

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DÖKME DEMİR CÜRUFUNUN HARÇ İÇİNDE MİNERAL
KATKI OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

SADIK YILDIZ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

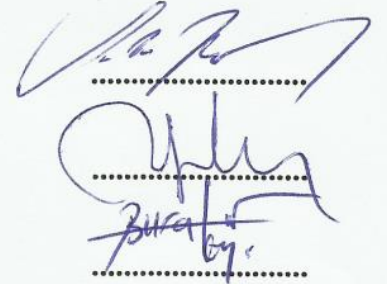
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÖKME DEMİR CÜRUFUNUN HARÇ İÇİNDE MİNERAL
KATKI OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

SADIK YILDIZ

Doç. Dr. S. Taner YILDIRIM
Danışman, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Serkan SUBAŞI
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.
Dr. Öğr. Üyesi M. Burak TELLİ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim boyunca, çalışmalarımda bana yol gösteren, yardım eden, destekleyen, çalışmamın düzenlenmesi ve doğru şekilde sonuca ulaşmasında bilgi ve birikimlerini bana aktaran Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM'a teşekkür eder, en içten saygı ve sevgi dileklerimi sunarım.

Çalışmalarımıza malzeme temin ederek her zaman desteğini esirgemeyen Kavanlar Beton Teknik Müdürü Sayın İlhan YILMAZ'a ve diğer personellerine, ayrıca proje işbirliği yaptığımız Ferro Döküm San. ve Dış Tic. A.Ş. firması yetkilileri ve özellikle Sayın Ragıp MUHAFFEL'e teşekkürlerimizi sunarız.

Öğrenim hayatımda beni hep destekleyen aileme, laboratuvar çalışmalarında bana yardım eden öğrenci arkadaşlarıma yüksek lisans hayatımın başlaması için beni teşvik eden ve destekleyen babam Hasan YILDIZ'a ayrıca bir teşekkürü borç bilirim.

Haziran-2019

Sadık YILDIZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	5
1.1. Döküm Sektörü.....	5
1.1.1. Model yapımı	6
1.1.2. Maça yapımı.....	6
1.1.3. Kalıplama	6
1.1.4. Ergitme ve döküm	6
1.1.4.1. Kupol ocakları.....	6
1.1.4.2. Potalı ocaklar.....	8
1.1.4.3. Elektrik ark ocakları.....	9
1.1.4.4. Endüksiyon ocakları.....	9
1.1.5. Temizleme.....	10
1.2. Dökümhane Cürufu Genel Özellikleri	10
1.3. Dökümhane Cürufunun Elde Edilmesi	12
1.4. Mineral Katkılar	16
1.4.1. Doğal puzolanlar	17
1.4.2. Yapay puzolanlar	18
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	20
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	30
3.1. Kullanılan Malzemeler	30
3.1.1. Döküm cürufu	30
3.1.2. Çimento	34
3.1.3. Doğal kum.....	35
3.1.4. Su	36
3.2. Deney Numunelerin Üretimi.....	36
3.3. Yöntem	39
3.3.1. Kıvam (Yayılma)	39
3.3.2. Birim ağırlık ve su emme	39
3.3.3. Kılcallık.....	40
3.3.4. Eğilme dayanımı	40
3.3.5. Basınç dayanımı	41
3.3.6. Rötire.....	42
3.3.7. ASR.....	43
3.3.8. Sıcaklığa dayanıklılık.....	44
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Kıvam (Yayılma).....	47

4.2. Birim Ağırlık ve Su Emme.....	48
4.3. Kılcallık.....	50
4.4. Eğilme Dayanımı.....	51
4.5. Basınç Dayanımı	52
4.6. Rötire	54
4.7. ASR	55
4.8. Sıcaklığa Dayanıklılık	57
4.8.1. Ağırlık kaybı	57
4.8.2. Basınç dayanım kaybı	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
5.1. Sonuçlar.....	61
5.2. Öneriler.....	63
KAYNAKLAR	64
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	68
ÖZGEÇMİŞ	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Kupol ocağının kesiti	8
Şekil 1.2.	Potalı ocakların üç türü: (a) kaldırmalı pota, (b) sabit potalı, ve (c) Devrilen potalı ocak.....	8
Şekil 1.3.	Elektrik Ark Ocağı	9
Şekil 1.4.	Endüksiyon Ocağı Kesiti.....	10
Şekil 1.5.	Dökümhane süreçlerinde oluşabilecek atıklar.....	13
Şekil 3.1.	Döküm cürufu eleme aşamaları.....	31
Şekil 3.2.	Çimento yerine ikame edilen döküm cürufu	31
Şekil 3.3.	XRD grafiği ile içerik tahlili	32
Şekil 3.4.	Işık mikroskobu ile tanecik yapısının görüntülenmesi.....	32
Şekil 3.5.	Işık mikroskobu ile aydınlık alan tanecik yapısının görüntülenmesi	33
Şekil 3.6.	Işık mikroskobu ile karanlık alan tanecik yapısının görüntülenmesi	33
Şekil 3.7.	Işık mikroskobu ile polarize ışık altında tanecik yapısının görüntülenmesi	34
Şekil 3.8.	CEM I 42.5 R Portland Çimento.....	35
Şekil 3.9.	Agrega Granülometri Eğrisi	35
Şekil 3.10.	0-4 mm aralığında agrega (kum).....	36
Şekil 3.11.	40x40x160mm boyutlarındaki kalıp	37
Şekil 3.12.	25x25x285mm boyutlarındaki kalıp	37
Şekil 3.13.	50x50x50 mm boyutlarındaki kalıp	37
Şekil 3.14.	Yayılma deneyi	39
Şekil 3.15.	40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında prizma numune	40
Şekil 3.16.	Numunelerin basınç altında eğilme dayanımı testi	41
Şekil 3.17.	Basınç dayanımı deney aleti.....	41
Şekil 3.18.	Günlere göre rötre ölçümleri	42
Şekil 3.19.	ASR ölçüm aleti	43
Şekil 3.20.	ASR kür havuzu	44
Şekil 3.21.	Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi.....	45
Şekil 3.22.	Numunelerin tartılması.....	45
Şekil 3.23.	Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanım testi	46
Şekil 4.1.	Geridönüştürülmüş döküm cürufu katkılı harçlarda yayılma miktarları	47
Şekil 4.2.	Numunelerin ağırlıkça yüzde su emme grafiği	49
Şekil 4.3.	Numunelerin ağırlıkça yüzde kılcal su emme grafiği	50
Şekil 4.4.	Eğilme dayanımlarının 90 günlük süreçteki değişimi (MPa).....	51
Şekil 4.5.	Basınç dayanımlarının 90 günlük süreçteki değişimi.	53
Şekil 4.6.	Günlere göre rötre ölçümleri (%).....	55
Şekil 4.7.	Günlere göre ASR ölçümleri (%).....	56
Şekil 4.8.	Numunelerin ağırlık kaybı grafiği (gr).....	57
Şekil 4.9.	Numunelerin etüv numunesiyle kıyaslamalı ağırlık kaybı grafiği (%)	58

Şekil 4.10. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanımları (MPa)	59
Şekil 4.11. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanım kaybı (%).....	60



TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Döküm cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri	12
Tablo 1.2. Demirdöküm esnasında meydana gelen atıklar.....	14
Tablo 1.3. 2014 Yılı Çelikhane Cürufu ile Atık ve Geri Kazanım Miktarları (ton).....	16
Tablo 2.1. Küpler (150x150x150mm) için karışım oranları	20
Tablo 2.2. 28 gün sonunda ort. Basınç değerleri (N/mm ²)	21
Tablo 2.3. 28 gün kürleme sonunda ort. dayanım değerleri (MPa).....	24
Tablo 2.4. Basınç, Çekme ve Eğilme dayanımlarının günlere göre dayanım değerleri (MPa).....	25
Tablo 2.5. Çelik cürufu, yüksek fırın cürufu kimyasal fiziksel özellikleri.....	28
Tablo 3.1. Döküm cürufunun kimyasal, fiziksel özellikleri.	30
Tablo 3.2. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.	34
Tablo 3.3. Karışım dizaynları.	38
Tablo 4.1. Kıvam sonuçları(mm)	47
Tablo 4.2. Numunelerin DYK ve Kuru ağırlıkları	48
Tablo 4.3. Numunelerin kuru birim ağırlıkları ve su emme oranları	49
Tablo 4.4. Tartımları yapılan numunelerin yüzde olarak kıyaslanması	50
Tablo 4.5. Eğilme dayanımı sonuçları (MPa).....	51
Tablo 4.6. Basınç sonuçları (MPa)	52
Tablo 4.7. Günlere göre rötre değişim değerleri	54
Tablo 4.8. Günlere göre rötre ölçümleri (%)	54
Tablo 4.9. Günlere göre ASR değişim değerleri (mm)	56
Tablo 4.10. Günlere göre ASR ölçümleri (%).....	56
Tablo 4.11. Tartımları yapılan numunelerin ortalama ağırlıkları(gr).....	57
Tablo 4.12. Sıcaklık deneyi sonrası ağırlık kaybı yüzdeleri(%).....	58
Tablo 4.13. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanımı (MPa).....	59
Tablo 4.14. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanım kaybı(%)	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B	: Harç numunesinin genişliği (mm)
d	: Harç numunesinin yüksekliği (mm)
L	: Mesnet açıklığı (mm)
P	: Kırılma anındaki yük (N)
S _a	: Ağırlıkça yüzde su emme (%)
V	: Numune hacmi (cm ³)
W _d	: Doygun kuru yüzey ağırlık (gr)
W _k	: Kuru ağırlık (gr)
Δ	: Kuru birim ağırlık (gr/cm ³)
σ _e	: Eğilme Dayanımı (MPa)

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzemeler Derneği)
ASR	: Alkali Silika Reaksiyonu
EN	: Europeane Norm (Avrupa Norm Kısaltması)
MPa	: Mega Pascal
TS	: Türk Standartları
TS-EN 196-1	: Çimento Deney Metotları - Dayanım Tayini
BS 12	: Specification of Ordinary Portland Cement British Standard (İngiliz Standartlarına Göre Portland Çimentosu)
IS:456-2000	: Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice is an Indian Standard(Hint Standart Düz ve Betonarme Uygulama Kuralları)
XRD	: X-Işınları Difraktometresi

DÖKME DEMİR CÜRUFUNUN HARÇ İÇİNDE MİNERAL KATKI OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Dünya’da tüketimin giderek artması ile birlikte geridönüşüm ürünlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Hammadde olarak kullanılan malzemelerin yerine atık malzemelerin ikame edilmesi ile mevcut kaynaklar daha az kullanılmakta ve atık malzemelerin kullanımı ekonomik avantajlar getirmektedir. Ekonominin ön plana çıktığı sektörlerin başında inşaat sektörü gelmektedir ve sektörde en çok kullanılan malzeme olan beton ön plana çıkmaktadır. Beton içinde birçok atık malzemenin geridönüşümünü mümkün kılan bir kompozittir.

Betonda geçmişten beri birçok geridönüştürülmüş malzeme puzolan olarak betona kazandırılmış ve bu malzemeler betona nitelik kazandırmıştır. Özellikle yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı çok araştırılan ve tercih edilen ürünlerdir. Ülkemizde de yüksek fırın cürufu ve uçucu kül beton imalatçılarının en çok kullandığı puzolanlardır. Yüksek fırın cürufu yanında dökümhane cüruflarının betonda kullanımı üzerine de araştırmalar devam etmektedir. Dökümhane cürufları demir dökümü yapan fabrikaların cüruflarından elde edilmektedir.

Bu çalışmada Ferro döküm fabrikasından elde edilen döküm cürufları öğütülerek çimento ile birlikte puzolan olarak betonda kullanımı araştırılmıştır. Bunun için döküm cürufu % 5, 10, 15 ve 20 oranlarında çimento ile ikame edilmiş, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Döküm cürufu ile hazırlanan taze harçlar üzerinde yayılma, sertleşmiş 40x40x160 mm boyutlu harçlar üzerinde birim ağırlık, su emme ve eğilme dayanımı, su emme deneyinden sonra ikiye kesilerek elde edilen 40x40x80 mm boyutlu numuneler üzerinde kılcal su emme, eğilme deneyi sonucu elde edilen parçaların 40x40x40 mm’lik kısımları üzerinde basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Ayrıca 50x50x50 mm boyutu küp numuneler fırında 400, 500 ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılarak ağırlık kayıplarına ve basınç dayanımlarına bakılmıştır.

Tüm bu testler sonucuna göre atık malzemenin geri dönüştürülebilir olduğu, özellikle %10 civarında harca pozitif katkı yaptığı, %20’ye kadar da mekanik özellikleri çok düşürmeden kullanılabileceği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döküm Cürufu, Fiziksel Özellikler, Harç, Mekanik Özellikler, Puzolan.

INVESTIGATION OF THE USE OF CAST IRON SLAG AS A MINERAL ADDITIVE IN MORTAR

ABSTRACT

While increasing consumption in the world, the use of recycling products is becoming widespread. By replacing the materials used as raw materials with the replacement of waste materials, the available resources are used less and the use of waste materials brings economic advantages. Construction sector is one of the leading sectors where the economy comes to the forefront and concrete, which is the most used material in the sector, comes to the fore. It is a composite that enables recycling of many waste materials in concrete.

Since the past, many recycled materials in concrete have been added to concrete as pozzolan and these materials have given quality to concrete. Particularly blast furnace slag, fly ash and silica fume are highly researched and preferred products. In our country, blast furnace slag and fly ash are the most commonly used pozzolan manufacturers. In addition to blast furnace slag, research on the use of foundry slag in concrete continues. Foundry slag is obtained from slag of iron casting factories.

In this study, casting slag obtained from Ferro casting factory were ground and used in cement as pozzolan. For this purpose, casting slag was replaced with 5, 10, 15 and 20% cement and its physical and mechanical properties were investigated. Spreading on fresh mortars prepared by casting slag, unit weight on hardened 40x40x160 mm mortars, water absorption and bending strength, capillary water absorption on samples of 40x40x80 mm obtained after cutting by water absorption test, 40x40x40 mm ' The compressive strength tests were performed on the sections. In addition, 50x50x50 mm cubic samples were exposed to 400, 500 and 600 °C in the furnace and their weight loss and compressive strength were examined.

According to the results of all these tests, it is determined that the waste material is recyclable, it makes a positive contribution to the mortar especially around 10% and it can be used up to 20% without reducing the mechanical properties.

Keywords: Casting Slag, Physical Properties, Mortar, Mechanical Properties, Pozzolan.

GİRİŞ

Geçmişte bağlayıcı malzeme olarak kullanılan kil, kireç ve puzolan gibi bağlayıcılar günümüzde yerini kireçtaşının kille pişirilmesinden ortaya çıkan ve günümüze kadar gelişerek gelen modern bağlayıcı olan çimentoya bırakmıştır. İlk zamanlarda barınma ihtiyacına hizmet veren inşaat sektörü günümüzde ulaşım, tarım, sanayi gibi hemen her sektöre hizmet veren bir konuma gelmiştir (Uysal ve Bahar, 2018; Akman, 2003).

İnşaat sektörü içerisinde birçok alandan malzeme kullanılmasına rağmen hala sektörde en çok kullanılan malzeme betondur. Beton su, çimento, agrega ve kimyasal veya mineral katkı maddelerinin homojen karışımından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup istenilen şekle girebilen zamanla çimentonun hidratasyonu sebebiyle katılaşıp sertleşen, kompozit bir yapı malzemesidir. Katkısız bir beton içeriğinin %10'u çimento, %15'i su, %75'i agregalardan oluşmaktadır. Beton üretiminde bağlayıcı olarak görev yapan çimento, sera gazlarından biri olan ve artması halinde çevreye zararlı etkileri büyük ölçülerde olan CO₂ gazının, insan kaynaklı emisyonunun tek başına %5'inden sorumludur.

Dünyada ciddi miktarlarda üretilmeye ve tüketilmeye devam eden çimento üretim maliyeti yüksek, üretim sırasında çevreye zarar veren ve hammaddesinin hızla tüketildiği bir madde olarak düşünüldüğünde gelecek için endişe vermektedir (Engin, 2016; Başar ve Aksoy, 2013).

Çimento, kum, agrega gibi tüm yapı malzemeleri doğal kaynaklardan elde edilir. Son yıllarda inşaat sektöründeki büyüme doğal kaynakların azalmasına ve üretimin zorlaşmasına sebep olmuştur. Özellikle tüm dünyada çimento üretiminin hızla artması hem doğal kaynaklar üzerinde hem de çevre kirliliği üzerinde büyük baskı oluşturmıştır. Tüm bu sebeplerden dolayı çimento üretimini azaltmak, çimentonun kullanıldığı harç ve beton üretiminde çimentonun yerine başka malzemeler kullanmaya çalışmaktayız. Son zamanlarda inşaat sektörünün yanı sıra hızla büyümekte olan metal döküm endüstrisi de üretim esnasında fırınlardan istenmeyen

malzeme olarak açığa çıkan çevreye zararlı, bertarafı ve depolanması zor olan atık malzeme ile başa çıkmaya çalışmaktadır. Cürufun kimyasal ve fiziksel özellikleri metal üretiminde kullanılan hammaddeye bağlı olmakla beraber genel olarak cüruf kimyasal bileşenleri ve fiziksel yapı itibarıyla çimento ve agrega yerine kullanılabilir bir malzemedir. Fırınlardan sıvı halde alınan, cüruf soğutma işlemine tabi tutularak kaba ve büyük yapılı hale getirilen sonrasında öğütülerek yol yapımı, beton, gübre, toprak düzenleyici, metal geri kazanım hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Metal üretimi esnasında ortaya çıkan cüruf genellikle Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , MgO , K_2O , CaO gibi oksitleri bulundurmaktadır. Dökümhane cürufunun doğru bir karakterizasyonunun yapılması kullanılabileceği alanları belirlemede çok önemlidir. CaO , SiO_2 , FeO ve Al_2O_3 gibi ana oksitler cürufun çimento üretiminde kilinker malzeme olarak kullanılabileceğini göstermektedir. (Devi ve diğ., 2016; Wang, 2010; Andrews ve diğ., 2012).

Geri dönüşüm üzerine yapılan araştırmalar ve bu sektörde ki özellikle sanayi alanında ki bazı atık malzemelerin çimento ile benzer özellikler gösterdikleri ortaya çıkmıştır. Daha fazla doğaya zarar vermeden hem ekonomik hem de çevresel üretimler yapmak için geri dönüşüm sektörünün işliyor olması ve geri dönüşümdeki bazı maddelerin beton içerisinde kullanılabileceğini düşünüyor olmamız ümit vericidir. Özellikle çimento yerine ikame etmek için dökümhane cürufları, dökümhane kumları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, alüminyum ve bakır cürufları düşünülebilir, agrega yerine ikame etmek içinse cüruf, santral atıkları, geri dönüştürülmüş beton, madencilik ve taş ocağı atıkları, atık cam, kırmızı çamur, mermer parçaları, yanmış kil, talaş, yakıcı kül ve döküm kumu düşünülebilir. Bu atık malzemeler bulunması kolay maliyet olarak uygun ayrıca ülke ekonomisine katkısı üretimde hammadde ve geri dönüşümde bertaraf etme sebebiyle azımsanmayacak derecede büyüktür (Balaraman ve Elangovan, 2018; Gülesin Yavuz F.,2016).

Betonun üretim şekli kullanım amacına, ekonomik durumuna ve çevresel etkenlere göre değişebilir. Üretiminde kullanılan malzemelerin de buna bağlı olarak değişebileceği aşıkardır. Bu malzemeler kullanım yeri, kullanım amacına göre değişen maddi olarak ucuz, aynı zamanda geri dönüşüme katkı yapan malzemeler olabilir. Kimyasal ve fiziksel yönden çimentoya benzer, içerdiği mineraller yönünden betona uygun, ayrıca betonda olumsuz sonuçlar meydana getirmeyecek olan geri

dönüştürülebilir dökümhane cürufları betonda kullanımı kusursuz sayılabilecek ender malzemelerdendir (Yuvaraj ve diğ.,2015).

Çelik üretimi, özellikle büyük miktarda yan ürün ortaya çıkaran sektör olması nedeniyle atık ürün bertarafı sorunundan endişe duymaktadır. Atık ürünlerin uzun süreli depolanma imkanı olmamakla beraber, bertaraf edilmesi maliyet ve zaman olarak sektörü büyük sıkıntı içerisine düşürmektedir. Farklı türde cüruf, demir-çelik sektöründe yan ürünlerin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Entegre bir çelik tesisinde, bir ton çeliğin üretimi yaklaşık yarım ton yan ürüne neden olur. Bunun 280-300 kg'ı cüruf olarak atılmaktadır (Nadeem ve Pofale, 2012).

Demir ve çelik üretimi sırasında dökümhanelerde kullanılan ergitme fırınlarının asıl görevi, bileşik halindeki metali istenilen sıcaklıkta belirli sürede ergitme işlemine tabi tutmaktır. Ergitme işlemi yapan ocakları kullandıkları enerji bakımından yüksek frekanslı elektrik kullanan ark, endüksiyon ocakları; kömür, doğalgaz, sıvı gaz gibi standart yakıt kullanan kupol, pota ocakları olarak ayırabiliriz (T.C Çevre ve Şehircilik Bak., 2012).

Ocak içine hurda metal, alaşımlı metal, bileşik halinde metal gibi istenilen ürüne ve kullanılan ocak tipine göre gerekli hammaddeler eklenerek yakılır. Ergitme esnasında ocağa istenilen ürün şartlarına göre gerekli yan ürünler ve demir dışı atıkları bağlayacak gerekli katkı maddeleri (flakslar) ilave edilir ve cüruf oluşur. Döküm metalinden daha hafif olan cüruf kalıbın üst tabakasını kaplar ve daha sonra kalıba 18 derecelik bir eğim verilerek ocaktan dışarı alınır. Önce su ile sonra hava ile soğutmaya tabi tutulan cüruf kırılarak depolamaya hazır hale getirilir (Sabis.sakarya.edu.tr, 2016).

Cüruf metalik olmayan inert bir yan ürün olup silikat, alümino silikatlar, alüminyum, kalsiyum, kalsiyum oksit, diğer metal oksitler ve eser miktarda demir içerir. Kupol (kupola) ocaklarında ki cüruf kireçtaşı, kömür külü, silisyum külü, kum, ve ocak içi duvar malzemesi içerir. Bileşikler tuz da içerebilir (Khalak ve diğ., 2019; Yuvaraj ve diğ., 2015).

İnşaat sektöründe kullanılan geri dönüştürülmüş malzemeleri kaynaklarına göre; endüstriyel yan ürünler (madencilik atıkları, metalik cüruf, döküm kumu, uçucu

küller vb.), geri dönüştürülmüş beton ve geri dönüştürülmüş asfalt malzemeleri olarak sınıflandırabiliriz. Her ne kadar bu malzemelerin beton içerisinde kullanılma imkanı olsa da, geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak hazırlanan betonların su ile etkileşimleri durumunda suyun pH, sertlik(CaCO_3), alkalinite ve klorür derecelerinde artış gözlenmiştir. Ayrıca alüminyum cüruflarının su ile etkileşiminde zehirli, yanıcı, hatta patlayıcı (NH_3 , CH_4 , PH_3 , H_2 , H_2S gibi) gazlar çıkararak insan sağlığına ve çevreye zararlı bir hale gelebildiğini unutmamalıdır. Sonuçlar göz önüne alındığında betonda kullanılacak atık ürünlerin su ile etkileşime girip girmediğine bakılmalı ve su ile etkileşime girmeyen atık ürünlerin de kütleme için kullanılacak suyun analizine de bakılmalıdır (Yuvaraj ve diğ.,2015; Yücel ve Car, 2015).

Kocaeli ili Gebze ilçesinde faaliyetlerini sürdüren Ferro Döküm San. Ve Dış Tic. A.Ş. firmasında döküm aşamalarından ergitme esnasında metalin safsızlık haline gelmesi için pota içerisine perlit tozu serpilmesiyle istenmeyen maddelerin oksidasyonu sonucu eriyik haldeki metalin üstünde toplanan ve potadan dışarı alınan, soğutulma işlemine tabi tutulduktan sonra kimyasal içerik bileşenleri ve fiziksel özellikleri incelendiğinde ekonomik değeri olduğu anlaşılan gri renkli, sert, pürüzlü ve boşluklu yapıya sahip bu atık ürün geri dönüştürülebilir dökümhane cürufu olarak adlandırılmaktadır(FerroDöküm,2018).

Bu çalışmada Ferro döküm A.Ş.'den elde edilen öğütülmüş döküm cürufunun harç üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Değişen çimento/cüruf oranlarıyla hazırlanan harç numunelerinin, sadece normal portland çimentosuyla hazırlanan referans numunelerine kıyasla fiziksel, mekanik ve sıcaklığa karşı dayanımlarında nasıl bir değişim olduğu incelenmiştir. Çalışmada test sonuçları ve malzeme üzerinde ki gözlemler ele alınarak döküm cürufunun harç içerisinde kullanımının ne sonuçlar getireceğini belirlemek, aynı veya benzer malzemeler ile çalışma yapacak arkadaşlara rehberlik etmesi hedeflenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Döküm Sektörü

Metallere şekil vermenin birçok yolu vardır insan gücü veya bazı endüstriyel yollar olabilir. Çekiç ile döverek şekil verme, çeşitli makineler vasıtası ile presleme, kesme, zımparalama gibi birçok ayrı yöntem kullanılabilir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bak., 2012).

Metal döküm ise tam olarak istenilen şeklin istenilen şekliyle elde edilebilmesi için sıvılaştırılmış metal ya da alaşımın daha önceden modeli belirlenerek hazırlanan kalıplara dökülüp katılaşması beklenerek kalıptan alma işlemi olarak tanımlanabilir (Aran, 2007).

Metal alaşımları kendi içinde kimyasal ve fiziksel özellikleri sebebiyle farklılık gösterir. Bunlar üç farklı kategoriye ayrılabiliriz (Eker, 2008).

- Demir döküm
 - Gri dökme demir (Lamel grafitli dökme demir)
 - Sfero dökme demir(Küresel grafitli dökme demir)
 - Temper dökme demir
- Çelik döküm
 - Alaşımsız sade karbon çelik (imalat çelikleri) veya az alaşımlı çelik
 - Yüksek alaşımlı dayanıklı çelik
- Demir dışı metal ve alaşımları döküm
 - Bakır (Cu) esaslı alaşımlar
 - Alüminyum (Al) esaslı alaşımlar
 - Magnezyum (Mg) esaslı alaşımlar
 - Titanyum (Ti) esaslı alaşımlar
 - Kurşun (Pb) esaslı alaşımlar
 - Diğer alaşımlar (kalay, çinko kobalt nikel gibi)

Metal üretim sektöründeki adımlar hemen hemen hepsinde aynıdır;

- Model yapımı
- Maça
- Kalıplama
- Ergitme ve Döküm
- Temizleme

1.1.1. Model yapımı

Metalin istenilen şekilde üretilebilmesi için ahşap, metal, alçı, plastik gibi malzemelerden ergimiş ve soğumuş metalin arasındaki büzülme farklarını göz önünde bulundurarak üretilen 3 boyutlu modellerdir.

1.1.2. Maça yapımı

Üretilmek istenilen metalde herhangi bir boşluk isteniyorsa burada maça devreye girer. Dökümden önce kalıbın içerisine yerleştirilir gerekirse maça destekleri kullanılabilir. Maça kalıba göre daha dayanıklıdır. Bazı durumlarda maça kalıp görevi de almaktadır.

1.1.3. Kalıplama

İstenilen metalin şeklini veren sistemin hazırlanmasıdır. Daha çok kum ile kalıplama yapılmaktadır. Kabuk kalıplama, vakum kalıplama, kapalı kalıp (genleşen polistiren yöntem), hassas döküm(kayıp mum yöntemi), alçı kalıba döküm, kalıcı kalıba döküm, basınçlı döküm gibi birçok kalıplama yöntemi vardır.

1.1.4. Ergitme ve döküm

Dökümhanelerde kupol ocakları, doğrudan yakıt yakan ocaklar, potalı ocaklar, elektrik ark ocakları endüksiyon ocakları gibi genel adıyla ergitme ocakları ya da ergitme fırınları bulunur. Bu fırınların esas amacı metali istenilen sıcaklıkta istenilen sürede ekonomik bir şekilde sıvılaşma sıcaklığına getirmektir (T.C Çevre ve Şehircilik Bak., 2012; Gülmez, 2015).

1.1.4.1. Kupol ocakları

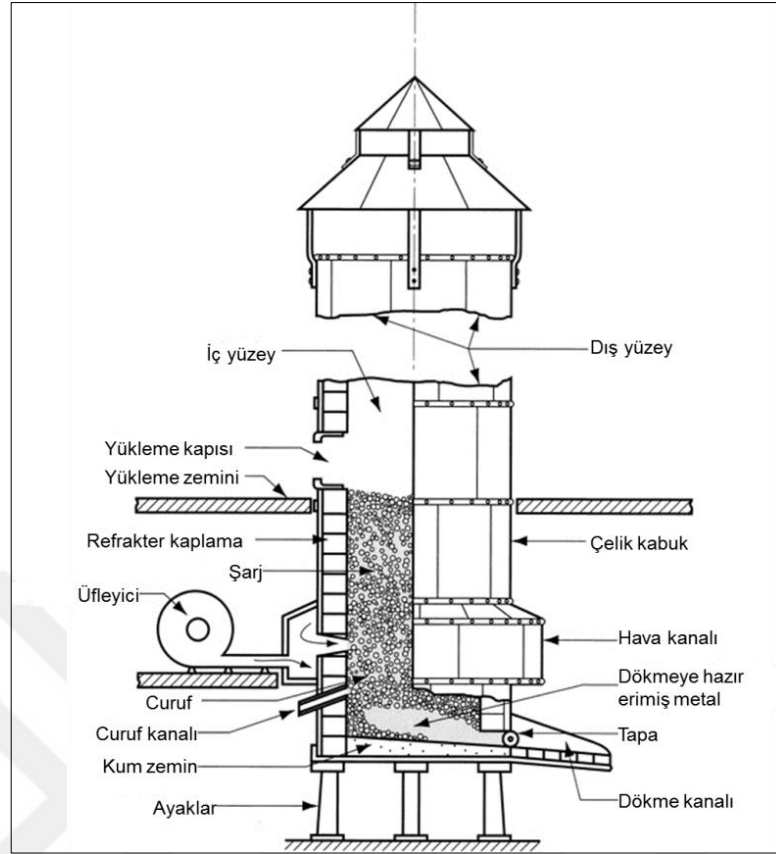
Döküm sektörü denildiğinde akla ilk olarak dökme demir ürünleri gelmektedir.

Dökme demir ürünlerinin de %80'i kupol ocaklarında ergitilmektedir. Döküm sektöründe dünyada ve ülkemize çok yaygın olarak kullanılan ocaklar, kupol ocaklarıdır. Şekil 1.1' de kupol ocağının ön görünüm kesiti verilmiştir.

Kupol ocakları dökme kanalının, tabanına yakın yerde olduğu silindirik tarzda ocaklardır. Sadece dökme demir için kullanılırlar. Büyük tonajlı dökme demirleri için kullanımı uygundur. Kapasiteleri 20ton/saate kadar çıkabilmektedir. Sırasıyla demir cevheri ya da hurda metaller, kok kömürü, kireçtaşı ve diğer alaşımlar şarj (yükleme yeri)'ne koyularak yakılır. Yakma işleminin hızlanması için içerisine basınçlı hava verilir. Yüksek sıcaklıklara ulaşan potalarda metal eritilir. Kok yatağına gelen erimiş sıvı metal belli aralıklarla dökme kanalından alınır. Ayrıca sıvı metalin üstünde biriken cürufu almak içinde cüruf alma deliği bulunur. Ortalama 70-80cm yüksekliğinde bir potada cüruf alma deliği 45-50cm de olacak şekilde ayarlanır. Kupol ocaklarında yakıt ve katkı maddelerinin çok ve doğrudan temas içinde olması nedeniyle diğer ocaklara nazaran daha çok cüruf oluşturmaktadır (Gülmez, 2015; MEB, 2011).

Özellikleri;

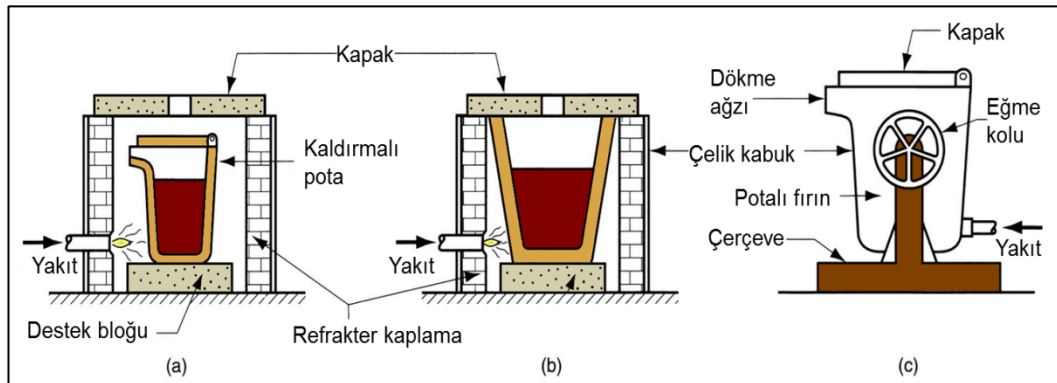
- Süreklilik
- Ekonomiklik
 - İlk yatırım ve işletme giderleri bakımından diğer ocaklara kıyasla daha ekonomiktir.
- Basitlik
 - Kullanımı kolay, eritme süresi kısadır. Ayrıca işletmede daha az alan kaplar.
- Özelliklerin kontrolü
 - Üretilen eriyik metalin bileşiminin kontrol edilmesi (safsızlık) ve eritilme sırasında pota sıcaklığının kontrol edilmesi zordur (Gülmez, 2015).



Şekil 1.1. Kupol ocağının kesiti

1.1.4.2. Potalı ocaklar

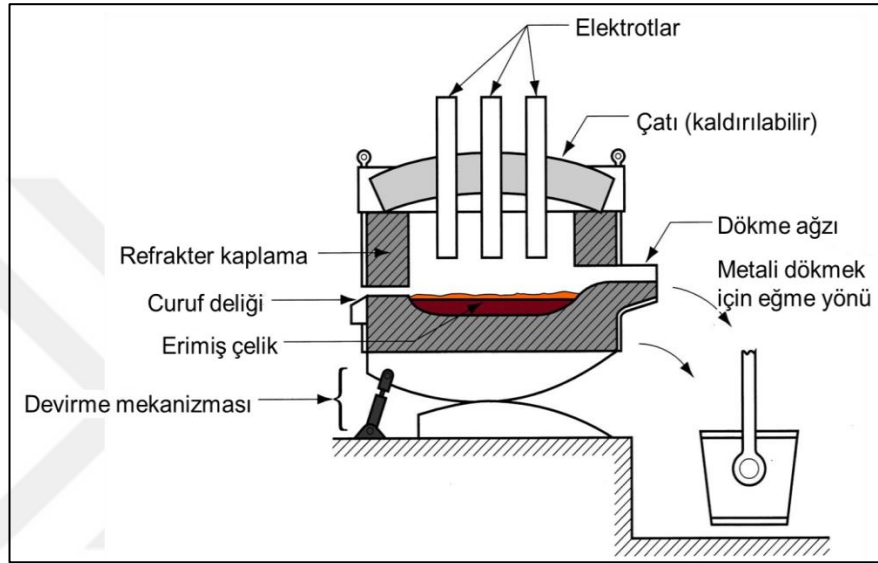
Şekil 1.2' de görüldüğü gibi kupol ocakları'nın aksine potalı ocaklarda metal yanan yakıt ile doğrudan bir temas olmadan erir. Pota ve reflakter malzemedan oluşan fırın kaldırmalı pota, sabit (erimiş metalin kepçeyle alınması gereken) ve devrilebilen potalı olarak üç türde kullanılır. Alüminyum, bronz, çinko gibi demir dışı metallerin ergitilmesinde kullanılır.



Şekil 1.2. Potalı ocakların üç türü: (a) kaldırmalı pota, (b) sabit potalı, ve (c) Devrilen potalı ocak

1.1.4.3. Elektrik ark ocakları

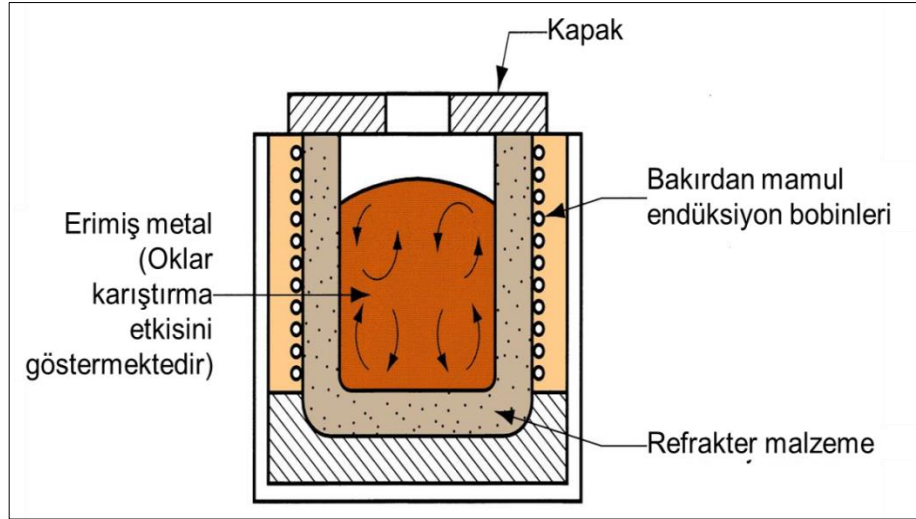
Yüksek enerji tüketimi olan bu ocak türünde elektrik arkının ürettiği ısı sayesinde metal eritilir. Yüksek sıcaklıklara ulaşabilen fırınlar genelde çelik döküm üretimi için kullanılır. Kullanımı kolay, ergitilen metalin temiz olması ayrıca yüksek eritme kapasitesine sahip olması tercih sebebidir. Şekil 1.3'te elektririk ark ocağı kesiti verilmiştir.



Şekil 1.3. Elektrik Ark Ocağı

1.1.4.4. Endüksiyon ocakları

Son teknoloji bu ocak türü metali alternatif akım enerjisi ile ergitmeyi amaçlar. İçerisinde manyetik alan oluşturmak için bakır bobinler bulunur. Şekil 1.4'te gösterilen Bu ocak türünde endüklenen akım metali hızlı bir erime sağlarken elektromanyetik alan ergimiş metalde karıştırma etkisi oluşturur. Üretilmek istenen metal herhangi bir yabancı maddeyle ergitilmediğinden saflığını korur ve yüksek kalitede metal üretimi sağlanır. Demir döküm, çelik döküm ve alüminyum alaşımlı dökümlerde sıkça kullanılan fırınlardır.



Şekil 1.4. Endüksiyon Ocağı Kesiti

1.1.5. Temizleme

Katılaşmadan sonra kalıplardan çıkartılan metaller üzerinde önce yatay ve dikey yollukların, varsa maça desteklerinin kesilmesi, yüzey çapaklarının taşlanması buradan kullanılmışsa maçaların çıkartılması işlemleri uygulanır. Ardından aşındırıcı içinde titreşim, tel fırçalama, kum veya metal bilye püskürtülerek temizleme işlemlerine tabi tutulur. Temizleme işlemleri özellikle kum kalıplama sistemlerinde oldukça önemlidir. Parçaların kumlanması işleminde makinelerden kum ve türevi toz atık çıkarken, taşlama işleminde ise daha çok metal toz atıklar çıkmaktadır. Temizleme işlemlerinin ardından parçalar gerek duyulması halinde ısıl işlem veya boyama uygulamaları yapılır (Gülmez, 2015; T.C Çevre ve Şehircilik Bak., 2012).

1.2. Dökümhane Cürufu Genel Özellikleri

Dökümhane cürufu, metal üretim tesislerinde ergitme sırasında meydana gelen istenmeyen bir yan üründür. Kimyasal içerik bakımından üretim tesisine ve üretilmek istenilen metale göre farklılıklar gösterebilir. Tüm bu farklılıklara rağmen dökümhane cürufları çimento ve silis kumu ile mineral içeriği bakımından benzer ve inert bir yapıya sahip olması, ayrıca fiziksel özellikleri açısından çeşitli sektörlerde kullanılabilir olması geri dönüşümde kullanılabilirliğinin araştırılmasını sağlıyor.

Dökümhane cürufları, eriyik metalin safsızlığını elde etmek için içerisine bazı flaksların atılmasıyla istenmeyen maddelerin oksidasyonu sonucu açığa çıkan oksit,

silikat ve kükürtlü bileşiklerden meydana gelen metalik olmayan bir yan üründür. Genellikle gri tonlarında boşluklu ve pürüzlü bir yüzeye sahiptir.

Çelikhane cüruflarının kimyasal içeriği üretilmek istenen metalin hammaddesine, hurda metallere, yükleme(şarj) yerine koyulan yanıcı maddelere bağlı olarak değişmektedir. Potada ergimiş metalle birlikte bulunan cüruf özgül ağırlık bakımından metalden düşük olması sebebiyle üstte toplanmakta ve cüruf deliğinden dışarı alınmaktadır. Dışarı alınan cürufun soğutulma hızı ve yöntemi kimyasal içerik bakımından fark oluşturmamakta fakat kristalleşme, geometrik yapı, yüzey pürüzlüğü, su emme oranı, ve kırılgenlik yönünden büyük farklılık oluşturmaktadır (Yonar, 2017).

Ergitme ile döküm yapan firmalardan Gebze’de faaliyetlerini sürdüren Ferro Döküm AŞ’de kalıplamadan gelen ve eriyik metalden gelen olmak üzere 2 ayrı atık malzemesi çıkmaktadır. Potada eriyik haldeki alaşım, kalıplara dökülmeden önce sıvı metalin üzerine perlit tozu serpilmektedir. Perlit tozu sıvı metal içerisinde ki istenmeyen malzemeler ile reaksiyona girerek istenmeyen malzemeleri sıvı metalin üstünde toplar. İşlem sonrası saf haldeki metal kalıplara dökülür. Potadan alınarak soğutma işlemine tabii tutulan ve perlit tozundan arındırılan malzeme geri dönüştürülebilir döküm cürufudur. Metalik olmayan bir malzeme olan döküm cürufu içeriği alaşımın içeriğine göre değişmekle beraber;

- Demir içerikli oksitler ve diğer bileşikler: FeO , Hersinit ($FeAl_2O_4$) ve magnezyoferrit.
- Alüminyum içeren çeşitli bileşikler: Mullit ($2Al_2O_3 SiO_2$), Safirin $((Mg,Al)_8(Al,Si)_6O_{20})$.
- Kalsiyumlu bileşikler.
- Kükürtlü bileşikler.
- Magnezyum içeren bileşikler: Periklaz (MgO), Spiel (MgO, Al_2O_3), Forsterit ($2MgO SiO_2$) .

İçermekte, temel olarak oksit, silikat ve kükürtlü bileşiklerden meydana gelmektedir.

İlk olarak kaba ve büyük taneli yapısıyla karşımıza çıkan cüruf önce kırıcılarla 40 mm’den daha küçük bir hale getiriliyor. Bilyeli değirmenlerde toz haline gelene

kadar öğütülmeye devam eden cüruf eleme işlemine tabi tutuluyor. Tüm bu fiziksel işlemlerin sonunda çimento ile aynı mikro partikül boyutlarına sahip cüruf elde edebiliyoruz (Sawant ve diğ., 2017).

Tablo 1.1’de Hindistan’da yapılan bir çalışmaya ait olan, döküm cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir (Devi ve diğ., 2016).

Tablo 1.1. Döküm cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellikleri	Sonuçlar	Kimyasal Özellikleri	%
Özgül Ağırlık	2,69	SiO ₂	41,92
Su emme oranı	0,45	Al ₂ O ₃	20,55
Su içeriği	1,30	Fe ₂ O ₃	18,92
İncelik Modülü	3,65	CaO	7,01
		MnO	6,61
		TiO ₂	1,49

Dökümhane cürufu fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından ayrı ayrı incelendiğinde, cürufun parke, oluk, bordür, çimento, beton katkı maddesi, hazır beton ürünleri, raspa kumu, asfalt agregası, asfalt dolgu malzemesi, beyaz eşya ve asansör denge ağırlığı, alt ve üst temel dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği düşünülmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015).

1.3. Dökümhane Cürufunun Elde Edilmesi

Cüruf, metal üretim sektöründe döküm aşamalarından ergitme aşamasında ortaya çıkan oksitlenmiş inert bir yan üründür. Demir döküm (Gri, Sferyo), çelik döküm ve demir dışı döküm olarak 3 farklı grupta incelediğimiz metal ürünlerinin üretimlerinden farklı içeriklere sahip cüruflar elde edilebilir (muhendisalemi.com, 2019).

Ocak türüne ve üretilmek istenen malzemeye bağlı olarak değişen fakat ortalama olarak her bir ton döküm metali oluşumu sırasında 600 ila 800 kg arasında atık malzeme oluşur. Bu atık malzemelerin 400 ila 600 kg atık kum, 10 ila 80 kg Dökümhane cürufu(ocak cürufu, kupol ocağı cürufu) oluşturur. Cüruf miktarı endüksiyon ocaklarında 10 ila 20 kg arasında oluşur.

Şekil 1.5'te Dökümhane süreçlerinde oluşan atıkların hangi üretim sırasında oluştukları gösterilmiştir (T.C Çevre ve Şehircilik Bak., 2012).

MODEL/MAÇA SANDIK YAPIMI	Tehlikeli ve tehlikesiz ambalaj atıkları Kağıt, naylon, plastik ve tahta atık Metal-alüminyum talaş atığı Kişisel koruyucu donanım atığı Evsel atık
	Tehlikeli ve tehlikesiz ambalaj atıkları Kağıt, naylon, plastik ve tahta atık Reçineli maça kum atığı Maça firesi atığı Fitre toz atığı Dış emisyon Kontamine olmuş atıklar-15 02 02 Kişisel koruyucu donanım atığı-15 02 02 Evsel atık
KALIPLAMA	Tehlikeli ve tehlikesiz ambalaj atıkları Kağıt, naylon, plastik ve tahta atık Atık kalıp kumu Maça kumu Fitre toz atığı Dış emisyon Kişisel koruyucu donanım atığı Evsel atık Kontamine olmuş atıklar
	Tehlikesiz ambalaj atıklar Kağıt, naylon, plastik ve tahta atık Kalıp kumu atığı Cüruf atığı Fitre toz atığı Dış emisyon Kişisel koruyucu donanım atığı Evsel atık
TEMİZLEME	Tehlikeli ve tehlikesiz ambalaj atıkları Flex taş atığı Kağıt, naylon, plastik ve tahta atık Kalıp kumu atığı Atık boya Fitre toz atığı

Şekil 1.5. Dökümhane süreçlerinde oluşabilecek atıklar

Ayrıca demir dökümhanelerde oluşan atıkların oluşma yeri, atık türü, atık kodu, ve miktarları Tablo 1.2'de verilmiştir (T.C Çevre ve Şehircilik Bak., 2012).

Tablo 1.2. Demirdöküm esnasında meydana gelen atıklar

Atık oluşumu	Atık türü	Atık kodu	Miktar
Ergitme	Ocak cürufu	100903	Ocak türü ve malzemeye bağlı
Ergitme	Ocak iç kaplamaları	161103*, 161104	Ocak türüne bağlı
Kalıp üretimi	Tehlikeli atık içerikli demir ambalajlar	150110*	Ender, genelde geri dönüşüm veya tekrar eritip geri kazanma
	Tehlikeli atık içermeyen demir ambalajlar	150104	
Kalıp üretimi	Bağlayıcı madde atıkları	100913*, 100914	Az miktarda
Kalıp üretimi (Coldbox)	Aminsülfat	060101*	Az, % 0.1
Kalıp üretimi ve döküm	Kalıp kumu	100907*, 100905* 100906 , 100908	% 0-5
Kalıp üretimi ve döküm	Kum kalıbı kumu	100908 , 100905* 100906 , 100907*	% 20-50
Kum geri kazanımı (Kuru toz emici)	Kum geri kazanımı tozları	100909* 100910	% 1-30 geri kazanıma göre değişir
Kum geri kazanımı (Yaş toz emici)	Kum geri kazanımı çamurları	100999	Ender, Olursa 1-20%
Temizleme (kumlama taşlama)	Kumlama kumları	100912 100999	% 0.1 - 1
Ek işlem (döküm temizlemesi, toz temizleme)	Demir içerikli tozlar	100909* 100910	Çok az ortalama % 0.1
Ek işlem (kalite kontrolü)	Çatlak kontrol işlemi sonucu atık olarak çıkan penetrant toz ve sıvılar	100915* 100916	Eser miktarda

Not: * Tehlikeli Atık

Günümüzde demir-çelik dökümden sonra en çok üretimi yapılan metal alüminyumdur. 2010 yılında 56 milyon ton alüminyum üretilmiş, 2020 yılında ise bu

rakamın 97 milyon ton olacağı tahmin edilmektedir. İngiltere’de 2002 yılında yapılan bir araştırmaya göre 200 bin ton kara ve beyaz cüruf atık olarak meydana gelmiştir. Günümüzde kesin olmamakla beraber 4 milyon ton beyaz cüruf, 1 milyon ton da kara cüruf açığa çıktığı düşünülmektedir (Sözbir ve diğ., 2018).

Metal dışı üretim yapan tesislerde birincil ergitme sırasında beyaz cüruf ikincil ergitme sırasında açığa kara cüruf meydana gelmektedir. Her iki cüruf türü de tehlikeli madde sınıfına girmektedir. Alüminyum içeriği yüksek olan beyaz cüruf tekrar ergitme işlemine tabi tutularak cüruf değil de yarı ürün olarak değerlendirilmektedir. İkincil ergitmeden gelen ve rafine edilmeden çevreye çok büyük zararları olan kara cüruf, çeşitli mekanik ve hidro metalurjik işlemlerden geçirilerek içeriği Al_2O_3 bakımından zengin ayrıca işleme sırasında cürufa dahil olan kireçtaşından gelen CaO bileşenini bulunduran tehlikesiz yeni yapısı ile çimento sektöründe katkı maddesi olarak kullanılabilir (Yücel ve Car, 2015).

Türkiye genelinde çelik üretim tesisler Marmara, Ege, Karadeniz ve Akdeniz olarak 4 bölgede faaliyet göstermektedir. 2014 yılı verilerine göre 34 milyon ton ham çelik üretimi gerçekleştiren Türkiye bu alanda Avrupa’da 2. Dünyada ise 8. sırada yer almaktadır.

Çelikhane cürufu, döküm ocaklarında metal eriyiğinin rafinasyonu ve oksitlenmesi sırasında, yoğunluğunun çelikten daha az olması sebebiyle eriyiğin üzerinde toplanması ve pota ocağında yapılan ikincil metalurji işlemlerinin sonucunda oluşur.

Her bir ton ham çelik başına yaklaşık 150-200kg Çelikhane cürufu oluşur. 2014 yılı verilerine göre 5,4 milyon ton cüruf açığa çıkmıştır.

Tablo 1.3’te ise 2014 yılı dökümhane cürufunun illere göre açığa çıkan ve kullanılabilir duruma getirilen çelikhane cürufunun çalışması gösterilmiştir.

Tablo 1.3. 2014 Yılı Çelikhane Cürufu ile Atık ve Geri Kazanım Miktarları (ton)

	Çelikhane Cürufu	Atık/Bertaraf	Geri Kazanım
Kocaeli	874.327	494.117	380.210
Bursa	35.500	7.500	28.000
Tekirdağ	132.000	47.000	85.000
Çanakkale	459.343	50.529	408.814
Bilecik	8.400	4.000	4.400
İzmir	490.580	182.907	307.673
Zonguldak	449.848	261.327	188.521
Karabük	266.760	0	243.540
Samsun	150.206	150.206	0
Osmaniye	619.819	608.745	11.074
Hatay	1.131.695	901.155	230.540

Açığa çıkan cürufun bir kısmı geri kazanımla fırınlarda kullanılabilmekte fakat tamamı geri kullanıma kazandırılmamaktadır. Atık olarak kalan cüruf kendisine özellikle inşaat sektöründe büyük kullanım alanları bulmaktadır. Asfalt yapımında agrega, alt ve üst yol tabakalarında agrega, demir yolunda balast malzemesi, yol dolgu malzemesi, deniz ve liman işlerinde dolgu malzemesi, beton üretiminde agrega malzemesi, çimento üretiminde ham madde, girit(kum raspa) üretiminde hammadde, pH dengeleyici madde, reflakter malzeme, toprak düzenleyici, pH ilavesi ile tarımda düzenleyici, gübre üretiminde yan madde ve atık su temizleyici olarak kullanımı mümkündür (T.C. Çevre ve Şehircilik Bak., 2015).

1.4. Mineral Katkılar

Betonun özelliklerini iyileştirmek ya da karışıma ek özellikler kazandırmak için kullandığımız, çimento boyutlarında öğütülen, kendi başlarına bağlayıcılık özelliği bulunmayan fakat beton içerisinde çimento ile kullanımlarında çimento gibi davranış sergileyen cüruf, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, volkanik kül gibi çeşitli malzemelere “Mineral Katkı” denir(Hamalı, 2007).

Volkanik tüfler, volkanik küller, volkanik camlar, pişirilmiş kil, volkanik topraklar doğal puzolanlar olarak, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu yapay puzolanlar olarak adlandırılmaktadır. Doğal puzolanlar önceleri söndürülmüş kireç ve su ile karıştırılarak suya dayanıklı bir tür harç yapımında kullanılmıştır. Günümüzde ise portland çimentosunun bulunmasıyla doğal ve yapay puzolanlar,

beton üretiminde karışıma mineral katkı malzemesi olarak dahil olmaktadır(Bilim, 2006).

Beton üretiminde kullanılan mineral katkı maddeleri ince öğütülmüş yapısıyla beton içerisinde etkili dolgu malzemesi olarak, puzolanik aktivite göstererek betonun birçok özelliğini olumlu yönde değiştirirler. Beton üretiminde çimento yerine ağırlıkça %50'ye kadar kullanılabilen mineral katkı maddelerinin beton üretim endüstrisinde çok büyük bir öneme haiz olduğu bilinmektedir.

Puzolan ve çimento karışımı su ile reaksiyona girdiğinde bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı puzolanik aktivite sonucu azalmaktadır. Belirli süre sonunda puzolan katkılı çimento hamuru, katkısız portland çimento hamuruna kıyasla daha az miktarda serbest kireç ve daha fazla miktarda bağlayıcı ürün olan kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ihtiva etmektedir. Daha çok kalsiyum silika hidrat (C-S-H) içeren mineral katkılı betonlardan katkısız betonlara kıyasla daha yüksek dayanımlı ve daha az boşluklu yapısı sayesinde korozyona daha dayanıklı beton elde edilmektedir.

Kalsiyum silika hidrat oluşumu puzolandan gelen silis ve kalsiyum hidroksit (söndürülmüş kireç)'in $CH+S+H \rightarrow C-S-H$ (kalsiyum silika hidrat) olarak gösterilebilir. Kimyasal olarak reaksiyon $C=CaO$, $S=SiO_2$, $H=H_2O$ ve $CH=Ca(OH)_2$ 'dur. Ayrıca bu reaksiyonun yavaş bir reaksiyon olduğu bilinmektedir. Betona katılmış olan puzolanın kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girme derecesi de puzolanik aktivite olarak tanımlanmıştır.

Beton endüstrisinde ve çimento endüstrisinde kullanılan mineral katkıları elde edilme bakımından doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olarak ayrırabiliriz(Bilim, 2006; Erdoğan ve diğ., 2007).

1.4.1. Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar yer yüzünde doğal olarak bulunan volkanik tüf, cam, kayaç, kül tras ve toprak gibi malzemelerin genel adıdır. Çoğunlukla puzolanik özelliğe sahip malzemeler olmakla beraber kimyasal ve mineral içerikleri oluşum şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedirler. Bu mineraller baskın silika içermektedir, bunun yanında alümina ve ferrik oksit bileşenlerine de sahiptirler.

Çimento ve beton üretiminde maliyeti düşüren, enerji ve çevre korunumunda önemli, hidrasyon ısısını azaltıcı, ASR etkisini azaltıcı, permeabiliteyi artırıcı etkilere sahip olması nedeniyle doğal puzolanlar etkin olarak kullanılmaktadır (Hamalı, 2007; Erdoğan ve diğ., 2007).

1.4.2. Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar endüstriyel üretim esnasında atık malzeme olarak açığa çıkan genel olarak puzolanik etkilere sahip malzemelerdir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı beton ve çimento üretiminde en yaygın olarak kullanılan yapay puzolanlardır.

Uçucu kül, pulverize kömürün termik santrallerde elektrik enerjisi üretimi için yakıt olarak kullanılması sonucu atık ürün olarak açığa çıkan, 1 µm - 150 µm boyutlarında CaO, Fe₂O₃, MgO ve yüksek oranda SiO₂ içeren, puzolanik aktiviteye sahip yapay puzolanıdır. Uçucu küller her tür beton üretiminde kullanılmakla beraber özellikle hidrasyon ısısını düşürmesinden dolayı kütle beton üretimlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüksek fırın cürufu, doğada demir oksit, silika, alümina ve kükürt gibi bazı maddelerle birlikte bulunan demir cevherinden, demir edebilmek için yüksek fırınlarda yakıt ile birlikte yakılarak ergitilmiş metal, istenmeyen maddeler (cüruf) potada birlikte toplanıyor. Metalden daha hafif olan ve sıvı haldeki metalin üstünde toplanarak cüruf alma deliğinden dışarı alınan atık malzeme cüruf, yüksek miktarda silika, alümina ve kalsiyum oksit içermektedir. Yüksek fırından sıvı halde dışarı alınan cüruf hava ile yavaş bir soğumaya bırakılırsa kristal yapılı, su ile ani soğutma yapılırsa granüle, amorf yapılı olmaktadır.

Puzolanik özelliğe sahip yüksek fırın cürufu ne kadar ince öğütülürse puzolanik özelliği de paralel şekilde artış göstermektedir. Beton dayanımına olumlu etkisi, beton üretiminde ki ekonomik etkisi, işlenebilirliği arttırması yönündeki etkileri nedeniyle yüksek fırın cürufu beton ve çimento endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Silis dumanı, silikon metali ve silikon metali içeren alaşımlar elde etmek için yüksek saflıktaki kuvarsitin elektirik ark fırınlarında indirgenmesi sonucu oluşur. Bu işlem esnasında açığa çıkan SiO gazlarının fırının soğuk kısmında hızlı şekilde yoğunlaşarak amorf yapılı SiO₂ 'e dönüşmesi sonucu elde edilir. %85 ila %98 oranında slika içeren 0.1 µm - 0.2 µm boyutunda taneciklere sahip silis dumanı silika tozu, silika fûme gibi isimlerle de bilinmektedir.

Çimentodan çok daha ince (yaklaşık 1/100) tanecikli yapıda ve çok yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğundan çimento ve beton üretiminde çok etkili, olumlu sonuçlar veren yapay puzolandır.

Beton üretiminde çimento yerine ikame edilmesi durumunda yüksek puzolanik aktivite, çimento agrega ara yüzeyinin artması ve boşluk kısmının azalması sonucunda erken ve ileri ki zamanlarda referans numunesinden daha yüksek mukavemetler verdiği gözlenmiştir. Hidratasyon ısınını azaltması, daha düşük difüzyon katsayısı, daha düşük su geçirimlilik oranı, sülfata karşı yüksek dayanım, korozyona karşı yüksek dayanım, enerji ve çevre korunumunda etkili olması gibi sebeplerden yaygın ve çok etkili kullanıma sahiptir.

Silis dumanı çok yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğundan yüksek dayanımlı beton üretiminde de kullanılmıştır. Ayrıca silis dumanı katkılı beton numunelerinde su ihtiyacının fazla olduğu süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanımının daha iyi sonuçlar vereceği tavsiye edilmiştir(Hamalı, 2007; Erdoğan ve diğ., 2007).

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yuvaraj, Palanivel, Vigneswar, Bhoopathy ve Gnanasekaran (2015), Yaptıkları çalışmada maliyeti kumdan daha az olan taş ocağı tozu ve döküm ocaklarından atık malzeme olarak ortaya çıkan dökümhane cürufunu kullanarak beton üretmek istemişler, üretilen betonun dayanımı ve kullanılan metal için sızıntı analizi yapmışlardır. Çalışmada Hindistan standartlarına göre üretilmiş taze ve kuru çimento, içme suyu, 4,75mm'den küçük yıkanmış temizlenmiş kum, 10mm ila 20mm arasında yıkanmış kullanılabilir agregası ve Hindistan tavsiye rehberi IS:456-2000'e göre hazırlanan dizayn oranlarında çimento, ince agregası (kum) ve kaba agregası (çakıl) (1: 1,5: 3 ve s/ç 0,65) kullanarak C20 sınıfı beton üreterek sonrasında Tablo 2.1'de verilen oranlarda kum yerine taş tozu, çakıl yerine döküm cürufu kullanarak yeni beton numuneleri elde etmişlerdir.

Tablo 2.1. Küpler (150x150x150mm) için karışım oranları

No	ÇİMENTO	İNCE AGREGA		İRİ AGREGA	
		KUM	TAŞ TOZU	ÇAKIL	CÜRUF
Kontrol	1,0	1,5	0,0	3,0	0,0
Numune-1	1,0	0,0	1,5	2,5	0,5
Numune-2	1,0	0,0	1,5	2,0	1,0
Numune-3	1,0	0,0	1,5	1,5	1,5
Numune-4	1,0	0,0	1,5	1,0	2,0
Numune-5	1,0	0,0	1,5	0,5	1,5
Numune-6	1,0	0,0	1,5	0,0	3,0

Beton numuneleri içerisinde içme suyu olan kür havuzlarında 28 gün bekletilerek basınç dayanımlarına bakılmış ve havuzdaki sulara sızıntıya karşı test yapılmıştır. 28 gün sonunda basınç ve sızıntı sonuçları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. 28 gün sonunda ort. Basınç değerleri (N/mm²)

Küpler	28 gün sonunda ort. Basınç değerleri (N/mm ²)	Karakteristik özellik	pH
Kontrol	25,18	Kontrol	9,40
Numune-1	22,88	Numune-1	9,47
Numune-2	21,55	Numune-2	9,65
Numune-3	20,44	Numune-3	9,52
Numune-4	18,66	Numune-4	9,59
Numune-5	17,22	Numune-5	9,85
Numune-6	17,11	Numune-6	9,60

Çalışma sonucunda sızıntı miktarı sınırlar içinde bulunmuş ve basınç değerleri olarak 20 N/mm² ye yakın değerler yakalanmıştır. Bulunan sonuçlar tatmin edici olup betonda taş ocağı tozu ve dökümhane cürufu kullanılmasında herhangi bir sıkıntı olmadığı açıklanmıştır.

Devi, Shahrukh, Meena, Joshi ve Sharma (2016), dökümhane cürufunu geri dönüşüme kazandırmak için çalışma yapmışlardır. Hindistan standartlarına göre; içilebilir su, çimento, ince agregası ve kaba agregası (1: 1,5: 3 ve s/ç 0,43) kullanarak c20 sınıfı referans beton numunesi üretmişler, daha sonra referans numunede kullanılan kum ve çimentonun yerlerine aynı boyutlarda olacak şekilde dökümhane cürufuyla sırasıyla ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında değiştirmişlerdir. Çalışma sonucunda kumun yerine ikame edilen cürufta 7 ve 28 günlük basınç dayanım testi sonuçlarına göre ikame oranı arttıkça basınç mukavemetinde bir artış olduğu gözlenmiş ve en yüksek sonuç %30 cüruf ikame edildiğinde 7 günlük sonuçlarda %14, 28 günlük sonuçlarda ise %12.5'lik bir artış görülmüştür. Çimentonun yerine ikame edilen çalışmada kum yerine ikame edilen çalışma ile paralellik göstermiş ikame oranı arttıkça dayanımda artış görülmüştür. 7 ve 28 günlük basınç dayanım testi sonuçlarına göre %20 oranında cüruf ikame edildiğinde 7 günlük sonuçlarda %14, 28 günlük sonuçlarda %12.5lik bir artış görülmüştür. Yarma ve eğilme sonuçlarında da benzer artışlar sağlanmıştır. Sonuç olarak döküm cürufu C20 betonu ile karşılaştırıldığında daha yüksek dereceli beton elde edilmiştir.

Balaraman ve Elangovan (2017), yaptıkları çalışmada c30 sınıfı beton üretmek için kaba ve ince agregası yerine %20, 30 ve 40 oranlarında (%10 ince, %10 kaba agregası ve katları) olmak üzere döküm cürufu kullanarak yeni bir beton üretmişlerdir.

Mekanik testlerin sonuçları istenileni vermemiş, agregâ oranı arttıkça beton numunelerinde dayanım kaybı gözlenmiştir.

Vishwash, Mistry, Patel ve Varia (2017), yaptıkları çalışmada betondaki agregânın kaynaklarının giderek azalmasından yola çıkarak agregâ yerine kullanılabilir olduğunu düşündükleri ve Hindistan’da bol miktarda atık olarak çıkan döküm(kubbe) cürufunu araştırmışlardır. Döküm cürufunu önce ince agregâ ve kaba agregâ boyutlarında kırıp eledikten sonra IS 383 ve IS 12269’a göre testlere tabi tutarak, c30 sınıfı beton üretmek istemişlerdir. Referans numunesinden sonra ince ve kaba agregâ yerine %10’dan %100’e kadar sırayla doğal agregâ yerine cüruf agregası kullanmışlardır. 28 günlük normal ve 85 °C suda kütleme sonuçlarına göre %50 ila %80 değerleri arasında istenilen değerlere yakın değerler elde etmişlerdir. Cürufun sertliği nedeniyle dayanım kaybına sebep olduğunu düşünen araştırmacılar %80 oranında agregâ değişim yaptıkları numuneye çimentonun ağırlıkça %0.2 oranında karışıma polipropilen lif koyarak tekrar deney yaptıklarında referans numunesine kıyasla %23 oranında daha fazla dayanım elde etmişlerdir. Sonuç olarak cüruf agregası ve propilen lif kullanımı ile doğal agregâdan daha yüksek sonuçlar alınmıştır.

Aderibigbe ve Ojobo (1982), döküm cürufunun kimyasal bileşenlerine bakarak puzolan yerine kullanımının uygun olabileceğini düşünülmüş ve yaptıkları fiziksel testlerde cürufun çok az puzolanik aktivite gösterdiğini görülmüştür. Cürufun 5 saat 700°C’de kalsine edilmesiyle fiziksel özelliklerinde gelişme sağlanmıştır. Harç içerisinde cürufun portland çimentosuyla yer değiştirilmesinin dayanımda kayda değer bir değişme göstermediği görülmüştür (%20 cüruf ikamesinde %13.5’luk dayanım kaybı). Sonuç olarak çimentonun pahalı olması cürufunda atık ürün olması nedeniyle cürufun çimento yerine ikamesinin kayda değer ekonomiklik sağlayacağını söylemişlerdir.

Sawant, Dhande, Sabde, Bhalsing, Yadav ve Ranjan (2017), geçirimli betonda kupol ocağından gelen döküm cürufunu kullanarak çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada cürufu ağırlıkça %15, %25, %35, %45 oranlarında çimento ile kısmi yer değiştirme yaparak ortaya çıkan yeni betonun basınç dayanımını ortaya koymuşlardır. Sonuçlara

göre %15 oranına kadar çimento yerine cüruf kullanılabilir, %25 'den sonra basınç dayanımının azalma eğiliminde olduğunu söylemişlerdir.

Stroup W.W., Stroup R.D. ve Fallin (2003), yaptıkları çalışmada çimento ile kimyasal özellikleri benzer olan döküm cürufunun portland çimentosu ile tekrar işlemlere tabi tutularak portland çimentosundan daha dayanıklı bir çimento üretiminden bahsetmişlerdir.

Baricová , Pribulová ve Demeter (2010), doğal agrega yerine önce %100 oranında kupol cürufunu (döküm cürufu) agrega yerine kullanmış ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları 3.2 MPa ve eğilme sonuçları 1 MPa olan numuneler elde etmişlerdir. Daha sonra 0-4 mm agregada %10, 20 ve 30 oranlarında kupol cürufu yerine yüksek fırın cürufu kullanmış ve yeni numuneler elde etmişlerdir. %10,20 ve 30 oranlarında ikame edildiğinde 28 günlük basınç sonuçları sırasıyla 10, 12, 13 MPa, eğilme sonuçları sırasıyla 3.3, 4.3, 3,8 MPa gelmiştir. Alınan sonuçlara göre her iki cürufunda yüksek gerilmeli yol betonlarına uygun olmadığı fakat yapı temellerinde veya yapı elemanlarında kullanılabilir olduklarını söylemişlerdir.

Bhagat, Pokar ve Rabadiya (Mart 2017), Betonda ince agrega yerine döküm kumunun, kaba agrega yerine döküm cürufunun kullanılabilirliği üzerine bir literatür araştırması yapmışlardır. Literatür araştırmasının sonucuna göre atık malzemenin betonda basınç dayanımına ve eğilme dayanımına büyük bir etkisinin olmadığı yarma çekme dayanımında ise biraz düşüş yaşandığı görülmüştür. Döküm cürufunun yüksek oranlarda kullanımında işlenebilirlik için daha çok suya ihtiyaç olduğu, döküm kumunun kullanıldığı çalışmalarda dayanımın ve işlenebilirliğin daha iyi olduğu gözlenmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında her iki atık malzemenin de betonda etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bhagat, Pokar ve Rabadiya (Nisan 2017), çalışmalarında kupol ocağından gelen döküm cürufu ile kaba agregayı, döküm kumu ile ince agregayı değiştirerek yaptıkları çalışmada slump, basınç, yarma, eğilme, asit ve sülfat saldırısı, deniz suyu etkisi deneylerini yapmışlardır. Her ne kadar tüm deney sonuçları karışım oranı arttıkça azalan sonuçlar verse de atık malzeme kullanımı açısından her iki atık maddenin de betonda kullanımının uygun olduğunu çalışma sonuçları ile sunmuşlardır.

Balaraman ve Ligorla (2015), döküm cürufunu ince ve kaba agrega olarak düşünmüş ve etkisini betonda görmek için c20 ve c25 sınıflarında beton numuneleri referans alarak %5, 10, 15, 20, 25, 50 ve 100 oranlarında kaba ve ince agrega yerine ikame ederek basınç ve yarma testleri yapmışlardır. Test sonuçlarına göre görülen en yüksek basınç dayanımı değerleri 33.778 N/mm² ve 38.222 N/mm² olduğu görülmüştür. İnce agrega olarak döküm cürufu 28 günlük sonuçlarda %25 oranına kadar istenilen değeri sağlamıştır. Kaba agrega olarak kullanımı c25 betonda istenilen değerleri sağlamamakla beraber en yüksek değer %5 değişimle 25.778 N/mm² olmuştur. Her iki agrega değişiminde de yarma testlerinde azalma görülmüştür.

Bharath ve Narendra (2016), döküm cürufunu kullanarak asfalt altı dolgu malzemesi olarak kullanmak için çelik üretim ocaklarından gelen cürufu kimyasal özellikleri bakımından incelemiş, özgül ağırlık testi, tane boyutu, nem absorbe etme oranı, sıkıştırma testi gibi önemli testler yapmışlardır. Sonuçlara göre %5 ila %25 oranında toprakla karıştırarak(yerel toprak) asfalt altı dolgu malzemesi olarak kullanımının uygun olduğunu açıklamışlardır.

Sharma D., Sharma S. Ve Goyal (2016), bu çalışmada döküm cürufu ile alkalin (allcofine) kullanarak yüksek dayanımlı beton çalışması yapmışlardır. İnce agrega yerine %10'dan % 50 oranına kadar değiştirme yapmışlar ayrıca karışımdaki alkalin miktarını arttırmak için karışıma %5 ila %20 oranlarında alkalin ekleyerek yüksek dayanımlı beton elde etmek istemişlerdir. Mekanik test sonuçlarının alkalin miktarı ve dayanım sonuçları olarak Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'te verilmiştir;

Tablo 2.3. 28 gün kürlenme sonunda ort. dayanım değerleri (MPa)

Alkalin(%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı(MPa)	Eğilme Dayanımı(MPa)
0	79,56	5,27	7,34
5	83,64	6,30	7, 82
10	85,39	6,73	8,96
15	102,32	7,27	10,33
20	92,39	7,02	10,16

Tablo 2.4. Basınç, Çekme ve Eğilme dayanımlarının günlere göre dayanım değerleri (MPa)

	NUMUNELER	KÜRLEME (GÜN)				
		7	14	28	56	90
Basınç Dayanımı (MPa)	Referans	71,22	84,44	102,32	105,13	107,11
	C10	72,56	87,22	102,88	106,21	107,34
	C20	73,33	90,11	103,67	106,75	107,87
	C30	75,55	94,22	103,82	107,33	108,24
	C40	77,66	96,56	105,12	107,62	109,72
	C45	78,20	97,30	105,72	108,31	110,86
	C50	73,33	93,33	102,20	104,80	106,66
Çekme Dayanımı (MPa)	Referans	5,73	6,69	7,27	8,27	8,28
	C10	5,73	6,71	7,30	8,28	8,29
	C20	5,78	6,79	7,33	8,30	8,30
	C30	5,80	6,85	7,37	8,31	8,33
	C40	5,83	7,00	7,38	8,33	8,34
	C45	5,89	7,16	7,39	8,34	8,35
	C50	5,77	6,87	7,26	8,26	8,28
Eğilme Dayanımı (MPa)	Referans	8,90	9,93	10,33	11,20	12,27
	C10	8,91	9,97	10,62	11,37	12,76
	C20	9,00	10,10	11,56	11,37	12,80
	C30	9,18	10,17	12,25	12,44	13,40
	C40	9,34	10,25	12,36	12,55	13,70
	C45	9,46	10,32	12,46	12,32	13,76
	C50	9,10	10,13	11,03	10,32	11,67

Alkalın miktarı %15 'de tutularak %5 ile %50 arasında ince agrega ile döküm cürufu değiştirildiğinde ise tüm agrega değişimlerinde referans numunesinden daha yüksek sonuçlar elde edildiğini göstermişlerdir.

Shashank ve Revathi (2017), çalışmalarında çelik cürufunun %5 ile %25 arasında doğal stabilizasyon malzemesi ile karıştırarak yeni oluşan malzemeyi fiziksel özelliklerine göre farklı jeoteknik yol katmanlarında kullanılabilirliğini incelemiş ve geliştirmişlerdir. Sonuç olarak toz çelik cürufu yolun bozuk olduğu yerlerde, oyuklarda iyi bir bağlanma malzemesi olarak kullanılabileceğini ve %20 ile %30

oranında agrega olarak karıştırarak dolgularda maliyetin düşürülebileceğini açıklamışlardır.

Nadeem ve Pofale (2012), Hindistan IS-10262-2009 standartlarına göre sırasıyla; 0.55, 0.45 ve 0.40 su/çimento oranlarında c20, c30, c40 referans betonu üretmişlerdir. Daha sonra endüstriyel çelik tesislerinden alınan çelik cürufunu karışımında önce %30, 50, 70 ve 100 oranlarında agrega, %30, 50, 70 ve 100 oranlarında kum yerine kullanmışlardır. Basınç dayanım testleri için 7, 28, 56, 91 ve 119 günlük, yarma testleri için 7 ve 28 günlük, eğilme testleri için 7 ve 28 günlük, numuneler hazırlayarak testlere tabi tutmuşlardır. Basınç, yarma ve eğilme dayanımı testlerinde agrega yerine ikame edilen numunelerde tüm değişim oranlarında %4 ila %10 arasında artış gözlenmiştir. Kum yerine ikame edilen cürufta ise % 50 oranına kadar %5 ila %7 oranında artış %100'e kadar ki kısımda ise %10 'a kadar düşüş gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre çelikhane cürufunun betonda kullanımı mümkün olmakla beraber betona daha yüksek dayanım sağlandığı görülmüştür.

Afolayan ve Alabi (2013), kupol ocağı fırınından gelen döküm cürufunu 75µm çapından daha küçük olacak şekilde öğütürerek, betonda çimento yerine sırasıyla %2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında kullanılmıştır. Slump değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. 28 günlük dayanım sonuçlarında % 2 ve % 4 oranlarında cüruf içeren beton numunesi, referans numunesinden %2 ve %0,27 oranlarında artış sağlamakla beraber %6, 8 ve 10 oranlarında cüruf içeren numuneler ise %0,13, %0,53 ve %0,73 oranlarında düşüş gözlemlenmiştir.

Yonar (2017), elektrik ark ocaklarından atık malzeme olarak ortaya çıkan çelikhane cürufunu karayolu üstyapı inşaatlarında agrega olarak kullanmayı planlamıştır. İlk olarak cürufun agrega olarak kullanılabilirliğinin anlaşılabilmesi doğal agrega ile kıyaslamaları yapılmıştır. Malzemelerin bileşenlerini anlayabilmek için X-ışını kırınım yöntemi kullanılmıştır. Deneyler sonucunda bulunana fiziksel ve kimyasal sonuçlar 2013 karayolları teknik şartnamesine göre kıyaslanmıştır. Kara Yolları Teknik Şartnamesi 2013'e göre aşınma tabakası, binder tabakası, bitümlü temel gibi asfalt üst yapı elemanlarını üreterek referans olarak ürettiği numunelerle kıyaslamıştır. Olumlu sonuç olarak geri dönüşüme katkı, düşük maliyet, yüksek içsel sürtünme açısı ve yüksek performans üzerinde dururken olumsuz etki olarak genleşme potansiyeli, rijit yapı gibi olumlu ve olumsuz durumların olduğu

gösterilmiştir. Sonuç olarak çelikhane cürufunun olumsuz yönlerine çeşitli çözümler üretilmekle beraber yapay agrega olarak kullanılabilecek malzemeler üzerinde çalışmalar yapılarak ulusal bir yönetmelik çıkarılması önerilmiştir.

Arum ve Mark (2014), Atık malzeme olan kupol ocağı cürufunu çimento yerine ikame etmek suretiyle beton üretmek istemişlerdir. Beton üretiminde İngiliz BS 12 standartlarında portland çimentosu, ince agrega olarak nehir kumu ve kaba agrega olarak 25mm'den büyük olmamak şartıyla kırılmış granit kullanılmıştır. Fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenen cürufun yoğunluğunun çimentoya göre yüksek kimyasal içeriğinin de ASTM C618 standartlarına uyduğu gözlenmiştir. Sırasıyla % 0, 5, 10, 15 oranlarında çimento ile yer değiştirilen cüruf standart çimento boyutu olan 45 µm boyutuna gelene kadar önce kırılmış, sonra elenme işlemlerine tabi tutulmuştur. 150 mm x 150mm x 150mm boyutlarında kalıplar kullanılarak hazırlanan numuneler 7, 21 ve 28 gün küremeye tabi tutulmuştur. Sonuçlar referans numunesiyle kıyaslandığında 7, 21 ve 28 günlerde cüruf arttıkça dayanımlarda artış olduğu gözlenmiştir. Tüm numuneler 28. Günde maksimum değerlerine ulaşmış, referans numunesine kıyasla %5, 10, 15 oranlarında sırasıyla %17.3, %20.4, %31.9 oranlarında artış meydana gelmiş ve en yüksek değer 28. Günde %15 oranında 29.8 N/mm² olarak gözlenmiştir.

Aguayo, Torres, Talamini ve Whaley (2017), agrega olarak reaktif olmayan kum, silisli kum ve döküm kumu katkı maddesi olarak silis dumanı kullanarak yüksek dayanımlı beton üretmişlerdir. Tüm kum çeşitlerinin, silis dumanının ve çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini karşılaştırmalı olarak tablolar halinde sunulmuştur. Çalışmada döküm kumu ve silis dumanı sabit kalarak, reaktif olmayan ve silisli kum agregaların orantılı değişmesiyle numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 7, 14 ve 28 gün küremeye tabi tutulmuştur. Sonuçlar reaktif silisli kumun daha yüksek sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Fiore ve Zanetti (2007), çeşitli şekil ve yöntemleri kullanarak dökümhane atıklarını yeniden kullanılabilirliklerine göre sınıflandırmışlardır. Bu çalışmanın odak noktası atık malzemenin içeriğinin ve partiküllerin boyutlarının bilinmesi benzer hammaddeler ile kıyaslanmasıdır. Kimyasal ve fiziksel özellikleri çok yüksek oranlarda SiO₂, içerdiği ayrıca CaO, Al₂O₃, ve Fe₂O₃ gibi mineralleri de içerdiği

gözlenmiştir. Özellikle silis içeriği ve partikül boyutu olarak betonda kullanımının uygun olduğu, preslenmiş çamurun ise yıkanıp kurutulduktan sonra kullanılabileceği açıklanmıştır.

Li, Yao ve Wang (2009), Çin çelik endüstrisinde büyük miktarlarda atık malzeme olarak açığa çıkan çelik cürufunu ve yüksek fırın cürufunu betonda çimento yerine kullanmışlardır. Tablo 2.5'te çelik cürufları ve yüksek fırın cürufu kimyasal bileşenleri gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Çelik cürufu, yüksek fırın cürufu kimyasal fiziksel özellikleri

	Kimyasal bileşenleri %						Fiziksel Özellikleri	
	Kütlece oran %						Özgül yüzey (cm ² /gr)	Özgül ağırlık (gr/cm ³)
	SO ₃	SiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	fCaO		
Çelik cürufu A	2,09	25,16	39,83	9,22	0,54	3,98	3750	3,03
Çelik cürufu B	0,43	14,74	40,33	9,78	1,12	8,98	4440	3,22
Çelik cürufu C	0,14	8,04	40,26	10,55	1,21	13,35	5690	3,3
Çelik cürufu D	0,47	18,28	39,69	9,37	1,26	1,98	3870	3,46
Y. Fırın cürufu	2,78	32,10	39,26	9,27	0,023	0,12	3820	2,94

Önce 4 farklı çeşit çelik cürufunu çimento yerine her bir cüruf çeşidi için ayrı ayrı %10, 20, 30 ve 40 oranlarında çimento yerine ikame ederek numuneler hazırlamışlar sonra %10'a %20, %15'a %25, %20'a %10, oranlarında olacak şekilde çelik cürufu ve yüksek fırın cürufunu birlikte kullanarak numuneler hazırlamışlardır. Basınç ve eğilme deneyleri için 100x100x100 mm boyutlarında prizma kalıplar kullanarak numuneler hazırlanmıştır. Alkali silika reaksiyonu için ASTM C 441 standart'ına göre deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çelik cürufu çelik-yüksek fırın cürufu karışımına göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Her iki koşulda da dayanım sonuçları kullanılabilir seviyede düşmektedir. Yüksek fırın cürufu ASR deneyinde en az genişlemeyi vermekle beraber cüruf katkılı betonlar katkısız betona kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Tüm sonuçlar ele alındığında çelik cürufu ve yüksek fırın cürufu dayanımda kullanılabilir, ASR etkisini azaltıcı yönde sonuçlar vermiştir.

Prabhu, Bang, Lee, Hyun ve Kim (2015), yaptıkları çalışmada ince agrega olarak kullandıkları nehir kumu yerine sırasıyla %10, 20, 30, 40 ve 50 oranlarında özgül ağırlığı 2,24 ve yoğunluğu 1576 kg/m³ olan döküm kumu ile değiştirerek yeniden hazırlanmıştır. 150 mm x 150mm x 150mm boyutlarında kalıplar kullanılarak hazırladıkları beton numuneleri 7, 28 ,90 180 gün kürlenmiştir. Numuneler slump, elastisite modülü, basınç, çekme ve eğilme dayanımı testlerine tabii tutularak sonuçları açıklanmıştır. Elastisite modülü sonuçlarının hemen hemen aynı olduğu gözlenen numunelerde dayanım ve slump sonuçları döküm kumu oranı arttıkça düşüş göstermiştir. Slump sonuçları için dizayn karışımında su oranının arttırılmasını ön gören araştırmacılar dayanım sonuçlarının kullanılabilir seviyelerde olduğu açıklamışlardır.

Özkan (2006), Çalışmasında yüksek fırın cürufu ve çelikhane cüruflarını farklı oranlarda değiştirerek yeni çimento elde etmeye çalışmıştır. Toplam klinker, alçı, yüksek fırın cürufu ve çelik cüruflarının ayrı ayrı ve birbirlerine olan oranlarını değiştirerek toplamda 22 farklı kombinasyon ortaya çıkmıştır. 22 ayrı çimentonun betonda ve harçlarda ki etkisini görebilmek için Türk Standardı TS-EN 196-1'e göre harç numuneleri üretilmiş 7,28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanım, sülfat dayanıklılık ve testleri uygulanmıştır. Dayanım sonuçlarında düşüş görülmekle beraber sonuçların tatmin edici, sülfat ve sıcaklığa dayanıklılık testlerinde ise daha iyi sonuçlar alındığı belirtilmiştir. Sonuçlara göre katkıların daha ince öğütülmesi halinde sonuçların daha iyi olacağı veya daha yüksek seviyelerde ikame oranları olacağı bu haliyle de yüksek fırın cürufları ve çelikhane cüruflarının çimento sanayinde kullanılabileceği açıklanmıştır.

Kanchana ve Varkey (2018), kupol cürufu ve çelik liflerle yapılan betonlar hakkında literatür araştırması yapmıştır. Cürufu kaba agrega yerine kullanmak suretiyle çelik lifler kullanarak beton numunesi hazırlamıştır. Çalışma ve araştırma sonuçlarına göre çelik liflerin betona eğilme ve çekme dayanımı verdiği cürufun da agregayla kısmı değişiminin mümkün olduğu açıklanmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Döküm cürufu

Bu çalışmada inceleme konusu olan malzeme, Kocaeli ili Gebze ilçesinde faaliyetlerini sürdüren Ferro Döküm San. Ve Dış Tic. A.Ş firmasından alınan döküm esnasında atık malzeme olarak açığa çıkan geridönüştürülmüş döküm cürufudur(GC). Geri dönüştürülmüş cürufun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Döküm cürufunun kimyasal, fiziksel özellikleri.

Kimyasal analiz	%	Fiziksel özellikler	
SiO ₂	59,96	Özgül yüzey, cm ² /g	3065
Al ₂ O ₃	11,14	Özgül ağırlık, gr/cm ³	2,93
Fe ₂ O ₃	15,73		
CaO	3,11		
MgO	2,95		
SO ₃	0,97		
Na ₂ O	1,95		
K ₂ O	1,75		
C I ⁻	0,02		
Cr ₂ O ₃	0,06		
Mn ₃ O ₄	-		
Çözünmeyen Kalıntı	-		
Kızdırma Kaybı	0,01		

Çimento yerine ikame edilmesi düşünülen döküm cürufu önce laboratuvar kırma makinesinde kırılarak boyutları küçültülmüş, sonrasında çimento boyutlarına gelene kadar elek ile elenmiştir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de döküm cürufu eleme aşamaları ve kullanılan döküm cürufu verilmiştir.

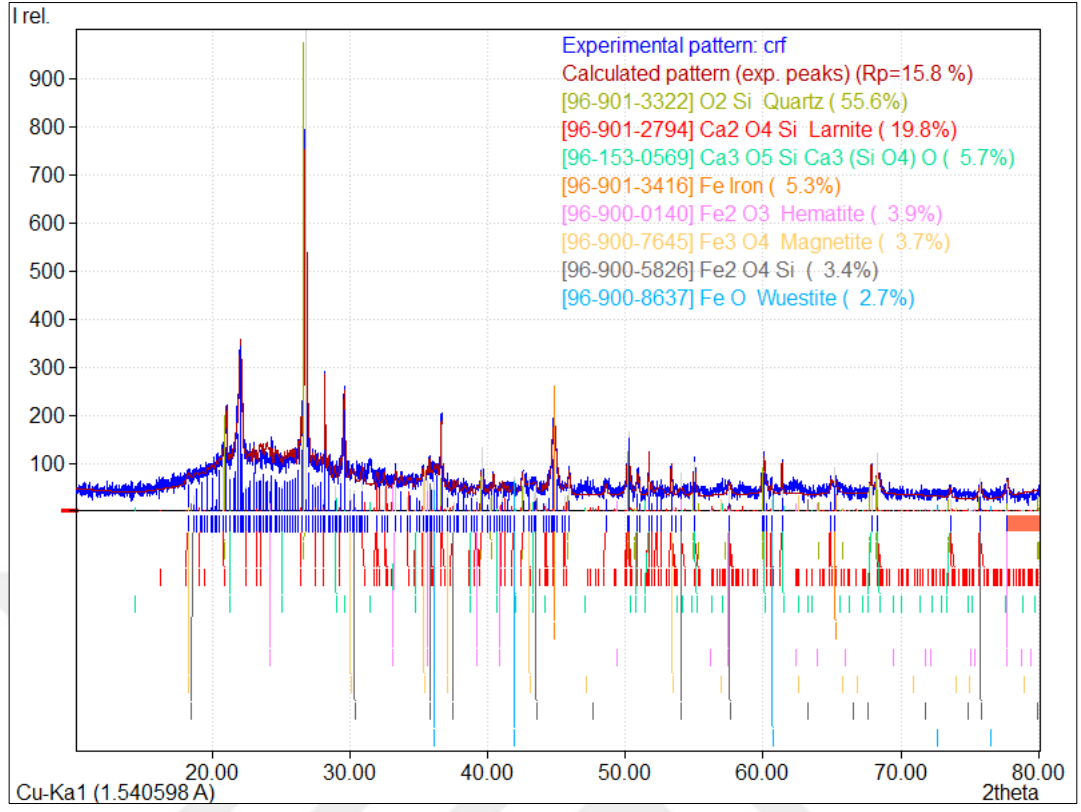


Şekil 3.1. Döküm cürufu eleme aşamaları

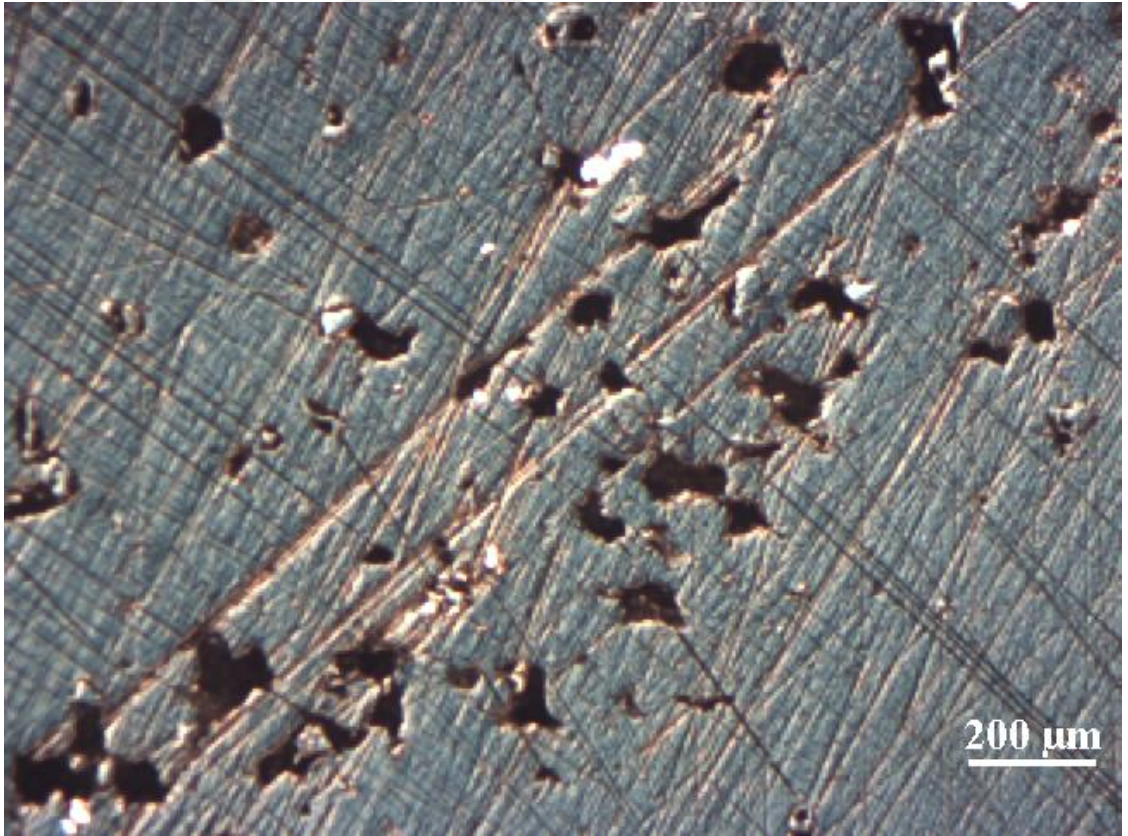


Şekil 3.2. Çimento yerine ikame edilen döküm cürufu

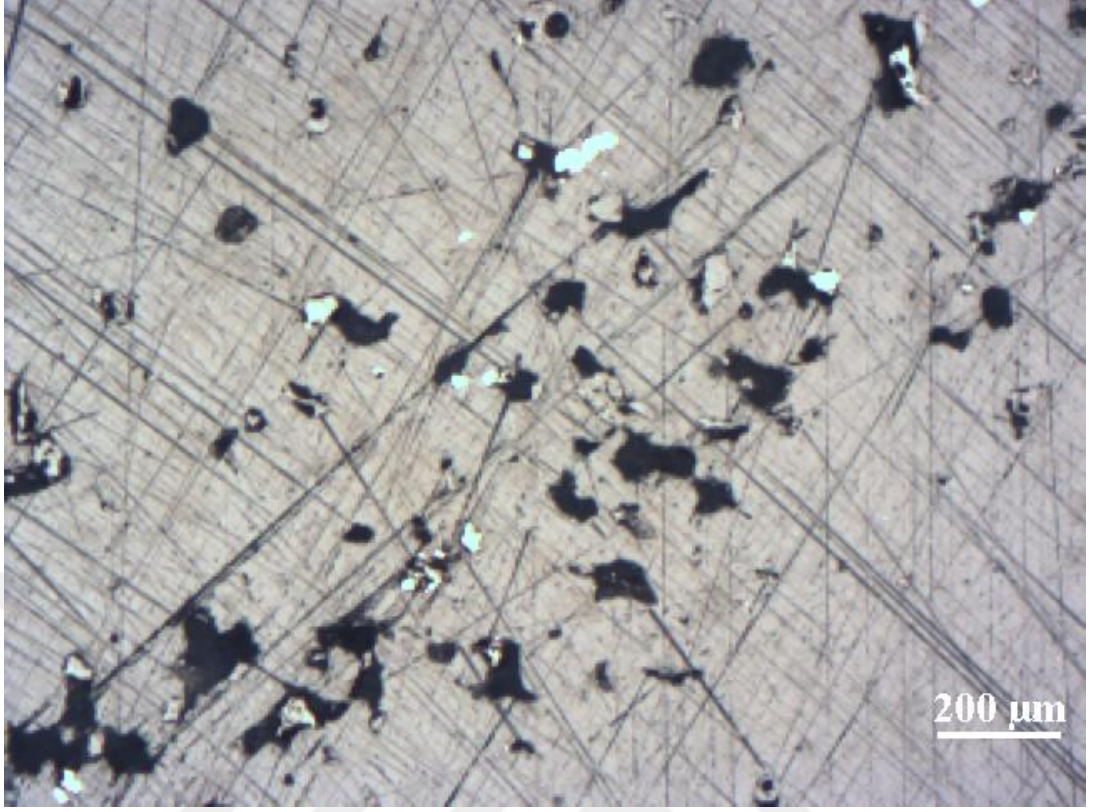
XRD (X-Işınları Difraktometresi) yöntemine göre içerik tahlil grafiği Şekil 3.3'te differential interference contrast(yükseklik farkı kontrast) ışık mikroskobu ile 600, 1000 ve 2000 no'lu sic zımpara kağıdıyla aşındırılmış numunelerin tanecik yapısının üstten görüntüleri ise Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'te verilmiştir.



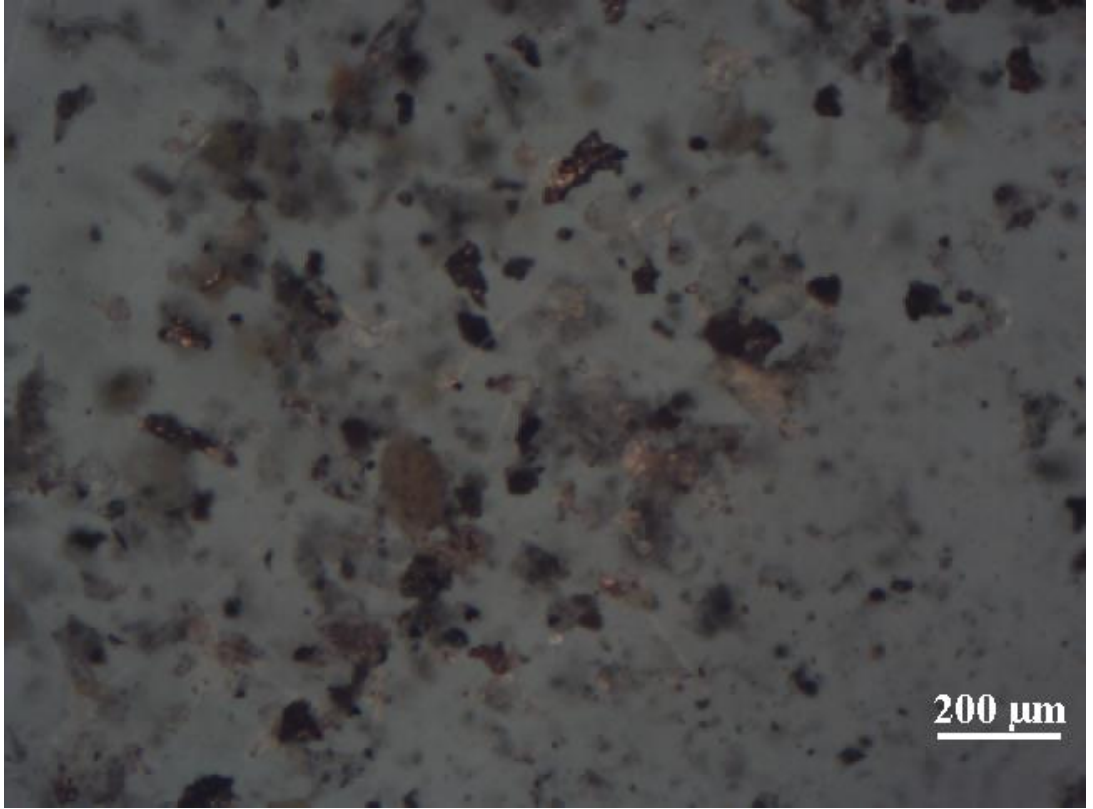
Şekil 3.3. XRD grafiği ile içerik tahlili



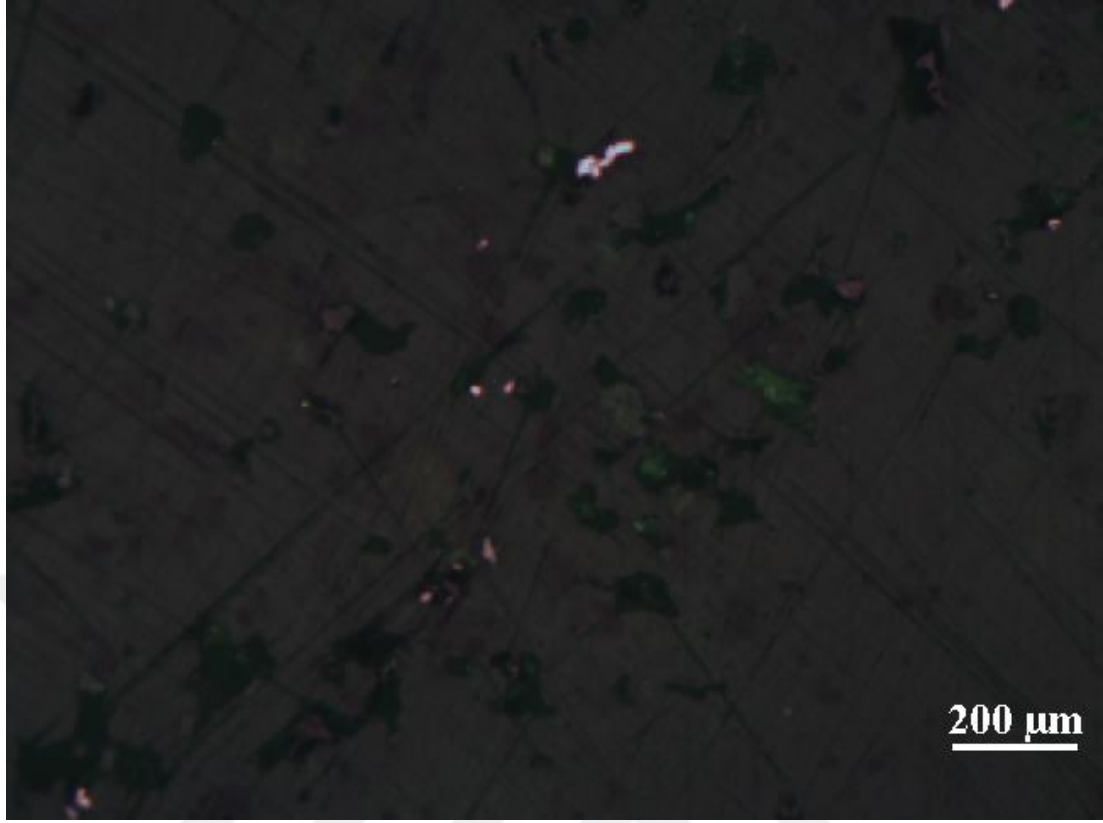
Şekil 3.4. Işık mikroskobu ile tanecik yapısının görüntülenmesi



Şekil 3.5. Işık mikroskobu ile aydınlık alan tanecik yapısının görüntülenmesi



Şekil 3.6. Işık mikroskobu ile karanlık alan tanecik yapısının görüntülenmesi



Şekil 3.7. Işık mikroskobu ile polarize ışık altında tanecik yapısının görüntülenmesi

3.1.2. Çimento

Bu çalışmada bağlayıcı madde olarak, Nuh Çimento San. A.Ş.'den alınmış olan CEM I 42.5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento malzemesinin kimyasal bileşik analizi fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.2'de, fotoğrafı ise Şekil 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

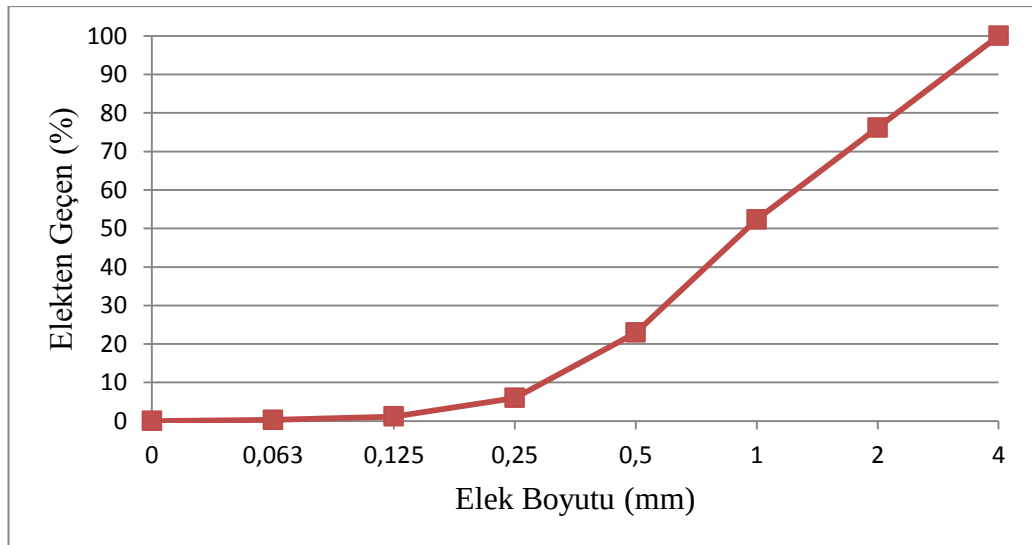
Kimyasal analiz	%	Fiziksel ve Mekanik özellikler	
CaO	62,7	Özgül yüzey, cm^2/g	3510
Al_2O_3	4,65	Özgül ağırlık, gr/cm^3	3,12
Fe_2O_3	3,40	Priz başlama peryodu, dakika	153
SiO_2	20,5	Priz bitiş peryodu, dakika	188
MgO	1,02	Basınç dayanımı	
SO_3	2,21	2 gün, MPa	30,2
TiO_2	-	7 gün, MPa	51,1
Na_2O	0,18	28 gün, MPa	62,2
K_2O	0,41		
Klor (Cl-)	0,01		
Çözünmez kalıntı	0,60		
Kızdırma kaybı	2,15		



Şekil 3.8. CEM I 42.5 R Portland Çimento

3.1.3. Doğal kum

Çalışmada Agrega olarak Başiskele Kocaeli 'de faaliyet gösteren Kavanlar Beton Santrali'nden alınan, 0-4 mm aralığında özgül ağırlığı 2.57 g/cm^3 olan doğal kum malzemesi kullanılmıştır. Agrega malzemesinin granülometri eğrisi de Şekil 3.9'da fotoğrafı ise Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Agrega Granülometri Eğrisi



Şekil 3.10. 0-4 mm aralığında agrega (kum)

3.1.4. Su

Deneylerde su olarak içilebilen Kocaeli ili şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Deney Numunelerin Üretimi

Çalışmada numuneler üzerinde kıvam, eğilme, basınç, kılcal su emme, kuru birim ağırlık, su emme, sıcaklığa dayanıklılık, rötre ve ASR deneyleri yapılmıştır. Deneyler için hazırlanan numuneler daha tazeyken yayılma tablası kullanılarak kıvam testi yapılmıştır. Hazırlanan harçlar eğilme, basınç, kılcal su emme, kuru birim ağırlık ve su emme deneyleri için 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında prizma kalıplarda, sıcaklığa dayanıklılık deneyleri için 50 mm x 50mm x 50mm boyutlarında küp kalıplarda, rötre ve ASR deneyleri için de 25mm x 25mm x 285mm boyutlarında prizma kalıplarda bir gün boyunca bekletilerek kalıptan alınmıştır. Numuneler hazırlanırken kullanılan kalıplar Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 'te verilmiştir.



Şekil 3.11. 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıp



Şekil 3.12. 25x25x285 mm boyutlarındaki kalıp



Şekil 3.13. 50x50x50 mm boyutlarındaki kalıp

Kalıplardan çıkartılan numuneler basınç ve eğilme deneyleri için 3, 7, 28 ve 90 gün süreyle, sıcaklığa dayanıklılık deneyleri için 90 gün, rötre deneyleri için 1, 4, 7, 28, 56, 90, 112 gün, ASR deneyleri için de 1, 3, 7, 21, 28 gün kürlenme havuzlarında bekletilmiştir. Günü dolan numunelere eğilme, basınç, kılcal su emme, kuru birim ağırlık, su emme, sıcaklığa dayanıklılık, rötre ve ASR deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışmada her bir deney için farklı sayılarda olan karışım dizaynları Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Karışım dizaynları.

HARÇ	Çimento(kg)	Kum(kg)	Su(kg)	GC(kg)
C	400	1598	240	0
GC5	380	1594	240	20
GC10	360	1590	240	40
GC15	340	1587	240	60
GC20	320	1584	240	80

Tabloda verilen ağırlıklara göre malzemeler hazırlanmış ve laboratuvar mikseri kullanılarak karıştırılmıştır. Karışımdan önce mikserin içi temizlenip kurulanmıştır. Karışıma önce kum daha sonra çimento ve Geri dönüştürülmüş döküm cürufu(GC) ilave edilerek karıştırılmıştır. Hazırlanan karışıma yavaş yavaş su ilave edilerek harç hazırlanmıştır. Hazırlanan harçtan bir numune alarak yayılma tablasına konulmuş, eğer yayılması 15cm'nin altında ise ek su ilave edilerek daha yüksek kıvamlı numune harçları elde edilmiştir. Elde edilen harçlar daha önceden temizlenerek kurutulan, sonrasında kalıp alımı kolay olması için yağlanan kalıplara mala ve spatula yardımıyla yavaş yavaş koyulmuştur. Kalıplar masa tipi laboratuvar vibratörü ile 4-6 sn arasında vibrasyon yapılarak spatula yardımıyla üstleri son şeklini alacak şekilde düzeltilmiştir. Üzerleri ince ıslak bir bez ile örtülen kalıplar 1 gün laboratuvar ortamında bekletilerek kalıptan çıkartılmış ve kür havuzuna koyulmuştur. Günü gelen numunelere deneyler yapılarak çalışma tamamlanmıştır.

3.3. Yöntem

3.3.1. Kıvam (Yayılma)

Hazırlanan taze harç numuneleri kalıplama işlemi öncesinde kıvam testi için yayılma tablasına koyulmuş, 15 sn de 25 vuruş yapılarak yayılma miktarı cetvel yardımıyla ölçülmüştür (ASTM C230). Şekil 3.14’te yayılma deneyi fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.14. Yayılma deneyi

3.3.2. Birim ağırlık ve su emme

Çalışmada 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında hazırlanan prizma numuneler kür havuzunda 28 gün bekledikten sonra havuzdan alınmış önce kuru bir bezle yüzeyindeki fazla su alınmış ve hassas terazide doygun kuru yüzey (DYK) tartılmıştır. Sonrasında 24 saat 110 ± 5 °C’de etüvde bekletildikten sonra etüvden alınmış ve kuru ağırlıkları için tekrar tartılmıştır(TS EN 772-13).

Bulunan sonuçların ortalaması alınarak aşağıdaki formüller uygulanmış ve numunelerin kuru birim ağırlık ve su emmeleri hesaplanmıştır (3.1, 3.2).

$$\Delta = \frac{W_k}{V} \quad (3.1)$$

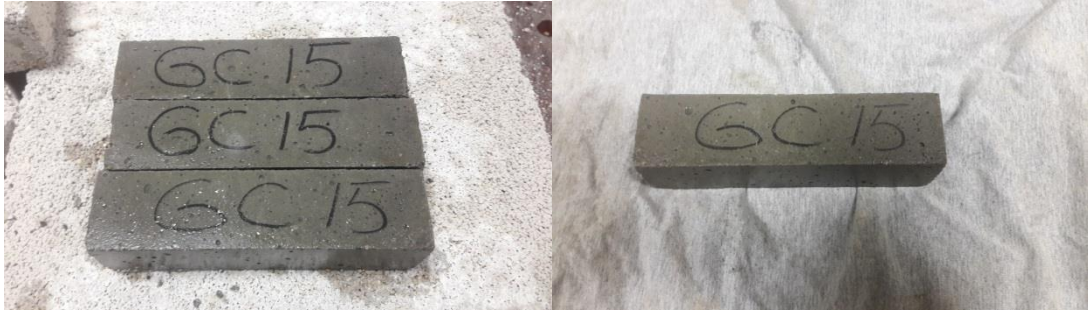
$$S_a = \frac{W_d - W_k}{W_k} \times 100 \quad (3.2)$$

3.3.3. Kılcallık

Kılcal su emme malzemenin bir yüzeyinin suya temasından dolayı malzemenin içerisindeki boşlukların kılcallık etkisiyle zaman içerisinde su emmesi olayıdır. Malzemelerden az boşluklu olanların daha az su emmesi ve daha fazla dayanım göstermesi beklenir. 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında prizma numuneler havuzda 28 gün bekledikten sonra havuzdan alınarak 40 mm x 40 mm x 80 mm olacak şekilde iki eşit parçaya sulu kesim makinesi ile kesilmiştir. Numuneler TS EN 1015-18 standartına uygun olarak etüvde 24 saat 100 ± 5 °C’de kurutulmuştur. Sonrasında kurutulan numuneler önce hassas terazide tartılmış ve kür havuzuna 40 mm lik kısım suya değecek şekilde bırakılmıştır. Sırasıyla 10 dk, 90 dk ve 1440 dk sonunda sudan çıkartılan numuneler, yüzeyleri kuru bir bezle silinip tartımları yapıldıktan sonra tekrar suya koyulmuştur.

3.3.4. Eğilme dayanımı

Eğilme: genellikle dikdörtgen veya daire kesitli bir numunenin bir yüzeyinin yükseklikleri eşit (terazide) iki desteğe arada boşluk kalmayacak şekilde oturtulup ortasından tek yönlü bir kuvvete maruz kalarak şekil değiştirmesidir. Eğilme dayanımı için hazırlanan numune fotoğrafları Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15. 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında prizma numune

Şekil 3.16’da görüldüğü gibi dizayna göre hazırlanan 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında prizma numuneler TS EN 1015-11 standardına uyularak mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde desteklere koyulmuştur.



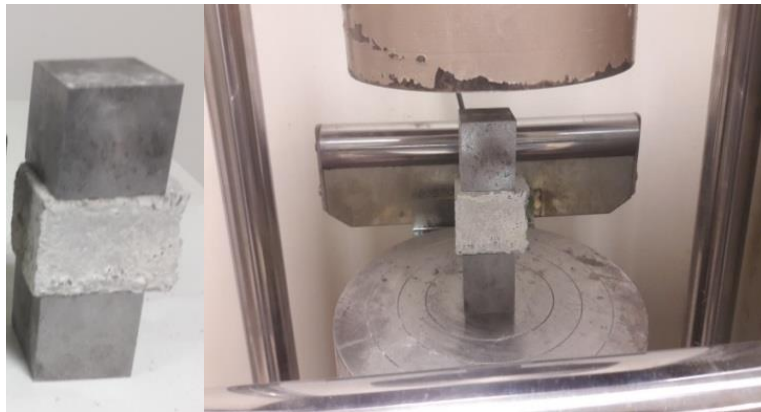
Şekil 3.16. Numunelerin basınç altında eğilme dayanımı testi

Daha sonra numunenin orta noktasına gelecek şekilde 0,02 Mpa/sn yükleme hızında kuvvet uygulanmıştır. Üç numune üzerinde elde edilen sonuçların ortalaması alınarak bulunan kırılma yükü aşağıdaki formülde yerine koyularak sonuçlar bulunmuştur(3.3).

$$\sigma_e = 1.5 \frac{P.l}{b.h^2} \quad (3.3)$$

3.3.5. Basınç dayanımı

Bilindiği üzere betonların ve harçların çekme dayanımları düşük basınç dayanımları yüksektir. Bu sebeple harçların dayanım bakımından en baskın olduğu özellik basınca karşı direnci olarak tanımlanabilir. Basıncın bu kadar önemli olduğu betonda kırılmaların yapılma şeklide çok önemlidir. Bu çalışmada günü gelerek eğilme testine tabi tutulan 40 mm x 40 mm x 160 mm boyutlarında prizma numuneler test sonucunda iki parçaya bölünmüş şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu numuneleri Şekil 3.17 'de görüldüğü gibi 40 mm x 40 mm x 40 mm boyutlarında küplerin arasına koyarak 0,1 Mpa/sn yükleme hızı ile kırmaktayız (TS EN 1015-11).



Şekil 3.17. Basınç dayanımı deney aleti

Her üç eğilme numunesinden gelen 6 basınç numunesi kırılarak gelen sonuçların ortalamaları alınmıştır.

3.3.6. Rötire

Çalışmada rötire deneyi için her yüzde de ayrı ayrı üç numune hazırlanması kararlaştırılmıştır. 25mm x 25mm x 285mm boyutlarında prizma kalıplar kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Harçların kalıplara dökümü esnasında kalıpların uç kısımlarına 25mm x 25 mm ölçülerinde 2mm kalınlığında plakalar ve bu plakaların tam ortasına gelecek şekilde pimler yerleştirilmiştir. İşlem sonrası 25mm x 25mm x 285mm boyutlarında yeni numuneler için rötire deneyi yapılmıştır. Ertesi gün kalıplardan alınan numuneler önce 10 dk suda bekletilmiştir. Sudan alınan numuneler kuru bir bezle kurulularak numunenin ilk boy ölçümü cetvel yardımıyla yapılmıştır. İlk boyu ölçülen numuneler pimlerin yardımıyla Şekil 3.18’de görülen ölçüm aletinde ilk gün ölçümleri yapılarak, numuneler oda sıcaklığında numune dolabında muhafaza edilmiştir. Daha sonrasında sırasıyla 4., 7., 28., 56., 90., 112 günlerde tekrar rötire ölçümleri yapılmış ve rötire ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak tabloya aktarılmıştır.



Şekil 3.18. Günlere göre rötire ölçümleri

Sonrasında bulunan sonuçlar aşağıdaki formülde yerine konarak yüzde değişim tablosu ve grafiği hazırlanmıştır(3.4a, 3.4b).

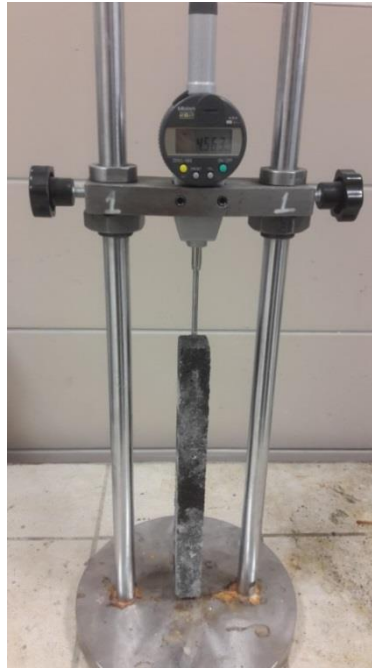
$$\Delta L = \Delta L_{\text{ilkgün}} - \Delta L_{\text{songün}} \quad (3.4a)$$

$$\%L = \frac{\Delta L}{\text{ilk boy}} \times 100 \quad (3.4b)$$

3.3.7. ASR

Alkali silika reaksiyonu (ASR) çimento içerisindeki alkaliler ile agregadan gelen aktif silisin tepkimeye girmesi sonucu su emme kapasitesine sahip genleşebilen jeller oluşmaktadır. Bu oluşan jeller zamanla betonun içerisinde genleşmekte betonu içerden çatlatmak suretiyle betona zarar vermektedir.

Çalışmada ASR deneyi için her yüzde de ayrı ayrı 3 numune hazırlanmıştır. Rötire çalışmasında olduğu gibi 25mm x 25mm x 285mm boyutlarında prizma kalıplar kullanılarak ve kalıpların uç kısımlarına 25mm x 25 mm ölçülerinde 2mm kalınlığında plakalar pimleriyle birlikte yerleştirilmiştir. Ertesi gün kalıplardan alınan numuneler önce 10 dk suda bekletilmiştir. Sudan alınan numuneler kuru bir bezle kurularak numunenin ilk boy ölçümü cetvel yardımıyla yapılmıştır.



Şekil 3.19. ASR ölçüm aleti

İlk boyu ölçülen numuneler pimlerin yardımıyla Şekil 3.19 ‘da gösterilen ölçüm aletinde ilk gün ölçümleri yapılarak, numuneler ASTM C1260 standartına göre 80 °C’ deki Sodyum hidroksit (NaOH) kür havuzuna bırakılmıştır. Şekil 3.20’de ASR kür havuzu gösterilmiştir.



Şekil 3.20. ASR kür havuzu

Sonrasında sırasıyla 3., 7., 21., 28. günlerde tekrar ölçümleri yapılmış ve ASR ölçüm sonuçlarının ortalaması alınarak tabloya aktarılmıştır. Sonrasında bulunan sonuçlar aşağıdaki formülde yerine konarak yüzde değişim tablosu ve grafiği hazırlanmıştır(3.4a, 3.4b).

$$\Delta L = \Delta L_{ilk\ g\un} - \Delta L_{son\ g\un} \quad (3.4a)$$

$$\%L = \frac{\Delta L}{ilk\ boy} \times 100 \quad (3.4b)$$

3.3.8. Sıcaklığa dayanıklılık

Bu deneyde numunelerin belirli sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımındaki değişimler ve ağırlık kaybındaki değişimler incelenmiştir. Yüksek sıcaklığa dayanıklılık dayanımı deneyleri için 50 mm x 50 mm x 50 mm boyutlarındaki kübik kalıplar kullanılmıştır. Her bir dizayn için toplamda 12 numune hazırlanmış ve hazırlanan numuneler 4 farklı gruba ayrılmıştır(referans, 400 °C, 500°C ve 600°C). Hazırlanan numuneler 90 gün süreyle kür havuzunda tutulmuştur. 90 günün sonunda numuneler sudan çıkartılarak yüzeyleri kuru bezle kurulanmış ve 24 saat boyunca 105±5 °C’lik etüve koyulmuştur. Etüvden alınan numuneler

tartılmıştır. Birinci grubun numuneleri etüvden çıkınca kırılmış ve referans değerleri bulunmuştur. Diğer grupların numuneleri ise 400 °C, 500°C ve 600°C’lerde fırına konularak 6 saat boyunca ısıya maruz bırakılmıştır. Her bir grup için ayrı ayrı fırınlama yapılmıştır. Fırından çıkan numunelerin önce tartımları peşine de kırılmaları yapılmıştır. Şekil 3.21’de numunelerin kür havuzu gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi

90 gün sonunda kürden alınan ve etüvlenen numunelerin hassas terazide tartım işlemi Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Numunelerin tartılması

50 mm x 50 mm x 50 mm boyutlarındaki kübik numuneler 24 saatlik 105 ± 5 , 400, 500 ve 600°C 'lerde sıcaklığa maruz bırakılan numuneler tartımları yapıldıktan sonra Şekil 3.23'de gösterildiği gibi basınç dayanım testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.23. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanım testi

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi inşaat mühendisliği bölümü yapı malzemeleri laboratuvarında yapılmıştır. Çalışma harç üzerine planlanmıştır. Öncelikle katkı maddesi olmadan referans numunesi üretilmiş sonrasında referans numunesiyle kıyaslanmak üzere %20 oranına kadar çimento ile yer değiştirilerek diğer numuneler üretilmiştir.

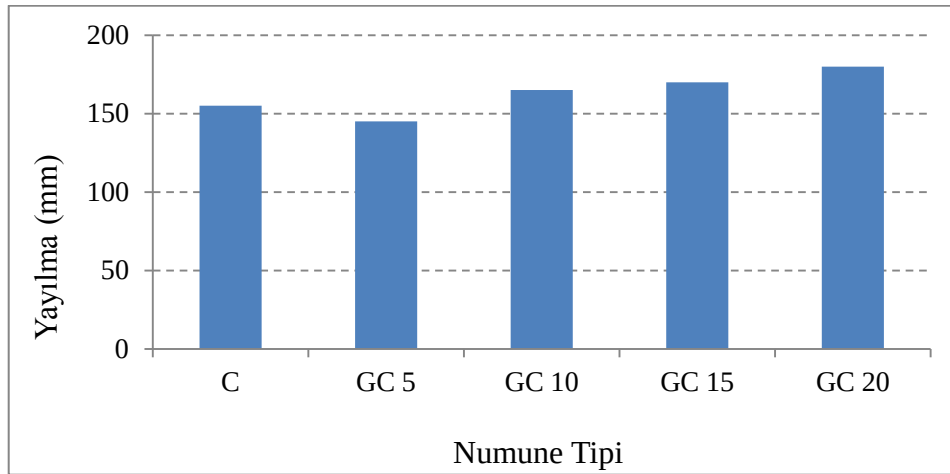
Hazırlanan harç numuneleri üzerinde kıvam, kuru birim ağırlık ve su emme, kılcal su emme, eğilme, basınç, rötre , ASR ve sıcaklığa dayanıklılık, deneyleri yapılmıştır.

4.1. Kıvam (Yayılma)

Cetvel yardımıyla ölçülen değerler Tablo 4.1’de, grafik haliyle Şekil 4.1’ de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kıvam sonuçları(mm)

Kıvam (mm)	
C	155
GC 5	145
GC 10	165
GC 15	170
GC 20	180



Şekil 4.1. Geridönüştürülmüş döküm cürufu katkılı harçlarda yayılma miktarları

Tablo 4.1 ve Şekil 4.1 'de gördüğümüz gibi geri dönüştürülmüş cüruf kontrol numunesine kıyasla GC5 yaklaşık %6 oranında azalma gösterirken GC10, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık %6, 10 ve 16 oranlarında artış göstermiştir. Bu sonuçlara göre cüruf miktarı arttıkça karışımın su ihtiyacının azaldığını, işlenebilirliğin arttığını söyleyebiliriz.

Çimentonun kimyasal reaksiyonunun egzotermik olduğu düşünüldüğünde çimento miktarının azalması harçta ısınmayı ve buharlaşmayı azalttığından yayılma miktarının arttığını gözlemlemekteyiz. Aynı düşüncenin GC5'te ise oran olarak yetersiz olduğunu düşünmekteyiz.

Afolayan ve arkadaşları döküm cürufunu çimento yerine ikame etmek suretiyle yaptıkları çalışmada slump değerlerinde herhangi önemli bir değişiklik olmadığını, Arum ve Mark'ın kupol ocağı cürufunu çimento yerine kullandıkları çalışmada cüruf oranı arttıkça slump değerinin azaldığını, Bhagat ve arkadaşları'nın yapmış oldukları döküm cürufunu agrega yerine kullandıkları çalışmada cüruf oranı arttıkça slump değerlerinin giderek azaldığını açıklamışlardır.

4.2. Birim Ağırlık ve Su Emme

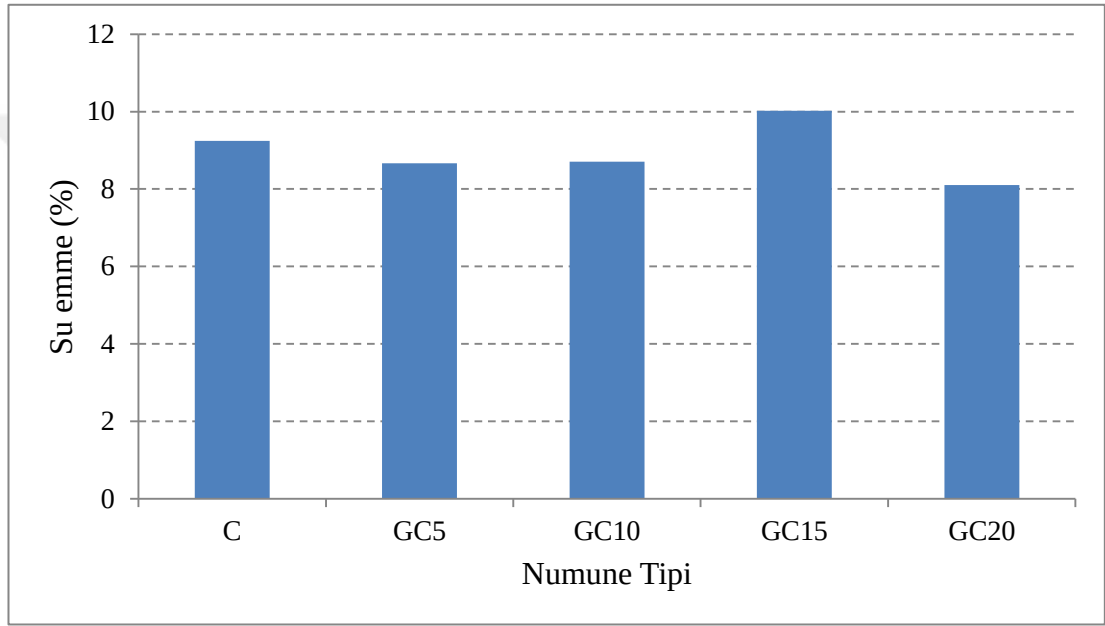
Tartımları yapılan numuneler DYK ve Kuru ağırlıkları karşılaştırmalı olarak Tablo 4.2'de formüller kullanılarak bulunan Kuru Birim Ağırlık ve Su Emme sonuçları Tablo 4.3'te numunelerin ağırlıkça Su Emme grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Numunelerin DYK ve Kuru ağırlıkları

Numune No	DYK Ağırlık (gr)			Kuru Ağırlık (gr)		
C	582,80	584,50	578,00	528,80	534,10	534,70
GC5	590,40	583,10	576,40	543,80	536,70	529,90
GC10	581,80	582,60	594,20	535,60	535,30	546,90
GC15	579,50	575,80	584,10	526,60	523,20	531,20
GC20	594,50	618,60	581,30	550,30	573,40	536,20

Tablo 4.3. Numunelerin kuru birim ağırlıkları ve su emme oranları

Numune No	DYK Ağırlık	Kuru Ağırlık	Kuru Birim Ağırlık (g/cm ³)	Su Emme(%)
C	581,77	532,53	2,08	9,25
GC5	583,30	536,80	2,10	8,66
GC10	586,20	539,27	2,11	8,70
GC15	579,80	527,00	2,06	10,0
GC20	598,13	553,30	2,16	8,10



Şekil 4.2. Numunelerin ağırlıkça yüzde su emme grafiği

Tablo 4.3'te görüldüğü gibi GC oranı arttıkça kuru birim ağırlık (g/cm³) artıyor ve Şekil 4.2'de görüldüğü gibi su emme oranı düşüyor gibi görünse de numuneler kuru birim ağırlıkları ve su emme oranları deneylerinde düzensiz sonuçlar vermiştir. Kuru birim ağırlık oranında GC15 numunesinde belirgin bir düşüş olmakla beraber GC20 numunesinde artış devam etmektedir. Deneysel çalışmalar sırasında GC15 için tekrar çalışma yapıldıysa da sonucun değişmediği gözlenmiştir. Bu durumda en düşük sonucu veren (2.06 g/cm³) GC15 numunesindeki sonucun granülometrik boşluk oluşturduğu düşünülmektedir.

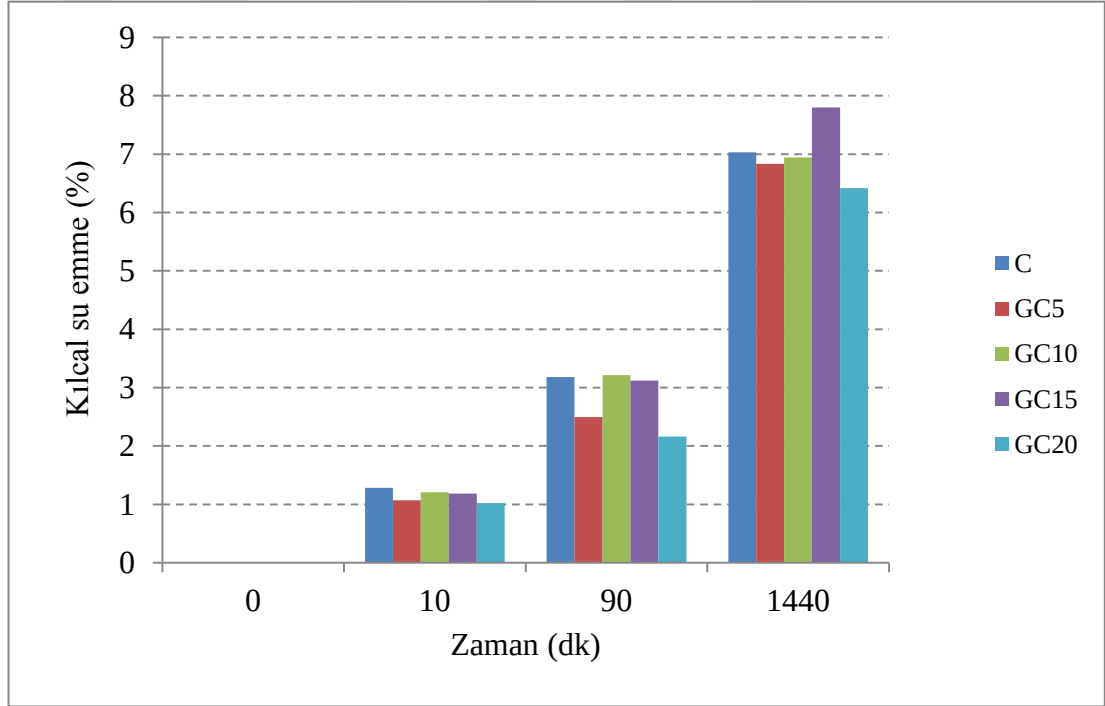
Yonar, ark ocağından gelen çelik cürufuyla yaptığı çalışmada cürufun karışımın birim hacim ağırlığını ve su emme oranını arttırdığını açıklamıştır.

4.3. Kılcallık

Tartımları yapılan numunelerin sonuçları Tablo 4.4'te sonuçlara bağlı olarak hazırlanan grafik Şekil 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Tartımları yapılan numunelerin yüzde olarak kıyaslanması

		10 dk %	90 dk %	1440 dk %
C	0	1,3	3,2	7,0
GC5	0	1,1	2,5	6,8
GC10	0	1,2	3,2	6,9
GC15	0	1,2	3,1	7,8
GC20	0	1,0	2,2	6,4



Şekil 4.3. Numunelerin ağırlıkça yüzde kılcal su emme grafiği

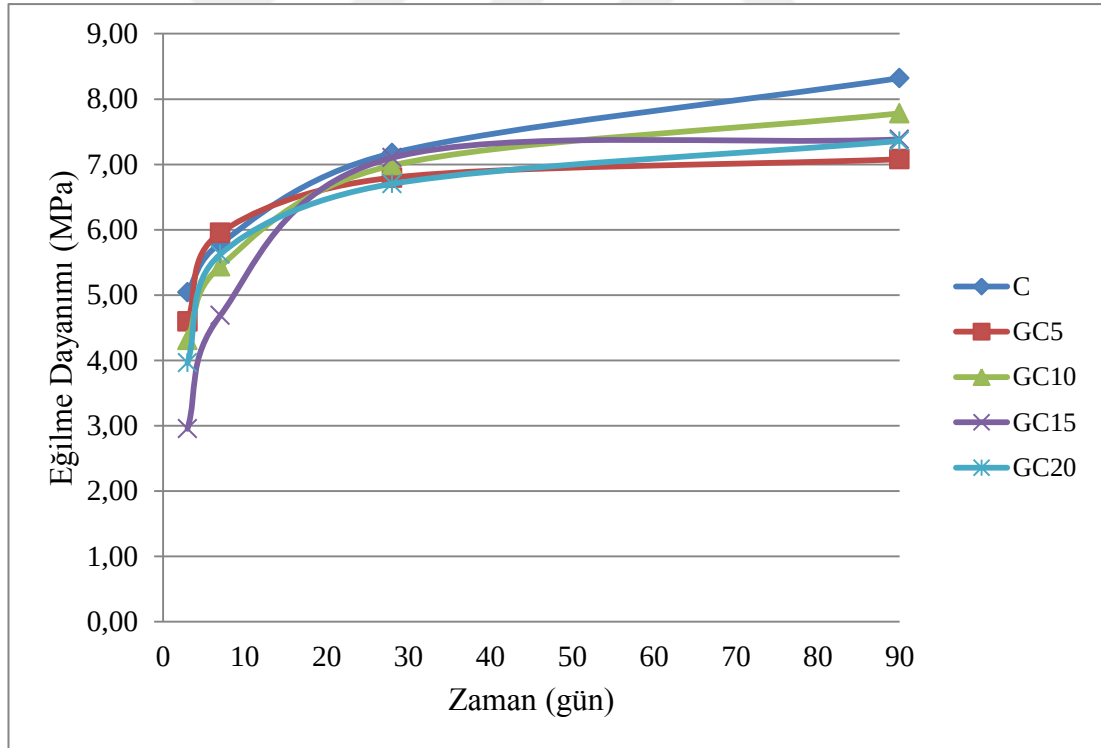
Tablo 4.4 ve Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi sonuçlar birbirine yakın çıkmakla beraber en az kılcallığa sahip numune GC20'dir. Döküm cürufunun karışımında ki oranının artmasının numunelerin boşluğunu azalttığını, buna bağlı olarak oran arttıkça kuru birim ağırlık oranının arttığı, su emme ve kılcallık sonuçlarının da azaldığı gözlenmiştir.

4.4. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyi sonucunda bulunan 3, 7, 28 ve 90 günlük sonuçlar Tablo 4.5'te dayanım sonuçlarının 90 günlük değişimleri de grafik halinde Şekil 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Eğilme dayanımı sonuçları (MPa)

Numune Tipi	Zaman (gün)			
	3	7	28	90
C	5,04	5,79	7,17	8,32
GC5	4,59	5,95	6,80	7,08
GC10	4,31	5,44	6,98	7,78
GC15	2,95	4,69	7,10	7,38
GC20	3,96	5,63	6,70	7,36



Şekil 4.4. Eğilme dayanımlarının 90 günlük süreçteki değişimi (MPa).

Tablo 4.5 ve Şekil 4.4'de GC numunelerinin eğilme dayanımları verilmiştir. Bu sonuçlara göre; 3 günlük sonuçlarda GC5, GC10, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 9, 15, 42 ve 22 oranlarında azalma olmuştur.

7 günlük sonuçlarda GC5 oranında %3'lük bir artış olmakla beraber GC10, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 7, 20, 3 oranlarında azalma olmuştur.

28 günlük sonuçlarda GC5, GC10, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 6, 3, 1 ve 7 oranlarında azalma olmuştur.

90 günlük sonuçlarda GC5, GC10, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 15, 7, 12 ve 12 oranlarında azalma olmuştur.

Sonuçlar ele alındığında genel olarak tüm numunelerde bir azalma gözlenmektedir. Özellikle 90 günlük sonuçlarda aradaki fark belirgin olarak artmıştır. GC oranlarına kıyasla en olumlu ve kabul edilebilir sonuçlar GC 10 değerinde ortaya çıkmıştır.

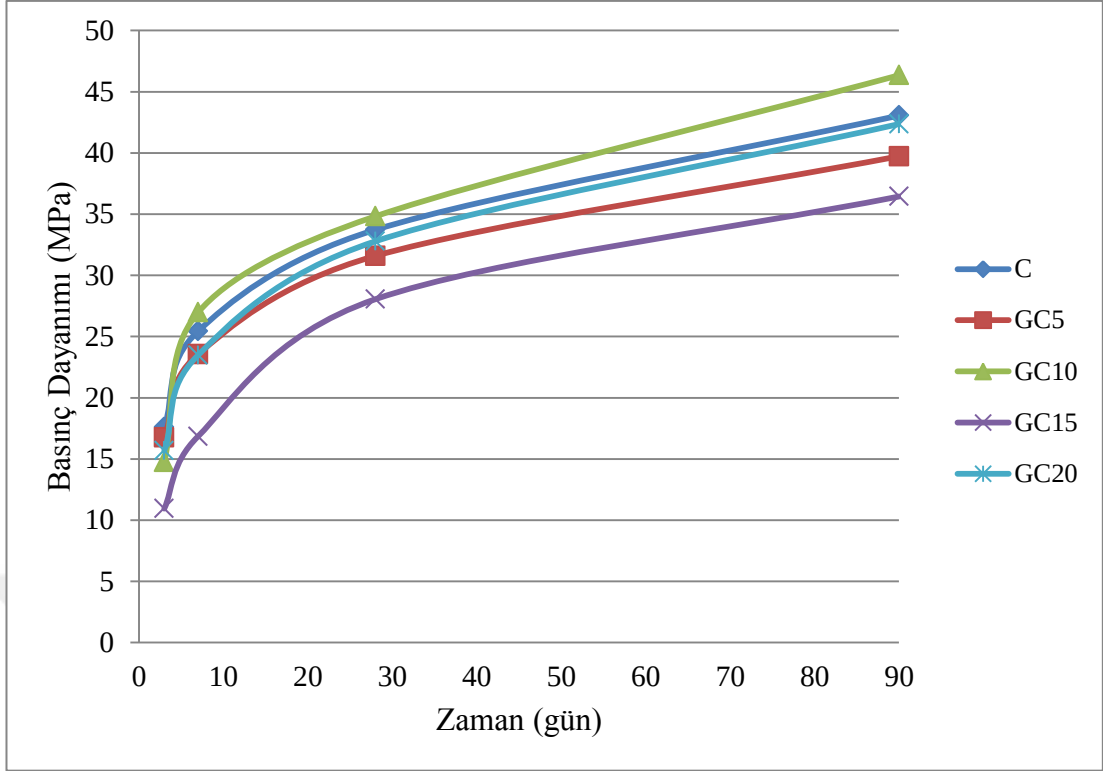
Bhagat ve arkadaşları, döküm cürufunu agrega yerine kullandıkları çalışmada cüruf oranı arttıkça eğilme dayanımında paralel şekilde bir düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Li ve arkadaşları, çelik ve yüksek fırın cürufunu çimento yerine kullanarak yaptıkları çalışmada cüruf oranı arttıkça eğilme dayanımında düşüş gözlemlemişlerdir. Devi ve arkadaşları, kum ve çimento yerine döküm cürufu ikame ederek hazırladıkları çalışmada eğilme dayanımının cüruf oranı arttıkça arttığını açıklamışlardır.

4.5. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyi sonucunda bulunan 3, 7, 28 ve 90 günlük sonuçlar Tablo 4.6 'da dayanım sonuçlarının 90 günlük değişimleri de grafik halinde Şekil 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.6. Basınç sonuçları (MPa)

Numune Tipi	Zaman (gün)			
	3	7	28	90
C	17,60	25,44	33,73	43,06
GC5	16,76	23,55	31,59	39,73
GC10	14,74	26,98	34,83	46,35
GC15	10,95	16,85	28,06	36,44
GC20	15,69	23,48	32,79	42,36



Şekil 4.5. Basınç dayanımlarının 90 günlük süreçteki değişimi.

Bu sonuçlara göre referans numunesine kıyasla; 3 günlük sonuçlarda GC5, GC10, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 5, 17, 38 ve 11 oranlarında azalma olmuştur.

7 günlük sonuçlarda GC10 oranında %7'lük bir artış olmakla beraber GC5, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 8, 34 ve 8 oranlarında azalma olmuştur.

28 günlük sonuçlarda GC10 oranında %4'lük bir artış olmakla beraber GC5, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 17, 17 ve 3 oranlarında azalma olmuştur.

90 günlük sonuçlarda GC10 oranında %8'lük bir artış olmakla beraber GC5, GC15 ve GC20 oranlarında sırasıyla yaklaşık % 8, 16 ve 2 oranlarında azalma olmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde GC10 oranı 3günlük sonuçlarda düşüş yaşamakla beraber 7, 28 ve 90 günlük sonuçlarda referans numunesinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Diğer GC oranları ise 3, 7, 28 ve 90 günlük sonuçlarda azalma gözlenmiştir. GC10 oranında 3 günlük sonuçlarda düşüş gösterip, diğer günlerde referans numunesinden daha iyi sonuçlar vermesi, 28 ile 90 gün arasında ki dayanım artışı puzolanik davranışın göstergesidir.

Yuvaraj ve arkadaşları dökümhane cürufu ile yaptıkları çalışmada cürufu agregaya yerine kullanmış ve cüruf oranı arttıkça basınç dayanımında azalma olduğunu söylemişlerdir. Balaraman ve Elangovan döküm cürufunu agregaya yerine kullandıkları çalışmada agregaya oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığını görmüşlerdir. Balaraman ve Ligorla yaptıkları çalışmada döküm cürufunu ince ve iri agregaya yerine kullanmış ve basınç dayanımı sonuçlarında referans numunesinden daha yüksek sonuçlar elde etmişlerdir. Devi ve arkadaşları kum ve çimento yerine dökümhane cürufu kullanmış ve basınç dayanımı sonuçlarında referans numunesine kıyasla %12.5 luk bir artış yakalamışlardır. Arum ve Mark, dökümhane cürufunu çimento yerine ikame ederek kullanmış ve 7, 21 ve 28 günlerde referans numunesinden daha yüksek sonuçlar elde etmişlerdir. En yüksek değer 28. günde %15 artış olarak gözlemlenmiştir.

4.6. Rötire

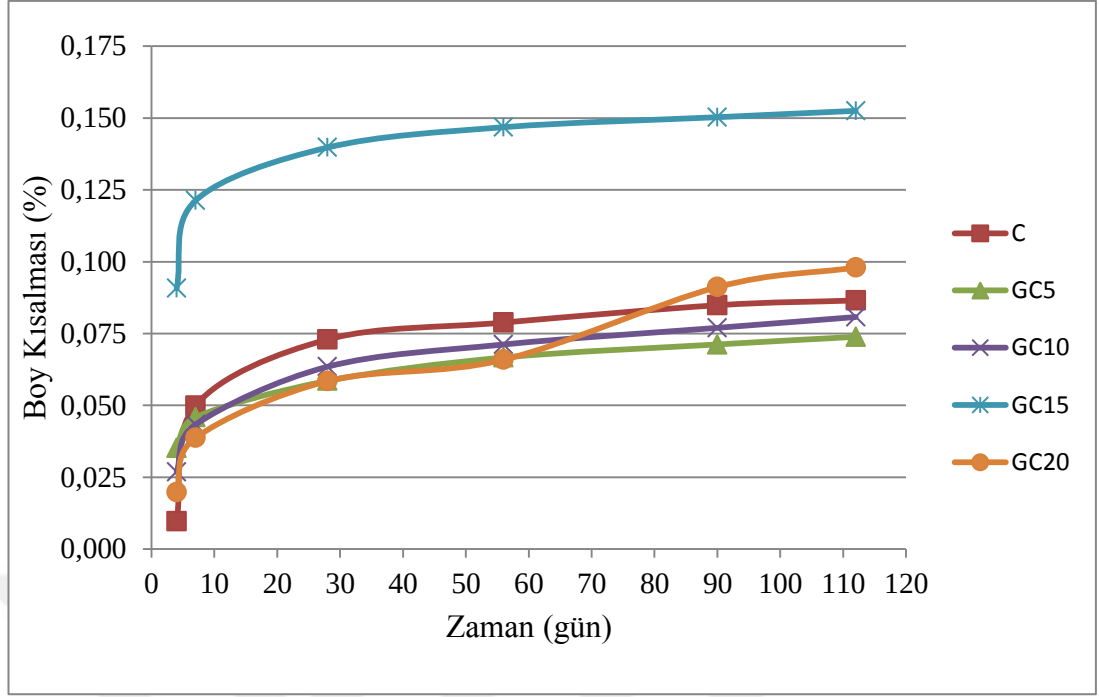
Rötire deneyinden gelen ölçüm değerleri Tablo 4.7’de bu sonuçlara göre formüller kullanılarak bulunan yüzdelik değişim Tablo 4.8’de verilmiştir. 4, 7, 28, 56, 90 ve 112 gün sonuçları alınarak hazırlanan değişim grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.7. Günlere göre rötire değişim değerleri

Günler	C	GC5	GC10	GC15	GC20
1	4,875	6,363	4,993	4,153	4,451
4	4,847	6,263	4,916	3,892	4,394
7	4,731	6,232	4,869	3,805	4,340
28	4,665	6,196	4,811	3,752	4,283
56	4,648	6,172	4,789	3,731	4,262
90	4,630	6,159	4,772	3,721	3,913
112	4,625	6,152	4,762	3,715	3,687

Tablo 4.8. Günlere göre rötire ölçümleri (%)

Günler	C	GC5	GC10	GC15	GC20
4	0.010	0.035	0.027	0.090	0.019
7	0.050	0.046	0.043	0.120	0.038
28	0.073	0.058	0.063	0.138	0.057
56	0.079	0.066	0.071	0.145	0.065
90	0.085	0.071	0.076	0.148	0.184
112	0.087	0.073	0.080	0.150	0.262



Şekil 4.6. Günlere göre rötre ölçümleri (%)

Tablo 4.7, Tablo 4.8 ve Şekil 4.6’da görüldüğü gibi rötre sonuçlarında numunelerde beklenildiği üzere bir kısalma söz konusudur. En iyi sonuçlar % 5 cüruf ikamesinde görülürken basınç ve eğilme dayanımlarında en iyi sonuçları veren %10 cüruf ikameli numuneler referans numunesinden daha düşük sonuçlar vermiştir. %15 cüruf ikameli numuneler için deneyler tekrarlandıysa da sonuçların değişmediği görülmüş, %15 cüruf ikamesinin numunelerde granülometrik boşluk oluşturduğu düşünülmektedir.

Daha önceki dökümhane cürufu ile ilgili çalışmalarda rötre deneyi yapıldığına dair bir bulguya rastlanmamıştır.

4.7. ASR

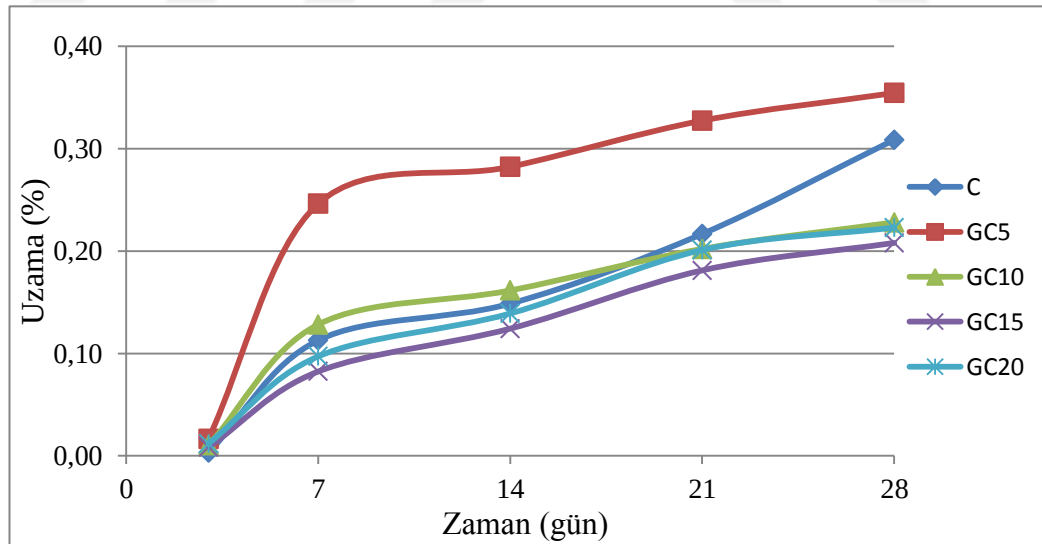
ASR deneyinden gelen ölçüm değerleri Tablo 4.9’da bu sonuçlara göre bulunan yüzdelik değişim Tablo 4.10’da verilmiştir. 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük sonuçları alınarak hazırlanan değişim grafiği Şekil 4.7 ’de verilmiştir.

Tablo 4.9. Günlere göre ASR değişim değerleri (mm)

Günler	C	GC5	GC10	GC15	GC20
1	5,2196	4,9236	4,5570	4,6946	4,0602
3	5,2285	4,9712	4,5867	4,7185	4,0943
7	5,5416	5,6314	4,9243	4,9302	4,3370
14	5,6455	5,7351	5,0195	5,0500	4,4567
21	5,8406	5,8648	5,1358	5,2128	4,6336
28	6,1042	5,9424	5,2100	5,2896	4,6960

Tablo 4.10. Günlere göre ASR ölçümleri (%)

Günler	C	GC5	GC10	GC15	GC20
1					
3	0,0031	0,0166	0,0104	0,0084	0,0119
7	0,1124	0,2463	0,1283	0,0824	0,0971
14	0,1487	0,2823	0,1615	0,1243	0,1391
21	0,2168	0,3275	0,2021	0,1812	0,2011
28	0,3088	0,3545	0,2281	0,2080	0,2230



Şekil 4.7. Günlere göre ASR ölçümleri (%)

Tablo 4.9, Tablo 4.10 ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi ASR sonuçlarında numunelerde beklenildiği üzere bir uzama söz konusudur. En fazla uzama GC5 numunesinde, en az uzama ise GC15 numunesinde görülmüştür.

Li ve arkadaşları çelik cürufunu çimento yerine kullanarak hazırladığı çalışmada numunelerden ASR etkisini azaltıcı yönde sonuçlar almışlardır. Daha önceki çalışmalarda beton ve harç içerisinde mineral katkı kullanımında ASR deneyleri yapılmış fakat dökümhane cürufuyla ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

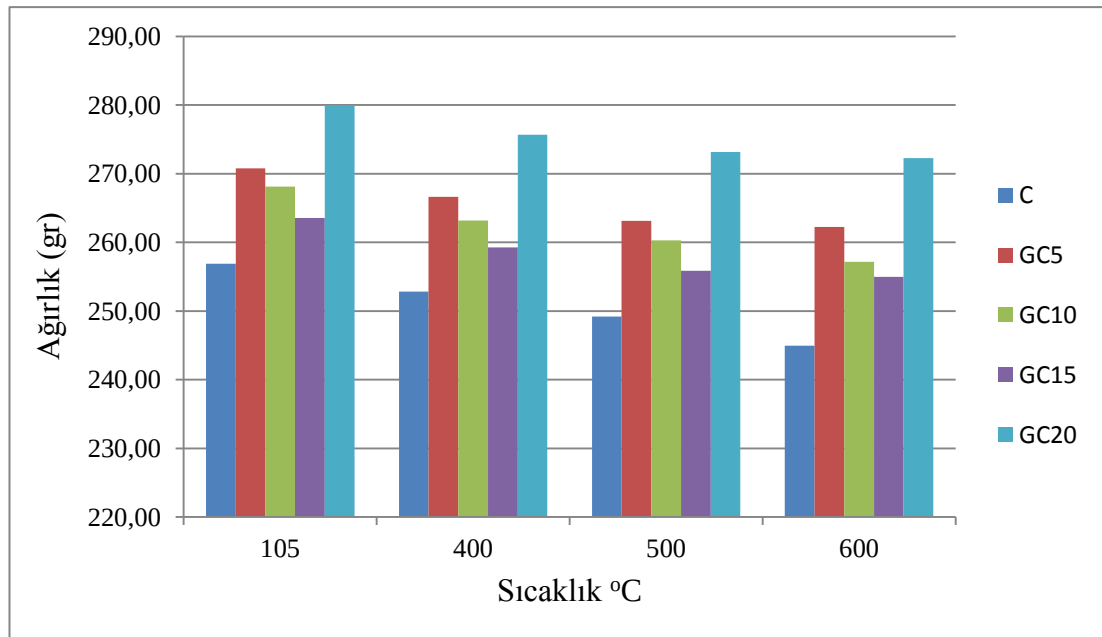
4.8. Sıcaklığa Dayanıklılık

4.8.1. Ağırlık kaybı

Etüv sonrası bulunan tartım sonuçları ve yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra numunelerin tartım sonuçları Tablo 4.11’de sonuçlara göre hazırlanan ağırlık kaybı grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.11. Tartımları yapılan numunelerin ortalama ağırlıkları(gr)

Numune	Sıcaklık (°C)			
	105	400	500	600
C	256,90	252,83	249,20	244,93
GC5	270,77	266,63	263,13	262,27
GC10	268,13	263,20	260,27	257,17
GC15	263,57	259,27	255,87	254,97
GC20	279,97	275,67	273,13	272,27

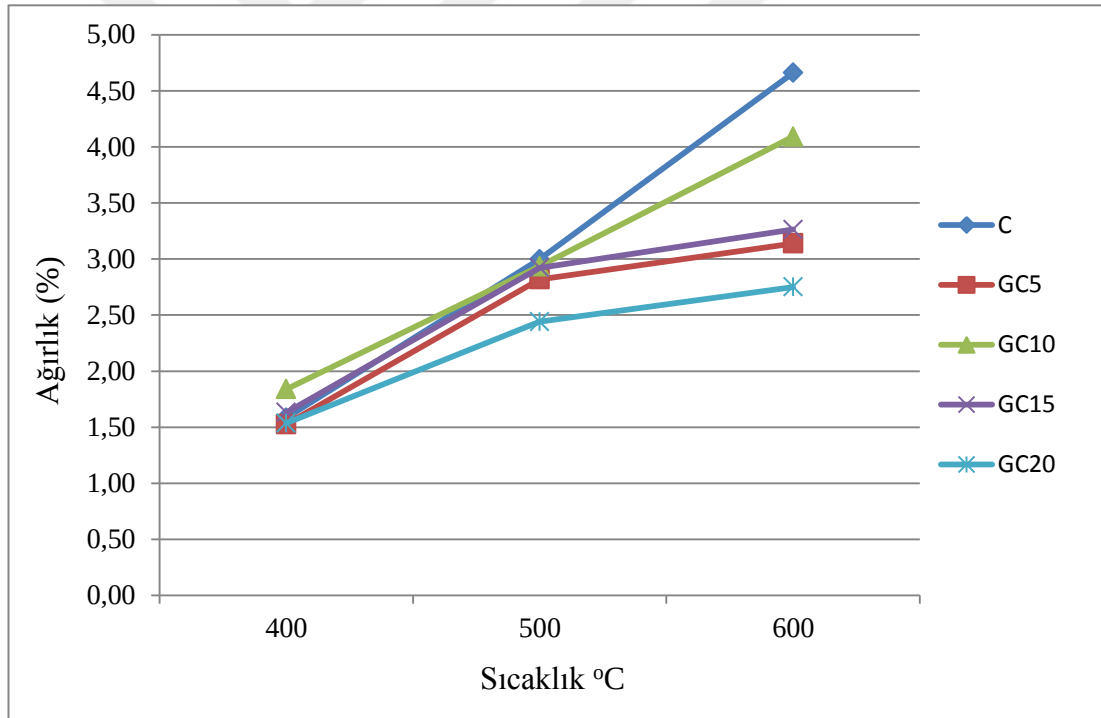


Şekil 4.8. Numunelerin ağırlık kaybı grafiği (gr)

400,500 ve 600°C’lerde sıcaklığa tabi tutulan numuneler 24 saatlik 105±5°C’lik etüv ile kıyaslamalı değerleri(%) Tablo 4.12’de, sonuçlara göre hazırlanan grafik Şekil 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.12. Sıcaklık deneyi sonrası ağırlık kaybı yüzdeleri(%)

Numune	Sıcaklık (°C)		
	400	500	600
C	1,58	3,00	4,66
GC5	1,53	2,82	3,14
GC10	1,84	2,93	4,09
GC15	1,63	2,92	3,26
GC20	1,54	2,44	2,75



Şekil 4.9. Numunelerin etüv numunesiyle kıyaslamalı ağırlık kaybı grafiği (%)

Sıcaklığa dayanıklılık işlemine tabi tutulan numunelerde beklenildiği gibi numuneler ağırlık kaybına uğramışlardır. Tablo 4.11, Tablo 4.12, şekil 4.17 ve şekil 4.18’te ağırlık kaybının ne derecede olduğu gösterilmiştir. Sıcaklık derecesi arttıkça buna paralel olarak ağırlık kaybı da artmıştır.

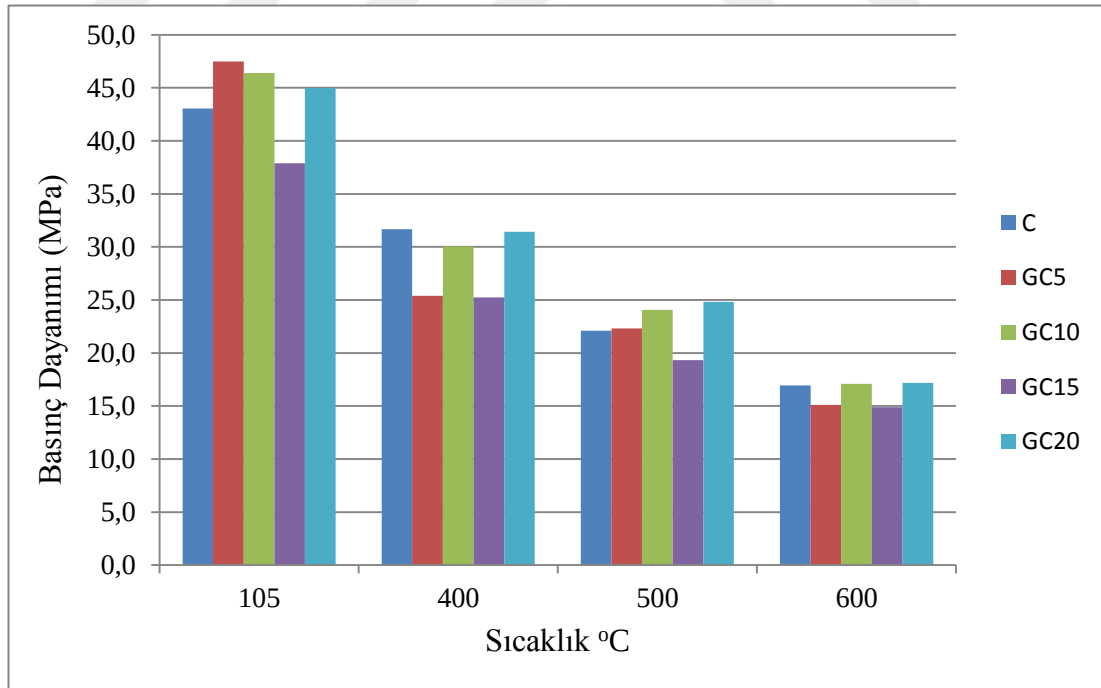
Mineral katkılı harçların referans numunesinden daha iyi sonuç verdiği 600 °C’de en az ağırlık kaybı %20 katkı ikamesinde görülürken en fazla ağırlık kaybı referans numunesinde görülmüştür.

4.8.2. Basınç dayanım kaybı

Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanım testlerinin sonuçları Tablo 4.13’te ve sonuçlara göre hazırlanan basınç dayanım kaybı grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.13 Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanımı (MPa)

	105°C	400°C	500°C	600°C
C	43,060	31,670	22,110	16,940
GC5	47,497	25,389	22,315	15,089
GC10	46,404	30,029	24,065	17,088
GC15	37,881	25,239	19,339	14,888
GC20	44,972	31,431	24,821	17,175

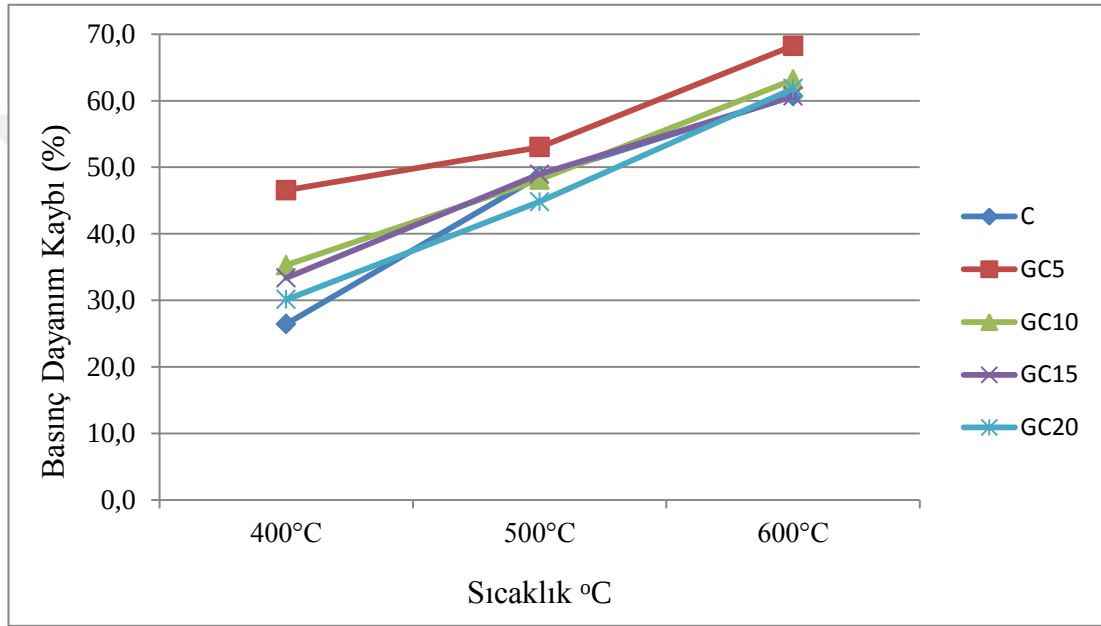


Şekil 4.10. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanımları (MPa)

400,500 ve 600°C’lerde sıcaklığa tabi tutulan numuneler 24 saatlik 105±5°C’lik etüv ile kıyaslamalı değerleri(%) Tablo 4.14’te, sonuçlara göre hazırlanan grafik Şekil 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.14. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanım kaybı(%)

	400°C	500°C	600°C
C	26,5	48,7	60,7
GC5	46,5	53,0	68,2
GC10	35,3	48,1	63,2
GC15	33,4	48,9	60,7
GC20	30,1	44,8	61,8



Şekil 4.11. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin dayanım kaybı (%)

Sıcaklığa dayanıklılık deneylerinde 400, 500 ve 600 °C sıcaklıklara maruz kalan numuneler sıcaklık altında ağırlık kaybına uğramışlardır. En fazla ağırlık kaybı 600 °C’de referans numunesinde en az ağırlık kaybı ise 600 °C’de %20 cüruf ikamesinde görülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılma işlemi sonucu 600 °C’de en yüksek dayanım %20 ve %10 cüruf ikame edilmiş numunelerde görülürken, 600 °C’de en çok dayanım kaybına uğrayan numune %5 cüruf ikameli numune olmuştur.

Özkan, çalışmasında yüksek fırın cürufu ve çelikhane cüruflarını çimento yerine kullanarak yeni numuneler üretmiş numunelerden aldığı sıcaklığa dayanıklılık değerlerinin referans numunesinden daha iyi olduğunu açıklamıştır. Mineral katkı olarak kullanılan cürufların sıcaklığa dayanıklılık deneyleri araştırılmış dökümhane cüruflarının kullanımında sıcaklığa dayanıklılık deneylerine rastlanmamıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasının amacı demir döküm fabrikalarından gelen döküm cüruflarının harç içerisinde mineral katkı olarak kullanımının araştırılması ve kullanımının ne kadar mümkün olduğunu belirlemektir. Bu amaçla çimento yerine %20 oranına kadar öğütülmüş cüruf kullanılarak harç numuneleri hazırlanmıştır. Sonuçlara göre %10 oranında kullanımının harç üzerinde ki etkilerinin olumlu, %20'ye kadar kullanımının kabul edilebilir olduğu gözlenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerin sonuçları aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir;

- Yapılan kıvam testlerinde geri dönüştürülmüş cüruf numunesi kontrol numunesi ile kıyaslandığında, %5 cüruf ikame edildiğinde yayılma miktarında düşüş görülmüşken %10, %15 ve %20 cüruf ikame edildiğinde yayılma miktarlarında artış görülmüştür.
- Yapılan kuru birim ağırlık(g/cm³) deneylerinde %5, %10 ve %20 cüruf ikame edildiğinde artış görülmüşken, %15 oranında ise belirgin bir düşüş görülmüştür. Su emme deneylerinde ise %5, %10 ve %20 cüruf ikame edildiğinde düşüş görülmüş, %15 cüruf ikamesinde belirgin bir artış görülmüştür. Deneysel çalışmalar %15 oranında beklenilenin dışında bir sonuçla karşılaşıldığı için tekrarlanmış lakin deney sonuçlarının değişmediği gözlenmiştir. Kuru birim ağırlık deneyine göre 2.06 g/cm³ ile en düşük sonucu, su emme oranı deneylerinde ise %10 ile en yüksek sonucu veren GC15 numunelerinde %15 oranında değişimin numunelerde granülometrik olarak boşluk oluşturduğu düşünülmektedir.
- Su emme deneyinde olduğu gibi en az kılcal su emerek en olumlu sonuçlar %20 cüruf ikame edildiğinde görülmüştür. %10 ve %15 cüruf ikame edildiğinde kontrol numunesine kıyasla daha yüksek kılcal su emme değerleri görülmüş, %5 cüruf ikamesinde ise sonuçların yaklaşık olarak aynı seviyelerde kaldığı görülmüştür. 90 dakikadan sonra %5, %10 ve kontrol

numunesi sonuçlarının birbirine yakın, %15'te ise kılcallığın belirgin arttığı görülmüştür.

- Eğilme dayanım deneyine göre tüm numunelerinin eğilme dayanımları ilk günlerden itibaren genel olarak kontrol numunesinin altında kaldığı gözlenmiş özellikle 90. günde aradaki farkın daha da belirgin hale geldiği görülmüştür. GC numunelerinden en olumlu sonucu 7,78 MPa ile %10 cüruf ikame oranında vermiştir.
- Basınç dayanım deney sonuçları incelendiğinde kontrol numunesine kıyasla %10 cüruf ikame edilmiş numuneler 3 günlük sonuçlarda düşüş yaşamakla beraber 7, 28 ve 90 günlük sonuçlarda referans numunesinden daha iyi sonuçlar vermiştir. Diğer numunelerde ise 3, 7, 28 ve 90 günlük sonuçlarda kabul edilebilir miktarlarda düşüş gözlenmiştir. GC10 oranında 3 günlük sonuçlarda düşüş gösterip, diğer günlerde referans numunesinden daha iyi sonuçlar vermesi az da olsa puzolanik davranışın göstergesidir.
- Rötire boy değişim sonuçları incelendiğinde, %5, %10, %15 cüruf ikame edilmiş numunelerde kontrol numunesine paralel şekilde kısalma gözlenmiştir. %20 cüruf ikame edilmiş numunelerde ise 56. Güne kadar büzülme paralel ilerlemiş 56. günden sonra büzülme miktarında belirgin bir artış gözlenmiştir. Tüm serilerde gün sayısı arttıkça numunelerin büzülme miktarlarında da artış görülmüştür.
- Alkali silika reaksiyonu(ASR) deneyinde kür günü ilerledikçe tüm numunelerde genleşme miktarlarında artış görülmüştür. Referans numunesi 7 günden sonra belirgin artış göstermekle beraber 28 gün sonunda en fazla genleşme %5 cüruf ikame edilen numunelerde en az genleşme ise %15 cüruf ikame edilmiş numunelerde görülmüştür.
- Sıcaklığa dayanıklılık deneylerinde 400, 500 ve 600 °C sıcaklıklara maruz kalan numuneler sıcaklık altında ağırlık kaybetmişlerdir. Numunelerde beklenildiği gibi 600 °C'de daha fazla ağırlık kaybı gözlenmiştir. Tüm serilerde en çok ağırlık kaybı 600 °C sıcaklık altında referans numunesinden sonra %10 ile %15 cüruf ikame edilmiş numunede görülmüştür. Ayrıca basınç dayanımı testlerinde etüv numunesinden sonra tüm serilerde en yüksek dayanım sonuçları etüvden sonra 400 °C sıcaklık altında görülmüştür. Referans numunesinden sonra en yüksek dayanım 400 °C'de referans numunesi ve %20 cüruf ikame edilmiş numunede

görülürken, en düşük dayanım ise 600 °C’de %15 cüruf ikame edilmiş numunede görülmektedir.

5.2. Öneriler

- Döküm cürufunun çok daha ince öğütülmesi durumunda filler etkisi ve puzolanik aktivite etkisinin fazla olacağı buna bağlı olarak erken ve geç dayanımlarda daha iyi sonuçlar elde edileceği tahmin edilmiştir. Farklı incelikte cüruflar üzerinde araştırmalar yapılabileceği ve daha iyi sonuçlar elde edileceği ön görülmüştür.
- Mineral katkı malzemesi olarak döküm cürufunun harç üretimine uygun olduğu, sağlayacağı ekonomik ve çevresel katkılar yönünden harç ve beton üretiminde araştırılmaya değer bir malzeme olduğu düşünülmüştür.
- Döküm cürufunun harç içerisinde mineral katkı olarak kullanılması su emme, kılcallık, ASR’ye karşı dayanım, rötre etkisi, sıcaklığa karşı dayanım altında olumlu sonuçlar verdiği gözlenmiş döküm cürufunun beton içerisinde de mineral katkı olarak incelenebileceği düşünülmüştür.
- Döküm cürufunun beton içerisinde kullanılması durumunda daha az su veya süper akışkanlaştırıcı kullanımına azaltıcı yönde etki yapacağı bu konuda araştırma yapılabileceği ön görülmüştür.
- Dökümhane cüruflarının içerisinde metal parçacık olanlardan metal parçaların ayrılarak beton içerisinde agrega olarak kullanımı araştırılmalıdır.
- Dökümhane cüruflarının hidratasyon ısısı ölçülerek kütle beton kullanımına uygunluğu araştırılmalıdır.
- Dökümhane ve diğer cürufların üzerinde ortak bir çalışma yapılarak cürufların hem agrega olarak hem de bağlayıcı olarak kullanımının atık malzeme kullanımı ulusal mevzuatının oluşturulması ülkemize ekonomik ve çevresel yönden fayda sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Aderibigbe D. A., Ojobo A. E., Properties Of Cupola Slag As A Pozzolana And Its Effects On Partial Replacement Of A Cement In A Mortar , *Conservation & Recycling*, DOI: 10.1016/0361-3658(82)90048-0.

Afolayan J.O., Alabi S.A., Investigation On The Potentials Of Cupola Furnace Slag In Concrete, *International Journal Of Integrated Engineering*, 2013, **5**(2), 59-62.

Aguayo F., Torres A., Talamini T., Whaley K., Investigation Into The Heat Of Hydration And Alkali Silica Reactivity of Sustainable Ultrahigh Strength Concrete With Foundry Sand, *Advances In Materials Science And Engineering*, DOI:10.1155/2017/2096808.

Akman M. S., Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi, *Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı*, 2003/4, 426, 31-33.

Andrews A., Gikunoo E., Ofosu Mensah L., Tofah H., Bansah S., Chemical and Mineralogical Characterization of Ghanaian Foundry Slags, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2012, **11**(2), 183-192,

Aran A., Döküm Teknolojisi İmal Usülleri Ders Notları, İTÜ Makina Fakültesi, 2007, 6-15.

Arum C., Mark G.O., Partial Replacement of Portland Cement By Granulated Cupola Slag Sustainable Option For Concrete of Low Permeability, *Civil and Environmental Research*, 2014, **6**(3), 17-26.

Balaraman R., Elangovan N.S., Behaviour of Cupola Slag In Concrete Aspartial Replacement With A Combination Offine and Coarse Aggregates, *Taga Journal*,, 2018, **14**, 1041-1045.

Balaraman R., Ligorla S. A., Utilization of Cupola Slag In Concrete As Fine and Coarse Aggregate, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Ağustos 2015, **6**(8), 06-14.

Baricová D., Pribulová A., Demeter P., Comparison Of Possibilities The Blast Furnace and Cupola Slag Utilization by Concrete Production, *Archives of Foundry Engineering*, 2010, **10**(2/2010), 15-18.

Bassey E. N., Bassey O. B., Olieh R. A., Suitability Of Electric Arc Furnace (Eaf) Slag as Partial Replacement For Cement in Sandcrete Blocks, *Global Journal Of Engineering Research*, 2011, **10**(1&2), 19-26.

Başar H. M., Deveci Aksoy N., Atık Döküm Kumunun Hazır Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Journal Of Engineering And Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2013, **31**, 517-528.

Bhagat K., Pokar N. R., Rabadiya H. M., Suitability of Concrete By Using Cupola Slag As Partial Replecement of Coarse Aggregate and Foundry Sand as Partial Replecement of Fine Aggregate: A Critical Review, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, Mart 2017, **4**(3), 127-129.

Bhagat K., Pokar N. R., Rabadiya H. M., Suitability of Concrete by Using Cupola Slag as Partial Replecement Of Coarse Aggregate And Foundry Sand as Partial Replecement of Fine Aggregate, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, Nisan 2017, **4**(4), 297-304.

Bharath S., Narendra D., Use Of Steel Slag In Construction Of Flexible Pavemant, *International Journal of Research Sciences and Advanced Engineering (IJRSAE)TM*, 2016, **2**(16), 196-200.

Bilim C., Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006, 183611.

Chen M., Zhou M., Wu S., Optimization Of Blended Mortars Using Steel Slag Sand, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, DOI: 10.1007/s11595-006-4741-3.

Devi S., Shahrukh, Meena S., Joshi S., Sharma S. K., Utilization Of Foundry Slag As A Partial Replacement of Cement And Sand, *SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE)*, Mayıs 2016, **3**(5), 81-85.

Eker Akdoğan A., Demirdışı Metal Ve Alaşımları, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2008, 5-11.

Erdoğan S. T., Erdoğan T. Y., Puzolanik Mineral Katkılar Ve Tarihi Geçmişleri, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 12-13 Haziran 2007.

Ferro Döküm San. Ve Dış Tic. A.Ş., 2018.

Fiore S., Zanetti M.C., Foundry Wastes Reuse and Recycling in Concrete Production, *American Journal Of Environmental Sciences*, 2007 **3**(3), 135-142.

Gülesin Yavuz F., Demir Dökümhanelerinde Çalışanların Toz, Silis Ve Ağır Metal Maruziyetlerinin Değerlendirilmesi, İş Sağlığı Ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, T.C. Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, 2016.

Gülmez T., İmal Usülleri, İTÜ Makina Fakültesi, 71-84.

Hamalı Y., Metakaolin Ve Silis Dumanı İçeren Harç Ve Betonların Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 222589.

[http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/48958/48486/8_.hafta_\(7_4_2016\).pdf](http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/48958/48486/8_.hafta_(7_4_2016).pdf), (Ziyaret tarihi: 27.04.2019).

<http://www.muhandisalemi.com/dokme-demirlerin-kaynagi-nasil-yapilmalidir/>, (Ziyaret tarihi: 28.04.2019).

Kanchana S., Varkey D., Experimental Investigation of Steel Fiber Reinforced Concrete With Partial Replacement of Coarse Aggregate by Cupola Slag, *International Research Journal of Engineering and Technology*, Kasım 2018, **05**(11), 1039-1043

Khajuria C., Siddique R., Use of Iron Slag As Partial Replacement of Sand to Concrete, *International Journal of Science Engineering and Technology Research (IJSETR)*, Nisan 2014, **3**(6), 1877-1880.

Khalak A.A., Chaudhary J.N., Chaudhary Y.J. 3, Vanjara V.S., Shah Y.B, Parmar H.J., A Review Paper on Cupola Slag Waste as Apartially Replacement in Coarse Aggregate in Concrete, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Ocak 2019, **06**(01), 1118-1120.

Kuralay B., Döküm Sektöründe Kullanılan Refrakter Malzemelerin Termal Davranışlarının Ve Isıl Özelliklerinin İncelenerek Deneysel Ve Reel Olarak Doğrulanması, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2015, 497498.

Leo J.G. Dekker (Çeviren: Yasin Engin), Beton İçin Çevresel Maliyet Göstergesi, *Hazır Beton*, Mayıs-Haziran 2016, 73-76.

Li Y., Yao Y., Wang L., Recycling of Industrial Waste And Performance of Steel Slag Green Concrete, *Journal of Central South University of Technology*, DOI: 10.1007/s11771-009-0128-x.

Milli Eğitim Bakanlığı, Metalurji Teknolojisi, *Kupol Ocağı*, Ankara, 2011, 3-15.

Mistry V. K., Patel B.R., Varia D.J., Suitability of Concrete Using Cupola Slag as Replacement of Coarse Aggregate, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Şubat 2016, **7**(2), 1182-1186.

Nadeem M., Pofale A.D., Utilization of Industrial Waste Slag as Aggregate In Concrete Applications By Adopting Taguchi's Approach for Optimization, *Open Journal of Civil Engineering*, 2012, **2**, 96-105.

Naik T.R., Moriconi G., Environmental Friendly Durable Concrete Made With Recycled Materials for Sustainable Concrete Construction, *Proceedings of International Symposium on Sustainable Development of Cement And Concrete*, Toronto, USA, 5-7 Ekim 2005.

Özkan Ö., Çelikhane Ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri, *İMO Teknik Dergi*, 2006, **257**, 3893-3902.

Prabhu G. G., Bang J.W., Lee B. J., Hyun J. H., Kim Y. Y., Mechanical And Durability Properties of Concrete Made With Used Foundry Sand as Fine Aggregate, *Advances in Materials Science and Engineering*, DOI: 10.1155/2015/161753.

Sawant M., Dhande D., Sabde S., Bhalsing R., Yadav P., Ranjan N., Pervious Concrete With Cupola Slag, *International Journal of Research in Advent Technology*, Mayıs 2017, 5(5), 22-25.

Sharma D., Sharma S., Goyal A., Utilization of Waste Foundry Slag and Alccofine For Developing High Strength Concrete, *International Journal of Electrochemical Science*, Mart 2016, 11, 3190-3205.

Shashank V., Revathi V., Application of Steel Slag as an Effective Construction Material in Pavements, *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education (IJARIIE)*, 2017, 3(6), 1325-1335.

Sözbir N., Manzak A., Akçil M., Ateş A., Çelik Endüstrisi için Alüminyum Cüruflarından Flaks Üretimi, *Academic Platform-Journal of Engineering and Science (APJES)*, DOI: 10.21541/apjes.289933.

Stroup W.W., Stroup R D., Fallin J. H., Cupola Slag Cement Mixture And Methods Of Making And Using The Same, Temmuz 2003, US 2003/0131762 A1 USA.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Demir Çelik Cüruf Raporu, *Türkiye Çelik Üreticileri Derneği*, 2015, 3-6.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye’de Sanayiden Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi, *Döküm Sektörü*, 2012, 3-21.

Uysal F.F., Bahar S., Cüruf Çeşitleri Ve Kullanım Alanları, *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 2018, 19(1), 37-52.

Wang G., Determination of The Expansion Force of Coarse Steel Slag Aggregate, *Construction And Building Materials*, 2010, 24(10), 1961–1966.

Yonar F., Elektrik Ark Ocağı Çelikhane Cürufunun Karayolu Esnek Üstyapı Tabakalarında Kullanımının Ve Karışım Performansının Araştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017, 451040.

Yuvaraj Mr.T., Palanivel Dr.M., Vigneswar S., Bhoopathy R., Gnanasekaran V., Environmental Feasibility in Utilization of Foundry Solid Waste (Slag) For M20 Concrete Mix Proportions, *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*, 2015, 9, 16-23.

Yücel O., Car E., Alüminyum Cüruflarının Değerlendirilmesi Ve Kalsiyum Alüminat Sentetik Cüruf Yapıcı Üretimi, 7. *Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul, 08-09 Ekim 2015.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yıldız S., Yıldırım S.T., Karaman D., Karaaslan E., Öğütölmüş Döküm Cürufunun Çimento Harcı İçinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi*, Kocaeli Türkiye, 23-25 Kasım 2018.



ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Karamürsel Kocaeli’de doğdu. İlköğretimini Dumlupınar ilköğretim okulunda, Orta öğretimini Karamürsel Alp Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2016 güz döneminde Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansa başladı. 2015 yılından itibaren arasında özel sektörde devlet ihale işlerinde şantiye şefi olarak çalışmaktadır.

