

# Öğütülmüş Ferrokrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Üretimi

Sinan Turhan Erdoğan

Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü K1-231, Ankara 06800

Tel: (312) 2102428

E-Posta: sinante@metu.edu.tr

## Öz

Ülkemizdeki ferrokrom tesislerinde her yıl, farklı özelliklerde, 100-150 bin ton cüruf ortaya çıkmaktadır. Bu atığın düşük bir miktarı agrega olarak kullanılmakta ya da öğütülmüş halde % 5 - 10 gibi düşük miktarlarda portland çimentolu betonlara katılabilmektedir. Bu çalışmada, ilk defa, toz bağlayıcı olarak yalnızca öğütülmüş ferrokrom cürufu içeren jeopolimer harçlar ve hamurlar elde edilmesi anlatılmakta, bu malzemelerin pek çok uygulama için yeterli dayanım, dayanıklılık, ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı gibi özellikleri sunulmaktadır. Karışım oranlarının ve kür koşullarının elde edilen harçların özelliklerine etkisi de incelenmiştir.

Çalışmada yaklaşık üç'te iki'si  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan ve Elazığ'dan temin edilen ferrokrom cürufu kullanılmıştır. Bu cüruf ayrıca % 30'dan fazla MgO içermektedir ve bu yönüyle tipik jeopolimer öncüsü malzemelerden farklıdır. Cüruf alkali içeren kimyasallarla karıştırılarak kullanıldığında ve oda sıcaklığının üzerinde fırın kürüne kısa süreli olarak maruz bırakıldığında portland çimentolu harçlar ile kıyaslanabilecek basınç dayanımları, oda sıcaklığında kürlendiğinde ise daha düşük dayanımlar elde edilmiştir. Sertleşmiş harç ve hamur numuneleri çeşitli bozucu kimyasallara ve asite maruz bırakıldığında portland çimentolu numunelerden çok daha az bozulma gözlenmiştir. Numuneler 1100 °C'a kadar ısıtılarak bir müddet tutulup tekrar soğutulduklarında ise gözlenen dayanım kayıpları portland çimentolu numunelerinkine kıyasla çok daha düşük olmuştur. Hatta bazı numunelerin basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir.

Hali hazırda ferrokrom tesislerinin atık sahalarında atıl vaziyette duran ve yer altı suyuna karışması durumunda ciddi çevresel risk oluşturabilecek olan 1 milyon ton'dan fazla cürufun jeopolimer harç ve beton yapımında kullanılmaya başlanması, bu malzemelerin üstün özelliklerinden faydalanılan uygulamalar bulunmasıyla mümkün olabilecektir.

**Anahtar Sözcükler:** Ferrokrom cürufu, Jeopolimer, Beton, Atık, Çevre.

## Giriş

Ülkemizde ve dünyada, sürekli olarak, endüstriyel kaynaklardan yüksek miktarda metal cürufu ve bağlantılı atıklar ortaya çıkmaktadır. Bu cürufların bir kısmı çeşitli şekillerde ve uygulamalarda değerlendirilirken, bir kısmı ise depolama sahalarına gitmektedir. Depolanan atıkların içindeki ağır metaller ve başka zararlı maddeler, önlem alınsa bile, zamanla yeraltı sularına sızabilmekte (liç) ve bölge halkının sağlığını tehdit edebilmektedir. Bu endüstriyel atıkların bir örneği de ferrokrom tesislerinden çıkan cüruftur.

Ferrokrom, demir ve krom içeren kromit mineralinden elde edilen ve büyük çoğunluğu paslanmaz çelik üretiminde kullanılan bir alaşımdır. Dünya ferrokrom üretiminin 2008 yılında 7.84 milyon ton olduğu belirtilmektedir (USGS Mineral Yearbook). 1 ton ferrokrom üretiminde ise yaklaşık olarak 1,5 ton cüruf ortaya çıktığı belirtilmektedir (Taşdemir, 2006). Ülkemizin değişik bölgelerinde krom yatakları olmakla birlikte, iki büyük ferrokrom tesisi Antalya ve Elazığ'dadır. Çobanoğlu (2004) 2003 yılı itibariyle Elazığ'daki ferrokrom tesisinde 700000 ton atıl cüruf olduğunu, her yıl da yaklaşık 100000 ton cürufun bu miktara eklendiğini belirtmektedir. Bu bildirinin yazarı Mart 2011'de Elazığ'daki Eti Krom A.Ş. yetkilileri ile görüşmesinden 2005 yılında buradaki tesisin özelleştiğini, öncesi üretim cürufunun sahada depolandığını, sonrası üretim cürufunun bir miktarının ise agrega olarak çeşitli uygulamalarda kullanıldığını öğrenmiştir.

Ferrokrom cürufunun beton agregası olarak (Zelić, 2005), granüle halde hafif beton yapımında (Gül ve Geçten, 1993), ve bitümlü sıcak karışım agregası olarak (Yılmaz ve Kök, 2008) kullanımı üzerine araştırmalar mevcuttur. Öğütülmüş ferrokrom cürufunun çimento ile düşük yüzdelerde (genelde % 20'den düşük) ikame edilerek puzolan olarak kullanımı konusunda da çalışmalar (Kayapınar, 1991; Ekinci, 1993; Yazıcıoğlu ve diğ., 2005) bulunmaktadır. Ancak öğütülmüş ferrokrom cürufunun çimento yerine, yani yegane toz bağlayıcı olarak kullanımı üzerine çalışma bulunmamaktadır.

Jeopolimerik harçlar ve betonlar, günümüzde portland çimentolu sistemlere kısmi alternatif olarak araştırılan, aslında yaklaşık yetmiş senedir bilinen (Purdon, 1940; Davidovits, 2008), doğal veya yapay inorganik toz malzemelerin uygun aktivatör kimyasallarla karıştırılmasıyla elde edilen malzemelerdir. Günümüzde jeopolimer terimi ile, genelde, alkali içeren bileşenlerle aktive edilmiş alüminosilikatlı başlangıç malzemelerinden elde edilen camsı malzemeler ifade edilmektedir. Jeopolimer üretiminde kullanılacak başlangıç malzemeleri, aktivatörler, gerçekleşen tepkimeler, oluşan ürünlerin fiziksel, kimyasal, ve mekanik özellikleri, ve jeopolimerlerin çeşitli kullanım yerleri hakkında ayrıntılı bilgi literatürde mevcuttur (Davidovits, 2008; Provis ve van Deventer, 2009).

Ferrokrom cürufu kimyasal yapısı (esasen içerdiği silis ve alümin miktarı) itibariyle alkalilerle aktive edilebilir görünmektedir. Ancak kristal miktarı ve tiplerinin de tepkiyebilirliğe etkisi olduğu için bu çalışmada bu malzemenin jeopolimerizasyon potansiyeli incelenmiştir. Değişik koşulların mekanik özellik gelişimine etkisine ilaveten, ayrıca elde edilen numunelerin yüksek sıcaklığa dayanıklılığı da araştırılmıştır. Literatürde ferrokrom cürufunun alkalilerle aktivasyonuna örnek bulunmamakla birlikte öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve başka bazı puzolanik malzemelerin alkali aktivasyonu araştırılmıştır. Ancak bu malzemeler kalsiyum içerdikleri için kalsiyum

silikat hidrat (C-S-H) jelleri de oluştururlar ve tam anlamıyla jeopolimer oluşturdukları söylenemez. Ferrokrom cürufu aktivasyonu sonucunda çimentodakinin aksine C-S-H oluşmamakta, çeşitli şekillerde bağlanmış, Si, Al, ve O içeren polimerik (tekrar eden) yapılar oluşmaktadır.

## Malzemeler ve Yöntemler

Bu çalışmada Elazığ'daki Eti Krom A.Ş.'den temin edilen ferrokrom cürufu kullanılmıştır. Firma yetkilileri atığın havada soğutulduğunu belirtmiştir. Cüruf 4-5 cm boyunda düzensiz şekilli ve mavi, siyah renklidir. Çalışmada kullanılmadan önce bir çeneli kırıcı ile ufak tanecikler haline getirilmiş, ardından da laboratuvar tipi bilyeli değirmen ile yaklaşık 4 saat öğütülmüştür. Ferrokrom cürufunun oksit analizi Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1. Elazığ Ferrokrom cürufunun kimyasal özellikleri.

Kimyasal Analiz (%)					
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
31,71	23,55	2,31	0,60	33,86	0,37
Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0,04	0,19	0,35	0,02	6,47	0,15

Öğütülmüş cürufun Blaine incelik değeri 3730 cm<sup>2</sup>/g olarak, özgül ağırlığı ise 3,18 olarak ölçülmüştür. X-ışını kırılma deneyi sonucunda cürufun içerdiği camı faz yaklaşık % 40 çıkmıştır. Cürufun içindeki kristal fazların Forsterit (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), Spinel (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), ve magnezyokromit ferroan ((Mg,Fe<sup>2+</sup>)(Cr,Al)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) olabileceği düşünülmektedir. Belirlenen bu camı faz miktarı tipik jeopolimerik başlangıç malzemelerine kıyasla düşüktür (Davidovits, 2008). Su ile hızlı soğutma yapılması durumunda aynı cürufun jeopolimerize edilmesinin daha kolay olacağı düşünülmektedir.

Cürufun aktivasyonunda iki farklı kimyasal kullanılmıştır. Bunlar katı pelet halde ve en az % 97 saflıkta sodyum hidroksit (NaOH), ve sıvı halde sodyum silikat'tır. Sodyum silikat istenilen çözelti yoğunlukları elde edilecek şekilde suda çözülerek kullanılmıştır. Sodyum silikat % 37.5 çözünmüş katı içeriğe, 40°-42° Baume değerine, ve yaklaşık 3.2 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranına (ağırlıkça) sahiptir. Çözeltiler karıştırıldığında veya sodyum hidroksit suda çözünürken ısınma gerçekleştiği için, karışımlar aktivatörlerin oda sıcaklığına gelmesi beklendikten sonra başlatılmıştır. Harç karışımlarında CEN standart kumu (TS EN 196-1, 2009) ve şebeke suyu kullanılmıştır.

Hamur ve harç numuneleri elde edilirken portland çimentolu karışımlar için kullanılan standart yöntemlere mümkün olduğunca uyulmaya çalışılmıştır. Tipik numune boyutu 4 cm x 4 cm x 16 cm (boy)'dir. Yüksek sıcaklık deneylerinde kullanılan numuneler ise yaklaşık olarak 2 cm (yükseklik) x 4 cm x 16 cm (boy)'dir. Dayanım belirlenmesinde de çimento harçları için kullanılan deneyler (TS EN 196-1, 2009) kullanılmıştır. Numunelerin kürü oda sıcaklığında veya oda sıcaklığının biraz üstünde sıcaklıklarda kuru fırında yapılmıştır.

## Bulgular ve Değerlendirme

### Dayanım Gelişimi

Çalışmada öncelikle öğütülmüş ferrokrom cürufu kullanılarak jeopolimer elde edilip edilemeyeceğini görmek amacıyla dayanım gelişimi incelenmiştir. Dayanım deneylerinde kullanılan numunelerin karışım oranları, kür koşulları ve sonuçlar Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları.

<i>Cüruf</i>	<i>Aktivatör</i>	<b>Basınç Dayanımı</b>	
		<i>Oda sıcaklığı – 21 gün</i>	<i>100 °C - 2 gün</i>
600 g	210 g 8M NaOH çözeltisi	2,0 MPa	11,5 MPa
600 g	225 g sodyum silikat	6,0 MPa	37,6 MPa

Aktivatör kimyasalların kendi başlarına etkinliklerini incelemek amacıyla, portland çimentolu hamurlarinkine benzer kıvamda hamurlar elde edecek miktarlarda yalnız NaOH ve yalnız sodyum silikat içeren hamurların farklı dayanım verdikleri görülmektedir.

Öğütülmüş ferrokrom cürufu yalnız 8 M yoğunlukta NaOH sodyum hidroksit çözeltisi ile karıştırıldığında çimentolu sistemlerinkine kıyasla çok düşük olmakla birlikte ölçülebilir bir basınç dayanımı olan bir malzeme elde edilmiştir. Öğütülmüş ferrokrom cürufu yalnız sodyum silikat ile karıştırıldığında ise daha yüksek basınç dayanımı olan bir hamur elde edilmiştir. Oda sıcaklığında kürlenmiş numunelerin dayanımının düşük kaldığı, fırında kürlenmiş numunelerin ise daha yüksek dayanıma ulaştıkları görülmektedir. Sodyum silikat, özellikle yüksek sıcaklık kürü uygulandığında, sodyum hidroksit’e kıyasla daha etkili görünmektedir. 8 M’den daha yoğun NaOH çözeltisi kullanıldığında elde edilen dayanımlar bir miktar artacaktır. Ancak belirtilmelidir ki çok yoğun bazik çözeltilerin de kimyasal yakıcı özeliği bulunmaktadır. Ayrıca 8 M NaOH çözeltisi bile hazırlanırken 80-100 °C sıcaklığa erişebilmektedir.

Aktivatör çözeltilerindeki su miktarı ve belli bir kıvam için gereken aktivatör miktarı gözönüne alındığında, su miktarının portland çimentolu sistemler gibi jeopolimerik karışımların da akışkanlığını etkileyen önemli bir faktör olduğu anlaşılmaktadır. Su miktarı ve kür ortamının nemliliği dayanım gelişimine de etki etmektedir. Tablo 1’deki sodyum silikat içeren karışımın su/cüruf oranı yaklaşık 0.23’dür. Aktivatör miktarı cürufun ağırlıkça % 37,5’i, aktivatörün içerdiği etkin katı madde (çözünbilir sodyum oksit ve silisyum oksit) miktarı ise cürufun % 14’ü kadardır. Aktivatör miktarı % 25’e düşürüldüğünde, her ne kadar aktivatör ve içerisindeki jeopolimerizasyon için etkin katı madde azalsa da (% 9,4’e), karışımdaki toplam su miktarı da azaldığı (% 15’e) için işlenebilirlik çok azalmakta, ancak yeterli sıkıştırma uygulanmasıyla dayanım çok artmakta, aynı kür koşullarında 98,7 MPa olmaktadır. Sodyum hidroksit içeren karışımın su/cüruf oranı yaklaşık 0.26’dır. Aktivatördeki katı sodyum hidroksit cürufun yaklaşık % 9’u kadardır.

Belirtmelidir ki portland çimentolu sistemlerden farklı olarak bu karışımlar Newtonsal olmayan akışkanlık göstermektedir. Karışımlar kayma incelmeleri özeliği göstermekte, yani kayma yüklerine maruz kaldıklarında (örneğin karıştırılırken veya vibrasyon altında) düşük akma (vizkozite) değerine sahip olup kendiliğinden yerleşebilmekte, uygulanan yük kaldırıldığında (vibrasyon durdurulduğunda) ise yüksek akma (vizkozite) değerine sahip olmaktadır. Bu özellik harç ve beton kullanılan bazı uygulamalarda avantaj, bazılarında ise dezavantaj sağlayabilir. Bu bakımdan geleneksel portland çimentolu karışımlar ile jeopolimerik karışımların akışkanlıklarını ve ihtiyaç duydukları su miktarını kıyaslamak kolay değildir.

Aktivatörlerin birlikte kullanıldığı ve bir miktar su da içeren bir karışım hazırlandığında elde edilen dayanım aktivatörlerin yalnız başlarına kullanıldıkları numune dayanımlarının arasında bir değerdir. Dolayısıyla yalnızca sodyum silikat kullanımının dayanım bakımında en olumlu sonucu verdiği düşünülebilir.

### **Kür Sıcaklığının Dayanıma Etkisi**

Kür sıcaklığının dayanıma etkisini incelemek amacıyla belirli bir karışıma sahip numunelerin farklı sıcaklıklardaki dayanım gelişimleri karşılaştırıldığında ise ortaya Tablo 3'deki durum çıkmaktadır.

**Tablo 3. Kür sıcaklığının belirli bir karışımın dayanımına etkisi.**

<i>Kür Sıcaklığı</i>	<b>Basınç Dayanımı</b>			
	<i>Oda sıcaklığı</i>	<b>80 °C</b>	<b>100 °C</b>	<b>150 °C</b>
<b>Karışım:</b> 300 g cüruf, 38 g sodyum silikat, 23 g ek su	Priz almadı	39,8 MPa	33,5 MPa	20,9 MPa
<b>Not:</b> Kür süresi her durum için 1 gün'dür.				

Tablo 3'de görüldüğü gibi, seçilen bir karışım için en uygun kür sıcaklığı bulunmaktadır. Bu, jeopolimer oluşumunda veya alkalilerle aktive edilmiş cüruflarda yazının daha önce gözlemlendiği bir durumdur. Bu çalışmadaki karışım için en uygun kür sıcaklığı yaklaşık 80 °C'dir. Daha yüksek veya daha düşük sıcaklık kürü mekanik özellik gelişimini olumsuz etkilemektedir. Jeopolimerizasyon tepkimesi için, başlangıç malzemesindeki yani toz bağlayıcıdaki silis, alümin, ve alkalilerin çözünmesi, ardından da birbirleriyle ve aktivatör kimyasaldan gelen sudaki diğer silis ve alkalilerle birleşerek iki ve/veya üç boyutlu -Si-O-Si-, -Si-O-Al-O-, -Si-O-Al-O-Si-O- tipi yapılar oluşturması gerekir. Alkali iyonları bu yapılarıdaki yük dengesinin sağlanmasına yardımcı olur. Yüksek sıcaklık uygulaması atomların ve iyonların başlangıç malzemesinden çözünmesini kolaylaştırdığı için çok reaktif ve oda sıcaklığında kolay çözünen yapıdaki alüminosilikatlar sıcaklık uygulamasına ihtiyaç duymazken, bu çalışmadaki ferrokrom cürufu gibi malzemeler ihtiyaç duyabilir. Bildirinin giriş kısmında belirtilen forsterit ve spinel gibi kristal yapılarıdaki silis ve alümin kolay çözülmeyeceği için de camsı yüzdesi düşük olan başlangıç malzemelerinin daha düşük dayanım vermesi şaşırtıcı değildir.

### **Ferrokrom Cürüflü Jeopolimerlerin Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı**

Öğütülmüş ferrokrom cürufu ile elde edilen jeopolimerik hamurların çeşitli fırınların içinde veya yangın esnasında oluşabilecek yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılıklarını sınamak amacıyla seçilmiş olan bir karışımdan elde edilen numuneler 400 °C, 800 °C ve 1100 °C sıcaklığa ikişer saat maruz bırakılmış ve dayanımlarındaki değişme incelenmiştir. Numuneler deney öncesinde 100 °C’de bir gün süreyle kür edilmiştir. Numuneler oda sıcaklığındaki fırına yerleştirilmiş, sıcaklık 20 °C/dakika hızla artırılmıştır. Seçilen sıcaklıkta iki saat geçmesinin ardından numuneler kapatılan fırın içinde ısıtma hızına yakın bir hızda soğutulmuşlardır. Bu deneylerin sonuçları Tablo 4’de verilmektedir.

**Tablo 4. Yüksek sıcaklığın ferrokrom cürufu jeopolimer numunelerinin dayanımına etkisi.**

<i>Uygulanan Sıcaklık</i>	<b>Basınç Dayanımı (Eğilme Dayanımı)</b>			
	<i>100 °C’de 1 gün</i>	<i>400 °C</i>	<i>800 °C</i>	<i>1100 °C</i>
<b>Karışım:</b> 200 g cüruf, 50 g sodyum silikat çözeltisi	98,7 MPa (14,7 MPa)	85,6 MPa (12,8 MPa)	81,8 MPa (18,0 MPa)	140,0 MPa (14,7 MPa)
<b>Not:</b> Karışım hamur numunesi olup, kum veya ek su içermemektedir.				

Bilindiği gibi portland çimentosu hamurları, 200 °C civarında bir miktar dayanım artışı gösterse de, daha yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybetmekte, 600-700 °C’de ise ilk dayanımlarının % 20’si kadar veya daha bile düşük dayanımlara sahip olmaktadır (Morsya ve diğ., 2008). Buna karşılık Tablo 4’deki sonuçlar ferrokrom cürufu jeopolimerik karışımların 800 °C’de bile ilk basınç dayanımlarının % 80’inden fazlasını koruduğunu, 1100 °C sıcaklığa maruz kaldıklarında ise dayanımlarının ilk dayanıma göre % 40 - % 50 kadar arttığını göstermektedir. Numunede oluşmuş olabilecek mikroçatlaklar sebebiyle eğilme dayanımında bir azalma gözleneceği tahmin edildiği halde eğilme dayanımı da ilk dayanım ile aynı kalmıştır. Bu sonuçlar ilginç bulunduğu için daha düşük dayanımlı (aynı karışım oranlarına sahip ancak 24 saat yerine yalnızca 2 saat kürlenmiş olan) başka bir numune ile kontrol edilmiş ve yine aynı oranda bir dayanım artışı gözlenmiştir. Tablo 4’deki numuneler hamur numunesi olup, kum içermemektedir. Kum içeren numunelerin davranışı agrega ile sertleşmiş hamur arasındaki ısıl özelliğe uyumuna bağlı olduğu için harç numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki dayanımları daha düşük olabilir.

### **Ferrokrom Cürufu Jeopolimerlerin Asit Gibi Bozuculara Karşı Dayanıklılığı**

Tablo 1’de görüldüğü gibi ferrokrom cürufu yapısında hemen hiç kalsiyum oksit barındırmamaktadır. Bu sebeple jeopolimer oluşum tepkimeleri esnasında kalsiyum-silikat hidrat veya kalsiyum hidroksit oluşumu mümkün değildir. Bu yönüyle, düşük kalsiyumlu pek çok jeopolimere benzer şekilde ve portland çimentolu sistemlerden farklı olarak, ferrokrom cürufu jeopolimerin asit dayanıklılığı yüksektir. Bu bildiride ayrıntılı sonuç sunmak için yer olmasa da bu malzemelerin üzerine yoğun hidroklorik asit veya sülfürik asit döküldüğünde ve bekletildiğinde herhangi bir bozulma gözlenmediği ifade edilebilir.

## Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada ferrokrom üretimi esnasında ortaya çıkan cüruf, portland çimentosu veya başka bir toz bağlayıcı ile karıştırılmadan, öğütülmüş halde, alkali içeren kimyasallarla ve sıcaklıkla aktive edilerek kullanıldığında elde edilen malzemeler ve özellikleri incelenmiştir. Çalışmadan çıkan sonuçlar ve ileride yapılabilecek çalışmalar için öneriler aşağıdaki gibidir:

- i) Öğütülmüş ferrokrom cürufunun alkali aktivasyonu yoluyla jeopolimerik malzemeler üretmenin mümkün olduğu gösterilmiştir.
- ii) Aktivatörler tek başına kullanıldıklarında, sodyum silikat çözeltisi, bu çalışmada seçilen yoğunluktaki sodyum hidroksit çözeltisine göre dayanımı daha fazla artırmaktadır.
- iii) Yaklaşık 80-100 °C sıcaklıkta kür işleminin mekanik özellik gelişimine etkisi, oda sıcaklığında kür'ün etkisine veya daha yüksek sıcaklıklarda kür'ün etkisine kıyasla daha olumludur.
- iv) Ferrkrom cürufllu jeopolimerik hamurlar 1100 °C sıcaklığa iki saat süreyle maruz kaldıklarında bile dayanımlarını koruyabilmektedir.
- v) Su ile (hızlı) soğutulmuş ferrokrom cürufunun tepkiyebilirliğinin ve aktivasyon potansiyelinin daha yüksek olacağı düşünülmektedir. Bu tip cüruftan oda sıcaklığında elde edilen jeopolimerlerin mekanik özellikleri incelenmelidir.
- vi) Ferrkrom cürufllu jeopolimerik harçların ve betonların yüksek sıcaklığa dayanıklılıkları incelenmelidir.
- vii) Ferrokrom cürufunun aktivasyonu için daha etkili, ve özellikle de daha ekonomik ve üretim aşamasında çevreye olumsuz etkisi daha düşük olan kimyasallar denenmelidir.
- viii) Ferrokrom cürufllu jeopolimerin taze haldeyken sahip olduğu kayma incilmesi özeliğinin, sertleşmiş haldeyken de asitlere, ısıya ve yangına dayanıklılığının katkı sağlayabileceği uygulamalar düşünülmelidir.

## Teşekkür

Halen süren bu araştırma ile ilgili sıkça danıştığım, malzeme analizi konularında yardımını ve değerli görüşlerini esirgemeyen ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Prof. Dr. Mustafa Tokyay'a teşekkürlerimi sunarım.

## Kaynaklar

Çobanoğlu, Ö.C. (2004) Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Çarpma Dayanımı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı.

Davidovits, J. (2008) Geopolymer chemistry and applications. 2. Baskı, Geopolymer Institute, St. Quentin, France.

Ekinci, C.E. (1993) Elazığ Ferrokrom Fabrikası Cürufunun Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Endüstriyel Atıkların İnşaat

Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 243-253.

Gül, R. ve Geçten, O. (1993) Elazığ Ferrkrom İşletmesi Granüle Cürufunun Hafif Beton Üretiminde Kullanılabilirliğini Araştırılması. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 291-301,.

Kayapınar, O.Ü. (1991) Use of Silicoferrochromium Slag and Ferrochromium Condensed Silica Fume As Partial Replacement of Cement, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Morsya, M.M., Shebl, S.S., ve Rashad, A.M. (2008) Effect of Fire on Microstructure and Mechanical Properties of Blended Cement Pastes Containing Metakaolin and Silica Fume. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Cilt 9 (2), s. 93-105.

Provis, J.L. ve van Deventer, J.S.J. (Editörler) (2009) Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.

Purdon, A.O. (1940) The action of alkalis on blast furnace slag. Journal of the Society of Chemical Industry, Cilt 59, s. 191-202.

Taşdemir, A. (2006) Enjeksiyon Yöntemiyle Üretilen Kristal Yapılı Ferrokrom Cürufu Katkılı Betonların Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı.

TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.

USGS Mineral Yearbook, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/ferroalloys/myb1-2008-feall.pdf>

Yazıcıoğlu, S., Gönen, T., ve Çobanoğlu, Ö.C. (2005) Elazığ Ferrokrom Cürufunun Betonun Basınç Dayanımı ve Çarpma Enerjisi Üzerine Etkisi, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Der., Cilt 17 (4), s. 681-685.

Yılmaz, M. ve Kök, B.V. (2008) Ferrokrom Cürufu Kullanımının Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 12 (3).

Zelić, J. (2005) Properties of concrete pavements prepared with ferrochromium slag as concrete aggregate. Cement and Concrete Research, Cilt 35 (12), s. 2340-2349.