

T.C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞİK GEOPOLİMER BETON NUMUNELERİN FARKLI KÜR
KOŞULLARI ALTINDA BASINÇ DAYANIMININ DEĞİŞİMİ**

İLHAN ALTINDAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ANIL NIŞ

İSTANBUL, 2020

İlhan Altındal tarafından hazırlanan “Değişik Geopolimer Beton Numunelerin Farklı Kür Koşulları Altında Basınç Dayanımının Değişimi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İstanbul Gelişim Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Anıl Niş

İnşaat Mühendisliği, İstanbul Gelişim Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

.....

Başkan : Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

.....

Üye : Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

.....

Tez Teslim Tarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Dr.Öğr.Üyesi Ümit ALKAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünün Tez Yazım Kuralları esas alınarak tarafımda hazırlanan ilgili tez çalışması içerisinde;

- Tezin içerisinde vermiş olduğum verileri, dökümanları ve bilgileri etik ve akademik kuralları gözeterek hazırladığımı,
 - Bütün belgeleri, bilgileri, değerlendirmeleri ve sonuçlarını bilimsel etik ve ahlak kuralları çerçevesinde hazırlayarak sunduğumu,
 - Tez çalışması içerisinde kullandığım eserlerin tümüne uygun atıflarda bulunarak kaynak beyan ettiğimi,
 - Kullanılan veriler içerisinde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tez içerisinde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirmekte olup, aksi bir durum oluştuğunda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabul ettiğimi beyan ederim.

İlhan ALTINDAL

...../...../2020

DEĞİŞİK GEOPOLİMER BETON NUMUNELERİN FARKLI KÜR KOŞULLARI ALTINDA BASINÇ DAYANIMININ DEĞİŞİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İlhan ALTINDAL

GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Beton dünyada yapılarda en fazla kullanılan yapı malzemelerinden birisidir. Gelecekte de beton kullanımının artan nüfusla beraber artacağı düşünülmektedir. Fakat beton yapımında kullanılan Portland çimentosu CO₂ salınımından ötürü çevremizi kirletmektedir. Gelecek nesillere yaşanılabilir bir çevre bırakmak için Portland çimentolu beton yerine alternatif beton türlerine ihtiyacımız vardır. Geopolimer beton atık bağlayıcı malzemelerle üretildiklerinden ve çevreye çok daha az CO₂ yaydıklarından dolayı gelecekte Portland çimentolu beton yerine kullanılabilirler. Son zamanlarda Geopolimer betonların yapılarda kullanımı için dayanım ve durabilite çalışmaları yapılmaktadır. Bu tez kapsamında ise atık malzemelerle üretilen farklı Geopolimer betonların farklı kür koşulları altında basınç dayanımının gelişimi araştırılmıştır. Geopolimer beton tipleri olarak; %100 yüksek fırın cürufu içeren, %75 yüksek fırın cürufu + %25 F-tipi uçucu kül içeren, %50 yüksek fırın cürufu + %50 F-tipi uçucu kül içeren 3 farklı Geopolimer betonların yapılarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geopolimer betonların ekonomik üretilebilmesi açısından alkali aktivatörler ile beraber yüksek oranda su kullanılarak Geopolimer beton üretilmiştir. Toplam bağlayıcı miktarı ise kimyasal durabilite etkilerine karşı standartlarda Portland çimentolu betonlara önerilen değerler Geopolimer betonlarda kullanılmıştır. Kür yöntemleri olarak laboratuvar, ısı kürü ve su kürü yöntemleri kullanılarak, 13 farklı kür yöntemleri seçilmiş ve seçilen kür koşulları altında Geopolimer betonların 2., 28. ve 90. günlerde basınç dayanımlarının değişimi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Geopolimer, Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül, Isı Kürü, Su kürü

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ

THE CHANGE OF COMPRESSIVE STRENGTH OF DIFFERENT GEOPOLYMER
CONCRETES UNDER DIFFERENT CURING CONDITIONS

(M.Sc. Thesis)

İlhan ALTINDAL

ISTANBUL GELISIM UNIVERITY

INSTITUTE OF SCIENCE

January 2020

ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials in structural applications. It is thought that the use of concrete will increase with the increasing population in the future. However, Portland cement pollutes our environment due to CO₂ emission. In order to leave a green environment for future generations, alternative types of concrete instead of Portland cement is required. Since Geopolymer concrete is produced with waste binder materials and emits much less CO₂ to the environment, they can be used in the future instead of Portland cement. Recently, strength and durability studies have been carried out for the utilization of Geopolymer concrete in structural buildings. In this thesis, the development of compressive strength of different Geopolymer concretes produced with waste materials under different curing conditions was investigated. The utilization of 3 different Geopolymer concretes containing 100% blast furnace slag, 75% blast furnace slag + 25% F-type fly ash, 50% blast furnace slag + 50% F-type fly ash was investigated in order to use Geopolymer concretes in the structural buildings. Geopolymer concrete was produced by using high levels of water together with alkali activators in order to produce Geopolymer concrete economically. The total amount of binder is selected so that the chemical durability criteria of Portland cement concrete given in standards was also used in Geopolymer concretes. 13 different curing methods were selected using laboratory, heat-curing and water-curing methods, and the variation in compressive strength of Geopolymer concretes on the 2., 28. and 90. days was investigated.

Key Words : Geopolymer, Blast Furnace Slag, Oven-curing, Water-curing, Fly ash

Page Number : 59

Supervisor : Asst. Prof. Dr. Anil NİŞ

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca ilgi alaka ve desteklerinden dolayı yanımda olan babam Mehmet Altındal ve annem Gülbahriye Altındal'a teşekkür ederim. Her zaman saygıyla anacağım, danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ'e teşekkür ederim. İstanbul Gelişim Üniversitesinde Yapı Malzemesi laboratuvarında gerçekleştirilen bu deneylerde bizlere sağladıkları malzeme desteklerinden dolayı Akçansa firmasına ve Akçansa firmasının değerli çalışanlarından Yasin Engin ve Emre Ortemiz'e teşekkür ederiz.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. GEOPOLİMER BETON VE BİLEŞENLERİ.....	5
2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu	5
2.1.1. Yüksek fırın cürufu çimentonun hidratasyonu	5
2.1.2. Betonda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanımı	6
2.2. Uçucu Kül.....	6
2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı	7
2.3. Alkali Aktivatörler	10
2.3.1. Sodyum silikat	10
2.3.2. Sodyum hidroksit.....	11
2.3.3. Kalsiyum hidroksit.....	11
2.3.4. Potasyum hidroksit	11
2.4. Geopolimer Betonun Durabilite Özellikleri	12
2.5. Geopolimerlerin Uygulama Alanları	12
2.6. Geopolimerlerin Ekonomik ve Çevresel Avantajları	13
2.7. Betonun Dayanıklılığı ile İlgili Bazı Konular	15
2.7.1. Büzülme	15
2.7.2. Alkali aktivatörler	15
2.7.3. Isı dayanıklılığı	15
2.7.4. Kür koşullarının geopolimerlerin özelliklerine etkisi.....	16
2.8. Geopolimerlerde Basınç Dayanımı	17
2.9. Geopolimerlerde Hidratasyon Isısı.....	17
2.10. Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Direnci.....	17
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	19

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	19
3.1.1. Yüksek fırın cürufu	19
3.1.2. Uçucu kül	20
3.1.3. Agregalar	21
3.1.4. Alkali solüsyonlar	22
3.1.5. Kimyasal katkı	23
3.2. Uygulamada Prosedür	25
3.2.1. Numuneler	25
3.2.2. Alkali solüsyonların karışımı	25
3.2.3. Karışımın hazırlanması	26
3.2.4. Geopolimer beton üretimi	29
3.2.5. Kür yöntemleri	30
3.2.6. Basınç dayanımı	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	34
4.1. S100 Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altında Dayanımının Gelişimi	34
4.2. S75FA25 Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altında Dayanımının Gelişimi	38
4.3. S50FA50 Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altında Dayanımının Gelişimi	41
4.4. Farklı Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altındaki Dayanımlarının Gelişimi	45
5. SONUÇLAR	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	58

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. F ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları.	9
Çizelge 2.2. Geopolimer malzemelerin uygulamaları.....	13
Çizelge 3.1. Kullanılan cürufun özellikleri	20
Çizelge 3.2. Kullanılan uçucu külün özellikleri.....	21
Çizelge 3.3. Agrega olarak kullanılan kayaların fiziksel özellikleri	22
Çizelge 3.4. Ürün özellikleri (Sodyum Silikat).....	23
Çizelge 3.5. Fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi (NaOH)	23
Çizelge 3.6 Kimyasal akışkanlaştırıcının özellikleri.....	24
Çizelge 3.7. Geopolimer beton karışım aşamaları	26
Çizelge 3.8. 100S (%100 yüksek fırın cürufu) beton üretiminde kullanılan malzemeler	28
Çizelge 3.9. 75S25FA (%75 cüruf +%25 uçucu kül) betonunda kullanılan malzemeler	28
Çizelge 3.10. 50S50FA (%50 cüruf +%50 uçucu kül) betonunda kullanılan malzemeler	29
Çizelge 3.11. Geopolimer betonların farklı kür yöntemleri.....	32

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. F sınıfı uçucu kül	9
Şekil 2.2. C sınıfı uçucu kül	10
Şekil 2.3. Ukrayna’da geopolimer beton kullanılarak üretilmiş konut yapıları.....	13
Şekil 2.4. Yüksek sıcaklık esnasında geopolimerlerin faz dönüşümü	18
Şekil 3.1. Yapılan deneyde kullanılan cüruf	19
Şekil 3.2. Deneyde kullanılan uçucu kül.....	21
Şekil 3.3. Deneyde tartılan agregalar	22
Şekil 3.4. Uygulamada karışıma ilave edilen katkı.....	24
Şekil 3.5. Uygulamada kullanılan küp numuneler	25
Şekil 3.6. Solüsyon karışımı.....	26
Şekil 3.7. Beton döküm aşamaları	30
Şekil 3.8. Numunelerin hazırlanması ve dökümü	31
Şekil 3.9. Numunelerde basınç testi	33
Şekil 4.1. S100 numunelerinin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi	35
Şekil 4.2. S100 numunelerinin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi.....	37
Şekil 4.3. S100 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının değişimi	37
Şekil 4.4. S75FA25 numunelerinin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi...39	
Şekil 4.5. S75FA25 numunelerinin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi...40	
Şekil 4.6. S75FA25 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının değişimi	41
Şekil 4.7. S50FA50 numunelerinin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi...42	
Şekil 4.8. S50FA50 numunelerinin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi...44	
Şekil 4.9. S50FA50 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının değişimi	44
Şekil 4.10. Farklı geopolimer numunelerin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi	47
Şekil 4.11. Farklı geopolimer numunelerin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi	49
Şekil 4.12. Farklı geopolimerlerin dayanıklılık ilişkisi (28 ve 90. Gün)	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Çalışmamda kullanılan simgeler ve kısaltmalar açıklamaları ile birlikte aşağıda belirtilmiştir.

Simgeler

Açıklamalar

CaO

Kalsiyum oksit (Sönmemiş Kireç)

Na₂SiO₃

Sodyum Silikat

Si-Al

Silisyum-Alüminyum

NaOH

Sodyum hidroksit

Kısaltmalar

Açıklamalar

OPC

Standart portland çimento

GGBS

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

FA

Uçucu kül

1. GİRİŞ

Beton; Portland çimentosu, su, ince ve iri agrega, mineral katkıları ve kimyasal katkıların birleştirilip bu malzemelerin karıştırılmasından oluşan, ilk olarak plastik kıvamda olup, kolayca şekil verilebilen ve zamanla sertleşerek dayanan kazanıp yapılarda kullanılan bir yapı malzemesidir. Günümüzde hemen hemen tüm endüstrilerde çevre koruma ve sürdürülebilir tasarıma yönelik çalışmalar zorunlu hale gelmiştir. Çimento üretimi yüksek enerji gerektirdiği için ve enerjinin fiyatı her geçen gün arttığı için sürdürülebilir değildir. Ayrıca, çimento üretimi sırasında yüksek oranda CO₂ yayınından ötürü çevre kirlenmektedir. Çimento sektöründe hem enerji fiyatlarını düşürmek hem de çevreyi daha az kirlenmesi açısından sürdürülebilirlik çalışmaları ileride yapılmak zorunda kalacaktır.

Bunun bir sonucu olarak ise küresel ısınma ortaya çıkmaktadır. Küresel ısınma atmosferik kompozisyondaki değişimin sebep olduğu yeryüzündeki sıcaklık artışının sonucudur. Gelişmekte olan teknolojiler çimento üretimini hem daha az enerji tüketir hem de daha az doğaya zarar verir hale getirmelidir. Bununla birlikte ülkelerde artan çimento ihtiyacı da göz önüne alındığında, çimentolu betonun sürdürülebilir bir malzeme olup olmadığı, yakın zamanda çok daha fazla tartışılır hale gelecektir.

Atmosferdeki sera gazının birikmesinden dolayı küresel ısınma hakkındaki mevcut endişeler, çimento endüstrisini, normal Portland çimentosuna alternatif aramaya yönlendirmiştir. Her çimento üretiminde önemli miktarda CO₂ açığa çıkmaktadır. CO₂ sadece çimento üretiminden değil, aynı zamanda malzemelerin reaksiyona girmesi için yüksek sıcaklığa kadar yakılmasından kullanılan fosillerden de kaynaklanmaktadır. Geopolimerler, normal Portland çimentosuna alternatif olan ve en az CO₂ salınımı yapan betonlardır. Geopolimerler kimyasal reaksiyonlarda CO₂ açığa çıkarmazlar ve üretim tekniklerinden dolayı normal Portland çimentolara göre, çok daha az CO₂ yayarlar.

Normal Portland çimentosunun yaygın kullanılması kendisini oluşturan hammaddelerin yerli ve ekonomik olmasındandır. Alternatif olarak üretilecek çimento bağlayıcılarının normal Portland çimento üretimine oranla endüstri için yeterli miktarda ve kullanılabilir olması gerekmektedir. Bu bağlayıcılar, kalsiyum alüminat esaslı çimentolar, kalsiyum sülfat esaslı çimentolar ve alkali aktive edilmiş çimentolardır. Bu son bağlayıcı çeşidi daha az

karbon salınımının yanında, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi ürünlerin yararlanılmasında kullanıldığı için giderek artan bir cazibeye sahiptir.

Geopolimer bağlayıcıların 1978 yılında Davidovits'un çalışmalarıyla, mühendislik alanında kullanılmaya başlamıştır. Çevreye zarar vermemesi, istenilen dayanıklılık, asit ve sülfata gösterdiği dirençten dolayı Geopolimer betonlar normal hazır betonlarla rekabet edecek düzeye gelmiştir. Geopolimer uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi atık olan hammaddelerden oluşturulur. Günümüzde uçucu kül esaslı Geopolimer betonlar maliyet açısından ucuzdur. Geopolimer bağlayıcılar, dış etkilere, olumsuz koşullara direnç göstererek alternatif beton olabilirler, çünkü Geopolimerler yapı bütünlüğü için kalsiyum silikat hidrat bağlayıcılarından çok alümino-silikat esaslıdırlar [1].

Geopolimerler birçok alanda kullanılabilir. Araştırma alanları kimya, fizikokimya, mineraloji, jeoloji ve mühendislik alanları gibi, sayısız alanda araştırma konusudur. Geopolimerlerin kullanım alanları oldukça fazladır. Özellikle, yangına dayanıklı malzemelerde, mimari açıdan önemli taşlı yapılarda, düşük enerjili seramiklerde, çimento ve beton üretimlerinde, pis su atık tünellerinde, atık olan malzemelerin değerlendirilmesiyle çoğu kulvarlara girmiştir [2].

Doğanın korunması geleceğimizin şekillenmesi açısından son derece önemlidir. Bu açıdan çevreye normal betona göre daha az zarar vererek uzun ömürlü bir yaşama zemin hazırlar. Çimento kullanılan birçok alan vardır. CO₂ ciddi oranda çevreye zarar vermektedir. Çimentodan dolayı çevreye verilen zarar diğer kaynaklara oranla bir hayli fazladır. Bu endüstri için en önemli endişelerden biri küresel ısınmadır. İnsanlardan dolayı CO₂ yayılımı ve diğer sera gazı yayılımı atmosferde sıcaklık artışının esas sebebini oluşturmaktadır. Bu nedenle doğadaki CO₂ oranında azaltma yapmak gerekmektedir. Azalmayı bir nebze de olsa sağlayabilmek için her yıl sayısız konut üretiminde kullanılan normal beton yerine çimentosuz beton üretimi yapılmalıdır.

Geopolimerler; uçucu kül, metakaolin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi katı alüminosilikat esaslı malzemeler ile alkali sodyum hidroksit ve silikat solüsyonunun aktivasyonu ile oluşmuş alüminosilikat bağlayıcı malzeme sınıfıdır. Bu bağlayıcıların yüksek performanslı kullanımı, çevre dostu olması ve Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olmalarından dolayı yaygın bir cazibeye sahiptirler [3].

Geopolimerlerin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır .

1. Hammaddelerin istenilen miktarda olması: Alkali çözeltisinde tepkimeye giren silikat veya alüminli silikatlar yeryüzünde fazlasıyla bulunmaktadır. Geopolimerler makineleşmenin etkisiyle atıklardan değerlendirilerek kullanılır.
2. Enerji kârı ve doğa dostu: Geopolimer betonlar, yüksek enerji tüketmezler. Bu yüzden fazla enerji gerekmez. Bununla birlikte CO₂ yayılımı normal betona göre çok çok az olduğu için çevreye faydası çok fazladır.
3. Geopolimer oluşturma: Doğal minerallerin kimyasal kompozisyonlarının ve kristal yapılarının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesi sonucu üretilir. Bekletilerek kür edilir. Çok kısa bir zaman diliminde istenilen dayanımda betonlar elde edilir. Bu işlem Portland çimentolu betonların hazırlanmasına benzerdir.
4. Çatlak kontrolü: Bu betonlar normal betonlara göre suyun buharlaşmasından ötürü çatlaklara daha az rastlanır.
5. Erken mukavemet göstermesi: Bu betonlar ısıtılarak bir nevi ısı kürü yapılarak beklenen basınç dayanımının yüzde 70 seviyelerine ulaşır.
6. Ekstra sağlamlık: Bu betonların en faydalı en dikkat çekici özelliği olumsuz koşullar karşısında normal betona göre daha uzun yıllar dayanımını kaybetmeden dayanmasıdır. Geopolimer Yapılar kısa vadede zarar gibi gözükürken uzun vadede kar elde edilir [4].

Araştırmanın Önemi

İnorganik polimer olarak da adlandırılan bu betonlar doğaya faydalı olmasından dolayı tercih edilme sebebi olarak düşünülmektedir. Doğaya faydalı olan daha doğrusu normal betona göre daha az zarar veren Geopolimer betonun göstereceği basınç dayanımı da bir hayli önemlidir. Bu kapsamda cürüflü ve cüruf-uçucu kül karışımı Geopolimer betonların farklı kür ortamlarındaki basınç dayanımları incelenecektir.

Tezin Ana Hattı

Bölüm 1 Özet: Tezin özeti ve amaçları anlatılmıştır.

Bölüm 2 Literatür Taranması ve Geçmişi: Bu betonda atık malzeme olarak düşünölen curüf, uçucu kül ve kimyasal katkılarla oluşturulacak geopolimer betonun farklı kür etkilerinde ortaya çıkacak basınç dayanımları hakkında çalışmalar gösterilecektir.

Bölüm 3 Deneysel Çalışma: Kullanılan ürünler, fiziksel karıştırma şekli, beton dökümü, kürlenme şekli ve basınç deneylerine yer verilmiştir.

Bölüm 4 Çalışmadan elde edilen bulgular: Deney yapıp elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Bölüm 5 Elde edilen grafikler: Çalışmada elde edilen bütün sonuçlar sunulmuştur.



2. GEOPOLİMER BETON VE BİLEŞENLERİ

2.1. Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülerek elde edilen Granüle yüksek fırın cürufu, fabrikalarda (demir fabrikası) üretim esnasında atık malzeme olarak çıkar. Daha önceleri nereye atılacağı tartışma konusu iken şimdi değerli konuma ulaşmaya başlamıştır. Kireçtaşı, demir cevheri ve kok kömürü demir üretimi esnasında hammadde malzemesi olarak kullanılırlar. Demir cevheri demir oksitin yanında alümin, kükürt ve silis gibi maddeler içerir ve yüksek fırın süreci sonunda bu maddelerin ayrışması gerçekleşir. Kireçtaşı ise bu aşamada ilave bir hammadde görevi görür. Bu aşamada kullanılan kok kömürü ise süreçte yakıt olarak kullanılırlar [5].

Sıcak fırınlarda yapılan işlemlerde sıcaklık 1600°C'lere ulaşmaktadır. Yüksek derecede eriyen maddeler alt tabakada pik demiri ve üst tabakada cüruf olacak şekilde fırının alt tabaksında birikir. Erimiş yüksek fırın cürufu ve demir ocaktan sırayla çıkartılır. Yüksek fırın cürufunun o sıcaklıkla boşaltılması kadar nasıl soğutulduğunda nihai özelliklerini önemli derecede belirler [5].

2.1.1. Yüksek fırın cürufu çimentonun hidratasyonu

Çimento ile suyun tepkimeye girmesiyle oluşan reaksiyona “hidratasyon reaksiyonu” adı verilir. Böyle bir reaksiyondan sonra etrafa ısı yayılır (ekzotermik). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ise içerdiği CaO sayesinde bağlayıcı özelliğe sahiptir ve yüksek fırın cürufunun su ile tepkimesi Portland çimentosuna nazaran daha yavaş ve daha küçük etkidir. Bundan dolayı öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun sudan başka malzemelerle aktive etmek gerekir. Yüksek fırın cürufunun aktivasyonu üç farklı yöntemle mümkündür:

- Çimento ile birlikte kullanımı
- Alkalilerle beraber ya da sülfat tuzları ile aktive edilebilir
- Betonda değişik mineral katkı ile beraber kullanımı

Çimento ile suyun tepkimesi sonucu oluşan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) ile yüksek fırın cürufu tepkimeye girip ikinci bir reaksiyon oluştururlar. Bu reaksiyondan sonra betona

dayanıklılık kazandırma şekli olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli daha çok miktarda oluşur [6].

2.1.2. Betonda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanımı

Öğütülmüş yüksek fırın cürufuna bağlayıcılık kazandırma çalışmaları ilk kez 1862'de Almanya'da Emil Langen tarafından ortaya çıkartılmıştır [7]. Yüksek fırın cürufu katkılı betonlar yüksek doğal tepki direncine sahiptir. Özellikle yüksek oranda sülfat, tuz ve asit etkisine maruz betonlarda kullanımı faydalıdır. Çimento hamuru yoğunluğunu da arttırarak daha işlenebilir, pompalanabilir, daha geçirimsiz betonlar yapılmasına olanak verir. Yüksek fırın cürufu uçucu kül oranla çok daha yüksek oranlarda beton içerisinde kullanılabilir. Genel olarak uçucu kül çimento ağırlığının % 30-40 oranlarında kullanılmakta iken yüksek fırın cürufu betonun su ihtiyacını arttırmaksızın çimento ağırlığının % 50-100 oranlarında dahi kullanılabilir. Bu durum özellikle kalınlığı 1 metreyi geçen kütle beton dökümlerinde büyük sorun oluşturan aşırı yükselen hidrasyon ısısına bağlı içsel ve yüzeysel çatlaklar problemlerine karşı hidrasyon ısısının kontrol edilerek düşürülmesi yönünde çözümler sunar. Bu tür dizaynlarda tek dezavantaj düşük erken dayanımlar olmakla beraber nihai dayanım normal Portland çimentosuna göre daha yüksektir [8].

2.2. Uçucu Kül

Elektrik üretiminde kömür kullanılmakta ve kömürün yakılması sonucu kömürün sınıfına göre değişkenlik gösteren yaklaşık 16 milyon ton atık kül çıkmaktadır. Atık malzeme olarak çıkıp, betonda kullanılan bu malzemelere uçucu kül denilir. Uçucu kül malzemesinin nihai özellikleri birçok parametrelerden etkilenmektedir. Özellikler ülkemizde hiçbir endüstri sanayisinde kullanılmadan atılan uçucu kül miktarının çok yüksek olduğu düşünülmektedir. Ortaya atık malzeme olarak açığa çıkan küller, ülkemizde boş arazilere gelişigüzel atılıp hem yaşadığımız çevrenin kirlenmesine, hem de hava kirliliğine neden olmaktadır. Bu atık malzemelerin belirli oranlarda veya eğer kullanılabilirlerse tamamen beton içinde kullanımı hem çevre açısından hem de çimentonun azaltılması açısından ülkemiz için çok önemli hale gelebilir. Bunun yanısıra ileriki zamanlarda özellikle büyük illerde yaşanacak agrega problemlerini de belirli oranda uçucu kül kullanımı ile azaltmak mümkün hale gelebilir. Burada uçucu kül malzemesinin özellikleri hakkında kısaca bilgi verilecektir.

Kömür yanma prosesinin yan ürünü olan uçucu külün özellikleri yanan kömürün tipine göre, öğütülmüş kömürün inceliğine göre, yanma prosesine göre (sıcaklığa bağlı), baca gazı akışındaki soğutma şartlarına göre ve filtredeki ayırma süreciyle bağlantılı homojenizasyona göre değişkenlik gösterir. Uçucu külün incelik derecesi ilk olarak kömürün öğütülme derecesinden etkilenmektedir. Uçucu külün incelik derecesini etkileyen ikinci etmen, küllerin mümkün mertebede bacadan kaçmasının engellenerek tutulmasıdır. Bacadan kaçan miktarın azalması uçucu külün inceliğini artırır. Uçucu külün dane büyüklüğü genelde 0.5 mikron ile 200 mikron arasında olup, yüksek oranda küresel şekilli malzemelerdir. Spesifik yüzeyleri 1800 g/cm^2 ile 5000 g/cm^2 arasında değişir ve ortalama olarak 2800 g/cm^2 ile 3800 g/cm^2 civarındadır [9].

2.2.1. Betonda uçucu kül kullanımı

Uçucu külün kullanımına ilişkin çalışmalar laboratuvar ortamlarında devam eden çalışmalarla ve arazide yapılan analiz ve deneylerle geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu devam eden çalışmaların sonucunda uçucu külün beton üretiminde ve inşaat alanında, özellikle yol inşaatlarında kullanılması, termik santrallerinde üretilen bu atık malzemelerinin uzaklaştırılması problemine bir nebze olsun çözüm getireceği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuçta uçucu küller herhangi bir amaç için kullanılmazsa ya arazilere atılıp büyük bir çevresel felakete sebep olacaktır. Ya da ikinci bir çözüm olarak bu atık malzemelerin herhangi bir yerlerin kazılıp gömülmesi sonucu toprak altında bırakılması gerekmektedir. Bu da maddi anlamda önemli bir sorun olacaktır. Bu sebepten ötürü uçucu kül atık malzemesinin inşaatta beton yapımında kullanılması hem çevre hem de ekonomik yönden ülkemizde katkı sağlayacaktır. Uçucu külle yapılan çalışmalar neticesinde Türk Standartları Enstitüsü (TSE) TS-EN- 197-1 “Katkı Kullanımı” ve “Uçucu Küllü Çimento” standartlarını betonda kullanıma sunmuştur.

Türkiye’de üretilen/ortaya çıkan uçucu kül malzemesi özelliklerinin genel anlamda “iyi kalite” olarak ortaya çıktığı ve bu küllerin farklı alanlarda kullanımının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat uçucu kül malzemesi, ülkemizde kullanılabilirlik yönünden yeterli olarak tanıtılamamaktadır. Ayrıca, uçucu küllerin kullanımının ülkemize hangi oranlarda yarar sağlayacağı konusunda yeterli önem verilmemektedir. Bu sebeplerden dolayı uçucu kullanımının yaygın hale getirilmesi engellenmektedir. Uçucu külün birçok anlamda kullanımının sağlanması için ülkemizde üretilen uçucu külün özellikleri ve standartlarının

belirlenerek kalite kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi, taşıma ve özellikle pazarlama gibi faktörlerin etraflıca araştırılarak incelenmesi gerekmektedir.

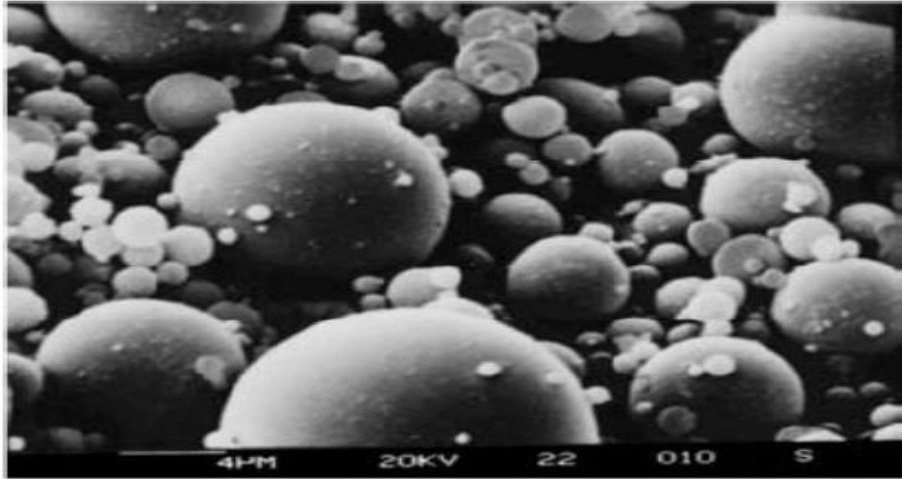
UK'ler beton teknolojisinde hem betonda kum yerine hem de çimento ile beraber direk olarak betona katılarak farklı şekilde kullanılabilir. Çimentonun üretimi esnasında klinkere eklenerek öğütülmesi sonucu uçucu küllü çimento olarak ülkemizde kullanımı yaygınlaşabilir. Yapılan araştırmaların sonucuna göre, ağırlıkça % 20 oranında uçucu kül kullanımı elde edilen betonların basınç dayanımını olumlu etkilediği belirtilmiştir [10]. Bununla beraber, betonda uçucu kül kullanımı betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları nispeten daha düşük olmakta ve beton prizini geciktirmektedir [11].

ASTM C 618 standardı mevcut uçucu külleri içeriğindeki CaO miktarına göre C ve F sınıfına ayırmaktadır. C ve F tipi uçucu küllerin genel olarak kimyasal kompozisyonları Çizelge 2.1'de verilmiştir:

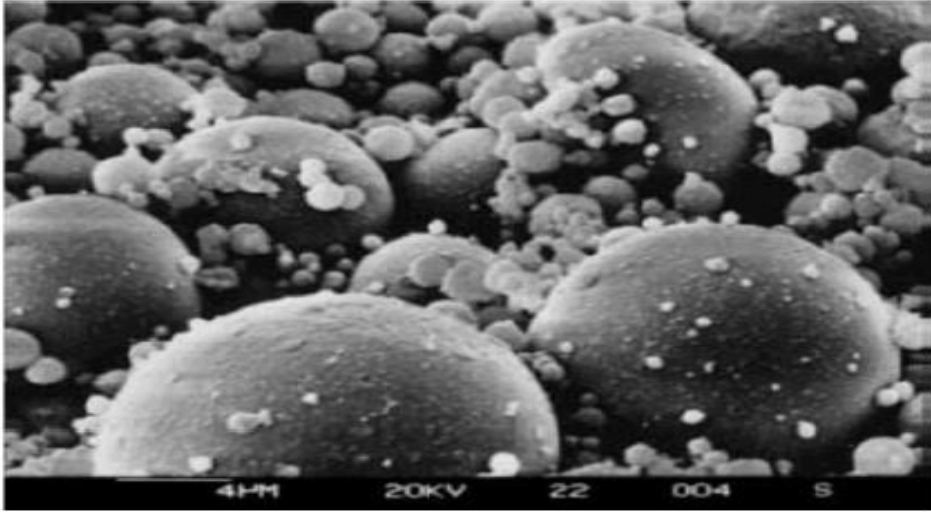
- a. F sınıfı uçucu küller Çizelge 2.1'de verilmiştir. F tipi uçucu kül, bitümlü kömürle üretilmekte olan ve içerdiği toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70'den daha fazla olan ve içerdiği CaO oranının ise % 10'un altında olan sınıfa girmektedir. Bu F-tipi uçucu küller CaO yüzdesi % 10'dan daha düşük olduğu için F-tipi uçucu küllere ayrıca düşük kireçli uçucu kül de denmektedir. F tipi uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- b. C sınıfı uçucu küller Şekil 2.1'de verilmiştir. C tipi uçucu küller, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilmekte olan ve içerdiği $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı yüzde 50'den ve CaO oranı ise % 10'dan daha fazla olan kül çeşididir. C tipi uçucu küllerde CaO oranı % 10'dan daha fazla olduğu için C-sınıfı uçucu küllere yüksek kireçli uçucu külde denmektedir. C tipi uçucu küller, puzolanik olmasının yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliği de gösterirler [12].

Çizelge 2.1. F ve C sınıfı uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları [13]

Kimyasal kompozisyon	F Tipi		C Tipi	
	Düşük F	Yüksek F	Düşük C	Yüksek F
SiO ₂	46 - 57	42 - 54	25 - 42	46 - 59
Al ₂ O ₃	18 - 29	16,5 - 29	15 - 21	14 - 22
Fe ₂ O ₃	6 - 16	16 - 24	5 - 10	5 - 13
CaO	1,8 - 5,5	1,3 - 3,8	17 - 32	8 - 16
MgO	0,7 - 2,1	0,3 - 1,2	4 - 12,5	3,2 - 4,9
K ₂ O	1,9 - 2,8	2,1 - 2,7	0,3 - 1,6	0,6 - 1,1
Na ₂ O	0,2 - 1,1	0,2 - 0,9	0,8 - 6	1,3 - 4,2
SO ₃	0,4 - 2,9	0,5 - 1,8	0,4 - 5	0,4 - 2,5
LiO ₂	0,6 - 4,8	1,2 - 5	0,1 - 1	0,1 - 2,3
TiO ₂	1 - 2	1 - 1,5	≤ 1	≤ 1



Şekil 2.1. F sınıfı uçucu kül [14]



Şekil 2.2. C sınıfı uçucu kül [14]

2.3. Alkali Aktivatörler

Geopolimer betonların üretiminde çoğunlukla kullanılan alkali aktivatörler;

- Sodyum Silikat
- Sodyum Hidroksit
- Kalsiyum Hidroksit
- Potasyum Hidroksit'dir

2.3.1. Sodyum silikat

Bir Sodyum silikat (Na_2SiO_3), mineraller grupları içinde en geniş silikatlar grubu arasında yer almaktadır. Silikatlar var olan mineraller bakımından % 30'luk bir kısmı içermekte olup, yeryüzündeki toplam mineral hacminin % 90'ını oluştururlar. Normalde yeryüzünde en çok silikat mineralleri bulunmaktadır. Bu sebeple yeryüzünde en çok bulunan 2 element O ve Si elementleridir. Bu elementlerle beraber silisyum-oksijen bileşikleri yeryüzünün yaklaşık olarak % 95'ini oluştururlar. Yeryüzünde yaklaşık olarak 600 civarında silikat minerali bilinmektedir. Bunların arasında yalnızca amfiboller, feldispatlar, mikalar, piroksenler, fedispatoitler, olivinler ve zeolitler kayaçların oluşmasında büyük rol oynarlar. Doğada var olan silikat mineralinin temel yapısı, merkezde bir silisyum (Si) atomu ve köşelerde ise silisyum (Si) atomuna bağlanmış dört adet oksijen atomu bulunan elementtir [15].

2.3.2. Sodyum hidroksit

Kostik ismi ile bilinen sodyum hidroksit (NaOH), ucuz olması, kolay ulaşılabilirliği ve arzu edilen miktarda kolayca bulunabilmesi sodyum hidroksit avantajlarından. Renk olarak beyaz renkte, katı ve akkor derecede uçucudur, su içinde ısı yayılımı sayesinde çözünme gerçekleşir ve eğer nem kaparsa hidroksit bozulur. Özellik olarak potasyum hidroksite benzer fakat potasyum hidroksitten kısmen daha az yakıcı özelliği olan güçlü bir bazdır [16].

2.3.3. Kalsiyum hidroksit

Kalsiyum hidroksit sönmemiş kirecin içine su eklenmesiyle oluşan kimyasal bir bileşiktir. Çevrede kristal beyaz renginde ve toz halinde mevcuttur. Su içinde çözünerek hamur görünümüne dönüşen bir alkalidir. Bilinen ismi hidratik kireçtir veya söndürülmüş kireç olarak da adlandırılır. Eğer 512°C’de ısıtıldığı zaman bozulur ve sonuç olarak kalsiyum oksit ve suya dönüşür.

Kalsiyum hidroksit kullanım alanları ;

- Sudaki atık malzemeleri temizlemek için ve toprağı nötralleştirmek amacıyla,
- Harçlarda ve beton katkılarında
- Petrol arıtma sanayinde,
- Akvaryum içinde algler, mercanlar ve salyangoz benzeri canlıların yaşamının devam edebilmesi amacıyla biyolojik denge oluşumunda,
- Gıda endüstrisinde ve alkollü içeceklerde,
- Diş kliniğinde tedavi amacıyla kullanılır [17].

2.3.4. Potasyum hidroksit

Potasyum hidroksit aynı zamanda potas kostik olarak da isimlendirilmektedir. Potasyum hidroksit formül olarak KOH ile gösterilir. Renk olarak beyaz renkli, katı bir halde olan kimyasaldır. Su ile tepkimeye girdiğinde ısıyayar. Ayrıca, potasyum hidroksitin nem tutma gibi iyi bir özelliğiyle bilinmektedir. Potasyum hidroksit mevcut ortamda bulunan nemi emerek, yavaş yavaş eriyebilen bir yapıya sahiptir [18].

2.4. Geopolimer Betonun Durabilite Özellikleri

Geopolimer malzemeler üstün fiziksel ve mekanik özelliklerine ek olarak, mükemmel kimyasal dayanıklılığa sahiptirler. Geopolimer hamur ve harçlar sülfat, deniz suyu, asidik ortamlar ve alkali silika reaksiyonu etkilerine karşı tatmin edici dayanıklılığa sahiptirler fakat bu konu hakkında genel bir bilgi yoktur. Halen Geopolimer betonlar üzerinde kimyasal etkilere karşı deneyler yapılmaktadır. Üretilen Geopolimer betonlarda da farklı alkali aktivatör / bağlayıcı oranları, farklı kür koşulları, farklı molariteye sahip sodyum hidroksit çözeltisi kullanımı, farklı alkali aktivatör aktivatörlerin Geopolimer betonda kullanımı mümkün olduğundan dolayı Geopolimer betonların basınç dayanımları yukarıdaki parametrelere bağlıdır. Geopolimer bağlayıcıların geopolimerizasyonu sonucunda C_3A ve $Ca(OH)_2$ gibi ürünler oluşmadığından, Geopolimer bağlayıcılı betonların durabilite özelliklerinin de geleneksel çimento ile üretilen betonlardan daha iyi olacağı beklenmektedir. Ayrıca Geopolimer betonlar yüksek sıcaklıklara da dayanıklıdır [19].

2.5. Geopolimerlerin Uygulama Alanları

Geopolimer betonların dünyanın hemen hemen her yerinde uygulama alanı bulunduğunu söyleyebiliriz. Örnek verirsek Avustralya'da 2013 yılında 40000 m³ Geopolimer beton kullanılmıştır. Geopolimer bağlayıcıların uygulandığı alanlar epeyce geniştir. Normal beton, hazır beton, betonarme, beton borular, harç, hafif beton gibi uygulamaları olan Geopolimer bağlayıcıların kullanım alanları yapılan çalışmalarla genişlemeye devam etmektedir.

Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar 60 yıldan daha uzun süredir bilinmektedir. Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar kullanılarak yapılmış geniş ölçekli çalışmalardan biri Ukrayna'da bulunan konut yapılarıdır (Şekil 2.3). Bu evler demir-çelik atığının alkali aktivasyonu sonucu elde edilen Geopolimer bağlayıcı ile 1960 yılında 7.5 MPa tasarım mukavemetine göre inşa edilmiştir. 2012 yılında yapıdan alınan numuneler üzerinde yapılan basınç dayanımı deneyinde 14 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir [20].



Şekil 2.3. Ukrayna’da geopolimer beton kullanılarak üretilmiş konut yapıları [20]

Davidovits (1999) Geopolimer malzemelerin potansiyel uygulama alanları Si/Al oranına bağlı olarak Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi önermiştir [21]

Çizelge 2.2. Geopolimer malzemelerin uygulamaları [21]

Si/Al oranı	Uygulama Alanı
1	Tuğla, seramik, yangın barınakları
2	Düşük CO ₂ çimentoları, beton, radyoaktif ve toksik atık kapsülleme
3	Isıya dayanıklı kompozitler, döküm ekipmanları, cam elyafı kompozitler
>3	Endüstri için sızdırmaz malzemeler
20 < Si/Al < 35	Yangına dayanıklı ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

2.6. Geopolimerlerin Ekonomik ve Çevresel Avantajları

Rajarajeswari ve Dhinakaran (2016) yaptıkları çalışmada öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanarak ürettikleri Geopolimer beton numuneleri üzerine maliyet analizi gerçekleştirmişlerdir. 28 MPa basınç dayanımına sahip normal Portland çimentolu 1 m³ betonun maliyetini 83.05 dolar olarak hesaplanmışken, 26.97 MPa basınç dayanımına sahip

1 m³ Geopolimer betonun maliyetini 51.66 dolar, 32.98 MPa basınç dayanımına sahip 1 m³ Geopolimer betonun maliyetini 57.05 dolar, 37.65 MPa basınç dayanımına sahip 1 m³ Geopolimer betonun maliyetini 61.66 dolar olarak elde etmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Geopolimer betonun daha ucuz olduğu ortaya çıkarılmıştır. Normal Portland çimentolu beton ile Geopolimer beton arasındaki maliyet farkının ise büyük oranla çimentodan kaynaklı olduğunu ifade etmişlerdir [22].

Li vd. (2004) ise Geopolimerlerin avantajlarını aşağıdaki gibi açıklamışlardır:

1. Hammadde kaynaklarının çevrede oldukça bulunabilmesi: Suda çözüne bazlarda (alkali çözeltilerde) çözünen silikatlar yeryüzünde fazlasıyla mevcuttur. Geopolimerler fabrika atıklarından ve doğal puzolanlardan üretilir.
2. Verimli enerji kullanımı ve doğa dostu: Daha öncedende bahsettiğimiz gibi geopolimer üretiminde, enerji fazla tüketilmez. Doğada yer alan alümino-silikatların düşük rölatif sıcaklıklarda (600 - 800°C) ısıl zamanı, Portland çimentosunun harcadığı enerjinin 3/5'ini kullanarak uygun Geopolimerik hammaddeler sağlar ve az miktarda CO₂ açığa çıkarır.
3. Geopolimer beton hazırlama: Geopolimer betonlar, alümino-silikat reaktif malzemelerin, kuvvetli alkali çözeltilerle düzenli karıştırılmasıyla kolaylıkla sentezlenebilir. Kısa zamanda kayda değer bir dayanıklılık elde edilir. Bu işlem Portland çimentolu betonların hazırlanmasına benzerdir.
4. Çatlak kontrolü: Normal betonlara göre daha az çatlar.
5. Erken dayanıklılık: Geopolimer betonlar, doğru malzemelerle erken dayanıma ulaşırlar.
6. Mukavemet: Yüzlerce sene dayanımını kaybetmeksizin varlığını koruyabilir.
7. Yangına dayanma ve ısı iletkenliğinin az olması: Geopolimerler yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliklerine sahiptir. Geopolimerle üretilen önemli binalar yangına karşı daha dayanıklı haldedir [23].

2.7. Betonun Dayanıklılığı ile İlgili Bazı Konular

2.7.1. Büzülme

Büzülme betonun hacminin zamanla azalması şeklinde tarif edilir ve oluşan büzülme dış faktörden kaynaklanmaz. Termal, kimyasal ve plastik büzülme tipleri vardır. Özellikler Geopolimer betonlarda öğütülmüş yüksek fırın cüruf malzemesinin kullanımı betonların büzülmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca Geopolimer beton üretiminde kullanılan malzemelerin büzülme davranışlarının bilinmesi özellikle kütle beton dökümlerinde hayati önem arz etmektedir.

2.7.2. Alkali aktivatörler

NaOH ve KOH alkali aktivatörleri, Na_2SiO_3 ile karıştırılarak veya yalnız başına Geopolimer kompozitlerin üretimi için kullanılmaktadır. Sodyum hidroksit'in yalnız başına kullanımı, daha çok düşük konsantrasyonda biraz daha düşük mukavemetli Geopolimer ile sonuçlanır [24]. Na_2SiO_3 kullanılması önemli ölçüde mukavemet gelişimine yol açar. Bununla birlikte NaOH, CO_2 salınımı açısından Na_2SiO_3 'ten daha çevre dostudur. Çünkü tuzlu suyun elektroliz işlemi NaOH üretiminde tercih edilir ve bu işlem sadece Cl_2 ve H_2 'yi serbest bırakır. Ancak, Na_2SiO_3 üretmek için NaCO_3 ve SiO_2 kabaca $1200 - 1400^\circ\text{C}$ 'de yakılmalıdır ve bu yöntem ile CO_2 salınımı meydana gelir [25]. Geopolimerizasyon dediğimiz tepkimelerde en çok karıştırılan alkali aktivatör sodyum hidroksit veya potasyum hidroksit sodyum silikat veya potasyum silikat ile karıştırılmasından elde edilir. Geopolimer beton ile yapılan çalışmaların çoğunda sodyum hidroksit ile sodyum silikatın beraber kullanılması tercih edilmektedir.

2.7.3. Isı dayanıklılığı

CSH jeli ve diğer kristal hidratların dehidrasyonu ve tahrip olması, agrega türleri, geçirgenlik gibi sebeplerden dolayı normal Portland çimentolu betonların $800 - 1000^\circ\text{C}$ sıcaklık sonrası kalan basınç dayanımı % 20 ila % 30 civarındadır. Yangın esnasında, yüksek sıcaklığa erişmiş olan tabakalar, daha serin olan iç tabakadan ayrılma ve parçalanma eğilimindedir [26]. Buna karşın, Geopolimerler fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun alümino-silikat yapıya zarar vermeden yer değiştirmesini ve buharlaşmasını sağlayan, seramik benzeri mikroyapıda dağılmış olan nano gözeneklerin varlığı nedeniyle yüksek yangın dayanıklılığına sahiptirler [27].

Alümino-silikat esaslı betonlarda bulunan alkali aktive edilmiş alümino-silikat jelleri Portland çimentolu betondan farklılık gösterir. Bu tür bağlayıcıların kullanılması, silis ve alüminyum bakımından zengin fazlar (örn. killer ve camlar) ile reaksiyona giren sodyum veya potasyum bazlı alkali hammaddeye ihtiyaç duyar. Sonuçta, Portland çimentosu hidratasyonu ile üretilen CSH jellerine kıyasla büyük miktarlarda kimyasal veya fiziksel su içermeyen bir jel meydana gelir. Alümino-silikat bileşimlerini ayıran bu açık gözenek yapısı, hammaddenin tane boyutlarını gösterir [28]. Açık gözenek yapısı, az miktarda mukavemet kaybıyla 600 - 800°C aralığındaki sıcaklıklara dayanabilen yeni bir inorganik kompozit malzeme oluşturur [29].

2.7.4. Kür koşullarının geopolimerlerin özelliklerine etkisi

Kür işlemleri Geopolimer karışımlarının prizi ve sertleşmesi esnasında uygulanan sıcaklık, nem, hava sirkülasyonu gibi etkileri kapsar. Bu parametrelerin Geopolimer malzemelerin özelliklerini oldukça etkilediği bilinmektedir. Birçok araştırmacı, 20°C ile 100°C arasında sıcaklıkta, bir kaç saat ile bir kaç gün arasında değişen sürelerde uygulanan kür işleminin Geopolimerizasyon üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir. Araştırma sonuçları, kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımının da arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, belirli bir sıcaklığın üzerinde uygulanan kürün mukavemete katkısı yoktur. Metakaolin esaslı Geopolimerler üzerine yapılan birçok çalışmada 60 - 70°C üzerindeki kür işleminin uzun süreli dayanım üzerinde zararlı olduğu bulunmuştur. Daha yüksek sıcaklıkta uygulanan kür işlemleri hızlı prize neden olan reaktiviteye yol açmaktadır [30]. Bu eşik sıcaklığı, bazı uçucu kül ve volkanik kül esaslı Geopolimerlerde daha yüksektir, ancak genellikle 100°C'yi aşmamaktadır [31].

Geopolimer betonların normal Portland çimentolu betonlar ile karşılaştırıldığında benzer veya daha yüksek basınç dayanımına ulaşması için ısı kütürün gerekli olduğu çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır. Isıl kür silika ve alümina esaslı hammaddelerin çözünmesinin hızlandırılmasına ve daha sonra polikondenzasyon işlemine yardımcı olur. Geopolimerizasyon, hammaddeye bağlı olarak belirli sıcaklık ve ısı işlem periyodunu aştıktan sonra engellenebilir ve bu da Geopolimerlerin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler [32]. Isıl kür, çözünme ve alüminosilikat jelin Geopolimerizasyonuna faydalıdır ve bu da erken yüksek basınç dayanımı sağlar [33].

Yüksek sıcaklıktaki uzun süreli kür işleminin dehidrasyona ve aşırı büzölmeye neden olması sebebiyle oluşan jel yapısının yarı kristal ağ oluşturmadan kasılmasına yol açarak jel yapısı bozulur [34].

2.8. Geopolimerlerde Basınç Dayanımı

Betonun en önemli özelliklerinden biri basınç dayanımıdır. Geopolimer bağlayıcı numunelerin basınç dayanımındaki iyileşme, artan reaksiyon ürünleri miktarıyla açıklanabilir. Sıcaklık Geopolimer bağlayıcılarda reaksiyon hızlandırıcı etki yapmaktadır. Yüksek kür sıcaklığı Geopolimer hammaddesinin çözünmesini ve polikondenzasyonunu artırır. Bu durum Geopolimerlerin mukavemet gelişimine katkıda bulunur [35]. Geopolimer hammaddesinin öğütölməsi sonucu elde edilen ince tane çapı ve yüksek yüzey alanı Geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırarak daha güçlü bir Geopolimer yapı oluşmasına imkân sağlar [36].

Kullanılan alkali aktivatörlerin tipine bakılmaksızın, aktivatör konsantrasyonundaki artış, daha fazla silis ve alümin bağlarının çözünmesine neden olduğu için genellikle basınç dayanımını artırır. Ancak belirli bir değerdən sonra, basınç dayanımında düşüş gözlenir. Bu durum esasen alümino-silikat jelinin çökmesine neden olan aşırı hidroksit iyonlarından kaynaklıdır [37].

2.9. Geopolimerlerde Hidratasyon Isısı

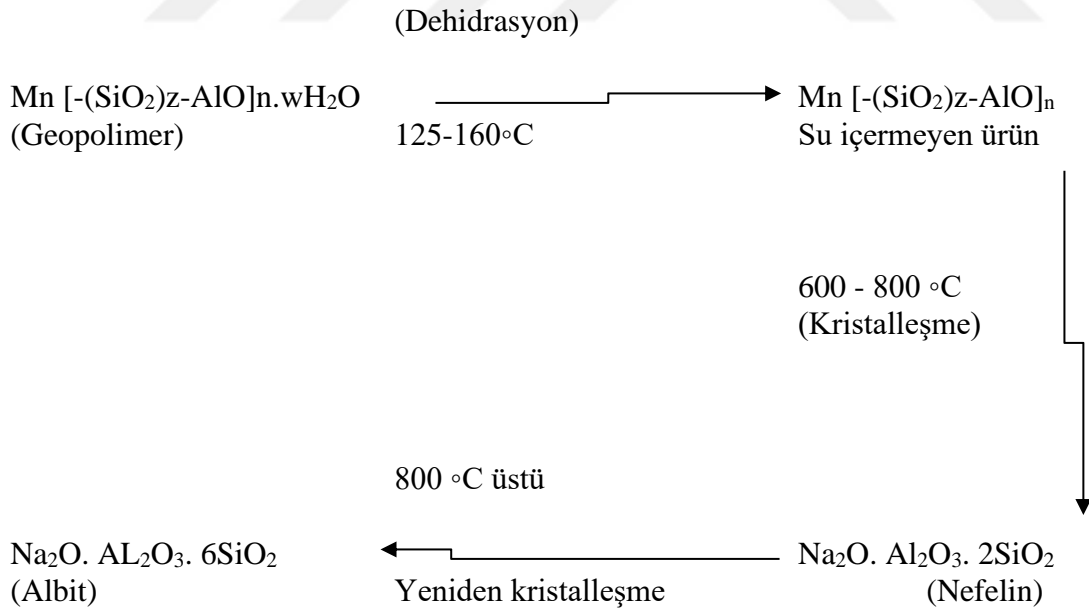
Hidratasyon sırasında ısı açığa çıkar. Hidratasyon ısısı olarak adlandırılan bu ısının büyük bir bölümü ilk günlerde meydana gelir. Hidratasyon hızını ve hidratasyon ısısının açığa çıkma hızını etkileyen önemli faktörler; hammaddenin kimyasal bileşimi, hammaddenin inceliği ve hidratasyonun yer aldığı sıcaklık koşullarıdır. Geopolimer bağlayıcı numunelerin Portland çimentolu numunelere göre oldukça düşük hidratasyon ısı çıkardığı birçok araştırmada ifade edilmiştir [38].

2.10. Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Direnci

CSH jeli ve diğer kristal hidratların dehidrasyonu ve tahrip olması, agrega türleri, geçirgenlik gibi sebeplerden dolayı normal Portland çimentolu betonların 800 - 1000°C sıcaklık sonrası kalan basınç dayanımı %20 - %30 civarındadır. Yangın esnasında, yüksek sıcaklığa erişmiş olan tabakalar, daha serin olan iç tabakadan ayrılma ve parçalanma eğilimindedir. Buna

karşın, Geopolimerler fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun alüminosilikat yapıya zarar vermeden yer değiştirmesini ve buharlaşmasını sağlayan, seramik benzeri mikroyapıda dağılmış olan nano gözeneklerin varlığı nedeniyle yüksek yangın dayanıklılığına sahiptirler [39].

Alüminosilikat esaslı betonlarda bulunan alkali aktive edilmiş alümino-silikat jelleri Portland çimentolu betondan farklılık gösterir. Bu tür bağlayıcıların kullanılması, silis ve alüminyum bakımından zengin fazlar (örn. killer ve camlar) ile reaksiyona giren sodyum veya potasyum bazlı alkali hammaddeye ihtiyaç duyar. Sonuçta, Portland çimentosu hidrasyonu ile üretilen CSH jellerine kıyasla büyük miktarlarda kimyasal veya fiziksel su içermeyen bir jel meydana gelir. Yüksek sıcaklık esnasında, NASH jel tarafından emilen suyun buharlaşması, su içermeyen ürünlerin oluşumu, kararlı su içermeyen fazların kristalleşmesi ve tahrip olmaya götüren eritme (sinterleme) gibi çeşitli olaylar meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklık esnasında Geopolimerlerin faz dönüşümü Şekil 2.4'de gösterilmiştir [40].



Şekil 2.4. Yüksek sıcaklık esnasında geopolimerlerin faz dönüşümü [41]

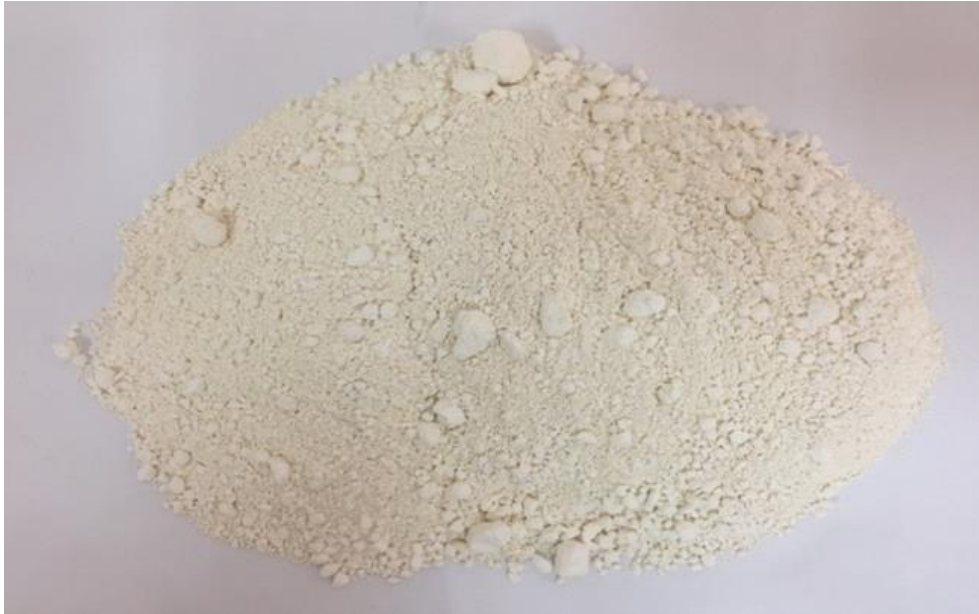
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yaptığımız uygulamalı deney çalışmasında çevre dostu olarak bahsettiğimiz geopolimer betonun üretilme aşamaları, kullanılan malzemeler, kullanılan malzeme özelliklerinden bahsedilmektedir. Farklı kür koşullarında bırakılan geopolimer betonların dayanım sonuçları deneyin sonunda verilmiştir. Burada farklı Geopolimer betonların ısı kürü uygulanmasından hangi derecede etkilendikleri, Geopolimer betonların basınç dayanımları ve gelişiminin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği sonuçları ortaya konmuştur. Farklı Geopolimer betonların yapılarda kullanımının yaygınlaşması amacıyla yapılan deneylerden kısaca bahsedilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Yüksek fırın cürufu

Daha önceki kısımlarda da cürufun bir atık malzeme olduğundan bahsetmiştik. Öğütülen cüruf kalsiyum silikat ve alümina silikat içeren malzemedir. Ayrıca, granüler form halinde olan ve metal olmadığı bilinen üründür. Atık olan bu malzemeler atacak yer bulmak için yer aranırken şimdi geopolimer beton üretiminde kullanılan değerli bir malzeme haline geldi.



Şekil 3.1. Yapılan deneyde kullanılan cüruf

Yaptığımız deneyde kullanılan cürufun özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan cürufun özellikleri

Kimyasal analiz	Sonuçlar (%)
CaO	37,92
SiO ₂	37,97
Al ₂ O ₃	13,27
Fe ₂ O ₃	1,16
MgO	5,64
SO ₃	0,23
K ₂ O	0,56
Na ₂ O	0,84
Cl	0,0150
S	0,78
TiO ₂	0,66
Mn ₂ O ₃	0,55
Kızdırma kaybı	0,01
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2,95
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	5131

3.1.2. Uçucu kül

Kömürün yakılması sonucu oluşan baca gazlarının filtrelerde yapışarak elde edilir. Kendi başlarına bağlayıcılık oluşturmaz. Sönmüş kireçle hidratasyona girerek suda sertleşir. Yapay puzolan kimyasal özelliği Çizelge 3.2’de belirtilmiştir ve yapılan deney esnasında kullanılan malzeme Şekil 3.2’de belirtilmiştir.



Şekil 3.2. Deneyde kullanılan uçucu kül

Çizelge 3.2. Kullanılan uçucu külün özellikleri

Malzemeler	Sonuçlar
CaO	1,793 (%)
SiO ₂	56,15 (%)
Al ₂ O ₃	26,37 (%)
Fe ₂ O ₃	6,444 (%)
MgO	2,350 (%)
SO ₃	0,056 (%)
K ₂ O	3,804 (%)
Na ₂ O	1,095 (%)
Cl	0,090 (%)
Kızdırma kaybı	2,20 (%)
Özgül ağırlık	2,05 g/cm ³

3.1.3. Agregalar

Çalışmada kullandığımız agregalar boyutlarına göre farklılık göstermektedir. İnce agregalar ve iri agregalar kullanılmıştır. Agregalar olarak kullanılan kayaların fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te belirtilmiştir. Agregalar tartım işlemleri de Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Deneyde tartılan agregalar

Çizelge 3.3. Agregaya olarak kullanılan kayaların fiziksel özellikleri

Özellikler	1 nolu agregaya	2 nolu agregaya
Tane yoğunluğu	$2,71 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$	$2,72 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3$
Su emme oranı	% 0,7	% 0,6
Yassılık endeksi	% 14,0	% 9,0
İri agregaların parçalanmaya karşı direnci	% 20	% 20

3.1.4. Alkali solüsyonlar

Yaptığımız deneylerde kül, cüruf, sodyum silikat, sodyum hidroksit gibi malzemelerin bir araya getirilerek malzeme oluşturuldu. Sodyum silikat aktivatörün özellikleri Çizelge 3.4'te, sodyum hidroksit fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi ise Çizelge 3.5'te belirtilmiştir. (Na_2SiO_3) sıvı aktivatörü yerel bir kimyasal ürün satan kimya şirketinden sıvı olarak alınmıştır. Deneyde kullanılan diğer aktivatör olan sodyum hidroksit ise neredeyse yüzde yüz saflıkta olacak şekilde yine yerel bir kimya şirketinden alınmıştır. En zayıf durabiliteyi veren 14M Geopolimer beton numunelerinin farklı kür koşulları altında basınç dayanımlarının hangi oranda değişeceği amaç olarak benimsenmiştir. Bu kullanılan

Geopolimer betonların yapısal olarak mümkün kılmak adına en zayıf durabilite koşulları altında Geopolimer betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Sodyum hidroksit ile su belirli oranlarda birleşerek 14 Molarite elde edilmiştir. Yapılan diğer bir araştırmada sodyum silikat-hidroksit oranı ekonomik etkiler yüzünden 1.5 - 2.5 arasında kullanılmasının uygun olduğu bildirilmiştir [41]. Yapılan bu araştırmada ise alkali aktivatör ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) oranı olarak 2.5 kullanılmıştır. Sodyum silikat ile sodyum hidroksit homojen olacak şekilde karıştırılarak mikserin içine döküldü.

Çizelge 3.4. Ürün özellikleri (Sodyum Silikat)

Bileşim	Değeri
% SiO_2	% 22- % 25
% NaO_2	% 10- % 12
Yoğunluğu	1,39 g / cm^3
Görünüm	Renksiz

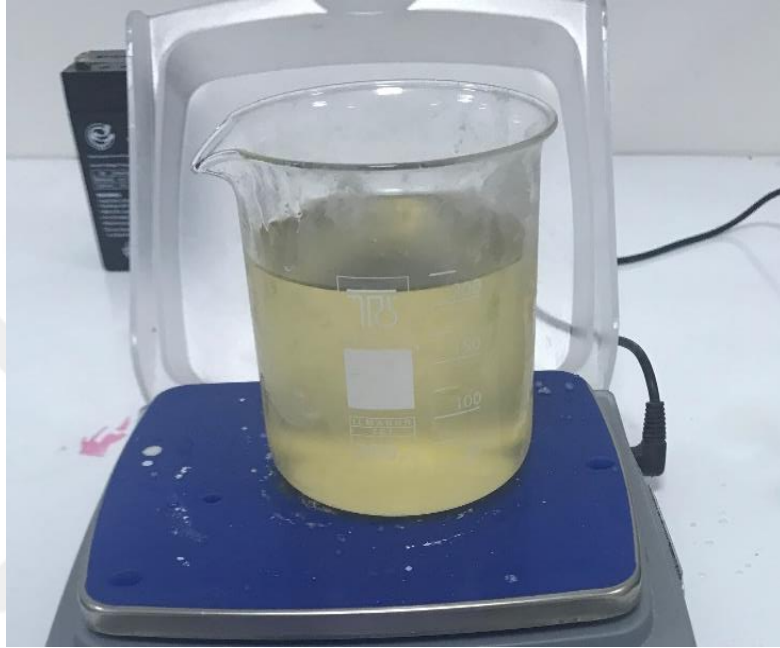
Çizelge 3.5. Fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi (NaOH)

Bileşim	Değeri
Yoğunluk	2,13 g / cm^3
Kaynaması	1388°C
Erimesi	318°C
Moleküler ağırlığı	39,977 g/mol
Rengi	Beyaz ve katı

3.1.5. Kimyasal katkı

Tez çalışmasında yapılan deneyde, değişik özellikte geopolimerlerin işlenebilirliği için polikarboksilat - polimer kaynaklı akışkanlaştırıcı malzeme kullanılmıştır. Uyguladığımız katkı, betonun işlenebilirliğine önemli katkı sağlamıştır. Uygulama da kullandığımız akışkanlaştırıcı farklı betonlar için beton tasarım tablolarında verilmiştir. Kullandığımız

akışkanlaştırıcı 2 etapta beton mikserine ilave edilmiştir. Birinci etapta kullandığımız akışkanlaştırıcının yarısı alkali solüsyonun içerisine eklenip karıştırılmıştır. Kalan diğer yarısı ise ikinci etapta Geopolimer beton mikserine katılmıştır. Deney aşamasında kullandığımız polikarboksilat kaynaklı akışkanlaştırıcının bilgileri Çizelge 3.6'da sunulmuştur ve kimyasal akışkanlaştırıcı Şekil 3.4'de belirtilmiştir.



Şekil 3.4. Uygulamada karışıma ilave edilen katkı

Çizelge 3.6 Kimyasal akışkanlaştırıcının özellikleri

Özellikleri	Süper Akışkanlaştırıcı
İsim	CHRYSO Enviromix 14
Görünümü	Donuk
Durum	Akışkan
Birim ağırlığı	1,090 g/cm ³
Kütle ağırlığı	32 %
Çözülebilir klor miktarı	0,04 %
Ph'ı	6,05

3.2. Uygulamada Prosedür

3.2.1. Numuneler

Araştırma kapsamında küp numuneler (150 x 150 x 150) mm boyutlarında kullanılmıştır ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Geopolimer beton ön karışımları yapılmadan önce kullanılması gereken küp kalıplar tek tek temizlenerek beton dökümü için hazır hale getirilmiştir. Daha sonra küp kalıpların iç kısımları yağlanmıştır. Dökülen beton numunelerin küp kalıplarından kolaylıkla çıkmasının sağlanması amacıyla, küp kalıpların en alt kısmındaki boşluklar kalın kâğıtlarla kapatılarak, deliklerin beton parçaları ile kapanmasının önüne geçilmiştir.

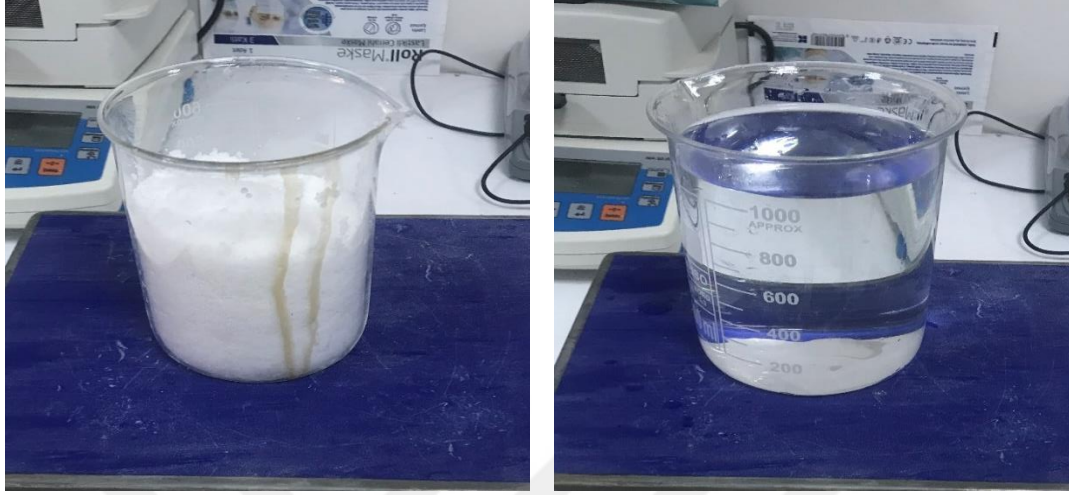


Şekil 3.5. Uygulamada kullanılan küp numuneler

3.2.2. Alkali solüsyonların karışımı

Çalışma kapsamında kullanılacak aktivatörler/solüsyonlar hazırlanırken silikat çözeltisi zaten sıvı olduğundan dolayı karışım için hazırdır. Sodyum hidroksit ise katı halde bulunmasından ve yapacağımız kapsamda 14 M sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanması gerekmiştir. 14 M sodyum hidroksit çözeltisini elde etmek için mikserde tek seferde dökülmesi gereken beton hacmi olarak 32 dm^3 'e göre hesaplar yapılmıştır. Bu hesaplardan yola çıkarak, 1482 gr sodyum hidroksit karışımı oluşturmak için, 957 gr su ve 525 gr sodyum hidroksit (NaOH) kullanılıp sodyum hidroksit çözeltisi karışım için hazır hale getirilmiştir. 14M sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken sodyum hidroksitin su ile reaksiyonu sonucu ekzotermik (ısı açığa çıkaran) bir tepkime gerçekleşmiştir. Bu sıcak çözeltiyi bir miktar

soğumaya bırakıp, yeterli kadar soğuduktan sonra kullanımı gerçekleştirilmiştir. Alkali çözelti Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Solüsyon karışımı

3.2.3. Karışımın hazırlanması

Geopolimer üretimi, temel olarak amorf kil ve benzeri malzemeler kullanılarak polimerize silikat veya alüminosilikat içeren bileşiklerin alkali ortamda sentezlenmesi yöntemine dayanmaktadır. Çizelge 3.7'de karışım hazırlanma aşaması verilmiştir. Yapılan bu çalışmada farklı oranlarda atık malzemeler kullanılarak 3 farklı Geopolimer beton numuneleri üretilecektir.

Çizelge 3.7. Geopolimer beton karışım aşamaları

Na_2SiO_3	+	NaOH	=	Alkali solüsyon
Katı malzemeler	+	Sıvı solüsyonlar	=	Geopolimer betonu

Üretilecek olan birinci geopolimerde kullanılan cüruf %100 cüruf olacak şekilde karışım ayarlanarak beton üretilecektir. Üretilecek olan ikinci geopolimerde kullanılan cüruf miktarı % 75 uçucu kül % 25 olarak belirlenmiştir. Üretilecek olan üçüncü geopolimer betonda ise % 50 cüruf ile % 50 uçucu kül kullanılmıştır. Dökülen betonları adlandırırken tamamen cüruf kullanılan geopolimerler S100 olarak adlandırılır. Dökümü gerçekleşen diğer numuneleri isimlendirirken %75 cüruf kullanılanlar S75FA25 olarak adlandırılmıştır. Son

dökümde cüruf ve uçucu kül yarı yarıya kullanılmıştır. İsim verirken S50FA50 olarak adlandırılmıştır. Yapılan çalışmada sodyum silikat, hidroksit oranı olarak 2.5 ve bağlayıcı malzeme miktarı olarak ise 360 kg/m^3 seçilmiştir. Geopolimer betonlara ilave su eklenmesi daha önce yapılan çalışmalarda mevcuttur. Buradaki amaç kimyasal katkı miktarının bir miktar azalmasını sağlayarak Geopolimer betonların daha ekonomik üretilmesini sağlamaktır. Sonuçta Geopolimer betonların üretim aşamasında en önemli maliyeti kullanılan alkali aktivatör miktarı, kimyasal katkı miktarı ve kullanılan bağlayıcı malzemenin miktarıdır. Portland çimentosuyla üretilen betonlarda farklı kimyasal etkilere karşı durabilitenin sağlanması amacıyla kimyasal etkinin tipine bağlı olarak su/çimento oranının 0.45 ile 0.55 arasında seçilmesi gerekmektedir. Eğer bağlayıcı miktarı fazla tutulursa yani kullanılan cüruf ve uçucu kül miktarı çok fazla olursa yani 500 kg/m^3 civarında olması durumunda kullanılacak alkali aktivatör miktarı 225 ile 275 kg/m^3 arasında olacaktır. Bu durumda hem bağlayıcı malzeme hem de alkali aktivatör miktarı çok olmasından ötürü üretilen Geopolimer betonlar ekonomik olarak uygun olmamasından ötürü yapılarda daha uygun fiyatla üretilen Portland çimentolu betonlar kullanılacaktır.

Bu çalışma da Geopolimer betonların ekonomik olarak üretilmesi için kimyasal katkı/bağlayıcı oranı 0.45 ve bağlayıcı miktarı olarak ise 360 kg/m^3 kullanılarak ekonomik yönden betonların uygunluğu da araştırılacaktır. Kullanılacak betonda slump değerinin de akıcı bir kıvam olan S4 kıvamı seçilecektir. Bu sebepten ötürü özellikle %100 cüruf içeren Geopolimer betonların akıcılık değerinin yüksek olması için kullanılan ilave su miktarının yüksek olması hedeflenmiştir. Çünkü kullanılan su maliyet olarak en ucuz malzemedir. Yapılan ön denemelerde özellikle cürufllu Geopolimer betonun S4 kıvamda olması için çok fazla ilave suya ihtiyaç olduğu belirlenmiştir. Cürufllu betonda kullanılan ilave su ve katkı miktarları diğer betonlarda da kullanılmıştır. Diğer betonlar çok daha akıcı beton hale gelmiştir. Yapılan ön denemeler sonucuna göre kullanılan ilave su miktarının kullanılan NaOH çözeltisi miktarıyla aynı olması düşünülmüştür. Sonuç olarak ise kullanılan alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.45 olmasına rağmen, ilave su kullanımıyla beraber (ilave su + alkali aktivatör) / bağlayıcı oranı 0.58 olmuştur. Bu şartlarda altında 3 farklı Geopolimer betonun farklı kür ortamları altında basınç dayanımının değişimi incelenecektir. Çizelge 3.8'de S100 betonlarının, Çizelge 3.9'da S75FA25 betonlarının, Çizelge 3.10'da ise S50FA50 betonlarının üretiminde kullanılan malzemeler ve miktarları gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. 100S (%100 yüksek fırın cürufu) beton üretiminde kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agregası	No I	560
	No II	560
İnce agregası	Kum	373
	Kırma kum	373
Yüksek fırın cürufu		360
Uçucu kül		-
Kimyasal katkı		31,25
Na ₂ SiO ₃		115,7
NaOH		46,3
İlave su		46,3

Çizelge 3.9. 75S25FA (%75 cüruf +%25 uçucu kül) betonunda kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agregası	No I	560
	No II	560
İnce agregası	Kum	373
	Kırma kum	373
Yüksek fırın cürufu		270
Uçucu kül		90
Kimyasal katkı		31,25
Na ₂ SiO ₃		115,7
NaOH		46,3
İlave su		46,3

Çizelge 3.10. 50S50FA (%50 cüruf +%50 uçucu kül) betonunda kullanılan malzemeler

Malzeme		Miktar (kg/m ³)
İri agrega	No I	560
	No II	560
İnce agrega	Kum	373
	Kırma kum	373
Yüksek fırın cürufu		180
Uçucu kül		180
Kimyasal katkı		31,25
Na ₂ SiO ₃		115,7
NaOH		46,3
İlave su		46,3

3.2.4. Geopolimer beton üretimi

Normal hazır beton üretiminde kullandığımız karışım malzemelerinin neredeyse bire bir aynısı ile farklı Geopolimer beton numunelerimiz İstanbul Gelişim Üniversitesi malzeme laboratuvarındaki beton mikseri aracılığıyla üretilmiştir. Karışımındaki agregalar kolay bulunur bir malzeme olduğu için en çok o kullanılmıştır. Betoniyere konulan malzemeler kullanılan agrega çaplarının büyüklüklerine göre sırasıyla konulmuştur. Akabinde yapılması istenen beton üretimi için bağlayıcı olarak kullanılan malzemeler betoniyere eklenir. Agregalar ile bağlayıcı malzemelerden oluşan kuru karışım homojen karışım olması için beton mikserin içerisinde iki dakika süreyle karıştırılır. Sonra, daha önce hazırlanmış alkali solüsyonlar ve akışkanlaştırıcının yarısı (sodyum hidroksit ve sodyum silikat bileşimi ve kimyasal katkının yarısı) ayrı bir kova içerisinde karıştırılıp, beton mikserine katılır. Bir araya getirilen malzemeler yaklaşık 2 dakika homojen olacak şekilde mikserde karıştırılır. Karışıma eklenecek suyun ve katkının diğer yarısı mikserde eklenerek yaklaşık iki dakika daha karıştırılır. Toplam süre olarak 6 dakika içinde Geopolimer beton mikserde karıştırılıp döküm için hazır hale getirilmiştir. Numune döküm işleminde de, elde edilen farklı Geopolimer karışımlar 150 x 150 x 150 mm küp kalıpların yarı miktarına kadar dökülerek gerekli vibrasyon işlemi sonrası (hava boşluklarını azaltmak için) en son kalıpların kalan diğer yarısı da doldurulup tekrar vibrasyon uygulanıp, yüzeyi mala yardımıyla düzgün hale getirilir. Geopolimer numune üretimi sonrası kalıplar, Şekil 3.7’de görüleceği gibi beton yüzey kısmının hava ile temasın kesilmesi ve alkali solüsyonun buharlaşmasını önlemek için

küp kalıpların üst yüzeyi plastik torbalar ile örtülmüştür. Daha sonra 48 saat beklenildikten sonra (yavaş Geopolimerizasyon sürecinden ötürü) numuneler kalıplardan çıkarılmıştır.



Şekil 3.7. Beton döküm aşamaları

3.2.5. Kür yöntemleri

Kalıplardan çıkarılan Geopolimer betonlar farklı kür koşulları altında basınç dayanımının gelişiminin incelenmesi hedeflenmiştir. Çizelge 3.11’de Geopolimer betonların farklı kür yöntemleri gösterilmiştir. 13 farklı kür yöntemi uygulanarak S100, S75FA25 ve S50FA50 Geopolimer beton numunelerinin farklı kür koşulları altında nasıl performans gösterdiği belirlenmiştir. 28 günlük kür yöntemleri; 28 gün laboratuvar ortamında (28A), 28 gün suda (28W), 26 gün laboratuvar ortamında + son iki gün 70°C 48 saat fırında (26A+20), 26 gün suda + son iki gün 70°C 48 saat fırında (26W+20), 2 gün 70°C fırında (2O), 2 gün 70°C fırında + 26 gün laboratuvar ortamında (2O+26A), ve 2 gün 70°C fırında + 26 gün suda (2O+26W) olacak şekilde 7 farklı şekilde belirlenmiştir. Daha uzun süreli yani 90 günlük kür yöntemleri olarak ise; iki gün 70°C fırında + 88 gün laboratuvar ortamında (2O88A), iki gün 70°C fırında + 88 gün suda (2O88W), 88 gün laboratuvar + son iki gün 70°C fırında (88A+2O), 88 gün suda + son iki gün 70°C fırında (88W+2O), 90 gün laboratuvar ortamında (90A), ve 90 gün suda (90W) olacak şekilde 6 farklı kür yöntemi seçilmiştir. Uygulanan bu farklı kür yöntemlerinin Geopolimer betonların basınç dayanımlarını hangi oranda etkilediği araştırılmıştır. 150 x 150 x 150 mm küp numuneleri hazırlandıktan sonra 70°C fırında kür uygulanmasına tabi tutulmuştur. Numuneler fırına girmeden önce üzerlerine ilgili isimler

yazılarak gerekli kr iŖlemlerine tabii tutulmaktadırlar. Kr iŖlemleri sonrası (su ve fırın) beton numunelerin kuruması ve soğuması için belli bir süre numuneler laboratuvar ortamlarında bekletilmektedir. Daha sonra bu numunelerde ilgili standartlar kullanılarak basınç dayanımı testleri gerekleŖtirilmektedir.



Ŗekil 3.8. Numunelerin hazırlanması ve dökümü

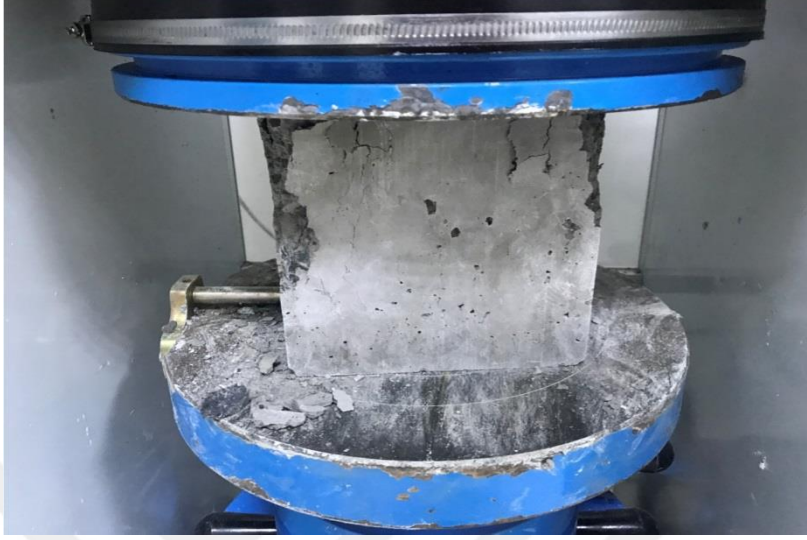
Çizelge 3.11. Geopolimer betonların farklı kür yöntemleri

Tip	Sembol	Kür yöntemi
1	28A	28 gün laboratuvar
2	28W	28 gün suda
3	26A+2O	26 gün laboratuvar + son iki gün 70°C 48 saat fırın
4	26W+2O	26 gün suda + son iki gün 70°C 48 saat fırın
5	2O	70°C 48 saat fırın
6	2O+26A	70°C 48 saat fırın + 26 gün laboratuvar
7	2O+26W	70°C 48 saat fırın + 26 gün suda
8	2O+88A	70°C 48 saat fırın + 88 gün laboratuvar
9	2O+88W	70°C 48 saat fırın + 88 gün suda
10	88A+2O	88 gün laboratuvar + son iki gün 70°C fırın
11	88W+2O	88 gün suda + son iki gün 70°C fırın
12	90A	90 gün laboratuvar
13	90W	90 gün su

3.2.6. Basınç dayanımı

Betonda basınç dayanımı testi, betonda basınç yükleri esnasında mukavemetinin belirlenmesi için gerçekleştirilir. Teknik bakımdan, tek eksenli basınç gerilmesine maruz bir elemanın taşıyabildiği maksimum gerilme değeridir. Sonuçta, beton numunenin dayanabileceği maksimum basınç kuvvetinin numune kesit alanına bölünmesiyle betonun basınç dayanımı bulunur. Birimi genelde MPa cinsinden yazılır. Üretilen betonların dayanıklılık testleri standartlara uyularak gerçekleştirilmiştir. Özellikle farklı kür yöntemindeki numuneler basınç testlerine maruz bırakılmadan önce suda kürlenmiş numunelerin bir gün öncesinden laboratuvar ortamına bırakılıp kurumaları sağlanmış, fırında kür edilen numunelerin ise 48 saat sonra önce fırın kapağı açılıp kontrollü soğumaya bırakılıp ardından da numuneler fırınlardan çıkarılıp laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler üzerinde basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Her bir seriden her farklı kür koşulları için elde edilen basınç dayanımları ortalama olarak 3 adet 150 x 150 x 150 mm küp numunelerin basınç dayanım değerlerinin ortalamasını göstermektedir. Basınç dayanımı testleri kür koşullarına bağlı olarak 2. günde (ısı kürü sonrası), 28.günde ve 90.

günde basınç testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9’da Geopolimer beton numunelerinde gerçekleştirilen basınç dayanımı testi gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Numunelerde basınç testi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda daha önceden adlandırmaları gösterdiğimiz S100 (%100 cürüflü Geopolimer betonlar) , S75FA25 (%75 cüruf içeren ve % 25 uçucu kül içeren Geopolimer betonlar), ve S50FA50 (% 50 cüruf içeren ve % 50 uçucu kül içeren Geopolimer betonlar) Geopolimer betonların farklı kür koşulları altında 2. gündeki, 28. gündeki ve 90. gündeki basınç dayanımlarının zamana bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Üretilen Geopolimer betonların her bir kür ortamı altında (ısı kürü, ortam kürü) basınç dayanımlarının gelişimi üretilen her Geopolimer betonlar için irdelenmiştir. Burada kür yöntemlerini incelenmesindeki amacımız yeni nesil Geopolimer betonların yapılarda kullanılabilirliğini araştırmak, yeteri kadar mukavemet kazanması amacıyla kür yöntemlerini denemek (erken dayanım gerekli yerlerde ısı kürünün uygulanması gibi), Geopolimer betonların uzun süreli dayanımlarının hangi oranda arttığının belirlenmesini sağlamak ve önümüzdeki yıllarda standartlaşması için gerekli çalışmalara katkıda bulunmaktır.

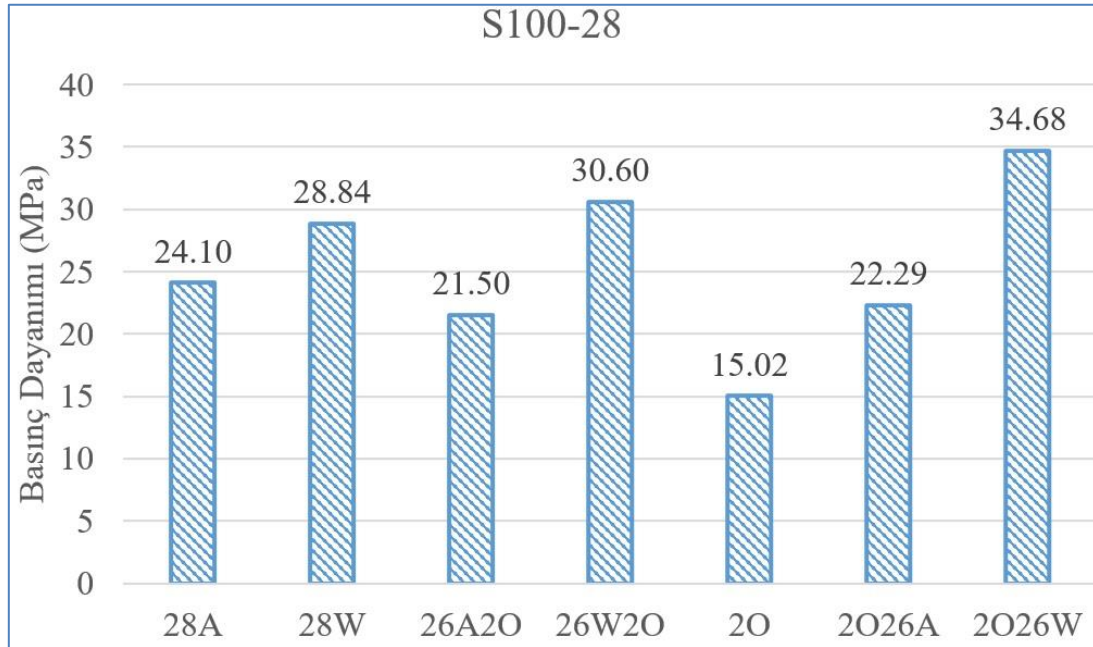
4.1. S100 Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altında Dayanımının Gelişimi

Şekil 4.1’de S100 (%100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürüflü) Geopolimer betonlarının farklı kür koşulları altında 2.günde (ısı kürü sonrası) ve 28. gündeki ortalama basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Farklı kür koşullarının kısaltılması ve detaylı açıklaması Çizelge 3.11’de gösterilmiştir.

Elde edilen basınç dayanımı sonuçlara göre, S100 Geopolimer betonlarının 70°C 48 saat ısı kürü sonrası (S100-20) basınç dayanımı 15.02 MPa olarak bulunmuştur. 28. gün basınç dayanım sonuçlarına göre ise, S100-28A (laboratuvar ortamı) Geopolimer numunelerinin basınç dayanımı 24.10 MPa iken, S100-28W (su içinde) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 28.84 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlara göre, %100 öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren numunelerin sudaki basınç dayanımı, laboratuvar ortamındaki basınç dayanımından daha fazla elde edilmiştir.

Bunun sebebi olarak, cüruf içeriğindeki yüksek CaO gösterilebilir. Cürüflü Geopolimer numunelerdeki su altında basınç dayanımı gelişimi, Portland çimentolu betonlara benzer şekilde olmuştur. S100-26A2O (26 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) numunelerinin basınç dayanımı 21.50 MPa olurken, S100-26W2O (26 gün su + 2 gün ısı kürü) numunelerinin basınç dayanımı 30.60 MPa bulunmuştur. S100-2O26A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar

ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 22.29 MPa iken, S100-2O26W (2 gün ısı kürü + 26 gün su ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 34.68 MPa olarak elde edilmiştir.



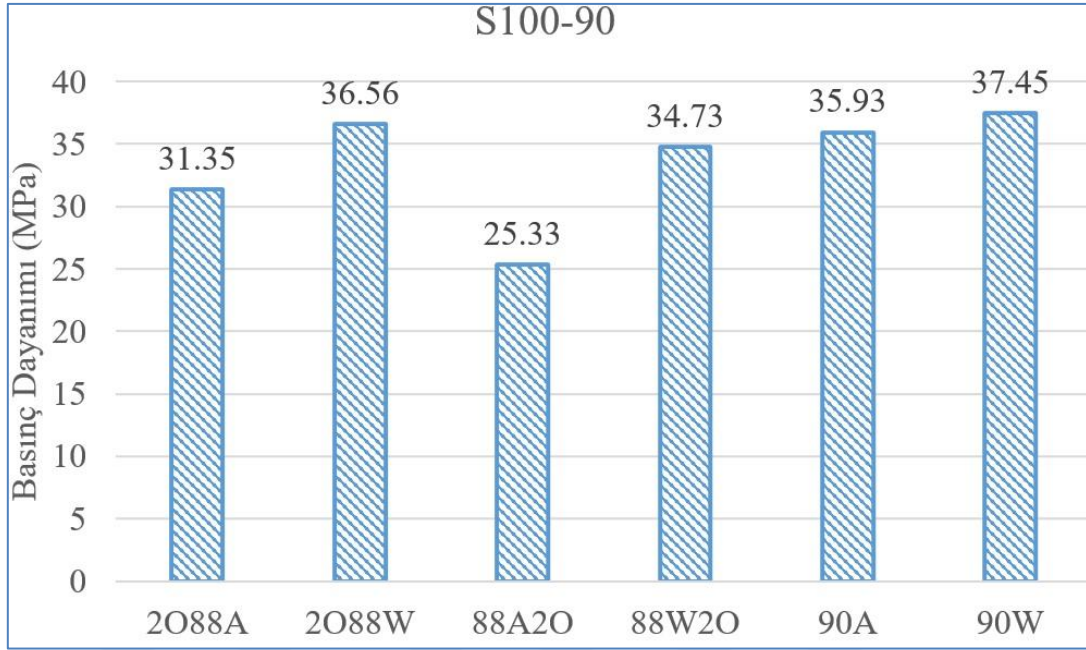
Şekil 4.1. S100 numunelerinin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi

Sonuçlara göre, 28. günde en yüksek dayanımı veren Geopolimer beton numuneler 2026W (2 gün ısı kürü + 26 gün su ortamı) kür şartlarında bekletilen numuneler iken, en düşük dayanımı veren Geopolimer beton numuneler ise 26A20 (26 gün laboratuvar ortamı + 2 gün ısı kürü) kür şartlarında bekletilen numuneler olmuştur. Elde edilen düşük dayanımın sebebi olarak ise, 26 günde belirli bir dayanıma ulaşan numunelerin ısı kürü sebebiyle büzülmesi ve mikro çatlak oluşumu gösterilebilir. En yüksek dayanımın ise öncelikle ısı kürü ardından da su ortamında bekletilerek 28.günde en yüksek dayanım değerine ulaşılmaktadır.

Şekil 4.2’de ise S100 Geopolimer betonlarının farklı kür koşulları altında 90. gündeki ortalama basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Elde edilen 90. gün basınç dayanımı sonuçlarına göre, S100-90A (90 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer numunelerinin basınç dayanımı 35.93 MPa iken, S100-90W (90 gün su içinde) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 37.45 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlara göre, 90. günde %100 öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren numunelerin sudaki basınç dayanımı, laboratuvar ortamındaki basınç dayanımı ile neredeyse benzer dayanım değerleri göstermiştir.

Bunun sebebi olarak, yüksek fırın cürüflü Geopolimer betonların 90. güne kadar Geopolimerizasyon sürecini tamamlaması olarak gösterilebilir. 90. günde de %100 cürüflü Geopolimer numunelerinin su altında basınç dayanımı gelişimi, Portland çimentolu betonlara benzer şekilde yaşa bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Farklı zamanlarda ısı kürü uygulanan numunelerden S100-88A2O (88 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 25.33 MPa olurken, S100-88W2O (88 gün su + 2 gün ısı kürü) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı ise 34.73 MPa bulunmuştur. S100-2O88A (2 gün ısı kürü + 88 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 31.35 MPa iken, S100-2O88W (2 gün ısı kürü + 88 gün su ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 36.56 MPa olarak elde edilmiştir.

Deney sonucu elde edilen S100 betonların dayanıklılık testi sonuçlarına göre , en fazla dayanımı veren Geopolimer beton numuneler 90W (90 gün su ortamı) kür şartlarında bekletilen numuneler iken (37.45 MPa), en düşük dayanımı veren Geopolimer beton numuneler ise 88A2O (88 gün laboratuvar ortamı + 2 gün ısı kürü) kür şartlarında bekletilen numuneler (25.33 MPa) olmuştur. Benzer şekilde 88A2O numunelerinden elde edilen düşük dayanımın sebebi olarak ise, 88 günde belirli bir dayanıma ulaşan numunelerin ısı kürü sebebiyle büzülmesi ve mikro çatlak oluşumu gösterilebilir. Diğer taraftan en yüksek basınç dayanımı değeri 90W ortamında elde edilmesine rağmen, diğer 90A, 2088W numunelerinin de maksimum değere çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Buradan da, Geopolimerizasyon sürecinin %100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren numunelerde 90. günde neredeyse tamamlandığını göstermektedir.



Şekil 4.2. S100 numunelerinin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 4.3. S100 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının değişimi

Şekil 4.3'de ise S100 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımı değerleri görülmektedir. Portland çimentolu betonlara benzer şekilde, 90. gündeki Geopolimer betonların basınç dayanım sonuçları 28.güne göre daha yüksek çıkmıştır. S100 numunelerinin 28. gün basınç dayanım sonuçları ile 90. gün basınç dayanım değerleri ile

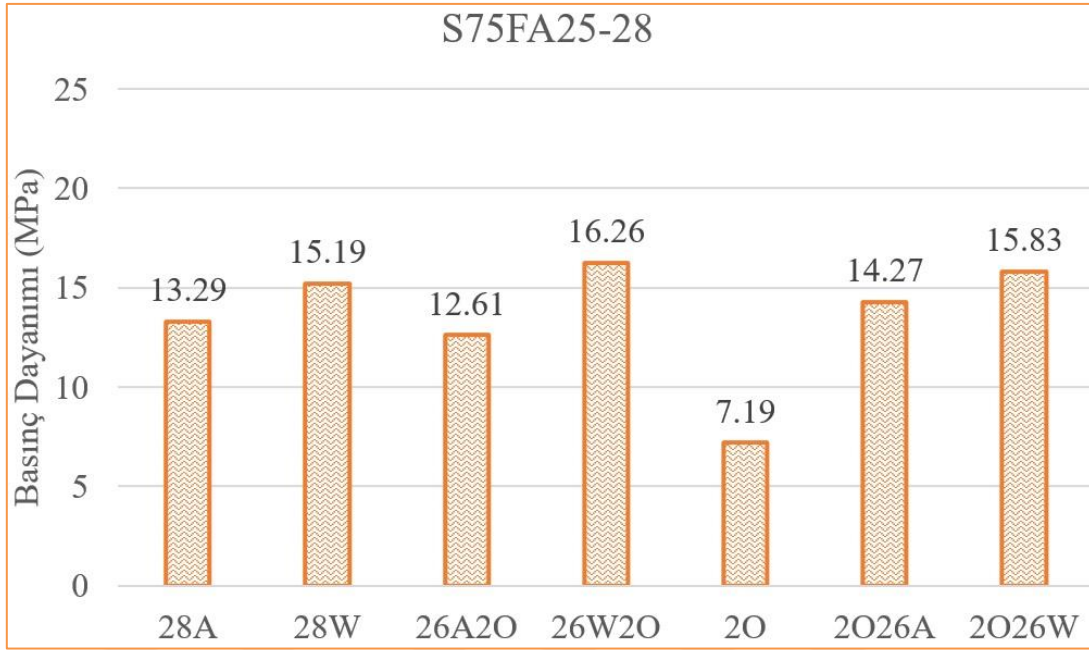
kıyaslandığında, 90.güne en yakın basınç dayanım sonuçları 2026W (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer betonlarında elde edilmiştir.

4.2. S75FA25 Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altında Dayanımının Gelişimi

Şekil 4.4’de S75FA25 Geopolimer betonlarının farklı kür koşulları altında 2.günde (ısı kürü sonrası) ve 28. günde ortalama basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı sonuçlara göre, S75FA25 Geopolimer betonlarının 70°C 48 saat ısı kürü sonrası (S75FA25-20) basınç dayanımı 7.19 MPa olarak bulunmuştur. 28. gün basınç dayanım sonuçlarına göre ise, S75FA25-28A (laboratuvar ortamı) Geopolimer numunelerinin basınç dayanımı 13.29 MPa iken, S100-28W (su içinde) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 15.19 MPa olarak elde edilmiştir.

Sonuçlara göre, %75 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %25 F-tipi uçucu kül içeren numunelerin sudaki basınç dayanımı, laboratuvar ortamındaki basınç dayanımından daha fazla elde edilmiştir. S75FA25-26A2O (26 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) numunelerinin basınç dayanımı 12.61 MPa olurken, S75FA25-26W2O (26 gün su + 2 gün ısı kürü) numunelerinin basınç dayanımı 16.26 MPa bulunmuştur. S75FA25-2026A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 14.27 MPa iken, S75FA25-2026W (2 gün ısı kürü + 26 gün su ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 15.83 MPa olarak elde edilmiştir.

Sonuçlara göre, 28. günde en yüksek dayanımı veren S75FA25 Geopolimer beton numuneler 26W20 (26 gün su ortamı + 2 gün ısı kürü) kür şartlarında bekletilen numuneler iken, en düşük dayanımı veren Geopolimer beton numuneler ise 26A20 (26 gün laboratuvar ortamı + 2 gün ısı kürü) kür şartlarında bekletilen numuneler olmuştur. Elde edilen düşük dayanımın sebebi olarak ise, 26 günde belirli bir dayanıma ulaşan numunelerin ısı kürü sebebiyle büzülmesi ve mikro çatlak oluşumu gösterilebilir.



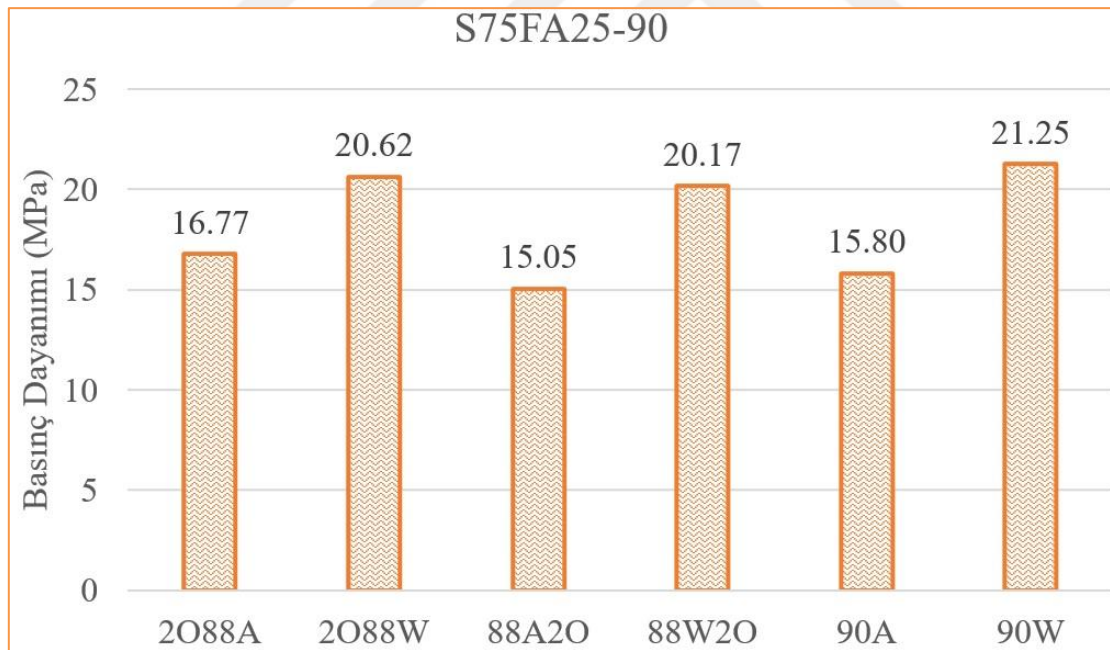
Şekil 4.4. S75FA25 numunelerinin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi

Şekil 4.5’de ise S75FA25 Geopolimer betonlarının farklı kür koşulları altında 90. gündeki ortalama basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Elde edilen 90. gün basınç dayanımı sonuçlarına göre, S75FA25-90A (90 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer numunelerinin basınç dayanımı 15.80 MPa iken, S75FA25-90W (90 gün su içinde) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 21.25 MPa olarak elde edilmiştir.

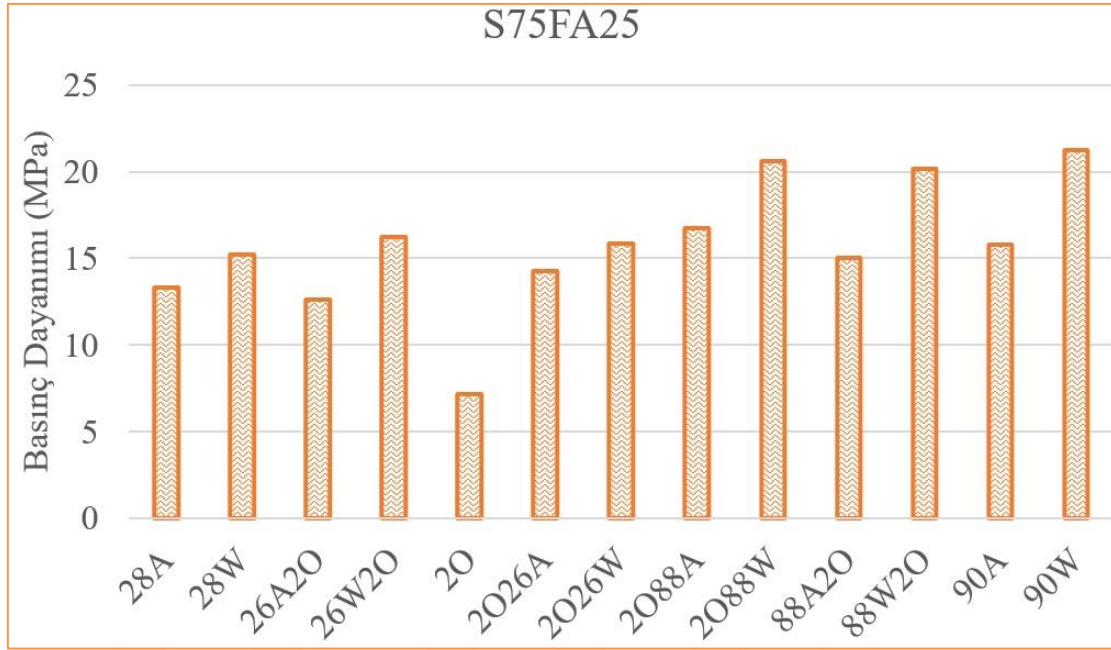
Sonuçlara göre, 90. günde %75 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %25 F-tipi uçucu kül içeren numunelerin sudaki basınç dayanımı, laboratuvar ortamındaki basınç dayanımından daha fazla dayanım değeri göstermiştir. Bunun sebebi olarak, uçucu kül numunelerinin hidrate olamaması olarak gösterilebilir.

Yapılan çalışmalarda uçucu kül numunelerinin yüksek sıcaklıkta hidrate olabildiği ya da uçucu kül numunelerinin hidrate olabilmesi için çok uzun zaman gerekebilmektedir. Farklı zamanlarda ısı kürü uygulanan numunelerden S75FA25-88A2O (88 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 15.05 MPa olurken, S75FA25-88W2O (88 gün su + 2 gün ısı kürü) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı ise 20.17 MPa bulunmuştur. S75FA25-2O88A (2 gün ısı kürü + 88 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 16.77 MPa iken, S75FA25-2O88W (2 gün ısı kürü + 88 gün su ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 20.62 MPa olarak elde edilmiştir.

S75FA25 olarak adlandırılan betonların 3.ayda ki dayanıklılık sonuçlarına göre, en yüksek dayanımı veren Geopolimer beton numuneler 90W (90 gün su ortamı) kür şartlarında bekletilen numuneler iken (21.25 MPa), en düşük dayanımı veren Geopolimer beton numuneler ise 88A20 (88 gün laboratuvar ortamı + 2 gün ısı kürü) kür şartlarında bekletilen numuneler (15.05 MPa) olmuştur. Benzer şekilde 88A20 numunelerinden elde edilen düşük dayanımın sebebi olarak ise, 88 günde belirli bir dayanıma ulaşan numunelerin ısı kürü sebebiyle büzülmesi ve mikro çatlak oluşumu gösterilebilir. Fakat S100 numunelerine nazaran, S75FA25 numunelerinde 88A20 ile 90A numunelerinde oluşan dayanım farkı az olmuştur. Bunun sebebi ise, uçucu kül numunelerinin büzülmeye daha dayanıklı olması gösterilebilir. Diğer taraftan en yüksek basınç dayanımı değeri 90W ortamında (21.25 MPa) elde edilmesine rağmen, 2088W ve 88W2O numunelerinin (ısı kürü uygulanmış) de maksimum değere çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu da uçucu küllerin ısı kürü ile aktive (hidrate) olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.5. S75FA25 numunelerinin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 4.6. S75FA25 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının değişimi

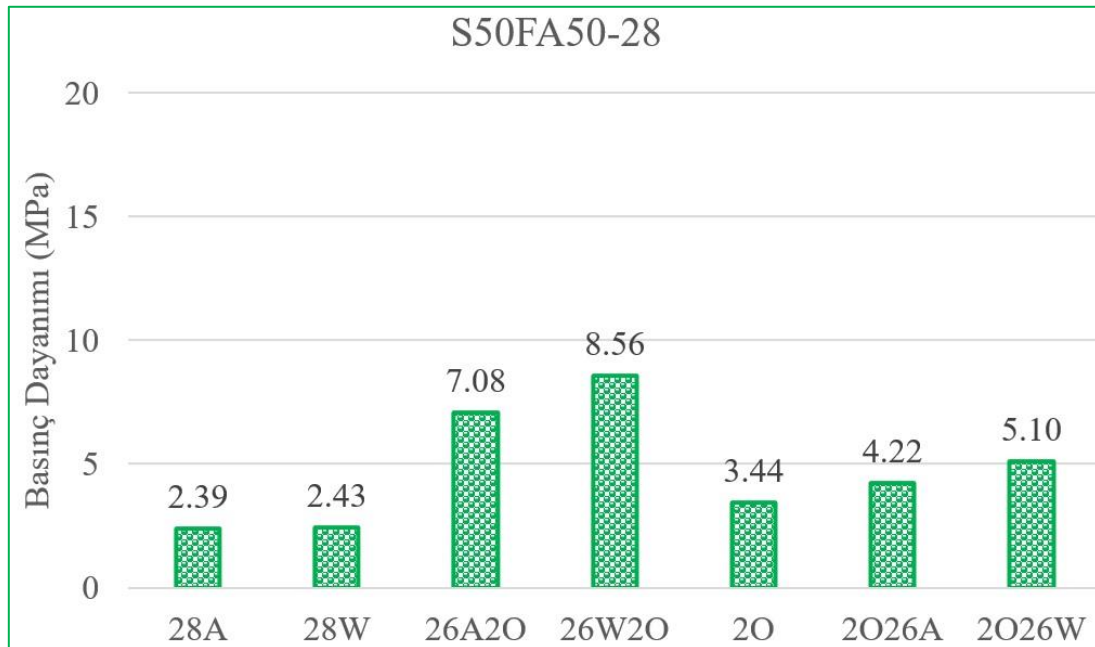
Şekil 4.6'da ise S75FA25 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımı değerleri görülmektedir. Portland çimentolu betonlara benzer şekilde, 90. gündeki Geopolimer numunelerin dayanıklılık sonuçları 28.güne göre daha yüksek çıkmıştır. Fakat iki aylık zaman arasındaki basınç dayanım farkı, %100 yüksek fırın cürufu içeren Geopolimer betonlara kıyasla daha azdır. Bunun sebebi olarak ise uçucu küllerin hidrate olmaması gösterilebilir.

4.3. S50FA50 Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altında Dayanımının Gelişimi

Şekil 4.7'de S50FA50 (%50 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu + %50 F-tipi uçucu kül) Geopolimer betonlarının farklı kür koşulları altında 2.günde (ısı kürü sonrası) ve 28. gündeki ortalama basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, S50FA50 Geopolimer betonlarının 70°C 48 saat ısı kürü sonrası (S50FA50-20) basınç dayanımı 3.44 MPa olarak bulunmuştur. 28. gün basınç dayanım sonuçlarına göre ise, S50FA50-28A (laboratuvar ortamı) Geopolimer numunelerinin basınç dayanımı 2.39 MPa iken, S100-28W (su içinde) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 2.43 MPa olarak elde edilmiştir.

Sonuçlara göre, %50 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %50 F-tipi uçucu kül içeren numunelerin sudaki basınç dayanımı ile laboratuvar ortamındaki basınç dayanımları neredeyse birbirlerine eşit çıkmıştır. S50FA50-26A2O (26 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) numunelerinin basınç dayanımı 7.08 MPa olurken, S50FA50-26W2O (26 gün su + 2 gün ısı kürü) numunelerinin basınç dayanımı 8.56 MPa bulunmuştur. S50FA50-2O26A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 4.22 MPa iken, S50FA50-2O26W (2 gün ısı kürü + 26 gün su ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 5.10 MPa olarak elde edilmiştir.

Sonuçlara göre, 28. günde en yüksek dayanımı veren S50FA50 Geopolimer beton numuneler 26W2O (26 gün su ortamı + 2 gün ısı kürü) kür şartlarında bekletilen numuneler iken, en düşük dayanımı veren Geopolimer beton numuneler ise 28A (28 gün laboratuvar ortamı) kür şartlarında bekletilen numuneler olmuştur. Elde edilen düşük dayanımın sebebi olarak ise, uçucu külün ısı ortamı olmadan dayanım gelişiminin çok yavaş olması gösterilebilir. 28. gün basınç dayanımı sonuçlarına göre dikkat çeken en önemli nokta %50 uçucu kül içeren numunelerde 26 gün sonrasında uygulanan ısı kürü ilk iki gün uygulanmasına göre daha iyi sonuç vermiştir.



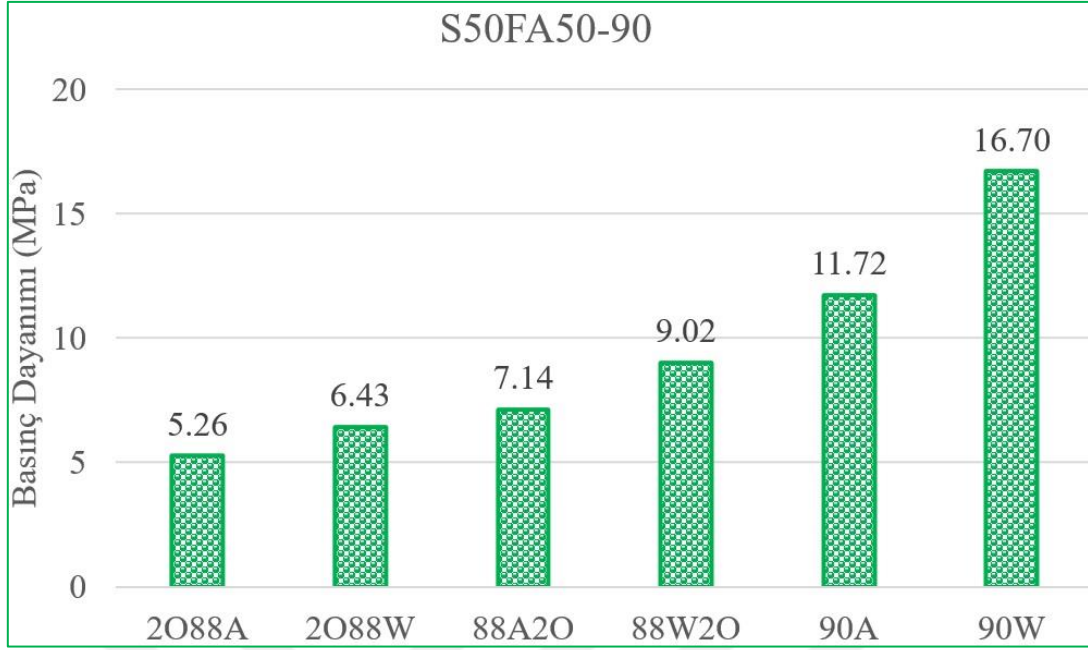
Şekil 4.7. S50FA50 numunelerinin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi

Şekil 4.8’de ise S50FA50 Geopolimer betonlarının farklı kür koşulları altında 90. gündeki ortalama basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. Elde edilen 90. gün basınç dayanımı

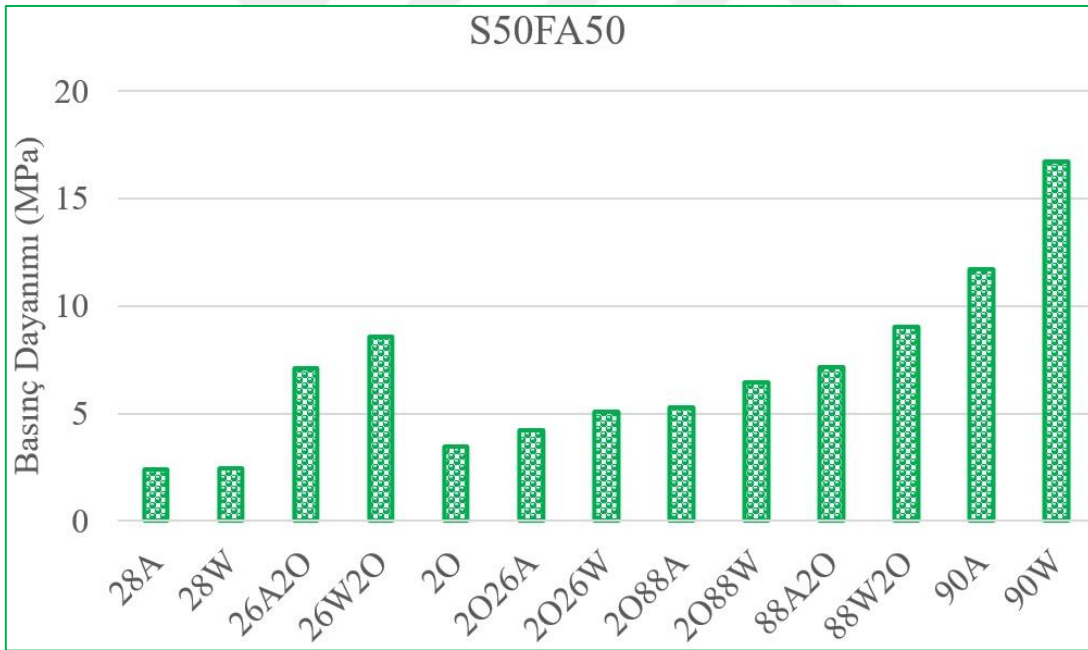
sonuçlara göre, S50FA50-90A (90 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer numunelerinin basınç dayanımı 11.72 MPa iken, S50FA50-90W (90 gün su içinde) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 16.70 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuçlara göre, 90. günde %50 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve %50 F-tipi uçucu kül içeren numunelerin sudaki basınç dayanımı, laboratuvar ortamındaki basınç dayanımından daha fazla dayanım değeri göstermiştir.

Bunun sebebi olarak ise, uçucu kül numunelerinin laboratuvar ortamında hidrate olamaması olarak gösterilebilir. Yapılan çalışmalarda uçucu kül numunelerinin yüksek sıcaklıkta hidrate olabildiği ya da uçucu kül numunelerinin hidrate olabilmesi için çok uzun zaman gerekebilmektedir. Farklı zamanlarda ısı kürü uygulanan numunelerden S50FA50-88A2O (88 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 7.14 MPa olurken, S50FA50-88W2O (88 gün su + 2 gün ısı kürü) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı ise 9.02 MPa bulunmuştur. S50FA50-2O88A (2 gün ısı kürü + 88 gün laboratuvar ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 5.26 MPa iken, S50FA50-2O88W (2 gün ısı kürü + 88 gün su ortamı) Geopolimer beton numunelerinin basınç dayanımı 6.43 MPa olarak elde edilmiştir.

S50FA50 Geopolimer beton numunelerinin 90. gündeki basınç dayanımı sonuçlarına göre, en yüksek dayanımı veren Geopolimer beton numuneler 90W (90 gün su ortamı) kür şartlarında bekletilen numuneler iken (16.70 MPa), en düşük dayanımı veren Geopolimer beton numuneler ise 2O88A (2 gün ısı kürü + 88 gün laboratuvar ortamı) kür şartlarında bekletilen numuneler (5.26 MPa) olmuştur. Burada elde edilen sonuç ısı kürü uygulandıktan sonra %50 uçucu kül içeren betonların dayanımlarının çok fazla gelişemediği ortaya çıkmıştır. Aynı etki 2O88W numunelerinde de görülmektedir. 2 gün ısı kürüne maruz bırakıldıktan sonra 88 gün su ortamında bırakılan numunelerin basınç dayanımları, 88 gün su ortamına maruz bırakıldıktan sonra 2 gün ısı kürüne maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımından daha az çıkmıştır. Bu da %50 uçucu kül içeren numunelerde sonradan ısı kürü uygulanmasının daha faydalı olabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.8. S50FA50 numunelerinin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 4.9. S50FA50 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının değişimi

Şekil 4.9'da ise S50FA50 numunelerinin 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımı değerleri görülmektedir. Portland çimentolu betonlara benzer şekilde, 90. gündeki Geopolimer betonların basınç dayanım sonuçları 28.güne göre daha yüksek çıkmıştır.

4.4. Farklı Geopolimer Betonların Farklı Kür Koşulları Altındaki Dayanımlarının Gelişimi

Şekil 4.10'da S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerin 28. gündeki basınç dayanımlarının gelişimi farklı kür etkileri ile beraber verilmiştir. Elde edilen 28.gün basınç dayanımlarına göre, S100 numunelerinin basınç dayanımları maksimum olurken, S50FA50 numunelerin basınç dayanımları ise minimum olmuştur. Geopolimer betonların basınç dayanımları $S50FA50 < S75FA25 < S100$ olacak şekilde değişmektedir. %100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren Geopolimer betonlarda basınç dayanımının maksimum olması sebebi ise cüruf içeriğindeki yüksek miktarda CaO miktarıdır. CaO sayesinde cüruf lu numuneler Portland çimentolu betonlar gibi zamanla dayanım kazanmaktadır ve su içerisinde daha fazla dayanım kazanmaktadır.

Şekil 4.10'daki sonuçlara göre, 28.gündeki maksimum dayanım S100 ve S75FA25 numunelerinde 2026W (2 gün ısı kürü + 26 gün suda) kür ortamında çıkarken, S50FA50 numunelerinde ise 26W20 (26 gün suda + 2 gün ısı kürü) kür ortamında çıkmıştır. Diğer taraftan 28. gündeki minimum dayanım ise S100 ve S75FA25 numunelerinde 26A2O (26 gün laboratuvar + 2 gün ısı) kür ortamında çıkarken, S50FA50 numunelerinde ise 28A (28 gün laboratuvar ortamında) kür ortamında çıkmıştır. S100 numunelerinin basınç dayanımları 28. günde bütün kür ortamlarında 20 MPa değerinden daha yüksek çıkmıştır. Sebebi ise yüksek oranda CaO içermesinden kaynaklanmaktadır.

28A (laboratuvar) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 24.10 MPa, 13.29 MPa, ve 2.39 MPa çıkmıştır. Özellikle uçucu külün %50 olduğu numunelerde laboratuvar kür ortamında en düşük dayanım elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak uçucu küllerin hidrate olmaması gösterilebilir.

28W (suda) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 28.84 MPa, 15.19 MPa, ve 2.43 MPa çıkmıştır. %50 uçucu küllü numunelerde su ortamında basınç dayanımı uçucu küllerin hidrate olmaması sebebiyle düşük çıkmıştır.

26A2O (26 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 21.50 MPa, 12.61 MPa,

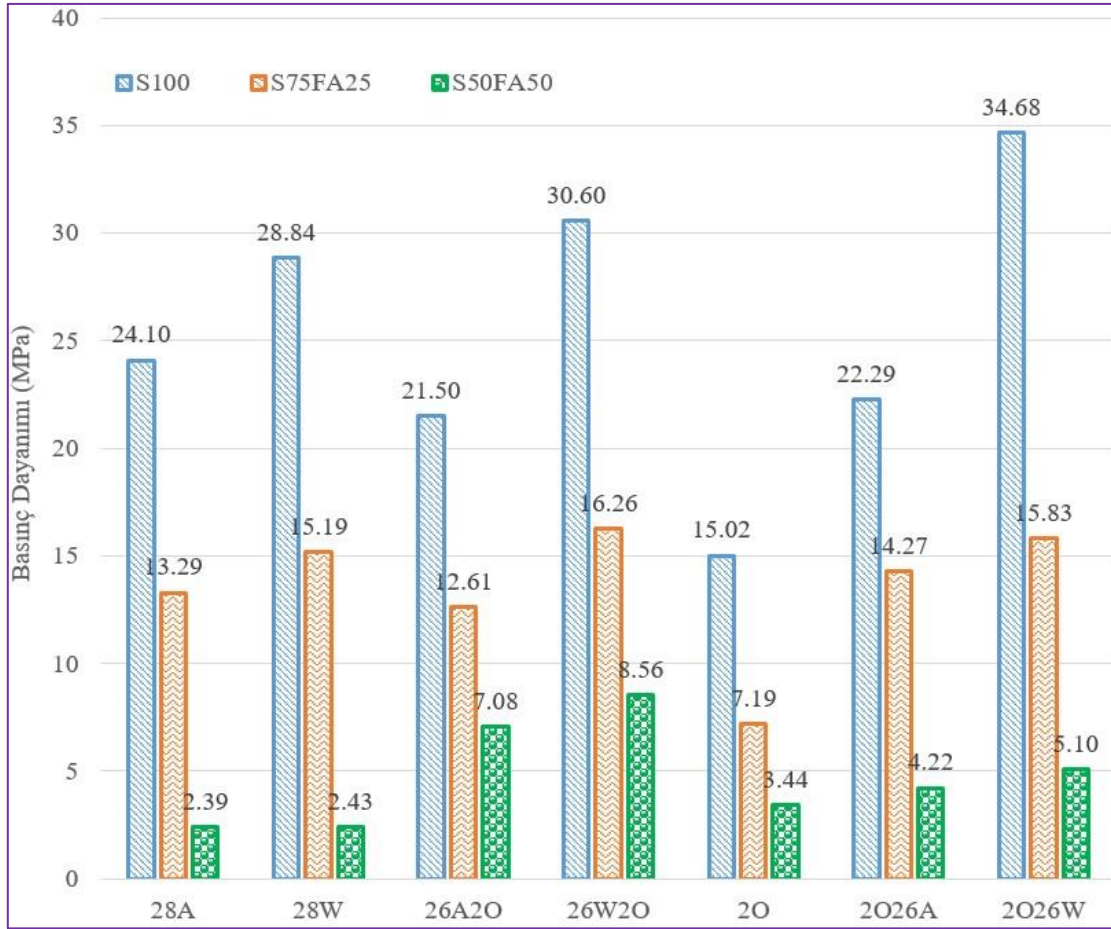
ve 7.08 MPa çıkmıştır. 26A2O ortam kürü S100 ve S75FA25 numunelerde (cürufun çok) en düşük performansı gösterirken, S50FA50 numunelerde ise çok daha iyi basınç dayanımı elde edilmiştir.

26W2O (26 gün suda + 2 gün ısı kürü) ortamında kürlenene numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 30.60 MPa, 16.26 MPa, ve 8.56 MPa çıkmıştır. Bu ortam kürü ise S50FA50 ve S75FA25 numunelerinde en yüksek dayanım değerleri elde edilirken, S100 numunelerinde 2O26W kür ortamından sonra en yüksek değer elde edilmiştir. Uçucu kül numunelerin sonradan ısı kürü uygulanarak aktivite edilmesinden dolayı bu sonuç elde edilmiş olabilir.

2O (2 gün ısı kürü) ortamında kürlenene numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 15.02 MPa, 7.19 MPa, ve 3.44 MPa çıkmıştır.

2O26A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar) ortamında kürlenene numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 22.29 MPa, 14.27 MPa, ve 4.22 MPa çıkmıştır.

2O26W (2 gün ısı kürü + 26 gün su) ortamında kürlenene numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 34.68 MPa, 15.83 MPa, ve 4.22 MPa çıkmıştır. Bu kür ortamında S100 numuneleri 28.günde maksimum basınç dayanımına ulaşmıştır, S75FA25 numuneleri ise 26W20 ortamından sonra en iyi basınç dayanım değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.10. Farklı geopolimer numunelerin 28. gündeki basınç dayanımlarının değişimi

Şekil 4.11’de S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi farklı kür etkileri ile beraber verilmiştir. Elde edilen 90. gün basınç dayanımlarına göre, S100 numunelerinin basınç dayanımları maksimum olurken, S50FA50 numunelerin basınç dayanımları ise minimum olmuştur. Geopolimer betonların 90. gündeki basınç dayanımları da 28. gün dayanımlarına benzer şekilde S50FA50 < S75FA25 < S100 olacak şekilde değişmektedir. %100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren Geopolimer betonlarda basınç dayanımının maksimum olması sebebi ise cüruf içeriğindeki yüksek miktarda CaO miktarıdır. CaO sayesinde cürufu numuneler Portland çimentolu betonlar gibi zamanla dayanım kazanmaktadır ve eğer su içerisinde kür edilirse basınç dayanımı daha fazla olmaktadır. Şekil 4.11’deki basınç dayanımı sonuçlarına göre, 90. gündeki maksimum dayanım S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinde 90W (90 gün suda) kür ortamında çıkmıştır. Bütün numunelerin 90. günde maksimum dayanım göstermesinin sebebi olarak numunelerin büzülme uğramaması ve mikro çatlakların olmaması gösterilebilir. Diğer taraftan 90. gündeki minimum dayanım ise S100 ve S75FA25 numunelerinde 88A2O (88

gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) kür ortamında çıkarken, S50FA50 numunelerinde ise 2O88A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar ortamında) kür ortamında çıkmıştır.

90A (laboratuvar) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 35.93 MPa, 15.80 MPa ve 11.72 MPa çıkmıştır. Özellikle uçucu külün %50 olduğu numunelerde laboratuvar kür ortamında 28. gün sonunda en düşük dayanım çıkmasına rağmen, 90.günde ise 90 A ortamı 90W (su) kür ortamından sonra en iyi basınç dayanımı değerini göstermiştir. Bunun sebebi ise uçucu küllerin yavaş hidrate olmasından dolayı kaynaklanmaktadır.

90W (suda) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 37.45 MPa, 21.25 MPa ve 16.70 MPa çıkmıştır. Bu kür ortamında bütün numunelerde en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak ise büzülme olmaması ve mikro çatlakların olmamasından kaynaklanmaktadır.

88A2O (88 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 25.33 MPa, 15.05 MPa ve 7.14 MPa çıkmıştır. 88A2O ortam kürü S100 ve S75FA25 numunelerde (cürufun çok) en düşük performansı göstermiştir. Bu düşük performansın nedeni olarak ise cürufun belli bir dayanıma ulaşmasından sonra uygulanan ısı kürü numunelerde çatlaklara sebep olarak dayanımın düşmesine sebep olmuş olabilir.

88W2O (88 gün suda + 2 gün ısı kürü) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin dayanıklılıkları 34.73, 20.17 ve 9.02 MPa çıkmıştır.

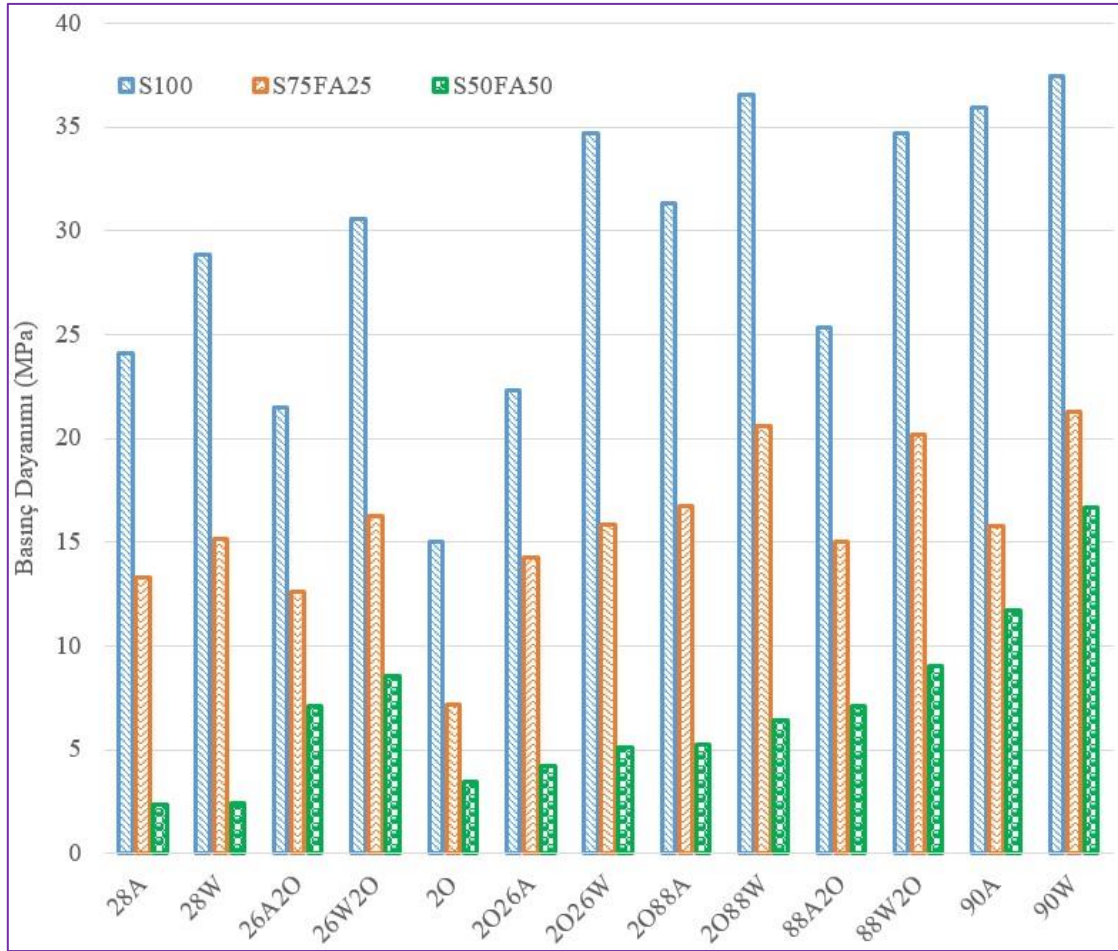
2O88A (2 gün ısı kürü + 88 gün laboratuvar) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin dayanıklılıkları 31.35, 16.77 ve 5.26 MPa çıkmıştır.

2O88W (2 gün ısı kürü + 88 gün su) ortamında kürlenmiş numunelerde S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinin dayanıklılıkları 36.56, 20.62 ve 6.43 MPa çıkmıştır. Yapılan kür ortamında S100 numuneleri 90. günde 90W kür ortamından sonra en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır.



Şekil 4.11. Farklı geopolimer numunelerin 90. gündeki basınç dayanımlarının değişimi

Şekil 4.12’de S100, S25FA75 ve S50FA50 Geopolimerlerin 28. ve 90. günkü dayanıklılık değişimi belirtilmiştir. Çok belirgin bir şekilde en büyük basınç dayanımlarının S100 numunelerinde, daha sonra S75FA25 numunelerinde ve en düşük dayanımın ise S50FA50 numunelerinde görülmektedir. 90. günlerdeki basınç dayanımı değerleri, 28. gün basınç dayanımları değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Farklı geopolimerlerin dayanıklılık ilişkisi (28 ve 90. Gün)

5. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada S100 (%100 cüruf içeren Ge, S75FA25 ve S50FA50 Geopolimer betonların 13 farklı kür koşulları altında basınç dayanımlarının gelişimi 28. ve 90. günlerde incelenmiştir. Kür yöntemleri; 28 (28 gün laboratuvar), 28W (28 gün su), 26A+2O (26 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü), 26W+2O (26 gün su + 2 gün ısı kürü), 2O (2 gün ısı kürü), 2O26A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar), 2O26W (2 gün ısı kürü + 26 gün su), 2O88A (2 gün ısı kürü + 88 gün laboratuvar), 2O88W (2 gün ısı kürü + 88 gün su), 88A+2O (88 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü), 88W+2O (88 gün su + 2 gün ısı kürü), 90A (90 gün havada), 90W (90 gün su) olacak şekilde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Hem 28. gün hem de 90.gün basınç dayanım sonuçlarına göre, S100 Geopolimer betonların basınç dayanımları maksimum olurken, S50FA50 numunelerin basınç dayanımları ise minimum olmuştur. Geopolimer betonların basınç dayanımları S50FA50 < S75FA25 < S100 olacak şekilde değişmektedir. %100 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren S100 Geopolimer betonlarda basınç dayanımının maksimum olmasının sebebi ise cüruf içeriğindeki yüksek miktarda CaO miktarıdır. Uçucu küllü numunelerde basınç dayanımının az olmasının sebebi olarak ise hem düşük CaO içeriği hem de hidrate olmamış uçucu kül parçacıkları düşük dayanıma sebep olmaktadır.
- 28.günde elde edilen maksimum dayanım S100 ve S75FA25 numuneleri için 2026W (2 gün ısı kürü + 26 gün suda) kür ortamı olurken, S50FA50 numuneleri için ise maksimum dayanım 26W20 (26 gün suda + 2 gün ısı kürü) kür ortamında çıkmıştır.
- 28. günde elde edilen minimum basınç dayanımları ise S100 ve S75FA25 Geopolimer numunelerinde 26A2O (26 gün laboratuvar + 2 gün ısı) kür ortamında çıkarken, S50FA50 numunelerinde ise 28A (28 gün laboratuvar ortamında) kür ortamında çıkmıştır. S100 ve S75FA25 Geopolimer beton içeriğindeki yüksek fırın cürufunun ısı kürü sonrası büzülme ve mikro çatlakların oluşmasından dolayı basınç dayanımı düşük çıkmaktadır. 28A (laboratuvar) ortamında kürlenmiş numunelerde S50FA50 numunelerde (uçucu küllün %50 olduğu numunelerde) en düşük dayanım elde edilmesinin sebebi olarak ise uçucu küllerin hidrate olmaması gösterilebilir.
- 90. gün basınç dayanımı sonuçlarına göre, maksimum basınç dayanımları S100, S75FA25 ve S50FA50 numunelerinde (tüm numunelerde) 90W (90 gün suda) kür ortamında çıkmıştır. Bütün numunelerin 90. günde 90W ortamında maksimum dayanım göstermesinin sebebi olarak, numunelerin su içerisinde olmasından dolayı büzülmeye

uğramaması ve mikro çatlakların olmaması, ve yüksek fırın cürufunun yüksek CaO içermesinden ötürü su ortamında dayanımın daha fazla olması gösterilebilir.

- 90. günde elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, minimum basınç dayanımları S100 ve S75FA25 numuneleri için 88A20 (88 gün laboratuvar + 2 gün ısı kürü) kür ortamında çıkarken, S50FA50 numunelerinde ise 2088A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar ortamında) kür ortamında çıkmıştır. 88A20 kür ortamında belli bir dayanım değerine ulaşan yüksek oranlı cüruf numunenin ısı kürü etkisi sonucu büzülme gösterip mikro çatlaklar oluşması cüruf numunelerin basınç dayanımı düşürmektedir. S50FA50 numunelerinde ise 2088A (2 gün ısı kürü + 26 gün laboratuvar ortamında) en düşük dayanımı göstermesinin sebebi olarak ise erken yaşta ısı kürü uygulanması nedeniyle oluşan Geopolimerizasyon ürünlerinin homojen olmaması olabilir. Isı kürü sonrası laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin Geopolimerizasyon sürecinin sağlıklı gelişmemesinden ötürü en düşük dayanım çıkmış olabilir. Buna karşılık, 90A ortamında kür edilen S50FA50 numunelerinde 90W ortamından sonra en yüksek dayanım elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak ise, uçucu küllerin yavaş ve daha sağlam (büzülmenin ve mikro çatlakların daha az) hidrate olması gösterilebilir.

KAYNAKLAR

1. Thokchom S., Ghosh P. , Ghosh S., (2009). Effect of Na₂O Content on Durability of Geopolymer Mortars in Sulphuric Acid, International Journal of Natural Sciences and Engineering, 77-82.
2. Davidovits J., (2008). Geopolymer Chemistry and applications, Saint Quantin, France.
3. Thakur R.N. and Ghosh S., (2009). Effect of Mix Composition on Compressive Strength and Microstructure of Fly Ash Based Geopolymer Composites, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol:4, 68-74.
4. Li Z., Ding Z., Zhang Y., (2004). Development of Sustainable Cementitious Materials, Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 55-76.
5. Erdoğan, T. Y., (2004).“ Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri” , THBB Yayınları.
6. Bougara, A., Khatib, J., And Khellafi, H., (2009). “Some Parameters Affecting the Heat of Hydration of Slag Cement”, 1st International Conf. on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries”, Algeria.
7. Engin, Y., Yüksek Fırın Cürüflü Çimento Üretimi Özellikleri ve Etkisi, www.betonvecimento.com.
8. Arslan Hakkı İ., Yiğit E., Özel P., (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri Cilt II, Çalışma Grubu, Ankara.
9. L.Senff, (2005). The Influence of TiO₂, ZnO Powder Mixtures On Photocatalytic Acticity And Rheological Behavior of Cement Pastes, Constr. Build. Mater.

10. Sümer, M., (1994). Uçucu Kül Atıklarının Beton Üretiminde Değerlendirilmesi, I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı, 179-185.
11. Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y. and WU, X., (2002). Studies on Blended Cement with Large Amount of Fly Ash. Cement and Concrete Research, 1153-1159.
12. Türker P., Erdoğan B., Katnaş F., Yeğınobalı A., (2009). Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB Yayınları, 4. Baskı, Ankara.
13. Erdoğan, T.Y., (1993). Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanım Sempozyumu.
14. Caijun Shi, P.V.K., Della Roy, Alkali-Activated Cements and Concretes, 2006, 245-256.
15. Kantarcı, F., (2013). Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
16. Elibol, C., (2012). Alkalilerle Aktive Edilen Çimento Esaslı Malzemelerin Basınç Dayanımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, I.T.Ü. FenBilimleri Enstitüsü, İstanbul.
17. Gomes, B. P., Souza, S. F., Ferraz, C. C., Teixeira, F. B., Zaia, A. A., Valdrighi, L. & Souza-Filho, F. J. (2003). Effectiveness of 2% chlorhexidine gel and calcium hydroxide against *Enterococcus faecalis* in bovine root dentine in vitro. *Int Endod J*, 36: 267-75
18. Ekmen Ş., Mermerdaş K. (2018). “Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 93-101.
19. Haddad, R.H., Alshbuol, O. (2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Constr. Build. Mater.* 114(1), 699-707.

20. Hardjito, D. (2005). Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Doctor Of Philosophy Thesis, Curtin University of Technology, Perth.
21. Hlavacek, P. (2014). Engineering properties of alkali activated composites. Doctor Of Philosophy Thesis, Czech Technical University In Prague, Prague.
22. Rajarajeswari, A., Dhinakaran, G. (2016). Compressive strength of GGBFS based GPC under thermal curing. *Constr. Build. Mater.* 126, 552-559.
23. Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cem. Concr. Res.* 34(6), 1043-1049.
24. Görhan, G., Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B.* 58, 371-377.
25. Speight, J.G. (2002). *Chemical and Process Design Handbook*. McGraw-Hill, USA, 633 p.
26. Neville, A.M. (1997). *Properties of concrete*. 4th ed. India: Dorling Kindersley Publishing, Inc.
27. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J. (2007b). Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 42(9), 2917-2933.
28. Hajimohammadi, A. Provis, J.L. van Deventer, J.S.J. (2011b). Time-resolved and spatially-resolved infrared spectroscopic observation of seeded nucleation controlling geopolymer gel formation. *J. Colloid Interface Sci.* 357(2), 384-392.
29. Rivera, O.G., Long, W.R., Weiss Jr, C.A., Moser, R.D., Williams, B.A., Torres-Cancel, K., Gore, E.R., Allison, P.G. (2016). Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders. *Cem. Concr. Res.* 90, 43-51.

30. Bing-hui, M., Zhu, H., Xue-min, C., Yan, H., Si-yu, G. (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* 99, 144-148.
31. Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel.* 82(18), 2259-2265.
32. He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cem. Concr. Compos.* 37, 108-118.
33. Khater, H.M. (2012). Effect of calcium on geopolymerization of aluminosilicate wastes. *J. Mater. Civ. Eng.* 24(1), 92-101.
34. Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Constr. Build. Mater.* 85, 78-90.
35. Bakharev, T. (2005c). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cem. Concr. Res.* 35 (4), 658-670.
36. He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cem. Concr. Compos.* 37, 108-118.
37. Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P., Chindapasirt, P. (2011). NaOH activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel.* 90(6), 2118-2124.
38. Karakoç, M.B., Türkmen, İ., Maraş, M.M., Kantarci, F., Demirboğa, R., Toprak, M.U. (2014). Mechanical properties and setting time of ferrochrome slag based geopolymer paste and mortar. *Constr. Build. Mater.* 72, 283-292.
39. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S.J. (2007b). Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.* 42 (9), 2917-2933.

40. Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Constr. Build. Mater.* 85, 78-90.

41. D. Hardjito, S.E.Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V.Rangan, (2004). “On the development of fly ash-based geopolymer concrete”, *ACI materials Journal*, Technical paper, Title No.101M52.



ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : İlhan ALTINDAL
Uyruğu : T.C
Doğum Tarihi ve Yeri : 25.04.1992 Zile/Tokat
Medeni Hali : Bekâr
Telefon : 0 537 943 22 30
E-Mail : altndl60@gmail.com

Eğitim

Yüksek Lisans İ.G.Ü. F.B.E. İnş. Müh. A.B.D. 2019
Lisans Bozok Üniversitesi 2015
Lise Büyükçekmece Lisesi 2010

İş Deneyimi

2017- Azur Grup İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Mesleki araştırmalarda bulunmak, kitap okumak ,seyahat etmek



GELİŞİM GELİŞMEKTİR...