

Çelikhane Cürufunun Yol Üst Yapısının İyileştirilmesinde Kullanımı

Mehmet Yılmaz

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2018



The Use of Steel Slag to Improve Road Superstructure

Mehmet Yılmaz

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Civil Engineering

May 2018

Çelikhane Cürufunun Yol Üst Yapısının İyileştirilmesinde Kullanımı

Mehmet Yılmaz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Gülgün YILMAZ

Mayıs 2018

## ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Yılmaz'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Çelikhane Cürufunun Yol Üst Yapısının İyileştirilmesinde Kullanımı” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Gülgün Yılmaz

**İkinci Danışman** : -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye:** Prof. Dr. Gülgün Yılmaz

**Üye :** Doç. Dr. Derviş Volkan Okur

**Üye :** Doç. Dr. Murat Türköz

**Üye :** Dr. Öğr. Üyesi Kamil Bekir Afacan

**Üye :** Dr.Öğr.Üyesi M. İnanç Onur

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Gülgün Yılmaz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Çelikhane Cürufunun Yol Üst Yapısının İyileştirmesinde Kullanımı” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 15/05/2018

Mehmet Yılmaz

İmza

## ÖZET

Bu tez çalışmasında, demir çelik fabrikalarında çelik ve buna benzer malzemenin üretimi esnasında ortaya çıkan çelikhane cürufunun, kaolin kili ve uçucu kül ile belirli oranlarda karıştırılarak yol üst yapısı; temel veya alt temel tabakasında kullanımı araştırılmıştır. Kaolin kil(K) oranı sabit(%5) tutulmak koşuluyla çelikhane cürufu(S) (%70, %65, %60, %55) ve uçucu kül(F) (%25, %30, %35, %40) oranları değiştirilerek optimum su muhtevasında karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlar S70F25K5, S65F30K5, S60F35K5 ve S55F40K5 olarak adlandırılmıştır. Bu numunelere 1,7 ve 28 gün kürleme işlemi yapılmıştır. Yukarıda adı geçen karışımlar üzerinde; zemin sınıflama deneyleri ile mukavemet deneyleri; kompaksiyon, serbest basınç taşıma kapasitesi ve Kaliforniya Taşıma Oranı(CBR) deneyleri yapılmıştır. 1 ve 7 günlük sonuçların 28 günlük sonuçlar kadar sağlıklı sonuçlar vermediği tespit edilmiştir. 28 gün kürlenmiş numunelerin sonuçlarına göre CBR oranı %130'a kadar artış göstermiştir. Bu durumda çelikhane cürufu yol üst yapısı; alt temel ve temel tabakalarında kullanılabilir olduğu ortaya çıkmıştır. Geri dönüşüm kavramının önem kazandığı günümüzde, üretim aşamasında ortaya çıkan milyonlarca ton atığın, inşaat sektöründe kullanılabilirliği tartışılmaktadır. Bu çalışmada geri dönüşüm ile ülke ekonomisine katkı sağlanması hedeflenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Çelikhane cürufu, Uçucu kül, Kaliforniya Taşıma Oranı, Kaolin kili

## SUMMARY

In this thesis study, the superstructure of the road the steel slag which are produced during the production of steel and similar materials in iron steel factories at a certain ratio with kaolin clay and fly ash by mixing, which is use in the base or subbase has been investigated. Steel slag (70%, 65%, 60%, 55%) and fly ash (F) (25%, 30%, 35%, 40%) is changed while keeping the kaolin clay (K5) proportion were constant by the which mixtures is in optimum water content get prepared.. These mixtures are named S70F25K5, S65F30K5, S60F35K5 and S55F40K5. These samples were cured for 1,7 and 28 days. The above-mentioned blends were subjected to sieve analysis, compaction, unconfined compressive strenght and California Bearing Ratio (CBR) tests. 1 and 7-day results were not as good as 28-day results. It has been understood that steel slag having a CBR ratio of 130% can be used in the subbase of the superstructure of road based on the results of 28 days. Today, as the concept of renewable energy and recycling becomes more important, millions of tons of waste generated during the production phase are discussed use of in the use of construction industry. In addition, this recycling is aimed to benefit the economy of the country.

**Keywords:** Steel slag, Fly Ash, California Bearing Ratio, Kaolin clay

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın yapılması, araştırılması, yürütülmesi ve sonuçlanmasında bana yol gösteren, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, yoğun çalışma tempoma rağmen bu duruma ılımlı yaklaşan danışman hocam Prof. Dr. Gülgün Yılmaz'a sonsuz minnet, teşekkür ve en içten saygılarımı sunarım. Bununla beraber deney çalışmalarında bana yardımcı olan Araş. Gör. Hakan Bilici ve bölüm teknikerimiz Eyüp Ertaş'a, teknik ve lojistik anlamda desteklerini esirgemeyen Gazi Üniversitesi Öğretim üyesi Prof. Dr. Seyhan Fırat'a, yüksek lisansa başladığım esnada yaşadığım teknik sorunların çözümlenmesinde bana yardımcı olan bölüm başkanımız Prof.Dr. Eşref Ünlüoğlu'a, deney çalışmalarında teknik bilgi ve deneyimini benimle paylaşan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç.Dr. Murat Türköz ve Doç.Dr. Hasan Savaş'a, Sakarya Üniversitesi Öğretim Üyesi. Dr. Öğr. Üyesi İsa Vural'a, bu çalışma esnasında motivasyonumu devamlı yukarıda tutmama yardımcı olan kardeşlerim Ayşenur Yılmaz ve Nurefşan Yılmaz'a ve eğitim hayatımın en başından bu çalışmanın sonuna dek desteklerini bir an olsun esirgememiş ve gelecekte de esirgemeyeceğimden tereddüt etmeyeceğim, hayatım boyunca her daim sonsuz sevgiyle minnetdar kalacağım annem Leyla Yılmaz ve Babam Ahmet Yılmaz'a en kalbi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiii
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>1.GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	3
<b>3. YOL ÜST YAPISI</b> .....	7
3.1. Yol Üst Yapısının Geometrisi.....	7
3.1.1. Alt temel tabakası.....	8
3.1.2. Temel tabakası.....	10
3.2. Yol Üst Yapısında Kaliforniya Taşıma Oranı(CBR) Deneyi.....	13
3.3. Rijit ve Esnek Yol Üst Yapısı.....	14
3.4. Çelikhane Cürufu ve Yol Üst Yapısı.....	15
<b>4. MATERYAL</b> .....	17
4.1. Çelikhane Cürufu .....	17
4.2. Uçucu Kül .....	22
4.3. Kaolin.....	25
<b>5.YÖNTEM</b> .....	27
5.1.Numunelerin Hazırlanması.....	27
5.2. Elek Analizi.....	27
5.3.Kompaksiyon.....	29
5.4. Serbest Basınç Deneyi.....	30
5.5. Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi (CBR).....	34
<b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	38
6.1. % CBR Oranı-kür süresi ilişkisi.....	38

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.2.Eksenel yük-kür süresi ilişkisi.....	39
6.3.% CBR Oranı-maksimum kuru yoğunluk ilişkisi.....	39
6.4.% CBR Oranı-qu ilişkisi.....	42
6.5.Diğer Çalışmalar.....	43
6.6.Çelikhane Cürufunun Fiziksel Özelliklerinin Yol Alt Temel ve Temel Tabakası Standartları ile Karşılaştırılması.....	46
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>47</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>50</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1. Stok sahalarında depolanan çelikhane cürufu (ERDEMİR).....	2
3.1. Standart esnek üst yapısı katmanları.....	7
3.2. Yol üst tabakasının şematik gösterimi.....	8
4.1. Demir-çelik üretim prosesi (Dündar, 2006).....	18
4.2.Çelikhane cürufunun elek analizi.....	19
4.3.Çelikhane cürufunun SEM fotoğrafı.....	21
4.4. Çelikhane cürufuna ait XRD grafiği.....	22
4.5. Uçucu külün SEM fotoğrafı.....	23
4.6. Uçucu küle ait XRD grafiği.....	23
4.7. Kaolinin SEM fotoğrafı.....	25
4.8. Kaoline ait XRD grafiği.....	26
5.1. Karışımların tane boyu dağılım eğrisi.....	28
5.2. Karışımların kuru yoğunluk-su muhtevası ilişkisi.....	29
5.3 S55F40K5 karışıma ait serbest basınç deney sonuçları.....	31
5.4. S60F35K5 karışıma ait serbest basınç deney sonuçları .....	31
5.5.S65F30K5 karışıma ait serbest basınç deney sonuçları .....	32
5.6. S70F25K5 karışıma ait serbest basınç deney sonuçları .....	32
5.7. Serbest basınç deneyine tabi tutulan 1 günlük numune.....	33
5.8. Serbest basınç deneyine tabi tutulan 28 günlük numune.....	33
5.9. S70F25K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi.....	36
5.10. S65F30K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi .....	36
5.11. S60F35K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi .....	37
5.12. S55F40K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi .....	37
6.1. % CBR değeri ile kür süresi arasındaki ilişki.....	38
6.2. Eksenel yük-kür süresi arasındaki ilişki.....	39
6.3. % CBR oranı- maksimum kuru yoğunluk arasındaki ilişki (1 günlük).....	40
6.4. % CBR oranı- maksimum kuru yoğunluk arasındaki ilişki (7 günlük).....	41

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.5. % CBR oranı- maksimum kuru yoğunluk arasındaki ilişki (28 günlük).....	42
6.6. % CBR-qu arasındaki ilişki.....	42
6.7. Karışımların 1,7 ve 28 günlük % CBR değerlerinin karşılaştırılması.....	45
7.1. Karışımların 1,7 ve 28 günlük % CBR değerleri.....	48



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1. Alt temel malzemesi gradasyon limitleri.....	8
3.2. Alt temel malzemesinin fiziksel özellikleri.....	9
3.3. Alt temel sıkıştırma kriterleri.....	10
3.4. Kaba agreganın fiziksel özellikleri.....	11
3.5. İnce agreganın fiziksel özellikleri .....	11
3.6. Temel tabakası gradasyon limitleri.....	12
3.7. KGM'nin belirlediği alt temel ve temel standartları.....	13
4.1. Çelikhane cürufu elek analizi sonuçları.....	19
4.2. Çelikhane cürufu kimyasal analizi.....	20
4.3. Çelikhane cürufu piknometre deney sonucu.....	20
4.4. Çelikhane cürufu fiziksel özellikleri.....	21
4.5. Seyitömer uçucu külünün kimyasal bileşimi.....	24
4.6. Uçucu kül fiziksel özellikler.....	24
4.7. Kaolinin kimyasal analizi.....	26
5.1. Numune karışım oranları(% ağırlıkça).....	27
5.2. Karışımların elek analizi sonuçları.....	28
5.3. Dört karışıma ait maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri.....	30
5.4. Karışımlara ait qu değerleri .....	32
5.5. Hesaplanan % CBR Değerleri.....	34
5.6 Karışımların % CBR değerlerindeki artış oranları.....	35
6.1. % CBR oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi(1 günlük).....	40
6.2. % CBR oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi(7 günlük).....	41
6.3. % CBR oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi(28 günlük).....	41
6.4. Numunelere ait karışım oranları (% ağırlıkça).....	43
6.5. Karışımlara ait maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerleri .....	44
6.6. Karışımlara ait % CBR değerleri.....	45
6.7. KGM'ye göre alt temel, temel ve Çelikhane Cürufunun fiziksel özellikleri.....	46

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Kısaltmalar****Açıklama**

AASTHO	Amerika Karayolları Zemin Sınıflama Sistemi
ASTM	American Society for Testing and Material
BOF	Bazık Oksijen Fırın
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi
EAO	Elektrik Ark Ocağı
ERDEMİR	Ereğli Demir Çelik Fabrikası
FHWA	Federal Highway Administration
İO	İndüksiyon Ocağı
KK	Kesme Kutusu Deneyi
SB	Serbest Basınç Deneyi
TÜBİTAK-MAM	Tübitak Marmara Araştırma Merkezi
USCS	Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde insanoğlunun ihtiyaçlarının artması ve teknolojinin engellenemez gelişimi ile birlikte doğal enerji kaynakları da doğru orantılı olarak tükenmektedir. Bu kaynakların kontrolsüz bir şekilde tükenmesi tüm dünyada ciddi anlamda çevresel deformasyona sebep olmaktadır. Özellikle doğal enerji kaynaklarının hızla tükenmesi ve bununla beraber nüfusun ve ihtiyaçların hızla artması insanlığa 'yeniden kazanım' ve 'geri dönüşüm' gibi kavramları kazandırmıştır. Bu kapsamda çeşitli üretimler sonucunda ortaya çıkan atık malzemeler, yukarıda bahsi geçen yeniden kazanım konusunun içinde bulunmaktadır. Ayrıca günümüzde yapılan özellikle atıklarla ilgili olan bilimsel çalışmaların tamamında, bu atık malzemenin çevresel bir sorun olarak kalmayıp değerlendirilmesi, ülke ve dünya ekonomisine katkısının sağlanması hedeflenmektedir.

Çelikhane cürufunun yeniden kazanım başlığı altında dünyadaki kullanım alanları; geri dolgu malzemesi, asfalt agregası, zemin iyileştirme, çimento katkısı, demiryolu balastı, muhtelif yapı malzemeleri, yol alt ve üst temel tabakalarında kullanımı ile birlikte tarım ve çevre uygulamalarıdır. Ülkemizde Ereğli demir çelik fabrikasının parke taşı yapımı (ERDEMİR, 2009), yol dolgu malzemesi gibi çalışmaları bulunmaktadır fakat bu konuda çok fazla çalışma yoktur.

Tez kapsamında atık olarak kullanılan çelikhane cürufu Ereğli Demir Çelik Fabrikasında (ERDEMİR), 1 ton çelik üretiminde ortalama 100-150 kg olarak ortaya çıkmaktadır. Yıllık olarak düşünüldüğünde ise yaklaşık olarak 300.000-350.000 ton çelikhane cürufu açığa çıkmakta ve bu malzemenin büyük bir kısmı kullanılmayarak stok sahasında depolanmak zorunda kalmaktadır (Şekil 1.1). Bu durum ise çevresel bir sorunu ortaya çıkarmaktadır. Bu atıkların farklı alanlarda kullanılarak bertaraf edilmesi hem bir çevresel sorunu ortadan kaldıracak, hem de ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.



Şekil 1.1. Stok sahalarında depolanan çelikhane cürufu (ERDEMİR)

Bu çalışmanın amacı, çelik üretimi sırasında ortaya çıkan çelikhane cürufunun diğer atık malzemelerle birlikte kullanılarak yol üst yapısına ait temel veya alt temel tabakalarında değerlendirilmesini araştırmaktır. Bu sayede hem yol alt tabakasında hali hazırda kullanılan çeşitli granülometrilere ki agrega yerine, teknik yeterliliğe sahip bir ürün elde etmek, hem de atık malzemelerin depolanması, bertarafı gibi sorunları ortadan kaldırarak milli servetimize katkı sağlamak ve doğaya minimum düzeyde zarar vererek çevreci bir yaklaşımda bulunulmuş olunacaktır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geri dönüşüm kavramının önem kazanmasıyla birlikte gerek bahsi geçen çelikhane cürufu ile ilgili olsun gerekse yardımcı katkı malzemeler olarak kullanılan kaolin ve uçucu külle ilgili özel şirketler, fabrikalar, demir çelik üretim tesisleri ve üniversiteler tarafından birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında atık malzemeler; yapı malzemesi üretimi, çeşitli beton ve betonarme yapılarda katkı malzemesi ve yol çalışmalarında dolgu malzemesi olarak kullanılmış ve olabilirliği değerlendirilmiştir.

Ereğli demir çelik fabrikasında çelikhane cürufunun parke taşı yapımında kullanılabilirliğiyle ilgili çalışma yapılmıştır (Pehlivan ve Parlak, 2013). Bu çalışma kapsamında çelikhane cürufu elenerek 2-5 mm ve 5-12 mm şeklinde iki farklı granülometride sınıflandırılmıştır. Parke taşı reçetesine göre imalat yapılmış agrega yerine çelikhane cürufu kullanılmıştır. Toplam %42 kadar 2-5 mm, %22 kadar 5-12 mm çelikhane cürufu, %9 yüksek fırın cürufu, %3 kireç, %18 çimento, %6 su şeklinde karışım hazırlanmıştır. Sadece kireç katılmadan aynı oranlar kullanılarak bir numune daha hazırlanmıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra ürünlerin küremeleri standartlara uygun bir şekilde yapılmış olup çekme deneyine tabi tutulmuştur. TS2824 EN1338 standardına göre 28. gün sonundaki çekme değerine ulaşamamıştır. Ancak kireç ve yüksek fırın cürufu katkısı olan numune standart değer olan 3,6 N/mm<sup>2</sup> ye değerine çok yaklaşmıştır (3,4-3,85 N/mm<sup>2</sup>). Bu çalışma neticesinde agrega olarak salt çelikhane cürufu kullanmak değil belirli oranlarda doğal agrega kullanarak istenilen değerlere kolaylıkla ulaşılabileceği anlaşılmıştır.

Yine bir başka çalışmada çelikhane cürufunun çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılıp kullanılmayacağı tartışılmıştır (Dündar, 2006). Bu çalışmada hali hazırda çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılan yüksek fırın cürufu ile bunun yerine kullanılacak olan çelikhane cürufu karşılaştırılmıştır. Farklı soğutma hızlarında ve farklı granülometrilere kullanılan çelikhane cürufunun, aynı oranda kullanılan yüksek fırın cürufu ile benzer dayanım özelliklerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Çelikhane cürufunun inceliği arttıkça çimentonun dayanımı da artmıştır. Ayrıca çelikhane cürufunu öğütmede

kullanılan enerji ve çalışmayla, klinker ile birlikte öğütülen yüksek fırın cürufu arasında bir fark olmadığı gözlemlenmiştir.

Çelikhane cürufunun yol alt yapı dolgusunun zemin özelliklerinin iyileştirilmesi başlıklı yapılan çalışmada (Fırat vd., 2016), kireç oranı sabit tutularak çelikhane cürufu, uçucu kül ve kaolinit belirli oranlarda karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. 1, 7, 28 ve 56 gün kürlemelere tabi tutulan numunelere serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda 28 günlük kür süresine sahip numunelerin maksimum taşıma kapasitesi değerlerini verdiği bulunmuştur. Sonuçlara göre çelikhane cürufunun yol alt tabakalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bilgen (2012)' in yaptığı " Düşük plastisiteli kilde katkı olarak çelikhane cürufu kullanılması ve kireç ile etkileşimi" başlıklı çalışmada, çelikhane cürufunun killi zeminlerin geoteknik özelliklerine katkısı araştırılmış ve sadece kil ile yapılan serbest basınç deneyinde 279 kPa değeri bulunurken, ağırlıkça %3,33 lük çelikhane cürufu ilavesi ile 28 gün sonunda serbest basınç değeri 960 kPa olarak bulunmuştur. Bununla birlikte kil, %3,33 çelikhane cürufu ve %5 kireç karışımında ise serbest basınç değeri 4000 kPa olarak bulunmuştur. Ayrıca %6 olan CBR değeri ise %135 değerine ulaşmıştır. Bu sonuçlara göre çelikhane cürufunun killi zeminlerin iyileştirmesinde istenilen etkiyi yaptığı özellikle kireçle birlikte çok daha etkin bir şekilde performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Çelikhane cürufu yapı malzemeleri ve çimento yapımında kullanıldığı gibi yol yapımında asfalt betonu katkı malzemesi ve demiryolu balast malzemesi olarak kullanımı da tartışılmıştır. Bununla alakalı TÜBİTAK-MAM ve Ereğli Demir Çelik fabrikası, "ERDEMİR çelikhane cüruflarının asfalt betonu agregası ve demiryolu balast malzemesi olarak kullanılması imkanları" (Sönmez vd., 2003) başlıklı bir çalışma yapmış olup, yapılan malzeme karakterizasyon tespiti çalışmaları neticesinde çelikhane cürufunun hem asfalt betonu katkı malzemesi olarak hem de demiryolu balast malzemesi olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Çalışma kapsamında çelikhane cürufunun yanı sıra bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerden bir tanesi de uçucu küllerdir. Güler vd'nin (2005) yaptığı çalışmada, ülkemizde yakılan 45 milyon ton kömür neticesinde 15 milyon ton uçucu kül ortaya çıktığı

belirtilmiştir. Uçucu küllerin özelliklerinin ve kullanım alanlarının araştırıldığı çalışmada özellikle içeriğindeki toksik maddelerin arındırılmasıyla, inşaat sektöründe tarıma kadar bir çok alanda kullanılabilceği anlaşılmıştır. Bu sayede atık maddelerin depolanması ve çevresel bir sorun haline gelmesi problemi büyük ölçüde ortadan kalkacaktır.

Aruntaş'a göre (2006), özellikle 1970 petrol krizinden sonra enerji kaynaklarının korunması ve atık malzemelerin yeniden kullanılabilir hale gelmesi önem kazanmıştır. Bir atık malzeme olan uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanılabilirliğinin büyük bir potansiyele sahip olduğu, özellikle çimento, beton ve yapı malzemelerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanıldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca yol yapımında, kerpiç ve tuğla yapımında, geri dolgu ve zemin stabilizesinin sağlanması gibi alanlarda da kullanılabilceği öngörülmüştür.

Uçucu küllerde birçok çalışmada tek ya da bir başka malzemeyle birlikte kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmış ve çeşitli veriler elde edilmiştir. Bu tez kapsamında da kullanılan Seyitömer termik santralinden çıkan uçucu külün tuğla katkı hammaddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır (Bentli vd., 2005) Bu çalışmaya göre Seyitömer termik santralinden elde edilen uçucu külün mineralojik ve kimyasal yapısı incelenmiş, temin edilen baca uçucu külünden tuğla reçetesine farklı oranlarda katılarak tuğlalar imal edilmiştir. Bu imalatlar neticesinde, şahit numune olarak alınan tuğla ile kıyaslandığında, imal edilen tuğlaların birim hacim ağırlığı şahit numuneye göre biraz daha fazla olmasına rağmen pişme, kuruma ve toplam küçülmede herhangi bir değişikliği neden olmamıştır. Ayrıca hazırlanan numunelerin su emme oranı azalmış olmasına rağmen, dayanım değerleri şahit numunenin dayanım değerine ulaşamamıştır.

Ülkemizde endüstriyel bir atık olan uçucu küllerin çeşitli şekillerde kullanılabilir olduğu 1990'ların sonlarında fark edilmiştir. Uçucu külün performansı ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde malzemenin kullanımı yaygınlaşmıştır. Beton içerisine uçucu kül katılarak yapılan çalışmada, uçucu kül sayesinde betondaki geçirimsizliğin azaldığı, hidrasyon ısısını düşürdüğü için betondaki rötre çatlaklarını önlediği, beton içerisindeki boşlukları doldurduğu için donatı korozyonuna engel olduğu, betonun işlenme oranını arttırdığı, az da olsa beton içerisinde izolasyon sağladığı, mukavemeti portland çimentosuna göre arttırdığı ve mukavemetinin 400 güne kadar artarak devam ettiği,

betondaki kuma ve segregasyonu önlediği anlaşılmıştır (Çil, 2003). Bu farkındalıktan sonra termik santrallerden açığa çıkan uçucu kül atıkları özellikle imento fabrikaları tarafından yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Uçucu küllerin priz süresine etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada, Seyitömer ve Çayırhan termik santrallerinden çıkan uçucu külün portland çimentosuna farklı oranlarda karıştırılarak priz süresine etkisi değerlendirilmiştir (elik vd., 2003). Bu alışma neticesinde çimentoya ağırlıkça %5, %10,%15 ve % 20 oranında uçucu kül katılmasıyla beton priz sürelerinin uçucu kül bulunmayan çimentoya göre arttığı anlaşılmıştır. Uçucu kül oranı arttığa priz süresi artmıştır.



### 3.YOL ÜST YAPISI

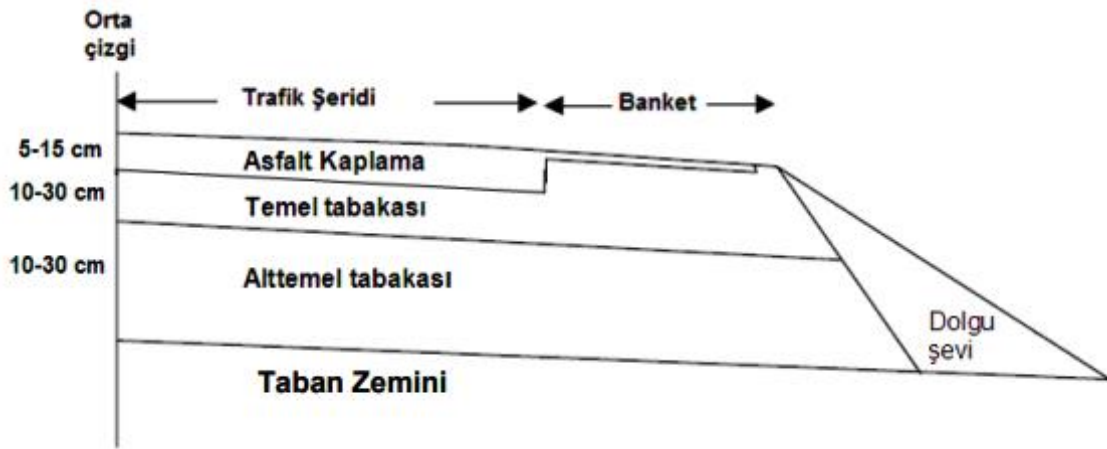
#### 3.1. Yol Üst Yapısının Geometrisi

Yol üst yapısı 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 (Yılmaz, 2016).

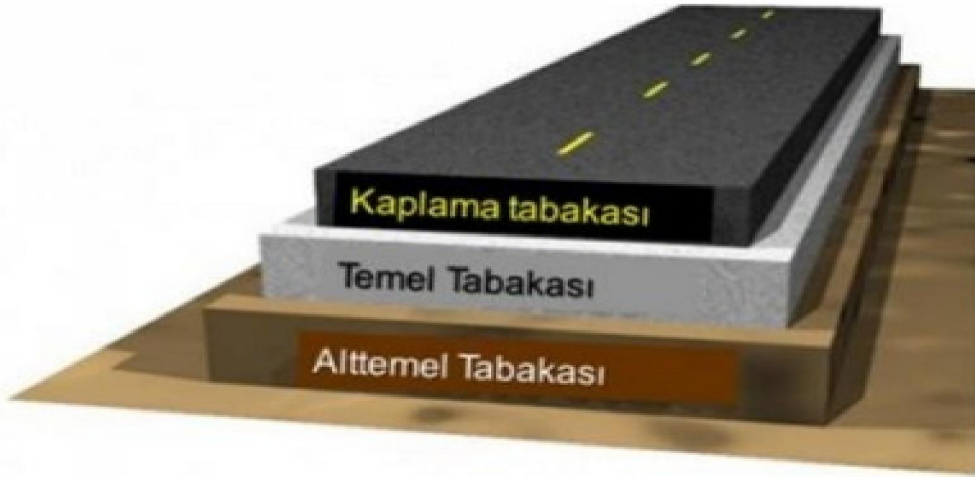
Kaplama tabakası, araçlar için uygun bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak, sürekli sirkülasyondan kaynaklı trafiğin aşındırma etkisini azaltmak ve yol yapısını olumsuz yönde etkileyecek olan kar, yağmur ve diğer her çeşit suyun deformasyonunu asgari düzeye indirgemek amacıyla yapılır.

Kaplama altındaki temel tabakası, bağlayıcı ya da bağlayıcısız belirli granülometrideki agregalar ile üst yapının yük taşıma performansını arttırmak amacıyla yapılır. Bununla beraber temel tabakası trafikten gelecek kayma gerilmelerine, hava şartlarına dayanabilir nitelikte olmalıdır.

Alt temel tabakası ise, temel tabakası ve kaplama tabakasını taşımak üzere taban zeminine serilen belirli granülometri ve plastisite özelliklerine sahip yol yapısıdır.



Şekil 3.1 Standart yol üst yapısı



Şekil 3. 2. Yol üst tabakasının şematik gösterimi

### 3.1.1. Alt temel tabakası

Karayolları teknik şartnamesi (2013)'e göre alt temel; Çizelge 3.1. de verilen gradasyon sınırları içinde ve sürekli gradasyon verecek malzemenin su ile karıştırılarak ince tesviyesi tamamlanmış olan dolgu veya yarmadan oluşan üstyapı tabanı üzerine bir ya da birden fazla tabakalar halinde projeye uygun bir şekilde serilip sıkıştırılmasıyla oluşan tabaka olarak tanımlanmaktadır.

Alt temel tabakasında kullanılacak malzeme kum, çakıl, teras çakılı, ayrışmış kaya, cüruf kırmataş ve benzeri malzemelerden tek tip olabileceği gibi kazınmış asfalt malzemesi kullanımı durumunda iki veya daha fazla malzemenin karışımından oluşmalıdır.

Çizelge 3.1. Alt temel Malzemesi Gradasyon Limitleri(KGM, 2013)

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

Alt temel malzemesi, kum-çakıl ocaklarından temin edildiği durumlarda malzemenin gradasyonu TİP-A gradasyon sınırlarına uygun olmalıdır. Ancak alt temel malzemesi kum-çakıl veya taş ocaklarından kırılarak hazırlanırsa malzemenin gradasyonu TİP-B'ye uymalıdır. Kum-çakıl ocağında kırılan malzemenin alt temelde kullanılması durumunda 4 nolu elek üzerinde kalan malzemenin minimum %50 lik kısmının iki veya daha fazla yüzeyinin kırılması gerekmektedir (KGM, 2013).

Alt temel tabakasında kullanılacak malzemenin fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.2 deki gibidir.

Çizelge 3.2 Alt temel malzemesinin fiziksel özellikleri.

DENEY ADI		ŞARTNAME LİMİTLERİ	DENEY STANDARDI
% Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO <sub>4</sub> ile kayıp, %		≤ 25 (MS <sub>25</sub> )	TS EN 1367 - 2
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %		≤ 45 (LA <sub>45</sub> )	TS EN 1097 - 2* AASHTO T 96
Yassılık İndeksi, %		35	BS 812
		≤ 30 (FI <sub>30</sub> )	TS EN 933-3*
Su Emme (Kaba ve İnce Agregada), %		≤ 3,5 (WA <sub>24</sub> 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 <sub>4,0</sub> ) ≤ 5,5 (MB <sub>5,5</sub> )**	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 5,5 (MB <sub>5,5</sub> )**	
* Referans Metot ** Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.			

Alt temel malzemesi tesviyesi hazırlanmış yüzey üzerine 20 cm'yi aşmayacak şekilde tabakalar halinde serilip sıkıştırılmalıdır. Alt temel sıkıştırma kriterleri ise Çizelge 3.3 deki gibidir.

Çizelge 3.3 Alttemel sıkıştırma kriterleri

TİP-A	Sıkışma, Minimum %	96	Modifiye Proctor TS 1900-1, AASHTO T 180
	Optimum Su İçeriği %	$W_{opt} \pm 2$	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 %	$(W_{opt-2}) - W_{opt}$	Modifiye Proctor TS 1900-1, AASHTO T 180
	Optimum Su İçeriği %	$W_{opt} \pm 1$	Titreşimli Tokmak TS 1900-1, BS 1377

### 3.1.2. Temel tabakası

Temel tabakası, üst yapının ana yapısal elemanlarından biri olup, alt temel ve tabana gelen basınç gerilmelerini kabul edilebilir seviyeye düşürmek ve belirli bir esneklik sağlayarak kaplamanın deformasyonunu, kırılmasını önlemek gibi işlevleri bulunmaktadır.

Temel tabakası; Granüler Temel (GT), Plent-Miks Temel (PMT) ve Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT) olarak 3 farklı şekilde yapılabilir.

Üç tip temel tabakası da alt temel tabakası gibi çakıl, kırılmış çakıl, kum, cüruf ve benzeri malzemelerden hazırlanmalıdır. Temel tabakasında kullanılacak malzemeler kaba agrega ve ince agrega olarak ikiye ayrılır. Çakıl, kırılmış çakıl, teras çakılı, kırmataş, kırılmış cüruf kaba agrega sınıfına girerken; doğal kum, ince çakıl, taş tozu, cüruf kumu ince agrega sınıfında yer almaktadır. Bu malzemelerden cürufun AASHTO (American Association of State Highway Transportation Officials) T 19'a göre saptanan gevşek birim ağırlığı  $1.100 \text{ kg/m}^3$  ten az olmamalıdır. Temel tabakasında kullanılacak malzeme Çizelge 3.4 ve 3.5 teki verilere sahip olmalıdır.

Çizelge 3.4. Kaba agreganın fiziksel özellikleri

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO <sub>4</sub> ile kayıp, %	≤ 20 (MS <sub>20</sub> )	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %	≤ 35 (LA <sub>35</sub> )	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 <sub>25</sub> )	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 <sub>243</sub> )	TS EN 1097-6 (Madde 8)
* Referans Metot		

Çizelge 3.5.İnce agreganın fiziksel özellikleri

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 ≤ 3,0 (MB <sub>3,0</sub> ) ≤ 4,5 (MB <sub>4,5</sub> )*	TS EN 933-9
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına ≤ 4,5 (MB <sub>4,5</sub> )*	
* Magmatik kökenli kayalarda, şantiye konkasöründe üretilmiş ince agregada istenen şartname değerinin sağlanamaması durumunda bu şart aranacaktır.		

Granüler temel tabakası kaba agrega ile ince agreganın Çizelge 3.6 da verilen gradasyon limitleri içerisinde, su ile karıştırılarak şartnameye uygun olarak hazırlanan taşıma gücü yeterli taban veya alt temel tabakası üzerine tek seferde ya da tabakalar halinde serilip sıkıştırılmasıyla oluşmaktadır. Plent miks temel ise belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelendirilmiş bir gradasyona sahip agreganın plentde optimum su

içeriğinde karıştırılması ve yola serilip sıkıştırılması ile elde edilir. Çimento bağlayıcılı granüler temel tabakası ise plentmiks temel tabakasında olduğu gibi, belirli fiziksel şartları sağlayan ve iyi derecelenmiş bir gradasyona sahip agregaya belirli oranda plentde çimento katarak optimum su içeriğinde karıştırılıp yola serildikten sonra yeterince sıkıştırılması ile elde edilir. Diğer temel tiplerinden farkı agrega, çimento ve suyun karışım işlemleri mutlaka sabit bir plentde yapılmalıdır(Tunç, 2001).

Çizelge 3.6. Temel Tabakası Gradasyon Limitleri

Elek inç(mm)	Granüler Temel tabakası				Plent Miks Temel Tabakası		Çimento Bağlayıcılı Granüler Temel Tabakası
	A	B	C	D	Tip-1	Tip-2	
3"(75)	-	-	-	-	-	-	-
2"(50)	100	100	-	-	-	-	-
1 1/2"(37,5)	80-100	85-100	-	-	100	-	100
1"(25)	60-90	70-95	100	100	72-100	100	72-100
3/4"(19)	-	-	75-100	80-100	60-92	80-100	60-92
3/8"(9,5)	30-70	40-75	50-85	60-100	40-75	50-82	40-75
No.4(4,75)	25-55	30-60	35-65	50-85	30-60	35-65	30-60
No.10(2,00)	15-40	20-45	25-50	40-70	20-45	23-50	20-45
No.40(0,425)	8-20	10-25	12-30	20-45	8-25	12-30	8-25
No.200(0,075)	2-8	0-12	0-12	0-12	0-10	2-12	0-10

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 olmayacaktır. Modifiye Proctor Deneyi( AASHTO T180, TS 1900-1) ile bulunan maksimum kuru birim ağırlığının %98'ine sıkıştırılan numunelerin yaş CBR (AASHTO T193, TS1900-2) değerleri, %100'den az olmayacaktır(KGM, 2013). Çizelge 3.7. de Karayolları Genel Müdürlüğünün alt temel ve 3 tip temel için belirlediği standartlar yer almaktadır.

Çizelge 3.7.KGM'nin belirlediği alt temel ve temel standartları

ÖZELLİKLER		ALTTEMELE	MEKANİK STABİLİZASYON TEMEL		PLENT-MİKS TEMEL		ÇİMENTO STABİLİZASYON TEMEL	
AGREGA	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ile dayanıklılık	Mak. %25	KABA Mak.%15	İNCE —	KABA Mak. %15	İNCE —	KABA Mak. %15	İNCE —
	Los Angeles Aşınma	Mak. %50	Mak. %40	—	Mak. %40	—	Mak. %40	—
	Yassılık İndeksi	—	Mak. %40	—	Mak. %35	—	—	—
	LL-PI	Mak. 25-6	—	Mak. 25-6	—	Mak. 25-6	—	Mak. 25-6
	Kırılmışlık Oranı	—	Min. %50	—	Min. %100	—	—	—
	Filler	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	—	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	—	No.40'dan geçen kısmın 2/3'ünden az	—
	Kil toprakları	Mak. %1	0	Mak. %0,5	0	Mak. %0,5	0	Mak. %0,5
	Organik maddeler	Mak. %1	0	Mak. %0,5	0	Mak. %0,5	0	Mak. %0,5
	Diğer zararlı maddeler	—	Mak. %1	Mak. %1	Mak. %1	Mak. %1	Mak. %1	Mak. %1
	Sıkışmış tabaka kalınlığı	Mak. 20 cm	Mak. 20 cm	—	Mak. 20 cm	—	—	—
SIKIŞMA	Sıkıştırma kontrolü	-100 m'de bir Kum Konisi -100 m'de bir Kasnak -25 m'de bir Nükleer	-100 m'de bir Kum Konisi -100 m'de bir Kasnak -25 m'de bir Nükleer	—	-100 m'de bir Kum Konisi -100 m'de bir Kasnak -25 m'de bir Nükleer	—	7 günlük Serbest Basınç Dayanımı: 35-55 kg/cm <sup>2</sup>	
	Sıkıştırma Makinaları: Vibrasyonlu Silindir Pnömatik Silindir	Statik çizgisel yük>30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton	Statik çizgisel yük>30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton	—	Statik çizgisel yük>30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton	—	Statik çizgisel yük> 30kg/cm Lastik başına yük>3,5 ton	
	Minimum Sıkışma	%95 Mod. Proktor %100 Sd. Proktor	%98 Mod. Proktor %95 Titreşimli Tokmak	—	%100 Mod. Proktor %97 Titreşimli Tokmak	—	%98 Mod. Proktor	
	Sıkışmada su içeriği %	W <sub>opt</sub> -2(Std. Proktor) W <sub>opt</sub> ± 2 (Mod.Proktor)	W <sub>opt</sub> -2(Mod. Proktor) W <sub>opt</sub> ± 2 (Titreşimli Tok.)	—	W <sub>opt</sub> -2(Mod. Proktor) W <sub>opt</sub> ± 0,5(Titreşim.Tok.)	—	W <sub>opt</sub> İla W <sub>opt</sub> +0,5	
	CBR, %	Min. 30 (Yaş)	Min. 100 (Yaş)	—	Min. 120 (Yaş)	—	—	
	Yüzey düzgünlüğü (4m masterla)	Mak. 20 mm	Mak. 15 mm	—	Mak. 15 mm	—	Mak. 15 mm	

### 3.2. Yol Üst Yapısında Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

Üst yapı malzemelerinin taşıma güçlerinin değerlendirilmesinde en çok kullanılan verilerden birisi olan Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR), bir zeminin dikkatle kontrol edilen yoğunluk ve rutubet şartları altında daneler arası kayma direncinin bir ölçüsü olup, belli boyutları olan bir pistonun özel olarak sıkıştırılarak hazırlanmış bir numuneye belirli bir derinliğe kadar batması için gerekli basıncın, aynı pistonun düzgün bir gradasyonu olan kırmataştan hazırlanmış bir numunede aynı batmayı sağlayan basınca oranı olarak tanımlanır. CBR yüzde olarak ifade edilen bir sayıdır. Deney, ince daneli zeminler ve 19.0 mm elek üzerinde kalan kısmı çok az olan bazı temel ve alt temel malzemelerinin değerlendirilmesinde daha faydalı olmaktadır (KGM, 2008). Karayolları genel müdürlüğünün belirlediği standartlara göre, alt temelde minimum yaş CBR oranı %30, granüler temel tabakasında %100, plent miiks temel tabakasında %120 olmalıdır. CBR deneyinden elde edilen veriler, malzemenin yol üst yapısının alt temel veya temel tabakasında kullanılıp kullanılmayacağı konusunda net bilgi verir.

### 3.3. Rijit ve Esnek Yol Üst Yapısı

Üst yapılar, kaplamada kullanılan malzemenin niteliğine yapılaş şekline göre rijit ve esnek üst yapısı olarak ikiye ayrılmaktadır. Rijit üst yapısı alt temel ve temel tabakalarının üzerine kaplama tabakası olarak beton kullanılmasıyla oluşan yol çeşididir. Diğer bir deyişle beton yollar olarak nitelendirilmektedir. İmalatında çimento kullanımı olduğundan bu adı almaktadır. Beton yolların yapımı zaman almakla birlikte (dökülen betonun priz alması için gerekli 28 günlük süre) yapısal ömrü uzun ve az bakım gerektiren bir yol çeşididir. Gerekli bakımları yapıldığı takdirde geçirimsiz bir yüzey oluşarak yol alt tabakasının deformasyonunu en aza indirmekte ve yolun ömrünü uzatmaktadır. Yüzeyin pürüzlülüğü az olduğundan yüksek hızlarda daha az ses yaparak trafik konforunu artırır. Bununla beraber asfalta nazaran açık renkli olduğundan özellikle gece görünürlülüğü fazladır. Harekete karşı direnci düşük olduğundan trafikteki araçların deformasyonu en aza indirgenir. Yol yüzeyi pürüzsüz olduğundan yola gelen yağışların tahliyesi kolay olur. Standartlara uygun yapılan bir beton yol yaklaşık 20 sene hiç bir bakıma ihtiyaç duymadan hizmet verebilir. Örnek olarak Afyon-Ankara bölünmüş yolunun Afyon gidiş yönünde 5-7. km'ler arası 2004 yılında yapılmış olan beton yol hala herhangi bir bakım ve onarım yapılmadan kullanılmaktadır (Anonim,2015). Rijit üst yapının bahsi geçen birçok avantajı ile birlikte dezavantajları da mevcuttur. Yapımı beton priz alma süresi kadar sürdüğünden bu süreçte yolu trafiğe açmak mümkün olmamaktadır. Ayrıca aşınma arttıkça pürüzsüz olan yüzey yerini kaygan bir yüzeye bırakarak güvenlik zafiyeti oluşturmaktadır. Beton yolların yapımından sonra altyapıya dair(pis su hattı, yağmur suyu hattı, elektrik hattı, doğalgaz hattı vb.) imalatların yapımı çok zordur. Asfalta göre betonu kırmak oldukça zordur. Hava durumundaki değişkenlikler rijit üst yapıda ilave gerilmeler oluşturmaktadır. Döşemenin kalınlığında ve ısınma durumuna göre, plağın alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 30 °C'ye kadar çıkabilir. Bu durum sonucu iki tip gerilme doğuşu görülür yani sıcaklığın yükselmesi halinde, üst yüzey alt yüzeyden sıcak olacağından plak kabarıp, ortası yükselir ve üst kısım çekmeye ait kısmı basınca maruz kalır. Betonun elastisite modülünün  $E:100000 \text{ kg/cm}^2$  dilatasyon derzleri arasındaki uzaklığın 30 m olması halinde,30°C' lik bir fark için basınç gerilmelerinin değeri 20–30  $\text{kg/cm}^2$  ye ulaşabilmektedir. Kaplamanın üst ve alt kısımlarındaki nem farkından da buna benzer gerilmeler doğar (Anonim, 2014).

Esnek üst yapılar, kaplama tabakası olarak bitüm esaslı malzemelerin kullanılmasıyla oluşur. Esnek üst yapılar, çekme direnci fazla olmayan malzemelerden yapılmış alt temel, temel ve kaplama tabakalarından oluşur(Anonim, 2014).Esnek üst yapılar rijit üst yapılara göre çok daha hızlı imal edilebilirler. Yapımından bir kaç saat sonra yol trafiğe açılabilir hale gelir. Ayrıca uygulama olarak da daha hızlı ve ilk yatırım maliyeti düşüktür. Bakımı beton yola göre daha kolay olmakla birlikte daha sık olmaktadır. Asfaltın rengi koyu olduğundan gece görünürlüğü daha azdır. Asfalt petrol esaslı bir ürün olduğu ve petrolünde ülkemizde ithal edildiği düşünüldüğünde, ülke adına döviz harcaması anlamına gelmektedir. Araçlardan yola dökülen benzin, mazot, yağ gibi kimyasallar asfaltın yapısını bozmaktadır. Özellikle kış aylarında uygulanan tuzlama işlemi asfalta ciddi anlamda zarar vermekte ve en geç iki sene sonra tekrar tamir gerektirmektedir. Bununla beraber Türkiye'de Karayolları Genel Müdürlüğü, yollarda esnek üst yapısını tercih etmektedir.

### 3.4. Çelikhane Cürufu ve Yol Üst Yapısı

Giriş kısmında da aktarıldığı gibi çelik fabrikalarında üretilen çelikhane cürufunun miktarı yaklaşık 300.000-350.000 ton arasındadır. Bu malzeme hiç bir yerde kullanılmayıp stok sahalarında aylarca hatta yıllarca bekletilmektedir. Geri dönüşümün önem kazandığı günümüzde bu malzemenin teknik özelliklerinin irdelenerek hangi alanlarda değerlendirilebileceği araştırılmaktadır. Bu malzemenin demir üretiminden sonra yeniden kullanılabilir olması hem milli servete katkı sağlayacak, hem de hangi alanlarda kullanılacaksa o alanlardaki hammadde ihtiyacımızı daha aza indirgeyerek doğanın da korunmasına yardımcı olacaktır.

Çelikhane cürufunun gerek yol alt tabakalarında kullanımı, gerekse üst yapıda özellikle yapı malzemelerinde hammadde ya da yardımcı malzeme olarak kullanılabilirliği araştırılırken, fiziksel ve kimyasal standartları sağlayıp sağlayamadığının tespiti için bu çalışma kapsamında da olduğu gibi geçmişten bu yana çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, elek analizi, fiziksel ve kimyasal özelliklerin tespiti için özgül ağırlık, likit limit, plastik limit, kompaksiyon (proktor), mekanik direncinin irdelenmesi ve tespiti için serbest basınç ve CBR deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden alınan veriler

neticesinde çelikhane cürufunun hedeflenen yerlerde kullanılıp kullanılmayacağı belirlenmiştir.

Ilıcalı (1988), tarafından karayolu üst yapısında ERDEMİR cürufunun kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada öncelikli olarak cürufun fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiş ve bu özellikler karayolları yol üst yapısında kullanılacak agrega standartları ile karşılaştırılmıştır. Uygulanacak olan granülometreler deneylerle tespit edilmiştir. Bağlayıcı ve bağlayıcı olarak hazırlanan numunelere (bağlayıcı olarak kireç ve çimento kullanılmıştır) çimento eklenerek serbest basınç deneyi yapılmış, ayrıca CBR deneyi ile de değerlerin tutarlılığı kontrol edilmiştir. Bağlayıcı numunelerin mekanik dayanımı CBR deneyi ile bağlayıcı numunelerin mekanik dayanımı serbest basınç deneyi ile bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada çelikhane cürufu ile birlikte demir çelik fabrikalarından çıkan diğer tür cüruflarda araştırılmıştır. Çalışma neticesinde özellikle çelikhane cürufunun soyulma direncinin diğer cüruflara göre daha yüksek olduğu, dona karşı mukavemetinin aynı şekilde daha iyi olduğu ve karayollarında yaptırılan cilalama testlerinde alt değerden daha yüksek bir mukavemete sahip olduğu anlaşılmıştır.

## 4.MATERYAL

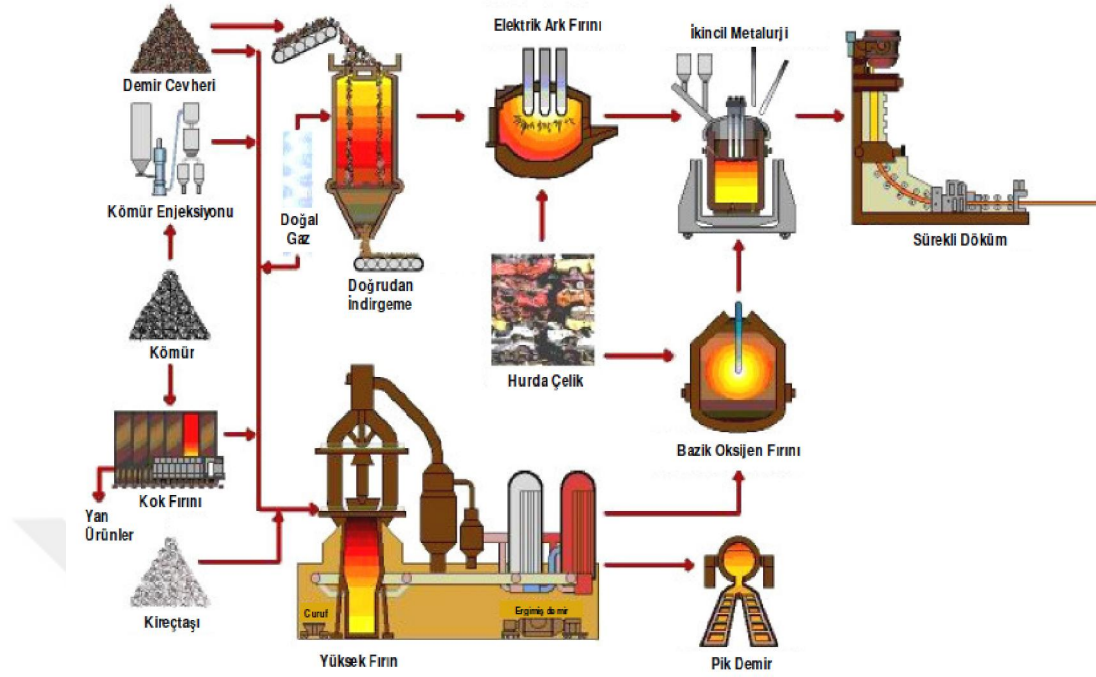
### 4.1.Çelikhane cürufu

Türkiye özellikle son 15 senelik süreçte demir çelik sektöründe büyüyen ülkelerden birisi olmuştur. 2000'li yıllarda yaklaşık 20 milyon ton olan ham çelik üretim kapasitesi yassı ve yapısal çeliğe dönük yatırımların ivme kazanmasıyla 2015 sonu itibarıyla 50 milyon ton seviyesini geçmiştir. 2000 yılında dünyanın en büyük 17. ham çelik üreticisi olan Türkiye 2016'da 8.'liğe yükselmiştir (Çevik, 2017).

Türkiye genelinde, demir çelik tesisleri Marmara, Ege, Karadeniz ve Akdeniz olmak üzere 4 ana bölgede toplanmıştır. Bu 4 lokasyon içerisinde en yüksek kapasiteye sahip olan bölge 16 milyon ton/yıl ile İskenderun iken, sırayla Marmara, İzmir ve Karadeniz bölgeleri gelmektedir. İskenderun dış pazara yakınlığı sebebiyle yeni yatırımlar içinde önemli bir konumdadır.

Çelik üretim sürecinde; çelikhane cürufu ve yüksek fırın cürufu şeklinde iki çeşit yan ürün oluşmaktadır. Çelikhane cürufu, çelik üretiminde, elektrikli ark ocağı (EAO), indüksiyon ocağı (İO) ya da bazik oksijen fırın (BOF) metal eriğin oksitlenmesi esnasında oluşur. Yüksek fırın cürufu (YFC) ise yüksek fırında demir cevherinin sıvı ham demir elde edildiği esnada, cüruf yapıcı elementlerin oksitlenerek, sıcak maden üzerinde toplanmasıyla oluşur (Karatağ, 2017).

Bazik oksijen proseslerinde, sıcak maden, hurda ve cüruf yapıcılar (kireç, dolomit kireç) konvertöre şarj edilir. Daha sonra konvertör içerisine daldırılan bir lans aracılığı ile yüksek basınçta oksijen üflenir. Üflenen oksijen şarjdaki epüritelerle birleşir. Bu empüriteler karbon (CO gazı olarak), Si, Mn, P ve bir miktar Fe'dir (Sıvı oksitler halinde). Kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan bu oksitlerden sıvı halde olanlar kireç ve dolomitik kireç ile birleşerek cürufu oluştururlar. İşlem bitiminde sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf sıvı halde, yaklaşık olarak 1100-1500 C de özel cüruf potalarına boşaltılarak taşınmakta ve stok sahalarında soğumaya bırakılmaktadır. Bir ton çelik üretiminde yaklaşık 100-150 kg (%10-15) cüruf oluşmaktadır.

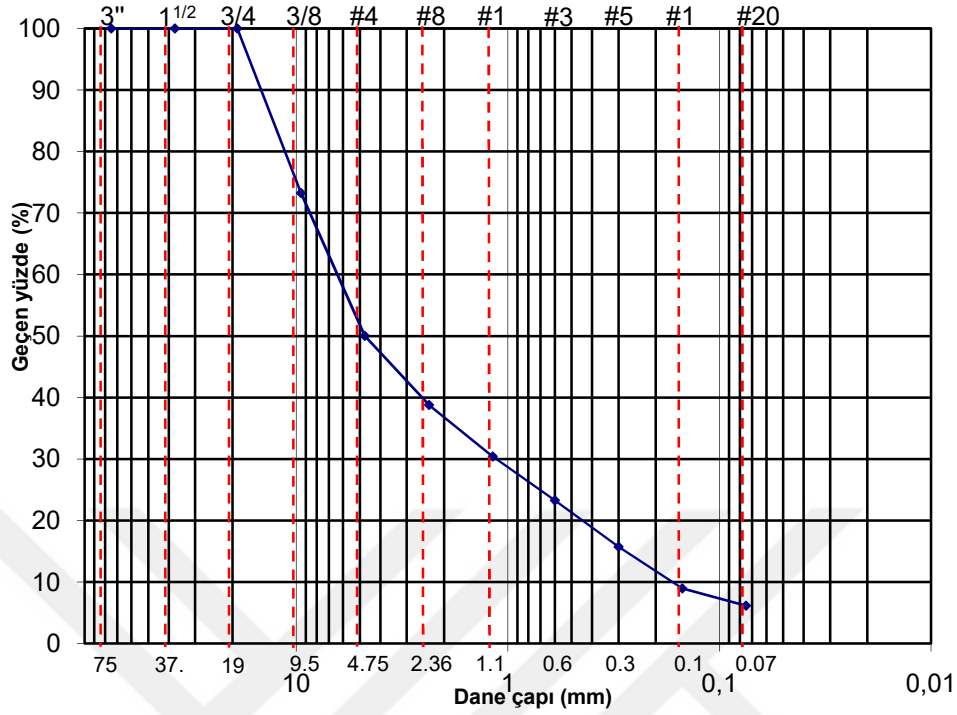


Şekil 4.1. Demir-çelik üretim prosesi(Dündar, 2006)

Çelikhane cürufu içerik olarak irdelendiğinde yarısına yakın bir kısmı kireç, kalan kısmı ise sıcak maden ve oksitlenen hurda elementlerinden meydana geldiği görülmektedir (Çizelge 4.2).

Fiziksel olarak baktığımızda çelikhane cürufları füme renkte ve parçalanmış agrega gibi bir görünüşe sahiptir(Şekil 4.3).

ERDEMİR'den alınan çelikhane cürufunun yapılan elek analizi sonucu aşağıdaki grafik gibidir. Kurutularak deneye tabi tutulan 500 gr ve 1000 gr'lık farklı numuneler benzer sonuçları göstermiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Çelikhane cürufu elek analizi

Çelikhane cürufuna ait elek analizi deneyleri sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki gibidir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1 Çelikhane cürufu elek analizi sonuçları

ÇELİKHANE CÜRUFU ELEK ANALİZİ SONUÇLARI	
Çakıl (%)	55,3
Kum (%)	40,3
Silt-Kil(%)	4,4
D60	6,75
D30	1,90
D10	0,25
$Cu=D60/D10$	3,55
$Cc=D_{30}^2/D_{60} \cdot D_{10}$	2,14

Çelikhane cürufuna ait kimyasal analiz sonuçlarına göre yaklaşık %50 kadarı Cao (Kalsiyum Oksit) ten oluşmaktadır (Çizelge 4.2) (ERDEMİR,2011).

Çizelge 4.2 Çelikhane cürufu kimyasal analizi

Element	Yüzde,%
Cao	47-55
Cao Serbest	6,5
SiO <sub>2</sub>	7,5-15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2-1,7
MgO	1,3-1,5
Toplam Fe	20-26
Toplam Mn	3,5-5,3
Na <sub>2</sub> O	-
K <sub>2</sub> O	-
S	-
CaO/SiO <sub>2</sub>	3,7-6,25

Çelikhane cürufu üzerinde yapılan piknometre deney sonucu Çizelge 4.3 de sunulmaktadır.

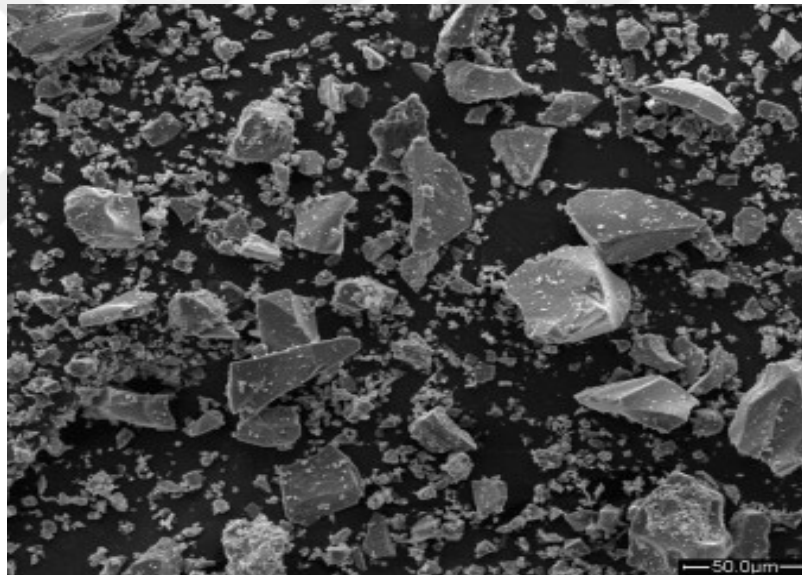
Çizelge 4.3. Çelikhane cürufu piknometre deney sonucu

Numune(W1)	10
Piknometre (Kapağı ile)	136,96
Piknometre+ Numune (10 gr) (W4)	146,96
Piknometre+ Numune + Su (W3)	661,33
Piknometre+ Su(W2)	654,95
Gs(Özgül Gravity)	2,76

Federal Highway Administration (FHWA) tarafından yayınlanan rapora göre çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri Çizelge 4.4 de sunulmaktadır (Karatağ, 2017).

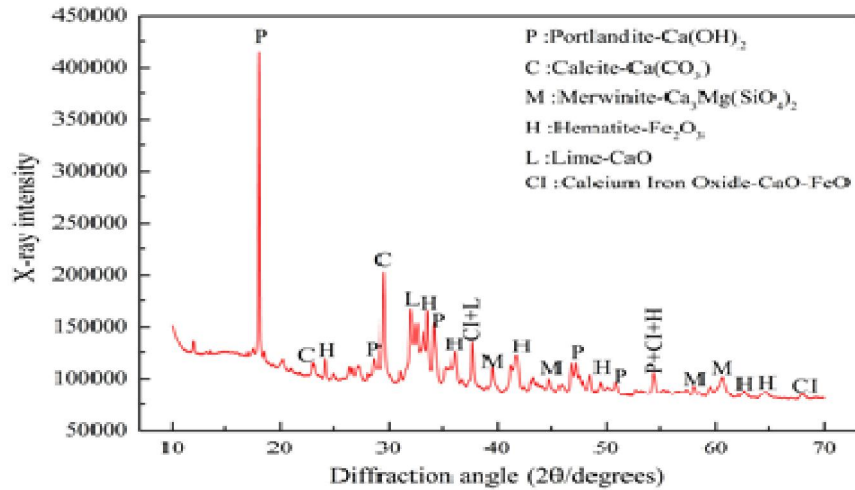
Çizelge 4.4. Çelikhane cürufu fiziksel özellikleri

	DEĞER
Los Angeles Aşınma (ASTM C131), %	20-25
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi (ASTM C88), %	<12
İçsel Sürtünme Açısı	40 <sup>0</sup> -50 <sup>0</sup>
Kalifornia taşıma oranı (CBR, %en büyük boyut 19 mm)**	300 kadar
Sertlik(Moh skalası)*	6-7
Yassılık İndeksi, %	15,5
Su emme(kaba ve ince agrega), %	0,95-0,83
Dolomit sertliği 3-4	
Öğütülmüş kireç taşı CBR'I %100	



Şekil 4.3.Çelikhane cürufunun SEM fotoğrafı

Çelikhane cürufu SEM fotoğrafında da görüldüğü gibi yüzeyi pürüzlü, koyu renkte ve kübik şekillidir (Şekil 4.3).



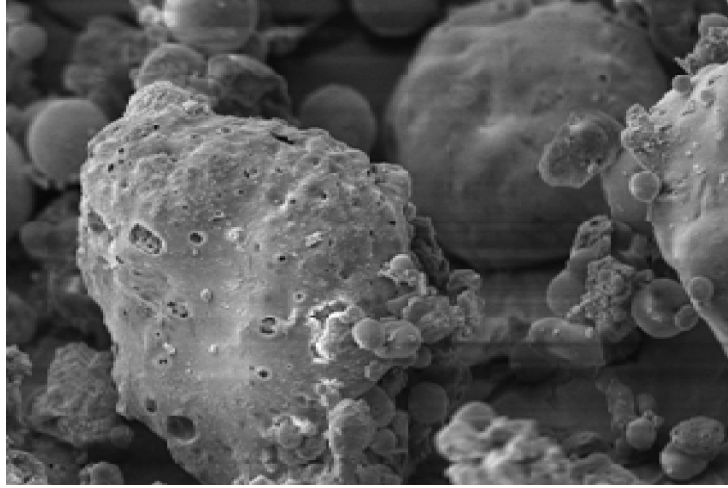
Şekil 4.4. Çelikhane cürufuna ait XRD grafiği

Şekil 4.4. de verilen çelikhane cürufuna ait XRD grafiğinde görüldüğü gibi çelikhane cürufu, Hematit, Kireç(Kalsiyum Oksit), Kalsiyum Demir Oksit, Kalsiyum Magnezyum Demir Silikat gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Ana bileşeni ise Kalsiyum(Ca) dur.

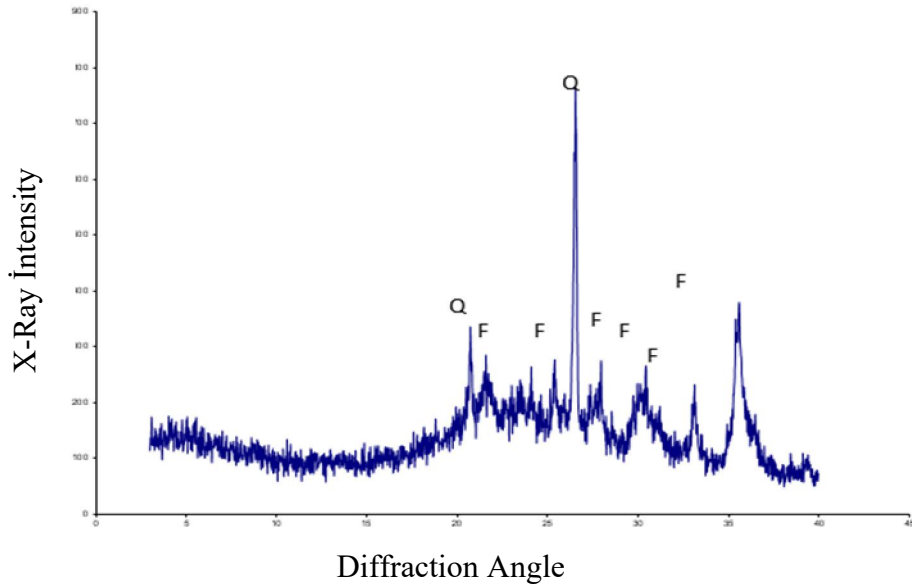
#### 4.2.Uçucu kül

Uçucu Kül, elektrik üretmek amacıyla yapılan termik santrallerde yakıt olarak kullanılan kömürün (taş kömürü, linyit kömürü) yanma sonucuyla baca gazlarıyla birlikte ortaya çıkan atık olarak nitelendirilmektedir. Oransal olarak baktığımızda taş kömürünün %10-15'i, linyit kömürünün ise %20-25'i kül olarak ortaya çıkmaktadır(Güler vd., 2005). Çelikhane cürufundaki çelik üretim-çıkan atık korelasyonunun benzeri, termik santrallerde yakılan kömür-uçucu kül arasında da vardır. Türkiye de yılda yakılan 45 milyon ton kömür neticesinde yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Bu durum yine cüruftaki gibi çevresel bir sorunu göz önüne getirmektedir.

Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik yapıları incelendiğinde bölgeden bölgeye değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Bundaki etken, kömürün cinsi, yakılma sıcaklığı, kömürün yakıldığı kazanın cinsi, santralin filtrasyon teknolojilerindeki farklılıklardır.



Şekil 4.5. Uçucu külün SEM fotoğrafı



Şekil 4.6. Uçucu külün XRD grafiği

Uçucu küllerin fiziksel özelliklerine baktığımızda çok ince taneli ve koyu gri-bej renk arası bir renge sahip olması en belirgin özelliklerinden birisidir. Renginin tonundaki koyuluk açıklık ilişkisi yanma sıcaklığı ile doğrudan ilintilidir. İyi yanma neticesinde ortaya çıkan uçucu kül daha açık renkli olur. Uçucu küllerin boyutları 0.5 ila 200 mikron arasında değişir. Şekilleri genelde camsı ve küreseldir. Uçucu küllerin kimyasal yapısına bakıldığında  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  bileşenleri bulunur ve bu bileşenlerin oranlarına göre uçucu küllerin tipolojileri belirlenmektedir (Türker vd., 2009). ASTM C 618 e göre

bitümlü kömürden üretilen  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamı %70 den fazla ve CaO miktarı %10'dan düşük olan küller F sınıfı uçucu kül olarak nitelendirilmektedir. Linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamı %50 den fazla ve CaO miktarı %10'dan fazla olan küller ise C sınıfı uçucu kül olarak nitelendirilmektedir. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe ve bağlayıcı özelliğe sahiptir (Çizelge 4.5) (Yılmaz,G., 2012). Uçucu küller inşaat alanında çimento hammaddesi, yapı malzemeleri, yol alt tabakalarında bağlayıcı malzeme ve çeşitli sektörlerde geniş bir yelpazede kullanılabilir.

Çizelge 4.5 Uçucu külün kimyasal bileşimi

	Uçucu Kül(F)
	(%)
$\text{SiO}_2$	55,36
$\text{Al}_2\text{O}_3$	18,34
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	9,81
MgO	5,4
CaO	4,5
$\text{Na}_2\text{O}$	0,12
$\text{K}_2\text{O}$	0,8
$\text{TiO}_2$	0,43
$\text{SO}_3$	1,51

Çizelge 4.6 Uçucu külün fiziksel özellikleri

Özgül gravite	1,76
Tane büyüklüğü analizi (%) (kum/silt/kil)	- /83/17
Likit limit	55
Plastik limit	
Plastisite indisi	
Optimum su muhtevası (%)	38
Maksimum kuru yoğunluk (g/cc)	0,85

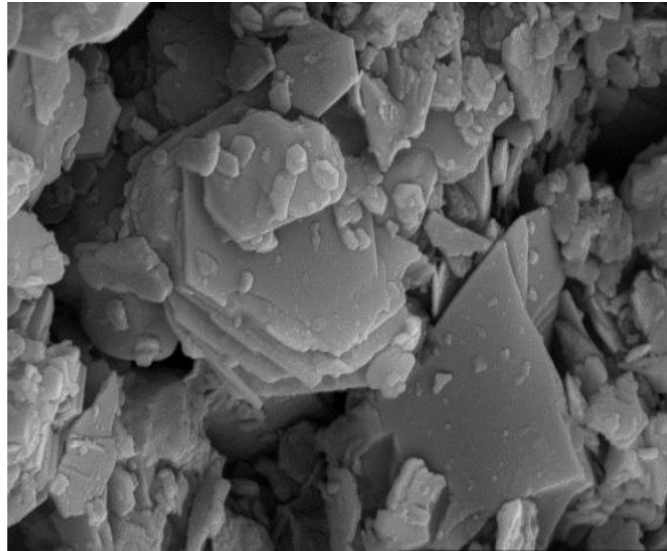
Bu çalışma kapsamında kullanılan uçucu küller, Seyitömer termik santralinden tedarik edilmiştir.

### 4.3. Kaolin

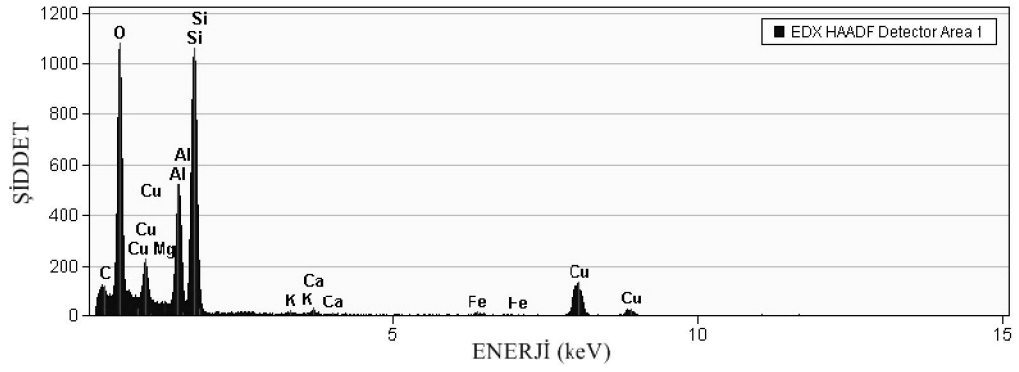
Kaolin, kısmi düşük sıcaklıklarda feldispatları oluşturan silikatların asitli ortamlarda bozulması neticesinde oluşur. Kaolin  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  formülüne sahiptir. İçeriğinde %39,50  $Al_2O_3$ , %46,55  $SiO_2$ , %13,95  $H_2O$  bulunmaktadır. Bununla beraber yapısında safsızlığa bağlı olarak mika, kuvars, demir, titan oksitler de bulundurulabilirler. Kaolin yapı olarak genelde mat ve gevşek toprak görünümünde olmakla birlikte nadiren kristal halde de bulunabilir. Kaolinin sertliği 2-3 özgül ağırlığı 2,6'dır. Kaolinlerde aranılan en belirgin özellik ateşe karşı dayanıklılığıdır. Erime sıcaklığı  $1760\text{ C}^0$  dir. Saf halde beyaz, safsızlığın derecesiyle alakalı yeşil ya da sarı renkte olabilir. Kaolinlerin bir diğer önemli özelliği de çok az bir su ile döküm kabiliyeti kazanabilmesidir. Fiziksel özellik ve bulunduğu ortam bakımından kaolinleşme, orjinal ana kayacın bozulma işleminin yerinde gerçekleşmesiyle ortaya çıkar (Fırat vd. ,2017).

Bu tez kapsamında saf kaolin kili kullanılmıştır.

Kaolinler, en fazla seramik olmakla birlikte, kâğıt, boya, gıda, ilaç ve dental alanlarda kullanılmaktadır. Seramik endüstrisinde porselen ve fayans reçetesindeki ana madde kaolindir. Türkiye'de kaolinin tüketim oranları %60 çimento,%30 seramik ve cam, %10 dolgu, lastik, boya vs. şeklindedir.,



Şekil 4.7. Kaolinin SEM fotoğrafı



Şekil 4.8.Kaolinin XRD grafiği

Çizelge 4.7 Kaolinin kimyasal analizi

KİMYASAL ÖZELLİKLER	KAOLİN
	(%)
MgO	0,27
CaO	0,3
CaO Serbest	
SiO <sub>2</sub>	45,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,63
TiO <sub>2</sub>	0,13
Na <sub>2</sub> O	0,62
K <sub>2</sub> O	2,4
H <sub>2</sub> O	13,95
K.K.	11,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,73

## 5.YÖNTEM

### 5.1.Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında, çelikhane cürufu, uçucu kül ve kaolin malzemeleri kullanılarak dört farklı karışım numunesi hazırlanmıştır (Çizelge 5.1.). Bu karışımlar yapılmadan önce çelikhane cürufu elek analizinde kullanılan No:4 (4.75 mm) elekten geçirilerek elenmiştir. Uçucu kül ve kaolin tane çapları zaten 4 nolu eleğin altında olduğu için elek analizine tabi tutulmamıştır. Elenmiş olan numuneler etüvde 105 C<sup>0</sup> 'de 24 saat bekletilerek tamamen kurutulmuştur. Kurutulan malzemeler mümkün mertebe homojen bir şekilde belirlenen oranlarda karıştırılmış deneylere hazır hale getirilmiştir.

Çizelge 5.1 Numune karışım oranları (% ağırlıkça)

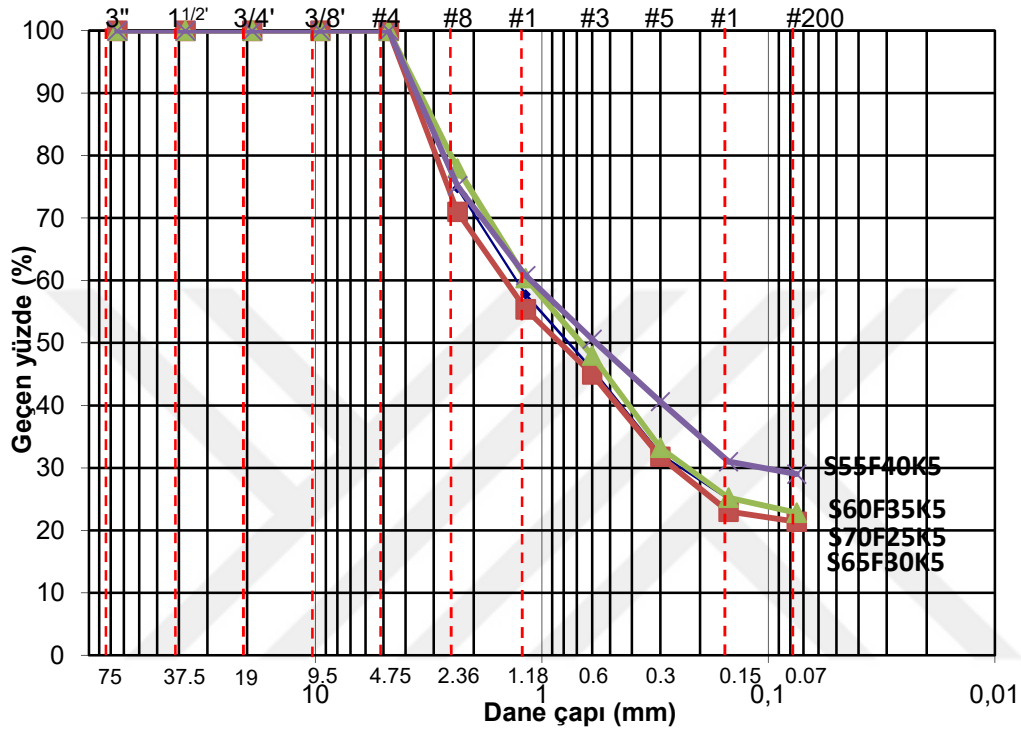
Karışım	Çelikhane Cürufu(%)	Uçucu Kül(%)	Kaolin(%)
S70F25K5	70	25	5
S65F30K5	65	30	5
S60F35K5	60	35	5
S55F40K5	55	40	5

### 5.2.Elek Analizi Deneyi

Zeminler, ihtiva ettiği malzemelerin granülometrilerine göre iyi derecelenmiş ve kötü derecelenmiş olarak iki şekilde tanımlanırlar. İyi derecelenmiş kavramından kasıt malzemenin heterojen bir karışıma sahip olmakla birlikte içeriğindeki malzeme türlerinin uygun (çakıl, kum, kil, silt) oranlarında dağılmış olmasıdır. Zeminlerin sınıflandırılması ve tane boyutunun saptanması, öncelikli olarak malzemenin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, ayrıca malzemenin kullanım alanının tespiti için önem arz etmektedir.

Elek analizi deneyi, ASTM D-421 standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır. Elek analizi deneyinden elde edilen veriler neticesinde 'Tane Boyu Dağılım Eğrisi' çizilir. Bu eğri sayesinde deneye tabi tutulan numunelerin çakıl, kum, kil ve silt oranları belirlenerek

değişik amaçlı kullanımlar için zemin sınıflaması yapılır. Bu çalışmada, çelikhane cürufu elendikten sonra karışım oranlarına uygun bir şekilde uçucu kül ve kaolin ile karıştırılmıştır. Çalışma kapsamında kaolin oranı hep aynı tutulan karışımların tane boyu dağılım eğrisi ve elek analizi deney sonuçları Şekil 5.1 ve Çizelge 5.2. de sunulmaktadır.



Şekil 5.1 Karışımların tane boyu dağılım eğrisi

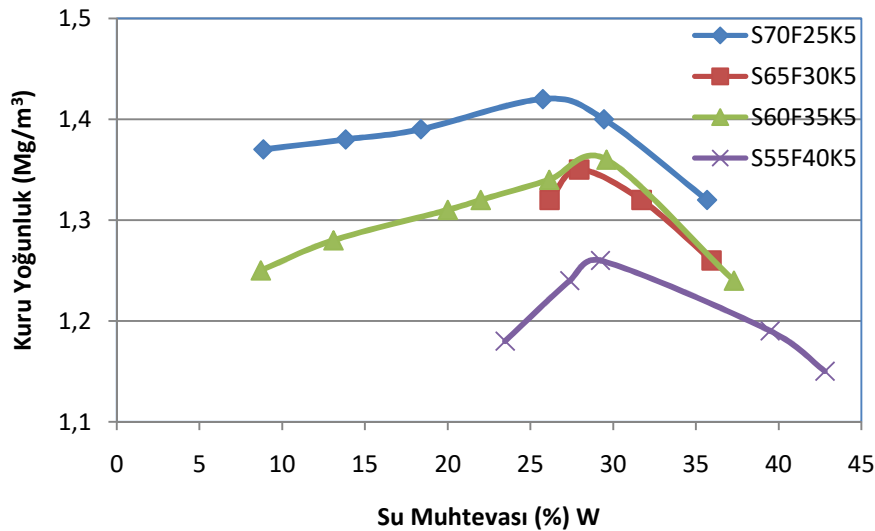
Çizelge 5.2. Karışımların elek analizi sonuçları

Karışım	Çakıl Yüzdesi	Kum Yüzdesi	Silt-Kil yüzdesi	D60	D30	D10	Cu	Cc
S70F25K5	0	77	23	1,20	0,25	-	-	-
S65F30K5	0	78,6	21,4	1,19	0,27	-	-	-
S60F35K5	0	77,2	22,8	1,18	0,21	-	-	-
S55F35K5	0	71	29	1,19	0,10	-	-	-

### 5.3.Kompaksiyon Deneyi

Zeminlerin taşıma gücünü arttırmak, durgun ve dinamik yükler altında oluşabilecek oturmaları önlemek ve zemin geçirirmliliği azaltılmaya çalışarak sudan kaynaklanabilecek hacimsel deformasyonların önüne geçmek adına zeminlerin çeşitli mekanik cihazlarla zemindeki su oranının sabit tutularak sıkıştırılması olayı "kompaksiyon" olarak adlandırılmaktadır. Kompaksiyon, yol ya da herhangi bir yapıda meydana gelebilecek oturma ve deformasyonların kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması amacıyla yapılır. Sıkıştırılmış bir zemindeki en önemli ölçek zemine ait kuru birim hacim ağırlığıdır. Kuru birim hacim ağırlığı ile zeminin sıkışmışlık derecesi doğru orantılıdır. Zeminin iyi sıkışmış olması kuru birim hacim ağırlığının büyük olduğu anlamına gelir. Zeminin iyi sıkışabilmesi için zemin içerisindeki suyun önemi büyüktür. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri zemindeki suyun optimum seviyede olduğu anda ortaya çıkar.

Bu çalışmada, kompaksiyon deneyleri ASTM D-698 standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır. Çalışmaya ait 4 farklı numune üzerinde yapılan kompaksiyon deneylerinden elde edilen veriler Şekil 5.2 de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Karışımların Kuru Yoğunluk-Su Muhtevası ilişkisi

Çizelge 5.3. Dört karışıma ait maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri

<b>KARIŞIMLAR</b>	<b><math>\gamma_d</math> (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>W%</b>
<b>S70F25K5</b>	1,42	25,75
<b>S65F30K5</b>	1,35	27,95
<b>S60F35K5</b>	1,34	26,14
<b>S55F40K5</b>	1,26	29,24

Karışımların maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerlerine bakıldığında çelikhane cürufu oranı azaldığında, maksimum kuru yoğunluk değeri azalırken optimum su muhtevası değeri artmaktadır. Çelikhane cürufunun azalmasıyla birlikte karışımdaki uçucu kül oranı arttığından ve dolayısıyla puzolanik aktivite arttığından optimum su muhtevası da artmaktadır.

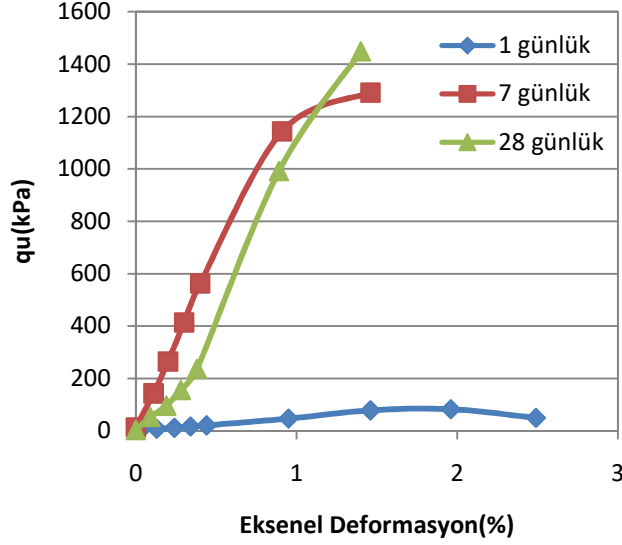
#### 5.4. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi genellikle suya doymun olan killi zeminlerde uygulanan ve kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan bir deneydir. Bu deney neticesinde oluşan Mohr dairesi sonucunda zemine ait kayma direnci hesaplanabilir.

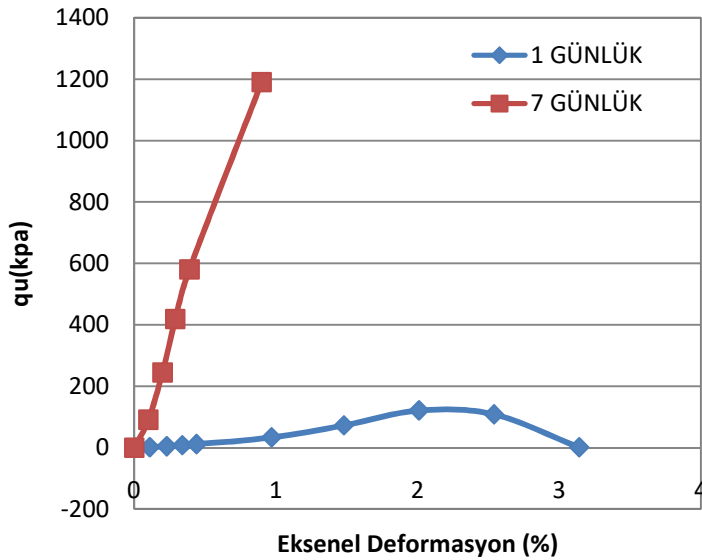
Serbest basınç deneyinde oldukça hızlı bir şekilde sonuç alınabildiğinden çalışmalarda sıklıkla kullanılır. Deneyde gerilme kontrollü ve birim boy kontrollü olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Genellikle birim boy kontrolü tercih edilir.

Çalışmada serbest basınç deneyi yapılırken ASTM D-2166 standartlarına uygun malzeme ve yöntem uygulanmıştır. Numuneler hazırlanırken 50 mm çapında 100 mm yüksekliğinde deney kabı kullanılmıştır. Deney için hazırlanan numunelerdeki tane çapı 6 mm'den küçük olmalıdır. Numune deney aletine yerleştirilmeden önce alt ve üst düzeyleri düzeltilir. Numune düzeltmesi sırasında numune üzerinde meydana gelecek boşluklar aynı numune ile doldurulur. Numunenin çapı ve boyu üç değişik yerden ölçülerek numunenin ortalama çap ile boyu bulunur. Deneye başlamadan önceki su içeriği, ağırlığı, kullanılacak yük halkası numarası kaydedilir. Numunenin su içeriğinde kayıp olmadan deney gerçekleştirilir. Hazırlanan dört farklı karışımdan her bir karışım için 1,7 ve 28 günde

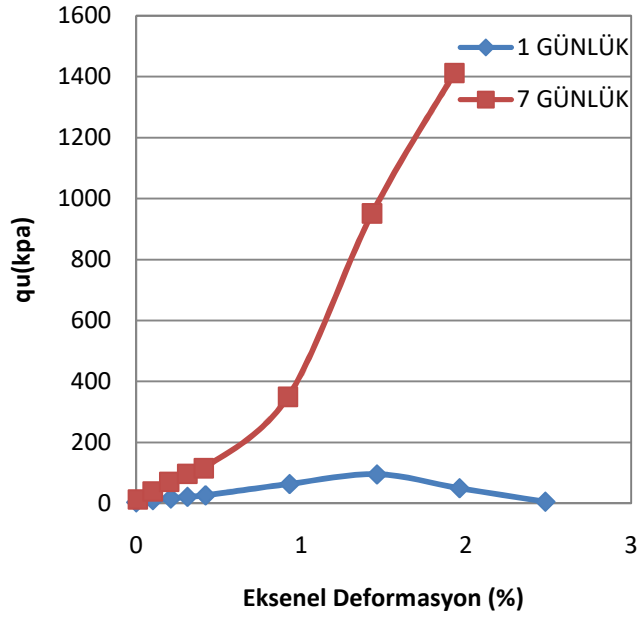
kırılmak üzere üçer adet numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler içeriğindeki suyu hapsedecek şekilde desikatörlerde küre bırakılmıştır. Numunelerden alınan sonuçlar Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' de grafikler halinde gösterilmiştir.



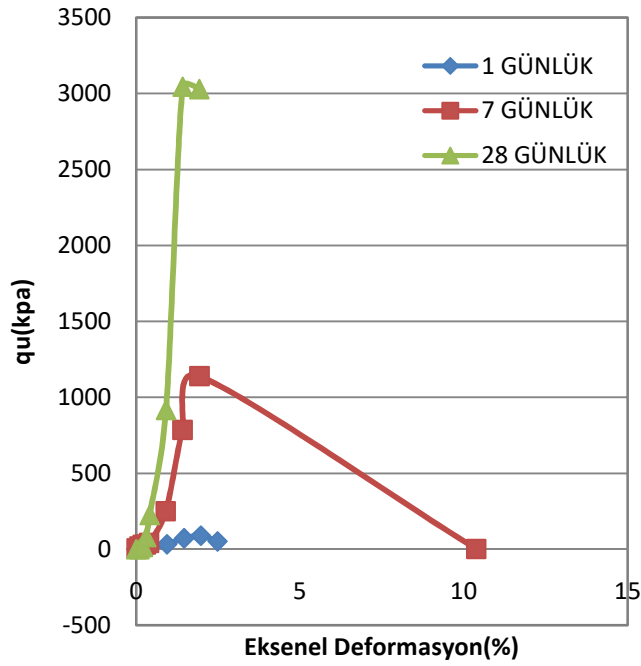
Şekil 5.3. S55F40K5 karışımına ait serbest basınç deney sonuçları



Şekil 5.4. S60F35K5 karışımına ait serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil 5.5. S65F30K5 karışımına ait serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil 5.6. S70F25K5 karışımına ait serbest basınç deneyi sonuçları

Çizelge 5.4. Karışımlara ait  $q_u$  değerleri

KARIŞIMLAR	$q_u$ (kPa)(1 günlük)	$q_u$ (kPa)(7 günlük)	$q_u$ (kPa)(28 günlük)
<b>S70F25K5</b>	89	1139,1	3043,4
<b>S65F30K5</b>	95,1	1411	-
<b>S60F35K5</b>	121,1	1189,7	-
<b>S55F40K5</b>	82,9	1290,3	1447,2

ESOGÜ zemin mekaniği laboratuvarında bulunan serbest basınç deney makinasının max. 3000 kPa uygulayabildiği ve hazırlanan karışımların 28. gün dayanım değerleri 3000 kPa üstünde olduğu için iki adet 28 günlük numune üzerinde deney yapılamamıştır. Deneye tabi tutulan numunelerin deney sonrası durumu Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Serbest basınç deneyine tabi tutulan 1 günlük numune



Şekil 5.8. Serbest basınç deneyine tabi tutulan 28 günlük numune

### 5.5. Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi(CBR)

CBR deneyi, üst yapıdaki granüler tabakaların davranışının belirlenmesinde kullanılan bir deneydir. Bir başka ifadeyle alt temel, temel ve doğal zeminin nispi taşıma değeri CBR ile ifade edilmektedir. CBR deneyi, ASTM D1883-07 yönetmeliğine göre yapılmış olup genel anlamda tanımlamak gerekirse, 1935 mm<sup>2</sup> lik kesit alanına sahip silindirik bir pistonun sabit bir hızla zemine itilmesiyle elde edilen yük-penetrasyon ilişkisinin bulunmasını sağlamaktadır. Bu deney herhangi bir zeminin kayma direncinin, standart kırmataşın kayma direncine göre oransal olarak değerini gösterir. CBR deneyi, taşıma oranı %5 den küçük olduğu tahmin edilen numunelere yapılmaz. Bunun yanı sıra tüm zeminlere(kum, çakıl, kil) uygulanabilen bir penetrasyon deneyidir.

CBR deneyinde, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim ağırlık değerine sahip olan numuneler CBR kalıplarına 3 kademe halinde, her kademe ise 4.5 kg lık bir tokmağın 46 cm den serbest düşüşüyle elde edilen sıkıştırma enerjisi ile kompakte edilmektedir. Kalıplara yerleştirilen numunelerden 1, 7 ve 28 günlük kürlenme olacak şekilde her bir karışım oranından 3'er adet, toplamda 12 adet numune hazırlanmıştır.

Çizelge 5.5. Karışımların hesaplanan % CBR değerleri

KARIŞIM	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN
	(%)	(%)	(%)
S70F25K5	96	98	123
S65F35K5	86	92	120
S60F40K5	72	82	107
S55F45K5	69	73	94

Her dört karışımdan elde edilen % CBR değerlerinde, kür süresi arttıkça % CBR değerinde arttığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber karışımlardan en fazla çelikhane cürufuna sahip olan S70F25K5 de 1 günlük ile 7 günlük numune arasında %2'lik bir CBR değeri artışı gözlemlenmiştir. Bu durum S65F30K5 de %7, S60F35K5 de %14, S55F40K5 de ise %6 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, karışımlarda çelikhane cürufunun oranı düşüp, uçucu külün oranı arttıkça dayanım olarak düşüş olsa bile 1

günlükten 7 günlüğe geçerken oransal olarak daha fazla dayanım kazanmaktadır. Aynı durum 7 günlük ve 28 günlük sonuçlara bakıldığında da görülmektedir. S70F25K5 karışımının 7 günlük numunesi ile 28 günlük numunesi arasındaki fark % 26 dır. S65F30K5 karışımında bu değer %31, S60F35K5 de %31, S55F40K5 de ise %29 dur.

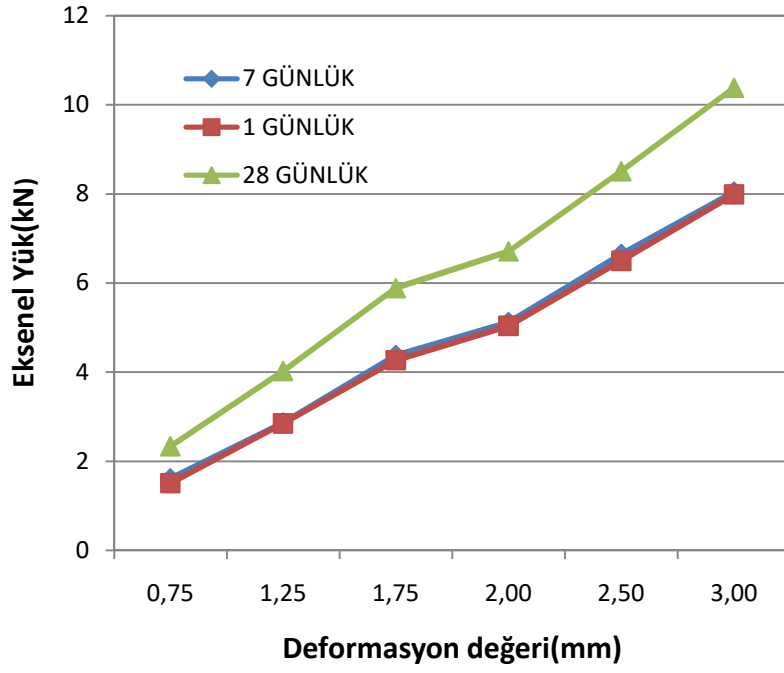
% CBR değerlerinde maksimum artış S60F35K5 karışımında olmuştur. 1 günlük ile 28 günlük numune arasında % 49 artış gözlemlenmiştir. Minimum artış ise S70F25K5 karışımında olmuştur. 1 günlük ile 28 günlük arasında %28 lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum uçucu küldeki puzolanik aktiviteden kaynaklanmaktadır. Uçucu kül oranı arttıkça nihai dayanım oransal olarak artmıştır.

Karışımlara ait % CBR değerleri, Çizelge 5.6'te verilmiştir.

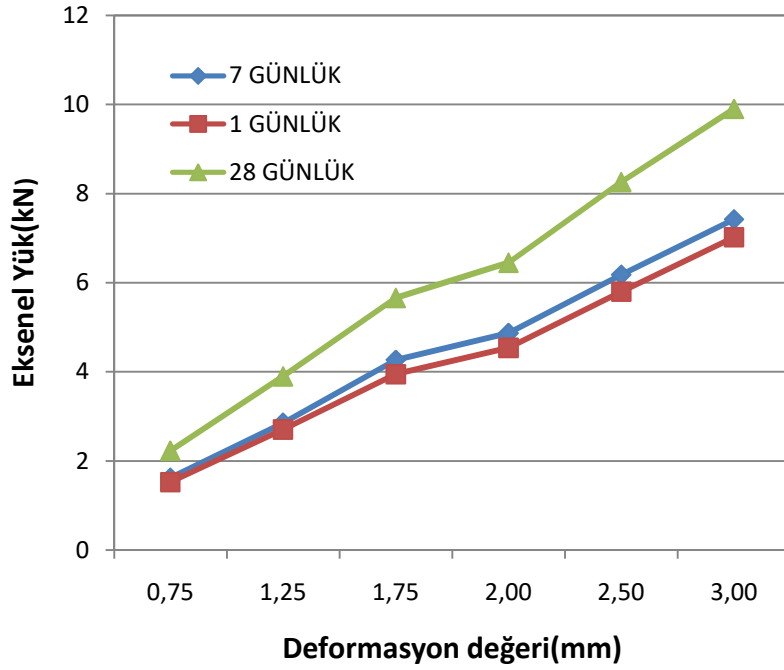
Çizelge 5.6. Karışımların % CBR değerlerindeki artış oranları

	1— 7 GÜN (%)	7— 28 GÜN (%)	7— 28 GÜN (%)
S70F25K5	2	26	28
S65F30K5	7	31	40
S60F35K5	14	31	49
S55F40K5	6	29	36

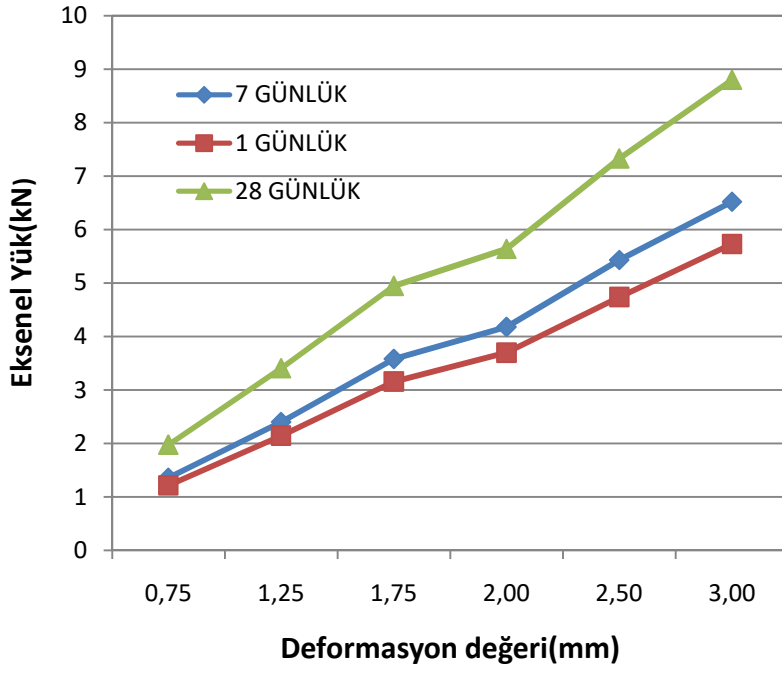
Çizelgeye bakıldığında ilk üç karışımda da % CBR oranının artış miktarı dayanım olarak daha az olsa bile oransal olarak uçucu kül arttıkça yükselmiştir. Sadece S55F40K5 karışımında oransal olarak bir miktar düşüş yaşanmıştır. Bu tablodaki veriler neticesinde karışımlardaki uçucu külün belirli bir seviyeye kadar artması % CBR değerlerini oransal olarak daha fazla etkilemektedir. Ancak nihai olarak en büyük % CBR oranına sahip olan karışım çelikhane cürufunun en fazla olduğu karışım olan S70F25K5 karışımıdır.



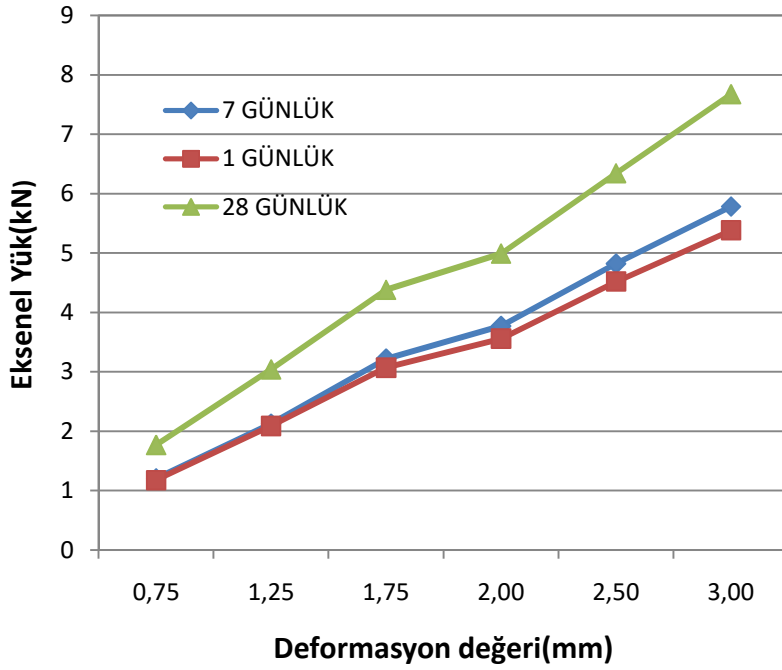
Şekil 5.9. S70F25K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi



Şekil 5.10. S65F30K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi



Şekil 5.11. S60F35K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi



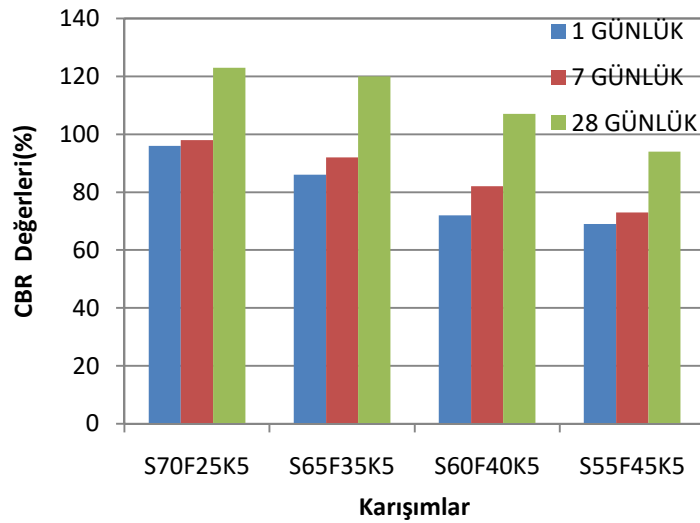
Şekil 5.12. S55F40K5 karışımına ait yük-deformasyon ilişkisi

## 6.BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılarak hazırlanan numuneler üzerinde, kompaksiyon deneyi, serbest basınç taşıma kapasitesi ve Kaliforniya taşıma kapasitesi deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen verileri aşağıdaki başlıklar altında kendi aralarında ilişkilendirmek ve sonuç çıkarmak mümkündür.

### 6.1. % CBR Oranı -Kür süresi ilişkisi

İlk olarak CBR deneyinden elde edilen verilere göre (%) CBR oranı ile kür süresi arasında doğru bir orantı bulunmuştur (Şekil 6.1).

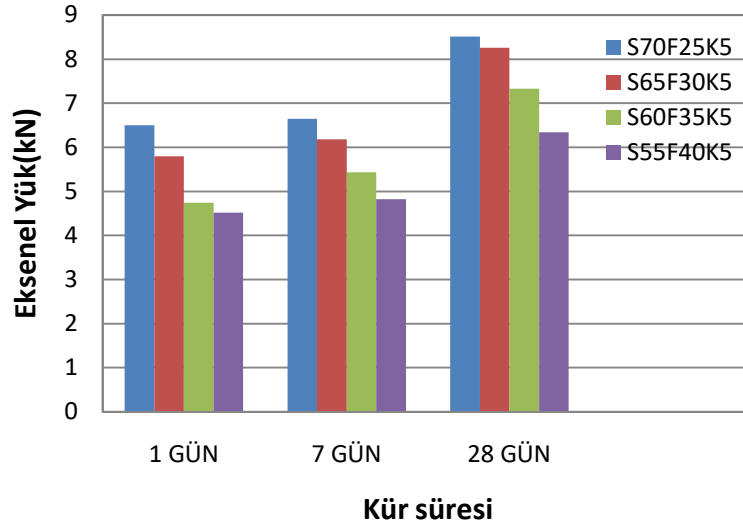


Şekil 6.1. % CBR değeri ile kür süresi arasındaki ilişki

Şekil 6.1.'e göre hazırlanan 4 farklı karışım numunesinde kür süresi arttıkça % CBR oranının arttığı gözlemlenmiştir. 1 günlük numunede istenilen sonuç elde edilemezken 28 günlük numunelerde S55F40K5 numunesi hariç, diğer 3 numune %100 ün üstünde değerler vermiştir. S55F40K5 numunesinde ise %96 lık bir değer elde edilmiştir.

## 6.2. Eksenel Yük-Kür Süresi İlişkisi

Yine CBR deneyinden elde edilen bir başka ilişki ise eksenel yük-kür süresi arasındaki ilişkidir (Şekil 6.2.)



Şekil 6.2. Eksenel yük-kür süresi arasındaki ilişki

Şekil 6.2.'ye göre, hazırlanan numunelerin kür süresi arttıkça, aynı penetrasyon değerinde daha yüksek eksenel yük taşınmıştır. Hesaplamalarda 2.5 mm lik penetrasyon değeri baz alınmıştır. Dört farklı karışımdan oluşan numunelerde 1 günlükten 28 günlüğe gidildikçe dayanımlar artmıştır.

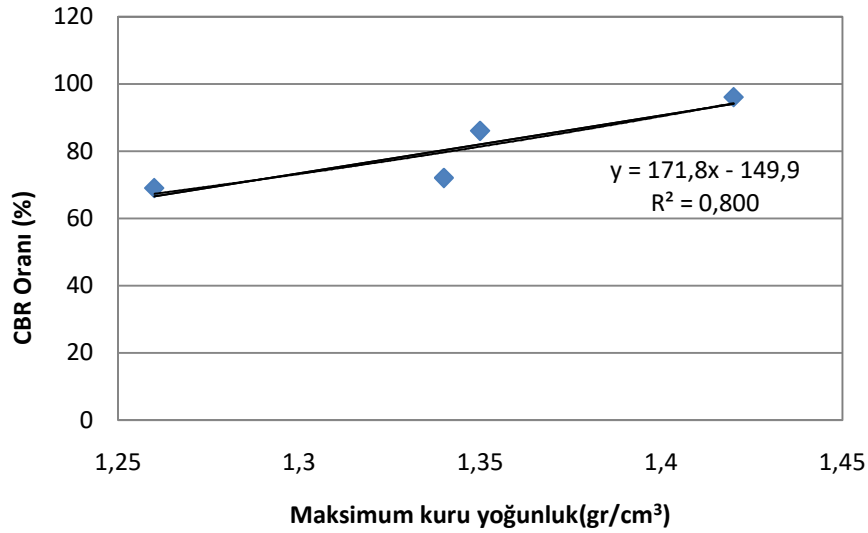
## 6.3. % CBR Oranı-Maksimum Kuru Yoğunluk İlişkisi

Hazırlanmış numunelerin % CBR oranları ile maksimum kuru yoğunluk arasındaki ilişkiler kür sürelerine bağlı olarak Çizelge 6.1, 6.2, 6.3'te verilmiştir. Tüm karışımlara bakıldığında kür süreleri arttıkça % CBR değerleri artış göstermektedir. Uçucu kül oranı ağırlıkça artıp, çelikhane cürufu oranı azaldığında maksimum kuru yoğunluk değeri azaldığından % CBR değerlerinde de azalma görülmektedir. Çelikhane cürufu taneleri şekilsel olarak daha köşeli ve mukavemet değerleri yüksek olduğundan "agrega" özelliği göstermektedir. Oysaki çelikhane cürufunun yerini uçucu kül aldığında daha yuvarlak yapılı taneler bünyeye girmektedir. Bu durumda değme yüzeyleri arasındaki mukavemet

ilişkisi azalmakta dolayısıyla % CBR değerinde düşme görülmektedir. Ayrıca Şekil6.3, 6.4, 6.5'te % CBR oranı ile maksimum kuru yoğunluk arasındaki ilişkiye ait Regresyon analizi ( $R^2$ ) değerlerine bakılacak olursa; 1,7 ve 28 günlük kür sürelerine bağlı olarak sırasıyla  $R^2=0.800$ ,  $R^2=0.901$ ,  $R^2=0.851$  olarak elde edilmiştir. Numunelerin 28 günlük kür süreleri sonunda elde edilen  $R^2$  değerinin en büyük olması beklenirken, 7 günlük  $R^2=0.901$  olması, numunelerin kürlenme sırasında desikatörde bir miktar su kaybettiği veya prizini tam anlamıyla tamamlayamadığı sonucunu göstermektedir. Bu durumu uçucu kül, çelikhane cürufu ve kaolin arasındaki bağların elektron mikroskobu fotoğrafları ile açıklamak mümkün olabilir.

Çizelge 6.1 % CBR Oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi(1 günlük)

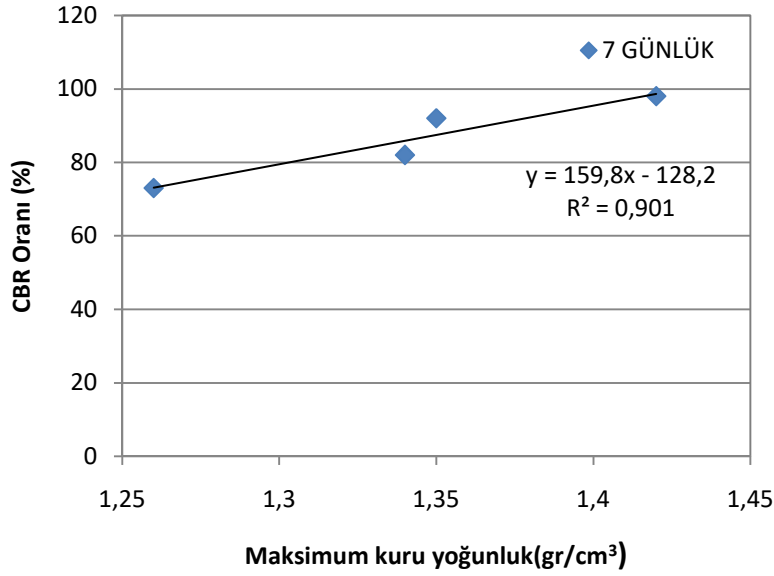
KARIŞIM	MAKSİMUM KURU YOĞUNLUK( $gr/cm^3$ )	% CBR 1 GÜNLÜK
S70F25K5	1,42	96
S65F30K5	1,35	86
S60F35K5	1,34	72
S55F40K5	1,26	69



Şekil 6.3. % CBR Oranı-Maksimum Kuru Yoğunluk İlişkisi(1 günlük)

Çizelge 6.2. CBR Oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi (7 günlük)

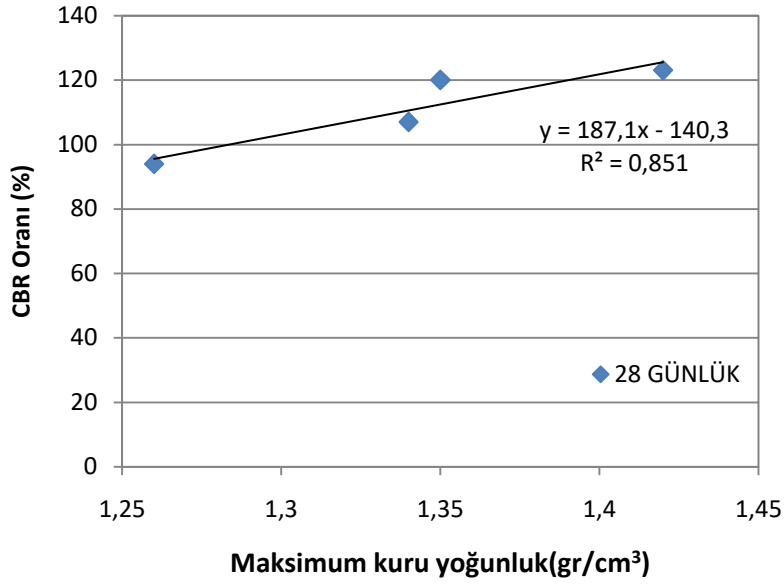
KARIŞIM	MAKSİMUM KURU YOĞUNLUK(gr/cm <sup>3</sup> )	% CBR 7 GÜNLÜK
S70F25K5	1,42	98
S65F30K5	1,35	92
S60F35K5	1,34	82
S55F40K5	1,26	73



Şekil 6.4. % CBR Oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi (7 günlük)

Çizelge 6.3. % CBR Oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi (28 günlük)

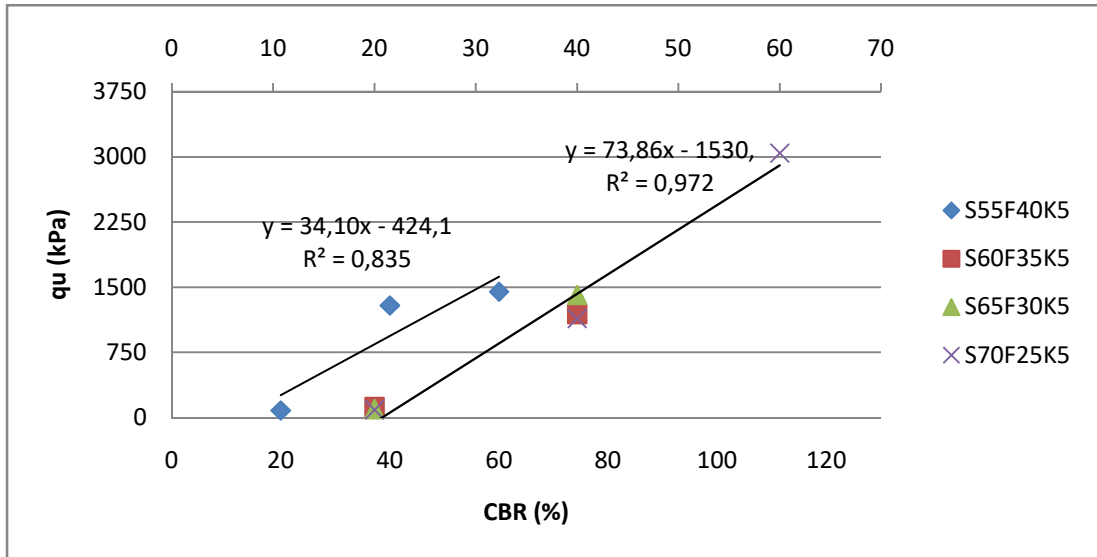
KARIŞIM	MAKSİMUM KURU YOĞUNLUK(gr/cm <sup>3</sup> )	% CBR 28 GÜNLÜK
S70F25K5	1,42	123
S65F30K5	1,35	120
S60F35K5	1,34	107
S55F40K5	1,26	94



Şekil 6.5. % CBR Oranı-Maksimum kuru yoğunluk ilişkisi (28 günlük)

#### 6.4. % CBR Oranı-Serbest basınç taşıma kapasitesi ilişkisi

Yapılan çalışmada serbest basınç deneyi sonucunda elde edilen  $q_u$  değerleri ile CBR deneyinden elde edilen veriler arasındaki ilişki grafikteki gibi bulunmuştur (Şekil 6.6).



Şekil 6.6. % CBR- $q_u$  arasındaki ilişki

Şekil 6.6'da numunelere ait 1, 7 ve 28 günlük CBR(%) ve  $q_u$  (kPa) değerleri verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi zemin mekaniği laboratuvarındaki serbest basınç deney aleti maksimum 3000 (kPa) yük uygulayabildiği için 2 numunenin 28 günlük verileri cihaza zarar vermemek adına bulunamamıştır. Elde edilen sonuçlar göre CBR- $q_u$  S55F40K5 numunesi için  $R^2=0,835$ , S70F25K5 için  $R^2=0,972$  olarak bulunmuştur.

### 6.5.Diğer Çalışmalar

Çalışmaya ilave olarak aynı malzemeler ile farklı karışımlar kullanılarak elde edilen veriler (Fırat vd., 2017) ve bu tez çalışmasında hazırlanan karışım oranları Çizelge 6.4. de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Numunelere ait karışım oranları(% ağırlıkça)

Karışım	Çelikhane Cürufu (%)	Uçucu Kül (%)	Kaolin (%)
S95F00K5	95	0	5
S90F05K5	90	5	5
S85F10K5	85	10	5
S80F15K5	80	15	5
S75F20K5	75	20	5
S70F25K5	70	25	5
S65F30K5	65	30	5
S60F35K5	60	35	5
S55F40K5	55	40	5

Çizelge 6.5. Karışımlara ait maksimum kuru yoğunluk ve optimum su muhtevası değerleri

<b>KARIŞIMLAR</b>	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	<b>W</b> (%)
<b>S95F0K5</b>	1,789	20,7
<b>S90F05K5</b>	1,716	21,7
<b>S85F10K5</b>	1,689	21,9
<b>S80F15K5</b>	1,642	22,5
<b>S75F20K5</b>	1,589	23,1
<b>S70F25K5</b>	1,42	25,75
<b>S65F30K5</b>	1,35	27,95
<b>S60F35K5</b>	1,34	26,14
<b>S55F40K5</b>	1,26	29,24

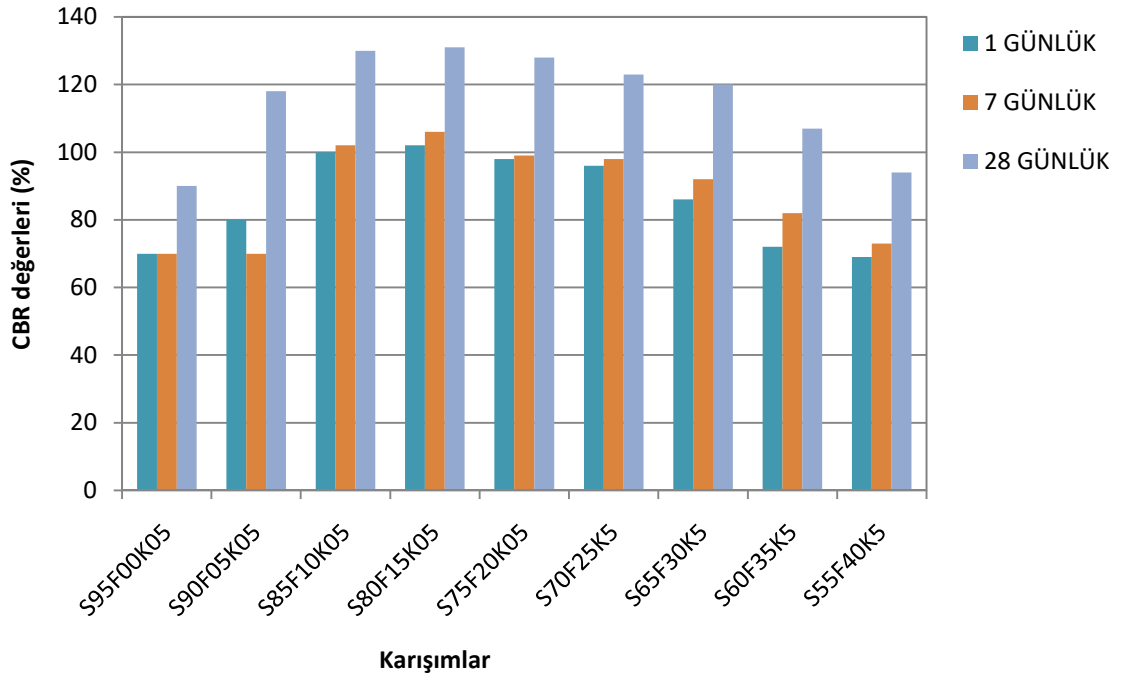
Çizelge 6.5'ten görüleceği gibi karışımlar içerisinde uçucu kül oranı arttıkça maksimum kuru yoğunluk değerinde azalma görülmektedir. Bunun nedeni uçucu külün özgül yoğunluğunun çelikhane cürufuna göre daha düşük olması ve tane şeklinden dolayı da daha geniş alan kaplaması olarak açıklamak mümkündür.

Çizelge 6.6 ve Şekil 6.7'den görüleceği gibi tüm karışımlar analiz edildiğinde S80F15K5 numunesine ait % CBR değeri en yüksek sonucu vermektedir. Kür süresi ile ilişkisine bakılacak olursa da 1, 7 ve 28 gün kürlenme sonucunda % CBR değerleri sırasıyla % 102, % 106 ve % 131 olmaktadır. Dolayısıyla uçucu kül oranının % 15 olduğu ve çelikhane cürufunun % 80 olduğu karışım en büyük dayanım değerini vermektedir.

Çizelge 6.6. de ise her iki çalışmaya ait yapılan CBR deneyine ait karışımlardan elde edilen veriler tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 6.6. Karışımlara ait % CBR değerleri

KARIŞIM	1 GÜN	7 GÜN	28 GÜN
	(%)	(%)	(%)
S95F00K5	70	70	90
S90F05K5	80	70	118
S85F10K5	100	102	130
S80F15K5	102	106	131
S75F20K5	98	99	128
S70F25K5	96	98	123
S65F35K5	86	92	120
S60F40K5	72	82	107
S55F45K5	69	73	94



Şekil 6.7. Karışımların 1, 7 ve 28 günlük % CBR değerlerinin karşılaştırılması

## 6.6.Çelikhane Cürufunun Fiziksel Özelliklerinin Yol Alt Temel ve Temel Tabakası Standartları ile Karşılaştırılması

Çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri incelendiğinde, karayolları teknik şartnamesinde belirtilen standartlara göre hem alt temel, hem de temel tabakalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu durum Çizelge 6.7 de sunulmaktadır.

Çizelge 6.7. KGM standartlarına göre alt temel, temel ve Çelikhane Cürufunun fiziksel özellikleri

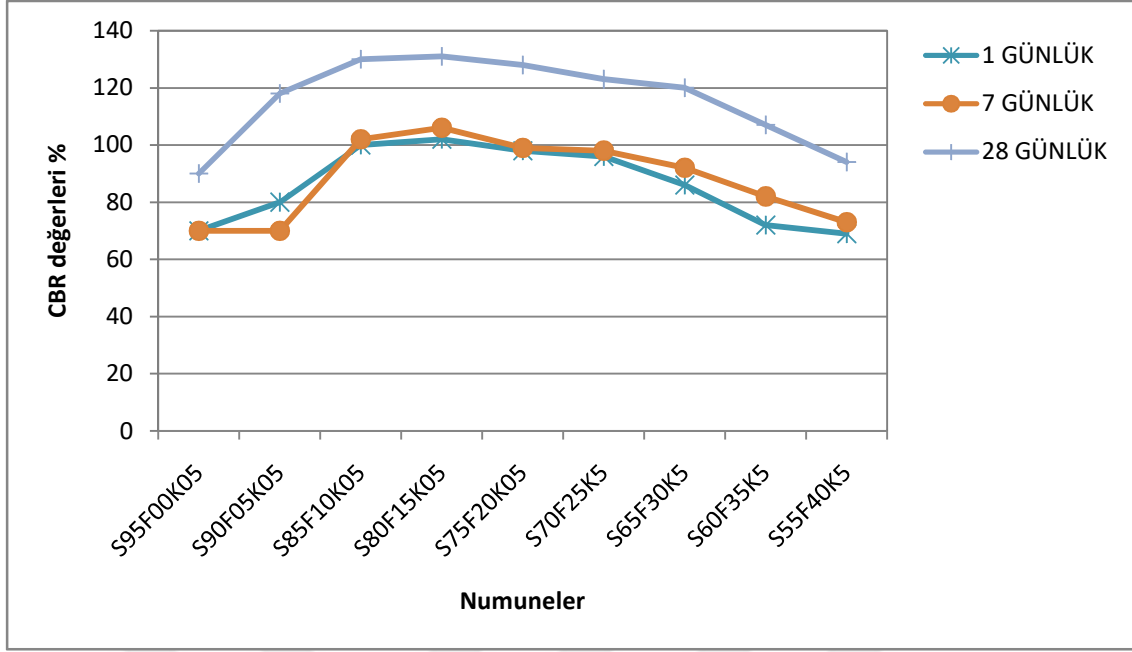
DENEY ADI	ALT TEMEL	TEMEL	ÇELİKHANE CÜRUFU	DENEY STANDARDI
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, %	≤ 25	≤ 20	20-25	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %	≤ 45	≤ 35	<12	TS EN 1097-2 AASHTO T 96
Yassılık İndeksi, %	≤ 30	≤ 25	15,5	TS EN 933-3
Su emme(kaba ve ince agregada), %	≤ 3,5	≤ 3	0,95-0,83	TS EN 1097-6
Kil Topağı ile Dağılabilen Dane Oranı, Maksimum %	4,75 mm elek üstü ≤2	≤ 1	0	ASTM C 142
Organik Madde (%3 NaOH ile)	Negatif	Negatif	Negatif	TS EN 1744-1

Bu çizelgeye göre çelikhane cürufunun fiziksel özellikleri, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Şartnamesinde alt temel ve temel için verilen üst sınırların altında kalmaktadır. Ayrıca teknik şartnamede belirtilen diğer bir konu da yaş CBR değeri % 100 de az olmamalıdır( AASHTO T 193, TS 1900-2). Salt çelikhane cürufunun % CBR değeri 300 mertebelerinde iken tez çalışması kapsamında yapılan karışımların % CBR değerleri de %100 ün üstündedir. Sadece çelikhane cürufu oranı %55 olan S55F40K5 karışımının 28 günlük değeri % 94 seviyesinde kalmıştır. Bu değerler çelikhane cürufunun yol alt temel ve temel tabakalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

## 7.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada demir çelik fabrikaların atığı olan çelikhane cürufu, termik santrallerin bacalarında tutulan uçucu kül atığı ve bağlayıcı malzeme olarak kaolin kili kullanılmıştır. Çelikhane cürufu olarak Ereğli demir çelik fabrikasının atıkları, uçucu kül olarak Seyitömer termik santralının uçucu külü, kaolin olarak ise serbest piyasadan kaolin kili tedarik edilerek çalışmalar yapılmıştır ve 4 farklı karışım hazırlanarak atıkların yol alt tabakalarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Karışımlar hazırlanırken her defasında kaolin kili %5 sabit olmak koşuluyla çelikhane cürufu ve uçucu kül miktarları belirli oranlarla değiştirilerek karışımlar elde edilmiştir. Hazırlanan bu numuneler üzerinde elek analizi ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda 4 nolu elek altında kalan malzemeler karıştırılmış ve kompaksiyon deneyinden elde edilen optimum su muhtevası değerlerine göre numuneler hazırlanıp kürlenmiştir. Daha sonra numuneler üzerinde sırasıyla kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve CBR deneyi yapılmıştır. Kesme kutusu deneyinden, numunenin içerisindeki bağlayıcı miktarı uygun olmadığından yapılamamıştır. Serbest basınç deneylerinden numunelerin qu değerleri, CBR deneylerinden ise % CBR oranları bulunmuştur. Serbest basınç ve CBR deneyleri için hazırlanmış numuneler üzerinde 1,7 ve 28 günlük kür işlemi uygulanıp deneye tabi tutulmuştur. Tüm deneyler ASTM standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar ve elde edilen veriler ve neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır. Bu tez çalışmasının sonuçlarını mühendislik açısından etkileri, çevresel etkiler ve sosyal etkiler olarak üç alt başlıkta toplayarak değerlendirmek mümkündür.



Şekil 7.1. Karışımların 1, 7 ve 28 günlük % CBR değerleri

Mühendislik açısından etkileri;

- Tüm karışımlarda kür süresi arttıkça hem serbest basınç mukavemet değeri ( $q_u$ ) hem de % CBR değerleri artış göstermiştir.
- % CBR değeri tüm karışımlarda %100 ün üstünde kalmıştır. Sadece çelikhane cürufu %55 olan numunenin değeri %96 mertebesinde kalmıştır (Şekil 7.1).
- Karışımlarda kullanılan malzemeler tek başına yüksek dayanıma ve bağlayıcı özelliğe sahip olmamalarına rağmen bir araya geldiklerinde puzolanik aktivite gerçekleşmektedir.
- Salt çelikhane cürufu olan numunede % CBR oranı %70 iken çelikhane cürufu azalıp uçucu kül arttıkça % CBR değeri % 130 mertebelerine kadar yükselmiştir.
- Karışımındaki çelikhane cürufu oranı %100 den %80 mertebelerine düştükçe % CBR değerlerinde de artış gözlemlenmiştir. %80 den %60 a düştükçe bir miktar azalma gözükse de ciddi bir kayıp yaşanmamıştır.
- Numunelerin % CBR değerleri irdelendiğinde en yüksek değer; içeriğinde % 80 çelikhane cürufu, % 15 uçucu kül barındıran numunede tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak çelikhane cürufu kullanılırken, ağırlıkça %15 kadar uçucu kül katılması malzemenin yol alt tabakasındaki performansını arttıracaktır.

- Numunelerdeki çelikhane cürufu azaldıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık azalırken optimum su muhtevası artmıştır.
- Çalışmalarda serbest basınç(qu) ve % CBR deneylerinden elde edilen veriler neticesinde uçucu kül gibi puzolanik malzemelerle karıştırılan zemin katkı karışımlarının 28 günlük deney sonuçları, 1 ve 7 günlük sonuçlara göre daha gerçekçi ve isabetli sonuçlar ortaya çıkarmaktadır (Şekil 7.1). Kısa süreli kütleme işlemi, malzemenin mukavemet özelliklerinin doğru tespiti için yeterli değildir.
- Taşıma kapasitesi deney sonuçlarına göre, demir çelik fabrikalarının bir atığı olan çelikhane cürufu, uçucu kül ve kaolin ile karıştırıldığında mukavemet özelliklerinin arttığı görülmektedir
- Çizelge 6.7'ye göre çelikhane cürufu, uçucu kül ve kaolin karıştırıldığında, KGM'nin alt temel ve temel tabakaları için belirlediği limitlerin içinde kalmaktadır.
- % CBR sonuçlarına göre ise karışım numuneleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, yol alt temel ve temel tabakalarında çelikhane cürufu doğal agreganın yerini alabilecek özellikler göstermektedir.

#### Çevresel etkiler;

- Yapılan tüm çalışmalar neticesinde, endüstriyel bir atık olan çelikhane cürufu, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün teknik şartnamesinde verilen, yol üst yapısının alt temel ve temel katmanları için belirlenen standartları sağladığı ve temel, alt temel tabakalarında kullanılabilen sonucuna varılmıştır. Çevre kirliliğinin ve geri dönüşümün önem kazandığı bir dönemde, çelikhane cürufu gibi bir endüstriyel atığın kullanılabilir hale gelecektir.
- Çelikhane cürufunun kullanılabilir olması, alt temel ve temel tabakalarında kullanılan agreganın ocaktan çıkarılması, parçalanması için makinelerle kazma, patlatma gibi doğaya zarar verecek unsurlar azalacak, yeni taş ocakları ihtiyacı düşüş gösterecek, aynı zamanda agreganın parçalanması için kullanılan benzin veya mazotlu iş makinelerinin atmosfere vereceği CO salınımını azaltacaktır.
- Atık malzemelerin stoklanması için oluşturulan sahalar azalacak ve buna paralel olarak yeni üretim tesislerinin inşası için doğal alanların yok edilmesinin önüne kısmi olarak geçilecektir.

### Çalışmanın sosyal açıdan etkileri;

- Endüstriyel bir atığın kullanılması, alt temel ve temel tabakalarında kullanılan agreganın üretimi için harcanan; taş ocaklarının kamulaştırılması, ocaklarda yapılan patlatma gibi yüksek maliyetli işler, ithalatını yaptığımız petrol ürünleriyle çalışan iş makinelerinin kullanımının azalması gibi sonuçlara sebep olarak ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.
- Demir çelik fabrikalarına yakın bölgelerde kullanılacak olan çelikhane cürufu sayesinde, alt temel ve temel tabakalarının malzeme tedariki için maliyette ciddi anlamda düşüşler gözlemlenecektir. Uzak bölgeler için ise taşıma maliyet analizi yapılarak olabirliği tartışılmalıdır.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Alataş, T., Somunkıran, E., T., Ahmedzade, P., 2006, Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılması, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der. 18 (2), 225-234, Elazığ
- Anonim, 2014, Esnek ve rijit üst yapılar, <https://www.medeniyetmuhendisleri.com/index.php?topic=467.0> erişim tarihi:20.01.2018
- Anonim,2015, <https://www.haberler.com/turkiye-nin-ilk-beton-yolu-11-yildir-bozulmadi-7880625-haberi/> erişim tarihi:15.01.2018
- Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanımı. G.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 21 (1), s:193-203.
- ASTM C618-12a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- ASTM D421-85, Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007
- ASTM D698-12e2, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012
- ASTM D2166 / D2166M-16, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016
- ASTM D3080 / D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011
- ASTM D1883-07, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007
- Bentli, İ., Uyanık, A.O., Demir,U., Şahbaz, O.,Çelik, M.S.,2005, Seyitömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bilgen, G., Kavak, A., Çapar, Ö. F., 2012, Düşük plastisiteli bir kilde katkı olarak çelikhane cürufunun kullanılması ve kireç ile etkileşimi, Zonguldak, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi,sayı:2, s:30-38
- Çelik, M.H., Aruntaş, H.Y., Baran, Y.,2003, Seyitömer ve Çayırhan uçucu küllerinin Portland çimentosu-uçucu kül(pç-uk) hamurunun priz başlama ve sonu sürelerine etkisi, Politeknik Dergisi,Cilt:6, Sayı:1, s:397-409
- Çevik, B., 2017, Demir Çelik Sektörü, Türkiye İş Bankası İktisadi Araştırmalar Bölümü
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015, Demir Çelik Cüruf Raporu, Türkiye Çelik Üreticileri Derneği.
- Çil,İ., 2003, Uçucu küllerin beton yapımında kullanımı, 56. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara
- Dündar, H., 2006, Farklı soğutma hızlarında soğutulan çelikhane cüruflarının öğütme parametrelerinin incelenmesi,Hacettepe Üniversitesi, s:3, Ankara
- Erdemir, AR-GE Raporu, 2005. Çelik üretim cüruflarının asfalt üretiminde kullanılması. Ereğli Demir Çelik Fabrikası, Zonguldak
- Fırat, S., Cömert,A.,T., 2011, Uçucu kül, kireç ve çimento ile iyileştirilmiş kaolinde kür süresinin CBR üzerine etkileri,Gazi Üniv.Müh.Mim.Fak.Der., cilt 26,no 4, s:719-730
- Fırat, S. Yılmaz G, İ. Vural, J.Khatib, S. U.Umu, 2016. Çelikhane Cürufu İle Yol Altyapı Dolgusunun Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi, Mesleki Eğitimde I. Uluslararası Yapı ve Elektrik Uygulamaları Çalıştayı (IWCEA2015), Tam Metin Bildiriler Kitabı, s:215-223, Eskişehir, ISBN 978-975-06-1861-1.
- Fırat, S., Khatib, J., M., Yılmaz, G., Comert, A.,T., 2017, Effect of curing time on selected properties of soil stabilized with fly ash, marble dust and waste sand for road sub-base materials, WM&R, Vol.35(7), p:747-756
- Fırat,S., Soyonar, E., Okur, D., V., Yılmaz, G., 2017, Performance of steel slag and fly ash added soil as subbase materials, 3<sup>rd</sup> International Sustainable Building Symposium, Dubai
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., 2005, Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları, İzmir, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Ilıcalı,M.,1988, Karayolu üst yapısında ERDEMİR cürufunun kullanımının araştırılması,Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul
- Karatağ, H.,2017, Çelik cürufu ile yapılan yol temel-alt temel tabakalarının dinamik yükler altında davranışının deneysel ve sayısal analizi( doktora tezi devam ediyor)
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2008, Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberi, s:17-22
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013, Karayolu Teknik Şartnamesi, Bölüm:401-402
- Misra,A., Biswas, D., Upadhyaya, S., 2004, Physico-mechanic behavior of self-cementing class C fly ash-clay mixtures,
- Mutlugeldi,C., 2015, Elektrik ark fırın cürufunun karayolu esnek üst yapısı bitümlü temel tabakasında agrega olarak değerlendirilmesi,İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans tezi
- Pehlivan, B.,Parlak, F., 2013, Çelikhane cürufundan parke taşı yapımı, ERDEMİR AR-GE Müdürlüğü, Zonguldak
- Sönmez,B., Baş,E.,Günay,E., Kara,M.,2003, ERDEMİR çelikhane cüruflarının asfalt betonu agregası ve demiryolu balast malzemesi olarak kullanılması imkanları
- Tunç, A., 2001, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları,Atlas Yayınevi,İstanbul
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2009, Türkiye deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Ankara, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı
- Yılmaz, A., 2016, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Karayolu Malzemeleri ders notu
- Yılmaz, G., 2012, Structural characterization of glass–ceramics made from fly ash containing SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO and analysis by FT-IR–XRD–SEM methods,Journal of Molecular Structure, 1019, p:37-42
- Yılmaz, I.,Yıldırım,M.,Keskin,İ.,2014, Zemin Mekaniğı Laboratuvar deneyleri, 2. baskı