

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALKALİ AKTİVATÖRLER KULLANILMIŞ ÇELİKHANE
CÜRUFU HARÇLARIN MEKANİK VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİ**

YUSUF HAKAN AÇIKKAPI

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALKALİ AKTİVATÖRLER KULLANILMIŞ ÇELİKHANE
CÜRUFUFLU HARÇLARIN MEKANİK VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİ**

YUSUF HAKAN AÇIKKAPI

Doç.Dr. Salih Taner YILDIRIM
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ENGİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Şinasi BİNGÖL
Eş Danışman, Tokat Gaziosmanpaşa Üniv.

Enstitü Yönetim Kurulunun
03/11/2021 tarih ve 2021/37 nolu
toplantısında II. tez danışmanı
olarak atanmıştır.

Tezin Savunulduğu Tarih: 26/01/2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

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

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İMZA

YUSUF HAKAN AÇIKKAPI

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

İMZA

YUSUF HAKAN AÇIKKAPI

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve laboratuvar çalışmalarım sürecimde bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocalarım, Sayın Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM ve Sayın Dr. Şinasi BİNGÖL'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Labarotuvuar çalışmalarım için gerekli olan hammaddelerden çelikhane cürufunu temin eden Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Ayrıca, tezimi oluşturmam sırasında destekleriyle yanımda olan Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Samsun Bölge Müdürlüğünde çalışan mesai arkadaşlarıma, tez çalışmalarına fikir alışverişleriyle katkıda bulunan arkadaşım Ömer GÜL'e, çalışmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan, babam Necmettin AÇIKKAPI'ya, annem Handan AÇIKKAPI'ya, ablam Ayşe Nihan AÇIKKAPI KİSBET'e şükranlarımı sunarım.

Aralık – 2022

Yusuf Hakan AÇIKKAPI

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Puzolanlar.....	3
2.1.1. Puzolanik Reaksiyon ve Puzolanik Malzemelerin Aktivitesi.....	3
2.1.2. Puzolan Kullanımının Betona Etkileri.....	5
2.2. Çelikhane Cürufu.....	5
2.3. Alkali Aktivatörler ve Aktivasyon Sistemi.....	12
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	17
4. MATERYAL VE METOT.....	25
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	25
4.1.1. Çimento.....	25
4.1.2. Çelikhane Cürufu.....	25
4.1.3. Sodyum Meta Silikat.....	26
4.1.4. Kum.....	27
4.1.5. Su.....	28
4.2. Karışım Oranları.....	28
4.3. Deney Numunelerin Hazırlanması ve Kürlenmesi.....	28
4.4. Test Metotları ve Deneysel Çalışmalar.....	30
4.4.1. Puzolanik Aktivasyon Testi.....	30
4.4.2. Kıvam (İşlenebilirlik).....	31
4.4.3. Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini Deneyi.....	32
4.4.4. Kılcal Su Emme.....	33
4.4.5. Eğilme Dayanımı.....	34
4.4.6. Basınç Dayanımı.....	35
4.4.7. Ultrasonik Ses Geçişi.....	36
4.4.8. Asit Etkisine Dayanıklılık.....	37
4.4.9. Yüksek Sıcaklıklara Karşı Dayanıklılık.....	38
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
5.1. Puzolanik Aktivasyon.....	40
5.2. Kıvam (İşlenebilirlik) Deneyi Sonuçları.....	40
5.3. Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini.....	41
5.4. Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları.....	43
5.5. Eğilme Dayanımı.....	47
5.6. Basınç Dayanımı.....	49
5.7. Ultrasonik Ses Geçişi.....	51
5.8. Asit Etkisine Karşı Dayanıklılık Deneyi Sonuçları.....	53
5.9. Yüksek Sıcaklık Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	57

5.10. Genel Değerlendirme	61
5.11. Maliyet Analizi	62
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR.....	66
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	70
ÖZGEÇMİŞ.....	71



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	1950-2020 Yılları Arası Üretilen Çelik Miktarı.....	6
Şekil 2.2.	Çelik Üretim Süreci Genel Görünümü.....	6
Şekil 2.3.	Bazık Oksijen Fırınının Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	7
Şekil 2.4.	Bazık Oksijen Fırınıyla Çelik Üretimi Aşamaları.....	8
Şekil 2.5.	Elektrik Ark Ocağının Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	9
Şekil 2.6.	Elektrik Ark Ocağı İle Çelik Üretimi.....	10
Şekil 2.7.	2020 Yılı Çelikhane cürufu atık ve geri kazanım miktarı.....	11
Şekil 2.8.	Alkalilerle Aktive Edilen YFC'lerin Reaksiyon Mekanizması.....	15
Şekil 2.9.	C-S-H ve C-A-S-H jellerinin yapısı.....	16
Şekil 4.1.	Deneyde kullanılan çelikhane cürufu.....	26
Şekil 4.2.	Deneyde kullanılan Sodyum Meta Silikat.....	27
Şekil 4.3.	Hobart mikseri ve sarsma tablası.....	30
Şekil 4.4.	Kıvam (işlenebilirlik) deneyi.....	31
Şekil 4.5.	Kılcal su emme deneyine tabi tutulmuş harç numuneleri.....	34
Şekil 4.6.	Eğilme Dayanımı deneyine tabi tutulan bir harç numunesi.....	35
Şekil 4.7.	Basınç dayanımı deneyine tabi tutulan bir harç numunesi.....	36
Şekil 4.8.	Ultrasonik Test uygulanan harç numunesi.....	37
Şekil 4.9.	Asit içerisinde bekletilen harç numuneleri.....	38
Şekil 4.10.	Yüksek sıcaklık deneyi uygulanan numuneler.....	39
Şekil 5.1.	Kıvam deneyi uygulanan harç numunelerini yayılma çapları.....	41
Şekil 5.2.	Harç numunelerinin boşluk ve su emme oranı değişimleri.....	43
Şekil 5.3.	Etüv kürü zamana göre su emme miktarları.....	44
Şekil 5.4.	Buhar kürü zamana göre su emme miktarları.....	45
Şekil 5.5.	Su kürü zamana göre su emme miktarları.....	45
Şekil 5.6.	Kılcallık katsayıları.....	47
Şekil 5.7.	Etüv kürü uygulanan numunelerin eğilme dayanımı.....	48
Şekil 5.8.	Buhar kürü uygulanan numunelerin eğilme dayanımı.....	48
Şekil 5.9.	Su ve havada kürlenen numunelerin eğilme dayanımı.....	49
Şekil 5.10.	Etüv kürü uygulanan harç numunelerinin basınç dayanımı.....	50
Şekil 5.11.	Buhar kürü uygulanan harç numunelerinin basınç dayanımı.....	50
Şekil 5.12.	Su ve havada kürlenen numunelerin basınç dayanımı.....	51
Şekil 5.13.	Harç numunelerinin ultrasonik geçiş hızları.....	53
Şekil 5.14.	Asit içinde bekletilen numunelerin dayanım değişimleri.....	56
Şekil 5.15.	Asit içinde bekletilen numunelerin dayanım değişimleri.....	57
Şekil 5.16.	300°C'de numunelerin basınç dayanımı değişimi.....	59
Şekil 5.17.	600°C'de numunelerin basınç dayanımı değişimi.....	61

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	ASTM C 311 Puzolanik Aktivitenin Ölçümü İçin Gereken Oranlar	5
Tablo 2.2.	Çelikhane Cüruflarının Kimyasal Kompozisyonu	10
Tablo 2.3.	Alkalilerle aktive edilen bağlayıcıların tarihsel gelişimleri	13
Tablo 4.1.	CEM I 42.5 R Portland Çimentosunun Kimyasal Bileşimi	25
Tablo 4.2.	Çelikhane Cürufunun Kimyasal Bileşimi	25
Tablo 4.3.	Sodyum Meta Silikatın (Na_2SiO_3) Kimyasal Bileşimi.....	26
Tablo 4.4.	Deneyde kullanılan elek analizi	27
Tablo 4.5.	Kontrol Numunesi ve Harç Numunelerinin Karışım oranları.....	28
Tablo 4.6.	Puzolanik Aktivasyon Harç Karışım Oranları	31
Tablo 4.7.	Ultrasonik Testle Beton Kalitesinin Değerlendirilmesi	37
Tablo 5.1.	Puzolanik Aktivasyon Testi Sonuçları	40
Tablo 5.2.	Harç numunelerinin yayılma çapları	40
Tablo 5.3.	Harç numunelerinin boşluk ve su emme oranları.....	41
Tablo 5.4.	Zamana göre kılcal su emme miktarları.....	43
Tablo 5.5.	Numunelerin kılcallık katsayıları	46
Tablo 5.6.	Harç numunelerinin ses iletim hızı.....	52
Tablo 5.7.	Asit içinde bekletilen numunelerinin dayanımları	53
Tablo 5.8.	Asit içinde bekletilen numunelerinin dayanım değişimleri.....	54
Tablo 5.9.	300°C’de numunelerin ağırlık ve dayanım değişimi.....	57
Tablo 5.10.	600°C’de numunelerin ağırlık ve dayanım değişimi.....	59
Tablo 5.11.	Harç numunelerinin genel değerlendirmesi	62
Tablo 5.12.	Harç numunelerinin maliyet analizi	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

W_K	: Etüv kuru ağırlığı, g
W_{DYK}	: Doymun kuru yüzey ağırlığı, g
W_{SU}	: Su içindeki ağırlığı, g
c	: Kılcallık katsayısı ($gr/cm^2dk^{0.5}$)
m_t	: t sürede numunenin absorbe ettiği su miktarı (g)
A	: Numunenin suyla temas ettiği yüzey alanı (cm^2)
σ_E	: Eğilmede çekme dayanımı, (N/mm^2)
σ_B	: Basınç dayanımı, N/mm^2
b	: Numunenin eni, (mm)
d	: Numune yüksekliği, (mm)
L	: İki mesnet arasındaki mesafe, (100 mm)
P	: Numuneye uygulanan yük, (Newton)

Kısaltmalar

AA-ÇC	: Alkali Aktif Çelikhane Cürufu
ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerika Test Materyalleri Topluluğu)
TSE	: Türk Standartlar Enstitüsü

ALKALİ AKTİVATÖRLER KULLANILMIŞ ÇELİKHANE CÜRUFU HARÇLARIN MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Geleneksel Portland çimentoları üretimi sırasında atmosfere çok fazla CO₂ salınımı gerçekleştirmektedir. Bunun neticesinde günümüzün en büyük problemlerinden biri olan küresel ısınma meydana gelmekte ve çevre felaketleri yaşanmaktadır. Geleneksel Portland çimentosunun üretimi esnasında çevreye vermiş olduğu bu zararlar, bilim insanlarını çimentoya alternatif olabilecek yapı malzemelerini keşfedebilmek amacıyla çalışmalar yapmaya sürüklemiştir. Bu noktada, doğada geri dönüştürülemeyen endüstriyel atıklardan alümino-silikat içeren cüruflar araştırmalara konu olmuştur. Alümino-silikat içeren cüruflar, alkali bir aktivatörlerle reaksiyon gerçekleştirerek çimentoya ihtiyaç duymaksızın bağlayıcılık özelliği kazanabilmektedir. Bu olaya geopolimerizasyon, bu yolla meydana gelen yapı malzemelerine de geopolimer malzeme adı verilmektedir. Geopolimerler, üretimi sırasında hem daha az CO₂ emisyonu gerçekleştirip hem de doğada geri dönüştürülme imkânı olmayan endüstriyel atıkları kullanarak çimento yerine sürdürülebilir bir çevre temizliğine olanak sağlamaktadır. Bu çalışma, endüstriyel bir atık olan ve inşaat sektöründe genellikle kara yolu stabilizasyon malzemesi ya da agrega olarak kullanılan çelikhane cüruflarının, geopolimer teknolojisinde kullanımına uygunluğunu araştırmak amacıyla yapılmıştır. Çelikhane cürufları, Na₂SiO₃ (Sodyum Meta Silikat) aktivatörü kullanılarak aktive edilmiştir. Ağırlıkça %4-6-8-10-12 oranında Na (Sodyum) içerecek şekilde aktivatör kullanılarak tasarlanan harçlar, 4x4x16 cm ebatlarındaki kalıplara dökülmüş, etüv, buhar (nemli etüv), su ve hava kürü olmak üzere 4 farklı kürleme metoduna tabi tutulmuştur. Kürlenme süresi tamamlanan numunelere kıvam, birim hacim ağırlık, kılcal su emme, eğilme ve basınç dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı, asit etkisi, yüksek sıcaklık deneyleri uygulanmıştır. Çalışmalar neticesinde, harçların 20 MPa üzerinde basınç dayanımlarına erişebildiği ve çevresel faydaları sebebiyle yüksek mukavemet gerektirmeyen mühendislik uygulamalarında kullanılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkali Aktivatörler, Basınç Dayanımı, Çelikhane Cürufu.

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF STEEL MORTAR USED WITH ALKALINE ACTIVATORS

ABSTRACT

Traditional Portland cements release a lot of CO₂ into the atmosphere during production. As a result of this, global warming, one of the biggest problems of today, occurs and environmental disasters are experienced. These damages to the environment during the production of traditional Portland cement have led scientists to conduct studies in order to discover building materials that can be alternatives to cement. For this reason, slags containing alumino-silicate from industrial wastes that cannot be recycled in nature have been the subject of research. Slags containing alumino-silicate can get binding properties without the need for cement by reacting with an alkaline activator. This event is known as geopolymerization, and the building materials formed in this method are called geopolymer materials. Geopolymers enable a sustainable environmental cleaning instead of cement by producing less CO₂ emissions and using industrial wastes that cannot be recycled in nature. This research was done to determine whether steel slag, an industrial waste that is often utilized as aggregate or road stabilization material in the construction sector, will using with geopolymer technology. The Na₂SiO₃ (Sodium Meta Silicate) activator was used to activate the steel slags. The mortars were put into 4x4x16 cm molds and exposed to 4 different curing processes, including oven, steam (moist oven), water, and air curing. The mortars were created utilizing activator to include 4-6-8-10-12% by weight of Na (Sodium). Tests of consistency, unit volume weight, capillary water absorption, flexure and compressive strength, ultrasonic sound transmission rate, acid effect, high temperature tests were applied to the samples whose curing period was completed. According to this research, it has been determined that the mortars can reach compressive strengths above 20 MPa and can be used in engineering applications that do not require high strength due to their environmental benefits.

Keywords: Alkali Activators, Compressive Strength, Steel Slag.

1. GİRİŞ

Beton; uygulanabilirliği, mekanik ve dayanıklılık özelliği, uygun maliyeti ve performansı gibi özellikleri sayesinde günümüzde en yaygın şekilde kullanılan yapı malzemesidir (Meyer, 2009). Türkiye Hazır Beton Birliği'nin "2021 yılı Hazır Beton Sektör Raporu" verilerine göre ülkemizde 1988 yılında 1,5 milyon m³ hazır beton üretimi yapılırken 2020 yılında bu sayı 95 milyon m³'e çıkmıştır (THBB, 2021). Ancak beton, tüm bu avantajlarının ve popülerliğinin yanında bazı dezavantajları da bünyesinde barındırmaktadır.

Sera gazları günümüzün en önemli problemlerinden biri olarak addedilmektedir. Sera gazları emisyonuna bağlı olarak iklim değişiklikleri gerçekleşmekte ve buna bağlı olarak da çevre felaketleri meydana gelmektedir.

Betonun en büyük yapı taşlarından birini oluşturan ve bağlayıcı malzeme olarak kullanılan Portland Çimentosunun yıllık üretimi, 2019 yılı itibarıyla 4,1 milyar tonu bularak dünyada kişi başına yarım tonu geçmiş, ülkemizde ise 2020 yılında üretilen Portland Çimentosu miktarı 72,30 milyon tonu bulmuştur (Sanayi Genel Müdürlüğü, 2021).

Portland Çimentosu, üretimi esnasında doğal kaynakların kullanması ve kalsinasyonun oluşması için gereken yakıtın yanmasıyla sera gazı emisyonunun önemli bir kısmını oluşturmaktadır ve 1 ton Portland Çimentosu üretimiyle havaya yaklaşık olarak 900 kg CO₂ salınımı yapılmaktadır (Mahasen ve diğ., 2002).

Portland Çimentosunun iklim değişiklikleri ve çevre felaketlerinin oluşmasında oynadığı bu rol, bilim insanlarını alternatif bağlayıcı malzeme arayışına sürüklemiştir. Bu bağlamda bağlayıcı malzeme olarak, hali hazırda atık bir malzeme olan ve doğada kendiliğinden geri dönüşümü olmayan uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların kullanılabilirliği araştırmalara konu olmuştur.

Kendi başlarına kullanıldıklarında hidrolik bağlayıcılık özellikleri düşük olan bu tür puzolanlar, alkali bir aktivatörle birlikte kullanıldıklarında hidrolik bağlayıcı özelliği kazanabilmektedir. Puzolanların içerisinde alümino-silikat içeriğinin Sodyum Hidroksit (NaOH), Sodyum Meta Silikat (Na₂SiO₃), Potasyum Hidroksit (KOH) gibi alkalilerle

aktive edilme işlemine geopolimerizasyon, bu yolla üretilmiş yapı malzemelerine de geopolimer malzeme adı verilmektedir.

Geopolimerizasyon işlemi için, alümino-silikat öncüllerinin ve alkali çözeltilerinin nispeten düşük bir sıcaklıkta pişirilmesi veya önişlemeden geçirilmesi gerekir. İşlem, oda sıcaklığından 150° C'ye kadar olan sıcaklıklarda tamamlanabilir ve üretim sürecinde NO_x, SO_x ve CO₂ emisyonu da çok düşüktür (Guo ve Pan, 2018).

Geopolimerlerin yüksek erken dayanım büyümesi, asit ve sülfat saldırılarına karşı güçlü direnç göstermesi, yüksek sıcaklıkta iyi performans sağlaması, çimento kullanımını en aza indirerek sera gazı salınımını önemli bir oranında azaltmasından dolayı, günümüzde Portland çimentosuna potansiyel bir alternatif olarak görülmektedir (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2009).

Çelikhane cürufu da tıpkı yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi doğada kendiliğinden geri dönüşümü olmayan endüstriyel bir atık malzemedir ve bünyesinde alümino-silikatlar yer almaktadır. Çelikhane cürufu, bugüne kadar yapılan çalışmalarda genellikle karayolu stabilizasyon malzemesi, dolgu malzemesi ve betonda agrega olarak kullanılmıştır. Çelikhane cüruflarının geopolimer teknolojisinde kullanılması üzerine ise dünyada yapılmış çok az sayıda çalışma vardır.

Bu çalışma kapsamında bağlayıcı malzeme olarak çelikhane cürufu ve alkali aktivatör olarak Sodyum Meta Silikat (Na₂SiO₃) kullanılmıştır. Çalışmada Alkali Aktif Celikhane Cürüflü (AA-ÇC) harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Deney kapsamında üretilen numunelere; puzolanik aktivasyon testi, kıvam, birim hacim ağırlık-su emme-boşluk oranı de, kılcal su emme, eğilme ve basınç dayanımı, ultrasonik ses geçişi, asit etkisine dayanıklılık ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık deneyleri uygulanmıştır. Harç numunelerinde en iyi kürlenme metoduna ulaşabilmek amacıyla hava kürü, su kürü, etüv kürü ve buhar kürü olmak üzere 4 farklı kür koşulu uygulanmıştır. Harçların aktive edilmesi için gerekli optimum aktivatör içeriğini bulmak amacıyla da 5 farklı oranda Na₂SiO₃ (Sodyum Meta Silikat) aktivatörü kullanılmıştır. Aktivatör oranı ise aktivatör içindeki Na (Sodyum) miktarının, bağlayıcı miktarına oranının %4, %6, %8, %10, %12'si olacak şekilde belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Puzolanlar

Puzolanlar, tek başına kullanıldığında bağlayıcılık özelliği göstermeyen veya çok düşük bağlayıcılık özelliği gösteren, ancak ince taneli duruma getirildiklerinde ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Kalsiyum Hidroksit) ile sulu bir ortamda birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanabilen amorf yapıdaki silisli ve alüminli malzemeler olarak tarif edilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Milattan önceki dönemlerde Roma İmparatorluğunda yaşamış olan ünlü mimar Marcus Vitruvius Pollio “Mimarlık Üzerine On Kitap” adlı eserinde puzolanik malzemelerin kullanımından bahsetmiştir. Vitruvius, bu malzemenin İtalya’nın Baiae Bölgesi’nde Vezüv Yanardağı’nın etrafında bulunduğunu, kireçle ve taşla birleştiğinde her türlü yapılara dayanım sağlayabileceğini ve deniz yapılarında da kullanılabileceğini belirtmiştir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Puzolan kelimesinin kökeni de İtalya’nın Vezüv Yanardağı’nın eteğinde bulunan kasabalardan biri olan “Pouzzoli” kasabasından gelmektedir. Romalılar, puzolanların hidrolik bağlayıcı özelliğini keşettikten sonra su kemerlerinde ve yol yapımı başta olmak üzere, köprü, tapınak ve liman yapıları gibi birçok yerde kullanmıştır. Ayrıca bu malzemelerin Neolitik dönemde “puzolan” olarak adlandırılmasa da milattan önce 8000’li yıllarda Anadolu’da da kullanıldığı yapılan çalışmalarla ortaya çıkmıştır.

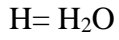
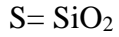
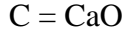
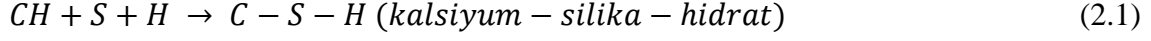
Puzolanlar, doğal ve yapay puzolanlar olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal puzolanlar, çoğunlukla volkanik kökenli olan ve yeryüzünde kendi hali hazırda var olan volkanik küller, volkanik tüfler, traslar, diatomlu topraklar gibi malzemeler olarak tanımlanırken yapay puzolanlar, endüstriyel bir ürünün üretimi esnasında açığa çıkan ikincil ürün olarak tanımlanmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve çelikhane cürufu gibi malzemeler yapay puzolan olarak adlandırılmaktadır.

2.1.1. Puzolanik Reaksiyon ve Puzolanik Malzemelerin Aktivitesi

Puzolanlar, içerisinde önemli ölçüde silis ve alümin ihtiva etmektedir. İnce bir şekilde öğütülmüş puzolanlar, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve suyla birleştirildiğinde bazı kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirmektedir. Puzolanın içinde bulunan aktif silisin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve suyla reaksiyona

girmesiyle hidratasyon ürünü olarak C-S-H (kalsiyum-silika-hidrat) meydana gelmekte bu da betonun dayanımında artış olmasını sağlamaktadır (Erdoğan, 2021).

Bu reaksiyon, denklem (2.1)'de gösterildiği üzere basit bir şekilde;



olarak ifade edilebilir (Bilim, 2006).

Puzolanik malzemelerin $Ca(OH)_2$ ve su ile reaksiyona girebilme yeteneği ile hangi ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği sonucuna "Puzolanik Aktivite" adı verilmektedir. Puzolanik malzemelerin gerekli aktiviteyi sağlayabilmesi için ince taneli ve yeterince silis, alümin ve demir oksit içermesi gerekmektedir (Erdoğan, 2021).

Puzolanik malzemelerin aktivitesi, ASTM C 311 standartlarına göre birisi puzolanlı harç numunesi diğeri Portland çimentolu harç numunesi olmak üzere iki farklı harç karışımı hazırlanarak bulunabilir. Tablo 2.1.'de gösterilen oranlarla hazırlanan harç karışımları 7. ve 28. günün sonunda basınç dayanımı deneyine tabi tutulurlar. Puzolanik aktivasyon, denklem (2.2)'de gösterilen puzolanik aktivite indeksinin bulunmasıyla hesaplanır. Bu değer;

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (2.2)$$

A= Puzolan içeren harç numunesinin basınç dayanımı

B= Portland çimentolu kontrol harç numunesinin basınç dayanımı

olarak hesaplanmaktadır.

Deneyde kullanılan puzolanın, puzolanik aktif malzeme olarak kabul edilebilmesi için “Dayanım Aktivite İndeksi”, ASTM standartlarına göre %75’ten az olmamalıdır.

Tablo 2.1. ASTM C 311 Puzolanik Aktivitenin Ölçümü İçin Gereken Oranlar

	Kum (g)	Çimento (g)	Puzolan (g)	Su (g)
R	1350	500	-	242
Puzolan Num.	1350	400	100	242

2.1.2. Puzolan Kullanımının Betona Etkileri

Puzolanlar, ince taneli durumda kullanıldıklarında betonun özelliklerine olumlu ya da potansiyel olarak zararlı etkilerde bulunabilir. Puzolanların beton özelliklerine olumlu etkileri;

- Taze betonu daha işlenebilir hale getirmek
- Taze betonda meydana gelen terlemeleri azaltmak
- Betonun hidrasyon ısısını azaltmak ve kütle betonlardaki çatlamaı engellemek
- Sertleşmiş betonun su geçirgenliğini azaltmak
- Sertleşmiş betonun sülfat direncini artırmak
- Sertleşmiş betondaki alkali-silika reaksiyonu azaltmak
- Ekonomiklik sağlamak

olarak sayılabilirken, potansiyel zararlı etkileri de;

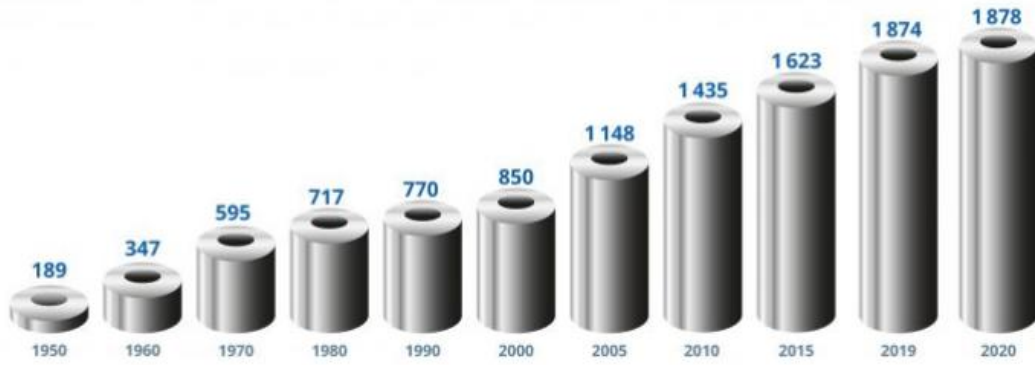
- Soğuk havalarda dökülen betonun priz alma süresini uzatmak
- Betonun erken dayanım almasını engellemek
- Portland çimentosuna göre dikkatli kür edilmediği takdirde yaşanabilecek sorunlar
- Daha çok hava sürükleyici katkı maddesi kullanımı gerektirmesi

olarak sıralanabilir.

2.2. Çelikhane Cürufu

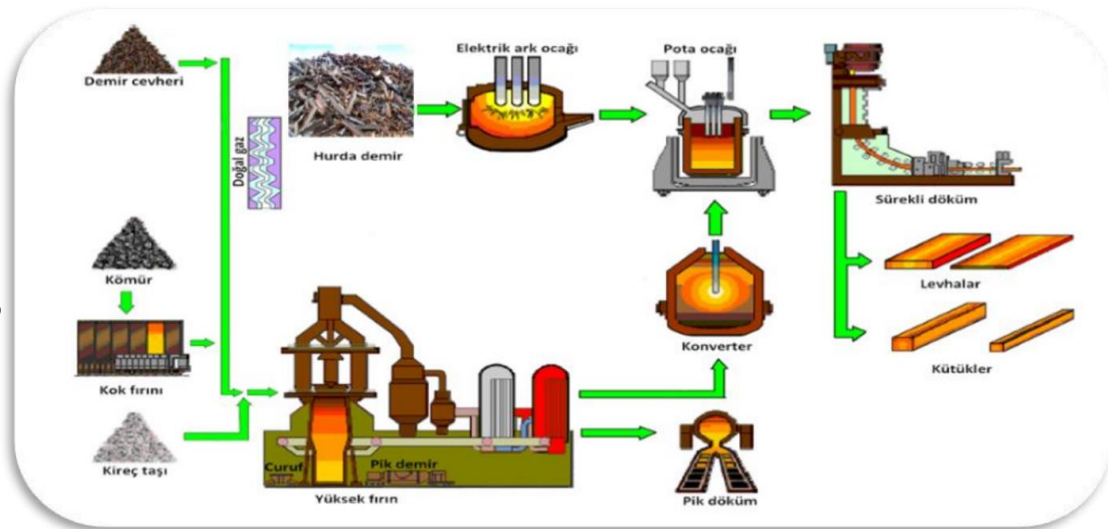
Çelik, dünyada çok yaygın olarak kullanılan bir malzemedir ve popülerliği de giderek artmaktadır. Dünya Çelik Birliğinin (WSA) yayınlamış olduğu rapora göre dünyada çelik

üretimi 2000 yılında 850 milyon ton iken 2020 yılında bu rakam 1878 milyona ulaşmıştır (WSA, 2021). Çelik üretimi ülkemizde de giderek artmaktadır. Ülkemizdeki çelik üretim miktarı 2004 yılında 20,5 milyon tonlarda iken, 2021 yılında üretim 40,4 milyon tonu bulmuştur. Öte yandan demir-çelik sektörü, ekonomik olarak da ülkemizin en gelişmiş sektörlerden birisi konumundadır. 2021 yılında yapılan 22,4 milyar dolarlık ihracatla toplam ihracat hacmimizin %10'unu oluşturmaktadır (URL-1).



Şekil 2.1. 1950-2020 Yılları Arası Üretilen Çelik Miktarı (Milyon Ton)

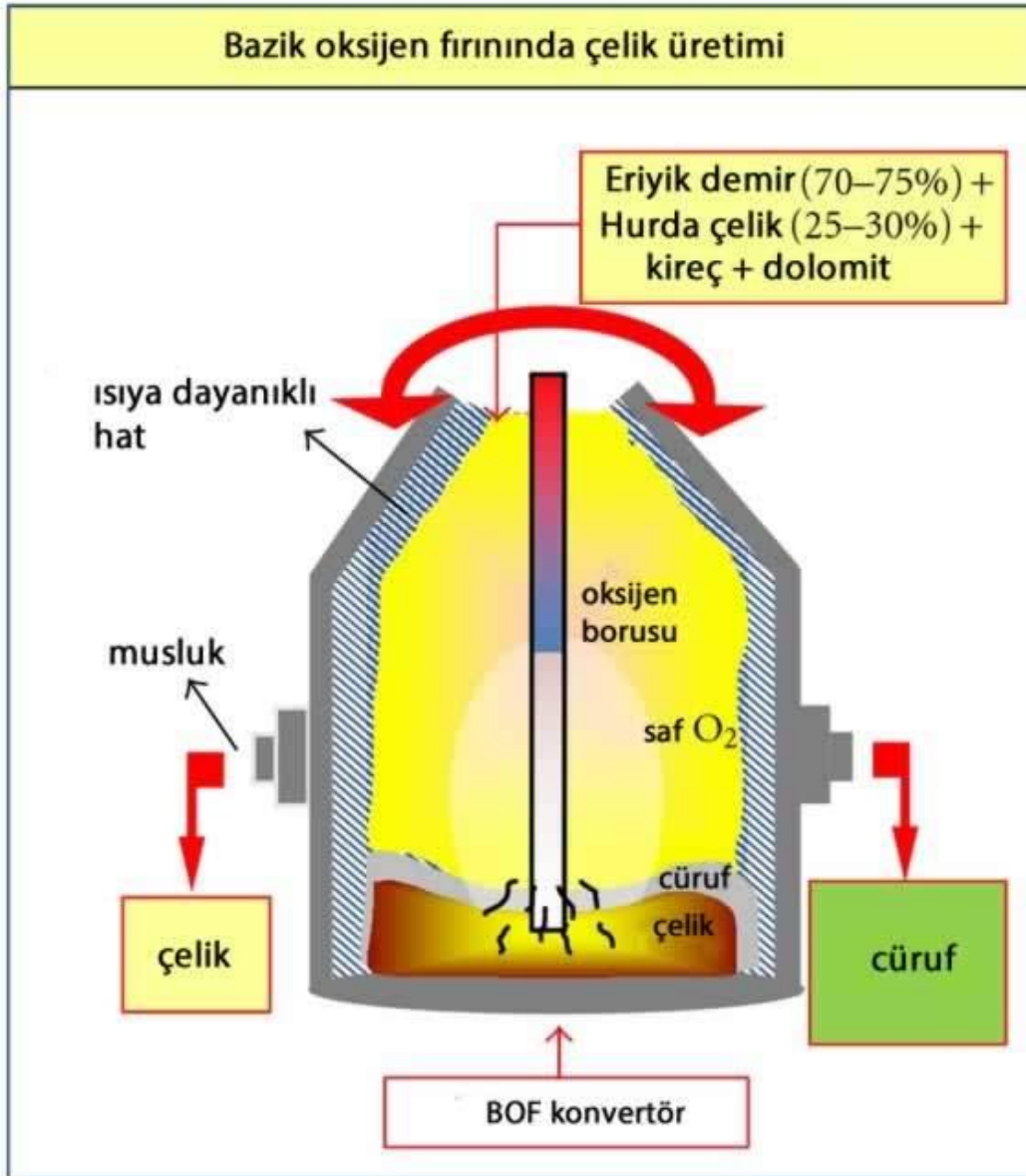
Ülkemizde çelik üretimi; hammaddesinin büyük çoğunluğunu demir cevheri, bir kısmını da hurdaların oluşturduğu Yüksek Fırınlı Bazık Oksijen Fırınlarında (BOF) ve hammaddesini hurdaların oluşturduğu Elektrik Ark Ocaklarında (EAO) gerçekleşmektedir (Sanayi Genel Müdürlüğü, 2021-2).



Şekil 2.2. Çelik Üretim Süreci Genel Görünümü (Sanayi Genel Müdürlüğü, 2021-2)

Bazık Oksijen Fırınları (BOF), yüksek fırınlardan gelen ergiyik haldeki pik demirin, sıvı çelik haline getirildiği konverterlerdir. Fırının bazık olarak adlandırılmasının nedeni, fırında koruyucu ve yalıtkan bir tabaka oluşturmak için yapılan fırın astarlamasında kullanılan bazık karakterli refrakterlerden dolayıdır.

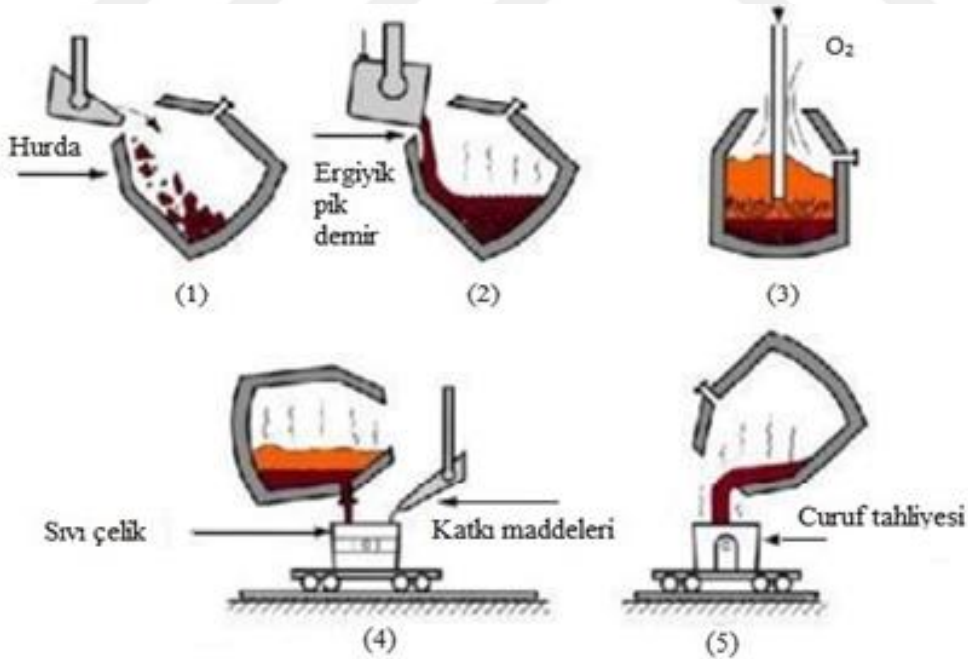
Bazık Oksijen Fırınlarında çelik üretimi yapılırken genellikle %70-75 oranında yüksek fırından gelen sıvı metal, %25-30 oranında hurda ve cüruf yapıcılar kullanılır.



Şekil 2.3. Bazık Oksijen Fırınının Yapısı ve Çalışma Prensibi (URL-2)

Bazık oksijen fırınında üretim aşaması aşağıdaki sıralamaya göre gerçekleşir:

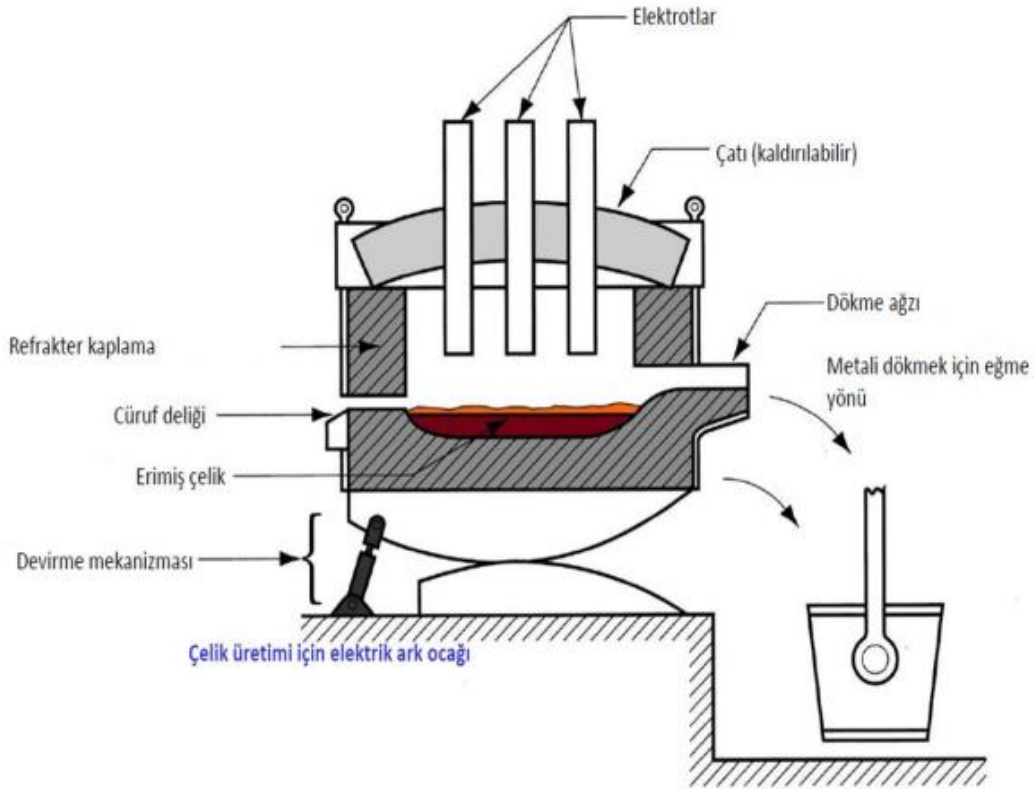
Bazik oksijen fırını, yaklaşık 45°C'lik bir açığa getirilerek içine gereken miktarda hurda boşaltılır. Akabinde hurda malzemenin üzerine ergiyik halde pik demir ilave edilir. Bu işlemin ardından konverter tekrar dikey konuma getirilerek oksijen borusu hurda ve ergimiş demir karışımının içine hava üfleyebilecek duruma getirilir. Burada oksijen kullanılmasının amacı sıvı haldeki metali daha iyi ısıtıp daha hızlı reaksiyonlar elde etmektir. Oksijenin verilmeye başlamasının ardından konvertere, belirlenen oranlarda kireç (CaO) ve dolomit gibi cüruf yapıcı katkı malzemesi ilavesi yapılır. Kireç, ergiyik haldeki demirin içinde bulunan, ancak istenmeyen Silisyum (Si) ve Fosfor (P) elementlerle birleşerek cürufları meydana getirir. Çeliğin içerisinde kalmış olan Silisyum ve Fosfor miktarı, olması gereken miktarın üzerindeyse kireç ilavesi yapılarak azaltılır. Döküm sıcaklığı istenilen seviyeye geldiğinde fırın döküm tarafına eğilir ve metal, döküm musluğundan potaya alınır. Üretilen çeliğin cinsine göre alaşım elementleri ve katkı malzemeleri ilave edilir. Döküm işleminin tamamlanmasının ardından diğer döküm musluğundan cüruflar alınır. Bu işlemin ardından cüruftan ayrıştırılan ve döküm potasına alınan eriyik demir ikincil bir metalürji işleminden geçerek tekrar saflaştırılır ve ardından dökümü yapılır.



BOF yönteminin aşamaları: (1) hurda yüklemesi, (2) yüksek fırından gelen pik demir, (3) O₂ üfleme, (4) sıvı çeliğin alınması, alaşım elementleri ve bazı ilavelerin katılması, (5) cürufun atılması

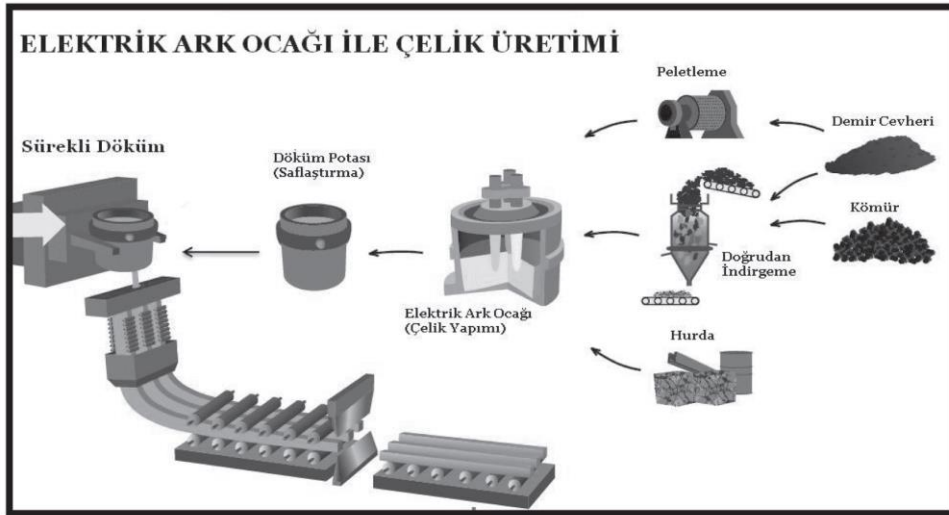
Şekil 2.4. Bazik Oksijen Fırınıyla Çelik Üretimi Aşamaları (URL-3)

Elektrik ark ocağı metodu, çelik üretimine çok elverişli olduğundan dolayı dünyada ve ülkemizde en yaygın olarak kullanılan çelik üretim yöntemidir. Elektrik ark ocaklarının bazik oksijen fırınlarından farkı; çelik üretiminde, yüksek fırınlardan gelen ergimiş haldeki pik demirin hiç kullanılmayıp üretimin tamamen hurdalardan yapılmasıdır. Hurdalar, elektrik ark ocağına bir vinç yardımıyla yukarıdan boşaltılır ve ocağın kapağı kapatılır. Bu kapakta, ocağa indirilecek üç adet elektrot için boşluk bulunur. Kapağın üzerinde yer alan sistemde, fırının içine inip çıkabilen grafit elektrotlar yer almaktadır. Elektrotlara verilen akım, bir elektrik ark meydana getirir ve bunun sonucunda da ısı açığa çıkar. Açığa çıkan bu ısı da hurdayı ertirir.



Şekil 2.5. Elektrik Ark Ocağının Yapısı ve Çalışma Prensibi (URL-3)

Ergimiş haldeki metali saflaştırmak amacıyla tıpkı bazik oksijen fırınlarında yapılan işlem gibi fırının içine oksijen üflenebilir. Ardından fırın, ergimiş çeliği potaya aktarabilmek için yaklaşık 45° 'lik bir açıyla yana yatırılır ve döküm potasına aktarılır. Bu işlemin ardından cüruftan ayrıştırılan ve döküm potasına alınan eriyik demir ikincil bir metalürji işleminden geçerek tekrar saflaştırılır ve ardından dökümü yapılır.



Şekil 2.6. Elektrik Ark Ocağı İle Çelik Üretimi (Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, 2015)

Çelikhane cürufları, bazik oksijen fırındaki ve elektrik ark ocaklarındaki metotlarla yapılan çelik üretimindeki ergimiş metalin rafinasyonu ve oksitlenmesi sırasında, yoğunlukları çeliğin yoğunluğundan daha az olduğu için çeliğin üzerinde oluşurlar. 1300 °C’yi bulan ve daha üzerindeki sıcaklıklarda da ocaktan alınırlar. Pota ocağında yapılan ikincil metalurji işlemlerinde de cüruflar meydana gelir (TÇÜD, 2015). Çelikhane cürufları, 1300°C’den yüksek sıcaklarda meydana geldiğinden organik, yarı-organik ya da uçucu bileşikler içermezler. Yapılarında, Kalsiyum (Ca) , Demir (Fe), Silisyum (Si), Alüminyum (Al), magnezyum oksitler ve kalsiyum-silikat, alümino-silikat, alümino-ferrit gibi içerikleri ihtiva ederler.

Çelikhane cüruflarının kimyasal kompozisyonu, kullanılan fırın tipine ve üretim koşullarına göre değişmektedir. Tablo 2.2’de bazik oksijen fırında ve elektrik ark ocağında üretilmiş çelikhane cüruflarının kimyasal kompozisyonu gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Çelikhane Cüruflarının Kimyasal Kompozisyonu (Yi ve diğ., 2012)

Oksitler(%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	P ₂ O ₅
BOF Cürufu	45-60	10-15	1-5	3-9	7-20	3-13	2-6	1-4
EAO Cürufu	30-50	11-20	10-18	5-6	8-22	8-13	5-10	2-5

Demir-Çelik üretiminden meydana gelen bu atıklar, doğada kendiliğinden geri dönüşümü olmayan malzemelerdir. Geri kazanımları yapılmadığı takdirde bu atıklar cüruf dağları oluşturmakta, bu da ekolojik dengeyi tehdit etmektedir. Ülkemizde, çelikhane cürufunun geri kazanım oranı 2015 yılında %38,71 iken, bu rakam 2020 yılından %75,70'e yükselmiştir. Şekil 2.7. de 2020 yılında oluşan çelikhane cürufunun bölgelere göre geri kazanım oranları gösterilmiştir.

2020 Yılı Çelikhane Cürufu Atık ve Geri Kazanım Miktarı (Ton)				
	Çelikhane Cürufu	Atık/Bertaraf	Geri Kazanım	Geri Kazanım Oranı (%)
Akdeniz	1.967.842	351.527	1.616.315	82,14
İzmir	1.317.594	288.203	1.029.391	78,13
Karadeniz	1.205.806	180.403	1.025.463	85,04
Marmara	1.668.516	676.640	991.876	59,45
Toplam Geri Kazanım Oranı (%)				75,70

Şekil 2.7. 2020 Yılı Çelikhane cürufu atık ve geri kazanım miktarı

Çelikhane cüruflarının farklı yollarla geri kazanımı yapılabilmektedir. Bunlar:

- Karayolu üst yapılarında doğal agrega olarak kullanılması
 - Demiryolu balast malzemesi olarak kullanılması
 - Beton agregası olarak kullanılması
 - Deniz dolgusu ve liman inşaatlarında kullanılması
 - Çimento katkı malzemesi olarak kullanılması
 - Gübre üretiminde kullanılması
 - Raspalama kumu olarak kullanılması
 - Refrakter üretiminde kullanılması
 - Atık su arıtma tesislerinde kullanılması
- olarak sıralanabilir.

2.3. Alkali Aktivatörler ve Aktivasyon Sistemi

Bağlayıcı malzemelerin yüzey alanı ve kimyasal içeriği geopolimerlerin aktivasyonunu etkilemektedir. Aktivasyonun gerçekleşebilmesi için parçacık boyutunun küçük ve camsı faz içeriğinin fazla olması gerekir. Ancak bağlayıcıların içerdiği camsı faz, su ile karşılaştığında bağlayıcılık özelliği kazanamaz. Bu camsı faz, bir alkali aktivatör kullanılarak aktive edildiğinde bağlayıcılık özelliği kazanabilmektedir.

Geopolimer teknolojisinde farklı aktivatörler kullanılabilir. NaOH (Sodyum Hidroksit), Na_2SiO_3 (Sodyum Meta Silikat), KOH (Potasyum Hidroksit) ve K_2SiO_3 (Potasyum Silikat) en çok bilinen aktivatörlerdir ancak potasyum içeren aktivatörlerin maliyetleri sodyum içerenlere kıyasla fazla olduğundan, yapılan çalışmalarda sodyum bazlı aktivatörlerin kullanımı daha yaygın durumdaydı (Zhang ve diğ., 2020).

Portland çimentosu çok iyi bağlayıcılık özelliği olan ve insanların ihtiyaçlarına cevap verebilen yapı malzemesidir ancak çimentonun üretilmesi için gerekli hammaddelerin çok yüksek sıcaklıklarda pişirilmesine ihtiyaç vardır. Bu sıcaklıklara ulaşabilmek için fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Hammaddelerin pişirilmesinden ve fosil yakıtlardan kaynaklı CO_2 emisyonu gerçekleşmektedir. 1 ton Portland çimentosu üretilirken beraberinde 0,95-1 ton CO_2 emisyonu gerçekleşmektedir (Ma 2016). Bu durum dünyamız için çok büyük bir tehlike arz etmektedir. Hem doğal kaynakların kullanılması hem de yüksek orandan CO_2 salınımı, bilim insanlarını alternatif çalışmalar yapmaya sürüklemiştir.

Puzolanik içerikli malzemelerin alkalilerle aktive edilmesiyle yeni bir bağlayıcı elde edilmektedir. Buna geopolimer malzeme adı verilmektedir. Geopolimerler, Portland çimentosunun aksine çok düşük miktarlarda CO_2 emisyonu gerçekleştirmektedir ve bu rakam ton başına 0,184'tür (Davidovits ve diğ., 1990). Bununla birlikte üretiminde doğal kaynakların kullanılmaması, hali hazırda olan ve doğada geri dönüşümü olmayan endüstriyel atık malzemeleri kullanarak ekolojik dengeye önemli katkıda bulunmuş olur. Geopolimerlerin bu avantajları geçmişten bu yana ilgi konusu olmalarına ve üzerlerinde birçok araştırmanın yapılmasına olanak sağlamıştır. Alkalilerle aktive edilen bağlayıcıların tarihsel gelişimleri Tablo 2.3.'te gösterilmiştir (Pachego-Torgal, 2015).

Tablo 2.3. Alkalilerle aktive edilen bağlayıcıların tarihsel gelişimleri

Yazarlar	Yıl	Tarihsel Gelişmeler
Feret	1939	Çimentoda cüruf kullanılmaya başlanması
Purdon	1940	Alkali-Cüruf kombinasyonlarının yapılması
Glukhovsky	1959	Alkalın çimentoların teorik temelleri ve gelişimleri
Glukhovsky	1965	Alkalın çimentoların kavramının ilk defa kullanılması
Davidovits	1979	Geopolimer teriminin ilk defa kullanılması
Forss	1983	F tipi uçucu kül içeren çimentoların kullanılması
Davidovits & Sawyer	1985	Pyrament çimentolarının patentinin alınması
Deja & Malelepyss	1989	Alkalın çimentoların klorür dirençlerinin araştırılması
Talling & Brandstetr	1989	Cürufların alkalilerle aktivasyonunun yapılması
Wu & diğerleri	1990	Cüruf çimentoların aktivasyonunun yapılması
Roy & diğerleri	1991	Hızlı priz alabilen alkali aktif bağlayıcıların gelişimi
Roy & Silsbee	1992	Alkali aktif bağlayıcılara genel bir bakış
Krivenko	1994	Alkalın Bağlayıcılar
Wang & Scrivener	1995	Alkali aktif cürufların mikroyapılarının incelenmesi
Shi	1996	Alkalilerle aktive edilen cürufların mukavemeti, geçirgenliği ve boşluk yapısı
Fernandez-Gimenez & Puertas	1997	Alkalilerle aktive edilen cüruflu bağlayıcıların kinetik özelliklerinin araştırılması
Katz	1998	Alkalilerle aktive edilen uçucu küllerin mikroyapısı
Davidovits	1999	Geopolimer sistemelerin kimyası ve teknolojisi
Roy	1999	Alkali aktif bağlayıcıların fırsatları ve zorlukları
Bakharev	2001 2002	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf betonu
Duxon	2007	Geopolimer Teknolojisi: Son Teknoloji
Hajimohammadi & diğerleri	2008	Tek bileşenli geopolimerler
Provis & Van Devanter	2009	Geopolimerler: Yapısı, imalatı, özellikleri ve endüstriyel uygulamaları

Alkali aktif bağlayıcıların ana bileşenlerinin keşfedilmesinden bu yana alkali aktivasyonu üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Alkali aktif bağlayıcılar, metakaolin, yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb. malzemelerden veya bu malzemelerin iki veya daha fazlasının karışımları dahil olmak üzere, çeşitli doğal hammaddelerden, endüstriyel yan ürünlerden ve geri dönüştürülmüş alümino-silikatlardan üretilebilir.

Kullanılan malzemelerin ve alkali aktivatörlerinin kimyasal bileşenleri, meydana gelecek bağlayıcıların hidrasyonunda ve mikroyapısal gelişiminde önemli bir pay sahibidir. Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılarla üretilen betonlar, geleneksel Portland çimentosu kullanılmış betonlardan bile daha iyi mekanik dayanım ve dayanıklılık özelliği gösterebilir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015).

Alkali aktif bağlayıcılar, amorf yapıdaki alümino-silikatların alkali aktivatörlerle reaksiyona girmesiyle oluşan malzemelerdir. Alümino-silikatlar alkali aktivatörler ile karıştırıldığında sertleşir ve katılaştır, bunun sonucunda iyi bir hidrolik bağlayıcı özelliğe sahip bir meydana gelir.

Bağlayıcı olarak kullanılacak puzolanlar, kimyasal bileşenlerine ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) göre yüksek kalsiyumlu ve düşük kalsiyumlu olarak iki gruba ayrılabilir. Aralarında; aktivasyon modeli, aktivasyon koşulları, hidrasyon sırasında açığa çıkan birincil ürün ve ikincil ürün gibi farklar mevcuttur. Yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu gibi malzemeler yüksek kalsiyum içeren gruba girerken metakaolin ve F tipi uçucu kül gibi malzemeler de düşük kalsiyum içeren malzemeler grubuna girmektedir.

Yüksek Kalsiyum içeren malzemeler, düşük Kalsiyum içeren malzemelere kıyasla daha ılımlı koşullar altında aktive edilebilmektedir. Düşük Kalsiyum içeren malzemelerin aktive edilebilmesi için daha agresif koşullar (daha yüksek sıcaklarda kürlenme, daha yüksek alkali aktivatör içeriği) gerekmektedir.

Yüksek kalsiyum içeren cürufların, geopolimer teknolojisine uygun bir bağlayıcı olarak kullanılabilmesi için bazı kriterler ve gerçekleşen reaksiyonlar denklem (2.3), (2.4), (2.5) ve (2.6) ile aşağıda sıralanmıştır.

- Granül durumda olmalı ve %85-95 camsı faz içeriğine sahip olmalıdır.
- Blaine yüzey alanı $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ 'dan düşük olmamalıdır.

- pH durumu bazik olmalıdır. Yani;

$$\frac{CaO+MgO}{SiO_2} > 1 \text{ olmalıdır.} \quad (2.3)$$

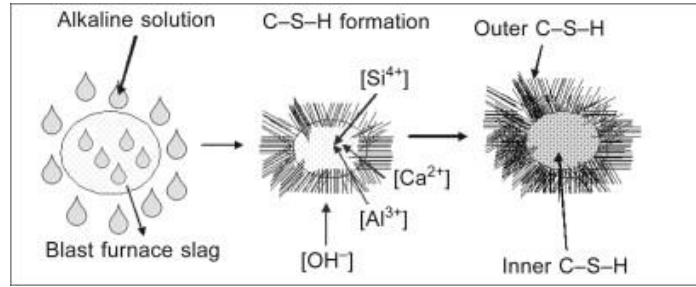
Alkalilerle aktive edilen yüksek kalsiyum içeren bağlayıcıların reaksiyon dizileri aşağıda gösterilen denklemdaki gibi modellenenabilir.

$$= Si - O^- - R^+ == Si - O - R \quad (2.4)$$

$$= Si - O - R + OH^- == Si - O - R - OH^- \quad (2.5)$$

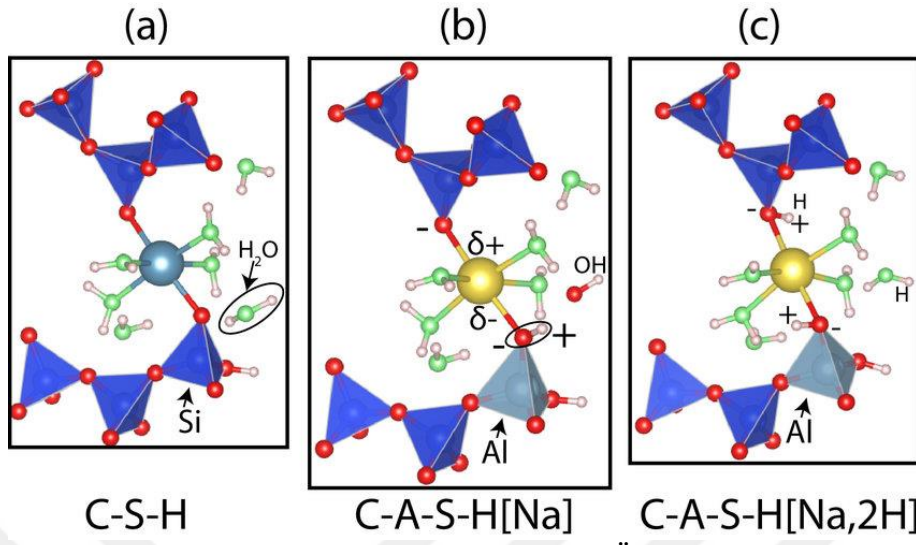
$$= Si - O - R - OH^- - Ca^{+2} == Si - O - Ca - OH + R^+ \quad (2.6)$$

Bu denklemde Alkalın katyon (R^+) hidratasyonun ilk aşamalarında bir katalizör görevi görür. Oluşumu itibariyle bu reaksiyon ürünü, geleneksel Portland çimentosunun güçlü bir mekanik dayanımı olmasını sağlayan C-S-H jelinin bir tipidir. Şekil 2.8.'de alkalilerle aktive edilen yüksek kalsiyum içeren bağlayıcıların reaksiyon mekanizmalarının teorik modellenmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Alkalilerle Aktive Edilen YFC'lerin Reaksiyon Mekanizması (Palomo ve diğ., 2014)

Bağlayıcı olarak kullanılan malzemenin kimyasal içeriğine bağlı olarak hidratasyon ürünlerinde çeşitli farklılıklar gözlenebilmektedir. Örneğin yüksek Kalsiyum içeren bağlayıcılarda Ca/Si, Ca/Al ve Si/Al oranlarına göre ana hidratasyon ürünlerinde ve ikincil ürünlerde farklı bağlanmalar gözlenebilmektedir. Ana hidratasyon ürününde Al bulunması durumunda yine bir C-S-H türü olan C-A-S-H jeli oluşmaktadır. C-A-S-H jelinin bileşimi ve ikincil ürünlerin ürünlerin varlığı, kullanılan aktivatör türüne ve miktarına, bağlayıcı yapısına ve kürlenme koşullarına göre değişebilmektedir.



Şekil 2.9. C-S-H ve C-A-S-H jellerinin yapısı (Özçelik & White, 2016)

3. LİTERATÜR TARAMASI

Farklı Sodyum konsantrasyonu ve Silikat Modülleriyle üretilen Alkali Aktif Çelikhane Cürufu (AA-ÇC) harç numunelerine çeşitli kürler uygulanmış ve bunların mekanik özelliklerini incelemiştir. %4-6-8 Sodyum konsantrasyonu ve 1,0-1,5-2,0 silikat modülü aralığındaki aktivatörlerle üretilmiş numunelerde Sodyum içeriği ve silikat modülünün artması numunelerin mekanik özelliklerinin gelişmesine katkıda bulunmuştur. 12 saat boyunca %98 relatif nem ve 80°C sıcaklıkta kürlenmiş numune 4,18 MPa eğilme dayanımı ve 22,02 MPa basınç dayanımıyla en yüksek sonuçları elde etmiştir. Ayrıca düşük nem ve sıcaklık koşullarında daha kısa sürelerle kürlenmiş numunelerin, yüksek Sodyum ve yüksek Silikat Modülüne sahip olsa bile gerekli mekanik gelişimi gösteremediği rapor edilmiştir (Öztürk ve diğ., 2019).

2020 yılında yapılan bir çalışmada bağlayıcı olarak çelikhane cürufu, aktivatör olarak %4 Na konsantrasyonuna sahip olacak şekilde tasarlanan NaOH-Na₂SiO₃ solüsyonu kullanılarak üretilen geopolimer harcın hidratasyon ısıları, fiziksel ve mekanik özellikleri, geleneksel Portland çimentolu kontrol harçlarıyla mukayese edilmiştir. İlk 7 saat geopolimer harçta hidratasyon ısı daha yüksekken bu saatten sonra hız yavaşlama eğilimine girmiş, kontrol harcında ise tam aksine hızlanmıştır. 96 saatin sonundaki kümülatif değerlere bakıldığında geopolimer harcın hidratasyon ısısının kontrol harcının %50'si kadar olduğu görülmüştür. Çelikhane cürufu ile üretilen harçlarda, daha çok mikro çatlaklara ve hidrate olmayan parçacıklara rastlanılmıştır. Basınç dayanımları karşılaştırıldığında ise daha az miktarda hidratasyon ürünü ve daha fazla boşluk oranına sahip olması sebebiyle geopolimer harç tüm yaşlarda kontrol harcının ancak %30-40'ı kadar mukavemet gelişimi göstermiş ve 90. günün sonunda 20 MPa dayanıma ulaşabildiği görülmüştür (Sun ve diğ., 2020).

(Wang ve diğ., 2013) yapmış oldukları çalışmada çimento ile ağırlıkça %25 ve %45 oranlarında uçucu kül, kaba çelikhane cürufu ve ince öğütülmüş çelikhane cürufu kullanmış, tasarlamış olduğu numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada kullanılan uçucu kül 358 m²/kg, kaba çelikhane cürufu 448 m²/kg ve ince öğütülmüş çelikhane cürufu 786 m²/kg özgül yüzey alanına sahiptir. Belirlenen karışım oranlarında tasarlanan numuneler üretimleri yapıldıktan sonra 20°C ve %95 bağıl nem koşullarında kürlenmiştir. İlk olarak çelikhane cürufunun aktive indeksleri ele alınmıştır.

Çimento yerine ağırlıkça %50 ikâme edilen çelikhane cürufu numunelerin erken yaşlarda aktivite indeksinin düşük seyrettiği görülmüştür. İnce çelikhane cürufu kullanılan numunede 28. gün itibariyle dayanım 36,7 MPa'yı ve indeks %73'ü, 720. günün sonunda dayanım 61,4 MPa'yı ve aktivite indeksi %85 değerlerine ulaşmıştır. Bu gelişim kaba çelikhane cürufu içeren numunede zamana yayılmış bir şekilde gerçekleştirmiş, 28. gün dayanım 29,7 MPa, indeks %59 iken 720. günün sonunda dayanım 59 MPa ve aktivite indeksi %81 olarak ölçülmüştür. Basınç dayanımlar incelendiğinde çelikhane cürufu ikâmesinin her yaşta betonun basınç dayanımını olumsuz etkilediği, ikâme oranının artmasıyla da bu etkinin daha da arttığı görülmüştür. Erken yaşlarda ince öğütülmüş çelikhane cürufu numunelerin dayanımı uçucu kül ile üretilen numunelerin basınç dayanımına yakın seyretse de ilerleyen günlerde aradaki fark açılmış hatta uçucu basınç dayanımı Portland çimentolu kontrol harcının basınç dayanımını da geçmiştir. İnce ve kaba öğütülmüş çelikhane cürufunun kendi aralarındaki davranışları incelendiğinde ise tüm yaşlarda ve ikâme oranlarında ince öğütülmüş cüruf daha yüksek dayanımlar elde etmiştir. Porozite ve permeabilite özellikleri bakımından da çelikhane cürufu ikâmesinin negatif olarak etkilediğinden söz edilebilmektedir. Uçucu kül ve Portland çimentosu ile üretilen numuneler özellikle ilerleyen yaşlarda düşük geçirgenlik ve gözenekliliğe sahipken çelik cüruflarında bu eğilim yukarı yönlü olmuştur.

(Palod ve diğ., 2020) yapmış oldukları çalışmada Portland çimentosu ile ağırlıkça %10-20-30 oranlarında çelikhane cürufu kullanmış ve üretilen numunelerin mekanik dayanımları, fiziksel ve durabilite özellikleri incelenmiştir. %10-20 oranında çelikhane cürufu içeren numunelerin 56. güne kadar dayanımları kontrol numunesinden daha düşük seyrederken 56. günden itibaren dayanımları kontrol numunesinden daha yüksek sonuçlara ulaşmıştır. Cüruf içeren numuneler 90. gün yaklaşık 50 MPa basınç dayanımı elde ederken kontrol numunesinde bu değer 45 MPa olarak ölçülmüştür. Böylelikle kür süresinin artmasıyla cüruflarda daha yüksek aktivitenin görüldüğü sonucuna varılmıştır. Elektirsel özdirenç ve ultrasonik ses iletim hızları 28 güne kadar kontrol numunelerinde daha yüksekken bu tarihten itibaren %10-20 cüruf içeren numunelerin değerleri daha iyi sonuçlara ulaşmıştır. %5'lik sülfirik asit çözeltisinde 28 gün bekletildikten sonra elde sonuçlarda kontrol numunesinin en çok kaybı yaşadığı ve cüruf kullanımıyla bu kayıpların azaldığı rapor edilmiştir.

2016 yılında yapılan bir çalışmada Portland çimentosu %5-10-15-20 oranlarında çelikhane cürufu ikâme edilerek beton numuneleri dizayn edilmiştir. Numuneler taze durumdayken işlenebilirlik özellikleri, priz almış durumdayken mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çelikhane cürufunun betondaki içeriğinin artmasıyla işlenebilirliğin azaldığı kaydedilmiştir. %10 oranında çelikhane cürufu içeren numune tüm yaşlarda kontrol numunesinden daha iyi mekanik performans gerçekleştirmiştir. Kontrol numunesi 28. Gün 4,5 MPa eğilme dayanımı, 35 MPa basınç dayanımı elde ederken bu değerler %10 çelikhane cürufu içeren numunede sırasıyla 5,3 MPa ve 38 MPa olarak ölçülmüştür. 60 ve 90 günlük dayanımlara bakıldığında %15 çelikhane cürufu içeren numunein kontrol numunesinden daha yüksek dayanımlara eriştiği kaydedilmiştir (Roslan ve diğ., 2016).

(Hu, 2017), yapmış olduğu çalışmada geleneksel Portland çimentosuyla birlikte ağırlıkça %15-30 oranlarında çelikhane cürufu kullanmış 0,35-0,45 oranlarında su/bağlayıcı tasarımı hazırlayarak numuneler üretmiş ve bu numunelerin fiziksel, kimyasal, durabilite ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Portland çimentosu yerine %30 oranında çelikhane cürufu kullanımıyla betonun erken yaştaki hidrasyon ısısının %11 azaldığı görülmüştür. Çimento yerine kullanılan cüruf içeriğinin, su/bağlayıcı oranının artmasıyla boşluk oranının ve klorür iyonu geçirgenliğinin arttığı, buna bağlı olarak da sülfat direncinin ve dayanımların azaldığı rapor edilmiştir.

Portland çimentosu ile ağırlıkça %30 oranında çelikhane cürufu ikâmesi yapılan ve Na_2SiO_3 (Sodyum Meta Silikat), Na_2SO_4 (Sodyum Sülfat), NaOH (Sodyum Hidroksit), Na_2CO_3 (Sodyum Karbonat) aktivatörleri kullanılarak üretilen numuneler, %30 çelikhane cürufu kullanılıp su ile aktive edilen numunelerle karşılaştırılmıştır. Basınç dayanımı ölçülecek numunelerde sırasıyla 0,001 M, 0,01 M, 0,01 M ve 0,01 M molaritede NaOH , Na_2SiO_3 , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 aktivatörlerinin çözeltileri 0,45 su/bağlayıcı oranları ile tasarlanıp dökümleri gerçekleştirilmiş, priz aldıktan sonra deneylere yapılana kadar 27 ° C'deki tatlı su havuzunda kürlenmiştir. Aktivatörlerin basınç dayanımına etkileri incelendiğinde Na_2SiO_3 46 MPa, Na_2SO_4 42,5 MPa dayanım elde ederek diğer aktivatörlerden ve su ile aktive edilen numunelerden daha yüksek değerlere erişmiştir. NaOH ve Na_2CO_3 aktivatörleri kullanılan numunelerde ise basınç dayanımı gelişimi düşük seyretmiş, 28. günün sonunda ancak 20 MPa dayanım elde edilmiştir (Singh ve Vashistha, 2021).

(Bingöl,2022), çalışmasında bağlayıcı olarak %80 yüksek fırın cürufu - %40 çelikhane cürufu, %60 yüksek fırın cürufu - %40 çelikhane cürufu; atkivatör olarak %3-5-7.5-9 oranlarında Na içeriği olacak şekilde Na_2SiO_3 kullanmış, ürettiği numuneleri 28 gün suda kürledikten sonra basınç dayanımlarını Portland çimentolu numunelerle kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda %7.5-9 Na içeriğine sahip geopolimer harç numuneleri kontrol harçlarından daha yüksek basınç dayanımı el etmiştir. Kontrol numunesinde 28. gün 51 MPa basınç dayanımı görülürken %20 çelikhane cürufu ve %9 Na içeren numunede 76 MPa, %40 çelikhane cürufu ve %9 Na içeren numunede 67 MPa basınç dayanımı görülmüştür.

Geleneksel Portland çimentosunun yerine değişken oranlarda çelikhane cürufu ikâme edilerek harç numuneleri üretilmiş ve mekanik özellikleri ele alınmıştır. Portland çimentolu kontrol numuneleri 28. günün sonunda 37,27 MPa basınç dayanımı elde ederken bu değerlere en yakın sonuçlar %10 çelikhane cürufu ikâmeli numunelerde görülmüştür. Numunelerdeki çelikhane cürufunun artmasıyla birlikte dayanımlar giderek azalmış, %70 Çelikhane Cürufu - %30 Portland çimentosuyla üretilmiş numunede 22,54 MPa basınç dayanıma ulaşılmış ve çelikhane cürufunun ikâme oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımında azalma görüldüğü rapor edilmiştir (Özkan, 2006).

(Rashad ve diğ., 2021), yapmış oldukları çalışmada %30 konsantrasyonunda NaOH aktivatörünü kullanarak Alkali Aktif Çelikhane Cürufu üretmiş ardından çelikhane cürufunun yerine kısmî oranlarda uçucu kül kullanarak ürettiği numunelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Uçucu kül içermeyen Alkali Aktif Çelikhane Cürufu harcın 28. günün sonunda 1,8 MPa eğilme dayanımına ve 32,5 MPa basınç dayanıma sahip olduğu, uçucu kül kullanımıyla birlikte mekanik özelliklerin gelişim gösterdiği kaydedilmiştir. %70 Çelikhane Cürufu - %30 Uçucu Kül kullanılarak üretilen harcın 8,1 MPa eğilme dayanımı ve 65 MPa basınç dayanımıyla en yüksek mekanik özelliklere ulaştığı rapor edilmiştir.

Geleneksel Portland çimentosu ile ağırlıkça %5, %10 ve %20 çelikhane cürufu kullanılarak üretilen numunelerin zamana bağlı basınç dayanımı gelişimi karşılaştırılmıştır. Deneyde, numunelerin hidrasyon süresinin artmasıyla birlikte dayanımlarının da arttığı kaydedilmiştir. %5 ve %10 çelikhane cürufu ikâmeli harçların

dayanımları birbirlerine yakın değerlerde seyrederken ikâme oranının %20'ye çıkmasıyla birlikte dayanım kaybının %25'lere ulaştığı belirlenmiştir (Hekal ve diğ., 2013).

(Arslan, 2007), çalışmasında ağırlıkça %20, %40 ve %60 oranlarında çelikhane cürufunu Portland çimentosu yerine ikâme ederek numuneler hazırlamış, ardından bu numunelerin 7 günlük eğilme ve basınç dayanımlarını ele almıştır. Çalışmada, %20 oranında çelikhane cürufu kullanılan numunelerden elde edilen dayanım değerlerinin kontrol numunesinin dayanım değerlerine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Portland çimentosunda 6,9 MPa eğilme dayanımı ve 36,8 MPa basınç dayanımı görülürken %20 ikâmeli numunelerde bu değerler sırasıyla 6,6 MPa ve 34,1 MPa olarak kaydedilmiştir. Ancak ikâme oranının artmasıyla dayanımlar azalmış ve %60 oranında eğilme dayanımı 1,5 MPa'ya, basınç dayanımı da 6,8 MPa'ya kadar gerilemiştir.

(Kumaravel, 2014), yapmış olduğu çalışmada uçucu külü ve uçucu küle birlikte %5-10 oranlarında ikâme ettiği yüksek fırın cürufunu Na_2SiO_3 -NaOH solüsyonu ile aktive ederek bir geopolimer beton üretmiş, ürettiği numunelere de hava, buhar, etüv kürü uygulayarak basınç dayanımlarında meydana gelecek farklılıkları gözlemlemeyi amaçlamıştır. Deney sonucunda hava kürü uygulanan numunelerin erken yaş dayanımlarının düşük olduğu ancak zamana bağlı olarak dayanımlarında önemli kazançlar elde edebildiği görülmüştür. Etüv ve buhar küründe erken yaşlardaki dayanımların yüksek olduğu, aktivasyonun büyük çoğunluğunun bu günlerde gerçekleştiği ve zamanla dayanım kazanma hızının yavaşladığı tespit edilmiştir.

2011 yılında yapılan bir çalışmada bağlayıcı olarak uçucu kül, aktivatör olarak NaOH- Na_2SiO_3 solüsyonlarının karışımını kullanılarak üretilen geopolimer beton numuneleri sıcak çuval bezinde, havada ve etüvde kürlenmiştir. 3 farklı kür yöntemiyle kürlenmiş numuneler, kürlenme sürelerinin dolmasıyla birlikte basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Sıcak çuval bezi ile kürlenme metodunda üretilen numuneler döküm işleminin hemen ardından sıcak çuval bezlerinin içine kapatılmış, çuvalar 24 saatte bir değiştirilmek üzere toplam 48 saat kür edilmiştir. Bu metotta 7. gün 4,5 MPa, 28. gün 16 MPa dayanım elde edilmiştir. Laboratuvar koşullarında havada kürlenmiş numuneler 7. gün 14 MPa, 28. gün 20 MPa dayanım elde ederken etüv küründe 7. Gün 45 MPa ve 28. gün 49 MPa dayanım görülmüştür (Nuruddin ve diğ., 2011).

(Saavedra ve de Guti rrez, 2017), yapmış oldukları çalışmada geopolimerlerin yapı taşlarından birini oluşturan aluminosilikat malzeme içeriğinin, betonun yüksek sıcaklıklardaki davranışına etkisini incelemiştir. Bu bağlamda; Portland imentolu kontrol numunesi, ağırlıkça %80 uçucu kül - %20 Portland çimentosundan oluşan alkali aktif hibrit numune ve ağırlıkça %80 uçucu kül - %20 yüksek fırın cürufundan oluşan geopolimer numune üretilmiştir. Hazırlanan numuneler 25°C - 1100°C aralığında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış ve basınç dayanımları mukayese edilmiştir. Portland imentolu betonların tüm sıcaklıklarda geopolimer ve hibrit numunelerden fazla dayanım kaybına kaybı yaşadığı rapor edilmiştir. Kontrol numunesi 25°C’de 32 MPa, 500°C’de 16 MPa, 700°C’de 12 MPa, 900°C’de 5 MPa dayanım elde ederken sıcaklık 1100°C’ye gelince dayanımının tamamını kaybetmiştir Böylelikle kontrol numunesinin 500°C’den itibaren dayanımının yarısını, 900°C’de dayanımının %85’ini kaybettiği grlmştir. Geopolimer numunede 25°C’de 46 MPa, 500°C’de 30 MPa, 700°C’de 25 MPa, 900°C’de 20 MPa ve 1100°C’de 15 MPa dayanım elde edilmiş, 900°C’de %50’lik, 1100°C’de %66’lık bir dayanım kaybı meydana gelmiştir. Aktif hibrit numunenin yüksek sıcaklıklara karşı direnci ise diğer iki numunenin arasındaki değerlerde seyretmiştir. Aktif hibrit numunesi 25°C’de 22 MPa dayanım elde ederken 900°C ve 1100°C’de dayanımın 7 MPa’ya geriledđi grlmştir. Deney sonucunda almno-silikat malzeme içeriğinin artmasıyla betonun yüksek sıcaklıklara karşı dirençli bir hle geldiği ve daha stabil bir performans gösterdiği belirlenmiştir.

2014 yılında yapılan bir çalışmada Metakaolin - Uçucu Klden oluşan geopolimer harçların ve betonların, Portland imentolu harçlara ve betonlara göre gösterdiği yüksek sıcaklık davranışını incelenmiştir. Deneyde numunelerin 22°C - 800°C aralığındaki basınç dayanımları test edilmiştir. Oda sıcaklığından itibaren tüm sıcaklıklarda geopolimer harç ve betonların, Portland imentolu harç ve betonlara nazaran yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olduğu bulgularına ulaşılmıştır (Zhang ve diğer., 2014).

(Bingöl ve diğer., 2020) yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufunu %4-8-12 oranlarında Na₂SiO₃ ile aktive etmiş, bu karışım metoduyla ürettiği numuneleri de hava, etüv ve tatlı su koşullarında krleyerek krleyerek yüksek sıcaklıklardaki dayanımlarını Portland imentolu kontrol harçlarıyla karşılaştırmıştır. Tüm kr koşullarında 300°C sıcaklık uygulanan numunelerin 20°C’deki numunelere

göre basınç dayanımı gelişimi gösterdiği kaydedilmiştir. 600° C'den itibaren basınç dayanımında azalmalar meydana geldiği ve sıcaklığın 900° C'ye geldiği durumda bu kayıpların önemli boyutlara ulaştığı görülmüştür. Hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı gelişiminin diğer iki kür metoduna göre düşük olduğu ve optimum Na konsantrasyonunun da %8 olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bir çok kür koşulunda geopolimer harç numunelerinin yüksek sıcaklıklardaki basınç dayanımı davranışının kontrol numunesinden daha iyi olduğu sonucu rapor edilmiştir.

(Çevik ve diğ., 2018) yapmış oldukları çalışmada uçucu kül ve uçucu küle nano silikalar ilave ederek üretmiş olduğu geopolimer betonların agresif kimyasal ortamlarda 30 gün bekletilmesinden sonraki davranışlarını geleneksel Portland çimentolu betonların davranışlarıyla karşılaştırmıştır. Kontrol numunesi 30. günün sonunda H₂SO₄ çözeltisi içinde %34, MgSO₄ çözeltisi içinde %16, deniz suyu içinde %8 basınç dayanımı kaybına uğrarken yalnızca uçucu kül numunede bu oranlar sırasıyla %28, %14 ve %7 olarak ölçülmüştür. Uçucu kül içeriğinin %3'ü kadar nano silika eklenmesiyle tasarlanan karışımda ise bu ortamlara karşı bir direnç geliştiği, sırasıyla %17, %9 ve %4 dayanım kaybı yaşayarak diğer numunelere kıyasla agresif ortamlarda daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

(Bakharev, 2005), çalışmasında uçucu kül ve farklı aktivatörler kullanarak üretmiş olduğu numuneleri %5'lik sülfirik asit çözeltisi içine bırakmış ve zamana bağlı olarak basınç dayanımı gelişimini ele almıştır. Deneyde aktivatör olarak %8 Sodyum içeren Sodyum Silikat (Na₄O₄Si), %8 Sodyum içeren Sodyum Hidroksit (NaOH) ve %8 Sodyum - %1 Potasyum içeren Sodyum Hidroksit – Potasyum Hidroksit kombinasyonu (NaOH-KOH) kullanılmıştır. Ayrıca bu numunelerin geleneksel Portland çimentosu ile kıyasını yapabilmek amacıyla Portland çimentolu kontrol numunesi ve %20 uçucu kül ikâmeli hibrit Portland çimentosu numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler arasındaki en iyi basınç dayanımı gelişimini NaOH kullanılan numune göstermiş, 4 ayın sonunda yalnızca %17,50 oranında dayanım kaybı yaşamıştır. Bu tarihten sonra ise numunenin asit karşısında göstermiş olduğu davranış stabil hale gelmiş ve dayanım kaybetmemiştir. Diğer aktivatörler kullanılarak üretilen numunelerde ve %20 uçucu kül ikâmeli hibrit numunede ise basınç dayanımı gelişimi birbirine oldukça benzer bir şekilde seyretmiştir. Bu numuneler 150. günün sonunda dayanımlarının yaklaşık %80'ini kaybetmiştir.

Geleneksel Portland çimentosu kullanılarak numune ise deneyin henüz ilk ayında basınç dayanımını kaybetmiştir.

Uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer betonun ve geleneksel Portland çimentosu kullanılarak üretilen betonun, %3 sülfirik asit çözeltisine 180 gün maruz bırakılmasının ardından meydana gelen kütle kaybını ve basınç dayanımı gelişimini araştıran bir çalışma yapılmıştır. Geleneksel Portland çimentosu kullanılarak üretilen beton, 180 gün sonunda %27,10 oranında kütle kaybı ve %40,08 oranında dayanım kaybı yaşarken geopolimer beton %1,83 oranında kütle kaybı % 20,01 oranında dayanım kaybı yaşayarak geleneksel Portland çimentosundan daha iyi bir performans sergilemiştir (Ganesan ve diğ., 2015).

(Arsoy, 2018), çalışmasında çelikhane cürufu ikâmeli ve farklı Sodyum konsantrasyonu ile silikat modüllerinde üretilen betonların su emme özelliklerini incelemiştir. Çalışmada yalnızca %10 çelikhane cürufu içeren ve %4 Sodyum konsantrasyonunda Silikat Modülü=1 olan aktivatör kullanılan numunenin su emme değeri Portland çimentolu kontrol numunesinden daha düşük gelmiştir. Sodyum içeriğinin ve çelikhane cürufunun artmasıyla birlikte numunelerin su emme eğiliminin de arttığı rapor edilmiştir.

(Yakupoğlu, 2010), çalışmasında 3 farklı Sodyum konsantrasyonunda 4 farklı aktivatörle aktive edilen yüksek fırın cürufunun su emme değerlerini ve boşluk oranını araştırmış ve Portland çimentolu kontrol numunesiyle karşılaştırmıştır. Tüm aktivatörlerde su emme ve boşluk oranı değerlerinin kontrol numunesinden fazla olduğu ölçülmüştür. NaOH, Na₂SiO₃ ve Na₄O₄Si kullanılan aktivatörlerin su emme ve boşluk oranı değerleri kontrol numunesinden fazla olsa yakın olarak seyretmiştir. Sodyum Karbonat kullanıldığında ise su emme miktarının ve boşluk oranının artma eğiliminde olduğu sonucuna varılmıştır.

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Kullanılan Malzemeler

4.1.1. Çimento

Bu çalışmada çimento olarak Tokat Adoçim Çimento Beton San. ve Tic. A.Ş.'nin üretmiş olduğu CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. CEM I 42.5 R Portland Çimentosunun Kimyasal Bileşimi

Kimyasal Bileşim	%	Kimyasal Bileşim	%
SiO ₂	18,87	MgO	2,63
Al ₂ O ₃	5,62	SO ₃	2,82
Fe ₂ O ₃	2,54	Na ₂ O	0,4
CaO	62,78	K ₂ O	0,9

4.1.2. Çelikhane Cürufu

Bu çalışmada çelikhane cürufu olarak Kardemir Demir-Çelik fabrikasının atığı olan çelikhane cürufu temin edilmiştir. Temin edilen cüruf, Tokat Adoçim Çimento Beton Sanayi ve Ticaret AŞ laboratuvarlarında öğütülerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Çalışmada kullanılan çelikhane cürufunun özgül ağırlığı 3,18 g/cm³, Blaine yüzey alanı ise 6891 cm²/g 'dır . Tablo 4.2.'de çelikhane cürufunun kimyasal bileşimleri gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Çelikhane Cürufunun Kimyasal Bileşimi

Kimyasal Bileşim	%	Kimyasal Bileşim	%
CaO	52,83	SO ₃	0,99
SiO ₂	13,53	MgO	5,49
Al ₂ O ₃	3,16	MnO	1,73
Fe ₂ O ₃	12,74	Kızdırma Kaybı	7,24



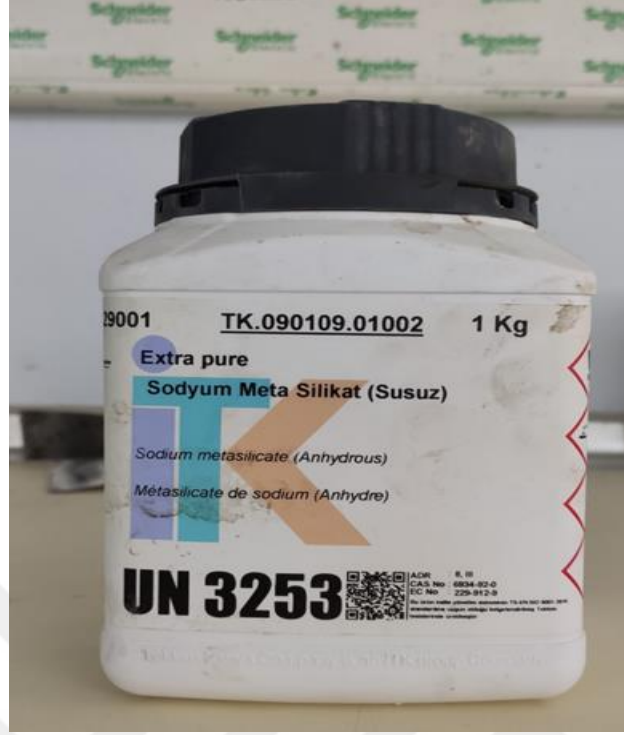
Şekil 4.1. Denejde kullanılan çelikhane cürufu

4.1.3. Sodyum Meta Silikat

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak Tekkim Kimya Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'nin üretmiş olduğu Sodyum Meta Silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Tablo 4.3.'te, çalışmada kullanılan sodyum meta silikatın kimyasal bileşimi, kimyasal ve fiziksel özellikleri sunulmuştur.

Tablo 4.3. Sodyum Meta Silikatın (Na_2SiO_3) Kimyasal Bileşimi

Kimyasal Özellikler	%	Kimyasal Özellikler	%
Safılık	≥ 95	Suda Çözünmeyen	$\leq 0,5$
Na_2O	48-51	pH	> 12
SiO_2	44,4-47,4	Erime Sıcaklığı	1089 °C
Fe	≤ 0.1		



Şekil 4.2. Deneyde kullanılan Sodyum Meta Silikat

4.1.4. Kum

Bu çalışma kapsamında kullanılan dere kumu Tokat yöresinden temin edilmiştir.. Kullanılan kumun özgül ağırlığı 2.58 g/cm^3 olup elek analizi Tablo 4.4.'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Deneyde kullanılan elek analizi

Kümülatif Geçen % (Ortalama)	
Elek Çapı (mm)	Doğal Kum
8	100
4	99,45
2	96,80
1	93,21
0,5	83,12
0,25	66,23
0,125	17,94
0,063	1,02

4.1.5. Su

Harç karışımlarında Tokat ili içilebilir temiz şebeke suyu kullanılmıştır.

4.2. Karışım Oranları

Portland çimentolu kontrol numunesi hazırlanırken 1200 gram kum, 450 gram çimento kullanılmış, s/b oranı 0,50 olacak şekilde karışıma 225 gram su ilave edilmiştir. Deney için hazırlanan harç numunelerinde de her bir kalıp başına 1200 gram kum, 450 gram çelikhane cürufu kullanılmış ve s/b oranı 0,50 olmak üzere sabit tutulmuştur. Karışımda kullanılan alkali aktivatör oranının harç numunelerin üzerindeki mekanik ve dayanıklılık etkilerini araştırmak amacıyla ayrı ayrı numunelerde aktivatör içindeki Na (Sodyum) miktarının, bağlayıcı miktarına oranının %4, %6, %8, %10, %12'si olacak şekilde belirlenmiştir.

Tablo 4.5. Kontrol Numunesi ve Harç Numunelerinin Karışım oranları

	Kum(gr)	Çimento(gr)	Cüruf(gr)	Su(gr)	Aktivatör(gr)
R	1200	450	-	225	-
%4 NS	1200	-	450	225	48
%6 NS	1200	-	450	225	72
%8 NS	1200	-	450	225	96
%10 NS	1200	-	450	225	120
%12 NS	1200	-	450	225	144

4.3. Deney Numunelerin Hazırlanması ve Kürlenmesi

Harç numunelerinin üretimi (TS EN 196-1) standartlarına uygun bir şekilde Hobart mikseriyle yapılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında kullanılacak olan Portland çimentosu, çelikhane cürufu, Na_2SiO_3 ve kum, laboratuvar ortamında nemden korunacak bir şekilde muhafaza edilmiştir.

Portland çimentolu kontrol numunesi hazırlanırken Hobart mikserinin karıştırma kabına ilk olarak Portland çimentosu ve su eklenmiş ve yavaş devirde 30 saniye karıştırılmaya başlanmıştır. İkinci 30 saniyelik karıştırma işlemine geçerken mikserin ayrı bir

haznesinden kum ilave edilmeye başlamış ve 30 saniye boyunca yavaş devirde karıştırma işlemi devam etmiştir. Kum ilave işleminin bitmesinin ardından mikser 30 saniye boyunca hızlı devirde çalışmış ve ardından 90 saniyelik bekleme moduna geçmiştir. Bekleme modu sırasında karıştırma kabının kenarlarına ve dibine yapışmış harç, mikserin belirtilen bölgeleri yeterince karıştırılamamasından dolayı kaşıkla karıştırılmış ve kabin tamamında istenen kıvama ulaşılmıştır. 90 saniyelik bekleme modunun ardından mikser 60 saniye daha hızlı devirde çalışmış ve 4x4x16 cm'lik numune kalıplarında sıkıştırılması amacıyla sarsma cihazına yerleştirilmiştir. Sıkışma işlemi tamamlanan harç numunesi 24 saat boyunca 21 ± 1 °C ve $\%50 \pm 4$ bağıl nem koşullarında laboratuvar ortamında havada kürlenmeye bırakılmıştır. 24 saatin ardından kalıplardan çıkarılan numuneler, 28 günlük kür süresini tamamlamak 23 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzuna yerleştirilmiştir.

Çelikhane cürüflü harç numuneleri hazırlanırken kontrol numunesiyle aynı prosedür uygulanmıştır. Kontrol numunesi üretiminden farklı olarak eklenen Na_2SiO_3 , harç numunesinin ani priz almasını engellemek amacıyla karışıma kumla beraber ilave edilmiştir. Kalıplara yerleştirilip sıkıştırılma işlemleri tamamlanan numuneler için 4 farklı kür yöntemi belirlenmiştir;

- Etüvde 80°C'lik sıcaklıkta 1,2 ve 3 gün süreyle etüv kürü
- Etüvde 80°C'lik sıcaklık ve $\%95 \pm 2$ nem koşullarında 1,2 ve 3 gün süreyle buhar kürü
- 28 gün boyunca 23 ± 2 °C sıcaklıkta su kürü
- 28 gün boyunca laboratuvar koşullarında hava kürü.

Bu kür metotları grafik ve tablolarda;

E → Etüv kürlemesi yapılan numuneler

B → Buhar (Nemli etüv kürlemesi) yapılan numuneler

S → Su kürlemesi yapılan numuneler

H → Hava kürlemesi yapılan numuneler

şeklinde kısaltılmış ve kısaltmaların yanındaki rakamlar da numunenin içerdiği Na miktarını belirtecek şekilde gösterilmiştir.



(a) (b)
Şekil 4.3. Hobart mikseri (a) ve sarsma tablası (b)

4.4. Test Metotları ve Deneysel Çalışmalar

Alkalilerle aktive edilmiş çelikhane cürüflu harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini belirlemek amacıyla puzolanik aktivite, kıvam (işlenebilirlik), birim hacim ağırlık-su emme-boşluk oranı, kılcal su emme, basınç ve eğilme dayanımı, ultrasonik ses geçişi, asit dayanıklılığı ve yüksek sıcaklık deneyleri uygulanmıştır.

Alkalilerle aktive edilmiş çelikhane cürüflu harç numunelerinin dayanım sonuçlarına göre en iyi sonuçları veren kür yöntemleri seçilmiştir. Bu bağlamda; etüvde 3 gün boyunca 80 °C’de sıcak kür uygulanan, etüvde 3 gün boyunca 80 °C’de etüv kürü uygulanan ve 28 gün boyunca suda kürlenmiş numuneler diğer deneylere tabi tutulmuştur. Seçilen numunelerin Portland çimentolu harç numuneleriyle performanslarını kıyaslayabilmek amacıyla aynı deneyler Portland çimentolu kontrol numunelerine de uygulanmıştır. Portland çimentolu harç numunelerine 28 gün boyunca su kürlenmesi yapıldıktan sonra dayanıklılık deneyleri uygulanmıştır.

4.4.1. Puzolanik Aktivasyon Testi

Puzolanik malzemelerin betonda kullanılabilirliğini tayin etmek amacıyla Puzolanik Aktivasyon Testi gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda ASTM C311 standartları esas

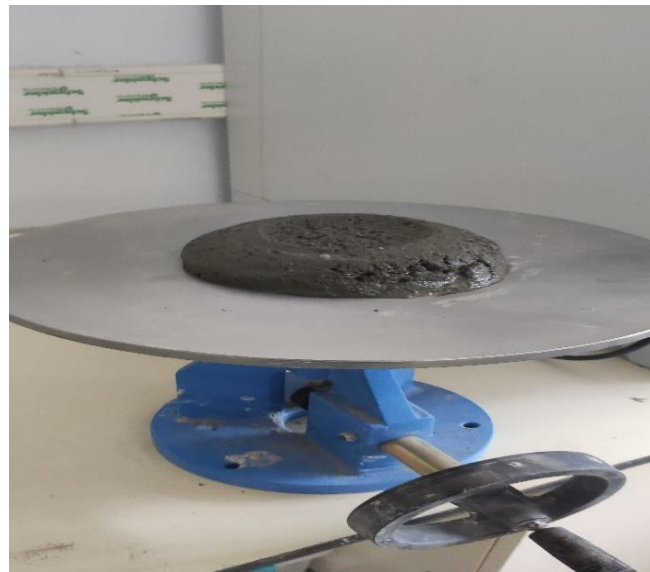
alınarak hazırlanan karışım oranları Tablo 4.6’da gösterilmiştir. Bu oranlarda üretilen harç numuneleri, 7 ve 28 gün boyunca suda kürlenmiş, ardından eğilme ve basınç dayanımları mukayese edilmiştir.

Tablo 4.6. Puzolanik Aktivasyon Harç Karışım Oranları

	Kum (g)	Çimento (g)	Çelikhane Cürufu (g)	Su (g)
R	1350	500	-	242
Çelikhane Cürufu	1350	400	100	242

4.4.2. Kıvam (İşlenebilirlik)

Hobart mikserinden taze halde çıkarılan AA-ÇÇ’li harçların ve kontrol harcının kıvam (işlenebilirlik) deneyleri, yayılma tablası kullanılarak (TS EN 12350-5) standartlarına uygun bir şekilde yapılmıştır. Koni kalıba 2 aşamada yerleştirilip tokmak yardımıyla sıkıştırılan harç numunelerine, kalıptan çıkarıldıktan sonra saniyede 1 defa olmak üzere 15 düşüş yaptırılmıştır. Bu işlemin tamamlanmasının ardından yayılan harç numunesinin çapı farklı yerlerden kumpas yardımıyla ölçülmüş ve çıkan sonuçların ortalaması alınarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.4. Kıvam (işlenebilirlik) deneyi

4.4.3. Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini Deneyi

4x4x16 cm ebatlarındaki AA-ÇC'li harçlar, kür süreleri tamamlandıktan sonra birim ağırlıkları, su emme ve boşluk oranları tayin edilebilmek amacıyla (ASTM C642-13, 2013)'e uygun standartlarda deneylere tabi tutulmuştur. Deney kapsamında Arşimet terazisi ve etüv kullanılmıştır.

28 günlük su kürü uygulanan AA-ÇC'li harç numunesi ve Portland çimentolu kontrol numunesi 24 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler, sıcak kür ve nemli sıcak kür uygulanan numunelerle birlikte tartılmış ve ağırlıkları W_{EK} olarak kaydedilmiştir. Bu işlemin akabinde suya doymun hale gelmeleri amacıyla numuneler 1 gün su havuzuna yerleştirilmiştir. 24 saat tamamlandıktan sonra kür havuzundan çıkarılan numunelerin su içindeki asılı ağırlıklarını bulabilmek üzere Arşimet terazisiyle kullanılmış ve tartılan numunelerin ağırlıkları W_{SU} olarak kaydedilmiştir. Su içindeki ağırlıkları tayin edilen numunelerin yüzeyleri, suda çıkarıldıktan sonra havlu yardımıyla kurulanmış ve doymun kuru yüzey haline getirilmiştir. Doymun kuru yüzey haline getirilen numunelerin de ağırlıkları tartılmış ve sonuçları W_{DYK} olarak kaydedilmiştir. Bu işlemlerin ardından aşağıda verilen (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) ve (4.8) denklemleri kullanılarak numunelerin fiziksel özellikleri tayin edilmiştir.

$$\text{Görünür Birim Ağırlık } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{W_{EK}}{\text{Numune Boyutları}} \quad (4.3)$$

$$\text{Görünür Yoğunluk } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{W_{EK}}{W_{EK} - W_{SU}} \quad (4.4)$$

$$\text{KYD Yoğunluk } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{W_{KYD}}{W_{DYK} - W_{SU}} \quad (4.5)$$

$$\text{Kuru Yoğunluk } \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{W_{EK}}{W_{DYK} - W_{SU}} \quad (4.6)$$

$$\text{Boşluk Oranı } (\%) = \left[\frac{W_{DYK} - W_{EK}}{W_{DYK} - W_{SU}} \right] X 100 \quad (4.7)$$

$$\text{Su Emme Oranı } (\%) = \left[\frac{W_{DYK} - W_{EK}}{W_{EK}} \right] X 100 \quad (4.8)$$

W_K : Etüv kuru ağırlığı, g

W_{DYK} : Doygun kuru yüzey ağırlığı, g

W_{SU} : Su içerisindeki ağırlık, g

4.4.4. Kılcal Su Emme

Beton içerisinde mikro çatlakların bulunması, beton için son derece sakıncalı bir durum teşkil eder. Su ve çeşitli kimyasal maddeler, mikro çatlaklardan betonun içine nüfuz ederek malzemenin tamamına yayılabilir. Suyun bu yolla beton içerisinde ilerlemesine kılcallık veya kapilarite adı verilir.

Çalışmada 4x4x16 cm'lik boyutlarda üretilen AA-ÇC'li harçlar, (TS EN 1015-18) standartlarına göre kür süreleri tamamlandıktan sonra 24 saat etüvde kurutulmuştur. Tamamen kurutulan numuneler ikiye bölünmüş ve tabanı suyla 5 mm temas ettirilmiş, geri kalan tüm yüzeylerine eritilmiş mum sürülerek suyun betonun içerisine nüfuz etmesi engellenmiştir. Harç numunelerinin yüzeyleri, suyla temas ettirildikten 1,5,10,20,30,60 dakika ve 1 gün sonra sudan çıkarılmış ve ağırlık okumaları yapılmıştır. Akabinde, aşağıda verilen bağıntının yardımıyla (4.9) ile absorbe edilen su miktarı ve kılcallık katsayısı hesaplanmıştır.

$$c = \frac{m_t \times 100}{A \times \sqrt{t}} \quad (4.9)$$

Burada;

c = kılcallık katsayısı ($\text{gr}/\text{cm}^2\text{dk}^{0.5}$)

m_t = t sürede numunenin absorbe ettiği su miktarı (gr)

A = numunenin suyla temas ettiği yüzey alanı (cm^2)

t = Zaman (dk)



Şekil 4.5. Kılcal su emme deneyine tabi tutulmuş harç numuneleri

4.4.5. Eğilme Dayanımı

Deney kapsamında üretilen ve kürlenme süresi tamamlanan numuneler; (TS EN 1015-11) standartlarına uygun bir şekilde eğilme dayanımına tabi tutulmuştur. Şekil 4.6.'da görüldüğü üzere numunelere, mesnet açıklığı 100 mm olan, yükleme hızı 50 N/s saniye olan üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Bu test, kalıplardan elde edilen 3 adet numuneye de uygulanmış ve çıkan 3 sonucun aritmetik ortalamaları alınarak sonuç kaydedilmiştir. Eğilme dayanımı aşağıda verilen (4.10) denklemlerle N/mm^2 cinsinden hesaplanmıştır.

$$\sigma_E = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4.10)$$

Burada;

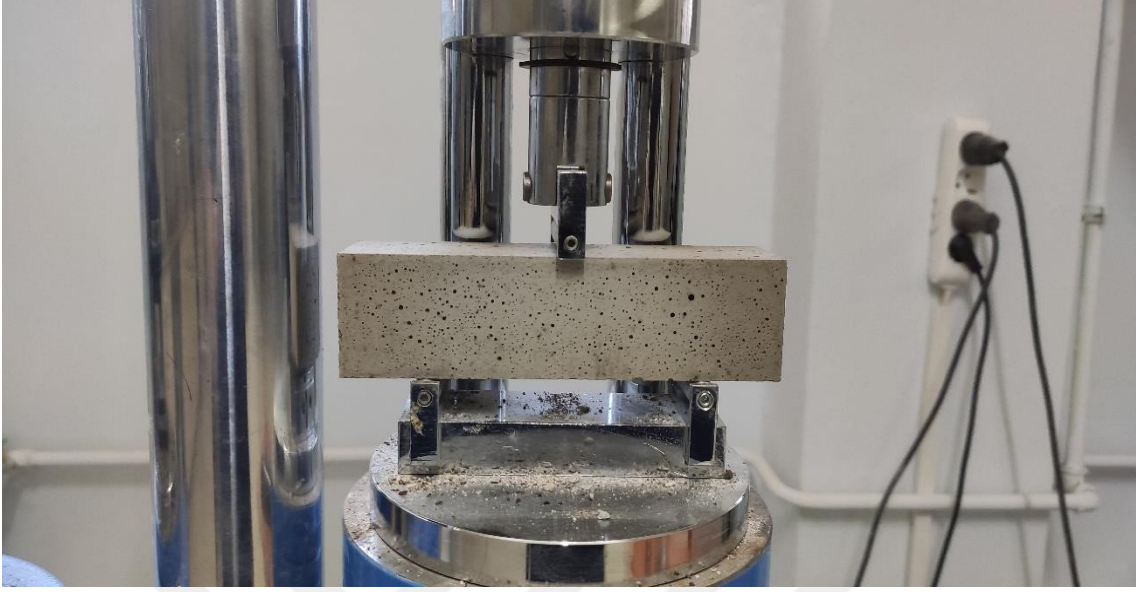
σ_E : Eğilmede çekme dayanımı, (N/mm^2)

b: Numunenin eni, (mm)

d: Numune yüksekliği, (mm)

L: Mesnetler arasındaki açıklık, (100 mm)

P: Numuneye uygulanan kuvvet, (Newton)



Şekil 4.6. Eğilme Dayanımı deneyine tabi tutulan bir harç numunesi

4.4.6. Basınç Dayanımı

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin basınç dayanımı deneyleri (TS EN 1015-11) standartlarına uygun şekilde yapılmıştır. Eğilme deneyinde ikiye ayrılan numuneler basınç testinin olacağı 4x4 cm'lik platforma yerleştirilmiş ve 500 N/s yükleme hızı altında basınç testine tabi tutulmuştur. Aynı tür numuneler için deneye tabi tutulacak toplamda 6 adet basınç numunesi oluşmuş ve bu numunelerin test sonuçlarının aritmetik ortalamaları olarak basınç dayanımları hesaplanmıştır. Basınç dayanımı değeri aşağıda verilen (4.11) denklemle N/mm^2 cinsinden bulunmuştur.

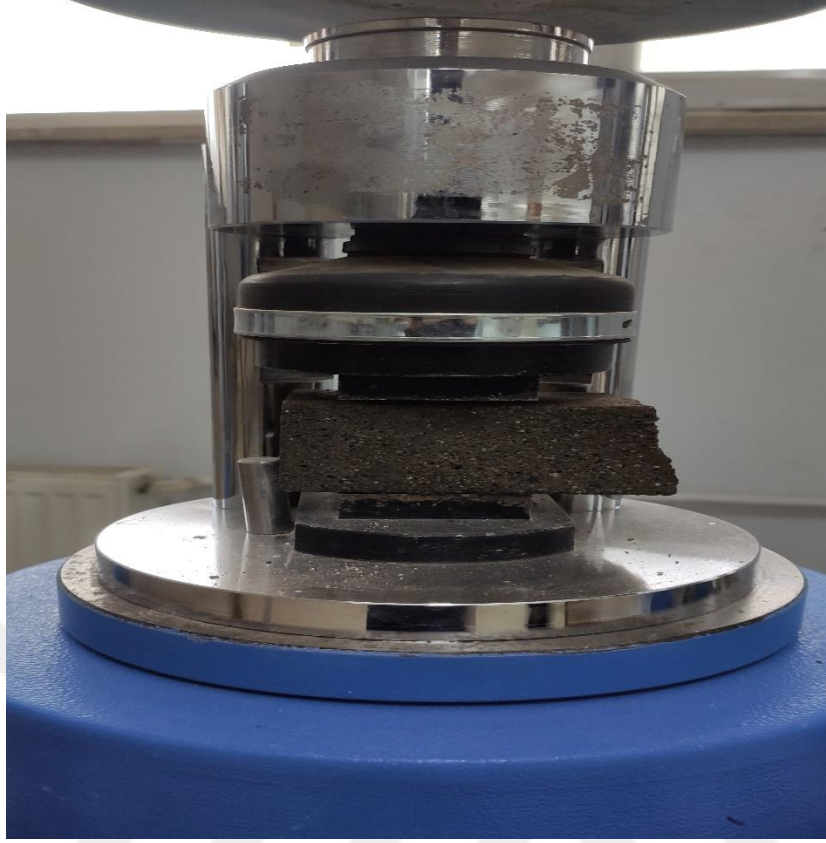
$$\sigma_B = \frac{P}{b^2} \quad (4.11)$$

Burada;

σ_B : Basınç dayanımı, N/mm^2

b: Numunenin eni, (mm)

P: Numuneye uygulanan kuvvet, (Newton)



Şekil 4.7. Basınç dayanımı deneyine tabi tutulan bir harç numunesi

4.4.7. Ultrasonik Ses Geçişi

Ultrasonik test yöntemiyle numunenin bir yüzeyinden betonun içerisine sesüstü dalgaları yollanmakta ve dalgaların beton içerisindeki ilerleme hızları hesaplanabilmektedir. Dalga ilerleme hızı, betonun yoğunluğu ve ihtiva ettiği boşluklar hakkında fikir vermektedir. İçerisinde çok fazla boşluk bulunan bir betonda dalga ilerleme hızı, daha az boşluk bulunan bir betona göre daha düşük olmaktadır (Erdoğan , 2021). İçerisindeki boşlukların fazla olması da betonun kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir.

4x4x16 cm boyutlarında hazırlanan harç numunelerinde, (ASTM C597-16, 2016) standartlarına uygun bir şekilde ultrasonik test yöntemiyle dalga hızı tayini gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik test yöntemiyle bulunan dalga hızı değerleri, Şekil 4.8'deki ultrasonik test cihazı kullanılarak bulunmuştur.

Suda küremesi yapılan AA-ÇC'li harç numuneleri ve Portland çimentolu kontrol numuneleri etüvde 24 saat boyunca kurutulduktan sonra deneye tabi tutulmuştur.

Tablo 4.7. Ultrasonik Testle Beton Kalitesinin Değerlendirilmesi (Erdoğan, 2021)

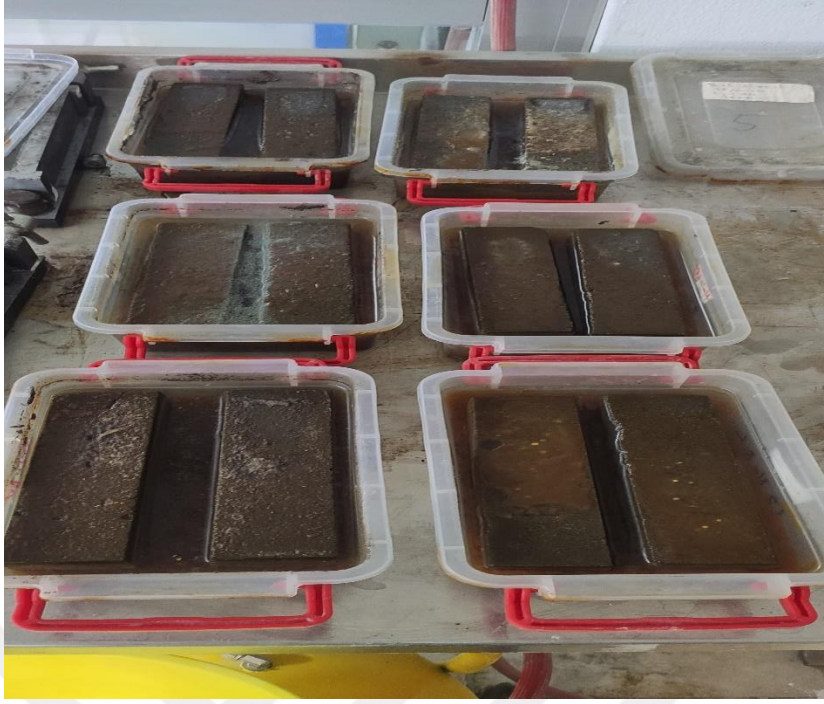
Dalga Hızı, metre/saniye	Beton Kalitesi
>4500	Mükemmel
3500-4500	İyi
3000-3500	Şüpheli
2000-3000	Zayıf
<2000	Çok Zayıf



Şekil 4.8. Ultrasonik Test uygulanan harç numunesi

4.4.8. Asit Etkisine Dayanıklılık

Çalışma kapsamında AA-ÇC'li ve Portland çimentolu harç numunelerinin asit etkisine karşı dayanıklılığını araştırmak amacıyla 5 ppm yoğunluğunda HCl (Hidroklorik asit) çözeltisi hazırlanmıştır. Harç numuneleri kürelerini tamamladıktan sonra 112 gün boyunca asit çözeltisinin içerisinde bekletilmiştir. 112 günün sonunda numuneler, asit çözeltisinin içinden çıkarılarak çeşitli deneylere tabi tutulmuş ve mekanik özelliklerinin değişimi bulunmuştur.



Şekil 4.9. Asit içerisinde bekletilen harç numuneleri

4.4.9. Yüksek Sıcaklıklara Karşı Dayanıklılık

4x4x16 cm boyutlarından üretilen AA-ÇC'li harç numuneleri ve Portland çimentolu kontrol numuneleri, kür sürelerini tamamladıktan sonra yüksek sıcaklık deneyine uygun hale getirilmek amacıyla etüvde tamamen kurutulmuş hale getirilmiştir. Ardından sıcaklığın kademeli olarak arttığı (1 saatin sonunda sıcaklığı 25 °C'den 300 °C ve 600 °C'ye ulaşacak şekilde artan) kül fırınına yerleştirilmiştir. Deneyde, harç numunelerinin 300 °C ve 600 °C 'deki dayanımları araştırılmıştır. Kül fırını, deney için gerekli sıcaklığa ulaşmasının ardından otomatik olarak kendini durdurmuştur. Numuneler 1 saat boyunca bu sıcaklıklarda bekletilmiştir. Cihazın durmasının ardından kül fırınının kapağı hemen açılmamış ve harç numunelerinin ani olarak çatlamalarını engellemek amacıyla 24 saatlik zaman zarfında yavaşça soğuması sağlanmıştır. 24 saatin tamamlanmasıyla birlikte kül fırınından alınan numunelerin kütle değişimleri, ultrasonik ses geçiş hızları, eğilme ve basınç dayanımı değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.10. Yüksek sıcaklık deneyi uygulanan numuneler

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Puzolanik Aktivasyon

Çelikhane cürufunun puzolanik aktivitesini belirlemek amacıyla yapılan üretilen harç numunelerinin 7 ve 28 günlük mekanik dayanımları Tablo 5.1.'de gösterilmiştir. Tabloda gösterilen verilere göre çelikhane cürufu içeren puzolanik aktivasyon numunesinin mekanik dayanım değerleri, Portland çimentolu kontrol numunesinin mekanik dayanım değerlerinin %75'inin üzerinde seyretmiştir.

Tablo 5.1. Puzolanik Aktivasyon Testi Sonuçları

	Eğilme Dayanımı (MPa)		Basınç Dayanımı (MPa)	
	7. Gün	28. Gün	7. Gün	28. Gün
R	8,41	9,8	41,35	51,8
Puzolan Num.	6,43	7,85	27,43	40,15

5.2. Kıvam (İşlenebilirlik)

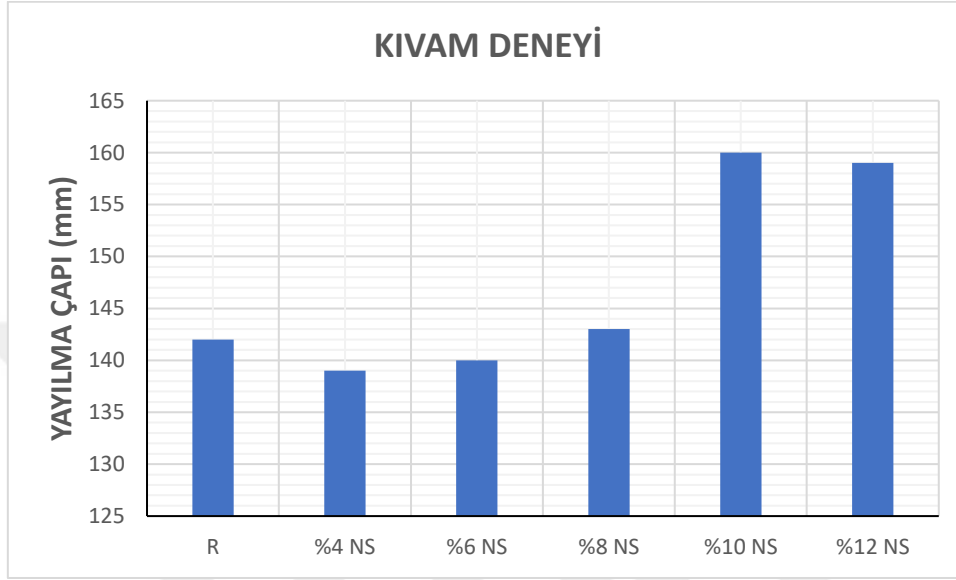
Çalışma kapsamında, farklı Sodyum oranları ile hazırlanmış çelikhane cürufu harç numunelerine ve CEM I 42.5 R Portland çimentolu kontrol harcına yayılma tablası kullanılarak kıvam deneyi uygulanmıştır. Deney sonuçları Tablo 5.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Harç numunelerinin yayılma çapları

NS Oranı (%)	Yayılma Çapı (mm)
R	142
%4 NS	139
%6 NS	140
%8 NS	143
%10 NS	160
%12 NS	159

Çelikhane cürufu ile hazırlanan harçlarda, karışımın içindeki Sodyum oranının artmasıyla yayılma çapının arttığı görülmektedir. En düşük yayılma çapı değeri %4NS harç numunesinde olup 139 mm'dir. %6-8 NS içeren harçlarda da bu değere yakın sonuçlar

elde edilirken % 10 NS içeren harç numunesinden itibaren bir kırılım yaşanmış ve yayılma çapı 160 mm'ye kadar yükselmiştir. Kontrol numunesinin yayılma çapı değeri 142 mm olarak ölçülmüştür. %4-8 NS aralığındaki numunelerde bu değere oldukça yakın değerler elde edilmiş ancak %10-12 NS aralığında önemli bir kıvam farkı oluşmuştur.



Şekil 5.1. Kıvam deneyi uygulanan harç numunelerini yayılma çapları

5.3. Birim Hacim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı

Çelikhane cürüflü harç numunelerinin kontrol harcı numunelerinin birim hacim ağırlık, su emme ve boşluk oranı deneyi sonuçları Tablo 5.3.'te, grafiksel olarak da Şekil 5.2.'de verilmiştir..

Tablo 5.3. Harç numunelerinin boşluk ve su emme oranları

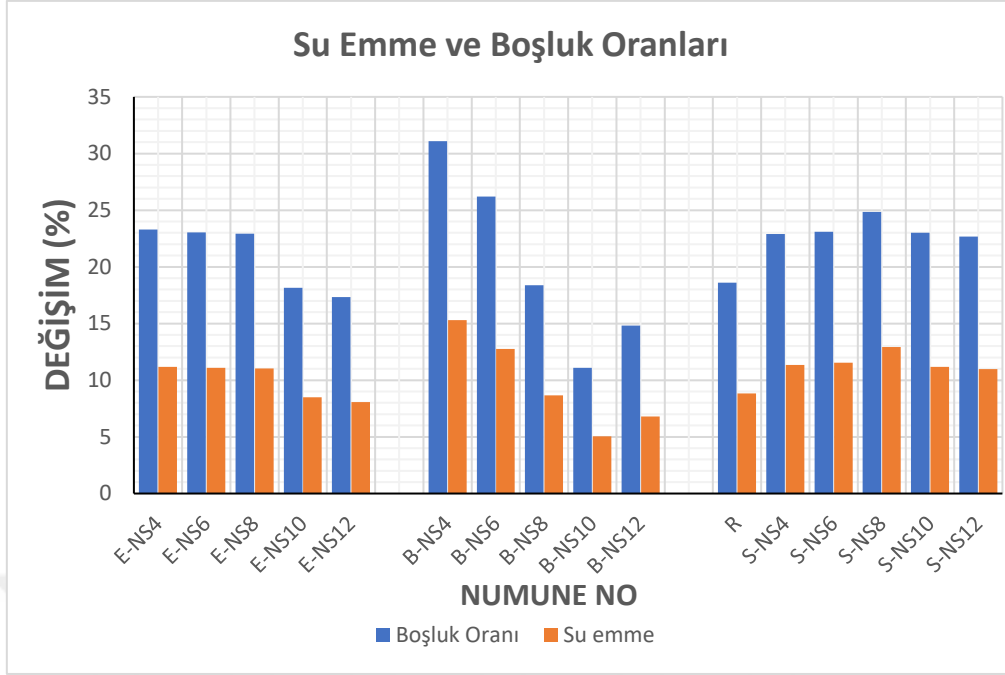
Numune No	Görünür BHA (g/cm^3)	Boşluk Oranı (%)	Su Emme Oranı (%)
R	2.01	18.60	8.83
E-NS4	1.98	23.29	11.18
E-NS6	2.01	23.03	11.08
E-NS8	1.96	22.93	11.04
E-NS10	2.12	18.16	8.50
E-NS12	2.06	17.34	8.07

Tablo 5.3. Harç numunelerinin boşluk ve su emme oranları (Devam)

Numune No	Görünür BHA (g/cm ³)	Boşluk Oranı (%)	Su Emme Oranı (%)
B-NS4	1.99	31.08	15.29
B-NS6	2.01	26.21	12.76
B-NS8	2.04	18.37	8.66
B-NS10	2.12	11.10	5.06
B-NS12	2.10	14.81	6.80
S-NS4	2.02	22.88	11.36
S-NS6	2.02	23.09	11.55
S-NS8	1.99	24.86	12.93
S-NS10	1.96	23.00	11.18
S-NS12	2.06	22.68	10.98

Etüv kürü ve buhar kürü uygulanmış çelikhane cürüflü harç numunelerinde aktivatör oranının artmasıyla boşluk oranının ve su emme oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda boşluk oranı ile su emme oranı arasında da doğru bir orantı olduğu görülmektedir. Suda kürlenmesi yapılan numunelerin boşluk oranı ve su emme oranı değerleri yüksek olup aktivatör içeriğinin artması, numunelerinin fiziksel özelliklerinde önemli bir fark yaratmamıştır.

Etüv kürü uygulanan numunelerde en düşük oranlar E-NS12 numunesinde görülmüş, boşluk oranı %17,04 ve su emme oranı %8,07 olarak kaydedilmiştir. Buhar kürü uygulanan numunelerde B-NS10 numunesi, %11.10'luk boşluk oranı ve %5,06'lık su emme oranıyla tüm harç numuneleri arasındaki en düşük değer olarak tespit edilmiştir. Portland Çimentolu kontrol numunesinin boşluk oranı %18,60 ve su emme oranı %8,83 değerindedir. Bu durumda, %10-12 Sodyum ihtiva eden etüv kürü ve buhar kürü uygulanan harç numunelerinin kontrol numunesinden daha düşük boşluk oranı ve su emme oranına sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.2. Harç numunelerinin boşluk ve su emme oranı değişimleri

5.4. Kılcal Su Emme

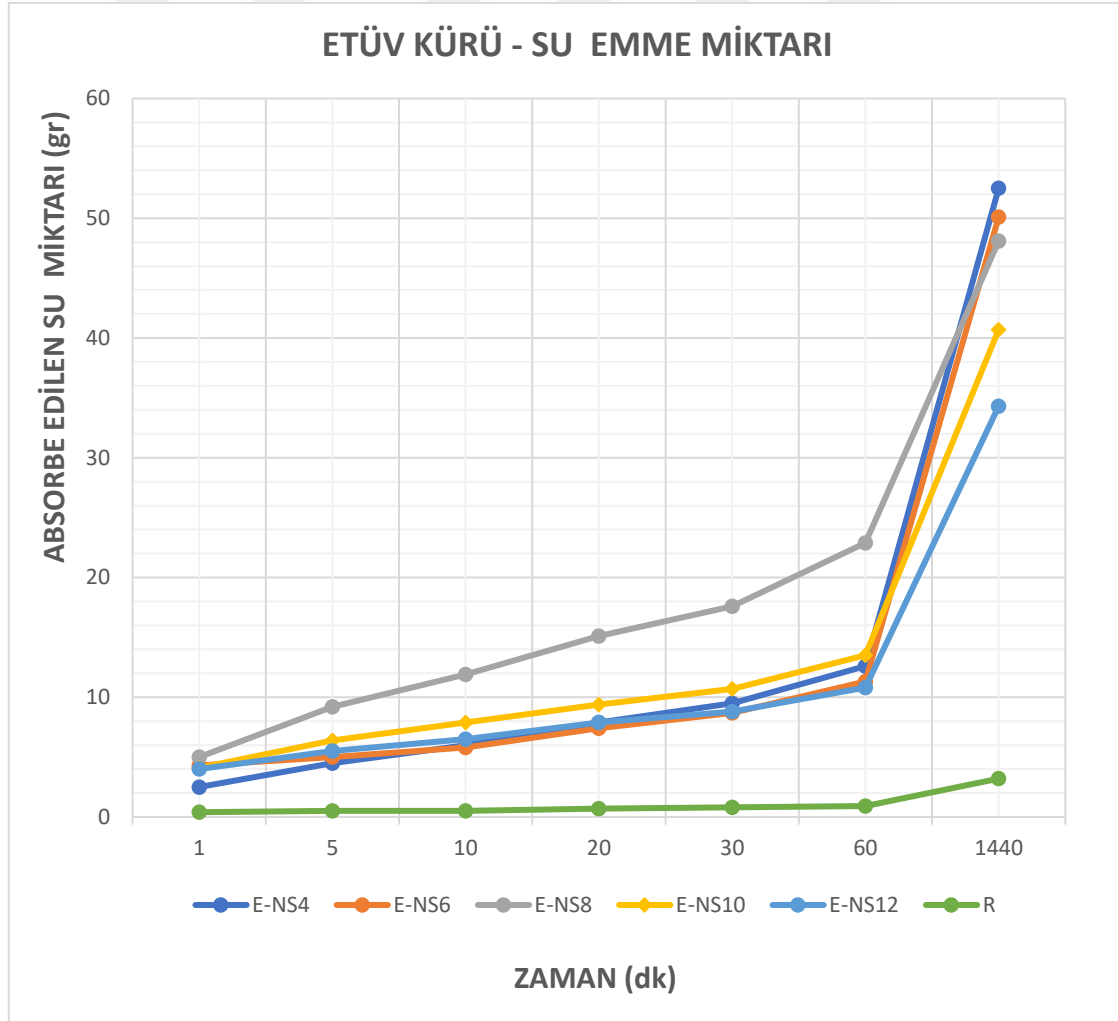
3 farklı kür metodu uygulanan AA-ÇC harçlarının ve Portland çimentolu kontrol harcının zamana bağlı olarak absorbe ettiği su miktarları ve kılcallık katsayıları (TS EN 1015-18)'ye göre hesaplanıp aşağıdaki tablo ve grafiklerde sunulmuştur.

Tablo 5.4. Zamana göre kılcal su emme miktarları

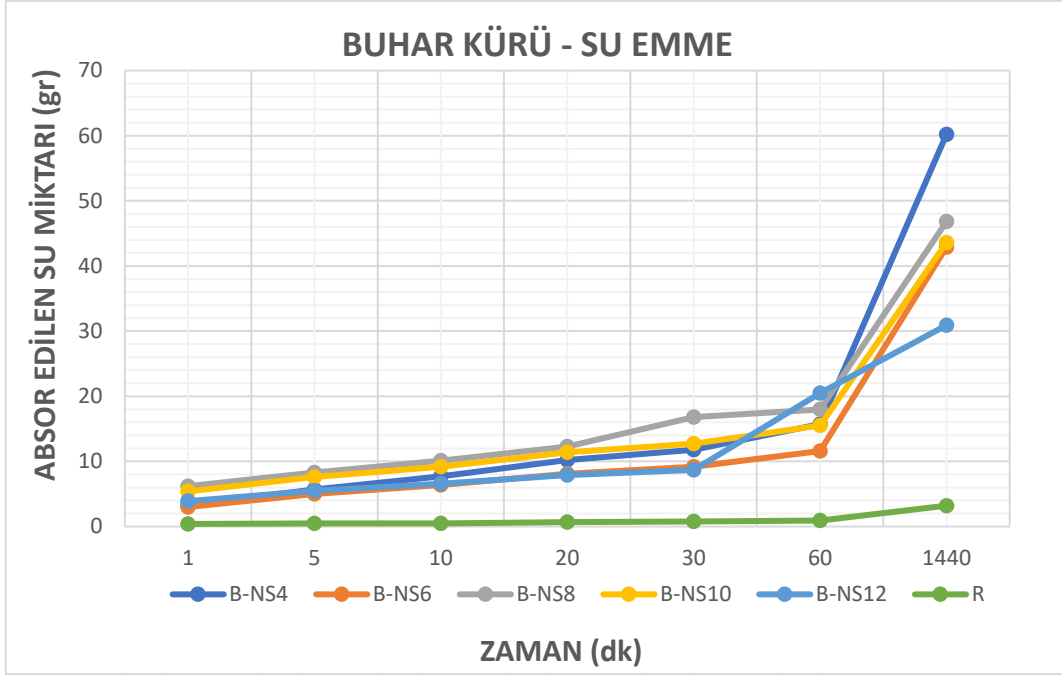
I= Su Emme Miktarları (gr)							
Numune No	1.Dk	5. Dk	10. Dk	20. Dk	30. Dk	1. Saat	1. Gün
E-NS4	2.5	4.5	6	7.9	9.5	12.6	52.5
E-NS6	4.3	5	5.8	7.4	8.7	11.3	50.1
E-NS8	5	9.2	11.9	15.1	17.6	22.9	48.1
E-NS10	4.1	6.4	7.9	9.4	10.7	13.5	40.7
E-NS12	4	5.5	6.5	7.9	8.8	10.8	34.3
B-NS4	3.3	5.7	7.7	10.2	11.8	15.7	60.2
B-NS6	3	5	6.4	8.1	9.2	11.6	42.9
B-NS8	6.2	8.3	10.1	12.3	16.8	18	46.8
B-NS10	5.4	7.6	9.2	11.4	12.7	15.5	43.6

Tablo 5.4. Zamana göre kılcal su emme miktarları (Devam)

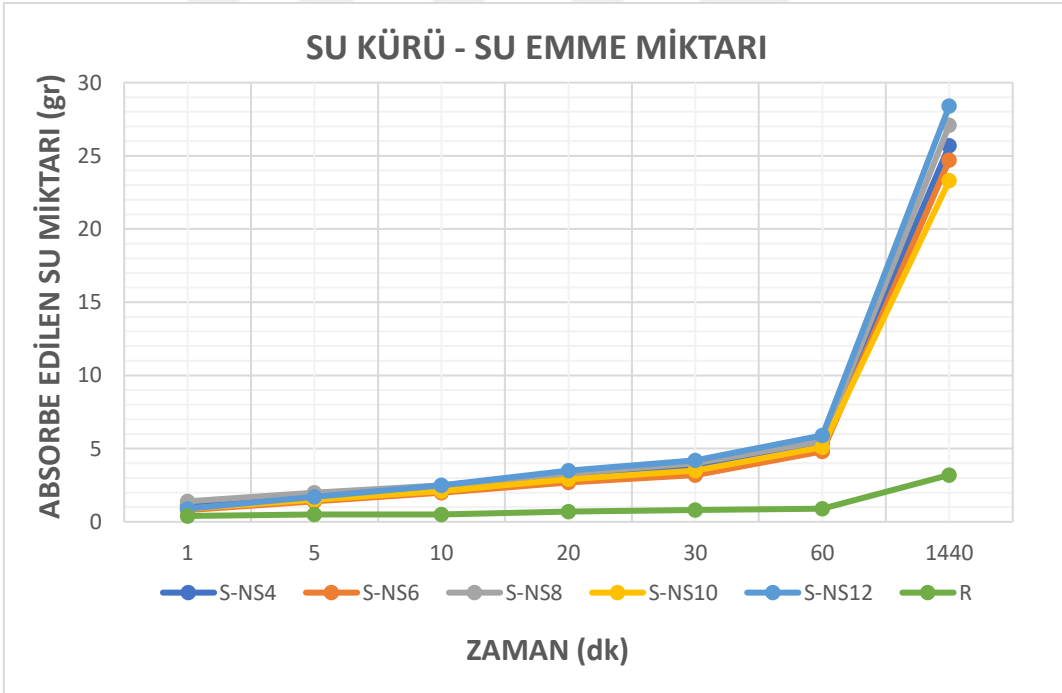
I= Su Emme Miktarları (gr)							
Numune No	1.Dk	5. Dk	10. Dk	20. Dk	30. Dk	1. Saat	1. Gün
B-NS12	3.9	5.5	6.6	7.9	8.7	20.5	30.9
S-NS4	1.1	1.8	2.4	3.1	3.8	5.4	25.7
S-NS6	0.8	1.4	2	2.7	3.2	4.8	24.7
S-NS8	1.4	2	2.5	3.3	4	5.5	27.1
S-NS10	0.9	1.5	2.1	2.9	3.5	5.1	23.3
S-NS12	0.9	1.7	2.5	3.5	4.2	5.9	28.4
R	0.4	0.5	0.5	0.7	0.8	0.9	3.2



Şekil 5.3. Etüv kürü zamana göre su emme miktarları



Şekil 5.4. Buhar kürü zamana göre su emme miktarları



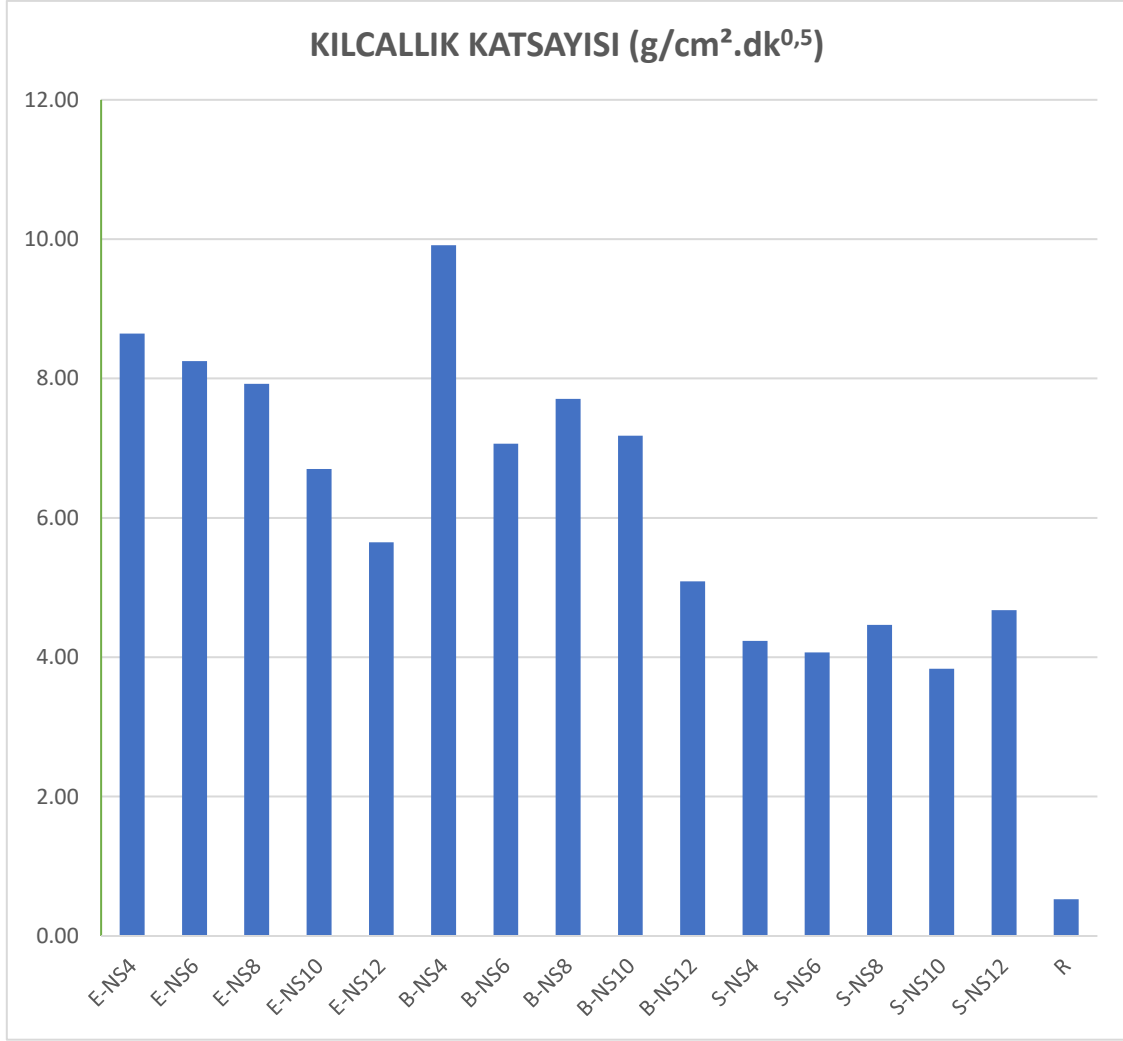
Şekil 5.5. Su kürü zamana göre su emme miktarları

Etüv kürü ve buhar kürü uygulanan harçların ihtiva ettiği NS miktarı arttıkça absorbe ettiği su miktarının azaldığı görülmektedir. Her iki kür yönteminde de en çok suyu %4 NS içeren numuneler, en düşük suyu da %12 NS içeren numuneler absorbe etmiştir. Su kürlenmesi yapılan tüm numunelerde sonuçlar birbirine yakın değerlerde seyretmiş, ısl

kür uygulanan numunelere göre daha az su emmiştir. Kontrol harçlarında ise AA-ÇÇ harçlarına göre çok daha az miktarlarda su absorbe edilmiştir.

Tablo 5.5. Numunelerin kılcallık katsayıları (mm/sn.05)

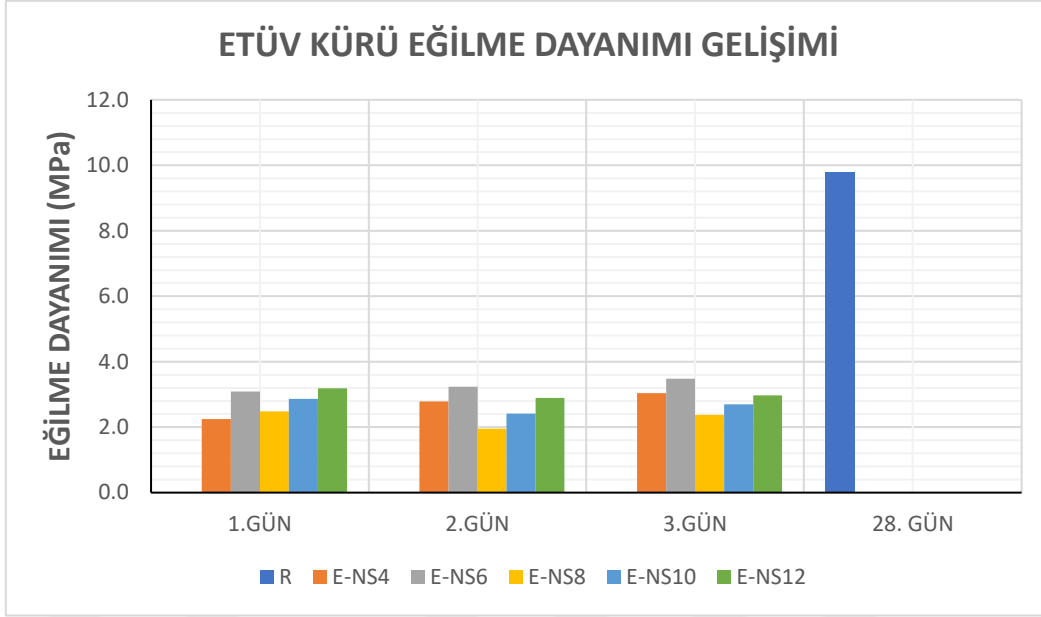
Numune No	Kılcallık Katsayısı (mm/s ^{0.5})
E-NS4	8,6469
E-NS6	8,2516
E-NS8	7,922
E-NS10	6,7034
E-NS12	5,6493
B-NS4	9,9151
B-NS6	7,0657
B-NS8	7,7081
B-NS10	7,1810
B-NS12	5,0893
S-NS4	4,2328
S-NS6	4,0681
S-NS8	4,4634
S-NS10	3,8376
S-NS12	4,6775
R	0,5270



Şekil 5.6. Kılcallık katsayıları

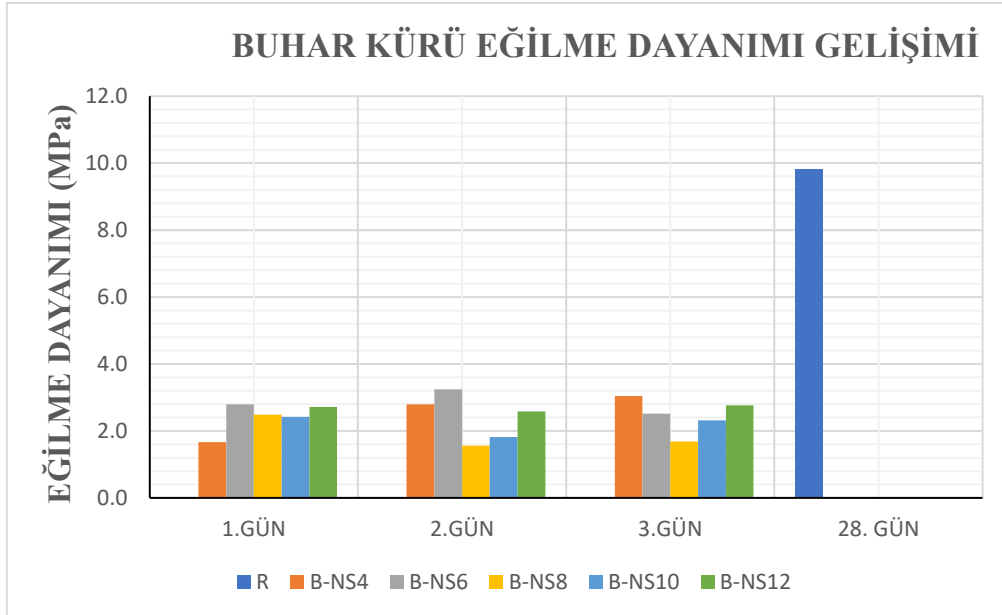
5.5. Eğilme Dayanımı

AA-ÇÇ'li harçlara etüvde 80°C'lik sıcaklık koşullarında 1, 2 ve 3 günlük sürelerle etüv kürü uygulanmış ve eğilme dayanımı sonuçları 28 gün boyunca suda kürlenmiş kontrol numunesiyle mukayese edilmiştir. E-NS4 ve E-NS6 numunelerinde kürlenme süresinin artması, harç numunelerini olumlu etkilemiştir ve en yüksek dayanımlar 3. günün sonunda elde edildiği Şekil 5.7.'deki grafikte gösterilmiştir. Diğer numunelerde ise kür süresine bağlı bir eğilme dayanımı davranışı gözlenmemiştir. Portland çimentolu kontrol harcının eğilme dayanımında ise 10 MPa'ya yakın bir sonuç elde edilmiş ve çelikhane cürufu harç numunelere göre üstün bir performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.



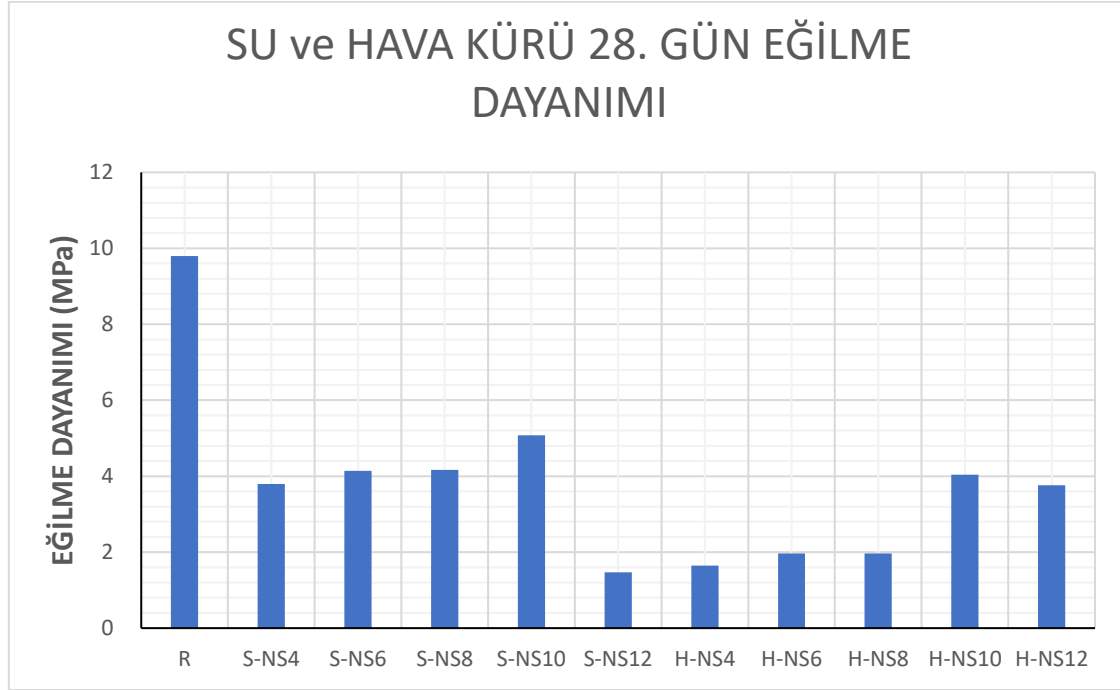
Şekil 5.7. Etüv kürü uygulanan numunelerin eğilme dayanımı

Şekil 5.8.'de farklı karışım oranlarında hazırlanan harç numunelerinin buhar kürü altında, kür süresine bağlı olarak değişen eğilme dayanımları ve 28 gün boyunca suda kürlenmiş kontrol numunesinin eğilme dayanımı gösterilmiştir. B-NS4 ve B-NS6 numunesinde zamana bağlı doğrusal bir eğilme dayanımı artışı görülürken diğer numunelerde eğilme dayanımının kürlenme süresiyle arasında doğrudan bir bağlantı kurulamamıştır.



Şekil 5.8 Buhar kürü uygulanan numunelerin eğilme dayanımı

AA-ÇÇ'li harçlar 21 ± 2 °C'lik sıcaklık koşullarındaki kürlenme havuzunda 28 gün boyunca kürlenmiştir. S-NS12 numunesi hariç diğer numunelerde aktivatör oranı arttıkça eğilme dayanımı da artmıştır. S-NS10 numunesi 5,08 MPa dayanıma ulaşmış ve çelikhane cürufu arasında en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır (Şekil 5.9.).

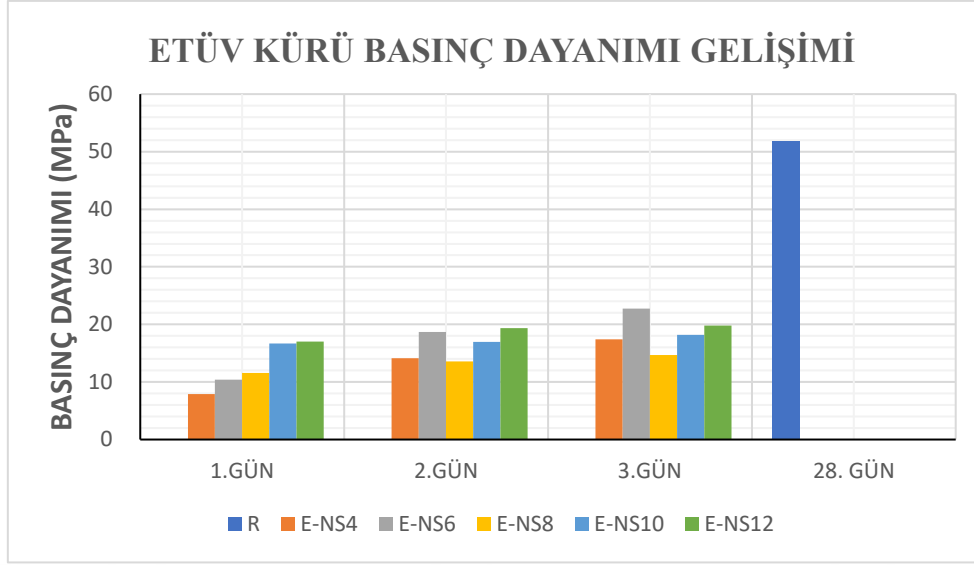


Şekil 5.9. Su ve havada kürlenmiş numunelerin eğilme dayanımı

Laboratuvar koşullarında açık havada kürlenmiş numunelerde aktivatör içeriğine bağlı olarak dayanım artsa da düşük seviyelerde kalmıştır. H-NS10 ve H-NS12 numunesinde diğer numunelere kıyasla yüksek bir eğilme dayanımı kaydedilmiştir.

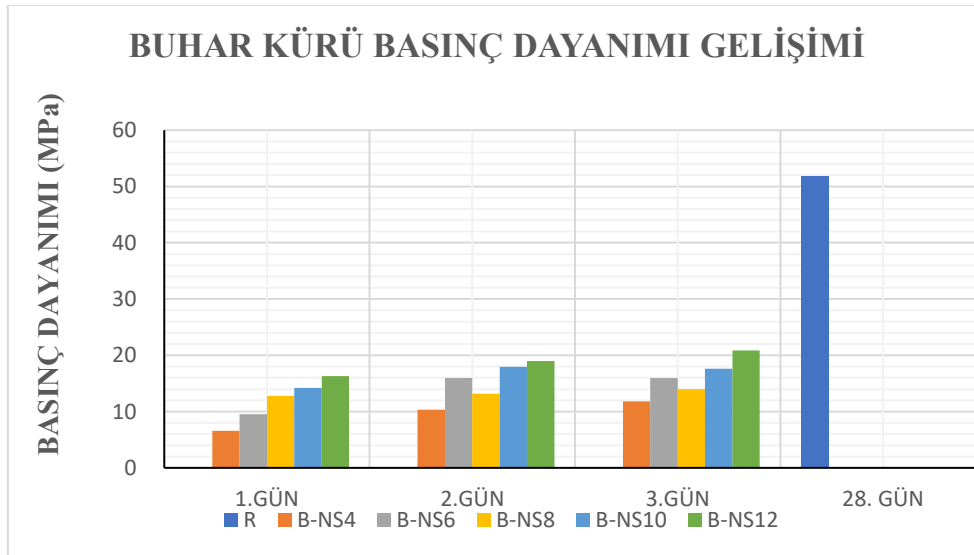
5.6. Basınç Dayanımı

AA-ÇÇ'li harçlara etüvde 80°C'lik sıcaklık koşullarında 1, 2 ve 3 günlük sürelerle etüv kürü uygulanmış ve basınç dayanımı sonuçları 28 gün boyunca suda kürlenmiş kontrol numunesiyle karşılaştırılmıştır. Şekil 5.10.'da etüv kürü uygulanan numunelerde basınç dayanımının kürlenme süresi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Özellikle E-NS4 ve E-NS6 numunelerinin basınç dayanımında; 2. günün sonunda %80'den fazla, 3. günün sonunda %100'den fazla bir artış görülmüştür. E-NS6 numunesi 22,76 MPa'lık basınç dayanımıyla sıcak kürlenmede en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır.



Şekil 5.10. Etüv kürü uygulanan harç numunelerinin basınç dayanımı

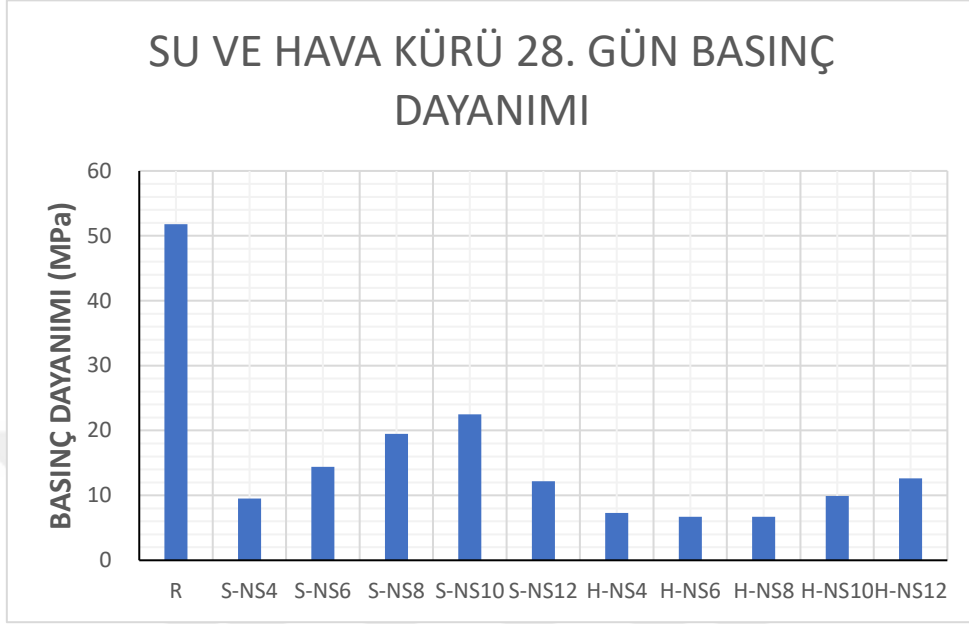
Buhar kürü uygulanan numunelerde de etüv küründe olduğu gibi basınç dayanımının kür süresiyle doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.11.). Buhar kürü uygulanmış numunelerin basınç dayanımı gelişiminin çoğunu 2. günün sonunda tamamladığı görülmüştür. Buhar kürü uygulanmış harçlar arasında B-NS12 numunesi 20 MPa'nın üzerinde bir dayanıma ulaşmıştır.



Şekil 5.11. Buhar kürü uygulanan harç numunelerinin basınç dayanımı

AA-ÇÇ'li harçlar 21 ± 2 °C'lik sıcaklık koşullarındaki kürleme havuzunda 28 gün boyunca kürlenmiştir. S-NS12 numunesi hariç diğer numunelerde aktivatör oranı arttıkça basınç

dayanımı da artmıştır. S-NS8 numunesi 19,46 MPa, S-NS10 numunesi 22,48 MPa'lık basınç dayanımı elde etmiştir. (Şekil 5.12.).



Şekil 5.12. Su ve havada kürlenmiş numunelerin basınç dayanımı

Portland çimentolu ve AA-ÇÇ'li harçlar, dayanım gelişimi için gereken hidrasyon reaksiyonlarının önemli bir kısmını döküm işlemini takip eden günlerde gerçekleştirmektedir. Bu süre zarfında ortamda gereken sıcaklık ve harcın bünyesinde gerekli miktarda su bulunmazsa dayanım gelişimi yeterli seviyelerde olmamaktadır. Hava kürü yapılan numunelerin hidrasyon için gereken sıcaklığı ortamdaki sağlayamadığı ve gerçekleşen reaksiyonlar neticesinde ihtiva ettiği suyu kaybettiği, bu sebeple de basınç dayanımı gelişiminin beklenen seviyelerde olmadığı görülmektedir. Bu sebepten dolayı hava kürü uygulanan numunelerde durabilite deneyleri gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca, hava kürü uygulanan numunelerde çiçeklenmeler de gözlemlenmiştir.

5.7. Ultrasonik Ses Geçişi

Belirli kütleme metotları uygulanan çelikhane cürüflü harç numunelerinin ve Portland çimentolu harç numunelerinin ultrasonik test yöntemiyle dalga geçiş hızı tayin edilmiştir. Ölçümler;

- 1) Normal kürlenme süresi tamamlanan numune
- 2) 300 °C yüksek sıcaklık uygulanan numune

3) 600 °C yüksek sıcaklık uygulanan numune

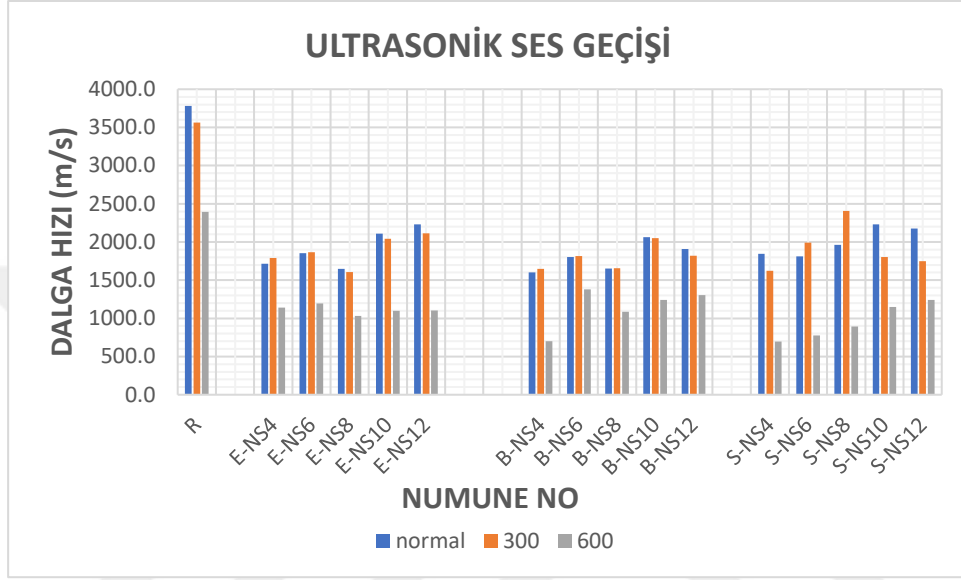
olmak üzere 3 farklı koşulda yapılmıştır. Ultrasonik ses geçiş hızı deneyi uygulanan numunelerin ölçüm değerleri Tablo 5.6.'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. Harç numunelerinin ses iletim hızı

Ses İletim Hızı (m/s)			
Numune No	Normal Kür	300 °C	600 °C
E-NS4	1714	1792	1139
E-NS6	1854	1867	1197
E-NS8	1650	1608	1033
E-NS10	2109	2043	1098
E-NS12	2231	2114	1103
B-NS4	1601	1648	701
B-NS6	1802	1816	1378
B-NS8	1652	1655	1085
B-NS10	2063	2051	1243
B-NS12	1910	1818	1304
S-NS4	1843	1624	698
S-NS6	1810	1990	775
S-NS8	1961	2406	893
S-NS10	2231	1804	1149
S-NS12	2178	1747	1243
R	3783	3563	2395

Çelikhane cürüflu harç numunelerinde Sodyum oranının artmasıyla dalga hızının attığı görülmektedir. Ancak yine de normal kürlenme süresi biten tüm numunelerde dalga hızı 1650-2231 m/s arasında değişmektedir. Tablo 4.4.'ten alınan bilgilerle yola çıkıldığında çelikhane cürüflu harçların kalitesinin çok zayıf-zayıf aralığında olduğu yorumu yapılabilmektedir. Numunelere 300 °C yüksek sıcaklık uygulanmasıyla bazı numunelerin dalga hızında azalış, bazı numunelerde ise artış görülmüşse de sonuçlar normal kürlenmeye paralel seyretmiş ve kalite değişikliğine neden olmamıştır. 600 °C yüksek

sıcaklık uygulanması da dalga hızının çok azalmasına ve kalitenin çok daha düşmesine yol açmıştır. Kontrol numunesinde ise normal kür ve 300 °C'lik sıcaklık uygulanmasında 3500 m/s'nin üstünde değerler elde edilmiş ve kalitenin iyi olduğu gözlemlenmiştir. 600 °C'lik sıcaklık uygulandığında ise dalga hızı 2395 m/s değerine düşerek numunenin kalitesi iyi seviyeden zayıf seviyesine gerilemiştir.



Şekil 5.13. Harç numunelerinin ultrasonik geçiş hızları

5.8. Asit Etkisine Karşı Dayanıklılık

Numunelerin asit etkisine karşı dayanıklılıklarını tayin edebilmek amacıyla yoğunluğu %5 olan HCl (hidroklorik asit) çözeltisi hazırlanmıştır. Kürlenme süreleri tamamlanan numuneler, 112 gün boyunca hazırlanan asit çözeltisinde bekletilmiştir. Bu sürenin tamamlanmasının ardından numunelerin eğilme dayanımları ve basınç dayanımları incelenmiştir. Numunelerin asit etkisi altındaki dayanımları ve dayanım değişimleri Tablo 5.7. ve 5.8.'de, grafik olarak da Şekil 5.14. ve 5.15.'te gösterilmiştir.

Tablo 5.7. Asit içinde bekletilen numunelerinin dayanımları

Numune No	İlk Eğilme Dayanımı (MPa)	Son Eğilme Dayanımı (MPa)	İlk Basınç Dayanımı (MPa)	Son Basınç Dayanımı (MPa)
E-NS4	3,04	2,72	17,42	12,04
E-NS6	3,48	3,84	22,76	12,70

Tablo 5.7. Asit içinde bekletilen numunelerinin dayanımları (Devam)

Numune No	İlk Eğilme Dayanımı (MPa)	Son Eğilme Dayanımı (Mpa)	İlk Basınç Dayanımı (MPa)	Son Basınç Dayanımı (MPa)
E-NS8	2,37	3,20	14,68	8,26
E-NS10	2,70	3,12	18,19	9,79
E-NS12	2,97	3,14	19,81	10,54
B-NS4	3,04	2,83	11,79	10,06
B-NS6	2,52	3,13	15,98	15,81
B-NS8	1,68	3,46	13,99	10,72
B-NS10	2,32	3,37	17,61	9,26
B-NS12	2,77	2,72	20,88	9,76
S-NS4	3,80	0	9,51	7,08
S-NS6	4,14	0	14,40	6,33
S-NS8	4,17	0	19,46	8,39
S-NS10	5,08	3,46	22,48	12,65
S-NS12	1,47	1,26	12,17	9,84
R	9,80	8,32	51,80	41,25

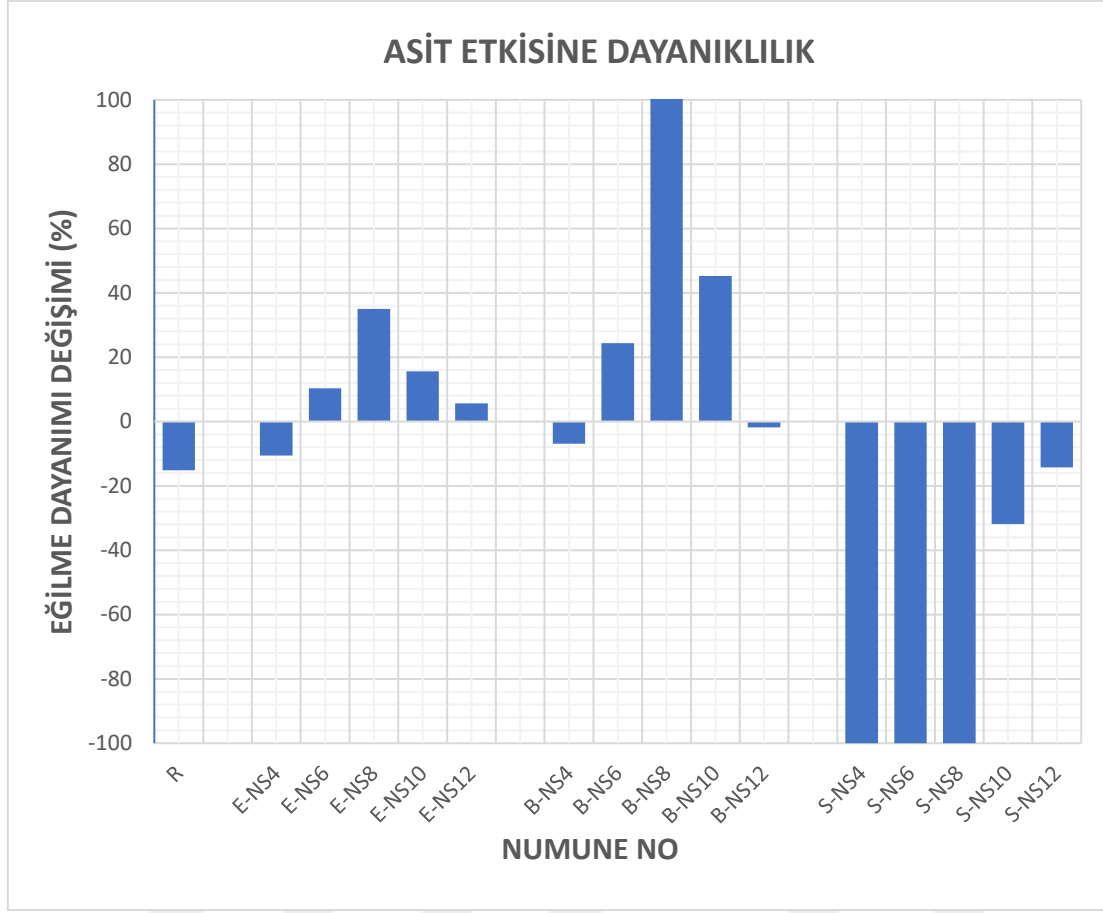
Tablo 5.8. Asit içinde bekletilen numunelerinin dayanım değişimleri

Numune No	Eğilme Dayanımı Değişimi (%)	Basınç Dayanımı Değişimi (%)
E-NS4	-10,53	-30,88
E-NS6	10,34	-44,22
E-NS8	35,02	-43,75
E-NS10	15,56	-46,22
E-NS12	5,61	-46,80
B-NS4	-6,91	-14,73
B-NS6	24,37	-1,06
B-NS8	105,95	-23,37
B-NS10	45,26	-47,42

Tablo 5.7. Asit içinde bekletilen numunelerinin dayanım değişimleri (Devam)

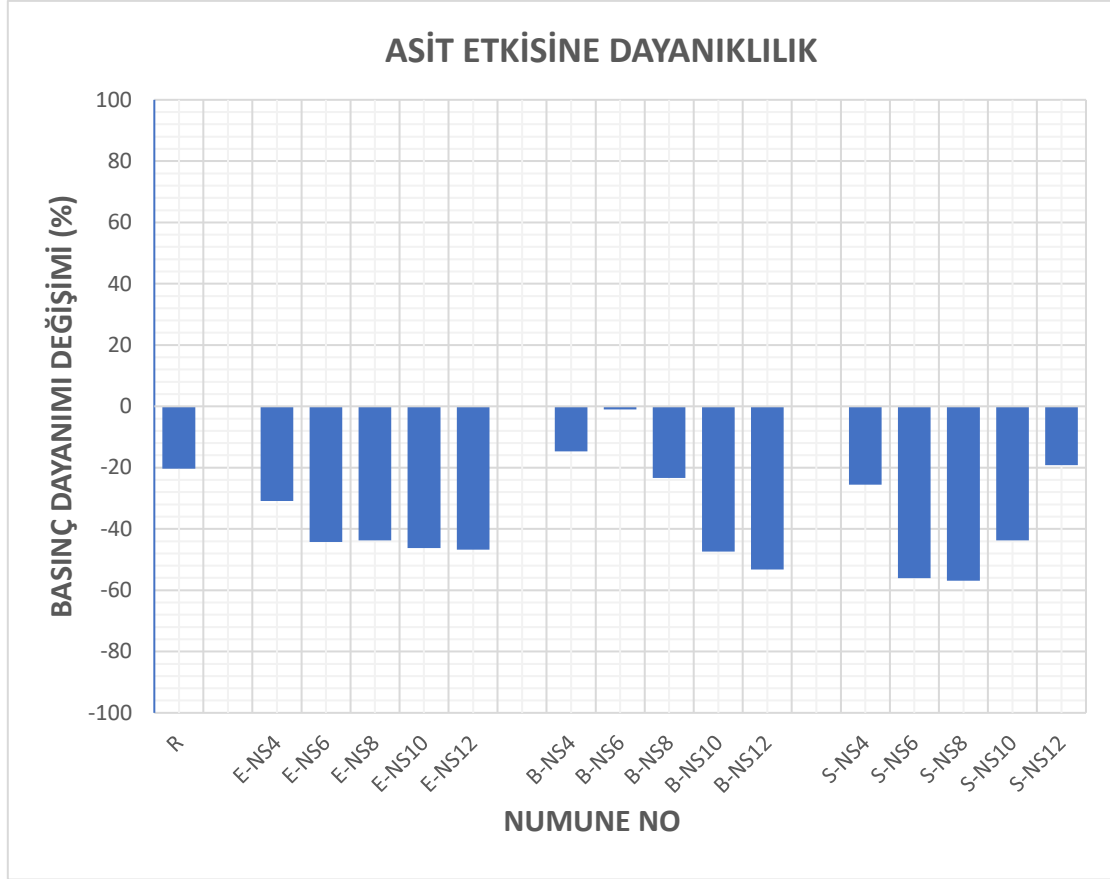
Numune No	Eğilme Dayanımı Değişimi (%)	Basınç Dayanımı Değişimi (%)
B-NS12	-1,81	-53,28
S-NS4	-100	-25,60
S-NS6	-100	-56,04
S-NS8	-100	-56,89
S-NS10	-31,89	-43,73
S-NS12	-14,29	-19,19
R	-15,10	-20,38

112 gün boyunca HCl çözeltisi içinde bekletilen ve 3 farklı kür yöntemi uygulanmış harç numunelerinin eğilme dayanımları incelendiğinde; Sıcak kürleme uygulanan harç numunelerinde, HCl çözeltisine maruz bırakılmalarına rağmen eğilme dayanımı artışı görülmüştür. E-NS8 numunesinde %35'lik eğilme dayanımı artışı kaydedilmiş ve etüv kürlemesi metodundaki en yüksek değer olarak kaydedilmiştir. Yalnızca E-NS4 numunesinde eğilme dayanımı kaybı görülmüş ve bu da -%10,53 oranında gerçekleşmiştir. Buhar kürü uygulanan numuneler de etüv kürü uygulanan numunelere paralel bir davranışı göstermiştir. Ancak etüv küründen farklı olarak eğilme dayanımı artışında daha yüksek miktarlarda sonuçlar elde edilmiştir. B-NS6 numunesinde %24,37, B-NS8 numunesinde %105 ve B-NS10 numunesinde %45,26'lık dayanım artışı görülürken B-NS4 numunesinde ise %6,91'lik eğilme dayanımı kaybı yaşanmıştır. Su kürlemesi yapılan numunelerdeki eğilme dayanımı ise diğer iki kürleme metoduna göre farklı bir şekilde seyretmiştir. S-NS4, S-NS6 ve S-NS8 numunelerinde düşük yüklemelerde numuneler kırılmış, eğilme dayanımı tayin edilememiş ve %100 oranında bir kayıp yaşanmıştır. S-NS10 numunesinde %31,89'luk, S-NS12 numunesinde %14,29'luk eğilme dayanımı kaybı görülmüştür. Sonuç olarak su kürlemesi yapılan numunelerin tamamının, HCl karşısındaki eğilme dayanımı performansı diğer numunelere nazaran yetersiz kalmıştır. Portland çimentolu harç numunesi de %15,10'luk değer kaybıyla su kürlemesi yapılan S-NS12 numunesine benzer bir davranış göstermiştir.



Şekil 5.14. Asit içinde bekletilen numunelerin dayanım değişimleri

Asit etkisinde harç numunelerinin basınç dayanımları incelendiğinde; tüm kütleme koşullarındaki numunelerin mukavemet kaybı yaşadığı sonucu elde edilmiştir. 3 farklı kütlemede de Sodyum miktarı arttıkça basınç dayanımı kaybı artmıştır. E-NS4 numunesi %30,88'lik dayanım kaybıyla bu kür metodunda asitten en az etkilenen numune olurken E-NS12 Sodyum içeren harç numunesi %46,80'lik dayanım kaybıyla en çok mukavemet kaybı yaşayan numune olmuştur. B-NS6 numunesi %1,81'lik değer kaybıyla ortamdaki HCl çözeltisinden neredeyse hiç etkilenmemiştir ancak B-NS12 numunesi %53,28 oranında dayanım kaybı kaydedilmiştir. Su kütleme uygulanan numunelerin tamamında önemli oranlarda basınç dayanımı kayıpları gözlemlenmiştir. S-NS8 numunesii %56,89'luk dayanım kaybıyla tüm numuneler arasında en çok dayanım kaybına uğrayan numune olmuştur. Portland çimentolu harç numunesi ise %20,38'lik bir basınç dayanımı kaybı yaşasa da AA-ÇÇ'li harç numunelerine kıyasla daha etkili bir asit direnci performansı sergilemiştir.



Şekil 5.15. Asit içinde bekletilen numunelerin dayanım değişimleri

5.9. Yüksek Sıcaklık Dayanımı

40 x 40 x 160 mm ebatlarındaki AA-ÇC harçları ve Portland çimentolu kontrol harçları kütleme sürelerini tamamlamasının ardından 300° C ve 600° C'lik yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Bu işlemin ardından numunelerin kütle değişimleri ve basınç değişimleri ele alınmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları Tablo 5.9. ve 5.10.'da gösterilmektedir.

Tablo 5.9. 300°C'de numunelerin ağırlık ve dayanım değişimi

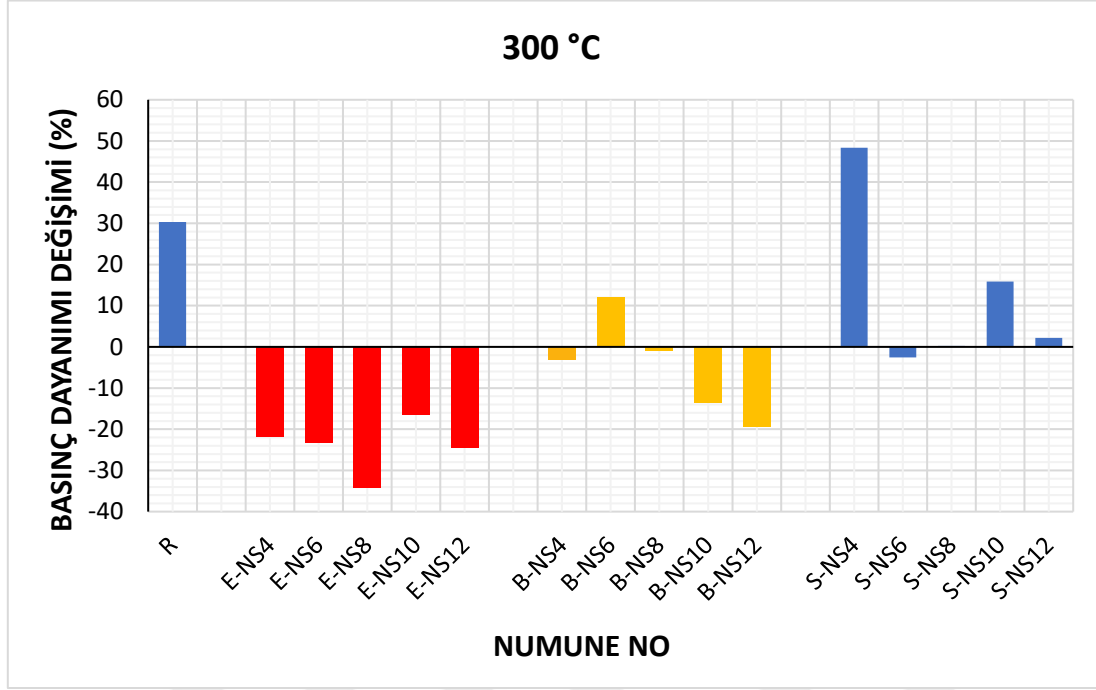
300 °C	Ağırlık (gr)		Basınç Dayanımı (MPa)		Ağırlık Değişimi (%)	Dayanım Değişimi (%)	
	Numune No	Başlangıç	Deney Sonrası	Başlangıç			Deney Sonrası
	E-NS4	510,5	503,3	17,42	13,64	-1,41	-22,70
	E-NS6	519,7	510,8	22,76	17,45	-1,71	-23,30

Tablo 5.9. 300°C’de numunelerin ağırlık ve dayanım değişimi (Devam)

300 °C	Ağırlık (gr)		Basınç Dayanımı (MPa)		Ağırlık Değişimi (%)	Dayanım Değişimi (%)
	Başlangıç	Deney Sonrası	Başlangıç	Deney Sonrası		
E-NS8	509,8	499	14,68	9,49	-2,12	-34,12
E-NS10	545,8	532	18,19	15,22	-2,53	-16,34
E-NS12	558,8	542,1	19,81	14,15	-2,99	-24,55
B-NS4	514,1	509,9	11,79	11,42	-0,82	-3,20
B-NS6	518,7	512,4	15,98	17,9	-1,21	12,02
B-NS8	530,1	523,7	13,99	13,87	-1,21	-1
B-NS10	547,6	529,4	17,61	15,24	-3,32	-13,49
B-NS12	541,6	525,9	20,88	16,84	-2,90	-19,37
S-NS4	518,6	517,2	9,51	14,11	-3,12	48,31
S-NS6	500,4	502,4	14,40	14,04	-2,34	-2,53
S-NS8	500,1	488,7	19,46	19,5	-3,98	0,2
S-NS10	505,2	480,2	22,48	26,05	-2,45	15,88
S-NS12	530,3	492,8	12,17	12,44	-3,05	2,12
R	527,9	514,1	51,8	67,85	-2,03	30,30

300° C’lik sıcaklığa maruz kalan numunelerin kütle kaybı yaşadığı görülmektedir. Bu durum, harçların bünyesinde ihtiva ettiği suyu 300° C’lik sıcaklıkta kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Basınç dayanımları incelendiğinde; etüv kürü uygulanan numunelerin hepsinin dayanımının azaldığı, en az kayıp yaşayannın da %16,34’lük değerle E-NS10 numunesinin olduğu görülmektedir. Buhar kürü uygulamasında ise B-NS4 ve B-NS8 numuneleri çok düşük dayanım kayıpları yaşarken B-NS6 numunesinde bunun aksine %12,02 oranında bir dayanım artışı meydana gelmiştir. 28 günlük su kürelemesi yapılan harçlarda ise önemli dayanım artışları kaydedilmiştir. S-NS4 numunesi

%48,31'lik artışla göze çarparken S-NS10 numunesinin dayanımı %15,88'lik artışla 26,05 MPa'ya ulaşmıştır. Kontrol harcının dayanım gelişimi de su kürü yapılan numunelere benzer seyretmiş ve %30,30 oranında bir artış yaşamıştır.



Şekil 5.16. 300°C'de numunelerin basınç dayanımı değişimi

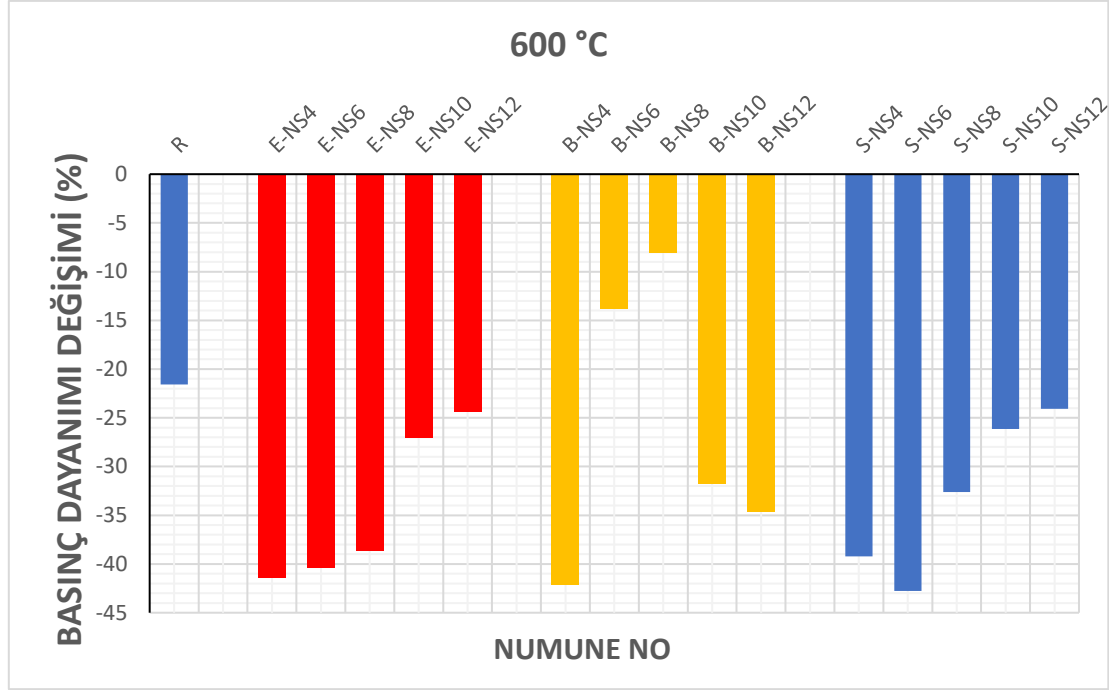
Tablo 5.10. 600°C'de numunelerin ağırlık ve dayanım değişimi

600 °C	Ağırlık (gr)		Basınç Dayanımı (MPa)		Ağırlık Değişimi (%)	Dayanım Değişimi (%)	
	Numune No	Başlangıç	Deney Sonrası	Başlangıç			Deney Sonrası
	E-NS4	509,4	488,4	17,42	10,21	-4,12	-41,39
	E-NS6	517,6	495,2	22,76	13,58	-4,33	-40,33
	E-NS8	511,1	481,2	14,68	9,00	-5,85	-38,68
	E-NS10	543,7	504,7	18,19	13,27	-7,17	-27,06
	E-NS12	554,9	512,6	19,81	14,98	-7,62	-24,40
	B-NS4	512,7	491,5	11,79	6,83	-4,13	-42,08

Tablo 5.10. 600°C’de numunelerin ağırlık ve dayanım değişimi (Devam)

600 °C	Ağırlık (gr)		Basınç Dayanımı (MPa)		Ağırlık Değişimi (%)	Dayanım Değişimi (%)
	Başlangıç	Deney Sonrası	Başlangıç	Deney Sonrası		
Numune No						
B-NS6	519,9	499,00	15,98	13,78	-4,02	-13,77
B-NS8	532,3	496,4	13,99	12,86	-6,74	-8,08
B-NS10	544,1	509,1	17,61	12,01	-6,43	-31,80
B-NS12	540,2	501,1	20,88	13,65	-7,24	-34,63
S-NS4	517,8	498,2	9,51	6,44	-6,84	-39,22
S-NS6	498,2	482,4	14,40	8,24	-7,47	-42,78
S-NS8	502,3	461,00	19,46	13,11	-9,58	-32,63
S-NS10	509,5	454,2	22,48	16,6	-7,97	-26,15
S-NS12	534,9	468,9	12,17	9,24	-7,12	-24,08
R	524,9	496,8	51,8	41,45	-5,09	-21,58

600° C’lik sıcaklığa maruz kalan tüm numunelerdeki kütle kayıpları, daha yüksek sıcaklığın etkisiyle 300° C’lik numunelere kıyasla artmıştır. Numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde ise; etüv kürü uygulanan numunelerde Sodyum miktarı arttıkça dayanım kayıplarının azaldığı görülmüştür. E-NS4 numunesinde %41,39’luk kayıp varken E-NS12 numunesinde bu değer %24,40’a kadar gerilemiştir. Buhar kürü uygulanan harçlarda B-NS6 ve B-NS8 numuneleri diğer tüm numunelerle karşılaştırıldığında en iyi sonuçlara ulaşmıştır. Özellikle B-NS8 numunesi yalnızca %8,08 oranında bir dayanım kaybı yaşayarak iyi bir performans göstermiştir. 28 gün su kürü yapılan numunelerin davranışı ise sıcak kür yapılan numunelerin davranışına çok benzemektedir. Yani 28 günlük su kürlemesinde yapılan harçlarda sodyum miktarının artması dayanım kaybını olumlu yönde etkilemiştir. Portland çimentolu kontrol harcında ise %21,58’lik bir dayanım kaybı gözlenmiştir.



Şekil 5.17. 600°C’de numunelerin basınç dayanımı değişimi

5.10. Genel Değerlendirme

Alkalilerle aktive edilen çelikhane cürüflü harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri ve kendi aralarındaki performansları, Portland çimentolu harç numuneleriyle Tablo 5.11’de genel bir değerlendirme yapılarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada değerlendirme sonuçları (*) sembolü kullanılarak yapılmış ve (*);

- ***** → En iyi
- **** → İyi
- *** → Orta
- ** → Zayıf
- * → Çok Zayıf

numune sonuçlarını temsil edecek şekilde gösterilmiştir.

Deney sonuçlarına incelendiğinde etüv kürü uygulanan numunelerde E-NS12, buhar küründe B-NS12, su küründe S-NS10 numunelerinin ön plana çıktığı görülmüştür.

Tablo 5.11. Harç numunelerinin genel değerlendirmesi

Numune No	BHA	Kılcal Su Emme	Eğilme Dyn.	Basınç Dyn.	Ses Geç.	Asit	Yüksek Sıcaklık	Toplam
R	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	35
E-NS4	***	*	*	**	*	***	*	12
E-NS6	***	*	***	*****	*	**	*	15
E-NS8	***	*	*	*	*	**	**	11
E-NS10	*****	*	**	***	**	*	*****	18
E-NS12	*****	**	***	***	**	*	*****	20
B-NS4	*	*	**	*	*	*****	*	12
B-NS6	**	*	***	**	*	*****	*****	19
B-NS8	*****	*	*	*	*	*****	*****	19
B-NS10	*****	*	**	***	**	*	***	17
B-NS12	*****	**	***	*****	*	*	***	19
S-NS4	***	***	***	*	*	*****	*	15
S-NS6	***	***	***	*	*	*	*	13
S-NS8	**	**	***	***	*	*	**	14
S-NS10	***	***	*****	*****	**	**	*****	23
S-NS12	***	**	*	*	**	*****	*****	19

5.11. Maliyet Analizi

Çalışmada kullanılan malzemelerin piyasa fiyatları baz alınarak yaklaşık maliyet hesaplanmıştır. Ortalama fiyatlar CEM I 42.5 R çimento 1500 TL/ton, Elenmiş Dere Kumu 350 TL/m³, karışımda kullanılan Tokat ili içme suyu 3,6 TL/ton, Sodyum meta silikat 400 dolar/ton, olarak bulunmuştur (1 Dolar=18,70 TL). Çelikhane cürufu ise atık bir malzeme olduğu için ücretsiz bir şekilde temin edilebilmektedir. Çalışma, harç numuneleri üzerinden gerçekleştirildiğinden dolayı yaklaşık maliyet 4x4x16 cm ebatlarındaki kalıplar için bulunmuş ve bulunan değer üzerinden 5 farklı oranda aktivatör kullanılmış numunelerin 1 m³'lük maliyet analizi gerçekleştirilerek ile kontrol numunesi ile mukayese edilmiştir. Maliyeti analiz tablosu 5.12'de gösterilmiştir.

Tablo 5.12. Harç numunelerinin maliyet analizi

Numune No	Maliyet Analizi (TL/m ³)	Maliyet Analizi (\$/m ³)
R	1151,32	61,57
%4 NS	684,40	36,60
%6 NS	916,28	49,00
%8 NS	1148,16	61,40
%10 NS	1387,52	74,19
%12 NS	1619,40	86,60



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- 1- Çelikhane cürufunun puzolanik aktif bir malzeme olduğuna ulaşılmıştır.
- 2- Etüv kürü ve buhar kürü uygulanan numunelerde, kürlenme süresinin eğilme dayanımına doğrudan bir katkısı olmadığı görülmüştür.
- 3- S-NS12 numunesi hariç su ve hava kürü uygulanan numunelerde, Sodyum oranı ile eğilme dayanımı gelişiminin doğru orantılı olduğu anlaşılmıştır. Tüm kürler arasında en yüksek eğilme dayanımına 5,08 MPa'lık dayanım ile S-NS10 numunesi ulaşmıştır.
- 4- Etüv kürü ve buhar kürü uygulanan numunelerde kürlenme süresi arttıkça basınç dayanımları artmış ve en iyi sonuçlar 3. günün sonunda elde edilmiştir. E-NS6 numunesi 22,76 MPa dayanımla tüm AA-ÇC'li harçlar arasında en yüksek dayanıma ulaşan numune olmuştur.
- 5- Su ve hava kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımı gelişimi eğilme dayanımı gelişimi ile paralellik göstermektedir. S-NS10 numunesi 22,48 MPa dayanımla basınç dayanımı en yüksek 2. numune olmuştur. Hava kürü uygulanan numunelerde ise Sodyum içeriğinin artmasıyla dayanımlar bir miktar artsa da yeterli gelişim gözlenmemiş ve basınç dayanımları düşük seviyelerde kalmıştır. Hava küründeki dayanım gelişiminin yetersiz olduğu görüldükten sonra bu numunelere durabilite deneyleri uygulanmamıştır. Ayrıca hava kürü uygulanan numunelerde çiçeklenmelerin de meydana geldiği görülmüştür.
- 6- AA-ÇC'li harçların yayılma çapları aktivatör içeriğiyle doğru orantılıdır. %4 NS içeren harçta 139 mm yayılma çapı kaydedilirken %12 NS oranında bu değer 159 mm'ye ulaşmıştır. Portland çimentolu harcın yayılma çapı 142 mm olarak kaydedilirken bu değere en yakın sonuç ise %8NS harcında görülmüştür.
- 7- Etüv kürü ve buhar kürü uygulanan numunelerde aktivatör içeriği arttıkça su emme ve boşluk oranı azalmıştır. E-NS10, E-NS12, B-NS8, B-NS10 ve B-NS12 numuneleri, kontrol numunesinden daha az boşluklu yapıya sahiptir ve daha az su emmiştir.
- 8- AA-ÇC'li harçların, tüm kürlenme koşullarında Portland çimentolu kontrol harcına göre çok daha yüksek oranlarda kılcal su emdiği sonucuna varılmıştır.

9- AA-ÇÇ'li harçların ultrasonik test yöntemiyle ölçülen ses iletim hızı davranışı, tüm kürlendirme koşullarında benzerlik göstermiştir. Aktivatör içeriği arttıkça iletim hızı artsa da betonun kalitesinde kayda değer artışlar gözlenmemiş ve kalitenin çok zayıf-zayıf arasında olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin 600°C sıcaklığa maruz bırakılmasından sonra gerçekleştirilen ses iletim hızı deneyinde ise değerlerin neredeyse yarı yarıya azaldığı ve kalitenin çok zayıfa düştüğü sonucu elde edilmiştir. Kontrol numunesinde ise deney öncesi beton kalitesi iyi iken deney sonrası zayıf durumuna gerilemiştir.

10- Asit içerisinde bekletilen numunelerin eğilme dayanımları incelendiğinde; etüv kürü ve buhar kürü uygulanmış numunelerin eğilme dayanımında artış meydana gelmiştir. B-NS10 numunesi %105,95 ve B-NS12 numunesi %45,26'lık oranlarla en çok dayanımı artıran numuneler olmuştur. Su kürü uygulanan harçlarda ise düşük aktivatör içeriğinde numunelerin eğilme dayanımlarının tamamını kaybettiği gözlenmiş ancak S-NS12 numunesinin kontrol numunesine yakın bir sonuç elde etmiştir.

11- Asit içerisinde bekletilen harçların tamamının basınç dayanımı azalmış ancak B-NS4 ve B-NS6 numuneleri kontrol numunesinden daha az dayanım kaybına uğramıştır. S-NS12 numunesi, eğilme dayanımında olduğu gibi basınç dayanımında da kontrol numunesinin davranışına paralel bir performans göstermiştir.

12- 300°C sıcaklıkta su kürü uygulanan harçlar iyi bir davranış sergilemiş ve önemli dayanım artışları kaydedilmiştir. S-NS4 numunesinde %48,31 oranında dayanım artışı kaydedilirken kontrol numunesinde bu oran %30,30'dur. Etüv kürü uygulanan harçların ise 300°C sıcaklıkta iyi bir davranış sergilemediği görülmüştür.

13- 600°C sıcaklıkta tüm numunelerde önemli basınç dayanımı kayıpları meydana gelirken B-NS6 ve B-NS8 numunelerinde kontrol numunesine nazaran daha düşük kayıplar yaşanmıştır.

14- Genel değerlendirmeler göz önüne alındığında S-NS10 numunesi ön plana çıkmıştır. E-NS12 VE B-NS12 numuneleri bu numunenin ardından en iyi sonuçlara ulaşmıştır.

Alkali aktif çelikhane cürüflü harç numuneleri, 20 MPa üzerinde basınç dayanımlarına erişebilmiştir. S-NS10, E-NS12 ve B-NS12 numuneleri asit ortamı dışında gelecek vadede sonuçlar vermiştir. Bu numuneler çevresel faydaları da göz önüne alındığında yüksek mukavemet gerektirmeyen ve agresif kimyasal ortamlara maruz kalınmayacak mühendislik uygulamalarında alternatif bir yapı malzemesi olarak kullanılabilacağı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Arslan, E. (2007). *A Study on The Utilization of Steel Slag in Concrete*. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 200259.
- Arsoy, A. (2018). *Elektrik ark ocağı cürufunun alkalilerle aktivasyonu ile üretilen betonların özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 502559.
- ASTM C311/C311M-18. (2018). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. International, Pennsylvania.
- ASTM C597-16. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. International, Pennsylvania.
- ASTM C642-13. (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. International, Pennsylvania.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670.
- Bilim, C. (2006). *Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 183611.
- Bingöl, Ş. (2022). Farklı Cüruf Türlerinden Geopolimer Harç Üretimi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 173-178.
- Bingöl, Ş., Bilim, C., Atış, C. D., & Durak, U. (2020). Durability properties of geopolymer mortars containing slag. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(1), 561-569.
- Çevik, A., Alzebaree, R., Humur, G., Niş, A., & Gülşan, M. E. (2018). Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolymer concrete. *Ceramics International*, 44(11), 12253-12264.
- Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2015). *Sektörel Atık Kılavuzları Demir Çelik Sanayi*. Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- Davidovits, J., Comrie, D. C., Paterson, J. H., & Ritchey, D. J. (1990). Geopolymeric Concretes For Environmental Protection. *Concrete International*, 12(7), 30-40.
- Erdoğan, S., & Erdoğan, T. (2007). *Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.
- Erdoğan, T. (2021). *Beton*. Ankara: ODTÜ Yayıncılık.

- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2009). Chemical durability of geopolymers. J. L. Provis içinde, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications* (s. 167-193). Woodhead Publishing.
- Ganesan, N., Abraham, R., & Raj, S. D. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 471-476.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2015). An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, & P. Chindapasirt içinde, *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (s. 19-47). Woodhead Publishing.
- Guo, X., & Pan, X. (2018). Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 633-641.
- Hekal, E. E., Abo-El-Enein, S. A., El-Korashy, S. A., Megahed, G. M., & El-Sayed, T. M. (2013). Hydration characteristics of Portland cement–Electric arc furnace slag blends. *HBRC Journal*, 9(2), 118-124.
- Hu, J. (2017). Comparison between the effects of superfine steel slag and superfine phosphorus slag on the long-term performances and durability of concrete. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128(3), 1251-1263.
- Kumaravel, S. (2014). Development of various curing effect of nominal strength Geopolymer concrete. *ournal of Engineering Science and Technology Review*, 7(1), 116-119.
- Ma, F., Sha, A., Yang, P., & Huang, Y. (2016). The greenhouse gas emission from Portland cement concrete pavement construction in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7).
- Mahasenana, N., Smith, S., & Humphreys, K. (2002). The cement industry and global climate change: current and potential future cement industry CO2 emissions. *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference*, (s. 995-1000). Kyoto.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601-605.
- Nuruddin, M. N., Kusbiantoro, A. K., Qazi, S. Q., Darmawan, M. D., & Husin, N. H. (2011). Development of geopolymer concrete with different curing conditions. *IPTEK the Journal for Technology and Science*, 22(1).
- Ozçelik, V. O., & White, C. E. (2016). Nanoscale charge-balancing mechanism in alkali-substituted calcium–silicate–hydrate gels. *The journal of physical chemistry letters*, 7(24), 5266-5272.

- Ozturk, M., Bankir, M. B., Bolukbasi, O. S., & Sevim, U. K. (2019). Alkali activation of electric arc furnace slag: Mechanical properties and micro analyzes. *Journal of Building Engineering*, 97-105.
- Özkan, Ö. (2006). Çelikhane ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri. *Teknik Dergi*, 17(83), 3893-3902.
- Pacheco-Torgal, F. (2015). Introduction to Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. F. Pacheco-Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, & P. Chindapasirt içinde, *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (s. 1-16). Woodhead Publishing.
- Palod, R., Deo, S. V., & Ramtekkar, G. D. (2020). Sustainable approach for linz-donawitz slag waste as a replacement of cement in concrete: mechanical, microstructural, and durability properties. *Advances in Civil Engineering*.
- Palomo, Á., Kavalerova, E., Fernández-Jiménez, A., Krivenko, P., García-Lodeiro, I., & Maltseva, O. (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales de Construction*, 64(315).
- Rashad, A. M., Khafaga, S. A., & Gharieb, M. (2021). Valorization of fly ash as an additive for electric arc furnace slag. *Construction and Building Materials*, 294, 123570.
- Roslan, N. H., Ismail, M., Abdul-Majid, Z., Ghoreishiamiri, S., & Muhammad, B. (2016). Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and Building Materials*, 104, 16-24.
- Saavedra, W. G., & de Gutiérrez, R. M. (2017). Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure. *Construction and Building Materials*, 154, 229-235.
- Sanayi Genel Müdürlüğü. (2021). *Çimento Sektörü Raporu*. Ankara: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.
- Sanayi Genel Müdürlüğü. (2021). *Demir Çelik Sektör Raporu*. Ankara: Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı.
- Singh, S. K., & Vashistha, P. (2021). Development of newer composite cement through mechano-chemical activation of steel slag. *Construction and Building Materials*, 268.
- Sun, J., Zhang, Z., Zhuang, S., & He, W. (2020). Hydration properties and microstructure characteristics of alkali-activated steel slag. *Construction and Building Materials*, 241.
- TÇÜD. (2015). *Demir Çelik Cüruf Raporu*. Ankara: Türkiye Çelik Üreticileri Derneği.
- THBB. (2021). *Hazır Beton Sektör Raporu*. İstanbul: Türkiye Hazır Beton Birliği.

- TS EN 1015-11. *Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini.*
- TS EN 1015-18. *Sertleşmiş harcın kapiler etkiden kaynaklanan su emme katsayısının tayini.*
- TS EN 12350-5. *Yayıma tablası deneyi.*
- TS EN 196-1. *Dayanım tayini.*
- URL-1. (2021). <https://www.cib.org.tr/tr/istatistikler.html>.
<https://www.cib.org.tr/tr/istatistikler.html>/(Ziyaret tarihi: 20 Haziran 2022).
- URL-2. (2022). <https://www.makinaegitimi.com/celik-uretim-yontemleri/>.
<https://www.makinaegitimi.com/celik-uretim-yontemleri/> (Ziyaret tarihi: 20 Haziran 2022).
- URL-3. (2022). <https://insapedia.com/celik-uretimi/>. <https://insapedia.com/celik-uretimi/>
(Ziyaret tarihi: 20 Haziran 2022).
- Wang, Q., Yang, J., & Yan, P. (2013). Cementitious properties of super-fine steel slag. *Powder technology*, 245, 35-39.
- WSA. (2021). *World Steel in Figures*. Brüksel.
- Yakupoğlu, A. (2010). *Alkalilerle aktive edilmiş cürüflü harçların özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 282998.
- Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., & Chen, H. (2012). An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 791-801.
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., Cao, L., & Wu, B. (2014). Development of Metakaolin–Fly Ash Based Geopolymers for Fire. *Construction and Building Materials*, 55, 38-45.
- Zhang, P., Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Ling, Y. (2020). Fabrication and engineering properties of concretes based on geopolymers/alkali-activated binders - A review. *Journal of Cleaner Production*, 258.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Açikkapı, Y. H. , Yıldırım, S. T. , & Bingöl, Ş., (2022). Alkalilerle Aktive Edilen Çelikhane Cürüflu Harçların Mekanik Özellikleri . *2nd International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (ISSRIS'22)* (pp.644-653). Balıkesir, Turkey.



ÖZGEÇMİŞ

Yusuf Hakan Açıkkapı, ilk ve orta öğrenimini Tokat Vakıfbank Namık Kemal İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra, lise eğitimini Tokat İMKB Anadolu Öğretmen Lisesinde aldı. Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Haziran 2019'da tamamladıktan sonra, Eylül 2019'da Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde yüksek lisansa başladı ve Ocak 2023'te de yüksek lisans tezini tamamladı. 2022 yılından beri Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Samsun Bölge Müdürlüğünde inşaat mühendisi unvanı ile çalışma hayatına devam etmektedir.

