



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEPOLİMER BETONLARDA ADERANS PERFORMANSININ
MAFSALLI KİRİŞ YÖNTEMİYLE ANALİZ EDİLMESİ

MERVAN ABA
YÜKSEK LİSANS



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKEŞ BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEOPOLİMER BETONLARDA ADERANS PERFORMANSININ
MAFSALLI KİRİŞ YÖNTEMİYLE ANALİZ EDİLMESİ

MERVAN ABA
YÜKSEK LİSANS

DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET BEYÇİOĞLU

ADANA 2023

GEOPOLİMER BETONLARDA ADERANS PERFORMANSININ MAFSALLI KİRİŞ YÖNTEMİYLE ANALİZ EDİLMESİ

**Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat
Mühendisliği Anabilim Dalında Mervan ABA tarafından tamamlanan Yüksek Lisans Tezi
onaylanmıştır.**

Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU
Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Faruk Fırat ÇALIM
Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU
Danışman

Tez Jürisi

Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ
Adana Alparslan Türkeş Bilim ve
Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. İlker KALKAN
Kırıkkale Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi

17/08/2023

Bu tezde yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm bilgiler için atıf verdiğimi ve kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

Mervan ABA

ÖZET

GEOPOLİMER BETONLARDA ADERANS PERFORMANSININ MAFSALLI KİRİŞ YÖNTEMİYLE ANALİZ EDİLMESİ

Mervan ABA

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU

Haziran 2023, xv + 76 Sayfa

"Geopolimer Betonlarda Aderans Performansının Mafsallı Kiriş Yöntemiyle Analiz Edilmesi" başlıklı bu tez çalışması, esas olarak geopolimer beton ve yapısal çelik bağ davranışının eğilme testi altında değerlendirilmesi ile ilgilidir. Bilindiği üzere yükselen bir trende sahip olan geopolimer beton, çimentosuz beton olarak karbondioksit emisyonlarında büyük bir azalma sağlamaktadır. Bu nedenle geleneksel beton yerine kullanılabilecek alternatif bir yapı malzemesi olabilir. Ancak geopolimer betonun yapısal performansı üzerine yapılan çalışmalar literatürde yeterli değildir. Çelik bağ davranışı, yapısal performansı anlamak için betonların ana parametrelerinden biridir. Bu amaç kapsamında, bu tez çalışması, Geopolimer betonun çelik-bağ davranışının farklı kür koşulları altında Standart Belçika Mafsallı Kiriş test yöntemi kullanılarak belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.

Çalışmanın ilk evresinde, alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan uçucu kül ile, 1,1, 1,2, 1,3 ve 1,4 Ms (Silika Modülü) değerine sahip 150*150*150 mm kalıplarda geopolimer beton örnekleri üretilmiştir. Her bir Ms modülünde %10 Na₂O konsantrasyonu uygulanmıştır. Bu örneklerde, taze betonun işlenebilirliği ve tek eksenli basınç dayanımı testleri için slump deneyleri yapılmış, ardından 80, 100, 120 °C sıcaklıklarda ısıl kür uygulaması gerçekleştirilerek optimum işlenebilirlik ve dayanım parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler, geopolimer beton karışımının reçetesinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Son aşamada, mafsallı kiriş yöntemi kullanılarak aderans performansının analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, işlenebilirlik ve dayanım parametreleri belirlenen nihai reçete

ile geopolimer beton kirişler ve bu geopolimer kirişler ile benzer dayanım özelliklerine sahip geleneksel portland çimentolu beton kirişler hazırlanmıştır. Her iki beton türünden kirişler, 5Ø, 10Ø ve 20Ø etkili uzunluğa sahip olacak şekilde 3 tekrarlı olarak düzenlenmiştir. Mafsallı kiriş yöntemi ile kirişler üzerinde yapılan aderans performansının analiz sonuçlarına dayanarak, mafsallı kiriş yöntemi kullanılarak elde edilen bulgular, geopolimer betonların geleneksel portland çimentolu betonlara göre donatılarla daha üstün bir aderans performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: geopolimer, yeşil beton, aderans, belika mafsallı kiriş deneyi, uucu kl



ABSTRACT

BOND PERFORMANCE OF GEOPOLYMER CONCRETE VIA HINGED BEAM APPROACH

Mervan ABA

M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet BEYÇİÖĞLU

August 2022, xv + 76 pages

This thesis study titled "Analysis of Adhesion Performance in Geopolymer Concrete using the Hinged Beam Method" primarily focuses on the evaluation of Geopolymer Concrete and Structural Steel Bond Behavior under bending tests. Geopolymer concrete, which is experiencing a rising trend, is known to contribute significantly to the reduction of carbon dioxide emissions as a cement-free concrete. Therefore, it has the potential to serve as an alternative building material instead of traditional concrete. However, there is a lack of sufficient studies in the literature regarding the structural performance of geopolymer concrete. The behavior of the steel bond is one of the key parameters for understanding the structural performance of concrete. In this context, this thesis study aims to determine the steel bond behavior of geopolymer concrete under different curing conditions using the Standard Belgian Hinged Beam test method.

In the initial stage of the study, geopolymer concrete samples were produced using fly ash as the aluminosilicate source with Ms modulus values of 1.1, 1.2, 1.3, and 1.4. A Na₂O concentration of 10% was applied to each Ms modulus. Slump tests were conducted on these samples to assess the workability and strength of fresh concrete. Subsequently, thermal curing was carried out at temperatures of 80, 100, and 120°C to determine the optimal workability and strength parameters. These parameters were then used to determine the recipe of the resulting geopolymer concrete mixture.

In the subsequent stage, the analysis of adhesion performance was conducted using the hinged beam method. For this purpose, beams of traditional Portland cement concrete and geopolymer concrete with similar strength properties were prepared. Beams of both concrete types were arranged to have effective lengths of 5ϕ , 10ϕ , and 20ϕ . Based on the analysis results of adhesion performance, the findings obtained using the hinged beam method demonstrated that geopolymer concrete exhibits superior adhesion with reinforcement compared to traditional Portland cement concrete.

Keywords: geopolymer, green concrete, adherence, Standard Belgium Hinged Beam Test, fly ash



TEŞEKKÜR

Hazırlamış olduğum bu tez çalışmasında, tez konusunun belirlenmesi ve çalışmaların sürdürülmesinde fikir, öneri ve desteklerini hiçbir zaman eksik etmeden sabır ve kararlılıkla çalışmanın gerçekleşmesine büyük katkıda bulunan tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU 'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında malzeme temini konusunda destekte bulunan ABA İNŞAAT ve ALPA A.Ş.'ye, KAMBETON A.Ş.'ye ve Caner GÜNGÖR'e şükranlarımı sunarım. Geopolimer tasarımı konusunda önemli katkılar sunan Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a, kıymetli arkadaşım Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim elemanı Arş Gör. Hüsamettin ÜRÜNVEREN'e ve laboratuvar deneylerinde yardımlarını eksik etmeyen laboratuvar teknisyeni Hasan DAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu günlerimi borçlu olduğum, maddi ve manevi desteklerini her daim hissettiğim, annem ve babam başta olmak üzere tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. GEOPOLİMER BETON.....	2
2.1. Geopolimer Betonların Gelişimi ve Tarihçesi.....	2
2.2. Geopolimerlerin Kimyası	4
2.3. Geopolimerlerin Çevresel Etkileri.....	9
2.4. Geopolimerlerin Kullanım Alanları.....	10
2.5. Geopolimer Betonların Normal Betonlara Göre Avantajları	10
2.6. Geopolimer Beton Bileşenleri	11
2.6.1. Alkali Aktivatörler.....	13
2.6.2. Sodyum Hidroksit.....	14
2.6.3. Sodyum Silikat	14
2.7. Geopolimer Beton Tasarım İlkeleri.....	15
2.7.1. Sodyum Hidroksit (NaOH) Çözelti Konsantrasyonu	15
2.7.2. Sodyum Silikat – Sodyum Hidroksit Oranı.....	16
2.7.3. Alkali Aktivatör – Toz Bağlayıcı Oranı	16
2.7.4. Su – Geopolimer Harç Oranı	17
2.7.5. SiO_2/Na_2O Oranı	17
2.8. Geopolimer Betonlarda Kürlenme.....	17
2.8.1. Kür Şekli.....	17
2.8.2. Kür Sıcaklığı.....	18
2.8.3. Kür Süresi	18

2.9.	Taze ve Sertleşmiş Haldeki Geopolimerlerin Özellikleri.....	19
2.9.1.	İşlenebilirlik.....	19
2.9.2.	Mekanik Özellikler	19
2.9.3.	Durabiliteye İlişkin Kavramlar	19
3.	BETON – DONATI ADERANSI.....	21
3.1.	Betonarmade Aderans ve Kenetlenme	21
3.2.	Aderansa Etki Eden Başlıca Faktörler	21
3.2.1.	Donatı Çubuğunun Yüzey Geometrisi	22
3.2.2.	Donatı Çapı.....	23
3.2.3.	Kenetlenme Boyu	23
3.2.4.	Paspayı Tabaka Kalınlığı.....	23
3.2.5.	Donatının Konumu	23
3.2.6.	Sargı Donatısı	24
3.3.	Aderans Deneyleri	24
3.3.1.	Çekip Çıkarma (Pull – Out) Deneyi	25
3.3.2.	Kiriş Deneyleri	27
3.3.3.	Bureau of Standards Deneyi	27
3.3.4.	Tektaş Deneyi.....	27
3.3.5.	Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi.....	28
4.	LİTERATÜR ÖZETİ.....	29
5.	MALZEME VE YÖNTEM	38
5.1.	Malzeme	38
5.1.1.	Agrega	38
5.1.2.	Normal Portland Çimentosu	38
5.1.3.	Uçucu Kül.....	39
5.1.4.	Kimyasal Katkı	40
5.1.5.	Alkali Aktivatör.....	40

5.1.6. Çelik Donatılar	41
5.2. Yöntem	42
5.2.1. Geopolimer Betonların Tasarımı ve Karışım Oranlarının Belirlenmesi	44
5.2.2. Geopolimer Beton Ön Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	44
5.2.3. Çökmede Yayılma Deneyi (Slump Deneyi).....	45
5.2.4. Deneylerde Kullanılan Numune Boyutları ve Kür Şartları	46
5.2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	47
5.2.6. Mafsallı Kiriş Deneyi Numunelerinin Üretimi ve Kür Uygulaması	47
5.2.7. Mafsallı Kiriş Deney Düzeneği, Yöntemi ve Uygulanması.....	51
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	58
6.1. Çalışmada Üretilen Geopolimer Betonun Taze Beton Özelliklerine Ait Bulgular ...	58
6.2. Üretilen Geopolimer Betonların Dayanım Özelliklerine Ait Bulgular	58
6.3. Mafsallı Kiriş Deneyinde Elde Edilen Donatı Aderans Performansına Ait Bulgular	61
7. SONUÇ.....	74
7.1. Geopolimerler Betonların Taze Beton Özellikleri ile İlgili Sonuçlar.....	74
7.2. Geopolimerler Betonların Basınç Dayanımları Özellikleri ile İlgili Sonuçlar	74
7.3. Eğilmede Aderans Deneyleri İle İlgili Sonuçlar.....	74
KAYNAKLAR.....	77

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Karbondioksit salınımının yıllara göre dağılımı (Statista, 2018)	1
Şekil 2.1 : Çözünmüş alüminosilikatların yeniden örgütlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşması ve jel formasyonu başlangıcı, (c) polimerizasyon (Sing ve Middendorf, 2020).....	5
Şekil 2.2 : Geopolimerizasyon süreci (Singh, 2018)	5
Şekil 2.3 : Geopolimerizasyon sürecinin bir diğer gösterimi (Singh, 2018).	6
Şekil 2.4 : Oksijen atomunun $Si + 4$ ve $Al + 4$ ile koordinasyon mekanizması (Joseph, 2015).	8
Şekil 2.5 : SEM görüntüleri (Soyer-Uzun ve Çetintaş, 2018).	9
Şekil 2.6 : Geopolimer beton bileşenleri	13
Şekil 3.1 : Merkezi çekip-çıkarma deneyinin şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.2 : Bazı merkezi çekip-çıkarma deney düzeneklerinin şematik gösterimi	26
Şekil 3.3: Dışmerkez çekip-çıkarma deney düzeneğinin şematik gösterimi	26
Şekil 3.4: Bureau of standards deney düzeneğinin şematik gösterimi	27
Şekil 3.5: Texas çıkmalı kiriş deney düzeneği	28
Şekil 3.6: Standart Belcika mafsallı kiriş deney düzeneği.....	28
Şekil 4.1: Yakıt (termal enerji) kullanımı (Assi et al. 2018)	30
Şekil 5.1. Deneylerde Kullanılan Çelik Donatılar	42
Şekil 5.2. Tez kapsamında gerçekleştirilen deney programı	43
Şekil 5.3. Yayılma deneyinin uygulandığı	45
Şekil 5.4. Taze betonun kalıplara yerleştirilmesi	46
Şekil 5.5. Etüvde bekletilen geopolimer beton numuneleri ve etüve ait örnek kür şartları	46
Şekil 5.6. Basınç dayanım testi uygulanmış bir geopolimer beton numunesi	47
Şekil 5.7. Mafsallı kiriş deneyinde kullanılan donatı ve etriyeler	48
Şekil 5.8. Mafsallı kiriş deneyinde kullanılan kalıplar	48
Şekil 5.9. Donatının kenetlenme boyunun sınırlandırılması.....	49
Şekil 5.10. Taze betonun kalıplara yerleştirilmesi ve masa tipi vibratörle sıkıştırılması	49
Şekil 5.11. Etüvde bekletilen kiriş numuneleri	50
Şekil 5.12. Üretilen geopolimer kiriş numuneleri.....	50
Şekil 5.13. Kür havuzunda bekletilen geleneksel beton numuneleri	51
Şekil 5.14. BMK deney düzeneği şeması	52
Şekil 5.15. BMK deney düzeneği	54
Şekil 5.16. BMK deneyi uygulanan bir kirişte meydana gelen sıyrılma	54
Şekil 5.17. BMK deneyi uygulanmış bir kirişte donatının kopması.....	55
Şekil 5.18. BMK deneyi uygulanmış bazı kiriş numuneleri	55
Şekil 6.1. MS1.3-100-5Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği	61
Şekil 6.2. MS1.3-100-5Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği	62
Şekil 6.3. MS1.3-100-5Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği	62
Şekil 6.4. PÇ-28D-5Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği	63
Şekil 6.5. PÇ-28D-5Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği	64
Şekil 6.6. PÇ-28D-5Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği	64

Şekil 6.7. MS1.3-100-10Φ/1 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	65
Şekil 6.8. MS1.3-100-10Φ/2 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	66
Şekil 6.9. MS1.3-100-10Φ/3 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	66
Şekil 6.10. PÇ-28D-10Φ/1 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	67
Şekil 6.11. PÇ-28D-10Φ/2 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	68
Şekil 6.12. PÇ-28D-10Φ/3 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	68
Şekil 6.13. MS1.3-100-20Φ/1 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	69
Şekil 6.14. MS1.3-100-20Φ/2 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	70
Şekil 6.15. MS1.3-100-20Φ/3 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	70
Şekil 6.16. PÇ-28D-20Φ/1 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	71
Şekil 6.17. PÇ-28D-20Φ/2 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	72
Şekil 6.18. PÇ-28D-20Φ/3 Kodlu giriş numunesine ait deney sonuç grafiği	72



TABLolar LİSTESİ

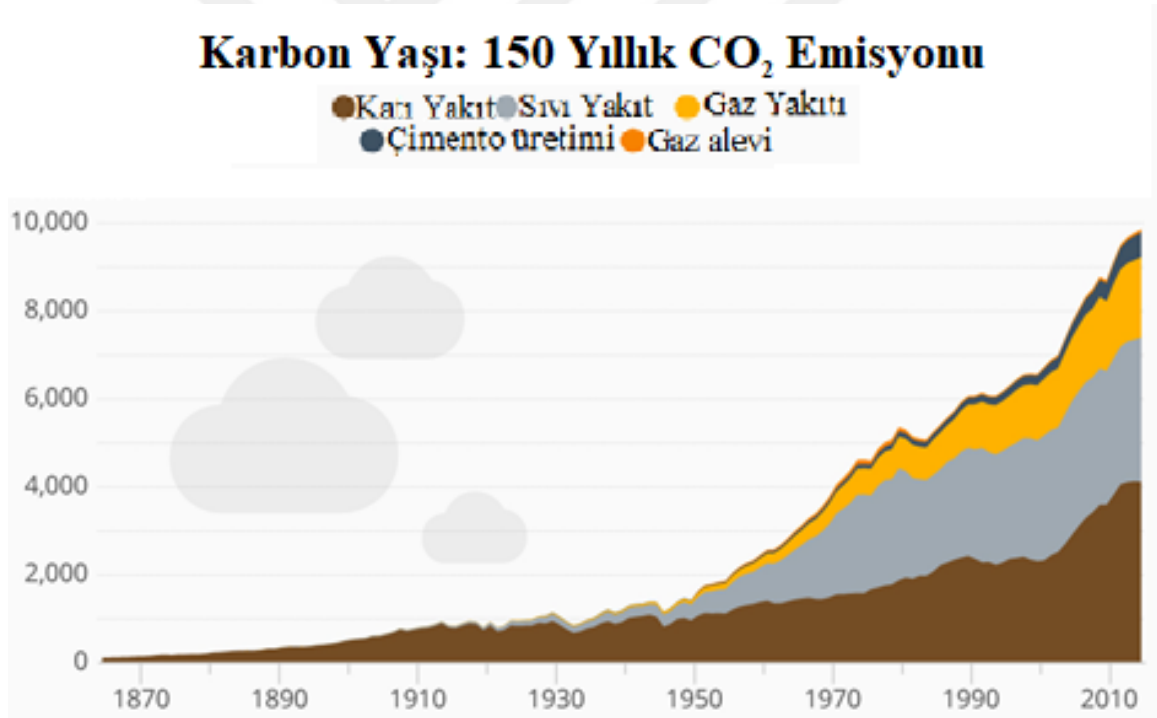
Tablo 1.1. Geopolimer malzemelerin uygulamaları.....	10
Tablo 1.2. Alkali aktivatör ve alüminosilikat kaynakları.....	12
Tablo 5.1. Kullanılan agregaya ait bazı fiziksel özellikler.....	38
Tablo 5.2. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri.....	39
Tablo 5.3. Uçucu küle ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler.....	39
Tablo 5.4. Kimyasal katkıya ait özellikler.....	40
Tablo 5.5. Deneyde kullanılan Sodyum Hidroksit analiz raporu.....	41
Tablo 5.6. Deneyde kullanılan Sodyum Silikat analiz raporu.....	41
Tablo 5.7. Geopolimer Beton Kirişler.....	56
Tablo 5.8. Geleneksel portland çimentolu kirişler.....	57
Tablo 6.1. Slump Deney Sonuçları Tablosu.....	58
Tablo 6.2. 80 Derece Kürlenmiş Betonlara Ait Basınç Dayanım Deney Sonuçları Tablosu....	59
Tablo 6.3. 100 Derece Kürlenmiş Betonlara Ait Basınç Dayanım Deney Sonuçları Tablosu..	59
Tablo 6.4. 120 Derece Kürlenmiş Betonlara Ait Basınç Dayanım Deney Sonuçları Tablosu..	60

KISALTMALAR

CO_2	: Karbondioksit
$^{\circ}C$	: Sıcaklık birimi (Derece)
Al	: Alüminyum
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
$Ca(OH)_2$	: Kalsiyum hidroksit
CaO	: Kalsiyum oksit
CEN	: Avrupa Standardizasyon Komitesi
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
Fe_2O_3	: Demir oksit
K	: Potasyum
KOH	: Potasyum hidroksit
MK	: Metakaolin
Ms	: Silikat Modülü (SiO_2/Na_2O)
Na_2CO_3	: Sodyum karbonat
Na_2O	: Sodyum oksit
Na_2SiO_3	: Sodyum silikat
Na_2SO_4	: Sodyum sülfat
NaCl	: Sodyum klorür
NaOH	: Sodyum hidroksit
N-A-S-H	: Alkalın alüminosilikat hidrat
$nSiO_2K_2O$	: Potasyum cam suyu (potasyum silikat)
O	: Oksijen
PÇ	: Portland Çimentosu
SD	: Silis dumanı
Si	: Silisyum
SiO_2	: Silisyum oksit
UK	: Uçucu kül
YFC	: Yüksek fırın cürufu
HA	: Hiper akışkanlaştırıcı

1. GİRİŞ

Çimento üretiminin atmosfere sera gazı etkisine yol açması ve karbon dioksit (CO_2) salınımının artmasına sebep olması nedeniyle, inşaat ve bina endüstrisinin tüm dünya genelindeki karbon dioksit (CO_2) emisyonunun yaklaşık %17'sini oluşturması sonucunda, beton üretiminde kullanılmakta olan portland çimentosunun kullanımını azaltmaya yönelik araştırmalar literatürde gün geçtikçe kendine daha fazla yer bulmaktadır. Bu kapsamda çimentoya alternatif olarak en verimli sonuçlar geopolimer beton üretimi alanında kaydedilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar doğrultusunda, geopolimer beton üretimi sırasında, geleneksel çimentolu beton üretimine kıyasla enerji kullanımının %80 oranında düşük kullanımı ve daha düşük seviyede karbon emisyonuna yol açtığı görülmektedir (Akbarnezhad vd., 2015).



Şekil 1.1 : Karbondioksit salınımının yıllara göre dağılımı (Statista, 2018)

Yapılan çalışmalar doğrultusunda geopolimer betonlardaki beton-donatı aderansı değerlerinin normal betonlarla kıyaslanabilir olduğu gözlemlenmiştir.

2. GEOPOLİMER BETON

Geopolimer beton, atık malzeme olarak kabul edilen endüstriyel üretim atıklarından bir veya birden fazlasını bileşen olarak kullanan ve üretim sürecinde çevreye zarar vermeyen yenilikçi beton olarak tanımlanmaktadır. Atık malzeme bertarafına katkı sunmaları ve çevre dostu olmalarının yanında geopolimer betonlar, yüksek performans özelliklerine ve uzun kullanım ömrüne sahip olmaları bir diğer özellikleri olarak kabul edilmektedir. Diğer bir deyişle geopolimer beton çevre dostu, yenilikçi ve geleneksel çimentolu betonlar ile kıyaslanabilecek performans özelliklerine sahip bir malzemedir (Suhendro, 2014).

Geopolimer bağlayıcılar, alkali aktivatörlerle reaksiyon sonucu yüksek alümino-silikat içeriğine sahip malzemelerin inorganik polimer karışımını oluşturduğu malzemelerdir. Yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK) ve silis dumanı gibi sanayi atıkları, düşük maliyetleri ve kolay temin edilebilirlikleri nedeniyle alümino-silikat kaynağı olarak sıkça kullanılmaktadır. Geopolimer bağlayıcılar, portland çimentolarına kıyasla CO_2 emisyonlarını yaklaşık %80 oranında azaltma yeteneğine sahiptirler. Bu özellik, diğer endüstriyel atıkların da kullanımıyla birlikte, geopolimer bağlayıcılarının çevresel etkilerini azaltmada yardımcı olur (Castel ve Foster, 2014).

2.1. Geopolimer Betonların Gelişimi ve Tarihçesi

İlk defa 1979 yılında Fransız malzeme bilimci olan Joseph Davidovits tarafından ortaya atılan geopolimer terimi, alüminosilikat esaslı malzemelerin alkali çözeltilerle tek başlarına veya kombinasyon halinde kullanılmasıyla SiO_4 ve AlO_4 bileşiklerinden oluşan “poli-sialat” (Si-O-Al-O) üç boyutlu polimerik zincir yapısına sahip homojen bir karışım olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1994).

Geopolimer teknolojisi aslen Avrupa’da ortaya çıkan yangın serisini takiben organik termoset polimerlere karşı yangına dayanıklı bir alternatif malzeme üretmek için geliştirilmiştir. Ürün bazlı olarak ilk çalışma ve örnekler yolcu gemilerinde yangın koruması için kaplamalar, karbon fiber kompozitler için yüksek sıcaklığa dayanıklı reçine, ahşap yapılarda termal koruma, ısıya dayanıklı yapışkan, ısıya dayanıklı refraktör olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak geopolimer teknolojisindeki ve bağlayıcısındaki birincil uygulamalar zamanla inşaat sektörü ile yer değiştirip geopolimer teknolojisinin en öncelikli kullanım disiplini haline gelmiştir. Bu durumun genel sebebinin ilk başlarda güvenilir, yüksek performanslı geopolimerlerin kömür

yakımından elde edilen uçucu külün alkali aktivasyonu üretilebileceğinin gözlemlenmesi olarak ifade edilmektedir (Provis ve Deventer, 2009)

Katıların alkali aktivasyonu ile elde edilen inşaat malzemelerinin sentezi, portland çimentosu içermeyen uygulamaların öncüsü olan ve genel olarak yüksek kalsiyumlu metalürjik bir bağlayıcı niteliğindeki cüruf ile ilk olarak 1940 yılında Purdon tarafından ispat edilmiştir. Cüruf kullanımı ile icra edilen alkali aktivasyondaki temel ayrımın üretilen kalsiyum-slikat hidrat jellerinin olduğu ifade edilmektedir. Alkali aktivasyonla üretilen genel olarak tek boyutlu zincirler sunarken, geopolimer jeller üç boyutlu alkali aluminoslikat iskelet yapısı sunmaktadır. Geopolimer teknolojisinde kalsiyumun oynadığı rol araştırma altında olup önem ifade etmektedir (Provis ve Deventer, 2009). Alkali-aktif cüruf çimentosu 1950’li yılların başlarında geniş ölçekli olarak inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamanın alışlagelmiş gerekliliği %1.5 NaCl ve %1.5 Sodyum Hidroksit’in (NaOH) fırın cürufuna eklenmesi olarak ortaya çıkmaktaydı (Davidovits, 2011).

1957 yılında Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği İnşaat Mühendisliği Kiev Enstitüsünde çalışan Victor Glukhovsky adında bir bilim insanı alkali-aktif edilmiş cüruf bağlayıcısındaki problemler üzerine çalışmalar yapmıştır. Glukhovsky bu araştırmalarıyla 1960’lı ve 1970’li yıllarda hem kalsiyum-slikat hidrat hem de kalsiyum ve sodyum alümino-slikat hidrat (zeolit)’in katılma ürünü olduğunu tespit ederek literatüre büyük bir katkı yapmıştır. Glukhovsky aynı zamanda kaya ve kil minerallerinin zeolit (alümino-slikat hidrat) formunu almak için alkali işlemleri esnasında reaksiyona girdiğini belirtmiştir. Glukhovsky bu teknoloji ile üretilen betonları ‘toprak slikat beton’ yada ‘zemin slikat beton’ bağlayıcıları ise ‘zemin, toprak çimentosu’ olarak adlandırmıştır (Davidovits, 2011)

1949 yılında Borchert ve Keidel 100 C° ’de konsantre edilmiş NaOH solüsyonu içerisinde kaolinit mineralini tepkimeye sokarak hidrosodalit (Na-PS) hazırlamışlardır. 1963 yılında Howell kaolinit minerali yerine kalsine edilmiş kaolinit, yani metakaolin kullanarak hidrosodalit formasyonu eldesinin önüne geçmiş ve A tipi Zeolit elde etmiştir. 1972 yılında Jean Paul Latapie ve Michel Davidovics adlarında bilim insanların oluşturduğu bir seramikçi grubu su geçirmez seramiklerin karolarının 450 C°’ den daha düşük sıcaklıklarda, başka bir deyişle pişirme olmadan üretilebileceğini doğrulamışlardır. Paris Doğa Tarihi Müzesi çalışanları Besson, Caillere ve Henin 1969 yılında 100 C°’de ve konsantre edilmiş NaOH

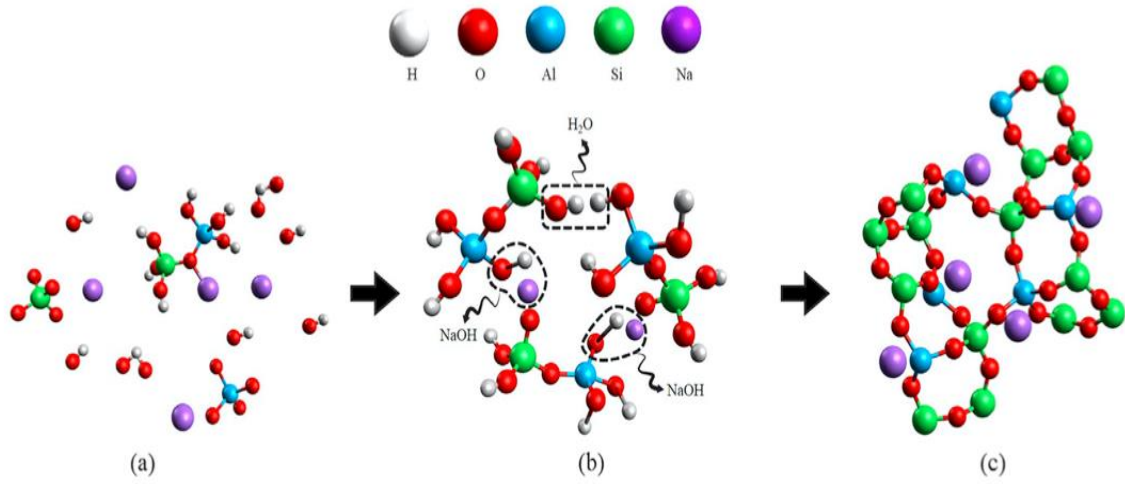
solüsyonunda çeşitli phyllosilikat'lardan (kaolinit, halosit vb.) hidrosodalit eldesi için çalışmalar yapmışlardır (Davidovits, 2011).

Geopolimer çalışmalarına dair en değerli ve özet mahiyetindeki çalışma Davidovits ve Orlinski tarafından 1988 düzenlenen geopolimer konferansı ve 1991 yılında Davidovits tarafından yayınlanan bir inceleme makalesi olarak gösterilmektedir. Bu çalışmadan kısa bir süre sonra Palomo ve Glasser 1992 yılında metakaolin esaslı geopolimerler hakkında detaylı bir bilimsel çalışma yayınlamışlardır. Rahier ve diğerleri de bilahare 1996 yılında üç parçadan oluşan metakaolin esaslı geopolimerler hakkında yayın yapmışlardır. Bu çalışmalar birbirini takip eden on yıllık süreçlerde temel olarak metakaolin esaslı geopolimerleri daha geniş ve derin anlamak adına farklı gruplar tarafından İspanya'da Palomo (1999), Granizo ve Blanco (1998), Yeni Zelanda'da Barbosa (2000), MacKenzie (2003), Almanya'da Kaps ve Buchwald (2002,2006) ve Avustralya'da Yip ve Van Deventer (2003), Duxton (2005) gibi birçok araştırmacı tarafından yürütülmüştür. 1999 ve 2005 yılında Davidovits tarafından düzenlenen geopolimer konferansları geopolimerdeki hem teknik gelişmeleri hem de küresel büyümeler hakkında değerli bilgiler elde edinimini sağlamıştır (Provis ve Deventer, 2009).

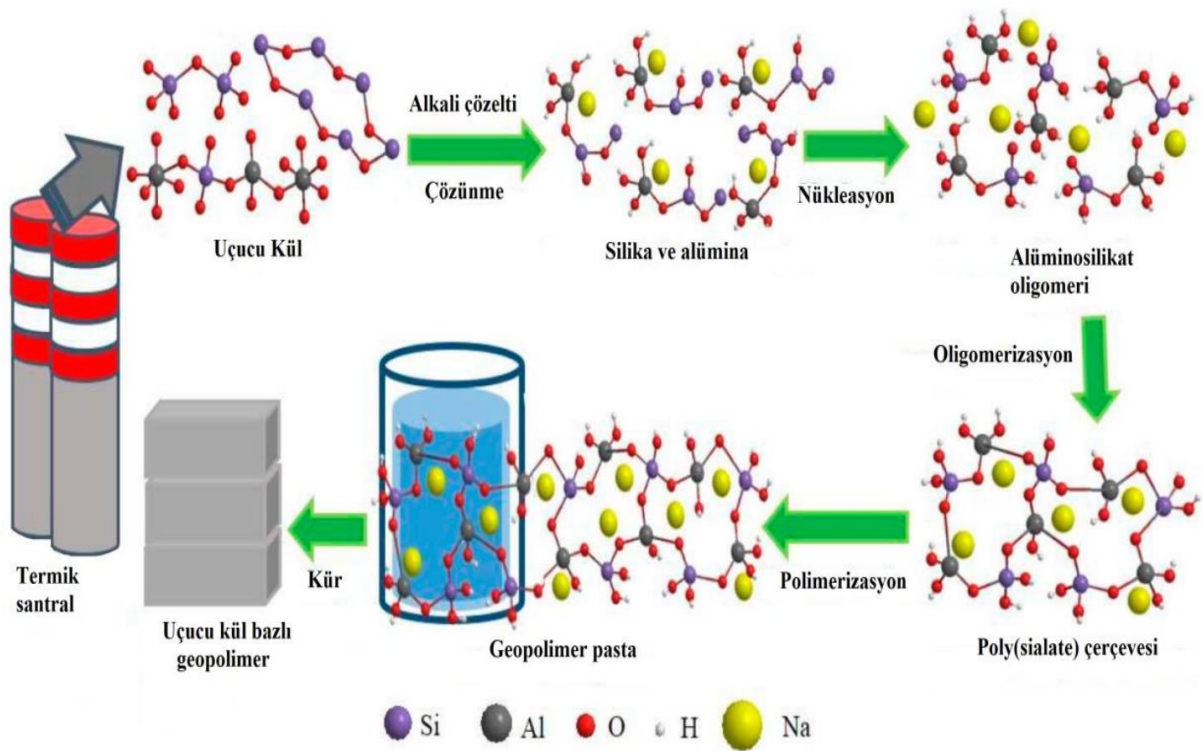
2.2. Geopolimerlerin Kimyası

Geopolimerler amorf yapıdan SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral kombinasyonu ile oluşturulan yarı kristalin alüminosilikat çerçeve yapısıdır. Geopolimerizasyonda kimyasal yapı tetrahedral tabakadaki alüminyumun silisyuma ikamesi ile ve Na^+ iyonlarını varlığı ile elektriksel nötrlüğünü korumaktadır (Sing ve Middendorf, 2020).

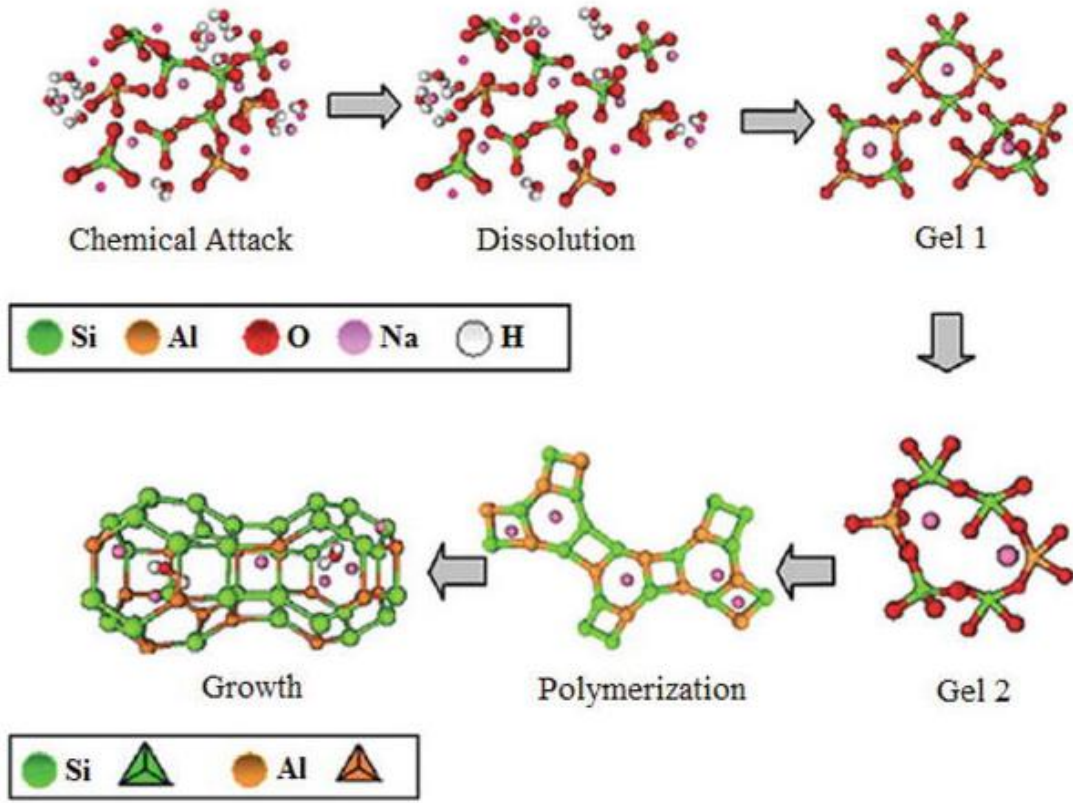
Geopolimerizasyon işlemi çözünme, yeniden düzenlenme ya da organize olma, yoğunlaşma ve polimerizasyon süreçlerini içermektedir. Çözünme ve yeniden örgütlenme birçok oligomer formu oluşturmaktadır. Oligomerler bağlanarak büyük polimer zincirlerini oluştururlar. Oligomerler kimyasal süreç içerisinde bağlandığı esnada OH grupları ile bir oksijen atomunu paylaşırlar ve böylece suyu serbest bırakmaktadırlar. Geopolimerizasyon şeması Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3'te gösterilmektedir (Sing ve Middendorf, 2020).



Şekil 2.1 : Çözünmüş alüminosilikatların yeniden örgütlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşması ve jel formasyonu başlangıcı, (c) polimerizasyon (Sing ve Middendorf, 2020)



Şekil 2.2 : Geopolimerizasyon süreci (Singh, 2018)

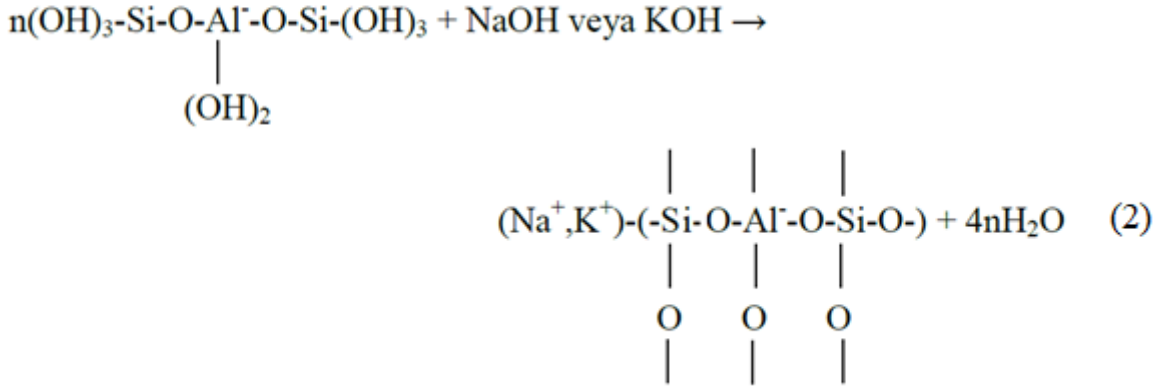
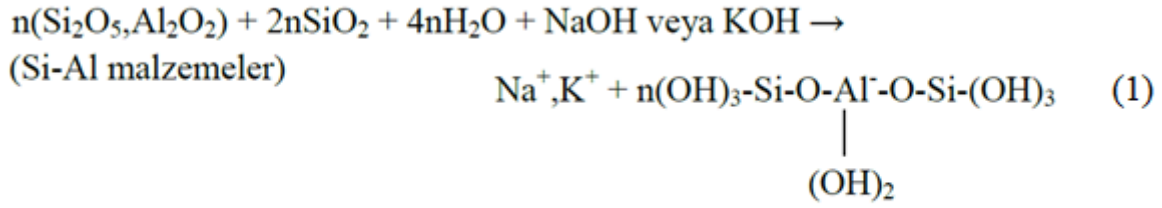


Şekil 2.3 : Geopolimerizasyon sürecinin bir diğer gösterimi (Singh, 2018).

SiO_2 ve Al_2O_3 geopolimer reaksiyonlarına uygun bileşiklerdir. Aluminosilikat oksitlerin hidroksit tuzlarda çözünmesiyle birlikte geopolimer reaksiyon işlemleri başlamaktadır. Kimyasal tepkimelerde yüzey alanının reaksiyon hızına etkisi düşünüldüğünde geopolimerizasyon tepkimelerinde de kullanılan malzemenin yüzey alanının fazla olması, incelik modülünün fazla olması, Si ve Al içeren maddelerin çözünülebilirlik derecelerini ve genel olarak da reaksiyonu etkilemektedir (Van Jaarsveld, vd., 1997).

Ham maddeler üzerine uygulanan kür sıcaklığı ve süresi alüminosilikat jel solüsyon oluşum proseslerini etkilemektedir (Zeybek, 2009).

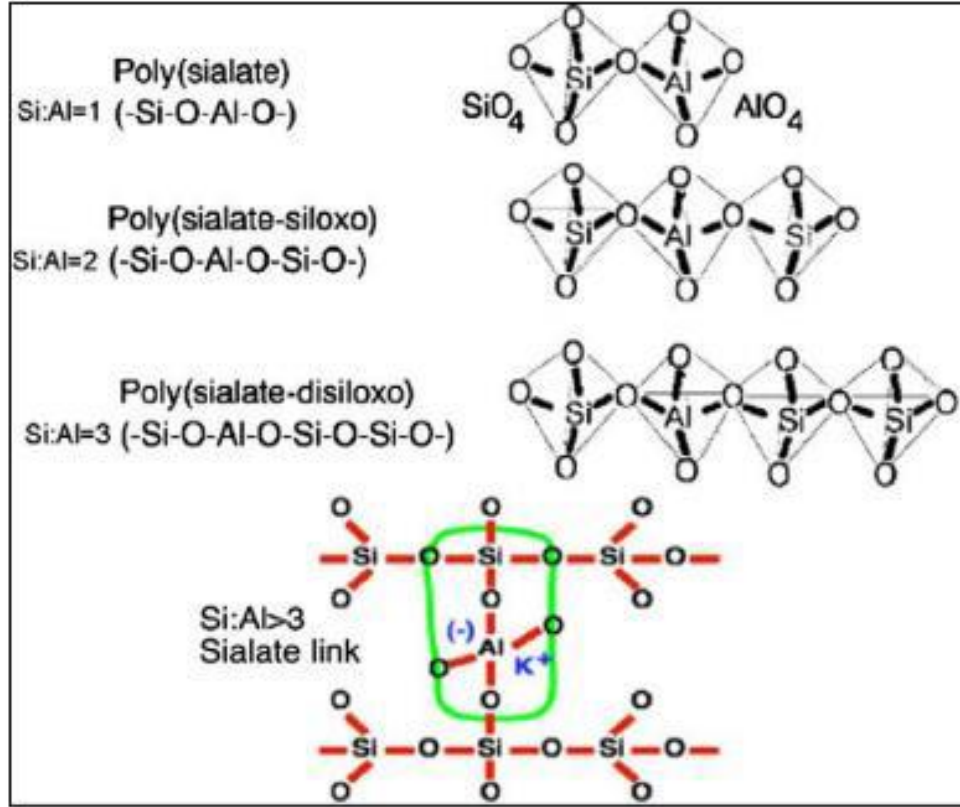
Geopolimerizasyon oluşum sürecinde farklı alüminasilikat oksitleri ile alkalisilikatlar arasında hızlıca kimyasal tepkime gerçekleşir ve Si-O-Al-O polimer bağı meydana gelir. Aşağıda verilen Denklem 1 ve 2 geopolimer malzeme oluşum şemasını daha iyi açıklayabilir. (Davidovits, 1991; Xu ve Van Deventer, 2000).



Denklem 1 ve 2’de görüldüğü üzere Si-Al barındırın bir malzeme geopolimerizasyonda hammadde olarak kullanılabilir. Alüminyum ve silisin çözünmesi için herhangi bir alkali metal tuza ve/veya hidroksite gereksinim duyulur (Xu ve Van Deventer, 2000).

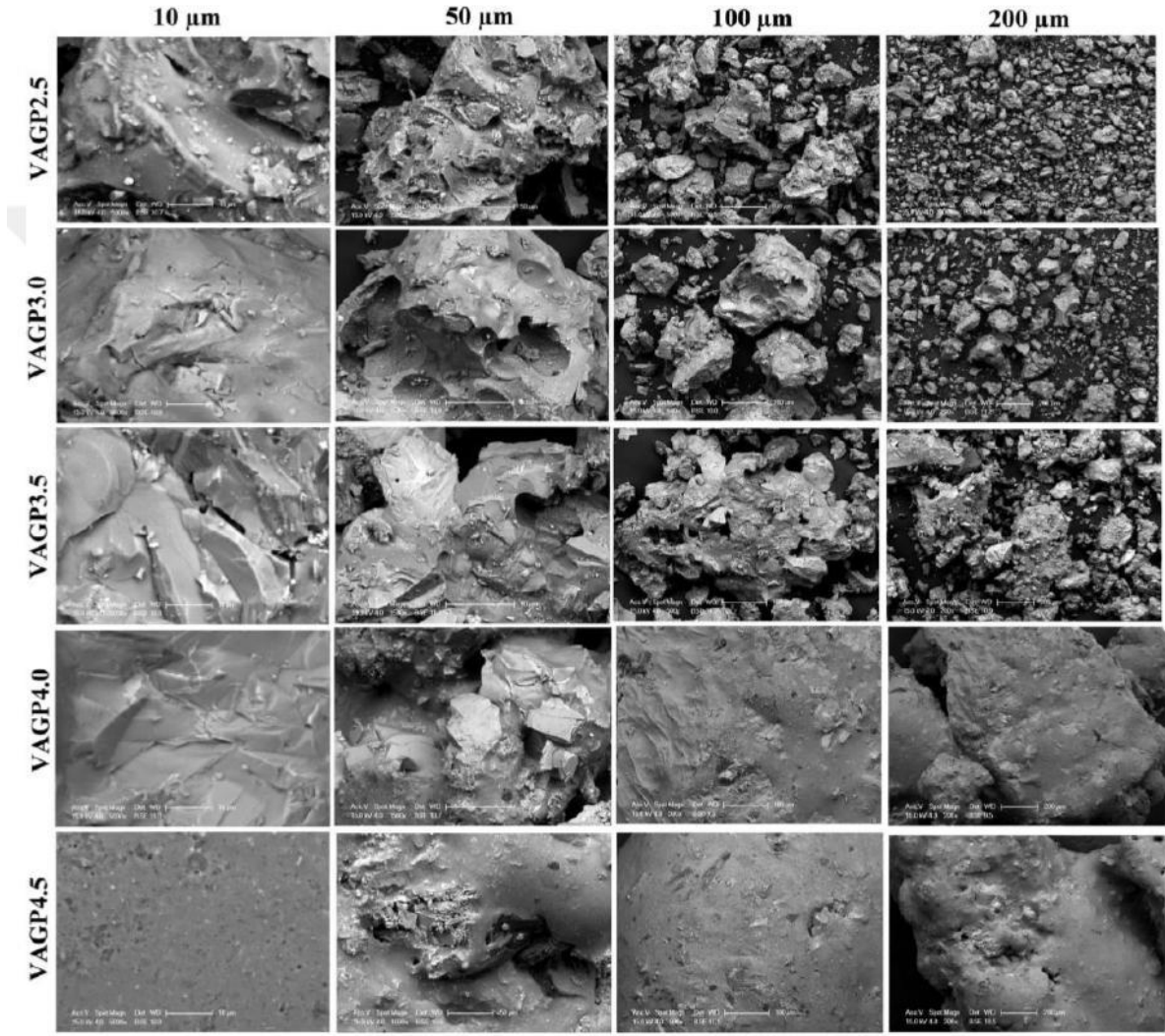
Denklem 2’de görüldüğü üzere kimyasal tepkime sırasında serbest halde bulunan su geopolimer dizeyinden (matrisinden) ayrılmaktadır. Geopolimerlerin meydana gelmesinde suyun görevini önemsemek gereklidir. Geopolimerde bulunan su, kuruma ve kür süreçlerinde geopolimer dizeyinden dışarı atılmakta ve geopolimer dizeyinde nano boşluklar bırakmaktadır. Geopolimerlerin performanslarının geliştirilmesinde ve geçirimsiz beton tasarımlarında oldukça yararlıdır. Geopolimer karışım tasarımlarında suyun kimyasal tepkime sırasında hiçbir rolü bulunmamakla birlikte sadece işlenebilirliğe etkisi vardır ve bu normal Portland çimentosu karışımlarında bulunan suyun kimyasal tepkimesi ve hidrasyonundaki rolünün tam zıttı bir işlemdir (Hardijito ve Rangan, 2005; Rangan, 2008). Karışımındaki suyun ortamdan ayrılması geopolimerlere ısı yalıtımı, yangın dayanımı ve hafiflik gibi pozitif özellikler kazandırmaktadır (Andini vd., 2008). Geopolimerler, birbirlerine uzay ağı veya zincir olarak bağlanmış kovalent bağlı moleküllerdir. Geopolimerlerin üç farklı amorf-yarı kristal üç boyutlu alüminosilikat yapı olduğunu ifade etmiştir (Joseph, 2015). Kimyasal grupları ve moleküler birimleri aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Şekil 2.4).

- Poli (sialat) tipi (Si-O-Al-O-)
- Poli (sialat-silokso) tipi (Si-O-Al-O-Si-O-)
- Poli (sialat-disilokso) tipi (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



Şekil 2.4 : Oksijen atomunun Si^{+4} ve Al^{+3} ile koordinasyon mekanizması (Joseph, 2015).

Araştırmacılar geopolimer kimyasını daha iyi anlayabilmek için iç yapı analizleri yapmışlardır. Volkanik külden üretilen geopolimerlerin SEM görüntüleri Şekil 2.5’de verilmiştir. Si/Al ve Na/Al oranları arttıkça numunelerin daha kompakt bir yapıda olduğu görülmektedir. Bu yüzden geopolimerizasyonda kullanılan volkanik hammaddesinin Si/Al ve Na/Al oranları arttıkça numunelerin daha iyi sonuçlar gösterdiği anlaşılmaktadır (Soyer-Uzun ve Çetintaş, 2018).



Şekil 2.5 : SEM görüntüleri (Soyer-Uzun ve Çetintaş, 2018).

2.3. Geopolimerlerin Çevresel Etkileri

Beton endüstrisinin, küresel ısınmaya katkıda bulunan ana faktörlerden biri olduğu düşünülmektedir. Bu durum, bağlayıcı olarak portland çimentosunun kullanımıyla ilişkilidir. 2014 yılı üretim verilerine göre, dünya genelinde meydana gelen CO_2 gazı emisyonlarının yaklaşık olarak %8'inden çimento endüstrisi ve çimento üretimi kaynaklıdır (Olivier vd., 2015).

Sürdürülebilir bir şekilde üretilebilecek ikame bağlayıcı arayışı, Portland çimentosu imalatında sera gazı emisyonlarının yanı sıra enerji ve kaynak kullanımıyla ilgili endişelerden kaynaklanmıştır. Geopolimer bağlayıcılar, çevre dostu, yapı ve inşaat malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynama ve sürdürülebilir alternatif bağlayıcı olma potansiyeline sahip yeni tasarlanmış mühendislik malzemeleri olarak ön plana çıkmaya başlamışlardır (Duxon vd., 2007).

Geopolimer beton üretiminde kaynak malzeme olarak yüksek alüminosilikat içeriğine sahip yüksek fırın cürufu, uçucu kül, pirinç kabuğu külü ve doğal puzolan gibi tarımsal veya endüstriyel maddeler kullanılmaktadır. Betonda yapısal bağlayıcıların birincil bileşeni olarak atık ve yan ürün materyallerinin kullanımı CO_2 emisyonlarını ve çevre üzerindeki kirlilik yükünü azaltmaktadır (Farhan vd., 2020; Zakka vd., 2021).

2.4. Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Davidovits (1999), geopolimer bağlayıcıların potansiyel uygulama alanlarını içeriklerindeki Si/Al oranına bağlı olarak Tablo 2.1.'de görüldüğü gibi önermiştir (Hlavacek, 2014).

Tablo 2.1. Geopolimer malzemelerin uygulamaları (Hlavacek, 2014).

Si/Al Oranı	Uygulama Alanı
1	Seramik,tuğla,yangın barınakları
2	Beton,Düşük CO_2 salınımlı çimento,radyoaktif ve toksik atık kapsülleme
3	Döküm ekipmanları, ısıya dayanıklı kompozit malzemeler, cam elyafı kompozitler
>3	Sızdırmazlık özelliğine sahip endüstriyel malzemeler
$20 < Si/Al < 35$	Yangına ve ısıya dayanıklı fiber kompozit üretimi

İnsanlık tarihinde önemli bir yeri olan Roma amfi tiyatrosu ve Mısır piramitleri gibi uzun geçmişe sahip tarihi yapıların içyapı incelemeleri sonucu, geopolimerizasyon sonucu oluşan beton kalıntılarına rastlanmıştır (Li vd., 2004).

Amerika'da 1984 yılında gerçekleştirilen bir havaalanı betonu dökümünde, geopolimer betonun kullanılarak 6 saat içinde uçakların iniş yapabileceği sertlikte beton ve dayanım elde edildiğini göstermektedir. 28 gün sonundaki betonun dayanımı ise yaklaşık olarak 80 MPa olarak ölçülmüştür (Xu ve Deventer 2000).

2.5. Geopolimer Betonların Normal Betonlara Göre Avantajları

Geopolimer betonların normal betonla karşılaştırıldığında bir çok avantaja sahiptir. Geopolimer betonların sağladığı bazı avantajlar şu şekildedir;

- Hammadde kaynaklarının bolluğu: Geopolimer betonun üretiminde, puzolanik bileşikler veya alkali çözelti içinde çözülebilen silikatlar veya alüminli silikatlar gibi

herhangi bir kaynak yeterlidir. Bu kaynaklar, atık maddelerden elde edilebilir ve kullanılarak üretilirler.

- Çevreci yaklaşım ve düşük enerji tüketimi: Geleneksel çimentolu betonlara kıyasla geopolimer bağlayıcılı betonlar, daha az enerji tüketirler. Normal betonlarla karşılaştırıldığında, %60 daha az enerji kullanırlar. Bunun yanı sıra, atmosfere karbondioksit (CO_2) salınımı konusunda geleneksel portland çimentolu betonlara göre daha az salınım gerçekleştirirler.
- Hazırlama tekniğinin basit ve uygulanabilir olması: Geopolimer betonlar, alüminosilikat reaktif malzemeleri ve güçlü alkali çözeltilerini karıştırarak kolayca üretilirler.
- Hacim stabilitesi: Geopolimer betonlar, geleneksel portland çimentolu betonlara göre %80 daha az büzülme gösterirler.
- Dayanımın kısa sürede kazanımı: Isıl kür yöntemi ile üretilen geopolimer betonların nihai dayanıma ulaşma süresi yaklaşık olarak %70 oranında azaltılabilir.
- Mükemmel durabilitesi: Geopolimer betonların en önemli avantajlarından biri, normal betonlara göre olumsuz çevre koşullarına karşı daha uzun süre dayanabilmesidir (Li, Ding, & Zhang, 2004)

2.6. Geopolimer Beton Bileşenleri

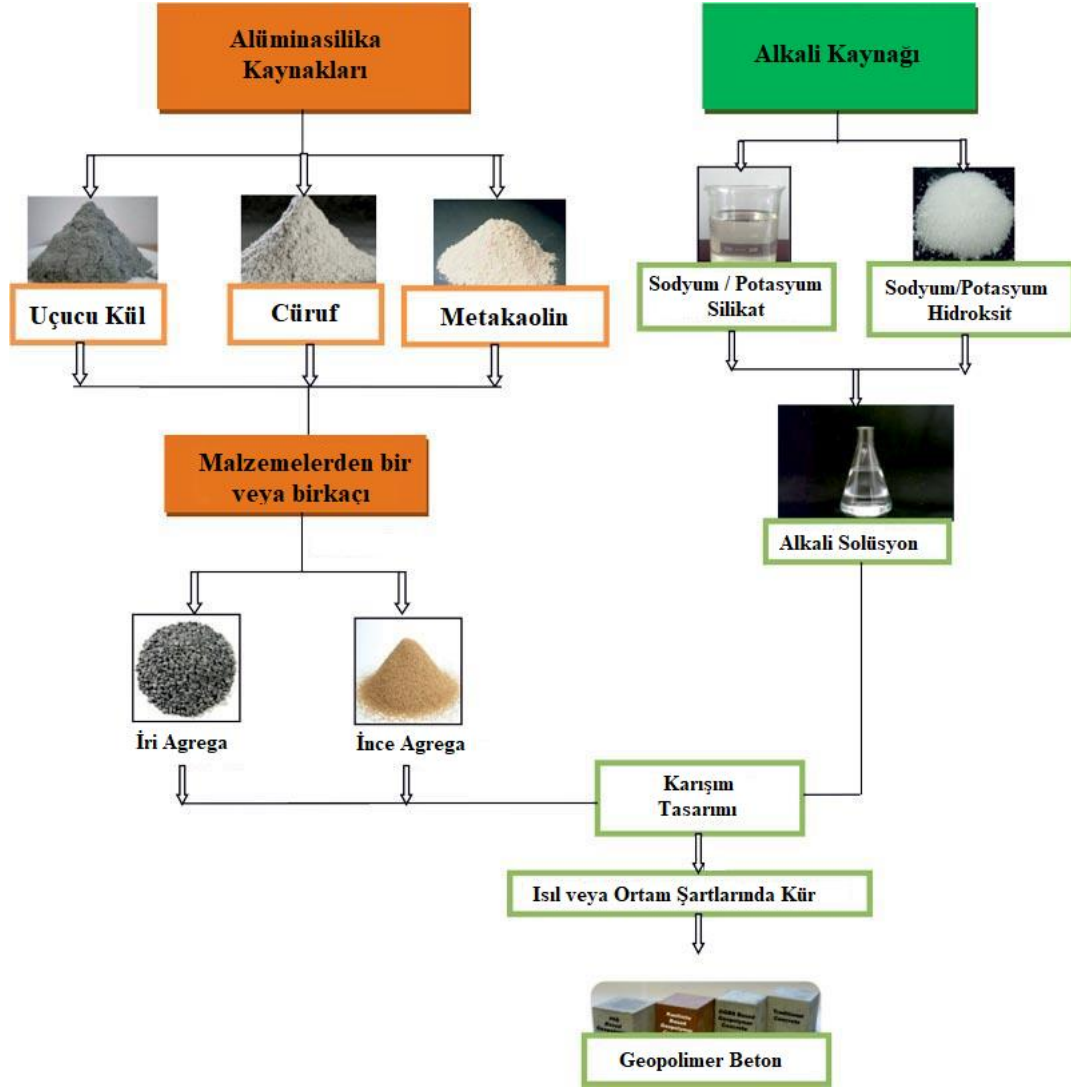
Geopolimer sentezi için temel olarak iki bileşen grubu söz konusudur (Sing & Middendorf, 2020; Amran vd., 2020). Bunlar: alkali aktivatör ve alüminosilikat kaynağıdır. Sentez için gerekli bu iki bileşen grubuna ait olan bazı malzemeler Tablo 2.2’de gösterilmektedir.

Tablo 2.2. Alkali aktivatör ve alüminosilikat kaynakları (Sing & Middendorf, 2020; Amran vd., 2020).

Alüminosilikat Kaynağı	Alkali Aktivatörler
Uçucu kül	$NaOH$
Yüksek fırın cürufu	Na_2SiO_3
Metakaolin	KOH
Kırmızı Çamur	K_2SiO_3
Silis Dumanı	$Ca(OH)_2$
Palm yağı külü	Diğer silikatlar
Pirinç çeltiği külü	

Geopolimerler inorganik polimerlerdir. Geopolimer sentezinde iki çeşit materyal: alüminosilikatlar ve Alkali aktivatörler'ler kullanılmaktadır. Geopolimer dizilimi yada formasyonu alüminosilikat bağlayıcılarının (uçucu kül, cüruf vb.) konsantre sıvı alkali solüsyonları (alkali aktivatörler) ile reaksiyona girmesi sonucunda gerçekleşmektedir. Geopolimer prosesi silikat ve alüminat'ların çözünmesini ve polikondenzasyon reaksiyonlarını içermektedir (Sing ve Middendorf, 2020).

Geopolimer beton bileşenleri şekil 2.6. de aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Geopolimer beton bileşenleri

2.6.1. Alkali Aktivatörler

Geopolimer betonların üretiminde, genellikle sodyum hidroksit (SH) ve sodyum silikat (SS) karışımlarından elde edilen alkali aktivatörler veya likit potasyum hidroksit ve potasyum silikat karışımları gibi aktivatörler tercih edilmektedir. Bu aktivatörler, geopolimer betonların daha iyi dayanım ve dayanıklılık özellikleri kazanmasına yardımcı olur. (Lee ve Van Deventer, 2007).

Potasyum hidroksit, sodyum hidroksite göre daha yüksek maliyetli olması ve tedarikinin daha zor oluşundan kaynaklı olarak, literatürdeki çalışmaların çoğunda aktivatör çözeltisi olarak Na_2SiO_3 ve sodyum hidroksit karışımı ile üretilmiş olan alkali aktivatörlerin kullanıldığı görülmüştür.

2.6.2. Sodyum Hidroksit

En geniş ve yaygın şekilde kullanılan alkali hidroksit aktivatörleri KOH (potasyum hidroksit) ve NaOH (sodyum hidroksit)' tir. Diğer elde hazır tedarik edilebilen alkali hidroksitler LiOH (Lityum Hidroksit), RbOH (Rubidyum hidroksit) ve CsOH (sezyum hidroksit) gibi geopolimer üretiminde nadir kullanılan hidroksit aktivatörleridir (Weerdt, 2011).

Sodyum, potasyumdan daha ucuz bir elementtir. Ancak sodyum hidroksit, potasyum hidroksitle kıyaslandığında birtakım dezavantajlara sahiptir. Sodyum hidroksit sıcaklığın düşmesiyle çözünürlük ya da erime özelliğinde dramatik bir düşüş göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda sodyum hidroksit kullanımı solüsyonda çökelmelere sebebiyet vermektedir. Potasyum hidroksitin çözünürlüğü bahsedilen sıcaklıklara bağımlılık göstermemektedir. Sodyum hidroksit, potasyum hidroksit solüsyonuna kıyasla benzer konsantrasyonlarda daha viskoz olma eğilimindedir. Bu durum taze karışımda reolojik özellikleri bozulmasına sebep olmaktadır (Weerdt, 2011).

Hem potasyum hidroksit hem sodyum hidroksit kristalin zeolit yapısının oluşumuna sebebiyet vermektedir. Kristalizasyon en hızlı sodyum hidroksit kullanımında ortaya çıkmaktadır. Alkali hidroksit aktivasyonun yüksek aşındırıcı doğası ve çözünmesi esnasında yüksek sıcaklık salınımından dolayı (10 molar sodyum hidroksit solüsyonu sıcaklığı 90°C'ye kadar çıkmaktadır) kullanıcıya dost olmadığının dikkate alınması gerektiği not edilmelidir. Alkali hidroksit solüsyonunda bir diğer dezavantaj artan molarite ile artan viskozite olarak gösterilmektedir (Weerdt, 2011).

2.6.3. Sodyum Silikat

Sodyum silikat (SS), $Na_2O \cdot nSiO_2$ kimyasal formülüne sahip bileşiklere verilen genel addır. "n" oranı teorik olarak herhangi bir sayı olabilir ancak ticari sıvı olarak kullanılan SS üretiminde kullanılan değerler genellikle 1.60 ila 3.85 arasındadır. Bu değer aralığının dışındaki sıvı haldeki SS bileşikleri, stabilitesi sınırlı olduğu için pratik bir kullanıma uygun değildirler. SS, başlangıçta sodyum karbonat ve kumun 1350-1450 °C'de eritilmesiyle üretilen bir cam malzemesi olan SS camından elde edilir. Sonrasında, uygun sıcaklık ve buhar basıncı altında 140-160 °C'de otoklavda çözülür. SS, kağıt ürünleri, sabun, ateşe dayanıklı (refrakter) malzeme üretimi ve tekstil gibi endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. SS, yapı malzemeleri alanında "erken sertleştirici" ve "kendi kendine iyileşme mekanizması sağlayıcı"

olarak kullanılabilir. (Mostavi vd., 2015). Sodyum silikatın bu özellikleri sayesinde, püskürtme betonlarında (shotcrete) kullanılması yaygın bir uygulamadır (Shi vd., 2003).

2.7. Geopolimer Beton Tasarım İlkeleri

Geopolimer betonların basınç dayanımı, betonun önemli bir karakteristiğidir. Bu tür betonların basınç dayanımı, reaksiyon ürünlerinin miktarındaki artışla doğru orantılı olarak artış gösterir. Geopolimer bağlayıcıların oluşturduğu reaksiyonlar, sıcaklıkla birlikte artış gösterir. Bu sebeple, yüksek sıcaklıkta kür edilen farklı geopolimer betonlarında basınç dayanımlarında artışlar gözlenmektedir (Bakharev, 2005).

Geopolimer bağlayıcılı betonlarda kullanılan alüminosilikat kaynaklarının parçacık boyutları, basınç dayanımını etkileyen bir başka faktördür. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi bağlayıcı olarak kullanılan hammadde malzemeler, öğütüldüğünde daha ince taneli bir form kazanır ve yüzey alanları artar. Artan yüzey alanına sahip olan parçacıkların reaksiyon hızı da artar ve bu durum, geopolimer betonun basınç dayanımının artmasına neden olur (He, Jie, Zhang, Yu, ve Zhang, 2013).

Alkalilerle aktive edilebilen malzemelerle ilgili standart oluşturma çabaları, inşaat malzemeleri endüstrisindeki genel standart geliştirme hızı ile karşılaştırıldığında, dünya çapında birçok farklı bölgede nispeten daha hızlı ilerlemektedir (Provis 2018).

2.7.1. Sodyum Hidroksit (NaOH) Çözelti Konsantrasyonu

Alkali aktivatör (AA) çözeltisi, Si ve Al oksitlerinin toz bağlayıcıdan çözünmesinde önemli bir role sahiptir. Geopolimer bağlayıcıların yeterli mekanik dayanıma ulaşması açısından alkali aktivatör konsantrasyonu, alüminosilikat kaynağı olan toz bağlayıcılardan gerekli Si ve Al oksitlerinin çözülmesi kapsamında çok önemlidir. Bilindiği gibi, PC (portland çimentosu), su ile karıştırıldığında, her bileşeni ayrı ayrı suyla reaksiyona girerek hidrasyon ürünleri oluşturur. GP üretiminde kullanılan toz bağlayıcılar da alkali aktivatör çözeltisi ile birleştiğinde, toz bağlayıcı taneciklerinin yüzeyinden itibaren Si, Al ve diğer ikincil iyonlar çözünmeye başlar (Rattanasak ve Chindaprasirt 2009). Toz bağlayıcıdaki çözülme miktarı, NaOH çözeltisinin molaritesinin artmasıyla artar (Haddad ve Alshbuol 2016). 10 M ve 12 M NaOH konsantrasyonlarının optimum olduğunu ifade eden çalışmaların sonuçları daha ağırlıklıdır (Puertas vd., 2000).

NaOH konsantrasyonundaki artışın, GP bağlayıcılar üzerinde önemli etkilerinden biri, taze GP hamuru, harç ve beton karışımlarının viskozitesinin artmasıdır. Bu da işlenebilirliğin azalmasına neden olur. (Chindaprasirt vd., 2007). Bu sebeple, benzer mekanik özelliklere sahip olduğu durumlarda, daha düşük NaOH molaritesinin tercih edilmesi daha uygun bir seçim olacaktır.

2.7.2. Sodyum Silikat – Sodyum Hidroksit Oranı

Daha önce yapılan araştırmalar, geopolimer harçlarının basınç dayanımını etkileyen faktörlerin $Na_2SiO_3/NaOH$ oranı ve NaOH molaritesi olduğunu göstermiştir (Mustafa Al Bakri vd., 2012). Sodyum silikatın kullanımının daha fazla silika jel üretimine ve dolayısıyla yüksek mukavemet katkısına yol açması bu artış durumu ile ilişkilendirilebilir.

Thokchom vd., sülfürik asitteki geopolimerlerin dayanıklılığını araştırırken sodyum oksit içeriğinin önemini vurgulamaktadırlar. Yüksek alkali içeriğine sahip örnekler, düşük alkali içeriğine sahip örneklerden daha iyi basınç dayanımı gösterdi. Bu nedenle, silikat içeriğinin yüksek olması, mekanik dayanımın artmasına katkıda bulunur.

2.7.3. Alkali Aktivatör – Toz Bağlayıcı Oranı

Sodyum hidroksit ve sodyum silikatın bir arada kullanımı, geopolimer betonun mekanik performansında bir artışa neden olur. Betonun basınç dayanımı kadar kimyasal ve fiziksel etkilere karşı davranışı ve hizmet ömrü açısından da alkali aktivatörler etkilidir. Bu nedenle, geopolimer bağlayıcı betonlarda kullanılan alkali aktivatörün oranını temsil eden sodyum silikat ve sodyum hidroksit arasındaki oran iyi sonuç verebilecek şekilde belirlenmelidir. Bu konuda literatürde yer alan bir çalışmada, SS/SH oranının geopolimer betonun erken basınç dayanımı ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiği rapor edilmiştir. Başka bir deyişle, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ile geopolimer betonun basınç dayanımı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır (Hardjito, Wallah, Sumajouw, & Rangan, 2004).

Alkali Aktivatör/Toz Bağlayıcı oranının artması, karışımdaki Alkali Aktivatör miktarının artmasına neden olur. Bu da sertleşmiş hamurda reaksiyona girmeyen alkali miktarının artmasına sebep olur. Reaksiyona girmeyen alkali miktarının artması ise çiçeklenmenin miktarını artırır (Vafaei ve Allahverdi, 2017).

2.7.4. Su – Geopolimer Harç Oranı

Geopolimer betonlarda su/geopolimer katı madde oranı, Portland çimentolu betonda su/çimento oranının etkilerine benzer bir şekilde betonun basınç mukavemetini azaltır. Bu nedenle, su/geopolimer katı madde oranının doğru şekilde belirlenmesi, betonun dayanıklılığı için önemlidir (Xiem, Nguyen ve Thang, 2016).

2.7.5. SiO_2/Na_2O Oranı

SiO_2/Na_2O oranı, geopolimer bağlayıcı betonların basınç dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. SiO_2/Na_2O 'nun çözeltideki oranı, alkali oranının yüksek polimerizasyon derecesine sahip olduğu çözeltilerde etkilidir. Bu da sentezlenen polimerizasyon ürünleri ve dolayısı ile geopolimerlerin kazanmış oldukları basınç dayanımlarını yüksek oranda etkiler (Draft, 1985).

2.8. Geopolimer Betonlarda Kürlenme

Geopolimer betonların kürü, geleneksel Portland çimentolu betonlardan farklıdır. Geopolimer betonlar su içinde değil, belirli bir sıcaklıkta açık havada veya buhar altında kür edilir. Bu ısıl kür işlemi, geopolimer yapı içerisinde gerçekleşen polimerizasyon olarak adlandırılan polimerleşme tepkimelerinin jel üretimi açısından etkili bir şekilde gerçekleşmesi için genellikle gereklidir (Jindal, 2019).

Oda sıcaklığında kür uygulaması, geopolimer bağlayıcı betonlarda genellikle yeterli dayanımı kazanma açısından yeterli olmamasına neden olur. Bu nedenle, çoğu çalışmada, sıcaklık kontrollü fırınlarda sıcak küre tabi tutulmaları gerekir. Geopolimer betonlarda dayanım kazanma açısından uygulanan kür işlemleri ile ilgili yapılan çalışmalarda, kür koşulları genellikle, oda sıcaklığı veya 40-100°C aralığında sıcaklık değerleri kullanılarak gerçekleştirilir.

2.8.1. Kür Şekli

Portland çimentosu esaslı geleneksel betonların karakteristik basınç dayanımları, su içerisinde belirli bir süre kür edilerek dayanım kazandırma yöntemi ile belirlenmektedir (TS-EN-12390-2 2002). Su içinde kür yöntemi, PC esaslı betonlar için uygun bir yöntem olmakla birlikte, GP

esaslı betonlar için farklı sonuçlar verebilir. GP numunelerinde, su içinde bekletme yöntemi AA'nın süzülmesine neden olabilir ve dayanım gelişimi yetersiz kalabilir. Açıkta kür etme yöntemi ise yüzey çatlaklarına neden olabilir. Ayrıca bu yöntemin, yalnızca sodyum hidroksit ile aktive edilen GP betonlarda kullanılması önerilir (Kovalchuk vd., 2007).

Birçok çalışma, GP betonlar için en uygun kür yönteminin numune yüzeylerinin tamamen kapatılmasıyla veya ısıl kür uygulanmasıyla gerçekleştirilen yöntemler olduğunu göstermektedir. Bu yöntemlerle kür edilen geopolimerler daha yoğun yapıdadır ve daha yüksek dayanıma sahiptirler (Kovalchuk vd., 2007; Provis, 2018).

2.8.2. Kür Sıcaklığı

Geopolimer karışımlarının prizlenmesi ve sertleşmesi süreçlerinde kür işlemleri, sıcaklık, nem, hava sirkülasyonu gibi faktörlerin uygulanmasını içerir. Bu parametrelerin, Geopolimer malzemelerin özelliklerini büyük ölçüde etkilediği bilinmektedir. Birçok araştırmacı, genellikle 20°C ile 100°C arasındaki sıcaklık aralığında, değişen sürelerle (birkaç saat ile birkaç gün arası) uygulanan kür işleminin Geopolimerizasyon sürecine olumlu etkiler sağladığını belirtmiştir. Yapılan araştırmalar, kür sıcaklığının arttıkça basınç dayanımının da arttığını göstermektedir. Ancak, belli bir sıcaklık eşiğinin üzerinde uygulanan kürün mukavemete katkısı olmadığı tespit edilmiştir. Metakaolin temelli Geopolimerler üzerinde yapılan birçok çalışma, 60°C - 70°C sıcaklığın üzerindeki kür işlemlerinin uzun vadeli dayanımı olumsuz etkileyebileceğini göstermiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda uygulanan kür işlemleri, reaktiviteyi artırarak hızlı prizlenmeye yol açabilir (Bing-Hui vd., 2014). Bu eşik sıcaklığı, bazı uçucu kül ve volkanik kül esaslı Geopolimerlerde daha yüksek olabilir, ancak genellikle 100°C'yi aşmamaktadır (Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2003). Bu bulgular, Geopolimer malzemelerin özelliklerini optimize etmek ve istenen sonuçları elde etmek için kür işlemlerinin dikkatli bir şekilde ayarlanması gerektiğini vurgulamaktadır.

2.8.3. Kür Süresi

Birçok çalışma, yüksek kür sıcaklıklarında kür süresinin uzamasının, suyun bir kısmının buharlaşması sonucu mikro-boşlukların oluşmasına ve bu da ileriki yaşlarda dayanım kayıplarına neden olabildiğini göstermektedir (Heah ve ark. 2011). Bu nedenle, kür süresi belirli bir değere kadar arttıkça dayanım da artar ancak daha uzun kür süreleri dayanımda düşüşlere neden olabilir. (Van Jaarsveld ve ark. 2002; Chindaprasirt ve ark. 2007).

Farklı hammaddelerin kullanımı, karışım oranları ve kür sıcaklıklarındaki farklılıklar, optimum kür süresi için kesin bir değer belirlemeyi zorlaştırmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar, optimum kür süresinin genellikle 24-72 saat aralığında olduğunu göstermektedir.

2.9. Taze ve Sertleşmiş Haldeki Geopolimerlerin Özellikleri

2.9.1. İşlenebilirlik

Taze beton için aranan en önemli özelliklerden biri, betonun karıştırılması, taşınması ve yerleştirilmesi işlemlerinde minimum enerji kullanımı ile homojen bir şekilde kalıba doldurulabilmesidir. Bu işlenebilirlik özelliği sayesinde betonun ayrışma yapmadan ve boşluk kalmadan kalıbı tamamen doldurması sağlanır (Şahin vd., 2007).

Taze betonun kıvam tayininde kullanılan birçok deney yöntemi bulunmakla birlikte bu deney yöntemleri içinde VeBe deney yöntemi TS EN 12350-3'e (2010), çökme deneyi olarak bilinen slump deney yöntemi TS EN 12350-2'ye (2010), taze betonda yayılmanın belirlenmesi yöntemi de TS EN 12350-5'e (2010) ve sıkıştırılabilme derecesinin tayini yöntemi TS EN 12350-4'e göre yapılmaktadır.

2.9.2. Mekanik Özellikler

Geopolimerlerin, erken dönemde yüksek dayanıma ulaşması önemli bir özellik olarak kabul edilir. Bu malzemeler genellikle 2 ila 3 gün içerisinde 100 MPa basınç dayanımı değerine kadar ulaşabilirler (Atiş ve ark. 2015). Bununla birlikte, geopolimer bağlayıcılı betonların çekme ve eğilme dayanımı açısından geleneksel portland çimentolu betonlardan daha üstün olduğu söylenebilmektedir (Haddad ve Alshbuol 2016).

2.9.3. Durabiliteye İlişkin Kavramlar

Büzülme

Geopolimerlerin büzülme olayı, zamanla betonun hacminde meydana gelen küçülmeyi ifade eder. Bu küçülme, betonun kuruması sürecinde gerçekleşir ve sünme olayından farklı olarak dış etkenlerden etkilenmez. Kuruma olayı, kimyasal, ısı ve plastik büzülme gibi dört farklı gruba ayrılabilir (Alnkaa, 2019).

Alkali – Silika Reaksiyonu

1920-1930 yılları arasında Amerika'da üretilen ve kullanılan betonlarda, sebebinin tam olarak bilinmediği bir şekilde çatlaklar oluştuğu ve bu çatlakların daha da ilerlemesi ile birlikte betonların bir süre sonra durabilitesini kaybettiği tespit edilmiştir. Beton üretim yönteminin ve kullanılan malzemelerin ilgili standartlara uygun olmasına rağmen bu standartlara uygun üretilen betonların, üretimlerinden birkaç yıl sonra yüzeylerinde çatlakların oluştuğunu ve zamanla, bu çatlaklardan jel benzeri bir madde sızdığı gözlemlenmiş ve betonda çatlaklardan kaynaklanan patlamalar rapor edilmiştir. 1940'lı yıllarda Stanton, bu çatlakların kimyasal reaksiyonlar sonucu oluştuğunu belirtmiştir. Bu kimyasal reaksiyonlar, alkali-silika reaksiyonları olarak adlandırılmaktadır (Stanton, 1940).

Alkali-silika reaksiyonu, betonun dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bir faktördür. Allouche ve Patil, betonlar üzerindeki alkali-silika reaksiyonlarının etkisini incelemek amacıyla çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmalar sonucunda, geopolimer betonların, geleneksel portland çimentolu betonlara kıyasla alkali-silika reaksiyonlarına karşı daha dirençli bir performans sergilediklerini ortaya koymuşlardır (Wang, Shah, & Mishulovich, 2004).

Isı Dayanıklılığı

Geopolimerler, standart Portland çimentolarına kıyasla yüksek sıcaklık koşullarında daha üstün performans sergilemektedir. Özellikle cüruf bazlı Geopolimer betonlar, geleneksel Portland çimentolu betonlara göre daha yüksek basınç mukavemetine sahiptir. Ayrıca, kimyasal ve yüksek sıcaklık etkilerine karşı daha dayanıklıdır. Zuda ve arkadaşları, uçucu kül kullanılarak üretilen Geopolimer betonlar üzerinde deneyler yapmış ve bu betonların 400°C'ye kadar hedeflenen basınç mukavemetini koruduğunu belirtmiştir. Geopolimer beton, alkali solüsyonlarla oluşturulan alüminosilikat malzeme sayesinde etkili sıcaklık koşullarına karşı iyi bir direnç gösterir (Poon vd., 2003).

3. BETON – DONATI ADERANSI

Beton ve çelik çubuk arasındaki kayma gerilimlerine aderans denir ve bu özellik, betonarme yapıların en önemli özelliklerinden biridir. Aderans olmaması durumunda, betonarme yapılardan söz edilemez (Husem, 2006).

Beton ve donatı malzemeleri, çevresel etkiler nedeniyle şekil değiştirirler. Bu süreçte malzemeler arasında gerilmelerin aktarımı oluşur. Aderans, bu gerilmenin sorunsuz bir şekilde aktarılması sırasında ortaya çıkan bir kavramdır ve sıyrılma olmadan gerilmenin aktarımını sağlar. Aderansın temelinde üç faktör olduğu kabul edilmektedir. Bunlar;

- ✓ Beton ve çelik çubuk arasındaki sürtünme kuvvetleri,
- ✓ Çelik ve beton arasındaki moleküler ve kapiller bağ kuvvetleri olarak nitelendirilebilecek etkileşimler,
- ✓ Aderans yeteneği artırılmış çubukların (nervürlü donatı) kullanılması durumunda ortaya çıkan nervürler ile beton arasındaki diğ kuvvetleri ve kenetlenme etkileri (Celep, 2011).

3.1. Betonarmede Aderans ve Kenetlenme

Bir betonarme yapı elemanı için, beton ve çelik çubuklar arasında aderansın olması ve donatı çubuklarının betona kenetlenmesi gereklidir. Bu kenetlenme sayesinde beton ve donatı çubukları, oluşan etkilere göre şekil değiştirirler ve iki malzeme arasında gerilmelerin geçişi meydana gelir. Aderans, bu gerilme geçişinin sıyrılma olmaksızın gerçekleşmesine olanak sağlar (Celep, 2011)

3.2. Aderansa Etki Eden Başlıca Faktörler

Aderans gerilmesini etkileyen çok sayıda farklı faktör vardır. Aderans mukavemeti ile ilgili olarak, kesme ve aderans yeteneği ile boyutun etkisi arasındaki bağlantı gibi önemli faktörlerden bahsedilmektedir. Sonuç olarak, aderansı etkileyebilecek faktörler etraflıca tartışılmıştır. Bunlar;

- Nervürlü donatı elemanları kullanılan betonarme yapıların kırılma ve yarıma gibi hasarlarının oluşacağından, çekme dayanımı önemli bir parametredir.
- Donatıların sahip olduğu akma dayanımı, aderans gerilmesi dağılımını etkilediğinden önemlidir.
- Donatının nervürlü, düz vb. gibi yüzey durumu da önemli bir parametredir.

- Donatı çapı, donatının beton yüzeyine kenetlenme alanının artmasına yardımcı olarak uygulanan kuvveti etkileyen alana oranla değiştirir ve çekme gerilmeleri ile doğru orantılıdır.
- Aderans kapasitesi, donatının kenetlenme boyu ile değişebilir ancak direkt olarak kesin bağlantılı bir orantı yoktur.
- Donatıyı saran betonun kalınlığı, donatının çekme dayanımı ile ters orantılıdır.
- Beton dökümü sırasında donatının konumu veya yüzeyindeki kapiler boşluklar, aderansı olumsuz etkiler.
- Yerel gerilmeler de aderansı etkileyebilir. Özellikle nervürlü donatı kullanılan durumlarda, mesnedin uyguladığı yerel basınç gerilmeleri yarılmayı geciktirebilir.
- Donatı yüzeyindeki nervürler veya kumlanmış yüzeyler, aderans performansını ve yarılmaya karşı dayanımı artırır.
- Kullanılan agreganın türü ve çeşidi, aderans performansını etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır. Hafif agregalara kıyasla, kırma taş agregaların aderans performansı daha düşük olabilir (Ersoy, 2000).

3.2.1. Donatı Çubuğunun Yüzey Geometrisi

Betonarme yapıların düz donatılarında, donatı ile beton yüzeyi arasındaki kimyasal yapışma aderansın bir kısmını sağlamaktadır. Aderans kaybı ile birlikte donatıda sıyrılma başladıktan sonra, beton-donatı arasında oluşan sürtünme kuvveti de aderans dayanımına katkıda bulunmaktadır. Ancak düz donatılarda, nervürlü donatıların sunduğu avantajın olmaması neticesinde düz donatıların aderansı dişli donatılara göre daha düşük olmaktadır. Bu nedenle kenetlenme sağlanabilmesi için daha uzun bir kenetlenme boyu gerekmektedir. Donatı uçlarına kanca yapılması durumunda ise kenetlenme boyunun daha küçük olabileceği bilinmektedir (Arslan, 2007).

Nervürlü çelik donatılarda, aderansa katkı sağlayan yapışma ve sürtünme, mekanik olarak dişli yapıya sahip dişlerin katkısından daha düşüktür. Bu tür donatılarda, aderansın önemli bir bölümü, eğimli yüzeylere sahip dişlerin betonla teması sonucu oluşan eğik kuvvetler aracılığıyla sağlanır. Bu nedenle, donatı seçiminde yüzey geometrisi açısından dişli veya nervürlü çelik donatıların tercih edilmesi, aderansa önemli bir katkı sağlayacaktır (Arslan, 2007).

3.2.2. Donatı Çapı

Kenetlenme yeteneğinin sağlandığı ortamın, uygulanan kuvvet üzerindeki etkisi donatı çapına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Spesifik olarak değerlendirildiğinde, donatının çapı arttığında donatıya etki eden kuvvetlerin artması nedeniyle kenetlenme azalır ve aynı zamanda donatı dış kuvvetleri tarafından oluşturulan radyal gerilmelerin artmasıyla yarıma çatlakları ortaya çıkar. Bu durumda, yarıma kırılması sırasında betonda oluşan çekme gerilmelerinin çapa bağlı olarak arttığı görülmektedir. Boyuna donatı çapının aderans üzerindeki etkisi, öneriler doğrultusunda artan donatı çapına karşılık lineer olarak azalan aderans dayanımı hesaplanarak dikkate alınabilir.

3.2.3. Kenetlenme Boyu

TS500 standartında verilen Denklem 3, kenetlenme boyu için incelendiğinde, betonun çekme dayanımındaki değişimin ihtiyaç duyulan kenetlenme boyu üzerinde doğrudan etkisi olduğu görülür. Bu denkleme göre, l_b kenetlenme boyunu, f_{yd} kullanılan donatının tasarım akma dayanımını ve f_{cd} kullanılan betonun tasarım çekme dayanımını ifade etmektedir (Uysal ve Yılmaz, 2011). Beton özellikleri kadar donatı özellikleri de aderans üzerinde etkilidir.

$$l_b = 0.12 \times \left(\frac{f_{yd}}{f_{cd}} \right) \times \emptyset \quad \text{Denklem (3)}$$

3.2.4. Paspayı Tabaka Kalınlığı

Pas payı (Beton örtü kalınlığı); özellikle nervürlü donatının kullanıldığı beton yapılarında çatlak oluşumunun önlenmesi için önemli bir parametredir. Koruma kalınlığı arttıkça aderans dayanımı ve dolayısıyla çatlak dayanımı da artmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 1998; Arslan, 2007).

3.2.5. Donatının Konumu

Donatıların beton içerisindeki yerleşimi, yatay, dikey veya kesitsel açıları ile kalıbın alt veya üst yüzeyine olan uzaklıkları, beton ile donatı arasındaki aderansı önemli ölçüde etkilemektedir. Betonun dökümü sırasında, üst yüzeye yakın konumda bulunan donatılara hapsedilmiş hava kabarcıkları, bu donatıların aderansını zayıflatır. Bununla birlikte, betonun kalıbın alt kısmında daha iyi sıkıştığı düşünüldüğünde, aderans değerleri daha yüksek olabilir (Ersoy ve Özcebe, 1998; Arslan, 2007).

3.2.6. Sargı Donatısı

Deneyisel çalışmalar, fratli veya kapalı etriye demirleri gibi genellikle köprüleme takviyesi olarak adlandırılan sargı donatılarının, yerel basınç oluşturarak bağ kuvvetini arttırdığını göstermiştir. Özellikle nervürlü donatıların kullanıldığı durumlarda, oluşabilecek yarılmalar sargı donatılarıyla engellenebilmektedir. Bindirmeli eklerin bindirme boyunca kapalı etriyelerle sarılması, kesitin yarılmaya karşı dayanımını artırırken, büyük çapa sahip donatıların rijit dönme sonucunda betonun yırtılmasını da önlemektedir (Ersoy ve Özcebe, 1998; Arslan, 2007).

3.3. Aderans Deneyleri

Bu alandaki deneyler, genellikle beton ve donatı arasındaki doğrudan aderans özelliklerini inceleyen çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri ve çatlama özelliklerini inceleyen kırış deneyleri olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Bunların yanı sıra, daha az yaygın olsa da, itip-çıkarma (push-out) deneyleri de gerçekleştirilmektedir (Benli, 2007).

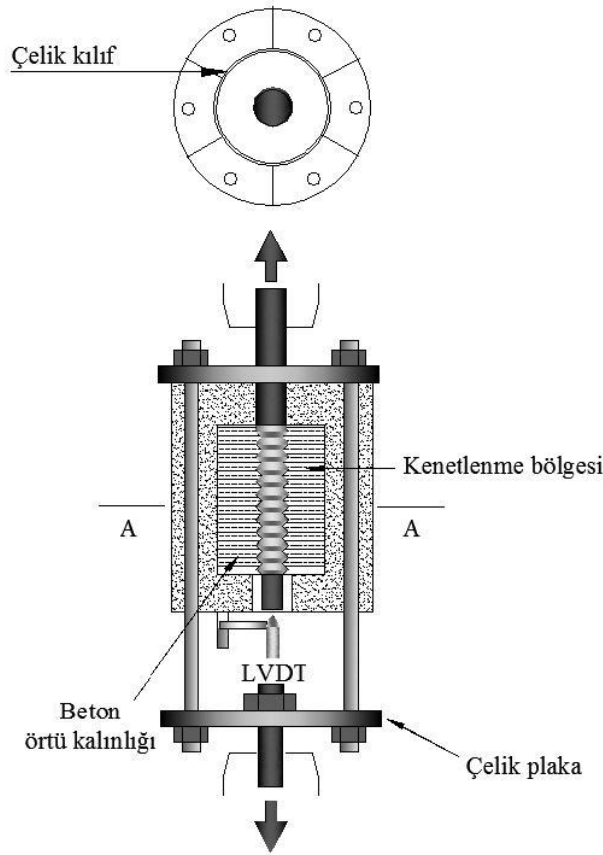
Daha önce bahsedildiği gibi, betonarme yapısının varlığı aderans olayına bağlıdır ve aderans dağılımı, kenetlenme boyu ve bu parametreleri etkileyen faktörleri belirlemek için 20. yüzyılın başından beri birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Ancak, bu deneylerin çoğu donatı-beton aderansını tam olarak yansıtmamaktadır. Bu durumun başlıca nedenleri şunlardır:

- ✓ Aderans ve kesme kuvveti arasındaki ilişkinin tam olarak anlaşılamamış olması,
- ✓ Deney numunelerinin boyutlarının gerçeği tam olarak yansıtmaması, ekonomik ve pratik nedenlerle,
- ✓ Bazı deneylerde uygulamada olanlardan farklı olarak, önemli ölçüde yerel gerilmelerin meydana gelmesi,
- ✓ Donatı çubukları arasındaki mesafe ve beton örtü kalınlığının uygulamadaki durumdan farklı olması gibi nedenlerden dolayı, betonla donatı arasındaki aderansın tam anlamıyla yansıtılamadığı ifade edilebilir.

Donatı-beton aderansının ve kenetlenme boyunun belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan deney yöntemi, merkezi çekme çıkarılma (pull-out test) deneyidir. Ayrıca, donatı-beton aderansını ölçmek için elemanların eğilmesi durumunda kırış deneyleri de geliştirilmiştir. Aşağıda, bazı deney yöntemleri özetlenmiştir (Ersoy ve Özcebe, 1998; Arslan, 2007; Dahil, 2001).

3.3.1. Çekip Çıkarma (Pull – Out) Deneyi

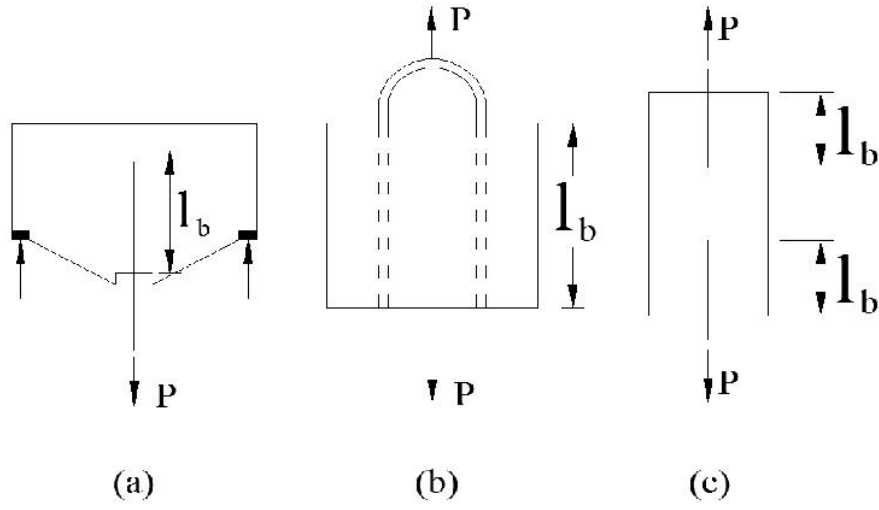
Merkezi çekip çıkarma (pull-out test) deneyi, aderans deneylerinin en temel ve en yaygın olarak kullanılan yöntemidir. Bu deneyde, silindirik veya prizmatik beton numunelerine yerleştirilen donatıya merkezi bir yük uygulanarak donatının betondan ayrılma mesafesi ölçülmektedir (Şekil 3.1). Ayrılma mesafesi 0,25 mm olduğunda, bu değere karşılık gelen aderans gerilimi güvenli aderans gerilimi olarak adlandırılmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 1998; Arslan, 2007).



Şekil 3.1 : Merkezi çekip-çıkarma deneyinin şematik gösterimi

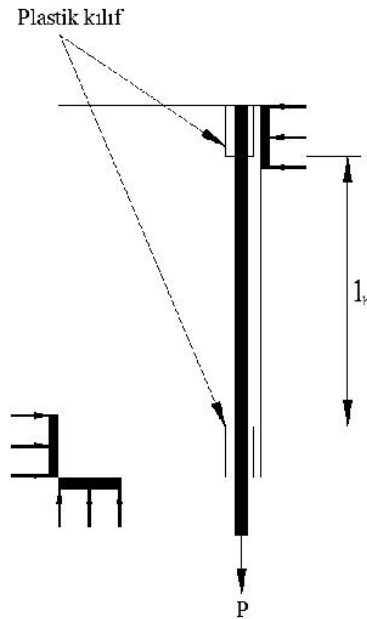
Merkezi çekip-çıkarma deneyi, kolay ve basit bir şekilde uygulanabilir deneydir. Fakat buna rağmen gerçek davranışı tam olarak yansıtmamaktadır. Bu deneyde, donatıya dik kesme kuvvetleri olmadığından, mesnet tepkimeleri betona yerel basınç gerilmeleri gerçek değerinden fazla uygular. Ayrıca beton örtü kalınlığı çok büyük olabilir ve betonda çekme çatlakları oluşmaz. Bu nedenle, kenetlenme boyunun belirlenmesi amacıyla bu deney uygun değildir. Ancak, merkezi çekip-çıkarma (pull-out) deneyi farklı sınıfa ait donatıların, betonla aderanslarının basit bir şekilde karşılaştırılması için uygundur. Bu deneyin sakıncalarını

gidermek için farklı düzenekler geliştirilmiştir (Şekil 3.2.a, b ve c) ancak bu düzeneklerde diğer sakıncalar maalesef ortadan kaldırılamamıştır.



Şekil 3.2 : Bazı merkezi çekip-çıkarma deney düzeneklerinin şematik gösterimi

Şekil 3.3'teki dışmerkez çekip-çıkarma deneyi, geliştirilen diğer bir deney düzenekidir. Bu düzenek, donatıya dik kesme kuvvetlerinin bulunması, eğilmeye bağlı çatlakların oluşması, yerel basınç gerilmelerinin donatı çevresinde oluşmaması ve pas payının daha gerçekçi olması nedeniyle, diğer çekip-çıkarma deneylerine göre daha gerçekçidir. Ancak, düzenek düşey konumda olduğu için, kirişlerdeki deformasyonları temsil etmemektedir.



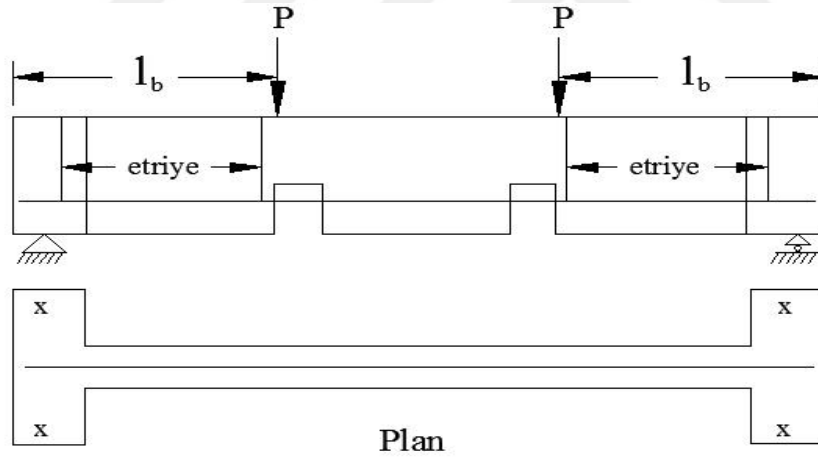
Şekil 3.3: Dışmerkez çekip-çıkarma deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.3.2. Kiriş Deneyleri

Eğilme altındaki bir yapı elemanının gerçek durumunu daha doğru bir şekilde yansıtabilmek amacıyla, çekip-çıkarma deneylerinin sınırlamalarına alternatif olarak kiriş deneyleri geliştirilmiştir. Özellikle eğilme sırasında çekme çatlaklarının aderans davranışını etkilediği göz önüne alındığında, çekip-çıkarma deneylerinin kiriş testlerine kıyasla daha az güvenilir olduğu kabul edilmektedir. Kiriş deneylerinin en yaygın kullanılanları arasında, Standartlar Bürosu deneyi, Texas deneyi, standart Belçika mafsallı kiriş deneyi ve büyük boyutlu betonarme kirişler üzerinde gerçekleştirilen kiriş çatlama deneyi bulunmaktadır (Benli, 2007).

3.3.3. Bureau of Standards Deneyi

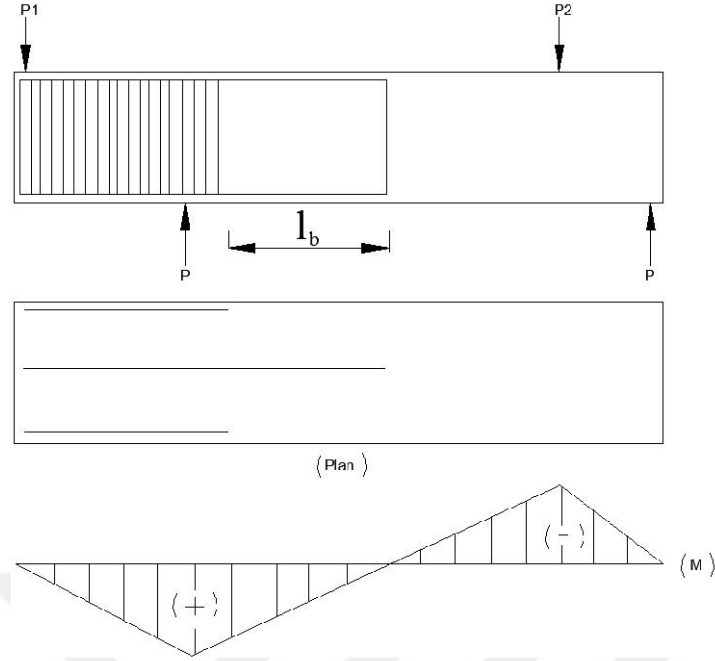
Kenetlenme boyunun ölçülmesinde daha gerçekçi koşulların sağlandığı bir deney türüdür. Şekil 3.4'teki Standartlar Bürosu deneyinde, kesme kırılmasını önlemek için aşırı etriye ihtiyaç vardır ve bu da aderansı büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek için önemli bir engel oluşur (Benli, 2007).



Şekil 3.4: Bureau of standards deney düzeneğinin şematik gösterimi

3.3.4. Teksas Deneyi

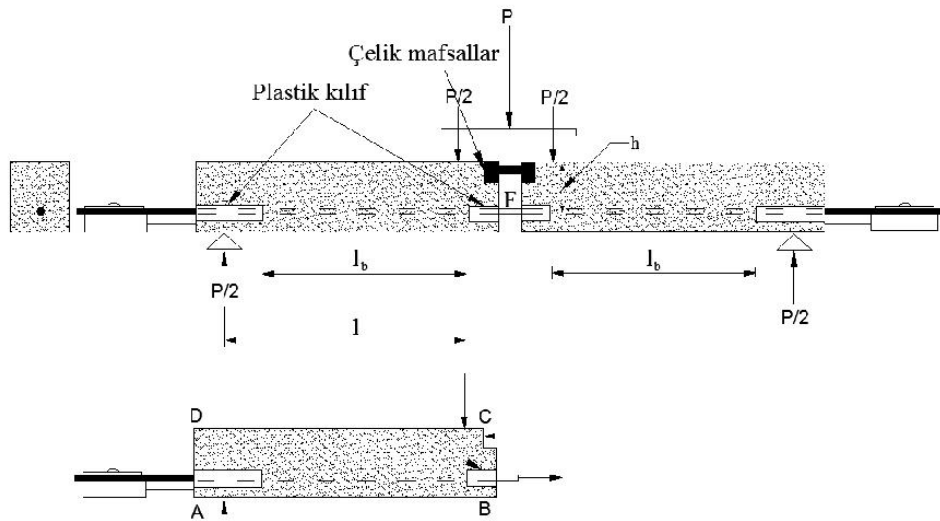
Bu deney, Bureau of Standards deneyine benzer şekilde kenetlenme boyunun incelendiği, ancak donatının gerçek betona uygun olmayacak genişlikte bir beton kütesi içine gömülmesinin sakıncası vardır (Şekil 3.5). Bu kiriş tipinde, donatıyı örten betonu sınırlayabilecek yerel basınç gerilmelerini önlemek çok önemlidir. Böylece yarılma göçmesinin önlenmesi sağlanır (Benli, 2007).



Şekil 3.5: Texas çıkmalı kiriş deney düzeneği

3.3.5. Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyi

Standart Belçika mafsallı kiriş (BMK) deneyi, diğer kiriş deneyleriyle karşılaştırıldığında, kirişin ortasında bir mafsala sahip olması açısından İngiliz standart deneyinden farklılık gösterir. Bu mafsallı bölüm, donatıda oluşan F kuvvetinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesine olanak sağlar. Bu çalışmanın hazırlanmasında kullanılan deney düzeneği BMK deneyidir ve daha detaylı açıklamalar çalışma başlığı altında yer almaktadır. Standart BMK deneyinin şeması, Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.6: Standart Belçika mafsallı kiriş deney düzeneği

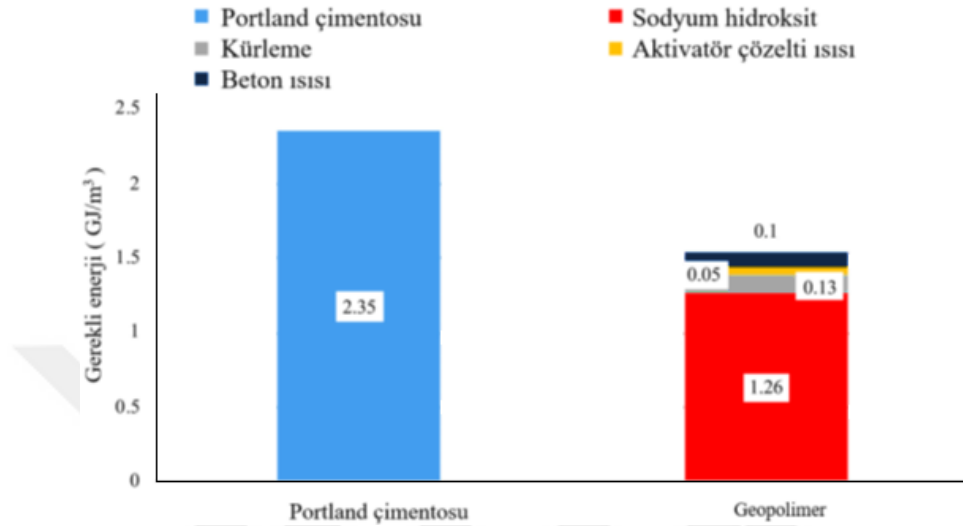
4. LİTERATÜR ÖZETİ

Reddy vd. (2011) tarafından yapılan bir araştırmaya göre, geopolimer malzemelerle ilk defa çalışan araştırmacı olarak Davidovits'in 1978 yılında yaptığı çalışmalarda, Mısır piramitlerinde ve Roma antik tiyatrolarında kullanılan malzemelerin özelliklerine benzerlik göstermektedir. Geopolimer malzemeler, normal Portland çimentosunda olduğu gibi C-S-H (kalsiyum silika hidratları) oluşturmazlar ancak alümina, silika gibi aktivatörler kullanarak yapısal dayanım sağlamaktadırlar. Geopolimerlerin alkali sıvılar ve malzeme ürünleri gibi iki ana bileşeni vardır ve bu bileşenler silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), pirinç kabuğu külü ve cüruf gibi yüksek miktarda alümina ve silika içeren maddelerden oluşur. Diğer alüminosilikatlardan farklı olarak, geopolimerler oldukça farklıdır ve katı yoğunluk oranları daha yüksektir. Geopolimerler, yapısal benzerlik gösteren Portland çimentosu ile yapılan betonlardan farklı olarak, iç tepkimesini devam ettirerek daha sonra daha güçlü bir yapıya sahip olabilirler (Temuujin vd., 2011).

Wardhono v.d. (2017), alkali aktifleştirilmiş cürufların ve düşük kalsiyumlu uçucu kül ile yapılan geopolimer betonun özelliklerini karşılaştırdılar ve 540 gün boyunca bu malzemeleri incelediler. İlk 90 gün boyunca, alkaliyle aktifleştirilmiş cüruflu betonların, uçucu kül içeren geopolimer betona göre yüksek çekme ve basınç dayanımına, ancak düşük yayılma özelliklerine sahip olduklarını gözlemlediler. Ancak, 90 ile 540 gün arasında, alkaliyle aktifleştirilmiş cüruf içeren betonda performans azalırken, uçucu kül içeren geopolimer betonda performans artışı gözlemlenmiştir (Wardhono, vd., 2017). Bu çalışmanın sonucuna göre, uçucu kül bazlı geopolimer betonların basınç dayanımındaki artışın yavaş geliştiği ve 540 güne kadar basınç dayanımında bir artış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, uçucu küllü geopolimer betonların düşük sıcaklıklara sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Hardjito vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada, yüksek molariteye sahip sodyum hidroksit kullanılan numunelerde daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği belirtilmiştir. Sodyum silikatın sodyum hidroksit ile oranının yüksek olduğu harç karışımında ise oldukça yüksek bir basınç dayanımı tespit edilmiştir. Numunelerin kür sıcaklığı 30 °C ile 90 °C arasında değiştiğinde, sıcaklığın artması basınç dayanımında da bir artışa neden olmuştur. Ayrıca, uzun süre kür uygulanan numunelerde yüksek dayanım ve dayanıklılık performansı gözlemlenmiştir (Hardjito vd., 2005).

Assi vd. (2018) 100 MPa basınç dayanımına sahip normal Portland çimentolu beton ile geopolimer betonun üretiminde gerekli olan yakıt miktarlarının karşılaştırıldığı çalışmada elde ettiği sonuçlarda Şekil 4.1’de üretimleri için kullanılan yakıt miktarları verilmiştir.



Şekil 4.1: Yakıt (termal enerji) kullanımı (Assi et al. 2018)

Grafiğe göre 100 MPa basınç dayanımlı beton için 475 kg Portland çimentosu üretmek için gerekli olan enerji 2,35 GJ/m³ iken 106 MPa’lık bir metreküp (1 m³) geopolimer beton üretmek için gereken olan enerji tüketimi 1,5 GJ/m³ civarındadır. Geopolimer beton üretmek için gerekli yakıt kullanımının normal betona göre %36 daha az olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte geopolimer betonunda aktivatör olarak kullanılan NaOH’ın geopolimer beton üretiminde gerekli toplam yakıt kullanımının %80’inden sorumlu olduğu tespit edilmiştir (Assi vd., 2018)

Atış vd., F sınıfına sahip uçucu külü, NaOH ile aktive edilmesi ile birlikte yüksek pH değerine sahip alkali bir ortam elde etmiş ve bu koşullarda, ısıl kür sıcaklığının, kütleme süresinin ve sodyum konsantrasyonunun geopolimer betonda basınç ve eğilme etkisini araştırmışlardır. Karışımın içindeki kum ve bağlayıcı oranını 3:1 ve su ile bağlayıcı oranını 1:3 olarak seçmişlerdir. Na konsantrasyonu %4–20 arasında kademe kademe %2 artırılarak yükseltilmiş ve sodyum konsantrasyonunun etkisini incelemişlerdir. Isıl kür sıcaklığını 45°C’den 105°C’ye kadar kademeli olarak 10°C artışla ayarlamışlardır. Isıl kür süresini 24, 48 ve 72 saat olarak seçmişlerdir. Her bir parametrenin etkisini araştırmak için üç tekrarlı olacak şekilde 40x40x160 mm’lik kesite sahip numuneler üretmişlerdir. Belirlenen sıcaklık ve sürelerde kür işlemi uygulandıktan sonra numuneler oda sıcaklığına getirilerek eğilme ve basınç dayanım

değerlerini belirlemişlerdir. 115°C sıcaklıkta ve 24 saat kür süresinde %14 Na içeren karışımlar, 15 MPa eğilme dayanımı ve 120 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Geopolimer harç karışımlarında eğilme ve basınç dayanımları alkali aktivatör konsantrasyonu ve ısıl kür sıcaklığının artması ile birlikte artış göstermiş fakat, aşırı yüksek Na oranları ve kür sıcaklıkları ile düşüş gösterdiği sonucuna varmışlardır. Bu dayanım değerleri, optimum noktaya kadar artmıştır. Çalışmada, kür süresinin belirli bir noktaya kadar eğilme ve basınç dayanımını arttırdığı bulunmuştur. Yüksek kür sıcaklıklarında 24 saat kür süresi yeterli iken düşük sıcaklıklarda 72 saat gereklidir. %8'in altındaki Na konsantrasyonlarında yüksek sıcaklıkta dayanım gelişimi gözlenmemiştir. 45°C sıcaklıkta bile 72 saatlik kürden sonra dayanım görülmemiştir. Bu sonuçlar, F sınıfı uçucu küllerin alkali aktivasyon sürecinin belirli bir sıcaklık altında yavaşladığını göstermektedir. Yüksek mukavemete ulaşan bu küllerin, yapı malzemesi üretiminde alkali aktivasyon yöntemiyle kullanılabilceği sonucuna varılmıştır (Atiş vd., 2015).

Kaya, doktora tezi çalışması kapsamında, Tunçbilek Termik Santralinden elde ettiği F sınıfı uçucu kül ve Kangal Termik Santralinden elde ettiği C sınıfı uçucu külü sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ($nSiO_2Na_2O$) kullanarak birleştirmiş ve bunları kullanarak geopolimer harç üretmiştir. Numuneleri ısıtıp 28 gün boyunca hava koşullarında kür ettikten sonra dayanım testlerine tabi tutmuştur. Durabilite testleri sonucunda en yüksek basınç dayanım değeri F sınıfı uçucu kül ile elde edilmiştir ve değer 50.64 MPa olarak ölçülmüştür. C sınıfı uçucu kül ile ise 13.88 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Rötire sonuçlarının çimento harçlarına göre düşük olduğu belirlenmiştir (Kaya, 2016).

Görür, doktora tezi çalışması kapsamında, Sugözü Termik Santralinde üretilen F sınıfı uçucu külü sodyum hidroksit (NaOH) kullanarak aktive etmiştir. Farklı sodyum oranlarıyla harçlar hazırlayarak optimum karışım parametrelerini %14 Na oranı ve 115°C olarak belirlemiştir. Bu parametrelerle en yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir ve basınç dayanımı 118,8 MPa'ya ulaşmıştır. Ayrıca, numunelerin 55°C altındaki sıcaklıklarda dayanım kazanmadığını belirlemiştir. Durabilite deneyleri sonucunda, yangın dayanımı, aşınma, donma çözülme gibi faktörler açısından çimentolu harçlara göre daha iyi sonuçlar alınmıştır (Görür, 2015).

Hamidi vd., NaOH konsantrasyonunun geopolimerler üzerinde mekanik ve iç yapı özelliklerine etkisini inceledikleri çalışmalarında, %4 ila %18 aralığında farklı NaOH konsantrasyonları

kullanılarak aktive edilen uçucu kül kullanmışlardır. Araştırmacılar, kür süresinin 24 saat olarak belirlendiği çalışmalarında ısıtılma sıcaklığını 60°C olacak şekilde uygulamışlardır. NaOH konsantrasyonunun iç yapı özelliklerine etkisini ifade edebilmek amacı ile Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ve Scanning Electron Microscope (SEM) görüntülerini analiz etmişlerdir. Bununla birlikte mekanik özellikleri belirlemek için eğilme dayanımı deneyi uygulamışlardır. FTIR analizi sonucunda düşük frekanslarda Si-O-Si ve Al-O-Si bağlarını, yüksek frekanslarda su moleküllerinin varlığını belirlemişlerdir. Bunlara ek olarak sodyum karbonat oluşumu da tespit etmişlerdir. Bu durumu, genel olarak geopolimer matrisinin oluşumunda bir düzen olduğunu açıklayarak ifade etmişlerdir. Ayrıca, eğilme dayanımı değerleri %4, 6, 8, 10 ve 12'de NaOH artışı ile arttığını, ancak %14, 16 ve 18'de azaldığını ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, 24 saat kür süresi ve 60°C ısıtılma sıcaklığı için optimum NaOH konsantrasyonunun %12 olduğunu belirlemişlerdir (Hamidi, 2016).

Okoye vd., uçucu kül bazlı geopolimer betonların silis dumanı (SD) ile ikameli üretiminden elde edilen geopolimer betonların durabilite performanslarını araştırmışlardır. Çalışmaları kapsamında geleneksel portland çimentolu kontrol gruplarının yanında %10 ve %20 SD ikameli geopolimer betonlar ve %100 uçucu kül içeren geopolimer beton numuneleri hazırlamışlardır. Su/bağlayıcı 0,20 NaOH 14M ve alkali/uçucu kül 0,40 olarak belirlemişler ve işlenebilirlik için süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Geopolimer üretiminde alkali aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı kullanmışlardır. Üretmiş oldukları geopolimer betonları 72 saat boyunca 100°C'de ısıtılma işlemine tabi tutarak dayanım kazandırmışlardır. Fiziksel görünümünü, ağırlık kaybını ve basınç dayanım kaybını incelemek için tüm örnekleri %2 sülfürik asit ve %5 sodyum klorür çözeltilerine maruz bırakmışlardır. Sülfürik asit maruz kalan örneklerde, %20 silis dumanı ile değiştirilen uçucu kül betonlarında asit erozyonu ve bozulma gözlemlenmiştir. Her örnek ağırlık kaybına uğramış olsa da, en fazla kayıp kontrol örneklerinde, en az kayıp ise %20 silis dumanı ile üretilen örneklerde görülmüştür. Tüm numuneler %2 sülfürik asit ve %5 sodyum klorür çözeltilerine maruz bırakılarak fiziksel görünüşleri, ağırlık kayıpları ve basınç dayanımları incelenmiştir. Basınç dayanım kaybı en yüksek olan numuneler kontrol grubundaki ve en düşük kayıp %20 silis dumanı ile üretilen uçucu küllü geopolimerlerde gözlemlenmiştir. %100 uçucu küllü numunelerde dayanım kaybı daha fazla olmasına rağmen, kontrol numunelerinden daha az kayıp yaşanmıştır. Sodyum klorür çözeltisine maruz kalan numunelerde, %20 silis dumanı ile üretilenlerde bozulma gözlemlenmemiştir. En yüksek ağırlık kaybı kontrol numunelerinde, en az kayıp ise %20 silis dumanı ile üretilen numunelerde

görülmüştür. Kontrol numunelerinde zamanla birlikte basınç dayanım kaybı artmış ve en yüksek kayıp bu grupta gözlemlenmiştir. En düşük dayanım kaybı %20 silis dumanı ile üretilen geopolimer numunelerinde gerçekleşmiştir. Genel olarak, uzun süreli dayanıklılık özelliklerinde %20 silis dumanı ilavesinin olumlu etkisinin olduğu ve farklı silis dumanı oranlarının denenebileceği belirtilmiştir (Okoye vd., 2016).

Assi vd., uçucu küllü geopolimer betonların basınç dayanımıyla ilgili olarak aktivasyon solüsyon tipi, kür uygulaması ve uçucu kül kaynağının etkisini araştırdılar. Bu çalışmada, geopolimer harçların mikroyapısı, yoğunluğu, su emme ve boşluk oranı da incelendi. İlk aktivatör karışımı sodyum hidroksit, silis dumanı ve su içerirken, ikinci karışım sodyum hidroksit, sodyum silikat ve su içermekteydi. İlk karışım, ilk iki gün ortam koşullarında bekletildikten sonra, ardından iki gün boyunca 75°C sıcaklığa sahip bir ortamda bekletilmiştir. İkinci karışım grubu ise bir gün boyunca ortam koşullarında bekletildikten sonra yine iki gün boyunca 75°C sıcaklığa sahip bir ortamda bekletilmiştir. Yedi gün sonra, basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Silis dumanı kullanılarak elde edilen karışımın erken dayanımı 105,1 MPa değerine ulaşmıştır. Sodyum silikat kullanılarak elde edilen karışımdan elde edilen karışımdan daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Ayrıca, farklı uçucu küllerin mikro yapı ve tane büyüklüğü değiştikçe, basınç dayanımının da aynı oranda etkilendiği belirlenmiştir. (Assi vd., 2016).

Xie ve Kayali, mini flow yöntemiyle işlenebilirlik değerlerini iyileştirmek için iki farklı F ve C sınıfı uçucu kül kullanarak naftalin ve polikarboksilat kökenli süperplastikleştiricilerin iki farklı içeriğini araştırmışlardır. Her iki akışkanlaştırıcı katkının da çimentolu karışımlara kıyasla geopolimerlere daha az etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Polikarboksilat kökenli katkının, C sınıfı uçucu külde daha etkili olduğunu ve F sınıfı küllerde daha az etkili olduğunu ifade etmişlerdir. C sınıfı uçucu külde pozitif yüklü kalsiyum iyonlarının neden olduğu iyi etki mekanizması vardır. Naftalin kökenli süperplastikleştiriciler, her iki kül grubunda da benzer etki göstermiştir. Ancak polikarboksilat içerikli katkı maddelerine kıyasla, F sınıfı uçucu külde daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir (Xie ve Kayali, 2016).

Noushini ve Castel, araştırmalarında farklı sıcaklık ve sürelerde kürlenmiş olan geopolimer betonların, boşluk yapısına bağlı olarak farklı iletkenlik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla, 12 farklı kürlenme koşulunda (60, 75, 90°C sıcaklık ve 8, 12, 18 ve 24 saat ısıl kür süreleri) örnekleri farklı sıcaklık koşullarına tabi tutmuşlar ve bir grup örneği de ortam

koşullarında bırakmışlardır. Kontrol numuneleri çimentolu ve geopolimer malzemelerden oluşmaktadır. Kontrol numuneleri, 23°C suda 28 gün boyunca bekletilirken, geopolimer numuneleri ise ısıtılma sonrası oda sıcaklığında 28 gün bekletilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı kullanılmıştır. Üretilen numunelerin basınç dayanımı, elastisite modülü, ultrases geçiş hızı, su emme, geçirgen boşluk hacmi, boşluk büyüklüğü dağılımı ve direnç ölçümleri yapılmıştır. Isıl kür sıcaklığı 75°C ve kür süresi 24 saat üzerinde olduğunda, basınç dayanımının 27,4-62,3 MPa arasında ve elastisite modülünün 13,5-25,9 GPa arasında arttığını belirtmiştir. Geopolimerlerin ortam koşullarında kür edildiğinde, basınç dayanım değerlerinin çok düşük olduğu bulunmuştur. Ayrıca, 75°C'nin altındaki ve 18 saatten az kür sürelerinde, geçirgen boşluklarda artış olduğu belirtilmiştir. En iyi geçirimli boşluk oluşumunun 75-90°C arasındaki sıcaklık ve 18-24 saat arasındaki kür süresinde olduğunu belirtmiştir. 60°C'de kür edilen numunelerde yüksek oranda kılcal su emilimi tespit edilmiş ve ısıtılma kür süresi ve sıcaklığı arttıkça bu emilim azalmıştır. Nem oranı arttıkça rezistivitenin de arttığı, kontrol grubu numunelerinin elektriksel iletkenliğinin daha yüksek olduğu ve nem oranının %40'ın altında olduğu durumlarda elektriksel iletkenlik artış hızının azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, geopolimer betonlarında basınç dayanımının 60 MPa'dan 40 MPa'a düştüğü zaman, rezistivitenin %50 azaldığı bulunmuştur. Bu sonuçlar, geleneksel portland çimentolu betonlar gibi, geopolimer betonlarının da basınç dayanımı testleri ile kalitesinin değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar geleneksel portland çimentolu betonlar gibi, geopolimer betonlarının da kalitesinin basınç dayanım deneyleri ile değerlendirilebileceğini göstermektedir. Yani, basınç dayanım testleri, geopolimer betonlarının kalitesinin değerlendirilmesinde önemli bir kriter olarak kullanılabilir. (Noushini ve Castel, 2016). Na_2SiO_3

Helmy, basınç dayanımlarını değerlendirmek için aralıklı kür uygulayarak F sınıfı uçucu kül kullanmıştır. Aktivatör olarak farklı oranlarda NaOH ve Na_2SiO_3 karışımını kullanan Helmy, aralıklı kür yöntemini kullanarak numunelerin basınç dayanımlarını değerlendirmiştir. Bu yöntemde, numuneler bir günde dört kez 70°C'de 6 saat süreyle kür edilmiş ve ardından 18 saat boyunca ortam koşullarında bırakılmıştır. Bu işlem toplamda dört kez tekrarlanmıştır. Sabit uçucu kül/kum oranına sahip 21 farklı karışım hazırlanmış ve bu karışımların 24, 48, 72, 96 saat ve 7 günlük basınç dayanımını ölçmüştür. Aralıklı kür uygulandığında her kür döngüsünde basınç dayanımında bir artış gözlemlenmiştir. Dayanımdaki dayanımdaki artışın yüksek özgül

ağırlıklı sodyum silikat, kullanılan NaOH molar oranı, alkali/uçucu kül oranı ve H_2O/Na_2O oranı ile doğrudan orantılı olduğunu belirtmiştir (Helmy, 2016).

Ma ve Ye, farklı oranlarda sodyum silikat çözeltisi kullanarak F sınıfı uçucu kül içeren geopolimer pastalarını hazırlamışlardır. Bu pastaları 40°C'de 7 gün boyunca kür etmişler ve otojen ve kuruma büzülmesini incelemişlerdir. Kontrol için, su/bağlayıcı oranı 0,4 olan CEM I 42,5 çimento pastası hazırlayarak 7 gün boyunca 20°C'de kür etmişlerdir. Geopolimer karışımların SiO_2 ve Na_2O molar değerlerini değiştirerek su/uçucu kül 0,35 olan üç adet karışım hazırlamışlardır. SiO_2 ve Na_2O 'nun molar değerleri 1'den 1,5'a kadar arttıkça basınç dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Yüksek SiO_2 ve Na_2O oranlarında bünyesel ve kuruma büzülme de artmıştır. Alkali aktifleştirilen örneklerde, otojen büzülme 1-3 gün arasında en yüksek düzeyde tespit edilmiştir. Erken dönemlerde, otojen büzülmeyle ilgili çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Otojen büzülmeyle çimento ile alkali aktifleştirilmiş harçlar farklı tepki göstermiştir. 180 günlük kuruma büzülmelerinde çimento pastasına göre SiO_2 ve Na_2O molar değerleri 1,0-1,5 ve 1,0-1,0 olan daha düşük çıkmasına rağmen 1,5-1,5 olan alkali ile aktifleştirilen numunelerin kuruma büzülme oranları yakın çıkmıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerin SiO_2 ve Na_2O oranı arttıkça kuruma büzülmesi yükselmiş ancak ağırlık kayıpları orantılı olmamıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerin farklı boşluk yapılarından kaynaklanabileceği belirtilen kılcal basınçların neden olduğu farklı ağırlık kaybı/kuruma büzülmesi oranlarının gözlemlendiğini belirtmişlerdir (Ma ve Ye, 2015).

Ryu vd., araştırmalarında alkali ile aktifleştirilen uçucu küllü betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Uçucu küllerin aktivasyonu için sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatörleri kullanmışlardır. Örnekler öncelikle 60°C'deki fırında 24 saat boyunca kurutulmuş ve daha sonra 23±2°C'deki havada 24 saat kür uygulanmıştır. 50x50x50 mm boyutlu prizmatik numunelere basınç dayanımı testi yapılmış ve yüksek sodyum hidroksit konsantrasyonunda erken basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada, alkali aktivatörlerin yüksek molaritede kimyasal değişimlerinin dayanımı üzerinde etkili olduğu ve en uygun aktivatör çözeltisinin 9 molaritede olduğu sonucuna varılmıştır (Ryu vd., 2013).

Aydın ve Baradan, yaptıkları araştırmada, alkali ile aktive edilmiş cürufu harçların özelliklerine kimyasal ve mineral katkı kullanımının etkisini incelemiştir. Uçucu kül, silis dumanı ve metakaolin gibi mineral katkılar, hava sürükleyici, köpük önleyici ve büzülme

önleyici katkılar gibi kimyasal katkılar kullanılmıştır. Kimyasal katkıların malzemenin işlenebilirliğine etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Silis dumanı ve F tipi uçucu külün malzemenin işlenebilirliğini olumlu etkilediğini belirlemişlerdir. Ayrıca, F sınıfı uçucu külün büzülme davranışını etkilemediği belirtilmiştir. Çalışmalarında mineral katkı olarak F sınıfı uçucu kül kullanıldığında, normal kür şartlarında dayanım değerinin 87,2 MPa civarında ve buharla kür uygulaması yapıldığında 90,7 MPa civarında olduğunu tespit etmişlerdir (Aydın ve Baradan, 2013).

Olivia ve Nikraz (Olivia ve Nikraz, 2012), çalışmalarında Taguchi metodu ile uçucu kül kullanılarak yapılan geopolimer betonunun mekanik özelliklerini ve dayanıklılık özelliklerini en uygun karışım oranını araştırmışlardır. Araştırmacılar, dokuz farklı karışım oranı belirleyerek, agrega içeriği, uçucu kül/alkali solüsyon oranı, sodyum hidroksit ve sodyum silikat oranı ve kür koşullarını belirlemişlerdir. F sınıfı uçucu kül, üç farklı tür agrega ve sodyum hidroksit ile sodyum silikatın kombinasyonunu kullanarak, 28 gün içinde geopolimer betonunun 55 MPa basınç dayanımına ulaşabildiklerini belirlemişlerdir. Taguchi metodu kullanarak, malzeme bileşimindeki uygun kombinasyonu belirleyerek betonun dayanımını maksimize etmişlerdir. Farklı buhar kürü uygulamaları yapılan geopolimer betonları, zamanla basınç dayanımında artış göstermiştir. 28 gün sonra yapılan ölçümlerde en yüksek basınç dayanımı 54,89 MPa, en düşük ise 29,71 MPa olarak belirlenmiştir. Çekme dayanımının kontrol numunelerine göre %8-12 daha yüksek ve elastisite modülünün ise %14,9-28,8 daha düşük olduğu bulunmuştur. Genel olarak, geopolimer betonunun normal portland çimentolu betondan daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu ve ayrıca deniz suyunda ıslanma-kuruma döngülerine karşı daha dayanıklı olduğu ifade edilmiştir.

Castel ve Foster (Castel ve Foster, 2015), farklı kür koşullarında yapılmış olan geopolimer betonların donatı aderansını belirlemek amacıyla çekme çıkarma (pull-out) deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Aktivatör olarak $NaOH$ ve Na_2SiO_3 karışımı kullanarak F sınıfı uçucu kül cüruf karışımı bağlayıcıları aktive etmişlerdir. Numunelere iki farklı kür uygulanmıştır. İlk gruptaki numuneler bir gün boyunca 80°C'lik fırında kurutulmuş, ardından bir gün boyunca 80°C'lik su banyosunda bekletilmiş ve sonrasında 28 gün boyunca oda sıcaklığında kür edilmiştir. İkinci gruptaki numuneler ise bir gün boyunca 80°C'lik fırında kurutulmuş, ardından altı gün boyunca 80°C'lik su banyosunda bekletilmiş ve sonrasında 28 gün boyunca oda sıcaklığında kür edilmiştir. Su/bağlayıcı 0,35, NaOH molaritesi 12M, $Na_2SiO_3/NaOH$ 2,5

olarak belirlenmiştir. Araştırmacılar, kür şartlarına bağlı olarak geopolimerlerin mekanik özelliklerinin arttığını tespit etmişlerdir. İki gün kür edilen numuneler, normal portland çimentolu numunelerle benzer bir aderans dayanımına sahipken, yedi gün kür edilen numuneler en yüksek dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Ayrıca geopolimerlerin prekast yapı elemanı üretiminde kullanımının uygun olabileceğini belirtmişlerdir.



5. MALZEME VE YÖNTEM

Deneyisel çalışmalarda, uçucu kül, sodyum hidroksit-sodyum silikat karışımı aktivatör, kırmataş kalker esaslı ince (0-4.75 mm) ve iri (4.75-12.7 mm) agrega kullanılarak Geopolimer betonlar üretilmiştir. Geopolimer kiriş numunelerinin aderansı performansını belirlemek için Ø12 çelik çubuklar ve sargı donatıları kullanılmıştır. Bu bölümde, kullanılan tüm malzemelerin özellikleri, hazırlanan geopolimer beton tasarımları, taze ve sertleşmiş beton deneyleri, kiriş numunelerinin üretimi ve aderans deney yöntemi özetlenmiştir.

5.1. Malzeme

5.1.1. Agrega

Deneylerde kullanılan agrega, Adana ili Yüreğir ilçesinde bulunan Kambeton A.Ş. firmasından temin edilen sınıflandırılmış kırmataş agregadır. Agrega, ince (0 - 4.75 mm) ve iri (4.75 - 12.7 mm) olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Kullanılan agreganın bazı fiziksel özellikleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kullanılan agregaya ait bazı fiziksel özellikler

Agrega	Özellik		
	Yoğunluk (g/cm ³)	Su emme (%)	Stok Nem (%)
İri (4.75-12.7 mm)	2,67	1,112	0,15
İnce (0-4.75 mm)	2,66	2,64	0,24

5.1.2. Normal Portland Çimentosu

Bu çalışmada geleneksel portland çimentolu beton dökümlerinde, CEM I 42.5 R tipi dökme çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal kompozisyon	(%)	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	18.95	Priz başlangıcı (sa:dk)	02:20
Al ₂ O ₃	5.32	Priz sonu (sa:dk)	02:40
Fe ₂ O ₃	4.07	Hacim genleşmesi (mm)	1
CaO	54.72	Yoğunluk (g/cm ³)	3.18
MgO	1.35	Özgül yüzey (Blaine cm ² /g)	4663
SO ₃	2.90	Mekanik Özellikler	
Na ₂ O	0.16		
K ₂ O	0.51	Basınç dayanımı (MPa)	
Kızdırma Kaybı	3.83	7 gün	44.6
Çözünmeyen Kalıntı	0.63	28 gün	55.3
Serbest CaO	1.52	90 gün	62.4

5.1.3. Uçucu Kül

Çalışmada alüminoslika kaynağı olarak Adana ili Yumurtalık ilçesinde bulunan İSKEN termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. Uçucu küle ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler

Kimyasal Kompozisyon	(%)
Al ₂ O ₃	21,00
SiO ₂	53,00
SO ₃	1,50
K ₂ O	2,70
CaO	4,95
TiO ₂	1,31
Fe ₂ O ₃	13,83
Diğerleri	1,71

5.1.4. Kimyasal Katkı

Bu çalışmada, Sika Yapı Kimyasalları'ndan elde edilen polikarboksilat bazlı hiperakışkanlaştırıcı yüksek oranda su azaltıcı olarak kullanılmıştır. Katkıya ait bilgiler Tablo 5.4.'te verilmiştir. Üretici firma, optimal dozajdaki katkının çalışabilirlik ve mukavemet gereksinimlerinin şantiye koşullarında ön denemelerle belirlenebileceğini ve beton karışım bileşenleri ile karışım suyunun %70'inin ilave edildiği homojen bir karışım elde edildiği anda kalan suyun uygun olacağını önermektedir. Kullanılan kimyasal katkının SD ve UK ile uyumlu bir polikarboksilat esaslı katkı olduğu da firma tarafından belirtilmiştir.

Tablo 5.4. Kimyasal katkıya ait özellikler

Özellik	Kullanım Dozajı
Görünüm	Açık kahve renkli sıvı
Tip	Polikarboksilat esaslı karışım
Yoğunluk	1.10 ± 0.03 kg/L
pH	4.00 – 5.50
Klorür	≤ %0.1 (TS EN 480–10)
	• Çimento miktarına göre
	• Erken mukavemetli beton için kütlece % 1.2–3.0,
	• Akıcı betonlar için % 0.8–1.2,
	• Plastik betonlar için % 0.8–1.5,
	• Kompakt betonlar için en az % 0.5 oranlarında kullanılır.

5.1.5. Alkali Aktivatör

Geopolimer beton üretimi sırasında, puzolanların aktifleştirilmesi için alkali aktivatörler kullanılır. Bu çalışmada, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Potasyum bazlı alkali aktivatörler, sodyum bazlı alkali aktivatörlere göre daha pahalıdır. Bu çalışmanın hedeflerinden biri daha ekonomik bir beton üretmek olduğu için, bu çalışma kapsamında sodyum bazlı alkali aktivatörler tercih edilmiştir. Kullanılan sodyum silikat (Na_2SiO_3) sıvı formda, sodyum hidroksit (NaOH) ise katı formdadır ve bir kimya firmasından temin edilmiştir. Alkali aktivatörün hazırlanması esnasında likit formdaki sodyum silikat içerisinde çözünen sodyum hidroksitin ekzotermik tepkimesi sonucu ısı açığa çıkmaktadır. Ortaya çıkan yüksek ısının beton dökümü için uygun hale getirilmesi için alkali aktivatör beton dökümünden yaklaşık 24 saat önce laboratuvar ortamında hazırlanmış ve soğumaya bırakılmıştır. Tez çalışması kapsamında kullanılan sodyum hidroksitin özellikleri Tablo 5.5.'te, sodyum silikatın özellikleri ise Tablo 5.6.'da verilmiştir.

Tablo 5.5. Deneyde kullanılan Sodyum Hidroksit analiz raporu

ANALİZ	SPESİFİKASYON
Kimyasal Formül	NaOH
Derece	Ekstra Saf
Tepe Formülü	HNaO
Molar Kütle	40,00 g/mol
Safılık Derecesi	≥%98,0
Sodyum Karbonat (Na ₂ CO ₃)	≤%0,5
Sodyum Klorür (NaCl)	≤%0,02
Demir (Fe)	≤%0,001

Tablo 5.6. Deneyde kullanılan Sodyum Silikat analiz raporu

ANALİZ PARAMETRELERİ	ANALİZ SONUÇLARI
Be	36
Na ₂ O %	10,4
SiO ₂ %	22,05
Moleküler Modül	2,02
Fe ₂ O ₃ % (max 0.05)	Uygun
Görünüş	Renksiz, kıvamlı berrak sıvı

5.1.6. Çelik Donatılar

Geopolimer betonların donatı ile aderansının incelendiği bu tez çalışmasında, donatı aderansını belirlemek için çapı 12 mm olan çelik donatı kullanılmıştır. Çelik donatılar, B420C tipi nervürlü donatı çubukları olup BEMA Makine San. Tic. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. (Şekil 5.1.)



Şekil 5.1. Deneylerde Kullanılan Çelik Donatılar

5.2. Yöntem

Bu bölümde, mafsallı kirişlerin üretiminde kullanılacak olan geopolimer betonun tasarımı, üretilen betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneyler, mafsallı kirişlerin üretimi ve kiriş deneyleri tanımlanmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen deney programı ise Şekil 5.2’de özetlenmiştir.



Şekil 5.2. Tez kapsamında gerçekleştirilen deney programı

5.2.1. Geopolimer Betonların Tasarımı ve Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Geopolimer beton karışımlarının optimize edilmesi için öncelikle yüksek akıcılık, yüksek stabilitenin yanı sıra yüksek dayanım gibi genel özellikler hedeflenir. Bu özelliklerin elde edilmesi için taze beton karışımı akıcı, optimum viskoziteye ve kohezyona sahip olmasının yanında tatmin edici bir dayanım özelliği de sergilemelidir. Geopolimer karışımlarda optimum akıcılık ve dayanım değerlerinin elde edilmesi bakımından iyi bir karışım tasarımı yapılmalı ve uygun malzemeler uygun oranlarda kullanılmalıdır. Ms modülüne göre karışım tasarımı yapılan bu tez çalışmasında Ms modülü hesabı Denklem 4'e göre yapılmış ve Na₂O konsantrasyonu uçucu küle göre ağırlıkça % olarak hesaplanmıştır. Karışım hesaplarında Agrega/Uçucu Kül oranı 3/1 olarak alınmıştır.

$$Ms = \frac{SiO_2}{Na_2O} = \frac{Sodyum Silikattan Gelen SiO_2}{Sodyum Hidroksitten Gelen Na_2O + Sodyum Silikattan Gelen Na_2O} \quad \text{Denklem (4)}$$

Deneyisel çalışmalarda, alkali aktivatör içerisindeki sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranları 4 farklı (1,1, 1,2, 1,3 ve 1,4 Ms modülü ile %10 Na₂O konsantrasyonu) olacak şekilde yukarıda verilen denkleme göre belirlenmiştir. Ms oranlarına göre hesaplanan geopolimer karışım reçeteleri Tablo 5.7.'de sunulmuştur.

Tablo 5.7. Çalışma kapsamında kullanılan geopolimer beton reçeteleri

Ms	MALZEMELER (kg/m ³)				Kuru Karışım	Aktivatör
	Uçucu Kül	Agrega	Sodyum Silikat	Sodyum Hidroksit		
1,1	504,65	1513,94	251,75	31,33	2018,6	283,1
1,2	497,81	1493,43	270,92	27,88	1991,2	298,8
1,3	491,16	1473,47	289,57	24,52	1964,6	314,1
1,4	484,68	1454,04	307,73	21,24	1938,7	329,0

5.2.2. Geopolimer Beton Ön Deney Numunelerinin Hazırlanması

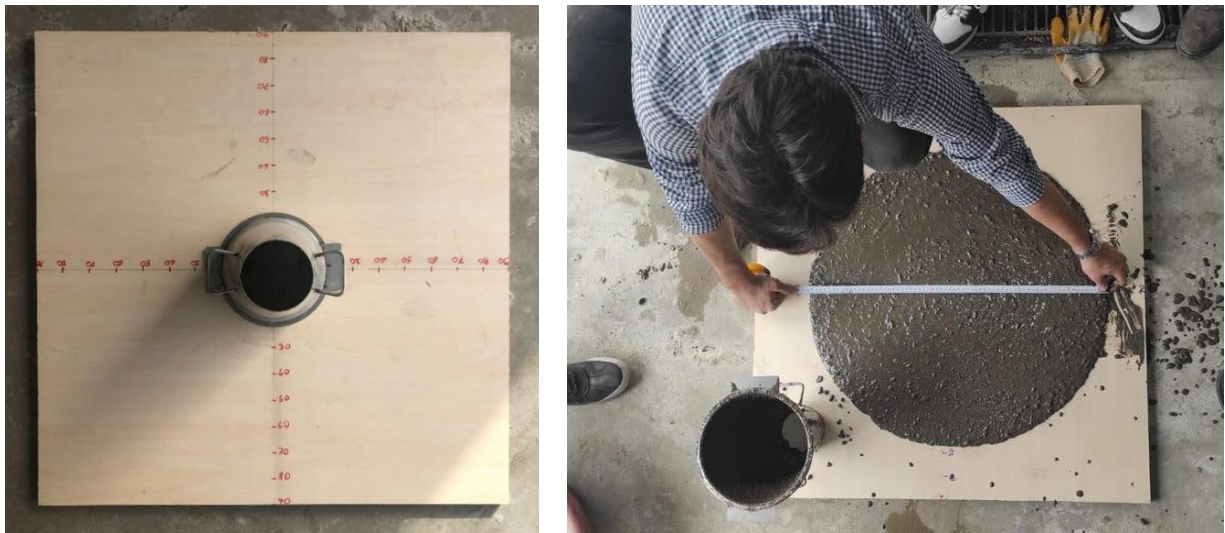
Geopolimer beton üretimi için laboratuvar tipi bir mikser kullanılmıştır. Geopolimer beton karışım oranları belirlendikten sonra, laboratuvar tipi mikser içine agrega yerleştirilmiş ve 1 dakika kuru şekilde karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi devam ederken suyun tamamı eklenmiş ve 1 dakika daha karıştırılmıştır. Bu şekilde agregalar suya doymun hale getirilmiştir. Daha

sonra, mikser içerisine uçucu kül ilave edilmiş ve 1 dakika daha karıştırılmıştır. Son olarak, alkali aktivatör karışıma ilave edilmiş ve bütün beton bileşenleri 3 dakika daha karıştırılmıştır. Karışım sonrası taze haldeki geopolimer beton, serbest düşme hareketiyle alınmış ve slump testine tabi tutulmuştur. Slump testi yapılan numuneler 15*15*15 cm'lik kalıplara 3 tabaka halinde her bir karışımdan 3 tekrarlı olacak şekilde yerleştirilmiştir.

5.2.3. Çökmede Yayılma Deneyi (Slump Deneyi)

TS EN 12350-2 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen çökmede yayılma deneyinde geopolimerin yüksek akışkanlığı nedeni ile standart slump deney tablası yerine plywood malzemeden yapılmış ve 90x90 cm boyutlarına sahip bir tabla kullanılmıştır.

Deneyde, kalıp üzerine 5 cm aralıklarla daire şeklinde hatlar belirlenmiştir (Şekil 5.3). Hem plaka hem de koni, deney öncesinde nemlendirilmiştir. Deneyde, Abrams konisinin içine standarda uygun bir şekilde 3 tabaka halinde şişlenerek yerleştirilen geopolimer beton numunesi, koni kaldırıldıktan sonra plaka üzerinde yayılmaya başlamıştır. T₅₀ yayılma süresi betonun önceden çizilmiş olan 50 cm çaplı çizgiye ulaştığı anda not edilmiş ve nihai yayılma çapı da standartlara uygun bir şekilde betonun yayılması durduktan sonra, iki farklı yönde yayılma çapları ölçülerek belirlenmiştir. Ölçülen yayılma çaplarının aritmetik ortalaması alınarak deney sonucu kaydedilmiştir.



Şekil 5.3. Yayılma deneyinin uygulanişı

5.2.4. Deneylerde Kullanılan Numune Boyutları ve Kür Şartları

Kiriş deneylerinde aderans dayanımının belirlenmesi için kullanılacak nihai geopolimer karışım reçetesinin belirlenmesi amacı ile her bir Ms modülündeki karışımlar 3 tekrarlı olacak şekilde 15*15*15 cm'lik kalıplara yerleştirilmiş (Şekil 5.4) ve her bir set ayrı ayrı 80, 100 ve 120 °C'de 24 saat boyunca etüvde kürlenmiştir (Şekil 5.5). Etüvde kürlenerek dayanım kazanan numuneler, etüvden çıkarılarak tek eksenli basınç dayanımı testine tabi tutulması amacı ile 24 saat boyunca laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 5.4. Taze betonun kalıplara yerleştirilmesi



Şekil 5.5. Etüvde bekletilen geopolimer beton numuneleri ve etüve ait örnek kür şartları

5.2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Tez çalışması kapsamında 4 farklı Ms modülü, 3 farklı sıcakta 3 tekrar olacak şekilde kürlenmiş 36 adet geopolimer beton laboratuvarında tek eksenli basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur (Şekil 5.6.).



Şekil 5.6. Basınç dayanım testi uygulanmış bir geopolimer beton numunesi

5.2.6. Mafsallı Kiriş Deneyi Numunelerinin Üretimi ve Kür Uygulaması

Ön deneyler kapsamında hazırlanarak kürlenmiş 36 adet geopolimer beton numunelerinden elde edilen optimum işlenebilirlik ve dayanım parametrelerine göre seçilen geopolimer beton reçetesi ile mafsallı kiriş dökümü aşamasına geçilmiştir. Mafsallı kiriş numunelerinin üretimi için, Şekil 5.7'de görülen çelik donatı ve etriyeler kullanılmıştır. Şekilde görülen etriye sistemi deney esnasında betonda kesme çatlağı oluşmadan deneyin tamamlanması için çok önemlidir. Aderans deneyleri kapsamında kullanılan çelik kalıplarda aderans donatısına ilave olarak 2 parça Ø8'lik donatı kalıp sökülünden sonra numunelerin taşınması ve yerleştirilmesi amacı ile eklenmiştir. Aderans testi için hazırlanan kiriş kalıpları Şekil 5.8.'de sunulmuştur.

Aderans performansları belirlenecek aderans donatılarının kenetlenme boyunu sınırlandırmak için plastik kılıflar kullanılmıştır (Şekil 5.9.). Kullanılan kılıflar ile donatıların arasına beton girmesini önlemek için silikon dolgusu yapılmıştır. Kenetlenme boyu ayarlanan aderans donatısı, etriyeler ve taşıma kolaylığı sağlayan ek donatılar yağlanan ve paspayları ayarlanan kalıplara yerleştirilerek döküm aşamasına geçilmiştir.



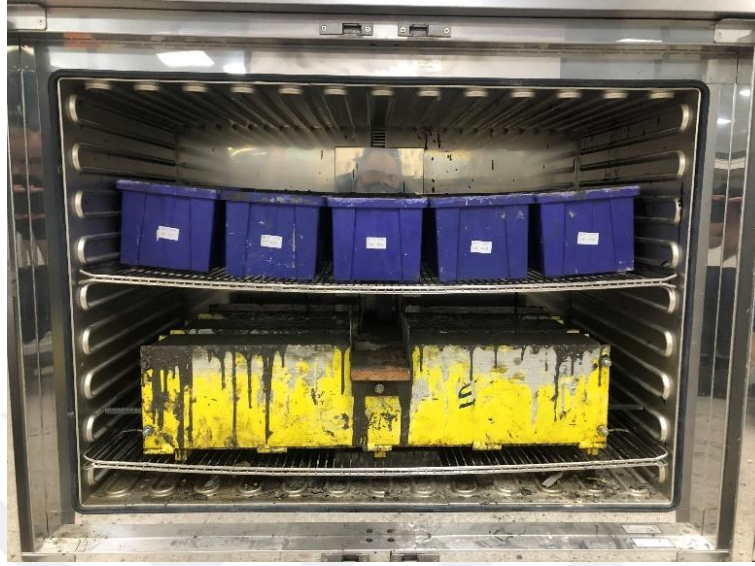
Şekil 5.9. Donatının kenetlenme boyunun sınırlandırılması

Hazırlanan kalıplara taze betonlar vibrasyon işlemi kullanılarak yerleştirilmiştir. vibrasyon işlemi uygulanarak hazırlanan numuneler Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10. Taze betonun kalıplara yerleştirilmesi ve masa tipi vibratörle sıkıştırılması

Hazırlanan geopolimer kiriş numuneleri ve dayanımların belirlenmesi amacı ile hazırlanan küp kalıp numuneler optimum dayanım değerini veren sıcaklık değerinde 24 saat boyunca kürlenmiştir (Şekil 5.11.)



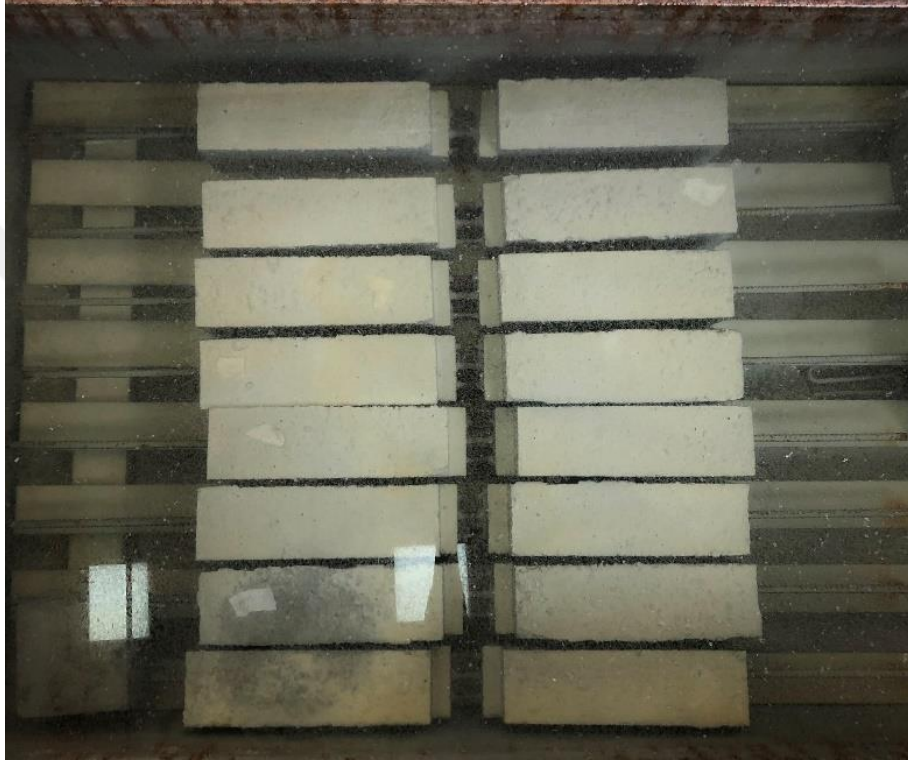
Şekil 5.11. Etüvde bekletilen kiriş numuneleri

24 saat süreyle ısıtılma uygulanan mafsallı kirişler etüvden çıkarıldıktan sonra kalıpları sökülere deneye hazır hale getirilmiştir. Mafsallı kiriş deneyi için hazırlanmış kiriş örnekleri Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12. Üretilen geopolimer kiriş numuneleri

Geopolimer kiriş üretimi yapıldıktan sonra mafsallı kiriş yöntemi ile aderans performansının kıyaslanması amacı ile geleneksel portland çimentolu kiriş üretimi aşamasına geçilmiştir. Bu amaçla geopolimer kirişler ile benzer dayanıma sahip olacak şekilde karışım tasarımı hazırlanmış küp ve kiriş numuneler hazırlanarak kirece doymun kür havuzunda 28 gün boyunca kürlenmiştir. Kür havuzunda kürlenerek geleneksel Portland çimentolu kirişlere ait bir görsel Şekil 5.13’te sunulmuştur.



Şekil 5.13. Kür havuzunda bekletilen geleneksel beton numuneleri

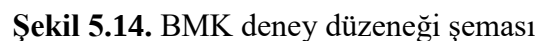
5.2.7. Mafsallı Kiriş Deney Düzeneği, Yöntemi ve Uygulanması

Aderans deneyleri için 3 farklı kenetlenme boyuna (5Ø - 10Ø - 20Ø) sahip betonlar 3 tekrarlı olacak şekilde kullanılarak 9 adet geleneksel beton ile üretilmiş kiriş numunesi ve 9 adet geopolimer beton ile üretilmiş kiriş numunesi hazırlanmıştır. Betonarmede nervürlü çubuklar için kenetlenme boyu TS 500 “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları” 2000’de belirtilen “Eş. 5” kullanılarak belirlenmektedir.

$$l_b = (0.12 * \frac{f_{yd}}{f_{cta}} * \phi) \geq 20\phi \quad (5)$$

$\emptyset$ ise donatı çapını temsil etmektedir.

Donatıda meydana gelen kuvvet değerine karşılık gelen aderans gerilmesinin (τ_b) donatının üzerinde düzgün yayıldığı varsayımı kullanılarak hesaplama yapılmaktadır. Deney sırasında uygulanan yükler yük hücresi ve sıyrılma değerleri ise Potansiyometrik Cetvel’ler kullanılarak ölçülür. Bu çalışmada kullanılan BMK deney yöntemi Şekil 5.14’te gösterilmiştir..



Deney sırasında, betonun yapısı ve yüklemeler nedeniyle donatıların her iki ucunda farklı sıyrılma değerleri oluşabilir. Güvenli bir yaklaşım için, bu farklı değerler arasından büyük olanın göz önünde bulundurulması önerilir.

Deneyde; A donatı alanını, Ø donatı çapını göstermek üzere donatının kesit alanı “Eş. 5.1” yardımıyla ;

$$A=\pi*D^2 /4 \quad (5.1)$$

olarak elde edilir. Çelik mafsallın orta noktasında moment sıfır olduğundan “Eş. 5.2” elde edilir;

$$(P.l)/2 = F.h \quad (5.2)$$

Üretilen kirişlerde l= 25 cm ve h= 10 cm olduğundan F kuvveti P kuvveti yardımıyla “Eş. 5.3” kullanılarak dolaylı bir şekilde bulunur;

$$F=1,25.P \quad (5.3)$$

Kenetlenme uzunluğu (ℓb) boyunca, denge durumunda donatıya etkiyen F çekme kuvvetinin, donatının etrafında oluşan toplam aderans kuvvetine eşit olması gerektiğinden σ_s donatıdaki gerilmeyi, τ_b aderans gerilmesini ve ℓb kenetlenme boyunu göstermek üzere “Eş. 5.4” elde edilir;

$$\Sigma(\tau_b * \text{birim alan}) = F, \tau_b * (\pi\varnothing) * \ell b = A * \sigma_s = \frac{\pi*\varnothing^2}{4} * \sigma_s \quad (5.4)$$

Eşitlikte gerekli düzenlemeler yapıldığında herhangi bir yük değerine karşılık gelen τ_b aderans gerilmesi aşağıdaki verilen “Eş. 3.12” yardımıyla elde edilir.

$$\tau_b = (\sigma_s * \varnothing)/4\ell b \quad (5.5)$$

Önceden belirtildiği gibi, standart bir BMK deneyi, mafsallı kirişler kullanılarak donatılara eğilme durumunda çekme gerilmeleri vererek betondan sıyırmaya çalışır ve bu şekilde beton-

donatı aderansını belirler. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen kiriş deneylerine ait bazı görseller Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.15. BMK deney düzeneği



Şekil 5.16. BMK deneyi uygulanan bir kirişte meydana gelen sıyrılma



Şekil 5.17. BMK deneyi uygulanmış bir kirişte donatının kopması



Şekil 5.18. BMK deneyi uygulanmış bazı kiriş numuneleri

Mafsallı kiriş numuneleri, 100 ton kapasiteli hidrolik bir yükleme çerçevesi kullanılarak yüklenmiştir. Her bir mafsallı kiriş numunesi, sabit ve hareketli iki mesnetin üzerine yerleştirilmiş ve orta noktasından yüklenmiştir.

Kirişlere uygulanan düşey yükler, dataloggera bağlı yük hücresi (loadcell) aracılığıyla ölçülmüştür. Numunelerin her iki ucunda ise, donatının betondan sıyrılma miktarını ölçmek için 0,01 mm hassasiyetinde potansiyometrik cetveller kullanılmıştır. Deneyde donatıdaki çekme kuvvetini dolaylı olarak bulmak için, kiriş numune ortasındaki açıklığa çelik bir mafsallı yerleştirilmiştir. Ayrıca, aderansı incelenen donatının her iki tarafına yerleştirilen ilave donatılar, donatının eğilme veya burkulma gibi etkilerden korunmasını sağlayarak, kiriş numune yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra kesilmiştir.

Tüm üretilen kirişler, kirişin özelliklerini göstermek için belirli bir kodlama kullanılarak etiketlenmiştir. Geopolimer beton kirişleri için kodlama ayrıntıları Tablo 5.7'de, geleneksel Portland çimentolu beton kirişleri için ise Tablo 5.8'de sunulmuştur..

Tablo 5.7. Geopolimer Beton Kirişler

Numune Kodu	Kodlamanın Açılımı
MS1.3-100-5Φ/1	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-5Φ Donatı Çapı-No:1
MS1.3-100-5Φ/2	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-5Φ Donatı Çapı-No:2
MS1.3-100-5Φ/3	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-5Φ Donatı Çapı-No:3
MS1.3-100-10Φ/1	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-10Φ Donatı Çapı-No:1
MS1.3-100-10Φ/2	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-10Φ Donatı Çapı-No:2
MS1.3-100-10Φ/3	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-10Φ Donatı Çapı-No:3
MS1.3-100-20Φ/1	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-20Φ Donatı Çapı-No:1
MS1.3-100-20Φ/2	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-20Φ Donatı Çapı-No:2
MS1.3-100-20Φ/3	MS Modül 1.3-100 C Kürlenme Sıcaklığı-20Φ Donatı Çapı-No:3

Tablo 5.8. Geleneksel portland çimentolu kirişler

Numune Kodu	Kodlamanın Açılımı
PÇ-28D-5Φ/1	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-5Φ Donatı Çapı-No:1
PÇ-28D-5Φ/2	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-5Φ Donatı Çapı-No:2
PÇ-28D-5Φ/3	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-5Φ Donatı Çapı-No:3
PÇ-28D-10Φ/1	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-10Φ Donatı Çapı-No:1
PÇ-28D-10Φ/2	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-10Φ Donatı Çapı-No:2
PÇ-28D-10Φ/3	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-10Φ Donatı Çapı-No:3
PÇ-28D-20Φ/1	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-20Φ Donatı Çapı-No:1
PÇ-28D-20Φ/2	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-20Φ Donatı Çapı-No:2
PÇ-28D-20Φ/3	Portland Çimento-28 Gün Kür Süresi-20Φ Donatı Çapı-No:3

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Çalışmada Üretilen Geopolimer Betonun Taze Beton Özelliklerine Ait Bulgular

Çalışma kapsamında geopolimer betonun taze halde işlenebilirliğinin ve sertleşmiş halde dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacı ile 3'er adet 15*15*15 cm'lik küp numunelere göre (döküm esnasında oluşabilecek kayıplar düşünülerek %15 fazla hesaplanmış) karışım hesapları yapılmış ve her bir karışım için yayılma deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda Tablo 6.1.'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Slump Deney Sonuçları Tablosu

Ms	MALZEMELER (g)				Yayılma Değerleri (cm)		
	Uçucu Kül	Agrega	Sodyum Silikat	Sodyum Hidroksit	Yayılma Ø1	Yayılma Ø2	Yayılma Øort
1,1	6115,9	18347,8	2440,8	303,8	43	44	43,5
1,2	6046,8	18140,4	2632,6	270,9	50	51	50,5
1,3	5979,2	17937,6	2820,1	238,8	66,5	63,5	65
1,4	5913,1	17739,3	3003,5	207,3	71	70	70,5

Tabloda 1,1, 1,2, 1,3 ve 1,4 Ms modülüne sahip geopolimer karışımların hesap karışım miktarları ve bu karışıma bağlı olarak tasarlanan betonların yayılma çapları verilmiştir. Tabloda verilen değerler incelendiğinde; Ms modülündeki artış ile birlikte UK+Agrega miktarında düşüş gözlenmekle birlikte alkali aktivatör olarak kullanılan SS+SH karışımında bir artış gözlenmiştir. Bu durum beton yayılma çapında artan Ms modülüne bağlı olarak bir artışa neden olmuştur. 1,1 Ms modülünde ortalama 43,5 cm olan yayılma çapı, 1,2 Ms modülünde 50,5'e, 1,3 Ms modülünde 65'e ve 1,4 Ms modülünde de 70,5'e kadar çıktığı gözlenmiştir.

6.2. Üretilen Geopolimer Betonların Dayanım Özelliklerine Ait Bulgular

Slump değerleri belirlenen 15*15*15 cm'lik kalıplara dökülen geopolimer numunelere ayrı ayrı 80, 100 ve 120 °C sıcaklıkta ısıtılma kür uygulanmıştır. Isıl kür işlemi etüvde 24 saat boyunca uygulanmış ve numuneler ısıtılma kür aşamasından sonra kalıptan çıkarılan geopolimer numuneleri 24 saat boyunca laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmıştır. Tek eksenli basınç dayanımına hazır hale gelen numuneler üzerinde dayanım testleri belirli standartlara uygun olarak uygulanmıştır. Isıl kür işleminde farklı sıcaklık değerlerinin Ms modülüne bağlı olarak geopolimer betonlarda dayanıma etkileri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Kürlenme sıcaklığı 80 °C olarak üretilen geopolimer betonlar için yapılan basınç dayanım deneylerine ait sonuçlar Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. 80 Derece Kürlenen Betonlara Ait Basınç Dayanım Deney Sonuçları Tablosu

80 °C Basınç Dayanım Değerleri			
Ms	MPa₁	MPa₂	MPa₃
1,1	52,93	53,1	54,32
1,2	49,41	45,97	39,12
1,3	46,44	46,11	44,51
1,4	39,19	39,63	40,3

Bulgular incelendiğinde, 80 °C’lik ısıtılma uygulamasında en yüksek basınç dayanımı değerinin 1,1 Ms modülüne sahip numunelerde ortalama 53,45 MPa olarak, en düşük basınç dayanımının ise 1,4 Ms modülüne sahip numunelerde ortalama 39,71 MPa olarak elde edildiği görülmektedir. Bulgular incelendiğinde sabit sıcaklık altında Ms modülündeki artışın basınç dayanımını düşürdüğü söylenebilir.

Kürlenme sıcaklığı 100 °C olarak üretilen geopolimer betonlar için yapılan basınç dayanım deneylerine ait sonuçlar Tablo 6.3’de verilmiştir.

Tablo 6.3. 100 Derece Kürlenen Betonlara Ait Basınç Dayanım Deney Sonuçları Tablosu

100 °C Basınç Dayanım Değerleri			
Ms	MPa₁	MPa₂	MPa₃
1,1	74,58	71,55	61,4
1,2	58,61	56,97	58,54
1,3	54,1	53,58	53,8
1,4	44,71	45,22	46,33

Bulgular incelendiğinde, 100 °C’lik ısıtılma uygulamasında en yüksek basınç dayanımı değerinin 1,1 Ms modülüne sahip numunelerde ortalama 69,18 MPa olarak, en düşük basınç dayanımının ise 1,4 Ms modülüne sahip numunelerde ortalama 45,42 MPa olarak elde

edilmiştir. Bulgular incelendiğinde 80 °C ısıtma kür uygulamasına benzer olarak sabit sıcaklık altında Ms modülündeki artışın basınç dayanımını düşürdüğü söylenebilir.

Kürleme sıcaklığı 120 °C olarak üretilen geopolimer betonlar için yapılan basınç dayanım deneylerine ait sonuçlar Tablo 6.4’de verilmiştir.

Tablo 6.4. 120 Derece Kürlenen Betonlara Ait Basınç Dayanım Deney Sonuçları Tablosu

120 °C Basınç Dayanım Değerleri			
Ms	MPa ₁	MPa ₂	MPa ₃
1,1	59,65	54,22	60,53
1,2	59,94	57,74	53,74
1,3	47,6	46,96	42,09
1,4	38,5	41,26	41,95

Bulgular incelendiğinde, 120 °C’lik ısıtma kür uygulamasında en yüksek basınç dayanımı değerinin 1,1 Ms modülüne sahip numunelerde ortalama 58,13 MPa olarak, en düşük basınç dayanımının ise 1,4 Ms modülüne sahip numunelerde ortalama 40,57 MPa olarak elde edilmiştir. Bulgular genel olarak incelendiğinde 80 ve 100 °C ısıtma kür uygulamalarına benzer olarak sabit sıcaklık altında Ms modülündeki artışın basınç dayanımını düşürdüğü söylenebilir.

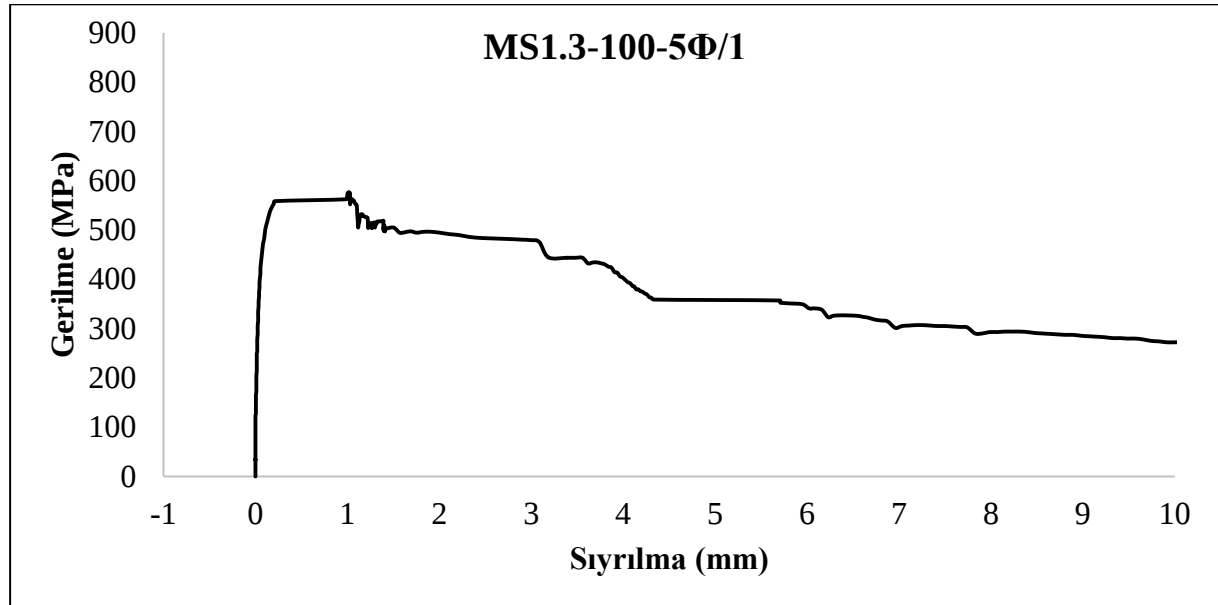
Elde edilen yayılma değerleri ve basınç dayanımı sonuçları için genel bir değerlendirme yapılacak olursa, işlenebilirlik değerlerinin Ms modülündeki artışa bağlı olarak sürekli artış gösterdiği görülmektedir. Buradaki artışın, karışım içerisindeki alkali aktivatör/kuru karışım oranındaki artışa bağlı olarak ortaya çıktığı söylenebilir. Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, geopolimer numunelerde Ms modülündeki her artış sıcaklıktan bağımsız olarak basınç dayanımı değerinde düşüşe neden olmuştur. Buna ek olarak Ms modülünden bağımsız olarak bütün numunelerde, kür sıcaklığının 100°C’de optimum basınç dayanımı değeri verdiği; bu değere kadar olan artışların basınç dayanımında artışa ve bu değerden sonraki sıcaklık artışlarının da basınç dayanımı değerlerinde düşüşe sebep olduğu gözlenmiştir. Özet olarak, işlenebilirlik değerindeki artış dayanıma olumsuz etkiye sahiptir.

Elde edilen veriler ışığında, mafsallı kiriş yöntemi ile aderans performansının incelenmesi amacı ile hazırlanacak olan kiriş numunelerde yeterli işlenebilirliğe ve dayanıma sahip olacak geopolimer beton parametreleri 1,3 Ms modülü, ve 100°C sıcaklık olarak seçilmiştir.

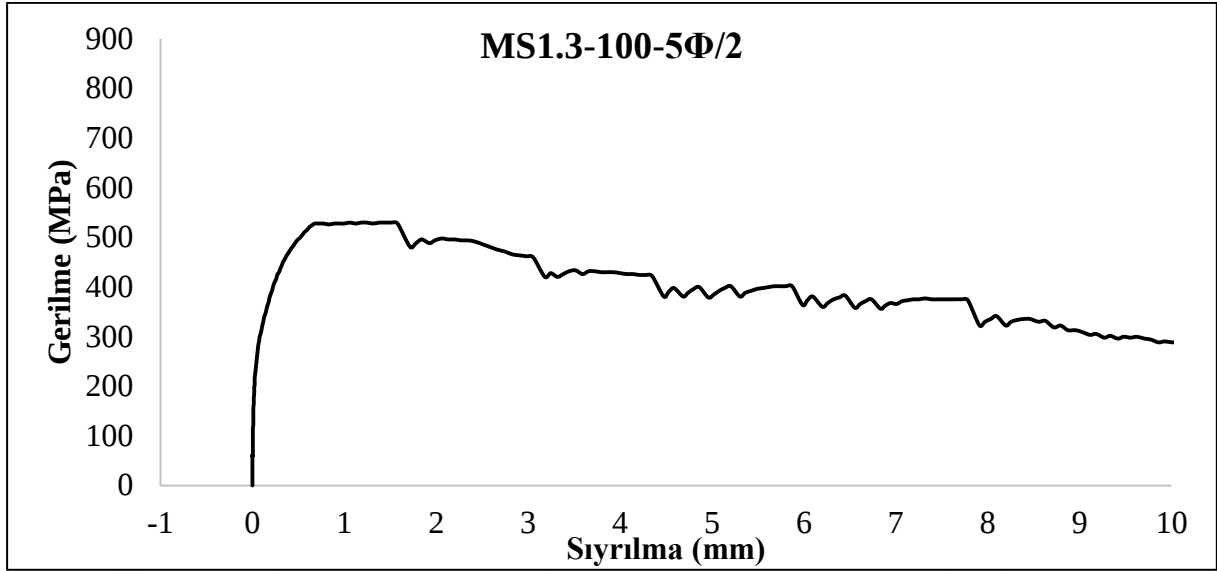
6.3. Mafsallı Kiriş Deneyinde Elde Edilen Donatı Aderans Performansına Ait Bulgular

Ön deneylerde 1,1, 1,2, 1,3 ve 1,4 Ms modülü ile 15*15*15 cm'lik kalıplarda 80°C, 100°C ve 120°C de 24 saat boyunca kürlenен numunelerin yayılma ve basınç dayanımları birlikte değerlendirilmiş olup, tez kapsamında kullanılan kiriş kalıplarına betonun yerleşebilmesi ve yeterli dayanımı sağlayabilmesi parametresine bağlı olarak 1,3 Ms modülünde 100°C'de kürlenен beton sınıfı mafsallı kiriş deneylerinde kullanılmak üzere seçilmiştir.

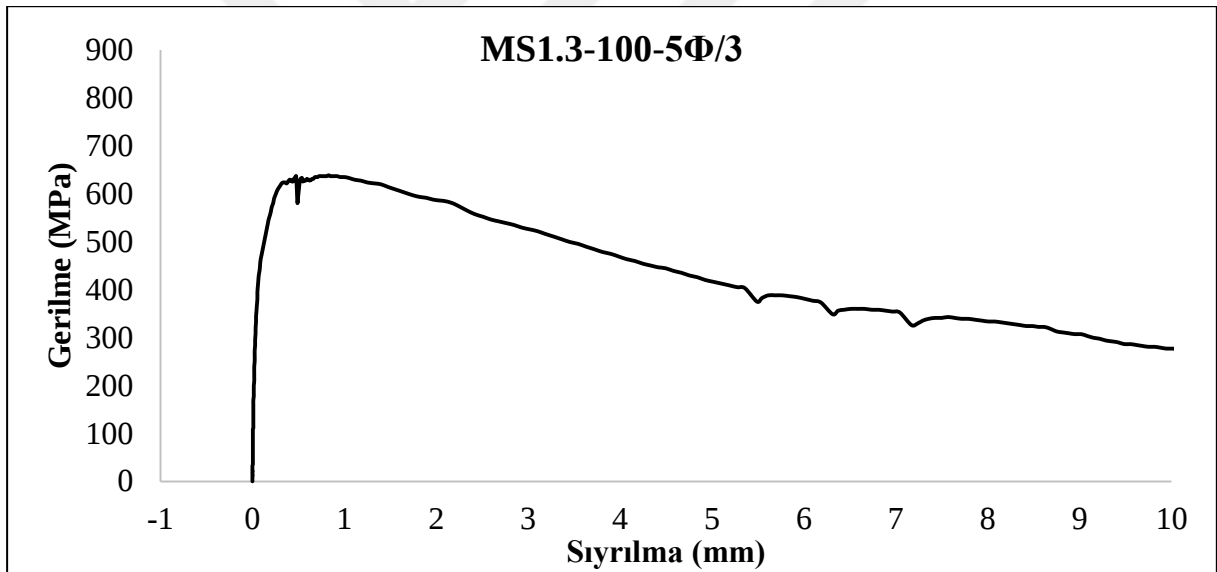
Ön deneyler sonucunda optimum işlenebilirlik ve dayanım parametrelerinin belirlendiği geopolimer beton reçetesi ile hazırlanan kirişler ve benzer dayanımlara sahip geleneksel portland çimentolu kiriş numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde Belçika mafsallı kiriş deneyleri 3 tekrar şeklinde gerçekleştirilmiştir. MS 1.3, 100 C ısıl kür uygulanan kirişlerden 5 fi kenetlenme boyu için elde edilen gerilme sıyrılma grafikleri sırasıyla Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.1. MS1.3-100-5Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



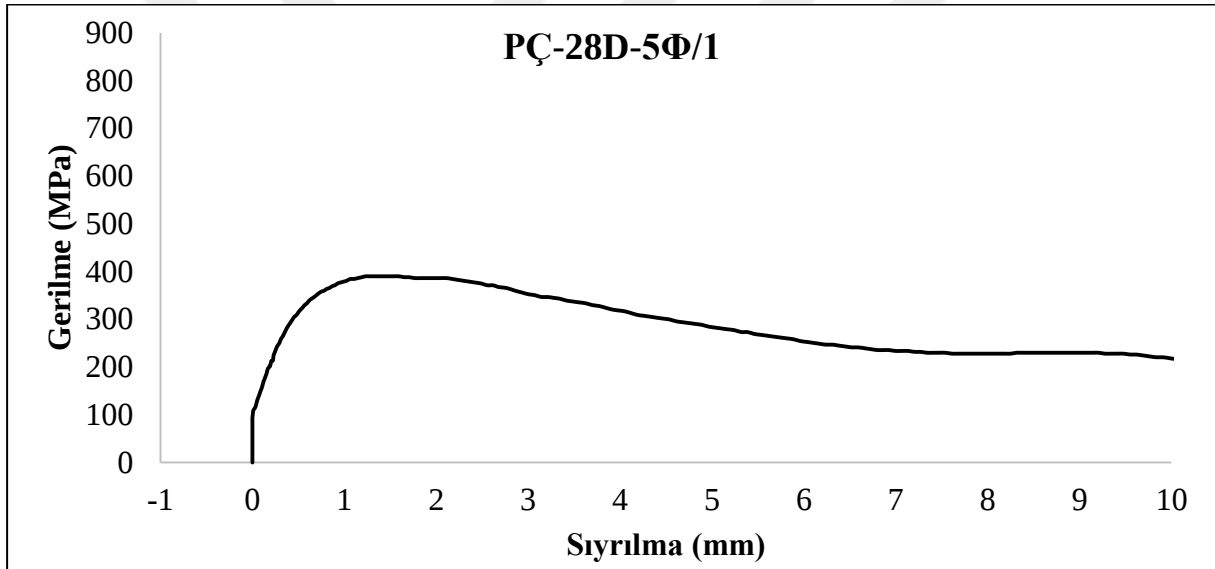
Şekil 6.2. MS1.3-100-5Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



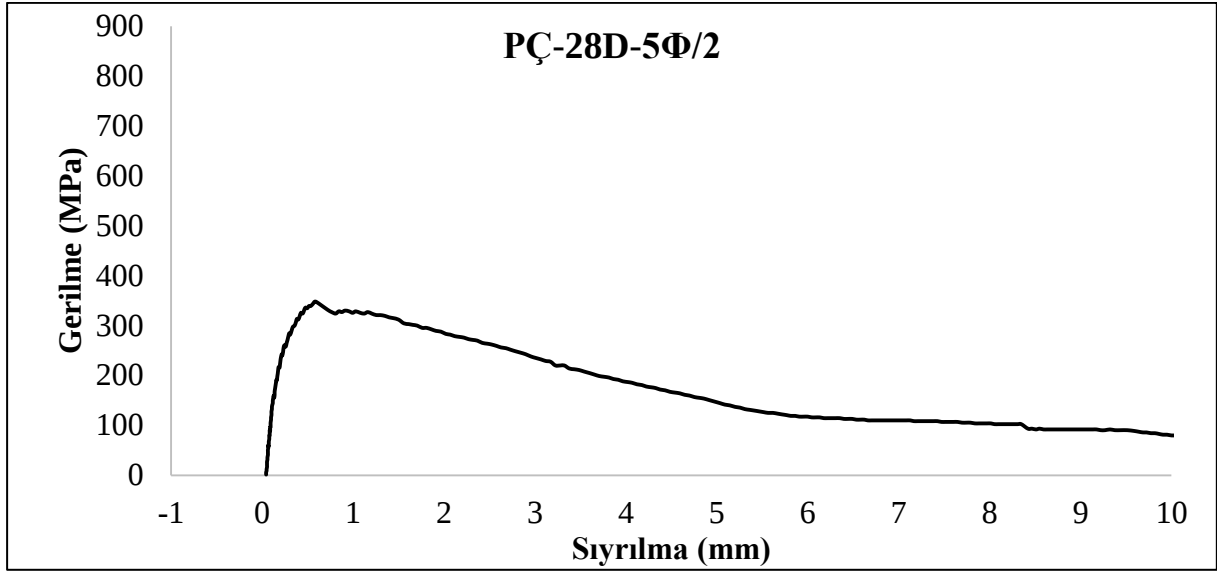
Şekil 6.3. MS1.3-100-5Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği

NUMUNE KODU	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme Kuvveti (N)	τ_u (MPa)	MG-S (mm)	İS-G (MPa)	DST
MS1.3-100-5Φ/1	576,64	65216,25	28,83	1,53	75,38	AK
MS1.3-100-5Φ/2	529,53	59888,13	26,48	1,51	77,26	AK
MS1.3-100-5Φ/3	638,82	72249,37	31,94	1,41	84,80	AK
Ortalama	581,66	65784,58	29,08	1,48	79,15	AK

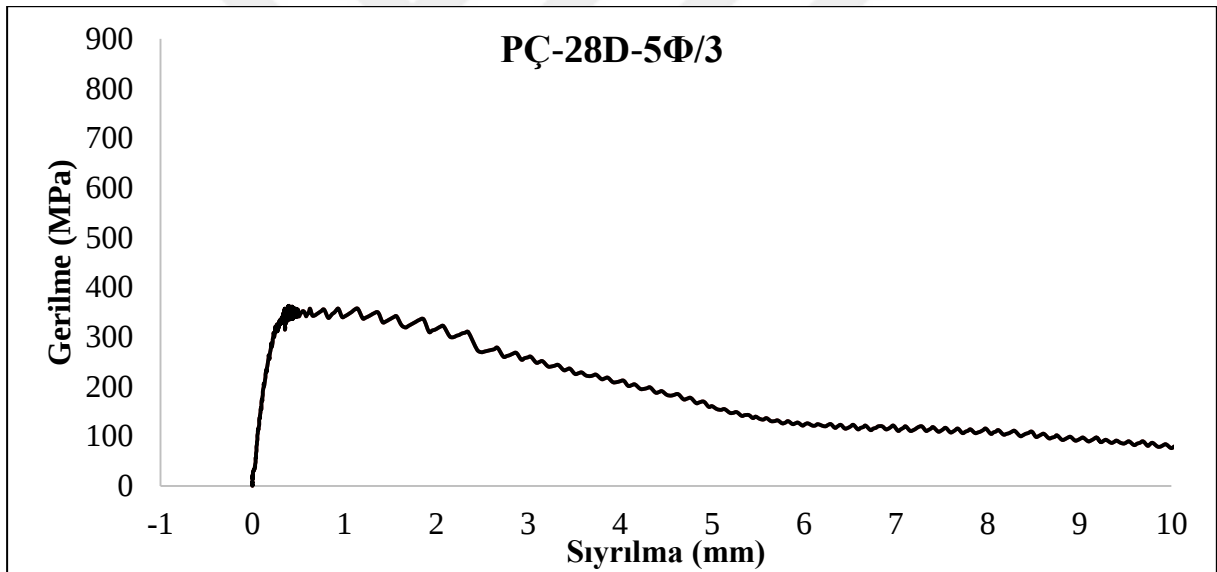
Gerilme-sıyrılma grafiği incelendiğinde, MS1.3-100-5Φ/1 numaralı numunede maksimum gerilme 576 MPa iken maksimum gerilmede ortaya çıkan sıyrılma 1.53 mm dir. MS1.3-100-5Φ/2 ve MS1.3-100-5Φ/3 numaralı numunelerde ise maksimum gerilmeler sırasıyla 529 ve 638 MPa olup bu maksimum gerilmelerde sıyrılmalar sırasıyla 1,51 ve 1,41 mm dir. Deneylerde, ilk sıyrılmanın hangi gerilme değerinde oluştuğu ise önemli bulgulardan bir tanesi olarak dikkati çekmektedir. Tabloda göröleceği üzere MS1.3-100-5Φ/1 numaralı numunede ilk sıyrılma oluştuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmesi 75,38 MPa'dır. MS1.3-100-5Φ/2 ve MS1.3-100-5Φ/3 numaralı numunelerde ise ilk sıyrılma oluştuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmeleri sırasıyla 77,26 ve 84,80 MPa olarak ölçölmüştür.



şekil 6.4. PC-28D-5Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



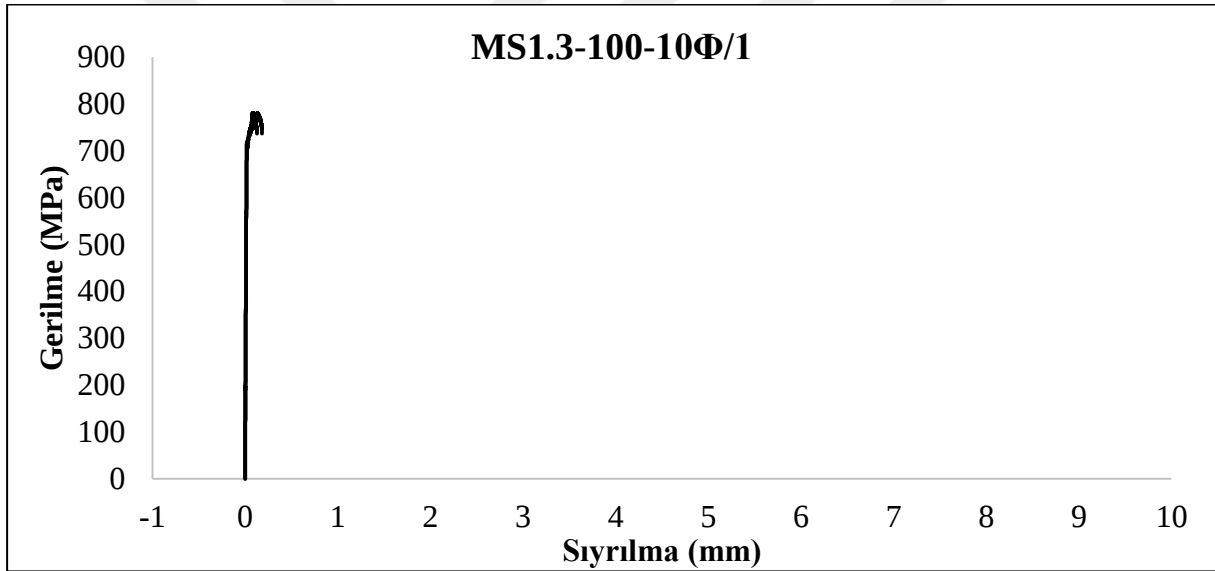
Şekil 6.5. PÇ-28D-5Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



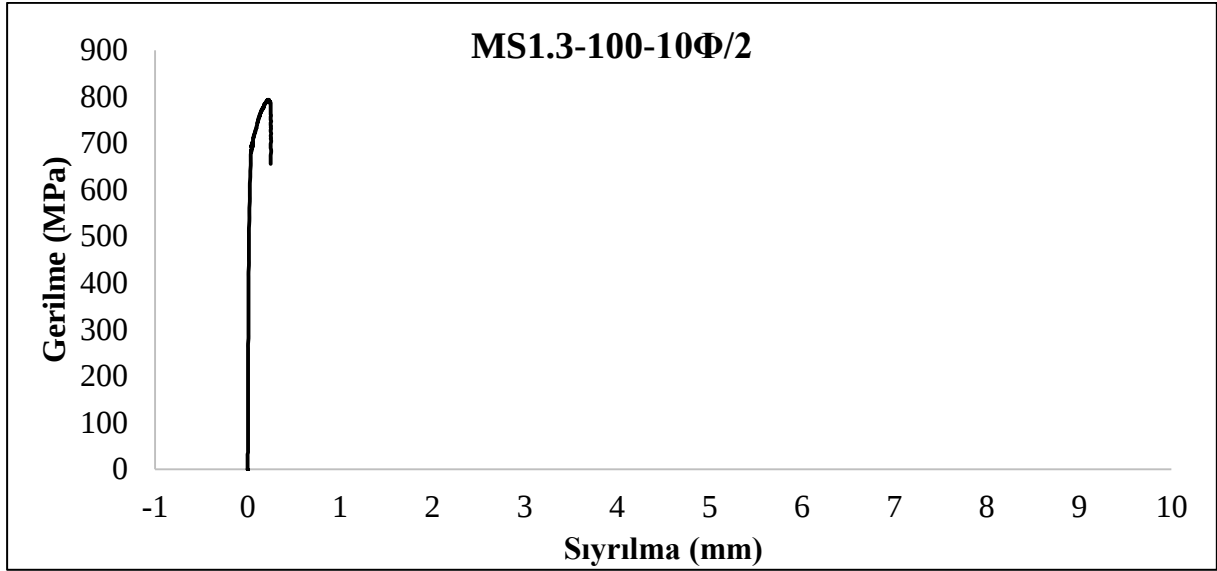
Şekil 6.6. PÇ-28D-5Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği

NUMUNE KODU	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme Kuvveti (N)	τ_u (MPa)	MG-S (mm)	İS-G (MPa)	DST
PÇ-28D-5Φ/1	390,08	44116,9	19,5	2,17	47,11	AK
PÇ-28D-5Φ/2	348,14	39373,7	17,407	2,29	45,22	AK
PÇ-28D-5Φ/3	362,57	41005,4	18,13	2,2	31,74	AK
Ortalama	366,93	41498,7	18,35	2,22	41,36	AK

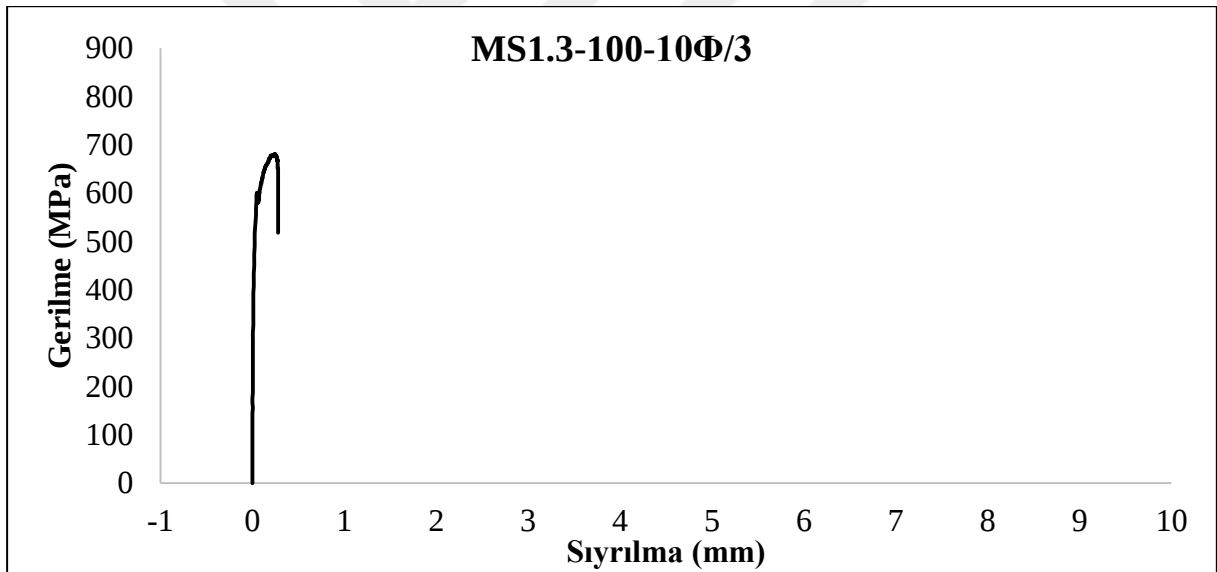
Gerilme-sıyrılma grafiği incelendiğinde, PÇ-28D-5Φ/1 numaralı numunede maksimum gerilme 390 MPa iken maksimum gerilmede ortaya çıkan sıyrılma 2.17 mm dir. PÇ-28D-5Φ/2 ve PÇ-28D-5Φ/3 numaralı numunelerde ise maksimum gerilmeler sırasıyla 281,92 ve 362,57 MPa olup bu maksimum gerilmelerde sıyrılmalar sırasıyla 2,29 ve 2,20 mm dir. Deneylerde, ilk sıyrılmanın hangi gerilme değerinde olduğu ise önemli bulgulardan bir tanesi olarak dikkati çekmektedir. Tabloda görüleceği üzere PÇ-28D-5Φ/1 numaralı numunede ilk sıyrılma oluştuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmesi 47,11 MPa'dır. PÇ-28D-5Φ/2 ve PÇ-28D-5Φ/3 numaralı numunelerde ise ilk sıyrılma oluştuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmeleri sırasıyla 40,77 ve 31,74 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.7. MS1.3-100-10Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



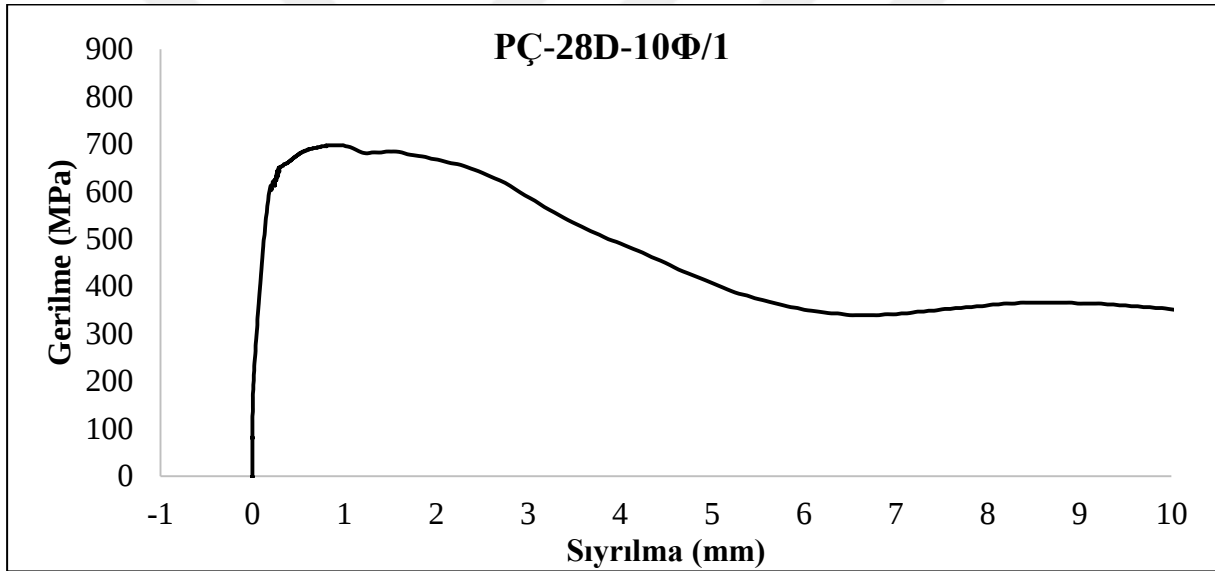
Şekil 6.8. MS1.3-100-10Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



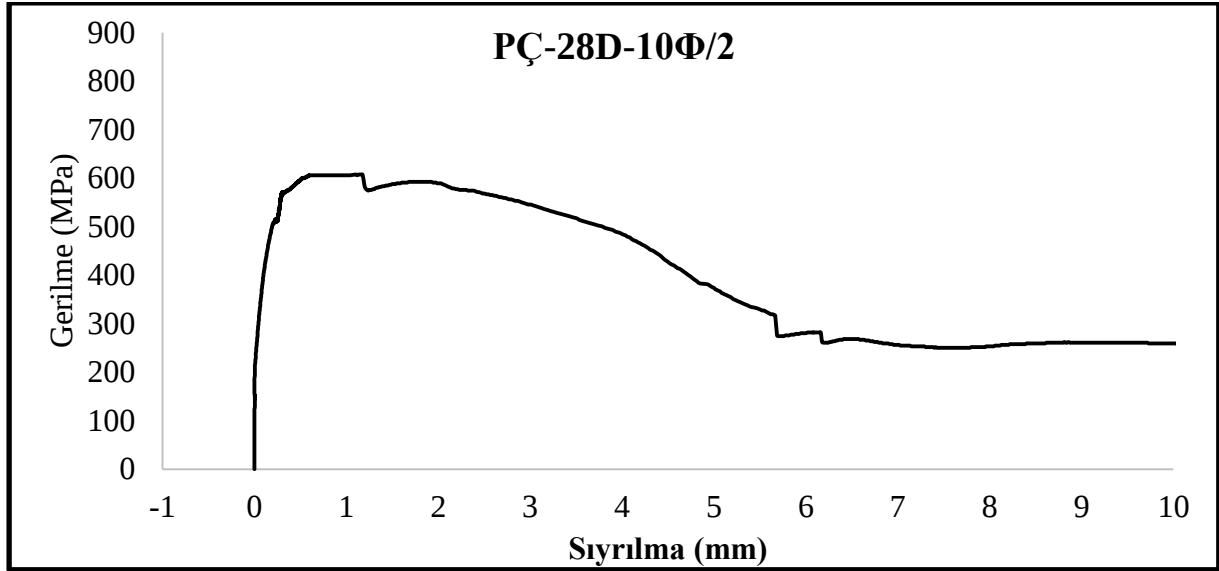
Şekil 6.9. MS1.3-100-10Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği

NUMUNE KODU	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme Kuvveti (N)	τ_u (MPa)	MG-S (mm)	İS-G (MPa)	DST
MS1.3-100-10Φ/1	780,16	88234,02	19,50	0,36	126,26	DK
MS1.3-100-10Φ/2	793,35	89725,63	19,83	0,40	137,56	DK
MS1.3-100-10Φ/3	680,28	76938,13	17,01	0,41	131,91	DK
Ortalama	751,26	84965,92	18,78	0,39	131,91	DK

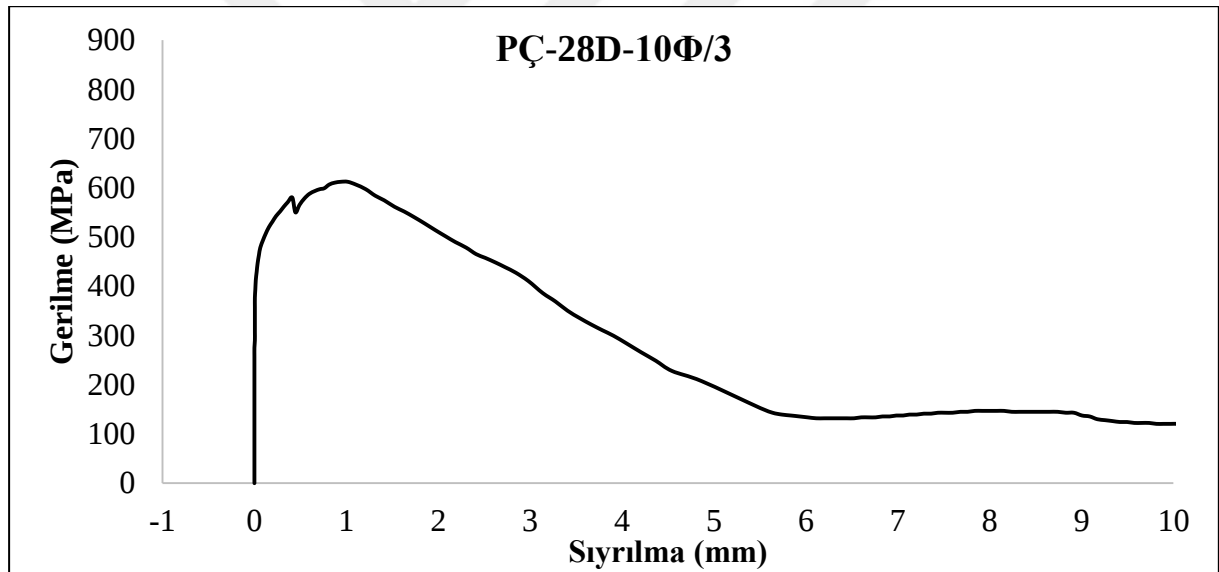
Gerilme-sıyrılma grafiği incelendiğinde, MS1.3-100-10Φ/1 numaralı numunede maksimum gerilme 780 MPa iken maksimum gerilmede ortaya çıkan sıyrılma 0,36 mm dir. MS1.3-100-10Φ/2 ve MS1.3-100-10Φ/3 numaralı numunelerde ise maksimum gerilmeler sırasıyla 793 ve 680 MPa olup bu maksimum gerilmelerde sıyrılmalar sırasıyla 0,40 ve 0,41 mm dir. Deneylerde, ilk sıyrılmanın hangi gerilme değerinde oluştuğu ise önemli bulgulardan bir tanesi olarak dikkati çekmektedir. Tabloda göröleceği üzere MS1.3-100-10Φ/1 numaralı numunede ilk sıyrılma oluştuğuında donatıdan betona aktarılan kayma gerilmesi 126,26 MPa'dır. MS1.3-100-10Φ/2 ve MS1.3-100-10Φ/3 numaralı numunelerde ise ilk sıyrılma oluştuğuında donatıdan betona aktarılan kayma gerilmeleri sırasıyla 137,56 ve 131,91 MPa olarak ölçölmüştür.



şekil 6.10. PC-28D-10Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



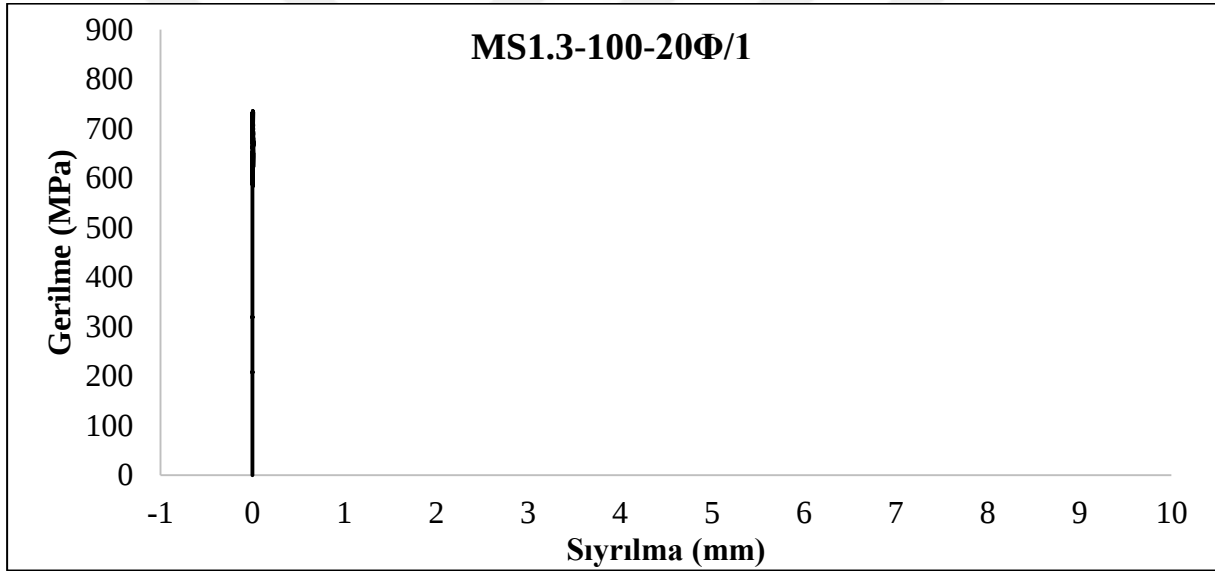
Şekil 6.11. PÇ-28D-10Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



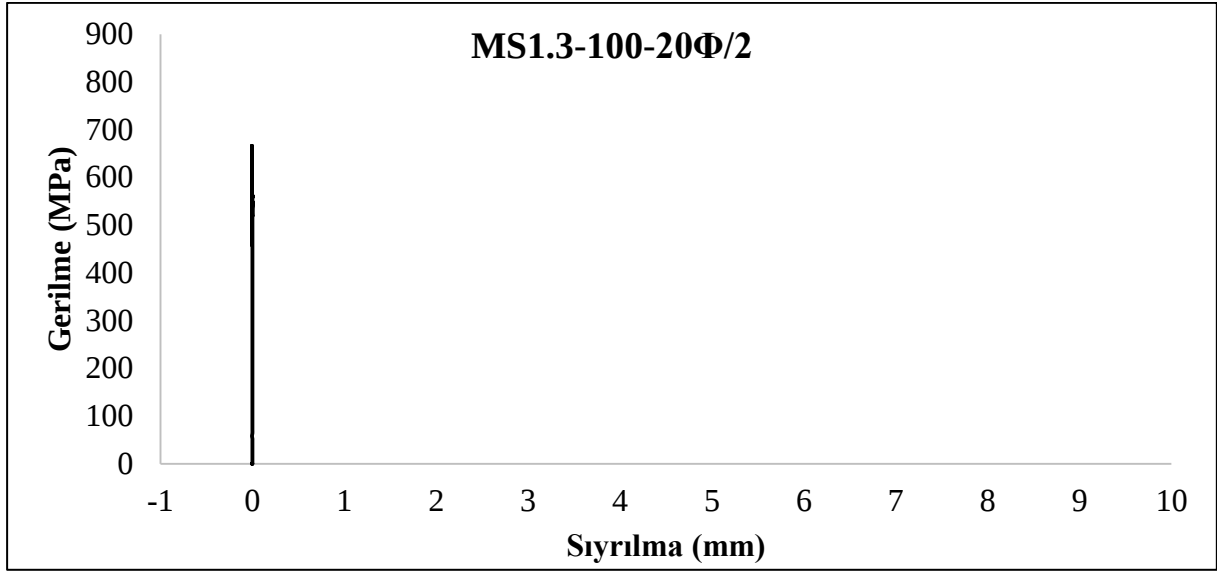
Şekil 6.12. PÇ-28D-10Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği

NUMUNE KODU	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme Kuvveti (N)	τ_u (MPa)	MG-S (mm)	İS-G (MPa)	DST
PÇ-28D-10Φ/1	697,24	78856,25	17,43	1,87	116,84	AK
PÇ-28D-10Φ/2	607,54	68711,16	15,19	1,61	123,6	AK
PÇ-28D-10Φ/3	612,44	69265,63	15,31	1,1	131,91	AK
Ortalama	639,07	72277,68	15,98	1,53	124,12	AK

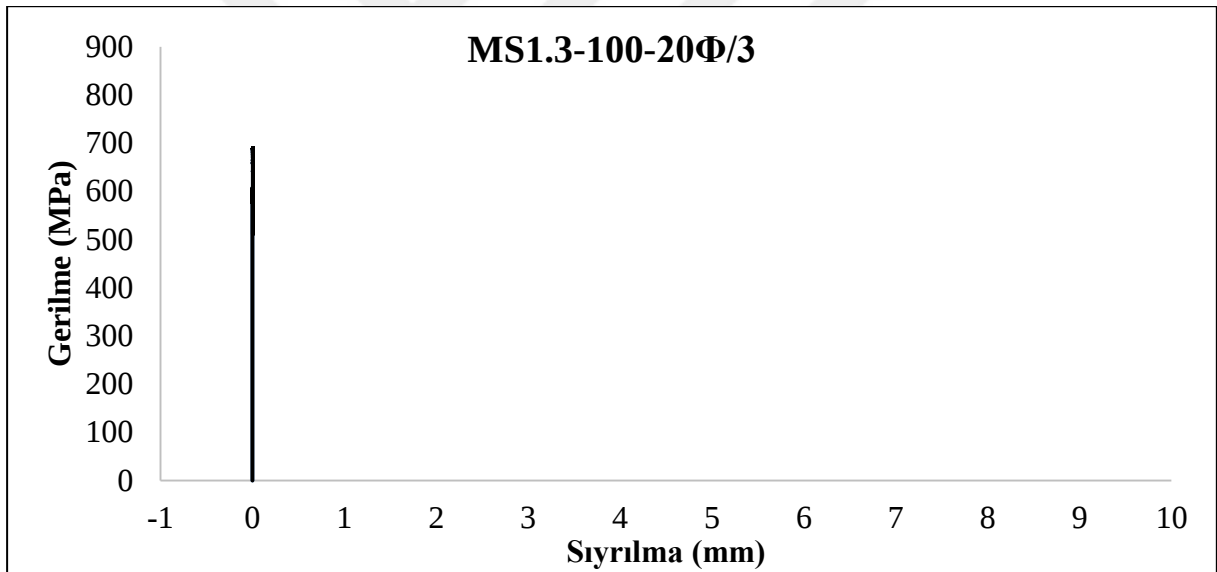
Gerilme-sıyrılma grafiği incelendiğinde, PÇ-28D-10Φ/1 numaralı numunede maksimum gerilme 697 MPa iken maksimum gerilmede ortaya çıkan sıyrılma 1,87 mm dir. PÇ-28D-10Φ/2 ve PÇ-28D-10Φ/3 numaralı numunelerde ise maksimum gerilmeler sırasıyla 607,54 ve 612,44 MPa olup bu maksimum gerilmelerde sıyrılmalar sırasıyla 1,61 ve 1,10 mm dir. Deneylerde, ilk sıyrılmanın hangi gerilme değeriinde oluğu ise önemli bulgulardan bir tanesi olarak dikkati çekmektedir. Tabloda görüleceği üzere PÇ-28D-10Φ/1 numaralı numunede ilk sıyrılma oluğuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmesi 116,84 MPa'dır. PÇ-28D-10Φ/2 ve PÇ-28D-10Φ/3 numaralı numunelerde ise ilk sıyrılma oluğuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmeleri sırasıyla 123,6 ve 131,91 MPa olarak ölçölmüştür.



Şekil 6.13. MS1.3-100-20Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



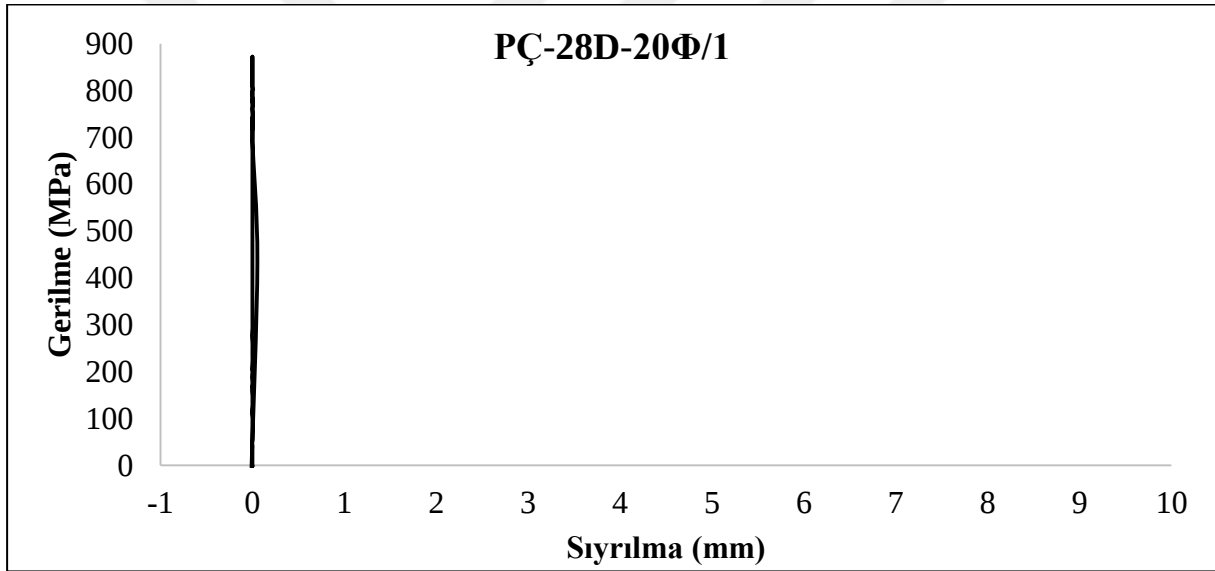
Şekil 6.14. MS1.3-100-20Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



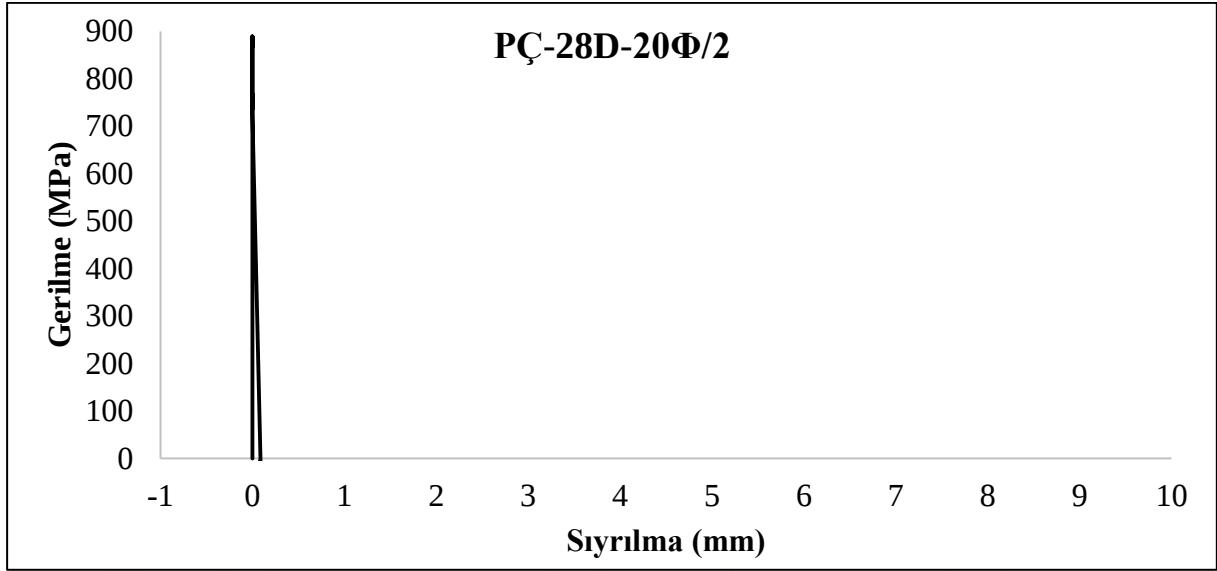
Şekil 6.15. MS1.3-100-20Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği

NUMUNE KODU	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme Kuvveti (N)	τ_u (MPa)	MG-S (mm)	İS-G (MPa)	DST
MS1.3-100-20Φ/1	734,93	83118,75	9,19	0,01	712,32	DK
MS1.3-100-20Φ/2	665,21	75233,13	8,32	0,03	665,21	DK
MS1.3-100-20Φ/3	689,70	78003,75	8,62	0,01	687,82	DK
Ortalama	696,61	78785,21	8,71	0,02	688,45	DK

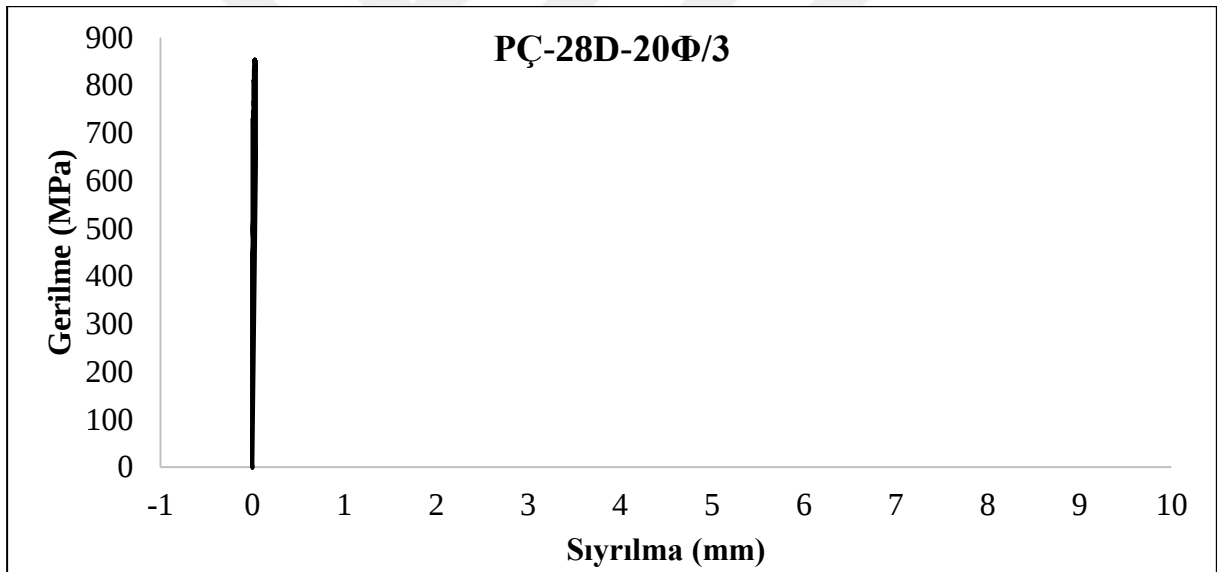
Gerilme-sıyrılma grafiği incelendiğinde, MS1.3-100-20Φ/1 numaralı numunede maksimum gerilme 734 MPa iken maksimum gerilmede ortaya çıkan sıyrılma 0,01 mm dir. MS1.3-100-20Φ/2 ve MS1.3-100-20Φ/3 numaralı numunelerde ise maksimum gerilmeler sırasıyla 665,21 ve 689,70 MPa olup bu maksimum gerilmelerde sıyrılmalar sırasıyla 0,03 ve 0,01 mm dir. Deneylerde, ilk sıyrılmanın hangi gerilme değerinde oluştuğu ise önemli bulgulardan bir tanesi olarak dikkati çekmektedir. Tabloda görüleceği üzere MS1.3-100-20Φ/1 numaralı numunede ilk sıyrılma oluştuğuında donatıdan betona aktarılan kayma gerilmesi 712,32 MPa'dır. MS1.3-100-20Φ/2 ve MS1.3-100-20Φ/3 numaralı numunelerde ise ilk sıyrılma oluştuğuında donatıdan betona aktarılan kayma gerilmeleri sırasıyla 665,21 ve 687,82 MPa olarak ölçölmüştür.



şekil 6.16. PÇ-28D-20Φ/1 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



Şekil 6.17. PÇ-28D-20Φ/2 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği



Şekil 6.18. PÇ-28D-20Φ/3 Kodlu kiriş numunesine ait deney sonuç grafiği

NUMUNE KODU	Maksimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme Kuvveti (N)	τ_u (MPa)	MG-S (mm)	İS-G (MPa)	DST
PÇ-28D-20Φ/1	872,50	98676,88	10,91	0,14	802,77	DK
PÇ-28D-20Φ/2	889,46	100595,00	11,12	0,01	848,00	DK
PÇ-28D-20Φ/3	853,65	96545,63	10,67	0,05	727,39	DK
Ortalama	871,87	98605,83	10,90	0,07	792,72	DK

Gerilme-sıyrılma grafiği incelendiğinde, PÇ-28D-20Φ/1 numaralı numunede maksimum gerilme 872 MPa iken maksimum gerilmede ortaya çıkan sıyrılma 0,14 mm dir. PÇ-28D-20Φ/2 ve PÇ-28D-20Φ/3 numaralı numunelerde ise maksimum gerilmeler sırasıyla 889 ve 853 MPa olup bu maksimum gerilmelerde sıyrılmalar sırasıyla 0,01 ve 0,05 mm dir. Deneylerde, ilk sıyrılmanın hangi gerilme değeriinde oluğu ise önemli bulgulardan bir tanesi olarak dikkati çekmektedir. Tabloda görüleceği üzere PÇ-28D-20Φ/1 numaralı numunede ilk sıyrılma oluğuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmesi 802,77 MPa'dır. PÇ-28D-20Φ/2 ve PÇ-28D-20Φ/3 numaralı numunelerde ise ilk sıyrılma oluğuğunda donatıdan betona aktarılan kayma gerilmeleri sırasıyla 848 ve 727 MPa olarak ölçölmüştür.



7. SONUÇ

Tez çalışması kapsamında farklı Ms modülleri ve farklı sıcaklık değerlerinde taze beton özellikleri ve dayanım özellikleri incelenmiş ve bu inceleme sonucunda tek tip geopolimer sınıfı seçilmiştir. Seçilen geopolimer beton ile kıyaslama yapılabilmesi amacı ile benzer dayanım değerlerine sahip geleneksel Portland çimentolu beton numuneleri ile kiriş numuneleri hazırlanmış ve 3 farklı (5 Φ , 10 Φ ve 20 Φ) kenetlenme boyuna sahip kiriş numuneleri hazırlanarak eğilmede aderans performansları incelenmiştir. Bu incelemelerin sonuçları maddeler halinde aşağıdaki şekilde verilmiştir.

7.1. Geopolimerler Betonların Taze Beton Özellikleri ile İlgili Sonuçlar

Sonuçlar, taze beton özellikleri açısından yorumlandığında, geopolimer beton içeriğindeki kuru karışım (UK ve Agregası) azalıp aktivatör miktarı (SS ve SH karışımı) artış gösterdiğinden Ms modülündeki artış ile birlikte yayılma çapı da buna bağlı olarak artış gösterdiği sonucuna varılmıştır.

7.2. Geopolimerler Betonların Basınç Dayanımları Özellikleri ile İlgili Sonuçlar

4 farklı karışım reçetesi (1,1 Ms, 1,2 Ms, 1,3 Ms ve 1,4 Ms) ile hazırlanan numuneler 80°C, 100°C ve 120°C değerlerinde kürlenerek dayanım kazandırılmıştır.

Sıcaklıktan bağımsız olarak artan Ms modülü ile birlikte geopolimer basınç dayanımlarında bir azalma söz konusu iken, her bir Ms modülünde optimum basınç dayanımları 100°C de kür işlemi sonucunda elde edildiği sonucuna varılmıştır.

7.3. Eğilmede Aderans Deneyleri ile İlgili Sonuçlar

1,3 Ms modülünde 100°C’de 24 saat kürlenmiş geopolimer betonlar ile hazırlanan ve 28 gün suda kürlenmiş, geopolimer beton ile benzer dayanım değerlerine sahip kirişlerin eğilmede aderans deneylerinden elde edilen sonuçlara göre;

- **5 Φ kenetlenme boyunda**

Geopolimer betonlar ile hazırlanan kiriş numunelerinde;

Ortalama 581,66 MPa değerinde maksimum gerilme değerine maruz kalmış, ilk sıyrılma okunan gerilme değeri ortalama olarak 79,15 MPa olarak hesaplanmış olup maksimum gerilme değerine ulaşana kadar ortalama 1,48 mm sıyrılma gerçekleşmiştir.

Geleneksel Portland çimentolu betonlar ile hazırlanan kiriş numunelerinde;

Ortalama 366,93 MPa değerinde maksimum gerilme değerine maruz kalmış, ilk sıyrılma okunan gerilme değeri ortalama olarak 41,36 MPa olarak hesaplanmış olup maksimum gerilme değerine ulaşana kadar ortalama 2,22 mm sıyrılma gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak 5 Φ numunelerinde geopolimer beton kirişler, maksimum yük aktarma kapasitesi olarak, ilk sıyrılmaya kadar oluşan gerilme değeri olarak ve maksimum yük kapasitesine ulaşınca kadar meydana gelen toplam sıyrılma miktarı olarak geleneksel portland çimentolu beton kirişlere göre daha iyi bir performans sergilemiştir.

- **10 Φ kenetlenme boyunda**

Geopolimer betonlar ile hazırlanan kiriş numunelerinde;

Ortalama 751,26 MPa değerinde maksimum gerilme değerine maruz kalmış, ilk sıyrılma okunan gerilme değeri ortalama olarak 131,91 MPa olarak hesaplanmış olup maksimum gerilme değerine ulaşana kadar ortalama 0,39 mm sıyrılma gerçekleşmiştir.

Geleneksel Portland çimentolu betonlar ile hazırlanan kiriş numunelerinde;

Ortalama 639,07 MPa değerinde maksimum gerilme değerine maruz kalmış, ilk sıyrılma okunan gerilme değeri ortalama olarak 124,12 MPa olarak hesaplanmış olup maksimum gerilme değerine ulaşana kadar ortalama 1,53 mm sıyrılma gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak 10 Φ numunelerinde geopolimer beton kirişler, maksimum yük aktarma kapasitesi olarak, ilk sıyrılmaya kadar oluşan gerilme değeri olarak ve maksimum yük kapasitesine ulaşınca kadar meydana gelen toplam sıyrılma miktarı olarak geleneksel portland çimentolu beton kirişlere göre daha iyi bir performans sergilemiştir.

- **20 Φ kenetlenme boyunda**

Geopolimer betonlar ile hazırlanan kiriş numunelerinde;

Ortalama 696,61 MPa değerinde maksimum gerilme değerine maruz kalmış, ilk sıyrılma okunan gerilme değeri ortalama olarak 688,45 MPa olarak hesaplanmış olup maksimum gerilme değerine ulaşana kadar ortalama 0,02 mm sıyrılma gerçekleşmiştir.

Geleneksel Portland çimentolu betonlar ile hazırlanan kiriş numunelerinde;

Ortalama 871,87 MPa değerinde maksimum gerilme değerine maruz kalmış, ilk sıyrılma okunan gerilme değeri ortalama olarak 792,72 MPa olarak hesaplanmış olup maksimum gerilme değerine ulaşana kadar ortalama 0,07 mm sıyrılma gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak 20 Φ numunelerinde geopolimer beton kirişler, maksimum yük aktarma kapasitesi olarak, ilk sıyrılmaya kadar oluşan gerilme değeri olarak ve maksimum yük

kapasitesine ulaşıncaya kadar meydana gelen toplam sıyrılma miktarı olarak geleneksel portland çimentolu beton kirişlere göre daha iyi bir performans sergilemiştir.



KAYNAKLAR

- Akbarnezhad A., Huan M., Mesgari S., Castel A.,(2015) Recycling of geopolymer concrete . Construction and Building Materials , 101, 152-158.
- Alnkaa, A.A.(2019).Farklı kür koşullarının geopolimer harç özelliklerine etkisi (Doctoral dissertation, Kastamonu Üniversitesi).
- Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H. & El-Zeadani, M., 2020. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. Journal of Cleaner Production, Cilt 251.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F. and Santoro, L., 2008. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymerbased products. Waste Management, 28, 416–423.
- Arslan, M., E., “Eğilmede taşıyıcı hafif beton-donatı aderansının geleneksel beton-donatı aderansı ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi” Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi (2007).
- Assi, L. N., Deaver, E. E., Ziehl, P., 2018. Using sucrose for improvement of initial and final setting times of silica fume-based activating solution of fly ash geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 191, 47-55.
- Assi, L. N., Deaver, E., Elbatanouny, M.K., Ziehl, P., 2016. Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, Construction and Building Materials, 112:807-815.
- ASTM C1621/C1621M-09b. Standard test method for passing ability of self consolidating concrete by J-ring. Annual book of ASTM standards, vol. 04.02. Philadelphia (USA): American Society for Testing and Materials; 2011.
- Atış, C.D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., Luga, E., 2015. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration, Construction and Building Materials, 96: 673-678.
- Aydın, S., Baradan, B. 2013. Mineral ve kimyasal katkıların alkalilerle aktive edilmiş harçların özelliklerine etkisi, Bildiri, Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 200-209.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack (Cilt 35 (4)). Cem. Concr. Res.).

Benli, A., “Kendiliğinden sıkışan betondaki donatı aderansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi” Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi (2007).

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.

Castel, A., Foster, S. J. (2014). Bond strength between blended slag and class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. *Materials and Design*, 56, 833–841.

Chindaprasart P, Chareerat T, Sirivivatnanon V, 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement and concrete composites*, 29(3): 224-229.

Dahil, H., “Yüksek performanslı beton-donatı aderansının geleneksel beton-donatı aderansı ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, (2001).

Davidovits, J., 1994. Properties of Geopolymer Cements, Published in Proceedings. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 131-149.

Davidovits, J., 2011. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 3. ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère.

Davidovits, J., 1991a. Properties of geopolymer cements. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656.

Draft, R. (1985). “Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams, ”. *Mechanics of Composite Materials and Structures* , 18, 285-290.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., Van Deventer, J. S. J., 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917-2933.

EFNARC 2005, *The European Guidelines for Self-compacting Concrete: Specification, Production and Use*, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.

Ersoy, U., Özcebe, G., “Betonarme : Temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre hesap”, Gözden Geçirilmiş II. Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul, 36, (2001).

Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*. 82(18), 2259-2265.

Görür, E.B., 2015. Alkali ile Aktifleştirilmiş Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 140 s.

Haddad RH, Alshbuol O, 2016. Production of Geopolymer Concrete Using Natural Pozzolan: A Parametric Study. *Construction and Building Materials*, 114:699-707.

Hamidi, R.M., Man, Z., Azizli, K.A. ,2016. Concentration of NaOH and the effect on the properties of fly ash based geopolymer, *Procedia Engineering*, 148: 189-193.

Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J., ve Rangan, B.V. (2005). On Development of Fly Ash- Based Geopolymer Concrete, *ACI Materials Journal*, 101.

Hardjito, D. and Rangan, B.V., 2005. Development and properties of low- calcium fly ash based geopolymer concrete. Research Report GC1, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.

He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites (Cilt 37). *Cem. Concr. Compos.*

Heah CY, Kamarudin H, Al Bakri AM, Binhussain M, Luqman M, Nizar IK, Ruzaidi C, Liew Y, 2011. Effect of Curing Profile on Kaolin-Based Geopolymers. *Physics Procedia*, 22:305-311.

Helmy, A. İ. İ., 2016. Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 110: 54-64.

Hlavacek, P. (2014). Engineering properties of alkali activated composites. Doctor Of Philosophy Thesis, Czech Technical University In Prague, Prague.

Husem M. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high performance concrete. *Fire Saf J* 2006;41(2):155-63.

Jindal BB, 2019. Investigations on the Properties of Geopolymer Mortar and Concrete with Mineral Admixtures: A Review. *Construction and Building Materials*, 227:116644.

Joseph, B., 2015. Behaviour Of Geopolymer Concrete Exposed To Elevated Temperatures. Doctor Of Philosophy Thesis, Cochin University of Science and Technology, Kerala.

Kaya, M., 2016. Farklı Tür Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 207 s.

Kovalchuk G, Fernández-Jiménez A, Palomo A, 2007. Alkali-Activated Fly Ash: Effect of Thermal Curing Conditions on Mechanical and Microstructural Development–Part II. *Fuel*, 86(3): 315-322.

- Lee, W. K. W., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Chemical interactions between siliceous aggregates and low-Ca alkali-activated cements. *Cement and Concrete Research*, 37(6), 844–855.
- Li Z., Ding Z., Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials (pp: 55-76). *Proceedings of the International*.
- Ma, Y., Ye, G. 2015. The shrinkage of alkali activated fly ash, *Cement and Concrete Research*, 68: 75-82.
- Mostavi E, Asadi S, Hassan MM, Alansari M, 2015. Evaluation of Self-Healing Mechanisms in Concrete with Double-Walled Sodium Silicate Microcapsules. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12): 04015035.
- Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2012). Effect of Na₂SiO₃/NaOH Ratios and NaOH Molarities on Compressive Strength of Fly-Ash-Based Geopolymer. *ACI Materials Journal*, 109(5).
- Noushini, A., Castel, A., 2016. The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 112:464-477.
- Okoye, F.N., Prakash S., Singh, N.B., 2016. Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume, *Journal of Cleaner Production*, 149: 1062-1067.
- Olivia, M., Nikraz, H. 2012. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, *Materials and Design*, 36: 191–198.
- Olivier, J. G. J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J. A. H. W. (2015). Trends in Global CO₂ Emissions; 2015 Report, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, Netherlands.
- Poon, C., Azhar. S, Anson, M., Wong. Y. (2003). “Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures” *Cement and Concrete Composites*, retrieved from <http://www.sciencedirect.com>, 25, 83–89.
- Provis, J. L. & van Deventer, J. S. J., 2009. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Provis J. L., 2018. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48.
- Puertas F, Martínez-Ramírez S, Alonso S, Vazquez T, 2000. Alkali-Activated Fly Ash/Slag Cements: Strength Behaviour and Hydration Products. *Cement and concrete research*, 30(10): 1625-1632.
- Rangan, B.V., 2008. Studies on fly ash-based geopolymer concrete. *Malaysia Construction Research Journal*, 3 (2), 1–20.

- Rattanasak U, Chindaprasirt P, 2009. Influence of Naoh Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. *Minerals engineering*, 22(12): 1073-1078.
- Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S. 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, *Construction and Building Materials*, 47: 409–418.
- Shi C, Roy D, Krivenko P 2003. *Alkali-Activated Cements and Concretes* (CRC press).
- Sing, N. S. & Middendorf, B., 2020. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 20 Mart.Issue 237.
- Singh, N. B., 2018. Fly Ash-Based Geopolymer Binder: A Future Construction Material. *Minerals*, 12 Temmuz.8(7).
- Soyer-Uzun, S. and Çetintaş R., 2018. Relations between structural characteristics and compressive strength in volcanic ash based one–part geopolymer systems. *Journal of Building Engineering*, 20, 130–136.
- Stanton, T. (1940). “Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate” (Cilt Vol. 66). *Proceedings, American Society of Civil Engineers*.
- Suhendro , B. (2014). Toward green concrete for better sustainable environment . *Procedia Engineering* , 95, 305 320.
- Şahin, R., Taşdemir, M. A., Gül, R., & Çelik, C. (2007). Taze Beton Özelliklerinin Optimizasyonu. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38: 127-135.
- U. Ersoy, *Betonarme - Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı* 2. baskı, İstanbul, Türkiye: Evrim Basın Yayın Dağıtım, 2000.
- Uysal, M., Yılmaz, K., “Mineral katkı kullanımının kendiliğinden yerleşen betonun elastisite modülüne etkisinin incelenmesi” 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 16-18 May, Elazığ, Turkey (2011).
- Vafaei M, Allahverdi A, 2017. High Strength Geopolymer Binder Based on Waste-Glass Powder. *Advanced Powder Technology*, 28(1): 215-222.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S. and Lorenzon, L., 1997. Factors effecting the immobilisation of metals in geopolymerised fly ash, part 1 theory and applications. *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669.
- Van Jaarsveld J, Van Deventer JS, Lukey G, 2002. The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash-and Kaolinite-Based Geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3): 63-73.

- Wang, K., Shah, S., & Mishulovich, A. (2004). “Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKDfly ash binders” (Cilt 34). Cement and Concrete Composites.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., ve Setunge, S. (2017). Comparison of Long Term Performance Between Alkali Activated Slag and Fly Ash Geopolymer Concretes. Construction and Building Materials, 143, 272-279.
- Weerdt, K. D., 2011. Geopolymers – State of the art, Oslo : SINTEF Building and Infrastructure.
- Xie, J., Kayali, O., 2016. Effect of superplasticiser on workability enhancement of Class F and Class C ash-based geopolymers, Construction and Building Materials, 122:36-42.
- Xiem Nguyen, T. (2016). Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181.
- Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., 2000. The geopolymerisation of aluminosilicate minerals. Int. J. Miner. Process. 59(3), 247–266.
- Z. Celep, Betonarme yapılar, 6. Baskı, İstanbul, Türkiye, Beta Dağıtım, 2011.
- Zakka, P. W., Lim, N. H. A. S., Khun, M. C., 2021. A scientometric review of geopolymer concrete. Journal of Cleaner Production, 280, 124353.
- Zeybek, O., 2009. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.