



Türk Doğa ve Fen Dergisi
Turkish Journal of Nature and Science

<http://www.bingol.edu.tr/dergiler/turk-doga-ve-fen-dergisi.aspx>



Na₂O, silika modülü, su/bağlayıcı oranı ve yaşlanmanın cüruf tabanlı geopolimerlerin basınç mukavemetinde olan etkileri

Mehrzaad Mohabbi YADOLLAHI^{*1}, Sadık VAROLGÜNEŞ¹, Fethi İŞSEVER¹

Özet

Geopolimerler, Portland çimentosu ve Portland çimentolu betonlar için puzolanların aktivasyonundan üretilen alternatif bağlayıcılardır. Malzeme özelliklerinin güçlendirilmesi, çevre dostu olması ve çimento yerine üretilebilmesi için bu çalışmada ferrokrom cürufu tabanlı geopolimerinin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu çalışmada, ferrokrom cürufunu aktive edebilmek için, Na₂O yüzdesi, silika modülü ve su/bağlayıcı oranlarına göre dokuz farklı seride geopolimer karışımı hazırlanmıştır. Test sonuçları, üretilen geopolimerlerin basınç dayanımının yeterince yüksek olduğunu ve yapısal bir malzeme olarak kullanılabilceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Ferrochrome Slag, geopolimer cement, alkali-activator

The effects of Na₂O, silica modulus, water/binder and aging on compressive strength of ferrochrome slag based geopolymers

Abstract

Geopolymers are alternatives for ordinary Portland cement concrete that are made from pozzolans activation. To enhance material greenness and produce alternative binders as a geopolimer, mechanical properties of ferrochrome slag geopolimer has been investigated in this study and to identify the best geopolimer mix ratios, varying silica modulus, water/binder and Na₂O content have been investigated. Hence nine series of geopolimer pastes differing in Na₂O content, silica modulus and w/b ratios were manufactured to activating ferrochrome slag in this study. Test results indicated that the produced geopolymers compressive strength were high enough and can be used as a structural material.

Keywords: Ferrochrome slag, geopolimer cement, alkali-activator

1. Giriş

Günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan bağlayıcı malzeme normal Portland çimentosuyla üretilmektedir. Tüketimdeki bu yüksek oran; enerji, ekonomik ve çevresel problemleri de ortaya çıkarmıştır. Dünyada toplam CO₂ yayılımının %7' sinin çimento üretiminden kaynaklandığı bilinmektedir. Bu yüzden Portland çimentosuna alternatif çimentolar üretmek güncel araştırma konuları arasında yer almaktadır. Ayrıca çimento, yüksek sıcaklıkta (1400-1500 °C) üretildiği için önemli ölçüde enerji tüketimi söz konusudur ve bu yüksek enerji ihtiyacı nedeniyle yüksek maliyetlerle elde edilmektedir. Alternatif ürün arayışları bağlamında birçok araştırmada; yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi doğal ya da yapay puzolanların aktive edilmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Ülkemizde çok miktarda bulunan Elazığ ferrokrom cürufu normal Portland çimentosuna alternatif olarak aktive edilerek kullanıldığında; enerji tasarrufu ve çevresel problemlerin azaltılması gibi birçok açıdan yararlı olacağı beklenmektedir. Ayrıca soğuk hava şartlarında ve kalıbın

erken alınması gereken yerlerde aktive edilen bağlayıcının hızlı priz almasından dolayı kalıp alma sürelerinin kısalması, küre maliyetlerinin azalması ve soğuk havalardan dolayı oluşan dayanım ve durabilite problemleri azaltılmış olacaktır.

Sonuç olarak bu çalışmada, bölgemizde mevcut bulunan Elazığ ferrokrom cürufu stoku aktif bir şekilde değerlendirilecektir. Portland çimento üretiminin azaltılması sağlanacaktır. Doğal malzemelerin kullanılmasıyla, Portland çimentosunun üretiminden dolayı meydana gelen CO₂ emisyonu azalacaktır. Çimento üretimi esnasında harcanan enerji kaybının azaltılması amaçlanmaktadır. Normal Portland Çimentosuna alternatif olarak üretilecek geopolimer çimento ile betonun priz alma süresinin kısaltılması ve bundan dolayı betonun kalıp alma süresi ve bakım maliyetinin azaltılması beklenmektedir. Ayrıca bu çalışma ile Elazığ ferrokrom cürufunun alkali aktivatörlerle aktif hale getirilerek bağlayıcı madde olarak kullanılmasıyla ilgili olarak literatürdeki bazı boşluklar doldurulacaktır.

Elazığ ferrokrom cürufunu daha aktif hale getirecek ve mekanik özelliklerini iyileştirecek alkali oranı, tipi, molaritesi; mukavemet ve durabilite açısından optimum

¹ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 12000 Bingöl, Türkiye

*Sorumlu yazar E-posta: mmohabbi@bingol.edu.tr

karışım oranları belirlenecektir ve Portland Çimentosu ile karşılaştırılacaktır. Aktive edilmiş Elazığ ferrokrom cürufu ile üretilen harçların fiziko-mekanik özellikleri tespit edilecektir. Su/bağlayıcı oranının, aktive edilmiş Elazığ ferrokrom cürufunun mekanik özellikleri üzerine etkileri araştırılacaktır.

Son yıllarda, yakıt fiyatlarındaki yükselmeler, çimento üretim maliyetini artırdığından, üretici firmaların puzolan katkılı çimentolara yönelmelerine sebep olmuştur. Ancak Elazığ ferrokrom cürufunun alkali ile aktivasyonu ve aktivasyon sonucu olması geopolimer bağlayıcı ile üretilen betonların özellikleri bilinmemektedir.

Çimento yerine Elazığ ferrokrom cürufu geopolimer çimentosunun kullanılması ile çimento üretiminde ortaya çıkan CO₂ miktarının azalması sonucunda çevreye olan zararlı etki azalmış olacaktır. Ayrıca bu tip çimentoların üretiminde enerji ihtiyacı azalacağından önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayacaktır.

Bu ürünün çimento kimyası tamamen Portland çimentosundan farklı olacağından ve çimento yapısında bulunan C₃A, Ca(OH)₂ gibi ürünler oluşmayacağından yeni geopolimer Elazığ ferrokrom cürufu çimentosu ile üretilecek betonların durabiliteilerinin de yüksek olması umulmaktadır. Ayrıca ülkemizde var olan yerli malzemeler kullanılacağı için önemli ölçüde ekonomik yarar sağlanması beklenmektedir.

Önerilen çalışma başarılı bir şekilde uygulanırsa, elde edilecek bulgularla, puzolanik malzemelerin aktif şekilde kullanımı ile ilgili mevcut çalışmalara ek bilgi sağlayacaktır. Üretilen yeni çimento ile priz süresindeki kısalma ile soğuk havalarda ve erken dayanım kazanılması istenen durumlarda, ek koruma maliyetleri olmaksızın, beton dökümüne imkân sağlanacaktır. Bu yeni malzeme, sektörde çalışacak kişiler için daha uzun bir çalışma dönemi oluşturacağından istihdama katkı sağlayacaktır.

En önemlisi, ülkemizin ve özellikle bölgemizin sahip olduğu Elazığ ferrokrom cürufu rezervinin aktif bir şekilde kullanılmasına ve mevcut Portland çimentosuna göre üstün özelliklere sahip yeni bir çimento üretimine imkân sağlanacaktır. Ayrıca aktivasyon metodu ve puzolanik malzemelerle ilgili bu çalışmadan çıkarılacak ulusal ve uluslararası yayınlarla da bilime katkı sağlanacağı ve bu konuda oluşturulacak yeni standartlara ışık tutacağı umulmaktadır. Buna ek olarak doğal ve yapay puzolanik malzemelerden ekonomiye, çevreye katkılar sağlayacak yeni projelerin üretilmesine öncülük edecektir. Örneğin, atık olarak ortaya çıkan yapay puzolanik malzemelerin çevreye olan zararını minimize edecek yeni çalışmalara örnek teşkil edecektir.

Literatür incelendiğinde metakaolin, yüksek fırın cürufu, pomza ve uçucu kül gibi puzolanik malzemeleri aktive ederek geopolimer çimento üretiminin uygunluğu belirtilmiştir. Fakat Elazığ ferrokrom cürufu üzerinde böyle bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu projenin sonucu olarak da normal Portland çimentosuna alternatif çimento ve daha iyi performanslı beton üretimi konusunda yararlı olması beklentisi araştırmaya değer konu olduğunu ortaya koymaktadır.

Weil ve arkadaşları çalışmalarında küresel ısınmaya neden olan CO₂ salınımını incelemek için iki geopolimer karışımı hazırlamışlardır [1]. Bu çalışmanın sonunda uçucu kül ve cüruf kaynaklı geopolimerlerin normal çimentoya göre daha az CO₂ salınımı gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir. Li ve arkadaşları geopolimer çimentoların üretiminde kullanılan toplam enerjinin, normal Portland çimentosu üretimindeki kullanılan toplam enerjiye göre yaklaşık %40 daha az olduğunu ortaya koymaktadır [2]. Komnitsasa, geopolimer çimento üretiminde Si/Al miktarının önemli olduğunu belirtmiştir [3].

Torgal ve arkadaşları, çalışmalarında alümin ve silikat esaslı alkallerle aktive edilebilecek ana malzemelerin; kaolinit kil, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun farklı oranlarda karışımı, uçucu külle metakaolinin farklı oranlarda karışımı, yüksek fırın cürufuyla metakaolinin farklı oranlarda karışımı ve cürufu kırmızı çamur karışımı malzemeler olduğunu belirtmişlerdir [4]. Bu malzemeler üzerinde Ca-Si ve Ca-Al esaslı deneylerini yaparak, XRD ve kızılötesi ışınlarıyla hidratasyon gelişimini ölçmüşlerdir.

Kong ve arkadaşları çalışmalarında metakaolin ve uçucu külü birlikte yüksek sıcaklığa tabi tutarak daha aktif bir duruma getirmişlerdir [5]. Bunun nedeninin uçucu külün yüksek miktarda alümin ve silika içermesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Metakaolinin yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 800°C) amorf yapıya sahip olduğunu ve aktive bir alümino-silikata dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmada agrega, akışkanlaştırıcı ve sıcaklığın geopolimer çimento üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Numune ebatları büyüdükçe basınç dayanımının termal çatlaklardan dolayı düştüğü belirtilmiştir. Agregata tane çapları 10 mm' den küçük olursa kabuk atma daha çok olmaktadır. 10 mm' den daha büyük olması durumunda ise bu olayı önleyebileceği düşünülmüştür. Süper akışkanlaştırıcı katkının, geopolimerli betonlarda mukavemeti düşürdüğü ve toplam işlenebilirlikte önemli bir katkısının olmadığı belirtilmiştir.

Malolepszy tarafından yapılan çalışmada, Na₂CO₃'ün bol miktarda C₂MS (M=alkali metal) içeren cürufuları aktive etmek için uygun olduğunu ifade edilmiştir. NaOH' ın ise bol miktarda C₂AS içeren cürufular için iyi bir aktivatör olduğu belirtilmiştir [6].

Farklı sistemlerin, NaOH, Na₂CO₃ ve Na₂OSiO₂ ile aktivasyonu 1992 yılında Krivenko tarafından incelenmiş olup, Na₂OSiO₂ alkali aktivatörün CaO-SiO₂, CaO-Al₂O₃, CaO-Al₂O₃-SiO₂ ve CaO-Mg-SiO₂ için en etkili aktivatör olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Na₂CO₃' ın, CaO-Al₂O₃ için en uygun aktivatör olduğu ifade edilmiştir. Na₂SiO₃' ın (sodyum silikat veya cam suyu) çok etkili bir aktivatör olduğu belirtilmiştir [7].

Allahverdi ve arkadaşları çalışmalarında Taftan dağı civarındaki pomza tipi doğal puzolanı ve aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃'ün kombinasyonlarını kullanarak geopolimer çimento hazırlamışlardır [8]. Sodyum silikatlara, sodyum hidroksit ekleyerek, silika modülü 0,52-0,60 ve 0,68 olan üç değişik alkali aktivatör hazırlanmıştır. Sodyum oksit içeriği kuru bağlayıcı ağırlığının %4, 7 ve 10 oranında 3 değişik geopolimer çimento sistemleri oluşturulmuştur. Su/çimento oranı 0,36-0,40 ve 0,44 olarak alınmıştır. Çalışma sonucunda; NaOH ve Na₂SiO₃' ün uygun oranlarda kullanılmasıyla Taftan puzolanının aktive edilebileceğini; uygun işlenebilir ve 28 günlük basınç dayanımı olarak 63 MPa' ı sağlayan geopolimer çimento formasyonuna dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir. Doğal puzolanların aktive edilebileceğini ve alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksitin belli oranlarda karışımının kullanılmasıyla geopolimer çimento üretilebileceği açıklanmıştır. Doğal puzolan esaslı geopolimer çimentonun kalitesinin alkali aktivatörün bileşimine, su/bağlayıcı oranına ve doğal puzolanın kalitesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Literatürdeki araştırmalarda geopolimerlerin erken dayanımları, aside karşı dirençleri, sülfat kararsızındaki davranışları, büzülme ve rötresi özellikle uçucu kül üzerinde incelenmiştir [9-16]. Daha dayanıklı ve yararlı özellikleri için ve çevre dostu bir malzeme oldukları için farklı çalışmalar yapılmıştır [1, 3, 17-19]. Geopolimer çimentoların üretiminde kullanılan toplam enerji, normal Portland çimentosu üretimindeki kullanılan enerjiye göre yaklaşık %40 daha az olmaktadır [2].

Atis çalışmalarında Portland çimentosu kullanmadan, cürufu aktive edecek yeni bir bağlayıcı madde kullanılmasını araştırmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat, sodyum karbonat, sodyum hidroksit kullanılmış, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, eğilmede çekme dayanımları ölçülmüş ve 6 aylık süreçteki kuruma rötreleri incelenmiştir. Aynı zamanda numunelerin hidrasyon gelişmesi incelenmiştir. Priz başlangıç ve bitiş zamanları normal Portland çimentosuna göre sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive edilmiş çimentolarda daha erken, sodyum karbonatla aktive edilmiş çimentoların ise normal Portland çimentosu ile aynı olduğu belirtilmiştir. Silis modülünün artmasıyla sıvı sodyum silikatın nihai dayanım kazanmasında ve eğilmede çekme dayanımında etkisinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive edilen cüruflarla üretilen harçlar, daha gevrek, sodyum karbonatla üretilen harçların davranışının ise normal Portland çimentosuna benzediği belirtilmiştir [20].

Komljenovic ve arkadaşları çalışmalarında; alkali aktive edilmiş uçucu küllü (F sınıfı) geopolimerlerin mekanik ve mikro yapı özelliklerini araştırmışlardır [21]. Alkali aktivatör olarak Ca(OH)₂, NaOH, NaOH+Na₂CO₃, KOH ve sodyum silikat (cam suyu) kullanmışlardır. Alkali aktivasyon metodunda en önemli parametrelerin; aktivatör özelliği ve yoğunluğu, uçucu kütle ise önemli olanın incelik olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu küllü geopolimerlerin (<43µm) basınç mukavemetinin genellikle yüksek olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek basınç mukavemeti sodyum silikat kullanılmasıyla elde edilmiştir. Basınç mukavemetinin, Si/Al oranına büyük ölçüde bağlı olduğu belirtilmiştir.

Anuar ve arkadaşları çalışmalarında alkali sıvı olarak, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) karıştırılarak kullanılmıştır [22]. Bu çalışmada, geopolimer beton numuneler iki farklı molarlarda (8M' lık ve 14M' lık sodyum hidroksit NaOH) kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. 14 M NaOH kullanıldığında basınç dayanımının maksimum olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, atık kâğıt çamur küllü ve molaritesi artırılan geopolimer.

2. Materyal ve Metot

2.1. Araştırma parametreleri

Molaritesi (Na₂O): 4%, 7% ve 10% olacak şekilde alınacaktır. Alkaliniteden dolayı silisyum ve alüminyum bağları çözülmektedir ama onların optimum noktasını bulmak için Na₂O miktarı farklı molaritelerde seçilmelidir.

Tablo 1. Karışım hesapları

Karışım	CÜRUF (gr)	NaOH Çözeltisi (gr)	Na ₂ SiO ₃ Çözeltisi (gr)	Su (gr)	Süper akışkanlaştırıcı (gr)	SM*2	Na ₂ O (%)	Na ₂ O molaritesi	S/b
1	1214,08	142,68	109,59	258,38	48,56	0,52	4,00	1,5584	0,36
2	1152,81	237,08	182,11	164,19	46,11	0,52	7,00	2,4597	0,40
3	1096,27	322,08	247,40	80,02	43,85	0,52	10,00	3,1941	0,44
4	1205,65	234,74	220,42	137,80	48,22	0,60	7,00	2,5647	0,36
5	1144,11	317,93	298,52	24,25	45,76	0,60	10,00	3,4669	0,40
6	1302,08	107,20	136,20	197,29	52,08	0,60	4,00	1,5700	0,44
7*	1186,83	260,94	352,63	14,24	47,47	0,68	10,00	3,6000	0,36
8	1173,49	122,93	138,91	270,46	46,94	0,68	4,00	1,4500	0,40
9	1127,00	206,61	233,47	161,53	45,07	0,68	7,00	2,3500	0,44

Su/bağlayıcı oranı: 0,36-0,40 ve 0,44 oranları kullanılacaktır.

Kür şartları: Numuneler üretildikten sonra 65°C kür yapılacaktır. Sıcak kür sürecinin sonunda, numuneler kalıplardan çıkarılıp; 3, 7, 28 ve 90 günlük deney sürelerine kadar oda sıcaklığında (laboratuvar) bırakılacaktır. Her bir karışım için üçer numunenin ortalaması alınacaktır. Basınç dayanımı ASTM C109-08'e göre ölçülecektir. Basınç dayanımı: 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri saptanacaktır.

2.2. Kullanılacak Malzemeler

2.2.1. Elazığ ferrokrom cürufu

Elazığ ferrokrom cürufu, Elazığ ferrokrom fabrikasından temin edilecektir. Elazığ ferrokrom cürufu alkali aktivatörlerle reaktivitesini artırmak için, normal Portland çimentosunun partikül boyutuna yakın 3.000 cm²/gr tane yüzeyine getirilerek öğütülecektir.

2.2.2. Aktivatörler

En çok kullanılan alkali aktivatörler sodyum veya potasyum hidroksit, SiO₂Na₂O ve/veya SiO₂K₂O ile karışımından oluşmaktadır. Önceki çalışmaların ışığında proje kapsamında NaOH ve Na₂SiO₃'ün kullanılmasına karar verilmiştir.

2.3. Yapılacak Ölçümler ve Deneyler

2.3.1. Basınç dayanımı

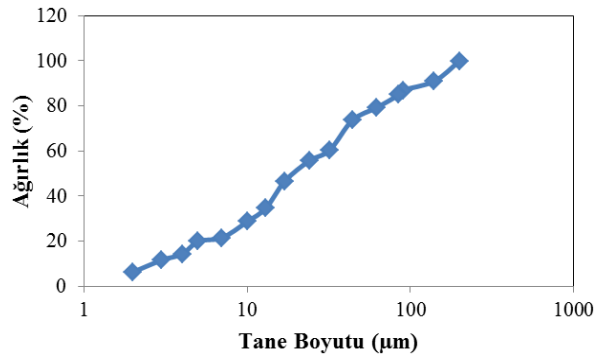
Hidrolik çimentoların basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan ASTM C109/C109M test metotları uygulanacaktır. **2.3.2. Karışım hesapları**

Karışım hesapları Tablo 1'de verilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Öğütülmüş cürufun Granülometri Eğrisi

Hidrometre cihazı 0,075 mm'den küçük tanelerin oranlarını bulmakta ve tane dağılımı hesaplamasında kullanılmaktadır. Geopolimerlerde tanelerin hangi aralıklarda olduğunu öğrenmek için bu deney yapılmıştır ve sonuçlar Şekilde açıklanmıştır.



Şekil 1. Ögütülmüş cürufun Granülometri Eğrisi

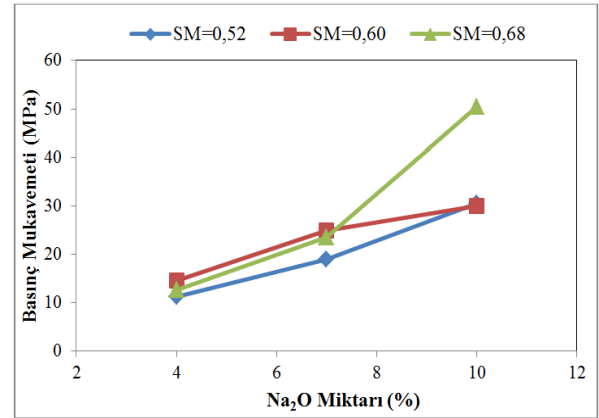
Tablo 2. Geopolimerlerin priz süreleri, UPV değerleri, sarsma tablası sonuçları ve 28 günlük basınç değerleri

Karışım	28 günlük basınç mukavemetleri (MPa)	Priz başlanış süresi (dakika)	Priz sona erme zamanı (dakika)	Sarsma tablası sonuçları (mm)	UPV hızı (m/s)
1	11,28	11,00	37	119	1700
2	18,90	12,50	35	116	2900
3	30,58	10,50	32	135	3352
4	24,97	9,60	37	127	3262
5	30,05	10,30	32	114	3800
6	14,60	12,50	40	125	2150
7	50,39	8,51	36	119	4570
8	12,60	12,16	35	126	1867
9	23,55	11,90	36	130	3231

Na₂O miktarının, basınç mukavemetine olan etkisi tablo 2 ve Şekil 2 te verilmiştir. Verilen grafikte sabit silika ve değişen silika modülünde Na₂O miktarının basınç mukavemetine olan etkisi incelenmiştir. Grafiklere göre sabit silika modülü miktarlarında Na₂O miktarının artması ile basınç mukavemeti de artış göstermiştir. Sabit Na₂O miktarlarında silika modülünün artması ile basınç mukavemeti de artmıştır. Sabit silika modülünde SM=0,52 iken %4, %7 ve %10 Na₂O miktarları için, basınç mukavemetleri sırası ile 11,28-18,90 ve 30,58 MPa olmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda aktivatör miktarının artması basınç mukavemetinin artmasına neden olmuştur. Anuar ve arkadaşları çalışmalarında alkali sıvı olarak, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) karıştırarak kullanmıştır [22]. Bu çalışmada, geopolimer beton numuneler iki farklı molarlarda (8 M' lık ve 14 M' lık sodyum hidroksit -NaOH) kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 3, 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç mukavemetleri test edilmiştir.

Aynı şekilde SM=0,60 olduğunda Na₂O miktarı %4, %7 ve 10% değerlerinde kullanıldığında basınç mukavemeti sırasıyla 14,60-24,97 ve 30,05 MPa'dır. Silika modülü SM=0,68 ve Na₂O miktarı %4, %7 ve %10 olduğunda basınç mukavemetinin 12,60 – 23,55 – 50,39 MPa olduğu tespit edilmiştir. Na₂O miktarı %4 ve silika modülü 0,52-0,60 ve 0,68 olduğunda basınç mukavemeti 8,68-10,6 ve 9,55 MPa olmaktadır. Na₂O miktarı %7 ve silika modülü 0,52-0,60 ve 0,68 olduğunda ise basınç mukavemeti de sırası ile 18,90-24,97 ve 23,55 MPa olmaktadır. Aynı şekilde Na₂O miktarı %10 ve silika modülünün 0,52-0,60-0,68 olduğunda basınç mukavemeti 30,58-30,05 ve 50,39 MPa olmaktadır. Na₂O miktarının ve silika modülünün her ikisinde de artış geopolimerin mukavemetinde artışa neden olmuştur. Allahverdi 2008 yılında yaptığı çalışmada hem silika modülünün ve hem Na₂O miktarının artmasıyla basınç mukavemetinin arttığını rapor etmektedir [8].

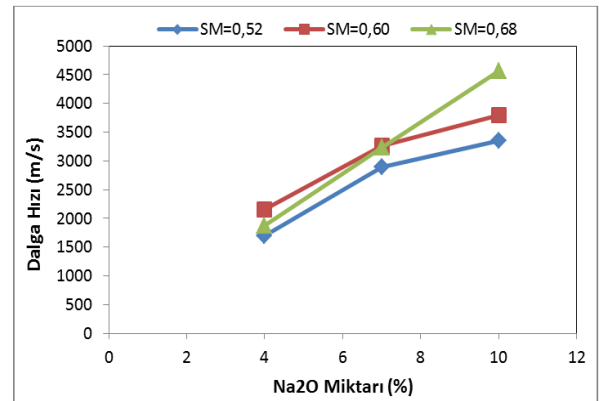
Bunun muhtemel nedenleri Na₂O miktarının artışıyla kimyasal reaksiyonların sıcaklığının artması ve dolgu oranının artması olabilir.



Şekil 2. Na₂O miktarının 28 günlük basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

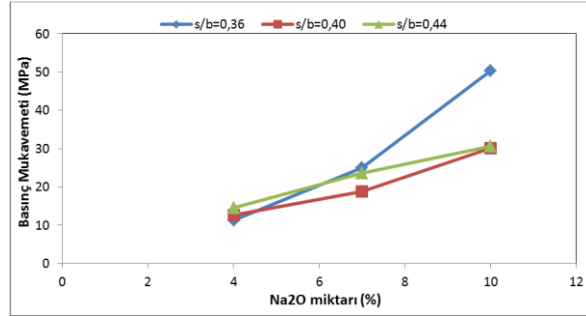
Çizelgeye göre Na₂O miktarlarının değişimi ile ultra ses geçiş hızı (UPV) arasındaki ilişki Sabit silika modülü değerlerinde Na₂O miktarının artması ile UPV değerleri de artmıştır ve bu yoğunluğun artmasından kaynaklanabilmektedir. Sabit Na₂O miktarında silika modülünün artması ile UPV hızı da artmıştır. Bu durumun muhtemel nedeni ise çözeltilerde alkalinitenin daha yüksek olması ve amorf yapıda olan bağların daha kolay çözülmesi yani amorf yapıda olan Al ve Si ların çözünmesidir. Ayrıca kimyasal reaksiyonlardaki sıcaklık artışı muhtemel sebeplerdendir. Çözülen bağlar poli (sialate-siloxo) bağları oluşturmaya başlar ve daha mukavemetli ve daha dolgu bir bağ meydana gelir. Literatüre göre mukavemet ve birim ağırlıktaki artış UPV değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Demirboğa 2003 yılında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu üzerinde yapmış olduğu çalışmada mukavemetin artmasıyla UPV değerlerinin arttığını ifade etmiştir [23]. Shariq 2013 yılında yüksek fırın cürufu üzerinde yaptığı çalışmada aynı şekilde mukavemetin artmasıyla UPV değerlerinin arttığını ifade etmiştir [24].

Sabit silika SM=0,52 modülünde Na₂O miktarı %4, %7 ve %10 olduğunda UPV değerleri sırası ile 1700, 2900 ve 3352 m/s hızına ulaşmıştır. Eğer SM=0,60 olursa Na₂O miktarı %4, %7 ve %10'a değişmesi ile UPV değerleri 2150, 3262 ve 3800 m/s olarak değişmiştir. Buna benzer durumda SM=0,68 değeri için Na₂O miktarı %4, %7 ve %10 olduğu zaman UPV değerleri sırasıyla 1867, 3231 ve 4570 m/s olarak değişmektedir.



Şekil 3. Na₂O miktarının 28 günlük UPV değerleri üzerindeki etkisi

Çizelgeden yararlanarak geopolimerlerde sabit ve değişen su/bağlayıcı miktarlarında Na₂O miktarının basınç mukavemetine olan etkisini incelemek için Şekil 4 çizilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi eğer su/bağlayıcı miktarı sabit olursa (yani 0,36-0,40 ve 0,44) Na₂O miktarının artması ile (%4, %7 ve %10) bütün basınç mukavemeti artış göstermiştir.



Şekil 4. Sabit su/bağlayıcı oranlarında Na₂O miktarının basınç mukavemeti üzerindeki etkisi

Su/bağlayıcı oranı sabit iken (0,36), %4, %7 ve %10 oranlarında Na₂O miktarları için basınç mukavemeti sırası ile 11,28-24,97 ve 50,39 MPa olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,40 olduğu zaman %4, %7 ve %10 oranlarında Na₂O miktarları için basınç mukavemeti sırası ile 12,60-18,90 ve 30,05 MPa olmuştur. Su/bağlayıcı oranı 0,44 olduğunda %4, %7 ve %10 oranlarında Na₂O miktarları için basınç mukavemeti sırası ile 14,60-23,55 ve 30,58 MPa olmuştur. Na₂O oranı %10 olduğu zaman su/bağlayıcı oranının artması ile basınç mukavemeti hızlı şekilde azalmaktadır. Şekil 4'de gösterildiği gibi ve Na₂O= %4 oranı iken su/bağlayıcı oranı 0,36-0,40 ve 0,44 olduğunda basınç mukavemeti 11,28-12,60 ve 14,60 MPa olmuştur. Bunun nedeni çözünen iyonların miktarının çok olup Al ve Si iyonlarının daha kolay çözünebilmesidir [25]. Na₂O miktarı %7 ise su/bağlayıcı oranı 0,36- 0,40 ve 0,44 olduğunda basınç mukavemetinde ki değişim sırası ile 24,97- 18,90 ve 23,55 MPa olmuştur. Na₂O miktarının %10 olması durumunda su/bağlayıcı oranı 0,36-0,40 ve 0,44 olduğu zaman basınç mukavemetleri 50,39-30,05 ve 30,58 MPa olarak gözlenmiştir.

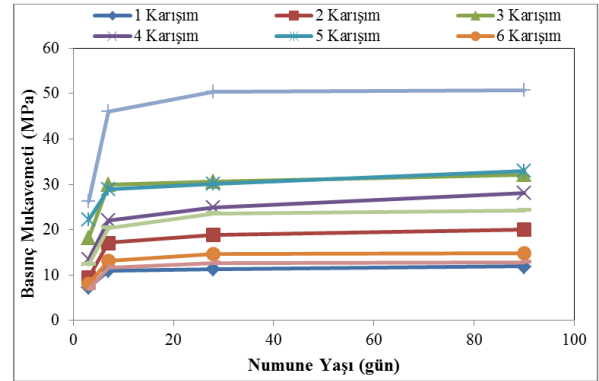
Tablo 3. Kür süresinin basınç mukavemeti üzerindeki etkisi (65°C kür için)

Karışım	3 günlük basınç mukavemeti (MPa)	7 günlük basınç mukavemeti (MPa)	28 günlük basınç mukavemeti (MPa)	90 günlük basınç mukavemeti (MPa)
1	7,30	10,90	11,28	11,90
2	9,53	17,10	18,90	20,01
3	18,20	30,00	30,58	32,10
4	13,45	22,10	24,97	28,10
5	22,30	28,90	30,05	33,01
6	8,14	13,10	14,60	14,80
7	26,20	46,30	50,39	50,68
8	6,90	11,65	12,60	12,90
9	12,30	20,35	23,55	24,30

Kür süresinin ısı işlem görmüş ve NaOH ile aktifleşmiş cüruf tabanlı üretilen geopolimerlerin basınç mukavemetine olan etkisi Portland çimentosundan üretilen hamurların kür süresinin etkisine benzemektedir. Bunun muhtemel nedeni zaman içerisinde alkali iyonların etkisinde silis ve alüminyumların geopolimerizasyonlarıdır.

Şekilde görüldüğü gibi cüruf tabanlı üretilen geopolimerlerin reaksiyon hızı 3 günden 28 güne kadar çok hızlıdır ama 28 günden sonra mukavemet kazanma hızı çok azalmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitten üretilen yüksek alkalinitesi olan çözelti zaten birbiriyle reaksiyona girecekler ve 36 saat bu çözelti kendi başına kalırsa yarı katı bir malzemeye dönüşecektir.

Yüksek alkalinitesi olan çözeltiler öğütülmüş cüruf tabanlı Si ve Al iyonlarını çözmeye başlar ve çözünen iyonlar ve çözelti reaksiyona girer. Davidovits' in ifadesine göre ara bileşen malzeme, hidroksil ve oksijen yardımıyla oluşmaya başlar.



Şekil 5. Numune yaşının geopolimerlerin basınç mukavemetlerine etkisi (65°C kür için)

Bu reaksiyon erken yaşlarda olur ve hızlıdır. Daha sonra kullanılmayan çözelti ve c reaksiyona girmeyen kısmı reaksiyona devam eder ve tüm iyonların kullanımına kadar sertleşme devam eder.

4. Sonuçlar

- Geopolimer için dokuz cüruf esaslı karışım hazırlanmıştır ve sonuçta en yüksek basınç mukavemeti oluşturan karışım özellikleri açıklanmıştır.
- Öğütülmüş Elazığ ferrokrom cürufu aktive edilebilmektedir. Sodyum hidroksit ile sabit sıcaklıkta aktive edilen Elazığ ferrokrom cürufu, geopolimer üretiminde kullanılabilir.
- Farklı su/bağlayıcı, farklı silika modülü, farklı kür süresi ve farklı kür sıcaklığının etkisi Elazığ ferrokrom cürufu geopolimer üretmek için araştırılarak, 28 günlük basınç mukavemeti 50,39 olan geopolimer üretilmiştir. Bu mukavemete sahip geopolimerler harç ve beton üretiminde kullanılabilir ve geopolimerler çimentoya alternatif bağlayıcı olabilir.
- Silika modülü sabit olduğunda (SM=0,52-0,60 ve 0,68), Na₂O miktarının artması ile (Na₂O = %4, %7 ve %10) basınç mukavemeti artmaktadır.
- Karışımlardan alınan sonuçlara göre farklı silika modüllerde, silika modülü arttıkça basınç mukavemeti de artmaktadır.
- Sabit Na₂O=%10 miktarında su/bağlayıcı oranı arttıkça mukavemet önemli derecede azalmaktadır.
- Sabit su/bağlayıcı oranlarında (0,36-0,40 ve 0,44) Na₂O miktarının artması ile (%4, %7 ve %10) numunelerin basınç mukavemeti de artmaktadır.
- Kür süresi geopolimerlerin basınç mukavemeti kazanması üzerinde çok büyük bir etkisi vardır, fakat 28 günden sonra mukavemetin zamanla artma eğilimi azalmaktadır.

Kaynaklar

- [1] M. Weil, K. Dombrowski, and A. Buchwald, "Life-cycle analysis of geopolymers," *Geopolymers, structure, processing, properties and applications*, ISBN-13, vol. 978, no. 1, pp. 845-69, 2009.
- [2] Z. Li, Z. Ding, and Y. Zhang, "Development of sustainable cementitious materials." pp. 55-76.
- [3] K. A. Komnitsas, "Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities," 2011 International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities, vol. 21, no. Supplement C, pp. 1023-1032, 2011/01/01/, 2011.
- [4] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 7, pp. 1315-1322, Jul, 2008.
- [5] D. L. Y. Kong, and J. G. Sanjayan, "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 2, pp. 334-339, Feb, 2010.
- [6] J. Malolepszy, "Activation of synthetic melitite slags by alkalis," *VIH Intem. Congr. Chem. Cem.(Rio de Janeiro)*, vol. 4, pp. 104-107, 1986.
- [7] A. Saglik, "Alkali-silica reactivity and activation of ground perlite containing cementitious mixtures," MSc, Graduate School of Natural and Applied Sciences of METU, 2009.
- [8] A. Allahverdi, K. Mehrpour, and E. N. Kani, "Taftan pozzolan-based geopolymer cement," *IUST International Journal of Engineering Science*, vol. 19, no. 3, pp. 1-5, 2008.
- [9] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1224-1232, 2005/06/01/, 2005.
- [10] T. Bakharev, "Resistance of geopolymer materials to acid attack," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 4, pp. 658-670, 2005.
- [11] T. Bakharev, "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1233-1246, 2005/06/01/, 2005.
- [12] S. Thokchom, P. Ghosh, and S. Ghosh, "Resistance of fly ash based geopolymer mortars in sulfuric acid," *arPN Journal of engineering and applied Sciences*, vol. 4, 2009.
- [13] D. SureshThokchom, P. Ghosh, and S. Ghosh, "Acid resistance of fly ash based geopolymer mortars," *Int. J. of Recent Trends in Engineering and Technology*, vol. 1, no. 6, 2009.
- [14] A. Allahverdi, and F. Skvara, "Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements-Part 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations," *Ceramics Silikaty*, vol. 49, no. 4, pp. 225, 2005.
- [15] A. Allahverdi, and F. Skvara, "Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements - Part 1," *Ceramics-Silikaty*, vol. 45, no. 3, pp. 81-88, 2001.
- [16] A. Allahverdi, and F. Skvara, "Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements - Part 2," *Ceramics-Silikaty*, vol. 45, no. 4, pp. 143-149, 2001.
- [17] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. van Deventer, "Geopolymer technology: the current state of the art," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917-2933, May 01, 2007.
- [18] B. L. Damineli, F. M. Kemeid, P. S. Aguiar, and V. M. John, "Measuring the eco-efficiency of cement use," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 8, pp. 555-562, 2010/09/01/, 2010.
- [19] C. Meyer, "The greening of the concrete industry," *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 8, pp. 601-605, 2009/09/01/, 2009.
- [20] E. Luga, and C. D. Atis, "Strength Properties of Slag/Fly Ash Blends Activated with Sodium Metasilicate and Sodium Hydroxide+ Silica Fume," *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, vol. 60, no. 2, pp. 223, 2016.
- [21] M. Komljenović, Z. Baščarević, and V. Bradić, "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181, no. 1, pp. 35-42, 2010/09/15/, 2010.
- [22] K. Anuar, A. Ridzuan, and S. Ismail, "Strength characteristics of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate," *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2011.
- [23] R. Demirboga, and R. Gul, "The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 5, pp. 723-727, May, 2003.
- [24] M. Shariq, J. Prasad, and H. Abbas, "Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 41, no. Supplement C, pp. 411-418, 2013/04/01/, 2013.
- [25] D. Bondar, M. Khodaparast, and N. Hassani, *Geopolymer concrete and its applications*, 2011.