

**T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI MİNERAL KATKILARININ GEOPOLİMER
HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

Muhammedül Emin ASLAN

**Danışman
Jüri Üyesi
Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Hasbi YAPRAK
Dr. Öğretim Üyesi Gökhan KAPLAN
Dr. Öğretim Üyesi Muhammed Yasin DURGUN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

KASTAMONU-2019

TEZ ONAYI

Muhammedül Emin ASLAN tarafından hazırlanan “**Farklı Mineral Katkıların Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkileri**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr.Üyesi Muhammed Yasin DURGUN Bartın Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr.Üyesi Gökhan KAPLAN Kastamonu Üniversitesi	

04/10/2019

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Nur BELKAYALI	
----------------	------------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış 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 bildirir ve taahhüt ederim.

Muhammedül Emin ASLAN

ÖZET

Yüksek lisans Tezi

FARKLI MİNERAL KATKILARININ GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

Muhammedül Emin ASLAN
Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

Geopolimer harçlar, doğal minerallerin alkalilerle aktive edilmesi sonucu üretilen malzemelerdir. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül geopolimer harçlar potasyum silikat ve potasyum hidroksit gibi alkalilerle aktive edilmektedir. Geopolimerlerin kullanımı ve özellikleri, organik kimya, fizikokimya, mineroloji, jeoloji ve mühendislik teknolojisi alanlarında araştırılmaktadır. Ayrıca uygulama alanları da oldukça fazladır. Bu çalışmada uçucu kül ve cüruf farklı alkalilerle aktive edilerek 9 farklı karışım oluşturulmuştur. Bu karışımlardan oluşan numunelere su kürü ve buhar kürü uygulanmıştır. Kürden çıkarılan numuneler deney süresi gelinceye dek kür odasında muhafaza edilmiştir. Yapılan bu çalışmada numunelere 3,7,28 günlük süre zarfında basınç, eğilme deneyleri uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Ayrıca elde edilen numunelere 50 ve 100 döngü olmak üzere donma-çözülme deneyi yapılmış ve sonuçlar bir grafik oluşturularak belirlenmiştir. Nihai sonuçlardan ideal karışım oranları farklı kür şartlarına göre belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, cüruf, geopolimer, geopolimer harçlar, mineral katkı

2019, 69 sayfa
Bilim Kodu: 91

ABSTRACT

Master of Science Thesis

THE EFFECTS OF DIFFERENT MINERAL ADDITIVES ON FEATURES OF GEOPOLYMER GROUTS

Muhammedül Emin ASLAN

Kastamonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hasbi YAPRAK

Abstract: Geopolymer grouts are materials which are produced by as a result of naturel minerals are activated by alkali ones. Blast furnace slag and fly ash geopolymer grouts are activated by alkalis like potassium silicate and potassium hydroxide. Features and use of geopolymers are being researched in the filds of organic chemistry, physical chemistry, mineralogy and engineering technology. Moreover, geopolymers have quite a lot of application areas. In this research, fly ash and slag are activated by different alkalis and 9 distinct mixtures were formed. Hydro-cure and steam cure were applied to the samples that were formed from these mixtures. Samples which are taken out of the cures are protected in the curing room till the experiment time comes. In this study, pressure and bending experiments were applied to the samples in the time period of 3, 7, 28 days. Obtained experiment results are evaluated by analysis of variance. Moreover, 50 to 100 cycles freeze- thaw experiments are carried out to the samples and the results were determined by creating a graph. From final results, ideal mixture ratio was determined according to different cure conditions.

Key words: Fly ash, slag, geopolymer, geopolymer grout, mineral additive

2019, 69 pages

Science Code: 91

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez programımın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön vererek yardım ve bilgi konusunda bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ‘a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince her türlü desteğini ve yardımını, bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Selçuk MEMİŞ ve Dr. Öğretim Üyesi Gökhan KAPLAN hocalarıma teşekkür ederim.

Ayrıca değerli arkadaşlarım Oğuzhan ATAŞ, Metin TALASLIOĞLU, Raşit OĞUZ ‘a verdikleri desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Muhammedül Emin ASLAN
Kastamonu, Ekim, 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI.....	ii
TAAHHÜTNAME.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
TABLolar DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Geopolimer	3
2.1.1. Geopolimer Terminolojisi.....	5
2.1.2. Geopolimerlerin Hammaddesi	6
2.1.3. Geopolimerlerin Aktivasyonu.....	8
2.1.4. Geopolimerlerin Kimyası	10
2.1.5. Geopolimerlerin Dayanıklılığı.....	12
2.1.6. Geopolimerlerin Kürü.....	13
2.1.7. Geopolimer Harçların Kullanım Alanları	14
2.2. Alkali Aktivatörler	15
2.3. Uçucu Kül.....	16
2.3.1. Uçucu Külün Kullanım Alanları.....	17
2.3.2. Uçucu Külün Sınıflandırılması	18
2.3.3. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri	19
2.3.4. Uçucu Külün Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri.....	21
2.4. Cüruf.....	22
2.5. İlgili Araştırmalar	23
3. MATERYAL VE METHOT	30
3.1. Materyaller	30
3.2. Methot	31
3.3. Basınç, Eğilme, Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları	35
3.4. Donma-Çözülme Deney Sonuçları.....	55
4. SONUÇLAR	60
5. KAYNAKÇA.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CaO	Kalsiyum oksit
SiO ₂	Silika
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
Fe ₂ O ₃	Demir(3) oksit
CaSO ₄	Alçıtaşı
Ca (OH) ₂	Kalsiyum hidroksit
Si	Silisyum
MgO	Magnezyum oksit
SiH ₄	Polisilan molekülü
SiO ₃	Silikat
Al	Alüminyum
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Kaolinit
Na ₂ O	Sodyum oksit
KOH	Potasyum hidroksit
K ₂ SiO ₄	Potasyum silikat
KH ₂ PO ₄	Monopotasyum fosfat
YFC	Yüksek fırın cürufu
NaOH	Sodyum hidroksit
Mg	Magnezyum
Ca	Kalsiyum
P	Fosfor

Kısaltmalar

Pc	Portland çimentosu
Mpa	Mega paskal
UK	Uçucu kül

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Geopolimerlerin moleküler yapısı	11
Şekil 3.1.Numune kalıpları	32
Şekil 3.2.Basınç ve eğilme cihazları	32
Şekil 3.3 Yayılma tablası ve harç numuneleri.....	33
Şekil 3.4.Buhar kürü uygulanmış numuneler.....	34



TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri	22
Tablo 3.1. Malzeme karışım oranları	31
Tablo 3.2. Genel faktör regresyonu: Basınca dayanımı (3 Gün)	35
Tablo 3.3. Genel faktörler regresyon: Basınç dayanımı (7 gün).....	35
Tablo 3.4. Genel faktörler regresyon: Basınç dayanımı (28 gün).....	36
Tablo 3.5. Genel faktörler regresyon: Eğilme dayanımı (3 gün)	37
Tablo 3.6. Genel faktörler regresyon: Eğilme dayanımı (7 gün)	37
Tablo 3.7. Genel faktörler regresyon: Eğilme dayanımı (28 gün)	38
Tablo 3.8. Genel faktörler regresyon: Birim hacim ağırlık (3 gün)	38
Tablo 3.9. Genel faktörler regresyon: Birim hacim ağırlık (7 gün)	39
Tablo 3.10. Genel faktörler regresyon: Birim hacim ağırlık (28gün).....	39
Tablo 3.11. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 3 günlük basınç dayanımları	40
Tablo 3.12. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 7 günlük basınç dayanımları	41
Tablo 3.13. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 28 günlük basınç dayanımları	42
Tablo 3.14. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 28 günlük birim hacim ağırlıkları	43
Tablo 3.15. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 7 günlük birim hacim ağırlıkları	43
Tablo 3.16. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 3 günlük birim hacim ağırlıkları	44
Tablo 3.17. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 3 günlük eğilme dayanımları	45
Tablo 3.18. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 7 günlük eğilme dayanımları	46
Tablo 3.19. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 28 günlük eğilme dayanımları	47
Tablo 3.20. Kür 1 ve 2 ye göre 28 günlük ortalama birim hacim ağırlıkları	48
Tablo 3.21. Kür 1 ve 2 ye göre 7 günlük ortalama eğilme dayanımları	49
Tablo 3.22. Kür 1 ve 2 ye göre 28 günlük ortalama eğilme dayanımları	50
Tablo 3.23. Kür 1 ve 2 ye göre 7 günlük ortalama basınç dayanımları	51
Tablo 3.24. Kür 1 ve 2 ye göre 28 günlük ortalama basınç dayanımları	52
Tablo 3.25. YFC/UK ye göre 28 günlük ortalama basınç dayanımları	53
Tablo 3.26. 28 günlük ortalama basınç dayanımına kür,yfc/uk ve K_2SiO_4/KOH oranları etkisi	54
Tablo 3.27. 28 günlük en yüksek basınç dayanımına kür,yfc/uk ve K_2SiO_4/KOH oranları etkisi	55
Tablo 3.28. 50 döngü buhar kürü basınç dayanımları (Mpa).....	56
Tablo 3.29. 100 döngü buhar kürü basınç dayanımları (Mpa).....	56
Tablo 3.30. 50 döngü su kürü basınç dayanımları (Mpa)	57
Tablo 3.31. 100 döngü su kürü basınç dayanımları (Mpa)	57

Tablo 3.32. Karışım serilerine göre 28 günlük buhar kürü basınç dayanımları (Mpa)	58
Tablo 3.33. Karışım serilerine göre 28 günlük su kürü basınç dayanımları (Mpa)	58



1. GİRİŞ

Çimento; CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi bileşenlerin uygun sıcaklıkta pişirilip isteğe göre katkı maddelerinin eklenip öğütülmesi sonucu meydana gelir. Bu mineralleri oluşturan hammaddeler; kalker, kil ve ayrıca bunların doğal orantılanmış hali olan “marn”dır. Kireçtaşıdan veya kalkerden çimento için gerekli olan kalsiyum karbonat elde edilir. Kilden ise silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksit gereksinimleri karşılanır. Eğer kilden alüminyum ve demir oksit ihtiyacı karşılanamıyorsa hammadde karışımı olan farine yeterli oranlarda kuvars ve demir mineralleri eklenir. Sedimanter oluşumlu bu kayalar doğada rahatça bulunabilirler. Ayrıca bunların yanında istenilen özelliğe ve niteliğe göre çimentoya çeşitli hammaddeler ilave edilir. Bunlar puzolonik maddeler, demir ve alüminyum cevheri, doğal alçı ve yapay alçı olarak sıralayabiliriz. Örneğin Portland çimentosuna priz ayarlayıcı olarak öğütme aşamasında yaklaşık % 3-5 oranında anhidrit (CaSO_4 , alçıtaşı) ilave edilir.

Dünyadaki çimento üretimi ve talebi günden güne artmaktadır. 2009 yılında, Dünyadaki toplam çimento üretimi üç milyar tonu aşmış, 2012 ve 2015 yıllarında ise toplam çimento üretimi sırasıyla yaklaşık 3,6 ve 4,18 milyar tona ulaşmıştır. Gelişmekte olan ülkelerde PC üretimi önemli ölçüde artmaktadır. 2020 yılına kadar çimento talebinin 1990'lara kıyasla yaklaşık %115– 180 oranında artabileceği tahmin edilmektedir. Bu, 2050 yılında %400'e veya 2050 yılına göre %200'e ulaşabilir. Bu, dünya çapında CO_2 salınmasından dolayı başlayan iklim değişikliğinin mevcut durumunda, doğal afetlerin ortaya çıkması, deniz suyu seviyesinin yükselmesi vb. ile sonuçlanan özel bir durum olarak düşünülmektedir. Çimento üretimi sadece çevresel bir soruna neden olmakla kalmaz, aynı zamanda büyük miktarda el değmemiş malzemenin de kullanılmasına sebep olur. Bir ton çimento üretimi için bir buçuk ton eldeğmemiş malzeme kullanılmaktadır. Buna ek olarak, çimento üretimi büyük enerjiye ihtiyaç duyar ve paha biçilmez bir malzeme olarak tekrar kullanılır.

Çimento üretiminin çevresel etkisinin azaltılması için, daha az doğal kaynağın kullanılmasına ve daha az karbondioksit yayan enerji kaynağı gerektiren pc nin alternatiflerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla yanan kömürden elde edilen uçucu

kül ve demir üretiminde yan ürün olarak oluşan cüruf gibi doğal atıkların karıştırılması ile yeni bir malzeme üretilmekte ve geopolimer olarak adlandırılmaktadır.

Yapay veya doğal puzolanlar, dâhil oldukları çimento ve beton sistemlerinde hidrasyonla oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkileşimde bulunarak bağlayıcı özelliği olan ek bileşenler oluşturmakta ve betonu, puzolan kapsamayan normal Portland çimentolu bir betona oranla, yıpratıcı dış etkilere karşı dayanıklılık gücünü arttırmaktadır. Beton içinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan yapay puzolanlardan biri de, demir/çelik fabrikalarında pik demirin üretim sürecinde ortaya çıkan endüstriyel atık durumundaki granüle yüksek fırın cürufıdır. Yüksek fırın atıkları öğütülerek ince taneli hale getirildiklerinde puzolanik nitelik sergilediklerinden, beton içine öğütülmüş biçimde granüle yüksek fırın cürufu eklenmesi, taze ya da sert hale gelmiş betonun niteliklerini optimize etmekte, betonu hiç cüruf kapsamayan normal bir betona göre agresif çevresel koşullara karşı daha dayanıklı duruma getirmektedir.

Günümüzde ise kendiliğinden yerleşebilir özelliklere sahip epoksi zemin kaplamaları olarak bilinen polimer kompozitler yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Geopolimerler de, doğal minerallerin kimyasal bileşimlerinin ve kristal içeriklerinin farklı methodlarla değiştirilmesi sonucu üretilen malzemelerdir. İnorganik polimer olarak da bilinen geopolimerler hem kristalin, hem de amorf yapılı olabilmektedir. Geopolimerler veya alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, çeşitli endüstriyel atıkların aktivasyonu ile üretilen yeni bir bağlayıcı türüdür. Çevresel, ekonomik ve teknik avantajlarından ötürü son yıllarda bu bağlayıcılar üzerinde yapılan çalışmalar oldukça artmıştır.

Yapılan bu çalışmada uçucu kül ve cüruf belirli oranlarda karıştırılarak potasyum hidroksit, potasyum silikat ile aktive edilerek oluşturulan geopolimer harçların dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Zonguldaktan getirilen cüruf ve öğütülerek kullanılan uçucu kül ile birlikte yerli potasyum silikat (Ege Kimya) kullanılmıştır. Deneylerde yerli potasyum hidroksit (Borkim) kullanılmış olup, deneyde kullanılmadan önce hazırlanarak 24 saat içinde kullanılmıştır.

Çalışmada ülkemizdeki atık malzeme olarak bulunan uçucu kül ve cürüfun kullanılarak çimento üretiminden kaynaklı çevresel kirliliğin azaltılması ve bu malzemelerin inşaat sektöründe çimento yerine daha ekonomik bir malzeme olarak kullanılması amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Geopolimer

1970’li yıllarda Fransa şehirlerindeki özellikle ahşap ve çelik binalarda meydana gelen yangınlar neticesinde farklı bir kaplama malzemesi kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Kapı ve pencerelerde kullanılan Poli-Vinil-Klorür yalıtım da kullanılan Poli Üretan gibi organik kimya ürünü termoset polimerlerin yanmazlık özelliği sergilemesi mümkün değildir. Çünkü organik polimerlerin içeriğinde bulunan petrol türevi karbon içeren monomerler yanıcıdır (Davidovits, 2008).

Yanmazlık özelliği sadece minerallerde bulunur. Silisyum (Si) ve organik kimyanın temel elementlerinden olan karbon (C) elementi ile periyodik tabloda atom özellikleri bakımından aynı grupta yer almakla birlikte bir alt periyottadır. Bu durum ametal olan karbondan farklı olarak silisyum elementinin metaloit özellikleri olduğunu gösterir. Metaloidler kimyasal bakımdan ametal gibi davranmakta ve yarı iletken özellikleri bakımından ise metal özellik göstermektedirler (Brady ve Holum, 1996).

Bir metaloid olan silisyumun ionizasyon enerjisi de karbona oranla daha düşüktür. Silisyum 4 elektronunu verme eğiliminde olan bir katyondur. Organik kimya ürünü hidrokarbon bağlarından farklı olarak, Si elementini hidrojen ile doyurmak oldukça zor bir kimyasal işlem olmakla birlikte, 1912 yılında Alman bilim adamı Alfred Stock (SiH_4) polisilan molekülü zincirlerini elde etmiştir. Ancak polisilan molekülleri kararlı olmadıkları için oldukça tehlikelidirler ve polimerizasyon zincir sayısı en fazla 4 olmaktadır. Silisyumun oksijen ve diğer elementlerle gerçekleştirdiği bileşikler daha kararlı bir özellik sergilemektedir. Bu da daha sıkı

kristalize ve yanıcılığı az olan malzeme yapısını sağlayacaktır. Silikat (SiO_3) molekülleri ile oluşmuş piroksen vollastonit kristalleri birer kayaç örneği olduğu gibi doğadaki kuvarz SiO_4 bileşiği ise en sert taştır. Kuvarzı yapay olarak üretmek oldukça zordur. Ancak farklı element ve bileşiklerin silikatlarla (SiO_2) kovalent bağlı polimerler oluşturmasıyla üç boyutlu yarı kristal amorf yapıda basınç ve yanma dayanımı yüksek malzemeler elde edilebilmektedir. Buradan hareketle, silika moleküllerinin zincir bağlarından meydana gelen silokson ya da silikatmoleküllerinin (AlO_4) aluminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile üretilen polisialatların keşfi geopolimer kimyasının temellerini oluşturmaktadır (Kapkaç, 2013).

Geopolimer olarak bilinen polimerler, aluminosilikat esaslı inorganik polimerlerdir yani geokimyasal kaynaklı polimerler sayılmaktadır. Bu reaksiyonların başlaması için silisyum (Si) ve alüminyum (Al) ve alkali çözelti hammadde olarak gereklidir. Geopolimerlerin özellikleri, içerdiği Si-Al oranına ve kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) gibi bileşenlerinden büyük ölçüde etkilenmektedirler (Davidovits 1991; Barbosa et al. 2000). Geopolimerleşme aluminosilikatlar arasında yüksek alkalitesi olan ortamlarda meydana gelen kimyasal reaksiyonlardır ve sonuçta $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$ bağları oluşmaktadır (Davidovits 1982; Davidovits 1991; Davidovits 1994C; Van Jaarsveld vd. 2003).

Geopolimer çok iyi sergilemiş olduğu fiziksel ve kimyasal içerikleriyle; hazır yapı sanayisi, kullanılmakta olan yapı malzemeleri, heykeltçilik ve süsleme alanları, beton içerikli yol kaplamaları, zemin onarma, zararlı ve nükleer atıkların depolanması, farklı seramik malzeme üretimi, kötü iklim şartlarına ve ısıya dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihi yapıların statiksel kısımlarının onarılması, uçak ve yarış arabası sanayisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir. Seçilen teknolojinin ilerlemişlik seviyesine, belirlenen kimyasal içeriğe göre ve toprak içerikli malzemede yapılan fiziksel iyileştirmelerle geopolimere diğer seramik malzemelerde olduğu gibi istenilen fiziksel içerikler kazandırılabilir (Davidovits, 2008; Pinto, 2005). Örneğin, kaplama refrakter malzemesi olarak da kullanılan geopolimerin çelik adhezyonu, kil taneciklerinin daha ince öğütülmesi ile sağlanır. Ayrıca geopolimer kimyası ile ilgili bilgiler bugün Mısır Piramitlerinin

gizemini, Roma ve Horasan harçlarının kimyasal yapısını da aydınlatmaktadır. Doğada aglomerasyon sonucunda oluşan jeolojik kayaçların laboratuarda jeolojik bir bağlayıcı kullanılarak yapay reaglomerasyon ile sentezlenebileceği fikri feldispatoitler gibi 3000 yıllık kayaçların oluşum mekanizmasını ve arkeolojik kazılar sonucunda ortaya çıkan seramiklerin üretim metodunu, kalıntı örneklerine uygulanan, X ışını difraksiyon deneyleri ve NMR-FTIR deneylerinin sağladığı mineral kompozisyon ile ilgili veriler geopolimer kimyası ile açıklanabilmektedir (Davidovits, 2008).

2.1.1. Geopolimer Terminolojisi

Geo sözlükte yeryüzüne ait, dünya ile ilgili anlamlarına gelen bir önektir. *Poli* çok, *mer* ise en az iki atomun belirli bir düzen içinde dizilmesi ile oluşmuş küçük ve basit moleküler birim demektir. *Polimer*, çok sayıda merin birleşerek daha büyük merlere dönüşmüş ürünlerin genel adıdır. Eğer *mer* veya *monomerler* hidrojen ve karbon atomlarından oluşuyorsa, meydana gelen polimere organik polimer veya hidrokarbon polimeri; eğer silisyum, alüminyum ve oksijen gibi atomlardan oluşuyorsa, meydana gelen polimere inorganik polimer adı verilir.

Geopolimer özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondensasyon sonucu oluşan kovalent karmaşık zincir bağlı polimerler kurması ile oluşur. Geopolimer terimi 1979 yılında Davidovits tarafından yaratılarak uygulanmıştır. Siliko-alüminatlara dayalı geopolimerlerin kimyasal tanımı için poli(sialat) önerilmiştir. Sialat, silikon-okso-alüminat'ın bir kısaltmasıdır. Polisialatlar, amorfıtan yarı-kristaline uzanan oksijen ile IV-kat koordinasyonunda yer alan Si^{4+} ve Al^{3+} içeren polimer zinciri ve halkasıdır. Yarı kristalden üç boyutlu siliko-alüminat amorf yapılar, geopolimer türleri olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 2002).

2.1.2. Geopolimerlerin Hammaddesi

Geopolimerleşme sürecinde; kalsine kil, cüruf ve uçucu küller yaygınlıkla kullanılan hammadde sınıfıdır. Başka bir deyişle, ilk olarak jeolojik kaynağı kaya formunda olan kaolin kiliyle volkanik küller ve ikinci olarak da sınavi atık ya da alt malzemelerden uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, geopolimer hammadde kaynağını oluşturmaktadır (Hwang ve Huynh, 2015). Yoğunlukla metakaolin olmak üzere kalsine killeri, oransal olarak geopolimer oluşumunda ağırlıklı bir şekilde kullanım alanı bulmasına karşın plaka benzeri parçacık formlarından ötürü beton üretimi sırasındaki fazla su gereksinimi ve poroziteye yol açtıklarından çok uygun değillerdir. Cüruf ve uçucu kül ise iki kısımlı geopolimer üretimi için daha elverişlidir.(Kürklü, 2016).

Davidovits (1994) uçucu kül, pirinç kabuğu külü, granüle yüksek fırın cürufu, metakaolin, silis dumanı gibi ek bağlayıcı maddelerin kullanımının, hem de Portland çimentosuna alternatif olabilecek bağlayıcıların geliştirilmesinin büyük önem taşıdığını ifade etmektedir. Bu yüzden geopolimer teknolojisi beton endüstrisine Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı olarak geliştirilmesi önemle önerilmiştir.

Songpiriyakij vd. (2010) çalışmalarında, yüksek miktarda silis kaynağı olan pirinç kabuğu ve ağaç kabuğu külü (RHBA), uçucu külle yer değıştirerek geopolimer üretiminde kullanmışlardır. Bu amaçla SiO_2/Al_2O_3 oranı 4.03-1035 gibi çok geniş bir aralıkta tutularak, basınç dayanımı, reaksiyonun derecesi ve geopolimerlerin mikro yapıları üzerine SiO_2/Al_2O_3 oranının etkisini gözlemlemişlerdir. SiO_2/Al_2O_3 oranının optimum değeri 15.9 olduğu ve bu değerde test edilen tüm günler için en yüksek basınç dayanımına ulaşıldığı, ayrıca hem ana malzemelerin reaktivitesi hem de kalıp kalitesinin geopolimer harcının basınç dayanımını geliştirmede katkıda bulunduğunu saptamışlardır.

Jaarsveld vd. (2003) çalışmalarında, uçucu kül bazlı geopolimerlerin nihai yapısı ve fiziksel özellikleri, ham malzemenin su içeriğı, termal geçmişı, partikül boyutu, kristalinite veya amorfisite derecesi gibi çeşitli parametrelere bağı olduklarını göstermişlerdir. Değişik yapısı olan ucucu küllerin yüksek alkali ortamdaki çözünme davranışını ve erken dayanımlarını incelemek için farklı kaynaklardan elde ettikleri

uçucu küllerle ürettikleri geopolimer harçların özelliklerini araştırmışlardır. Ön çalışmaları uçucu kül parçacıkların zetapotansiyeli ve kalsiyum içeriği üretilen geopolimer harçların priz başlangıcı ve priz sonu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, uçucu küllün kalsiyum içeriği dayanım gelişimi üzerine büyük bir rol oynadığını sonucuna varmışlardır.

Tho-in vd. (2012) çalışmalarında, yüksek kalsiyumlu uçucu küllün geopolimer bağlayıcı özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmişler. Sonuç olarak, yüksek kalsiyumlu uçucu külün geopolymer bağlayıcı olarak kullanılması, tatmin edici mekanik özelliklere sahip olan bir beton üretmek için kullanılabileceğini rapor edip, bu tür betonun yoğunluk-boşluk içeriği, basınç dayanımı-yoğunluk ve basınç dayanımı-boşluk içeriğinin geleneksel betona benzer olduğunu sonucuna varmışlardır.

Bilim vd. (2012), farklı seviyelerde çimentonun yerini alan yüksek fırın cürufu harçların alkalilerle aktive edilmesini araştırmışlar. Bunun için %0-%100 kadar cüruf seviyelerde ve aktivatör olarak sıvı sodyum silikat kullanarak üretilen harçların karbonatlaşma, basınç ve eğilme dayanımlarını ölçmüşlerdir. Sonuç olarak Portland çimentosu/cüruf karışımı ile üretilen harçların özellikleri tamamen aktive edilmiş cüruf ile üretilmiş harçların özellikleriyle kıyaslandığında daha zayıf olduğunu tespit etmişlerdir.

Fernandez-Jimenez (1999), alkaliler ile aktive edilmiş cürufu harçların mekanik mukavemetlerinin gelişimi üzerinde cüruf özgül yüzeyi, kür sıcaklığı, kullanılan aktivatörün konsantrasyonu ve türü gibi bir dizi faktörün etkisini araştırmışlar ve harçların mekanik davranışını tanımlayan matematiksel modeller kurmuşlardır. Araştırmadan elde ettikleri istatistiksel analiz sonuçlarına dayanarak, davranış üzerindeki en önemli faktörün aktivatör türü olduğunu ve en yüksek mukavemetin sodyum silikat ile yapılan aktivasyon ile elde edildiğini belirten araştırmacılar, elde edilen mekanik mukavemet açısından da kullanılan aktivatörleri, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$ olarak belirlemişlerdir. Davranış üzerinde etkili olan diğer önemli faktörleri ise sırasıyla, aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve cüruf özgül yüzeyi olarak vermişlerdir.

2.1.3. Geopolimerlerin Aktivasyonu

Zivica, (2007), gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat gibi üç farklı aktivatör kullanılarak aktive edilen cürufllu karışımların işlenebilirlik ve priz zamanı üzerinde, 20-31°C arasında değişen kür sıcaklığının ve aktivatör tipinin etkisini incelemiştir. Çalışmasından elde ettiği sonuçlara göre Zivica, alkaliler ile aktive edilmiş karışımlarda, prizin normal Portland çimentolu karışımlara kıyasla oldukça hızlı olduğunu belirterek, karışımların aktivasyonunda kullanılan sodyum silikatın, diğer aktivatörlere kıyasla prizi oldukça hızlandırdığını ve kür sıcaklığındaki artışın, işlenebilirliği azaltarak prizi hızlandırdığını bildirmiştir.

Atiş vd. (2009), alkali kullanılarak aktive edilen ve çimento içermeyen cürufllu harçların priz süresi, kuruma rötresi, basınç ve eğilme dayanımları üzerinde, kullanılan aktivatör tipinin etkisini incelemiştir. Çalışmada, 0.5 su/bağlayıcı oranında tamamen cüruf katkılı olarak üretilen harçların sıvı sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat ile aktivasyonu yapılmış, elde edilen karışımların 7, 28 günlük ve 3 aylık eğilme ve basınç dayanımları ile birlikte 6 aya kadar olan kuruma rötresi ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar, maksimum basınç ve eğilme dayanımlarının sıvı sodyum silikat ile elde edildiğini, buna karşılık bu aktivasyon tipinde ortaya çıkan rötrenin, normal Portland çimentosu ile üretilmiş kontrol karışımından yaklaşık olarak 6 kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan, sodyum karbonat ve sodyum hidroksit ile yapılan aktivasyon neticesinde, kontrol karışımı ile kıyaslanabilecek düzeyde daha mütevazı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, araştırmanın sonucunda, kullanılan aktivatör tipi ne olursa olsun yapılan aktivasyon neticesinde elde edilen priz sürelerinin, Portland çimentolu kontrol karışımına kıyasla, oldukça kısa olduğu ve bunu geciktirmeye yönelik ilave araştırmalara gereksinim duyulduğu bildirilmiştir.

Al-Otaibi (2008) çalışmasında, Portland çimentosu kontrol karışımı yanında, çimentonun %60'ı GGBS tarafından yer değiştirerek karışımlar üretmiştir, ayrıca ilave olarak sadece cüruf ile (cüruf ağırlıkça) %4 ve %6 Na₂O iki doz cam suyu ile alkali aktive edilmiş karışımlar hazırlamıştır. Biri çözelti halinde, biri katı granül şeklinde iki tip cam suyu kullanmıştır. Kullanılan aktivatörün iki şekli, aynı

zamanda, farklı silikat modülü (Ms);çözelti halindeki için 1.65, granül halindeki için modülü ise 1.0 olmuş. Bütün karışımlarda su/bağlayıcı oranı olarak sabit 0.48 oranı kullanılmıştır. Sonuç olarak, geleneksel Portland çimentosu betonuna göre alkali ile aktive edilen cüruf betonlarının daha iyi ve dayanıklı olduklarını tespit etmişlerdir. Aktivatörün dozajı ve silikat modülün artışı basınç dayanımını artırdığını saptanmıştır. Alkali aktive edilmiş cüruf betonların alkali silika reaksiyonu kontrol karışımlara göre daha düşük olduğunu sonucuna ulaşılmıştır.

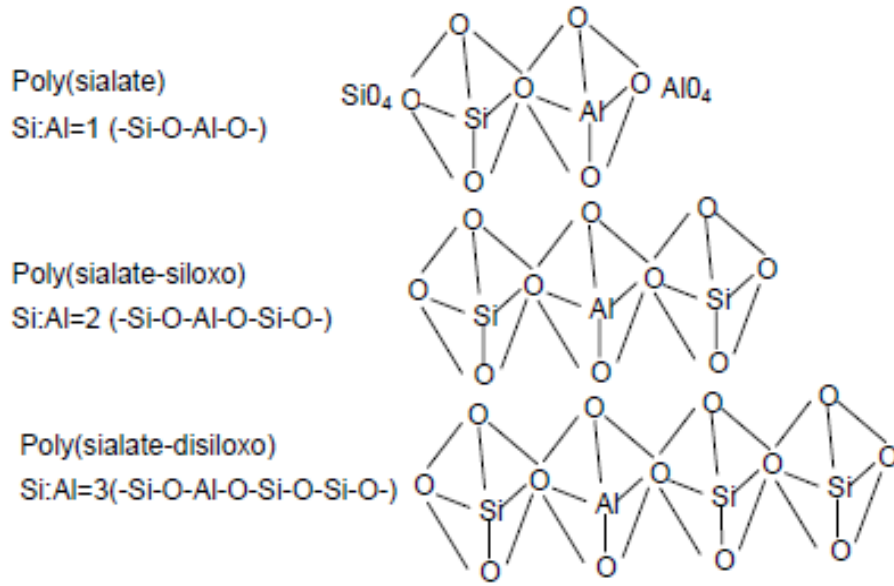
Kolousek vd. (2007), çalışmalarında yeni bir tür alternatif (sodyum silikat içermeyen) geopolimer sisteminin yapısal karakterizasyonunu ve hazırlanmasını sunmuşlardır. Geopolimerlerin reaktif bir ön-maddesi hazırlanmasına dayanarak düşük kaliteli kaolinin Na/K hidroksitlerle doğrudan kalsinasyonu yoluyla geopolimer sentezinin yeni bir yöntemi tanıtmışlar. Sonraki geopolimer matrisin oluşumu alkali silikat çözeltisi ile aktivasyon gerektirmemektedir. Bu kalsinasyon neredeyse tüm alüminyum pozisyonlarının tam tetrahedral koordinasyona dönüşmelerine ve geniş dörtyüzlü SiO_4^{4-} ve AlO_4^{5-} kimyasal bağların oluşumuna yol açmıştır.

Katz (1998), çalışmasında uçucu külün katkılı çimentolardaki reaktivitesini iyileştirmek için uçucu külün bazik bir ortam içindeki aktivasyon mekanizmasını incelemiştir. Uçucu kül aktivasyonu kuvvetli bir baz (NaOH) ile yapılarak farklı konsantrasyonlar, sıcaklıklar ve su/uçucu kül oranları test etmiştir. Bazın konsantrasyonunu 4 mol'e kadar ve sıcaklığı 90 °C'ye kadar artırılması ile basınç mukavemeti değerlerine göre reaktivite derecesinin arttığını bulunmuştur. Aynı zamanda bazın konsantrasyonunu sabit tutup, su/bağlayıcı oranını düşürülerek NaOH/uçucu kül oranı azaltılması basınç dayanımının düşmesine sebep olmuştur. Çalışmanın sonuçları uçucu külün aktivasyonu sadece çözeltinin pH değerine değil, aynı zamanda çözelti/uçucu kül oranına da bağlı olduğunu göstermiştir.

2.1.4. Geopolimerlerin Kimyası

Geopolimerler ve geopolimerik birleşikler, özellikleri ve potansiyel uygulamaları henüz tam keşfedilmemiş seramik malzeme sınıfıdır. Saf metaller sert, inorganik, alüminosilikat esaslı hidrate jellerdir. Na^{+1} , K^{+1} , Cs^{+1} gibi I. grup katyonları ile elektrik yükleri dengelenmiştir. Geopolimerlerin bileşim aralıkları bellidir, ancak düşük bileşimleri $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{M}_2\text{O}.\text{nSi}_2.10\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir. Sonuç olarak geopolimerler inorganik ve genellikle toz şeklinde solüsyon karıştırılmasıyla elde edilirler. Elde edilen hamur plastik kalıpların içerisine dökülür. Karışım, ortam sıcaklık ve basınç şartlarında 24 saat bekletilir. Geopolimerler polimerlere ve grafitte yapışmazlar, böylelikle çeşitli şekillerde net ölçülerde üretilirler. Geopolimerler asit ve termal etkilere karşı daha dirençlidirler (Bell vd. 2006).

Geopolimerler alüminosilikat minerallerinin alkali aktivasyonundan amorf moleküllerin üretilmesiyle oluşurlar. Pozitif iyon olarak alkali metalin varlığı geopolimer yapısı için gereklidir. Çünkü alkali metal IV katlı koordinasyonda negatif yüklü alüminatı dengeler. Bu geopolimerlerin moleküler yapısı genellikle yüzük veya zincir şeklini alır ve amorf ile yarı kristal aralığında değişir. Büyük ölçüde kristal polimerlerde monomer zincirler, düzensiz sıra bırakmayacak şekilde sıralı satırlar boyunca uzarlar. Amorf polimerler, sıralanmayan düzensiz polimer zincirlerdir. Geopolimerler düzenli düzensiz polimer yapılara sahiptirler ve bu yüzden yarı kristaller olarak adlandırılırlar (McNulty, 2009).



Şekil 2.1. Geopolimerlerin moleküler yapısı

Geopolimerler zeolit eğimli kristal olmayan bağlar olarak yorumlanabilir. Geopolimerler kristal zeolitler gibi aynı altyapılardan oluşurlar, fakat uzun mesafeli düzenleri yoktur. Geopolimerler özel reaksiyon koşullarının (kür sıcaklığı, süresi) yanı sıra katı hammaddenin ve aktivatör solüsyonunun bileşimine bağlı olarak sertleşmeden sonra değişken kristal özellik gösterirler (Buchwald vd. 2009).

Wagh (2011) yaptığı çalışmada MgO ile KH_2PO_4 tepkimesi ile oluşan fosfat tabanlı geopolimer sentezlenmiştir. Yüksek kristal yapılar meydana getirmişlerdir ve bu yapılar yaklaşık 20.69 MPa basınç dayanımına sahiptirler.

Geopolimer konsepti ile üretilen gerek düşük teknoloji ve gerekse gelişmiş teknoloji tüm üretimlerde molekül yapısını belirleyici olan, jeolojik toprak, kaynak ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si:Al molar oranıdır (Davidovits, 2008). Bu oranın 1 olduğu sistemlerde zeolit kristaline benzeyen tuğla seramik ve yangından koruyucu ürünler elde edilebilir. Bu oran 2 olduğunda yine seramik amorf arası yapıda geopolimer çimento ve beton sentezlenebildiği gibi biraz daha ileri teknoloji ile radyoaktif atıkların istiflenmesi için gerekli yapılar üretilebilmektedir. Si:Al oranının 3 olduğu durumlarda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta fırın kaplamaları, cam elyaf yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için 1000°C dayanabilen malzemeler üretilebilmektedir. Si:Al oranı 3'ün üzerine

çıkıldığında ise dolgu malzemesi köpükler üretilebilir. Si:Al>15 olduğunda 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer pastası oluşmakta ve bu yapı savaş uçaklarında kullanılabilecek nano kompozit yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanılabilmektedir. Geopolimer ile gelişmiş teknoloji seramik ürünlerin üretiminde reaksiyon stokiometrisi iyi gözlenmelidir. Mineral esaslı tepkimelerde hammaddenin önemli bir kısmı reaksiyona girmez. Ancak gerekli molarite ve mol kütlelerinde alkali soda ve tuzların etkilmesi ve ısı etkilerinin tepkime entalpilerinin değerlendirilerek uygulanmasına göre istenilen fiziksel özellikteki kompozit ya da monolitik malzemeler elde edilir. Mikromoleküler yapının incelenmesiyle ani soğutma ve ikincil fırınlama işlemleri sonucunda emayeleşme, yüzey parlaklığı gibi dekoratif özellikler geopolimerde gözlemlenmektedir. (Davidovits, 2008).

Reddy vd. (2011) tarafından yapılan çalışmaya göre, geopolimer malzemelerle ilk olarak 1978'de Davidovits çalışmıştır. Çalışılan bu malzemelerin eski Roma antik tiyatrolar ve Mısır piramitlerinde kullanılan malzeme özelliklerine benzer olduğu belirtilmiştir. Geopolimerler, Portland çimento gibi dayanım sağlayan C-S-H (kalsiyum silika hidratları) oluşturmazlar. Ancak yapısal dayanım elde etmek için, silika ve alümina gibi aktivatörler kullanılmaktadırlar. Geopolimerlerin iki ana bileşeni vardır. Bunlar, malzeme ürünleri ve alkali sıvılardır. Bu malzemeler; uçucu kül, cüruf, pirinç kabuğu külü, silis dumanı gibi bol miktarda Si ve Al içeren maddelerdir. Geopolimerler diğer alüminosilikat malzemeler (örneğin alüminosilikattan jeller ve zeolitler) ile karşılaştırıldığında farklıdır. Geopolimerlerin katı yoğunluk oranı alüminosilikat malzemelerden daha yüksektir. Bu polimerizasyon işlemi hızlı kimyasal reaksiyon gösterir ve üç boyutlu polimer zincir ve halka yapılı Si-Al Si-OAl-O bağlarını oluşturur. Geopolimer, Portland çimentolu betona benzeyen şekildeki formunu elde ettikten sonra da iç tepkimelerini sürdürmektedir.

2.1.5. Geopolimerlerin Dayanıklılığı

Geopolimerlerin kullanımındaki avantajlardan bir tanesi onlardan meydana gelen nihai bağlayıcı malzemesinin dış etkilere karşı yüksek performansdır. Bu da geopolimerlerin boyut stabilitesine bağlıdır, özellikle çok düşük C-S-H olan

geopolimer bileşimlerde. Geopolimerlerdeki alkali agrega reaksiyonu kalsiyum içeriğinin düşük oranına bağlı olarak çok etkili olmamaktadır. Yine aynı sebepten dolayı geopolimerler sülfat atağı ve deniz suyuna karşı geleneksel bağlayıcılara göre daha dayanıklıdır. Si/Al oranı bire yakın olan matrislerde, zor atmosferik şartlar altında ve dış etkenler etkisinde ayrışma meydana gelmektedir (Kamseu vd. 2010).

Puertas vd. (2003), Polipropilen fiber ile güçlendirilmiş alkali çimento harçlarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarından şu sonuçlar çıkarılmıştır; alkalilerle aktive edilmiş harçların dayanım gelişimini etkileyen ana faktör geopolimerlerin matris yapısıdır. Aktive edilmiş cüruflu harçlar, eşit şartlardaki Portland çimentolu harçlardan daha yüksek dayanım gelişimi göstermişlerdir. Alkali harçlar Portland çimentolu harçlara göre düşük elastisite modülü göstermişlerdir. Aktive edilmiş cüruflu harçlar, yüksek rötre değerleri sergilemiştir. Cüruflu harçların aktivasyonu, mekanik dayanımlarını artırmış ve donma-çözülme devirleri karşısında yüksek stabilite göstermişlerdir.

Olivia ve Nikraz (2011), düşük kalsiyum içeren uçucu kül geopolimer betonun mukavemeti gelişimini, su emme ve su geçirgenliği ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Farklı su/bağlayıcı, agrega/bağlayıcı, agrega gradasyonu ve alkalın/uçucu kül oranı varyasyonlarında üretilen geopolimer karışımlar hazırlamışlardır. Sonuçlarında, uçucu kül geopolimer betonun su/bağlayıcı madde ve agrega/bağlayıcı madde oranı azaltılarak mukavemetin arttırdığını göstermişler ve su/bağlayıcı oranının azaltılması, uçucu kül içeriğinin artırılması ve düzgün gradasyonu sahip olan agrega kullanarak düşük kalsiyum uçucu kül geopolimerlerin su emmesini azaltmıştır. Sonuç olarak uygun parametrelerde kullandığında düşük kalsiyum uçucu kül kullanarak iyi kalitede geopolimer beton üretilebildiğine ortaya koymuşlardır.

2.1.6. Geopolimerlerin Kürü

Collins ve Sanjayan (2000), kürleme azlığının alkali ile aktivesi gerçekleştirilmiş cüruf içeren betonlarda ölçülen mikro çatlak düzeyini artırdığını ve aynı alkali ile aktive edilmiş cüruflu betonlardaki mukavemet oluşumunun yetersiz kür şartları sebebiyle önemli ölçüde azaldığını, yapılarda kullanıldığı takdirde bu betonların çok iyi kür edilmesinin önemli olduğunu söylemiştir.

Criado vd. (2005), çalışmalarında uçucu küllerin alkalın aktivasyonunu ve kür koşulların reaksiyon ürünlerinin niteliğine olan etkisini araştırmışlar. Çalışmalarına göre kür koşullarının alkali aktive edilmiş uçucu kül çimentoların üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Kür koşulların uygun olmadığı zaman, hızlı bir karbonatlamaya yol açmaktadır. Karbonlaşmayı favorize eden kür koşulların mekanik dayanım gelişimini olumsuz yönde etkiler. Karbonatlaşmanın başlangıcı pH seviyesinin düşmesini içerir, bu yüzden uçucu külün aktivasyon hızı ve mekanik dayanım gelişimi belirgin bir şekilde yavaşlamaktadır. Bu karbonatlaşma süreci ancak yüksek nem koşulları altında kontrol edilmiş bir kür rejimi ile önlenabilir.

Pangdaeng vd. (2014), çalışmalarında katkı maddesi olarak normal Portland çimentosu içeren yüksek kalsiyum uçucu kül geopolimerlerin farklı kür koşulları altındaki, mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını incelenmişlerdir. Uçucu kül, bağlayıcının ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 dozajlarda Portland çimentosu ile yer değiştirilmiştir. Geopolimer harçların priz zamanını, mikro yapılarını ve yayılmalarını, basınç dayanımlarını, porozitelerini ve su emmelerini araştırmışlar. Buhar geçirmez membran kürü, su içinde ve sıcak kür olarak üç kür yöntemi kullanmışlardır. Sonuç olarak, Portland çimentosunun katkı maddesi olarak kullanımı, yüksek kalsiyum uçucu kül geopolimerlerin özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuşlar. C-S-H ve C-A-S-H jellerin oluşumuna bağlı olarak harçların dayanımlarını arttığını görmüşler. Kür yöntemlerinin de önemli ölçüde geopolimer harçlarının özelliklerini etkilemiştir. Buhar geçirmez membran kürü ve su kürü Portland çimentosunun ek hidrasyonuna yol açmıştır ve daha yüksek basınç dayanımı sağladığı görülmüştür. Sıcak kürün ise erken basınç dayanımı arttırmıştır.

2.1.7. Geopolimer Harçların Kullanım Alanları

Son yıllarda geopolimer tipi mantolama kaplama malzemeleri araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır. Özellikle yangına dayanıklı kaplama malzemeleri çimentomsu malzemeler, yangın dayanımını artırır, boyalar, lifli malzemeler gibi çeşitlere ayrılır. Fakat bu alanda en çok yangın dayanımını artırır boyalar ve çimento gibi malzemeler kullanılır. Çimento tipi malzemeler genelde inorganiktir ve ateşle temas ettiğinde yanmaz. Dayanıklı, dirençli ve ucuzdurlar fakat sıradan Portland çimentosundan yapılırlar ve yangına maruz kaldıklarında kavlamadan etkilenecek

dayanımlarını kaybederler. Ayrıca çimentomsu malzemelerin yangın sırasında gerekli korumayı sağlamaları için kalın (koyu) ve ağır olmaları gerekir. Yangın dayanımını artırır boyalar ise alev ısısı ile reaksiyona girerek şişen kaplama tipi boyalardır. Hafif, estetik, pürüzsüzdürler ve ince bir kaplama ile kullanılabilirler. Bu malzemenin en yaygın olarak kullanılanı ise sodyum silikat temelli boyadır. Bu konudaki bir çalışmada araştırmacılar bu iki malzemeyi birleştirerek üstün özellikli bir malzeme üretmek istemişler ve çelik yüzeylere uygulanabilen metakaolin sodyum silikat çözeltisi ile geopolimer tipi kaplama mantolama malzemesini üretmişlerdir (Temuujin vd. 2011).

Geopolimer harçların kullanım alanları normal betonun kullanıldığı her eleman olabilmekle birlikte malzeme olarak normal çimentolu beton gibi yaygınlık kazanmadığından kullanımı fazla popüler değildir. Kullanım alanları genel olarak; istinat duvarları, betonarme su tankları, barajlar ve ön germeli köprüler, zemin stabilizasyonu olarak sıralanabilir. Geopolimer beton harcı kuruma sürecinde çekme miktarı az olduğu için ince ve dar durumdaki yapı elemanlarında da kullanıma uygundur (Kapkac, 2013).

2.2. Alkali Aktivatörler

Genel olarak alkalilerle aktivasyonu yapılmış çimento ve betonlarda kostik alkali veya alkali tuzlar alkali aktivatörler olarak kullanılır. Kimyasal bileşimleri temelinde alkali aktivatörler, kostik alkaliler (MOH), silikasız zayıf asit tuzları (M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF), silikatlar ($M_2O.nSiO_2$), alüminosilikatlar M_2O ($M_2O.Al_2O_3$) ve silikasız güçlü asit tuzları şeklinde kategorize edilmiştir. Bu aktivatörlerin tümü, hem yaygın kullanıma sahip olmakta hem de ekonomik kimyasallardandır (Shi vd. 2006).

Sodyum silikat, $Na_2(SiO_2)_nO$ formülüyle gösterilen kimyasal bileşiklerin ortak adı olmaktadır. En çok bilineni ise sodyum metasilikattır (Na_2SiO_3). Ayrıca su camı-sıvı cam olarak da bilinen bu malzemeler, sulu çözeltide ya da bir katı içinde kullanılabilir. Saf bileşimler renksiz veya beyaz renklidir. Genelde bu kompozisyonlar çimentolar, pasif yangın koruma, tekstil, kereste işleyiciliği, refrakter malzemeler, otomobiller ve başka farklı alanlarda kullanılabilir.

(Kapkaç, 2013). Sodyum hidroksit (NaOH) ise, beyaz renklidir ve nemi çeken özelliğe sahip bir madde olarak suda kolayca çözünür ve yumuşak, kaygan ve sabun hissi uyandıran bir çözelti meydana getirir. Bunun yanı sıra insan dokusuna kaşıntıdırıcı bir etkisi vardır.

Sodyum hidroksit ya da kostik soda, laboratuvarlarda CO₂ gibi asidik gazları yakalamak için kullanılır. Endüstride çok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan sanayii ile petrol rafinelerinde kullanılır. Bir baz olan NaOH, su ile tepkimeye girdiğinde yaklaşık beş dakika içinde sıcaklığı 50°C dereceye çıkmakta ve yaklaşık on beş dakika sıcak kalmaktadır. Özellikle inşaat laboratuvarlarında organik madde belirlenmesinde kullanılmaktadır (Şimşek, 2004).

2.3. Uçucu Kül

Gelişmekte olan birçok ülkenin ekonomik olarak büyümesiyle birlikte enerji ihtiyaçları artmaktadır. Bu da enerji tüketiminin artmasına sebep olmaktadır. Türkiye'deki nüfus artışıyla beraber, yaşama standardının da yükselmesiyle, sanayileşme ve kentleşme enerji ihtiyacı günden güne hızlı bir şekilde arttırmıştır. Büyüyen ihtiyaçlar karşısında mevcut potansiyellerin mümkün olduğu kadar değerlendirilmesi için hızlı bir şekilde harekete geçilmiş ve hidroelektrik ve termik santraller kurulması bir çözüm olarak gerçekleşmiştir. Özellikle endüstriyel yakıt olarak kullanılma imkânı olmayan düşük kalorili kömür yatakları yakınına, büyük kapasiteli termik santraller kurulması enerji üretimini artırma maksadıyla yürütülen çalışmalar arasında büyük önem taşıyan ve en başta gelen çalışmalardan bir tanesidir. Enerji üretiminin artırılmasında tutarlı bir çözüm olarak gözüken kömüre dayalı termik santrallerin sayısının artmasının yanı sıra önemli ekolojik, ekonomik ve teknik sorunları da beraberinde getirebilecek olan kül üretiminin de artmasına neden olmaktadır. Bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması muhtemel çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretimi kaybı vb. konularda da mali ve teknik problemler yaratabilmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Bu tip kömürler termik santrallerde, buhar üreten kazanları ısıtmak amacıyla çoğunlukla pulverize halde yakılır. İnce öğütülmüş kömür tozları önceden ısıtılmış

hava ile karıştırılır ve yanma için kazan içine üflenir. Bu yanma sonucunda farklı özellikteki çeşitli gazlar ve bazı atıklar açığa çıkar. Çoğunlukla, termik santrallerde yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise %35-40'ı külden oluşmaktadır. Oluşan atığın %75-80'lik ilk kısmı, çok küçük tanecikler halinde yanma odasından gazlarla birlikte dışarı çıkar. Bu tanecikler, gazlarla birlikte bacadan havaya çıkarken, elektrostatik filtrelerle veya elektromekanik yöntemler ile tutulup, kül toplayıcı silolara aktarılır. Daha sonraki aşamada ise silolarda konveyör bantlarla yada farklı yöntemlerle, termik santrallerden uzak bir yerde atık olarak kuru yada yaş olarak stoklanmaktadır. Gelişmiş santrallerde, oluşan bu ince malzemelerin %99'u gaz çıkışı gerçekleşmeden önce tutulmaktadır. Uçucu kül, pulverize kömür ile çalışan termik santrallerin, yanma sonucu elde edilen bir yan ürünü olan çok ince kalıntılarıdır. İngiltere'deki gibi bazı ülkelerde bu yan ürüne, pulverize uçucu kül denilmektedir (Baradan vd. 2012).

Uçucu küllerin yapısı büyük oranda silis ve alümininden oluşmaktadır. İçeriğinde silis ve alümin oksitlerin yanı sıra demir oksit, kalsiyum oksit, magnezyum oksit ve karbon bulunabilmektedir. Uçucu küller tanecikleri 1µm-150 µm arasında değişen, amorf yapıya ve küresel şekle sahiptir. Bundan dolayı uçucu küller puzolanik özelliği olan malzemelerdir ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcı özelliği gösterirler (Erdoğan, 2007).

2.3.1. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Pulverize kömür küllerinin kompozisyonları ile ilgili çalışmalar 1900'lerde başlamıştır. Araştırmaların sonucu ABD'de 1914 Engineering News isimli dergide yayınlanmıştır. Bu tür kömür küllerin kompozisyonları ile doğal puzolanların kimyasal kompozisyonu arasında benzerlik görülmesi üzerine, puzolanik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. İlk zamanlarda külleri betonda kullanarak başarılı sonuçlara ulaşılamamıştır, fakat yapılan araştırmalardan pulverize kömür küllerin puzolanik özellik gösterebilmeleri için, yanma sıcaklığının yüksek ve soğuma hızının kısa olması gerektiğini anlaşılmıştır (Erdoğan, 2007).

2.3.2. Uçucu Külün Sınıflandırılması

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi sanayisinin genişlemesiyle meydana gelmiş ve uçucu külün Portland çimentosu içerisinde yer alması ise yine bu tarihlerde başlamıştır. 1937 yılında R.E Davis California Üniversitesinde uçucu küllü betonla ilgili çalışma sonuçları yayımlamış ve bu çalışma ilk şartnamelerin, test yöntemlerinin ve uçucu kül kullanımının temelini oluşturmuştur. 1970'li yıllarda yaşanan enerji üretim maliyetindeki hızlı artış neticesinde, elektrik santrallerinde daha çok kömür harcanmaya başlanmıştır. Bu sebeple uçucu kül üretiminde bir artma meydana gelmiş, uçucu kül tüm dünya genelinde kullanılmaya başlanmıştır (Baradan vd. 2012).

Uçucu küllerin önemli ölçüde kullanılmaya başlanması ise baraj inşaatları yapımı sırasında ve betondaki hidrasyon ısısının düşürmesiyle gerçekleşmiştir. 1940'lı yıllarda ABD'de ilk olarak Hoover ve Hungry Horse barajlarında kullanılmasıyla olmuştur. Türkiye'de ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında kullanılması düşünülmüştür. Daha sonraki yıllarda uçucu küllü betonların daha kolay işlenmesi, geçirimsiz oluşu ve ekonomik olmaları nedeniyle diğer ülkelerde de kullanımları hız kazanmıştır. Termik santrallerde çok ince bir şekilde öğütülerek yakılan kömürden üç farklı kül elde edilmektedir. Göreceli olarak büyük taneli olan baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen "taban külü" Siklon tarzı ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulup uzaklaştırılması ile elde edilen "ham kül" çok ince taneli olup, baca gazları ile taşınan "uçucu kül"dür. Çevreye zarar verecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından ayrılarak havaya karışmaları önlenir. Bu sebeple, küller mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak santral etrafında yada daha uygun alanlarda depolanır. Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan, Yeniköy ve Sugözü termik santralleri çalışmakta olup, bu santrallerden yılda yaklaşık 15 milyon ton, dünyada genelinde ise 600 milyon ton civarında uçucu kül sağlanmaktadır. (Erdoğan, 2007; Baradan, vd. 2012; Kapkaç, 2013)

2.3.3. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin başlıca fiziksel özellikleri tane şekli ve dağılımı, incelik ve yoğunluklarıdır. Bu özellikler taze veya sertleşmiş betonun özelliklerini etkilemektedir. Uçucu külün rengi ve kullanılacağı miktar üretilecek olan betonun rengini etkiler. ASTM C618'e göre uçucu külün inceliğinin yanı sıra dayanım aktivite indisi, homojenliği, su ihtiyacı ve su muhtevası da uçucu külün fiziksel özelliği olarak incelenmelidir. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri elde edildikleri güç üretim tesislerine bağlı olmak üzere oldukça değişir. Bu değişikliklerin nedeni yakılan kömürün bileşenleri, öğütülmedeki inceliği, yanma oranı ve etkinliği, yakma ekipmanının tipi ve uçucu kül toplama sistemi olabilmektedir (Erdoğan, 2007).

Uçucu külün fiziksel özellikleri taze betonun performansını kimyasal özelliklerine göre kıyaslandığında daha fazla etkilemektedir. Bununla beraber uçucu külün inceliği ise pozolanik reaksiyon üzerinde etkili bir rol oynamaktadır.

Tane şekli ve boyutu: Uçucu kül çoğunlukla katı, biraz boşluklu ve küresel şekle sahip taneleri içerir. Boşluklu taneler cenosphere olarak adlandırılır ve muhtevası % 5 ile % 20 arasındadır. Bunlar azot ya da karbondioksit ile doludurlar. Bu tanelerin fazla olması beton üretiminde kullanılacak küllerde istenmez. Çünkü bu taneler boşluklu olduklarından su yüzünde kalmaya çalışırlar ve bitirmeyi zorlaştırdıkları gibi beton yüzeyi üzerinde rengi koyulaşan kısımlar meydana getirirler. Uçucu küllerin tane boyutları 1 ile 150 μ arasında değişir. Genellikle %75' ten fazlası 45 μ elekten geçer. Tane dağılımı genel olarak güç tesisinin etkinliği ve kül toplama sistemi tarafından idare edilir. Mekanik toplayıcılar tarafından tutulan uçucu küller elektrostatik yöntemle toplananlara göre daha kabadır (Türker, vd. 2003).

İncelik: Uçucu külün inceliği pozolanik aktiviteyi ve taze betonun işlenebilirliğini etkiler. Betonun su ihtiyacını ve hava sürükleyici katkı dozajını etkileyebilir. Genel olarak uçucu kül kullanımı betonun su ihtiyacını düşürür ve işlenebilirliğini arttırır da inceliği fazla olan, 45 μ eleği geçen yüzdesini %95'in üzerinde olan uçucu kül su-çimento oranı düşük olan betonlar için su miktarını %1 ile %3 arasında arttırabilir. İnceliğin çok yüksek olması hava sürükleyici katkı maddesinin dozajını arttırır.

Yoğunluk: Normalde uçucu kül yoğunluğu 2.1 ile 2.7 gr/cm³ arasındadır. Uçucu külün yoğunluğu beton özellikleri üzerinde çok az etkiye sahiptir. Yoğunluğun yüksek olması inceliği ile alakalıdır. İnce küller kaba küllere göre daha fazla yoğunluk gösterirler.

Renk: Değişik kaynaklardan elde edilen uçucu küller değişik renklerde olabilir ancak bu renk gri civarında değişir. Bu renk, kullanılan fırınların işletilmesine ve kömürün kalitesine bağlıdır. Uçucu kül içinde yanmamış karbon oranı arttıkça rengi koyulaşır. Bunun yanı sıra demir oksit de uçucu külün rengini etkiler. Yüksek demir oksit içeriği siyaha yakın renk verir. Genelde uçucu küller çimento rengine benzer ya da daha koyu bir renktedir. Uçucu külün rengi bu külle elde edilen betonun mühendislik özelliklerini etkilemez (Atakay, 2006).

Dayanım aktivite indisi: Bu indis uçucu külün puzolanik reaksiyon ve dayanım kazandırma kapasitesini gösterir. İncelik ve toplam eriyebilen silika, alümina ve demir önemli faktörler olup puzolanik reaksiyon oranını ve derecesini belirlerler.

Su ihtiyacı: Uçucu külün su ihtiyacı inceliği tarafından etkilenmektedir. Çok ince küllerle yapılan çimento hamuru kaba olan uçucu küllerle yapılan çimento hamuruna göre oldukça fazla su ihtiyacı gösterir. Ancak küresel şekillerde olan ince taneler genellikle belli bir işlenebilirlik değeri için betonun su ihtiyacında azalmaya neden olur. Bu azalma normal betonla karşılaştırılarak görülür. Uçucu külün su ihtiyacı ASTM C311'e göre belirlenir. ASTM C618 ise uçucu külün su ihtiyacının, uçucu kül içermeyen karışıma oranla maksimum %105 değeri ile sınırlar.

Geçirimsizlik: Pratikte zararlı olacak hacim genişlemeleri ve büzülme gibi bozucu etkilerin uçucu kül karışımında görülmesi istenmez. ASTM C618 hacim genişlemesi ve büzülme yüzdesini 0.8 olarak sınırlandırmış ve yapılacak deneyin ise ASTM C311'e göre yapılması istenmiştir.

Üniformluluk (Homojenlik): Uçucu kül tanelerinin boyutları ve dağılımı belli bir üniformluğa sahip olmalıdır. Uçucu külün üniformluğu inceliğinin ve yoğunluğunun belirlenmesi ile kontrol edilir. ASTM C618'e göre bir uçucu kül

örneğinin yoğunluğu ve inceliği 10 örnekten elde edilen ortalama değerlerden en fazla % 5 sapabilir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

2.3.4. Uçucu Külün Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri

ASTM C 618 standardında uçucu küller F ve C olarak ayrılır. Uçucu küllerin F sınıflandırmasına göre, bitüm içeren kömürden üretilmiş olan ve toplamda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'in üzerinde olan küllerdir. Bu sınıfa ait küllerin bağlayıcılıktan çok puzolanik özellikleri vardır. C sınıfındaki uçucu küller ise, linyit ya da yarı-bitüme sahip kömürden üretilmiş olan ve toplamda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesinin %50'nin üzerinde olduğu küller olmaktadır. CaO yüzdesinin %10'un üzerinde olmasından dolayı yüksek kireçli uçucu küller şeklinde de isimlendirilmektedir. Bu tipteki küllerin hem bağlayıcılık hem de puzolanik özellikleri vardır (Diedrick, 2008).

TS EN 197-1 (2002) sınıflandırmasında ise uçucu küller kalkerimsi (W) ve silisli (V) şeklinde kategorize edilmektedir. V sınıfına ait silisli küller, çoğu puzolanik nitelikleri olan küresel taneciklerden oluşan ince yapılı bir toz olmaktadır ve temelde reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten meydana gelen ve geriye kalanının Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri kapsayan küllerdir. V sınıfı silisli küllerde reaktif kireç (CaO) oranı $< \% 10$, reaktif silis miktarı ise $> \% 25$ olmalıdır. W sınıfından olan kalkerimsi küller de, hidrolik ya da puzolanik niteliklere sahip ince bir toz olarak temelde SiO_2 ve Al_2O_3 'ten meydana gelen, geriye kalanının ise Fe_2O_3 'in yanı sıra diğer bileşenleri de kapsadığı küller olmaktadır. W sınıfı küllerde reaktif kireç oranı $> \% 10$, reaktif silis oranı ise $< \% 5$ olmalıdır (Görhan ,vd. 2009).

Uçucu küllerin mineralojik kompozisyonu, kömürün ihtiva ettiği kil, kuvars, karbonatlar, alçıtaşı ve pirit gibi minerallerle sürecin şartlarına bağlı olmaktadır. Mineralojik yapıda, külün türüne göre değişiklik gösteren bir dağılım söz konusudur. Uçucu kül, kristalsiz ve kristal yapılı bileşenlere sahiptir. Diğer taraftan kristalsiz yapının durumu ve kristalin yapısı da puzolanik nitelikleri etkilemektedir. Özellikle kristalsiz faz durumunun uçucu kül reaktifliğinde büyük etkisi olduğu söylenebilir. Kireç oranı düşük olan uçucu küldeki kristalsiz faz yapısı SiO_2 yönünden zengin ve yüksek oranlı polimerize silis ya da alüminyum da kapsayan alümino-silikat

bileşimine sahiptir. Silis içeren ya da alümino-silikat kristalsiz faz, kireç oranı düşük reaktif bileşendir ve su/kalsiyum hidroksit ile tepkileşimde olduğundan bu durum uçucu küle puzolanik nitelik sağlamaktadır. Kireç oranı yüksek olan külde ise, aktif bileşende silisyumu da kapsayan kalsiyum alüminat kristalsiz fazın yanında aktif kristal faz da bulunmaktadır. Buradaki saf haldeki silika camı kalsiyum ve alüminyum iyonlarıyla değişikliğe uğramıştır. Yüksek kireçli külün kristalsiz ve kristalize fazları, külün puzolanik niteliğinin yanı sıra kısmen bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır (Türker vd. 2003).

Tablo 2.1. Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri (Tokyay ve Erdoğan, 1998)

Mineral	Mineral Yüzdesi		
	Silikoalüminöz Küller	Sülfokalsik Küller	Silikokalsik Küller
Camsı ve amorf faz	60	35	50
Mullit	20	1	5
Hematit	7	4	3
Manyetit	6	1	1
Kuars	5	5	5
Anhidrit	-	15	5
Serbest kireç	-	20	10
Feldspat ve Gehlenit	-	≥ 20	≥ 15

2.4. Cüruf

Yapay veya doğal puzolanlar, dahil oldukları çimento ve beton sistemlerinde hidrasyonla oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkileşimde bulunarak bağlayıcı özelliği olan ek bileşenler oluşturmakta ve betonu, puzolan kapsamayan normal Portland çimentolu bir betona oranla, yıpratıcı dış etkilere karşı dayanıklılık gücünü arttırmaktadır. Beton içinde mineral katkı malzemesi olarak kullanılan yapay puzolanlardan biri de,

demir/çelik fabrikalarında pik demirin üretim sürecinde ortaya çıkan endüstriyel atık durumundaki granüle yüksek fırın cüruflarıdır. Yüksek fırın atıkları öğütülerek ince taneli hale getirildiklerinde puzolanik nitelik sergilediklerinden, beton içine öğütülmüş biçimde granüle yüksek fırın cürufu eklenmesi, taze ya da sert hale gelmiş betonun niteliklerini optimize etmekte, betonu hiç cüruf kapsamayan normal bir betona göre agresif çevresel koşullara karşı daha dayanıklı duruma getirmektedir (Bilim ve Atış, 2011).

2.5. İlgili Araştırmalar

Toprak (2011), yapmış olduğu çalışmada termik santral taban külünün alkali aktivasyonu ile üretilen geopolimerin dayanım, dayanıklılık ve mikro yapı özelliklerini araştırmıştır. Taban küllerine göre ağırlıkça %8, 12, 16 Na₂O ve %0, 4, 8 ve 12 SiO₂ içeren 12 farklı alkali ile aktive edilmiş harçlar hazırlanmış 20 saat 85°C ve %40 bağıl nemde etüvde kür edilmiştir. Taban külünün ağırlıkça %12 Na₂O ve %8 SiO₂ içeren alkalilerle aktive edilmesi sonucunda 25-30 MPa dayanıma sahip geopolimer harçlar üretmişlerdir.

Altan ve Erdoğan (2012), çalışmalarında yüksek fırın cürufunu değişik oranlarda NaOH, NaOH+sodyum silika ve KOH+sodyum silika ile aktive etmişlerdir. Üretilen numuneler hem oda sıcaklığında küre tabi tutulmuş hem de değişik sıcaklıklarda (60, 80,95°C) ısı küre tabi tutulmuştur. Çalışmada kür sıcaklığı, kür zamanı, kür işlemleri, nem şartları, aktivatör konsantrasyonu, numune yaşı, aktivatör/bağlayıcı oranı, su/bağlayıcı oranı gibi parametreler incelenmiştir. Geopolimer örnekleri kıyaslayabilmek için Portland çimentosu ile kontrol numunesi üretmişlerdir. Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cüruf numunelerinin Portland çimento ile üretilenlere kıyasla hızlı dayanım aldıklarını saptamışlardır. 80°C’de kür edilen KOH ile aktive edilen örnekler NaOH ile aktive edilenlerden ilk haftalarda daha yüksek dayanım gösterirken sonraki zamanlarda bu durumun tersine döndüğü görülmüştür. Hidratasyon sırasındaki nem ihtiyacı açısından nem kürünün kuru küre göre dayanımın gelişmesi açısından daha etkili olduğunu söylemişlerdir.

Bakharev (2005) yaptığı çalışmada, F tipi uçucu küllü geopolimerleri, % 5 sodyum sülfat ve % 5 magnezyum sülfat, ayrıca % 5 sodyum sülfat + % 5 magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletildiğinde en fazla bozulma (numunelerde oluşan parçalanma) ve dayanım kaybı sodyum sülfatlı çözeltiler gözlemlenmiştir. NaOH içerikli numunelerin sülfatlı sularda diğer sodyum silikat ve potasyum hidroksit içerikli numunelerinden daha stabil olduklarını belirten farklı bir çalışmada ise kür şartlarını yüksek sıcaklıklarda oluşturmuş NaOH ile aktive edilen numunelerin dayanımlarının, sodyum silikatlı olanlara göre daha iyi neticeler verdiğini tespit etmiştir.

Puertas vd. (2000), % 50 Uçucu kül + % 50 Yüksek fırın cürufu ve 10 M NaOH solüsyonu ile 25°C kür yapılan numunelerden elde edilen 28 günlük basınç dayanım değerini 50MPa olarak bulunmuştur.

Oh vd. (2010) çalışmalarında, yüksek kalsiyum içerikli uçucu küllü geopolimerleri NaOH, Na₂SiO₃ ve ısı ile aktive edilmişlerdir. Kalıptan alındıktan sonra 1 saat 75 °C fırında küre tabi tutulan örneklerden yüksek dayanım elde edilmiştir. Uçucu kül ağırlığının %3-12 oranında süper akışkanlaştırıcı eklenmiş, basınç dayanımı 65 MPa elde edilmiştir. Dayanım değerleri ekstra su kullanıldığında ise süper akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerden daha iyi değerler elde edildiği belirtilmiştir.

Temuujin vd. (2009), kalsiyum içeriğinin uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi konulu çalışmalarında, uçucu kül içerisine ağırlıkça sırayla %1, % 2, % 3 oranlarında CaO ve Ca(OH)₂ kalsiyum bileşenleriyle yer değiştirilmiş ve aktivatör olarak da sodyum silikat ve 14 M NaOH kullanmışlardır. Elde edilen geopolimerlere oda sıcaklığında (20°C) ve 70°C de kür uygulamışlardır. Uçucu kül yerine eklenen kalsiyum bileşikler, oda sıcaklığında kür edilen örneklerde mekanik dayanımı iyileştirmiştir. Oda sıcaklığında 7 günlük küre tabi tutulan örneklerden ağırlıkça %3 CaO ilave edilen örneğin dayanımı 11,8 MPa dan 22,8 MPa'ya çıkarken; ağırlıkça %3 Ca(OH)₂ ilave edilen örneğinki ise 29,2 MPa'ya yükselmiştir. Bu durum Ca(OH)₂ ilavesinin CaO ilavesinden daha faydalı olduğunu göstermektedir. Ancak 70°C de kür edilen örneklerde ise kalsiyum ilavesi dayanımda düşüşe neden olmuştur. Bu durum alüminosilikat yapıdaki kalsiyum

varlığının alüminosilikat yapının 3 boyutlu geopolimerik yapısının yetersiz gelişmesine sebep olmasıyla açıklanmıştır.

Songpiriyakij vd. (2010), yüksek miktarda silis kaynağı olan pirinç kabuğu ve ağaç kabuğu külünü (RHBA) uçucu külle UK/RHBA oranı 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 ve 0:100 olacak şekilde ağırlıkça yer değiştirilmiş. Çalışmada iki karışım serisi kullanılmıştır. İlk seride, aktivatör oranı sabit tutulmuş UK/RHBA oranları değiştirilerek 7 karışım hazırlanmış, ikinci seride ise UK/RHBA oranı sabit tutularak (40:60) silikat/NaOH oranı değiştirilmiş ve çalışmalarında, basınç dayanımı, reaksiyonun derecesi ve geopolimerlerin mikro yapıları $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, optimum oranında ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 15,9$) 73 MPa değerinde en yüksek basınç dayanımına ulaştığını tespit etmişlerdir.

Xu vd. (2010), alt külün geopolimerizasyonu ile ilgili yaptıkları çalışmada, alt külün reaktivitesini belirlemek için külü 2, 5 ve 10M NaOH ve KOH solüsyonda çözmüş, geopolimeri aktive etmek içinse bir seri alkali hidroksit ve/veya sodyum silikat solüsyon kullanmışlardır. 40°C de 168 saat kür edilen örnek 52,9 MPa ile en yüksek dayanımı göstermiştir. Yapılan dayanım, SEM, XRD analiz sonuçlarına göre de alt külün çeşitli geopolimerizasyon uygulamaları ile Portland çimentoya alternatif olabilecek bir kaynak malzeme olduğunu tespit etmişlerdir.

Guo vd. (2010), C sınıfı uçucu kül esaslı geopolimerin mikroyapısal özellikleri ve basınç dayanımı başlıklı çalışmalarında, C sınıfı uçucu kül ve aktivatör olarak da Sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak hazırlanan geopolimer örnekleri incelemişlerdir. En yüksek dayanım aktivatörün $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranı 1.5 ve Na_2O 'nin kütle oranı uçucu külün %10'u iken elde edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar örnekleri 75°C de 8 saat küre tabi tuttuktan sonra 28 gün de 23°C'de küre tabi tutmuş ve dayanımı 63.4 MPa olarak bulmuşlardır. Bunun yanı sıra yapılan XRD ve SEM taramalarında geopolimerik jel ve C-S-H jelinin her ikisinin de var olduğu görülürken incelenen yapı da reaksiyona girmemiş bazı uçucu kül parçacıklarına rastlamışlardır.

Xu vd. (2002), çoklu minerallerin geopolimerizasyonu başlıklı çalışmalarında, uçucu kül, kaolinit ve albit atıklarının birleşiminden oluşan geopolimerlerin basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Bu amaçla uçucu kül, kaolinit ve albitten oluşan karışımlar NaOH ve KOH ile aktive edilmiştir. Üretilen geopolimer numuneler 18 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra uçucu kül ve kaolinit veya albit veya hem kaolinit hem albitle üretilen numuneler 40 °C de 6 gün kür edilmiş, sadece kaolinit ve albitten oluşan karışımlar 45°C de 27 gün kür edilmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda uygun reaksiyon parametreleri kullanıldığında üç bileşenli sistemin en yüksek basınç dayanımı (32,7 MPa) ve düşük oranda kırılım gösteren geopolimerler olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca uçucu kül ve albit arasındaki reaksiyonunun yüksek oranda gerçekleştiği sonucuna varmışlardır.

Chindaprasirt vd. (2007) yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanılan jeopolimer harcının temel özellikleri, işlenebilirliği ve dayanımını araştırmışlardır. Geopolimeri, sodyum hikroksit, sodyum silikat ve ısı ile aktive eden araştırmacılar, jeopolimer harcının akışkanlık oranının 110+%-135+%-5 olduğunu saptarken bu oranın sodyum silikat/NaOH oranına ve NaOH konsantrasyonuna bağlı olduğunu saptamışlardır. Üretilen örneklerde basınç dayanımı 10-65 MPa arasında değişirken, yüksek dayanımlı jeopolimer örnekleri 75 °C de 2 günden az olmamak kaydıyla küre tabi tuttuklarını belirtmişlerdir.

Temuujin vd. (2010), uçucu kül esaslı geopolimer harçların hazırlanması ve karakterizasyonu konulu çalışmalarında, farklı boyutlarda kum agregalarla hazırlanan geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Uçucu kül tabanlı geopolimer örneğin basınç dayanımı 60 MPa, elastik modülü ise 2.27 GPa bulunmuş ve bu değerlerin ağırlıkça %50'nin üzerinde kum eklendiğinde ise önemli bir değişme göstermediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar alkali aktivatör miktarı artmadan kum miktarı artırıldığında bağlayıcı sistemin geopolimerizasyon derecesinde bir düşüş gözlemlendiğini bildirmişlerdir.

Diaz vd. (2010), geopolimer üretiminde uçucu kül atığının uygunluğunu araştırdıkları çalışmada, Amerika'nın farklı alanlarından elde edilen 5 farklı uçucu kül örneğinin kimyasal analiz, XRD, dane boyutu dağılımını yaparak, her bir uçucu

kül atığı ile harç ve beton örnekler üzerinde, kimyasal ve XRD, RAMAN spektroskopisi, priz süresi tayini ve basınç dayanımı gibi bir dizi mekanik analiz uygulamışlardır. 5 farklı uçucu külü aktive etmek için 14 M NaOH ve sodyum silikat (ağırlık olarak % 45) 1:1 oranda kullanılmıştır. Bütün örnekler 60°C de 3 gün küre tabi tutulmuş ve testten önce 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Araştırmacılar çalışma da, uçucu külün kimyasal ve dane dağılımı gibi kristografik bileşenlerini üretilen geopolimerin kimyasal ve mekanik özellikleriyle karşılaştırmış ve uçucu kül atığının dane dağılımı, camlaştırma derecesi ve camın kırınım lokasyonu gibi doğal faktörlerin geopolimerin taze ve sertleşmiş özelliklerinde önemli rol oynadığını tespit etmişlerdir.

Villa vd. (2010), doğal zeolitten sentezlenen geopolimerlerin mekanik dayanımları üzerinde aktivatör oranı, zamanı ve kür sıcaklığının etkisini, silikat çözeltileri ve sodyum hidroksit kullanılarak değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, sodyum silikat/NaOH oranı 0.4, 1.5, 5, 10 ve 15 olacak şekilde 7M NaOH solüsyonları aktivatör olarak kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler oda sıcaklığında, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıklarda 1, 7, 14, 28 ve 90 günlük küre tabi tutulmuştur. Araştırma sonuçlarına göre, kür ısısında olduğu gibi aktivatör oranındaki bir artış malzemedeki dayanım gücünü arttırmıştır. Ayrıca araştırmacılar, 80°C ya da daha yüksek kür sıcaklığı ve 90 günlük kür süresinin dayanım üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. En yüksek dayanımın 40°C kürde elde edilen örneklerde Portland çimentosu ile elde edilen değerden daha fazla olduğu görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklarda (60 ve 80°C) kısa süreli kürlerde daha iyi dayanım elde edilirken düşük sıcaklıklarda dayanımda iyileşme gözlemlemek için kür süresinin uzun olması gerektiği görülmüştür.

Jaarsveld vd. (2002), uçucu kül ve kaolinite esaslı geopolimer üzerine bileşim ve sıcaklığın etkisini inceledikleri çalışmada, atık bazlı geopolimer üretimi sırasında kullanılan malzemelerin re-aktivitesindeki farklılıkların özellikle geopolimerin nihai özelliklerine etkisinin olduğunu, malzeme özelliklerinde gözlenen bu değişikliklerin atık malzemenin çözünmemesinden kaynaklandığını saptamıştır. Su muhtevasının, uçucu kül/kaolinit oranı ve kullanılan metal silikat cinsi geopolimerin nihai özellikleri üzerinde etkili olduğunu ifade eden araştırmacı, özellikle, kaolinit

gibi esas malzemelerin termal özelliklerinin, geopolimer ürün tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktör olduğunu bildirmiştir.

Temuujin ve Riessen, (2009), uçucu külün ön kalsinasyonunun geopolimerizasyon süreci üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 500 ve 800°C de gerçekleştirilen ön kalsinasyon uçucu külün dekarbonatizasyonuna sebep olurken aynı zamanda uçucu külün amorf içeriğinde % 60 dan % 57'ye düşüş gerçekleşmiştir. Ham uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerlerin dayanımı 55.7 (9.2) MPa bulunurken 500°C de kalsine edilen örneklerde dayanım 54 (5.8) MPa, 800°C de kalsine edilenlerde ise 44.4 (5.4) MPa dayanım bulunmuştur. Geopolimerlerin dayanımındaki bu düşüşün uçucu kül parçacıklarının kısmi yüzey kristalleşmesinden kaynaklandığını belirten araştırmacılar, uçucu külün reaktivitesinin büzülme oranıyla alakalı olduğunu ve geopolimerin yüzeyinde çiçeklenmeye sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Kong ve Sanjayan (2010), yüksek sıcaklığın geopolimer harç ve beton örnekleri üzerine etkisi konulu çalışmalarında, Geopolimer örneklerde uçucu külü aktive etmek için sodyum silikat ve 7M KOH solüsyon kullanmışlardır. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra 24 saat 80°C de küre tabi tutulmuştur. Kür süresini tamamladıktan sonra numuneler kalıplarından çıkarılmıştır. Numuneler oda sıcaklığına ulaştıktan sonra bir seri numune dakika da 4.4°C de yükselerek 800°C sıcaklığa çıkarılmıştır, bir kısmı ise hiç ısı işlem görmeden oda sıcaklığında bırakılmıştır. Numune boyutu, agrega boyutu, agrega cinsi süper akışkanlaştırıcı cinsi gibi birçok parametre inceleyen araştırmacılar, çalışmada, yüksek sıcaklıklarda (800°C) numune boyutunun ve agrega boyutunun geopolimer davranışını etkileyen iki önemli parametre olduğu belirlemişlerdir. Hem oda hem de yüksek sıcaklıktaki numunelerde agrega boyutunun 10 mm den büyük olduğu durumlarda yüksek dayanım elde edilmiş ve yüksek sıcaklıklarda geopolimer harç ve agrega arasındaki termal uyumsuzluğun dayanımda düşüşe sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

Li ve Sun (2000) yaptıkları çalışmada, NaOH ve Na₂CO₃ ve her iki solüsyonun karışımıyla aktive edilmiş ve karışıma farklı oranlarda zeolit, gips katkı olarak eklenmiştir. Hazırlanan örneklerden bir kısmı oda sıcaklığında kür edilirken bir kısmı da 20°C su içerisinde küre tabi tutulmuştur. Çalışmada aktivatör türü, katkının etkisi

ve kür şartlarının etkisi gibi birçok parametre araştırılmıştır. Çalışmada yüksek fırın cürufu ile ince veya kaba agrega olmadanda yüksek dayanımlı bağlayıcı malzeme elde edilebildiği görülmüştür. Zeolit, cips gibi katkıların alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürufunun dayanımını yükselttiği rötreyi azalttığı ancak kullanım alanına uygun katkı kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Kür şartının dayanımda ve rötrede büyük etkisi olduğu 20 °C suda kür etmenin en yüksek eğilme dayanımı sağladığı (7.9 MPa) ve rötreyi azalttığı belirlenmiştir.

Aydın ve Baradan (2012), NaOH ve sodyum silikat alkalilerini kullanarak otoklav ve buhar kürü uygulamışlardır. Otoklav kür uyguladıkları numunelerde çok düşük silikat modülleriyle (% 2 Na₂O) bile basınç dayanımlarında 70 MPa değerini yakalamışlardır. Bununla beraber buhar kürü uygulanan numunelerde de benzer dayanım değerleri ve her iki kür koşullarında da kuruma büzölmelerinde kayda değer azalma gözlemlendiği belirtilmiştir.

Reig vd. (2013), karışımdaki Na konsantrasyonu 2,5 ila 10 M arasında değişecek oranlarda NaOH ve sodyum silikat ile aktive edilen kırmızı tuğla atıklarını 65°C’de bağıl nem % 90-95 olacak şekilde 3 ve 7 günlük küre tabi tutmuşlardır. Optimum karışım için olması gereken Na konsantrasyonu 7M olarak tespit edilmiş ve bu karışım için 7 günlük kür sonucu 30 MPa dayanım değeri elde etmişlerdir.

Palomo vd. (1999), uçucu külün alkali ile aktive edilmesini konu alan çalışmalarında, yüksek OH⁻ konsantrasyona sahip NaOH, KOH ve sodyum silikat vb. malzemeleri ile 65°C ve 85°C kür şartlarında ve 2-5 ve 24 saatlik kür zamanlarıyla birlikte 0,25 ve 0,30 solüsyon/uçucu kül oranların da çalışmışlardır. Bu farklılıkların mekanik dayanımın gelişmesini önemli ölçüde etkilediğini belirten araştırmacılar, 85°C de 5 saat kür ettikleri numunelerde 60 MPa mekanik dayanım elde etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METHOT

3.1. Materyaller

Deneylerde silis kumu kullanılmıştır ve silis kullanılmadan önce çeyrekleme yapıp 24 saat etüvde kurutulduktan sonra kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çatalağzı'ndan getirilen uçucu kül 90+90 dakika öğütölüp inceliği artırılarak kullanılmıştır. Deneylerde Zonguldak'tan getirilen cüruf kullanılmıştır. Deneylerde yerli potasyum silikat (Ege Kimya) kullanılmıştır. Deneylerde yerli potasyum hidroksit (Borkim) kullanılmış olup, deneyde kullanılmadan önce hazırlanarak 24 saat içinde kullanılmıştır. Deneylerde polikarboksilat esaslı chryso akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yine deneylerde, şehir şebekesinden temin edilen içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. TS EN 1008 standardında karışım suyu olarak içilebilen suların kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir. Deneylerde kullanılan karışım oranları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1. Malzeme karışım oranları

	1 nolu karışım		2 nolu karışım		3 nolu karışım	
Malzeme cinsi	%	Ağırlık (gr)	%	Ağırlık (gr)	%	Ağırlık (gr)
Ek su		78		81		75
Kum		1000		1000		1000
Cüruf	50	405,25	50	405,25	50	405,25
Uçucu kül	50	405,25	50	405,25	50	405,25
Kimyasal katkı		13,78		11,75		14,99
K ₂ SiO ₄	50	162	60	195	40	130
KOH	50	162	40	130	60	195
	4 nolu karışım		5 nolu karışım		6 nolu karışım	
Malzeme cinsi	%	Ağırlık (gr)	%	Ağırlık (gr)	%	Ağırlık (gr)
Ek su		78		75		81
Kum		1000		1000		1000
Cüruf	40	324,2	40	324,2	40	324,2
Uçucu kül	60	486,3	60	486,3	60	486,3
Kimyasal katkı		12,16		8,92		6,48
K ₂ SiO ₄	50	162	40	130	60	195
KOH	50	162	60	195	40	130
	7 nolu karışım		8 nolu karışım		9 nolu karışım	
Malzeme cinsi	%	Ağırlık (gr)	%	Ağırlık (gr)	%	Ağırlık (gr)
Ek su		78		75		81
Kum		1000		1000		1000
Cüruf	60	486,3	60	486,3	60	486,3
Uçucu kül	40	324,2	40	324,2	40	324,2
Kimyasal katkı		10,94		9,73		16,21
K ₂ SiO ₄	50	162	40	130	60	195
KOH	50	162	60	195	40	130

3.2. Methot

Yapılan çalışma da 9 farklı karışım oranı daha önce yapılan ön deneylerle belirlenmiş olup her bir karışım serisinden 9 kalıp numune dökülmüştür ($9 \times 3 = 27$ adet numune). Numeler basınç, eğilme, birim hacim ağırlık ve donma çözülme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Numune boyutları şekil 2 de görüldüğü gibi $40 \times 40 \times 160$ dir. Çalışmada üretilen numuneler TS EN1015-11,2000 e uygun olarak şekil 3 de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde tek noktadan yükleme yapılmıştır. Yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde eğilme testi yapılmıştır.

Yine yapılan çalışmadaki numuneler TS EN 1015-11,2000 e uygun olarak kr sürelerini tamamladıklarında basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Eğilme deneyinden iki parça olarak elde edilen numuneler şekil 3 de görülen 4*4 lk kısma yerleştirilerek ve yükleme hızı 50N/s olacak şekilde basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Eğilme deneyiyle ikiye bölünen  prizma numuneden altı adet basınç numunesi elde edilmekte ve bu numunelere basınç testi yapılarak aritmetik ortalaması alınmaktadır. Birim hacim ağırlık deneyi ASTM C 642 ye göre yapılmıştır.



şekil 3.1. Numune kalıpları



şekil 3.2. Basınç ve eğilme cihazları

Hazırlanan geopolimer harçlara TS EN 1015-3 standardına uygun olarak kıvam deneyi uygulanmıştır. Yayılan harçların çapları metre ile ölçülerek ortalamaları alınmıştır. Yayılma çapları 18-22 cm aralığında ölçülmüştür.



Şekil 3.3. Yayılma tablası ve harç numuneleri

Numuneler 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan sökülmüştür. Kalıptan sökülen numunelere 85⁰ C de 12 saat etüvde su ve buhar kürü uygulanmıştır. Etüvden çıkarılan numuneler 3,7,28 günlük süreçte kür odasında bekletilmiştir. 1 Kodlu numunelere şekil 5 de görüldüğü gibi su buharı kürü uygulanmıştır. 2 Kodlu numunelere su kürü uygulanmıştır.



Şekil 3.4. Buhar kürü uygulanmış numuneler

Basınç dayanımlarını belirlemede 3 adet numune kullanılmıştır. Örneğin 7 günlük basınç dayanımını belirlemek için 3 adet numune kırılmıştır. Deney sonuçları varyans analizi ile anlamlı olup olmamasına göre değerlendirilmiştir. Varyans analizinde p (olasılık) değeri istatistiksel anlamlılığın varlığının ve varsa da var olan farklılığın kanıtının düzeyinin belirlenmesi amacı ile kullanılan bir değerdir. Her istatistiksel testin sonucunda kullanılan test istatistiğine ait bir p değeri hesaplanır. Bu P değeri ilgili hipotez testi sonucunda anlamlı fark vardır denileceği durumda hatalı karar verme olasılığının ne olduğunu gösterir. $0.05 > p > 0.01$ istatistiksel anlamlılığı ifade etmektedir. F değerleri ise varyanslar arasında fark olup olmadığına karar vermede yani varyansların karşılaştırılmasında kullanılan F testinden elde edilen değerdir.

3.3. Basınç, Eğilme, Birim Hacim Ağırlık Deney Sonuçları

Tablo 3.2. Genel faktör regresyonu: Basınca dayanımı (3 Gün)

Faktör	Düzeyler	Değerler
KÜR	2	1; 2
YFC/UK (%)	3	40; 50; 60
K ₂ SiO ₄ /KOH	3	40; 50; 60

1. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4,72488	92,38%	88,78%	82,85%

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	Etki Oranı	P Değeri
Model	17	9739,8	572,93	25,66		0
Doğrusal	5	8983,5	1796,69	80,48		0
KÜR	1	7948,8	7948,79	356,06	93,89	0
YFC/UK (%)	2	806,8	403,42	18,07	4,76	0
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	227,8	113,92	5,1	1,34	0,011

Yukarıdaki tabloya göre 3 günlük basınç dayanımları üzerinde etkili olan ana parametre kür tipidir. YFC ve K₂SiO₄ oranlarındaki değişim ise 3 günlük basınç dayanımlarını çok etkilememektedir. Ayrıca elde edilen modelin R² değeri %82.85'dir. Bu oran modelin anlamlı olduğunun göstergelerinden birisidir.

Tablo 3.3. Genel faktörler regresyon: Basınç dayanımı (7 gün)

2. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4,32195	92,38%	88,78%	82,85%

Tablo 3.3. *devamı*

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	Etki Oranı	p Değeri
Model	17	8150,62	479,45	25,67		0
Linear	5	6661,18	1332,24	71,32		0
KÜR	1	4854,9	4854,9	259,91	84,32	0
YFC/UK (%)	2	1117,34	558,67	29,91	9,70	0
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	688,94	344,47	18,44	5,98	0
Toplam	53	8823,07				

Yukarıdaki tabloya göre 7 günlük basınç dayanımları üzerinde etkili olan ana parametre de kür tipidir. YFC ve K₂SiO₄ oranlarındaki değişim ise 7 günlük basınç dayanımlarını çok etkilememektedir. Ancak 3 günlük basınç dayanımlarına göre daha etkili olmaktadır. Ayrıca elde edilen modelin R² değeri %82.85'dir. Bu oran modelin anlamlı olduğunun göstergelerinden birisidir.

Tablo 3.4. *Genel faktörler regresyon: Basınç dayanımı (28 gün)*

3. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,71416	92,97%	89,65%	84,17%

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri		p Değeri
Model	17	6564,2	386,13	27,99		0
Linear	5	5297,6	1059,53	76,81		0
KÜR	1	3335,8	3335,78	241,81	77,28	0
YFC/UK (%)	2	1318,9	659,46	47,8	15,28	0
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	642,9	321,46	23,3	7,45	0

Yukarıdaki tabloya göre 28 günlük basınç dayanımları üzerinde etkili olan ana parametre de kür tipidir. YFC ve K₂SiO₄ oranlarındaki değişim ise 28 günlük basınç dayanımlarını çok etkilememektedir. Ancak 3 ve 7 günlük basınç dayanımlarına göre daha etkili olmaktadır. Ayrıca elde edilen modelin R² değeri %84.17'dir. Bu oran modelin anlamlı olduğunun göstergelerinden birisidir.

Tablo 3.5. Genel faktörler regresyon: Eğilme dayanımı (3 gün)

4. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,659347	97,92%	96,94%	95,32%

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	Etki Oranı (%)	p Değeri
Model	17	737,128	43,36	99,74		0
Linear	5	709,735	141,947	326,51		0
KÜR	1	687,939	687,939	1582,42	98,44	0
YFC/UK (%)	2	13,135	6,567	15,11	0,94	0
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	8,661	4,331	9,96	0,62	0

Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi 3 günlük eğilme dayanımı açısından kür tipi daha etkili olmaktadır. 3 günlük eğilme dayanımı %98.44 oranı ile kür tipine bağlı olarak değişmektedir. Kür şartları malzeme oranlarındaki değişimi rağmen basınç dayanımını daha çok etkilemektedir. Model %95.32 R² değeri ile oldukça anlamlıdır.

Tablo 3.6. Genel faktörler regresyon: Eğilme dayanımı (7 gün)

5. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,519701	98,40%	97,64%	96,39%

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	Etki Oranı (%)	p Değeri
Model	17	596,895	35,111	130		0
Linear	5	537,337	107,467	397,9		0
KÜR	1	531,1	531,1	1966,39	99,42	0
YFC/UK (%)	2	0,575	0,287	1,06	0,05	0,356
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	5,662	2,831	10,48	0,53	0

Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi 7 günlük eğilme dayanımı açısından kür tipi daha etkili olmaktadır. 7 günlük eğilme dayanımı %99.42 oranı ile kür tipine bağlı olarak

değişmektedir. Model %96.39 R^2 değeri ile oldukça anlamlıdır. Ayrıca YFC oranındaki değişimin 7 günlük eğilme dayanımı üzerinde hiçbir etkisi yoktur ($p>0.05$).

Tablo 3.7. Genel faktörler regresyon: Eğilme dayanımı (28 gün)

6. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
11,4825	32,63%	0,82%	0,00%

28 Günlük eğilme dayanımına ait modelin R^2 değeri 0 olduğu için elde edilen model yetersiz kabul edilmektedir. Bu yüzden etki oranlarının verilmesi yanlış sonuçlar ortaya çıkarabilir. Ancak buna rağmen kür tipi etkili olan bir parametredir.

Tablo 3.7. Devamı

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	p Değeri
Model	17	2299,0	135,24	1,03	0,456
Linear	5	701,4	140,29	1,06	0,396
KÜR	1	288,5	288,47	2,19	0,148
YFC/UK (%)	2	237,1	118,53	0,90	0,416
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	175,9	87,96	0,67	0,519

Tablo 3.8. Genel faktörler regresyon: Birim hacim ağırlık (3 gün)

7. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0155063	80,19%	70,84%	55,43%

Modelin R^2 değeri 55.43 olarak bulunmuştur. Bu değer modelin çok kuvvetli olmadığını göstergesidir. Zaten F değerleri incelendiğinde K₂SiO₄ oranındaki değişimin 3 günlük birim ağırlıkları daha çok etkilediği görülmektedir. Ayrıca beklendiği gibi kür koşullarının birim ağırlık değişimi üzerindeki bir etkisi yoktur.

Tablo 3.8. *Devamı*

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	p Değeri
Model	17	0,035042	0,002061	8,57	0,000
Linear	5	0,018750	0,003750	15,60	0,000
KÜR	1	0,000587	0,000587	2,44	0,127
YFC/UK (%)	2	0,006922	0,003461	14,40	0,000
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	0,011241	0,005621	23,38	0,000

Tablo 3.9. *Genel faktörler regresyon: Birim hacim ağırlık (7 gün)*

8. Varyans analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0142997	92,08%	88,35%	82,19%

%82.19 R² değeri ile modelin anlamlılığı yüksek çıkmıştır. 7 günlük birim ağırlıkları üzerinde etkili olan anaparametre YFC oranındaki değişim olmuştur. Özgül ağırlığı UK'ya göre ağır olan YFC'nin oranı arttıkça harçların 7 günlük birim ağırlıklarında artmaktadır.

Tablo 3.9. *Devamı*

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	Etki Oranı (%)	p Değeri
Model	17	0,08563	0,00504	24,63		0
Linear	5	0,03282	0,00656	32,1		0
KÜR	1	0,00344	0,00344	16,82	18,97	0
YFC/UK (%)	2	0,02859	0,0143	69,92	78,86	0
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	0,00079	0,00039	1,92	2,17	0,161

Tablo 3.10. *Genel faktörler regresyon: Birim hacim ağırlık (28gün)*

9. Varyans Analizi

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,270113	35,46%	4,98%	0,00%

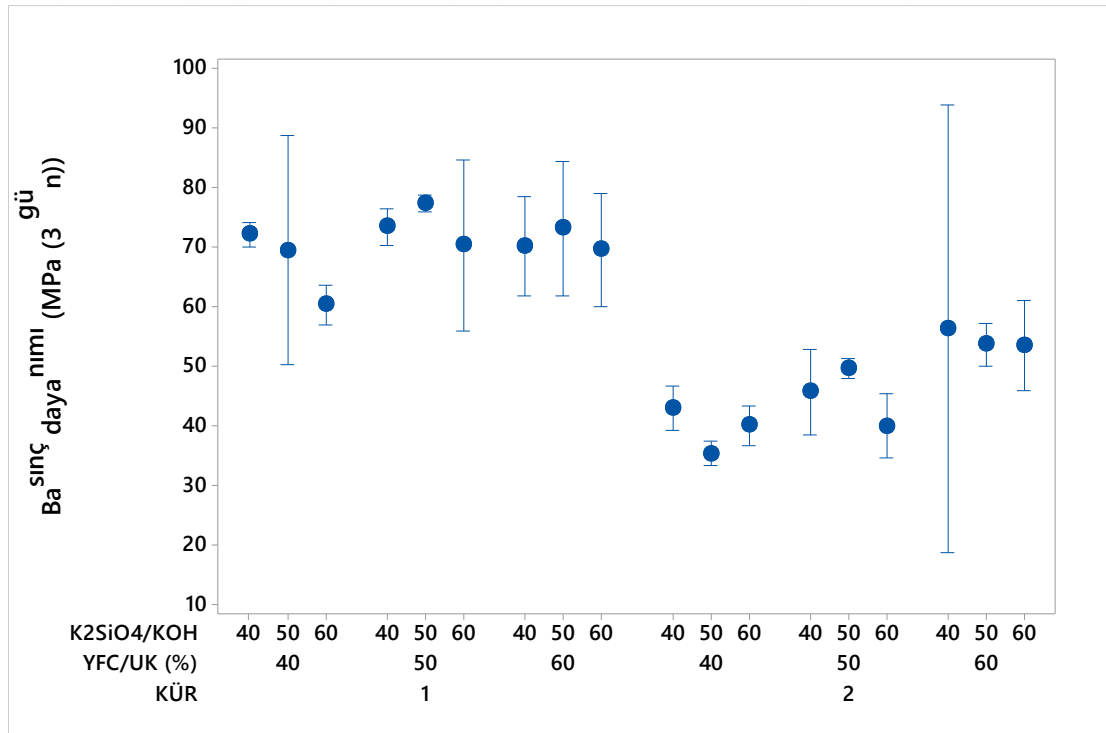
28 Günlük birim ağırlıklarına ait modelin anlamlılığı çok düşük olduğu için etki oranlarını ele almak hatalı sonuçlar verebilir. Ancak F değerleri incelendiğinde YFC oranındaki değişim 28 günlük birim hacim değerlerini etkilemektedir.

Tablo 3.10.Devamı

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F Değeri	p Değeri
Model	17	1,44299	0,08488	1,16	0,340
Linear	5	0,54518	0,10904	1,49	0,216
KÜR	1	0,08979	0,08979	1,23	0,275
YFC/UK (%)	2	0,28227	0,14114	1,93	0,159
K ₂ SiO ₄ /KOH	2	0,17312	0,08656	1,19	0,317

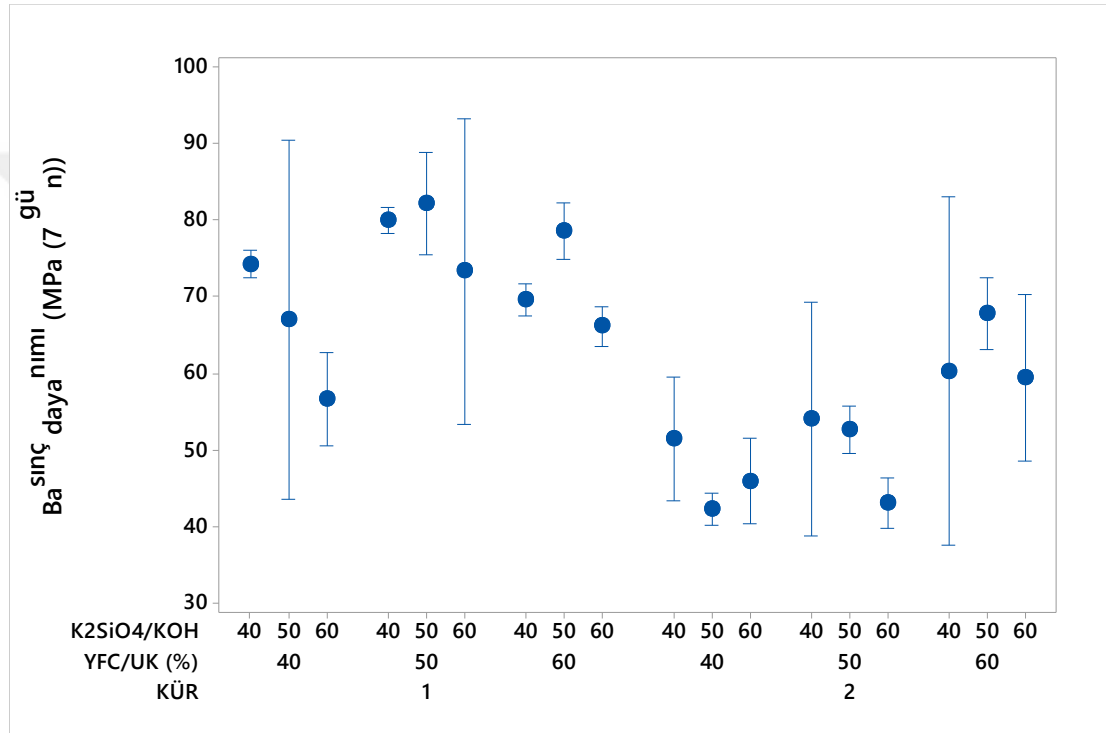
Sonuç olarak yapılan deneyler ve farklı uygulama standartlarına göre geopolimer beton oluşumu için belirlenen kriterler ve özellikleri aşağıdaki değerlendirme grafiklerinde oluşum şemaları bakımından açıklayıcıdır.

Tablo 3.11. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 3 günlük basınç dayanımları



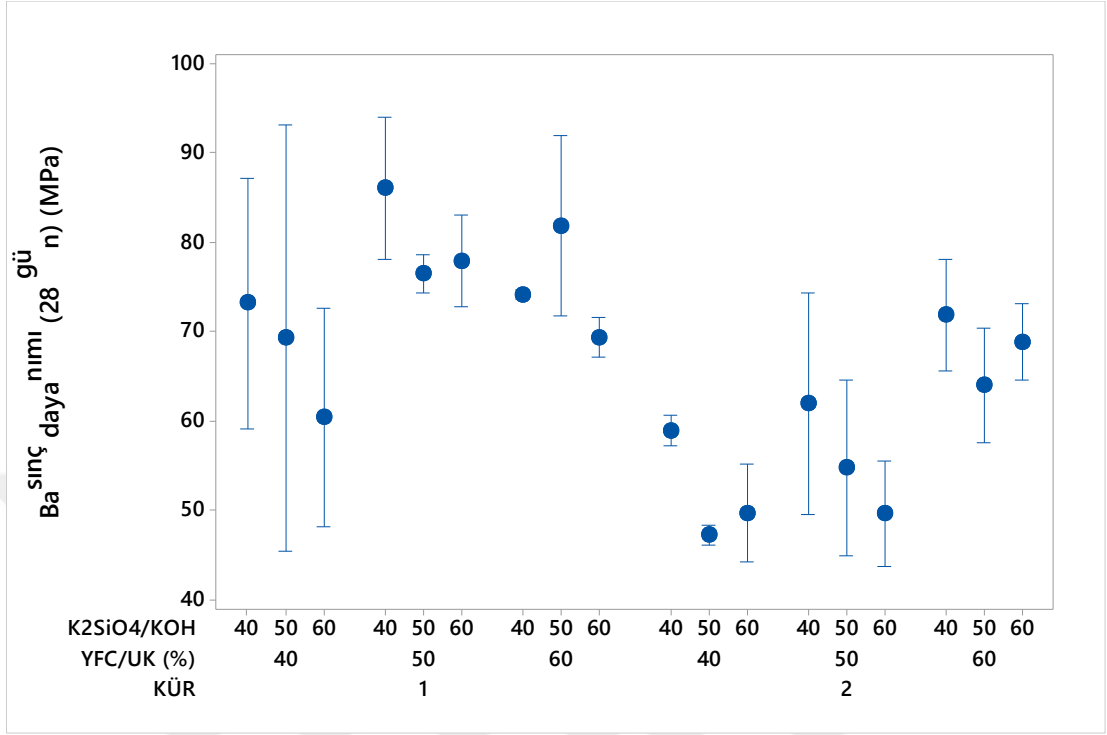
3 Günlük deney sonuçları neticesinde 1 nolu su buharı kürü uygulanmış numunelerden karışım oranları YFC/UK- K_2SiO_4 /KOH ın % 50 olduğu durumda daha fazla dayanım elde edilmiştir. 2 nolu su kürü uygulanmış numulere ise YFC/UK %60 ve K_2SiO_4 /KOH %40 olduğu durumda en yüksek dayanım elde edilmiştir.

Tablo 3.12. K_2SiO_4 /KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 7 günlük basınç dayanımları



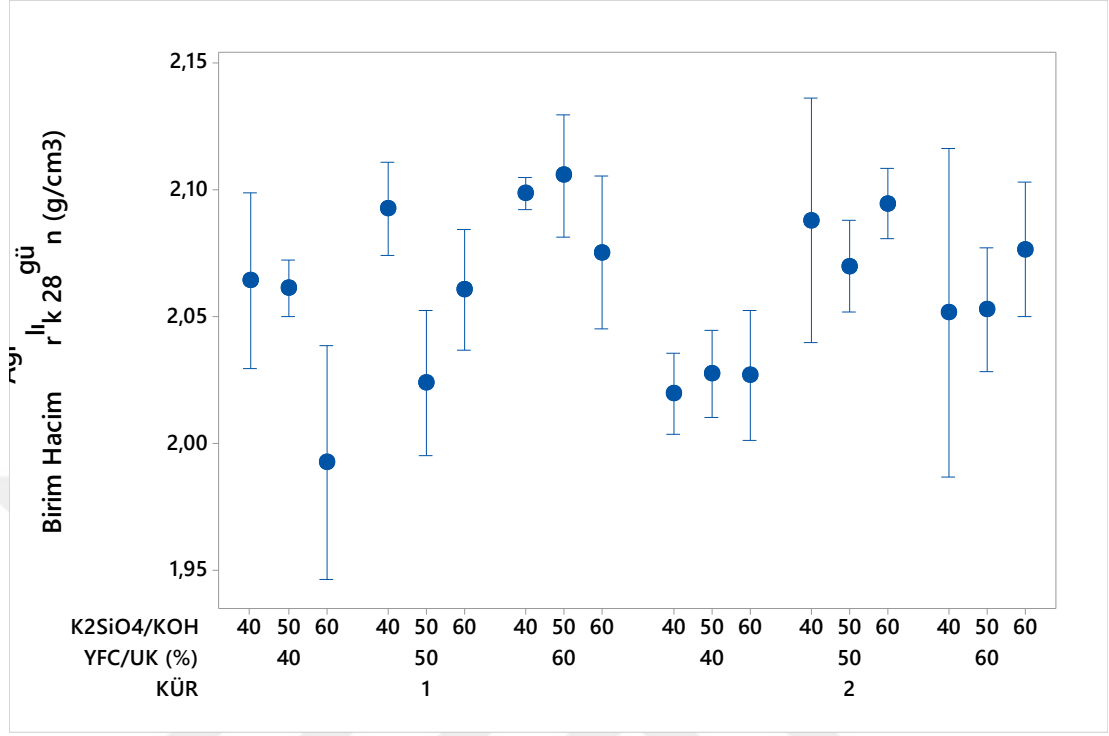
7 Günlük basınç dayanımları değerlendirildiğinde 1 nolu buhar küründe yine en yüksek dayanımların YFC/UK- K_2SiO_4 oranlarının %50 olduğu durumda en yüksek dayanımların elde edildiği görülmüştür. 2 nolu su kürü değerlendirildiğinde ise en yüksek dayanım oranları YFC/UK %60, K_2SiO_4 /KOH %50 olduğu durumda en yüksek dayanımların elde edildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 3.13. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 28 günlük basınç dayanımları

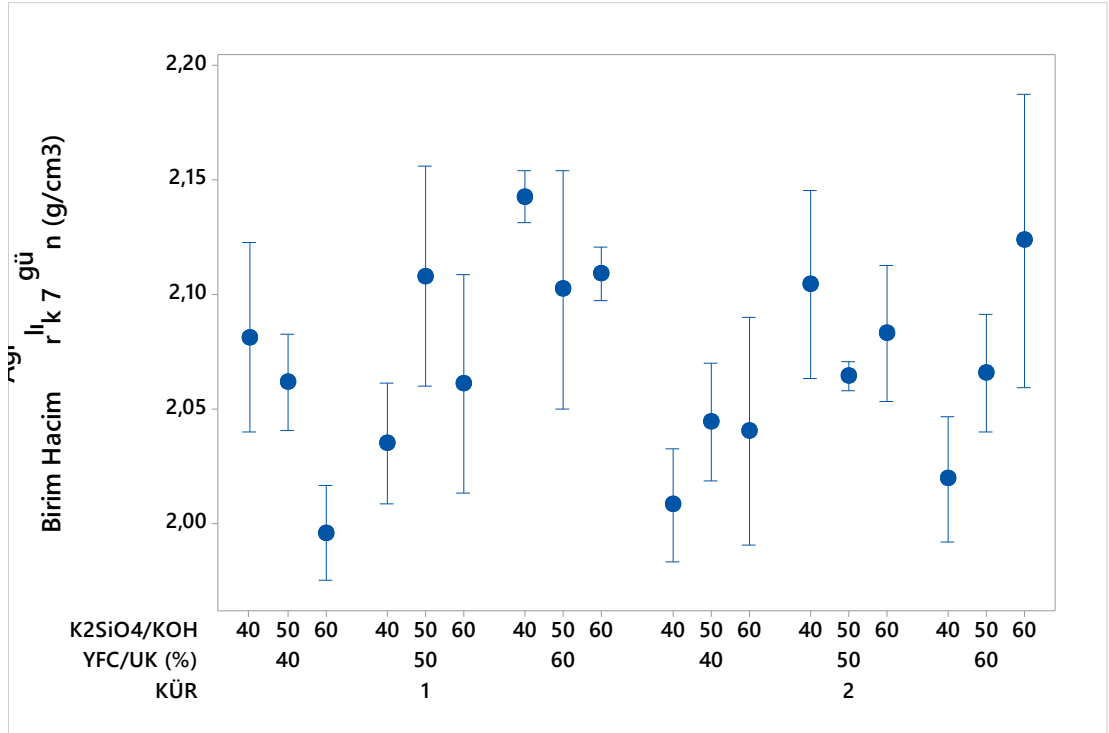


28 Günlük basınç dayanımları sonuçlarında 1 nolu su buharı kürü uygulanmış numunelerde YFC/UK %50, K_2SiO_4/KOH %40 olduğu karışım oranında, 2 nolu su kürü uygulanmış numunelerde ise YFC/UK %60 ve K_2SiO_4 %40 olduğu karışım oranında en yüksek dayanımlar elde edilmiştir.

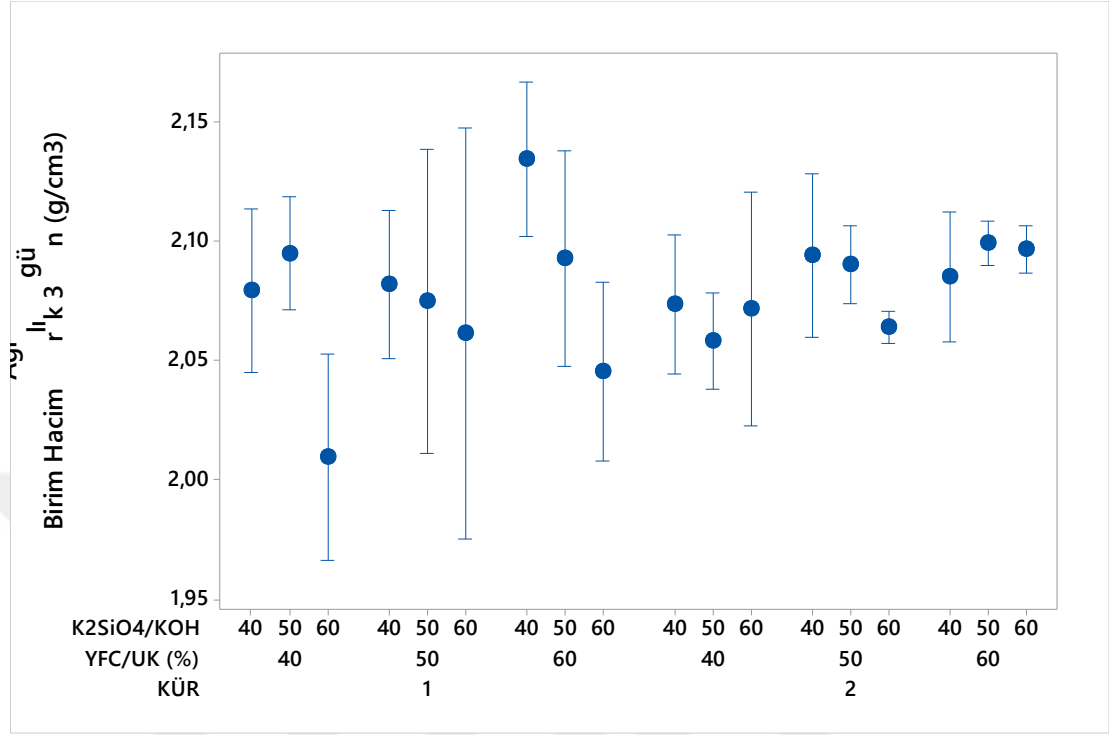
Tablo 3.14. $K_2SiO_4/KOH - YFC/UK$ oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 28 günlük birim hacim ağırlıkları



Tablo 3.15. $K_2SiO_4/KOH - YFC/UK$ oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 7 günlük birim hacim ağırlıkları

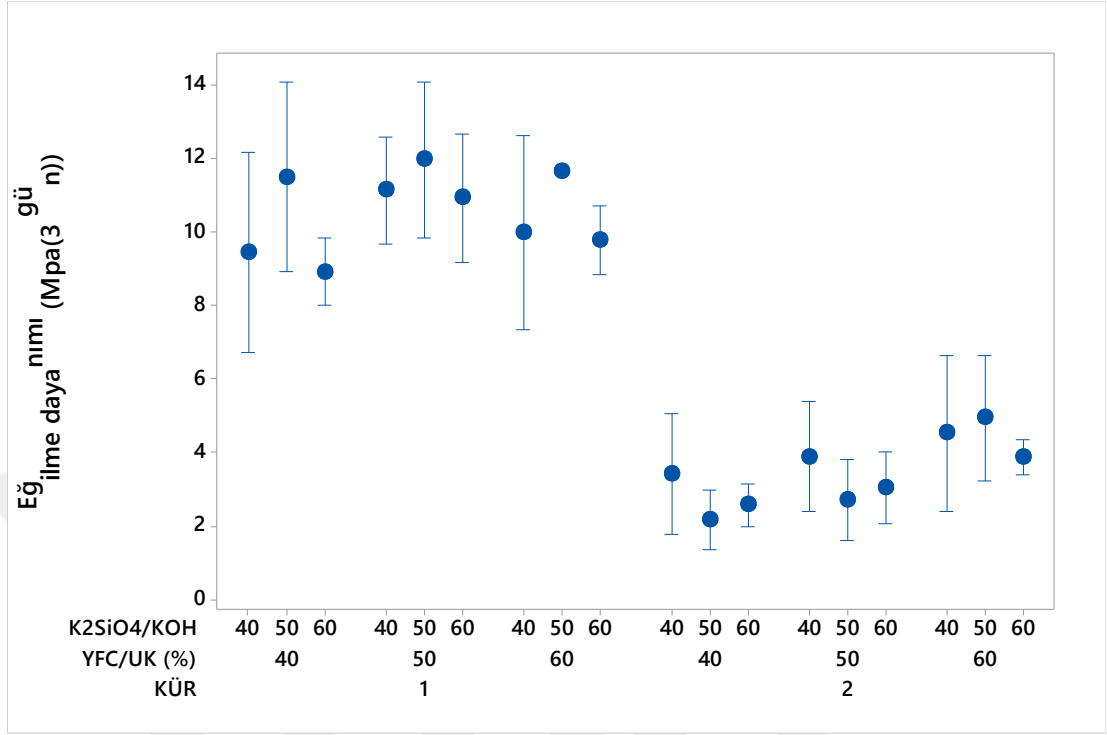


Tablo 3.16. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 3 günlük birim hacim ağırlıkları



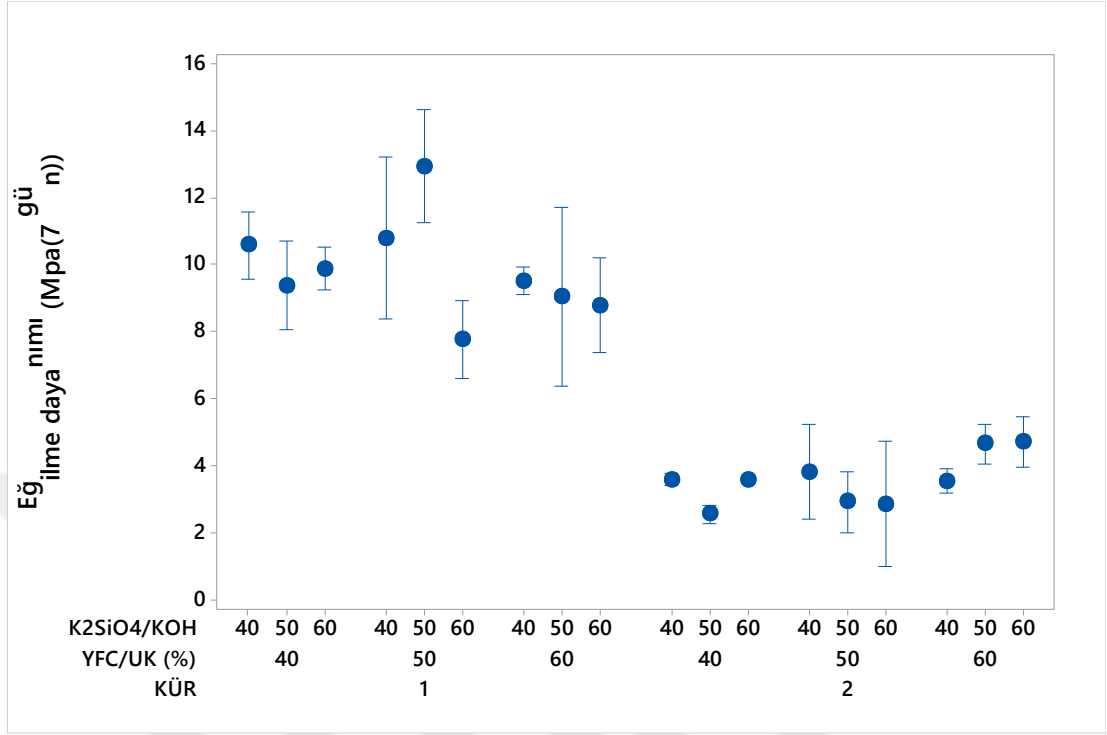
Birim hacim ağırlık değişimlerinde 3,7,28 günlük süre zarflarında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Tablo 3.17. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 3 günlük eğilme dayanımları



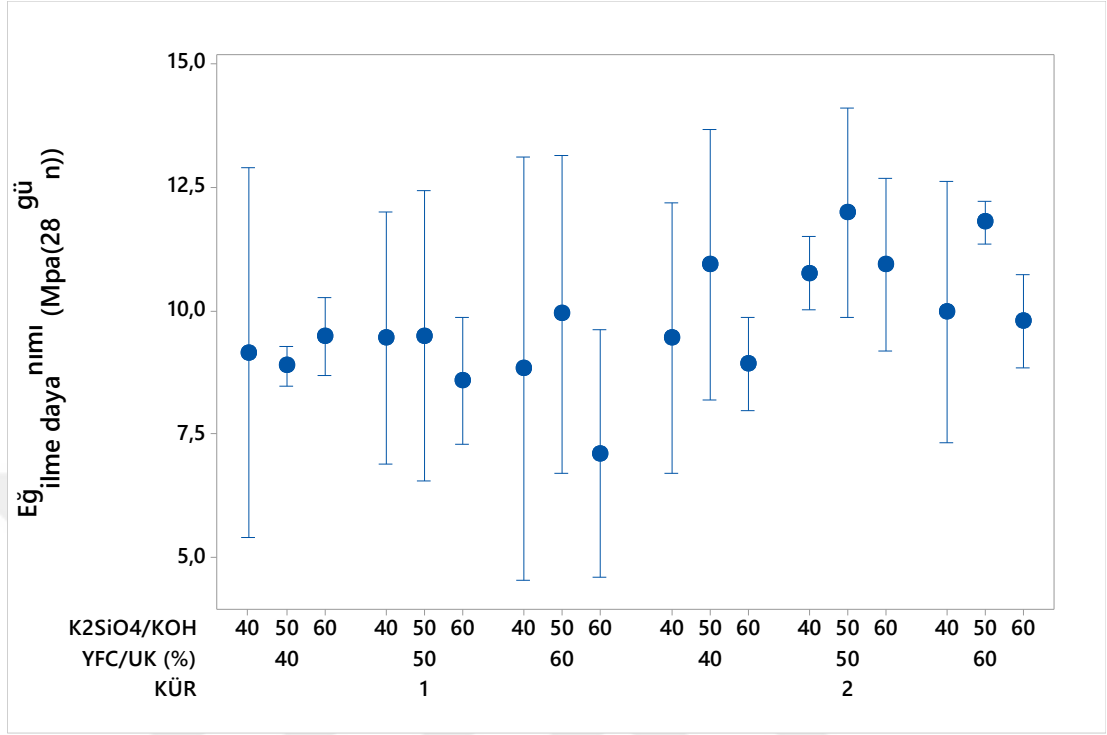
3 Günlük eğilme dayanımlarında 1 nolu kürde YFC/UK- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu, 2 nolu kür de ise YFC/UK %60- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu karışım oranında en yüksek dayanımların elde edildiği tespit edilmiştir.

Tablo 3.18. K_2SiO_4/KOH – YFC/UK oranlarının kür 1 ve kür 2 ye göre 7 günlük eğilme dayanımları



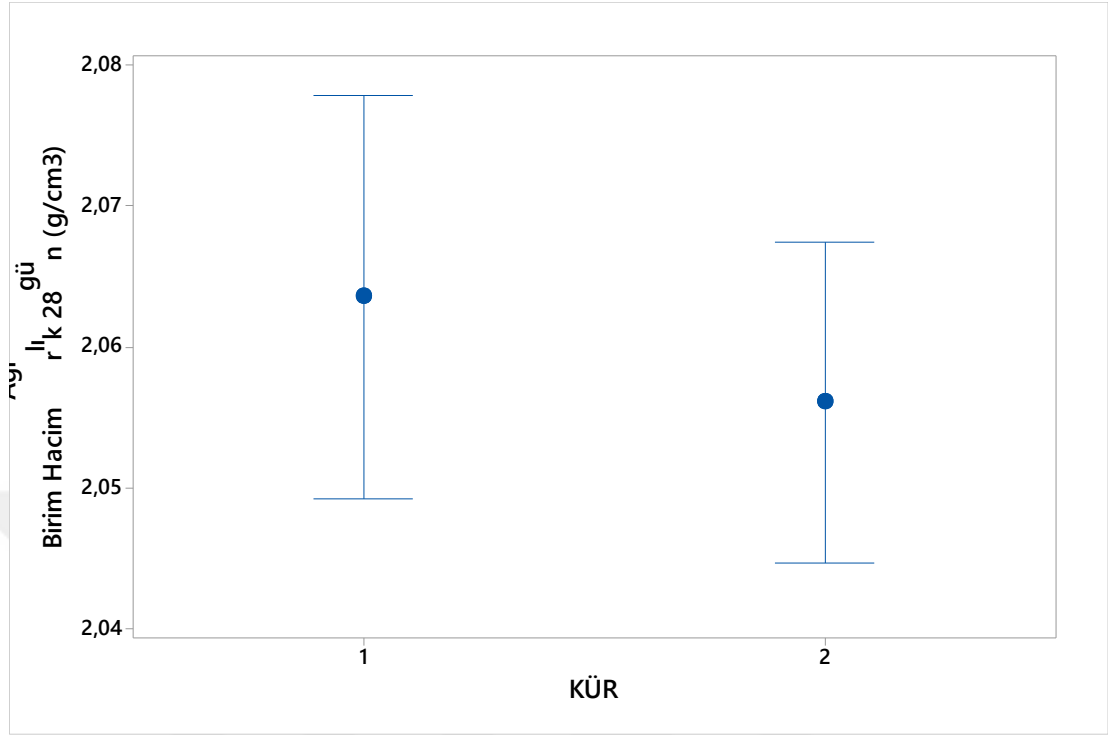
7 Günlük eğilme dayanımları sonuçları incelendiğinde 1 nolu kürde YFC/UK – K_2SiO_4/KOH %50 olarak belirlendiği karışım serisinde, 2 nolu kürde ise YFC/UK %60- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu karışım serisinde en yüksek eğilme dayanımları sağlanmıştır.

Tablo 3.19. K_2SiO_4/KOH –YFC/UK oranlarının kür 1ve kür 2 ye göre 28 günlük eğilme dayanımları



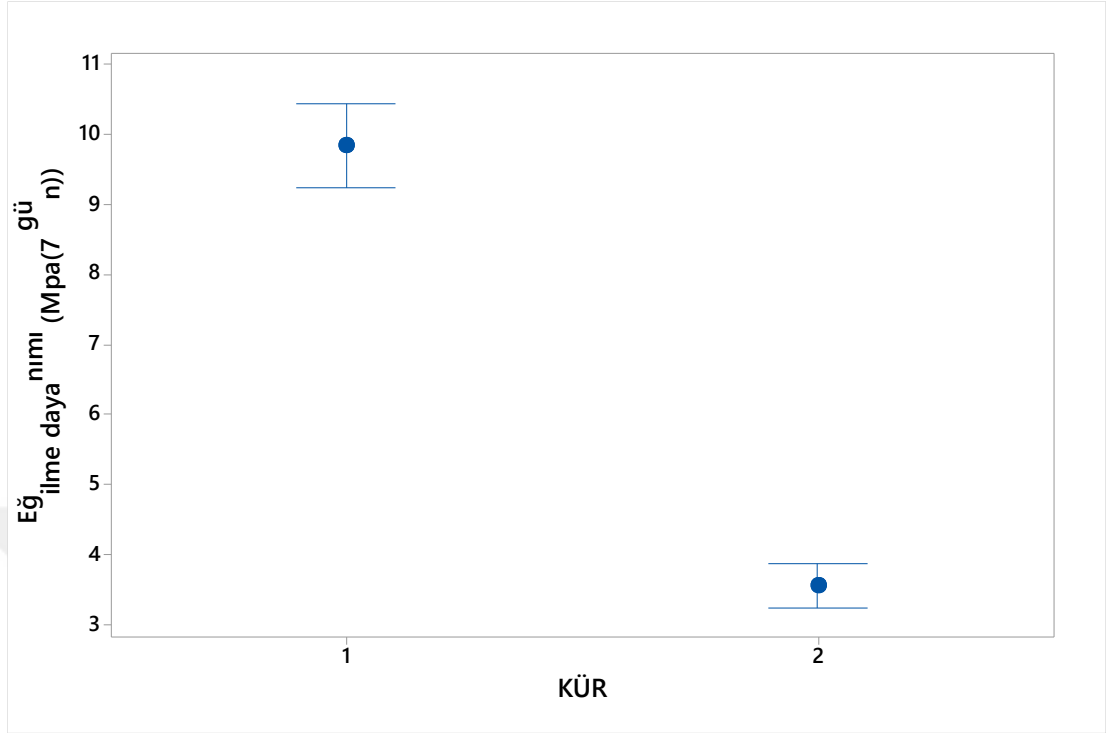
28 Günlük eğilme dayanımları değerlendirildiği takdirde ise 1 nolu kürde YFC/UK %60- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu karışım serisi, 2 nolu kürde ise YFC/UK- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu durumlarda diğer karışım serilerine kıyasla daha fazla dayanım elde edilmiştir. Ayrıca 2 nolu kürde 1 nolu küre göre daha fazla dayanım elde edilmiştir.

Tablo 3.20. Kür 1 ve 2 ye göre 28 günlük ortalama birim hacim ağırlıkları



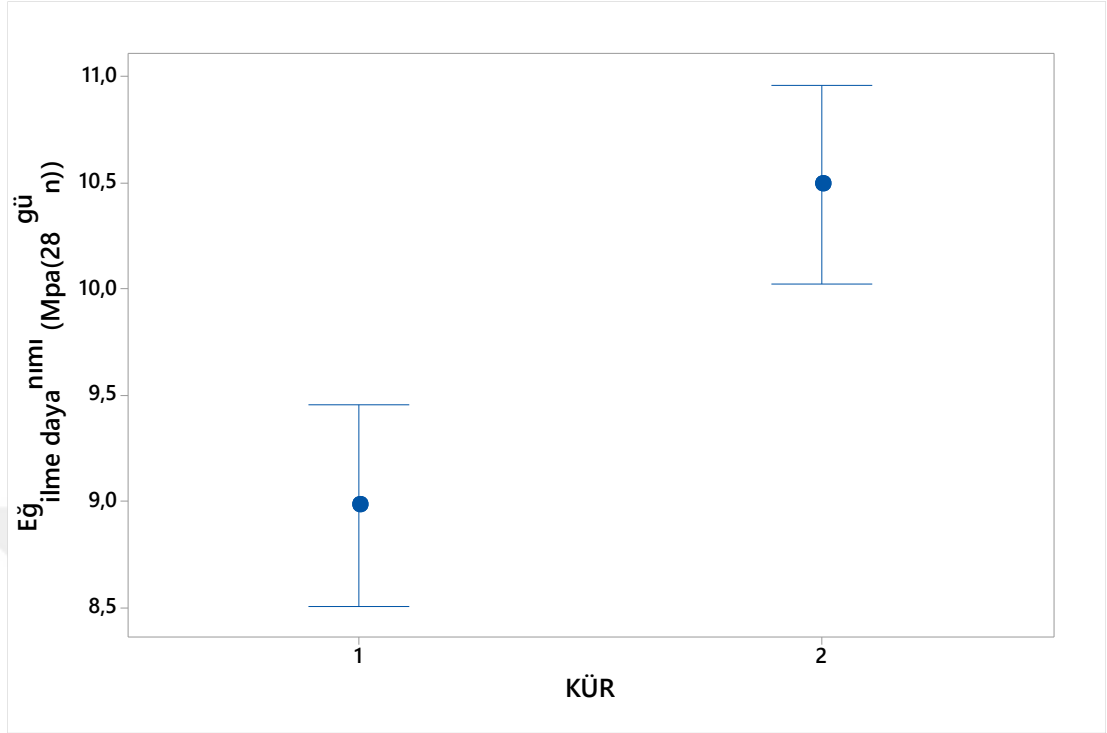
28 Günlük ortalama birim hacim ağırlıkları değerlendirildiğinde 1 nolu kür şartlarının 2 nolu kür şartlarında bekletilmiş numunelere kıyasla daha fazla birim hacim ağırlık değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ancak oluşan bu farklılık önemsizdir.

Tablo 3.21. Kür 1 ve 2 ye göre 7 günlük ortalama eğilme dayanımları



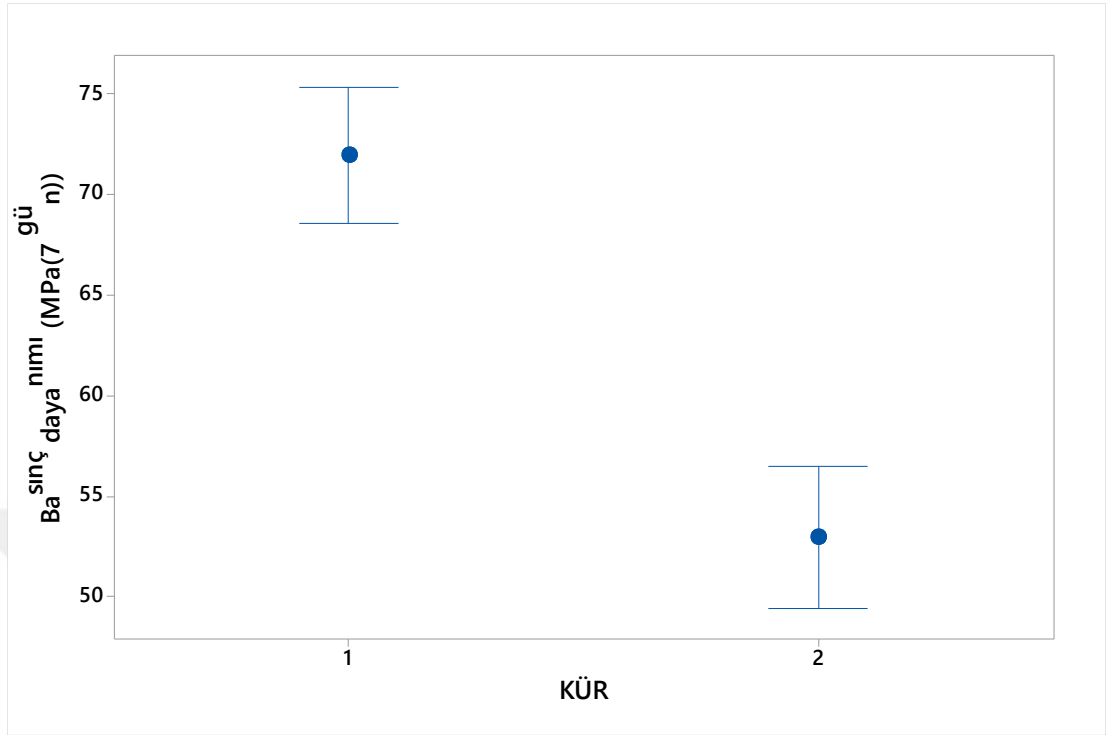
7 Günlük ortalama eğilme dayanımları 1 nolu kür koşullarında 2 nolu kür koşullarına oranla daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3.22. Kür 1 ve 2 ye göre 28 günlük ortalama eğilme dayanımları



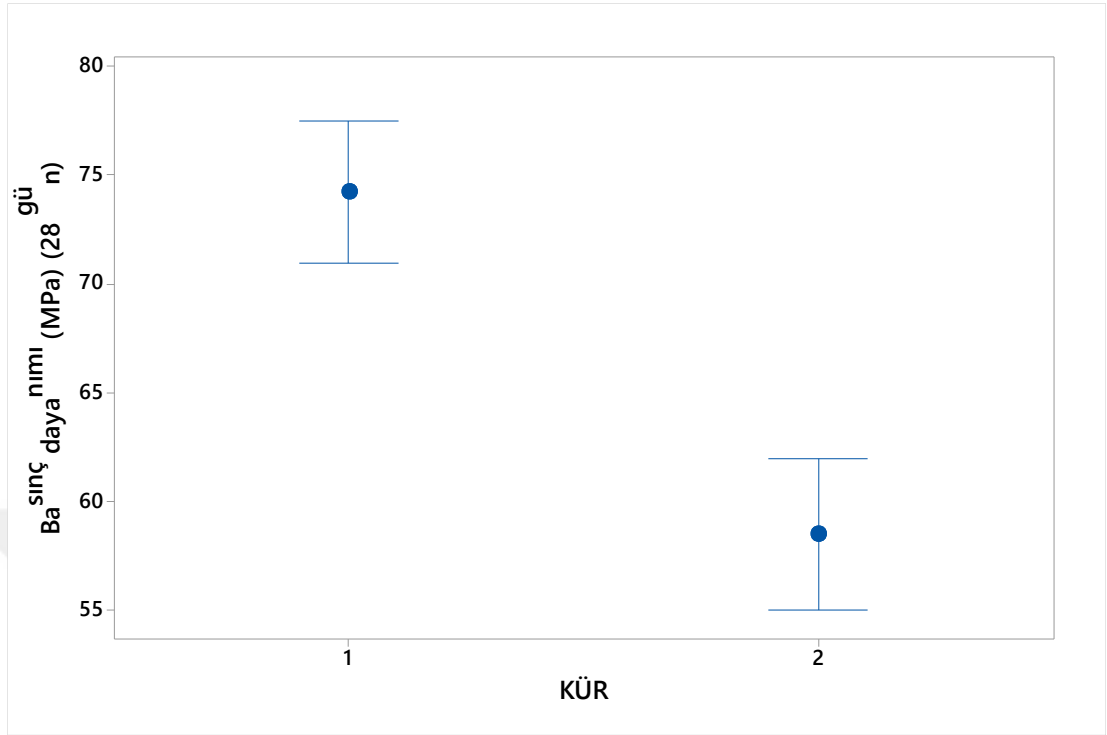
28 Günlük ortalama eğilme dayanımlarında 1 nolu kür koşullarının 2 nolu kür koşullarına göre daha zayıf kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak 1 nolu kür koşulunda 7-28 gün süre aralığında eğilme dayanımında önemli bir fark oluşmazken 2 nolu su kürü 7-28 gün aralığında belirgin bir dayanım artışı olduğu tespit edilmiştir. Bu etkinin su küründe hidrasyonun daha uzun sürede gerçekleştiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 3.23. Kür 1 ve 2 ye göre 7günlük ortalama basınç dayanımları



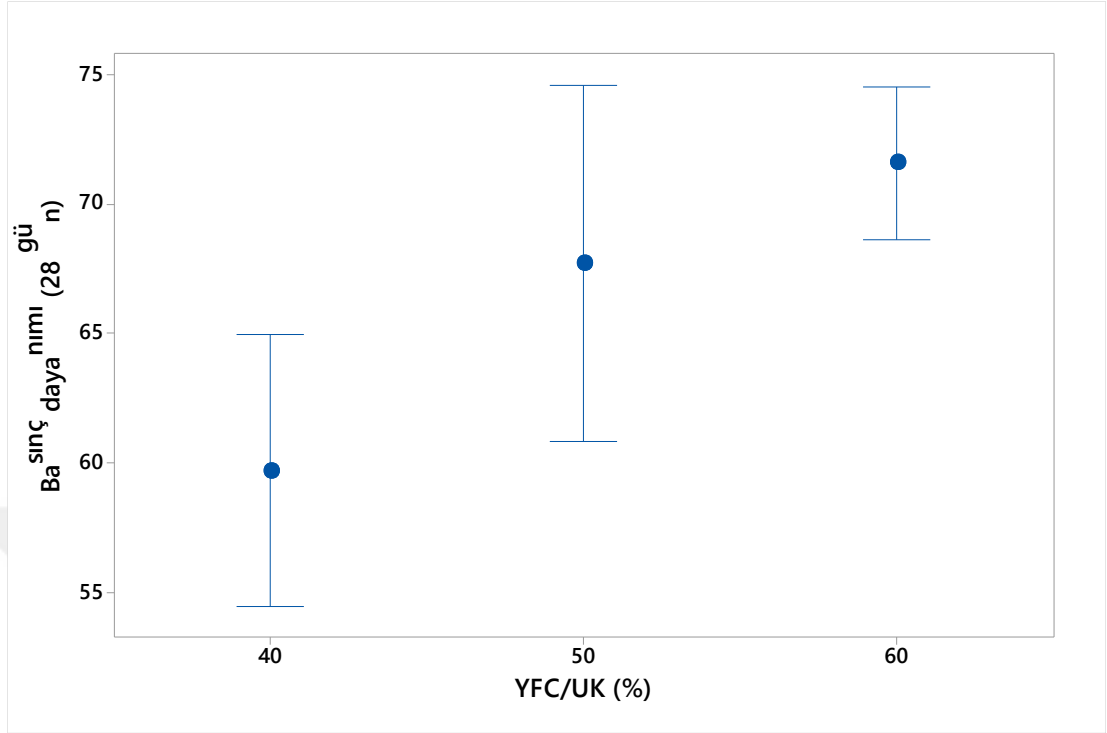
7 Günlük basınç dayanım ortalamalarında 1 nolu kür koşullarının 2 nolu kür şartlarına oranla daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu etkinin 1 nolu kür koşulunda hidrasyonun daha hızlı gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 7 günlük ortalama eğilme dayanımları da bu değerlendirmeyi doğrulamaktadır.

Tablo 3.24. Kür 1 ve 2 ye göre 28 günlük ortalama basınç dayanımları



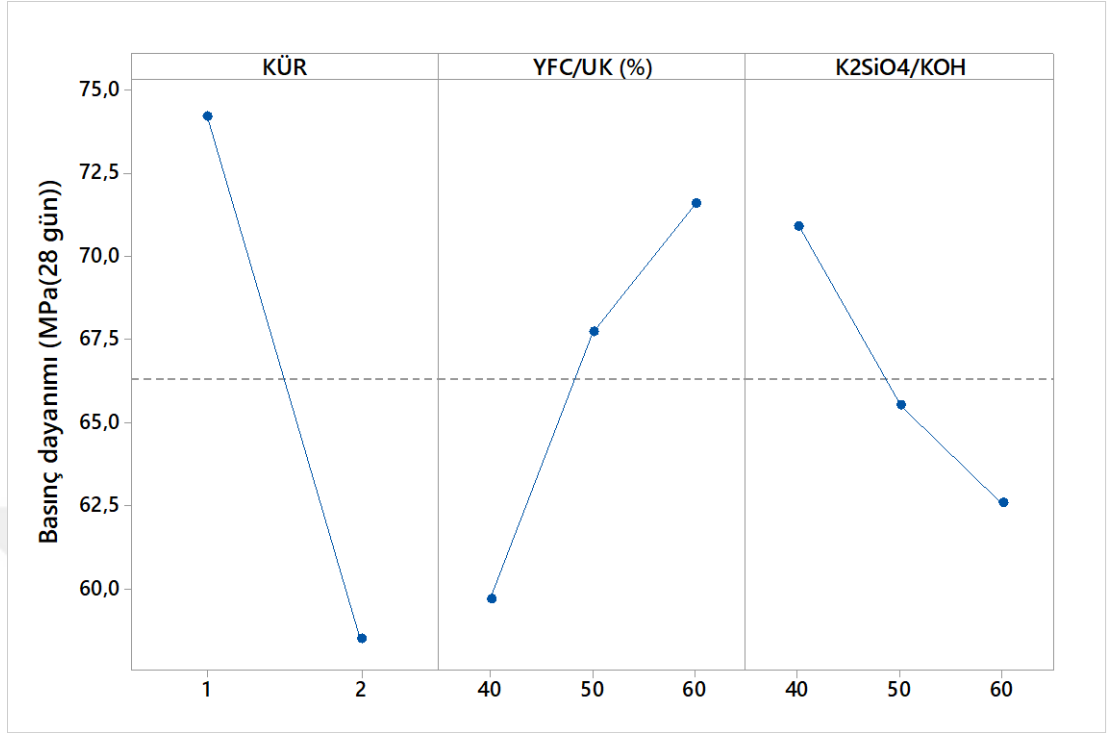
28 Günlük basınç dayanımlarında da yine 1 nolu kür şartlarında 2 nolu kür koşullarına göre daha fazla dayanımların elde edildiği tespit edilmiştir. Ancak bu dayanım 7 günlüklere kıyasla büyük bir fark oluşturmamaktadır. Bu durumun 1 numarayla adlandırılan buhar kürünün numune sıcaklığını koruduğu, 2 nolu su kürünün ise sıcaklığını koruyamaması üzerine numunelerde çatlak oluşmasına neden olduğu ve bu etkinin 2 nolu numunelerde daha az basınç dayanımı elde edilmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Jeopolimerizasyon boyunca polimer oluşum hızı kür sıcaklığı, kür süresi ve alkali derişimi ile değişir. Kür sıcaklığının artması durumunda polimerizasyon daha hızlı gerçekleşir ve polimer oluşumu hızlanır. Bu nedenle 1 nolu kür de daha fazla dayanım elde edilmiştir.

Tablo 3.25. *Yfc/uk ye göre 28 günlük ortalama basınç dayanımları*



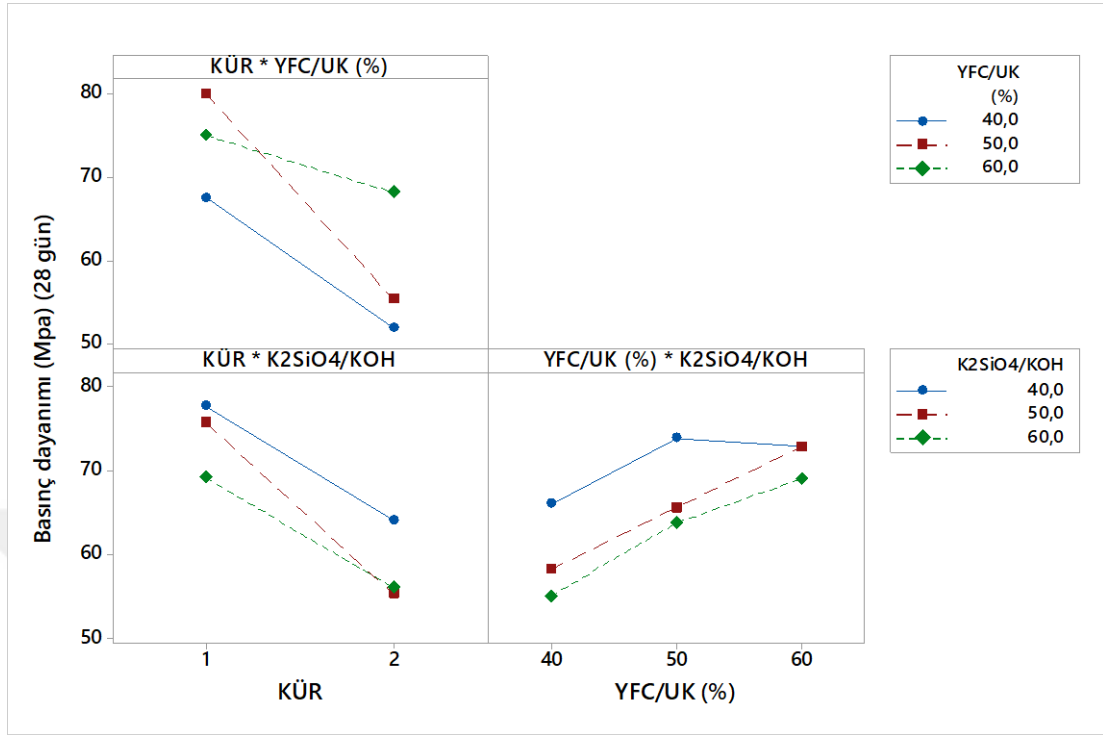
28 Günlük ortalama basınç değerlerinde YFC/UK yüzdesinin %60 oranında en yüksek dayanımları sağladığı tespit edilmiştir. YFC oranındaki artışla birlikte yfc nin alkalilerle daha iyi aktive olması sebebiyle dayanım artışı meydana gelmektedir.

Tablo 3.26. 28 günlük ortalama basınç dayanımına kür,yfc/uk ve K_2SiO_4/KOH oranları etkisi



Yapılan çalışmada en yüksek basınç dayanımı değerlerine 28 günlük süre sonunda ulaşılmış olup 9 farklı karışım oranına 2 farklı kür tipi uygulanmıştır. Yapılan deneylerde en ideal kür tipinin 1 nolu buhar kürü olduğu ve yine YFC/UK oranının %60 ‘ a K_2SiO_4/KOH oranı ise %40 ‘ a yaklaştığı durumlarda en yüksek ortalama basınç dayanım değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

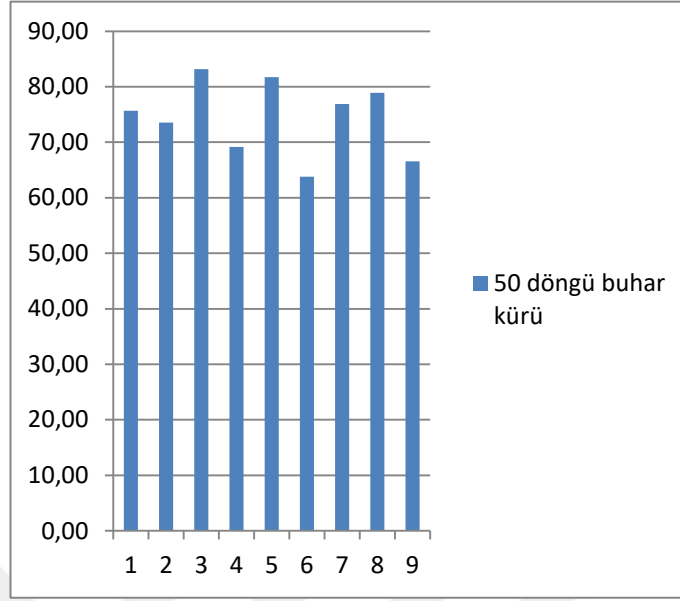
Tablo 3.27. 28 günlük en yüksek basınç dayanımına kür,yfc/uk ve K_2SiO_4/KOH oranları etkisi



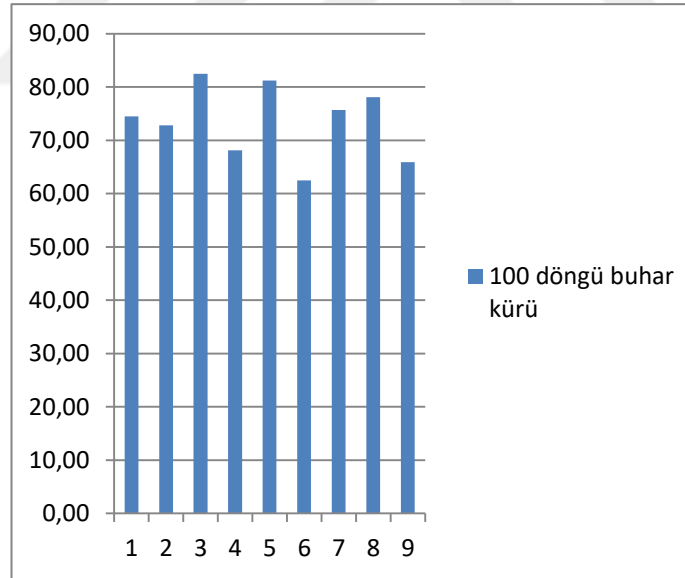
3.4. Donma-Çözülme Deney Sonuçları

ASTM C666'' Hızlı Donma Çözölmeye Maruz Kalan Betonun Direncini Belirlemek İçin Standart Test Metodu '' na uygun iki methot oluşturulmuştur. Bu iki methotta da hızlı donma-çözölme döngüleri uygulanmaktadır. A yönteminde donma-çözölme su içerisinde, B yönteminde ise donma havada, çözölme ise su içerisinde gerçekleşmektedir. Yapılan bu çalışmada A yöntemi uygulanmış, donma -çözölme döngülerinde sıcaklık 4 C den -18 C ' düşüp, -18 C den 4 C' ye çıkarılarak ve döngüler 2-5 saat aralığında gerçekleştirilmiştir. Otomatik donma- çözölme döngüsü gerçekleştirebilen makinede 50,100 döngülerde basınç dayanımı değerleri ölçölmüştür. Basınç dayanım değerleri aşğıdaki grafiklerde verilmiştir.

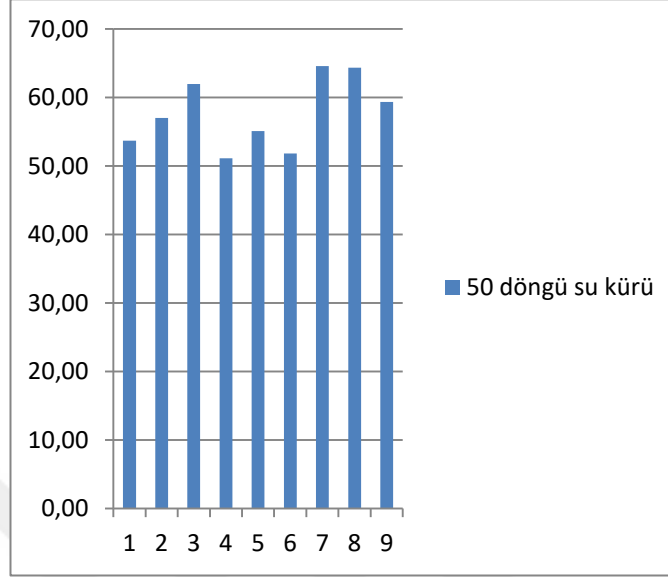
Tablo 3.28. 50 döngü buhar kürü basınç dayanımları (Mpa)



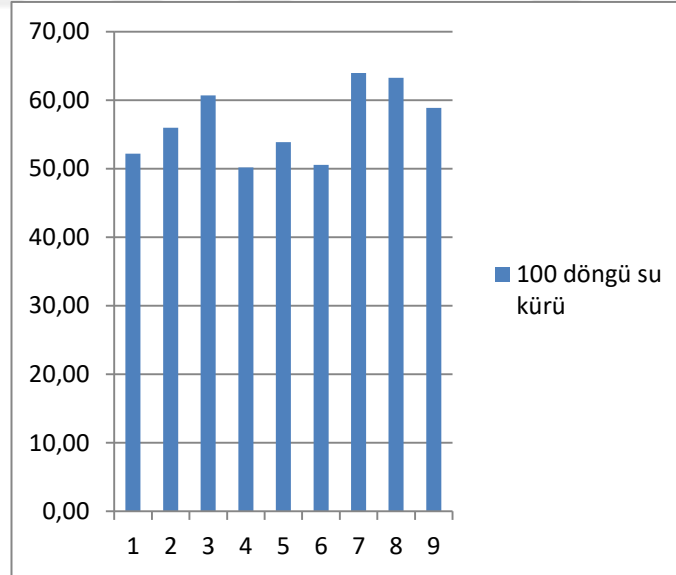
Tablo 3.29. 100 döngü buhar kürü basınç dayanımları (Mpa)



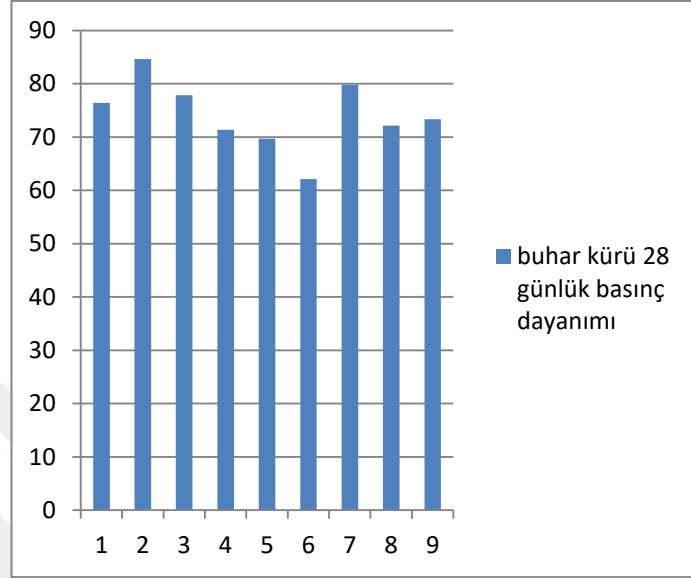
Tablo 3.30. 50 döngü su kürü basınç dayanımları (Mpa)



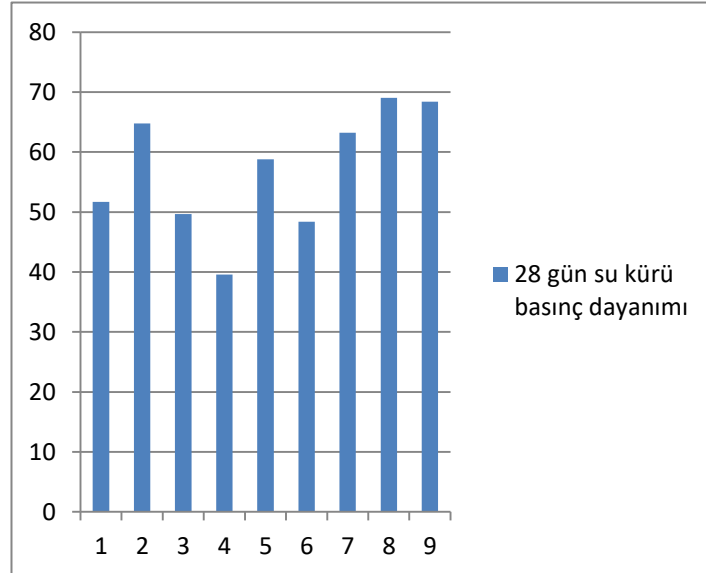
Tablo 3.31. 100 döngü su kürü basınç dayanımları (Mpa)



Tablo 3.32. Karışım serilerine göre 28 günlük buhar kürü basınç dayanımları (Mpa)



Tablo 3.33. Karışım serilerine göre 28 günlük su kürü basınç dayanımları (Mpa)



50 Döngü buhar kürü uygulanan karışım serilerinde 3,5,6,8 nolu serilerde 28 günlük buhar kürü basınç dayanımlarına kıyasla artış gerçekleşmiştir. 1,2,4,6,9 nolu serilerde ise

basınç dayanımlarında 28 gün buhar kürü basınç dayanımlarına göre azalma olduğu gözlemlenmiştir.

100 Döngü buhar kürü basınç dayanımlarında ise 50 döngü buhar kürü basınç dayanımlarına oranla azalma meydana gelmiştir. Ancak 28 gün buhar kürü basınç dayanımlarına göre 3,5,6,8 nolu serilerde yine artış olduğu tespit edilmiştir.

50 Döngü su kürü uygulanan 1,3,4,6,7 nolu karışım serilerinde 28 günlük su kürü basınç dayanımlarına kıyasla bir artış olduğu tespit edilmiştir.

100 Döngü su kürü basınç dayanımları ele alındığında 50 döngü su kürü basınç dayanımlarına nazaran bir azalma meydana gelmiştir fakat 28 gün su kürü basınç dayanımlarına göre kıyaslandığında yine 1,3,4,6,7 nolu karışım serilerinde az da olsa bir dayanım artışı olduğu gözlemlenmiştir.

28 Günlük su-buhar kürü basınç dayanımı sonuçlarına göre 50-100 döngü donma çözülmeye maruz kalan karışım serilerinde meydana gelen basınç dayanım artışının geopolimer içyapısında meydana gelen boşluklardaki su zerreciklerinin donmasıyla numunelerde dayanım artışına sebep olduğu düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR

Ekonomik ve çevresel kaygılara dayalı volkanik kül, uçucu kül ve cürufların tamamı geopolimerizasyon için arzu edilen malzemelerdir. Alkalin aktivasyonu ile Portland çimentosuna alternatif olarak yeni bağlayıcıların geliştirilmesi araştırmacıların ilgi alanını oluşturur. Araştırmacılar bu sistemin özelliklerinde değişikliği amaçlayan uçucu kül sisteminde farklı lifler, kimyasal ve mineral katkıların yanı sıra diğer materyalleri de kullanmışlardır. Geopolimer harçlar, çimento bağlayıcılı harçlara göre daha hafif, fiziksel ve kimyasal etkilere daha dayanıklıdır.

Diğer taraftan tüm dünya ülkelerinde giderek artış gösteren çimento gereksinimi de dikkate alındığında, çimentolu betonun sürdürülebilir bir malzeme oluşturup oluşturmadığı artık daha fazla tartışılır duruma gelecektir. Geopolimer kimyasıyla verimliliği yüksek ve maliyeti düşük teknolojilere sahip ürünlerin üretilmesi mümkündür. Doğal minerallerdeki kimyasal bileşimlerin işlenmesiyle üretilen geopolimer ile yüksek dayanma gücüne sahip beton, güçlendirme harcı ve daha çok sayıdaki farklı amaçlara hizmet edebilecek malzemeler sağlanabilmektedir.

Geopolimer harçlarda mineral katkıların etkilerini değerlendirmek amacıyla yapılan bu çalışmada, her seriden dokuz kalıp numune dökülmüştür. Numuneler 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan sökülmüştür. Kalıptan sökülen numunelere 85° C de 12 saat etüvde su ve buhar kürü uygulanmıştır. Etüvden çıkarılan numuneler deney zamanına gelinceye kadar kür odasında bekletilmiştir. 1 Kodlu numunelere su buharı kürü uygulanmıştır. 2 Kodlu numunelere su kürü uygulanmıştır. Deneylerde silis kullanılmıştır ve silis kullanılmadan önce çeyreklemeye yapıp 24 saat etüvde kurutulduktan sonra deneylerde kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan uçucu kül 90+90 dakika öğütülüp inceliği artırılarak kullanılmıştır.

Zonguldak'tan getirtilen cüruflla birlikte Ege Kimya'nın yerli potasyum silikatu deneylerde uygulanmıştır. Bunun yanı sıra, yerli potasyum hidroksit (Borkim), kullanım öncesinde hazırlanarak 24 saat içinde kullanılmıştır. Yerli katkının bulunduğu deneylerde basınç dayanımlarını belirlemede 3 adet numune kullanılmıştır. Sözelimi 7 günlük basınç dayanımını belirlemek için 3 adet numune kırılmıştır. Yapılan basınç

dayanım deneyinden elde edilen sonuçlar varyans analizi ile değerlendirilmiştir ve ideal karışım oranları belirlenmiştir.

3 Günlük basınç dayanımı deney sonuçları neticesinde 1 nolu su buharı kürü uygulanmış numunelerden karışım oranları YFC/UK- K_2SiO_4/KOH ın % 50 olduğu durumda, 2 nolu su kürü uygulanmış numunelerde ise YFC/UK %60 ve K_2SiO_4/KOH %40 olduğu durumda en yüksek dayanım elde edilmiştir.

7 Günlük basınç dayanımları değerlendirildiğinde 1 nolu buhar küründe yine en yüksek dayanımların YFC/UK- K_2SiO_4 oranlarının %50 olduğu durumda elde edildiği görülmüştür. 2 nolu su kürü değerlendirildiğinde ise en yüksek dayanım oranları YFC/UK %60, K_2SiO_4/KOH %50 olduğu durumda en yüksek dayanımların elde edildiği gözlemlenmiştir.

28 Günlük basınç dayanımları sonuçlarında 1 nolu su buharı kürü uygulanmış numunelerde YFC/UK %50, K_2SiO_4/KOH %40 olduğu karışım oranında, 2 nolu su kürü uygulanmış numunelerde ise YFC/UK %60 ve K_2SiO_4 %40 olduğu karışım oranında en yüksek dayanımlar elde edilmiştir.

3 Günlük eğilme dayanımlarında 1 nolu kürde YFC/UK- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu, 2 nolu kür de ise YFC/UK %60- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu karışım oranında en yüksek dayanımların elde edildiği tespit edilmiştir.

7 Günlük eğilme dayanımları sonuçları incelendiğinde 1 nolu kürde YFC/UK – K_2SiO_4/KOH %50 olarak belirlendiği karışım serisinde, 2 nolu kürde ise YFC/UK %60- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu karışım serisinde en yüksek eğilme dayanımları sağlanmıştır.

28 Günlük eğilme dayanımları değerlendirildiği takdirde ise 1 nolu kürde YFC/UK %60- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu karışım serisi, 2 nolu kürde ise YFC/UK- K_2SiO_4/KOH %50 olduğu durumlarda diğer karışım serilerine kıyasla daha fazla dayanım elde edilmiştir.

Yapılan çalışmada en yüksek basınç dayanımı değerlerine 28 günlük süre sonunda ulaşılmış olup 9 farklı karışım oranına 2 farklı kür tipi uygulanmıştır. Yapılan

deneylerde en ideal kür tipinin 1 nolu buhar kürü olduğu ve yine YFC/UK oranının %60 ' a K_2SiO_4/KOH oranı ise %40 ' a yaklaştığı durumlarda 28 gün en yüksek ortalama basınç dayanım değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

50-100 Döngü buhar kürü uygulanmış karışım serilerinde 3 nolu karışım serisinde en yüksek dayanımlar elde edilirken 50-100 döngü su kürü uygulanan karışım serilerinde 7 nolu karışım serisinde en yüksek dayanımlar elde edilmiştir.

Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere beton numunelerin kür süreleri arttıkça, basınç dayanımlarının da arttığı görülmektedir. Collins ve Sanjayan'ın (2001) yapmış oldukları deneysel bir araştırmada da bağlayıcı olarak alkali aktive edilmiş cürufu kapsayan geopolimer betonlar üzerinde uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Sodyum karbonat ve sodyum hidroksitten oluşan aktivatörlerin yanı sıra sönmüş kireç ve sodyum silikat kullanılmıştır. Alkalilerle aktive edilen cürufu ile üretilmiş olan betonların basınç dayanıklılığının, tüm kür sürelerinde normal betonlardan daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Puertas vd. (2000), % 50 Uçucu kül + % 50 Yüksek fırın cürufu ve 10 M NaOH solüsyonu ile 25°C kür yapılan numunelerden elde edilen 28 günlük basınç dayanım değerini 50MPa olarak bulunmuştur.

Brough ve Atkinson (2002) a göre 20 C ve 80 C de 12 saat boyunca kür edilen ve sodyum silikatla aktive olmuş cüruf 7 ve 72 Mpa basınç dayanımını elde ederken bu basınç dayanım artışı sıcaklığın 20 C den 80 C ye çıktığında gerçekleşmiştir. Bu dayanım artışı aktivasyon yönteminden sonra puzolanların özellik oluşumunun gerçekleşmesi sonucu üzerinde bir düşünce oluşumuna neden olmuştur.

Hubler vd. (2011) yaptıkları deneyde alkali ile aktive olmuş cüruf harcına saf kalsiyum silika hidrat ilave etmişlerdir. Cüruf harcı kürleme sonrasında daha yüksek dayanım gerçekleşmiştir. Aktivesi alkali ile yapılmış cüruflar daha önce hidratasyon gerçekleştirmiştir. Deney neticesinde aktivesi alkali ile yapılmış cüruf harcında 1-14 gün süresinde yapılan kürün c-s-h jellerinin dayanımı arttırdığı ve hava ile etkileşimin olmadığı yerlerde kürlemenin dayanımı yükselttiği ancak su içindeki kürlemenin ise çatlak oluşumu neticesinde dayanımı olumsuz etkilediği bildirilmiştir.

Cai vd. (2013) yaptığı deneyde, alkali ile aktive edilen cürüflu betonu (ASC), cüruf ve Na_2SiO_3 , NaOH aktivatörleriyle oluşturmuştur. Aktivatör çözelti-cüruf oranı (A/S), cüruf içeriği ve kum oranının donma-çözülme dayanıklılığına etkileri araştırılmıştır. Donma-çözülme dayanımına en büyük etkiyi öncelikle A/S sonrasında cüruf içeriği ve kum miktarı gerçekleştirmiştir. Cüruf yapısı ve A/S birleşimi ve hava boşluklu oluşumun en etkili etkenler olarak belirtilmiştir. Hava kabarcığı boşluk katsayısının azalması ve spesifik yüzey alanının artmasıyla donma-çözülme direncine olumlu yönde etkilediği söylenmiştir.

Geopolimer harçların yapı teknolojilerinde kullanılmasının yeni ve gerekli oluşunun yanı sıra, son zamanlardaki uygulamalarıyla önemli yararlar sağlanmıştır. Geopolimerler, farklı katkılarla çimento uygulamalarında optimal amorf malzemelerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda geopolimer betonların mekanik ve fiziksel özellikleri açısından normal çimentolardan daha yüksek değerli olduğu gözlemlenmiştir. Bu yeni malzemelere yeni yöntemlerde yer alan eksiklikler, bunlar için ek araştırma ve deneylerin gerekliliğini göstermektedir.

5. KAYNAKÇA

- Al-Otaibi, S. (2008). Durability of Concrete Incorporating GGBS Activated by Water-Glass. *Construction and Building Materials*, 22 (10), 2059-2067.
- Altan, E., & Erdoğan, S.T. (2012). Alkali Activation of a Slag at Ambient and Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 34 (2), 131-139.
- Atakay, O. (2006). Uçucu Küllerin Katkılı Çimento Üretiminde Kullanılması: Tane İnceliği ve Katkı Miktarının Etkisi.Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ankara
- Atış, C., Bilim C., Çelik Ö., & Karahan O. (2009). Influence of Activator on the Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Mortar. *Construction and Building Materials*, 23 (1), 548-555.
- Aydın, S., & Baradan, B. (2012). Mechanical and Microstructural Properties of Heat Cured Alkali-Activated Slag Mortars. *Materials & Design*, 35,374-383.
- Bakharev, T. (2005). Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. *Cement and Concrete Research* 35,1224-1232.
- Baradan, B., Yazıcı H.,& Aydın, S. (2012). *Beton*.İzmir: Altındağ Grafik Matbaacılık.
- Bell, J.L., Gordon M., & Kriven W.M. (2006). Nano and Microporosity in Geopolymer Gels. *Microscopy Society of America*, 1017,552-553.
- Bilim, C., & Atış C.D. (2012). Alkali Activation of Mortars Containing Different Replacement Levels of Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Construction and Building Materials*, 28 (1), 708-712.
- Brady, J.E., & Holum J.R. (1996). *Chemistry-The Study of Matter and its Changes*. New York: John Wiley.
- Brough & Atkinson, (2002) . ‘‘Elazığ Ferro Krom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması’’ Yüksek Lisans Tezi, *Malatya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Malatya
- Buchwald, A., Hohmann M., Posern K., & Brendler E. (2009). The Suitability of Thermally Activated Illite/Smectite Clay As Raw Material for Geopolymer Binders. *Applied Clay Science*, 46, 300–304.
- Cai.(2013), Ferrokrom Cürufu ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılarak Üretilen Geopolimer Betonların Donma Çözülme Dayanıklılığının Araştırılması.

- Chindaprasirt, P., Chareerat T., & Sirivivatnanon V. (2007). Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement & Concrete Composites*, 29, 224–229.
- Collins, F., & Sanjayan J.G. (2000). Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinkage of Alkali Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Research*, 30 (9), 1401-1406.
- Collins, F., & Sanjayan J.G. (2001). Microcracking and Strength Development of Alkali Activated Slag Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23 (4-5), 345–352.
- Criado, M., Polomo A., & Fernandez-Jimenez A. (2005). Alkali Activation of Fly Ashes. Part 1: Effect of Curing Conditions on the Carbonation of the Reaction Products. *Fuel*, 84 (16), 2048-2054.
- Davidovits, J. (1982). Mineral Polymers and Method of Making Them. *United States Patent*, 4,349-386.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656.
- Davidovits, J. (1994). Geopolymers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journal of Materials Education*, 91-137.
- Diaz, E.I., Allouche E.N., & Eklund S. (2010). Factors Affecting the Suitability of Fly Ash as Source Material for Geopolymers. *Fuel*, 89, 992–996.
- Erdoğan, T.Y. (2007). *Beton*. Ankara: METU Press Yayınları.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo J.G., & Puertas F. (1999). Alkali-Activated Slag Mortars Mechanical Strength Behavior. *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1313-1321.
- Guo, X., Shi H., Chen L., & Warren A.D. (2010). Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 16:142-147.
- Hwang, C.L., & Huynh T.P. (2015). Effect of Alkali-Activator and Rice Husk Ash Content on Strength Development of Fly Ash and Residual Rice Husk Ash-Based Geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 1-9.

- Hubler.(2011) Elazığ Ferro Krom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması.Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.Malatya
- Jaarsveld, J.G.S., Deventer J.S.J.,& Lukey G.C. (2002). The Effect of Composition and Temperature on The Properties of Fly Ash- and KaoliniteBased Geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89, 63-73.
- Jaarsveld, J.G.S., Deventer J.S.J., & Lukey G.C. (2003). The Characterisation of Source Material in Fly ash Based Geopolymers.*Materials Letters* 57 (7),1272-1280.
- Kamseu, E., Melo U.C., Leonelli C., & Lemougna P.N. (2010). Polysialate Matrixes from Al-Rich and Si-Rich Metakaolins: Polycondensation and Physico-Chemical Properties. in InterCeram: *International Ceramic Review*, 60 (1), 25-31.
- Katz, A. (1998). Microscopic Study of Alkali Activated Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 28 (2),197-208.
- Kolousek, D., Brus J., Urbanova M., & Vorel J. (2007). Preparation, Structure and Hydrothermal Stability of Alternative (Sodium Silicate-Free) Geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42 (22), 9267-9275.
- Kong, D.L.Y., & Sanjayan J.G. (2010). Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete. *Cement and Concrete Research*, 40,334–339.
- Kürklü, G. (2016). Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek Fırın Cürufu Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16,356-367.
- Li, Y., & Sun Y. (2000). Preliminary Study on Combined-Alkali–Slag Paste Materials. *Cement and Concrete Research*, 30 (6), 963-966.
- Oh, J.E., Monteiro J.M.P., Jum S.S., Choi S., & Clark S.M. (2010). The Evolution of Strength and Crystalline Phases for Alkali-Activated Ground Blast Furnace Slag and Fly Ash-Based Geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 40 (2),189-196.
- Olivia, M., & Nikraz H.R. (2011). Strength and Water Penetrability of Fly Ash Geopolymer Concrete. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6 (7),70-78.
- Pangdaeng, S., Phoo-Ngernkham T., Sata V., & Chindaprasirt P. (2014): Influence of Curing Conditions on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Containing Portland Cement as Additive. *Materials and Design*, 53, 269-274.

- Pinto, A.T. (2005). Repairing of Damaged Stone in Monuments and Stone Buildings. *Advances in Science and Technology*, 69, 164-173.
- Puertas, F., Fernandez-Jimenez A., Amat T., & Vazquez T. (2003). Mechanical and Durable Behavior of Alkaline Cement Mortars Reinforced with Polypropylene Fibres. *Cement and Concrete Research*, 33(12),2031-2036.
- Puertas, F., Martinez-Ramirez S., Alonso S., &Vazquez T. (2000). Alkali-Activated Fly Ash/Slag Cements: Strength Behaviour and Hydration Products. *Cement and Concrete Research*, 30 (10),1625-1632.
- Reig, L., Tashima M.M., Borrachero M.V., Monzo J., Cheeseman C.R., &Paya J. (2013). Properties and Microstructure of Alkali-Activated Red Clay Brick Waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106.
- Songpiriyakij, S., Jaturapitakkul C., Kubprasit T., &Chinda P. (2010). Compressive Strength and Degree of Reaction of Biomass and Fly Ash-Based. *Construction and Building Materials*, 24 (3), 236-240.
- Şimşek, O. (2004). *Beton ve Beton Teknolojisi*.Ankara: Seçkin Yayınevi.
- Temuujin, J., & Riessen. (2009). Effect of Fly Ash Preliminary Calcination on the Properties of Geopolymer. *Journal of Hazardous Materials* 164, 634-639.
- Temuujin, J., Rickard W., Lee M., & van Riessen A. (2011). Preparation and Thermal Properties of Fire Resistant Metakaolin-Based Geopolymer-Type Coatings. *Journal of Non-Crystalline Solids*” 357 (5), 1399-1404.
- Temuujin, J., Riessen V., & Williams R. (2009). Influence of Calcium Compounds on the Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes. *Journal of Hazardous Materials*, 167, 82–88.
- Temuujin, J., Riessen A., & MacKenzie K.J.D. (2010). Preparation and Characterisation on Fly Ash Based Geopolymer Mortars. *Construction and Building Materials*, 24 (10), 1906-1910.
- Toprak, M.U.(2011). Termik Santral Taban Küllerinin Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi. Doktora Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Eskişehir.
- Türker, P., Erdoğan B., Katnaş F., & Yeğınobalı A. (2003). *Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*. Ankara: TCMB Yayınları.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer J.S.J., & Lukey G.C. (2003). The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-Based Geopolymers. *Materials Letters* 57 (7),1272-1280.

- Wagh, A.S. (2011). Phosphate Geopolymers. *Ceramic Engineering and Science. Proceedings*, 32 (10), 91-103.
- Xu, H., Jannie S.J., & Deventer V. (2002). Geopolymerisation of Multiple Minerals. *Minerals Engineering*, 15,1131–1139.
- Xu, H., Li Q., Shen L., Wang W., & Zhai J. (2010). Synthesis of Thermostable Geopolymer from Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Bottom Ashes. *Journal of Hazardous Materials*, 16,198-204
- Zivica, V. (2007). Effects of type and Dosage of Alkaline Activator and Temperature on The Properties of Alkali Activated Slag Mixtures. *Construction and Building Materials*, 21 (7), 1463-1469.

