

Effects on Compressive Strength of Accelerated Curing Methods in Alkali Activated Mortars

Hasbi Yaprak

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Kastamonu University, 37150, Kastamonu, Turkey.
E-mail: hyaprak@kastamonu.edu.tr

Selcuk Memis (Corresponding author)

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Kastamonu University, 37150, Kastamonu, Turkey.
E-mail: smemis@kastamonu.edu.tr

Gokhan Kaplan

Kastamonu Vocational School, Kastamonu University, 37150, Kastamonu, Turkey.
E-mail: gkaplan@kastamonu.edu.tr

Mehmet Ugur Yilmazoglu

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Kastamonu University, 37150, Kastamonu, Turkey.
E-mail: myimazoglu@kastamonu.edu.tr

Iffet Gamze Mutevelli Ozkan

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Kastamonu University 37150, Kastamonu, Turkey.
E-mail: gmutevelli@kastamonu.edu.tr

Abstract

The production of ordinary Portland cement (OPC) requires large amounts of fuel and raw materials and responsible about 7% total CO₂ emissions in the earth's atmosphere. The handicaps of the production of OPCs can extinguish with a new type of green and eco-friendly material, namely, geopolymer. The aim of the study is to investigate compressive strength properties at accelerated curing conditions of alkali-activated slag/bottom ash mortars and different rates of rice husk ash. The ratio of blast furnace slag (YFC) / fly ash (UK) was chosen 100/0, 72.5 / 27.5, 45/55 and 7.5 / 92.5, and also the ratios of alkali (YFC + UK) / rice husk ash (PK) 0%, 2.5%, 5% and 7.5% were used. As the activator used Na₂SiO₄ (SS) and NaOH (SH) used was used at four different dosages, varying between 0/100%, 70/30%, 40/60% and 100/0%. Prepared using Taguchi L16 test design matrix for experimental study, and also the UK and PK to be used in the work were firstly grounded with sufficient fineness through a ball mill. The samples were poured into prismatic samples prepared in dimensions of 40 x 40 x 160 mm and thermal curing was applied at different temperatures and times. Compressive strength tests were applied on prepared 2, 7, 28 and 90 day samples. As a result of the study; it has been observed that the use of PK up to 7.5% gives favorable results in terms of compressive strength. The maximum compressive strength was obtained in 27.5% ratio of UK and 7.5% in SH and 30% in SH. However, in terms of the compressive strength, it is more appropriate to use 27.5% of the UK ratio.

Keywords: Geopolymer, Fly Ash, Slag, Sodium Silicate, Sodium Hydroxide, Compressive Strength

Alkaliler ile Aktive Edilen Harçlarda Hızlandırılmış Kür Yöntemlerinin Basınç Dayanımına Etkisi

Özet

Portland çimentosu (OPC) üretimi önemli miktarda enerji ve hammadde tüketir ayrıca atmosferdeki CO₂ emisyonunununda % 7'sinden sorumludur. Çimento üretiminin neden olduğu bu olumsuzluklar jeopolimer olarak nitelenen daha çevre dostu malzemeler kullanılarak azaltılabilir. Bu çalışmanın amacı, alkalilerle aktive edilen harçlarda cüruf/ taban külü ile farklı oranlardaki pirinç kabuğu külünün hızlandırılmış kür koşullarındaki basınç dayanımı özelliklerini araştırmaktır. Araştırma kapsamında yüksek fırın cürufu (YFC)/uçucu kül (UK); 100/0, 72.5/27.5, 45/55.5 ve 7.5/92.5 oranlarında ve ayrıca alkali oranının (YFC+UK) %0, %2.5, %5 ve %7.5'I oranlarında pirinç kabuğu külü (PK) kullanılmıştır. Aktivatör olarak (Na₂SiO₄ / NaOH) da %0/100, %70/30, %40/60 ve %100/0 oranları olacak şekilde sodyum silikat (Na₂SiO₄) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. YFC ve PK önce yeterli incelikte öğütülmüş, ve deneysel çalışmada Taguchi L16 deneysel dizaynı kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar 40 x 40 x 160 mm boyutlarında hazırlanan prizmatik numunelere dökülmüş ve farklı sıcaklıklarda ve zamanlarda termal sertleştirme uygulanmıştır. Hazırlanan 2, 7, 28 ve 90 günlük numunelerde basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Araştırma sonucunda; PK'nun % 7.5'e kadar kullanımının, basınç mukavemeti açısından olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Maksimum basınç dayanımı UK% 27.5, PK'da % 7.5 ve SH'de % 30 olarak kullanılması durumunda elde edilmiş ve basınç dayanımı değerleri açısından, UK oranının% 27.5'ini kullanılmasının daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Uçucu Kül, Cüruf, Sodyum Silikat, Sodyum Hidroksit, Basınç Dayanımı

1. Giriş

Küresel enerji tüketimi ile ilgili veriler incelendiğinde endişelere rağmen 2012'den 2040 yılına kadar 28 yıllık süreçte % 48'lik bir artış öngörülmektedir. Bu süreçte enerji ile ilgili CO₂ emisyonlarında da % 24'lük bir artış tahmin edilmektedir (Lin and Liu 2015). Enerji tüketiminin arttığı ve 2050 yılına kadar yaklaşık% 58 büyümesi beklenen dünya enerji tüketiminin en büyük paylardan biri de yapı sektörüdür ve dolayısıyla bu payı binlar ile kaybolan ve/veya tüketilen enerji oluşturmaktadır (Nejat et al. 2015). Bu sürdürülemez senaryoyu tersine çevirmek için binaların enerji performansı ile ilgili politik çerçeveler kabul edilmiştir (Staniaszek et al. 2013). Ancak bu sektör, maliyet de dikkate alındığında etkin enerji tasarrufu ve CO₂ azaltma potansiyelinin en büyük kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir.

Yapı sektöründe en önemli malzemelerden biri olan portland çimentosu, üretilirken çok yüksek enerji tüketmekte ve bu üretim sonucunda 1 ton çimento üretimi için harcanan enerji dışında 1 ton da CO₂ salınımı yapılmaktadır (Roy 1999). Demir çelik üretimi sırasında atık olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu, çimento içinde belirli miktarlarda kullanılmaktadır. TS 197-1, cürufu çimentolar içerisindeki cüruf miktarının en az %20 ve en çok %80 olacak şekilde sınırlandırmıştır. Türkiye' de bu oran %60 değerini geçememektedir. Bu oranı artırabilmek için çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu araştırmalar, bu malzemelerin başarılı bir şekilde üretilmesinde kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Bazikliği yüksek olan alkalili kimyasalları kullanarak uçucu kül, diatomit, metakaolin, zeolit, yüksek fırın cürufu, tuğla tozu, pirinç kabuğu, kırmızı çamur (boksit atığı) ve silis dumanı gibi çeşitli malzemeler ile denenerek alkali aktive edilmiş betonlar elde edilmiştir. Taban külü ise termik santrallerde açığa çıkan çevre sorunlarına yol açan önemli bir atık malzemedir. Ancak taban külünün standartlara uygun olmamasından dolayı çimento ve beton sektöründe kullanım alanı oldukça azdır.

Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en ilgi çeken, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur. Ancak, çeşitli atıklar günümüzde çimento ve beton üretiminde Portland çimentosu yerine belirli oranlarda hem akademik çalışmalarda hem de piyasa koşullarında kullanılmaktadır. Ancak, beton üretiminde kullanılmasında sakınca olmayan açığa çıkan endüstriyel atıkların miktarının oldukça önemli boyutlarda olması nedeniyle atıkların tamamının bu yolla tüketilmesi mümkün değildir. Değişik

yollarla açığa çıkan ve atık olarak nitelendirilen bu maddelerin ancak %20- 30'u tüketilebilmektedir. Bu durum, çevresel kirliliğin yanında, depolama problemleri ve bunun getirdiği teknik ve ekonomik problemlere yol açmaktadır.

Son yıllarda alkali ile aktive edilmiş malzemeler (AAM) üzerine yapılan araştırmalara karşı büyük bir ilgi artmıştır. Bu araştırmalarda, bu malzemelerin iyi özelliklere sahip yük taşıyıcı malzemeler üretmek için başarıyla kullanılabileceğini kanıtlamıştır (Duxson et al. 2007). AAM'ler yüksek orandaki alkalin solusyonları (genellikle sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit KOH veya sodyum silikat (Na_2SO_3) çözeltisi) tarafından aktive edilen SiO_2 , Al_2O_3 (ve CaO) bakımından zengin öğütülmüş granüllü yüksek fırın cürufu (YFC) kalsiyum alüminosilikat öncüleri veya metakaolin (MK) veya uçucu kül (UK) gibi alüminosilikat öncüleri karıştırılarak üretilir (Provis 2016). Kısaca AAM, katı alüminosilikat malzemelerinin alkali çözeltilerle reaksiyonu sonucu sentezlenen amorf veya yarı kristalin üç boyutlu alüminosilikatlardır (Davidovits 1991; Hajimohammadi, Provis, and van Deventer 2010). Karışım tasarımı ve hammadde seçiminin çevresel performansın optimizasyonuna yönelik bir bakış açısı ile gerçekleştirilmesi halinde, bu öncülerin kullanılması somutlaşmış CO_2 emisyonunu azaltabilir (Provis and Palomo 2015). Üstelik bu öncülerin kullanmak atık malzemelerin kullanımını arttırmakta, böylece depolama alanlarındaki depolamalarından ve sonuçta ortaya çıkan kirlilik sorunlarından kaçınılmaktadır. Ayrıca AAM'lar iyi mekanik özellikler ve yangına karşı direnç gösterirler (Pacheco-Torgal et al. 2012).

Sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve sodyum silikat (Na_2SO_3) en çok olarak kullanılan aktivatörlerdir. UK ve YFC gibi yapısında Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO içeren amorf malzemelerden alkali aktivatör sistemleri kullanılarak kuvvetli bir bağlayıcı madde üretimi mümkündür. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda "geopolimer" adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır. Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek mekanik performans, düşük enerji giderleri, düşük kirlenici gaz emisyonları (CO_2 , SO_2 , NO_x vb.) ve çevrenin daha az tahribi gibi avantajlar sunmaktadır (Aydin 2010). Ayrıca kaynak materyaller tarafından sağlanan silika ve alümina türleri, AAM'de geopolimer nanoyapısının iki ana maddesidir. Al ve Si'nin kaynak materyallerden çözünme oranının ve bu türlerin çözelti içine zaman salınımının, geopolimerizasyon reaksiyonunun kinetiğinde ve benzer şekilde gelişmekte olan geopolimer jelin kimyası arasında bazı farklılıklar yarattığı da bilinmektedir (Hajimohammadi, Provis, and van Deventer 2011, 2010).

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar (geopolimer), normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım, daha düşük hidratasyon ısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanında, ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajlara sahip bir malzemedir (Aydin 2010).

Bu çalışmanın amacı; farklı oranlarda sodyum silikat, uçucu kül ve pirinç kabuğu külü kullanılarak üretilen alkaliler ile aktive edilmiş harçların hızlandırılmış kür koşullarında basınç dayanımlarının incelenmesi ve beton içinde çimento kullanmadan çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlayacak yeni bir kompozit malzemenin üretilmesini sağlamaktır.

2. Deneysel Çalışma

2.1. Malzemeler

Karışımların hazırlanmasında tane boyutu 0-500 μm olan bazalt agregası kullanılmıştır. Kastamonu ilinde faaliyet gösteren agrega ocağında bazalt agregalarının konkasörlerde kırılması esnasında oluşan atık toz (taş unu) kısmı agrega olarak temin edilmiştir. Agregada laboratuvar ortamında yıkanarak içerisindeki yabancı maddelerden temizlenerek kullanılmıştır. Harç karışımlarında kullanılan yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK) ve pirinç kabuğu külü (PK)'ne ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. YFC, UK ve PK'nin kimyasal özellikleri

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	Özg. A.
YFC	31.61	43.45	16.17	0.45	3.81	0.65	4.00	1.54	2.87
UK	1.73	55.73	29.76	5.41	1.96	3.11	3.30	0.30	2.30

PK	0.60	96.55	0.55	0.31	1.07	2.28	0.88	0.21	1.95
----	------	-------	------	------	------	------	------	------	------

YFC öğütülmüş olarak OYAK Grubuna ait Erdemir tesislerinden temin edilmiştir. UK Çatalağzı Termik Santralinden (ÇAES) elde edilmiştir. PK Tosya ilçesinde faaliyet gösteren TOSPİR firmasından atık stoklama sahasından temin edilmiştir. PK ilk olarak kalsine edilmiş, sonrasında bilyalı değirmen ile 60 dakika öğütme işlemine tabi tutulmuştur. UK özgül yüzey alanının artırılması için 60 dakika süre ile bilyalı değirmende öğütülmüştür. Ancak YFC özgül yüzey alanı açısından yeterli görüldüğü için öğütme işlemi gerçekleştirilmemiştir.

Mineral katkıların aktivasyonu için Merc firmasından temin edilen sodyum silikat (NS) ve sodyum hidroksit (NH) kullanılmıştır. NH granüle formda olup, %97 saflık değerindedir. NH laboratuvar ortamında 16 mol olacak şekilde hazırlanmıştır ve firma verilerine göre NS'nin özgül ağırlığı 1.35 değerinde olup %8.5 Na₂O, %28.5 SiO₂ ve %65 H₂O'dan oluşmaktadır. Ayrıca taze harçların işlenebilirliğini arttırmak için polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Su azaltıcı katkının özgül ağırlığı 1,07 ve katı madde içeriği %36,73 olarak belirlenmiştir. Harçların hazırlanmasında hacimce %1 oranında PVA lif kullanılmış ve tüm karışımların lif içeriği sabit tutulmuştur. Karışım ve kür suyu için ise Kastamonu şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Deneysel Tasarım

Harçların hazırlanmasında Taguchi L16 deney matrisi kullanılmıştır. Taguchi ortogonal serisi iş gücü ve zaman tasarrufu sağlamak amacıyla tercih edilmiştir. Bu kapsamda deneysel çalışmada kullanılan değişkenler Tablo 2'de ve malzeme karışım oranları da Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. Karışım özelliklerine ait faktörler

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
UK (%)	0	27.5	55	92.5
PK (%)	0	2.5	5.0	7.5
NH (%)	0	30	60	100
Kür Sıcaklığı (°C)	60	80	100	120
Kür Süresi (Saat)	12	24	48	72

Tablo 3. Malzeme karışım oranları ve Taguchi L16 serisi

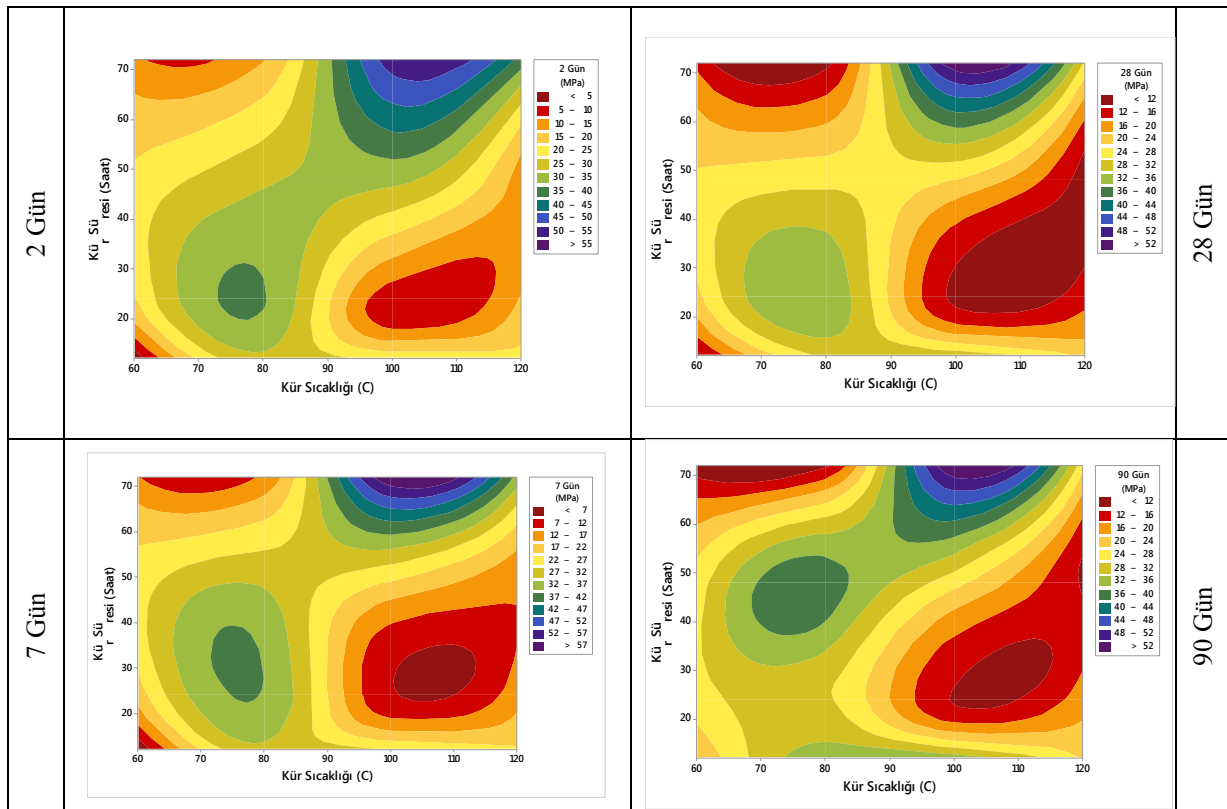
Karışım	Malzeme Oranları (%)			Kür Şartları	
	UK	PK	NH	Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (Saat)
1	0	0	0	60	12
2	0	2,5	0,3	80	24
3	0	5	0,6	100	48
4	0	7,5	1	120	72
5	27,5	0	0,3	100	72
6	27,5	2,5	0	120	48
7	27,5	5	1	60	24
8	27,5	7,5	0,6	80	12
9	55	0	0,6	120	24
10	55	2,5	1	100	12
11	55	5	0	80	72
12	55	7,5	0,3	60	48
13	92,5	0	1	80	48
14	92,5	2,5	0,6	60	72
15	92,5	5	0,3	120	12
16	92,5	7,5	0	100	24

Tüm harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0.43 ve agrega/bağlayıcı oranı 1,00 olarak alınmıştır. Mineral katkıların aktive edilmesi için karışım içerisinde kullanılan PK+UK+YFC ağırlığının %40'ı oranında aktivasyon çözeltilisi, bağlayıcı miktarının %10'u oranında su azaltma özelliğine sahip kimyasal katkı (akışkanlaştırıcı) kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılacak su miktarı aktivasyon çözeltilisindeki içeriği dikkate alınarak belirlenmiştir. Harç karışımlarında S/B oranı sabit kalacak şekilde ek su miktarı belirlenmiştir. Harçlar kendiliğinden kalıba yerleşme özelliğine sahip olduğu için herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Kendiliğinden yerleşen harçlar 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür. Kalıba yerleştirilen harçlar 120 dakika sonra (ön bekleme sonrası) etüv içerisinde yerleştirilerek belirtilen sıcaklık ve zamanda ısıl kür işlemi uygulanmıştır. 40x40x160 mm boyutlarındaki sertleşmiş harç örnekleri üzerinde 2, 7, 28, ve 90. günlerde tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kür Sıcaklığı ve Süresinin Basınç Dayanımına Etkisi

Farklı sıcaklık ve sürelerde kür işlemine tabi tutulan harçların zamana bağlı olarak basınç dayanımındaki değişimler Şekil 1'de sunulmuştur.



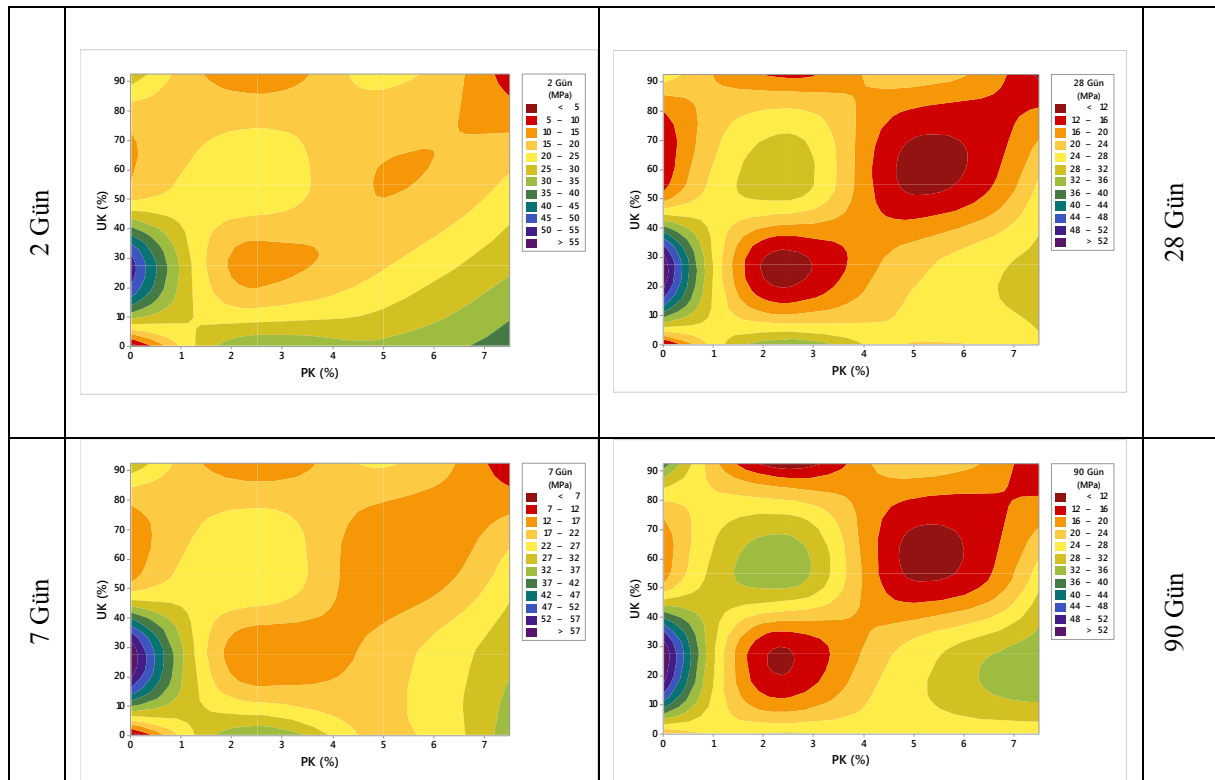
Şekil 1. Kür sıcaklığı ve süresinin zamana bağlı basınç dayanımına etkisi

2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde genellikle 100 °C sıcaklıkta 72 saat süre ile uygulanan ısıl kür işlemi basınç dayanımlarını büyük oranda arttırmıştır. 120 °C sıcaklıkta uygulanan ısıl kür işleminde kür süresinin 12, 24 ve 48 saat olması durumunda basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Yüksek sıcaklıklar ve uzun sürelerde uygulanan kür işlemi basınç dayanımlarını arttırmaktadır. Bu durum kür esnasında oluşan hidrasyon ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda uygulanan kısa kür işlemleri hidrasyon ürünlerinin oluşumuna yeterli katkıyı sağlayamadığı için basınç dayanımlarının düşük kalmasına yol açmıştır. Ayrıca ısıl kür işleminden

sonra oda koşullarında bekletilen harçların zamanla basınç dayanımları azalmaktadır. Bu olayın nedeni harçlarda oluşan karbonatlaşmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.2. Mineral Katkı oranlarının Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkileri

UK ve PK oranlarının 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde 2 günlük basınç dayanımları açısından PK kullanılmadan %27,5 UK uçucu kül kullanımı basınç dayanımlarını arttırmaktadır. PK oranının %7,5 olması durumunda UK oranının da %27,5 olması durumunda basınç dayanımlarında artışlar elde edilmektedir. Bu etki 7 günlük basınç dayanımları açısından da geçerli olmaktadır. 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde UK oranının %27,5 olması PK oranının %0 olması basınç dayanımlarını arttırmaktadır. 90 günlük basınç dayanımlarında ise PK kullanımı olumlu sonuçlar vermektedir. PK kullanılmaması durumunda UK oranının %27,5 olması basınç dayanımlarını arttırmaktadır. PK oranının %2,5 olması durumunda UK oranının %55 olarak kullanılması basınç dayanımlarına olumlu katkı sağlamaktadır. %7,5 oranında PK kullanımı durumunda ise UK oranının %27,5 olması basınç dayanımını arttırmaktadır. Ancak PK oranının %5 olması basınç dayanımlarında kayıplara neden olmaktadır. 90. günde PK ve UK katkıların daha yüksek oranda kullanılması puzolanik aktivitenin etkisi ile açıklanabilmektedir.



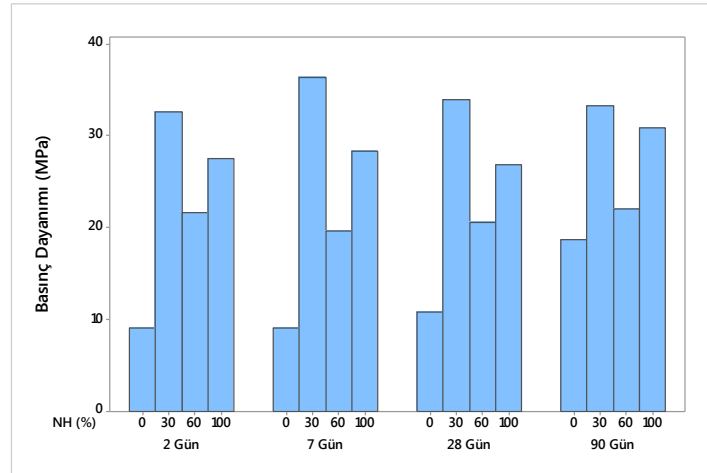
Şekil 2. Uçucu kül ve pirinç kabuğu külü oranının zamana bağlı basınç dayanımına etkisi

3.3. Alkali Aktivatör Oranlarının Basınç Dayanımına Etkileri

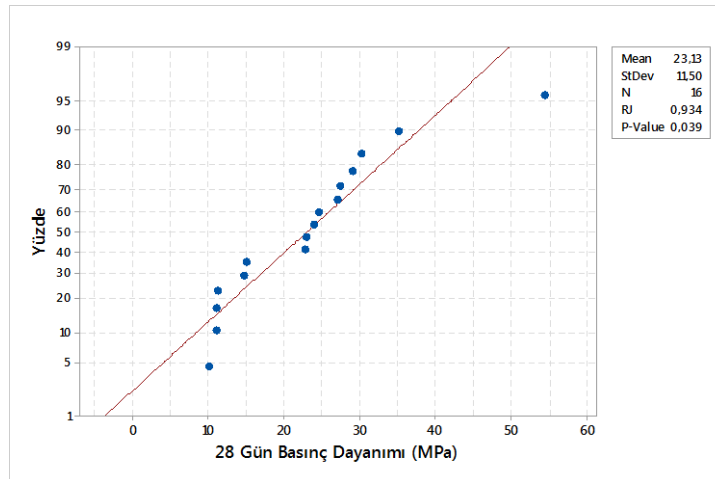
NH oranının zamana bağlı olarak basınç dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 3'de sunulmuştur. NH oranının %0 (%100 NS) olması durumunda basınç dayanımlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu durum yüksek oranda NS kullanımı sonucunda silis jelinin oluşması ile açıklanmaktadır. NH oranının %30 olması durumunda 7. güne kadar basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir. Ancak 28 ve 90. günlerde basınç dayanımlarında yaklaşık %5 oranında azalmalar gerçekleşmiştir. NH oranının %60 ve 100 olması durumunda 2, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları üzerinde belirgin bir etki göstermemiştir. Geopolimer harç üretimi açısından NH oranının %30 olması basınç dayanımlarını daha olumlu etkilemektedir.

3.4. İstatistiksel Analiz

Geopolimer (AAM) harçların 28 günlük basınç dayanımları üzerinde ilk olarak normal dağılım ve sonrasında da Kruskal Wallis-H testi gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımlarına ait normallik dağılımı Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4'de görüldüğü gibi p değerinin (0,039) < 0,05 olmasından dolayı verilerin normal dağılmadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden veriler üzerinde Kruskal Wallis-H testi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. NH oranının basınç dayanımı üzerindeki etkileri



Şekil 4. 28 günlük basınç dayanımlarının normal dağılım grafiği

Tablo 4. 28 günlük basınç dayanımları için gerçekleştirilen Kruskal Wallis testine ait P ve H değerleri verilmiştir.

Tablo 4. Kruskal Wallis testine ait sonuçlar

	H değeri	P değeri	Etki Oranı (%)
UK (%)	0.79	0.851	5.27
PK (%)	0.86	0.835	5.73
NH (%)	9.86	0.020	65.73
Kür Sıcaklığı	3.20	0.362	21.34
Kür Süresi	0.29	0.962	1.93
Toplam			100.00

Tablo 4'de görüldüğü gibi UK, PK, kür sıcaklığı ve süresindeki değişimin 28 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi ($p>0.05$) bulunmamaktadır. Ancak NH oranındaki değişimin 28 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Etki oranları açısından NH oranı 28 günlük basınç dayanımları üzerinde oldukça etkili (%65.73) olmaktadır. NH oranının ana etkisini belirlemek için varyansların da eşit olmamasından dolayı post-hoc testlerinden olan Dunnett testi kullanılmıştır. Dunnett testi için NH %0 oranı kontrol grubu olarak belirlenmiş ve test sonuçları Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 5. Dunnett Testi Sonuçları

NH (%)	N	Ortalama	Grup
0 (Referans)	4	10,856	A
30	4	34,21	
100	4	26,84	
60	4	20,60	A

Tablo 5'de görüldüğü gibi NH için referans oran olarak belirlenen %0, %60 oranı ile aynı grup içerisinde yer almaktadır. %30 ve %100 NH oranları ise referans gruptan farklı olmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Tüm deney günleri açısından 100 °C sıcaklıkta 72 saat uygulanan ısı kütür işlemi geopolimer (AAM) harçların basınç dayanımını önemli derecede arttırmaktadır. Ayrıca 80 °C sıcaklıkta 48 saat uygulanan ısı kütür işlemi de basınç dayanımlarında artışlar sağlamaktadır.
- 120 °C sıcaklıkta uygulanan ısı kütür işlemi ise basınç dayanımlarını genellikle olumsuz etkilemektedir. Bu durum yüksek sıcaklığın harç bünyesinde mikro çatlak oluşumuna sebep vermesinden kaynaklanmaktadır.
- Mineral katkı oranlarına göre PK kullanılmadan UK oranının %27,5 olması durumunda basınç dayanımlarında artışlar gözlenmiştir. PK oranının %7,5 olması durumunda ise UK kullanılmaması basınç dayanımlarına olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Ayrıca 90 günlük geopolimer harçlar için %55 UK kullanımı durumunda PK oranının %2,5 olması basınç dayanımlarını arttırmaktadır.
- Basınç dayanımları açısından alkali aktivatör olarak NH oranının %30 olması gerekmektedir. Ancak NH oranının %100 olması durumunda da basınç dayanımında artışlar gözlenmiştir.
- Maksimum basınç dayanımı için UK oranı %27,5 PK oranı %7,5 ve NH oranı %30 olarak seçilmelidir. Belirtilen karışım oranlarına göre hazırlanan geopolimer harçlar 80 °C sıcaklıkta 72 saat ısı kütür işlemine tabi tutulmalıdır. Geopolimer harç üretiminde genellikle YFC oranının azalması basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Ayrıca NH %30 olması durumunda basınç dayanımında azalmalar meydana gelmektedir.
- Geopolimer harç numunelerinin bazılarında 7 günden sonra basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Dayanım kaybının nedeni karbonatlaşma olarak düşünülmektedir.

Bu çalışma sonuçlarına göre; hızlandırılmış kür yöntemlerinde karbonatlaşma etkisinin uzun dönem basınç dayanımına etkisinin araştırılması geopolimer kimyasına büyük katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında yürütülen KÜBAP/05.2015-10 KÜBAP nolu proje ile desteklenmiştir.

References

- Aydin, Serdar. (2010). 'Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcı Lifli Kompozit Geliştirilmesi'. Sakarya Üniversitesi.
- Davidovits, J. (1991). 'Geopolymers'. *Journal of Thermal Analysis* 37 (8): 1633–56. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>.
- Duxson, P, A Fernández-Jiménez, J L Provis, G C Lukey, A Palomo, and J S J van Deventer. (2007). 'Geopolymer Technology: The Current State of the Art'. *Journal of Materials Science* 42 (9): 2917–33. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- Hajimohammadi, Ailar, John L. Provis, and Jannie S.J. van Deventer. (2011). 'The Effect of Silica Availability on the Mechanism of Geopolymerisation'. *Cement and Concrete Research* 41 (3). Pergamon: 210–16. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.02.001>.
- Hajimohammadi, Ailar, John L Provis, and Jannie S J van Deventer. (2010). 'Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation'. *Chemistry of Materials* 22 (18): 5199–5208. <https://doi.org/10.1021/cm101151n>.
- Lin, Boqiang, and Hongxun Liu. (2015). 'CO₂ Emissions of China's Commercial and Residential Buildings: Evidence and Reduction Policy'. *Building and Environment* 92 (October). Pergamon: 418–31. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.05.020>.
- Nejat, Payam, Fatemeh Jomehzadeh, Mohammad Mahdi Taheri, Mohammad Gohari, and Muhd Zaimi Muhd. (2015). 'A Global Review of Energy Consumption, CO₂emissions and Policy in the Residential Sector (with an Overview of the Top Ten CO₂emitting Countries)'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>.
- Pacheco-Torgal, F., Z. Abdollahnejad, A.F. Camões, M. Jamshidi, and Y. Ding. (2012). 'Durability of Alkali-Activated Binders: A Clear Advantage over Portland Cement or an Unproven Issue?' *Construction and Building Materials* 30 (May). Elsevier: 400–405. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.017>.
- Provis, John L. (2016). 'Alkali-Activated Materials'. *Cement and Concrete Research*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.
- Provis, John L., and Angel Palomo. (2015). 'Advances in Understanding Alkali-Activated Materials'. *Cement and Concrete Research* 78 (December). Pergamon: 110–25. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2015.04.013>.
- Roy, Della M. (1999). 'Alkali-Activated Cements: Opportunities and Challenges'. *Cement and Concrete Research* 29 (2): 249–54. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00093-3).
- Staniaszek, D, O Rapf, M Faber, and I Nolte. (2013). A guide to developing strategies for building energy renovation, Buildings Performance Institute Europe, 2013. 36.