



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEOPOLİMER YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİNDE ATIK DÖKÜM KUMU
KULLANIMI

FUNDA YOLCU

Ağustos 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEPOLİMER YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİNDE ATIK DÖKÜM KUMU
KULLANIMI

FUNDA YOLCU

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

Ağustos 2019

Funda YOLCU tarafından **Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR** danışmanlığında hazırlanan “**Geopolimer Yapı Malzemesi Üretiminde Atık Döküm Kumu Kullanımı**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Çevre Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Başkan :Prof. Dr. Ahmet BİLGİL (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)


Üye :Doç. Dr. Melayib BİLGİN (Aksaray Üniversitesi)


Üye :Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi)

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/....../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

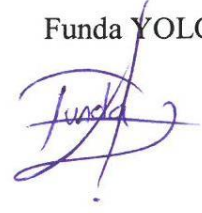
...../...../20...

Prof. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Funda YOLCU



ÖZET

GEOPOLİMER YAPI MALZEMESİ ÜRETİMİNDE ATIK DÖKÜM KUMU KULLANIMI

YOLCU, Funda

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

Ağustos 2019, 50 sayfa

Döküm işleminden sonra, kalıpta kalan atık döküm kumu (ADK) birkaç çevrimden sonra atık malzeme olarak kabul edilmektedir ve çevresel bir sorun oluşturmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, geliştirilmiş teknik özelliklere sahip geopolimer esaslı dayanıklı yapı malzemesi üretirken ADK problemini çözmek, bu atıkların çevreye vermiş olduğu zararı minimuma indirmek ve/veya yok etmek, endüstriyel bir atık sorununu ekonomik değeri olan bir ürün geliştirerek çözmektir. Deneysel adımın ilk bölümünde ADK'nın elek analizi, birim hacim ağırlığı, yanabilir madde verim hesabı belirlenmiştir. ADK'lar kimyasal bağlayıcılarla (sodyum hidroksit ve sodyum silikat) ile aktive edilmiş ve geopolimer yapı malzemeleri üretilmiştir. İkinci aşamada, ADK bazlı geopolimer yapı malzemeleri üzerinde su emme, porozite, birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Bu malzemelerin birim hacim ağırlıkları $1,6 \text{ g/cm}^3$ 'ten düşük bulunmuştur. Yapı duvar malzemeleri için minimum basınç dayanımı değeri ulusal standartlara göre 2,5 MPa'dır. Bu tez çalışmasında, 28 gün içinde 200 °C kür sıcaklığında %30 Na_2SiO_3 'ün geopolimer karışımı için maksimum basınç dayanımı 12,31 MPa olarak ölçülmüştür. Hafif yapı malzemesi özelliklerine ve orta derecede basınç dayanımına sahip bu geopolimer malzemeler, binalarda duvar malzemesi olarak kullanım için uygundur.

Anahtar Sözcükler: Atık döküm kumu, endüstriyel simbiyoz, geopolimer, sıfır atık, temiz üretim, yapı malzemesi, yeniden kullanım

SUMMARY

USAGE OF WASTE FOUNDRY SAND IN THE PRODUCTION OF GEOPOLYMER BUILDING MATERIAL

YOLCU, Funda

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Environmental Engineering

Supervisor :Professor Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR

August 2019, 50 pages

After the casting process, the waste foundry sand (WFS) remaining in the mold is considered as a waste material after a few cycles and is an environmental problem. The main aim of this study is to solve the problem of WFS, to minimize and/or eliminate the environmental damage caused by these wastes, while developing a product with economic value, within the framework of the master thesis. In the first part of the experimental step, WFS' sieve analysis, loose/tight unit weight, and loss on ignition were determined. WFSs were activated with chemical binders (sodium hydroxide and sodium silicate) and geopolymer building materials were produced. In the second step, water absorption, porosity, unit weight, and compressive strength tests were conducted on the WFS-based geopolymer building materials. Unit weights of these materials were lower than 1.6 g/cm^3 . The minimum compressive strength value for building wall materials was accepted as 2.5 MPa by national standards. In this thesis, the maximum compressive strength was measured as 12.31 MPa for the geopolymer mixture of 30% Na_2SiO_3 at the curing temperature of 200°C in 28 days. Geopolymer materials having lightweight properties and moderate compressive strength is suitable for using as a building wall material.

Keywords: waste foundry sand, industrial symbiosis, geopolymer, zero waste, clean production, building materials, reuse

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, endüstriyel atık döküm kumundan sodyum silikat ve sodyum hidroksit bağlayıcı olarak kullanılarak geopolimer yapı malzemesi üretimi incelenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan değerli danışmanım, Prof. Dr. Neslihan DOĞAN SAĞLAMTİMUR'a, tecrübelerine başvurduğum Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Ahmet BİLGİL'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Teze akademik katkı sunan jüri üyesi Doç. Dr. Melayib BİLGİN'e, bölüm katkısı için Prof. Dr. Fehiman ÇİNER'e, tezde gerçekleştirilen deneyler esnasında bana desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Şeyma ACAR ve Erdem BİLGİNOL'a teşekkür ederim. Yine tezin deneylerinin yürütüldüğü o dönemde Niğde ÇİMSA A.Ş. Müdürü olan Dr. Adnan GÜVEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim hayatım boyunca kariyer basamaklarını birer birer tırmanırken maddi ve manevi koruyuculuğumu üstlenen babam Bilal YOLCU, annem Aliye YOLCU, kardeşlerim Özgür ve Deniz YOLCU'a, hayat arkadaşım Akıncı GÜLNAR'a ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ	xi
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II GENEL BİLGİLER	2
2.1 Döküm Kumu	4
2.2 Yapı Malzemesi	6
2.3 Geopolimer	7
2.3.1 Geopolimer betonun özellikleri.....	9
2.3.2 Geopolimer betonun kullanım alanları.....	10
2.4 Literatür Taraması.....	10
BÖLÜM III MATERYAL VE METOT.....	19
3.1 Materyal	19
3.2 Metot.....	21
3.2.1 ADK'ya uygulanan deney ve ölçümler.....	22
3.2.1.1 Elek analizi	22
3.2.1.2 Yanabilir madde verim hesabı	23
3.2.1.3 Birim hacim ağırlığı deneyi	24
3.3 Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi.....	24
3.3.1 Şekillendirme	27
3.3.2 Kürleme.....	27
3.4 Geopolimer Yapı Malzemesine Uygulanan Fiziksel ve Mekanik Testler	29
3.4.1 Birim hacim ağırlığı	29
3.4.2 Basınç dayanımı	29
3.4.3 Su emme.....	31

3.4.4 Porozite	32
BÖLÜM IV BULGULAR.....	33
4.1 NaOH Bağlayıcılı Geopolimer Malzemenin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	33
4.2 Na ₂ SiO ₃ Bağlayıcılı Geopolimer Yapı Malzemesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	36
BÖLÜM V SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	40
KAYNAKLAR	43
ÖZ GEÇMİŞ	49
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER	50



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. ADK elemental analizi	19
Çizelge 3.2. Çalışmada deney bazında kullanılan araç ve gereçler	20
Çizelge 3.3. ADK'lı ve NaOH bağlayıcılı geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri (Tip 1)	25
Çizelge 3.4. ADK'lı ve Na ₂ SiO ₃ (38 bome) bağlayıcılı geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri (Tip 2)	25
Çizelge 3.5. ADK'lı Na ₂ SiO ₃ (48 bome) bağlayıcılı geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri (Tip 3)	25
Çizelge 3.6. Numune numarası ve kütleme sıcaklıklarına göre	26
Çizelge 4.1. ADK ve NaOH bağlayıcı kullanılarak üretilen geopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri	33
Çizelge 4.2. ADK ve Na ₂ SiO ₃ bağlayıcı ile üretilen geopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri	37

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Atık yönetim hiyerarşisi	3
Şekil 3.1. ADK elek analizi sonuçları.....	23
Şekil 4.1. Geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BİHA değerine etkisi	34
Şekil 4.2. 7 günlük geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BASD değerine etkisi	35
Şekil 4.3. 28 günlük geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BASD değerine etkisi	35
Şekil 4.4. Geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının SUE değerine etkisi	36
Şekil 4.5. Geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının porozite değerine etkisi.....	36
Şekil 4.6. 38 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BİHA değerine etkisi	38
Şekil 4.7. 48 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BİHA değerine etkisi	38
Şekil 4.8. 38 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen 7 günde geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BASD değerine etkisi	39
Şekil 4.9. 48 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen 7 günde geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BASD değerine etkisi	39

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3.1.a) Hassas terazi, b) Değirmen ve c) Mezür	21
Fotoğraf 3.2.a) Etüv, b) Kül fırını ve c) Elek serisi	21
Fotoğraf 3.3. ADK'nın laboratuvarında elek analizi	22
Fotoğraf 3.4. Masa tipi mikser	27
Fotoğraf 3.5. Geopolimer yapı malzemelerinin kürlendiği kül fırını	28
Fotoğraf 3.6. ADK ve kimyasal bağlayıcılarla aktive edilerek üretilen	28
Fotoğraf 3.7. Pres makinası	30



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Kuvvet uygulanan yüzey alan
°C	Santigrad derece
µm	Mikrometre
$M_{dry,u}$	Kuru birim ağırlıkları
$P_{g,u}$	Birim hacim ağırlığı
P	Kırılma yükü
P_r	Porozite (%)
γ_k	Numune birim hacim ağırlığı (g/cm^3)
γ_s	Numune özgül ağırlığı (g/cm^3)
σ_b	Basınç (MPa)

Kısaltmalar

Açıklama

ABE	Amerikan Beton Enstitüsü
ADK	Atık Döküm Kumu
ASTM	Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
BİHA	Birim Hacim Ağırlığı
BASD	Basınç Dayanımı
CLSM	Kontrollü Düşük Basınç Dayanımlı Malzeme
EPA	Çevre Koruma Ajansı
ICP	Inductively Coupled Plasma
NÖHÜ	Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
ÖY	Ölçüm Yapılamadı
SUE	Su Emme Yüzdesi
TS EN	Türk Standartları Avrupa Normu
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

BÖLÜM I

GİRİŞ

Dünya nüfusu hızla artmakta ve insanoğlunun giderek artan ihtiyaçlarını karşılayabilmek için doğadan taşıma kapasitesinin üstünde yararlanılmaktadır. Bu durum, doğal kaynakların oldukça hızlı bir şekilde tüketilmesine ve aynı zamanda bu kaynakların kullanımı esnasında büyük çevre kirliliği ve sorunlarına sebep olmaktadır. Görülen bu çevre sorunları, çevrenin ve doğal kaynakların sürdürülebilir bir şekilde gelecek kuşaklara aktarılmasına engel olmaktadır (TÇV, 2003).

İnsanlar hayatları boyunca birçok katı atık oluşturmaktadır. Bu atıkların oluşturduğu sorunları düzeltmek, kaliteli, sağlıklı ve yaşanılabilir bir çevreye sahip olabilmek için ortamdan kaldırılması gerekmektedir (Shekdar, 2009).Şehirlerde yetkililer atık yönetimi ile uğraşmaktadır. Ekonomi açısından yüksek meblağlarda maddi yüke sebep olan toplama, transfer, depolama veya bertaraf çevre ve halkın refahı için büyük önem taşımaktadır. Yerel yönetim bu sistemi doğru bir şekilde kurgulayıp faaliyete alamaz, yani katı atıklar doğru değerlendirilemez, ise oluşacak mali ve ekonomik sorunların sorumluluğu yine yerel yönetimin olacaktır (Yılmaz ve Bozkurt, 2010).

Gelişmekte olan ülke kategorisinde yer alan Türkiye’de halen atıkların bertarafı ve bu konuda ne tür bir çalışmayla en fizibil çözümün üretilebileceği konusunda karar verilmeye çalışılırken, gelişmiş ülkelerde atıklardan geri dönüşüm, yeniden kullanım, kompost üretimi ve enerji üretebilmek adına çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin İsveç’te endüstriden kaynaklanan katı atıklarda geri dönüşüme elverişli maddeler kullanılarak enerji üretimi yapabilen sistemler geliştirilmiştir (Casares vd., 2005).

Döküm kumu otomotiv sektörü, demir-çelik sanayisi, alaşım üretimi ve metalurji endüstrisinin çeşitli branşları ve diğer birçok endüstri alanında büyük miktarlarda kullanılan ve birkaç kullanımdan sonra atıl hale gelen ve “atık döküm kumu” olarak adlandırılan endüstriyel bir malzemedir. Bu yüksek lisans tezi, atık döküm kumunun yarattığı katı atık sorununun çözümüne yöneliktir. Tezde atık yeniden kullanımı sağlanarak, atıktan ürün elde edilmesine dayalı bir yaklaşımla ekonomi, çevre ve insan sağlığına fayda sağlanması amaçlanmıştır.

BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER

Katı atık ile ilgili literatürde birçok tanım bulunmaktadır. Bunlardan birisi “Üretildiği yer tarafından yok edilip atılmak istenen, ancak atık olarak nitelendirilmesine rağmen ekonomik değeri olan, halkın huzuru-sağlığı ve çevrenin korunması için düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken katı maddeler” olarak tanımlanmaktadır (TÇV, 2003). Katı atık kontrol yönetmeliğinde ise “katı atık” bilhassa çevrenin korunması ve toplumun sağlığı açısından atığı oluşturan üreticinin atmak istediği, fakat atıldıktan sonra düzenli bir şekilde bertaraf edilmesi gereken arıtma çamuru ve katı maddeler olarak tanımlanmaktadır (Yılmaz ve Bozkurt, 2010).

Katı atık ‘türleri’ ve çevreye olan etkileri sanayi devrimi öncesi en az seviyede iken sanayi devrimi sonrası kimya sanayinin gelişmesi ile artmıştır. Katı atıklar, oluştukları yere göre sınıflandırıldıklarında 7 alt bölüme ayrılmaktadır. Bunlar (MEB, 2009);

- Evsel,
- Endüstriyel,
- Tehlikeli,
- Tıbbi ve
- Özel katı atık
- Tarımsal ve bahçe atıkları
- İnşaat atığı ve moloz atığı

Biyolojik olarak doğada ayrıştırılamayan plastik atıklar, tarımda kullanılan pestisitler ve toprak verimini arttırmada kullanılan suni gübrelerin oluşturduğu kimyasal atıklar, tehlikeli atıklar sınıfında olduğu ifade edilen patlayıcı, yanıcı ve nükleer atıklar, ağır metal içeren piller, floresan lambalar vb. atıklar yeni katı atık türleri olarak görülmektedir. Atık türlerinin artmasının yanı sıra üretilen atık miktarındaki artış da bir çevre sorunu oluşturmaktadır. Gelişmiş ülkelerde çok fazla üretim yapılmakta ve bu ürünlerin tüketimi sırasında makro düzeyde bir çevre kirliliği oluşmaktadır. Doğanın tamponlayabileceği sınırı aşan atık maddelerin doğal çevrede birikmesi insan ve diğer

canlılar için büyük bir tehlike meydana getirmektedir (Özdemir, 1988). Atıkların halk sağlığı ve çevreye biyolojik, fiziksel ve kimyasal nedenlerle zarar verdiği dikkate alındığında, sistematik bir şekilde atık yönetiminin uygulanması zorunluluğu ön plana çıkmaktadır. Sistem yaklaşımında atık yönetiminin atık oluşumu, toplama, işleme ve uzaklaştırma gibi temel öğelerin yanında çevre koruma, enerji, kaynakların korunması, istihdam, verimlilik artışı gibi konularla bütünlük içinde ele alınması gerekir. Atık yönetiminde sistem yaklaşımının amacı, katı atıkların yalnızca insanın çevresinden bertarafı değil, çevre ve insan sağlığı gözetilerek geliştirilmesiyle birlikte ekonomik kalkınmaya da pozitif katkılar sağlamasıdır (Agrawal, 1990).

Entegre atık yönetimi, atık yönetimini bir tam-bütün olarak değerlendirdiği, bu tam-bütününün tüm elemanlarını birer birer verimlilik ve etkinlik açısından irdelediği ve bir kavram olarak saydığı anlaşıldıktan sonra amaç ve hedeflerin açıklandığı sistemlerdir. Bu yönetimin temel amacı; çevre ve ekonomiyle ilişkili sistemin içerisinde oluşan atıkların etkilerinin en aza indirilmesini ve/veya bu atıkların yok edilmesini sağlamaktır (Bozkurt, 2012).

Entegre atık yönetim sisteminin uygulanabilmesi için, yönetimin en uygun biçimde planlanarak hedeflerin belirlenmesi gerekir. Entegre atık yönetiminde; ulusal-uluslararası ekonomik, bölgesel, yerel, çevresel etkiler ve sosyal, var olan durumlar ele alınır ve planlama yapılır. Günümüz entegre/bütünleşik atık yönetimine özgü altı esas stratejinin uygulanması kararlaştırılmıştır (Eroğlu, 2010).



Şekil 2.1. Atık yönetim hiyerarşisi

Atık yönetim hiyerarşisi yukarıdan aşağıya doğru değerlendirilir. İlk basamakta atık oluşumunun önlenmesi ve herhangi bir işlem uygulanamıyor ise atık miktarının indirgenmesi amaçlanır. İkinci basamakta atığın yeniden kullanımı için çalışmalar yapılır. Fakat bu basamakta herhangi bir işlem yapılabilme olanağı yok ise ilk olarak

geri dönüşüm, daha sonra enerji geri kazanımı amaçlanır. Uygulanan bu işlemlerden sonra hala kalan atık ya da bu işlemlerin uygulanamadığı atık bertaraf edilir (Doğru, 2012).

2.1 Döküm Kumu

Ergimiş metalin üretilecek malzemenin görünümünde şekiller içeren boş bir kalıba dökülüp katılaştırılmasıyla, istenilen şekillerde malzemelerin üretilmesi metoduna döküm denir (Başar ve Aksoy, 2012). Döküm sanayi; çelik hurda, pik demir ve ferro alaşımların ark, endüksiyon veya kupol ocaklarında ergimesi sağlanıp kum, metal veya seramik kalıplarda istenilen şekillerdeki parça malzemeler elde edilerek, sanayinin gereksinimi olan pik demir, çelik, sfero ve temper döküm ürünlerinin ham veya işlenmiş malzemeler olarak üretildiği sanayi sektörüdür (Kepez, 2007).

Dökümler çoğunlukla kum kalıplar kullanılarak yapılır. Döküm kumu, metal döküm işlemi için istenilen modeldeki parçanın şeklini oluşturacak kalıpları yapmak için kullanılan kumdur. Döküm kumu bilhassa otomotiv, inşaat, makine imalat ve çelik sanayinde parça üreten fabrikalar ve atölyeler vb. işletmelerde, üretilen döküm mamullerinin (demir-çelik endüstrisi ile alüminyum ve bakır ağırlıklı alaşımların) kalıplanması için kullanılmaktadır. Genel olarak 1 ton döküm için 4-5 ton kum gereklidir. Bu miktar dökülen metalin türüne, parça büyüklüğüne ve kalıplama yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Kullanılan kalıbın cinsine göre kum kalıba döküm yöntemi değişik gruplara ayrılabilir. Bu yöntemlerin önde gelenleri; kuru kum kalıp, yaş kum kalıp, maçaların bütünüyle bir araya getirilmesi ile meydana getirilen maça kalıp, kabuk kalıp (shellmold), gaz sertleştiricili silikat yöntemi olarak bilinen CO₂ yöntemi ile hazırlanan kalıp, organik bağlayıcı ve katalizörler karışımından oluşan ve sıvı reçinelerin polimerizasyonu ile havada sertleşen air-set kalıplara döküm yöntemleridir (ÇYGM, 2012).

Döküm kumu -içerisinde yüksek oranda silis ve az miktarda kil (bentonit veya kaolinitik kil) bulunan- sinterleşme sıcaklığı 1500 °C'nin üzerindeki kumlardır. Döküm kumları doğada serbest tanecikler halinde yarı-köşeli veya yuvarlak şeklinde bulunurlar(Kaur, 2006). Döküm kumunun fiziksel ve kimyasal özellikleri, döküm prosesinin türüne ürünün sağlandığı sanayi sektörü ile ilişkilidir (Siddique vd., 2010).

Tane boyutu dağılımı tekdüzedir; %85-95'i 0,6 ile 0,15 mm arasında olup %5-12'si 0,075 mm'den küçüktür (Javed ve Lovell,1994).

Döküm kumu, kararlı fiziksel özellikleri olan yüksek kaliteli silika kumudur. Dökümhanelerde döküm kumunun kum kalıplarında kullanılmasının sebebi termal iletkenliği, ergimiş metalin ısı ve basıncına karşı direnç göstermesi ve ekonomik oluşundan ötürüdür (Siddique vd., 2009). İçi boş kalıplar, her döküm yapıldıktan sonra açılıp kum içerisindeki büyük parçalar elenerek uzaklaştırıldıktan sonra, azalan kum kadar döküm prosesine yeni kum eklenmektedir (Siddique vd., 2010).Döküm kumu proste birkaç kez kullanıldıktan sonra kalıplarda kullanılamaz hale gelir ve "atık döküm kumu (ADK)" adı altında dökümhaneden uzaklaştırılır. Bunun sebepleri; döküm esnasında 1500 °C'lik ergimiş metale maruz kalması, kumun fiziksel ve kimyasal yapısının bozulması, mekanik aşınmadan dolayı kum tanelerinin kırılan direnci ve kumdaki bentonitin bağlayıcılık özelliğini kaybetmesidir. ADK temelde ince agrega olduğundan yapı malzemesi üretimi gibi alanlarda kullanılabilmesi ve doğal kumun yerine geçmesiyle, doğal kaynak korunumunu sağlayacaktır. Ancak, ülkemizde ADK'nın geri kazanım yöntemleri oldukça yetersizdir; bu atık genellikle düzenli depolanarak bertaraf edilmektedir. ADK ülkemizdeki az sayıda geri kazanım yöntemlerinde genellikle depo saha örtüsü olarak kullanılmakta, az miktarı ise mühendislik alanlarında (Portland çimentosu, bordür ve beton park-bahçe (mobilyalar) parke taşı olarak değerlendirilmektedir (Solmaz vd., 2009).

Çeşitli araştırmacılar, ADK'nın geoteknik uygulamalarda yapısal ve akışkan dolgu, bent, geçirimsiz perde yapımı, düzenli depo sahası örtüsü olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuşlardır. İmalat ürünü olarak da harç, Portland çimentosu, tuğla-briket, asfalt betonu ve parke taşı üretiminde ADK kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Karayolu inşaatı uygulamalarında bitümlü asfalt karışımı, yol alt ve üst temel malzemesi şeklinde, tarımsal uygulamalarda ise kompost, toprak iyileştirici, üretim toprağı ve yüzey örtüsü olarak kullanılabilirliği ortaya konmuştur (Azak, 2019).

2.2 Yapı Malzemesi

İnşaat Mühendisliği ve bina yapımını içeren tüm yapı işlerinde sürekli kullanılmak üzere üretilen malzemelerin tamamına yapı malzemesi denir. İnsanoğlu Dünya'ya geldiği ilk günden itibaren malzemeye gereksinim duymuştur. Beyin gücü olarak diğer canlılardan üstün olan insan barınma, beslenme ve korunma için yeterince becerikliliğe ve güce sahip değildir. İnsanoğlu bu sorunları aşmak için zekasını ve çevresindeki malzeme imkanlarını kullanarak çözüm aramak zorundadır. Günümüzdeki uygar seviyeye ulaşabilmek için bugünkü ihtiyaçların giderilebilmesine olanak sunan malzeme ve araç gereçlere sahip olunması uzun ve emek isteyen bir süreçle ortaya koyulmuştur (Akman, 2003).

Neolitik çağ insanoğlunun gelişmesinde bir devrim niteliğindedir. Buzul çağı sona ermiş, insanlar tahıl üretmeye ve hayvanları evcilleştirmeye başlamışlardır. Bu nedenle verimli toprak arayışına girmiş ve mağaralardan uzakta ırmak kıyıları, vadi ve ovalar, ormanlık bölgelere göç etmişlerdir. Bu göçler sonucunda barınakların özellikleri değişmiş, farklı türde malzemeler kullanma ve üretme gereksinimi doğmuştur. Neolitik ve kalkolitik devirde büyük toplumsal göçlerin, hareketlerin ve savaşların olduğu konusunda kanıtlar yok olduğu gibi toplulukların isimleri de bilinmemektedir. Bu çağların insanları büyük ihtimalle yerleştikleri sahalarda yaşamlarını sürdürmüşler ve farklı yerlerden gelmemişlerdir. Bu insanların ilk yapı malzemeleri, yakın çevrelerindeki yöresel malzemelerdir. Bunlar toprak, saz ve saman türü bitkiler, orman ürünleridir; yakınlarında dere yatakları olanlar ise topladıkları taşları kullanmışlardır. Bu hammaddelere şekil vermek ve iyileştirmek için yapılan adımlar malzeme teknolojisinin gelişmesindeki ilk başarılarıdır (Akman, 2003).

O çağlardan günümüze kadar gelişerek bu günlere gelmiş olan yapı malzemeleri konusunda verilen uğraşlar sonucunda birçok yeni malzeme ortaya konmuştur. Örnek olarak uçucu kül, alçı ve kirecin bir kalıp içinde şekil verilmesiyle, su kürü ile mukavemet kazandırılması sonucunda yeni yapı elemanları üretilmektedir (Akman, 2003).

Çevre sorunlarının en üst seviyede olduğu günümüzde endüstriyel atıkların yapı malzemesi teknolojisinde katkı maddesi olarak kullanılarak değerlendirilmesi, bir

yandan maliyetleri düşürürken diğer taraftan bu sorunların giderilmesine yardımcı olmasından dolayı üzerinde durulması gereken önemli konulardan birisidir (Solmaz, 2008). Günümüz teknolojisinin gelişmesine paralel olarak yapı malzemesi teknolojisi hızlı bir değişim ve gelişim sürecine girmiştir. Bir taraftan basınç dayanımı yüksek, dış etkilere dayanıklı ve yoğunluğu düşük yapı malzemeleri üretilirken, diğer taraftan çevreyi kirleten bu endüstriyel atıkların katkı ve agrega maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır.

2.3 Geopolimer

İnşaat sektöründe sıkça kullanılan malzeme, Portland çimentolu (geleneksel) betondur. Klasik betona bağlayıcılığı veren Portland çimentosu, makul ve her yerde bulunabilen doğal hammaddelerin çok yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle fabrikada elde edilebilen malzemedir. Portland çimentosu, şebeke suyu ile tepkiyebilmesi ve neticesinde suya dayanıklı bir tepkime ürünü meydana gelmesi ve bu üretilen hamurun yapılaşmada kullanılacak kadar pozitif mekanik özelliklere sahip olması dolayısıyla önemli bir malzemedir. Bu olumlu özelliklere rağmen klinker üretimi yaklaşık 1500 °C sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Ayrıca oluşan klinkerin ezilmesi gerektiği için yüksek miktarda enerji tüketimi olur. Fırında gerçekleşen tepkimeler ve üretim anında kullanılan fosil yakıtlar nedeniyle yüksek miktarda karbondioksit (CO₂) ile düşük miktarda diğer zararlı gaz salınımına sebebiyet vermektedir. Üretilen çimento tipine ve endüstriyel metoda bağlı değişiklikler olabildiği gibi, 1 ton çimento üretiminin yaklaşık 0,9 ton CO₂ salınımına neden olduğu bildirilmektedir. Dünyada yıllık çimento üretimi 3,5 milyar tonun üstündedir. Bu sektör insan kaynaklı CO₂'nin %5-8'inden sorumludur (Gümüş, 2016).

Dünya'da artan çevre hassasiyeti, yapı malzemelerinin seçimi ve dizaynının da teknik özelliklerinin yanı sıra çevresel etkilerin de değerlendirilmesine neden olmuştur. Geleneksel betona seçenek olarak farklı pek çok araştırma yapılmaktadır. Araştırmalarda alternatif olarak öne çıkanlardan biri de geopolimer betondur (Gümüş, 2016).

Geopolimer üretimi, temel olarak amorf kil ve benzeri malzemeler kullanılarak polimerize silikat veya alüminosilikat içeren bileşiklerin alkali ortamda sentezlenmesi yöntemine dayanmaktadır (Xu ve Van Deventer, 1999).

Geopolimerler kimyasal aktivatörler ve su ile tepkimeye girerek kısmen veya tümüyle çözünen toz bağlayıcılardan elde edilir. Toz bağlayıcılar çoğunlukla öğütülmüş uçucu kül(UK), yüksek fırın cürufu (YFC) veya metakaolin gibi alümino silikatlardır. Kimyasal aktivatörler ise genellikle sodyum hidroksit veya sodyum silikat gibi alkali çözeltileridir; bu nedenle bu malzemeler alkali aktivatör olarak da tanımlanabilmektedir (Gümüş, 2016). Alümino silikatlar, ana oksitleri alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum oksit (SiO_2) olan, doğal ya da sonradan ısı işlem sonucu biçimsiz yapıya sahip malzemelerdir. Doğada bulunan ve atık olarak ortaya çıkan pek çok alümino silikat malzeme bulunmaktadır. Bu açıdan, bu malzemelerin bağlayıcı olarak kullanımı çevre etkisi ve inşaat sektörü açısından daha da önem kazanmaktadır. Geopolimer beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan alümino silikat malzemeler, UK ve YFC'dur. UK'ların alkalilerle aktivasyonu sonucu amorf yapıya sahip inorganik polimerler oluşmaktadır. Farklı UK'lar çok değişik kimyasal kompozisyonlara sahip oldukları için ortaya çıkan geopolimer bağlayıcının da özellikleri değişkenlik göstermektedir. Geopolimer üretimi için genellikle F tipi UK tercih edilmektedir. C tipi UK'lar, daha düşük alüminyum oksit ve silisyum oksit içermesinden, hızlı priz almasından dolayı daha az tercih edilmektedir. UK'lı geopolimer karışımların özelliklerine etki eden en önemli faktörler, UK'nın kimyasal ve mineralojik kompozisyonu, kullanılan alkali çözeltilisinin konsantrasyonu ve kür koşulu olduğu belirlenmiştir. Normal oda sıcaklığında UK'nın yavaş reaksiyona girmesi nedeniyle yüksek sıcaklıklarda kür uygulamak, oluşacak geopolimerin reaksiyon derecesi ve kinetik enerjisini arttırmakta ve daha yoğun bir yapı oluşmasını sağlamaktadır. Böylece, oluşan ürünün mekanik özelliklerinde iyileşme görülmektedir (Tuyan vd., 2017).

Tanımlanmış 9 tip geopolimer malzeme mevcuttur. Bunlar:

- 1-Camsuyu esaslı geopolimer, polisiloksonat (Si: Al=1:0)
- 2-Kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat(Si: Al=1:1)
- 3-Metakaolinit esaslı geopolimer, poly (sialate-siloxo) (Si: Al=2:1)
- 4-Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3)

- 5-Kayaç esaslı geopolimer, poly (sialate-multisiloxo) ($1 < Si: Al < 5$)
- 6-Silika-esaslı geopolimer, sialateve siloxo bağı poly (siloxonate) ($Si: Al > 5$)
- 7-Uçucu kül esaslı geopolimer
- 8-Fosfat esaslı geopolimer
- 9-Organik maden esaslı geopolimer (Xu ve Van Deventer, 1999).

Geopolimerler bolca ham madde kaynağına, az miktarda CO₂ salınımına, düşük enerji tüketimine, düşük üretim maliyetine ve hızlı dayanım kazanma özelliğine sahiptir. Bu pozitif özellikleri nedeniyle geopolimerler Mühendislik alanlarında inşaat, otomotiv, havacılık, metalürji ve plastik endüstrisinde kullanıma elverişlidir. Ayrıca atık yönetimi, sanat ve dekorasyon benzeri birçok alanda da değerlendirilebilir. Geopolimerlerin sıkça kullanıldığı alanlardan bir tanesi de toksik atıkların değerlendirilmesidir ve gittikçe genişlemektedir (Gümüş, 2016).

Mısır'daki piramitlerin ve Roma'daki amfi tiyatronun mikro yapısına bakıldığında sertleşmiş geopolimerik malzemelerle benzeştiği anlaşılmaktadır. Bundan dolayı eski yapılarda doğal malzemelerden daha çok geopolimerizasyon temeline dayanan üretimin olduğu düşünülmektedir. Konuyu aydınlatmak için birçok bilim adamı, eski zamanlarda geopolimer teorilerinin olup olmadığını ve eski yapıların bu teoriler üzerine kurulup kurulmadığını belirlemek için araştırmalar yapmaya devam etmektedirler (Gümüş, 2016).

2.3.1 Geopolimer betonun özellikleri

Geopolimer betonun basınç mukavemetinin -İngilizce ifadesi ile “compressive strength” değerinin- 70MPa'a kadar ulaşabildiği, ayrıca maksimum basınç mukavemetine Portland çimentolu betondan daha çabuk eriştiği gözlemlenmiştir (Ergin, 2014).

Kuruma anındaki çekme miktarı az olduğundan ince ve dar yapı elemanlarında kullanımı da uygundur. Normal betonlara göre hidrasyon ısısı epey düşüktür. Donatı demirlerinin korozyona karşı korunmasında elverişlidir. Asit ataklarına karşı oldukça dayanıklıdır (Ergin, 2014).

2.3.2 Geopolimer betonun kullanım alanları

Geopolimer betonun kullanıldığı alanlar, normal betonun kullanılabildiği her alan olabilir; ancak malzeme yönünden normal çimentolu beton kadar yaygın olmadığından kullanımı pek popüler değildir. En yaygın kullanım alanları ise istinad duvarları, betonarme su tankları, barajlar ve öngermeli köprülerdir (Ergin, 2014).

Dünya’da ilk kez yalnızca geopolimer beton kullanılarak yapılan bina Queensland Üniversitesi’nin 4 katlı Küresel Değişim Enstitü binasıdır (Ergin, 2014).

Geopolimer beton prefabrik yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, rijit yol kaplamaları, zemin iyileştirme, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, tarihsel yapıların ve taşıyıcı sistemlerin restorasyonu, uçak ve taşıt endüstrisi alanlarında kullanılmaktadır (Ergin, 2014).

2.4 Literatür Taraması

Dünya sıralaması gözden geçirilecek olursa Rusya 10.800 bin ton, Almanya 2.745 bin ton, ABD 6.032 bin ton, Fransa 1.428 bin ton ve İtalya 1.245 ton döküm kumu tüketmektedir. Türkiye’de çeşitli sektörlerde yılda yaklaşık 300 bin ton döküm kumu tüketilmekte ve tüketilen kum atık olarak doğaya bırakılmaktadır (Yalçın vd., 2003). Bu çalışmanın hammaddesi olan ADK’nın ülkemizde atık olarak depo edilmesi veya bertaraf edilmesi yerine çevre dostu metotlarla ekonomik karşılığı olan yararlı malzemelere dönüştürülmesi hususundaki çalışmalar gelişmiş ülkelere göre yetersizdir (Başar ve Aksoy, 2013).

Dünya’da inşaat sektöründe özelliklerde geoteknik ve karayolu inşaatları başta olmak üzere ADK’nın büyük miktarlarda kullanılmasını sağlayacak çeşitli alanlar vardır. Genel olarak, yeniden kullanımda gereken nakliye işlerinin birincil kumun gerektirdiği nakliye işlemlerini belirgin miktarda aşmadığı durumda, ADK kullanımı avantajlı hale gelmektedir (Schultes, 2006). ADK dolgu malzemesi olarak hidrolik iletkenliği kontrol edilerek veya edilmeyerek kullanılabilir. ADK en fazla oranda karayolu inşaatlarında kullanılmaktadır. Karayolu inşaatlarının bazı evrelerinde bu malzemenin

kullanılması mümkündür. Kış aylarında kar ve buz mücadelesinde yol kaplamasının alt ve üst yapısında sürtünme katsayısını arttırmak amacıyla kullanılabilir. ADK sıcak asfalt karışımında ince agrega olarak başarıyla kullanılmaktadır. Bu konudaki çalışmalar, ADK'nın ince agreganın %25'ini oluşturacak şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Portland çimentosu uygun oranlarda kalsiyum oksit, silisyum ve demir oksitten oluşmaktadır. Bu giriş malzemeleri tortulu şist, dolomit ve kireç taşı gibi doğal kayalarda bulunur. Çimento üretiminde silis içeriği olarak ADK'nın kimyası, şeklinden ve dane çapından daha önemlidir. ADK çimento yapımı için en kaliteli silis kaynaklarından birisidir. Doğal kum yerine ADK kullanılarak doğal kumun kullanım miktarı azaltılabilir. Dünyada ADK için birçok kullanım alanı saptanmış ve uygulanmakta olup, döküm sisteminin entropisi, başka bir ihtiyaç sahibinin entalpisi olmaktadır. Türkiye'de birçok hammaddenin yüksek fiyata mal olmasından dolayı, ADK başka endüstriler tarafından girdi (entalpi) olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Çimento, briket, dolgu malzemesi, asfalt, yol yapımı gibi ADK kullanım alanlarına, son zamanlarda eklenen bir alan ise, ADK'nın tarım toprağı olarak kullanılmasıdır (Yaylalı, 2015). Koyu rengi ve kıvamından dolayı ADK bitkisel toprak uygulamalarında idealdir. Bitkisel toprakta yüksek kum içeriği oldukça önemlidir. Yüksek kum içeriği, gübrelemede kümelenmeyi az miktara indirir ve sıkıştırmadan kaynaklanan karışmayı önler. Ayrıca bu malzeme içerisindeki hava akışına olanak sağlar. Döküm kumu Ohio fidanlığında toprak ve gübreyle karıştırılarak süs bitkileri üzerinde kullanılmaktadır. Ohio'dan Kurtz kardeşler golf sahası yeşillendirmesinde de bunu başarıyla kullanmıştır. Bu uygulamalarda kilin varlığı besinlerin alınmasını kolaylaştırdığı için faydalıdır. Bunlardan farklı olarak harç yapımında ince agrega olarak, fiberglas ve taş yünü üretiminde de zengin silisyum içeriğinden faydalanılmaktadır (Solmaz, 2008).

Beton harcındaki agregaların %20'si ADK ile yer değiştirilerek deneyler yapılmış, %10'a kadar su emme ile kılcal su emmesinde artmalar olduğu bulunmuştur. Bu artış, basınç dayanımını bir miktar azaltmıştır. Geri dönüşüm kumunun %15 ilavesiyle yapılan başka bir çalışmada, klorür iyonu penetrasyonunun azaldığı ve ultra ses hızının arttığı tespit edilmiştir. %10'un üzerindeki ADK karışımının yüksek dayanımlı betonlarda kullanılabilir parametrelerin dışında kaldığı görülmüştür. Yapılan başka bir çalışmada ise basınç dayanımı ve elastisite yönünden en iyi karışım oranının %5-10 arasındaki ADK karışımında bulunduğu, bu oranın standart kum ile yapılan betonun basınç dayanımını yaklaşık olarak koruduğu, ancak %5'e kadar olan ve %10'un

üstündeki numunelerin basınç dayanımının yaklaşık %10 azaldığı görülmüştür (Gönen vd., 2012).

Parke taşlarında ADK ve F tipi UK kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada, soğuk bölgelerde kullanılmış ADK veya F tipi UK'nın %25'e kadar kumla yer değiştirilebileceği belirtilmiş, UK'nın karışımlarda kullanılmasıyla basınç dayanımı (%32'den daha fazla), aşınma direnci ve durabilitenin arttığı görülmüştür (Kaya ve Karakurt, 2016).

Döküm kumlarının karayolları ve seddelerinde (Kirk, 1998; Mast ve Fox, 1998), hidrolik bariyerlerde (Abichouvd, 1998, 2000) ve asfalt içinde kullanılabilirliği (Javed vd., 1994), çamur (slurry) malzemelerle birlikte permeabilite değerlerinin araştırılması (Tarun ve Shiw, 1997), İnşaat Mühendisliğinde atık olarak kullanım olanakları ve geri dönüşüm yolları (Lovell ve Sayed, 1995), biyolojik veya çeşitli malzemelerle iyileştirme çalışmaları (Greinert, 1995; Reddi vd., 1996), döküm kumu yığılmış depolama (landfill) alanlarında sızıntı suyu kalitesinin araştırılması (Ham vd., 1986), özellikleri (Devaux ve Vecoven, 1984), yeniden kullanımı ve uzaklaştırılması çalışmaları (Institute of British Foundrymen, 1996) yapılmıştır (Yalçın vd., 2003).

Demir-çelik döküm sanayi ve metalürji endüstrisinde kalıp olarak kullanıldıktan sonra çıkan ADK'nın Portland çimentolu betonda kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla, standard beton karışımında kumun yerine %15 oranında ADK ve değişik su/çimento oranlarında karışımlar hazırlanarak, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi gözlenmiştir. Buna göre taze betonda çökme deneyi, sertleşmiş betonda da çekme, basınç, su emme, kılcal geçirimsizlik özgül ağırlık ve ultrases dalga hızı deneyleri yapılmış, deney sonuçlarına göre ADK'lı betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin belli bir miktarda bozulduğu fark edilmiştir. Bu bozulma tespit edilmesine rağmen, ADK'lı betonun betonarme olmayan büyük kütle betonlarında güvenle kullanılabilirliği belirtilmektedir. Bu tarz uygulamalarda ADK'nın kullanılması, ekonomi açısından faydalıdır (Yalçın vd., 2003).

Döküm kumlarının termal analizlerle %98'inin yeniden dönüştürülerek kullanılabilirliği, bunun ekonomik ve çevresel birçok fayda sağlayacağı, yeşil metal döküm kumlarının çukur, hendek ve siper gibi değişken dolgu alanlarında

kullanılabileceği bulunmuştur. Yine döküm kumlarından Zn, Mn ve Pb uzaklaştırılması için elektrik yöntemi önerilirken, döküm kumu içindeki krom ve silikanın yeniden kazanımı için yöntem önerenler de vardır. Döküm kumlarının içeriği kum ve bentonitten oluştuğu için, mekanik davranışları kum bentonit karışımlarına benzemektedir (Yalçın vd., 2003).

ADK ve atık döküm kumsuz numunelerin, dolaylı çekme deneyi sonuçları, basınç deney sonuçları ile paralel değişim göstermiştir. %15 ADK'lı 28 günlük numunelerin su emme miktarının, ADK içermeyen numunelerine göre düşük su/çimento (S/Ç) oranlarında %1,5 ve yüksek S/Ç oranlarında %2,9 daha fazla olduğu belirlenmiştir. %15 ADK'lı numunelerin kılcal geçirimsizlik ve görünür boşluk oranı değerlerinin katkısız numunelere göre daha büyük olduğu gözlenmiştir. Buna göre, ADK'nın içerisinde belirli oranda bulunan kil ve ADK tanelerinin yüzeylerinde bulunan parçacıklar aderansı zayıflatmış ve beton içindeki boşlukların artmasına neden olduğundan betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin azalmasına neden olmuştur. Bu azalma, betona katılan ADK oranının fazla olmasından kaynaklanabilir. ADK'nın taşıyıcı eleman olarak kullanılması sakıncalı olmasına karşın dolgu betonlarında kullanılabileceği düşünülmektedir (Yalçın vd., 2003).

Deng ve Tikalsky (2008) yaptıkları çalışmada ADK içeren akışkan dolgunun jeoteknik ve sızdırma özelliklerini incelemişler, ADK'nın jeoteknik uygulamalar için akışkan dolguya dönüştürülebileceğini söylemişlerdir. Bu çalışmada, farklı döküm yöntemi uygulayan 17 bağımsız metal döküm tesisinden ADK numuneleri temin edilmiş ve böylece ADK özelliklerinin iyi bir aralığı temsil edilmiştir. Laboratuvar çalışmaları farklı su içeriklerinde ADK, çimento ve UK karışımı içeren akışkan dolgunun fiziksel, jeoteknik ve sızma özelliklerini kapsamaktadır. Ölçülen başlıca özellikler ADK fiziksel özellikleri (yoğunluk, partikül derecelendirmesi, tane şekli ve incelik), ADK akışkan dolgu jeoteknik özellikleri (kapalı basınç dayanım, hidrolik iletkenlik, ayar zamanı ve akışkanlık) ve dolgunun sızdırma özellikleridir (ağır metaller, sıkı ADK akışkan dolgudan ekstrakte edilen sızma ve akışkan suda ağır metal ve organikler). Fiziksel özellik açısından test sonuçları, verilerin çoğunun dar bir bantta yer aldığını gösterir; ancak bakır/alüminyum tabanlı ADK örnekleri bu aralığın dışında yer alabilir. ADK akışkanının jeoteknik özellikleri, ADK akışkan dolgusunun kanuni kriterlerin altında olduğunu gösterir. Bu çalışmada bir karışım formülasyon aralığı, akışkan dolgu

kullanılarak yapılan ADK tasarımı için önerilmiştir. Akışkan dolguda ADK örnekleri katkısı hem teknik hem de çevresel yönlerden doğrulanmıştır. Başlangıç ya da keşfedilen karışım formülasyonu çimento için 25-94, UK için 334-463, ADK için 818-1264 ve su için 291-504 kg/m³ olarak önerilmiştir.

Güney vd. (2009) yaptıkları çalışmada, yüksek dayanımlı beton üretiminde ADK'nın yeniden kullanım potansiyelini araştırmışlardır. ADK normal ince kum ile 4 dozda karıştırılmıştır (%0, %5, %10 ve %15). Bir dizi test programından elde edilen bulgular, betonda ADK katkısına doğrudan bağlı olan elastikiyet modülü ve çekme mukavemetinde azalma olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte %10 ADK bulunan beton, kontrol grubuna neredeyse benzer sonuçlar vermektedir. ADK oranının artmasıyla birlikte taze betonun çökmesi ve işlenebilirliği azalır. Donma ve çözülme betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde azaltmasına rağmen elde edilen sonuçlar Amerikan Beton Enstitüsü (ABE) tarafından belirlenen kabul edilebilir sınırları karşılamaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre: (1) Beton karışımlarında kullanılan ince agregalar genellikle 200 µm küçük kil ve silti oluştururlar. Bu materyallerin aşırı kullanımı, çimento/agrega yapışmasında zayıflama, gerekli su miktarında bir artış ve çimento hidrasyonunda gecikme gibi istenmeyen etkilere neden olabilir. Buna ek olarak, çimento hidrasyonu sırasında su absorpsiyonu ve bundan sonra katılmış betonda su kaybı, boşluklarda bir artış ve beton içerisinde çatlaklara neden olabilir. Betonun mukavemeti ve dayanımı, bu olumsuz koşullar altında önemli ölçüde azalır. Bu nedenle, karışımlarda belirli bir miktardan daha fazla küçük kil parçacıklarının varlığı önerilmez. Öte yandan, bu malzemelerin belirli bir miktardan daha küçük oranda kullanılması, betonun gözenekliliğinde bir düşüşe neden olabilir ve bu mekanik ve sızdırmazlık özellikleri üzerinde muhtemelen olumlu bir etkiye neden olabilir. (2) Geleneksel ince kumu ADK ile değiştirme seviyesinde bir artış, sıkıştırma ve gerilme mukavemetlerinin yanı sıra betonun elastikiyet modülünü (belirli bir miktarı %10 hariç) azaltmıştır. Elastikiyet modülü ile birlikte benzer basınç ve gerilme mukavemetleri, %10 ADK ve kontrol örnekleri ile elde edilmiştir. ADK oranının %5'in altında olması yetersiz olabilir ve mukavemet parametreleri açısından aşırı miktarda kullanılması %10'dan fazla olacaktır. (3) ADK'sı %5'in üzerinde olan beton, su emme ve boşluk oranlarında azalma göstermiştir. Bu oranlardaki azalma, ADK içindeki kil tipi malzemelerin boşluk doldurma etkisine bağlı olabilir. (4) Dondurma ve çözülme döngülerinin tamamlanmasından sonra, bütün beton numunelerde basınç ve gerilme

mukavemetlerinde ve dinamik elastik modülünde azalmalar meydana gelmiştir. ADK yüzeyindeki kil parçacıkları, donma ve çözme döngülerinden sonra macun ve agrega ara yüzünde yapışkanlığın azalmasına neden olur. Yüksek dayanımlı betonda ADK kullanırken, soğuk bölgelerde bu olumsuz etki düşünülebilir. Hem ADK ilave edilen hem de kontrol numunelerinde donma-çözme etkilerinin yaklaşık olarak aynı olduğuna dikkat etmek kayda değer bir şeydir. Laboratuvarda simüle edilen donma ve çözülme koşullarının, Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu(ASTM) C666 standartlarına göre Türkiye'de birçok bölgede normalde karşılaşılan kış koşullarından daha sert olduğunu belirtmek önemlidir ve karışımların çoğunun arazide daha iyi bir performans sergilemesi muhtemeldir. (5) Sonuçlar, partikül büyüklüğü dağılımı dikkatlice düzenlendiğinde, standart ince kum içeren yüksek mukavemetli betonunkine benzer özellikler sağlayarak, yüksek dayanımlı beton uygulamalarında döküm kumunun başarıyla kullanılabilceğini göstermiştir. (6) Bu sonuçlardan, ADK kullanımının çevreye fayda sağladığı, bu tür stokların karlı bir şekilde kullanılabilceği, nakliye maliyetinin ve gereksinimlerinin önemli ölçüde düştüğü sonucuna varılabilir.

Siddique ve Noumowe (2008) tarafından yapılan çalışmada ADK'nın betonun mekanik özelliklerine etkisi irdelenmiş, yan ürün ve atık malzemelerin farklı ADK tipleri üretilmiş ve bu atık ürünlerin her birinin, çimento esaslı malzemelerin (kontrollü düşük basınç dayanımlı malzeme ve beton) özellikleri üzerinde özgün etkilere sahip olduğu belirtilmiştir.

Siddique vd. (2009) yaptıkları çalışmada ADK ile ince agreganın (normal kum) kısmen yer değiştirdiği beton karışımlarının mekanik özelliklerini değerlendirmek için deneysel araştırmaların sonuçlarını sunmuşlardır. İnce agrega, ağırlıkça ADK'nın üç oranı (%10, %20 ve %30) ile yer değiştirilmiştir. Yeni hazırlanmış betonun özelliklerini belirlemek için testler uygulanmıştır. Basınç dayanım, çekme gerilme dayanımı, eğilme dayanımı ve elastikiyet modülü 28, 56, 91 ve 365 günlerde tespit edilmiştir. Test sonuçları, normal kuma ADK katılmasıyla düz betonun basınç dayanım özelliklerinde belirgin bir artış olduğunu ve kaliteli beton ve yapı malzemesi yapımında kullanma konusunda efektif olarak kullanılabilceğini göstermiştir. Araştırmalarında (1) ADK içeriğindeki artışla beton karışımlarının basınç dayanımı, yarma çekme dayanımı, mukavemeti, bükülme mukavemeti ve elastikiyet modülü değerlerinin arttığını, (2) tüm döküm kumu içerikleri için günle birlikte beton karışımlarının basınç dayanımı, yarma çekme

dayanımı, bükülme mukavemeti ve elastikiyet modülü değerlerinin arttığını, (3) ADK yüzdesi ve test aşamasındaki yaşa bağlı olarak basınç dayanımının %8-19 arası, yarmada çekme dayanımının %6,5-14 arası, eğilme dayanımının %7-12, elastikiyet modülünün ise %5-12 arasında arttığını, (4) bu araştırmanın sonuçlarının, kullanılmış dökümhane kumunun kaliteli konstrüktör ve inşaat malzemeleri yapımında çok uygun bir şekilde kullanılabileceğini önermişlerdir.

Siddique vd. (2010) yılında gerçekleştirdikleri çalışmada ADK'nın Kontrollü Düşük Basınç Dayanımlı Malzeme (CLSM) ve beton gibi inşaat malzemeleri de içeren farklı uygulamalarda kullanılabilen endüstriyel yan ürünlerden birisi olduğunu belirtmişlerdir. Bu tür yan ürünlerin inşaat malzemeleri içinde faydalı kullanımı, inşaat malzemeleri bileşenlerinin maliyetini düşürmekte olup ayrıca atık uzaklaştırma sorunlarını da azaltmaktadır. Bu tür malzemelerden elde edilen sızıntı suyu, çevreyi muhtemel etkileyebilecek tehlikeli bileşikler içerebilir. Bu nedenle ADK'dan elde edilen sızıntı suyunun özelliklerini bilmek önemlidir. ADK sızıntı suyunun karakteristik özelliklerini anlamak, bertaraf, çevresel etki ve katı atık yönetimine doğru yararlı kullanım için potansiyel gelişme açısından şarttır. Bu çalışma ADK'nın fiziksel, kimyasal özellikleri, çeşitli sızıntı suyu test yöntemleri ve ADK sızıntısı özellikleri üzerine yayınlanan araştırmaları açıklamaktadır.

Singh ve Siddique (2012a) yaptıkları çalışmada, doğal kumun kısmen ADK ile yer değiştirmesiyle yapılan beton karışımlarının mukavemet ve dayanım özelliklerini değerlendirmişlerdir. Doğal kum, ağırlıkça beş yüzdeli (%0, %5, %10, %15 ve %20) ADK ile yer değiştirilmiştir. Bu çalışmada ADK içeren ve içermeyen toplam 5 adet beton karışımı (M-1, M-2, M-3, M-4 ve M-5) geliştirilmiştir. Basınç dayanımı ve çekme dayanımı testleri, betonun 7, 28 ve 91 günlük dayanım özelliklerini değerlendirmek için yapılmıştır. Esneklik modülü ve ultrasonik titreşim hızı testleri 28 ve 91 günlük numuneler üzerinde uygulanmıştır. Dayanıklılık özelliğinde, her beş karışım oranında 28 ve 91 günlük yaşlarda Hızlı Klorür Geçirgenliği testi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, ince agreganın kısmi değiştirilmesi olarak ADK'nın dahil edilmesi ile düz betonun mukavemet ve durabilite özelliklerinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre (1) Kumun kısmen ADK ile değiştirilmesi (%15'e kadar) betonun mukavemet özelliklerini (basınç dayanımı, yarmada çekme mukavemeti ve elastikiyet modülü) arttırmaktadır. (2) Hem 28 hem de

91 günde %15'lik ADK'lı beton ile basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastikiyet modülünde maksimum artış gözlenmektedir. (3) ADK kullanımı, betondaki klorür iyonu penetrasyonunu azaltmakta ve bu da betonun daha yoğun ve geçirimsiz olduğuna işaret etmektedir. (4) ADK yapısal beton yapımında uygun bir şekilde kullanılabilir.

Singh ve Siddique (2012b) yaptıkları çalışmada, ADK içeren betonun aşınma direnci ve dayanım özelliklerini araştırmış, kum (ince agrega) ile kütlece %0, %5, %10, %15 ve %20 ADK'yı yer değiştirmişlerdir. Su/çimento oranı ve karışımların işlenebilirliği sırasıyla 0,40 ve 85 ± 5 mm'de sabit tutulmuştur. İncelenen özellikleri basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastikiyet modülü ve aşınma derinliği olarak ifade etmişlerdir. Test sonuçları, kumun ADK ile değiştirilmesinin -ADK içeriğine bağlı olarak- 28 günlük basınç dayanımını %8,3-17, yarmada çekme dayanımını %3,6-10,4 ve elastikiyet modülünü %1,7-6,4 oranında arttırdığını ortaya koymuştur; 365 gün yaşa kadar mekanik özelliklerde sürekli iyileşme görülmüştür. Aşınma direnci ve araştırılan mekanik özelliklerin her biri arasında kuvvetli bir korelasyon vardır. ADK'nın ince agrega ile yer değiştirmesi tüm yaşlarda ADK katkısındaki artışla betonun dayanım özelliklerini arttırmıştır. ADK katkısına dayalı olarak, 28 günde betonun basınç dayanımı %8,5-17, yarmada gerilme dayanımı %3,55-10,40 ve elastikiyet modülü %1,67-6,35 artmıştır. Bütün bu özelliklerde kürlenme zamanındaki artışla sürekli bir gelişme görülür. Kürlenme yaşı göz önünde tutulmaksızın ince agreganın ADK ile yer değiştirmesindeki artışla, beton karışımlarında aşınma direnci artar. 28 günlük aşınma derinliği %0, %5, %10, %15 ve %20 içeren beton için sırasıyla 2,84, 2,6, 2,5, 2,28 ve 2,40 mm bulunmuştur. Betonun aşınma direnci -ADK içeriği ve yaşa bakılmaksızın- basınç dayanımı, yarmada gerilme dayanımı ile güçlü olarak korelasyon halindedir. ADK ile üretilen beton (%15'e kadar) yapısal beton üretmeye uygun olabildiği gibi aşınmanın önemli bir parametre olduğu uygulamalar için de kullanılması uygundur.

Akkaya (2015) yaptığı çalışmada döküm kumlarının çeşitli katkıları ile katı atık depolama sahası örtü katmanı olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Bu nedenle belirtilen numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deneyde kullanılan numuneler sırasıyla dökümhane kumu (iki tip dökümhane kumu için), dökümhane kumu+bentonit (çeşitli oranlarda), dökümhane kumu+bentonit+atık lastik tozu (çeşitli şekillerde) olarak sıralanmaktadır. Her bir numune optimum su içerikleri ve maksimum

kuru BİHA'sının %95'ine kadar sıkıştırılmış, numune üzerinde sınıflandırma deneyleri, permeabilite, k indeks özellikleri, kopma dayanımı, yarmada çekme testleri yapılmıştır. Laboratuvar sonuçlarına göre her tip dökümhane kumu için bentonit oranı %9'u geçtiğinde numunelerin genel hidrolik iletkenliği, geçirimsiz tabaka yapımı için beklenen değerin altında (10⁻⁹ m/s) kalmaktadır. Atık lastik tozu kullanılması ile her bir numune için yarmada çekme dayanımı artmakta, ancak bu durum permeabiliteyi arttırdığından sadece bir numunenin genel hidrolik iletkenliği geçirimsiz tabaka yapımı için beklenen değerin altında kalmaktadır. Sonuçların genel değerlendirmesi bentonit ve kullanılmış lastik tozu içeren dökümhane kumunun, katı atık depolama sahası örtü tabakası olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, iki farklı yeşil kum karışımı üzerinde yapılan doğrudan kayma testi, bölünme gerilimi kuvveti, şişme basıncı deneyinin deneysel çalışmasından elde edilmiştir; maksimum katkı miktarı %12'de tutulmuştur.

Sanayiye yönelik bu yüksek lisans bitirme tezi kapsamında, Konya ilinden temin edilen bentonit bağlayıcılı ADK'dan düşük maliyetli dayanıklı geopolimer yapı malzemesi üretmek ve bu malzemenin fiziksel-mekanik özellikleri değerlendirmek amaçlanmıştır. Depolanması ve bertarafı sorun teşkil eden bu atık için araştırma ve literatür taramaları gerçekleştirilmiş, Dünya ve Türkiye ekseninde ADK'nın farklı amaçlarla kullanıldığı bilgisine ulaşılmıştır. Bu atık değerlendirme alternatifleri içinde seçim yapılmış, geopolimer yapı malzemesine dönüştürme ön plana çıkmıştır. Bu seçimde, inşaat sektörünün insanın en temel ihtiyacı olan barınma ihtiyacını karşılaması, yarattığı katma değer ve istihdam olanaklarıyla Dünya ve Türkiye ekonomilerinde önemli bir paya sahip olması, hafif yapı malzemelerinin ise çevreye zarar vermemesi, piyasa değerinin fazla olması, yapı malzemesi olarak üstünlükleri, yüksek dayanım göstermesi göz önünde tutulmuştur.

Atıktan endüstriyel faydalı ürün üretilen bu tezde maliyeti düşük bir geopolimer malzeme üretilmiştir; ancak bu çalışma projelendiğinde bir başlangıç AR-GE'dir ve elde edilen geopolimer yapı malzemesi gelişmeye açıktır.

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Bu yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan bentonit bağlayıcılı ADK, Konya ilinden temin edilmiştir. ADK'nın kimyasal analizleri ÇİMSA A.Ş. laboratuvarlarında EPA 3051 A (mikrodalgada parçalama “ön işlem”) ve EPA 200.7 (ICP-OES’de analiz) standart test metotlarına göre yapılmıştır ve sonuçlar Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. ADK elemental analizi

Bileşenler	Miktar (%)
SiO ₂	89,58
Al ₂ O ₃	3,77
CaO	0,93
Fe ₂ O ₃	2,28
K ₂ O	0,21
MgO	0,44
Na ₂ O	0,73
SO ₃	0,05
P ₂ O ₅	0,13
Mn ₂ O ₃	0,05
Diğer	1,83

ADK’da içerik olarak SiO₂ kayda değer ölçüde fazladır; diğer bileşenler çok az miktarda bulunmaktadır.

Geopolimer yapı malzemesi üretiminde bağlayıcı olarak saflığı en az %97 olan sodyum hidroksit (NaOH), saflığı en az 38-42 ve 45-50 bome aralığındaki sodyum silikat (Na₂SiO₃) kullanılmıştır. NaOH -diğer adıyla kostik- beyaz renkte nem çekici bir maddedir. Suda rahatlıkla çözünebilen, suda çözüldüğünde sabun hissi veren ve yumuşak kaygan bir çözelti oluşturur. Bir kokusu yoktur, sıvı ve katı hallerde bulunur. Na₂SiO₃, cam suyu diye de bilinir. Genellikle renksizdir. Na₂SiO₃ çimento sektöründe, tekstilde, kereste işleme sanayinde, otomobillerde kullanılır.

Çalışmada karışım suyu olarak Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi kampüsü şebeke suyu kullanılmıştır.

Deneyler esnasında kullanılan temel araç ve gereçler NÖHÜ İnşaat, Maden ve Çevre Mühendisliği bölümlerinin laboratuvarları ve Niğde ÇİMSA A.Ş laboratuvarından temin edilmiştir. Bu laboratuvarlarda bulunmayan araç ve gereçler, Niğde’de bulunan ticari satış yerlerinden satın alınmıştır. Malzemelerin detayları Çizelge 3.2, Fotoğraf 3.1-3.2’de verilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde, fiziksel ve mekanik testlerde sırasıyla Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NÖHÜ) Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı ve Merkezi Araştırma Laboratuvarı kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Çalışmada deney bazında kullanılan araç ve gereçler

Kullanılan Araç ve Gereçler	Mevcut Olan Araç ve Gereçler	Tedarik Edilen Araç ve Gereçler
Hassas terazi	İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Elek serisi	İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Kül fırını	Maden Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Değirmen	Maden Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Arşimet terazisi ve seti	İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Spatula, mala		Temin edilmiştir
Cam mezürler		Temin edilmiştir
Agrega el küreği	İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Masa tipi mikser	İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Desikatör	Çevre Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Etüv	Çevre Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Bez (havlu)		Temin edilmiştir
Yükleme cihazı (Pres Makinesi)	ÇİMSA A.Ş. Laboratuvarında mevcut	Hizmet alımı yapılmıştır
Kroze	Çevre Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Masa tipi mikser	İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
Kıvam deney setleri	İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında mevcut	
40*40*160 mm beton numune kalıpları		Temin edilmiştir



Fotoğraf 3.1.a) Hassas terazi, b) Değirmen ve c) Mezür



Fotoğraf 3.2.a) Etöv, b) Kül fırını ve c) Elek serisi

3.2 Metot

Bu tezde ADK'nın kimyasal analizlerine göre (Çizelge 3.1) ADK üzerinde ön deneyler yapılmıştır. ADK için sırasıyla (i) elek analizi (Fotoğraf 3.3, Şekil 3.1), (ii) yanabilir madde verim hesabı ve (iii) birim hacim ağırlığı deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonuçlarına göre, çalışmada kullanılmak üzere, Konya ilinden temin edilen 4 farklı tip ADK içerisinde en iyi sonuç veren bir tip ADK üzerinden çalışmaya devam edilmesine

karar verilmiştir. Diğer 3 ADK 100°C sıcaklıkta gaz çıkışı ve koku sorunları ortaya çıktığı için çalışmada kullanılmamıştır. Daha sonra ADK'nın kimyasal bağlayıcılar (NaOH ve Na₂SiO₃) ile ayrı aktive edilmesi ve yapı malzemesi üretimi deneyleri yapılmıştır. Üretilen geopolimer yapı malzemelerinde fiziksel-mekanik testler olarak ((i) birim hacim ağırlığı, (ii) basınç dayanımı, (iii) su emme ve (vi) porozite gerçekleştirilmiştir. Yürütülen deneylerde ilgili TS standartları kullanılmıştır.

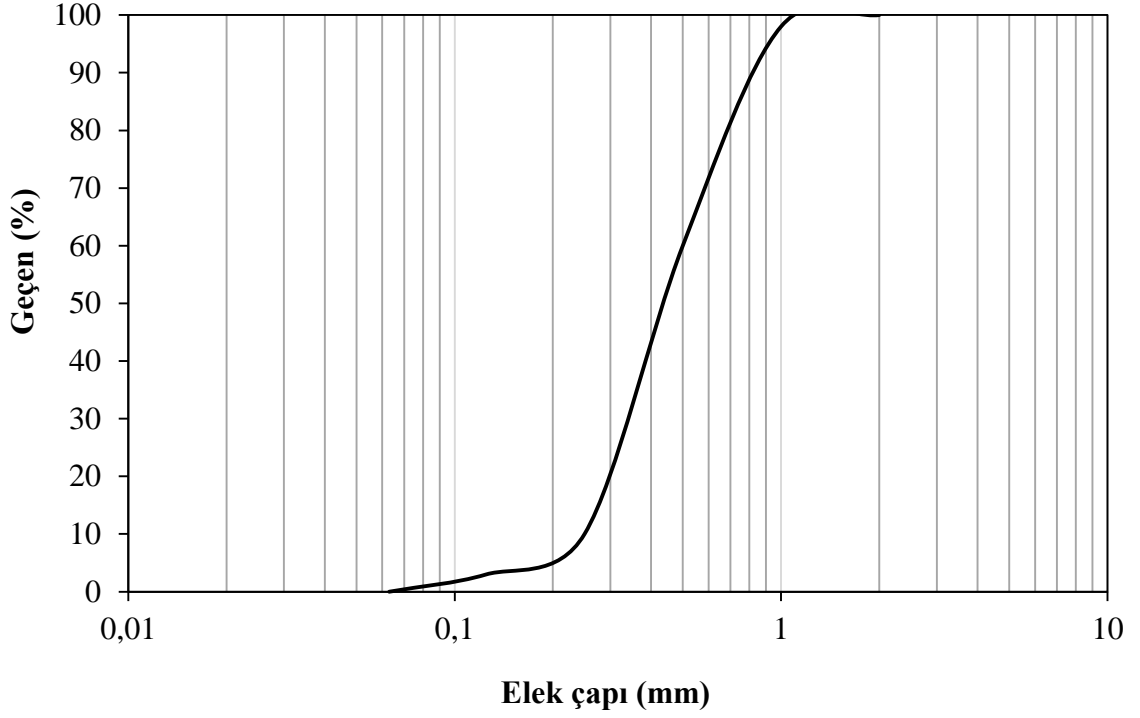
3.2.1 ADK'ya uygulanan deney ve ölçümler

3.2.1.1 Elek analizi

ADK'nın elek analizi yapılmış (Fotoğraf 3.3, Şekil 3.1) ve boyutlarına göre (TS ISO 3310-1) sınıflara ayrılmıştır.



Fotoğraf 3.3. ADK'nın laboratuvarında elek analizi



Şekil 3.1. ADK elek analizi sonuçları

3.2.1.2 Yanabilir madde verim hesabı

ADK'da yanabilir madde verimini bulmak için öncelikle krozenin darası alınır. 10 g ADK kroze konular ve 105 °C'de 1 saat süreyle etüvde bekletilir; sonrasında numunenin desikatörde soğuması beklenir. Desikatörden çıkartılan numune, hassas teraziye alınarak tartım yapılır ve 750 °C'de 2 saat süresince kül fırınında bekletilir. 1 gün sonra tekrar desikatöre alınır ve soğuyuncaya kadar bekletilir. Yanabilir madde verimi= $(y-x/\text{Numune ağırlığı}) \times 100$ şeklinde hesaplanır (Kroze darası=x, Numune ağırlığı=20 g, etüv sonrası N+K=y).ADK -döküm sırasında kullanılan maddeyi de bünyesinde barındıran- endüstriyel bir katı atıktır. Bu çalışmada hammadde olarak kullanılan ADK'ya döküm sırasında araç parçası karışmıştır. Bu nedenle geopolimer üretim sürecinde -yüksek sıcaklıklarda olduğu gibi- bu ön aşamada da sıcaklık arttıkça (>200 °C) gaz çıkışı ve koku sorunları olduğundan 750 °C sıcaklığa çıkılamamış ve yanabilir madde verim hesabı gerçekleştirilememiştir.

3.2.1.3 Birim hacim ağırlığı deneyi

ADK'nın birim hacim ağırlığı(BİHA) değeri, agregâ ölçü kabı şişleme çubuğu ile sıkıştırılarak veya kaba titreşim uygulanarak yerleştirilmesiyle bulunur. Doğal olarak bir agregânın BİHA değeri genelde 1,20 ile 1,80 g/cm³ arasında değişir. BİHA değerleri, agregânın granülometrisine, kusurlu malzemenin miktarına, yerleştirme şekline ve agregânın özgül ağırlığına bağlıdır. ADK'nın BİHA değerleri aşağıda verildiği şekilde hesaplanmıştır (TS EN 12350-6):

Hava kurusu BİHA: 1,60 g/cm³

Etüv kurusu BİHA: 1,54 g/cm³

3.3 Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi

ADK-kimyasal madde karışım oranları hesaplandı. Bu hesaplamalar doğrultusunda hazırlanan karışımlar, 4x4x16 cm ebatındaki dikdörtgen prizma şeklindeki kalıplara döküldü. Numune üretiminde kullanılan malzemelerin hacim esası yerine ağırlık esasına göre belirlenmesine karar verildi. Çalışmada kullanılan alkali aktivatör miktarları, ADK kum hacminin %10, 20, ve 30 oranına göre alınmış ve 3 grup halinde numune elde edilmiştir.

Bütün numunelerin üretiminde 1250g ADK ağırlığı standart olarak alınmıştır. Ön çalışmalarda bu miktarın, 3 bölmeli numune kalıbını dolduracak hacime tekabül ettiği ölçülmüştür. Karışımda kullanılan alkali aktivatör miktarı ise karışıma giren 1250g ADK'nın ağırlıkça %'si olarak alınmıştır. Karışımda kullanılan su miktarları da alkali aktivatör oranlarındaki artışa bağlı olarak karışım kıvamı ve gözlem esas alınarak bulunmuştur.

Çalışmada 3 tip numune üretilmiştir. Bunlar:

1. tip saflığı en az %97 olan NaOH bağlayıcı numuneler
2. tip saflığı en az 38-42 bome aralığında olan Na₂SiO₃ bağlayıcı numuneler
3. tip ise saflığı en az 45-50 bome aralığında olan Na₂SiO₃ bağlayıcı numuneler

1 adet 4x4x16 mm dikdörtgen prizma şeklindeki numune üretimi için gerekli olan karışım miktarları Çizelge 3.3-3.5’de verilmiştir. Çizelge 3.3-3.4’de bulunan notasyonlarda N numune numarasını, KO_{10-30} karışım oranını (alt indis alkali aktivatörün karışım oranını) ifade etmektedir.

Çizelge 3.3. ADK’lı ve NaOH bağlayıcılı geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri (Tip 1)

Numune No	Karışım Oranı(KO)(%)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ 38 Bome (g)	Na ₂ SiO ₃ 48 Bome (g)	ADK (g)
N ₁	KO ₁₀	125	-	-	1250
N ₂	KO ₂₀	250	-	-	1250
N ₃	KO ₃₀	375	-	-	1250

Çizelge 3.4. ADK’lı ve Na₂SiO₃(38 bome) bağlayıcılı geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri (Tip 2)

Numune No	Karışım Oranı(KO)(%)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ 38 Bome (g)	Na ₂ SiO ₃ 48 Bome (g)	ADK (g)
N ₄	KO ₁₀	-	125	-	1250
N ₅	KO ₂₀	-	250	-	1250
N ₆	KO ₃₀	-	375	-	1250

Çizelge 3.5. ADK’lı Na₂SiO₃(48 bome) bağlayıcılı geopolimer yapı malzemesi üretim parametreleri (Tip 3)

Numune No	Karışım Oranı(KO)(%)	NaOH (g)	Na ₂ SiO ₃ 38 Bome (g)	Na ₂ SiO ₃ 48 Bome (g)	ADK (g)
N ₇	KO ₁₀	-	-	125	1250
N ₈	KO ₂₀	-	-	250	1250
N ₉	KO ₃₀	-	-	375	1250

Karışım oranlarına ve kütleme sıcaklıklarına göre numune sayıları Çizelge 3.6’de verilmiştir. Çizelge 3.6’de verilen notasyonlarda KO karışım oranını, alt indis alkali aktivatörün karışım oranını, TP numune tipini, SH alt indis alkali aktivatör olan NaOH,

SS38-48 bome Na_2SiO_3 , $\text{KS}_{50-1,200-5}$ KS kür sıcaklığınalt indis 50-200°C küreleme sıcaklığını ve 1-5 numune numarasını ifade etmektedir.

Çizelge 3.6. Numune numarası ve küreleme sıcaklıklarına göre numune sayıları

Numune No	KS ₅₀₋₁	KS ₇₅₋₂	KS ₁₀₀₋₃	KS ₁₅₀₋₄	KS ₂₀₀₋₅
N ₁	9	9	9	9	9
N ₂	9	9	9	9	9
N ₃	9	9	9	9	9
N ₄	9	9	9	9	9
N ₅	9	9	9	9	9
N ₆	9	9	9	9	9
N ₇	9	9	9	9	9
N ₈	9	9	9	9	9
N ₉	9	9	9	9	9
Toplam	81	81	81	81	81

Çalışmada üretilen deney numunelerinin karıştırılmasında Fotoğraf 3.4’de görülen masa tipi mikser kullanılmıştır. Masa tipi mikserin içine ön çalışmalarda belirlenen miktarda su ve ADK ilave edilmiştir. Numuneler mikserde düşük hızda 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışıma giren oranda ADK ilave edilmiştir ve aynı hızda 1 dakika daha karıştırılmıştır. Mikser orta hıza alınarak ADK+alkali aktivatör+su birlikte 3 dakika olmak üzere toplamda 5 dakika karıştırılmıştır. Karışımında kullanılan ADK’nın su ile temasından sonra işleme süresinin 8 dakika olması dikkate alınarak bu sürenin yeterli olduğuna karar verilmiştir.



Fotoğraf 3.4. Masa tipi mikser

3.3.1 Şekillendirme

Masa tipi mikserde plastik kıvama getirilen numune, Fotoğraf 3.5 ve 3.6'da görülen çelik kalıplara dökülerek 4x4x16 cm boyutlarında dikdörtgen prizma şeklinde imal edilmiştir. Numuneler, her seferinde kalıp yağı ile yağlanmış kalıba, 1 dakika sürede yerleştirilmiştir. Karışımın kalıplanması esnasında yerleştirme yapılmış, 8 mm çapındaki şişleme çubuğu ile sıkıştırılmıştır.

3.3.2 Kürlenme

Kalıplaması tamamlanan geopolimer numuneler, fırında (Fotoğraf 3.5) farklı sıcaklıklarda (75, 100, 150 ve 200 °C) 24 saat süresince pişirilmiştir. Numuneler hazırlanırken 200 °C üstündeki sıcaklıklarda reaksiyon sonucu gaz çıkışı gerçekleştiğinden, sıcaklıkta üst limit 200 °C olarak tutulmuştur. Geopolimer yapı malzemeleri, Fotoğraf 3.6'da görsel olarak sunulmuştur.



Fotoğraf 3.5. Geopolimer yapı malzemelerinin kürlendiği kül fırını



Fotoğraf 3.6. ADK ve kimyasal bağlayıcılarla aktive edilerek üretilen geopolimer yapı malzemeleri

3.4 Geopolimer Yapı Malzemesine Uygulanan Fiziksel ve Mekanik Testler

Bu tez kapsamında ADK'dan alkali aktivatörler kullanılarak, 3.2.4'de anlatıldığı biçimde, üretilen geopolimer yapı malzemelerine uygulanan fiziksel ve mekanik testler aşağıda sıralanmıştır:

- BİHA
- Su emme (SUE)
- Porozite
- Basınç dayanımı (BASD)

3.4.1 Birim hacim ağırlığı

Numunelerin BİHA'sının tespit edilmesinde TS 12350-6 standardı temel alınmıştır. Üçer tane numunenin BİHA'sının aritmetik ortalamasına bakılarak o gruba ait BİHA elde edilmiştir. BİHA hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten (3.1) yararlanılmıştır:

$$\rho_{g,u} = \frac{m_{dry,u}}{V_{g,u}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3.1)$$

Burada;

$m_{dry,u}$: Kuru birim ağırlıkları

$V_{g,u}$: Numunelerin brüt hacimleri (uzunluk, genişlik ve yükseklik çarpımı)

$\rho_{g,u}$: BİHA

3.4.2 Basınç dayanımı

BASD testi için, numune önce TS 03114 belirtilen "Hava kurusuna şartlandırma" yöntemiyle, laboratuvar ortamında değişmez ağırlığa ulaşana kadar bekletilerek şartlandırılmıştır. Şartlandırma, numunelerin 24 saatten az olmayan zaman aralıklarıyla tartılmasıyla belirlenen kütleler arası farkın toplam kütleinin %0,2'sinden az olması esasına göre yapılmıştır. Aynı standartta verilen yöntemler doğrultusunda, istenen yükleme hızı limitlerinde yükleme yapılarak Fotoğraf 3.7'de görülen tek eksenli basınç presi yardımı ile teste tabi tutulmuştur. Numunelerin basınç dayanımı değerlerini

bulmak için aynı şartlarda üretilen, BASD değerleri birbirinden %20 farkı olmayan, 3 numuneden elde edilen değerlerinin aritmetik ortalaması alınmak suretiyle ilgili grubun BASD değerleri aşağıdaki (3.2) bağıntı yardımı ile bulunmuştur. BASD, üretilen geopolimer yapı malzemelerine 7 ve 28 günde uygulanmıştır (TS EN 206).

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \text{MPa} \quad (3.2)$$

Denklemdede;

σ_b : Basınç (MPa)

P: kırılma yükü

A: kuvvet uygulanan yüzey alanı

Olarak ifade edilmektedir.



Fotoğraf 3.7. Pres makinası

Yük, basınç dayanımı saniyede yaklaşık 1,0 MPa- 1,2 MPa artacak şekilde ve ani dinamik yüklemesiz olarak deney numunesi kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Pres göstergesinden okunan en büyük yük, otomatik olarak tespit edilmiş ve basınç dayanımı

MPa olarak verilmiştir. Aynı zamanda kullanılan prese deneye başlamadan önce numune boyutları kaydedilebilmektedir.

3.4.3 Su emme

Deneyde kullanılan numunelerin hepsi dikdörtgen prizma şeklindedir. Numuneler 24 saat zaman diliminde 105 °C’de kurutulmuştur. Numuneler kurutulduktan sonra oda sıcaklığında 30 dakika bekletilmiş ve sonrasında tartım işlemi yapılmıştır (G_k). Kurutulmuş numuneler, içinde 20-25 °C sıcaklıkta su bulunan kapta 24 saat bekletilmiş, üstündeki su damlacıkları ıslak bir sünger yardımıyla silindikten sonra hemen tartılmış ve tekrar su içine bırakılmıştır. Bu tartma işlemi 24 saat aralıklarla tekrarlanmıştır. Son adımda, suya doymuş değişmez ağırlık tespit edilmiştir (G_d). Geopolimerleştirme de kimyasal bağlayıcı olarak sodyum hidroksit kullanıldığı numunelerde 100-200 °C sıcaklık aralığında SUE değerleri ölçülebilmektedir. 50 ve 75 °C kür sıcaklıklarında üretilen numuneler suda dağıldığı için SUE açısından bu sıcaklıklarda belirleme yapılamamıştır (TS EN 1091-6). Kimyasal bağlayıcı olarak sodyum silikatın kullanıldığı bütün geopolimer yapı malzemeleri, SUE belirlenmesi sırasında suda dağılma eğilimi göstermiştir. Ağırlıkça su emme yüzdesi (S_k) ve hacimce su emme yüzdesi (S_h) aşağıdaki eşitlikler (3.3.a ve 3.3.b) yardımı ile bulunmuştur.

$$S_k = \frac{G_d - G_k}{G_k} 100 (\%) \quad (3.3a)$$

$$S_h = \frac{G_d - G_k}{G_d - G_{ds}} 100 (\%) \quad (3.3 b)$$

S_k : Ağırlıkça su emme yüzdesi (%),

S_h : Hacimce su emme yüzdesi (%),

G_d : Su emdirilmiş numune kütlesi,

G_{ds} : Archimedes terazisi ile tartılmış numune kütlesi,

G_k : Etüv kurusu numune kütlesi,

olarak ifade edilmektedir.

3.4.4 Porozite

Malzemenin hacimce SUE oranı, aynı zamanda görünen porozitesidir. Porozite, malzemedeki boşluk oranıdır. Geopolimer yapı malzemesinde SUE açısından belirleme yapılan kür sıcaklıklarında porozitenin de ölçümü yapılabilmış (TS 4633 EN 933-1), yapılamayan kür sıcaklıklarında ise bu parametrenin ölçümü gerçekleştirilememiştir. Bu tezde üretilen geopolimer yapı malzemelerinin porozite değeri, BİHA (γ_k) ve özgül ağırlık (γ_s) değerlerinden yararlanılarak aşağıdaki bağıntı (3.4) ile hesaplanmıştır.

$$Pr = 1 - \frac{\gamma_k}{\gamma_s} 100 \quad (\%) \quad (3.4)$$

Burada;

γ_k : Numune BİHA'sı (g/cm^3),

γ_s : Numune özgül ağırlığı (g/cm^3),

P_r : Porozite (%).

olarak ifade edilmektedir.

Bu tez çalışmasındaki üretim sürecinde geopolimer malzemelere uygulanan bu temel fiziksel-mekanik testlerin toplu sonuçları Çizelge 4.1 ve 4.2'te verilmiştir.

BÖLÜM IV

BULGULAR

Bu yüksek lisans tezinde endüstriyel bir katı atık olan ADK'dan NaOH ve Na₂SiO₃ bağlayıcıları kullanılarak %10-30 aralığındaki kombinasyonlarda geopolimer beton üretilmiş, bu yapı malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan deneylerin ve testlerin bulguları (Çizelge 4.1-4.2) bu bölümde verilmiştir.

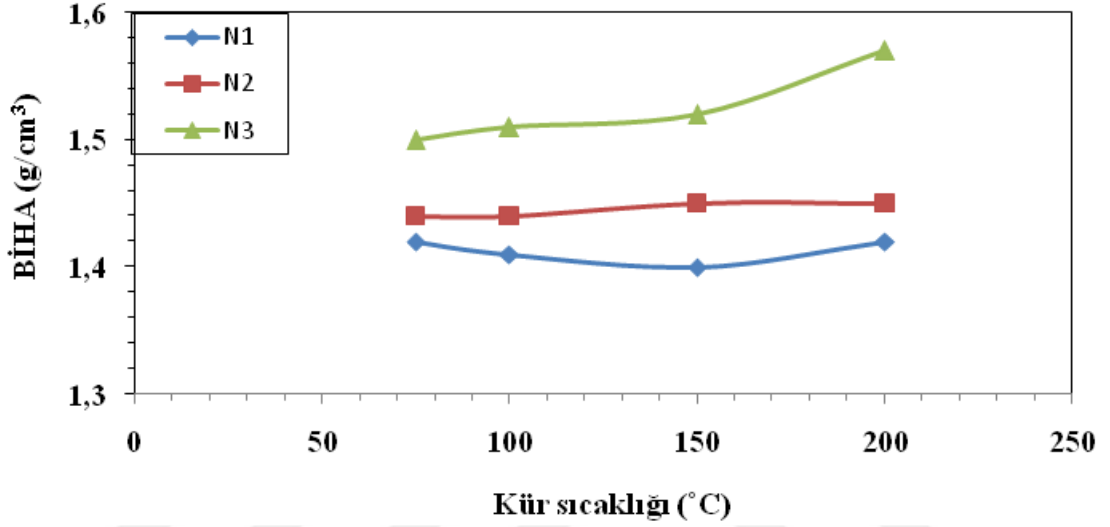
4.1 NaOH Bağlayıcılı Geopolimer Malzemenin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Fiziksel ve mekanik test sonuçlarına göre alkali aktivatör olarak NaOH kullanılan geopolimer yapı malzemelerinde sırasıyla BİHA, BASD, SUE ve porozite değerleri 1,40-1,57 g/cm³, 1-2,5 MPa, %24-38 ve %26-35 aralığında bulunmuştur. Bulunamayan değerler (-) ile ifade edilmiştir.

Çizelge 4.1.ADK ve NaOH bağlayıcı kullanılarak üretilen geopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri

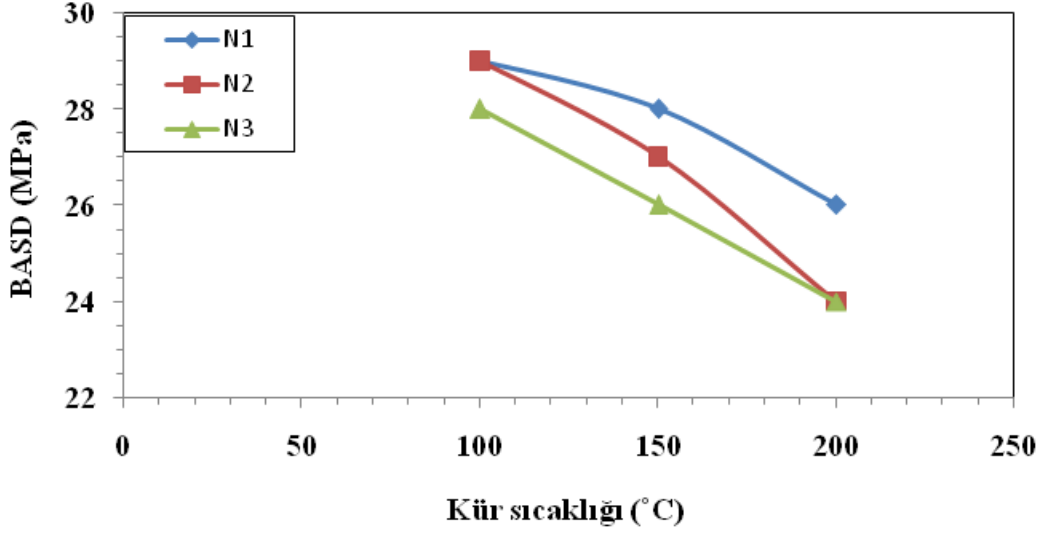
Kür sıcaklıkları (°C)	Numune No	BİHA (g/cm ³)	BASD (MPa)		SUE (%)	Porozite (%)
			7 günlük	28 günlük		
50	N ₁	-	-	-	-	-
	N ₂	-	-	-	-	-
	N ₃	-	-	-	-	-
75	N ₁	1,42	1,0	1,0	-	-
	N ₂	1,44	1,0	1,0	-	-
	N ₃	1,50	1,0	1,0	-	-
100	N ₁	1,41	2,4	2,5	29	35
	N ₂	1,44	1,8	1,9	29	33
	N ₃	1,51	1,1	1,2	28	33
150	N ₁	1,40	1,7	1,8	28	34
	N ₂	1,45	1,6	1,6	27	32
	N ₃	1,52	1,5	1,6	26	31
200	N ₁	1,42	1,8	1,8	26	33
	N ₂	1,45	1,6	1,6	24	31
	N ₃	1,57	1,6	1,6	24	31

Maksimum BİHA değeri ($1,57 \text{ g/cm}^3$)%30 oranında NaOH ile $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de üretilen numunelerde ölçülmüş, ancak tüm karışımlarda -malzemede genleştirici bir kimyasal kullanılmadığından- birbirine yakın değerler bulunmuştur (Çizelge 4.1). $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altındaki sıcaklıklarda üretilen malzemelerde BİHA artma eğilimi göstermiş, fakat büyük değişikliklere rastlanmamıştır. Aktivatör oranındaki artış da BİHA artışına neden olmaktadır (Şekil 4.1)

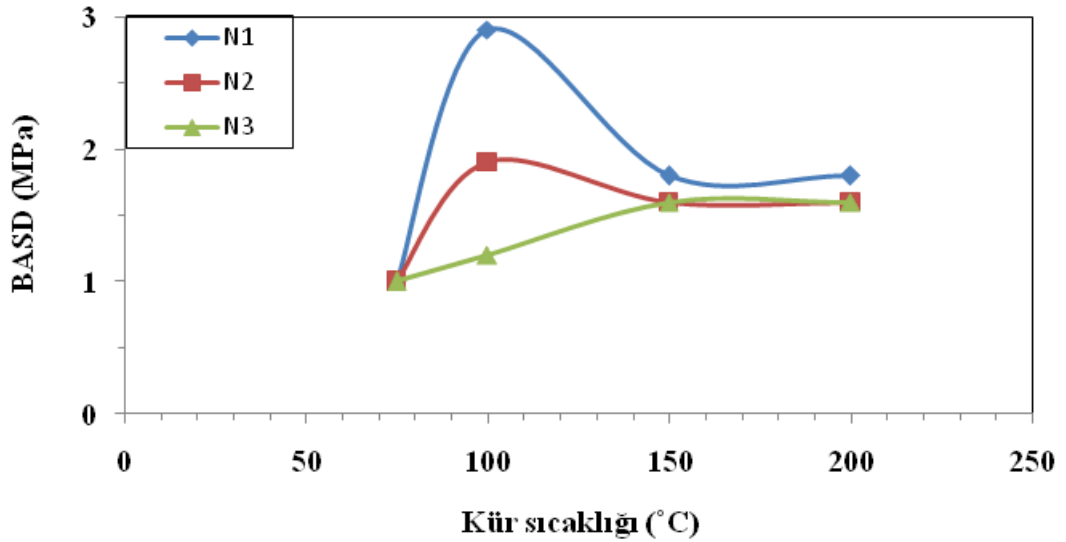


Şekil 4.1. Geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BİHA değerine etkisi

Kimyasal bağlayıcı olarak NaOH kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerinde BASD testi malzeme üretildikten sonraki 7 ve 28 günlerde yapılmış, deney sonuçları incelenmiştir. Şekil 4.2 ve 4.3'de görüldüğü gibi düşük kürleme sıcaklıklarında ($100 \text{ }^\circ\text{C}$) BASD'nin kısmen en yüksek değerlere ulaştığı, 200°C 'lere doğru ise BASD'nin azaldığı görülmektedir. Farklı NaOH miktarları BASD değerlerinde düşümlere yol açmıştır. Maksimum BASD değeri, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de %10 NaOH karışım oranında $2,5 \text{ MPa}$ olarak tespit edilmiştir. Buda kür sıcaklığının BASD üzerinde etkisinin az olduğunu göstermektedir. Tezde kullanılan ADK'da Al_2O_3 yeterince bulunmadığından polimerleşme sırasında gerçekleşmesi beklenen alümino silikat bağlarının verimli bir şekilde oluşmaması nedeniyle, geopolimer yapı malzemelerinin mukavemetinin düşük çıktığı düşünülmektedir.

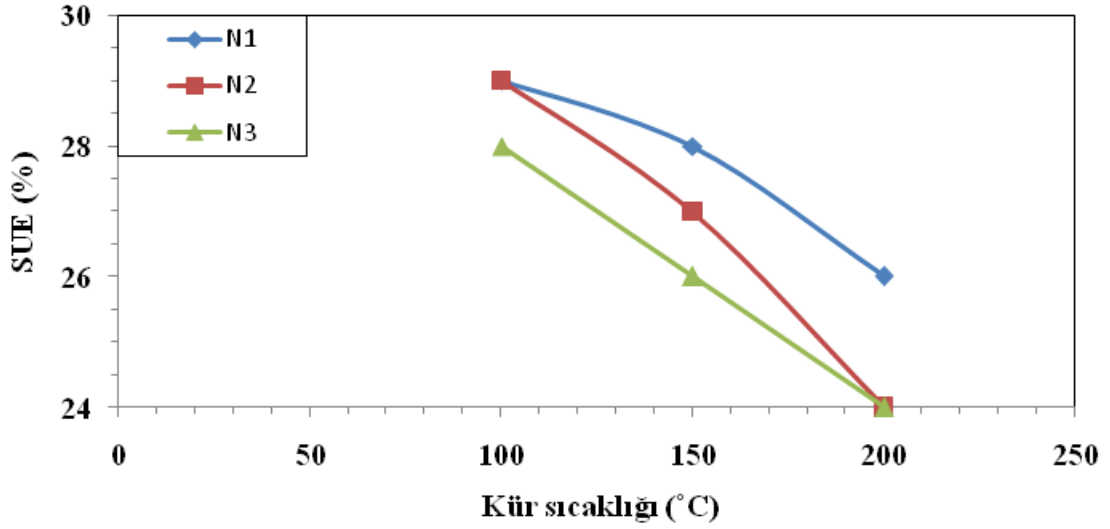


Şekil 4.2. 7 günlük geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BASD değerine etkisi



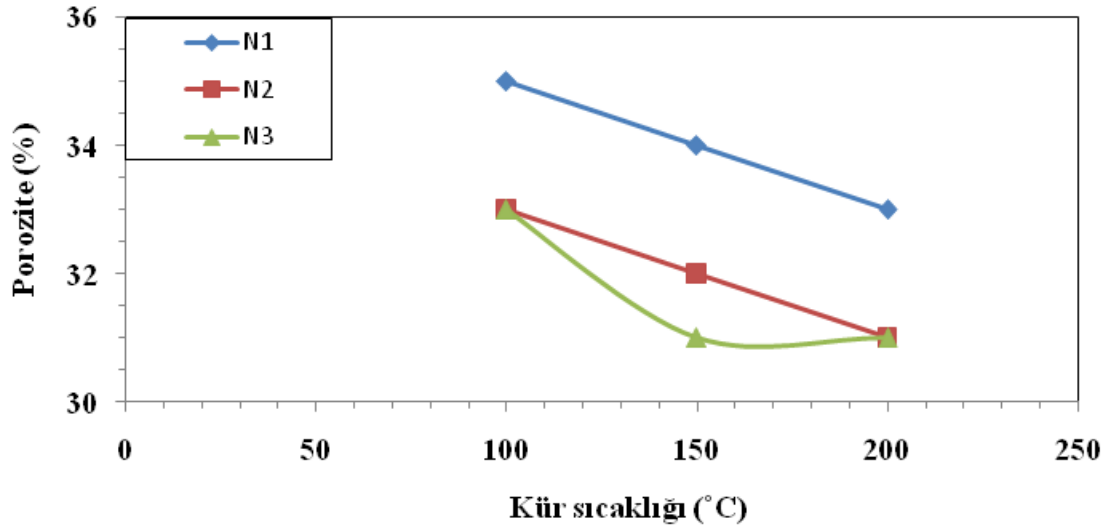
Şekil 4.3. 28 günlük geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BASD değerine etkisi

Geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklıklarının artırılmasıyla SUE oranlarının genel olarak azalma gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.4). SUE, 100 °C’de %10 oranda NaOH kullanılarak üretilen numunede maksimum değere ulaşmış ve minimum değer 200 °C %30 karışım oranlı üretilen numunede ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre kür sıcaklığının SUE değerine etkisinin az olduğu söylenebilir. SUE’nin yüksek olması yapı malzemesinde tercih edilmediğinden %30 NaOH ve 200 °C kurlama sıcaklığında elde edilen numune tercih edilebilir.



Şekil 4.4. Geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının SUE değerine etkisi

Bu tezde üretilen geopolimer yapı malzemesinde, kür sürelerinin arttırılmasının görünen poroziteyi düşürdüğü görülmüştür (Şekil 4.5.).



Şekil 4.5. Geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının porozite değerine etkisi

4.2 Na₂SiO₃ Bağlayıcılı Geopolimer Yapı Malzemesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Na₂SiO₃ bağlayıcılı numuneler iki tip bomeden (38 ve 48) üretilmiş olup aralarında bariz bir fark gözlenmemiştir. Fiziksel ve mekanik test sonuçlarına göre Na₂SiO₃ içeren geopolimer yapı malzemelerinde BİHA, BASD değerleri sırasıyla 1,41-1,80 g/cm³ ve

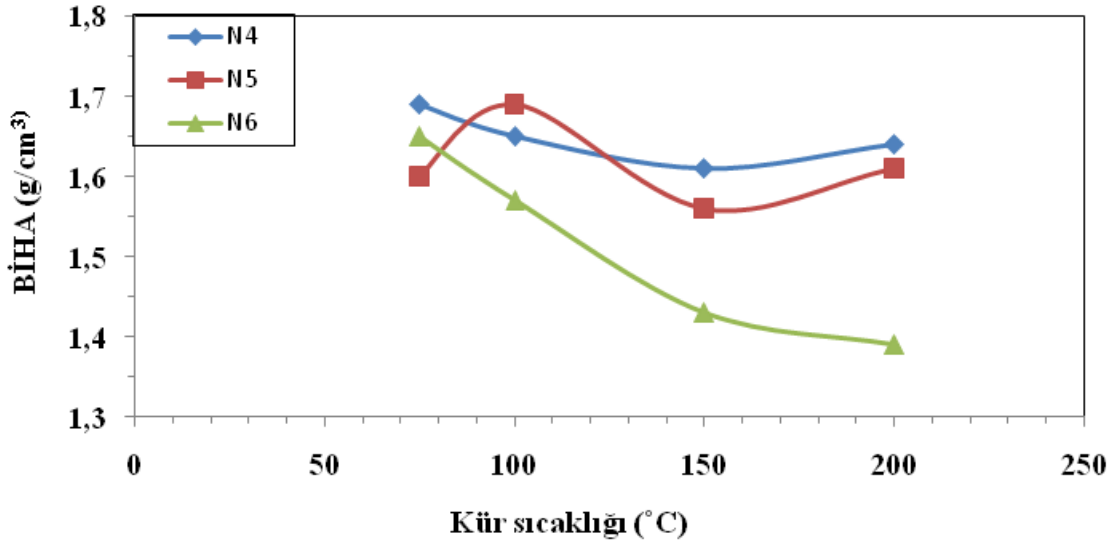
0,3-12,31 MPa olarak ölçülmüş olup SUE ve porozite testlerinde ölçüm yapılamamıştır. NaOH bağlayıcılı geopolimer yapı malzemelerinin aksine, Na₂SiO₃ bağlayıcı ile üretilen malzemelerin %30'luk karışım oranlarında fiziksel ve mekanik özellikler yönünden daha iyi sonuç alınmıştır.

%30 Na₂SiO₃ oranı ile üretilen numunelerde en yüksek BASD değeri elde edilmiştir. 7 ve 28 günlük BASD değerleri, NaOH bağlayıcılı numunelerde olduğu gibi, literatürdeki UK'dan elde edilen geopolimer betonların (Tuyan vd., 2017) değerlerine ulaşamamaktadır. Üretilen geopolimer betonlar suda çözülme eğilimi gösterdiğinden dolayı SUE ve porozite değerleri belirlenememiştir.

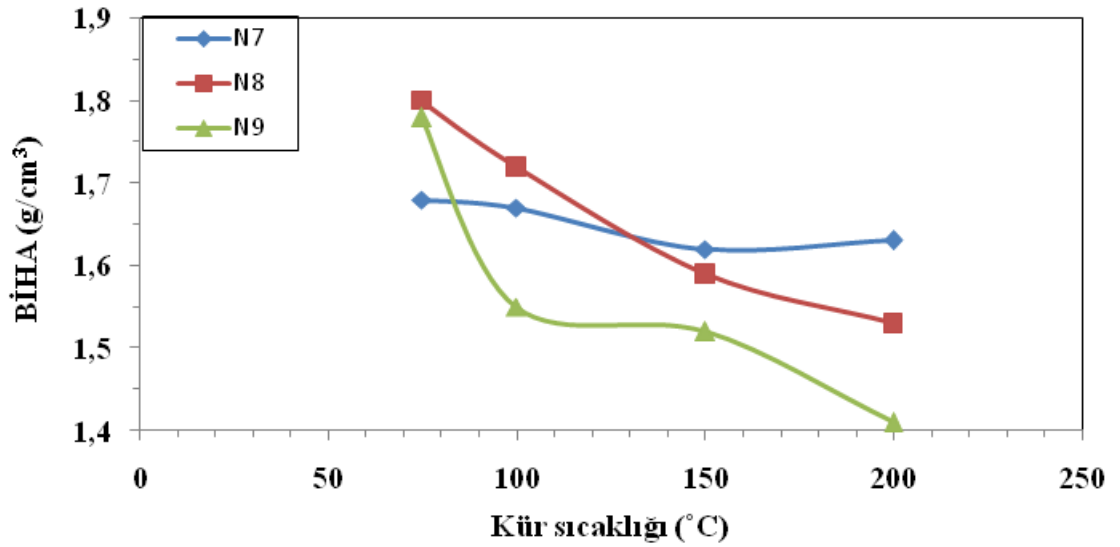
Çizelge 4.2. ADK ve Na₂SiO₃ bağlayıcı ile üretilen geopolimer malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri

Kür sıcaklıkları (°C)	Numune No	BİHA (g/cm ³)	BASD (MPa)		SUE (%)	Porozite (%)
			7 günlük	28 günlük		
75 °C	N ₄	1,69	-	-	-	-
	N ₅	1,60	-	-	-	-
	N ₆	1,65	-	-	-	-
	N ₇	1,68	-	-	-	-
	N ₈	1,80	-	-	-	-
	N ₉	1,73	-	-	-	-
100 °C	N ₄	1,65	0,7	-	-	-
	N ₅	1,69	2,7	-	-	-
	N ₆	1,57	0,9	-	-	-
	N ₇	1,67	0,9	1,3	-	-
	N ₈	1,72	0,9	-	-	-
	N ₉	1,55	0,9	-	-	-
150 °C	N ₄	1,61	0,9	-	-	-
	N ₅	1,56	0,9	1,3	-	-
	N ₆	1,43	2,1	2,0	-	-
	N ₇	1,62	0,3	-	-	-
	N ₈	1,59	0,6	2,6	-	-
	N ₉	1,52	4,4	4,2	-	-
200 °C	N ₄	1,64	0,9	0,7	-	-
	N ₅	1,61	3,2	2,75	-	-
	N ₆	1,39	4	4,3	-	-
	N ₇	1,63	1,1	1,1	-	-
	N ₈	1,53	4,6	4,25	-	-
	N ₉	1,41	9,1	12,31	-	-

Şekil 4.7 ve 4.8’de hem 38 bome hemde 48 bomelik Na_2SiO_3 karışımlarında kür sıcaklığı 75 °C’den 200 °C’ye doğru arttıkça BİHA değerlerinin düştüğü görülmüştür.

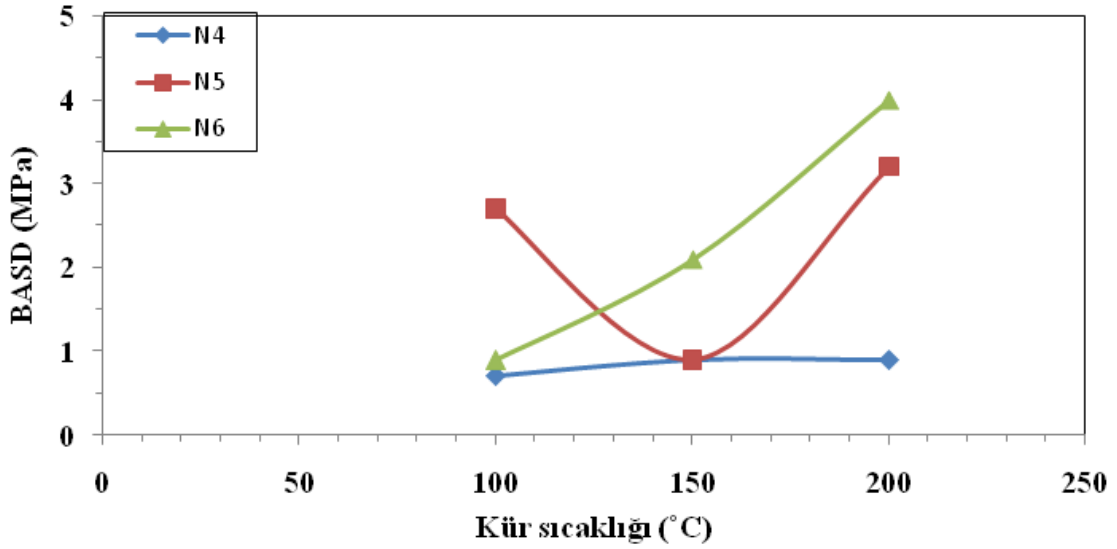


Şekil 4.6. 38 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BİHA değerine etkisi

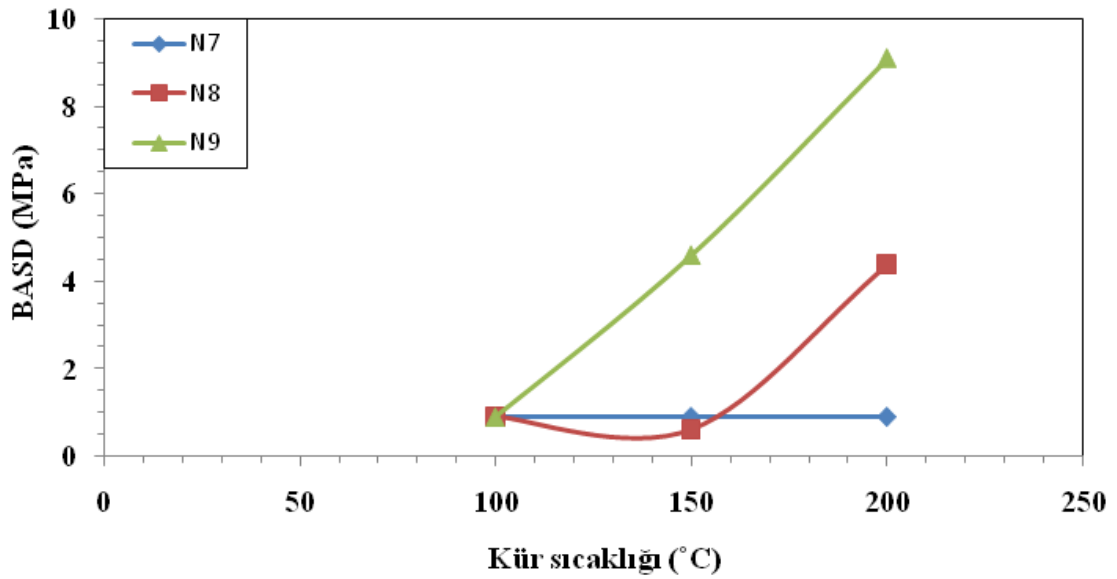


Şekil 4.7. 48 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığının BİHA değerine etkisi

Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemesinde kür sıcaklığı BASD değerine etkisi fazladır. BASD, 200 °C kür sıcaklığında %30 Na_2SiO_3 karışım oranında maksimum değere ulaşmıştır (Şekil 4.8 ve 4.9).



Şekil 4.8. 38 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen 7 günde geopolimer yapı malzemesinde kır sıcaklığının BASD değerine etkisi



Şekil 4.9. 48 bomelik Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen 7 günde geopolimer yapı malzemesinde kır sıcaklığının BASD değerine etkisi

BÖLÜM V

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geopolimer üretiminde ekonomik olması açısından kütleme sıcaklığının 20-200 °C arasında kalması önerilir. UK'dan geopolimer üretimi sırasında reaksiyon 60-100 °C sıcaklıklarda yavaş bir şekilde gerçekleştiğinde yapı malzemesinde BASD'yi arttırıcı bir etki yapar. Bu nedenle literatürde yukarıda bahsi geçen ortalama sıcaklık aralıklarında UK'dan geopolimer üretimi tercih edilmektedir.

Bu yüksek lisans tez çalışması, ADK'dan geopolimer üretimi üzerine bir çalışmadır. Ön denemeler yapılarak 4 adet ADK'dan optimum sonuç veren 1 tanesi tezde kullanılmıştır. ADK'lar 1 mm elekten geçirilerek, alkali aktivatörler/kimyasal bağlayıcılar olan NaOH ve Na₂SiO₃ %10-30 oranlarında karıştırılarak ve ön denemeler sonrası netleşen 50-200 °C aralığında kütleme sıcaklıkları uygulanarak geopolimer yapı malzemeleri üretilmiştir. ADK bileşiminde SiO₂/Al₂O₃ oranı ağırlıkça 1-5 arasında değişir. Bu tez çalışmasının deney seti kurgulaması, 200 °C'den daha yüksek sıcaklık ile kütleme denemelerinde ADK içinde kalan döküm atıkları yanma eğilimi gösterdiğinden, 200 °C'nin altındaki sıcaklıklar baz alınarak yapılmıştır (Nagral, vd., 2014). Öte yandan Aşırı miktarda Fe₂O₃ bileşiği (metal döküm sırasında), geopolimer reaksiyonunu yavaşlatır ve düşük basınç dayanımına neden olur.

Bu tezde NaOH kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerinde maksimum BİHA değeri (1,57g/cm³), %30 NaOH oranlı numunelerde ölçülmüştür. Ancak tüm karışımlarda, malzeme genleştirici bir kimyasal kullanılmadığından, neredeyse aynı değerler bulunmuştur. Bu geopolimer yapı malzemelerinde düşük kütleme sıcaklıklarında (100 °C) BASD değerleri daha yüksektir; farklı NaOH miktarları BASD değerlerinde düşüslere yol açmıştır. %10 NaOH oranı ile üretilen geopolimer yapı malzemesinde en yüksek BASD değeri (2,5 MPa) elde edilmiştir. En düşük BASD değeri (1 MPa) %30 oranında NaOH kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemesinde bulunmuştur. Bu malzemelerin 7 ve 28 günlük BASD değerleri, literatürdeki UK'dan elde edilen geopolimer yapı malzemelerinin (Tuyan vd., 2017) değerlerine ulaşmamaktadır. Malzemenin mukavemetin düşük çıkmasının nedeninin tezde kullanılan ADK'da Al₂O₃ yeterince bulunmadığından polimerleşme sırasında

geçekleşmesi beklenen alümino silika bağlarının (Nagral, vd., 2014). verimli bir şekilde oluşmaması nedeniyle, geopolimer yapı malzemelerinin mukavemetinin düşük çıktığı düşünülmektedir. Öte yandan SUE ölçümü sırasında geopolimer yapı malzemeleri deforme olduğundan, bu malzemelerin dış etkenlere karşı dirençli olmadığı görülmüştür. Üretilen geopolimer yapı malzemelerinde SUE ve porozite birbirine yakın değerlerdedir.

Bu tezde Na_2SiO_3 kullanılarak üretilen geopolimer yapı malzemelerinde maksimum BİHA değeri ($1,80 \text{ g/cm}^3$), %30 Na_2SiO_3 oranlı numunelerde ölçülmüştür. Ancak tüm karışımlarda, malzemede genleştirici bir kimyasal kullanılmadığından, neredeyse aynı değerler bulunmuştur. 7 ve 28 günlük BASD değerleri göz önünde tutulduğunda 48 bomeli ve %30 oranlı Na_2SiO_3 ile üretilen geopolimer yapı malzemeleri -sırasıyla 9,1 ve 12,3 MPa değerlerine ulaştığından literatürdeki (Tuyan vd., 2017) UK'lardan elde edilen geopolimer yapı malzemelerinin değerlerine yaklaşmıştır. İlgili standartlarda (TS EN 206), inşaatlar için duvar malzemelerinin minimum BASD değeri 2,5 MPa olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada %30 oranında Na_2SiO_3 ile üretilen numunenin BASD değeri 12,31 MPa değerine kadar çıkabilmiştir ve duvarlar için yapı malzemesi olarak kullanılmaya uygundur. Üretilen geopolimer yapı malzemeleri suda çözülme eğilimi gösterdiğinden dolayı SUE ve porozite değerleri belirlenememiştir.

Yapı malzemelerinde duvarlarda kullanılan beton duvar bileşimleri ASTM tarafından normal (2 g/cm^3 ve üstü birim ağırlık), orta ($1,6\text{~}2,0 \text{ g/cm}^3$) ve hafif ($1,6 \text{ g/cm}^3$ ve daha az) yapı malzemeleri olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Bu nedenle, tezde üretilen BİHA'ları $1,6 \text{ g/cm}^3$ 'ten düşük olan geopolimerler hafif yapı malzemeleri olarak kabul edilebilir.

İnşaat teknolojisi açısından ADK'nın geopolimere dönüştürülerek beton karışımında kullanılması nedeniyle temel olarak iki kazanç söz konusudur; bunlar (1) çimento yerine kimyasal bağlayıcı (NaOH ve Na_2SiO_3) kullanılması ve (2) agrega yerine ADK kullanılmasıdır. Çevre teknolojisi açısından; atığın başka bir ürüne dönüştürülmesi, atık yönetim hiyerarşisi piramidinde "yeniden kullanım (reuse)" olarak geçen bir teknolojidir. Her yıl döküm endüstrisinden belirli bir devirden sonra kalıplarda kullanılmayacak hale gelen döküm kumu "ADK" şeklinde dökümhaneden uzaklaştırılır; endüstriyel ekoloji kavramı içerisinde bu atığa yeni kullanım alanları

geliştirilmesi gereklidir. Geopolimer, ulusal ve uluslararası ölçekte özellikle ADK'ya dayalı çevre sorunlarının çözümünde iyi bir alternatiftir; ekonomik fayda sağlamanın yanı sıra endüstriyel simbiyoz için de uygun bir üründür. Bu çalışma -mevcut ulaşılabilen literatürde- ADK'dan geopolimer yapı malzemesinin üretildiği ilk yüksek lisans tezidir. Bu endüstriyel atıktan geopolimer üretimi alanında gelecekte yapılacak olan araştırmalarda, NaOH ve Na₂SiO₃ birlikte farklı oranlarda karıştırılarak kullanıldığı takdirde ve konunun AR-GE'sinin ilerlemesiyle daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

Akkaya, U., Döküm kumlarının katı atık depolama sahası örtü tabakası olarak kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, s. 121, 2015.

Agrawal, S. K., “Waste Management: A Systems Perspective”, *Industrial Management & Data Systems*, 90 (5), 1-67, 1990.

Akman., M.S., “Yapı malzemelerinin tarihsel gelişimi”, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, s. 30-36, 2003.

Azak, D., “Atıkdöküm kumu nedir nasıl oluşur?“, <https://prezi.com/xf-ofih4vevn/armatur-sektorunden-cikan-atik-dokum-kumunun-beton-sektorund/>, 22 Mart 2019.

Başar, H.M. and Aksoy, N.D. “Recovery Applications of Waste Foundry Sand”, *Journal of Engineering and Natural Sciences* 30, 205-224, 2012.

Başar, H.M. and Deveci Aksoy, N. “Investigation of usability of waste foundry sand in readymixed Concrete”, *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi* 31, 517-528, 2013.

Casares, M.L., Ulierte, N., Mataran, A, Ramos, A. and Zamorano, M., “Solid industrial wastes and their management in Asegra (Granda, Spain)”, *Waste Management*, 25, 1075-1082, 2005.

ÇYGM Türkiye’de Sanayiden Kaynaklanan Tehlikeli Atıkların Yönetiminin İyileştirilmesi, Döküm Sektörü, *Rehber Doküman*, Ankara, 2012.

Deng, A. and Tikalsky P. J., “Geotechnical And Leaching Properties Of Flowable Fill Incorporating Waste Foundry Sand”, *Waste Management*, 28, 2161–2170, 2008.

Doğru, B., “Türkiye’de tehlikeli atıkların yönetimi ve yasal düzenlemeler”, Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı, https://www.istac.istanbul/contents/146/tehlikeli-atik-yonetimi-egitimi-2012-gerceklesti_130984662879727524.pdf Ankara, 2012.

Ergin, M.K., “Geopolimer beton”, Yatırım projeleri ve sektörel haberler, <https://mkutluhanergin.wordpress.com/2014/11/21/geopolimer-beton/>, 21 Kasım 2014.

Eroglu, V. “Belediyeler İçin Entegre Atık Yönetimi Planı Hazırlama Kılavuzu?”, Çevre ve Orman Bakanlığı, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/editordosya/GNG2010-09EntAtikYonPlan.pdf>, 2010.

Gönen, T., Onat, O., Cemalgil, S., Yılmaz, B. ve Altuncu, Y.T., “Beton Teknolojisi İçin Yeni Atık Malzemeler Üzerine Bir İnceleme”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 8(1), 36-43, 2012.

Gümüş, A., “Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, s. 1-2, 2016.

Güney, Y., Sarı, Y.D., Yalçın, M., Tuncan, A. and Dönmez, S., “Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete”, *Waste Management*, 30, 1705-1713, 2010.

Greinert, H., “Demir Kalıp Kumu Atıklarının Biyolojik İyileştirilmesi”, *Soil&Environment*, 5, 1227-1228, 1995.

Ham, R.K., Boyle, W.C. and Blaha, F., “Kalıp Kumu Atıklarının Depolama Alanındaki Sızıntı Sularının Araştırılması”, *ASTM Special Technical Publication American Society for Testing and Materials Special Technical Publication*, 933, 28-44, 1986.

Javed, S., Lovell, C.W. and Wood, L.E., “Asfalt Betonunda Atık Kalıp Kumu”, *Farbe Und Lack*, 1437, 27, 1994.

Javed S. ve Lovell C.W., “Use of Waste Foundry Sand in Civil Engineering”, *Transportation Research Board*, 1486,109-113, 1994.

Kaur I., “Mechanical Properties of Concrete Incorporating Used Foundry Sand”, Master’s Thesis, *Deemed University Thapar Institute of Engg&Tech.*, Patiala, s. 2, 2006.

Kaya, T. ve Karakurt, C., “Uygulamadaki Beton Parke Taşlarının Mühendislik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2, 469-474 (e-ISSN: 2148-24464), 2016.

Kepez, Ü. “Türkiye’de Döküm Sektörü-Demir Döküm”, *TÜBİTAK Metal Teknoloji Platformu Oluşturma Çalıştayı*, Kocaeli, 2007.

Kirk, P. B., “Atık Kalıp Kumu Kullanılarak İnşa Edilen Karayolu Arazi Uygulaması”, Doktora Tezi, *Purdue Üniversitesi, West Lafayette, USA*, s. 202, 1998.

Lovell, C. V. ve Sayeed, J. “İnşaat Mühendisliğinde Atık Kalıp Kumlarının Kullanımı”, *Proceedings of Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering*, 31, 115-123, 1995.

Milli Eğitim Bakanlığı, Çevre Koruma, Katı Atık Toplama, Taşıma, Bertaraf http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/cevrekoruma/moduller/kati_atik_toplama.pdf, 2009.

Nagral, M.R., Ostwal, T. and Chitawadagi, M.V., “Effect Of Curing Temperature And Curing Hours On The Properties Of Geo-Polymer Concrete”, *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)* 04 (9), 2250 –3005, 2014.

Özdemir, Ş., “Türkiye’de Toplumsal Değişme ve Çevre Sorunlarına Duyarlılık”, *Palme Yayınları*, Ankara, 1988.

Reddi. L.N., Rieck, G.P. and Schwab, A.P. “Çimentolu Numuneler Kullanarak Kalıp Kumundaki Fenoliklerin Stabilizasyonu”, *Journal of Hazardous Materials*, 45, 89-106 (in English) 1996.

Schultes, E., Life 'Hawaman' Projesi, LIFE06 TCY/TR/000292, **Dökümhanelerden Kaynaklanan Tehlikeli Katı Atıkların Yönetimi**, 2006.

Shekdar, A.V., "Sürdürülebilir katı atık yönetimi: Asya ülkeleri için entegre bir yaklaşım", **Atık Yönetimi** 29 (4), s. 1438-1448, 2009

Siddique, R. and Noumowe, A., "Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength material sand concrete, Resources", **Conservation and Recycling** 53, 27-35, 2008.

Siddique, R., Schutter, G. and Noumowe, A., "Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete", **Construction and Building Materials**, 23, 976-980, 2009.

Siddique, R., Kaur, G. and Rajor, G., "Waste foundry sand and its leachate characteristics", **Resources, Conservation and Recycling**, 54, 1027-1036, 2010.

Singh, G. and Siddique R., "Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete", **Construction and Building Materials**, 26, 416-422, 2012a.

Singh, G. and Siddique, R., "Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS)", **Construction and Building Materials**, 28, 421-426, 2012b.

Solmaz, P., Benli, B., Lav, M.A., Çelik, M.S. ve Lav, A.H., "Atık döküm kumunun geçirimsiz perde yapılarak tekrar kullanımı", **2. Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu ve Sergisi**, 24-26 Ekim, İstanbul, 2008.

Solmaz, P., "Atık Döküm Kumunun Geçirimsiz Perde Yapılarak Tekrar Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 2009.

Tarun, R.N. ve Shiw, S.S., “Kalıp Kumu ve Uçucu Kül İçeren Slurry Malzemelerin Permeabilitesi”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (5), 446-452, 1997.

Tuyan, M., Boyacı O.C., Andiç Çakır, Ö. ve Ramyar, K., “Uçucu kül esaslı geopolimer betonların mekanik özellik ve yüksek sıcaklık dirençlerinin araştırılması”, *Hazır Beton Kongresi & Hazır Beton Çimento Agregası İnşaat Teknolojileri ve Ekipmanları Fuarı*, İstanbul, 2017.

Türkiye Çevre Vakfı, Türkiye'nin Çevre Sorunları, *Türkiye Çevre Vakfı Yayınları*, Ankara, 2003.

TS 03114, Beton basınç mukavemeti tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2005.

TS ISO 3310-1, Deney elekleri- Teknik özellikler ve deneyler- Bölüm 1: Metal tel örgülü deney elekleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.

TS EN 12350-6, Beton- Taze beton deneyleri, bölüm:6 yoğunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 206, Beton -Özellik, performans, imalat ve uygunluk standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2014.

TS EN 1091-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- Bölüm 6:Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2015.

TS 4633 EN 933-1, Yoğun refrakter mamuller için deney metodları-Kısım 1: Kaba yoğunluk, görünür porozite ve hakiki porozitenin tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1996.

Yalçın, M., Güney, Y., Koyuncu, H. ve Baş, Ö.F., “Atık Döküm Kumunun Betonda Kullanılabilirliği”, *5. Ulusal Beton Kongresi*, 1-3 Ekim, İstanbul, 2003.

Yaylalı, G., “Yeni Dünya, Yeni Eğilimler, Teknolojiler ve Türk Döküm Sektörü”, *Metalurji Dergisi*, 173, 22-40, 2015.

Yılmaz A., ve Bozkurt, Y., “Türkiye’de kentsel katı atık yönetimi uygulamaları ve Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKABI) örneği”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* Isparta 15, 11-28, 2010.

Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., “The geopolymerisation of alumino-silicate minerals”, *International Journal of Mineral Processing* 59 (2000), 247-266, 2019.



ÖZ GEÇMİŞ

1993 yılında Mersin’de doğdu. Mersin-Aydıncık’da bulunan İlkokulu, ortaokulu Kamaş İlköğretim Okulunda ve lise öğretimini Aydıncık Çok Programlı Lisesinde tamamladı. 2012 yılında girdiği Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nden 2016’de mezun oldu. 2017 de yüksek lisans öğrenimine başladı. 2017-2018 yılları arasında Sowa Enerji şirketinde çevre mühendisi olarak çalıştı.



TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet ulusal ve 2 (iki) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Doğan-Sağlamtimur, N., Bilgil, A., Bilginol, E., Acar, Ş., Yolcu, F. (2017) “An Experimental Study regarding the Reuse of Waste Foundry Sand in Geopolymer Concrete Production with Sodium Hydroxide Activator”, ***Book of Abstracts of the 3rd International Conference on Engineering and Natural Science (ICENS)***, pp. 52, ISBN: 978-605-83575-4-9, Budapest, Hungary, 3-7 May 2017.

Doğan-Sağlamtimur, N., Bilgil, A., Yolcu, F., Bilginol, E., Acar, Ş. (2017) “Geopolimer Yapı Malzemesinde Döküm Kum Atığı ve Sodyum Hidroksit Kullanılabilirliği: Üretim ve Fiziksel-Mekanik Özellikleri Değerlendirme Çalışması”, ***12. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası Yayınları***, s. 215-217, ISBN: 978-605-01-1062-3, Ankara, 5-7 Ekim 2017.

Yolcu F, Doğan-Sağlamtimur N, Bilgil A, Bilginol E, Acar Ş Alkali Aktivatör Olarak NaOH Kullanımı ile Atık Döküm Kumundan Geopolimer Yapı Malzemesi Üretimi, ***IEECC Uluslararası Çevre Mühendisliği Kongresi (IEECC 2019)***, Kocaeli, 10-12 Ekim 2019, sunulmak üzere kabul edildi.

