden 200 kPa dolayında fazladır. Şekil 5.55'te ise başlangıçta doğal agrega kirişlerinin sönmölediği enerji daha fazlayken 7000 tekrar civarında çelikhane cürufu kirişlerinin altına düşmekte ve deneyin tamamlandığı tekrarda çelikhane cüruflarının sönmölediği enerji 200 J/m³ civarındayken, doğal agrega kirişlerinin 100 J/m³'de kaldığı görölmektedir.

Çizelge 5.3'te yorulma deneyinde kullanılan kirişlerin ilk eğilme rijitliği değerleri verilmiştir. Çizelge 5.3'te göröldüğü üzere; akma ve stabilite değerlerinden de beklendiği gibi, çelikhane cürufu numunelerinin eğilme rijitliği doğal agrega numunelerinden yüksektir.

Çizelge 5.3 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu numuneleri eğilme rijitliği değerleri.

Malzeme	Tabaka Tipi	Numune No	Eğilme Rijitliği (MPa)	Ortalama Eğilme Rijitliği (MPa)
Doğal Agrega	Aşınma	3	5203,6	5136,0
		4	5068,3	
	TMA	2	4193,0	4260,5
		4	4328,0	
Çelikhane Cürufu	Aşınma	4	6925,4	6639,5
		5	6353,6	
	TMA	2	5421,6	5522,0
		4	5622,4	

Çizelge 5.4'te yorulma deneyinde kullanılan kirişlerin sönümledikleri toplam enerji miktarları verilmiştir. Çizelge 5.4'te görüldüğü üzere, her iki malzeme ile üretilen TMA tabakası numunelerinin toplam sönümledikleri enerji miktarı birbirine çok yakinken Aşınma tabakası numunelerinde 1,89 MJ/m³'lük bir fark mevcuttur.

Çizelge 5.4 : Doğal agrega ve çelikhane cürufu numuneleri sönümlenen toplam enerji miktarları.

Malzeme	Tabaka Tipi	Numune No	Toplam Sönümlenen Enerji (MJ/m ³)	Ortalama Sönümlenen Toplam Enerji (MJ/m ³)
Doğal Agrega	Aşınma	3	27,36	27,41
		4	27,45	
	TMA	2	22,36	23,05
		4	23,75	
Çelikhane Cürufu	Aşınma	4	26,39	29,30
		5	32,21	
	TMA	2	22,67	22,84
		4	23,01	

Yukarıda sunulan tüm veriler değerlendirildiğinde; çelikhane cürufu ile üretilen tabakaların, doğal agrega tabakaları ile eşdeğer deplasman yapabilmeleri için daha yüksek kuvvetlere ihtiyaç duydukları görülmektedir. Bu durumda eğilme rijitliklerini daha kısa sürede kaybetmeleri beklenirken yorulma ömürlerinin doğal agrega numunelerine oranla daha uzun olduğu belirlenmiştir. Bulgular bölümü (Bölüm 4), Çizelge 4.74'teki yorulma ömürleri karşılaştırıldığında çelikhane cürufu aşınma numunesinin yorulma ömrünün % 16,8, TMA tabakasının yorulma ömrünün % 3 oranında daha uzun olduğu belirlenmiştir.

5.10 Ekonomik Analiz

Literatürde ve Fiziksel Özellikler bölümünde (Bölüm 5.1) belirtildiği üzere çelikhane cürufu, birim hacim ağırlığı yüksek ve gözenekli bir malzemedir. Birim hacim ağırlığı nedeniyle ekonomik taşıma mesafesi kısalmakta, gözenekli yapısı nedeniyle de bağlayıcı tabakalarda daha fazla bitüme ihtiyaç duymaktadır. Bunların yanı sıra karayolu inşaatında kullanılabilmesi için bir dizi işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda ilk olarak, çelikhane cürufunun bertaraf ve işleme maliyetleri ele alınmıştır.

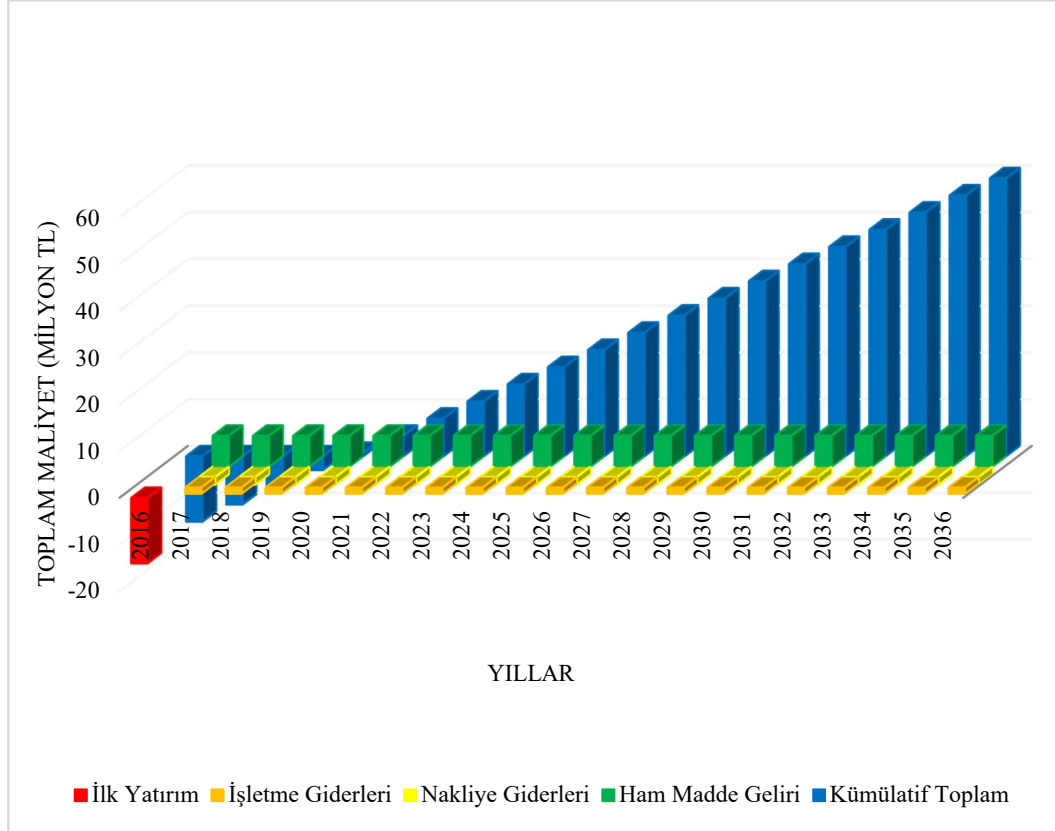
Yapılan tüm hesaplarda 2016 fiyatları esas alınmış, 2036 yılına kadar yapılan projeksiyonda eskalasyon katsayıları dikkate alınmamıştır. Bu durumun temel nedeni hurda fiyatlarının dolara endeksli olmasıdır.

Ülkemizde şu anda atık konumunda olan çelikhane cürufunun en genel bertaraf yöntemi eski taş ocaklarının doldurulmasıdır. Bu durumda, işletme ömrü dolmuş bir taşocağının devralınması, geçirimsiz tabakalar ve drenaj sistemleri ile ocağa doldurulacak cürufun çevreden izole edilmesi gerekmektedir. Tesisten gelen cürufun uygun bir şekilde ocağa serilebilmesi için küçük bir makine parkına ve tesisin devamlılığını sağlayacak personele ihtiyaç duyulmaktadır. Böyle bir bertaraf tesisinin ilk yatırım maliyeti 10 ila 15 milyon TL arasındadır. Bu tesisin işletme maliyeti aylık 15.000,00-TL olarak kabul edilmiştir. Ayrıca tesiste ortaya çıkan cürufun bertaraf tesisine taşınması için ek bir maliyet gerekmektedir. Çelik üretim tesisi yetkilileri ile yapılan görüşmelerde olası bertaraf alanları belirlenmiş ve 1 ton cürufun bu bölgelere taşınma maliyeti 5,00-TL olarak kabul edilmiştir.

Numunenin temin edildiği çelik üretim tesisinde hali hazırda bir kırma, eleme ve manyetik ayrıştırma birimi bulunmaktadır. Bu birimin ilk yatırım maliyetinin 1,5 milyon TL olduğu belirlenmiştir. Tesis kurulduktan sonra ise cüruf içindeki metalik demir çekilerek hammadde olarak üretime katılabilmektedir. Cürufun içinde % 12'ye kadar metalik demir bulunabilmektedir. Bu miktar ortalama % 6 kabul edilmiştir. Bu durumda, her ton çelikhane cürufundan 60 kg metalik demir elde edilecektir. Elde edilen metalik demir vasat hurda sınıfında dikkate alınmış ve kg fiyatı 0,34-TL olarak alınmıştır. Kısaca her ton cüruftan 20,40-TL değerinde hammadde elde edilmektedir. Kırma, eleme ve manyetik ayrıştırma biriminin tüm giderler dâhil olmak üzere ton başına maliyeti ise 3,50-TL'dir. Tüm çelik üretim tesislerinde cürufun geçici olarak depolandığı altyapısı hazır (su spreyleri, geçirimsiz tabaka ve drenaj tesisleri) bir stok sahası mevcuttur. Bu stok sahasında cürufun 6 ay boyunca yaşlandırılacağı ve hidrasyon tepkimeleri için yağış olmayan her 5 günde bir, bir ton cürufa günlük, su absorpsiyonunun iki katı oranında su püskürtüleceği kabul edilmiştir. Çelik tesisinin bulunduğu il olan Kocaeli'de, Meteoroloji Genel Müdürlüğü istatistiklerine göre en kurak sezon olan Mayıs-Ekim ayları döneminde toplam 48,3 gün yağış mevcuttur. En yağışlı sezon olan Kasım-Nisan ayları döneminde ise 92,2 gün yağışlıdır. Bu iki veri dikkate alındığında, cürufun stok sahasında ortalama 22,4 gün sulanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu durumda 1 ton cüruf için 6 aylık yaşlandırma suyu bedeli 6,27-TL olarak hesaplanmaktadır.

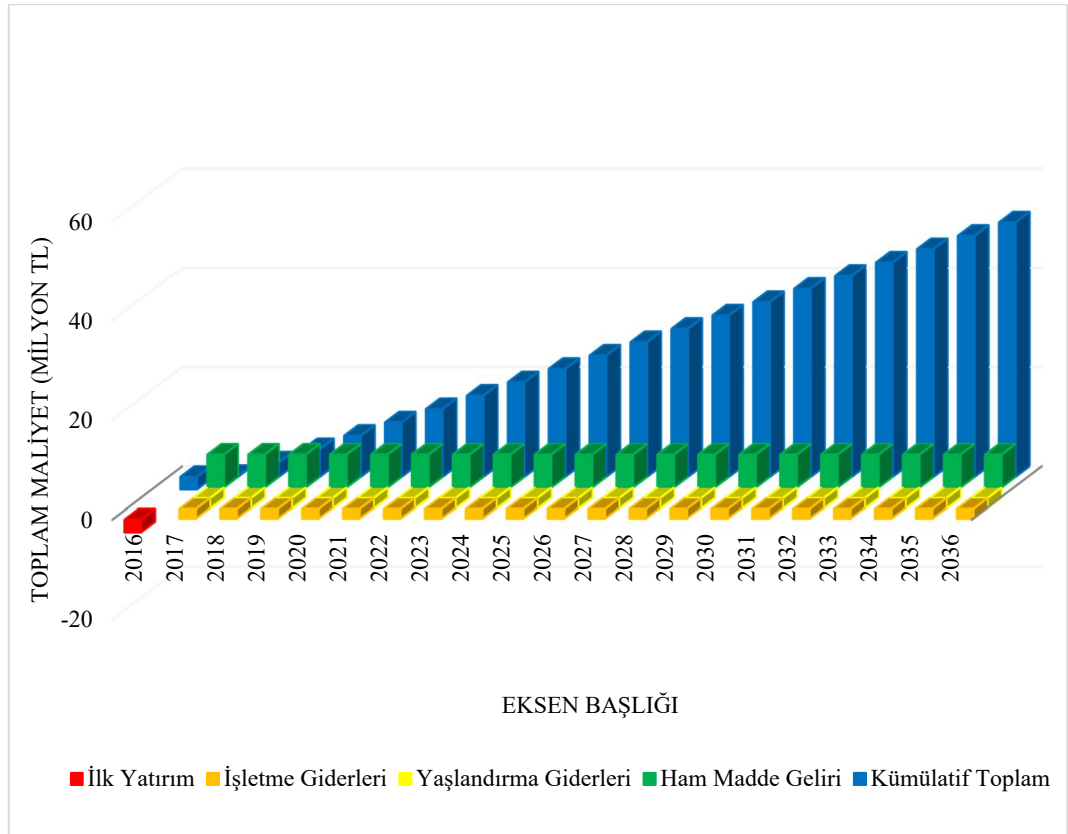
Çelik tesisinin kapasitesi ve 2015 yılı üretim miktarı dikkate alındığında, 20 yıllık analiz sürecinde, yıllık ortalama 2,4 milyon ton çelik üretileceği varsayılmıştır. 2,4

milyon ton çelik üretiminden de 20 yılda toplam 6,48 milyon ton cüruf elde edilecektir. Cürufun yapay agrega olarak kullanılmayacağı kabulüyle yaşlandırma işlemi dikkate alınmadan, söz konusu kırma-eleme ve bertaraf tesislerinin 2016 yılı içinde kurulduğu varsayımıyla yapılan hesaplamada çelik üreticisinin, cüruf içindeki metalik demirin üretime yeniden katılmasıyla elde ettiği kazanç ton başına 9,18-TL'dir. Bu duruma ilişkin yıllara göre maliyet grafiği Şekil 5.56'da sunulmuştur.



Şekil 5.56 : Cürufun bertaraf edilmesi durumunda yıllara göre maliyet grafiği.

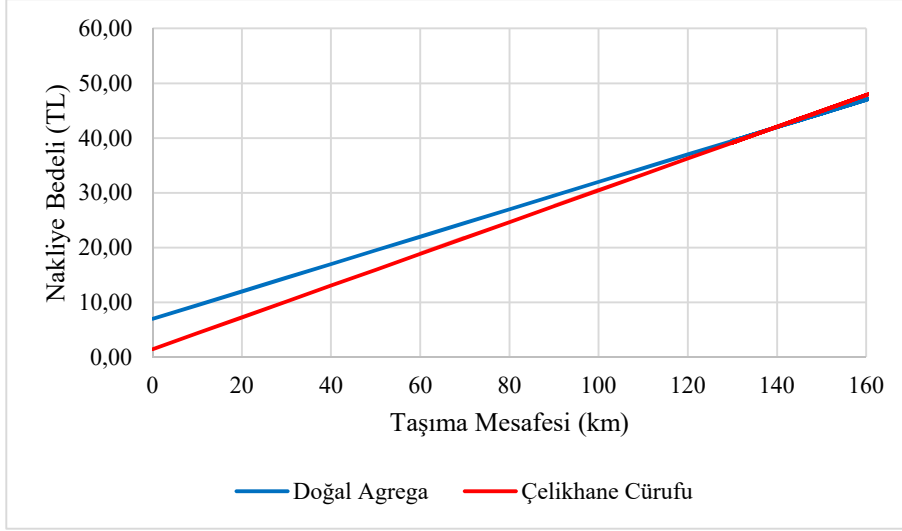
Cürufun yapay agrega olarak kullanılacağı düşünüldüğünde, bertaraf tesisinin maliyeti ortadan kalkmaktadır. Fakat cürufun tane boyutlarının istenen şekilde düzenlenebilmesi için ek elek sistemlerine ve ikincil kırıcıya ihtiyaç duyulacaktır. Bu durumda kırma, eleme ve manyetik ayırıştırma biriminin başlangıç maliyeti 2,5 milyon TL olarak kabul edilmiştir. Cürufun birim satış fiyatının bulunabilmesi için başlangıç bedel, 0,00-TL olarak alınmıştır. İşleme maliyeti kırma, eleme ve manyetik ayırıştırma biriminin ilk yatırım maliyeti doğrultusunda arttırılmış ve 5,83-TL/ton alınmıştır. 6 aylık yaşlandırma için kullanılacak su maliyeti 6,27-TL/ton'dur. Bu durumda çelik üreticisinin elde ettiği kazanç ton başına 7,91-TL'dir (Şekil 5.57).



Şekil 5.57 : Cürufun yapay agrega olarak işlenmesi durumunda yıllara göre maliyet grafiği.

Hesaplanan ortalama birim fiyatlar arasındaki farktan çelikhane cürufunun yapay agrega olarak kullanımı durumunda birim fiyatının 1,27-TL olması gerekmektedir. Bu bedel üzerine % 15 kar payı eklendiğinde çelikhane cürufunun üreticiden teslim birim fiyatı 1,46-TL/ton olarak hesaplanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus, yaşlandırma işlemlerindeki tek maliyet kaleminin su olmasıdır. Dilovası Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Çolakoğlu Metalürji A. Ş.'nin şebeke suyunu kullandığı ve Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü birim fiyatlarına göre suyun m³ bedelinin 7,57-TL olduğu dikkate alınmıştır. Geri kazanım ya da artezyen suyu kullanımı ile cürufun birim fiyatının düşülmesi söz konusudur.

Çelikhane cürufunun ekonomik taşıma mesafesinin belirlenebilmesi için doğal agreganın taş ocağından teslim birim fiyatı 7,00-TL/ton, nakliye bedeli ise 0,25-TL/ton.km olarak kabul edilmiştir. İki agreganın da BHA'ları farklı olduğu için birim hacimde ihtiyaç duyulan ortalama malzeme miktarına göre çelikhane cürufunun nakliye bedeli 0,29-TL/ton.km olarak hesaplanmıştır. Bu durumda çelikhane cürufunun ekonomik taşıma mesafesi 138 km olarak hesaplanmıştır. Taşıma mesafesi-nakliye bedeli grafiği Şekil 5.58'de sunulmuştur.



Şekil 5.58 : Çelikhane cürufu ve doğal agrega taşıma mesafesi – nakliye bedeli grafiği.

Çelikhane cürufu ve doğal agreganın birim fiyatları doğrultusunda granüler ve bağlayıcı tabakaların imalat fiyatları hesaplanmıştır. Çelikhane cürufu ve doğal agreganın BHA'ları farklı olduğundan 1 m^3 'lük birim hacim üretim esas alınmıştır.

İmalat hesaplarında ilk olarak granüler tabakalar dikkate alınmıştır. Granüler tabakalara uygulanan mekanik deneylerde her iki malzeme için de modifiye sıkıştırma uygulandığından, bir başka deyişle her iki malzemeye de eşit enerji uygulandığından imalat da sıkıştırma enerjilerinin aynı olduğu kabul edilmiştir. Granüler tabakalarda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlıkların ortalamaları doğal agrega için $2,370 \text{ t/m}^3$, çelikhane cürufu için $2,825 \text{ t/m}^3$ 'tür. Sıkıştırma için gerekli su miktarları ise sırasıyla 90 lt/m^3 ve 132 lt/m^3 'tür. Bu durumda 1 m^3 imalat için gerekli olan malzeme ve su bedelleri, doğal agrega için 17,48-TL, çelikhane cürufu için 5,42-TL'dir.

Bağlayıcı tabakaların, bitüm miktarlarına ve Hamburg sıkıştırma cihazından elde edilen verilere göre üç grupta ele alınmasına karar verilmiştir. İlk grupta binder ve BT tabakaları beraber incelenmiştir. Çelikhane cürufu ile üretilen bu iki tabakada bağlayıcı oranı geleneksel karışımlara oranla fazladır. Bu nedenle ek sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyulmayacağı düşünülmektedir. İkinci grupta aşınma tabakaları ele alınmıştır. Bu tabakada çelikhane cürufu kullanımı durumunda ek sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca çelikhane cürufu ile imal edilen aşınma tabakasının performans ömrü doğal agrega karışımına oranla uzundur. Son grupta ise TMA tabakaları karşılaştırılmıştır. Bu tabakada çelikhane cürufu kullanımı durumunda ek

sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duyulmamaktadır. Ayrıca çelikhane cürufu ile imal edilen TMA tabakasının performans ömrü doğal agrega karışımına oranla uzundur.

Binder karışımlarında elde edilen pratik birim hacim ağırlıklar, doğal agrega için 2,534 t/m³, çelikhane cürufu için 2,996 t/m³'tür. Karışımların bağlayıcı oranları sırasıyla % 4,30 ve % 4,93'tür. Bu durumda 1 m³ imalat için gerekli agrega miktarları sırasıyla 2,430 ton ve 2,855 ton'dur. Gerekli bağlayıcı miktarları ise sırasıyla 105 kg ve 141 kg'dır. Söz konusu malzeme miktarlarından yola çıkılarak yapılan hesapta, 1 m³ binder tabakasının malzeme maliyeti doğal agrega için 140,28-TL, çelikhane cürufu için 169,70-TL'dir. Bu durumda iki seçenek ortaya çıkmaktadır. Çelikhane cürufunun yüksek stabilitesi nedeniyle ağır trafikli yollarda maliyet dikkate alınmadan kullanılabilir ya da çelikhane cürufu binder tabakasının kalınlığı, stabilitesi ile ters orantılı olarak azaltılabilir. İkinci seçenek dikkate alındığında; çelikhane cürufu binder briketinin stabilitesinin, doğal agrega briketine oranla % 57,3 fazla olduğu görülmektedir. Dolayısıyla çelikhane cürufu binder tabakasının kalınlığı % 22,5 oranında azaltılabilir. Bu durumda çelikhane cürufu binder tabakasının 1 m³ doğal agrega binder karışımına denk maliyeti 131,52-TL olmaktadır.

BT karışımlarında elde edilen pratik birim hacim ağırlıklar, doğal agrega için 2,532 t/m³, çelikhane cürufu için 2,966 t/m³'tür. Karışımların bağlayıcı oranları sırasıyla % 4,35 ve % 4,89'dur. Bu durumda 1 m³ imalat için gerekli agrega miktarları sırasıyla 2,426 ton ve 2,828 ton'dur. Gerekli bağlayıcı miktarları ise sırasıyla 105 kg ve 138 kg'dır. Söz konusu malzeme miktarlarından yola çıkılarak yapılan hesapta, 1 m³ BT tabakasının malzeme maliyeti doğal agrega için 140,25-TL, çelikhane cürufu için 166,14-TL'dir. Bu durumda iki seçenek ortaya çıkmaktadır. Çelikhane cürufunun yüksek stabilitesi nedeniyle ağır trafikli yollarda maliyet dikkate alınmadan kullanılabilir ya da çelikhane cürufu BT tabakasının kalınlığı, stabilitesi ile ters orantılı olarak azaltılabilir. İkinci seçenek dikkate alındığında; çelikhane cürufu BT briketinin stabilitesinin, doğal agrega briketine oranla % 60,5 fazla olduğu görülmektedir. Bu durum dikkate alınarak, çelikhane cürufu BT tabakasının kalınlığı % 24 oranında azaltılabilir. Bu durumda çelikhane cürufu BT tabakasının 1 m³ doğal agrega BT karışımına denk maliyeti 126,27-TL olmaktadır.

Aşınma karışımlarında elde edilen pratik birim hacim ağırlıklar, doğal agrega için 2,545 t/m³, çelikhane cürufu için 3,002 t/m³'tür. Karışımların bağlayıcı oranları sırasıyla % 4,92 ve % 5,05'tir. Bu durumda 1 m³ imalat için gerekli agrega miktarları

sırasıyla 2,426 ton ve 2,858 ton'dur. Gerekli bağlayıcı miktarları ise sırasıyla 119 kg ve 144 kg'dır. Söz konusu malzeme miktarlarından yola çıkılarak yapılan hesapta, 1 m³ aşınma tabakasının malzeme maliyeti doğal agregaya için 156,69-TL, çelikhane cürufu için 173,23-TL'dir. Fakat bu iki karışımın ihtiyaç duyduğu sıkıştırma enerjilerinin farklı olduğu Hamburg sıkıştırma cihazından elde edilen veriler ile netleştirilmiştir. Dolayısıyla serme ve sıkıştırma maliyeti de dikkate alınmıştır. 1 m³ BSK'nın serme ve sıkıştırma maliyeti 79,38-TL'dir. Çelikhane cürufu aşınma tabakası, % 44,86 oranında daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu orandan yola çıkılarak çelikhane cürufu aşınma tabakasının 1 m³'ünün serim ve sıkıştırma maliyeti 114,99-TL olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda malzeme, serme ve sıkıştırma maliyetleri, doğal agregaya aşınma tabakası için 236,07-TL, çelikhane cürufu aşınma tabakası için 288,22-TL'dir. Fakat çelikhane cürufu aşınma tabakasının performans ömrü, doğal agregaya aşınma tabakasına oranla yorulma açısından % 16,8, kalıcı deformasyon açısından % 35,1 oranında fazladır. Bu iki değerin ortalaması alınarak çelikhane cürufu aşınma tabakasının performans ömrünün, doğal agregaya oranla % 26 oranında uzun olduğu kabul edilmiştir. Performans ömrü dikkate alındığında, uzun vadede çelikhane cürufunun üretim birim maliyeti 128,19-TL, üretim + serim ve sıkıştırma maliyeti 213,28-TL olmaktadır.

TMA karışımlarında elde edilen pratik birim hacim ağırlıklar, doğal agregaya için 2,539 t/m³, çelikhane cürufu için 2,971 t/m³'tür. Karışımların bağlayıcı oranları sırasıyla % 5,83 ve % 5,64'tür. Bu durumda 1 m³ imalat için gerekli agregaya miktarları sırasıyla 2,399 ton ve 2,812 ton'dur. Gerekli bağlayıcı miktarları ise sırasıyla 140 kg ve 159 kg'dır. Karışımlarda ihtiyaç duyulan selülozik elyaf miktarı ise sırasıyla 7,6 kg ve 8,9 kg'dır. Söz konusu malzeme miktarlarından yola çıkılarak yapılan hesapta, 1 m³ TMA tabakasının malzeme maliyeti doğal agregaya için 192,32-TL, çelikhane cürufu için 203,85-TL'dir. İki karışımın ihtiyaç duyduğu sıkıştırma enerjileri eşdeğerdir. Çelikhane cürufu TMA tabakasının performans ömrü, doğal agregaya TMA tabakasına oranla yorulma açısından % 3, kalıcı deformasyon açısından % 35,1 oranında fazladır. Bu iki değerin ortalaması alınarak çelikhane cürufu aşınma tabakasının performans ömrünün, doğal agregaya oranla % 19 oranında uzun olduğu kabul edilmiştir. Performans ömrü dikkate alındığında, uzun vadede çelikhane cürufunun üretim birim maliyeti 165,12-TL olmaktadır.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Ülkemiz, dünyanın en büyük 8. çelik üreticisi konumundadır. Diğer büyük çelik üreticilerinden farklı olarak üretimin büyük bölümü EAO tesislerinde yapılmaktadır. EAO tesisleri ile çelik üretiminden, atıkların yanı sıra yan ürün kategorisindeki çelikhane cürufu ortaya çıkmaktadır. Yıllık hacmi 3 milyon ton olan bu malzeme, halen atık konumunda olup, bertaraf edilmektedir.

EAO çelikhane cürufunun hammadde olarak inşaat sektörüne kazandırılması, ülkemize büyük katma değer sağlayacaktır. Fakat çelikhane cürufunun karayolu inşaatında yapay agrega olarak kullanılabilmesi için güçlü ve zayıf yönlerinin netleştirilmesi gerekmektedir.

EAO çelikhane cürufunun güçlü yönleri; indirgenen çevresel etki, olumlu kimyasal bileşenler, üstün fiziksel özellikler, düşük maliyet, yüksek içsel sürtünme açısı ve yüksek performanstır. Zayıf yönleri ise; olumsuz çevresel etki, sorunlu kimyasal bileşenler, yetersiz fiziksel özellikler, genleşme potansiyeli ve rijitliktir.

Elde edilen sonuçlar ve sonuçlara ilişkin değerlendirmeler, yukarıda belirtilen güçlü ve zayıf yönler doğrultusunda ortak başlıklar altında bu bölümde sunulmuştur.

6.1 Çevresel Etki

Yapılan çevresel analizde; çelikhane cürufunun, nikel konsantrasyonu ve toplam çözünmüş madde bakımından durağan atık sınıfına giremediği belirlenmiştir. Fakat deneylere tabi tutulan malzeme yaşlandırılmamıştır. Uygun yaşlandırma işlemleri ile çözünmüş madde içinde yer alan serbest CaO ve MgO'nun hidrate olması ve Ca(OH)₂'nin bünyeden uzaklaşması sağlanabilmektedir. Buna ek olarak, yeterli yaşlandırma süresi ile çelikhane cürufunun yüzeyinde oluşacak CaCO₃ ve MgCO₃ tabakası, ağır metallerin dışarı verilme hızını yavaşlatacaktır. Fakat belirtilenlerin yanı sıra, cürufun yüksek miktarlarda kullanıldığı dolgu vb. uygulamalarda alkali yapısı nedeniyle yakındaki su kaynaklarının pH dengesini değiştirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) öngörüldüğü üzere; çelikhane cürufunun sakıncalı parametre konsantrasyonlarının, temel uygulamalar ile azaltılabildiği ya da kullanım şartlarının netleştirilmesi ile etkilerin indirgenebildiği ayrıca Çevresel Analiz bölümünde (Bölüm 5.3) yapılan analizler ve literatür incelemeleri doğrultusunda, gerekli koşulların yerine getirilmesi durumunda, çelikhane cürufunun yapay agrega olarak karayolu inşaatında kullanılmasının çevre ve insan sağlığı açısından herhangi bir risk teşkil etmediği belirlenmiştir.

Bunların yanı sıra EAO çelikhane cürufunun karayolu inşaatında kullanımı ile her yıl 3 milyon ton yapay agrega inşaat sektörüne dâhil edilecek ve bu sayede doğal kaynakların ve alanların tüketimi azaltılabilecektir. Diğer yandan cürufun bertarafı sırasında oluşacak çevresel etkiler de ortadan kaldırılacaktır.

6.2 Kimyasal Özellikler

Çelikhane cürufunun ana bileşenleri, farklı mineral fazlarda bulunabilen demir oksitler, CaO, SiO₂, MgO, MnO ve Al₂O₃'tür. Bu bileşenlerin çelikhane cürufunun kullanılabilirliği ve hatta kullanıldığı tabakaların performansı üzerinde olumlu ve olumsuz etkileri mevcuttur.

Çelikhane cürufunun yapay agrega olarak kullanılabilmesinde en büyük öneme sahip iki bileşen CaO ve MgO'dur. Temel kaynağı, çelik üretiminde kullanılan kireç ve dolomitik kireç gibi arıtkanlar olan CaO, serbest haldeyken su ile tepkimeye girerek hacim artışına neden olmaktadır. Kısa süreli genleşme olarak tanımlanan bu durum kısa yaşlandırma süreçleri ile çözülebilmektedir. Fakat uzun süreli genleşmeye neden olan serbest MgO'nun hidrasyon süreci ise yıllara yayılabilmektedir. Fakat Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) öngörüldüğü üzere, yaşlandırma sürecinin iyi bir şekilde organize edilmesi, küçük yığınların ve tanelerin tercih edilmesi gibi temel uygulamalarla, yaşlandırma süreci 3 aya kadar indirilebilmektedir. Çelikhane cürufunun yapay agrega olarak kullanılması için temel şart, CaO ve MgO bileşenlerinin, genleşme kabul edilebilir değerlerin altına düşene kadar, yaşlandırılmasıdır.

Taze cüruf bünyesindeki serbest CaO, dağılabilen tane oranını yükseltmektedir. Su etkisi ile hidrate olan bu bileşen, cürufun bünyesinden uzaklaşabilmekte ve dağılabilen tane oranının yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Yaşlandırma işlemleri ile bu

bileşen, büyük oranda cüruf bünyesinden uzaklaştırılabilmektedir. Fakat KTŞ 2013'te TMA limitlerinde belirtilen sıfır dağılabilen tane koşulu cürufta sağlanamayabilir. Bu noktada dağılabilen taneleri Ca(OH)_2 molekülleri oluşturmaktadır. Ca(OH)_2 soyulma önleyici katkı maddesi olarak BSK'larda kullanıldığından cürufta, KTŞ 2013'te belirtilen sıfır dağılabilen tane oranı şartı aranmayabilir.

Serbest CaO ve MgO'nun etkilediği bir diğer parametre de su absorpsiyonudur. Su absorpsiyonu deneyi sırasında su ile tepkimeye giren CaO ve MgO bileşenlerinin kütleleri artarak Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 'ye dönüşmektedirler. Deney esnasında bu bileşenlerin bünyeden uzaklaşmaması, tanelerin kütlesini arttıracak ve su absorpsiyonu değerinin normalden yüksek çıkmasına neden olacaktır. Bu sorunun tasarım parametrelerini etkilememesi için cürufun yaşlandırılması zorunludur.

Cüruf bünyesinde bulunan demir oksitler ve metalik demir, cürufun birim hacim ağırlığını etkileyen ana bileşenlerdir. Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) öngörüldüğü üzere, mekanik yöntemlerle cüruf içindeki metalik demir büyük oranda geri kazanılabilmekte ve çelik üreticisine katma değer sağlamaktadır. Bu sayede BHA da düşürülebilmektedir. Fakat çelik üretiminin doğası gereği, cüruf içinde bulunan demir oksitlerin uzaklaştırılması mümkün olmamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamına karşılaşılmamış olsa da cürufa ilişkin bir diğer sorun, düşük soyulma mukavemetidir. Soyulma mukavemetine cüruf içindeki Ca(OH)_2 ve metalik demir bileşenleri doğrudan etki etmektedir. Ca(OH)_2 soyulma mukavemetini arttırmakta, metalik demir ise oksidasyonun etkisi ile adezyonu düşürmekte ve soyulma mukavemetini azaltmaktadır. Yaşlandırma sırasında CaO, Ca(OH)_2 'ye dönüşmekte ve bu sayede soyulma mukavemeti artmaktadır. Metalik demir için iki çözüm söz konusudur. Bunlardan ilki ve en ekonomik olanı, metalik demirin ayrıştırılarak yeniden üretime katılmasıdır. İkincisi ise metalik demirin ayrıştırılmaması durumunda yaşlandırma ile demirin okside edilmesi ve metalik demirin olumsuz etkilerinin indirgenmesidir.

Çelikhane cürufunun cilalanma mukavemeti, doğal agregadan yüksektir. Bu durum, Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) öngörüldüğü üzere, cürufun pürüzlü yüzeyinden ve içeriğindeki SiO_2 'ten kaynaklanmaktadır. Bu malzemenin kaplama tabakalarında kullanımı ile sürtünme katsayısı daha yüksek dolayısıyla daha güvenli yolların inşaatına olanak sağlanacaktır.

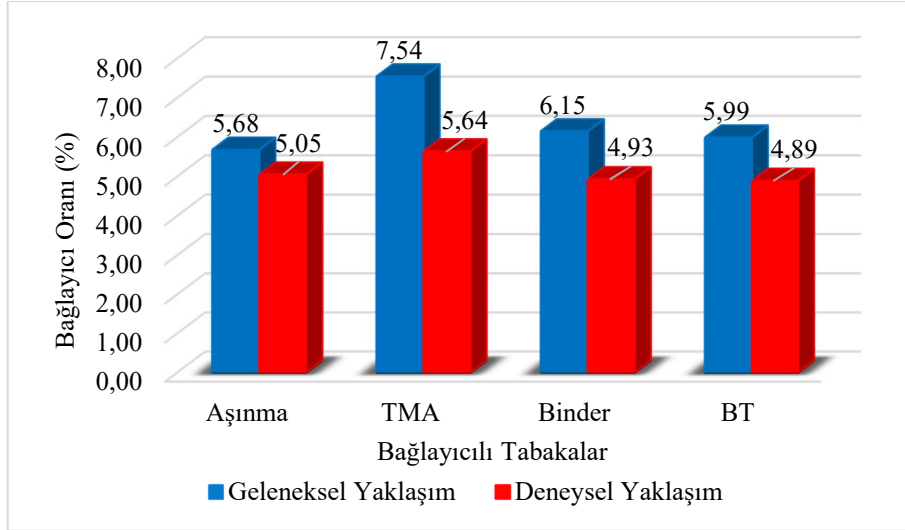
6.3 Fiziksel Özellikler

Fiziksel özellikler kapsamında dikkat çeken ilk konu çelikhane cürufunun yüksek birim hacim ağırlığı ve su absorpsiyonudur. Yüksek BHA, imalat için herhangi bir sorun teşkil etmese de üstyapı tabakaları için gerekli malzeme miktarını arttıracaktır. Bu da öncelikli olarak ekonomik taşıma mesafelerini kısaltacaktır. Fakat çelikhane cürufu, çelik üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür ve sadece işleme maliyeti mevcuttur. Bu doğrultuda Ekonomik Analiz bölümünde (Bölüm 5.10) belirtildiği üzere, cürufun düşük birim fiyatı, yüksek birim hacim ağırlığı nedeniyle kısalan ekonomik taşıma mesafesini dengelemektedir.

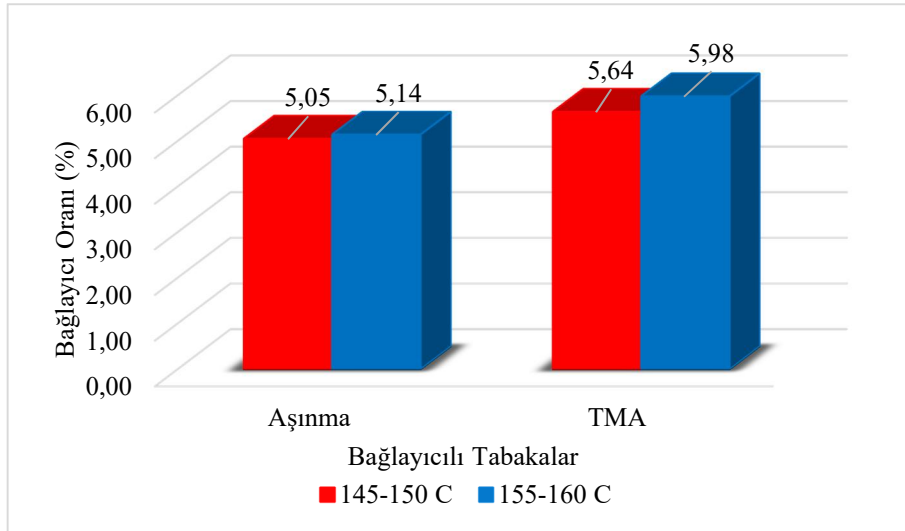
Çelikhane cürufunun, taşınabilmesi ve işlenebilmesi için soğutulması gerekmektedir. Bu işlem tesislere göre farklılıklar göstermekle birlikte ülkemizde genellikle su püskürtülerek ani soğutma yöntemi tercih edilmektedir. Su püskürtülerek soğutma sırasında, eriyik içinde gazlar hapsolmakta ve bu da gözenekli bir yapıya neden olmaktadır. Gözenekli yapı, cürufun su absorpsiyonunu, dolayısıyla da BSK'larda gerekli bağlayıcı miktarını arttırmaktadır.

Gözenekli yapı, yavaş veya kademeli soğutma yöntemleri ile büyük ölçüde ortadan kaldırılabilir. Fakat yavaş veya kademeli soğutma yöntemlerinin ilk yatırım maliyetleri yüksektir ve tesis içinde ek düzenlemeler gerektirmektedirler. Bu nedenle Ekonomik Kısıtlar bölümünde (Bölüm 1.4.3) belirtildiği üzere, çelik üreticilerine büyük bir mali yük getirmeden mevcut malzemenin minimum yatırımla kullanılması olanakları araştırılmıştır. Bu doğrultuda gözenekli yapı nedeniyle BSK'larda cürufun kullanımı durumunda artan bağlayıcı ihtiyacını azaltmak amacıyla deneysel yaklaşım ve karışım sıcaklığının düşürülmesi önerilmiştir. Deneysel ve geleneksel yaklaşım ile çelikhane cürufu karışımlarında elde edilen optimum bağlayıcı oranları Şekil 6.1'de sunulmuştur.

Şekil 6.1'de görüldüğü ve Hipotez bölümünde (Bölüm 5.1) varsayıldığı üzere, deneysel yaklaşım ile bağlayıcı oranlarında sırasıyla % 12, % 34, % 25 ve % 22 tasarruf sağlanmıştır. Gözenekli yapıya sahip bu tip yapay agregalarda, karışım tasarımlarının ölçülen teorik birim hacim ağırlıklar esas alınarak yapılması daha doğru ve uygun sonuçlar vermektedir. Karışım sıcaklığının düşürülmesinin optimum bağlayıcı oranlarına etkisi ise Şekil 6.2'de sunulmuştur.



Şekil 6.1 : Deneysel ve geleneksel yaklaşım ile çelikhane cürufu karışımlarında elde edilen optimum bağlayıcı oranları.



Şekil 6.2 : Karışım sıcaklığının düşürülmesinin optimum bağlayıcı oranlarına etkisi.

Etkisi, deneysel yaklaşıma oranla daha düşük olsa da Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) öngörüldüğü üzere, karışım sıcaklığının düşürülmesi de bağlayıcı tasarrufunu arttırmıştır.

Tanımlanan ve çözüm önerileri sunulan bu olumsuzlukların yanı sıra fiziksel özellikler bakımından cürufun pek çok olumlu tarafı mevcuttur ve hatta olumsuzluk olarak tanımlanan bazı parametreler, uygulamalarda doğal agregaya nazaran çok daha iyi sonuçlar alınmasını sağlamaktadır. Cürufun olumsuz bir özelliği olarak tanımlanan gözenekli yapısı, yüksek içsel sürtünme açısı yaratmakta, granüler ve bağlayıcı karışımların dayanımlarını büyük ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca gözenekli yapı, aşınma ve TMA tabakalarında yüksek sürtünme katsayısı sağlamaktadır.

Cürufun gözenekli bir yapıya sahip olmasına neden olan su püskürtme ile ani soğutma işlemi, tanelerin daha küresel ve kübik formda parçalanmalarını desteklemektedir. Bu durumda da çelikhane cürufunun yassılık indeksi, doğal agregalara oranla çok daha düşük olmaktadır. Düşük yassılık indeksi, cürufun pürüzlü ve gözenekli yüzeyi nedeniyle düşük olan işlenebilirliğini dengelemek yönünde çalışmaktadır.

6.4 Ekonomik Katkı

Ekonomik Analiz bölümünde (Bölüm 5.10) belirtildiği üzere; çelikhane cürufu, çelik üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür ve üretim maliyeti yoktur. Bunun yanı sıra karayolu inşaatı vb. uygulamalarda kullanılabilmesi için kırma, eleme, manyetik ayırıştırma ve yaşlandırma maliyetleri söz konusu olacaktır. Bu maliyetler dikkate alındığında, bu tez çalışması kapsamında değerlendirilen çelikhane cürufunun birim fiyatı 1,46-TL/ton olarak hesaplanmıştır. Doğal agreganın birim fiyatı 7,00-TL/ton olarak ele alındığında, Hipotez bölümünde (Bölüm 1.5) öngörüldüğü üzere, işleme maliyetleri dikkate alındığında dahi, çelikhane cürufunun maliyetinin doğal agregadan düşük olduğu ve yapay agrega olarak büyük bir rekabet gücüne sahip olduğu görülmektedir.

Çelikhane cürufunun granüler tabakalarda kullanımı ele alındığında, yüksek BHA'sına karşın, her durumda doğal agrega karışımlarından daha ekonomik olduğu Ekonomik Analiz bölümünde (Bölüm 5.10) görülmektedir. Kısa vadede, çelikhane cürufunun en ekonomik ve verimli kullanım alanı granüler tabaka uygulamaları olarak görülmektedir.

Çelikhane cürufunun uygulama maliyetlerini arttıran en önemli faktör, BSK'larda yüksek bağlayıcı miktarına ihtiyaç duymasıdır. Bu tez çalışması kapsamında uygun yaklaşımlar ile bağlayıcı oranlarının düşürülmesi sağlanmıştır. Fakat ağırlıkça agrega karışımına katılan bitüm, çelikhane cürufunun yüksek BHA'sı nedeniyle her zaman doğal agrega karışımlarından fazla olmaktadır. 1.174,00-TL/ton'luk birim fiyatı ile bağlayıcı miktarının artması, çelikhane cürufu karışımlarının malzeme maliyetlerini büyük ölçüde arttırmaktadır. Fakat çelikhane cürufu ile imal edilen karışımların performansları, doğal agrega karışımları ile kıyaslandığında, uzun vadede çelikhane cürufunun daha ekonomik olduğu görülmektedir. Kısa vadede çelikhane cürufu ile üretilen BSK'ların rekabet gücünü arttırmak için ise deneylerden elde edilen üstün performans sonuçları doğrultusunda tabaka kalınlıklarının inceltilmesi ele alınabilir.

Hesaplar ve değerlendirmeler doğrultusunda bu bölümde sunulan ekonomik etkilerin yanı sıra, elikhane cürufunun kullanımının bu tez çalışmasında ölçülemeyen ekonomik katkıları mevcuttur. Bunlardan ilki; yıllık hacmi 3 milyon ton olan bir yan ürünün ülke ekonomisine dâhil edilmesidir. Bu sayede yeni taş ocaklarının açılmasının önüne geçilebilecek, yeni taş ocakları ya da cüruf bertaraf tesisleri ile doğal alanların tahribatı azaltılabilecektir. Sürdürülebilirlik kapsamında doğal kaynakların korunumuna destek sağlanabilecektir.

6.5 Karışım Performansları

Granüler tabakalara ilişkin yapılan karışım tasarımlarında, elikhane cürufu karışımlarının optimum su muhtevalarının, yüksek SA değerleri doğrultusunda arttığı gözlemlenmiştir. Optimum su muhtevası ile sıkıştırılan karışımların taşıma oranlarının, Hipotez bölümünde (Bölüm 5.1) ngrldğ üzere, doğal agrega karışımlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, cürufun gözenekli ve pürüzlü yapısından kaynaklanan yüksek içsel sürtünme açısından ileri gelmektedir.

Yapılan BSK karışımlarında, elikhane cürufu karışımlarının bağlayıcı miktarlarının tüm tabakalar için doğal agregadan fazla olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde pratik birim hacim ağrılıklar da, cürufun yüksek birim hacim ağrılığı nedeniyle tüm tabakalarda doğal agrega karışımlarından yüksektir. Mineral agregalar arası boşluk, elikhane cürufunun gözenekli ve pürüzlü yapısı nedeniyle TMA tabakası hariç hiçbir karışımda KTş 2013 limitleri içine girememiştir. Bağlayıcı ile dolu boşluk oranı, elikhane cürufu karışımlarında sadece aşınma tabakasında KTş 2013 limitlerine girememiştir. Bu durum, ağrılıka katılan bağlayıcı oranından kaynaklanmaktadır. Akma değerleri, tüm karışımlarda KTş 2013 limitleri içerisinde yer almaktadır. elikhane cürufu karışımlarının stabilite değerleri, tüm tabakalarda doğal agrega karışımlarından yüksek ve KTş 2013 limitleri dâhilindedir.

elikhane cürufu bünyesinde bulunan ve genleşme potansiyeli olan CaO ve MgO bileşenleri nedeniyle Lottman Deneyi, ilk performans deneyi olarak dikkate alınmıştır. elikhane cürufu karışımları sonuçlarının, doğal agrega karışımlarından düşük fakat KTş 2013 limitleri dâhilinde olduğu belirlenmiştir.

İkinci performans deneyi olarak Tekerlek İzinde Oturma Deneyi dikkate alınmıştır. Doğal agrega ve elikhane cürufu aşınma ve TMA tabakalarına uygulanan bu deneyde,

elikhane cürufu karışımının aşınma ve TMA tabakasında kalıcı deformasyona karşı, Hipotez bölümünde (Bölüm 5.1) öngöröldüğü üzere, % 35,1 daha dirençli olduğu belirlenmiştir.

Üçüncü performans deneyi olarak Yorulma Ömrü Tayini Deneyi dikkate alınmıştır. Çelikhane cürufu karışımının akma sonuçlarında göstermiş oldukları eğilimden karışımın daha rijit dolayısıyla yorulma ömürlerinin daha kısa olması öngörölmüştür. Deneylerde, çelikhane cürufu karışımının eğilme rijitliğinin doğal agrega numunelerine oranla daha yüksek olduğu fakat yorulma ömürlerinin daha uzun olduğu belirlenmiştir. Çelikhane cürufu karışımının aşınma ve TMA tabakalarında yorulmaya karşı, sırasıyla % 16,8 ve % 3,0 daha dirençli olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen olumlu performans deneylerinden, çelikhane cürufu karışımında KTŞ 2013 limitleri içerisine giremeyen VMA ve VFA değeri lerinin, karışım performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığı kanaatine varılmıştır.

6.6 Genel Değerlendirme

Sonuç olarak, uluslararası literatürde durağan ve tehlikesiz yan ürün konumunda olan EAO çelikhane cürufunun, kullanım yolunun açılması ile her yıl 3 milyon ton ucuz ve kaliteli agrega ülke ekonomisine kazandırılabilir olacaktır.

Bu sayede doğal agregaya olan ihtiyaç belli oranda azaltılabilir olacaktır. Hammadde olarak bu yapay agreganın kullanılması ile doğal agrega üretimi sırasında meydana gelen, doğal alanların tahribi, tozlaşma, gürültü ve görüntü kirliliği gibi olumsuz çevresel etkiler azaltılabilir olacaktır. Çelik üreticileri tarafından kurulan cüruf bertaraf tesislerinin de benzer etkileri indirgenebilir olacaktır.

Hammadde tüketiminin azaltılması ile sürdürülebilirlik desteklenecek, bir endüstri kolunun yan ürünü başka bir sektörün hammaddesi konumuna gelecektir. Bunların yanı sıra çelikhane cürufunun karayolu inşaatında kullanılabilmesi için metalik demirin geri kazanımı desteklenmiş olacaktır.

Çelik üreticilerinin cüruf bertaraf maliyetleri azaltılabilir olacak, geri kazanılan metalik demir ile çelikhane cürufunun işlenmesi için gerekli maliyet kalemleri amorti edilebilir olacaktır.

Elde edilen üstün performans özellikleri dikkate alındığında, daha dayanıklı, performans ömrü daha uzun ve sürtünme katsayısı açısından daha güvenli yolların inşaatına olanak tanınmış olacaktır.

Bu çalışma kapsamında, genel literatür ve uygulamalardan farklı olarak, EAO çelikhane cürufunun % 100 oranında karayolu esnek üstyapı tabakalarında, optimum maliyetler ve ülkemizde uygulanabilir yaklaşımlar dikkate alınarak kullanım olanakları irdelenmiştir. Yol gösterici ve bu çalışmada elde edilen sonuçların ileride uygulanabilir olması açısından KTŞ 2013 limitleri esas alınmıştır. Çelikhane cürufu ile üretilen BSK'larda ekonomi ön plana alınarak, gerekli bağlayıcı oranlarının düşürülmesi sağlanmıştır. Tüm bu yaklaşımlar doğrultusunda çelikhane cürufunun yapay agrega olarak kullanılabilmesi için öneriler ve koşullar sunulmuştur.

6.7 Öneriler

Çelikhane cürufları ve benzer yan ürünlerin çevresel etkilerine ilişkin geniş bir çalışma yapılarak, ulusal yapay agrega mevzuatının oluşturulması, ülkemize ekonomik ve ekolojik açıdan katma değer sağlayacaktır.

Çelikhane cürufunun dolgu uygulamalarında kullanılmasına ilişkin çalışmalar, stok sahasında hâlihazırda bekleyen malzemenin kullanımı için iyi bir alternatif oluşturacaktır. Fakat bu durumda dolguların uygulama alanı ve hacmine göre cürufun alkali yapısının, çevredeki su kaynakları üzerine etkisi derinlemesine araştırılmalıdır.

Çelikhane cüruflarının mevcut fiziksel ve kimyasal özelliklerinin (gözenekli yapı, serbest CaO ve MgO içeriği) düzenlenebilmesi için ekonomik işleme ve yaşlandırma yöntemlerinin incelenmesi ve uygulanması önerilmektedir. Bu kapsamda elde edilecek kazanımlar, çelikhane cürufunun ekonomik ve teknik açıdan kullanılabilirliğini arttıracaktır.

Cürufun yaşlandırılması için arıtma tesislerinden temin edilen geri kazanım suyunun kullanılması ile ilgili araştırmaların yapılması önerilmektedir. Geri kazanım suyunun yaşlandırma için kullanılması, cüruf işleme maliyetlerini ve kaynak tüketimini azaltacak, sürdürülebilirliğe ek bir boyut kazandıracaktır.

Çelikhane cürufunun yapay agrega olarak kullanılabilmesi için KTŞ 2013'e Agregaların Hidratasyondan Potansiyel Genleşmesi Deneyi'nin eklenmesi önerilmektedir. ASTM D4792 ya da EN 1744-1:1998 standardı uyarınca yapılacak

deneylerin, cürufun genleşme potansiyelinin tespiti açısından yeterli olacağı düşünülmektedir.

Ülkemizde hâlihazırda stok sahalarında bekleyen çelikhane cürufunun olası en yoğun ve en kolay kullanım alanı granüler tabakalardır. Çelikhane cürufunun granüler tabakalarda kullanılabilmesi için farklı tesislerden alınan numunelerin su absorpsiyonu değerlerinin araştırılması, taşıma oranlarının belirlenmesi ve üstyapı projelendirme rehberinde yer alabilmeleri için esneklik modüllerinin incelenmesi uygun olacaktır.

BSK tasarımları kapsamında KTŞ 2013'te yapılacak olası düzenlemeler için daha fazla numune ile tasarım yapılması ve bu doğrultuda VMA ve VFA limitlerinin çelikhane cürufu özelinde değiştirilmesi uygun olacaktır.

Düşük penetrasyonlu bitümler ile karışım tasarımlarının yapılmasının, bağlayıcı oranının düşürülmesi konusunda yeni yaklaşımlar sunacağı düşünülmektedir. Fakat yapılacak bu karışımların özellikle yorulma ömrü üzerindeki etkileri araştırılmalıdır.

Bu çalışmada bağlayıcılı tabakalarda elde edilen yüksek stabilite değerlerinden yola çıkılarak çelikhane cürufu için minimum tabaka kalınlıklarının değiştirilmesi söz konusu olabilir. Bu düzenleme için bağlayıcılı tabakaların esneklik modüllerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca tabaka kalınlıklarının azaltılması durumunda maksimum tane boyutunun da değiştirilmesi gerekecektir. Bu durumda, daha az gözenekli olan ince tanelerin etkisi ile bağlayıcı oranlarının daha da düşürülmesinin mümkün olacağı düşünülmektedir.

Çelikhane cürufu ile üretilen bağlayıcılı tabakaların eğilme rijitlikleri ve yorulma ömürleri arasındaki doğru orantı nedeniyle bu konuda daha fazla çalışma yapılması ve davranış biçiminin netleştirilmesi uygun olacaktır.

Çelikhane cürufunun kullanımı, özen ve dikkat gerektiren bir iştir. Bu doğrultuda idareye, üreticiye ve yükleniciye yeni sorumluluklar getirmektedir. Herhangi bir hataya mahal vermemek açısından, gerekli araştırmaların yapılabileceği bağımsız bir merkezin kurulması tavsiye edilebilir

KAYNAKLAR

- [1] **Sanayi devrimi nasıl başladı?** Erişim: 14 Haziran 2016, <http://ahmetsaltik.net>
- [2] **Karalar, R.** (2011). Çevresel Sorunlara Karşı bir Çözüm Önerisi Olarak Sürdürülebilir Tüketim Düşüncesi, *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 30, 63-76.
- [3] **Paavola, J.** (2001). Towards Sustainable Consumption: Economics and Ethical Concerns for the Environment in Consumer Choices, *Review of Social Economy*, Vol. 59, No. 2.
- [4] **Seyfang, G.** (2006). Consuming Values and Contested Cultures: A Critical Analysis of the UK Strategy for Sustainable Consumption and Production, *Review of Social Economy*, Vol. 62, No. 3.
- [5] **Hertwich, E.** (2002). Life-Cycle Approaches to Sustainable Consumption, *Workshop Proceedings Interim Report, International Institute for Applied Systems Analysis*, Laxenburg, Austria.
- [6] **Frosch R. and Gallopoulos N.** (1989). Strategies for Manufacturing, *Scientific American*, 261, 144–154.
- [7] **Laybourn, P.** (2011). Industrial Symbiosis: Iskenderun Bay Area. *Presentation in the Launching Event of Industrial Symbiosis Project in Iskenderun Bay*. British Embassy, Ankara, 5th May 2011.
- [8] **TMMOB** (2011) 6. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu Sonuç Bildirgesi*, Maden Müh. Odası, Sivas, 7 Ekim 2011.
- [9] **Sönmez, İ.** (2013). Asfaltta geri dönüşüm ve geri dönüşüm sistemleri-I. *Yol Teknolojileri*, 21, 94-96.
- [10] **Özorhon, B.** (2012). Türk İnşaat Sektörünün Dünyadaki Yeri, *İstanbul Ticaret Odası Yayınları*, Yayın No 2012-31.
- [11] **Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği.** (2011) *Türkiye İnşaat Malzemeleri Sektör Görünüm Raporu*, Deolitte Türkiye.
- [12] **İMSAD** (2016). *Aylık Sektör Raporu Ocak 2016*.
- [13] **AGÜB** (2015). *Agrega Sektörü ve AGÜB*, Trakya Sektör Toplantısı, 11 Mayıs 2015, Çorlu.
- [14] **Yılmaz, A.** (2008). *Ferrokrom ve Silikoferrokrom Cürufları ile Silis Dumanının Yol Üstyapısında Kullanımının İncelenmesi*, Doktora Tezi.
- [15] **NSA.** (1998). *Steelmaking Slag: A Safe and Valuable Product*, Washington: The Steel Slag Coalition-National Slag Association.
- [16] **Okyay, Ö. ve Akkaya, Y.** Yüksek Dayanım ve Yüksek Performanslı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı.

- [17] **Euroslag** (2012). *Position Paper on the Status of Ferrous Slag*, Waste Framework Directive.
- [18] **TechnoBee Ltd. Şti.** (2012). *EAF ile Çelik Üretiminde Oluşan Cürüfların Değerlendirilme Olanakları, Ülkemizde ve Dünyada Mevcut Durumun Analizi*.
- [19] **T. C. Karayolları Genel Müdürlüğü** (2013). *Karayolları Teknik Şartnamesi*.
- [20] **Kaya, A. O.** (2014) *Esnek Üstyapıların Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregâ Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, YL Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [21] **Huang, Y., Bird, R. N., Heidrich, O.** (2007). A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavement, *Science Direct, Resources, Conservation and Recycling*, 52, 58-73.
- [22] **Sorlini, S., Sanzeni, A., Rondi, L.** (2012). Reuse of Steel Slag in Bituminous Paving Mixtures, *Journal of Hazardous Materials*, 209-210, 84-91.
- [23] **Yıldırım, I. Z., Prezzi, M.** (2011). Chemical, Mineralogical and Morphological Properties of Steel Slag, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2011, Article ID: 463638.
- [24] **Pasetto, M., Baldo, N.,** (2010). Experimental Evaluation of High Performance Base Course and Road Base Asphalt Concrete with Electric Arc Furnace Steel Slags, *Journal of Hazardous Materials*, 181, 938-948.
- [25] **Sofilic, T., Mledanovic, A., Sofilic, U.,** (2010). Characterization of the EAF Steel Slag as Aggregate for Use in Road Construction, *Chemical Engineering Transactions*, Volum 19.
- [26] **Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y.,** (2007). Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt Mixtures, *Science Direct, Building and Environment*, 42, 250-2585.
- [27] **Pasetto, M., Baldo, N.,** (2011). Mix Design and Performance Analysis of Asphalt Concretes with Electric Arc Furnace Slag, *Construction and Building Materials*, 25, 3458-3468.
- [28] **Abut, Y.** (2013). Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği, 6. *Ulusal Asfalt Sempozyumu*, Ankara, 27-28 Kasım.
- [29] **Kök, B. V., Yılmaz, M., Yılmaz, M.** (2009). Sivas Divriği Çelik Cürufunun Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliği, *C. Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi, Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 30, Sayı 1.
- [30] **Pasetto, M., Baldo, N.** (2011). Performance Comparative Analysis of Stone Mastic Asphalt with Electric Arc Furnace Steel Slag: a Laboratory Evaluation, *Materials and Structures*, 45, 411-424.
- [31] **Kehagia, F.** (2009). Skid Resistance Performance of Asphalt Wearing Courses with Electric Arc Furnace Slag Aggregates, *Waste Management & Research*, 27, 288-294.
- [32] **Sofilic, T., Mledanovic, A., Sofilic, U.,** (2009). Defining of EAF Steel Slag Application Possibilities in Asphalt Mixture Production, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 19(2), 148-157.

- [33] **Liapiz, I, Likoydis, S.** (2012). Use of Electric Arc Furnace Slag in Thin Skid-Resistant Surfacing, *Social and Behavioral Science*, 48, 907-918.
- [34] **Aiban, S. A.** (2006). Utilization of Steel Slag Aggregate for Road Bases, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.34, No 1, Paper ID: JTE 12683.
- [35] **Ali, N. A., Chan, J. S. S., Papagiannakis, T., Theriault, E. G., Bergan, A. T.** (1992). The Use of Steel Slag in Asphaltic Concrete, *ASTM International*.
- [36] **Sofilic, T., Rastovcan-Mioc, A., Cosic, M., Merle, V., Mioc, B., Sofilic, U.** (2010). EAF Steel Slag Application Possibilities in Croatian Asphalt Mixture Production, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 19.
- [37] **Mutlugeldi, C.** (2015). *Elektrik Ark Fırını Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Bitümlü Temel Tabakasında Agregası Olarak Değerlendirilmesi*, YL Tezi, İTÜ:
- [38] **Özügurlu, B.** (2015). *Karayolu Esnek Üstyapı Binder Tabakasında Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Yapay Agregası Olarak Kullanımının İncelenmesi*, YL Tezi, İTÜ.
- [39] **Washington State DOT** (2015). *WSDOT Strategies Regarding Use of Steel Slag Aggregate in Pavements*, Construction Division Pavement Office.
- [40] **Rohde, L., Nunez, W.P., and Ceratti, J.A.P.** (2003). "Electric arc furnace steel slagbase material for low-volume roads." Transportation Research Record 1819, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 201-207.
- [41] **Bagampadde, U., Wahhab, H.I.A., and Aiban, S.A.** (1999). "Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia." *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 11, No. 1, pp. 30-35.
- [42] **Alataş, T., Somunkıran, E. T., Ahmedzade, P.** (2006). Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agregası Olarak Kullanılması, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der.i* 18 (2), 225-234.
- [43] **Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., and Chen, Y.** (2007). Utilization of steel slag aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *Building and Environment*, Vol.42, No.7, pp. 2580-2585.
- [44] **Yitik, H.** (2006). *İnce Tanelerdeki Kil İçeriğinin Metilen Mavisi Deneyi ile Belirlenmesi*, Osmangazi Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- [45] **Özbebek, H., Açıık, H.** (2011). İnce Agregalarda Yapılan Metilen Mavisi ve Kum Eşdeğerliği Deney Sonuçlarının Beton Özelliklerine ve Maliyetine Etkisi, *Hazır Beton Dergisi*, Eylül-Ekim 2012, 84-92.
- [46] **Özaydın, K.** (2005) *Zemin Mekaniği*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [47] **ASTM** (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*, (ASTM D1557-12e1).
- [48] **ASTM** (2013) *Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions*, (ASTM D4792 / D4792M-13).

- [49] **National Cooperative Highway Research Program.** (2011). A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary, Advanced Asphalt Technologies, LLC Sterling, VA
- [50] **Theoretical Maximum Specific Gravity**, Erişim: 06.07.2016,
<http://www.pavementinteractive.org/article/theoretical-maximum-specific-gravity/>
- [51] **ASTM** (2011). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures* (ASTM D2041 / D2041M-11).
- [52] **ASTM** (2014). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*, (ASTM D4867 / D4867M-09).
- [53] **Kandhal, P. S., Cooley, L. A.** (2003). *Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavment Analyzer*, NCHRP Report 508.
- [54] **Fatigue Cracking**, Erişim 11.11.2016,
<http://www.pavementinteractive.org/article/fatigue-cracking/>
- [55] **Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik** (2010). T. C. Resmi Gazete, Sayı 27533, Tarih 26.03.2010.
- [56] **TSE** (2009) *İnşaat mühendisliği işleri ve yol yapımında kullanılan bağlayıcısız ve hidrolik bağlayıcılı malzemeler için agregalar*, (TSE 13242+A1).
- [57] **Exponent.** (2007). *Human Health and Ecological Risk Assessment for the Environmental Applications of Steel-Making Slag: An Update. Prepared for Steel Slag Coalition* Kelley Drye Collier Shannon 1050 K Street, NW Suite 400 Washington, DC 20007-5108. Prepared by Exponent 320 Goddard, Suite 200 Irvine, California 92618 August 2007.
- [58] **Fronek, B. A.** (2011). *Feasability of Expanding the Use of Steel Slag as a Concrete Pavement Aggregate*, MSci Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Cleveland State University, USA.
- [59] **Motz H., Geiseler J.** (2001). Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural Resources. *Waste Management*, 21, 285-293.
- [60] **Yıldırım, İ. Z., Prezzi, M.** (2009). *Use of Steel Slag in Subgrade Applications, Joint Transportation Research Program*, FHWA/IN/JTRP-2009/32, Final Report.
- [61] **Altun, I. A., Yilmaz, I.** (2002). Study on steel furnace slags with MgO additive in Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No.8, pp. 1247-1249.
- [62] **Chaurand, P., Rose, J., Briois, V., Olivi, L., Hazemann, J., Proux, O., Domas, J., and Bottero, J.** (2007). Environmental impacts of steel slag reused in road construction: a crystallographic and molecular (XANES) approach, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 139, No.3, pp. 537-542.
- [63] **Das, B., Prakash, S., Reddy, P.S.R., and Misra, V.N.** (2007). An overview of utilization of slag and sludge from steel industries, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 50, No. 1, pp.40-57.

- [64] **Emery, J.J.** (1974). *A simple test procedure for evaluating the potential expansion of steel slag*, Proc. of the 1974 Annual Conference, Roads and Transportation Association of Canada, Toronto, Ont., pp.90-103.
- [65] **Juckes, L.M.** (2003). The volume stability of modern steelmaking slags, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, Vol.112, No.3, pp.177-197.
- [66] **Kneller, A.W., Gupta, J., Borkowski, L.M., and Dollimore, D.** (1994). Determination of original free lime content of weathered iron and steel slag by thermogravimetric analysis, *Transportation Research Record 1434*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 17-22.
- [67] **Erlin, B., Jana, D.** (2003). Forces of hydration that can cause havoc in concrete, *American Concrete Institute*, Volume: 25, Issue Number: 11, ISSN: 0162-4075, 51-57.
- [68] **Gao, P. W., Wu, S. X., Lu, X. L., Deng, M., Lin, P. H., Wu, Z. R.** (2007). Soundness Evaluation of Concrete with MgO, *Construction and Building Materials*, 21, 132-138.
- [69] **Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A.** (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Construction and Building Materials*, 21(2), 328-337.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Fatih YONAR
Doğum Tarihi ve Yeri : 29.05.1981 - İstanbul
E-posta : yonarfatih@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2004, YTÜ, İnşaat Müh.
- **Yükseklisans** : 2007, İTÜ, İnşaat Müh., Ulaştırma Müh.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Aydınlık İnşaat, Türkiye, Çanakkale, Beton Grubu Şefi 2005-2006
- Selçuk Üniversitesi, Türkiye, Konya, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi, 2006-2007
- İstanbul Metropolitan Planlama, Türkiye, İstanbul, Ulaşım Planlama Bölümü, 2007-2008
- Bahçeşehir Üniversitesi, Türkiye, İstanbul, UYGAR Merkezi, İdari Asistan, 2008-2009
- İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, İstanbul, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Araştırma Görevlisi, 2009-2013
- TechnoBee Ltd. Şti., Türkiye, İstanbul, Ar-Ge Projeleri, Ar-Ge Mühendisi, 2013-

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yonar, F.**, Ergün, M., Dikbaş, H. A. (2016). *Utilization of EAF Slag as an Artificial Aggregate in Unbound Granular Layers of Highways*, Sigma Journal of Engineering, Sigma Journal of Engineering & National Sciences, 34 (3), 365-376.
- **Yonar, F.**, Dikbaş, H. A., Sağlık, A., Hacıosmanoğlu, N., Dok, F. (2015). EAO Cürufunun Karayolu Üstyapısında Kullanımının Araştırılması; Türkiye Örneği,

1st Europe and Central Asia Regional Congress and Exhibition, Istanbul, Turkey, 15-18 September.

- **Yonar, F.,** Cokgor, E. U., Dikbas, H. A., Demir, B., Ergun, M. (2015). Environmental Effects and Possible Highway Applications of Electric Arc Furnace Slag in Turkey, World Congress on New Technologies, Barcelona, Spain 15–17 July, Paper no. 228.
- **Yonar, F.** (2015). Utilization of EAF Slag in Highway Construction and Possible Environmental Outcomes in Turkey, Transportation Research Board, Sustainability in a Time of Resource Scarcity Workshop, Abstract, Los Angeles, USA, 7-10 June.