

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZİK OKSİJEN FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK
ÜSTYAPILARDA ALT TEMEL VE TEMEL TABAKALARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hikmet ERGİN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

EYLÜL 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAZİK OKSİJEN FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK
ÜSTYAPILARDA ALT TEMEL VE TEMEL TABAKALARINDA
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hikmet ERGİN
(501111413)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM

EYLÜL 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111413 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hikmet ERGİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BAZİK OKSİJEN FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK ÜSTYAPILARDA ALT TEMEL VE TEMEL TABAKALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Hasan YILDIRIM**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Halit ÖZEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **11.09.2017**
Savunma Tarihi : **03.10.2017**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışmam sırasındaki desteği , bilgi ve tecrübesi, kaynaklara olan hakimiyeti, yol göstericiliği, motive ediciliği ile tezimin her aşamasındaki yardımları için değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Şükriye İYİNAM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte ve daha önceki eğitim hayatım boyunca enerjisi ve desteğini hiç bir zaman üzerimden esirgemeyen, meslek hayatımın her aşamasında örnek alabileceğim tecrübelerini aktaran Sayın Öğr. Gör. Dr. A. Faik İYİNAM'a teşekkürlerimi sunarım.

Değerli Hocalarımdan yanı sıra, tez konumu belirlememde ve bu süreci yönetmemde, malzeme temininde, yaptığı araştırmalar ve çalışmalar ile her zaman yanımda olan Sayın Dr. İnşaat Mühendisi Fatih YONAR'a , Laboratuvar deneylerim sırasında her türlü tecrübesini ve emeğini esirgemeyen Sayın Murat ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Meslek hayatımın başlangıcından bugüne, bıktırıcı sorularıma rağmen benden hiç sıkılmayan, tecrübelerini ve yol göstericiliğini hiçbir zaman hiçbir konuda benden esirgemeyen, iş yaşamında bilgi ve becerisinden feyz aldığım ilk şefim Sayın Mimar Mehmet ZENGİN'e sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tezim ile ilgilenmemi sağlayan, bu süreçte yardımlarını esirgemeyen, mesleki olarak bana her zaman destek ve örnek olan, İtü ailemizden, Teknik Koordinatörüm Sayın İnşaat Mühendisi Hasan HACIHASANOĞLU'na, her konuda desteklerini üzerimden eksik etmeyen ve ailemden uzakta olmamı hissetmememi sağlayan Sayın Elektrik Koordinatörüm Elektrik Mühendisi ŞAKİR YILMAZ'a, Sayın Mekanik Koordinatörüm Makina Mühendisi Murat KUTLU'ya, Sayın İnşaat Koordinatörüm İnşaat Mühendisi Ahmet Akif EMEKSİZ'e saygı ve sevgilerimi sunarım.

Tezimle ilgili her zaman motive edici yaklaşan, sonuca ulaşmama çok büyük katkıları olan, ve örnek olan Sayın İnşaat Yüksek Mühendisi Hasan ALİYAZICIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin ve hayatımın her sürecinde yanımda olan, dostum İnşaat Mühendisi Levent KESER'e ve son olarak yol arkadaşım Mimar Çağla SOYSAL'a sevgilerimi sunarım.

Eylül 2017

Hikmet ERGİN
(İnşaat Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. KARAYOLU İNŞAATI ALTYAPI VE ÜSTYAPI TABAKALARI	5
2.1 Karayolu Altyapısı	5
2.2 Karayolu Üstyapısı	6
2.2.1 Alt temel tabakası.....	6
2.2.2 Temel tabakası	8
2.2.2.1 Granüler temel tabakası	8
2.2.2.2 Plent miks temel tabakası.....	9
2.2.2.3 Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası.....	10
2.2.3 Kaplama tabakası	11
2.2.3.1 Rijit kaplama tabakası	12
2.2.3.2 Esnek kaplama tabakası	12
3. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ	13
3.1 Demir Çelik Sektörü.....	13
3.2 Demir Çelik Üretimi.....	14
3.2.1 Yüksek fırınlar	16
3.2.2 Elektrik ark fırını.....	17
3.2.3 Bazik oksijen fırını.....	17
4. CÜRUF OLUŞUMU, ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI.....	19
4.1 Yüksek Fırın Cürufu.....	19
4.2 Çelikhane Cürufları	19
4.2.1 Elektrik ark fırını cürufu	20
4.2.2 Bazik oksijen fırını cürufu	20
4.3 Cürufların Kullanım Alanları	21
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
5.1 Karayolları Teknik Şartnamesi(2013)ne göre Alt Temel Tabakasının Özellikleri	23
5.1.1 Alt temel tabakasının malzeme özellikleri.....	23
5.1.2 Alt temel tabakasının yapım şartları	25
5.2 Karayolları Teknik Şartnamesi(2013)ne göre Temel Tabakasının Özellikleri	29
5.2.1 Granüler temel tabakasının malzeme özellikleri	31
5.2.2 Granüler temel tabakasının yapım şartları	32
5.2.3 Plent-miks temel tabakasının malzeme özellikleri.....	36

5.2.4 Plent-miks temel tabakasının yapım şartları	36
5.3 Uygulanan Deneyler	42
5.3.1 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi	42
5.3.2 (Los Angeles) aşınma deneyi	43
5.3.3 Yassılık indeksi deneyi.....	45
5.3.4 Su emme deneyi	46
5.3.5 Likit limit ve plastik limit deneyi.....	48
5.3.6 Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi.....	49
5.3.7 Organik madde deneyi(%3 NaOH ile)	51
5.3.8 Metilen mavisi deneyi	52
5.3.9 Modifiye proktor deneyi	53
5.3.10 CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyi	55
5.4 Deneyisel Bulgular	57
5.4.1 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi sonuçları.....	57
5.4.2 (Los Angeles) aşınma deneyi sonuçları	58
5.4.3 Yassılık indeksi deneyi sonuçları	59
5.4.4 Su emme deneyi sonuçları.....	59
5.4.5 Likit limit ve plastik limit deneyi sonuçları	60
5.4.6 Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi sonuçları	60
5.4.7 Organik madde deneyi sonuçları.....	61
5.4.8 Metilen mavisi deneyi sonuçları	62
5.4.9 Modifiye proktor deneyi sonuçları	62
5.4.10 CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyi sonuçları.....	72
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	89

KISALTMALAR

BOF : Bazik Oksijen Fırını
ÇBGT : Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel
GT : Granüler Temel
KBHA : Kuru Birim Hacim Ağırlık
KTŞ : Karayolları Teknik Şartnamesi
PMT : Plent Miks Temel
YF : Yüksek Fırın





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Alt temel malzemesi gradasyon limitleri	7
Çizelge 2.2 : Granüler temel tabakası gradasyon limitleri	9
Çizelge 2.3 : Plent-miks temel tabakasının gradasyon limitleri.	10
Çizelge 2.4 : ÇBGT tabakasının gradasyon limitleri.	10
Çizelge 5.1 : Numune tane boylarına karşılık gelen elek boyutları.	50
Çizelge 5.2 : Hava tesirlerine karşı dayanıklılık sonuçları ve KTŞ limit değerleri..	58
Çizelge 5.3 : Los Angeles deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri.	59
Çizelge 5.4 : Yasılık indeksi deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri.	59
Çizelge 5.5 : Kaba ve ince cürufun özgül ağırlık sonuçları.	59
Çizelge 5.6 : Kaba ve ince cürufun özgül ağırlık sonuçları ve KTŞ limit değerleri.	60
Çizelge 5.7 : Numune plastisite indeksi ve KTŞ limit değerleri.	60
Çizelge 5.8 : Dağılabilen tane oranı deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri.	61
Çizelge 5.9 : Organik madde içeriği deneyi sonuçları ve KTŞ limit değerleri.	61
Çizelge 5.10 : Metilen mavisi deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri.	62
Çizelge 5.11 : Alt temel Tip B alt limit granülometri değerleri.	63
Çizelge 5.12 : Alt temel Tip B alt limit su muhtevası- KBHA değerleri	63
Çizelge 5.13 : Alt temel Tip B üst limit granülometri değerleri.	64
Çizelge 5.14 : Alt temel Tip B üst limit su muhtevası- KBHA değerleri.	64
Çizelge 5.15 : Alt temel Tip B ortalama granülometri değerleri.	65
Çizelge 5.16 : Alt temel Tip B ortalama su muhtevası- KBHA değerleri.	65
Çizelge 5.17 : Temel Tip A alt limit granülometri değerleri.	66
Çizelge 5.18 : Temel Tip A alt limit su muhtevası- KBHA değerleri.	66
Çizelge 5.19 : Temel Tip A üst limit granülometri değerleri	67
Çizelge 5.20 : Temel Tip A üst limit su muhtevası- KBHA değerleri.	67
Çizelge 5.21 : Temel Tip A ortalama granülometri değerleri	68
Çizelge 5.22 : Temel Tip A ortalama su muhtevası- KBHA değerleri.	68
Çizelge 5.23 : PMT 1 alt limit granülometri değerleri.	69
Çizelge 5.24 : PMT 1 alt limit su muhtevası- KBHA değerleri.	69
Çizelge 5.25 : PMT 1 üst limit granülometri değerleri.	70
Çizelge 5.26 : PMT 1 üst limit su muhtevası- KBHA değerleri.	70
Çizelge 5.27 : PMT 1 ortalama granülometri değerleri.	71
Çizelge 5.28 : PMT 1 ortalama su muhtevası- KBHA değerleri.	71
Çizelge 5.29 : Yapılan bütün deneylerin optimum su muhtevası ve KBHA değerleri.	71
Çizelge 5.30 : Alt temel tip B alt limit granülometrisi CBR verileri.	72
Çizelge 5.31 : Alt temel tip B üst limit granülometrisi CBR verileri.	73
Çizelge 5.32 : Alt temel tip B ortalama tasarım granülometrisi CBR verileri.	74
Çizelge 5.33 : Temel tip A alt limit granülometrisi CBR verileri	75
Çizelge 5.34 : Temel tip A üst limit granülometrisi CBR verileri.	76

Çizelge 5.35 : Temel tip A ortalama tasarım granülometrisi CBR verileri.	77
Çizelge 5.36 : PMT 1 alt limit granülometrisi CBR verileri	78
Çizelge 5.37 : PMT 1 üst limit granülometrisi CBR verileri.....	79
Çizelge 5.38 : PMT 1 ortalama tasarım granülometrisi CBR verileri	80
Çizelge 5.39 : Bütün deneyler CBR(%) sonuçları ve KTŞ 2013 limit değerleri.....	81
Çizelge 6.1 : Bütün deneyler CBR(%) sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.....	84
Çizelge 6.2 : Bütün deneylerin sonuçlarının KTŞ 2013 limit değerlerine göre uygunlukları	85



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 :Cüruf depolama.	2
Şekil 1.2 :Cüruf depo sahası.	2
Şekil 2.1 :Esnek üstyapı kesiti.	6
Şekil 3.1 :Türkiye çelik haritası.	14
Şekil 3.2 :Entegre demir-çelik tesisi akım şeması.	15
Şekil 3.3 :Dünyada çeliğin üretim türlerine göre dağılımı.	16
Şekil 3.4 :Elektrik ark fırını görüntüsü.	17
Şekil 3.5 :Bazık oksijen fırını görünümü.	18
Şekil 5.1 :Alt temel malzemesi gradasyon limitleri.	24
Şekil 5.2 :Alt temel malzemesinin fiziksel özellikleri.	24
Şekil 5.3 :Alt temel sıkıştırma kriterleri	26
Şekil 5.4 :Arazi kuru birim hacim ağırlığı tayin metodu.	26
Şekil 5.5 :Alt temel tabakası kalite kontrol deneyleri.	27
Şekil 5.6 :Kaba agrega fiziksel özellikleri.	30
Şekil 5.7 :İnce agrega fiziksel özellikleri.	31
Şekil 5.8 :Granüler temel tabakası gradasyon limitleri.	31
Şekil 5.9 :Granüler temel tabakası sıkıştırma kriterleri.	34
Şekil 5.10 :Granüler temel tabakası kalite kontrol deneyleri.	35
Şekil 5.11 :PMT tabakasının gradasyon limitleri.	36
Şekil 5.12 :PMT tabakasının dane büyüklüğüne bağlı olarak tolerans limitleri.	37
Şekil 5.13 :PMT tabakasının sıkıştırma kriterleri.	40
Şekil 5.14 :PMT tabakası kalite kontrol deneyleri.	41
Şekil 5.15 :Magnezyum sülfat çözelti malzemesi ve hazırlanmış çözeltiye koyulmuş numune.	42
Şekil 5.16 :Etüvde kurutulan numune ve çözültiden süzülen numune.	43
Şekil 5.17 :Los Angeles deneyi için hazırlanan malzeme.	44
Şekil 5.18 :Los Angeles deney makinası ve deneyin yapılışı.	44
Şekil 5.19 :Yassılık indeksi deneyi.	45
Şekil 5.20 : Tel sepet ile numunelerin su içerisinde tartılması	46
Şekil 5.21 : Doygun kuru yüzey özgül ağırlık tayini.	47
Şekil 5.22 : Piktometre	48
Şekil 5.23 : Plastik limit tayini	49
Şekil 5.24 : Numunelerin su altında yıkanması	50
Şekil 5.25 : NaOH Çözeltisi	51
Şekil 5.26 : Metilen mavisi deney aleti	53
Şekil 5.27 : Sıkışma deneyi için kullanılan tokmak ve kılavuzu.	54
Şekil 5.28 : BOF cürufu rutubet numuneleri	55
Şekil 5.29 : CBR deney aleti.	56
Şekil 5.30 : Hazırlanmış olan CBR numunesinin deney aletine yerleştirilmesi.	57
Şekil 5.31 : Alt temel tip B alt limit modifiye proktor eğrisi	63
Şekil 5.32 : Alt temel tip B üst limit modifiye proktor eğrisi.	64

Şekil 5.33 : Alt temel tip B ortalama modifiye proktor eğrisi	65
Şekil 5.34 : Temel tip A alt limit modifiye proktor eğrisi	66
Şekil 5.35 : Temel tip A üst limit modifiye proktor eğrisi	67
Şekil 5.36 : Temel tip A ortalam modifiye proktor eğrisi	68
Şekil 5.37 : PMT 1 alt limit modifiye proktor eğrisi	69
Şekil 5.38 : PMT 1 üst limit modifiye proktor eğrisi.....	70
Şekil 5.39 : PMT 1 ortalama modifiye proktor eğrisi.....	71
Şekil 5.40 : Alt temel tip B alt limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.....	73
Şekil 5.41 : Alt temel tip B üst limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği	74
Şekil 5.42 : Alt temel tip B ortalama tasarım granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.....	75
Şekil 5.43 : Temel tip A alt limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.....	76
Şekil 5.44 : Temel tip A üst limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.....	77
Şekil 5.45 : Temel tip A ortalama tasarım granülometrisi yük-penetrasyon grafiği	78
Şekil 5.46 : PMT 1 alt limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.....	79
Şekil 5.47 : PMT 1 üst limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği	80
Şekil 5.48 : PMT 1 ortalama tasarım granülometrisi yük-penetrasyon grafiği	81

BAZİK OKSİJEN FIRINI CÜRUFUNUN YAPAY AGREGA OLARAK ESNEK ÜSTYAPILARDA ALT TEMEL VE TEMEL TABAKALARINDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Dünya nüfusundaki hızlı artış, sanayileşmedeki büyümeler ve sürekli ilerleyen teknolojik gelişmeler, ham madde ihtiyacını arttırmakta ve doğal kaynakların büyük bir hızla tüketilmesine sebep olmaktadır. Sonsuz olmayan bu kaynakların tüketilmesi ve bu süreçte çevre dengesinin hızlı bir şekilde bozulması, gelecek nesiller ve doğal denge için büyük tehlike oluşturmaktadır. Bu gerçek, insanoğlunu, yan ürün ve atıklarının değerlendirilmesine, geri dönüşüme daha çok dikkat etmeye yönlendirmiştir.

Bütün dünyada ve Türkiye’de sürdürülebilirlik ve yan ürünlerin başka sektörlerde değerlendirilmesi hakkında çalışmalar yapılmakta ve geri dönüşüm konusunda olumlu sonuçlar elde edilmeye çalışılmaktadır.

Ülkemiz, dünyada başka yerlerde eşi ve benzeri olmayan bir doğal güzelliğe sahiptir. Ancak ne yazık ki, doğaya gereken hassasiyet gösterilmemekte ve büyük zararlar verilmektedir. Gelişen endüstri ile yapılan yatırımlar, doğal kaynaklara ve bu hazineye, kabul edilemez zararlar vermektedir. Ülke vatandaşları olarak, bütün bireylerin bu konuya hassasiyet göstermesi ve gelecek nesillerin bu güzelliklerden mahrum kalmasını engellemek için çaba göstermesi gerekmektedir. Bilinçli bir tüketim topluluğu olmak sürdürülebilirliğin en önemli parçalarından birisidir.

Bir ülkenin gelişmesi, o ülkede yapılan yatırımların sürdürebilirliği ve çevresel zararın en aza indirilmesi ile doğru orantılıdır. Türkiye sürekli gelişen ve ekonomisini sürekli genişleten bir ülkedir. Bu şekilde büyüyen bir ülkenin yatırımcılarının ve hükümetinin, geri dönüşüme büyük bir önem vermesi, yapılan yatırımların çevresel zararlarını en aza indirmek için çalışmalar yapması gerekmektedir.

Türkiye’de son yıllarda inşaat sektörü, önemli bir hızla büyümekte ve bu büyüme artarak devam etmektedir. İnşaat sektörünün en büyük oranda ham maddesi agregadır. Agregaya alternatif olarak cürufların ham madde olarak inşaat sektöründe kullanılması, geri dönüşüm için büyük önem taşımaktadır. İnşaat sektörünün en çok ham madde gerektiren dallarından birisi de ulaştırma yatırımlarıdır.

Ulaştırma yatırımlarında, yol inşaatında, oran olarak en çok kullanılan malzeme agregadır. Doğal taş ocaklarının günden güne azalması ve demir çelik fabrikası atığı olan cürufun, ham madde olarak kullanılabileceği düşüncesi, bu akademik çalışmanın ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Ülkemizde yapılan ulaştırma yatırımlarındaki ilerleme ve bu yatırımların hammadde gereksiniminin büyük olması da, sektörü yan ürün ve atıkların değerlendirilmesi için araştırmalar yapmaya yönlendirmiştir.

Türkiye, çelik üretiminde dünyada 9. sıradadır ve bu üretim hacmi sonucunda yüklü miktarda atık oluşumu meydana gelmektedir. Demir çelik fabrikalarından yan ürün olarak çıkan cürufaların, yüksek depolama maliyetleri ve çevreye verdiği olumsuz etkiler yüzünden, geri dönüşüme ve başka sektörlerde kullanılmaya yönlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bazik oksijen fırını üretim sürecinde ergimiş halde olan pik demir ve hurda metal kullanılır. Bu açıdan bazik oksijen fırını, hurda metal de kullanıldığı için üretim aşamasında da geri dönüşüme katkı sağlamaktadır. Üretim esnasında cüruf da ortaya çıktığı için bu cürufun geri dönüşümü büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, bazik oksijen fırını ile çelik üretimi yapan tesislerde, çelik üretimi sırasında ortaya çıkan bazik oksijen fırını cürufalarının yapay agrega olarak esnek üstyapılarda alt temel ve temel tabakalarında kullanılabilirliği incelenmiştir. Karayolu Teknik Şartnamesi 2013 verilerine göre malzemeler ile deneyler yapılmıştır. Deneylerde Ereğli Demir ve Çelik Fabrikası'ndan temin edilen bazik oksijen fırını cürufu kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk bölümünde araştırmanın amacı ve kapsamı belirtilmiştir. Geri dönüşüme kazandırılmayan cürufaların vermiş olduğu zararlar ile ilgili bilgiler verilmiş ve örnekler gösterilmiştir.

İkinci bölümde karayolu inşaatı altyapı ve üstyapı tabakaları anlatılmıştır. Tabaka tipleri alt başlıkları ile birlikte incelenmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre karayolu tabakaları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde demir çelik üretimi, demir çelik sektörü ve fırın tipleri incelenmiştir. Türkiye'de ve dünyada demir çelik sektörü hakkında bilgi verilmiştir. Aynı bölümde fırın tiplerine göre ayrı ayrı üretim yöntemleri anlatılmış ve çalışma prensipleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde demir çelik fabrikalarından atık madde olarak çıkan cürufaların oluşumları, özellikleri ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'e göre, alt temel ve temel tabakalarının malzeme özellikleri ve yapım şartları tarif edilmiştir. Her tabakanın uygulama granülometri limit değerleri tablolar halinde verilmiştir. Aynı bölümde şartnamede belirtilen ve yapılması gereken deneylerin yapılışı anlatılmış, Ereğli Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilen bazik oksijen fırını cürufu ile yapılan deneylerin sonuçları, Karayolları Teknik Şartnamesi limit değerlerine göre incelenmiştir.

Bu çalışmada, Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 standartlarına göre, sırası ile, hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi, (Los Angeles) aşınma deneyi, yassılık indeksi deneyi, su emme deneyi, plastik limit ve likit limit deneyi, kil topağı ve dağılabilen dane oranı deneyi, organik madde deneyi (%3 NaOH ile), metilen mavisi deneyi yapılmış ve deneylerin yapıları anlatılmıştır.

Alt temel tip B, temel tip A, plent miks temel 1 (PMT1), alt limit, üst limit ve ortalama tasarım granülometrilere göre, toplam 9 farklı karışım için, ayrı ayrı modifiye proktor ve Kaliforniya taşıma oranı deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 verileri ile mukayeseleri yapılmış ve malzemenin şartname şartlarını sağlayıp sağlamadığı belirlenmiştir.

Altıncı bölümde ise, yapılan deneylerin sonuçları ile ilgili yorumlar yapılmış ve öneriler sunulmuştur.





STUDY OF THE USABILITY OF THE BASIC OXYGEN FURNACE SLAG -IN TERMS OF ARTIFICIAL AGGREGATE- AS LOWER FOUNDATION AND FOUNDATION LAYERS IN FLEXIBLE SUPERSTRUCTURES

SUMMARY

The rapid increase in the world population, industrial growth and technological developments that are constantly advancing, increase the need for raw materials thus resulting in natural resources to be consumed at a rapid rate. The depletion of these finite resources and the rapid degradation of the environmental balance in this process pose a great threat for future generations and natural equilibrium. This fact has led the human being to pay more attention to the effective use of by-products and recycling waste. Studies on this subject are taking place worldwide including Turkey and efforts are put to get positive results about recycling.

The development of a country is directly proportional to the sustainability of investments in that country and the minimization of environmental impact. Turkey is a country that is constantly developing and constantly expanding its economy. Investors and the government of a growing country in this way need to work hard to reduce the environmental damage of the investments made.

Our country has a natural beauty that is unique and unparalleled elsewhere in the world. Unfortunately, however, nature does not receive the desired sensitivity and is given great damage. Investments made with the developing industry give unacceptable damage to natural resources and to this treasure. As citizens of the country, they must strive to prevent all individuals from being sensitive to this issue and depriving future generations of these beauties. Being a conscious consumer community is one of the most important parts of sustainability.

The construction sector in Turkey has been growing at a very rapid pace in recent years and this growth is continuing to increase. The biggest raw material of the construction sector is the aggregate. As an alternative to aggregate, the use of slag as raw material in the construction sector is significant for recycling. One of the branches of the construction sector that requires the raw materials is transportation investments.

In transportation investments, road construction, the most used material is the aggregate. The decline of natural stone quarries from day to day and the idea that the slag, which is iron-steel factory waste, could be used as raw material ensured the emergence of this academic work.

Progress in transportation investments in our country and the large need for raw materials of these investments have led the sector to conduct research for the utilization of by-products and wastes.

Turkey is in the 9th place in steel production in the world and the amount of production results in the waste formation in high volumes. Because of the high storage costs and adverse impacts on the environment, recycling and of slag generated as a by-product from iron and steel plants and reuse of them in other industries are of immense importance.

In this study, the use of basic oxygen furnace slags, which occur during steel production, as artificial aggregate in flexible superstructures in substructure and foundation layers in steel making plants with basic oxygen furnace has been investigated. Experiments are carried out with materials according to the Highway Technical Specification 2013 data.

In these experiments, basic oxygen furnace slag obtained from Ereğli Iron and Steel Plant was used.

In the basic oxygen furnace production process, molten pig iron and scrap metals are used. In this respect basic oxygen furnace also contributes to the recycling of the production phase as it is also used in scrap metal. Recycling of this slag is of foremost importance as slag also appeared during production.

In the first chapter of the thesis, the purpose and scope of the research is explained. Information on the damages caused by slags not recycled are given and examples are given.

In the second chapter, infrastructure and superstructure layers of highway construction is explained. Layer types have been studied together with their subheadings. According to the Technical Specification of Highways, road strata are explained.

In the third chapter, iron and steel production, iron and steel sector and furnace types are examined. Information about iron and steel sector in Turkey and in the world, has been given. In the same section, separate production methods are explained according to furnace types and working principles are given.

In the fourth chapter, the formations, properties and application areas of slags emerging from iron and steel plants as waste material are explained.

In the fifth chapter, the material properties and construction conditions of the lower foundation and foundation layers according to the Highway Technical Specification 2013 are described. The application granulometry limit values of each layer are given in tables. In very chapter, the experiments to be performed according to the technical specification are explained and the results of the experiments that are carried out using samples from Erdemir basic oxygen furnace slag are studied.

In this study, according to the standards of the Highways Technical Specification 2013, the resistance against weather effects (frost), (Los Angeles) abrasion test, flatness index test, water absorption test, plastic limit and liquid limit test, experiment, organic matter experiment (with 3% NaOH), methylene blue experiment and the experiments are explained.

Modified Proctor and California Transport Ratio Tests are performed according to, 9 different mix, lower limit, upper limit and the average design granulometry of the lower foundation type B, the foundation type A, the plant mix foundation 1 (PMT1). The results of the experiments are compared with the data of KTŞ 2013

and it was evaluated whether the material satisfy the requirements of the specification.

Finally, in the sixth section, comments are listed on the results of abovementioned experiments and suggestions are presented.





1. GİRİŞ

Her geçen gün gelişen teknoloji ve artan nüfus ile, sonsuz olmayan doğal kaynaklar da büyük bir hızla azalmaktadır. Ülkemizde ve dünyada son yıllarda endüstriyel tesislerin çoğalması ve endüstriyel atıkların artması, atık geri dönüşümleri ve depolama ile ilgili büyük problemlere yol açmaktadır. Demir çelik sektörünün büyüklüğü ve dünyadaki yüksek tüketimler, bu sektörü de aynı şekilde atık depolamada ve maliyetleri yüksek olan geri dönüşümde olumsuz olarak etkilemektedir. Geri dönüşüm konusunda ülkemizde ve dünyada bir takım çalışmalar yapılmakla birlikte, bu çalışmalara her gün bir yenisinin eklenmesinin doğuracağı olumlu etkilere doğanın ve insanlığın ihtiyacı bulunmaktadır.

Dünyada 2015 yılı sonunda ham çelik üretimi 1,6 milyar tondur. Ülkemizde 2015 yılı sonunda 31,5 milyon ton ham çelik üretimi yapılmıştır. Dünya Çelik Birliği (Worldsteel) verilerine göre ülkemiz dünyanın en büyük 9.çelik üreticisi, aynı zamanda dünyanın en büyük 8. çelik tüketicisi olmuştur [1].

Demir çelik tesislerinden elde edilen atık maddelerden birisi cüruftur. Demir çelik fabrikasında atık olarak çıkan cürufların fiziksel ve kimyasal özellikleri, tesislerin malzeme tiplerine ve üretim şekillerine göre farklılıklar göstermektedir. Demir çelik fabrikalarının yan ürünlerinden olan çelikhane cürufu, çelik üretim işleminde ergimiş haldeki demirin safsızlıklardan arındırılması aşamasında elde edilmektedir. Çelikhane cüruflarının farklı endüstriyel kullanımı için çeşitli araştırmalar yürütülmektedir. Çelikhane cürufunun farklı üretim alanlarına hammadde olarak kullanılabilirliğinin belirenmesindeki en önemli faktörlerden bir tanesi işlemin ekonomik katkılarıdır. Günümüzde cürufların büyük bir bölümü, özelliklerinden tam anlamıyla yararlanılmadan kullanılmakta veya değerlendirilmeden ve kullanılmadan atılmaktadır [2]. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de kullanılmayan ve depolanan cürufların fotoğrafları verilmiştir.

Cürufların depolanmasının ve kullanılmamasının en önemli olumsuz sonuçlarından biri de ortaya çıkarttığı çevresel problemlerdir. Ereğli Demir Çelik Fabrikasında

yılda yaklaşık olarak 300.000-350.000 ton elikhane cürufu açığa çıkmakta ve bunun büyük bir kısmı kullanılmamakta, atık sahalarında stoklanmaktadır. Bu atıkların yeniden kullanılmasının ülkemiz ekonomisine sağlayacağı faydalar ve evre kirliliğinin önlenmesi açısından yapacağı katkılar ortadadır [3].



Şekil 1.1: Cüruf depolama.



Şekil 1.2: Cüruf depo sahası.

Son yıllarda dünyada ve ülkemizde inşaat sektöründe de büyük bir ilerleme görülmektedir. Bu etki ile yapılan yatırımlar ve tüketilen hammaddeler çoğalmaktadır. İnşaat sektörünün en fazla tüketilen hammaddesi agregadır. Ülkemizdeki ulaşırma yatırımları da son yıllarda hızlı bir ivme ile artmakta ve

agrega doğal kaynakları azaldığı için, malzeme temin sıkıntıları yaşanmaktadır. Karayolu inşaatında yol tabakalarında kullanılan malzemelerin yüzde 90-95 ini agrega oluşturmaktadır. Bu oranın büyüklüğü ve doğal kaynakların azalması, sektörü değişik hammadde arayışlarına zorlamaktadır. Bu alternatif arayışları devam ederken cürufun yol tabakalarında kullanılması hakkında bir çok çalışma devam etmektedir.

Demir çelik cürufları Bazik Oksijen Fırını Cürufu, Yüksek Fırın Cürufu, Elektrik Ark Fırın Cürufu ve Pota Ocağı Cürufu olarak sınıflandırılabilir. Özellikle demir çelik üretimi yapılan bölgelerde cürufların yol malzemesi olarak kullanılması hem maliyet, hem nakliye, hem enerji, hem de çevresel etkileri göz önünde bulundurularak olumlu bir etki yaratabilir.

Bu çalışmada, Karayolları Teknik Şartnamesi'ne göre Alt Temel Tip B, Temel Tip A, ve Plent Miks Temel 1 granülometrilere göre Erdemir Bazik Oksijen Fırını Cüruflarının yol tabakalarında kullanımının stabiliteye etkisi incelenmiştir.



2. KARAYOLU İNŞAATI ALTYAPI VE ÜSTYAPI TABAKALARI

İyi bir karayolu ağının sağladığı ulaşım kolaylığının, o ülkenin kalkınmasındaki payı oldukça önemlidir. Karayolu, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış olan bir güzergah boyunca, doğal zeminin istenilen yükseltilere getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Karayolu, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ayrı bölümde incelenebilir [4].

2.1 Karayolu Altyapısı

Taşıt ve yayaların ulaşimleri sırasında karayolunu kolaylıkla kullanabilmeleri için doğal zeminin belli bir enkesit şekline dönüştürülmesi gerekir. Bu amaçla yol enkesitinde bazı yerler kazılır, bazı yerler doldurulur. Bu kazma ve doldurma işlemine toprak işi adı verilir. Doğal zeminin düzeltilmesinden ibaret olan bu işe tesviye denir. Toprak işi sonucu ortaya çıkan yüzey tesviye yüzeyidir. Tesviye yüzeyinin projesine uygun enine ve boyuna eğim de verilerek bir greyder yardımı ile son olarak düzeltilmesi işlemine ince tesviye (reglaj) adı verilir. Reglajı yapılmış bir yol kesiti üstyapı inşasına hazır demektir [5].

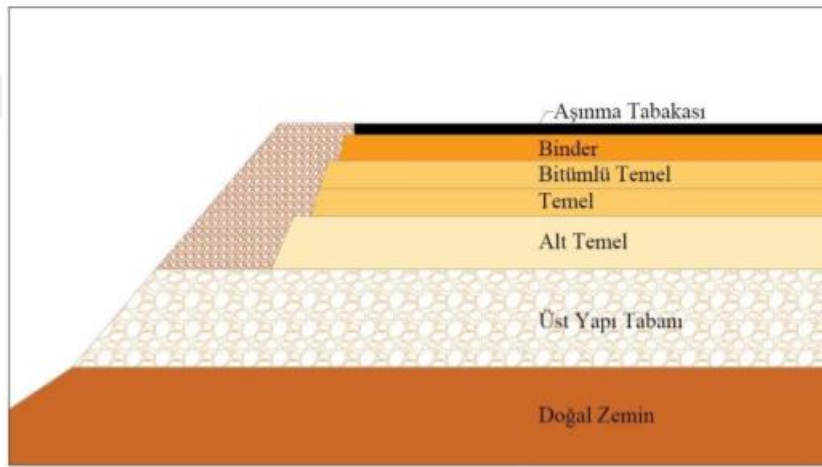
Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki bölgeye altyapı adı verilir. Altyapı, yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprak ile oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Ancak kazı işleminden sonra istenilen düzlüğü ve eşit yük dağılımını sağlamak amacıyla döşenen ve sıkıştırılan toprak da, yarma kesimindeki altyapıya dahildir. Ayrıca, köprü viyadük, tünel ve menfez istinat duvarı gibi sanat yapıları da altyapı olarak kabul edilebilir [4].

Altyapı yolun ana taşıyıcı kısmıdır. Altyapının görevleri; istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, üst yapı tarafından iletilen yükleri daha geniş bir alana yaymak ve az da olsa, yolu dış etkilerden korumaktır. Bu görevleri yerine getirebilmesi için altyapının, trafik yükleri, don ve su etkilerine karşı dayanıklı olması gerekir.

Altyapının oluşturulmasında; bitkisel toprak, çürük zemin ve sıkıştırmaya elverişli olmayan zeminlerin kullanılmamasına özen gösterilmelidir. Bu nedenle altyapıyı oluşturan zemin özelliklerinin çok iyi etüt edilmeleri gerekmektedir [4].

2.2 Karayolu Üstyapısı

Trafik yüklerini altyapının taşıyabileceği değere indirmek, altyapıyı korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak amacıyla altyapı üzerine yerleştirilen alt temel, temel ve kaplamadan oluşan tabakalı yol yapısıdır [4]. Şekil 2.1’de tipik bir esnek üstyapı kesiti gösterilmiştir [4].



Şekil 2.1: Esnek üstyapı kesiti [4].

2.2.1 Alt temel tabakası

Alt temel tabakası esnek üstyapıların en alt tabakası olup düşük elastisite modülüne veya CBR değerine sahip fakat, iyi drene olabilen granüler (taneli) malzemelerden yapılır.

Alt temel ve temel tabakaları, kaplama tabakalarının altına yapılan ve bir çeşit temel görevi gören üst yapı elemanlarıdır. Alt temel tabakaları, kaplamadan aktarılan yükleri alttaki zemine dağıtmak, uygun drenajı sağlamak, deformasyon ve aşınma etkilerine dayanım sağlamak, ince daneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek, don etkilerinin önüne geçmek gibi görevleri yerine getirir. Bu sebeple alt temel tabakalarının yüksek stabiliteli ve yüksek drenaj kabiliyetleri olması gerekmektedir. Alt temel tabakalarının bu görevleri yerine getirebilmesi için, tabakada kullanılan malzemelerin kalitelerinin bu görevlere uygun olması gerekmektedir. Bu tip tabakalarda kullanılan malzemelerin yüksek stabiliteli, yoğun

granülometrilili olması gerekmektedir. Ayrıca, bu tabakaların, uygun drenaj için gerekli boşluklu granülometriye, yüksek CBR ve içsel sürtünme açılarına sahip olması gerekmektedir. Bu tabakalardaki malzemelerin filler oranı düşük, kübik, açısız şekilli ve pürüzlü yüzeylere sahip olması ancak, yassı ve ince uzun taneler ihtiva etmeyen, don duyarlılığı düşük malzemelerden oluşturulması sağlanmalıdır. Alt temel ile granüler temel tabakasının işlevleri açısından aralarında önemli bir fark yoktur. Alttemel tabakası ile granüler temel tabakası arasındaki en önemli fark, daha düşük maliyette daha kalın bir tabakanın inşa edilebilmesidir [6].

Alt temel tabakası trafik yüklerinin taban üzerine yayılmasını sağlamak, ince taneli altyapıların temel tabakasına nüfuz etmesini önlemek, ayrıca su ve don tesirine karşı tampon bölge görevi yapmak üzere tesviye yüzeyi üzerine serilen tabakadır [4].

Alt temel tabakası Çizelge 2.1’de belirtilen granülometri limitleri içerisinde sürekli granülometri 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 tabakadır [7].

Çizelge 2.1: Alttemel malzemesi granülometri limitleri [7].

Elek Açıklığı (mm)	Tip A (% Geçen)	Tip B (% Geçen)
75	100	
50	-	100
37,5	85-100	80-100
25	-	60-90
19	70-100	45-80
9,5	45-80	30-70
4,75	30-75	25-55
2,00	-	15-40
0,425	10-25	10-20
0,075	0-12	0-12

Alt temel malzemesi, tesviyesi tamamlanmış taban üzerine, sıkışmış kalınlığı 20 cm’yi geçmeyecek şekilde tabakalar halinde serilip sıkıştırılır. Ancak, sıkıştırma makinelerinin kapasitelerinin büyük olması halinde tabaka kalınlığı 30 cm’ye kadar arttırılabilir. Alt temel kalınlığının bu değerlerden fazla olması durumunda, birden fazla tabakalar halinde inşa etme durumu hasıl olur ki, bu durumda tabaka kalınlıkları eşit alınır. Her tabaka, üzerine yenisi serilmeden istenen yoğunluğa getirecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Alt temel malzemesinin serilmesi ve tesviye

edilmesi esnasında, bulunan optimum su muhtevası (AASHTO, T-99 veya T-80 metodu ile) ± 2 tolerans limitleri dahilinde uygulanır [4].

Sıkıştırımda, statik çizgisel yükü 30 kg/cm den büyük olan düz bandajlı, vibrasyonlu silindirler ve lastik başına düşen yükü 3500 kg den az olmaya lastik tekerlekli sıkıştırıcılar kullanılır [4].

Bu çalışmada Ereğli Demir Çelik Fabrikası Bazık Oksijen Fırını Cürufunun Alt Temel Tip-B granülometrilere göre araştırma yapılmıştır.

2.2.2 Temel tabakası

Temel tabakası bağlayıcısız ya da bir bağlayıcı madde ile işlem görmüş olan, belirli gronülometrideki malzemeden oluşur. Temel tabakasının ana görevi, üst yapının yük taşıma kabiliyetini ve kapasitesini arttırmaktır. Ayrıca, bu tabakanın trafik hareketlerinden ve yüklerinden doğan yüksek kayma gerilmelerine karşı koyabilecek, su drenajına yardımcı olabilecek ve donma durumlarına karşı da koruma sağlayabilecek özellikte olmalıdır [4].

Temel tabakası Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'e göre üç tip halinde uygulanmaktadır [7],

- Granüler Temel (GT),
- Plent Miks Temel (PMT),
- Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT),

2.2.2.1 Granüler temel tabakası (GT)

GT tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, veya kırma taş ile ince malzeme kullanılarak Çizelge 2.2'de verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin, su ile karıştırılması ve şartnamesine göre uygun olarak hazırlanmış taşıma gücü yeterli taban veya alt temel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılması ile oluşturulan tabakadır [7].

Çizelge 2.2: Granüler temel tabakası gradasyon limitleri [7].

Elek Açıklığı (mm)	Tip A (% Geçen)	Tip B (% Geçen)	Tip C (% Geçen)
50	100		
37,5	80-100	100	
25	60-90	70-100	100
19	45-80	60-92	75-100
9,5	30-70	40-75	50-85
4,75	25-55	30-60	35-65
2,00	15-40	20-45	25-50
0,425	8-20	10-25	12-30
0,075	2-8	0-12	0-12

Stabil yapıdaki bir temel tabakası, trafik yükleri altında kalıcı deformasyon yapmadığı için ötürü mekanik açıdan stabil olarak adlandırılır. Bu nedenle, bu tip temeller “Mekanik Stabilizasyon Temel” olarak da adlandırılabilir. Granüler temel tabakası, plent miks veya çimento bağlayıcılı granüler temel tabakalarına nazaran daha az stabil fakat, daha ekonomik olarak imal edilebilmektedir [6].

Asfalt betonu ile kaplanacak yollarda kullanılacak GT malzemesinin granülometrilere Çizelge 2.2’de verilen Tip A veya Tip B ye uygun olarak hazırlanmalıdır. Sathi kaplama yapılacak devlet yollarında da Granüler Temel Tip A veya Tip B kullanılmalı, sathi kaplama yapılacak il yollarında ise proje koşullarına bağlı olarak Granüler Temel A , B veya C tipi malzemelerden biri kullanılabilir [7].

Bu çalışmada Temel Tip A granülometrisine sahip malzeme ile ilgili araştırmalar yapılacaktır.

2.2.2.2 Plent – miks temel tabakası (PMT)

Plent miks temel tabakası kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak Çizelge 2.3’de verilen granülometri limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda su ile bir plentte karıştırılması ile hazırlanan malzemenin, yapımı ve düzeltmeleri tamamlanmış, gerekli eğim verilmiş alt temel tabakası üzerine, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak bir ya da birden fazla tabakalar halinde serilip sıkıştırılması ile oluşturulan tabakadır [7].

Çizelge 2.3: Plent-Miks temel tabakasının gradasyon limitleri [7].

Elek Açıklığı (mm)	Tip 1 (% Geçen)	Tip 2 (% Geçen)
37,5	100	
25	72-100	100
19	60-92	80-100
9,5	40-75	50-82
4,75	30-60	35-65
2,00	20-45	23-50
0,425	8-25	12-30
0,075	0-10	2-12

Üstyapı projelendirme veya üstyapı takviye raporlarında verilmiş plent miks temel tabakası kalınlığının 15 cm ve üzeri olması durumunda PMT Tip-1 , plent miks temel tabakası kalınlığının 15 cm'den düşük olması durumunda ise, PMT Tip-1 veya PMT Tip-2 granülometrisi kullanılmalıdır [7].

Plent miks temel tabakası imalatından önce alt temel tabakası yüzeyi üzerinde gevşek kısımlar, serbest malzeme, çukurlar, kabarmalar veya çatla kısımlar bulunmamasına, var ise uygun şekilde onarılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir [7].

2.2.2.3 Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası

Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırmataş ve ince malzeme kullanılarak Çizelge 2.4'te verilen gradasyon limitleri içerisinde sürekli gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin uygun oranda çimento ve su ile bir plentte karıştırılması ile hazırlanan ve yeterli bir alt temel tabakası üzerine, bir veya birden fazla tabakalar halinde, projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olarak serilip sıkıştırılması ile oluşturulan tabakadır [7].

Çizelge 2.4: ÇBGT tabakasının gradasyon limitleri [7].

Elek Açıklığı (mm)	(% Geçen)
37,5	100
25	72-100
19	60-92
9,5	40-75
4,75	30-60
2,00	20-45
0,425	8-25
0,075	0-10

Esasen çimento stabilizasyonu temel tabakası bir çeşit zayıf betondur. Bu zayıf betonun normal betona nazaran çimento dozajı düşük olmakla birlikte, su/çimento oranının düşük olması işlenebilirliği (yani yerleştirme ve sıkıştırma direncini) azaltsa da, plentde karıştırılan karışımın kamyonlarla yola nakli, finişerle serimi ve silindirlerle sıkıştırılabilmesi mümkün olduğu için özellikle otoyol gibi yüksek standartlı yollarda yüksek stabiliteli bir temel tabakası olarak kullanılmaktadır [6].

Çimento miktarı, Modifiye Proktor deneyi ile saptanan su içeriğinde agrega-çimento karışımı standart CBR kalıbında 7 tabaka halinde Modifiye Proktor tokmağı ile her tabakaya 62 darbe tatbik ederek sıkıştırılan silindir numunelerinin 7 gün kürden sonraki serbest basınç dayanımları belli limitler dahilinde olacak şekilde yapılan deneme karışımlarıyla tespit edilir. Çimento stabilizasyonlu temellerin dayanımı şartnamelerde alt ve üst limitler ile sınırlandırılmıştır. Çünkü, alt limit ile minimum mukavemetin sağlanması ve üst limit ile aşırı rijit davranış göstermesinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Çimento stabilizasyonu temelini serim ve sıkıştırma sonrası yüzeyine bir kür tabakası uygulanır. Kür tabakası olarak;

-MC-30, 70 veya 250 sıvı petrol asfaltı,

-RS-1, 2, SS-1, SS-1h, CRS-1,2, CSS-1, CSS-1h, veya MS-1 asfalt emülsiyonu,

-Kimyasal kür maddeleri,

gibi malzemelerden biri olmalı ve kür süresince üzerleri plastik bir örtü ile örtülmelidir. Çünkü, çimentonun hidratasyonu için gerekli suyun kaybı önlenerek mukavemet kazanması sağlanacak ve çatlaması önlenecektir [6].

2.2.3 Kaplama tabakası

Taşıtlara uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak ve yapıya sızan yüzeysel su miktarını ve temel tabakasına iletilen kayma gerilmelerini azaltmak amacıyla temel tabakası üzerine inşa edilen bir tabakadır [4].

Üstyapılar, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin türlerine, niteliklerine ve yapım yöntemlerine göre rijit ve esnek olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadırlar. Taban zeminine, trafiğe, çevre şartlarına ve ekonomik faktörlere bağlı olarak en uygun üst yapı tipi seçilir [4].

2.2.3.1 Rijit kaplama tabakası

Çimento betonu ile yapılan kaplamalarla oluşturulan üstyapıya “Rijit üstyapı” ya da “Beton Yollar” denir. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafik yüklerini tabana iletme ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bir beton kaplamanın davranışı, dökülen beton tabakaların özelliklerinin yanı sıra, kaplama altına serilen temel ve alttemel tabakaları ile mevcut taban zemininin özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu nedenle projelendirme sırasında, taban zemini, temel ve alt temel malzemeleri, betonu oluşturan kum, çakıl, çimento ve betonarme demiri gibi malzemelerin özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir. Beton yollar, enine ve boyuna derzlerle birbirinden ayrılmış plaklar halindedir. Beton plağın rijitliğinin yüksek olması nedeniyle taban zemininde oluşan gerilmeler geniş bir alana yayılır [8].

2.2.3.2 Esnek kaplama tabakası

Bitümlü kaplama tabakaları ile oluşturulan üstyapılara ise “Esnek Üstyapı” denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile sıkı bir temas sağlayan ve trafik yüklerinin, kaplama, temel ve alt temel tabakaları vasıtasıyla taban zeminine dağıtan bir üst yapı şekli olup, stabilitesi, adezyon, tane sürtünmesi ve kohezyon gibi kullanılan agrega ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır [4].

3. DEMİR ÇELİK ÜRETİMİ

3.1 Demir Çelik Sektörü

Demir çelik sektörü, tüm dünya ülkelerinde ekonomik ve teknolojik ilerlemelerle ve ülkenin ekonomik durumu ile ilişkili bir sektördür. Ekonomik kalkınmada, güçlü ve profesyonel şekilde yönetilen demir çelik sektörünün büyük etkisi bulunmaktadır. Demir çelik sektörünün önemli olmasındaki etkenlerden birisi, inşaat, üretime, teknoloji, endüstriye bütün dallara kaynak sağlamasıdır. Demir çelik, ham madde olarak, inşaat sektöründe, otomotiv sektöründe, sağlık sektöründe, tarım araç gereçlerinde, dayanıklı tüketim mallarında, savunma sanayiinde, hemen hemen her sektörde kullanılmaktadır. Bu kadar hayatın içinde ve zaruri olan bir sektörün gelişiminin ülke ekonomisine, gelişmesine olumlu etkileri tartışılmayacak kadar fazladır.

Dünya'da demir çelik üretimi 2000'li yıllara kadar ağırlıklı olarak kamuya bağlı şirketler tarafından yapılmaktaydı. Ancak, daha sonraki yıllarda demir çelik tesisleri özelleştirilmiş ve özel şirketler sektöründe önemli paya sahip olmuştur. 2002 yılından itibaren gelişmekte olan ülkelerde yaşanan aşırı talep artışları bu süreci hızlandırmıştır [9].

Ülkemizde modern anlamda demir-çelik üretimine yönelik girişimler, Cumhuriyet'in kuruluşundan sonra başlamış ve ilk demir-çelik tesisi, 1930'lu yıllarda Kırıkkale'de kurulmuştur. Ardından entegre bir tesis olan Karabük Demir Çelik Fabrikaları faaliyete geçmiştir. Özel sektörde ise ilk ark ocaklı tesis olan Metaş, 1960 yılında üretime başlamıştır. Yassı ürüne yönelik ilk tesis olan Erdemir ise, 1965 yılında Ereğli'de üretime geçmiş, demir-çelik talebindeki gelişmeye cevap vermek üzere 1975 yılında İskenderun'da, İskenderun Demir-Çelik Fabrikaları üretime başlamıştır. 80'li yılların ilk yarısında, yeni ark ocaklı tesislerin üretime geçmesiyle, özel kesim Türkiye'nin demir-çelik üretimine ağırlığını koymuştur [10].

Türkiye'deki demir çelik tesislerinin 2012 yılındaki dağılımı, kapasiteleri ve bölgesel olarak üretim miktarları mt. (milyon ton) olarak Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Türkiye çelik haritası.

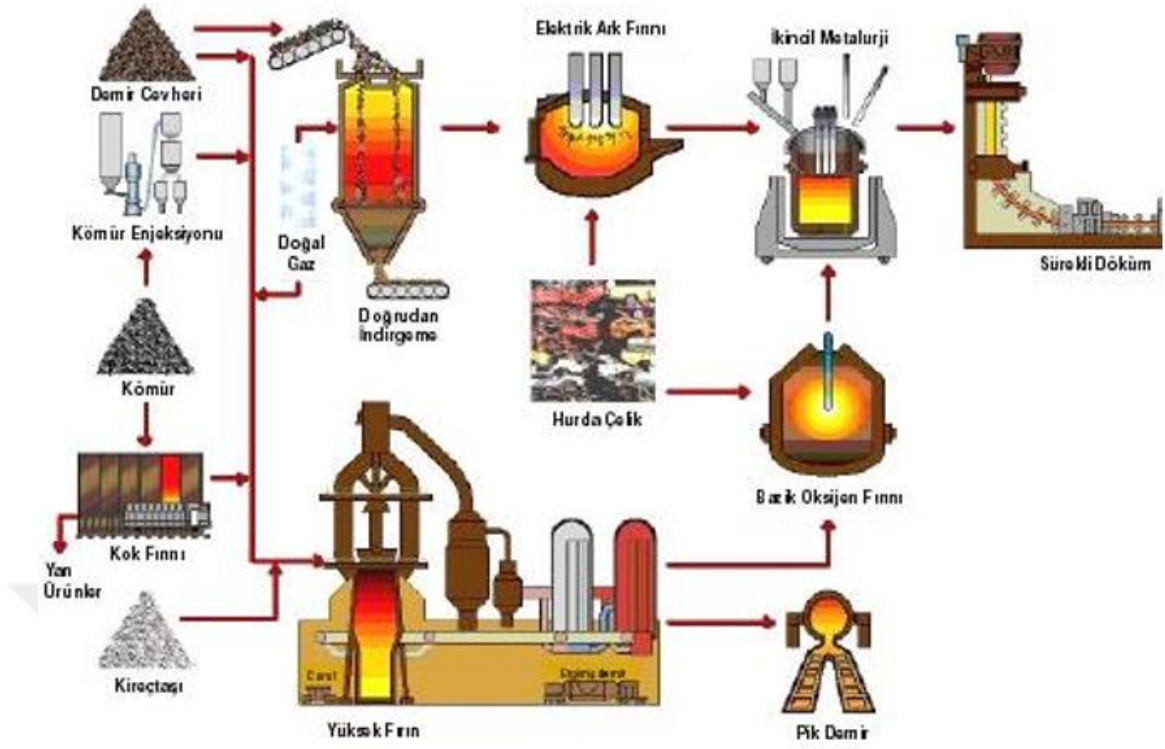
Bu çelik haritasından anlaşılabileceği gibi, yoğun olarak Türkiye'nin 4 bölgesinde de yüklü kapasiteli çelik üretimi yapılmakta ve bu fabrikalardan çıkan cürufur bu bölgelerdeki yatırımlarda geri dönüşümlerde ve alternatif ham madde olarak diğer sektörlerde kullanılabilir.

Dünya Çelik Derneği (Worldsteel) verilerine göre, çelik üretimi 2015 yılında bir milyar altı yüz yirmi üç milyon tondur. Türkiye, dünya sıralamasında 2015 senesinde 9. Sırada yer almaktadır [11].

3.2 Demir Çelik Üretimi

Çelik üretimi temel olarak, demirdeki safsızlıkların oksitlenerek uzaklaştırılmasını kapsamaktadır. Farklı çelik üretim işlemlerine bağlı olarak kullanılan metal de değişiklik göstermektedir. Çelik üretiminde; işleme bağlı olarak, yüksek fırından çıkan pik demir, hurda metal veya sünger demir ana hammadde olarak kullanılmaktadır.

Tipik bir modern entegre demir-çelik tesisine ait akım şeması Şekil:3.2'de verilmektedir [2].



Şekil 3.2: Entegre demir-çelik tesisi akım şeması [2].

Buna göre kok fırınında elde edilen metalurjik kok, kireç ve demir cevheri yüksek fırına şarj edilmekte ve elde edilen ergimiş metal torpido arabaları ile yüksek fırın potalarına ve kükürt giderme işleminden sonra bazık oksijen fırınına taşınmaktadır. Burada safsızlıkları giderilen ve çelik halini alan metal, ikincil metalurji tesisine gönderilmek üzere çelik potalarına boşaltılırken, BOF'un dibinde kalan cüruf da ayrı potalara aktarılır. İkincil metalurji tesisinde alaşım ilavesi ve sıcaklık optimizasyonu sağlanan çelik, sürekli döküm tesisinde özel kalıplara dökülerek katılaştırılır [12].

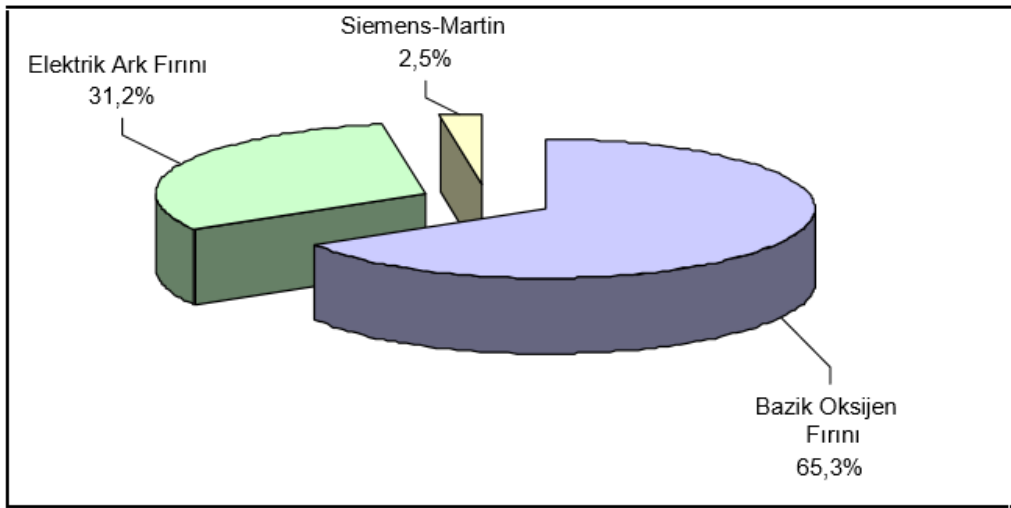
Çelik üretiminde ilk olarak Bessemer İşlemi geliştirilmiş, sonrasında Siemens-Martin İşlemi (open-hearth), oksijen üflemleri teknikler ve son olarak da elektrik ark fırını yöntemi geliştirilmiştir. Bessemer işleminde, fırınının alt kısmında yer alan kanallardan ergimiş pik demir boyunca hava üflenerek silisyum, manganez ve karbon gibi safsızlıklar oksitlenerek cüruf fazına alınmakta ve böylelikle saflaştırma gerçekleştirilmektedir [2].

Siemens-Martin işleminde, pik demir hurda çeliklerle birlikte ertirilip saflaştırılmaktadır. Ertirme işlemi için gereken ısı miktarını sağlamak için sıcak baca gazları sisteme geri döndürülmektedir. Sıcak baca gazları, fırın içerisindeki tuğla

içeren bir dizi bölmeden geçirilir, tuğlalar tarafından soğurulan ısı fırına verilen yakıtı ve havayı ısıtmak için kullanılmaktadır [2].

Hava üflemleri tekniklerde, kullanılan havanın, oksijen içeren, hacimce % 20'lik kısmı safsızlıkların oksitlenmesini sağlamak ve geri kalan, başlıca azottan oluşan, % 80'lik kısım ise fırına soğuk girip sıcak olarak terk etmektedir. Bu da ısının dışarı taşınarak işlemin termal verimliliğini düşürmektedir. Oksijen üflemleri teknikler geliştirilerek bu problem ortadan kaldırılmıştır [2,13].

Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, dünyada üretilen çeliğin % 65,3'ü bazik oksijen işlemi ile üretilmektedir. Ancak, Türkiye'de bu oran elektrik ark işlemi lehine olmaktadır [14].



Şekil 3.3: Dünyada çeliğin üretim türlerine göre dağılımı [14].

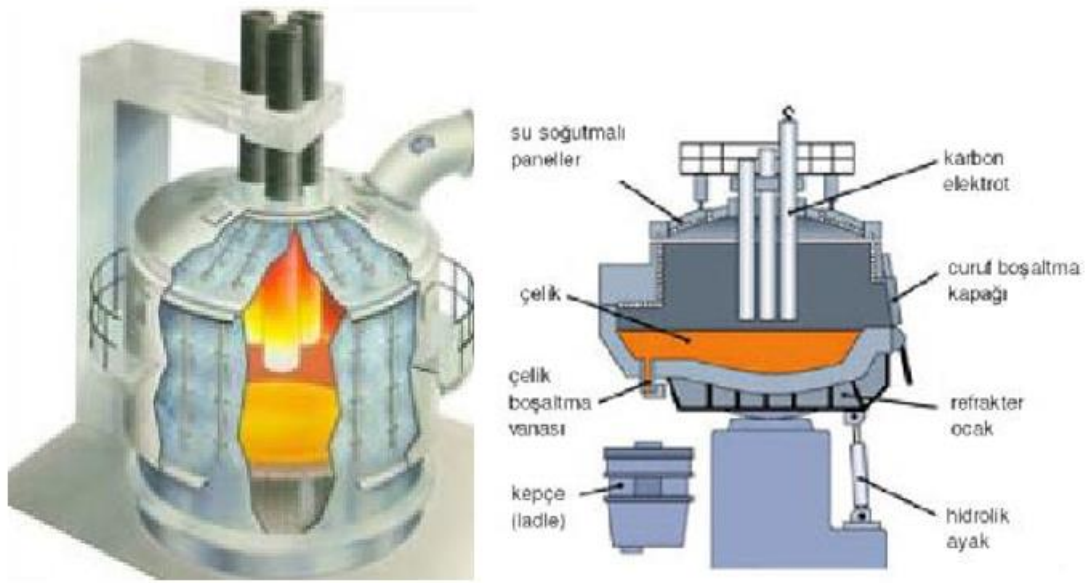
3.2.1 Yüksek fırınlar

Yüksek fırınlar (YF), demirli malzemelerin içeriğinde bulunan demir oksidin indirgenmesi sonucunda oluşan ve fiziksel olarak sıcak metale (sıcak maden, sıvı pik) dönüştürülmesini sağlayan işlemin gerçekleştirildiği fırınlardır. Entegre tesislerin ana üretici pozisyonunda olan yüksek fırınlar, görünüm olarak çelik bir baca şeklinde olup, iç tarafı özel malzemeler ile örtülüdür [15].

Yüksek fırınların kurulma amacı çelikhanenin ihtiyacı olan sıvı ham demirin üretilmesidir. Yüksek fırın, demir cevheri, pelet, sinter gibi demirli malzemeler ile kireçtaşı, kuvarsit, dolomit gibi cüruf yapıcı malzemelerin metalurjik kokun yanması ile eritilerek sıvı ham demirin elde edildiği bir fırındır. Yüksek fırınların tepe, gövde, marator (durak), bosh (karın) ve hazne olarak adlandırılan kısımları vardır [12].

3.2.2 Elektrik ark fırını

Elektrik ark fırını işleminde, çeliğin ergimesi ve saflaştırılması için gereken ısı yanma yerine elektrik enerjisi ile sağlanmaktadır . Hurda metal ve kireçle doldurulan fırın içerisine fırın kapağında yer alan elektrotlar indirilir. Elektrotlardan geçen elektrik akımı, hurda metal ve elektrotlar arasında ark yaparak hurda metalin ergimesi için gereken yüksek ısıyı ortaya çıkarır. Hurda metaldeki karbon, silisyum, manganez gibi safsızlıkları oksitlemek için sisteme oksijen verilir. Oksit formundaki bu safsızlıklar kireçle birleşerek cürufu meydana getirmektedir. Şekil 3.4’de elektrik ark fırını görüntüsü verilmiştir [2].

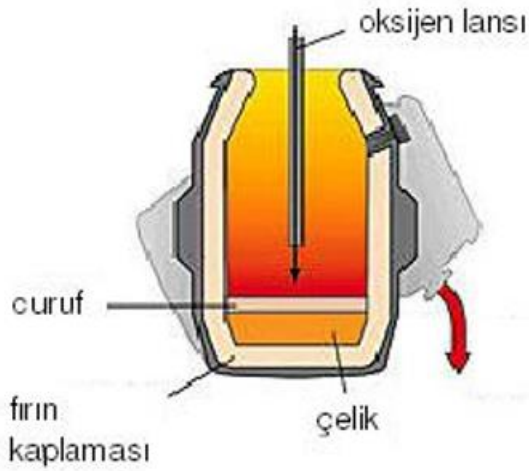


Şekil 3.4: Elektrik ark fırını görüntüsü [2].

3.2.3 Bazık oksijen fırını

Bazık oksijen işleminde; ergimiş haldeki pik demir ve hurda metal kullanılır. Fırın içerisine yüksek basınçta, safa yakın derecede oksijen gazı verilerek yaklaşık 1.700°C 'lik bir sıcaklığa erişilir. Bu sıcaklık hurda metalin ergimesine ve karbonun uzaklaşmasına sebep olur. Yanma sonrası açığa çıkan safsızlıklar fırına ilave edilen ergiticiler (kireç veya dolomit) ile tepkimeye girerek cüruf fazını oluşturur. Cürufu meydana getiren bu safsızlıklar; karbon (karbon monoksit formunda), silisyum, manganez, fosfor ve az miktarda sıvı halde demir oksitlerden oluşmaktadır. Şekil 3.5’de BOF görünümü verilmiştir [2].

Bazik oksijen fırınlarında, genellikle, % 70-80 oranında yüksek fırından gelen sıvı metal (sıvı pik) ile kalan kısmını çelik hurdası, kireç taşı, dolomit ve deoksidantların oluşturduğu şarj kullanılır. Uygun döküm sıcaklığında istenilen karbon yüzdesine erişmek için konvertere şarj edilecek ham maddelerin cinslerinin ve miktarlarının ayarlanması gerekir. Fırın % 100 sıcak metal ile şarj edilir ve oksijen ile üflenirse, sıcak metal içindeki karbon ve diğer yabancı elemanların oksijen ile birleşmesi sonucunda çok fazla ısı meydana geldiği için sonunda dökülemeyecek kadar sıcak bir çelik elde edilir. Bunu önlemek için konvertere soğutucu olarak hurda şarj edilir. Hurdanın erimesi karbon ve diğer yabancı elemanların yanması esnasında meydana gelir, Bu, elemanların oksijen ile yanması sonucu verdikleri ısıya bağlıdır. Konverter, % 75 hurda ve % 25 sıcak pik demir ile şarj edilirse sıcak metal içindeki karbon ve diğer elemanların oksijen ile yanması sırasında verdikleri ısı hurdanın yalnız küçük kısmını eritir. Bu bakımdan fırınların uygun miktarlarda sıcak pik demir, hurda veya cevher ile şarj edilmesi gerekir [15].



Şekil 3.5: Bazik oksijen fırını görünümü [2].

4. CÜRUF OLUŞUMU, ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Demir çelik üretiminde ortaya çıkan atık ve yan ürünlerin %90'ını cüruflar, toz ve çamur oluşturmaktadır. Bu cüruflarda genel olarak silika, kalsiyum oksit, magnezyum oksit, alüminyum ve demir oksit karışımları bulunmaktadır [15].

Demir çelik cürufları 2 ana başlık altında sınıflandırılabilir.

1-Yüksek Fırın Cürufu

2-Çelikhane Cürufları

- a) Elektrik ark fırını cürufu
- b) Bazik oksijen fırını cürufu

4.1 Yüksek Fırın Cürufları

YF cürufu, yüksek sıcaklık altında demir cevherlerindeki yabancı oksitler, kireçtaşı, dolomit, kuvarsit (çakmaktaşı) ve manganez gibi ilave malzemeler ile kok külünün birleşerek erimesi sonucu meydana gelmektedir. Cürufu oluşturan oksitler; SiO_2 , CaO , MgO , FeO , MnO ve en fazla CaS bulunan sülfürlü bileşiklerdir. Cürufu meydana getiren oksitlerin katı halden sıvı hale geçişindeki ısı aralığı ne kadar büyükse, fırında, kok parçalarının arasını dolduran gazların hareketine ve dağılımına engel olan yapışkan kütle de fırında hacimsel olarak o kadar büyük bir bölgeyi kaplamaktadır. Bu nedenle cürufu oluşturan malzemenin yumuşama ısı aralığı olabildiğince düşük olmalıdır [15].

4.2 Çelikhane Cürufları

Çelikhane cürufları iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar Elektrik ark fırını cürufu ve Bazik oksijen fırını cüruflarıdır.

4.2.1 Elektrik ark fırını cürufu

Elektrik ark ocakları, hammadde olarak hurda demir-çelik kullanır. Elektrik ark ocakları yakıt olarak gaz yakıtlar yerine yüksek güçte elektrik kullanır. Elektrik ark ocaklarının ısı kaynağı grafit elektrotlar ile sağlanır ve hammaddeler istenen fırın sıcaklığına ulaştıkça elektrotlar da fırının alt bölgelerine ilerler . Eriyik hammaddeler içindeki demir ile birlikte alüminyum, silikon, mangan, fosfor ve karbon gibi okside olmuş, istenmeyen safsızlıklar, fırına ilave edilen sönmüş kireç veya dolomit ile giderilir ve sistemden çelikhane fırın cürufu olarak uzaklaştırılır. Sisteme ayrıca karbon tozları ilavesi yapılır. Karbon tozları karbon monoksit gazını oluşturur ve cürufun köpükleşmesini ve çelik bileşiminden uzaklaşmada verimi ve ısı transferini artırır. Elde edilen eriyik cüruf soğutulur. Soğutmak için kullanılan hava, su veya hava-su karışımı, soğutma hızı, soğutma süresi ve yaşlandırma işlemi olarak adlandırılan soğutulmuş cürufların açık havada uzun süreler bekletilmesi uygulamaları cürufun fiziksel özelliklerinde oldukça etkilidir. Cüruflara uygulanan soğutma işlemlerinde gözlenen en önemli değişiklikler, cürufun gözenek ve boşluk yapısı, hızlı soğutmada gözlenen camsı özellik ve dolayısıyla camsı geçiş sıcaklığı ve serbest kalsiyum veya serbest magnezyum oksit miktarındaki değişikliklerdir. Soğutma işlemleri sonucunda elde edilen cüruflar kırıcı ve öğütücülerden geçirilerek istenilen boyutlara indirgenir [16,17].

4.2.2 Bazik oksijen fırını cürufu

Bazik oksijen fırını cürufları hakkında açıklamalar, oluşum işlemleri ve BOF cüruflarının özellikleri bu başlık altında incelenmiştir.

Bazik Oksijen Fırınlarının temel amacı karbon giderimidir. Fırına sıvı pik ile birlikte hem tonaj arttırımı hem de soğutucu amaçlı olarak hurda da şarj edilir. Cüruf yapıcılar ilave edilerek saf oksijen üflenir. Üflenilen oksijen ile karbon ve diğer safsızlıkların giderimi sağlanır. Fırında oluşan reaksiyonlar sonucunda oksitlerden meydana gelen cüruf oluşur. Oluşan cüruf içerisinde temel oksitler olarak CaO, SiO₂, MnO, P₂O₅, FeO ve MgO bulunur. MgO ve CaO dışındaki bütün oksitler sıvı pik ve hurda kaynaklı olarak oluşur. CaO'ın kaynağı cüruf yapıcılar ve MgO'nun kaynağı ise ilave edilen cüruf yapıcılar yada fırının magnezit karbon olan çalışma astarıdır [14].

4.3 Cürufların Kullanım Alanları

Cüruflar inşaat sektörü, ulaştırma yatırımları ve bir çok alanda kullanılabilmektedir. Bunların büyük orandaki kısmı inşaat sektöründedir. Çimento üretiminde ve beton katkı malzemesi olarak cüruflar bir çok ülkede kullanılmaktadır. Bunların dışında dolgu malzemesi olarak da bir çok yerde kullanımları devam etmektedir. Bu kullanımların incelenmesinde cüruflar ile ilgili pek çok çalışma yapılmış ve akademik yayın yapılmıştır.





5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Karayolu Teknik Şartnamesinde belirtilen özelliklere göre;

- Alt Temel Tip B
- Temel Tip A
- Plent-Miks Temel Tip 1

granülometrilerine ait Ereğli Demir Çelik Fabrika'sından temin edilen bazık oksijen fırını cürufları kullanılmıştır.

Yapılan deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri ve karışım oranları 2013 yılında çıkartılmış olan Karayolları Teknik Şartnamesine göre değerlendirilmiştir [7].

5.1 Karayolu Teknik Şartnamesine (2013) Göre Alt Temel Tabakasının Özellikleri

Bu çalışmada Ereğli Demir Çelik fabrikası bazık oksijen fırını cürufunun Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 verilerine göre Alt Temel Tip-B granülometrilerine göre kullanılabilirliği incelenmiştir.

5.1.1 Alt temel tabakasının malzeme özellikleri

Şekil 5.1'de belirtilen granülometri limitleri içinde kalacak şekilde hazırlanan malzemenin su ile karıştırılarak, tesviyesi tamamlanmış üstyapı tabanı üzerine bir veya birden fazla tabakalar halinde, projelerde belirtilmiş plan, profil ve enkesitlere uyacak şekilde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabaka, alt temel tabakasıdır.

Elek Açıklığı		TİP-A	TİP-B
mm	in	% Geçen	% Geçen
75	3	100	
50	2	-	100
37,5	1 1/2	85 - 100	80 - 100
25	1	-	60 - 90
19	3/4	70 - 100	45 - 80
9,5	3/8	45 - 80	30 - 70
4,75	No.4	30 - 75	25 - 55
2,00	No.10	-	15 - 40
0,425	No.40	10 - 25	10 - 20
0,075	No.200	0 - 12	0 - 12

Şekil 5.1: Alt temel malzemesi gradasyon limitleri.

Malzemenin; 0,075 mm eleği geçen kısmı 0,425 mm eleği geçen kısmının 2/3'ünden fazla olmamalıdır.

Alttemel yapımında kullanılacak malzeme; kum, çakıl, teras çakılı, ayrılmış, bozuşmuş kaya, cüruf, kırmataş, kazınmış asfalt ve benzeri malzemelerden tek tip veya kazınmış asfalt malzemesi kullanılması durumunda (maksimum % 25) iki veya daha fazla malzemenin karışımından oluşmalıdır.

AASHTO T 27, T 11 veya TS 1900-1 standartlarında belirtilen metotlar ile bulunan granülometri, Şekil 5.1'de verilen granülometri limitleri dahilinde ve iyi derecelenmiş olmalıdır.

Alttemel malzemesi Şekil 5.2'deki şartlara uygun olmalıdır.

DENEY ADI		ŞARTNAME LİMİTLERİ	DENEY STANDARDI
% Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO ₄ ile kayıp, %		≤ 25 (MS ₂₅)	TS EN 1367 - 2
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %		≤ 45 (LA ₄₅)	TS EN 1097 - 2* AASHTO T 96
Yassılık İndeksi, %		35	BS 812
		≤ 30 (FI ₁₀)	TS EN 933-3*
Su Emme (Kaba ve İnce Agregada), %		≤ 3,5 (WA ₂₅ 3,5)	TS EN 1097 - 6
Likit Limit, %		≤ 25	TS 1900-1 AASHTO T 89
Plastisite İndeksi, %		≤ 6	TS 1900 - 1 AASHTO T 90
Kil Topağı ve Dağılabilen Dane Oranı, maksimum %		<u>İri Malzeme</u> (4,75 mm elek üstü) ≤ 2	ASTM C 142
Organik Madde, (%3 NaOH ile)		Negatif	TS EN 1744-1
METİLEN MAVİSİ MB g/kg	İnce agreganın 0/2 mm'lik kısmına	≤ 4,0 (MB _{4,0}) ≤ 5,5 (MB _{5,5})**	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 5,5 (MB _{5,5})**	
* Referans Metot ** Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.			

Şekil 5.2: Alttemel malzemesinin fiziksel özellikleri.

Modifiye Proktor Deneyi ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığın % 98'sine kadar sıkıştırılan numunelerin yaş CBR değerleri Tip-A için minimum % 30, Tip-B için ise minimum % 50 olmalıdır.

Tek tip veya kazınmış asfalt malzemesi dahil iki veya daha fazla tane boyutu grubu ile oluşturulacak alttemel malzemesinin su dahil plentte karıştırılıp finişer ile serilmesi durumunda bu malzeme plent-miks alttemel olarak tanımlanır. Bu durumda Tip-B granülometri limitlerine uyulmalıdır.

5.1.2 Alt temel tabakasının yapım şartları

Alttemel malzemesi, inşaat ve tesviyesi tamamlanarak hazırlanmış taban üzerine, sıkışmış kalınlığı maksimum 20 cm olacak şekilde, tabakalar halinde, kontrollü bir şekilde serilip sıkıştırılmalıdır.

Ancak, sıkıştırma makinelerinin kapasitelerinin yüksek olması durumunda, tabaka kalınlığı deneylerle kontrol edilerek kontrollü bir şekilde maksimum 30 cm ye kadar arttırılabilir. Alttemelin birden fazla tabakalar halinde serilmesi durumunda, tabaka kalınlıklarının tamamı eşit kalınlıkta olmalıdır.

Alttemel malzemesinin Plent-miks olması durumunda serim kesinlikle finişer ile daha kontrollü bir şekilde yapılmalıdır.

Yol taban yüzeyinde gevşek kısımlar varsa onarılmalı, serbest malzeme, çukurlar, kabarmalar bulunmamalı, alttemel malzemesi donmuş taban üzerine veya alttemelin istenilen sıkışması sağlanmadan önce donabileceği hallerde serilmemelidir.

Serme işi, homojen olmalı, eşit miktarlarda ve kalınlıklarda sermeyi sağlayacak özellikteki araçlarla yapılmalı ve bir kerede serilip sıkıştırılan tabakanın sıkışmış kalınlığı şartnamede verilen değerleri geçmemelidir.

Malzeme yayıldıktan sonra bütün kesit genişliğince iş makinaları ile uygun bir şekilde tesviyesi yapılmalıdır. Bu sırada, malzemenin granülometrisinin bozulmamasına özen gösterilmelidir.

Alttemel malzemesinin serilmesi, tesviye edilmesi esnasında malzemeye ilave edilecek su miktarı Tip-A için Modifiye Proktor ile bulunan su içeriğinin ± 2 'si, Tip-B için $W(opt-2)$ ile $Wopt$ arasında olmalıdır.

Alttemel malzemesi, Şekil 5.3’de verilen değerler esas alınarak sıkıştırılmalıdır.

TİP-A	Sıkışma, Minimum %	96	Modifiye Proctor TS 1900-1, AASHTO T 180
	Optimum Su İçeriği %	Wopt ± 2	Modifiye Proctor TS 1900-1, AASHTO T 180
TİP-B	Sıkışma, Minimum %	98	Modifiye Proctor TS 1900-1, AASHTO T 180
	Sıkışma, Minimum %	95	Titreşimli Tokmak TS 1900-1, BS 1377
	Optimum Su İçeriği %	(Wopt-2) - Wopt	Modifiye Proctor TS 1900-1, AASHTO T 180
	Optimum Su İçeriği %	Wopt ± 1	Titreşimli Tokmak TS 1900-1, BS 1377

Şekil 5.3: Alttemel sıkıştırma kriterleri.

Sıkıştırma, çalışma ağırlığı şartnamede belirtilmiş makinalar ile yapılmalı, kullanılan malzeme ve serilen tabaka kalınlığına uygun sıkıştırma tekniğinin uygunluğu, işin başlangıcında yapılacak bir deneme alanında belirlenmelidir. Deneme alanı büyüklüğü şartnamelere uygun olmalıdır, bu deneme yapılmadan imalat yapılmamalıdır.

Sıkıştırma, yolun eksenine paralel olarak yapılmalı, düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kaymalıdır. Yatay kurplarda kurbun içinden başlanmalı ve dış tarafa doğru devam edilmelidir. Her geçişte bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma, silindirik genişliğinin en az % 10’u kadar bindirme yapılmalıdır. Şeritlerin tümünde ilk geçiş yapıldıktan sonra ikinci geçiş yapılmalıdır.

Sıkıştırma sırasında görülen segregasyona uğramış bölümler, bu bozulan bölümdeki malzemenin kaldırılarak yerine uygun malzeme getirilmesi ve sıkıştırılması ile düzgün bir şekilde düzeltilmelidir.

Arazi kuru birim ağırlığının belirlenmesinde kullanılacak metotlar, Şekil 5.4’de verilmiştir.

Deney Metodu		Malzemenin Maksimum Tane Boyutu		Deney Standardı
		in	mm	
Kum Konisi Metodu	6” çapında	2	50	TS 1900-1, AASHTO T 191
	12” çapında	3	75	TS 1900-1, AASHTO T 191
Kasnak Metodu	10” çapında	1 1/2	37,5	AASHTO T 181
	12” çapında	3	75	AASHTO T 181
Nükleer Metot		1 1/2	37,5	ASTM D 6938-10, AASHTO T 310-11

Şekil 5.4: Arazi kuru birim ağırlığı tayin metotları.

Yapılan kontroller sonucu, serilen ve sıkıştırılan tabakanın Alttemel Sıkıştırma Kriterleri Tablosunda verilen oranlarda sıkışmadığını gösterdiği takdirde, gerekiyorsa ilave sulama yapılarak istenilen birim ağırlığa erişinceye kadar sıkıştırma devam edilmelidir.

Gerekli durumlarda sıkışma kontrolünde esas alınan laboratuvar maksimum kuru birim ağırlığında, AASHTO T 224'e göre iri agrega oranındaki değişiklikten dolayı düzeltme yapılmalıdır.

Yapım esnasında kullanılan malzemeyi ve oluşturulan tabakayı kontrol etmek için, belirli aralıklarla yapılması gerekli deneyler ve sayıları, Şekil 5.5'de verilmiştir.

Deney Adı	Minimum Deney Sayısı ve Deney Sıklığı
Dane Boyutu Dağılımı TS 1900-1, AASHTO T 27,11	Her 2.000 m ³ 'de 1 deney
Likit Limit, Plastik Limit TS 1900-1, AASHTO T 89, 90	Her 2.000 m ³ 'de 1 deney
Metilen Mavisi TS EN 933-9	Her 2.000 m ³ 'de 1 deney
Parçalanma Direnci (Los Angeles) TS EN 1097-2, AASHTO T 96	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca 6 ayda bir deney
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO ₄ ile kayıp TS EN 1367-2, AASHTO T 104	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca 6 ayda bir deney
Tablo-401-5 Kalite Kontrol Deneyleri	
Yassılık İndeksi BS 812, TS EN 933-3	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca ayda bir deney
Su İçeriği TS 1900-1	Her 2.000 m ³ 'de 1 deney
Kuru Birim Ağırlık-Su İçeriği İlişkisi TS 1900-1, AASHTO T 180	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca ayda bir deney
Yaş CBR TS 1900-2, AASHTO T 193	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca ayda bir deney
Sıkışma %' si Belirleme Testleri	
1. Kum Konisi Metodu; TS 1900-1, AASHTO T 191	Her tabakanın 1.000 m ² 'de 1 deney
2. Kasnak Metodu; AASHTO T 181	Her tabakanın 1.000 m ² 'de 1 deney
3. Nükleer Metot *; ASTM D 6938-10, AASHTO T 310-11	Her tabakanın 250 m ² 'de 1 deney
* İşin başlangıcında en az 10 farklı noktada nükleer metot ile yapılan sıkışma deney sonuçları ile Kum Konisi veya Kasnak metotlarından biri ile yapılan sıkışma deney sonuçlarının korelasyonu yapılacaktır. Sıkışma kontrolünün nükleer metotla yapılması durumunda, ayrıca her 2.500 m ² 'de bir, diğer metotlardan birisi ile de sıkışma kontrolü yapılacaktır. Kalite kontrol deneyleri, en az bu tabloda belirtilen sayıda olmak üzere, kontrol mühendisince uygun görülen ara ve sıklıkta yapılacaktır.	

Şekil 5.5:Alt temel tabakası kalite kontrol deneyleri.

Alttemel tabakasının sıkıştırılması tamamlandıktan sonra, üzerine temel tabakası serilmeden önce gerekli kontroller uygun şekilde yapılmalıdır.

Doğrulama testi, alttemel tabakasının ve ona destek olan üstyapı tabanının üniform olup olmadığını belirlemek, alttemel veya üstyapı tabanında yer alan zayıf ve sıkışmamış kesimleri belirlemek için uygulanır.

Bu testin uygulanması sırasında;

1. Doğrulama testinde kullanılacak ekipman pnömatik lastik tekerlekli silindir, çift dingilli kamyon veya sulamada kullanılan arazöz olabilir.

2. Bu test için kullanılacak lastik tekerlekli silindirin tekerleri eşit aralıkta olmalı ve yükü eşit şekilde dağıtılmalıdır.

3. Test için kullanılacak ekipman/araç 30-40 ton ağırlığında olmalıdır.

4. Ekipman/araca ait lastikler; 90-150 psi (620-1.040 kPa) değerinde basınç kapasitesine sahip olmalıdır. Test uygulanmadan önce lastiklerin basınçları ölçülmeli ve kayıt edilmelidir.

Doğrulama testinin yapılacağı alttemel malzemesinin su içeriği, test sırasında en az Wopt-4'ü değerinde olmalıdır.

Test yapılmasında kullanılacak ekipman/araç lastik basınçları ve üzerine yüklenecek yük miktarı belirlenerek ayarlanmalıdır.

Doğrulama testi sırasında ekipman/araç hızı 4-8 km/saat olacak şekilde hareket etmelidir. Ancak, ekipman/ aracın hareket hızı üzerinden geçtiği tabakada oluşabilecek esneme, defleksiyon, çökme vb. unsurların belirlenmesi ve ölçülmesine izin verecek şekilde ayarlanmalıdır.

Doğrulama testi bir veya daha fazla sayıda pas yapılarak gerçekleştirilmelidir. Bu geçişler sırasında lastik tekerlekler alttemel tabakasının farklı alanlarına basmalıdır.

Doğrulama testi ile belirlenen, oynayan, çöken, üniform stabilite göstermeyen alttemel kesimlerinde inceleme yapılarak problemin kaynağı araştırılmalıdır. Bu kesimde yer alan alttemel malzemesinden ve üstyapı tabanından numune alınarak incelenmelidir.

Doğrulama testi sonucunda tespit edilen tüm zayıf, çöken kesimlerde yol tabanı açılmalı, problemlili kesimler kazılıp atılmalı yerine alttemel veya seçme malzeme

getirilerek iyileştirilmelidir. Ayrıca alttemel tabakası üzerinde belirlenen tüm yüzey düzgünsüzlükleri giderilmelidir.

5.2 Karayolu Teknik Şartnamesine (2013) Göre Temel Tabakasının Özellikleri

Bu çalışmada Ereğli Demir Çelik fabrikası bazik oksijen fırını cürufunun Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 verilerine göre Temel Tip-A granülometrisine göre kullanılabilirliği incelenmiştir.

Temel tabakası, agrega, çakıl, kırılmış çakıl, kırma taş, kum, cüruf veya benzeri malzemeler kullanılarak hazırlanır.

Temel tabakası yapımında kaba agrega olarak çakıl, kırılmış çakıl, teras çakılı, kırmataş, kırılmış cüruf kullanılabilir.

-Çakıl, düzensiz şekil ve boylarda, su etkisi ile yuvarlanmış veya aşınmış halde bulunan doğal agregadır.

-Kırılmış çakıl, kırım sonunda elde edilmesi istenen maksimum tane boyutunun en az 1,5 katı daha büyük boyutlu çakılın veya kayaçların kırılmasıyla elde edilen agregadır.

-Teras çakılı, doğal oluşumlar halinde bulunan, kum, silt ve kil ile karışık çakıldır. Çok düşük trafikli ya da önemsiz yollarda fiziksel özelliklerinin şartnameye uygun olması koşuluyla, kırılmaksızın kullanılabilir.

-Kırmataş, kalker, dolomit, bazalt, granit, kuvarsit veya benzeri kayaçların kırılmasıyla elde edilen agregadır.

-Kırılmış cüruf, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun kırılmasıyla elde edilen agregadır. Bu agreganın AASHTO T 19'a göre saptanan gevşek birim ağırlığı 1.100 kg/m³'den az olmamalıdır.

Temel yapımında kullanılacak olan malzemenin kaba kısmı (4,75 mm elek üzeri) aşağıdaki tabloda verilen özelliklere sahip olmalıdır. Kaba agregada donmuş malzeme ve herhangi bir nedenle karışmış yabancı malzeme bulunmamalıdır. Kaba agreganın olması gereken fiziksel özellikler Şekil 5.6'da verilmiştir.

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO ₄ ile kayıp, %	≤ 20 (MS ₂₀)	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %	≤ 35 (LA ₃₅)	TS EN 1097-2* AASHTO T-96
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane Oranı, %	≤ 1,0	ASTM C-142
Yassılık İndeksi, %	≤ 30	BS 812
	≤ 25 (FI ₂₅)	TS EN 933-3*
Organik Madde, (%3 NaOH ile)	Negatif	TS EN 1744-1 (Madde 15.1)
Su Emme (Kaba ve İnce Agregada), %	≤ 3,0 (WA ₂₄ 3)	TS EN 1097-6 (Madde 8)
* Referans Metot		

Şekil 5.6: Kaba agrega fiziksel özellikleri.

Temel tabakası yapımında ince agrega olarak, doğal veya kırılmış çakıl, kırma kum, doğal kum, cüruf kumu veya benzeri malzemeler ya da bunların karışımları kullanılmalıdır.

-Doğal kum, 2 mm ile 0,075 mm elekler arasında kalan ve taşların doğal yollarla bozuşma ve ayrışmasından meydana gelen malzemedir.

-İnce çakıl, 9,5 mm ile 2 mm elekler arasında kalan çakıldır.

-Taş tozu, taş ocaklarından kırım sırasında elde edilen ince malzemedir.

-Cüruf kumu, Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufunun elenmesi ile elde edilen malzemedir.

Temel yapımında kullanılacak olan malzemenin ince kısmı (4,75 mm elekten geçen), aşağıdaki tabloda verilen özelliklere uygun olmalıdır. İnce agraganın fiziksel özellikleri Şekil 5.7’de verilmiştir.

Deney Adı		Şartname Limitleri	Deney Standardı
Likit Limit, %		NP	TS 1900-1 AASHTO T 89
Plastisite İndeksi, %		NP	TS 1900-1 AASHTO T 90
Organik Madde, (%3 NaOH ile)		Negatif	TS EN 1744-1 (Madde 15.1)
Metilen Mavisi, MB, g/kg	İnce agreganın 0/2 m'lik kısmına	$\leq 3,0 (MB_{3,0})$ $\leq 4,5 (MB_{4,5})^*$	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	$\leq 4,5 (MB_{4,5})^*$	
* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.			

Şekil 5.7: İnce agreganın fiziksel özellikleri.

Granüler Temel (GT), Plent-Miks Temel (PMT) ve Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel (ÇBGT) yapımında kullanılacak su, yağ, tuz, asit, alkali gibi endüstri atıkları ve bitkisel atıklar içermemelidir.

ÇBGT için kullanılacak suyun 1 litresinde 2 gramdan fazla SO_3 olmamalıdır

5.2.1 Granüler temel tabakasının malzeme özellikleri

Granüler temel tabakası; çakıl, kırılmış çakıl, kırılmış cüruf veya kırmataş ile ince malzeme kullanılarak Şekil 5.8'de verilen granülometri limitleri içerisinde uygun 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, şartnamesine uygun olarak serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Elek Açıklığı		% Geçen		
mm	in	A	B	C
50	2	100		
37,5	1 1/2	80 - 100	100	
25	1	60 - 90	70 - 100	100
19	3/4	45 - 80	60 - 92	75 - 100
9,5	3/8	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4,75	No.4	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2,00	No.10	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0,425	No.40	8 - 20	10 - 25	12 - 30
0,075	No.200	2 - 8	0 - 12	0 - 12

Şekil 5.8: Granüler temel tabakası gradasyon limitleri.

Granüler temel malzemesinin 4,75 mm elek üzerinde kalan kısmının ağırlıkça en az % 50'sinin iki veya daha fazla yüzü kırılmış olmalıdır. Malzemenin 0,075 mm eleği geçen kısmı, 0,425 mm eleği geçen kısmının 2/3'ünden fazla olmamalıdır.

Modifiye Proctor Deneyi (AASHTO T 180, TS 1900-1) ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığının %98'ine sıkıştırılan numunelerin yaş CBR (AASHTO T 193, TS 1900-2) değerleri, % 100'den az olmamalıdır.

Granüler temel malzeme granülometrinin Şekil 5.1'de verilen A, B, C tiplerinden hangisine uygun olacağı, aşağıdaki maddelere göre tespit edilmeli ve hangi tip temelin kullanılacağı projesinde belirtilmelidir.

- Asfalt betonu ile kaplanacak yollarda, kullanılacak Granüler Temel (GT) malzemesi gradasyonu A, B tiplerinden birisine uygun olmalıdır.

- Sathi kaplama yapılacak Devlet Yollarında, Granüler Temel Tip A veya B kullanılmalıdır.

- Sathi kaplamalı yapılacak il yollarında ise proje koşullarına bağlı olarak Granüler Temel A, B veya C tipi malzemelerinden biri kullanılabilir.

5.2.2 Granüler temel tabakasının yapım şartları

Granüler temel tabakası, iki farklı tane boyutu grubundaki agregaların karıştırılmasıyla hazırlanacak ise, karıştırma işi sabit veya hareketli bir plentte ya da yolda yapılmalıdır.

Granüler temel tabakasının ikiden fazla tane boyutu grubunun karıştırılmasıyla hazırlanmasının söz konusu olduğu durumlarda karışım, mutlaka plentte yapılmalı ve karıştırma işlemi, çalışmanın Plent-Miks Temel Kısımında anlatılan esaslara uygun olarak yapılmalıdır.

Malzemelerin yolda karışım yapan makinelerle yapılması durumunda, makine agreganın tümünü yerden alıp gerekli oranda su ile karıştırıp serecek kapasite ve özelliğe sahip olmalıdır. Bu özelliklere sahip olmayan makine kullanılmasına kesinlikle izin verilmemelidir.

Karıştırmanın greyderle yapılması durumunda, malzemeler yolda yan yana ve ayrı ayrı olarak depolanmalıdır. Bu malzemelerden kullanım yüzdesi az olan diğerinin üzerine itilerek üst üste getirilmeli, sonrasında yola aktarılarak karıştırılmalı ve

yayılmalıdır. Aktarma işlemine malzeme homojen olarak karıştıncaya kadar devam edilmelidir. Homojen olmayan malzeme sıkıştırılmamalıdır, aktarma sırasında malzemenin segregasyona ve homojenliğinin bozulmamasına dikkat edilmelidir.

Malzemede sıkışmanın sağlanabilmesi için gerekli olan su, malzemeye aktarma esnasında katılmalıdır. Su miktarı Modifiye Proctor veya Titreşimli Tokmak Metodu ile bulunan optimum su içeriğine göre hesaplanmalı ve sıkıştırma sırasında su içeriğinde Titreşimli Tokmak metoduna göre $W_{opt} \pm 1$ limitleri dahilinde, Modifiye Proctor metoduna göre ise $(W_{opt}-2) - W_{opt}$ 'den az olmamalıdır.

Granüler Temel Malzemesi, çalışmanın “Alttemel Tabakası” bölümünde belirtilen esaslar dahilinde yapımı, sıkıştırılması ve yüzey düzgünlüğü tamamlanmış, gerekli eğim verilmiş alttemel tabakası üzerine, bir veya birden fazla tabakalar halinde, kontrollü bir şekilde serilip sıkıştırılmalıdır.

Granüler temelin serileceği yüzey üzerinde gevşek kısımlar varsa tamir edilmeli, bozulmalar bulunmayacak temel malzemesi donmuş yüzey üzerine veya temelde istenilen sıkışma sağlanmadan donabileceği durumlarda ve sıcaklıklarda serilmemelidir.

Serme işi homojen ve üniform miktar ve kalınlıklarda sermeyi sağlayabilecek düzeneğe sahip olan makine ile yapılmalı ve bir defada serilip sıkıştırılan tabakanın sıkışmış kalınlığı maksimum 20 cm olmalıdır.

Serme işlemine, malzemenin alındığı yere en uzak noktadan başlanmalı, malzemenin alındığı yere doğru devam edilmelidir. Serme işi, sıkıştırma işinden en fazla 200 m ileride olmalı, her iş günü sonunda serilmiş bütün malzeme sıkıştırılmış olmalıdır. GT malzemesi projede belirtilen kalınlığın fazlalığı nedeniyle birden fazla tabakalar halinde serildiğinde, tabaka kalınlıkları birbirlerine eşit olarak ayarlanmalı ve her tabaka, üzerine yenisi serilmeden önce istenen birim ağırlığa kadar düzgünce sıkıştırılmış olmalıdır. GT malzemesinin serilmesinde bir yayıcı makine kullanılacaksa malzeme ayrılmış halde yolun bir tarafına konulmalı, ancak yağmurlu mevsimlerde ve kış aylarında platform kenarında bırakılmamalıdır.

Serilmiş ve sıkıştırılmamış malzeme üzerinden kesinlikle trafik geçirilmemelidir. Malzeme yayıldıktan sonra bütün kesit genişliğince greyderle tesviyesi yapılmalıdır. Bu sırada malzeme gradasyonunun bozulmamasına ve bozuklukların olmamasına dikkat edilmelidir. GT malzemesi Şekil 5.9'da verilen değerler esas alınarak

sıkıştırılmalıdır. Kullanılan malzeme ve serilen tabaka kalınlığına uygun olan sıkıştırma tekniği işin başında bir deneme kesimi yapılarak belirlenmelidir. Deneme kesimi en az üç silindirleme şeridinden oluşmalı ve 100 m'den az olmamalıdır.

Minimum Sıkışma, %	98	Modifiye Proctor TS 1900-1 ASHTO T 180
	95	Titreşimli Tokmak TS 1900-1 BS 1377
Optimum Su İçeriği, %	$W(opt - 2) - Wopt$ $Wopt \pm 1$	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

Şekil 5.9: Granüler temel tabakası sıkıştırma kriterleri.

Sıkıştırma, yolun eksenine paralel olarak yapılmalı, düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kaymalıdır. Yatay kurplarda kurbun içinden başlanmalı ve dışına doğru devam edilmelidir. Her geçişte bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma, silindir genişliğinin %10'u kadar bindirme yapılmalıdır. Şeritlerin tümünde ilk geçiş tamamlanmadan ikinci geçiş yapılmamalıdır.

Sıkıştırma sırasında görülen segregasyona ve bozulmalara uğramış kesimler, bu malzemenin tamamen kaldırılarak, yerine uygun malzeme getirilmesi ve uygun şekilde sıkıştırılması ile düzeltilmelidir.

Tabakanın yerinde birim ağırlığının saptanmasında en büyük tane boyutuna göre Arazi Kuru Birim Ağırlığı tayin metodları tablosunda verilen metotlardan uygun olan kullanılmalıdır. Yapılan kontroller sonucunda tabakanın belirtilen oranlarda sıkışmadığının tespit edilmesi halinde, gerek duyulursa ilave sulama yapılarak istenilen birim ağırlığa erişilinceye kadar sıkıştırma işlemine devam edilmelidir.

Sıkıştırma bitirildikten sonra, yüzey düzgünlüğünün enine ve boyuna kontrolü 4 m uzunluğunda, esnemeyen ve kontrole uygun masterla yapılmalıdır. Yolun boyuna kontrolü için master yol eksenine paralel olarak ve yüzeyin genişliği boyunca aralıklarla yol yüzeyine konulduğunda, masterın yola temas eden herhangi iki noktası arasındaki bölümde, masterla yol yüzeyi arasındaki açıklık 15 mm'den fazla olmamalıdır. Bitmiş tabakanın enine kontrolünde yol eksenine dik olarak konulacak master ile bulunacak açıklık 15 mm'den fazla olmamalıdır.

Granüler temelin seriminden kısa bir süre sonra bitümlü temel tabakası inşa edilecekse, granüler temelin üzerine astar tabakası uygulaması yapılmamalıdır.

Granüler temel tabakasının uzun süre açık kalacağı ve bu süre içinde yağış beklenmesi, trafiğe açılması söz konusu olduğu ve üzerine gelecek sıcak karışım tabakalarının toplam kalınlığı 10 cm'den az olacağı durumlarda astar tabakası uygulaması yapılmalıdır.

Yapım esnasında kullanılan malzemeyi ve oluşturulan tabakayı kontrol etmek için, belirli aralıklarla yapılması gerekli deneyler Şekil 5.10'da verilmiştir. Tablodaki verilere uygun şekilde malzeme kullanılmalıdır.

Deney Adı	Minimum Deney Sayısı ve Deney Sıklığı
Dane Boyutu Dağılımı TS 1900-1, AASHTO T 27,11	Her 1.000 m ³ 'de 1 deney
Likit Limit, Plastik Limit TS 1900-1, AASHTO T 89, 90	Her 1.000 m ³ 'de 1 deney
Metilen Mavisi TS EN 933-9	Her 1.000 m ³ 'de 1 deney
Parçalanma Direnci (Los Angeles) TS EN 1097-2, AASHTO T 96	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca 6 ayda bir deney
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO ₄ ile kayıp TS EN 1367-2, AASHTO T 104	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca 6 ayda bir deney
Yassılık İndeksi BS 812, TS EN 933-3	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca ayda bir deney
Kırılma %'si	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca ayda bir deney
Su İçeriği TS 1900-1	Her 1.000 m ³ 'de 1 deney
Kuru Birim Ağırlık-Su İçeriği İlişkisi TS 1900-1, AASHTO T 180	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca ayda bir deney
Yaş CBR TS 1900-2, AASHTO T 193	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca ayda bir deney
Sıkıştırma %'si Belirleme Testleri	
Kum Konisi Metodu TS 1900-1, AASHTO T 191	Her Tabakanın 1.000 m ² 'sinde 1 deney
Kasnak Metodu AASHTO T 181	Her Tabakanın 1.000 m ² 'sinde 1 deney
Nükleer Metot* ASTM D-6938 10, AASHTO T 310-11	Her Tabakanın 250 m ² 'sinde 1 deney
* İşin başlangıcında en az 10 farklı noktada nükleer metot ile yapılan sıkıştırma deney sonuçları ile Kum Konisi veya Kasnak metotlarından biri ile yapılan sıkıştırma deney sonuçlarının korelasyonu yapılacaktır. Sıkıştırma kontrolünün nükleer metotla yapılması durumunda, ayrıca her 2.500 m ² 'de bir, diğer metotlardan birisi ile de sıkıştırma kontrolü yapılacaktır. Kalite kontrol deneyleri en az bu tabloda belirtilen sayıda olmak üzere, kontrol mühendisince uygun görülen ara ve sıklıkta yapılacaktır	

Şekil 5.10: Granüler temel tabakası kalite kontrol deneyleri.

5.2.3 Plent-miks temel tabakasının malzeme özellikleri

PMT tabakası kırılmış çakıl, kırılmış cüruf, kırma taş ve ince malzeme kullanılarak Şekil 5.11’de verilen granülometri değerlerine uygun olacak şekilde, düzgün granülometri verecek şekilde, kaba ve ince olmak üzere en az üç ayrı tane boyutu grubunun uygun oranda su ile bir plentte karıştırılmasıyla hazırlanan malzemenin uygun hazırlanmış yüzey üzerine bir ya da birden fazla tabaka halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşturulan tabakadır.

Elek Açıklığı		% Geçen	
mm	in	Tip - I	Tip – II
37,5	1 ½	100	
25	1	72 - 100	100
19	¾	60 - 92	80 - 100
9,5	3/8	40 - 75	50 - 82
4,75	No.4	30 - 60	35 - 65
2,00	No.10	20 - 45	23 - 50
0,425	No.40	8 - 25	12 - 30
0,075	No.200	0 - 10	2 - 12

Şekil 5.11: PMT tabakasının gradasyon limitleri.

PMT tabakası kalınlığının 15 cm ve üzerinde olması durumunda, PMT Tip-1, plent-miks temel tabakası kalınlığının 15 cm’den düşük olması durumunda ise PMT Tip-1 veya Tip-2 kullanılmalıdır.

5.2.4 Plent-miks temel tabakasının yapım şartları

Plentte hazırlanan temel tabakalarında kullanılacak olan karışım gradasyonu, her tane boyutu grubuna ait malzemeyi temsil edecek şekilde en az 10 adet elek analizi ortalaması esas alınarak hazırlanmalıdır.

Plent-Miks Temel Tabakası Gradasyon Limitleri tablosunda verilen gradasyon limitleri içerisinde kalmak koşuluyla, hazırlanan işyeri karışım gradasyonunda 4,75mm elek üzerinde kalan malzemenin tamamının, iki veya daha fazla yüzü kırılmış agregadan oluşmalıdır.

Ana granülometri limitleri içinde kalmak koşuluyla, uygulanacak tolerans limitleri Şekil 5.12’de verilmiştir.

Dane Büyüklüğü	Tolerans Limitleri
4,75 mm ve daha büyük elekler için	± 7
4,75 mm - 0,075 mm arası elekler için	± 5
0,075 mm elek için	± 2

Şekil 5.12: PMT tabakasının tane büyüklüğüne bağlı olarak tolerans limitleri.

Karışımında kullanılacak olan su miktarında Titreşimli Tokmak (TS 1900-1, BS 1377) ile bulunan optimum su içeriğinden $W_{opt} \pm 0,5$ veya Modifiye Proctor (TS 1900-1 AASHTO T 180) deneyi ile bulunan optimum su içeriğinden ($W_{opt}-1$) - W_{opt} aralığında olmalıdır.

İşyeri karışım formülünün hazırlanması ve gerekli laboratuvar deneylerinin yapılabilmesi için, karışımın hazırlanmasına başlanmadan en az 15 gün önce, her tane grubuna ait yeterli miktarda temsili agrega numuneleri ile bu tane gruplarına ait şantiye elek analizleri sonuçları, Bölge veya Merkez laboratuvarlarına teslim edilmelidir.

Karışım imalatının başlayabilmesi için, karışım formülü ve plant kapasitesi göz önüne alınarak, kullanılacak her tane boyutu grubundaki malzemeden en az 15 gün sürekli çalışmaya yetecek miktarda malzeme önceden hazırlanmış olmalıdır.

Tasarım granülometrisine uygun olarak hazırlanan ve Modifiye Proctor Deneyi (AASHTO T 180, TS 1900-1) yöntemi ile bulunan Maksimum Kuru Birim Ağırlığının % 100'üne sıkıştırılmış numunelerin yaş CBR (AASHTO T 193, TS 1900-2) değerleri % 120'den az olmamalıdır.

Agrega bölümünde tanımlanan kaba ve ince agrega grupları ayrı ayrı hazırlanmalı ve en az segregasyon olacak şekilde depolanmalıdır. Agreg a gruplarının birbirine karışmamasına özen gösterilmeli ve depolama süresi boyunca malzemeye zararlı maddelerin karışması önlenmelidir. Depo sahasından malzeme alımı sırasında, deponun tabandan itibaren 20-30 cm yukarısından malzeme alınmalıdır. Depo tabanından malzeme yüklenmemelidir.

Karışımın hazırlanmasında, işyeri karışım formülü esas alınmalıdır. Agregaların ve suyun karıştırılması işlemi harman (batch) tipi veya sürekli çalışan plantlerde

yapılmalıdır. Karışımın hazırlanmasında işyeri karışım formülüne göre verilecek besleme oranlarına kesinlikle uyulmalıdır.

Karışımın hazırlanması sırasında, beslemede ve optimum su miktarında kesiklilik veya düzensizlik olmamalı, üretimde gerekli kontroller yapılmalı, plant sık sık durdurulup çalıştırılmamalıdır. Karışım homojen olmalı, su ile karışmamış topaklar bulunmamalıdır. Besleme hızları ayarlanmalıdır. İmalatta kalite ve üretim sürekliliği sağlanmalıdır.

Karışımın işyeri granülometrisinde ve optimum su içeriğinde bölge ve gerektiğinde merkez laboratuvarının onayı alınmadan hiçbir değişiklik yapılmamalıdır.

Karışımın işyerine taşınması damperli kamyonlarla yapılmalıdır. Kamyon adedi plantin kapasitesi ve taşıma mesafesi de göz önüne alınarak karışım plantinin kesiksiz çalışmasını sağlayacak sayıda olmalıdır. Karışımın rutubetini kaybetmemesi için gerekli önlemler alınmalıdır.

Plentte hazırlanan temel tabakası malzemesi, çalışmanın “Alt Temel Tabakası” bölümünde belirtilen şekilde, yapımı ve düzeltmeleri tamamlanmış, gerekli eğim verilmiş alttemel tabakası üzerine serilmelidir.

Yüzey üzerinde gevşek kısımlar, serbest malzeme, çukurlar, kabarmalar veya çatlak kısımlar bulunmamalı, varsa uygun şekilde onarılmalıdır.

Plentte hazırlanan temel tabakalarının yapımı sırasında, aşağıda belirtilen şartlara uyulmalıdır.

Temel tabakasının yapımına başlanırken bölgenin coğrafi özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Genel olarak yapım süresi, Mart ayı başı ile Ekim ayı sonuna kadar olan zamandır. Bu süre, mevsim şartlarına göre belirlenir. Yağışlı, don ve karlı havalarda serim yapılmamalıdır. Çok sıcak havalarda yüzeydeki suyun buharlaşmasına engel olunmalı, gerektiğinde yüzey nemlendirilmelidir. Serilen bir tabakanın bozulmasına meydan verilmemeli, kısa bir süre içerisinde üzeri kaplanmalıdır.

PMT tabakasının yüzeyi,

- PMT yüzeyinin çok uzun süre açık kalacağı ve bu süre içinde yağış beklenmesi durumunda,

- PMT üzerine gelecek toplam BSK kalınlığı 10 cm veya daha ince ise,

- Yolun uzun bir süre taşıt trafiğine açık tutulacağı durumlarda,

PMT tabakasının yüzeyi astarlanmalı veya idarenin talimatı ile sathi kaplama yapılmalıdır.

Astarlama yapılması durumunda yol yüzeyi kuru olmalı, yüzeyden itibaren 3 cm'lik kısımda rutubet % 2'den fazla olmamalıdır. Hava sıcaklığının 5 °C'dan aşağı olduğu, satıhta aşırı rutubet bulunduğu, genelde hava şartlarının uygun olmadığı durumlarda astar tabakasının uygulaması yapılmamalıdır.

Astar malzemesi olarak TS EN 15322'e uygun, Fm2B2, Fm2B3, TS EN 13808'ye uygun malzemelerinden birisi kullanılmalı ve malzeme yüzeye 0,5 - 2,0 l/m2 miktarında uygulanmalıdır.

Plentte hazırlanan temel tabakasının, üstyapı takviyesi olarak uygulanması halinde, özellikle köprü yaklaşımları ile alt geçitlerde, yol üst kotunda meydana gelecek değişiklikler nedeniyle kot farklılıkları ve gabari daralmaları olmaması için gerekli önlemler alınmalıdır.

Karışımın serimi için finişer kullanılmalıdır. Bir seferde serilip sıkıştırılan tabakanın sıkışmış kalınlığı 20 cm'den fazla olmamalıdır.

Malzemenin özelliğine ve kullanılan sıkıştırma makinelerinin kapasitesine bağlı olarak gerekiyorsa serilip sıkıştırılan tabaka kalınlığı 20 cm'den az olabilir. Bu gibi durumlarda, serilip sıkıştırılan tabaka kalınlığı yapılacak deneme kesiminde saptanmalıdır.

Serim sırasında segregasyona meydan verilmemeli, malzeme yolun plan, profil ve enkesitlerine uygun olarak serilip sıkıştırılmalıdır. Serme genişliği, üstyapı projesinde belirtildiği gibi olmalıdır. Gerektiğinde, işin durumuna göre serme genişliği ve kullanılacak finişer sayısı kontrol mühendisi tarafından belirlenmelidir.

Karışım yola serilir serilmez silindiraja başlanmalıdır. İstenilen sıkışmanın sağlanabilmesi için gerekli olan tabaka kalınlığı, sıkıştırma makinesi ve geçiş sayıları, serilen kesimin ilk 100 m'lik kısmında denenerek belirlenmelidir. Bu deneme kesimi en az üç silindirleme şeridinden oluşmalıdır.

Sıkıştırma, çalışma ağırlığı en az 11.000 kg, statik çizgisel yükü 30 kg/cm'den büyük, iki frekanslı vibrasyon sistemli düz bandajlı silindirler ve lastik başına düşen yükü en az 3.500 kg olan lastik tekerlekli silindirlerle yapılmalıdır.

Sıkıştırma, yolun eksenine paralel olarak yapılmalı, düşük kotlu kenardan başlayarak eksene doğru kaymalıdır. Yatay kurplarda, kurbun içinden başlanmalı ve dışına doğru devam edilmelidir. Her geçişte, bir önceki geçişte sıkıştırılan kısma silindir genişliğinin % 10'u kadar bindirme yapılmalıdır. Şeritlerin tümünde ilk geçiş tamamlanmadan ikinci geçiş yapılmamalıdır.

Sıkıştırma sırasında tespit edilen segregasyona uğramış kesimler; bu kesimlerde malzemenin kaldırılarak yerine uygun malzeme getirilmesi ve sıkıştırılması yoluyla düzeltilmelidir.

Bordür, kalıplar ve duvarların yanları gibi silindirin yanaşamayacağı yerlerde sıkıştırma, vibrasyonlu plakalı sıkıştırıcılar, vibrasyonlu tokmaklar veya elle çekilebilen küçük vibrasyonlu silindirlerle yapılmalıdır.

Yeterli sıkıştırma ile erişilmesi istenen minimum sıkışma yüzdeleri Şekil 5.13'de verilmiştir.

Minimum Sıkışma, %	100	Modifiye Proctor TS 1900-1 ASHTO T 180
	97	Titreşimli Tokmak TS 1900-1 BS 1377
Optimum Su İçeriği, %	$W_{(opt - 1)} - W_{opt}$ $W_{opt} \pm 0,5$	Modifiye Proctor Titreşimli Tokmak

Şekil 5.13: PMT tabakasının sıkıştırma kriterleri.

Yapılan kontroller sonucunda gerekli sıkışmanın sağlanmadığı anlaşılırsa, sıkıştırmaya devam edilmelidir. Eğer temel tabakası birden fazla tabakalar halinde seriliyorsa, bir sonraki tabakanın serimi, ilk tabakanın sıkışmasının tamamlandığının testlerle anlaşılmasından sonra yapılmalıdır.

Yeterli silindiraja rağmen gerekli sıkışmanın elde edilemediği tabakalar kazınarak kaldırılmalı ve yerine yeni karışım serilip sıkıştırılmalıdır.

Sıkıştırılmış temel kalınlığı, projede gösterilen kalınlığın % 10'undan farklı olursa, yüzey kabartılacak, gerekli ilave veya azaltma yapılarak tekrar sıkıştırılmalıdır.

Bitmiş tabakanın, herhangi bir noktası ile tabakanın proje kotu arasında ± 15 mm'den fazla kot farkı olmamalıdır.

Sıkıştırmanın tamamlanmasından sonra yüzey düzgünlüğünün enine ve boyuna kontrolü teknik şartnamede belirtildiği şekilde yapıldığında yüzeyde ± 15 mm'den fazla kot farkı görülmemelidir.

Yapım esnasında kullanılan malzemeyi ve oluşturulan tabakayı kontrol etmek amacıyla, belirli aralıklarla yapılması gerekli Kalite Kontrol Deneyleri, minimum deney sayısı ve sıklıkları Şekil 5.14'de verilmiştir.

Deney Adı	Minimum Deney Sayısı ve Sıklığı
Dane Boyutu Dağılımı TS 1900-1, AASHTO T 11,27 - Kaba agrega - İnce agrega - Karışım	Her 500 m ³ 'de 1 deney Her 300 m ³ 'de 1 deney Her 1.000 ton'a 1 deney
Likit Limit, Plastik Limit TS 1900-1, AASHTO T89 90	Her 1.000 ton'a 1 deney
Parçalanma Direnci, (Los Angeles) TS EN 1097-2, AASHTO T 96	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca 6 ayda bir deney
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO ₄ ile kayıp TS EN 1367-2, AASHTO T 104	Her malzeme veya gradasyon değişikliğinde ve ayrıca 6 ayda bir deney
Yassılık İndeksi BS 812, TS EN 933-3	Karışım dizaynında ve her ay bir deney
Kırılmalılık %'si	Karışım dizaynında ve her ay bir deney
Su İçeriği TS 1900-1	Her 1.000 tona 1 deney
Kuru Birim Ağırlık-Su İçeriği İlişkisi TS 1900-1, AASHTO T 180	Karışım dizaynında ve her ay bir deney
Yaş CBR TS 1900-2, AASHTO T 193	Karışım dizaynında ve her ayda bir deney
Sıkıştırma %'si Belirleme Testleri	
Kum Konisi Metodu; TS 1900-1, AASHTO T 191	Her tabakanın 1.000 m ² 'de 1 deney
Kasnak Metodu; AASHTO T 181	Her tabakanın 1.000 m ² 'de 1 deney
Nükleer Metot *; ASTM D 6938-10, AASHTO T 310-11	Her tabakanın 250 m ² 'de 1 deney
* İşin başlangıcında en az 10 farklı noktada nükleer metot ile yapılan sıkıştırma deney sonuçları ile Kum Konisi veya Kasnak metotlarından biri ile yapılan sıkıştırma deney sonuçlarının korelasyonu yapılacaktır. Sıkıştırma kontrolünün nükleer metotla yapılması durumunda, ayrıca her 2.500 m ² 'de bir, diğer metotlardan birisi ile de sıkıştırma kontrolü yapılacaktır. Kalite kontrol deneyleri en az bu tabloda belirtilen sayıda olmak üzere, kontrol mühendisince uygun görülen ara ve sıklıkta yapılacaktır	

Şekil 5.14: PMT tabakası kalite kontrol deneyleri.

5.3 Uygulanan Deneyler

Temel ve alt temel tabakasında kullanılacak Bazik Oksijen Fırını Cürufalarının, 2013 yılında yayınlanan Karayolları Teknik Şartnamesine göre uygunluğunun incelenmesi için yapılan deneyler bu bölümde anlatılmıştır. Deneylerin tamamı İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Ulaştırma ve Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında yapılmıştır.

5.3.1 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi

5.4 TS EN 1367-2 standardı kullanılarak yapılan bu deneyde amaç, malzeme üzerinde küçük malzemelerin oluşmasına sebep olabilecek hava etkileri sebebiyle oluşan ufalanmayı ölçmektir. Bu deneyde magnezyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır.

10mm ile 14 mm arasında 500 gr ağırlığında BOF cürufu yıkanmış ve $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ deki etüvde 24 saat bekletilmiştir. Kurutma işleminden sonra malzeme tekrar elenmiş ve ağırlığı tartılmıştır (A). Malzemeler bu işlemde sonra hazırlanmış olan magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde koyularak $17 \pm 0,5$ saat süre çözelti içerisinde bekletilmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15: Magnezyum sülfat çözelti malzemesi ve hazırlanmış çözeltiye koyulmuş numune.

Süre sonunda malzemenin suyu süzölmüş ve $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ deki etüvde 24 saat bekletilmiştir. Etüvden çıkartılan malzeme oda sıcaklığına gelene kadar kendi halinde soğuması beklenmiş ve hazırlanmış çözeltiye tekrar konulmuştur. Çözelti içerisinde tekrar $17 \pm 0,5$ saat süre bekletilmiş ve suyu süzöldükten sonra etüv içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Bu işlem toplam 5 defa yapıldıktan sonra BOF cürufu, üzerinde magnezyum sülfat çözeltisi kalmayınca kadar iyice yıkanmıştır

(Şekil 5.16). Suyu süzülen numune tekrar $100 \pm 5^\circ\text{C}$ deki etüvde 24 saat bekletilmiş ve 10 mm elekten elenmiştir. Elek üzerinde kalan numune tartılıp not edilmiştir (B). Bu malzeme ağırlığı ile ilk ağırlık arasındaki fark bize donma kaybını vermiştir. Donma kaybı yüzdesi denklem 5.1 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Donma Kaybı (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (5.1)$$

A: İlk kuru ağırlık

B: Son kuru ağırlık



Şekil 5.16: Etüvde kurutulan numune ve çözeltiden süzülen numune.

5.3.2 (Los Angeles) aşınma deneyi

ASTM C131 standardı kullanılarak yapılan bu deneyde amaç, cürufun aşınmaya karşı dayanımının belirlenmesidir. Standarda göre B sınıfı seçilen 5000 gr cüruf yıkanmış ve etüve konmuştur. $100 \pm 5^\circ\text{C}$ deki etüvde 24 saat bekletildikten sonra 2500 gr 19-12,5 mm elek arasında kalan malzeme ve 12,5-9,5 mm elek arasında kalan malzeme 10 gr tolerans ile toplam 5000 gr olarak hazırlanmıştır (A) (Şekil 5.17).



Şekil 5.17: Los Angeles deneyi için hazırlanan malzeme.

Hazırlanan malzemeler standartta belirtilen çelik küreler ile beraber Los Angeles aşınma makinası içerisine koyularak kapağı düzgün bir şekilde kapatılmıştır. Malzeme dakikada 30-33 tur devir ile 500 devir çevrildikten sonra makinadan çıkartılmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18: Los Angeles deney makinası ve deneyin yapılışı.

Çıkartılan numune 12 numaralı elek (1,68 mm) ten elendikten sonra eleğin üzerinde kalan malzeme yıkanmış, $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ deki etüvde 24 saat bekletildikten sonra tartılmıştır(B).

Aşınma kayıpları denklem 5.2 ile bulunmuştur.

$$\text{Los Angeles Aşınma Kaybı (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (5.2)$$

A: İlk ağırlık.

B: Son ağırlık [18].

5.3.3 Yassılık indeksi deneyi

BS 812-105,2 standardına uygun olarak yapılan yassılık indeksi deneyi, kullanılan malzemelerdeki yassı madde oranını tespit etmek amacıyla yapılmıştır. Standartta belirtilen elek aralıklarına göre malzemeler ayrılmış ve her bir eleğin üzerinde kalan numuneler yıkanmış, $100 \pm 5^\circ\text{C}$ deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş, tane büyüklükleri ayrı ayrı sınıflandırılarak tartılmış ve numuneleri toplam ağırlığı(M1) hesaplanmıştır. Daha sonra numuneler, ait olduğu sınıflara göre şartnamede belirtilen silindirik çubuklu eleklerden elenmiştir (Şekil 5.19). Her elek üzerinde kalan ve geçen malzeme miktarları ayrı ayrı belirlenmiş ve deney föyüne yazılmıştır. Ardından silindirik çubuklu eleklerden geçen toplam malzeme ağırlığı belirlenmiştir.(M2)



Şekil 5.19: Yassılık indeksi deneyi.

Yassılık indeksi denklem 5.3 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Yassılık İndeksi (\%)} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (5.3)$$

M1: Deneye tabi tutulan toplam malzeme ağırlığı (gr)

M2: Elekten geçen toplam malzeme ağırlığı (gr) [19].

5.3.4 Su emme deneyi

TS EN 1097-6 standardına göre yapılan deneyde BOF cürufunun su emme ve özgül ağırlık değerleri bulunmuştur. Standartta tarif edildiği gibi, kaba ve ince malzemeler için deneyler ayrı ayrı yapılmıştır.

Kaba agregalar için yapılan deneyde 4-37,5 mm elek arasında kalan malzemelerle hazırlanan numuneler, yıkandıktan sonra tel sepete yerleştirilmiştir. Malzemeler Şekil 5.20’de görüldüğü gibi, 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra tartılmıştır (M2).



Şekil 5.20: Tel sepet ile numunelerin su içerisinde tartılması.

Tartma işleminden sonra malzeme su içerisinden çıkartılmış ve kuru bir bez üzerine Şekil 5.21’deki gibi boşaltılmış ve yüzeyleri dikkatli bir şekilde kurutulmuştur. Yüzeyi kuru suya doymun malzemeler tartılmıştır (M1). Bu sırada boş bir sepet de su içerisinde tekrar tartılarak ağırlığı not edilmiştir (M3). Daha sonra numuneler

100 ± 5°C deki etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve ağırlıkları tartılarak not edilmiştir(M4).



Şekil 5.21: Doygun kuru yüzey özgül ağırlık tayini.

Su emme yüzdeleri ve özgül ağırlık değerleri aşağıdaki bağıntılar ile bulunmuştur[20].

$$\text{Zahiri özgül ağırlığı } \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (5.4)$$

$$\text{Kuru özgül ağırlığı } \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.5)$$

$$\text{Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı } \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.6)$$

$$\text{Su emme (Absorpsiyonu) (\%): } W_{A_{24}} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4} \quad (5.7)$$

İnce malzemeler için 0,063-4 mm açıklıklı elekler arasındaki malzemeler yıkanmış ve kurutulmuştur. Piktometre içerisi su ile tamamen doldurulduktan sonra dışı kurularak tartılmıştır(M3). Deneyde kullanılan piktometre Şekil 5.22’de gösterilmiştir. Daha sonra piktometre içerisindeki su boşaltıldıktan sonra içerisine numuneler konmuş ve tekrar su doldurularak 24 saat bekletilmiştir. İçerisindeki hava vakum uygulanarak uzaklaştırılmıştır. Daha sonra üst tarafı berrak görüne kadar

beklenmiş ve piktometre taşana kadar su ile doldurulmuştur. Dış yüzeyi kurulandıktan sonra tartılmıştır (M2). Bu işlem sonrasında piktometre içerisindeki malzeme çıkartılarak yüzey nemi gittikten sonra tartılmıştır (M1). Numune 100 ± 5°C deki etüvde 24 saat bekletildikten sonra tekrar tartılmıştır (M4).

İnce malzemeler için su emme yüzdeleri ve özgül ağırlık değerleri aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmıştır.

$$\text{Zahiri özgül ağırlığı } \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (5.8)$$

$$\text{Kuru özgül ağırlığı } \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.9)$$

$$\text{Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı } \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.10)$$

$$\text{Su emme (Absorpsiyonu) (\%): } WA_{24} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4} \quad (5.11)$$



Şekil 5.22: Piktometre.

5.3.5 Plastik limit ve likit limit deneyi

Bu çalışmada plastik limit deneyi TS 1900-1 standardı göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Plastik limit deneyi, zeminin henüz plastik kıvamda bulunduğu en düşük su muhtevasını belirlemek için yapılan bir deneydir [21].

Plastik limit deneyinde , TS1900-1 standardındaki örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilmiş ve likit limit deneyi için

hazırlanmış 40 numaralı elekten (0,425 mm) geçen yaklaşık 20 gr numune alınmış ve numune homojen bir duruma gelene ve küçük bir top biçimini alabilene kadar cam plâka üzerinde, su ile iyice karıştırılıp yoğurulmuştur. Küre halindeki numune, 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alana kadar cam plâka ile el ayası arasında yuvarlanmıştır. Malzeme silindir haline getirilmeye çalışılmış ancak başarılı olunamamıştır (Şekil 5.23). Standarda göre malzemenin plastik özellikte olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.23: Plastik limit tayini.

Yapılan deneyde Erdemir Bazik Oksijen Fırını Cürufunun plastik özellikte olmadığı belirlendiği için, likit limit deneyi yapmaya gerek olmamıştır.

5.3.6 Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi

Bu çalışmada deney, şartnamede belirtildiği gibi ASTM C-142 Standardına göre yapılmıştır. Standartta elek aralıkları ince ve kaba agrega olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Çizelge 5.1’ de gösterildiği gibi, ince malzeme 1,18-4,75 mm elek arası olarak alınmıştır. Kaba malzeme 4,75-9,5 mm, 9,5-19 mm ve 19-37,5 mm elek aralıkları ile üç ayrı grupta sınıflandırılmıştır. Standarda göre seçilen elek aralıklarında hazırlanan BOF cürufu, yıkama işlemi gerçekleştirilmeden $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ etüvde 24 saat bekletilmiştir. Kurutulan numuneler ayrı ayrı tartılarak deney föyüne ilk kuru ağırlık olarak kaydedilmiştir (A). Daha sonra bu numuneler ayrı ayrı tepsilerde su üzerinde malzeme kalmayacak şekilde yerleştirilmiş ve 24 saat su içerisinde bekletilmiştir. Bekletilen numuneler Çizelge 5.1’ de belirtilen elekler ile

su altında yıkanarak suda çözülen dağılabilen taneler ve kil topakları elenmiştir (Şekil 5.24). Bu şekilde numuneler dağılabilen taneler ve kil topaklarından arındırılmıştır. Elek üzerinde kalan malzemeler daha sonra tekrar $100 \pm 5^\circ\text{C}$ etüvde 24 saat bekletilmiş ve ağırlıkları tartılmış, son kuru ağırlık olarak deney föyüne kaydedilmiştir (B).

Denklem 5.12 kullanılarak kil topakları ve dağılabilen tane oranları hesaplanmıştır.

$$\text{Dağılabilen tane oranı (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (5.12)$$

A: İlk kuru ağırlık

B: Son kuru ağırlık [22].

Çizelge 5.1: Numune tane boylarına karşılık gelen elek boyutları.

Numune Tane Boyutları (mm)	Kil Topağı ve Dağılabilen Taneleri Gidermek İçin Kullanılan Elekler
İnce Agregası	
1,18-4,75	0,85 mm (No. 20)
Kaba Agregası	
4,75-9,5	2,36 mm (No. 8)
9,5-19	4,75 mm (No. 4)
19-37,5	4,75 mm (No. 4)



Şekil 5.24: Numunelerin su altında yıkanması.

5.3.7 Organik madde deneyi (%3 NaOH ile)

Agrega içerisindeki hayvansal ve bitkisel atıkların çürümesi ile oluşan maddeler organik madde olarak tanımlanır. Bu çalışmada KTŞ’nde belirtildiği gibi, TS EN 1744-1 standardına göre deney yapılmış ve malzeme içerisinde organik madde bulunup bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu deney için 1 litre su içerisinde 30 gr NaOH eklenerek çözelti hazırlanmıştır. Bu şekilde elde edilen % 3 lük NaOH çözeltisi hazır bekletilirken, numune $40 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ’lik etüvde kurutulmuştur. Daha sonra etüvden çıkartılan malzemeler 4 mm elekten elenerek, elek altına geçen malzemeler ayrı bir kaba alınmıştır. Hazırlanmış olan %3 lük NaOH çözeltisi cam bir tüpe 80 mm yüksekliğe gelinceye kadar eklenmiş ve bunun üzerine toplam yükseklik 120 mm olana kadar malzeme numunesi ilave edilmiştir. Tüpün kapağı kapatıldıktan sonra hava kabarcıklarının iyice çıkması için tüp 1 dakika boyunca güçlü bir şekilde çalkalanarak daha sonrasında 24 saat hareket etmeyecek bir şekilde dinlenmeye bırakılmıştır. Şekil 5.25’de organik madde içeriği deneyinde kullanılan NaOH çözeltisi ve tüpü gösterilmiştir.



Şekil 5.25: NaOH çözeltisi.

Dinlenme sonucunda deney tüpündeki renk değişimine göre numunede organik madde bulunup bulunmadığı belirlenmektedir. NaOH çözeltisi organik maddelerle reaksiyona girerek koyu renk almaktadır. Çözelti rengi ne kadar koyu ise numunede o kadar fazla organik madde bulunmaktadır denmektedir. Renk açık sarıya kadar olan berraklıkta ise organik maddelerin önemli miktarda olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır ve deney sonucu negatif olarak tanımlanmaktadır [23].

5.3.8 Metilen mavisi deneyi

TS EN 933-9 standardı kullanılarak yapılan metilen mavisi deneyinin amacı, kullanılan malzemenin 0,063 mm elek altına geçen ince malzemelerin içinde bulunan kil içeriğinin tespit edilmesidir. Metilen mavisi suda çözündüğü zaman, çözelti içerisinde metilen mavisi katyonları ve klorit anyonları oluşmaktadır. Kil numunesi karışım içerisine girdiği vakit, klorit iyonları kil mineral yüzeyleri ile birleşmiş mevcut olan katyonlar ile yer değiştirerek kil parçacıklarının yüzeyi metilen mavisi ile kaplanmaktadır[24].

BOF cürufundan, 0-2 mm tane büyüklüğüne 200 gr'dan fazla olacak şekilde 2 ayrı numune hazırlanmıştır. Numunelerin bir tanesinin ilk ağırlığı tartılarak kaydedilmiş(M) ve daha sonra $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 24 saat kurutulmuştur. Etüvden sabit ağırlığa gelmiş numune çıkartılarak tartılıp not edilmiştir(M'). Aşağıda verilmiş olan formüller ile BOF cürufu için su içeriği (W(%)) hesaplanmış ve kullanılacak ikinci numunenin kuru ağırlığı (M₁) bulunmuştur.

$$W (\%) = \frac{M-M'}{M'} \times 100 \quad (5.13)$$

$$M_1 (\%) = \frac{M_0}{1+W/100} \quad (5.14)$$

Denklemden,

M₀= Test numunesinin ağırlığı [24].

500 ml su kaba koyulduktan sonra üzerine numune eklenmiş ve deney aletindeki (Şekil 5.26) karıştırıcı ile dakikada 600 devir hız ile 5 dakika karıştırılmıştır. Hazırlanmış olan metilen mavisi çözeltisi (10 gr/l) 6 ml olarak karışıma eklenmiştir. Bu ekleme işleminden sonra dakikada 400 devir olarak 1 dakika karıştırılmıştır. Metilen mavisi süzgeç kağıdı üzerine çapı 8-12 mm arasında olacak şekilde damlatılmıştır. Damlanın etrafında en az 1 mm açık mavi oluşması gerekmektedir. Bu halka oluşana kadar karışıma çözelti eklenmiş ve damla kağıdına damla damlatılmıştır. 5 dakika süre kaybolmaması gereken halkayı oluşturmak için eklenen boya çözeltinin hacmi not edilmiştir (V₁). Denklem 5.15 ile metilen mavisi değeri (MB) hesaplanmıştır.

$$MB = \frac{V_1}{M_1} 10 \quad (5.15)$$

M1 = Deney numunesinin kütlesi (gr)

V1 = Eklenen boya çözeltisinin hacmi (ml) [24].



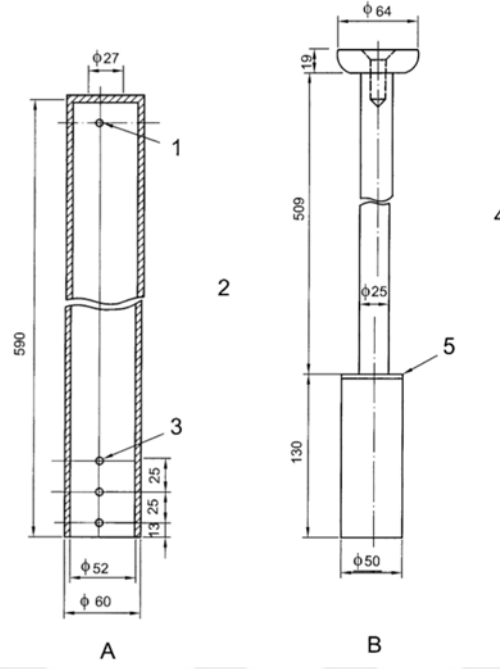
Şekil 5.26: Metilen mavisi deney aleti.

5.3.9 Modifiye proktor deneyi

Optimum su muhtevası ile kuru birim hacim ağırlığı arasındaki ilişki Karayolları Teknik Şartnamesi 2013 te belirtildiği gibi TS 1900-1 Standardına uygun olarak yapılan Modifiye Proktor Deneyi ile belirlenmiştir.

Bu deney belirli bir yolla sıkıştırılan zeminde en büyük kuru birim hacim ağırlığını veren su muhtevasına yakın su içeriklerinde birim hacme sığacak en büyük zemin kütlenin bulunması ile ilgilidir. Deneyde 458 mm serbest düşüş yapan 4,5 kg kütlesinde bir tokmak kullanılmıştır.

Şekil 5.27’de deneyde kullanılan 4,5 kg’lık tokmak ve kılavuzunun şematik görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 5.27: Sıkıştırma deneyi için kullanılan tokmak ve kılavuzu [21].

Bu çalışmada KTŞ 2013 te belirtilen Temel Tip A, Alt Temel Tip B ve PMT 1 tiplerine ait granülometrinin şartnamedeki alt limit, üst limit ve ortalama değerlerine göre karışımlar oluşturulmuş ve bunlar üzerinden deneyler yapılmıştır.

Modifiye proktor deneyinde 19 mm elek altı malzeme kullanılacağı için, her karışım için ayrı ayrı hazırlanan numunelerin 19 mm elek üstü malzemeler, ağırlıkları oranınca 19 mm altındaki eleklerle dağıtılmıştır. Numuneler $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 24 saat bekletilip kurutulmuştur. Deney numuneleri 152,4 mm çapındaki kalıpta, 5 eşit tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Her tabaka 45 cm yükseklikten serbest düşüş yapan 4,5 kg'lık tokmak ile sert yüzey üzerinde, darbeler her tabakanın yüzeyine eşit aralıklarla dağıtılacak şekilde, üzerine 56 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır.

Sıkıştırma işleminden sonra kalıbın üstü çıkartılmış, yüzey cetvel yardımı ile düzeltildikten sonra ağırlıklar kaydedilmiştir. Sıkıştırılan numuneler kalıptan çıkarılarak rutubet oranı için nem numuneleri alınmıştır. Her karışım için toplamda 5 defa yapılan sıkıştırma işlemlerinden çıkartılmış nem numuneleri tartılmış, $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde 24 saat bekletilip kurutulmuş ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Burada ıslak numune ağırlıklarından kuru numune ağırlıkları çıkartılarak numunedeki su miktarı hesaplanmış, miktarın kuru numune ağırlığına bölünmesi ile su muhtevaları hesaplanarak kaydedilmiştir.

Her numune ve her karışım için ayrı ayrı optimum su muhtevaları ve maksimum KBHA'ları bulunmuştur. Şekil 5.28'de BOF cürufu rutubet numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 5.28: BOF cürufu rutubet numuneleri.

5.3.10 CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyi

Bu çalışmada Kaliforniya Taşıma Oranı deneyi ASTM D-1883 standardına göre yapılmıştır. 19 mm elek üzerinde kalan cüruf, ağırlıkları oranınca 19 mm altındaki eleklerle dağıtılmıştır. Her bir granülometri için ayrı ayrı, Şekil 5.29' daki CBR deney aleti ile, yük-penetrasyon bağıntısı bulunmuştur. Silindirik piston sıkıştırılmış deney numunesine itilerek bağıntı bulunmuştur.



Şekil 5.29 : CBR deney aleti.

Proktor deneyi ile elde edilen maksimum KBHA değerlerine karşılık gelen optimum su muhtevalarına göre her bir granülometri için ayrı ayrı deney numuneleri hazırlanmış ve deney yapılmıştır.

152,4 mm çapında ve 177,8 mm yüksekliğindeki CBR kalıbının tabanındaki plaka üzerine metal disk yerleştirilmiş, metal diskin üzerine süzgeç kağıdı yerleştirilmiştir. Hazırlanmış olan CBR numunesi, modifiye proktor deneyindeki gibi 5 eşit tabakaya, 45 cm yüksekten serbest düşüş yapan 4,5 kg tokmak ile her bir tabakaya 56 darbe olacak şekilde sıkıştırılmıştır.

Hazırlanmış olan numuneler, Şekil 5.30'daki gibi CBR deney aletine yerleştirilmiştir. Numune üzerine ağırlıklar yerleştirildikten sonra piston numune üzerine yerleştirilmiş ve zemine itilmiştir. Deney füyünde yer alan boy kısaltmalarına karşılık gelen kuvvet halkası okumaları alınmış ve kaydedilmiştir.



Şekil 5.30: Hazırlanmış olan CBR numunesinin deney aletine yerleştirilmesi.

ASTM D-1883 standardına göre %100 CBR değerine karşılık gelen standart penetrasyon yük eğrisi 2,5 mm’de 1362 kgf, 5 mm’de 2043 kgf olarak verilmiştir. Belirli bir penetrasyonu veren yükün, aynı penetrasyonu standart eğri üzerinde veren yüke oranı, o penetrasyondaki CBR değeri olarak tarif edilmiştir. Her bir numune için, 2,5 mm ve 5 mm penetrasyonlardaki CBR değerleri hesaplanmış, bu iki değerden hangisi yüksek ise, o değer CBR değeri olarak kabul edilmiştir [25].

5.4 DeneySEL Bulgular

Bu çalışmada Ereğli Demir Çelik Fabrikası’ndan temin edilen BOF Cürufu kullanılmıştır. Bu malzemenin fiziksel özellikleri belirlenirken KTŞ 2013 şartnamesi verileri alınmış ve sonuçlar şartname verilerine göre incelenmiştir. Bazik Oksijen Fırını Cürufu’nun yapay agrega olarak esnek üstyapılarda alt temel ve temel tabakalarında kullanımının incelenmesi için uygulanan deneylerin sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir.

5.4.1 Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (donma) deneyi sonuçları

Malzemelerin hava tesirlerine karşı dayanıklılığı, don olaylarının görüldüğü ve gece gündüz sıcaklık farklarının fazla olduğu karasal iklim bölgelerinde ve donma olayı sıklıkla görülen bölgelerde büyük önem arzetmektedir. Don olayı suyun hacmini genişleten bir olaydır ve bu bölgelerde malzemelerin emdiği suyun donması sonucu yaptığı hacim büyümesinin yarattığı ilave yükler ve donma çözünme periyotlarının

sıklığı, yol malzemelerini parçalanmaya maruz bırakır. Bu fiziksel olaya malzemenin su emme özelliğinin büyük bir etkisi bulunmaktadır. Hava tesirlerinin etkisi ile oluşan bu olay sonucu malzemelerde parçalanmalar ve tabakanın gronülometrisinde değişimler meydana gelir. Bu sebeple malzemenin hava tesirlerine karşı dayanıklılığı yolun ömrü ve performansı açısından büyük önem arz etmektedir.

Çizelge 5.2’de Erdemir BOF cürufu kullanılarak yapılan hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi sonuçları ve KTŞ 2013 limit değerleri gösterilmiştir. BOF için yapılan deneyde malzemenin, temel ve alt temel tabakalarında kullanımı için verilmiş olan şartname limitlerine uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuca göre, malzemenin hava tesirlerine karşı dayanıklı olarak yol inşaatında kullanılabileceği belirlenmiştir.

Çizelge 5.2: Hava tesirlerine karşı dayanıklılık sonuçları ve KTŞ limit değerleri.

Numune	Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi İle Kayıp (%)	KTŞ Limitleri (Alt Temel) (%)	KTŞ Limitleri (Temel) (%)
Erdemir BOF Cürufu	12,3	25	20

5.4.2 (Los Angeles) aşınma deneyi sonuçları

Karayolu inşaatında kullanılan malzemeler, yol üzerinden geçen trafik yükleri ve mekanik etkiler sebebiyle aşınmaya, ufalanmaya, parçalanmaya ve kırılmalara uğramaktadır. Bu aşınmalar yol tabakasının standart granülometrilerini bozmakta ve yol tabakalarının bozulmalarına sebep olmaktadır. Temel ve alt temel tabakalarındaki bozulmalar kaplama tabakalarına da zarar verdiği için bu tabakaların aşınmaya karşı dayanıklılığı oldukça önemlidir. Los Angeles aşınma deneyindeki amaç, kullanılan malzemelerin darbelere ve kırılmalara karşı gösterdiği direnci belirlemek ve malzemenin şartname verilerine uygunluğunu kontrol ederek, malzemenin yol malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemektir. Bu çalışmada, parçalanma deneyi TS EN 1097-2’ ye göre yapılmış ve elde edilen sonuçlar KTŞ Limitleri ile birlikte Çizelge 5.3’ de gösterilmiştir.

Deney sonucuna göre bulunan değerler KTŞ maksimum değerleri altında kalmıştır. Bu sonuçlara göre Erdemir BOF cürufunun aşınmaya karşı dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.3: Los Angeles deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri.

Numune	Los Angeles Aşınma Değeri (%)	KTŞ Limitleri (Alt Temel) (%)	KTŞ Limitleri (Temel) (%)
Erdemir BOF Cürufu	17,13	45	35

5.4.3 Yassılık indeksi deney sonuçları

Karayolu kesitindeki tabakalarda yassı tanelerden oluşan malzemenin bulunması, trafik yükleri ve mekanik yükler altında kırılmalara ve standart granülometrinin bozulmasına yol açacağı ve stabiliteyi azaltacağı için, karışımda bulunabilecek yassı malzeme miktarına KTŞ’ de sınırlandırma getirilmiştir. Çizelge 5.4’de, yapılan deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri gösterilmiştir. Yapılan deney, şartname limitlerinin aşılmadığını ve malzemenin yol tabakalarında kullanımının yassılık açısından uygun olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.4: Yassılık indeksi deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri.

Numune	Yassılık İndeksi (%)	KTŞ Limitleri (Alt Temel) (%)	KTŞ Limitleri (Temel) (%)
Erdemir BOF Cürufu	5,6	30	25

5.4.4 Su emme deneyi sonuçları

Çalışmada kullanılan BOF cürufu için kaba ve ince malzemelerin özgül ağırlıklarının tespit edilmesi için yapılan deney sonuçları Çizelge 5.5’de verilmiştir. ASTM C 127’ye göre, yol yapımında kullanılacak kaba agreganın özgül ağırlığının minimum 2,6 gr/cm³ olması gerekmektedir. ASTM C 128’e göre de ince agreganın özgül ağırlığının minimum değerinin 2,25 gr/cm³ olması gerekmektedir. Bu limitlere göre BOF cürufunun bu şartlara uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.5: Kaba ve ince cürufun özgül ağırlık sonuçları.

Numune	gr/cm ³
Kaba Malzeme Zahirî Özgül Ağırlığı	3,63
Kaba Malzeme Kuru Özgül Ağırlığı	3,22
Kaba Malzeme DKY Özgül Ağırlığı	3,43
İnce Malzeme Zahirî Özgül Ağırlığı	3,66
İnce Malzeme Kuru Özgül Ağırlığı	3,20
İnce Malzeme DKY Özgül Ağırlığı	3,42

Yol inşaatında kullanılacak malzemelerin su emme değerleri özellikle donma olayının fazla olduğu bölgelerde oldukça büyük önem arz etmektedir. Malzeme şartnamede belirtilen değerlerden fazla su emme özelliğine sahip ise, donma çözünme olaylarında uğrayacağı parçalanmalar yol tabakalarında bozulmalara sebep olacaktır. Bu sebeple BOF cürufunun test edilen su emme değerleri tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6’ da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar temel ve alt temel tabakalarında KTŞ maksimum limit değerlerinin altında kalmıştır. Oldukça gözenekli bir yapıya sahip olmasına rağmen BOF cürufunun su emme açısından bu tabakalarda kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir.

Çizelge 5.6: Kaba ve ince cürufun özgül ağırlık sonuçları ve KTŞ limit değerleri.

Numune	Su Emme (Absorpsiyonu) (%)	KTŞ Limitleri (Alt Temel) (%)	KTŞ Limitleri (Temel) (%)
Erdemir BOF Cürufu			
Kaba Malzeme	2,82	3,5	3
İnce Malzeme	2,63	3,5	3

5.4.5 Likit limit ve plastik limit deneyi sonuçları

BOF cürufu ile yapılan deney sonuçlarına göre malzemenin plastik özellik göstermediği tespit edilmiştir. “Plastik olmayan” (NP- Non Plastic) olarak adlandırılan bu malzemeye likit limit deneyi yapılamamıştır. Deney sonuçları Çizelge 5.7’ de KTŞ maksimum yüzdeleri ile birlikte gösterilmiştir. Bu malzeme şartname verilerine göre temel ve alt temel tabakalarında istenilen koşulları sağlamış olduğu için, bu açıdan yol inşaatında bu tabakalarda kullanılmasına uygundur sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 5.7: Numune plastisite indeksi ve KTŞ limit değerleri.

Numune	Plastisite İndeksi (%)	KTŞ Limitleri (Alt Temel) (%)	KTŞ Limitleri (Temel) (%)
BOF Cürufu	NP	6	NP

5.4.6 Kil topağı ve dağılabilen tane oranı deneyi sonuçları

Yol yapımında, alt temel ve temel tabakalarında, şartnameye göre istenilen maksimum orandan daha fazla kil topağı ve dağılabilen tane oranı bulunursa, bu malzemeler stabiliteyi olumsuz yönde etkiler. Bu oranların tespit edilmesi için

yapılan deney sonuçları ve KTŞ Limitleri, Çizelge 5.8’ de gösterilmiştir. BOF cürufu ile yapılan deney sonuçlarına göre, bu değerın şartnamede verilen maksimum değerlerin altında kaldığı görülmüş ve bu açıdan malzemenin temel ve alt temel tabakalarında kullanımının uygun koşulları sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 5.8: Dağılabilen tane oranı deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri.

Numune	Dağılabilen Tane Oranı (%)	KTŞ Limitleri (Alt Temel) (%)	KTŞ Limitleri (Temel) (%)
Erdemir BOF Cürufu			
Kaba Malzeme	0,31	2	1
İnce Malzeme	0,42	2	1

5.4.7 Organik madde deneyi sonuçları

KTŞ 2013’de temel ve alt temel tabakalarında kullanılacak malzemelerde organik madde bulunmaması istenmektedir. Şartnamede, bu tabakalarda kullanılacak malzemelerin, TS EN 1744-1 standardına göre %3 NaOH ile yapılan deneyde organik madde deney sonucunun negatif olması beklenmektedir. Çalışmadaki deneyde ince ve kaba malzemelerde organik madde tayini, deney tüpü içerisindeki çözeltinin 24 saat bekledikten sonraki renk değişimine bakılarak yapılmış ve sonuç negatif olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.9’da deney sonuçları ve KTŞ limit değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.9: Organik madde içeriği deneyi sonuçları ve KTŞ limit değerleri.

Numune	NaOH Çözeltisi ile Renk Değişimi	Organik Madde İçeriği (%)	KTŞ Limitleri
Erdemir BOF Cürufu			
Kaba Malzeme	yok	0	Negatif
İnce Malzeme	yok	0	Negatif

Bazı özel durumlarda üretim sürecinde cüruf içerisine inorganik karbonun kaçtığı belirtilmektedir. Bu da NaOH çözeltisi ile yapılan organik madde içeriği deneylerinde, çözelti renginde değişime sebep olabilmektedir. Bu gibi özel durumlar haricinde BOF cürufu oluşumu sırasındaki üretim sıcaklıklarının çok yüksek olması sebebiyle BOF cürufu içerisinde organik madde bulunma ihtimali çok azdır. Ancak, fabrikadan çıktıktan sonra cüruf depolanma ve taşınma sırasında bu organik madde

oluşumlarının meydana gelebileceği göz önünde bulundurulmalı ve bu konuya dikkat edilmelidir [26].

5.4.8 Metilen mavisi deneyi sonuçları

Metilen mavisi deneyi agregadaki kil miktarını belirlemek için yapılır. BOF cürufu ile yapılan deneyde ilk etapta 6 ml çözelti karışıma ilave edilmiş ve süzgeç kağıdına damla damlatılmıştır. 1 mm açık mavi halka oluşumu gözlenmiştir. 6 ml çözelti karışımında mavi halka oluşmamış ve 2 ml daha çözelti karışıma eklenmiştir. Mavi halka oluşumu 8 ml çözelti ile gerçekleşmiştir.

BOF cürufu için elde edilen metilen mavisi değeri 0,4 g/kg olarak hesaplanmıştır. KTŞ 2013 veriler ile birlikte deney sonucu Çizelge 5.10’da verilmiştir.

Çizelge 5.10: Metilen mavisi deney sonuçları ve KTŞ limitleri.

Numune	Metilen Mavisi Değeri (g/kg)	KTŞ Alt Temel Limiti (g/kg)	KTŞ Temel Limiti(g/kg)
BOF cürufu	0,4	4	3

Yapılan deneyde, bütün tabakalarda BOF cürufunun şartname limitlerini sağladığı belirlenmiştir.

5.4.9 Modifiye proktor deneyi sonuçları

Temel Tip A, Alt Temel Tip B ve PMT 1 tiplerine ait, alt limit, üst limit ve ortalama tasarım granülometrilere göre TS 1900-1 standardında tarif edilen şekilde Modifiye Proktor Deneyi ile su muhtevaları ve bunlara karşılık gelen kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Her bir tip ve karışım için ayrı ayrı Modifiye Proktor eğrileri çizilerek, optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir.

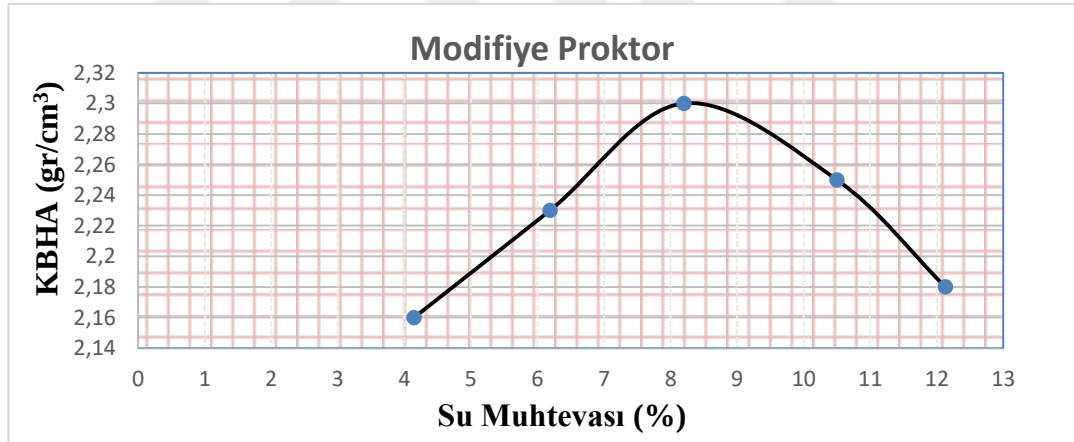
Çizelge 5.11’de Alt temel Tip B alt limit granülometri değerleri, Çizelge 5.12’ de bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.31’de alt temel tip B alt limit granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. Alt temel tip B alt limit granülometrisi için optimum su muhtevası değeri %8,75, maksimum KBHA değeri 2,31 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.11: Alt temel Tip B alt limit granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
50	2	100
37,5	1 1/2	80
25		60
19	1	45
9,5	3/4	30
4,75	3/8	25
2	No:4	15
0,425	No:10	10
0,075	No:40	0
	No:200	

Çizelge 5.12: Alt temel Tip B alt limit su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	4,15	2,16
2	6,19	2,23
3	8,2	2,30
4	10,5	2,25
5	12,13	2,18



Şekil 5.31: Alt temel tip B alt limit modifiye proktor eğrisi.

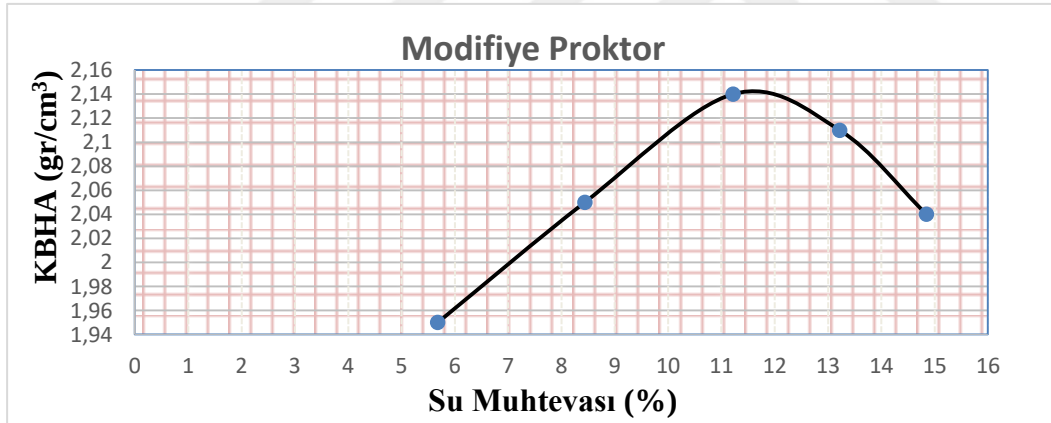
Çizelge 5.13’ de Alt temel Tip B üst limit granülometri değerleri, Çizelge 5.14’ de bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.32’de alt temel tip B üst limit granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. Alt temel tip B üst limit granülometrisi için optimum su muhtevası değeri %11,5 , maksimum KBHA değeri 2,14 gr/cm3 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.13: Alt temel Tip B üst limit granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
50	2	100
37,5	1 1/2	100
25	1	90
19	3/4	80
9,5	3/8	70
4,75	No:4	55
2	No:10	40
0,425	No:40	20
0,075	No:200	12

Çizelge 5.14: Alt temel Tip B üst limit su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	5,68	1,95
2	8,44	2,05
3	11,22	2,14
4	13,22	2,11
5	14,85	2,04



Şekil 5.32: Alt temel tip B üst limit modifiye proktor eğrisi.

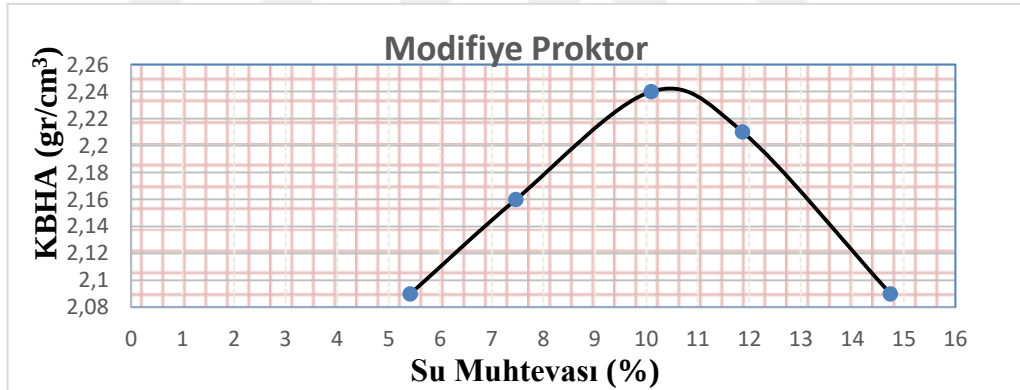
Çizelge 5.15’ de Alt temel Tip B ortalama granülometri değerleri, Çizelge 5.16’ da bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.33’de alt temel tip B ortalama granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. Alt temel tip B ortalama granülometri için optimum su muhtevası değeri %10,5 , maksimum KBHA değeri 2,24 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.15: Alt temel Tip B ortalama granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
50	2	100
37,5	1 1/2	90
25	1	75
19	3/ 4	62,5
9,5	3/ 8	50
4,75	No:4	40
2	No:10	27,5
0,425	No:40	15
0,075	No:200	6

Çizelge 5.16: Alt temel Tip B ortalama su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	5,42	2,09
2	7,47	2,16
3	10,10	2,24
4	11,87	2,21
5	14,74	2,09



Şekil 5.33: Alt temel tip B ortalama modifiye proktor eğrisi.

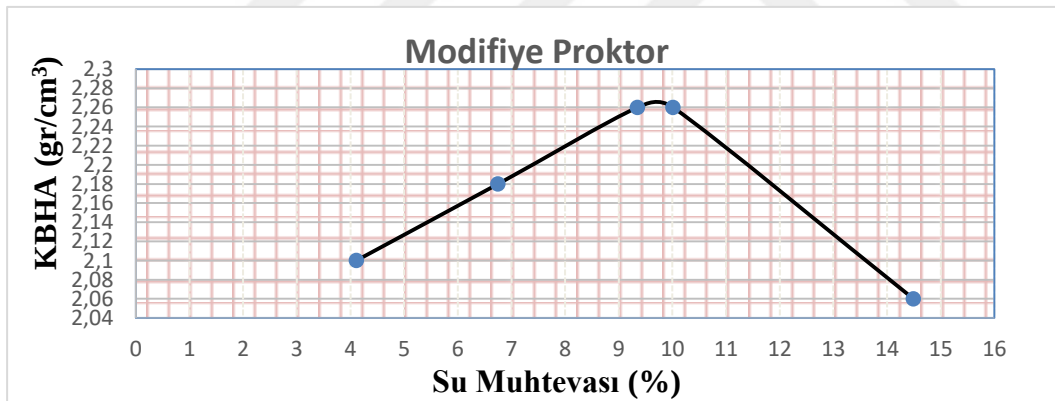
Çizelge 5.17’ de temel tip A alt limit granülometri değerleri, Çizelge 5.18’de bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.34’de temel tip A alt limit granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. Temel tip A alt limit granülometrisi için optimum su muhtevası değeri %9,5 , maksimum KBHA değeri 2,26 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.17: Temel Tip A alt limit granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
50	2	100
37,5	1 1/2	80
25	1	60
19	3/4	45
9,5	3/8	30
4,75	No:4	25
2	No:10	15
0,425	No:40	8
0,075	No:200	2

Çizelge 5.18: Temel Tip A alt limit su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	4,11	2,10
2	6,75	2,18
3	9,35	2,26
4	10,01	2,26
5	14,49	2,06



Şekil 5.34: Temel tip A alt limit modifiye proktor eğrisi.

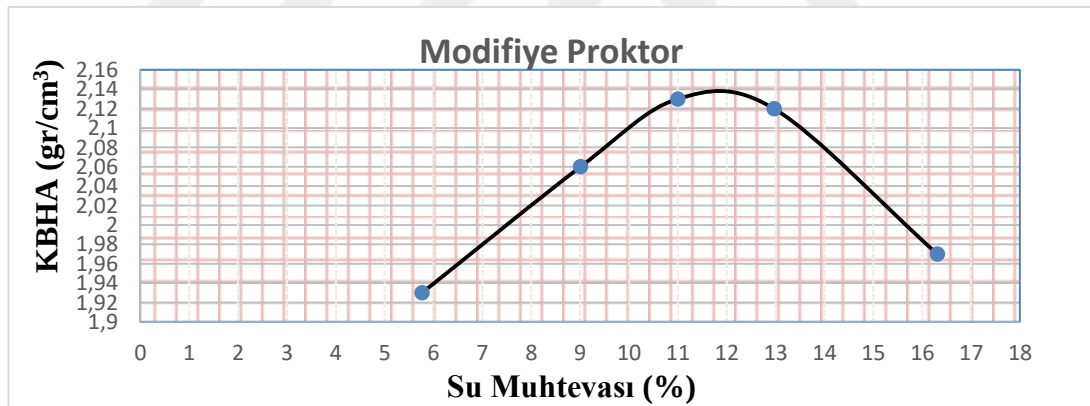
Çizelge 5.19’da temel tip A üst limit granülometri değerleri, Çizelge 5.20’de bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.35’de temel tip A üst limit granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. Temel tip A alt limit granülometrisi için optimum su muhtevası değeri %11,5 , maksimum KBHA değeri 2,14 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.19: Temel Tip A üst limit granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
50	2	100
37,5	1 1/2	100
25	1	90
19	3/4	80
9,5	3/8	70
4,75	No:4	55
2	No:10	40
0,425	No:40	20
0,075	No:200	8

Çizelge 5.20: Temel Tip A üst limit su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	5,77	1,93
2	9,01	2,06
3	11	2,13
4	12,97	2,12
5	16,31	1,97



Şekil 5.35: Temel tip A üst limit modifiye proktor eğrisi.

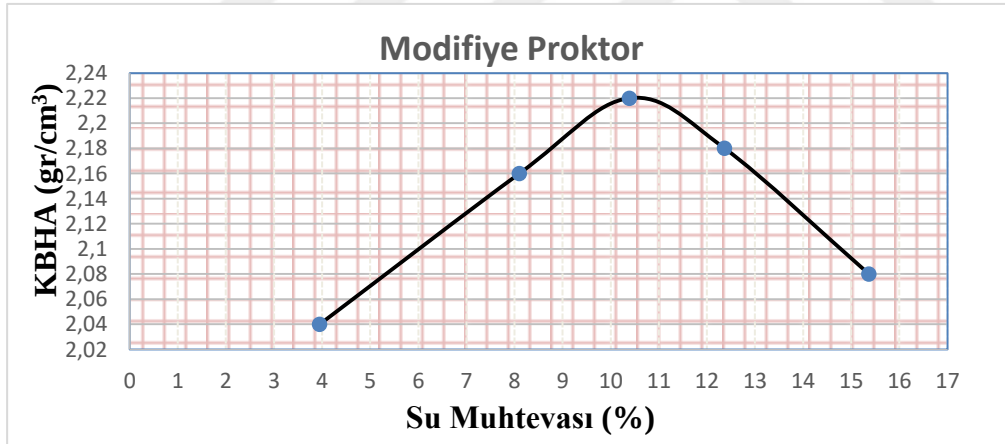
Çizelge 5.21’de temel tip A ortalama granülometri değerleri, Çizelge 5.22’de bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.36’da temel tip A ortalama granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. Temel tip A ortalama granülometri için optimum su muhtevası değeri %10,5 , maksimum KBHA değeri 2,22 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.21: Temel Tip A ortalama granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
50	2	100
37,5	1 1/2	90
25	1	75
19	3/4	62,5
9,5	3/8	50
4,75	No:4	40
2	No:10	27,5
0,425	No:40	14
0,075	No:200	5

Çizelge 5.22: Temel Tip A ortalama su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	3,95	2,04
2	8,10	2,16
3	10,39	2,22
4	12,37	2,18
5	15,37	2,08



Şekil 5.36: Temel tip A ortalama modifiye proktor eğrisi.

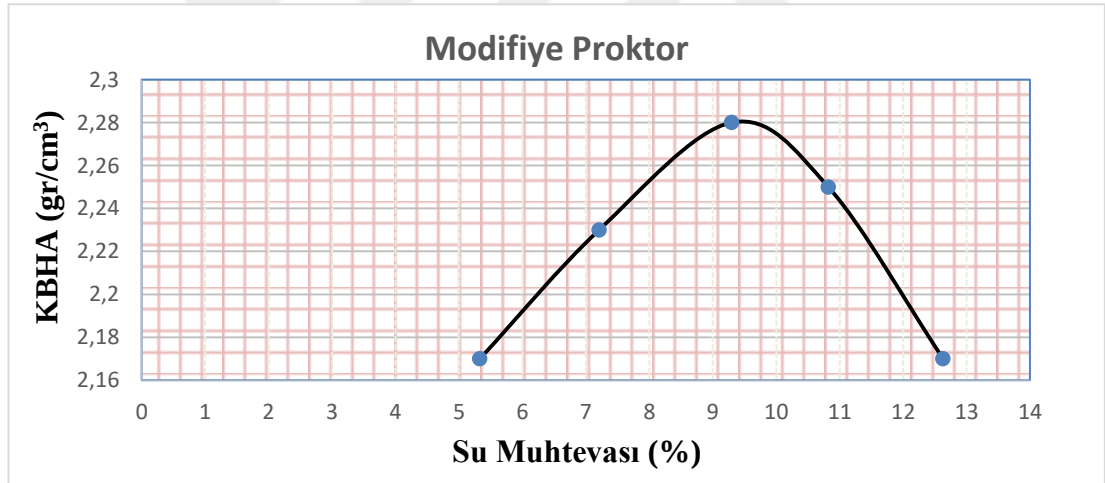
Çizelge 5.23’de PMT 1 alt limit granülometri değerleri, Çizelge 5.24’de bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.37’de PMT 1 alt limit granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. PMT 1 alt limit granülometrisi için optimum su muhtevası değeri %9,5 , maksimum KBHA değeri 2,28 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.23: PMT 1 alt limit granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
37,5	1 1 / 2	100
25	1	72
19	3 / 4	60
9,5	3 / 8	40
4,75	No:4	30
2	No:10	20
0,425	No:40	8
0,075	No:200	0

Çizelge 5.24: PMT 1 alt limit su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	5,33	2,17
2	7,21	2,23
3	9,3	2,28
4	10,82	2,25
5	12,63	2,17



Şekil 5.37: PMT 1 alt limit modifiye proktor eğrisi.

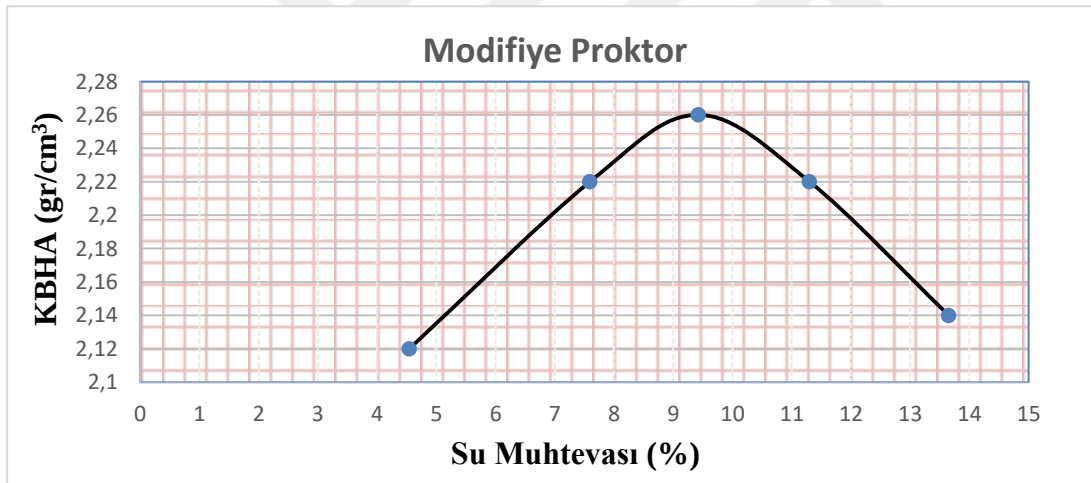
Çizelge 5.25’de PMT 1 üst limit granülometri değerleri, Çizelge 5.26’da bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.38’de PMT 1 üst limit granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. PMT 1 üst limit granülometrisi için optimum su muhtevası değeri %9,5 , maksimum KBHA değeri 2,26 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.25: PMT 1 üst limit granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
37,5	1 1 / 2	100
25	1	100
19	3/ 4	92
9,5	3/ 8	75
4,75	No:4	60
2	No:10	45
0,425	No:40	25
0,075	No:200	10

Çizelge 5.26: PMT 1 üst limit su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	4,54	2,12
2	7,59	2,22
3	9,42	2,26
4	11,30	2,22
5	13,65	2,14



Şekil 5.38: PMT 1 üst limit modifiye proktor eğrisi.

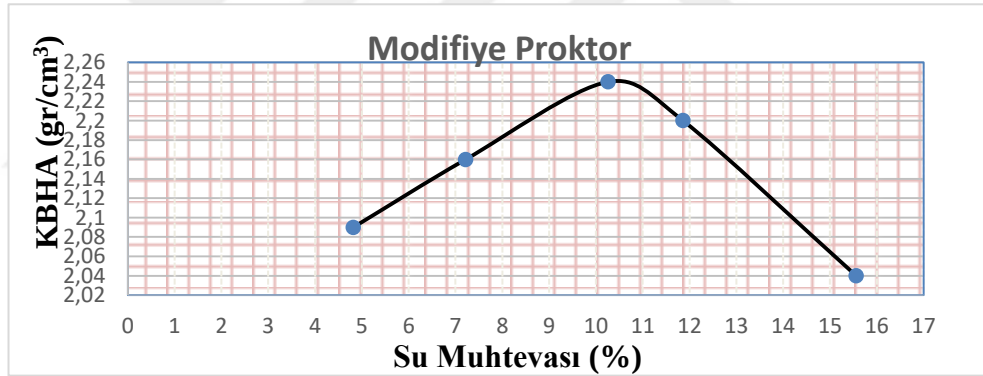
Çizelge 5.27’de PMT 1 ortalama granülometri değerleri, Çizelge 5.28’de bu granülometri karışımı ile yapılan deneyde, BOF cürufu için elde edilen su muhtevaları ve bu su muhtevalarına karşılık gelen KBHA’lar verilmiştir. Şekil 5.39’da PMT 1 ortalama granülometrisine ait Modifiye Proktor eğrisi verilmiştir. Bu eğriden optimum su muhtevası ve maksimum KBHA değerleri belirlenmiştir. PMT 1 ortalama granülometri için optimum su muhtevası değeri %10,5 , maksimum KBHA değeri 2,24 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.27: PMT 1 ortalama granülometri değerleri.

Elek Açıklığı (mm)	Elek Açıklığı (in)	% Geçen
37,5	1 1 / 2	100
25	1	86
19	3 / 4	76
9,5	3 / 8	57,5
4,75	No:4	45
2	No:10	32,5
0,425	No:40	16,5
0,075	No:200	5

Çizelge 5.28: PMT 1 ortalama su muhtevası- KBHA değerleri.

Deney Numarası	W (%)	KBHA (gr/cm ³)
1	4,82	2,09
2	7,22	2,16
3	10,26	2,24
4	11,86	2,20
5	15,56	2,04



Şekil 5.39: PMT 1 ortalama modifiye proktor eğrisi.

Hazırlanan bütün karışım granülometreleriyle yapılan deneyler sonucunda elde edilen bütün optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları değerleri Çizelge 5.29’ da verilmiştir.

Çizelge 5.29: Yapılan bütün deneylerin optimum su muhtevası ve KBHA değerleri.

Tip ve Granülometri	W _{optimum} (%)	Maksimum KBHA (gr/cm ³)
Alt Temel Tip B Alt Limit	8,75	2,31
Alt Temel Tip B Üst Limit	11,5	2,14
Alt Temel Tip B Ortalama	10,5	2,24
Temel Tip A Alt Limit	9,5	2,26
Temel Tip A Üst Limit	11,5	2,14
Temel Tip A Ortalama	10,5	2,22
PMT 1 Alt Limit	9,5	2,28
PMT 1 Üst Limit	9,5	2,26
PMT 1 Ortalama	10,5	2,24

Modifiye Proktor deneyinde elde edilen optimum su muhtevası ve maksimum KBHA'lara göre BOF cüruf numuneleri CBR deneyleri için hazırlanmıştır.

5.4.10 CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyi sonuçları

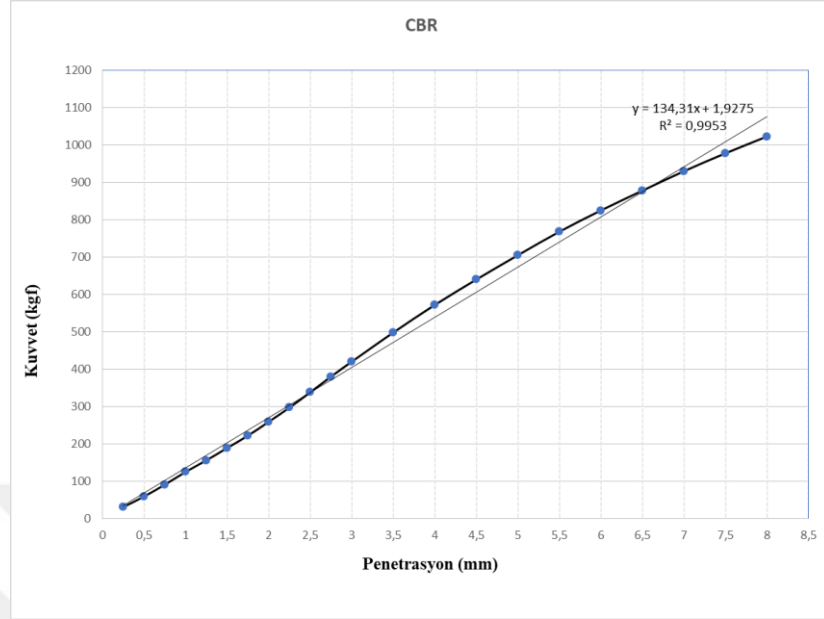
Alt temel tip B, temel tip A ve PMT 1 tabakaları, alt limit, üst limit ve ortamala granülometri değerlerindeki malzemelere uygulanmış Modifiye Proktor Deneyi ile belirlenen optimum su muhtevaları ve maksimum KBHA'lara göre, CBR numuneleri hazırlanmış ve deney yapılmıştır.

Çizelge 5.30'da alt temel tip B alt limit granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %66 , 5 mm penetrasyon değerinde CBR %87 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için, BOF cürufu için alt limit granülometrisinin CBR değeri %87 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.30: Alt temel tip B alt limit granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	31	
0,50	59	
0,75	91	
1,00	125	
1,25	156	
1,50	189	
1,75	222	
2,00	259	
2,25	297	
2,50	338	337
2,75	380	
3,00	420	
3,50	498	
4,00	572	
4,50	640	
5,00	705	674
5,50	768	
6,00	825	
6,50	878	
7,00	930	
7,50	978	
8,00	1023	

Şekil 5.40'da alt temel tip B alt limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



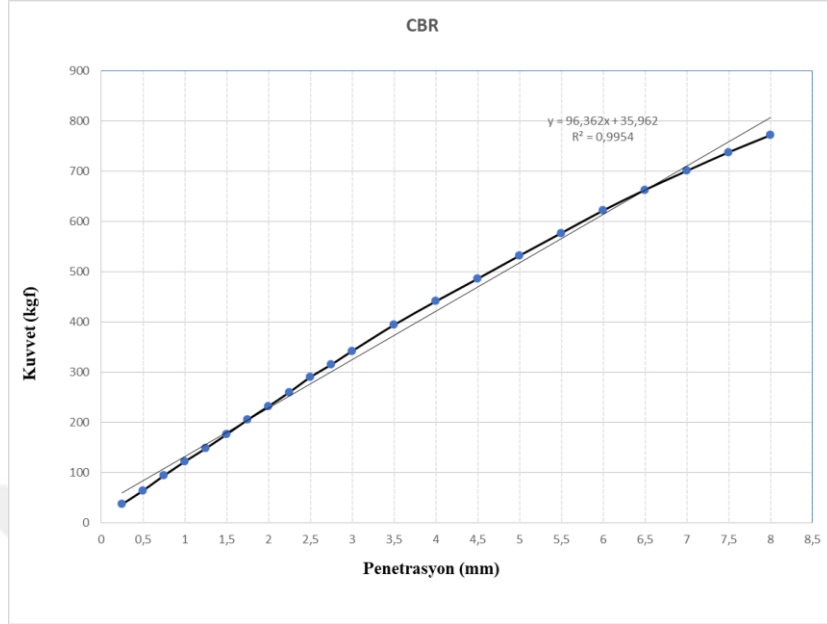
Şekil 5.40: Alt temel tip B alt limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.31'de alt temel tip B üst limit granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %54 , 5 mm penetrasyon değerinde CBR % 67 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için BOF cürufu için, üst limit granülometrisinin CBR değeri %67 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.31: Alt temel tip B üst limit granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	37	
0,50	64	
0,75	94	
1,00	122	
1,25	148	
1,50	176	
1,75	205	
2,00	232	
2,25	260	
2,50	290	277
2,75	315	
3,00	342	
3,50	394	
4,00	441	
4,50	486	
5,00	532	518
5,50	577	
6,00	622	
6,50	663	
7,00	701	
7,50	738	
8,00	772	

Şekil 5.41’de alt temel tip B alt limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



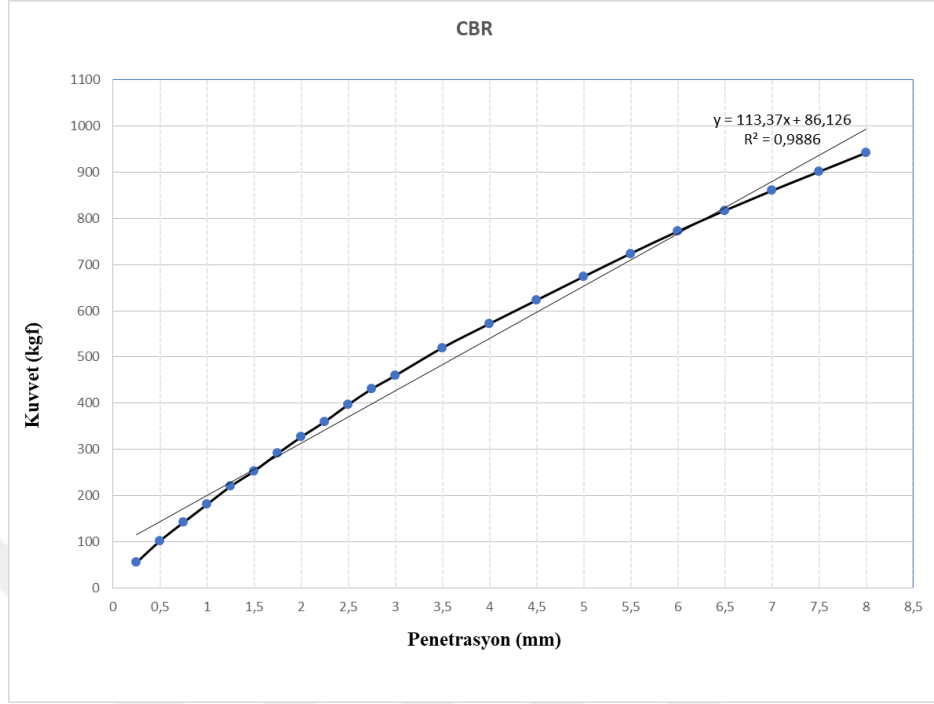
Şekil 5.41: Alt temel tip B üst limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.32’de alt temel tip B ortalama tasarım granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %72 , 5 mm penetrasyon değerinde CBR % 85 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için BOF cürufu için, ortalama tasarım granülometrisinin CBR değeri %85 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.32: Alt temel tip B ortalama tasarım granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	55	
0,50	102	
0,75	142	
1,00	181	
1,25	220	
1,50	253	
1,75	291	
2,00	327	
2,25	360	
2,50	397	370
2,75	431	
3,00	460	
3,50	520	
4,00	572	
4,50	623	
5,00	674	653
5,50	724	
6,00	772	
6,50	817	
7,00	860	
7,50	901	
8,00	942	

Şekil 5.42’de alt temel tip B ortalama tasarım granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



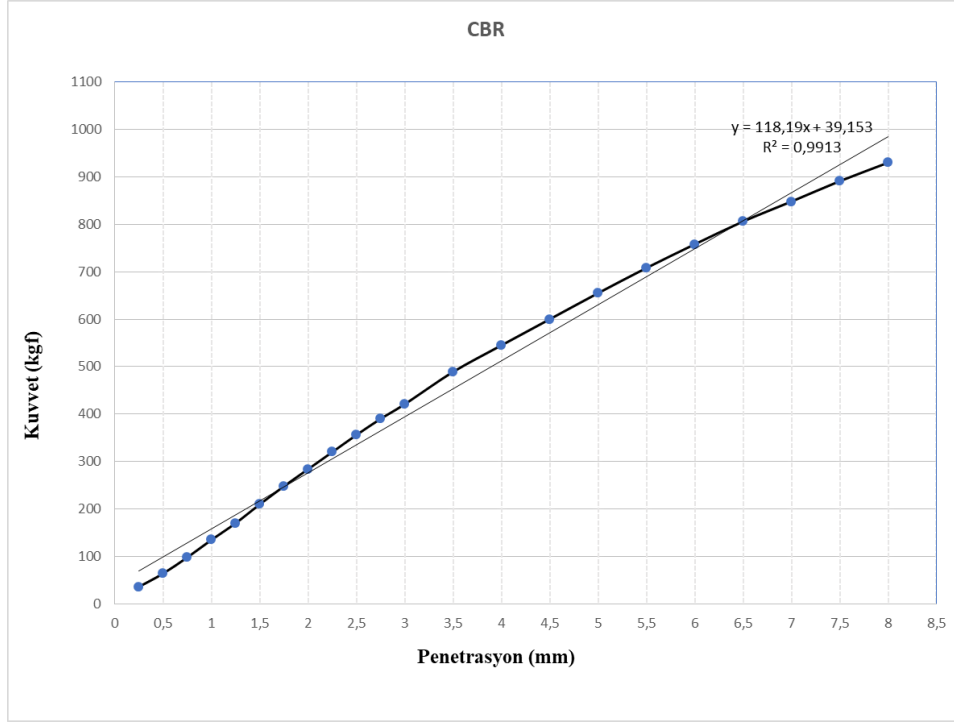
Şekil 5.42: Alt temel tip B ortalama tasarım granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.33’de temel tip A alt limit granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %65 , 5 mm penetrasyon değerinde CBR %82 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için, BOF cürufu için, alt limit granülometrisinin CBR değeri %82 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.33: Temel tip A alt limit granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	36	
0,50	64	
0,75	98	
1,00	135	
1,25	170	
1,50	210	
1,75	248	
2,00	284	
2,25	320	
2,50	356	335
2,75	390	
3,00	421	
3,50	489	
4,00	545	
4,50	600	
5,00	655	630
5,50	708	
6,00	758	
6,50	806	
7,00	848	
7,50	891	
8,00	930	

Şekil 5.43’de Temel tip A alt limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



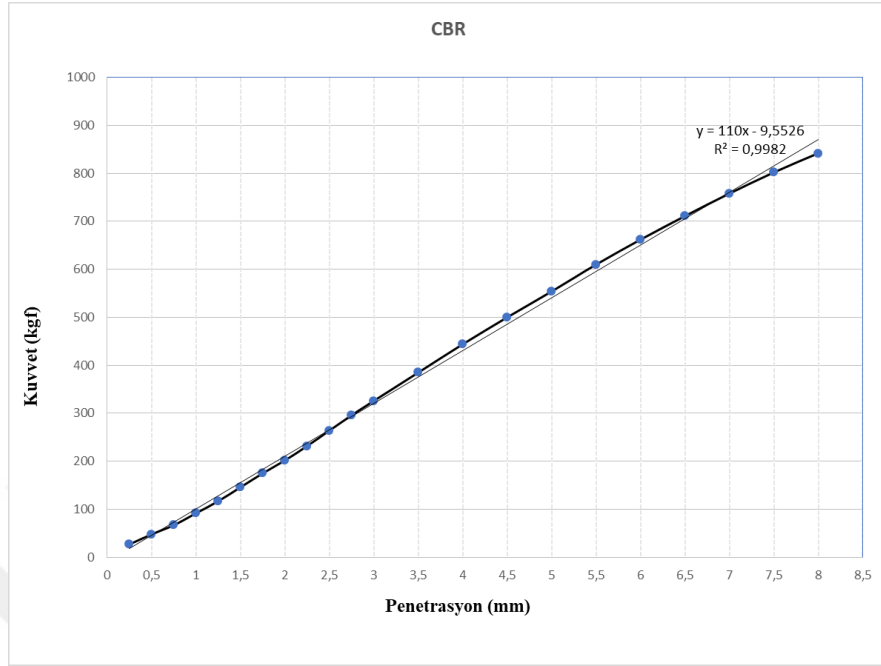
Şekil 5.43: Temel tip A alt limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.34’de temel tip A üst limit granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %52 , 5 mm penetrasyon değerinde CBR %70 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için, BOF cürufu için, üst limit granülometrisinin CBR değeri %70 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.34: Temel tip A üst limit granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	27	
0,50	48	
0,75	67	
1,00	92	
1,25	117	
1,50	146	
1,75	175	
2,00	202	
2,25	232	
2,50	264	266
2,75	296	
3,00	326	
3,50	385	
4,00	444	
4,50	500	
5,00	554	540
5,50	610	
6,00	662	
6,50	711	
7,00	758	
7,50	802	
8,00	842	

Şekil 5.44’de temel tip A üst limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



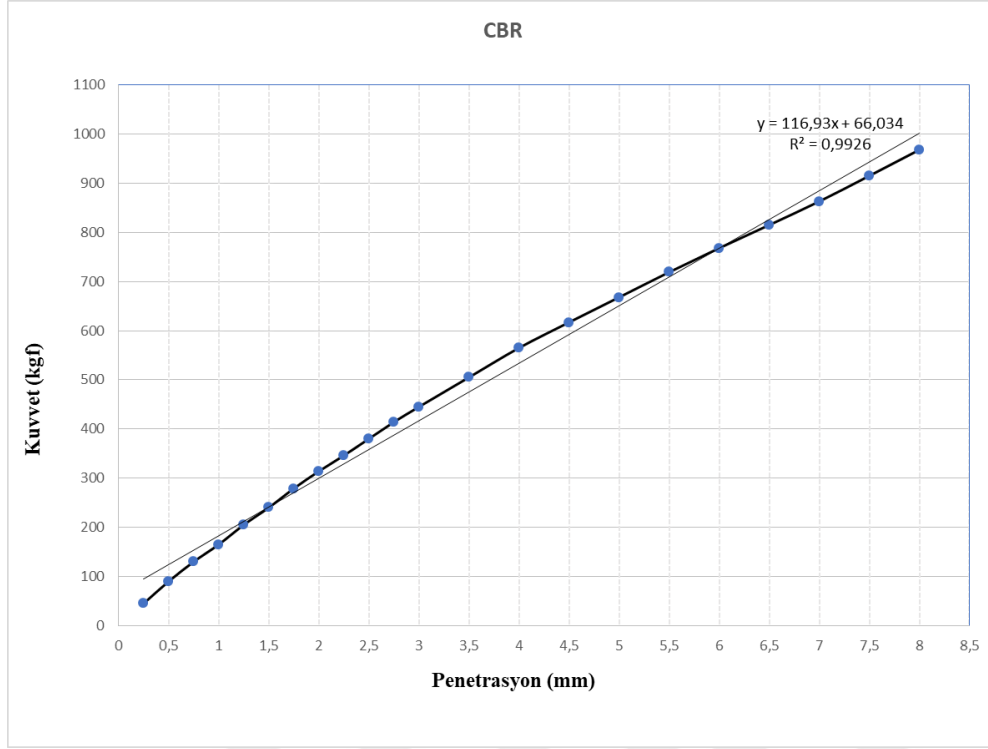
Şekil 5.44: Temel tip A üst limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.35’de temel tip A ortalama tasarım granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %70 , 5 mm penetrasyon değerinde CBR % 84 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için, BOF cürufu için, ortalama tasarım granülometrisinin CBR değeri %84 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.35: Temel tip A ortalama tasarım granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	45	
0,50	90	
0,75	130	
1,00	165	
1,25	205	
1,50	240	
1,75	279	
2,00	314	
2,25	346	
2,50	380	358
2,75	414	
3,00	445	
3,50	505	
4,00	565	
4,50	617	
5,00	668	651
5,50	719	
6,00	768	
6,50	815	
7,00	863	
7,50	915	
8,00	968	

Şekil 5.45’de temel tip A ortalama tasarım granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



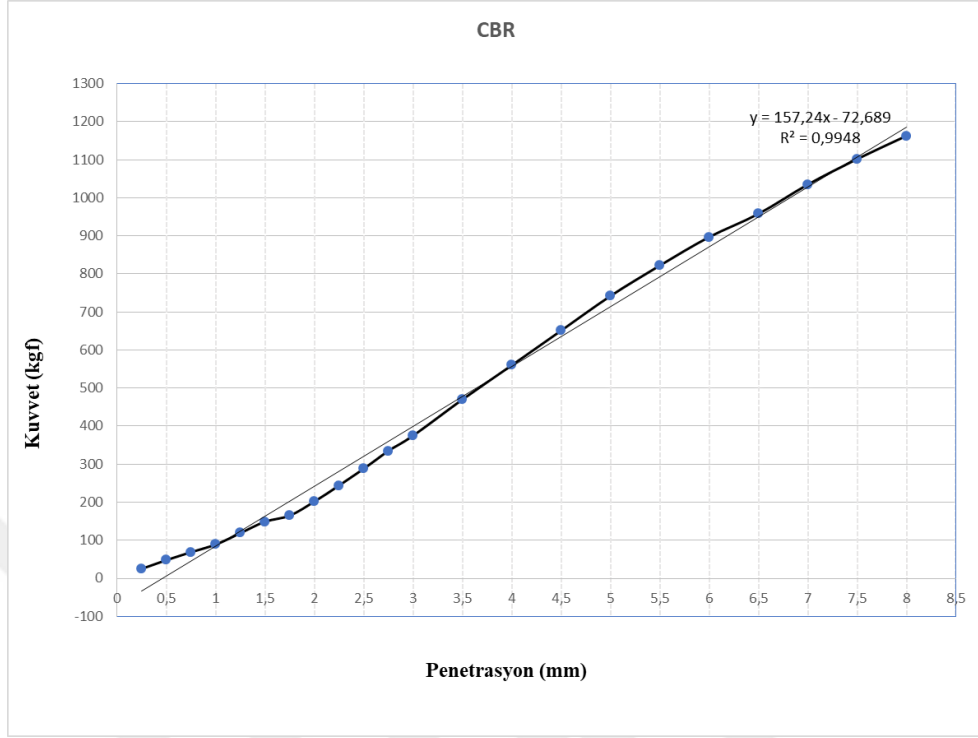
Şekil 5.45: Temel tip A ortalama tasarım granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.36’da PMT 1 alt limit granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %62, 5 mm penetrasyon değerinde CBR % 92 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için, BOF cürufu için, alt limit granülometrisinin CBR değeri %92 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.36: PMT 1 alt limit granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	25	
0,50	48	
0,75	69	
1,00	89	
1,25	119	
1,50	149	
1,75	165	
2,00	202	
2,25	244	
2,50	288	320
2,75	335	
3,00	375	
3,50	470	
4,00	560	
4,50	651	
5,00	742	714
5,50	822	
6,00	897	
6,50	958	
7,00	1035	
7,50	1102	
8,00	1163	

Şekil 5.46'de PMT 1 alt limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



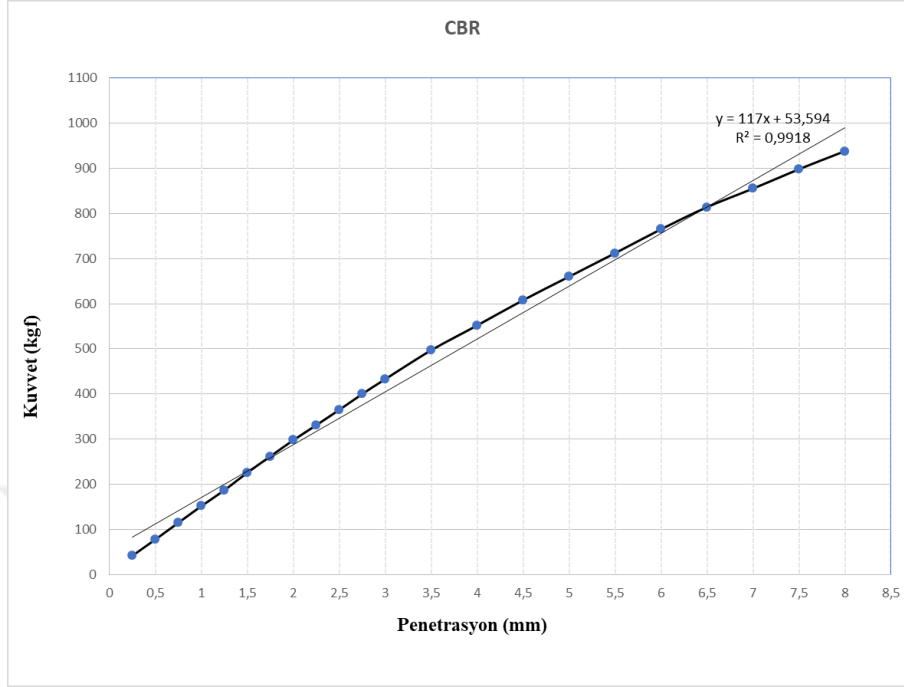
Şekil 5.46: PMT 1 alt limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.37'da PMT 1 üst limit granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %67, 5 mm penetrasyon değerinde CBR % 83 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için BOF cürufu için üst limit granülometrisinin CBR değeri %83 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.37: PMT 1 üst limit granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	42	
0,50	78	
0,75	115	
1,00	152	
1,25	187	
1,50	226	
1,75	262	
2,00	298	
2,25	331	
2,50	365	346
2,75	400	
3,00	433	
3,50	497	
4,00	552	
4,50	608	
5,00	660	639
5,50	712	
6,00	765	
6,50	814	
7,00	855	
7,50	898	
8,00	938	

Şekil 5.47’de PMT 1 üst limit granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



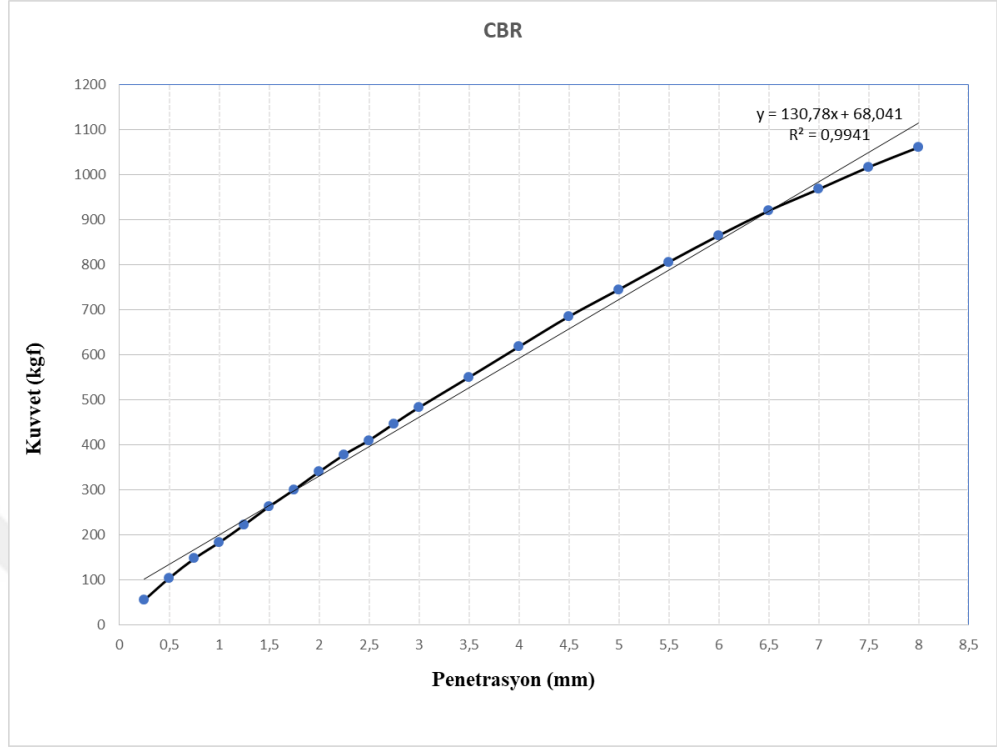
Şekil 5.47: PMT 1 üst limit granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.38’de PMT 1 ortalama tasarım granülometrisine ait CBR sonuçları verilmiştir. 2,5 mm penetrasyon değerinde CBR %77 , 5 mm penetrasyon değerinde CBR %94 olarak bulunmuştur. 5 mm penetrasyonundaki CBR değeri daha büyük olduğu için BOF cürufu için, ortalama tasarım granülometrisinin CBR değeri %94 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.38: PMT 1 ortalama tasarım granülometrisi CBR verileri.

Penetrasyon (mm)	Kuvvet (kgf)	Düzeltilmiş Kuvvet (kgf)
0,25	55	
0,50	104	
0,75	147	
1,00	183	
1,25	222	
1,50	263	
1,75	300	
2,00	340	
2,25	378	
2,50	410	395
2,75	447	
3,00	483	
3,50	550	
4,00	618	
4,50	685	
5,00	745	722
5,50	806	
6,00	865	
6,50	920	
7,00	968	
7,50	1017	
8,00	1061	

Şekil 5.48’de PMT 1 ortalama tasarım granülometrisine ait CBR deneyi yük-penetrasyon eğrisi verilmiştir.



Şekil 5.48: PMT 1 ortalama tasarım granülometrisi yük-penetrasyon grafiği.

Çizelge 5.39’ da BOF cürufu ile yapılan bütün CBR deneylerinin sonuçları verilmiş, KTŞ 2013 limit verileri ile kıyaslaması yapılmıştır.

Çizelge 5.39: Bütün deneyler CBR(%) sonuçları ve KTŞ 2013 limit değerleri.

Karışım	CBR (%)	KTŞ Limitleri min (%)
Alt Temel Tip B Alt Limit	87	50
Alt Temel Tip B Üst Limit	67	50
Alt Temel Tip B Ortalama	85	50
Temel Tip A Alt Limit	82	100
Temel Tip A Üst Limit	70	100
Temel Tip A Ortalama	84	100
PMT 1 Alt Limit	92	120
PMT 1 Üst Limit	83	120
PMT 1 Ortalama	94	120

Bu verilere göre, deneyi yapılmış olan Alt Temel Tip B bütün granülometrilerinin KTŞ 2013 verilerine uygun olduğu tespit edilmiş ve BOF cürufunun bu tabakada bu granülometrilere kullanımının uygun olduğu sonucu çıkartılmıştır.

Temel Tip A ve PMT granülometrilerine göre hazırlanan deney numunelerin sonuçlarına göre, BOF cürufunun bu tabakalarda kullanımının KT  2013 verilerine uygun olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, Ereğli’de bulunan Erdemir Fabrikasından temin edilen BOF cürufları kullanılmış ve BOF cüruflarının yapay agrega olarak esnek üstyapılarda alt temel ve temel tabakalarında kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada KTŞ 2013 standartları baz alınarak deneyler yapılmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

- Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonucu BOF cürufu için %12,3 olarak bulunmuştur. KTŞ limitleri alt temel için maksimum %25, temel için maksimum %20 olarak belirtilmiştir. BOF cürufu her iki tabakada da bu değerleri sağlamıştır.

- Los Angeles aşınma deney sonucu BOF cürufu için %17,13 olarak belirlenmiştir. KTŞ limitleri alt temel tabakası için maksimum %45, temel tabakası için maksimum %35 olarak belirtilmiştir. BOF cürufu değerleri her iki tabaka da da KTŞ şartlarını sağlamıştır.

- Yassılık indeksi deney sonucu BOF cürufu için %5,6 olarak bulunmuştur. KTŞ 2013 limitleri alt temel tabakası için maksimum %30, temel tabakası için maksimum %25 olarak belirtilmiştir. BOF cürufu değerleri her iki tabakada da KTŞ değerlerini sağlamıştır.

- BOF cürufunun su emme oranı kaba malzeme için %2,82, ince malzeme için %2,63 olarak bulunmuştur. KTŞ limitleri alt temel tabakası için maksimum %3,5 temel tabakası için maksimum %3 olarak verilmiştir. Oldukça gözenekli bir yapıya sahip olmasına rağmen BOF cürufunun bu özellikleri sağladığı tespit edilmiştir.

- Yapılan plastik limit deneyinde BOF cürufunun plastik özellikte olmadığı belirlenmiştir. Plastik özellikte olmadığı için, malzemeye likit limit deneyi yapılmamıştır. Bu özelliği ile BOF cürufu KTŞ verilerine uygun bulunmuştur.

- Kil topağı ve dağılabilen tane oranı sonuçlarına göre, BOF cürufu değerleri kaba malzemeler için %0,31, ince malzemeler için %0,42 olarak bulunmuştur. KTŞ verilerine göre alt temel tabakası için bu oran maksimum %2, temel tabakası için maksimum %1'dir. Deney sonuçlarına göre BOF cürufu şartname koşullarını sağlamaktadır.

- Yapılan organik madde deneyi sonuçlarına göre kaba ve ince malzemelerde NaOH çözeltisinde renk değişimi gözlenmemiş ve malzemeler içerisinde organik madde bulunmadığı tespit edilmiştir.

- Alt temel tip B, temel tip A ve PMT 1 tabakaları için oluşturulan alt limit, üst limit ve ortalama granülometri karışımları ile Modifiye Proktor deneyleri yapılmış ve her karışım için optimum su muhtevaları ve maksimum KBHA'lar belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen optimum su muhtevaları ve maksimum KBHA'lar kullanılarak CBR numuneleri hazırlanmış ve CBR deneyleri yapılmıştır. Her karışım için elde edilen CBR sonuçları ve KTŞ limitleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Bütün deneyler CBR(%) sonuçları ve KTŞ 2013 limitleri.

Karışım	CBR (%)	KTŞ Limitleri min (%)
Alt Temel Tip B Alt Limit	87	50
Alt Temel Tip B Üst Limit	67	50
Alt Temel Tip B Ortalama	85	50
Temel Tip A Alt Limit	82	100
Temel Tip A Üst Limit	70	100
Temel Tip A Ortalama	84	100
PMT 1 Alt Limit	92	120
PMT 1 Üst Limit	83	120
PMT 1 Ortalama	94	120

Bu sonuçlara göre, BOF cürufunun Alt temel tabakalarında şartname limitlerini sağladığı, ancak diğer tabakalarda şartname limitlerinin altında kaldığı belirlenmiştir.

Çizelge 6.2'de yapılan bütün deneylerin KTŞ 2013 limit değerlerine göre kullanımının uygunlukları gösterilmiştir.

Çizelge 6.2: Bütün deneylerin sonuçlarının KTŞ 2013 limit değerlerine göre uygunlukları.

Yapılan Deney	Deney Sonucu	KTŞ Limitlerine Uygunluk (Alt Temel)	KTŞ Limitlerine Uygunluk (Temel)	KTŞ Limitlerine Uygunluk (PMT)
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık(%)	12,3	Uygun	Uygun	Uygun
Los Angeles (%)	17,13	Uygun	Uygun	Uygun
Yassılık İndeksi (%)	5,6	Uygun	Uygun	Uygun
Su Emme (%)	Kaba Malzeme=2,82	Uygun	Uygun	Uygun
	İnce Malzeme = 2,63	Uygun	Uygun	Uygun
Likit Limit ve Plastik Limit	NP(Plastik Olmayan)	Uygun	Uygun	Uygun
Kil Topağı ve Dağılabilen Tane (%)	Kaba Malzeme=0,31	Uygun	Uygun	Uygun
	İnce Malzeme =0,42	Uygun	Uygun	Uygun
Organik Madde (%)	0	Uygun	Uygun	Uygun
Metilen Mavisi (g/kg)	0,4	Uygun	Uygun	Uygun
CBR Deneyi (%)	Alt Limit Granülometrisi	Uygun	Uygun Değil	Uygun Değil
	Üst Limit Granülometrisi	Uygun	Uygun Değil	Uygun Değil
	Ortalama Granülometri	Uygun	Uygun Değil	Uygun Değil

KTŞ 2013’de verilen standartlara göre yapılan deneylerin sonuçlarına göre, BOF cürufunun alt temel tabakasında kullanımının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ancak Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi sonuçlarına göre, BOF cürufunun Temel Tip A ve PMT 1 granülometrilere göre hazırlanan tabakalarda kullanımının uygun olmadığı tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] **URL-1** <<http://www.erdemir.com.tr/>>, alındığı tarih: 01.08.2016
- [2] **Dündar, H.** (2006). *Farklı Soğutma Hızlarında Soğutulan Çelikhane Cüruflarının Öğütme Parametrelerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [3] **Kara, M., Günay, E., Sönmez, B., Baş, E.** (2001). *Çelikhane Cüruflarının Asfalt Betonu Agregası ve Demiryolu Balast Malzemesi Olarak Kullanılması İmkânları*. Tübitak-Marmara Araştırma Merkezi, Gebze, Kocaeli
- [4] **Ilıcalı, M.** (1988). *Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Doktora Tezi). YTÜ, İstanbul.
- [5] **Yayla, N.** (2004). *Karayolu Mühendisliği Kitabı*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [6] **Tunç, A.** (2007). *Yol malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul.
- [7] **Karayolu Teknik Şartnamesi** (2013). KGM Yayını, Ankara.
- [8] **Kaya, A.O.** (2014) *Esnek Üstyapıların Aşınma Tabakasında Elektrik Ark Fırını Cürufunun Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). İTÜ, İstanbul.
- [9] **Akman, E.** *Dünya' da ve Türkiye' de Demir Çelik Sektörü ve Türk Demir Çelik Sektörünün Rekabet Gücü*. (Yüksek Lisans Tezi). Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak
- [10] **Göksu, Ö.** (2006). *Sıvı Demir Eldesinde Yüksek Fırınlarda Kullanılan Refrakter Malzemelerden Döküm Deliği Çamurunun Fiziksel ve Kimyasal Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- [11] **URL-2 Türkiye Çelik Üreticileri Derneği**, <<http://celik.org.tr/demir-celik-sektoru/>> , alındığı tarih: 12.02.2017
- [12] **Bilen, M.** (2010). *Çelikhane Cüruflarında Liç-Karbonatlaştırma Prosesi ile Klasiyum Karbonat Kazanılması*, (Yüksek Lisans Tezi). Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul.
- [13] **Higgins, R.** (1983). *Engineering Metallurgy – Part I*, Chapman and Hall Inc., NY, 559p
- [14] **Taşel, M., Çelik, D., Eren, A., Nurlu, M.** (2005). *Erdemir'de Konvertör Astar Ömürlerinin Arttırılması*. 3.Demir Çelik Kongresi, Zonguldak
- [15] **Özdabak, A.** (2004). *Demir-Çelik ve Enerji*. Rengin Basımevi, İstanbul

- [16] **Hasançebiölu, Ö.** (2014) *Elektrik Ark Ocağı Cürufunun Yapay Agrega Olarak Karayolu İnşaatı Dolgu ve Granüler Tabakalarında Kullanılabilirliğinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi) İTÜ, İstanbul.
- [17] **Eren, E., Derun, E. ve Pişkin, S.** (2010). *Çelikhane Cürufalarının Beton Üretiminde Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- [18] **ASTM C131**, (2006). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*, American Society for Testing and Materials, USA.
- [19] **BS 812 - 105.2**, (1990). *Elongation Index of Coarse Aggregate*, British Standard, England.
- [20] **TS EN 1097-6**, (2013). *Agregaların Mekanik Ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [21] **TS 1900-1:2006-T2** (2015). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [22] **ASTM C142**, (2010). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*, American Society for Testing and Materials, USA.
- [23] **TS EN 1744-1:2009+A1** (2013). *Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Kimyasal Analiz*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [24] **TS EN 933-9: 2013 +A1** (2014). *Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 9: İnce Malzeme Tayini – Metilen Mavisi Deneyi*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [25] **ASTM D1883** (2014). *Standar Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory - Compacted Soils*, American Society for Testing and Materials, USA.
- [26] **Yonar, F.** (2017). *Elektrik Ark Ocağı Çelikhane Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Tabakalarında Kullanımının ve Karışım Performansının Araştırılması* (Doktora Tezi). İTÜ

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Hikmet ERGİN
Doğum Tarihi ve Yeri : 22.10.1987 Altındağ / ANKARA
E-posta : hkmtergin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

DENEYİM:

-