

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ UÇUCU KÜL
GEOPOLİMER BETONUN DAYANIM VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Hazırlayan
Ela Bahşude GÖRÜR**

**Danışman
Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ**

Doktora Tezi

**Ocak 2015
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ UÇUCU KÜL
GEOPOLİMER BETONUN DAYANIM VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Doktora Tezi)

**Hazırlayan
Ela Bahşude GÖRÜR**

**Danışman
Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ**

**Ocak 2015
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Tezi Hazırlayan

Ela Bahşude GÖRÜR



YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

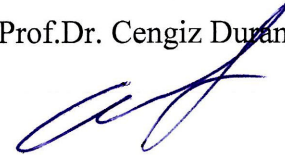
Tezi Hazırlayan

Ela Bahşude GÖRÜR



Danışman

Prof.Dr. Cengiz Duran ATİŞ



İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Mehmet ARDIÇLIOĞLU

İmza



Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ danışmanlığında **Ela Bahşude GÖRÜR** tarafından hazırlanan “**Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

28.01.2015
(Tez Savunma Sınav Tarihi)

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ

Üye :Doç. Dr. Okan KARAHAN

Üye : Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zülküf KAYA

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdal UNCUOĞLU

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 24/02/2015 tarih ve 2015/08-07 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Kâzım KEŞLİOĞLU

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocam Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı Doç. Dr. Cahit BİLİM'e ve Doç. Dr. Okan KARAHAN'a, aynı laboratuvarı paylaştığımız Arş. Gör. Serhan İLKENTAPAR'a teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ela Bahşude GÖRÜR

Kayseri, Ocak-2015

ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ UÇUCU KÜL GEOPOLİMER BETONUN DAYANIM VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ela Bahşude GÖRÜR

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Ocak 2015
Danışman: Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

ÖZET

Elektrik üreten termik santrallerin atığı olan uçucu küller teknoloji ve bilimin ilerlemesiyle atıklıktan çıkıp, yan ürün halini almıştır. Uçucu küller günümüzde çimento için kısmen ikame malzemesi haline gelmiştir. Uçucu küller üzerine yapılan çalışmalar ikame oranının %70'lere kadar çıktığını göstermiştir. Çoğu araştırmacının hedefi uçucu külü çimento ile mümkünse tamamen ikame etmektir. Bu ise uçucu külün alkalilerle aktifleştirilmesi yoluyla başarılmıştır. Bu çalışmada, Sugözü termik santralının yan ürünü olan F sınıfı uçucu külün kuvvetli bir baz olan NaOH ile aktive edilmesi sonucu elde edilen harçların özellikleri araştırılmıştır. Harçların üretilmesinde CEN referans kumu, uçucu kül, NaOH ve su kullanılmıştır. Katılmış geopolimerin dayanım özelliklerini en üst düzeye çekmek için çok sayıda karışım hazırlanmıştır. Harç üretimi sırasında farklı derişim oranlarında NaOH karıştırılarak üretilen harç numuneleri üzerinde, farklı sıcaklık ve kür süreleri uygulanmıştır. Üretilen harçlar üzerinde işlenebilirlik ve priz süresi tayinleri yapılmıştır. Numunelerden elde edilen basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre en uygun derişim tespit edilmiştir. Bu derişim ile hazırlanan karışım üzerinde farklı sıcaklık ve kür süreleri uygulanarak mekanik ve durabilite özellikleri tespit edilmiştir. Elde edilen değerler Portland çimentosu ile üretilen şahit karışımları ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak uygun derişim ve kür uygulayarak 100 MPa üzerinde dayanım ve Portland çimentosundan daha iyi durabilite özelliklerine sahip, geopolimer harcı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: NaOH, Uçucu Kül, Geopolimer, Alkali

INVESTIGATE THE STRENGTH AND DURABILITY CHARACTERISTICS OF FLY ASH GEOPOLYMER CONCRETE WITH ALKALY

Ela Bahşude GÖRÜR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph. D Thesis, January 2015

Supervisor: Prof. Dr. Cengiz Duran ATIŞ

ABSTRACT

Fly ashes are known to be a waste of thermal power station, currently, became a by-product due to advancement and development of science and technology. They were a substitute and replacement materials for cement in current days. The studies made on fly ashes have shown that replacement ratio was extended upto 70% with cement. The target of most researchers was to replace fly ash with cement in large amount or as much amount as possible, if possible completely. This is achieved by activating fly ash with alkali materials. In this work, a research was carried out on the properties of geopolimer mortar made with by activating a class F fly ash known as by-product of Sugozy thermal power station using NaOH as a strong alkaline matter. In the production of geopolimer mortar mixture CEN reference sand, fly ash, NaOH and water were used. A vast number of mixture were prepared to optimize strength properties of hardened geopolimer mixture. Fresh geopolimer mixture were prepared at different concentration of NaOH, and they were subjected to different curing temperature and curing time. Workability testing and setting time measurement were carried out on fresh geopolimer mortars. According to strength measurement results optimal NaOH concentration were determined. Mixtures prepared using optimal concentration were cured at different curing temperature and curing time, then, some mechanical and durability related properties were measured. The results obtained from geopolimer mortar were compared with mortar made with portland cement as the binder. As a results of study, higher than 100 MPa compressive strength was achieved. Geopolimer mortar mixture has shown better durability related properties than mortar mixture made with portland cement only.

Keywords: NaOH, Fly Ash, Geopolymer, Alkaline

İÇİNDEKİLER

ALKALİ İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ UÇUCU KÜL GEOPOLİMER BETONUN DAYANIM VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL ONAY	iii
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Uçucu Kül	6
1.1.1. Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	8
1.1.2. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları	13
1.1.3. Uçucu Küllerin Betonda Kullanımı	14
1.2. Alkaliler ile Aktifleştirme	17
1.3. Geopolimer.....	21
1.3.1. Geopolimer Kimyası.....	24

2. BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Alkali İle Aktive Edilen Geopolimerlerle İlgili Çalışmalar	28
2.2. NaOH İle İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar	34

3. BÖLÜM

YÖNTEMLER

3.1. Kullanılan Malzemeler	43
3.1.1. Alkali Aktivatör Olarak NaOH.....	43
3.1.2. Uçucu Kül.....	44
3.1.3. Su.....	45
3.1.4. Kontrol Numunelerinde Kullanılan Çimento	45
3.1.5. Kum	46
3.2. Deneysel Çalışmalar	46
3.2.1. Karışım Oranları.....	47
3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	47
3.2.3. Deneyler.....	49
3.2.3.1. Taze Haldeki Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler	49
3.2.3.1.1. İşlenebilirlik Deneyi	49
3.2.3.1.2. Priz Süresi Tayini Deneyi.....	49
3.2.3.2. Karışımların Sertleşmiş Haldeki Özelliklerini Belirlemek İçin Yapılan Deneyler	51
3.2.3.2.1. Birim Ağırlık Tayini	51
3.2.3.2.2. Dayanım Tayini.....	51
3.2.3.2.2.1. Eğilme Dayanımı	52
3.2.3.2.2.2. Basınç Dayanımı.....	55
3.2.3.2.3. Aşınma Kaybı Deneyi	56

3.2.3.2.4. Donma Çözülme Deneyi	58
3.2.3.2.5. Yanma Deneyi	59
3.2.3.2.6. Su Emme ve Boşluk Oranı	60
3.2.3.2.7. Kılcallık Katsayısı	60
3.2.4. Hazırlanan Numuneler üzerinde uygulanan kür ve süreleri	61

4. BÖLÜM

BULGULAR

4.1. Taze Haldeki Betonların Özellikleri.....	62
4.1.1. Numunelerin Priz Başlangıç Ve Bitiş Süreleri.....	62
4.1.2. İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları	72
4.2. Karışımların Sertleşmiş Haldeki Özellikleri	73
4.2.1. Basınç ve Eğilme Dayanım Sonuçları	73
4.2.1.1. Eğilme Dayanımı Sonuçları	74
4.2.2.2. Basınç Dayanımı Sonuçları.....	83
4.2.2.3. Farklı Derişimlerde Hazırlanan Geopolimer Numunelerin Basınç Dayanımları ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki	93
4.2.3. %14 Derişime Ait Numunelerin Sonuçları	94
4.2.3.1. Birim Ağırlık Sonuçları.....	94
4.2.3.2. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklık ve Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımı Sonuçları	94
4.2.3.3. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklık ve Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımı Sonuçları	100
4.2.3.4. Optimum Derişime Ait Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki	105
4.2.4. Aşınma Deneyi Sonuçları.....	106
4.2.4.1. Aşınma ile Eğilme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki.....	110
4.2.5. Yangın Deneyi Sonuçları	111

4.2.6. Donma Çözünme Deneyi Sonuçları	115
4.2.7. Kılcallık, Su Emme ve Boşluk Oranı Sonuçları.....	117

5. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKLAR	124
ÖZGEÇMİŞ.....	138

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Dünyada CO ₂ salınımlarının ülkelere göre dağılımları	4
Tablo 1.2. Türkiye’de Kömürle Elektrik Üreten Termik Santraller.....	7
Tablo 1.3. Türkiye’de Termik Santrallerde Üretilen Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları	8
Tablo 1.4. TSE ve ASTM’ye Göre Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri.....	10
Tablo 1.5. F ve C Sınıfı Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları	11
Tablo 1.6. Alkali Aktive ve Alkalın Bağlayıcıların Tarihsel Gelişimi.....	18
Tablo 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (NaOH) kimyasal kompozisyonu	44
Tablo 3.2. Kullanılan Uçucu Külün Kimyasal Kompozisyonu ve Fiziksel Özellikleri.....	45
Tablo 3.3. CEM I 42.5 Portland Çimentosunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri ..	45
Tablo 3.4. İnce agreganın granülometrisi ve standart sınır değerleri	46
Tablo 3.5. Farklı derişim oranlarında hazırlanan harçların karışım miktarları	47
Tablo 3.6. Yanma Deneyinde Numunelere Uygulanan Sıcaklık Ve Süreleri	59
Tablo 4.1. %4 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	62
Tablo 4.2. %6 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	63
Tablo 4.3. %8 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	64
Tablo 4.4. %10 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	65
Tablo 4.5. %12 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	66
Tablo 4.6. %14 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	67

Tablo 4.7. %16 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	68
Tablo 4.8. %18 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	69
Tablo 4.9. %20 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri	70
Tablo 4.10. Taze Beton Numunelerinin İşlenebilirlik Değerleri.....	72
Tablo 4.11. %4 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	74
Tablo 4.12. %6 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	75
Tablo 4.13. %8 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	76
Tablo 4.14. %10 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	77
Tablo 4.15. %12 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	78
Tablo 4.16. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	79
Tablo 4.17. %16 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	80
Tablo 4.18. %18 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	81
Tablo 4.19. %20 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	82
Tablo 4.20. %4 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	84
Tablo 4.21. %6 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	85

Tablo 4.22. %8 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	86
Tablo 4.23. %10 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	87
Tablo 4.24. %12 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	88
Tablo 4.25. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	89
Tablo 4.26. %16 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	90
Tablo 4.27. %18 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	91
Tablo 4.28. %20 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları	92
Tablo 4.29. %14 derişimde hazırlanan numunelerin birim ağırlıkları	94
Tablo 4.30. %14 Farklı Sıcaklıklar Eğilme Dayanımları (MPa)	99
Tablo 4.31. %14 Farklı Sıcaklıklar Basınç Dayanımları (MPa)	104
Tablo 4.32. Numunelerin 4 Yüzey Aşınma Sonuçları	109
Tablo 4.33. Numunelerin Tek Yüzey Aşınma Sonuçları	109
Tablo 4.34. Yanma Deneyi Sonrası Eğilme Dayanımları (MPa).....	112
Tablo 4.35. Yanma Deneyi Sonrası Basınç Dayanımları (MPa)	113
Tablo 4.36. Donma Çözünme Deneyi Sonrası Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Sonuçları	115
Tablo 4.37. Farklı Sıcaklıklarda Kür Edilen Numunelerin Kılcallık ve Su Emme Sonuçları	117

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Sektörlere göre CO ₂ salınımı	4
Şekil 1.2. 2013 Yılı Ükelere Göre CO ₂ Salınımları	5
Şekil 1.3. F Sınıfı Uçucu Kül	12
Şekil 1.4. C Sınıfı Uçucu Kül	12
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan TS-EN 196-1 kum	46
Şekil 3.2. Hobart Mikserinin Görünümü.....	48
Şekil 3.3. İşlenebilirlik Deneyinde Kullanılan Yayılma Tablası	49
Şekil 3.4. Priz süresi tayini için Vikat Cihazı	50
Şekil 3.5. Priz süresi tayini için Vikat Cihazının ölçüleri	50
Şekil 3.6. Basınç Dayanım ve Eğilme Cihazı	52
Şekil 3.7. Beton Numune Kalıbı	52
Şekil 3.8. Eğilme Dayanımı Deneyinden Görüntü.....	53
Şekil 3.9. Eğilme ve Basınç Deneyi, Deney Şeması.....	54
Şekil 3.10. Basınç Dayanımı Deneyinden Görüntü	55
Şekil 3.11. Aşınma Deneyi, Deney Şeması	56
Şekil 3.12. Aşınma Cihazı (Böhme) ve Deney Anından Görüntü	57
Şekil 3.13. Donma Çözülme Deneyi Döngü Şeması	58
Şekil 3.14. Donma Çözülme Deney Görüntüleri	59
Şekil 4.1. %4 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri... 63	
Şekil 4.2. %6 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri... 64	
Şekil 4.3. %8 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri... 65	
Şekil 4.4. %10 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri. 66	
Şekil 4.5. %12 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri. 67	
Şekil 4.6. %14 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri. 68	
Şekil 4.7. %16 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri. 69	
Şekil 4.8. %18 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri. 70	

Şekil 4.9. %20 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri.	71
Şekil 4.10. Taze Beton Numunelerinin İşlenebilirlik Değerleri (mm).....	73
Şekil 4.11. %4 Derişime Ait 1, 2, 3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	75
Şekil 4.12. %6 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	76
Şekil 4.13. % 8 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	77
Şekil 4.14. %10 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	78
Şekil 4.15. %12 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	79
Şekil 4.16. %14 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	80
Şekil 4.17. %16 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	81
Şekil 4.18. %18 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	82
Şekil 4.19. %20 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları.....	83
Şekil 4.20. %4 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	84
Şekil 4.21. %6 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	85
Şekil 4.22. %8 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	86
Şekil 4.23. %10 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	87
Şekil 4.24. %12 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	88
Şekil 4.25. %14 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	89
Şekil 4.26. %16 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	90
Şekil 4.27. %18 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	91
Şekil 4.28. %20 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları.....	92
Şekil 4.29. Basınç ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki.....	93
Şekil 4.30. 45 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	95
Şekil 4.31. 55 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	95
Şekil 4.32. 65 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	96
Şekil 4.33. 75 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	96
Şekil 4.34. 85 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	97
Şekil 4.35. 95 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	98

Şekil 4.36. 105 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	98
Şekil 4.37. 115 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları.....	99
Şekil 4.38. 45 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	100
Şekil 4.39. 55 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	101
Şekil 4.40. 65 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	101
Şekil 4.41. 75 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	102
Şekil 4.42. 85 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	102
Şekil 4.43. 95 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	103
Şekil 4.44. 105 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	103
Şekil 4.45. 115 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları	104
Şekil 4.46. Basınç ve Eğilme dayanımları arasındaki ilişki.....	105
Şekil 4.47. Numunelerin Tek Yüzey Aşınma Kayıpları (mm)	106
Şekil 4.48. Numunelerin Tek Yüzey Aşınma Kayıpları (gr)	107
Şekil 4.49. Numunelerin Dört Yüzey Aşınma Kayıpları (mm)	107
Şekil 4.50. Numunelerin Dört Yüzey Aşınma Kayıpları (gr)	108
Şekil 4.51. Basınç Dayanımı ve Aşınma Arasındaki İlişki.....	110
Şekil 4.52. Eğilme Dayanımı ve Aşınma Arasındaki İlişki	111
Şekil 4.53. Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımları (MPa)	112
Şekil 4.54. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımları (MPa)	114
Şekil 4.55. 1000 °C ve 1200 °C lerde yangın dayanımına tabii olan numunelerde görülen şekil bozuklukları.....	114
Şekil 4.56. Donma Çözünme Sonrası ve Donma Çözünmeye Maruz Kalmayan Numunelerin Eğilme Dayanım Sonuçları (MPa)	116
Şekil 4.57. Donma Çözünme Sonrası ve Donma Çözünmeye Maruz Kalmayan Numunelerin Basınç Dayanım Sonuçları (MPa).....	116
Şekil 4.58. Su Emme Oranı ve Kılcallık Katsayısı İlişkisi	118

SİMGELER VE KISALTMALAR

- A** : Suyla temas halinde olan yüzeyin alanı (cm^2)
- b** : Numunenin kare kesitin kenar uzunluğu (mm),
- Ds** : Deney Sonucundaki Çap
- Dt** : Deneye başlamadan Önceki Çap
- F** : Numunenin kırıldığı an uygulanan kuvvet (N),
- h** : Numunenin kare kesitinin kenar yüksekliği (mm),
- k** : Kapilarite katsayısı ($\text{cm/sn}^{1/2}$)
- l** : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm),
- M_{EK}** : Etüv kurusu ağırlığı (gr)
- M_{KYD}** : Kuru yüzey doymuş ağırlığı (gr)
- M_{SU}** : Su içindeki ağırlığı (gr)
- Q** : Absorbe edilen su miktarı (cm^3)
- t** : Zaman (sn)
- $\sigma_{\text{ç}}$** : Çekme (Eğilme) dayanımı (N/mm^2),

GİRİŞ

Uçucu küller (UK) betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sönmüş kireçle hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşirler. UK'ler elektrik üreten termik santrallerden elde edilir. Genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin çok ince öğütülerek termik santral fırınında yakılması sırasında yukarıya yükselen UK'ler, bacanın üst kısmında elektrofiltreler veya siklon adı verilen toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutularak depolanırlar.

Gelişen teknoloji ile beraber enerji kullanımı giderek artmaktadır. Bu nedenle endüstriyel atıklardan olan UK miktarı her geçen gün artmaktadır. Termik santrallerde büyük miktarlarda toplanan UK çevreye zarar verdiği gibi toplanması halinde depolama ve yok edilmesi ekonomik olmamaktadır.

UK'ler küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilirlik sağlar ve sulu ortamda kireci bağladıklarından dolayı betonu dış etkilere daha dayanıklı yapar, su geçirimsizliğini azaltır. Ayrıca alkali ile aktive edilerek çimentosuz beton üretiminde de kullanılabilir. Ayrıca alkali ile aktive edilerek çimentosuz beton üretiminde de kullanılabilir.

Amaç ve Kapsam

Türkiye'de termik santrallerde atık olarak oluşan uçucu küller (UK) düşük oranda çimento üretiminde kullanılmaktadır. Geri kalan UK silolarda depolanarak muhafaza edilmektedir. Bu çalışma ile üretiminde çevreye olumsuz etkileri olan çimentoya alternatif olabilecek bir yapı malzemesi olarak dayanım özelliği yüksek alkali ile aktive edilmiş geopolimer üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilen geopolimerin, inşaat

sektörünün çeşitli aşamalarında yapı malzemesi olarak kullanılarak, atık bir ürün olan uçucu külün ülke ekonomisine kazandırılması ve çimento üretimden kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması hedeflenmektedir. Ayrıca bu çalışmanın bir diğer amacı yüksek verimli, ekonomik bir yapı malzemesini inşaat sektörüne kazandırmaktır.

Çalışmanın materyal olarak kapsamını, su gözü termik santralinden elde edilen uçucu küllerin alkali ile aktive edilerek üretilen geopolimer oluşturmaktadır. Çimento katkısız olarak, sodyum hidroksit ile aktive edilmiş çimentosuz uçucu kül geopolimer harçlarının işlenebilirlik özellikleri, priz süresi gibi özellikleri incelenmiştir. Farklı sodyum hidroksit oranlarında ve farklı kür koşullarında üretilen harçların eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve aşınma özellikleri incelenerek en uygun kür koşulu ve kullanılacak alkali miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

Araştırmanın Önemi

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda genel olarak uçucu küllerin, çimento katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, hafif agrega ve beton yapımında kullanılması, su yapıları ve inşaatlarında yararlanması önerilmiştir. Bu araştırmanın önemi, uçucu külü alkali ile aktive ederek katkı maddesi değil çimentoya alternatif bir bağlayıcı oluşturmaktır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleri ile ortaya çıkan ve klinker olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen ve su ile birleştiğinde bağlayıcı özellik kazanan bir malzemedir. 1824 yılında, İngiltere'nin Leeds kentine yakın Portland isimli küçük bir adadan getirilen taşı, Joseph Aspdin isimli bir duvar ustası kalker ve kil karışımı ile pişirerek çimentoyu üretmiştir. Bugün tüm dünyada çimentoya Portland çimentosu denmektedir [1].

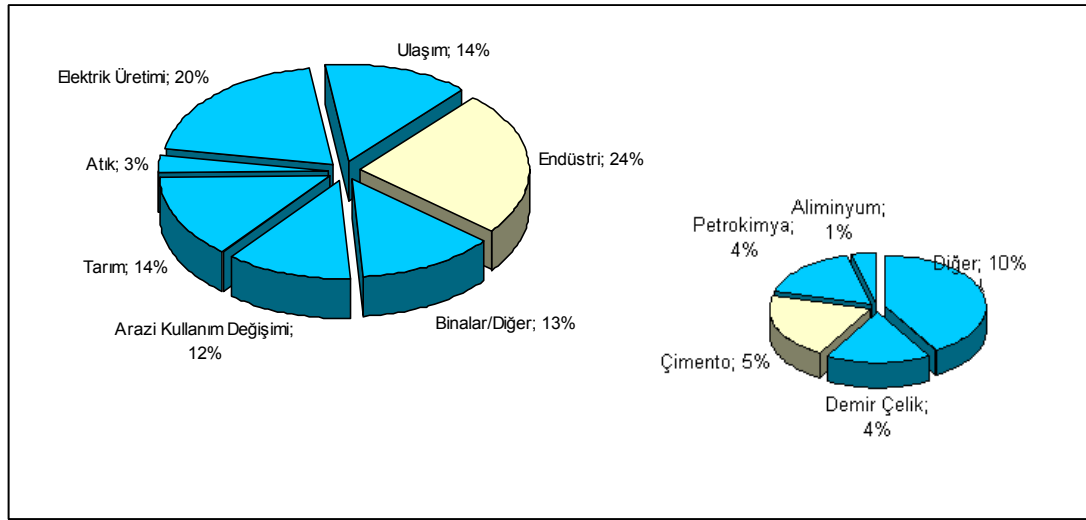
Portland çimentosu; katkı içermeyen, klinker ve priz düzenleyici olarak eklenen alçı taşından ibarettir. Kullanım amaçlarına göre çeşitli katkıları kullanılarak değişik çimentolar üretilmiştir. Bu katkı kullanımı, enerji ve hammadde kaynaklarının daha az kullanılması bakımından ekonomik açıdan önemli olmakla beraber kullanıldığı yerlerde sülfatlı, klorürlü, alkalili v.b ortamlardaki zararlı etkilere dayanıklılık açısından da önem taşımaktadır.

Portland çimentosu üretiminde ihtiyaç duyulan klinkerin üretimi sırasında hem enerji tüketiminin yoğun olması hem de kalsinasyon ve yanma sonucu ortaya çıkan CO₂ gazları sebebiyle çevreye önemli ölçüde zarar verilmektedir [2]. Portland çimentosu üretilirken çok yüksek enerji tüketerek CO₂ açığa çıkarır.



Bu üretim sonucunda 1 ton çimento üretimi için 1 ton CO₂ salınım yapar [3].

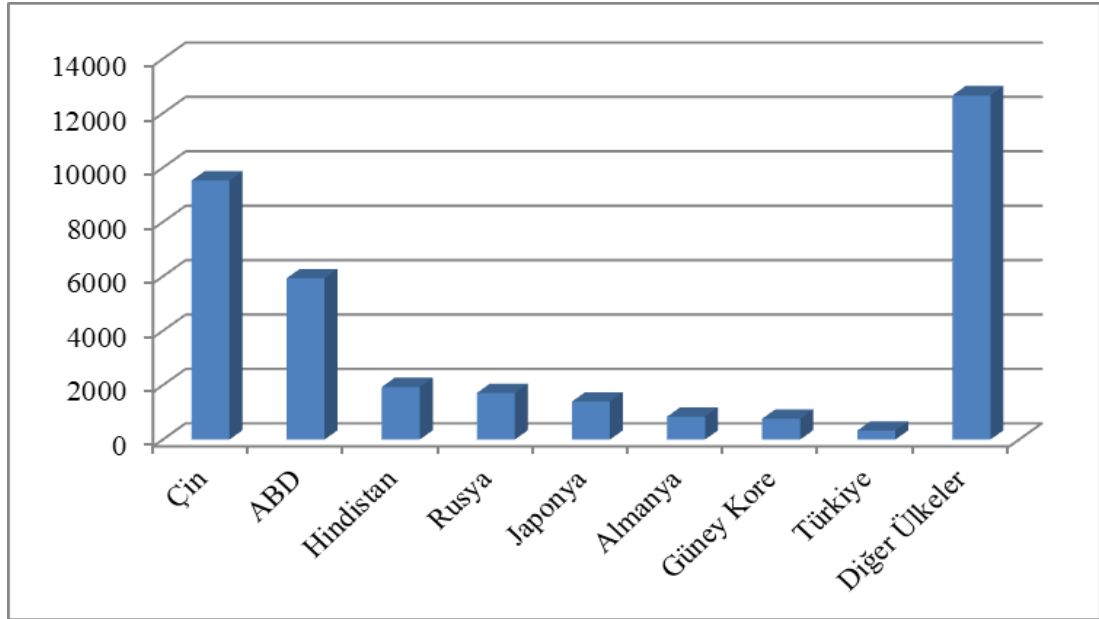
Dünyadaki CO₂ salınımlarının sektörlere göre dağılımı Şekil 1.1.'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, çimento üretiminin %5 oranında sorumlu olduğu ortaya çıkmaktadır. Dünyada CO₂ salınımlarının ülkelere göre dağılımları Tablo 1.1.'de verilmiştir. 2013 yılı itibariyle dünyada 35094 milyon ton CO₂ salınımı gerçekleşirken söz konusu gaz salınımlarında öne çıkan ülkeler Çin, ABD ve Hindistan'dır. Türkiye CO₂ salınımlarında dünyada 24. sırada yer almaktadır.



Şekil 1.1. Sektörlere göre CO₂ salınımları [4]

Tablo 1.1. Dünyada CO₂ salınımlarının ülkelere göre dağılımları (milyon ton) [4]

	1990	2012	2013	Değişim 1990-2013
Dünya	22682	34428	35094	12412
Çin	2452	9104	9524	7072
ABD	5461	5800	5931	470
Hindistan	626	1812	1931	1305
Rusya	2369	1703	1714	-655
Japonya	1179	1413	1397	218
Almanya	1029	816	843	-186
Güney Kore	257	764	768	511
Türkiye	142	318	329	187
Diğer Ülkeler	9167	12698	12657	3490



Şekil 1.2. 2013 Yılı Ülkelere Göre CO₂ Salınımları [4]

Çimento üretiminin azaltılması mümkün olmayacağından ve/veya alternatif bağlayıcılarının geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çimento teknolojisinde, gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak doğal (zeolit, tras vb.) ya da yapay (uçucu kül (UK), taban külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) puzolanik malzemeler kullanılmaktadır. Bu puzolanik malzemelerin arasında en çok kullanılanlarından biri uçucu küldür [2, 5].

Dünyada nüfusun artması, teknolojinin ilerlemesi ile birlikte günden güne enerji ihtiyacı artmaktadır. Bu enerji ihtiyacını karşılayabilmek için özellikle yüksek veya düşük kalorili kömürlerden önemli ölçüde yararlanılmaktadır. Bu amaçla Dünyada ve Türkiye’de kömür yakan birçok termik santral bulunmaktadır [6].

Termik santrallerde elektrik üretimi sırasında kömürün yanması sonucu baca çıkışlarında elektrofiltreler yardımıyla tutulan çok ince tanecikler oluşmaktadır. Atık malzeme olarak ortaya çıkan, sıcaklık etkisiyle uçabilen ve çok ince taneli olan yapay puzolan sınıfındaki bu küllere, uçucu kül (UK) adı verilmektedir. Bu işlem esnasında daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere sürüklenemeyerek kazan tabanına düşen küllere de taban külü denilmektedir [5].

Ayrıca endüstriyel bir atık olan ve çevreye zarar veren UK'nın sürdürülebilir beton teknolojisi açısından da önemi büyüktür. Çimentoda gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılan UK sayesinde, dayanım ve dayanıklılığın artmasıyla kalıcılık sorunları önlenmektedir. Böylelikle de inşa edilen yapılar, kullanım süreleri boyunca sorunsuz bir şekilde hizmet edebilmektedir. Uçucu küller çimento içeriğine katkı olarak kullanılmasının yanı sıra alkali aktivatörlerle birlikte kullanıldığında inşaat sektöründe kullanılacak özelliklerde bağlayıcı bir hamur yapısı meydana getirmektedir [5].

1.1. Uçucu Kül

Atık ürün olan uçucu külün geri dönüşüm ile bir yapı malzemesi olarak kullanılması çevrenin korunması ve atık olarak değerlendirilen bir ürüne katma değer kazandırılması açısından önemlidir.

Avrupa birliği ülkelerinde elde edilen uçucu külün %90-95 kadarı geri dönüşüm ile üretime dahil edilmektedir. Dünyada 450 milyon ton olan uçucu kül üretiminin yalnızca %6'sı çimento ve beton sanayinde kullanılmaktadır [7].

Türkiye'de uçucu kül oluşumu yılda 15 milyon ton olmasına rağmen sanayide kullanılma oranı düşüktür. Türkiye'de düşük uçucu kül kullanımının temel sebebi olarak, uçucu külün özellikleri hakkında yeterli bilgiye sahip olunmaması ve uçucu kül özelliklerinin kullanılan kömürün türüne göre uniform bir özellik göstermemesinden kaynaklanmaktadır [8].

Türkiye'de elektrik enerjisi, kömüre dayalı termik santrallerden ve hidroelektrik santrallerinden elde edilmektedir. Son yıllarda bunlara üçüncü olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Türkiye'de halen sadece kömür ile çalışan 15 tane termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ait bilgiler Tablo 1.2'de verilmiştir [9, 10].

Tablo 1.2. Türkiye’de Kömürle Elektrik Üreten Termik Santraller [10]

No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-İskenderun	İthal kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Tablo 1.2’de, Çolakoğlu, Çatalağzı ve Sugözü termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır. Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık %50’nin üretildiği termik santrallerde [11], 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl UK elde edilmektedir [9, 12, 5]. Bu miktar, A.B.D.’de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan’da 50 milyon ton/yıl dolayındadır [13, 14].

Uçucu külün özelliklerini; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi gibi çeşitli faktörler etkilemekle birlikte, genel olarak elektrik enerjisi üreten termik santrallerde kullanılan taşkömürünün %10-15’ini, linyit kömürünün ise %20-50’si kül olarak ortaya çıkmaktadır. Yanma sonucu ortaya çıkan külün %75-85’i baca gazları ile kazandan çıkar ve bu atıklar “uçucu kül” olarak tanımlanırlar.

Santrallerde, baca gazlarından uçucu küllerin tutulması amacıyla genel olarak yüksek verimli elektrofiltreler kullanılmaktadır [15, 16].

Tablo 1.3. Türkiye’de Termik Santrallerde Üretilen Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları

Bileşik	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	TSE	ASTM
Afşin-Elbistan	18,27	9,16	3,26	53,44	1,75	0,38	11,42	0,19	W	C
Çatalağzı	58,75	25,24	5,76	1,46	2,22	4,05	0,08	0,6	V	F
Tunçbilek	59,06	17,27	12,44	1,68	4,54	1,15	0,6	0,3	V	F
Çayırhan	49,13	15,14	8,25	13,2	4,76	1,76	3,84	2,2	V	F
Orhaneli	48,53	24,61	7,59	9,48	2,28	2,51	2,48	0,35	V	F
Seyitömer	54,49	20,58	9,27	4,26	4,48	2,01	0,52	0,65	V	F
Yatağan	51,5	23,08	6,07	10,53	2,42	2,54	1,32	0,77	W	F
Soma	42,82	20,82	4,57	23,45	1,74	1,31	1,47	0,32	W	C
Kangal	34,29	14,94	4,25	30,82	2,08	0,97	7,02	0,61	W	C
Yeniköy	14,94	10,23	5,2	39,32	1,47	1,39	25,68	0,47	W	C
Kemerköy	25,2	12,58	5,98	38,49	1,27	1,18	13,88	0,41	W	C
Sugözü	52,50	22,82	5,34	7,16	2,56	0,99	0,20	0,48	W	F

Türkiye’deki termik santrallerinde üretilen uçucu küllerin, ortalama kimyasal kompozisyonları Tablo 1.3’de verilmektedir.

1.1.1. Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Uçucu kül, koyu gri renkte, çok ufak taneli bir malzemedir. Renginin koyuluğu açıklığı, elde edildiği kömüre ve yanış özelliğine bağlıdır. İçindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça siyaha yakın koyu bir renk almaktadır. İyi yanma sonucu oluşan uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir [16].

Uçucu külün inceliği öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine bağlıdır, inceliğe etki eden ikinci faktör, küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına mani olunarak tutulmasıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artar.

Boyutları genellikle 0.5 ile 200 mikron arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Spesifik yüzeyleri 1800 – 5000 cm²/gr arasında değişmekle birlikte, ortalama 2800 - 3800 cm²/gr dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu 2.2 - 2.7 gr/cm³ arasındadır [17, 18].

Kimyasal özellikleri incelendiğinde ise; uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca MgO, SO₃, alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden SiO₂ %25- 60, Al₂O₃ %10-30, Fe₂O₃ %1-15 ve CaO %1-40 oranında bulunmaktadır [19, 20].

Termik santrallerde yakıt olarak, ülke kaynaklarına göre taş kömürü veya linyit kömürü kullanılmaktadır. Bu yüzden uçucu küller orijinlerine göre iki ana gruba ayrılırlar;

- Taş kömürü uçucu külleri
- Linyit kömürü uçucu külleri

Kimyasal yapıları bakımından ise uçucu küller 4 ana sınıfa ayırmak mümkündür.

- Silikat-Alümina esaslı uçucu küller: Bunlar taş kömürü uçucu külleridir. Yapılarının büyük kısmını kuvars (SiO₂) ve bir miktar alümina (Al₂O₃) meydana getirmektedir.
- Silikat-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarındaki ana oksitler kuvars (SiO₂) ve kalsit'tir (CaCO₃). Fakat kalsit miktarı oldukça yüksektir.
- Sülfür-Kalsit esaslı uçucu küller: Yapılarının büyük bir bölümünü kükürt trioksit (SO₃) ve kalsit'ten (CaCO₃) meydana gelmiştir. Bu sınıfa genellikle linyit kömürü uçucu külleri girmektedir.

- Sınıflandırılmayan uçucu küller: Termik santrallerdeki yanma sisteminin homojen olmamasından dolayı belirli bir kimyasal yapıya sahip olmayan küllerdir. Kimyasal yapıları sürekli değişebilmektedir.

Uçucu küller, gözenekli veya dolu camsı küresel taneler ile yanmamış mineralleri içeren süngerimsi ve köşeli aglomere tanelerden meydana gelir.

Genellikle bir uçucu külden SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , MgO , Na_2O , K_2O ve TiO_2 gibi oksitlerin hemen hemen tamamına rastlanmaktadır. Ancak bu oksitlerin küldenki yüzdeleri külün tipine bağlı olarak değişmektedir. TSE ve ASTM göre kullanıma uygun uçucu küllerin sahip olması gereken kimyasal özellikleri Tablo 1.4’de verilmiştir [21]:

Tablo 1.4. TSE ve ASTM’ye Göre Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri [22]

Kimyasal Bileşik	TSE	ASTM	
	% Ağırlıkça	F % Ağırlıkça	C % Ağırlıkça
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70 (Min)	70 (Min)	50 (Min)
MgO	5 (Mak)	0	0
SO_3	5 (Mak)	5 (Mak)	5 (Mak)
Nem	3 (Mak)	3 (Mak)	3 (Mak)
Kızdırma Kaybı	10 (Mak)	12 (Mak)	6 (Mak)

Aynı zamanda uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 [23] ve TS EN 197-1 [24] standartları baz alınmaktadır.

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar. F ve C sınıfı uçucu küllerin tipik kimyasal kompozisyonları Tablo 1.5’de verilmiştir:

a) F sınıfı uçucu küller Şekil 1.3’de verilmiştir. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70’den fazla olan ve Cao oranı %10’un altında olan uçucu küller girmektedir. Bu küller CaO yüzdesi %10’un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

b) C sınıfı uçucu küller Şekil 1.4’de verilmiştir. C sınıfı uçucu küller, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50’den, CaO oranı ise %10 dan fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılır. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliğine de sahiptirler.

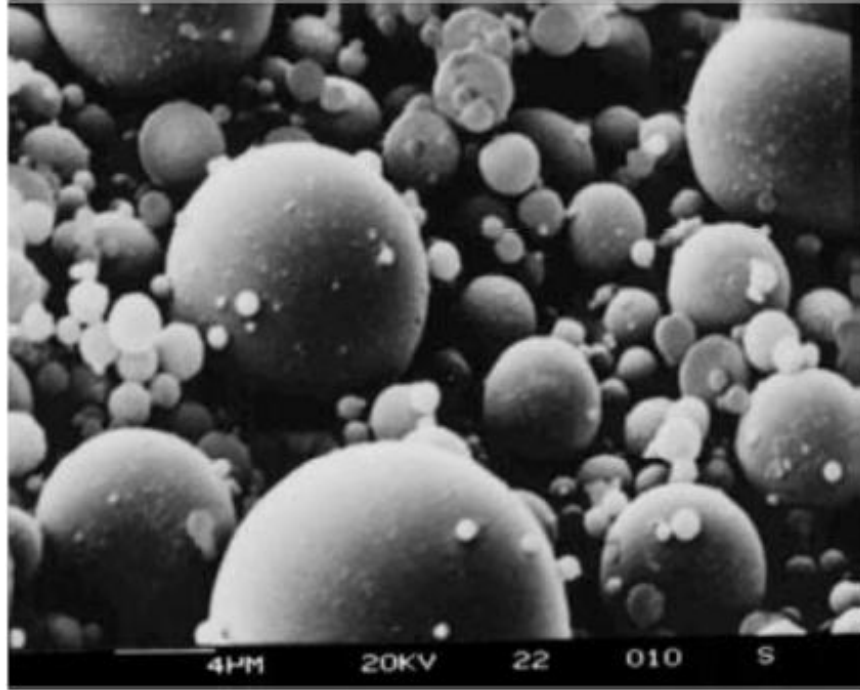
TS EN 197-1’e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar [25]:

a) V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’dan az, reaktif silis miktarının %25’den fazla olması gerekmektedir.

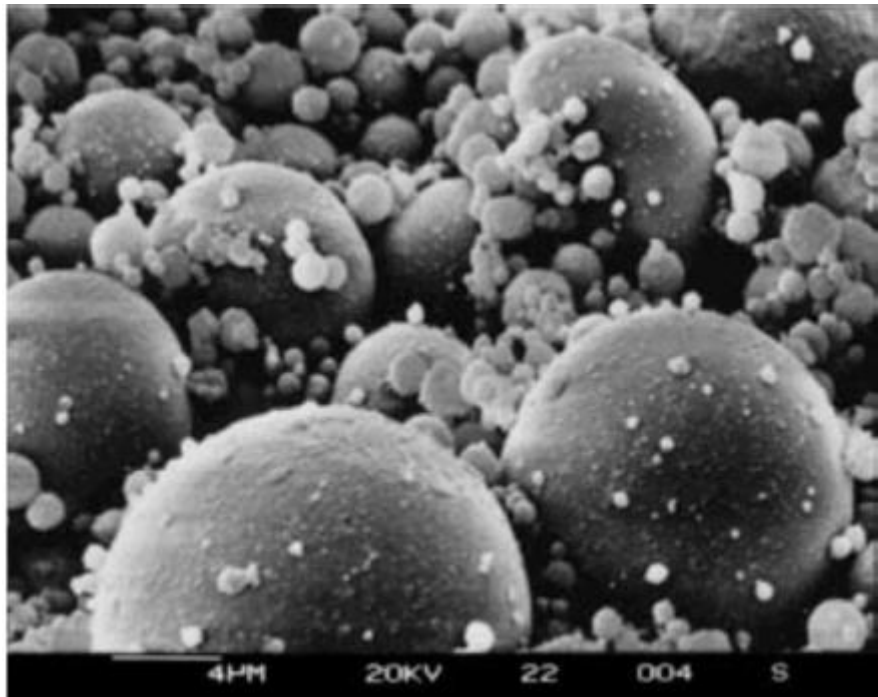
b) W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ’den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’dan fazla, reaktif silis miktarının da %25’den fazla olması gerekmektedir.

Tablo 1.5. F ve C Sınıfı Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları [26]

Kimyasal Kompozisyon	F Tipi		C Tipi	
	Düşük F	Yüksek F	Düşük C	Yüksek C
SiO_2	46-57	42-54	25-42	46-59
Al_2O_3	18-29	16,5-29	15-21	14-22
Fe_2O_3	6-16	16-24	5-10	5-13
CaO	1,8-5,5	1,3-3,8	17-32	8-16
MgO	0,7-2,1	0,3-1,2	4-12,5	3,2-4,9
K_2O	1,9-2,8	2,1-2,7	0,3-1,6	0,6-1,1
Na_2O	0,2-1,1	0,2-0,90	0,8-6	1,3-4,2
SO_3	0,4-2,9	0,5-1,8	0,4-5	0,4-2,5
LiO_2	0,6-4,8	1,2-5	0,1-1	0,1-2,3
TiO_2	1-2	1-1,5	<1	<1



Şekil 1.3. F Sınıfı Uçucu Kül [27]



Şekil 1.4. C Sınıfı Uçucu Kül [27]

1.1.2. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Uçucu kül üzerinde yapılan araştırmalar son yıllarda büyük yoğunluk kazanmıştır. Önceleri daha çok uçucu külün genel yapısı ve özellikleri ile kullanım olanaklarına yönelik çalışmalar, zamanla laboratuvar ve arazide gerçekleştirilen analizlerle geliştirilmiş, sonuçta uçucu külün inşaat alanında, özellikle yol yapımında kullanılmasının, termik santrallerde yüksek miktarlarda atık madde olarak oluşan bu malzemenin uzaklaştırılması sorununa çözüm getireceği açığa kavuşmuştur. Yapılan çalışmaların sonucunda, uçucu külün özellikle yol yapımında, zemin stabilizasyonunda, ayrıca dolgu ve enjeksiyon işlemlerinde kullanılması öngörülmüş tür [28].

Çeşitli nedenlerle uçucu külün yapısı ve özellikleri zamana ve yere göre büyük değişkenlik gösterdiğinden, birçok gelişmiş ülke külün farklı alanlarda kullanılmasını geçerli kılacak standartlara ihtiyaç duymuştur. Bu nedenle uçucu külle ilgili standartların belirlenmesi için yoğun çalışmalar yapılmıştır [29, 15].

Ülkemizde bu konuda Türk Standartları Enstitüsü tarafından TS-639 'Uçucu Küller' ve TS 640 'Uçucu Küllü Çimento' standartları çıkarılmıştır [17-18] Uçucu küller dünyada çimento ve beton olarak baraj duvarları köprü ayakları, maden ve diğer yapıların dolgu enjeksiyonlarında ve diğer pek çok inşaat yapılarında tarımda çatı bahçesi ve ağaçlandırma çalışmalarında, agrega olarak otoyol, köprü yol ve briket yapımında, asfalt içinde dolgu maddesi, yol drenaj kanallarında kullanılmaktadır. Örneğin Madrid'de 171 m yükseklikteki Picasso gökdeleninin değişik bölümlerinde %20 ile %40 arasında, Lizbon'da Caixa Gérai Deposite bankasının binasında, Danimarka'da Great Bell East köprüsünün yapımında, Finlandiya'da Permantokoski hidroelektrik santrali yapımında, Fransa'da Puylaurent barajında, Hollanda'da Eindhoven Havaalanı uçuş pistinde, Avusturya'da yeraltı tren yolu tünellerinde, İtalya'da yerüstü elektrik direkleri yapımında, İskoçya'da Tornes Nükleer Enerji Santrali yapımında, İngiltere'de denize yapılmış, BP'ye ait 570,000 varil ham petrol depolama kapasitesine sahip yapıda, Belçika'da 43,60 m yükseklikteki 4 adet uçucu kül depolama kulelerinin yapımında ve İngiltere ile Fransa'yı birbirine bağlayan ve

100 yıllık kullanım için dizayn edilen hızlı tren hattının tünel inşaatında uçucu kül kullanılmıştır [30, 16].

1960'lardan bu yana yapılan çeşitli araştırmalarda Türkiye uçucu küllerinin genellikle iyi kalitede olduğu ve çeşitli alanlarda kullanılabilceği ortaya konmuştur. Ancak malzeme, ülkemizde pratik açıdan yeterli düzeyde tanınmamakta, kullanım alanları, teknik ve ekonomik yararlarına gerektiği kadar önem verilmemektedir. Dolayısıyla kullanımı yaygın hale gelmemiş durumdadır. Bu konuda gelişim sağlanabilmesi için, uçucu kül özelliklerinin ve standartların belirlenmesinin ötesinde kalite kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi, taşıma ve özellikle pazarlama gibi faktörlerin incelenmesi zorunludur. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda genel olarak Türkiye uçucu küllerinin, çimento katkı maddesi olarak değerlendirilmesi, hafif agrega ve beton yapımında kullanılması, su yapıları ve inşaatlarında yararlanılması önerilmiştir [31].

1.1.3. Uçucu Küllerin Betonda Kullanımı

UK'ün çimento ile birlikte inşaat sektöründe en çok kullanıldığı diğer bir alan, beton üretimidir. UK, hem normal ve hafif betonda hem de giderek kullanımı yaygınlaşan hazır beton üretiminde gerek katkı gerekse ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır [32, 33, 34, 35, 36, 5]. UK'ler beton teknolojisinde hem betonda kum yerine hem de çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak farklı şekilde kullanılabilir. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. UK'lerin puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. UK'ler daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan tasarruf yapmasını sağlarlar. Araştırmalar ağırlıkça % 20 oranında UK kullanılmasının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir [37]. Bunun yanında UK kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte [38, 39] prizi geciktirmektedir [40]. Küçük danelerden oluştuğu için UK katkılı beton daha düzgün yüzeye sahiptir. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olur. UK katkılı betonun hidrasyon ısı

düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmaz dolayısıyla kütle betonları için uygundur.

UK'ler küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilirlik sağlarlar. UK'ler sulu ortamda kireci bağladıkları için betonu dış etkilere daha dayanıklı yapar, su geçirimsizliğini azaltır. UK'ler toprak stabilizasyonu, gaz beton üretimi, hafif agrega ve tuğla üretiminde kullanılabilirler [41, 42]. UK'lü betonlarda kür sıcaklığının artırılması basınç dayanımını iyileştirmiş, birim ağırlıkları düşürmüş ve hacimce su emmelerde artışa neden olmuştur [22]. Kür sıcaklığı 20 °C iken 28. günden sonra, kür sıcaklığı 40 °C iken 7. günden sonra UK'ün puzolanik reaksiyona başladığı görülmüştür [43]. UK ve Portland çimentosu ile üretilen harçlarda basınç dayanımı düşmektedir. Bu harçlarda yüksek miktarlarda UK kullanıldığında priz sürelerinde gecikme olmakta ve büzülme oranı artmaktadır [44].

UK ile yapılan bir çalışmada [37], PÇ 32.5 çimentosu, Orhaneli termik santrali külü ve akışkanlaştırıcı kullanarak çeşitli karışımlar hazırlanmış ve sonuçta % 20 UK kullanıldığında kontrol betonuna yakın basınç dayanımları elde edilmiş ve UK ile birlikte akışkanlaştırıcı da kullanıldığında birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiş, akışkanlaştırıcı kullanılmadığında birim ağırlıklar artmıştır. Bir başka çalışmada Afşin-Elbistan Termik santrali UK'ü kullanılmış ve % 15 civarında UK'ün çimento yerine kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir. Ayrıca UK'lü harçların ısı yalıtım özellikleri incelenmiş ve UK'e % 10 oranında katılacak çimento, kireç veya çimento + kireç bağlayıcılarından biri ile yalıtım amaçlı sıvalar yapılabileceği gibi ayrıca UK'ün sandviç dolgu duvarlarda dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [45].

UK'lü betonların donma-çözülme deneyleri sonunda kayıpların daha az olduğu, betona katkı olarak katılması durumunda basınç dayanımlarını artırdığı belirtilmiştir [46, 47]. Baraj gibi kütle betonu dökülen yapılarda hidrasyon ısısı düşük çimento [48] ve geçirimsiz betonların tercih edilmesi [49] ve UK'ün çimento yerine kullanılmasının hidrasyon ısısını ve betonun kompozitesini iyileştirmesi nedeni ile Devlet Su İşleri (DSİ) ve Türkiye Coğrafya Kurumu (TCK) gibi kuruluşlar UK'lü

betonun kullanılmasına öncülük etmişlerdir [50]. Farklı elektrik santrallerinden alınan UK'lerle yapılan bir çalışmada, UK'lerin kimyasal, mineralojik yapıları ile hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlarının oluşumu ve hızları bakımından birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. UK'lerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması bazı UK'lerin birden fazla sınıfın özelliklerine sahip olması veya bir sınıf oluşturabilecek kadar değişik karakteristiklere sahip olması nedeni ile uygun değildir [51]. UK çimento üretimi sırasında katılması durumunda ise çimentonun öğütülme işlemi kolaylaştırmakta ve öğütülme süresi kısaltmakta yani daha az enerji ile daha dayanımlı çimento elde edilmektedir [52].

Yüksek dayanımlı betonlarda çimento yerine % 25 oranında UK kullanılması ile basınç dayanımları ve elastisite modülleri düşmekte, çekme ve eğilme dayanımları artmaktadır. Aynı zamanda yüzeysel aşınma artmakta ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sülfürik asit hariç artmaktadır [53]. Sıcaklık artışı ile yüksek oranda UK katılmış betonlarda elastisite modülleri ve basınç dayanımları azalmaktadır [54]. Düşük işlenebilirliği olan betonlarda UK/ çimento oranının 0.5 ve üzerine çıkması da basınç dayanımını arttırmaktadır. Çökmesiz ve akışkanlaştırıcı katılmış UK/çimento oranı 0.75 olan betonların dayanıklılığı dış yüzey uygulamaları için yeterlidir. UK'lü betonlar, 325-400 dozaj ve UK/çimento oranı 0.75 civarında olması halinde beton yapılarda yeterli dayanım, dayanıklılık ve yüzey uygulamaları için uygundur [55]. Yapılan bir çalışmada UK'ün çimento üretimi sırasında %7.5 oranında kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir [56]. Klor geçirgenliği, aşınma dayanımı, donma çözülme gibi dayanıklılık faktörleri incelenen bir çalışmada betonda %15 oranında UK kullanımının uygun olacağı belirtilmiştir [57]. Günümüzde betonun dayanımının yanı sıra dayanıklılığının da önemli olduğu görülmüştür. Bu amaçla daha dayanıklı beton üretmek için betonun rötreten dolayı oluşan mikro çatlaklarının azaltılması, daha az çimento ile yüksek oranda UK kullanarak istenilen dayanımların sağlanması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Beton üretiminde yüksek oranda UK kullanmak betonun dayanım özelliklerini iyileştirdiği gibi ekonomi sağlar ve çevre kirliliğini azaltır [58, 59, 60, 61].

Atis (2005) [62] %70 oranında ve Huang ve ark., (2013) [63] % 80 oranında F sınıfı uçucu külü çimento ile ikame etmiş olup, su/bağlayıcı oranını 0.28 ve 0.24'e kadar düşürerek yüksek oranda uçucu kül içeren beton karışımları üretmişlerdir. Bu betonlar üzerinde mekanik ve durabilite deneyleri yürütülmüş olup, sonuç olarak beton özelliklerinde ciddi bozulmalar olmadan yüksek oranda uçucu kül ikamesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Yorum olarak araştırmacıların uçucu külün çimento ile ikame oranını mümkün olduğunca artırmaya ve tamamen uçucu külü bağlayıcı olarak kullanmaya çalıştıkları söylenebilir. Çimentosuz beton ve harç üretimi alkali aktivasyonu ile başarılmıştır.

1.2. Alkaliler ile Aktifleştirme

Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan en ilgi çeken, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur.

Teorik olarak silika ve alümina içeren her malzeme alkalilerle aktive edilebilir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killer, metakaolin, uçucu kül, kırmızı çamur, zeolit gibi malzemelerin aktivasyonunda en yaygın olarak kullanılan aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (KOH, NaOH) ile cam suyu (Na_2SiO_3) veya potasyum cam suyu ($\text{nSiO}_2\text{K}_2\text{O}$) karışımıdır [64].

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım [65], daha düşük hidratasyon ısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanında ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajları vardır [64]. Ani prizi önlemek için yapılan bazı çalışmalarda fosforik veya malik asit kullanılmıştır [65, 66]. Ani priz oluşması bazı durumlarda avantaj sağlayabilir.

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi amorf karakterli malzemeler bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Aluminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu

sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır [67].

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların geçmişten günümüze gelişimindeki bazı önemli adımlar Tablo 1.6’da özetlenmiştir.

Tablo 1.6. Alkali Aktive ve Alkalın Bağlayıcıların Tarihsel Gelişimi [3]

Yazarlar	Yıl	Konu
Feret	1939	Çimentoda cüruf kullanımı
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkalın çimentoların teorik esasları ve gelişimi
Glukhovsky	1965	Bileşen olarak doğal maddelerin kullanımı nedeniyle “alkalin çimentolar” adının ilk kullanımı.
Davidovits	1979	“Geopolimer” terimi-daha fazla polimerizasyonu vurgular.
Malinowski	1979	Antik kemerli su yollarının karakterizasyonu
Fors	1983	F-çimentosu (cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemelerinin karakterizasyonu.
Davidovits ve Sawyer	1985	“Pyrament” patent.
Krivenko	1986	R ₂ O-RO-R ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O.
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melit cüruflarının aktivasyonu
Malek ve diğerleri	1986	Cüruf çimentoları-düşük seviyede radyoaktif atık oluşturur
Davidovits	1987	Antik ve modern çimentoların kıyaslanması
Deja ve Malolepsy	1989	Klorürlere direnç görülmüştür.
Kausal ve diğerleri	1989	Zeolit oluşumunu içeren alkalın karışımlarından adiabatik (tam yalıtımlı) kür edilmiş nükleer atık oluşumları
Roy ve Langton	1989	Antik beton ile benzerlikleri
Majumdar ve diğerleri	1989	C12A7-cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf.
Wu ve diğerleri	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy ve diğerleri	1991	Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcılar
Roy ve Silsbee	1992	Alkali-aktive bağlayıcılar: genel bakış
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosu
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek betonları
Krivenko	1994	Alkalın bağlayıcılar
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkalilerle aktive edilmiş cürufün mikro yapısı

Alkali aktive ve alkalın bağlayıcıların uygulama alanları [27]

1. Yapısal betonlarda
2. Duvar bloklarında
3. Beton kaldırımlarda
4. Beton büzler
5. Elektrik direkleri
6. Gaz beton
7. Isıya dayanıklı beton
8. Petrol kuyuları
9. Tehlikeli ve radyoaktif atıkların stabilizasyonu gerektiren betonlarda
10. Sulama sistemleri, dalgakıranlar
11. Prefabrik ve yerinde bina inşaatları
12. Döşemeler, temeller

Bu malzemelerin alternatif kullanım alanı ise, nükleer atık yönetimi ve zehirli metallerin stabilizasyonu da dahil olmak üzere atık yönetimidir. Alkali alüminosilikat reaksiyonları, atıkları ortadan kaldırmada önemli bir role sahiptir. Bariyer olarak veya kapsülleşmede kullanıldığında hem matrisin geçirimsizliğini azaltır, hem de fazların yapısında oluşan belli iyonları sabitleştirir. Zararlı radyoaktif atıklar bentonit, kaolinit, halloysit ve dickite gibi killerle reaksiyona girerek, dayanıklı monolitik katılar oluşturabilir [27]. Metakaolin ve doğal zeolitler ile karıştırılarak elde edilen alkali aktive edilmiş cürüflu matrislerin stronsiyum (Sr) ve sezyum (Cs) gibi radyoaktif atıkların zararlı etkilerine karşı geliştirilebilirliği araştırılmış ve AAYFC'li betonların bu tip atıkların emilimini daha iyi yapabildiği görülmüştür [68].

Kaolin kilinin 600-800 °C arası sıcaklıklarda kalsine edilmesiyle üretilen bir mineral katkı olan metakaolin ile üretilen harç örneklerinin incelenmesi sonucunda

metakaolin katkısının, harçların ASR, klor geçirimsizliği ve kapilarite katsayısını önemli ölçüde azalttığı sonucuna ulaşılmıştır [69].

Metakaolin çimentoya üç farklı oranda (%0-10-20) ikame edilmiştir. Özellikle suda kür edilmiş metakaolin katkı oranının %20'ye ulaştığı betonların performanslarında basınç dayanımı, su geçirimsizliği, su emme, klorür iyon geçirimsizliği, kuruma rötresi, sülfat dayanımı, porozite ve boşluk dağılımlarında iyileşme tespit edilmiştir [70].

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda alkalilerle aktive edilerek kullanılmış olan puzolanlar [71];

1. Kaolin kili
2. Metakaolin
3. Uçucu küller
4. Yüksek fırın cürufu
5. Uçucu kül ve cüruf karışımları
6. Uçucu kül ve metakaolin
7. Yüksek fırın cürufu ve metakaolin
8. Yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur
9. Uçucu kül ve kırmızı çamur
10. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı
11. Zeolit

Alkalileri 6 grupta incelenebilir [27]:

1. Kostik alkaliler: MOH
2. Zayıf asitli tuzlar: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 vd.
3. Silikatlar: $M_2O.nSiO_2$
4. Alüminatlar: $M_2O.nAl_2O_3$
5. Alüminosilikatlar: $M_2O.nAl_2O_3.(2-6).SiO_2$
6. Güçlü asitli tuzlar: M_2SO_4

En çok kullanılan alkaliler; sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum sülfat ve sodyum silikat. Sodyum karbonat ve sodyum sülfat doğal kaynaklardan elde edilir. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ise sadece üretilerek elde edilir [27].

1.3. Geopolimer

1970’li yıllarda Fransa şehirlerindeki özellikle ahşap ve çelik yapı binalarda yangınların artması yeni kaplama malzemelerinin keşfini gerektirmiştir. Kapı ve pencerelerde kullanılan Poli-Vinil-Klorür yalıtım da kullanılan Poli Üretan gibi organik kimya ürünü termoset polimerlerin yanmazlık özelliği göstermesi mümkün değildir. Çünkü organik polimerlerin ana yapısında bulunan petrol türevi karbon içeren monomerler yanıcıdır [72].

Yanmazlık özelliği ancak minerallerde bulunur. Silisyum (Si), organik kimyanın ana elementlerinden olan karbon (C) elementi ile periyodik tabloda atom özellikleri itibari ile aynı grupta bulunmakla beraber bir alt periyottadır. Bu durum ametal olan karbondan farklı olarak silisyum elementinin metaloit özellikleri olduğunu gösterir. Metaloidler kimyasal olarak ametal gibi davranmakla birlikte yarı iletkenlikleri yönüyle metal özellikte gösterirler [73].

Bir metaloid olan silisyumun ionizasyon enerjisi de karbona nazaran daha düşüktür. Silisyum 4 elektronunu verme eğiliminde olan bir katyondur. Organik kimya ürünü hidrokarbon bağlarından farklı olarak, Si elementini hidrojen ile doyurmak oldukça zor bir kimyasal işlem olmakla birlikte, 1912 yılında Alman bilim adamı Alfred Stock (SiH₄) polisilan molekülü zincirlerini elde etmiştir. Ancak polisilan molekülleri kararlı olmadıkları için oldukça tehlikelidirler ve polimerizasyon zincir sayısı en fazla 4 olmaktadır. Si’un oksijen ve diğer elementlerle kurduğu bileşikler daha kararlı davranmaktadır. Bu da daha sıkı kristalize ve yanıcılığı az olan malzeme yapısını sağlayacaktır. Silikat (SiO₃) molekülleri ile oluşmuş piroksen vollastonit kristalleri birer kayaç örneği olduğu gibi doğadaki kuvarz SiO₄ bileşiği ise en sert taştır. Kuvarzı yapay olarak üretmek oldukça zordur. Ancak başka element ve

bileşiklerin silikatlarla (SiO_2) kovalent bağlı polimerler oluşturmasıyla üç boyutlu yarı kristal amorf yapıda basınç ve yanma dayanımı yüksek malzemeler elde edilebilmektedir. Buradan yola çıkılarak, silika moleküllerinin zincir bağlarından oluşmuş silokson ya da silikatmoleküllerinin (AlO_4) aluminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile elde edilen polisialatların keşfi ile geopolimer kimyasının temelleri atılmıştır [74].

Kil, seramik yapımında da önem arz eden oksit mineraller içermektedir. Kaolin, montmorillonit, pirofilit, muskovit, klorit, laterit gibi neredeyse tüm killi toprak türleri alkali soda (NaCO_3 , NaOH , KOH) ile tepkime vererek ısı etkisinde katılaşmaktadır. Özellikle kaolin kili içerisinde yüksek miktarda bulunan Al ve Si elementlerinin oksitli bileşikleri bağlayıcılık ve hacimsel tokluk sağlayıcı monomerler oluşturabilmektedir. Alkali ortamda organik kimya ürünü bakalit gibi polimerler için söz konusu olan termoset hidrotermal koşullar, kaolin ve benzeri kil tiplerine alkali tuz eşliğinde (NaOH) uygulanmış; feldispatoit ve zeolit türü kayaçların yapay olarak eldesi araştırılmıştır. 1972 yılında Kaolinit kili ve alkali aktifleştiricilerin etkisiyle 15 MPa basınçla sıkıştırılmış hamurun 100–130 °C da sunta üzerine 30 bar basınçlı buhar press ile presslenmesiyle yanmaz ahşap panel üretimi gerçekleştirilmiştir. Davidovits [75] silisyum içeren monomerlerin, elde edilen polimer malzemenin ana bileşenlerini oluşturması sebebi ile bu prosese “Siliface” ismini vermişlerdir [73]. Davidovits [75] erken dayanımı yüksek beton üretimi, refrakter, uçak kabin malzemesi gibi üretimler için çeşitli doğal ve yapay minerallerin alkali tuz ve alkali silikatlarla kimyasal reaksiyona girmesiyle oluşan yarı seramik genellikle üç boyutlu hegzagonal kristal yapıları bağlayıcı, çimento, harç, rezene tipinde de ürünler geliştirmiştir.

İçinde yüksek fırın cürufunun ve alkali tuzların (NaOH , KOH) hidrolik bağlayıcı olarak kullanıldığı beton, yüksek basınç dayanımı, esneklik, erken dayanım ve yüksek asit direnci göstermiştir. Pyrament ticari ismindeki bu geopolimerik çimento hamuru, 1984 yılında Amerika’da havaalanı betonu dökümünde Portland çimentolu betonla karıştırılarak kullanılmış ve 6 saat içinde uçağın inebileceği dayanım ve sertlikte beton elde edilmiştir. Betonun 28 günlük basınç dayanımı ise 80 MPa’ dır [73].

Doğal kayaç yapısına benzer özellikte, içinde Al ve Si oksitli bileşikleri bulunduran alkali ortamda jeolojik oluşumlu kayaçların bağlayıcılık kazandığı bir reaksiyon sonucu olduğundan, pek çok toprak mineral esaslı malzemelerin patentine sahip olan Davidovits [75] bu yüksek fiziksel özellikler gösteren inorganik kimya ürünlerine içinde bolca barındırdığı toprak mineralleri ve termoset polikondensasyon reaksiyonlu polimer kimyasıyla benzer reaksiyonlarla elde ediliyor olmasından dolayı geopolimer adını uygun görmektedir.

Geopolimer malzemelerin plastiği andıran parlak ve pürüzsüz yüzeyleri polimer isimlendirmesinin uygunluğunu doğrulamaktadır. Geopolimer prosesi bir füzyon sinterleme ya da eritme işlemi değil polimerleşme sürecidir. Geopolimer özellikle Si-Al-Mg-Ca-P-K-Na gibi mineral moleküllerini içeren monomerlerin birbirleri arasında polikondensasyon sonucu oluşan kovalent kompleks zincir bağlı polimerler kurması ile oluşur. Geopolimerin en iyi özellikler gösterdiği ürünler ise 750 °C'de kalsine olmuş metakaolinit kilinin alkali tuz ve alkali silikatlar ile aktifleştirilmesi ile elde edilen çözeltisinin, düşük ısıda (40–100 °C) fırınlanmasıyla elde edilir [74]. Geopolimer gördüğü ısıl işlemler sonrası, monolitik (yekpare taş) seramik yapıya ulaşır.

Hidrosodalit ve polisialatlar hegzagonal üç boyutlu molekül dizilimindedir. Bir başka deyişle hidrotermal polikondensasyon sonucunda içindeki suyu hem kimyasal hem de fiziksel yollarla vererek (dehidratasyon+dehidrasyon) zeolit kayaçlarına benzer tanecik yapısına ulaşan, ancak zeolit kristallerinden farklı olarak amorf üç boyutlu hegzagonal moleküler bağ yapıda olan alumino silikat toprak malzemeler geopolimerdir [76]. Geopolimeri zeolitlerden ayıran bir diğer faktör de 80 °C'de sentezlenebiliyor olmasıdır. Bundan dolayı geopolimer, yapısında su moleküllerinin bir kısmını da tutmaktadır. Zeolit ise 150–250 °C de yapısı içinde boşluklar bırakarak kristalleşmektedir [72]. Geopolimerde amorf yapıyı sağlayan suyun kaynama sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda sentezlenebiliyor olmasıdır. Yüksek ısı ve ani soğuma molekül yapısının kristalleşmesine neden olur.

Zeolitin temelini oluşturan alkali aktive alumino silikat hidratlarla hidrosodalit elde edilmesi ile ilgili çalışmalar ise 1950 yılında Ukrayna'da Victor Gluchowsky

tarafından toprak silikatlar adıyla başlatılmıştır. Rus yer bilimci Gluchowsky, tortul kayaların volkanik etkilerle başkalaşımının zeolit kayaçlara yüksek basınç düşük sıcaklıklarda dönüşümüne benzer bir aglomerasyon mekanizmasının laboratuvar şartlarında metakaolinit ve diğer kil toprak malzemelere uygulanması ile sert seramik yapıları malzemeler üretilebileceği fikrini ortaya atmıştır [77].

Geopolimer göstermiş olduğu mükemmel fiziksel ve kimyasal özellikleriyle; prefabrik yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykeltçilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak ve yarış arabası endüstrisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir. Kullanılan teknolojinin gelişmişlik düzeyine, seçilen kimyasal oranlara göre ve toprak esaslı hammadde de yapılan fiziksel iyileştirmelerle geopolimere pek çok seramik malzeme de olduğu gibi istenilen fiziksel özellikler kazandırılabilir [72, 78]. Örneğin, kaplama refrakter malzemesi olarak da kullanılan geopolimerin çelik adhezyonu, kil taneciklerinin daha ince öğütülmesi ile sağlanır [79]. Ayrıca geopolimer kimyası ile ilgili bilgiler bugün Mısır Piramitlerinin gizemini, Roma ve Horasan harçlarının kimyasal yapısını da aydınlatmaktadır [72]. Doğada aglomerasyon sonucunda oluşan jeolojik kayaçların laboratuvarda jeolojik bir bağlayıcı kullanılarak yapay re-aglomerasyon ile sentezlenebileceği fikri feldispatoitler gibi 3000 yıllık kayaçların oluşum mekanizmasını ve arkeolojik kazılar sonucunda ortaya çıkan seramiklerin üretim metodunu, kalıntı örneklerine uygulanan, X ışını difraksiyon deneyleri ve NMR-FTIR deneylerinin sağladığı mineral kompozisyon ile ilgili veriler geopolimer kimyası ile açıklanabilmektedir [74].

1.3.1. Geopolimer Kimyası

Geopolimerizasyon prosesi uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atık, volkanik tüf, ufalanmış doğal başkalaşım kayaçları ya da 750 °C da fırınlanmış kaolinit kili (metakaolinit) gibi dehidrasyona uğramış alümino-silikat yapıdaki toprak katılarıyla alkali silikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkimeye

girmesi ile başlar. Elde edilecek ürünün istenilen amaca uygun fiziksel özelliklerini sağlaması; katı hammadde kompozisyonu, ilgili kimyasalların gerekli molar oranlarda karıştırılarak tepkimeye sokulması, uygulanan ısı kür ya da kalsinasyon işlemi ısı ve süresine bağlı olarak değişkenlik gösteren molekül yapısına bağlıdır [74].

Geopolimerizasyon yüksek alkali ortamda moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondensasyon (çoklu yoğunlaşma) hareketlerini kapsayan bir ekzotermik kimyasal prosesdir [75].

Geopolimer basitçe fırınlanmış kil içinde bulunan aluminatlar ile silikatların oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile kovalent bağlı bileşik oluşturması sentezine dayanır. Silikat (SiO_2) mineralleri son derece kararlı bileşiklerdir. Alkali aktifleştiricilerin SiO_2 monomerlerinin heliks üç boyutlu ağ yapısını zayıflatması ilerleyen tepkime sürecinde geopolimer ana bileşiği olan Si-O-Al sialatların oluşumunu sağlar [74]

Geopolimer konsepti ile üretilen gerek düşük teknoloji ve gerekse gelişmiş teknoloji tüm üretimlerde molekül yapısını belirleyici olan jeolojik toprak kaynak ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si: Al molar oranıdır [72]. Bu oranın 1 olduğu sistemlerde zeolit kristaline benzeyen tuğla seramik ve yangından koruyucu ürünler elde edilebilir. Bu oran 2 olduğunda yine seramik amorf arası yapıda geopolimer çimento ve betonu sentezlenebildiği gibi biraz daha ileri teknoloji ile radioaktif atıkların istiflenmesi için gerekli yapılar üretilebilmektedir.

Si/Al oranın 3 olduğu durumlarda akışkan polimerik karakter biraz daha artmakta fırın kaplamaları fiber glass yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için 1000 °C dayanabilen malzemeler üretilebilmektedir. Si: Al oranı 3 ün üzerine çıktığında dolgu malzemesi köpükler üretilebilir. Si: Al>15 olduğunda 2 boyutlu moleküler ağ yapısında geopolimer pastası oluşmakta ve bu yapı savaş uçaklarında kullanılabilir nano kompozit yangın ve ısı dayanımı yüksek malzemelerin üretiminde kullanılabilir [72].

Geopolimer ile gelişmiş teknoloji seramik ürünlerin üretiminde reaksiyon stokiometrisi iyi gözlenmelidir. Mineral esaslı tepkimelerde hammaddenin önemli bir kısmı reaksiyona girmez. Ancak uygun molarite ve mol kütlelerinde alkali soda ve tuzların etkilmesi ve ısıl etkilerin tepkime entalpilerinin değerlendirilmesine göre uygulanması ile istenilen fiziksel özellikteki kompozit ya da monolitik malzemelere ulaşılır. Mikromoleküler yapı da gözlemlenerek ani soğutma ve ikincil fırınlama işlemleri ile emayeleşme, yüzey parlaklığı gibi bazı nitelikler geopolimere kazandırılmaktadır [74].

Karışım içerisindeki alkali tuzların da etkisiyle geopolimerizasyon süreci ekzotermiktir. Bu süreçte su moleküllerinin dehidratasyonu geopolimer polikondensasyonunda önemli bir rol oynar. Kullanılacak olan temel hammadde mineral kompozisyonu, incelik modülü, her malzemede olduğu gibi geopolimerik ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Bazı malzemelerden basınç dayanım özelliği olmayan zayıf yapıları karışımlar elde edilirken uygun oranlarda Al-Si bileşiği bulduran ve serbest kalsiyumun düşük olduğu mineral kompozisyondaki uçucu küllerle (F tipi uçucu kül) ya da 750 °C’ de fırınlanmış metakaolinit (MK750) gibi ham maddelerle yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri olan malzemeler elde edilebilmektedir. Fırınlanmamış kaolin kili ise daha düşük basınç dayanımı vermektedir [80]. Seramik malzeme üretiminde de uygulandığı gibi hammaddeye uygulanan fırınlama işlemi; boşluk suyunun ve karbonlu bileşiklerin ayrışmasını sağlamakta ve kompozisyon içerisindeki mineral element ve bileşiklerin enerji düzeyinin yükselmesi ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamakta böylece üretilecek ürünün reolojik özelliklerini iyileştirmektedir.

Bazı araştırmacılar ham maddenin düzensiz özelliklerinin deneysel çalışmaya etkisini azaltarak geopolimer kimyasını tanımlayabilmek için sadece kimyasal yapısı iyi bilinen kileri kullanmışlardır. Ancak ham maddede ön iyileştirme yapılsa dahi aluminosilikat minerallerin kimyasal ve yapısal özellikleri karmaşık ve farklı sonuçlar verebilir [81]. İstenilen jel kompozisyonunu sağlamak için geopolimer çözelti içerisindeki Al çözünümü azaldığında ilave kaolinit ya da Al elementi eklenebilir. Aluminatların yavaş reaksiyon vermesi sayesinde tepkimenin tüm ana bileşenleri arasında bağlanma reaksiyonları gerçekleşmektedir. Ancak yalnızca

yüksek aluminat içeren kaolinit ağırlıklı bir karışım zayıf malzeme özellikleri göstermektedir [82].

Oda sıcaklığında başlayan geopolimer reaksiyonu istenilen karışım sağlandıktan sonra 40–100 °C sıcaklıklarda etüv ya da buhar odasında ısıl işleme tabi tutularak, polimerizasyon süresi uzar. Niyahetinde üretilmek istenilen geopolimer malzeme özellikleri de iyileştirilmiş olur. Geo-polimer kimyasal mekanizması ve tepkime entalpi değerleri tam olarak tanımlanamamakla birlikte, metakaolinit içerisindeki silisyumlu aliminyumlu oksit parçacıkların üç boyutlu tetrahedral bağlı termoset polimer mikromoleküler yapıyı oluşturmasıyla elde edilen yarı camsı-amorf, seramiksi yapı meydana gelmektedir [77]. Tepkime termo-kinematiğinin incelenmesi ile istenilen malzeme özelliklerinin geopolimere kazandırılması mümkündür. Alkali tuzlar içinde bulunan Na, K, Ca gibi alkali metallerin elektron vererek Si ve Al'un oksijen atomlarını paylaşarak kimyasal bağ kurmasını sağlar. Böylece Si-O-Al moleküllerinden oluşan sialat adı verilen alkali silikon okso-alüminat yapı oluşmaktadır. Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre sialat (Si-O-Al-O-), polisialat siloxo ya da polisialat di siloxo oluşmaktadır. Sialat yapısı SiO_4 ve AlO_4 molekülleri arasında tüm oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurması ile oluşur [75]. Geopolimer tepkimesindeki ham madde ve alkali çözelti içindeki sialat ve aluminatın Si/Al molar oranı oluşacak kristal yapıyı ve neticede malzeme özelliklerini etkiler [74].

2. BÖLÜM

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Alkali İle Aktive Edilen Geopolimerlerle İlgili Çalışmalar

Chi ve Huang, [83], alkali ile aktive edilmiş uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında, alkali ile aktive edilmiş farklı oranlarda yüksek fırın cürufu/uçucu küllü bağlayıcılarda Na_2O oranını %4 ve %6 oranında tutarak, kuruma büzülmesi, basınç ve eğilme dayanımı ayrıca su emme deneylerini yapmış, kuruma büzülmesi değerleri hariç diğer deneylerde Portland çimentolarıyla mukayese edilebilir değerler elde etmişlerdir. 28 günlük kür sonunda %4 Na_2O oranına sahip örneklerden yüksek fırın cürufu/uçucu kül oranı 50/50 olan numune 80 MPa ile en yüksek dayanımı verirken %6 Na_2O oranına sahip örneklerden yüksek fırın cürufu/uçucu kül oranı 50/50 numunelerden ise 105,8 MPa dayanım elde etmişlerdir. Basınç dayanımlarına paralel olarak %4 Na_2O oranına sahip olan örnekte eğilme dayanımı 9,32 MPa çıkarken % 6 Na_2O içeren örneklerde ise bu değer %10-16 daha fazla bulunmuştur.

Toprak, [84], yapmış olduğu çalışmada termik santral taban külünün (TK) alkali aktivasyonu ile üretilen geopolimerin dayanım, dayanıklılık ve mikro yapı özelliklerini araştırmıştır. TK'ya göre ağırlıkça %8, 12, 16 Na_2O ve %0, 4, 8 ve 12 SiO_2 içeren 12 farklı alkali ile aktive edilmiş harçlar hazırlanmış 20 saat 85 °C ve %40 bağıl nemde etüvde kür edilmiştir. TK'nın ağırlıkça %12 Na_2O ve %8 SiO_2 içeren alkalilerle aktive edilmesi sonucunda 25-30 MPa dayanıma sahip geopolimer harçlar üretmişlerdir.

Altan ve Erdoğan, [85], çalışmalarında yüksek fırın cürufunu değişik oranlarda NaOH, NaOH+sodyum silika ve KOH+sodyum silika ile aktive etmişlerdir. Üretilen

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

Bakharev, [86], yaptığı çalışmada, F tipi uçucu küllü geopolimerleri, %5 sodyum sülfat ve %5 magnezyum sülfat, ayrıca %5 sodyum sülfat + %5 magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletildiğinde en fazla bozulma (numunelerde oluşan parçalanma) ve dayanım kaybı sodyum sülfatlı çözeltiler gözlemlenmiştir. NaOH içerikli numunelerin sülfatlı sularda diğer sodyum silikat ve potasyum hidroksit içerikli numunelerinden daha stabil olduklarını belirten farklı bir çalışmada ise kür şartlarını yüksek sıcaklıklarda oluşturmuş NaOH ile aktive edilen numunelerin dayanımlarının, sodyum silikatlı olanlara göre daha iyi neticeler verdiğini tespit etmiştir.

Puertas ve arkadaşları, [87], %50 Uçucu kül + %50 Yüksek fırın cürufu ve 10 M NaOH solüsyonu ile 25 °C kür yapılan numunelerden elde edilen 28 günlük basınç dayanım değerini 50MPa olarak bulunmuştur.

Oh ve ark., [88], çalışmalarında, yüksek kalsiyum içerikli uçucu küllü geopolimerleri NaOH, Na_2SiO_3 ve ısı ile aktive edilmişlerdir. Kalıptan alındıktan sonra 1 saat 75 °C fırında küre tabi tutulan örneklerden yüksek dayanım elde edilmiştir. Uçucu kül ağırlığının %3-12 oranında süper akışkanlaştırıcı eklenmiş, basınç dayanımı 65 MPa elde edilmiştir. Dayanım değerleri ekstra su kullanıldığında ise süper akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerden daha iyi değerler elde edildiği belirtilmiştir.

Temuujin ve ark. [89], kalsiyum içeriğinin uçucu kül esaslı geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerine etkisi konulu çalışmalarında, uçucu kül içerisine ağırlıkça sırayla %1, 2, 3 oranlarında CaO ve Ca(OH)₂ kalsiyum bileşenleriyle yer değiştirilmiş ve aktivatör olarak sodyum silikat ve 14 M NaOH kullanmışlardır. Elde edilen geopolimerlere oda sıcaklığında (20°C) ve 70 °C de kür uygulamışlardır. Uçucu kül yerine eklenen kalsiyum bileşikleri, oda sıcaklığında kür edilen örneklerde mekanik dayanımı iyileştirmiştir. Oda sıcaklığında 7 günlük küre tabi tutulan örneklerden ağırlıkça %3 CaO ilave edilen örneğin dayanımı 11,8 MPa dan 22,8 MPa'ya çıkarken; ağırlıkça %3 Ca(OH)₂ ilave edilen örneğinki ise 29,2 MPa'ya yükselmiştir. Bu durum Ca(OH)₂ ilavesinin CaO ilavesinden daha faydalı olduğunu göstermektedir. Ancak 70°C de kür edilen örneklerde ise kalsiyum ilavesi dayanımda düşüşe neden olmuştur. Bu durum alüminosilikat yapıdaki kalsiyum varlığının alüminosilikat yapının 3 boyutlu geopolimerik yapısının yetersiz gelişmesine sebep olmasıyla açıklanmıştır.

Songpiriyakij ve ark., [90], yüksek miktarda silis kaynağı olan pirinç kabuğu ve ağaç kabuğu külünü (RHBA) uçucu küle UK/RHBA oranı 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 ve 0:100 olacak şekilde ağırlıkça yer değiştirilmiş. Çalışmada iki karışım serisi kullanılmıştır. İlk seride, aktivatör oranı sabit tutulmuş UK/RHBA oranları değiştirilerek 7 karışım hazırlanmış, ikinci seride ise UK/RHBA oranı sabit tutularak (40:60) silikat/NaOH oranı değiştirilmiş ve çalışmalarında, basınç dayanımı, reaksiyonun derecesi ve geopolimerlerin mikro yapıları SiO₂/Al₂O₃ oranının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, optimum oranında (SiO₂/Al₂O₃ =15,9) 73 MPa değerinde en yüksek basınç dayanımına ulaştığını tespit etmişlerdir.

Xu ve ark., [91], alt külün jeopolimerizasyonu ile ilgili yaptıkları çalışmada, alt külün reaktivitesini belirlemek için külü 2, 5 ve 10M NaOH ve KOH solüsyonda çözmüş, geopolimeri aktive etmek içinse bir seri alkali hidroksit ve/veya sodyum silikat solüsyon kullanmışlardır. 40°C de 168 saat kür edilen örnek 52,9 MPa ile en yüksek dayanımı göstermiştir. Yapılan dayanım, SEM, XRD analiz sonuçlarına göre de alt külün çeşitli jeopolimerizasyon uygulamaları ile portland çimentoya alternatif olabilecek bir kaynak malzeme olduğunu tespit etmişlerdir.

Guo ve ark. [92], C sınıfı uçucu kül esaslı geopolimerin mikroyapısal özellikleri ve basınç dayanımı başlıklı çalışmalarında, C sınıfı uçucu kül ve aktivatör olarakda Sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak hazırlanan geopolimer örnekleri incelemişlerdir. En yüksek dayanım aktivatörün $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranı 1.5 ve Na_2O nin kütle oranı uçucu külün %10'u iken elde edilmiştir. Ayrıca araştırmacılar örnekleri 75 °C de 8 saat küre tabi tuttuktan sonra 28 gün de 23 °C de küre tabi tutmuş ve dayanımı 63.4 MPa olarak bulmuşlardır. Bunun yanı sıra yapılan XRD ve SEM taramalarında geopolimerik jel ve C-S-H jelinin her ikisinin de var olduğu görülürken incelenen yapı da reaksiyona girmemiş bazı uçucu kül parçacıklarına rastlamışlardır.

Xu ve ark., [93], çoklu minerallerin geopolimerizasyonu başlıklı çalışmalarında, uçucu kül, kaolinit ve albit atıklarının birleşiminden oluşan geopolimerlerin basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Bu amaçla uçucu kül, kaolinit ve albitten oluşan karışımlar NaOH ve KOH ile aktive edilmiştir. Üretilen geopolimer numuneler 18 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra uçucu kül ve kaolinit veya albit veya hem kaolinit hem albitle üretilen numuneler 40°C de 6 gün kür edilmiş, sadece kaolinit ve albitten oluşan karışımlar 45°C de 27 gün kür edilmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda uygun reaksiyon parametreleri kullanıldığında üç bileşenli sistemin en yüksek basınç dayanımı (32,7 MPa) ve düşük oranda kırılım gösteren geopolimerler olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca uçucu kül ve albit arasındaki reaksiyonunun yüksek oranda gerçekleştiği sonucuna varmışlardır.

Chindapasirt ve ark. [94], yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanılan jeopolimer harcının temel özellikleri, işlenebilirliği ve dayanımını araştırmışlardır. Geopolimeri, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve ısı ile aktive eden araştırmacılar, jeopolimer harcının akışkanlık oranının 110+%5 – 135+%5 olduğunu saptarken bu oranın sodyum silikat/NaOH oranına ve NaOH konsantrasyonuna bağlı olduğunu saptamışlardır. Üretilen örneklerde basınç dayanımı 10-65 MPa arasında değişirken, yüksek dayanımlı jeopolimer örnekleri 75°C de 2 günden az olmamak kaydıyla küre tabi tuttıklarını belirtmişlerdir.

Temuujin ve ark. [95], uçucu kül esaslı geopolimer harçların hazırlanması ve karakterizasyonu konulu çalışmalarında, farklı boyutlarda kum agregalarla hazırlanan geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Uçucu kül tabanlı geopolimer örneğin basınç dayanımı 60 MPa, elastik modülü ise 2.27 GPa bulunmuş ve bu değerlerin ağırlıkça %50'nin üzerinde kum eklendiğinde ise önemli bir değişme göstermediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar alkali aktivatör miktarı artmadan kum miktarı artırıldığında bağlayıcı sistemin geopolimerizasyon derecesinde bir düşüş gözlemlendiğini bildirmişlerdir.

Diaz ve ark. [96], Jeopolimer üretiminde uçucu kül atığının uygunluğunu araştırdıkları çalışmada, Amerika'nın farklı alanlarından elde edilen 5 farklı uçucu kül örneğinin kimyasal analiz, XRD, dane boyutu dağılımını yaparak, her bir uçucu kül atığı ile harç ve beton örnekler üzerinde, kimyasal ve XRD, RAMAN spektroskopisi, priz süresi tayini ve basınç dayanımı gibi bir dizi mekanik analiz uygulamışlardır. 5 farklı uçucu külü aktive etmek için 14 M NaOH ve sodyum silikat (ağırlık olarak %45) 1:1 oranda kullanılmıştır. Bütün örnekler 60°C de 3 gün küre tabi tutulmuş ve testten önce 24 saat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Araştırmacılar çalışma da, uçucu külün kimyasal ve dane dağılımı gibi kristoğrafik bileşenlerini üretilen geopolimerin kimyasal ve mekanik özellikleriyle karşılaştırmış ve uçucu kül atığın dane dağılımı, camlaştırma derecesi ve camın kırınım lokasyonu gibi doğal faktörlerin geopolimerin taze ve sertleşmiş özelliklerinde önemli rol oynadığını tespit etmişlerdir.

Villa ve ark., [97], doğal zeolitten sentezlenen geopolimerlerin mekanik dayanımları üzerinde aktivatör oranı, zamanı ve kür sıcaklığının etkisini, silikat çözeltileri ve sodyum hidroksit kullanılarak değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, sodyum silikat/NaOH oranı 0.4, 1.5, 5, 10 ve 15 olacak şekilde 7M NaOH solüsyonları aktivatör olarak kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler oda sıcaklığında, 40°C, 60°C ve 80°C sıcaklıklarda 1, 7, 14, 28 ve 90 günlük küre tabi tutulmuştur. Araştırma sonuçlarına göre, kür ısısında olduğu gibi aktivatör oranındaki bir artış malzemedeki dayanım gücünü arttırmıştır. Ayrıca araştırmacılar, 80°C ya da daha yüksek kür sıcaklığı ve 90 günlük kür süresinin dayanım üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğunu bildirmişlerdir. En yüksek dayanımın 40°C kürde elde edilen örneklerde

portland çimentosu ile elde edilen değerden daha fazla olduğu görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklarda (60 ve 80°C) kısa süreli kürlerde daha iyi dayanım elde edilirken düşük sıcaklıklarda dayanımda iyileşme gözlemlemek için kür süresinin uzun olması gerektiği görülmüştür.

Bakharev [98], yaptığı çalışmada, sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive edilmiş uçucu kül esaslı geopolimer malzemelerin faz yapılarına, mikro yapılarına ve dayanımlarının gelişmesi üzerine yüksek kür sıcaklığının etkisini incelemiştir. Özellikle ısı kürüne tabi tutmadan önce oda sıcaklığında bekletmenin dayanım ve faz yapısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmada XRD, FTIR ve SEM taramaları yapan araştırmacı, üretilen bütün numunelerde uzun süre oda sıcaklığında bekletmenin dayanım üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu belirtmiştir.

Jaarsveld ve ark., [99], uçucu kül ve kaolinite esaslı geopolimer üzerine bileşim ve sıcaklığın etkisini inceledikleri çalışmada, atık bazlı geopolimer üretimi sırasında kullanılan malzemelerin re-aktivitesindeki farklılıkların özellikle geopolimerin nihai özelliklerine etkisinin olduğunu, malzeme özelliklerinde gözlenen bu değişikliklerin atık malzemenin çözünmemesinden kaynaklandığını saptamıştır. Su muhtevasının, uçucu kül/kaolinit oranı ve kullanılan metal silikat cinsi geopolimerin nihai özellikleri üzerinde etkili olduğunu ifade eden araştırmacı, özellikle, kaolinit gibi esas malzemelerin termal özelliklerinin, geopolimer ürün tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken en önemli faktör olduğunu bildirmiştir.

Temuujin ve Riessen, [100], uçucu külün ön kalsinasyonunun geopolimerizasyon süreci üzerindeki etkisini incelemiştir. 500 ve 800 °C de gerçekleştirilen ön kalsinasyon uçucu külün dekarbonatizasyonuna sebep olurken aynı zamanda uçucu külün amorf içeriğinde %60 dan %57ye düşüş gerçekleşmiştir. Ham uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerlerin dayanımı 55.7 (9.2) MPa bulunurken 500 °C de kalsine edilen örneklerde dayanım 54 (5.8) MPa, 800 °C de kalsine edilenlerde ise 44.4 (5.4) MPa dayanım bulunmuştur. Geopolimerlerin dayanımındaki bu düşüşün uçucu kül parçacıklarının kısmi yüzey kristalleşmesinden kaynaklandığını belirten araştırmacılar, uçucu külün reaktivitesinin büzülme oranıyla alakalı olduğunu ve geopolimerin yüzeyinde çiçeklenmeye sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Kong ve Sanjayan, [101], yüksek sıcaklığın geopolimer harç ve beton örnekleri üzerine etkisi konulu çalışmalarında, Geopolimer örneklerde uçucu külü aktive etmek için sodyum silikat ve 7M KOH solüsyon kullanmışlardır. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra 24 saat 80°C de küre tabi tutulmuştur. Kür süresini tamamladıktan sonra numuneler kalıplarından çıkarılmıştır. Numuneler oda sıcaklığına ulaştıktan sonra bir seri numune dakika da 4.4°C de yükselerek 800°C sıcaklığa çıkarılmıştır, bir kısmı ise hiç ısıl işlem görmeden oda sıcaklığında bırakılmıştır. Numune boyutu, agrega boyutu, agrega cinsi süper akışkanlaştırıcı cinsi gibi birçok parametre inceleyen araştırmacılar, çalışmada, yüksek sıcaklıklarda (800°C) numune boyutunun ve agrega boyutunun geopolimer davranışını etkileyen iki önemli parametre olduğu belirlemişlerdir. Hem oda hem de yüksek sıcaklıktaki numunelerde agrega boyutunun 10 mm den büyük olduğu durumlarda yüksek dayanım elde edilmiş ve yüksek sıcaklıklarda geopolimer harç ve agrega arasındaki termal uyumsuzluğun dayanımda düşüşe sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

2.2. NaOH İle İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

Li ve Sun, [102], yaptıkları çalışmada, NaOH ve Na₂CO₃ ve her iki solüsyonun karışımıyla aktive edilmiş ve karışıma farklı oranlarda zeolit, gips katkı olarak eklenmiştir. Hazırlanan örneklerden bir kısmı oda sıcaklığında kür edilirken bir kısmı da 20°C su içerisinde küre tabi tutulmuştur. Çalışmada aktivatör türü, katkının etkisi ve kür şartlarının etkisi gibi birçok parametre araştırılmıştır. Çalışmada yüksek fırın cürufu ile ince veya kaba agrega olmadanda yüksek dayanımlı bağlayıcı malzeme elde edilebildiği görülmüştür. Zeolit, cips gibi katkıların alkali ile aktive edilen yüksek fırın cürufunun dayanımını yükselttiği rötreyi azalttığı ancak kullanım alanına uygun katkı kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Kür şartının dayanımda ve rötrede büyük etkisi olduğu 20°C suda kür etmenin en yüksek eğilme dayanımı sağladığı (7.9 MPa) ve rötreyi azalttığı belirlenmiştir.

Brough ve Atkinson, [103], KOH ile aktive edilmiş cürufların NaOH ile aktive edilenlerle benzer sonuçlar verdiğini ileri sürmüştür.

Xie ve Xi, [104], çalışmalarında, 24 saat 60 °C de kür edilen, NaOH ve cam suyu ile aktive edilmiş uçucu küllü numunelerde silikat modülünün 1.64 olmasının dayanım değerlerini artırdığını tespit etmişlerdir.

Bakharev, [105], çalışmasında, F tipi uçucu külü aktive etmek için NaOH, NaOH+KOH karışımı ve sodyum silikat solüsyonu karışımındaki toplam Na oranı %8-9 ve su/bağlayıcı oranı 0.3 olacak şekilde hazırlanmıştır. Örnekler 24 saat oda sıcaklığında bekledikten sonra 24 saat 95°C de kür edilmiş ve daha sonra 2 gün oda sıcaklığına inmesi için fırında tutulmuştur. Uçucu küllü geopolimerleri %5 asetik ve %5 sülfürik asit çözeltilerinde bekletmiştir. Sodyum silikat, NaOH ve KOH içerikli numunelerde önemli ölçüde bozulmalar oluşmuş ve en iyi performansın NaOH içerikli yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerde gözlemlendiğini belirtmiştir. Aynı deney deniz suyu, sodyum sülfat ve sülfürik asitli çözeltide bekletilen metakaolin bazlı alkali ile aktive edilmiş malzemelerde yapılmış, en iyi mekanik sonuçlar NaOH ile aktive edilen numunelerden elde edilmiştir.

Aydın ve Baradan, [106], NaOH ve sodyum silikat alkalilerini kullanarak otoklav ve buhar kürü uygulamışlardır. Otoklav kür uyguladıkları numunelerde çok düşük silikat modülleriyle (%2 Na₂O) bile basınç dayanımlarında 70 MPa değerini yakalamışlardır. Bununla beraber buhar kürü uygulanan numunelerde de benzer dayanım değerleri ve her iki kür koşullarında da kuruma büzülmelerinde kayda değer azalma gözlemlendiği belirtilmiştir.

Huang ve Han, [107], çalışmalarında, uçucu kül esaslı geopolimerlere α -Al₂O₃ eklenmiş, mikroyapı, mekanik özellikleri ve formaldehit emiliminin geopolimer özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla F1(%95 UK+%5 Al₂O₃, 6 M NaOH), F2 (%95 UK+%5 Al₂O₃, 9 M NaOH), F3 (%95 UK+%5 Al₂O₃, 12 M NaOH), F4 (%95 UK+%5 Al₂O₃, 15 M NaOH), F5 (%95 UK+%10 Al₂O₃, 15 M NaOH), F6 (%100 UK, 15 M NaOH) olarak isimlendirilen 6 numune üretilmiş ve 24 saat 80 °C de kür edildikten sonra 7 gün oda sıcaklığında tutulmuştur. En yüksek dayanım en yüksek NaOH konsantrasyonuna sahip F4 örneğinde yaklaşık 18 MPa bulunurken F6 örneğinde elde edilen dayanım da düşüş gözlenmiş, F5 örneğinde ise bu düşüş daha keskin olduğunu belirtmişlerdir.

Haha ve ark., [108], iki farklı Al_2O_3 içeriğine sahip yüksek fırın cürufunu aktive etmek için NaOH ve NSH_5 (sodyum metasilikat) olmak üzere iki farklı tipte aktivatör kullanmışlar ve örnekler test zamanına kadar oda sıcaklığında kür edilmiştir. Numuneler üzerinde dayanım, SEM, XRD ve termogravimetrik analizler yapmışlardır. NaOH ile aktive edilen örneklerde 1 gün sonunda dayanım elde edilirken NSH_5 ile aktive edilenlerde herhangi bir dayanım değeri elde edilmemiştir ancak 7 günden sonraki dayanımlar NaOH ile aktive edilen cüruflardan hep yüksek bulunmuştur. 180 gün sonunda ise NSH_5 ile aktive edilen cürufların sahip olduğu dayanım değerleri NaOH ile aktive edilenlerden 2 kat fazla değer vermektedir. NSH_5 ile aktive edilen örnekler her iki cüruf türünde de 7 ve 28 günlük dayanım sonuçlarına bakıldığında örneklerin %70-80 daha fazla dayanım kazandığı görülürken 180 günlük dayanım sonuçlarında ise dayanımın iki kat arttığı görülmektedir. NaOH erken dayanım sağlarken, NSH_5 'ın ise 7 günden daha fazla sürede dayanım kazandığı ifade edilmiştir.

Fernandez ve Palomo, [109], yaptıkları çalışmada uçucu küllü bağlayıcılar NaOH, $NaOH+Na_2CO_3$ ve $NaOH+Na_2SiO_3$ ile aktive edilmiş ve $85^\circ C$ de 20 saat küre tabi tutulmuştur. Aktivatör miktarı karışımda uçucu küllün %15'i kadar Na_2O bulunacak şekilde belirlenmiştir. Sadece NaOH ile aktive edilen örneklerde 70.4 MPa basınç dayanımı ve 12.4 MPa eğilme dayanımı elde edilirken $NaOH+Na_2SiO_3$ ile üretilen örneklerde dayanım 20 saatlik kür sonunda da 91.6 MPa basınç ile 8.2 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. Ancak SiO_2/Na_2O nun önemli bir parametre olması gibi su/bağlayıcı oranı da önemli bir faktördür. Sıvı/UK oranı 0.35 iken SiO_2/Na_2O oranı 1.23 ten 1.28 e çıkarmak bileşikdeki düşük Na_2O konsantrasyonu bileşiğin pH'sını düşürür ve bu da reaksiyon kinetiğini negatif etkileyeceğinden dayanım 82.36 MPa (8.9 MPa) dan 56.23 MPa (7.94 MPa) ya düşer. $NaOH+Na_2CO_3$ ile üretilen örneklerde ise $[CO_3^{2-}]$ varlığı içerikte Na_2O varlığına rağmen düşük dayanım göstermektedir (yaklaşık 35MPa (5.08 MPa)).

Reig ve ark., [110], karışımdaki Na konsantrasyonu 2,5 ila 10 M arasında değişecek oranlarda NaOH ve sodyum silikat ile aktive edilen kırmızı tuğla atıklarını $65^\circ C$ 'de bağıl nem %90-95 olacak şekilde 3 ve 7 günlük küre tabi tutmuşlardır. Optimum

karışım için olması gereken Na konsantrasyonu 7M olarak tespit edilmiş ve bu karışım için 7 günlük kür sonucu 30 MPa dayanım değeri elde etmişlerdir.

Chindapasirt ve ark., [111], uçucu kül ve zemin dip külünden yapılan geopolimerlerin karşılaştırılması ile ilgili yaptıkları çalışmada, aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanmışlardır. Çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1,5 olmak üzere üç farklı konsantrasyonda (5, 10 ve 15 M) NaOH kullanılmış ve geopolimerler 48 saat boyunca 65°C de kür edilmiştir. Geopolimer numuneler üzerinde yaptıkları analizler sonucunda (FTIR, DSC, SEM ve basınç dayanımı), hem uçucu külün hem de zemin dip külünün geopolimer ana malzemesi olarak kullanılabilceğini tespit etmişlerdir. Geopolimer özelliklerinin hem ana malzemeye hem de NaOH konsantrasyonuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu külün zemin dip külüne göre daha reaktif ve geopolimerizasyon derecesinin daha yüksek olduğunu en optimal NaOH konsantrasyonunun 10M olduğunu söylemişlerdir. Uçucu küle üretilen örnekler de dayanım 35 MPa bulunurken zemin dip külü ile üretilen örneklerde 18 MPa olarak bulunmuştur.

Chandapasirt ve Rattanasak [112], yaptıkları çalışmada kömür külü (PCC), akışkan yataklı yakma külü (FBC-FA) ve akışkan yataklı dip külünü (FBC-BA) kullanmışlardır. FBC-FA ve FBC-BA kaba incelik $10\mu\text{m}$ (C sınıfı), orta incelik $8\mu\text{m}$ (M sınıfı) ve ince incelik (F sınıfı) $6\mu\text{m}$ olacak şekilde 3 farklı incelik oranında kullanmışlardır. FBC-FA/FBC-BA optimum oranı belirlemek için 80:20, 60:40 ve 40:60 oranlarında kullanarak, optimum oran olarak 60:40 bulmuşlardır. PCC/FBC oranı ise 50:50 kullanılmıştır. Aktivatör olarak ise Na_2SiO_3 ve 10 M NaOH solüsyon $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 1.5 olarak kullanan araştırmacılar, hazırlanan geopolimerleri 65°C de 48 saat küre tabi tutmuşlardır. Geopolimer harçlar üzerinde XRD, SEM ve TGA analizleri yapılırken numuneler üzerinde basınç dayanım testi yapılmıştır. F sınıfı FBC külünün C sınıfı FBC külüne göre daha reaktif ve dayanımın daha yüksek olduğu görülmüştür, külün inceliğinin artmasıyla reaksiyona giren kül yüzeyinin arttığı ve külün reaksiyon fazının arttığı ve böylece de dayanımın arttığı görülmüştür. Yapılan dayanım deneyleri sonucunda en yüksek dayanım M ve F sınıfı uçucu küllü örneklerde 35.0-44.0 MPa olarak bulunmuştur.

Topçu ve Toprak, [113], çalışmalarında, akışkan yataklı yakma kömür dip külü NaOH ile aktive edilmiş ve örnekler üzerinde dayanım, atomik oran ve SEM taramaları yapmışlardır. Bu çalışmada, üretilen numunelerin bir kısmı (AC) oda sıcaklığında 20°C de %90 bağıl nemli ortamda 20 saat küre tabi tutulmuş, diğer kısmı ise (DC) 80°C de %40 bağıl nemli ortamda 20 saat küre tabi tutulmuştur ve 28 gün sonunda AC numunelerinde dayanım 26.23 MPa bulunurken DC numunelerinde 24.14 MPa bulmuşlardır.

Rattanasak ve Chindaprasit, [114], uçucu kül karışımının NaOH solüsyonu ile çözünmesi ve jeopolimer hazırlamak için gerekli karışım işlemlerini inceledikleri çalışmalarında, farklı zaman aralıklarında uçucu külü NaOH solüsyonu ile karıştırarak SiO₂ ve Al₂O₃'ün ayrışmasını ve silika ve alümina içerikleri açısından çözeltileri analiz etmişlerdir. Jeopolimer hazırlanırken ayrı karıştırma ve normal karıştırma yöntemleri uygulayan araştırmacılar, ayrı karıştırma yönteminde NaOH ve uçucu külü ilk 10 dakika karıştırmış ve daha sonra sodyum silikat solüsyonu karışıma eklemişlerdir. Normal karıştırma yönteminde ise uçucu kül, NaOH ve sodyum silikat solüsyonu aynı anda eklemiş ve karıştırmışlardır. Geopolimerler 65°C de 48 saat boyunca kür edilmişlerdir. Geopolimerler üzerinde mikro yapı ve dayanım testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak uçucu külün çözünürlüğünün NaOH konsantrasyonuna ve NaOH ile karıştırma süresine bağlı olduğunu, ayrı karıştırma yönteminin normal karıştırma yöntemine göre dayanımda biraz daha yüksek sonuç verdiğini saptamışlardır. En yüksek dayanım ise ayrı karıştırma yöntemi kullanılarak 10 M NaOH ve sodyum silikatın NaOH'a oranı 1.0 iken 70 MPa olarak bulunmuştur.

Görhan ve Kürklü, [115], yaptıkları çalışmada Kütahya Seyitömer termik santraline ait F sınıfı uçucu kül kullanarak farklı NaOH konsantrasyonunun farklı sıcaklık ve farklı kür zamanlarının jeopolimerizasyon üzerindeki etkisini incelemişlerdir. NaOH konsantrasyonunun jeopolimer hamur üzerindeki etkisini araştırmak için 3 farklı molarite (3 M, 6 M ve 9 M) sodyum silikat ile birlikte kullanılmıştır. Örnekler iki farklı sıcaklıkta (65 ve 85 °C) küre tabi tutulmuş ve 7 günlük numunelerin porozite, yoğunluk, su emme gibi fiziksel özelliklerine ve eğilme-basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerine bakılmıştır. Sonuçta, kür sıcaklığı ve kür zamanının jeopolimer hamurun fiziksel özelliklerini etkilediği, NaOH konsantrasyonunun 85

°C de etkisinin açık bir şekilde görüldüğünü bildirmişlerdir. Basınç dayanımı 24 saat küre tabi tutulan 6M örneklerde 65 °C kür edilenlerde 21.3 MPa 85 °C de kür edilenlerde ise 22 MPa bulunmuştur. Geopolimer örneklerin basınç dayanımları 85 °C de kür zamanı ve NaOH konsantrasyonundaki artışla arttığını gözlemleyen araştırmacılar, mukavemet değerleri göz önüne alındığında en iyi dayanım sıcaklığı ve optimal NaOH konsantrasyonu sırasıyla 85 °C ve 6M olarak tespit edildiğini bildirmişlerdir.

Somna ve ark., [116], NaOH ile aktive edilmiş taban uçucu kül esaslı ve oda sıcaklığında kür edilen geopolimerler ile ilgili yaptıkları çalışmada, tane büyüklüğü 10,5 µm olan taban uçucu külü kullanmışlardır. Alkali olarak 4,5-16,5 M NaOH konsantrasyonu kullanan araştırmacılar, örnekler üzerinde dayanım ve mikroyapı çalışmaları yapmışlardır. Çalışmada taban uçucu külünün oda sıcaklığında geopolimer üretiminde kullanılabileceğini belirtirken, taban uçucu külü ile üretilen geopolimerlerin orijinal uçucu küle üretilenlerden daha fazla dayanım verdiğini bildirmişlerdir. NaOH konsantrasyonunu 4,5 den 14,0 a artırmak dayanımı da artırmaktadır. Araştırmacılar, mikroyapı taramalarında 12-14 M NaOH konsantrasyonunda sodyum alüminosilikatın yeni kristal ürünü görüldüğünü, basınç dayanımının 9,5-14 M NaOH konsantrasyonunda 28 günlük örneklerde 20-23 MPa olarak bulunduğunu saptamışlardır. Ayrıca NaOH konsantrasyonun bu noktadan sonraki artışında alüminosilikat ürünün erken çökmesine bağlı olarak mukavemette bir azalma gözlemlemişlerdir.

Palomo ve ark., [117], uçucu külün alkali ile aktive edilmesini konu alan çalışmalarında, yüksek OH⁻ konsantrasyona sahip NaOH, KOH ve sodyum silikat vb. malzemeleri ile 65 °C ve 85 °C kür şartlarında ve 2-5 ve 24 saatlik kür zamanlarıyla birlikte 0,25 ve 0,30 solüsyon/uçucu kül oranların da çalışmışlardır. Bu farklılıkların mekanik dayanımın gelişmesini önemli ölçüde etkilediğini belirten araştırmacılar, 85 °C de 5 saat kür ettikleri numunelerde 60 MPa mekanik dayanım elde etmişlerdir.

Vargas ve ark., [118], uçucu külü alkali ile aktive ederek mühendislik için yeterli mekanik özelliklere sahip yoğun bir matris oluşturarak uçucu kül kullanımını teşvik etmek amacıyla yaptıkları çalışmalarında, üç değişken kullanmışlardır. Bu

değişkenler; $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranı (N/S 0.20, N/S 0.30 ve N/S 0.40); ilk 24 saat için kür sıcaklığı (50, 65, 80°C) ve yaş (1, 7, 28, 91 ve 180 gün) tır. Alkali ile aktive edilmiş hamur ve harç karışımları üzerinde SEM ve XRD analizleri, dayanım deneyleri yapılarak sonuçlar ANOVA ile analiz edilmiştir. N/S molar oranının geopolimerin mekanik ve morfolojik özellikler üzerinde önemli rol oynadığını belirten araştırmacılar, N/S molar oranı 0.40 olan örneklerin en yüksek dayanımı verdiğini belirtmişlerdir. En yüksek dayanım N/S molar oranı 0.40 için 80°C de kür edilmiş örnekte 180 günde 21,28 MPa olarak bulan araştırmacılar, morfolojik özelliklerde de yine N/S 0.40 molar oranına sahip örnekler için basınç dayanımında olduğu gibi en yoğun görünüme sahip olduğunu bildirmişlerdir.

Swanepoel ve Strydom, [119], yaptıkları çalışmalarında, elektrik ve petrokimya alanı atığı olan uçucu külü, yeni geopolimerik malzeme için esas malzeme olarak kullanmış, doğal puzolanlar gibi uçucu küllünde geopolimer sentezinde iyi bir polimerik Si-O-Al çerçeve oluşturmasının bu atık ürünün geopolimer üretiminde kullanımını teşvik ettiğini ifade etmişlerdir. Uçucu kül (%60), kaolinit (%10), sodyum silikat çözeltisi (%5), NaOH (%5) ve su (%20) karıştırılarak geopolimer üretilmiştir. Örnekleri farklı zaman aralıklarında (6, 24, 48 ve 72 saat) 40, 50, 60 ve 70 °C de kür eden araştırmacılar, 7 ve 28 günlük küp numuneler üzerinde basınç dayanım testleri yapmış ve en yüksek basınç dayanımını 28 gün sonunda 8 MPa olarak bulmuşlardır.

Panias ve ark., [120], çalışmalarında uçucu kül esaslı geopolimer üretiminde su, NaOH ve sodyum silikat içeriğinin geopolimerin basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Geopolimer üretiminde kullanılan parametrelerin dayanım üzerinde etkisi olduğu belirten araştırmacılar, ayrıca geopolimer üretiminde sodyum silikat miktarı artarken (sodyum silikat molar oranı 2.3 M iken dayanım 41,3 MPa) içerikteki su miktarının azalmasının (Su/uçucu kül = 2.05 iken dayanım 24,5 MPa) dayanımı artırdığını tespit etmişlerdir. Geopolimer de NaOH molar oranı 6.6 M iken dayanım 24,5 MPa olarak bulunması araştırmacılar tarafından bulunan bir diğer sonuçtur.

Hanjitsuwan ve ark., [121], NaOH konsantrasyonunun geopolimerin fiziksel ve elektriksel özellikleri üzerine etkisini inceledikleri çalışmalarında, 5 farklı NaOH molar oranı 8M, 10M, 12M, 15M ve 18M kullanmışlardır. Alkali sıvı/uçucu kül=0.4 ve sodyum silikat/NaOH=0.67 dir. Hazırlanan numuneler 1 gün boyunca suyunu kaybetmemesi için sarılmış ve oda sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra 40°C de 24 saat küre tabi tutulan numuneler sonrasında 7 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Çalışmada NaOH konsantrasyonunun geopolimerin fiziksel ve elektriksel özelliklerinde etkili olduğu görülmüştür. NaOH konsantrasyonundaki artışla geopolimer yapıdaki reaksiyona girmemiş uçucu küller aktive edildiği için dayanımda artış gözlenmiştir. 18M NaOH konsantrasyonuna sahip örnekte en yüksek dayanım 56,0 MPa olarak bulunmuştur.

Khalifeh ve ark., [122], C sınıfı uçucu kül esaslı geopolimerin erken yaşta dayanımındaki gelişmenin onu alternatif bir bağlayıcı yaptığını ve tek eksenli basınç dayanım sonuçlarına göre kür sıcaklığının erken dayanım gelişimi üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışmada sodyum silikat ve NaOH 3 farklı molar oranında (6M, 8M ve 10M) karıştırılmış ve hazırlanan numuneler iki farklı sıcaklıkta (87°C ve 125°C) ve 1, 3, 5 ve 7 günlük küre tabi tutulmuş ve en yüksek dayanım 87 °C’de 1 günlük kür sonunda 34,47 MPa olarak tespit edilmiştir.

Khan ve ark., [123], geopolimer malzemelerin yüksek yangın dayanımı, yangın direnci, ve antikorozyon özellik gösterdiğini belirttikleri çalışmalarında kaplama malzemesi olarak uçucu kül esaslı geopolimerleri araştırmışlardır. Geopolimerin kimyasal özelliklerinin adezyon dayanıma etkisi, mikroyapı, priz süresi, ve termal özelliklerini (800°C nin üzerinde) belirlemek için Na/Al ve su/katı oranı gibi iki parametre çalışmada kullanılmıştır. Na/Al oranı 1.0 ve su/katı oranı 0.33 iken adezyon dayanımını 3.8 MPa bulmuşlardır. Kaplama malzemeler 60°C de 3 günlük kür sonunda maksimum dayanımlarını kazanırken 6 aya kadar süren kürün adezyon dayanımı etkilemediğini tespit etmişlerdir. Kür zamanı ve adezyon dayanımı arasında direkt veya indirekt bir bağlantı bulunmadığını tespit eden araştırmacılar, su miktarının, geopolimerin adezyon dayanımını, priz süresini ve mikroyapısını önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, mikroyapı

incelemelerinde mezogözenekli polimerik yapıda reaksiyona girmemiş uçucu kül ve zeolit benzeri lifli morfolojiler gözlemlemişlerdir.

Yukarıda yapılan kaynak taramasından da anlaşıldığı üzere, uçucu küllerin alkali ile aktifleştirilerek geopolimerleştirme çalışmaları üzerinde ülkemizde yapılan çalışmaların az sayıda ve yetersiz olduğu görülmektedir. Ayrıca, uçucu külle üretilen geopolimerlerde genellikle çok yüksek olmayan basınç ve eğilme dayanımları elde edilmiştir. Nadiren çok yüksek dayanımlı geopolimer sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmada ülkemizde bulunan Yumurtalık Su Gözü termik santralinde ortaya çıkan F sınıfı uçucu külün geopolimer harç üretiminde değerlendirilebilirliği araştırılmıştır. Mevcut külden elde edilebilecek maksimum dayanım sınırlarını da belirleyebilmek amacıyla aktivatör yüzdesi, kür sıcaklığı ve kür zamanı parametreleri değiştirilerek çok sayıda geopolimer harç numuneler üretilerek laboratuvar çalışması yürütülmüştür. Üretilen numelerin üzerinde mekanik ve fiziksel özellikler tespit edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Üretilen harç numuneler üzerinde, kıvam, priz süresi, eğilme ve basınç dayanımları, böhme aşınma dirençleri, su emme, kılcallık, donma çözülme direnci ve yangın dayanımları incelenmiştir.

3. BÖLÜM

YÖNTEMLER

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, karışım oranları ve yürütülen deneyler hakkında bilgiler verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışmanın deney aşamasında kullanılan malzemeler özellikleri ile birlikte verilmektedir.

3.1.1. Alkali Aktivatör Olarak NaOH

NaOH İngiltere’de 1807 yılında Humphrey Day tarafından keşfedilmiştir. Bu keşif için kullanılan bir olay veya deney bilinmemektedir. NaOH doğal olarak meydana gelmez ve üretimi kolay bir kimyasaldır. Genellikle sodyum klorür’ün elektrolizi sonucu %50’lik çözelti şeklinde üretilir. Bu reaksiyon anında klor gazı oluşur, çözeltideki su buharlaştığında ise katı haldeki NaOH elde edilir.

Dünyada üretilen NaOH’ın çoğunluğu Kuzey Amerika, Asya ve Avrupa ülkelerinde yoğunlaşmaktadır.

NaOH kimya ve birçok endüstride kullanılan temel bir bileşiktir. NaOH, diğer adıyla KOSTİK beyaz renkte nem çekici bir maddedir. Suda kolaylıkla çözünür ve yumuşak, kaygan, sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. Herhangi bir kokusu yoktur, sıvı veya katı halde bulunur. Katı olarak payet, boncuk gibi şekillerde olur. Sıvı formda ise genelde sulu çözelti halinde bulunur. İnsan dokusunda kaşıntıdırıcı bir etkisi vardır.

Endüstride birçok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kağıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır. Su ile tepkimeye girdiğinde yaklaşık 5 dakika içinde sıcaklığı 50 °C'ye çıkar ve yaklaşık 15 dakika sıcak kalır. Çalışmada uçucu külü aktive etmek için katı formda NaOH suda eritilerek kullanılmaktadır.

NaOH medikal laboratuvarlarından temin edilmiş olup, kimyasal kompozisyonu Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan alkalilerin (NaOH) kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Adı	Sodyum Hidroksit
Kimyasal Formül	NaOH
Molekül Ağırlığı	40,00 g/mol
Asidimetrik	≥97
Na ₂ CO ₃	≤1
Cl	≤0,01
SO ₄	≤0,01
Ağır Metal	≤0,002
Al	≤0,002
Fe	≤0,002

3.1.2. Uçucu Kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül, İskenderun su gözü termik santralinden elde edilmiştir. Uçucu kül temininde, tek bir silodan alınan uçucu kül olmasına dikkat edilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu küle ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Kullanılan Uçucu Külün Kimyasal Kompozisyonu ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	%	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	61,81	Tanecik Yoğunluğu (kg/m ³)	2390
Al ₂ O ₃	19,54	Dayanım aktivite indeksi-7 gün (%)	78,20
Fe ₂ O ₃	7,01	Dayanım aktivite indeksi 28 gün (%)	93,80
Toplam CaO	1,77		
SO ₃	0,31		
Na ₂ O	2,43		
Serbest CaO	0,070		
Cr	0,040		
Kızdırma Kaybı	2,20		

3.1.3. Su

Karışım suyu olarak şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Kontrol Numunelerinde Kullanılan Çimento

Tez çalışmasında, üretilen kontrol numunelerinde kullanılan çimento, TS EN 197-1 [24]'e uyumlu CEM I 42.5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimento nem almaması için koruyucu kaplarda muhafaza edilmiştir. Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3.'de verilmiştir.

Tablo 3.3. CEM I 42.5 Portland Çimentosunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	%	Fiziksel Özellikler	
SiO ₂	18,69	Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,12
Al ₂ O ₃	5,61	Priz başlangıcı (dk)	190
Fe ₂ O ₃	2,52	Priz sonrası (dk)	225
CaO	62,68	Hacim genleşmesi (mm)	1,0
MgO	2,63	Blaine özgül yüzey (cm ² /g)	3200
Na ₂ O	0,13	2 günlük basınç dayanımı (MPa)	27,2
K ₂ O	0,77	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	41,0
SO ₃	2,73	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	51,2
Cl-	0,01		
Kızdırma Kaybı	2,88		
Çözünmeyen Kalan	0,96		
Serbest CaO	0,93		

3.1.5. Kum

Set Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TSE EN 196-1 [124]'e uygun maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Deneyde kullandığımız CEN standart kumunun tipik bir paketinin resmi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan TS-EN 196-1 kum

CEN standart kumunun elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımı ve TS EN 196-1 [124] sınır değerleri ile birlikte Tablo 3.4'de gösterilmiştir. Kumun standarda uygun olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 3.4. İnce agreganın granülometrisi ve standart sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1,0	1,6	2,0
Kalan (%)	99	83	62	38	10	0
Sınır (%)	99 ± 1	87 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	7 ± 5	0

3.2. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde deneysel çalışmalar için gerekli numunelerin karışım oranları, üretimi ve kür uygulamaları açıklanmaktadır. Ayrıca çalışmada hangi deneylerin yürütüldüğü ve hangi özelliklerin ölçüldüğü bu kısımda verilmektedir.

3.2.1. Karışım Oranları

Çalışma kapsamında kontrol grubu dahil 10 farklı karışım oranlarında harç karışımı hazırlanmıştır. Kontrol grubu olarak PÇ 42,5 çimento ile harç karışımı hazırlanmıştır. Diğer karışımlar da ise çimento yerine tamamen uçucu kül ikame edilmiştir. Kum/bağlayıcı oranı standart harçlar için kullanılan 3 olarak alınmıştır. Su/bağlayıcı oranı sabit 1/3 olarak seçilmiş ve aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır. Aktivatör miktarı ise çözeltildeki toplam sodyum oranı %4, %6, %8, %10, %12, %14, %16, %18 ve %20 olacak şekilde ayarlanmıştır. Alkali solüsyon hazırlanırken NaOH kullanılmıştır. Karışımın su/bağlayıcı oranını sabit tutmak ve değişmesini önlemek amacıyla NaOH içinde solüsyona giren fazladan su hesaplanarak, toplam su miktarından düşülerek karışımlar üretilmiştir. Tablo 3.5 te karışıma giren malzeme miktarları ile sodyum oranı ve molariteleri verilmektedir.

Tablo 3.5. Farklı derişim oranlarında hazırlanan harçların karışım miktarları

	Çimento (gr)	Kum (gr)	Toplam Su (gr)	Uçucu Kül (gr)	Aktivatör Dozajı	Molarite
1	450	1350		-	-	0
2	-	1350	150	450	%4	4,96
3	-	1350	150	450	%6	7,27
4	-	1350	150	450	%8	9,47
5	-	1350	150	450	%10	11,57
6	-	1350	150	450	%12	13,57
7	-	1350	150	450	%14	15,49
8	-	1350	150	450	%16	17,33
9	-	1350	150	450	%18	19,10
10	-	1350	150	450	%20	20,78

3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Harç numuneleri Tablo 3.5.'de verilen karışım miktar ve oranlarına göre sırasıyla Hobart mikserinde karıştırılarak hazırlanmıştır. Deney numuneleri 40x40x160 mm boyutlarında prizma olarak hazırlanmıştır. Harç karıştırma işleminde ilk olarak,

NaOH suyun içinde eritilmiştir. Çözeltinin soğuması beklendikten sonra, çözelti ve uçucu kül Hobart mikserine yerleştirilmiştir. Hobart mikseri TS EN-196-1 standardına uygun 80 kg ağırlığında ve 140 ve 285 dev/dakika ile çalışmaktadır. Elektronik beyin vasıtasıyla tam otomatik çalışma imkânı sağlamaktadır. Standardın gereği olan çift program ile çalışabilmektedir. Opsiyonel olarak otomatik kum boşaltma aparatı bulunmaktadır. Hobart mikserinin görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hobart Mikserinin Görünümü

TS EN 196-1 [124]’e göre Hobart mikseri otomatik olarak çalıştırılmıştır; yavaş ayarda 30 saniye karıştırılan harç ikinci adımda 30. saniyeden itibaren mikser karıştırmaya devam ederken deney kumu yavaşça karışıma boşaltılmış ve 30 saniye yine yavaş olarak mikser karıştırmaya devam etmiştir. Sonra üçüncü adımda mikser birden hızlanmış ve 30 saniye hızlı olarak harcı karıştırmıştır. Dördüncü adımda mikser harcı hızlı olarak 30 saniye karıştırdıktan sonra durmuş ve 15 saniye karışım dinlendirilmiştir. Daha sonra mikser 60 saniye hızlı ayarda harcı karıştırmıştır. Mikser durduktan hemen sonra taze harç mikserden alınmış ve numune kalıplarına yerleştirilmiştir. Uygun bir şekilde karıştırma kabından doğrudan bir veya bir kaç defada alınan harç karışımı, iki tabakada her kalıp bölümüne doldurulmuş ve vibrasyonla yerleştirilmiştir. Daha sonra yüzeyi düzeltilen harç numuneleri tanımlamak amacıyla numaralandırılmıştır.

3.2.3. Deneyler

3.2.3.1. Taze Haldeki Karışımlar Üzerinde Yapılan Deneyler

3.2.3.1.1. İşlenebilirlik Deneyi

Harç karışımlarının işlenebilirlik ölçümlerinde, TS EN 1015-3 [125]'te belirtilen yayılma tablası metodu kullanılmıştır. Yayılma tablası deneyi için araştırma kapsamında hazırlanan alkali ile aktive edilmiş harç karışımları, yayılma tablasının taban çapı 100 mm olan koni kalıbına iki aşamada ve her tabakaya tokmak ile 10 vuruş yapılarak yerleştirildikten sonra harcın üst yüzeyi düzelterip, kalıp çekilmiştir. Yayılma tablası üzerindeki harcın 1.25 cm yükseklikten 15 saniyede 15 defa düşürülmesinin ardından yayılan taze harcın 4 farklı yönden yayılma çapı değeri ölçülmüş ve bu ölçülen 4 değer aritmetik ortalaması, “mm” bazında yayılma değeri olarak ifade edilmiştir. Deneylerde kullanılan harç yayılma tablası Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

$$\text{İşlenebilirlik} = [(D_s - D_t) / D_t] \times 100$$

D_s: Deney Sonucundaki Çap

D_t: Deneye başlamadan Önceki Çap



Şekil 3.3. İşlenebilirlik Deneyinde Kullanılan Yayılma Tablası

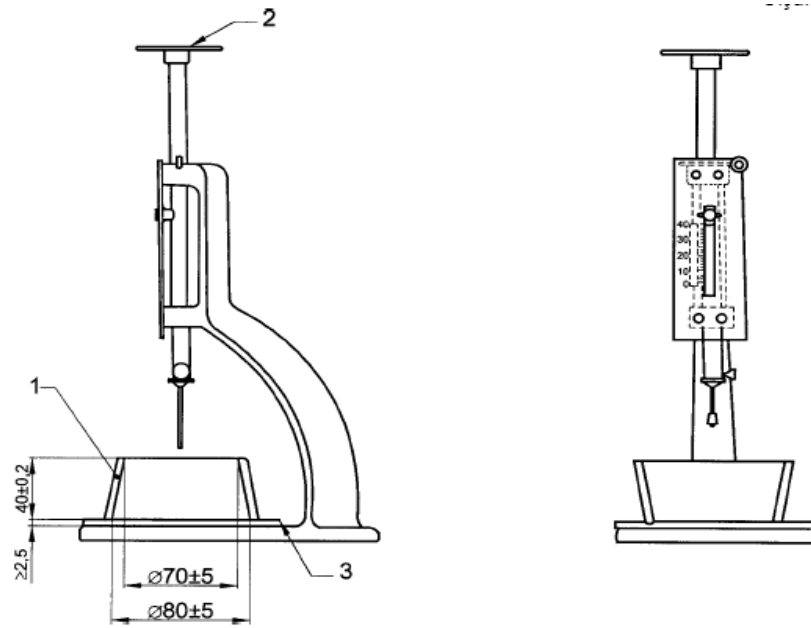
3.2.3.1.2. Priz Süresi Tayini Deneyi

Farklı karışım oranlarında hazırlanan harç karışımlarının başlangıç ve bitiş priz süresi ölçümleri, TS EN 196-3 [126] doğrultusunda, Vicat cihazı kullanılarak tayin

edilmiştir. Deneylede, Vicat iğnesinin hamur tabanından 3-5 mm mesafede olduğu süre, priz başlangıcı; 39 mm mesafede olduğu süre ise, priz bitişi olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan Vicat cihazı Şekil 3.4. ve 3.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Priz süresi tayini için Vikat Cihazı



Şekil 3.5. Priz süresi tayini için Vikat Cihazının ölçüleri

A) Priz başlama süresi tayini için dik Pozisyondaki kalıp yandan görünümü

1. Sert Plastik Kalıp
2. Düzeltici Ağırlıklar için Platform
3. Cam Plaka

B) Priz sona erme süresi tayini için tersine çevrilmiş kalıpla önden görünüm

3.2.3.2. Karışımların Sertleşmiş Haldeki Özelliklerini Belirlemek İçin Yapılan Deneyler

Bu bölümde karışımların sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek için uygulanan deneyler ve kullanılan cihazlar verilmiştir.

3.2.3.2.1. Birim Ağırlık Tayini

Sertleşmiş harcın birim ağırlığı, harcın havada tartılarak bulunan ağırlığının görünür hacmine oranıdır. % 14 derişime ait numunelerin kuru birim ağırlıkları, 40x40x40 mm boyutlarında üretilen örnekler bütün sıcaklıklarda maksimum dayanımı kazandığı güne kadar küre tabi tutulmuş ve kür sonunda numuneler tartılıp hacimlerine bölünerek hesaplanmıştır.

3.2.3.2.2. Dayanım Tayini

Hazırlanan numunelerin çimento pres makinesinde eğilme ve basınç deneyleri yapılarak, eğilme ve basınç dayanımları bulunmuştur. Çimento presi TS EN 196-1 [124]'e uygun tam otomatik, dijital kontrollü hız ayarına sahip bir cihazdır. Maksimum pres kuvveti 200 kN olan çimento presi Şekil 3.6'da verilmiştir. Bilgisayarla kontrol sistemi bulunmaktadır. Bilgisayar dışında kendi kontrol ünitesinden çalıştırılabilmektedir. Dayanım değeri N/mm^2 olarak otomatik olarak hesaplanır ve bilgisayardan rapor alabilme imkânı sunar. Eğilme ve basınç dayanımlarına ilişkin deney şeması Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Basınç Dayanım ve Eğilme Cihazı



Şekil 3.7. Beton Numune Kalıbı

3.2.3.2.2.1. Eğilme Dayanımı

Beton eğilme dayanımı 4x4x16 cm boyutlarındaki farklı oranlarda alkali ile aktive edilmiş ve farklı sıcaklıklarda değişik kür sürelerine tabi tutulmuş standart numune örnekleri kullanılarak saptanmıştır. Örnekler hazırlanırken, taze beton kalıplara (Şekil 3.7.) konmadan kalıpların iç yüzeyi hafifçe yağlanmış beton kalıplara iki

tabaka halinde doldurulup vibratörle sıkıştırılmıştır. Beton kalıplara konup sıkıştırıldıktan sonra örneğin üst yüzeyi düzeltilmiştir. Örneklerin eğilme dayanımları TS EN 1015-11 [127]'e göre belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deneyi, deney şeması 3.10 da verilmiştir. Şekil 3.6 ve 3.8'de basınç presi ve deney anından görüntü verilmektedir. Eğilme dayanımını bulmak için çimento presi ile tek noktadan yükleme yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyi 40x40x160 mm'lik boyuta sahip prizmaların kalıplanmış yan yüzeylerine yükleme yapılmak suretiyle yapılmıştır. Prizma deney numunesi deney cihazına yan yüzeylerden biri üzerine ve uzunluğuna eksenine mesnet silindirlerinin eksenine dik olacak şekilde mesnet silindirleri üzerine yerleştirilmiştir. Yük tek noktadan eğilme uygulayacak şekilde ve kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Eğilme dayanımı kesite etkiyen momentin kesit mukavemet momentine bölünmesiyle aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{3(Fl)}{2(bh^2)}$$

σ_{ζ} = Çekme (Eğilme) dayanımı (N/mm²),

F = Numunenin kırıldığı an uygulanan kuvvet (N),

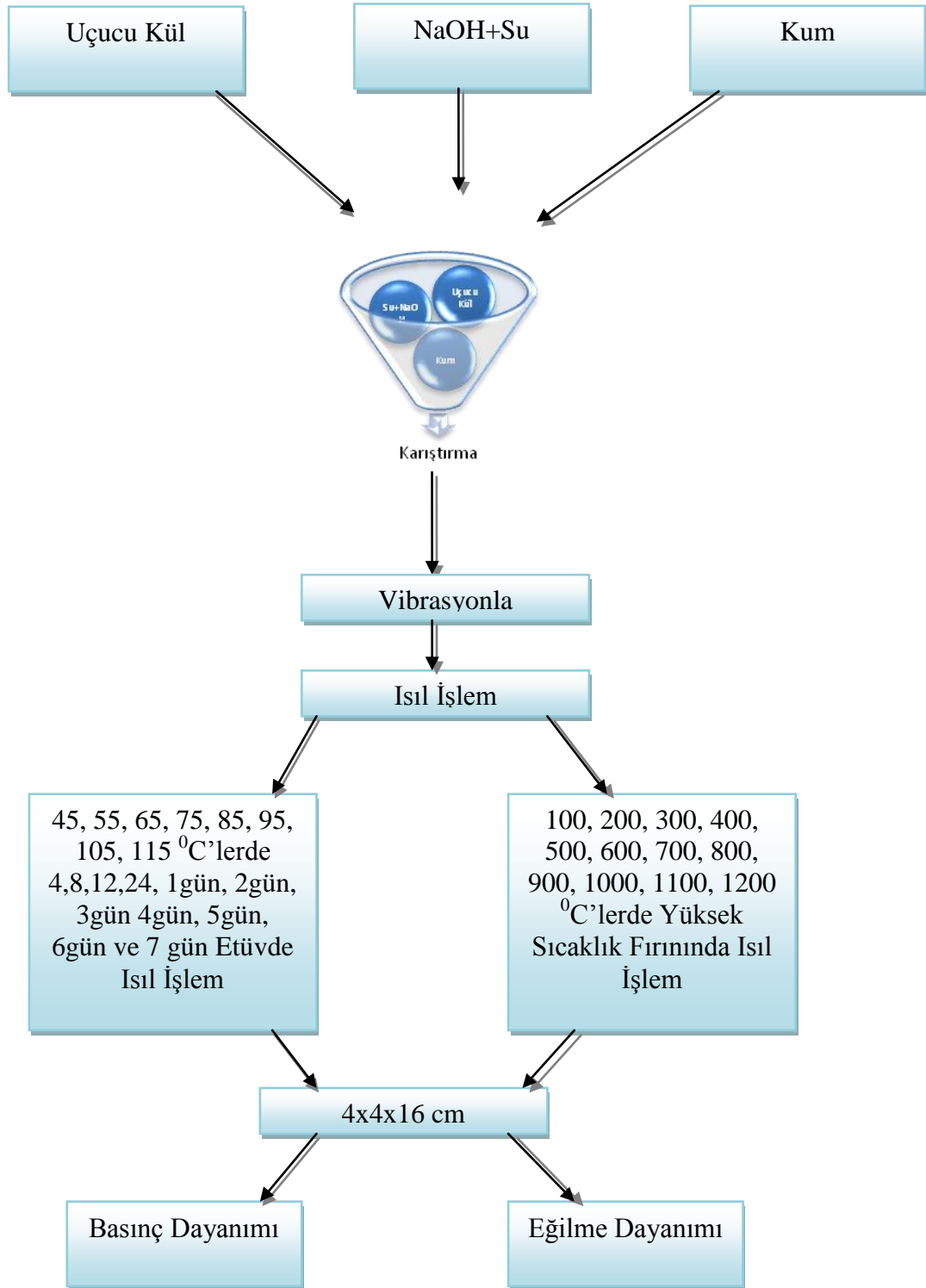
l = Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm),

b = Numunenin kare kesitin kenar uzunluğu (mm),

h = Numunenin kare kesitinin kenar yüksekliği (mm),



Şekil 3.8. Eğilme Dayanımı Deneyinden Görüntü



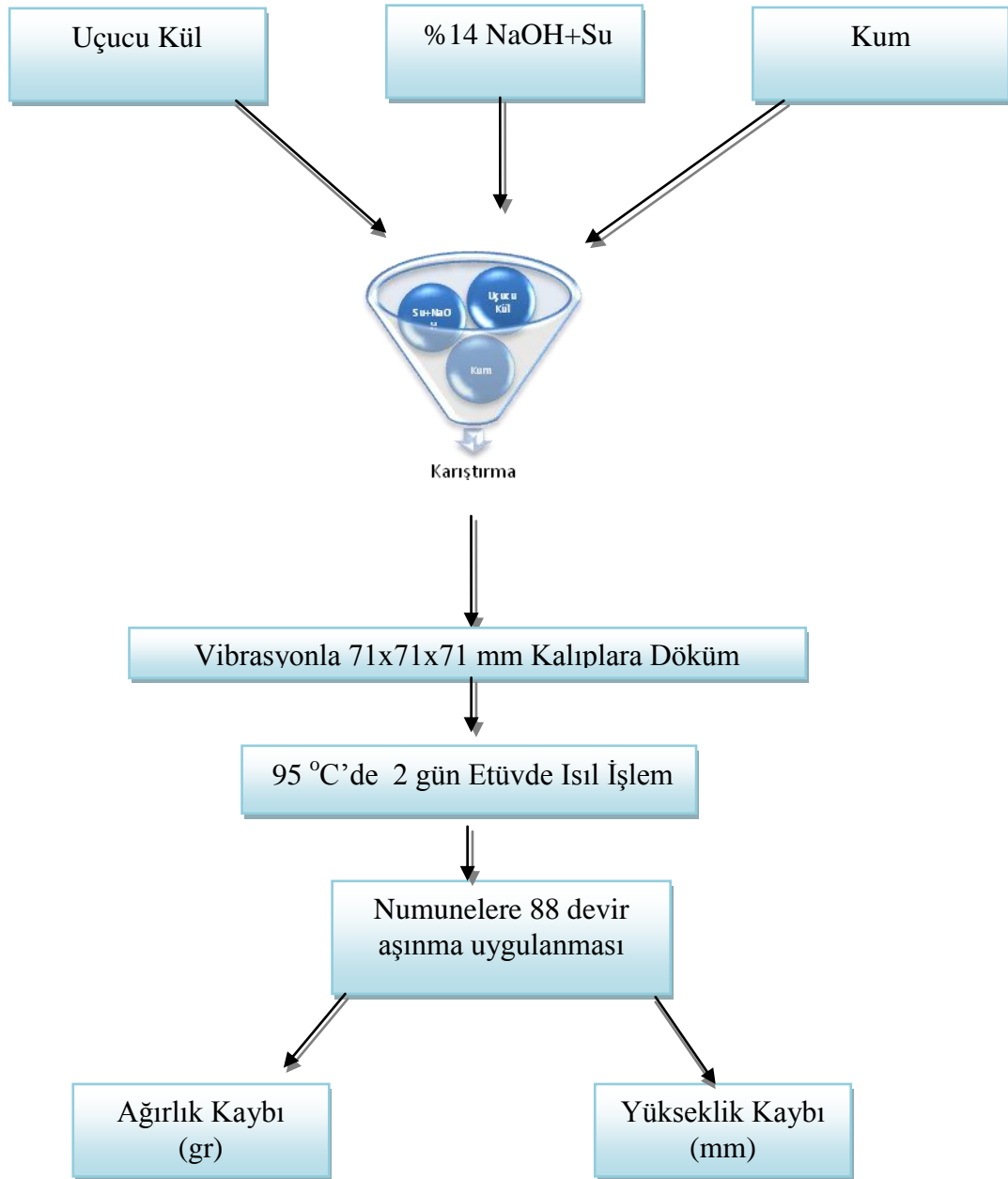
Şekil 3.9. Eğilme ve Basınç Deneyi, Deney Şeması

3.2.3.2.2. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri, eğilme deneyi sonucunda ikiye ayrılan yarım prizma numuneler üzerinde TS EN 196-1 [124]'e uygun olarak çimento presinde basınç dayanımı deneyine tabi tutularak yapılmıştır. Yarım prizmalar, cihazın plâkaları arasına merkezlenerek ve uzunlamasına yerleştirilmiştir. Yük 500 N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, prizma kırılana kadar otomatik olarak basınç uygulanmıştır. Basınç dayanımı numuneyi kıran kuvvetin (P, Newton) kesit alanına (1600 mm^2) bölünmesiyle MPa cinsinden hesaplanmıştır. Basınç dayanımına tabi tutulan numunelere ilişkin görüntü Şekil 3.10'da verilmiştir. Basınç dayanımı deneyi, deney şeması 3.9 da verilmiştir.



Şekil 3.10. Basınç Dayanımı Deneyinden Görüntü



Şekil 3.11. Aşınma Deneyi, Deney Şeması

3.2.3.2.3. Aşınma Kaybı Deneyi

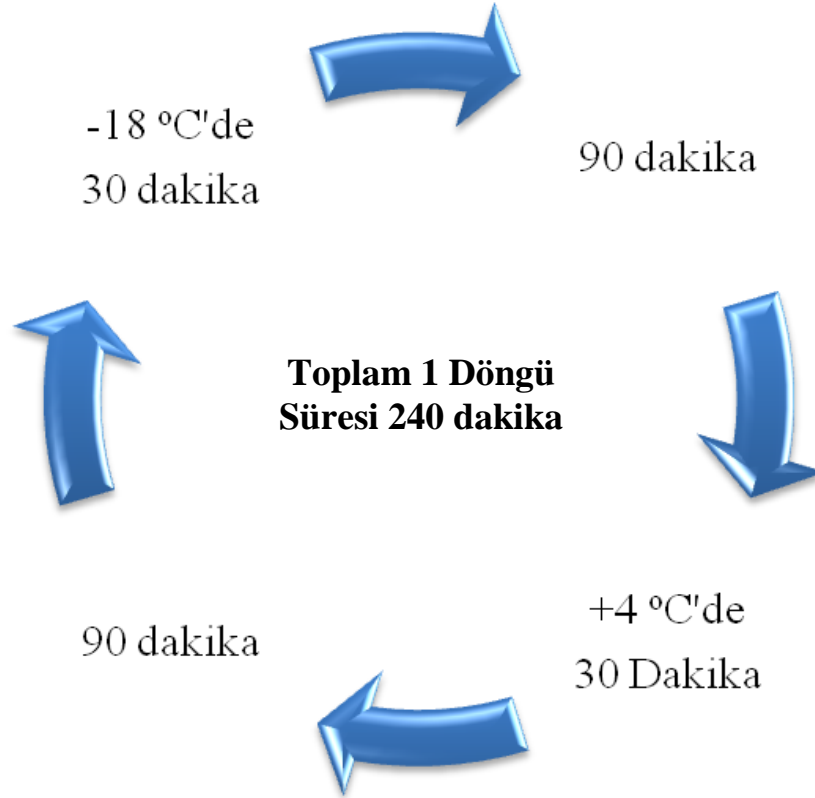
Yüzey aşınmasını bulabilmek için 71x71x71 mm boyutlarında % 14 derişimli örnekler üretilmiş ve 45 ile 115 °C arasında 10°C artışlarla farklı 8 sıcaklığın sahip olduğu maksimum dayanım gününe kadar kür edildikten sonra, bu örneklerin eğrilik

ve paralellik kontrolleri yapıp, aşındırılacak yüzeyler 1'den 4'e kadar numaralandırılmış ve mikrometre ile örneğin üzerinde belirlenen 9 noktadan yükseklik ölçümleri alınıp tartılmıştır. Aşınma deneyine ilişkin, deney şeması şekil 3.11'de verilmiştir. Aşındırılacak yüzey aşağı gelecek şekilde yüzeysel aşındırma cihazına yerleştirilmiştir (Şekil 3.12). Örneğin merkezi ile döner diskin merkezi 22 cm olacak şekilde ayar yapılmış daha sonra baskı pistonu yüksekliği yükleme kolu yatay olacak şekilde ayarlanmıştır. Yükleme kolu 294 N'luk yük ile yüklenerek cihaz sayacı sıfırlanıp sürtünme yüzeyine 20 gr standart zımpara tozu homojen şekilde yayılarak cihaz çalıştırılmıştır. Döner disk 22 devirden sonra otomatik olarak durmuştur. Her 22 devir 1 periyot olarak kabul edilir. Bu ilk periyotluk işlem tamamlandıktan sonra yüzey temizlenerek tekrar 20 g standart zımpara tozu yüzeye homojen olarak tekrar yayılmış ve örnek 90°C döndürülerek işlem tekrarlanmıştır. Bu işlem işaretlenen 4 yüzeye tek tek uygulanmış ve 4 periyot sonunda toplam 88 devir aşınma uygulanarak birinci aşama tamamlanmıştır. Çalışmada her örnek için toplam 16 periyot 352 devir uygulanmıştır. Ayrıca 4 yüzey için uygulanan aşındırma işlemi ikinci seri üretilen aynı örnekler üzerinde tek yüzey üzerinde 16 periyot 352 devir aşındırma yapılarakta uygulanmıştır. İşlem tamamlandıktan sonra her bir noktadan ayrı ayrı 0.01 duyarlıdaki mikrometre ölçümleri ile kalınlıktaki azalma ve tartım sonucuna göre ağırlık kayıpları hesaplanmıştır [128]. Aşınma deneyi cihazı ve deneyin yapılış anından bir görüntü Şekil 3.11'de verilmiştir.



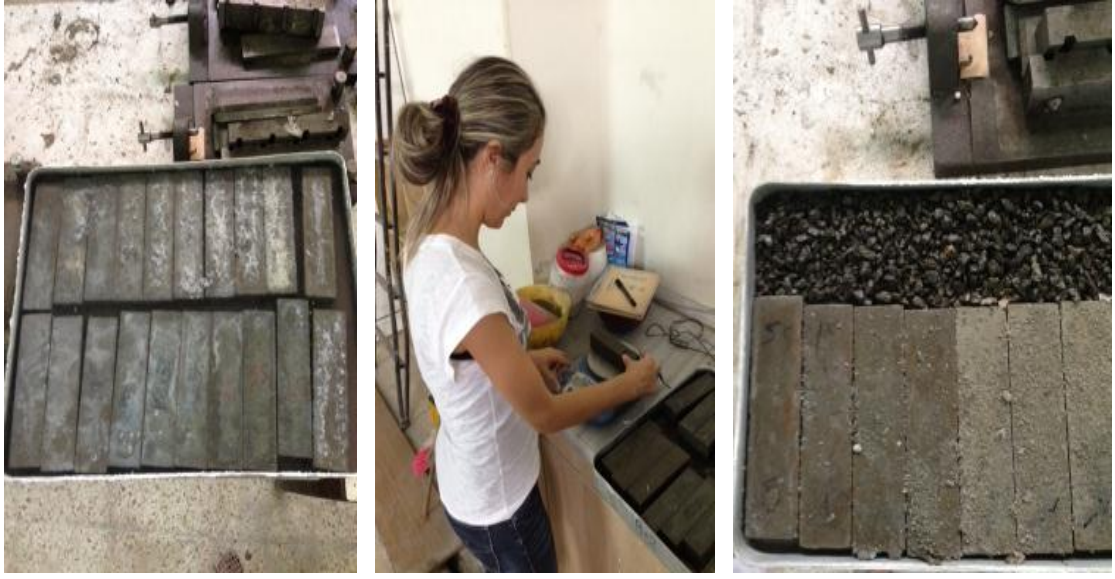
Şekil 3.12. Aşınma Cihazı (Böhme) ve Deney Anından Görüntü

3.2.3.2.4. Donma Çözülme Deneyi



Şekil 3.13. Donma Çözülme Deneyi Döngü Şeması

Donma çözünme deneyi için 4x4x16 cm boyutlarında %14 derişimle hazırlanan örnekler 8 farklı sıcaklıkta maksimum dayanımı kazandıkları güne kadar kür edilmiş ve deney öncesinde hazırlanan numuneler 24 saat boyunca suda bekletildikten sonra deneye tabi tutulmuştur. 90 dakikada -18 °C'ye inen sıcaklık düzeyi 30 dakika -18'de kaldıktan sonra 90 dakikada +4 °C'ye çıkarak 30 dakika +4 °C'de kalmıştır. 240 dakika süren bu döngü bir devir olarak kabul edilmiş ve toplamda aralıksız 100 devir uygulanmıştır. 100 devir sonrasında numuneler normal koşullarda kurduktan sonra basınç ve eğilme dayanımı deneylerine tabi tutulmuşlardır. Donma Çözülme deneyinin döngü şeması Şekil 3.13'de ve deney anına ait görüntüler ise Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14. Donma Çözülme Deney Görüntüleri

3.2.3.2.5. Yanma Deneyi

Yanma deneyi için numuneler 4x4x16 cm boyutlarında %14 derişime sahip ve 75 °C'de kür edilmiş ve hazırlanan prizma numuneler 100 °C ile 1000 °C arasında değişen sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık kapasitesine sahip fırına konulan numuneler, dakikada 5 °C artışla istenilen sıcaklık düzeyine çıkarılmış ve her numune hedef sıcaklıkta 60 dakika kadar bekletilmiştir. Deney bittikten sonra fırının kendiliğinden soğuması beklenmiş, daha sonra numunelerin dayanım ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin sıcaklık ve deney süreleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Yanma Deneyinde Numunelere Uygulanan Sıcaklık Ve Süreleri

Sıcaklık	Çıkış süresi (dk)	Bekleme Süresi (dk)	Toplam Deney Süresi (dk)
100 °C	20	60	80
200 °C	40	60	100
300 °C	60	60	120
400 °C	80	60	140
500 °C	100	60	160
600 °C	120	60	180
700 °C	140	60	200
800 °C	160	60	220
900 °C	180	60	240
1000 °C	200	60	260

3.2.3.2.6. Su Emme ve Boşluk Oranı

Çalışma kapsamına % 14 derişime ait örneklerin su emme ve boşluk oranı tayini için 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiş ve 8 sıcaklıkta maksimum dayanımı kazandığı güne kadar kür edildikten sonra kürden çıkarılan örnekler tartılarak örneklerin etüv kurusu ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra örnekler 24 saat su içerisinde bekletildikten sonra yüzeyleri bir havlu yardımıyla kurularak kuru yüzey doygun ağırlıkları ve su içerisindeki ağırlıkları hesaplanmıştır. %14 derişimle farklı sıcaklıklarda kür edilen örneklerin su emme ve boşluk oranı tayinleri TS 3624 [129]'a göre aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır.

$$\text{Boşluk Oranı (\%)} = \frac{(M_{KYD} - M_{EK})}{(M_{KYD} - M_{SU})} \times 100$$

$$\text{Su Emme Oranı (\%)} = \frac{(M_{KYD} - M_{EK})}{M_{EK}} \times 100$$

M_{KYD} : Kuru yüzey doygun ağırlığı (gr)

M_{EK} : Etüv kurusu ağırlığı (gr)

M_{SU} : Su içindeki ağırlığı (gr)

3.2.3.2.7. Kılcallık Katsayısı

Deneyde, boyutları 40x40x160 mm olan harç numuneler kullanılmıştır. Temas halinde olacak su seviyesinin 5 mm olarak ayarlandığı mesnetler üzerine 40x160 mm'lik yüzeyleri boyunca oturtulan numunelerin yan yüzleri parafinle kaplanmıştır. Deneyde; 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 ve 100 dakikalık sürelerde numune tarafından absorbe edilen su miktarları tespit edilmiş ve kapilarite katsayısı aşağıdaki formül yardımıyla elde edilmiştir.

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t}$$

Q = Absorbe edilen su miktarı (cm³)

A = Suyla temas halinde olan yüzeyin alanı (cm²)

t = Zaman (sn)

k = Kapilarite katsayısı (cm/sn^{1/2})

Kapilarite katsayısı, her bir t 'ye karşılık gelen Q/A değerleri arasındaki lineer ilişkinin eğiminden hesaplanmıştır.

3.2.4. Hazırlanan Numuneler üzerinde uygulanan kür ve süreleri

Yukarıda verilen karışım ve derişim oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde taze beton özelliği olarak işlenebilirlik ve priz başlangıç ve bitiş süreleri ölçülmüştür. Söz konusu derişimler için üretilen numuneler ayrı ayrı olmak üzere 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105 ve 115 °C derecelerde, 1, 2 ve 3 gün olmak üzere ayrı ayrı kür edilerek, basınç ve eğilme dayanımı tayinleri yapılmıştır. Elde edilen basınç ve eğilme dayanımları değerlendirilerek, yüksek dayanım sağlayan optimum derişim oranı tespit edilmiştir. İş hacmini azaltmak üzere seçilen optimum derişime sahip karışım üzerinde kür sıcaklıkları ve kür süresinin etkisini detaylı bir şekilde değerlendirmek amacıyla 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105 ve 115 °C derecelerde, 4, 8, 12, 24 saat, 2, 3, 4, 5, 6, 7 gün için ayrı ayrı olmak üzere kür edilerek eğilme ve basınç dayanımları tayin edilmiştir.

Optimum derişime sahip karışım üzerinde, geopolimer harcın aşınma direnci, donma-çözünme direci, su emme kapasitesi ve kılcallık katsayısını belirlemek amacıyla 45, 55, 65, 75, 85, 95, 105 ve 115 °C derecelerde maksimum dayanıma sahip olduğu kür gününe kadar küre tabi tutulan numuneler yukarıda tarif edildiği üzere aşınma testine maruz bırakılmıştır.

Geopolimer harcın yüksek sıcaklık karşısındaki davranışını belirlemek üzere optimum derişim ile hazırlanan karışımlar tek sıcaklıkta 3 gün kür edildikten sonra, 100 dereceden 1200 dereceye kadar sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulama işlemi yukarıda detaylı şekilde daha önce sunulmuştur.

4. BÖLÜM

BULGULAR

Bu bölümde numunelerin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine ilişkin deney sonuçları ve değerlendirilmeleri sunulmaktadır.

4.1. Taze Haldeki Betonların Özellikleri

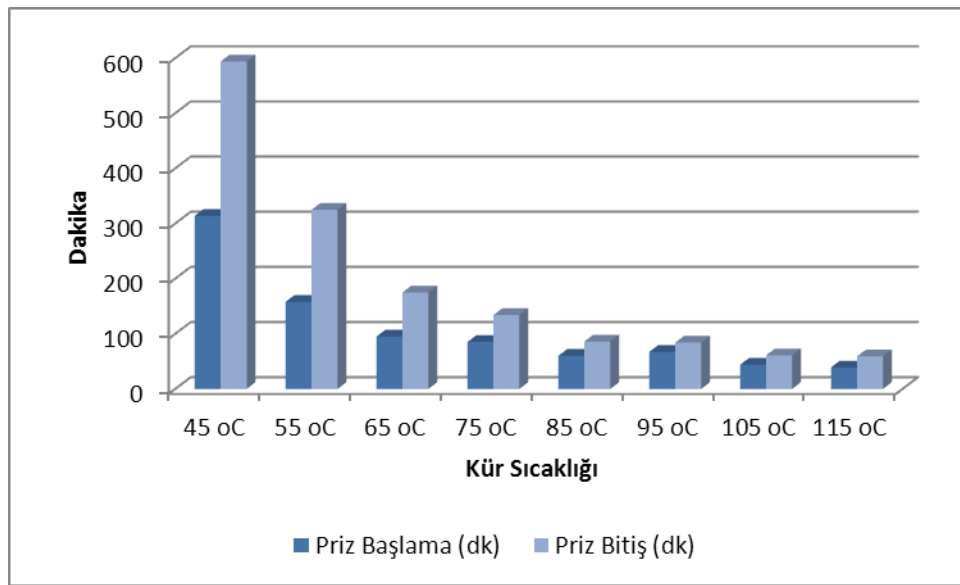
4.1.1. Numunelerin Priz Başlangıç Ve Bitiş Süreleri

Sodyum hidroksit ile aktive edilmiş uçucu kül hamurlarından hazırlanan priz ölçme numuneleri üzerinde vikat cihazı ile ölçümler yapılmıştır. Priz ölçümleri çimento prizi ile ilgili standarda uygun olarak yapılmıştır. Tablo 4.1 ile Tablo 4.9 arasındaki tablolarlada farklı derişimlerde üretilen ve farklı sıcaklıklarda kür edilen tüm karışımlara ait priz başlangıç ve priz bitiş süreleri sunulmaktadır. Ayrıca değişimin daha iyi görülebilmesi açısından Şekil 4.1 ile Şekil 4.9 arasında grafik halinde sunulmuştur.

Tablo 4.1. %4 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	314	594
55 °C	158	325
65 °C	95	175
75 °C	85	134
85 °C	60	86
95 °C	67	84
105 °C	44	61
115 °C	39	59

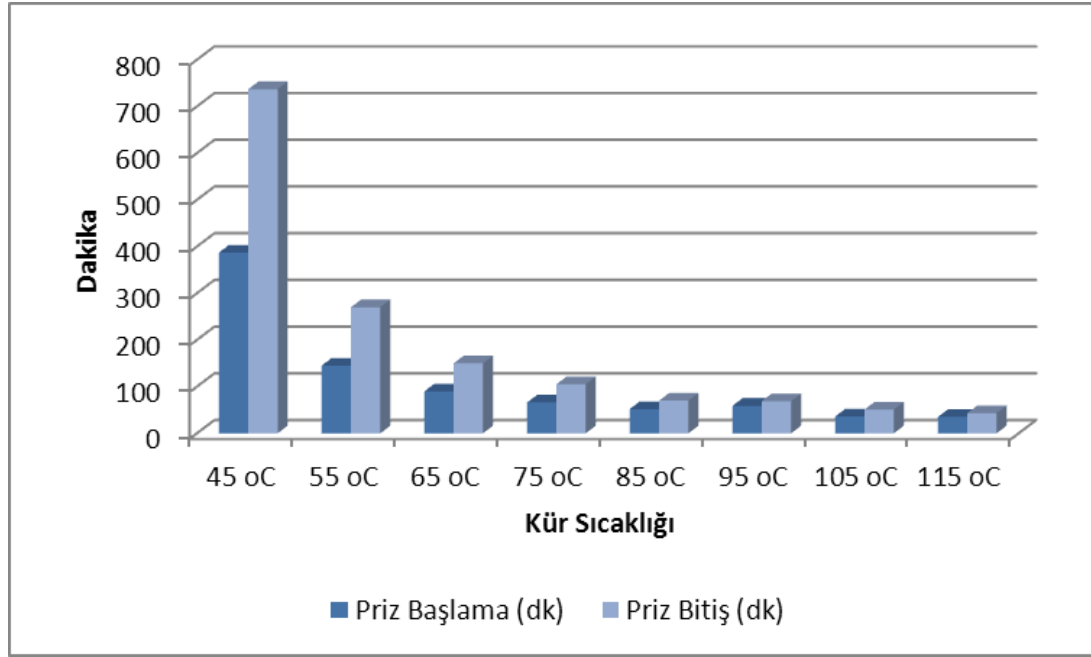
%4 derişimde hazırlanan numunelerin farklı sıcaklıklardaki priz başlama ve bitiş süreleri Tablo 4.1’de incelenmiştir. Priz başlama süreleri 39-314 dakika arasında değişmektedir. Aynı şekilde priz bitiş süreleride 59-594 dakika arasında değişmektedir. Sıcaklık artışı priz başlama ve bitiş sürelerini azaltma yönünde etki yapmaktadır. En düşük priz başlama süresi 115 °C’de kür edilen numunelerde görülürken, en yüksek priz başlama süresi 45 °C’de kür edilen numunelerde tespit edilmiştir. Ayrıca %4 derişimde hazırlanan numunelerin priz başlama ve bitiş sürelerine ilişkin grafik şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. %4 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

Tablo 4.2. %6 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	387	737
55 °C	145	270
65 °C	90	150
75 °C	66	105
85 °C	52	70
95 °C	59	69
105 °C	36	51
115 °C	35	43

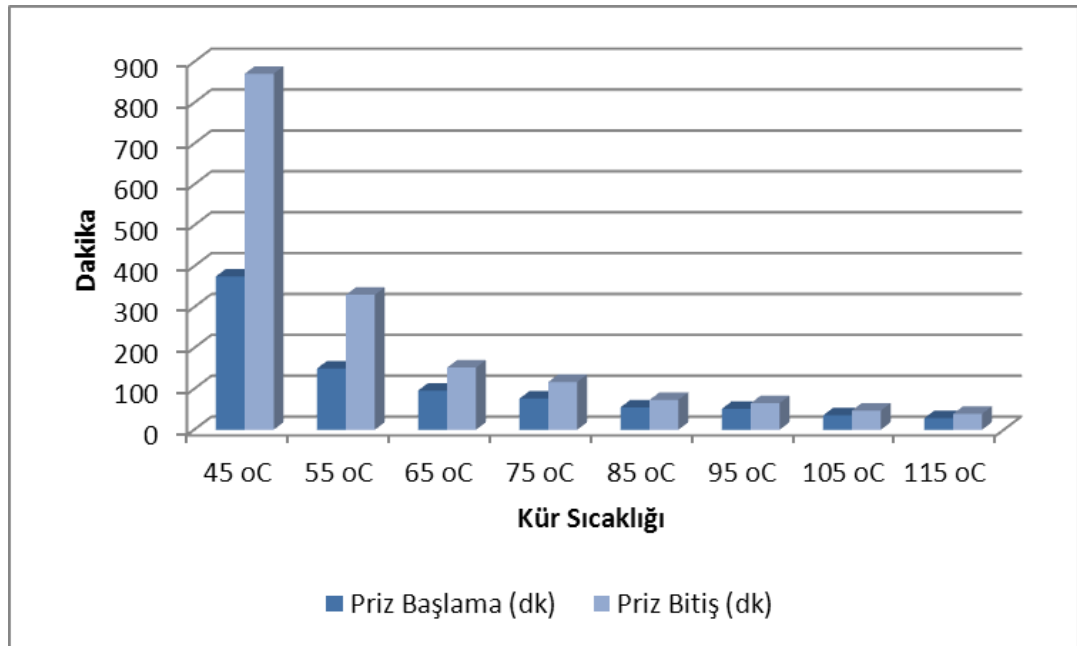


Şekil 4.2. %6 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

Tablo 4.2’de %6 derişimde hazırlanan numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri verilmiştir. Priz başlama süreleri 35-387 dakika arasında değişirken 105-115 °C’deki numuneler arasında fazla bir farklılığın olmadığı saptanmıştır. Bunun yanında en düşük priz başlama süresi 115 °C’de tespit edilmiştir. Ayrıca %6 derişimde hazırlanan numunelerin priz başlama ve bitiş sürelerine ilişkin grafik şekil 4.2’de verilmiştir

Tablo 4.3. %8 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	375	871
55 °C	150	330
65 °C	96	152
75 °C	76	117
85 °C	55	73
95 °C	51	65
105 °C	35	47
115 °C	28	39

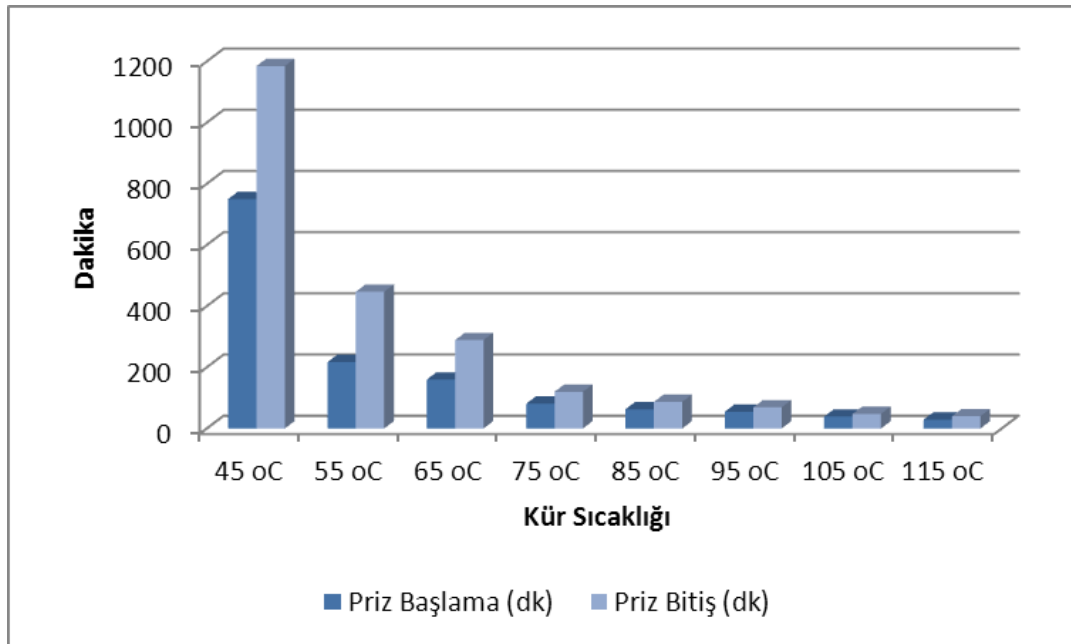


Şekil 4.3. %8 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

%8 derişimde hazırlanan numunelerin priz başlama ve bitiş süreleri Tablo 4.3’de, grafik olarak gösterimi ise Şekil 4.3’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde en kısa priz başlama süresi 115 °C’de ve en yüksek priz başlama süresi 45 °C’de olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4. %10 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	750	1185
55 °C	217	447
65 °C	160	289
75 °C	81	120
85 °C	63	87
95 °C	55	69
105 °C	39	48
115 °C	29	40

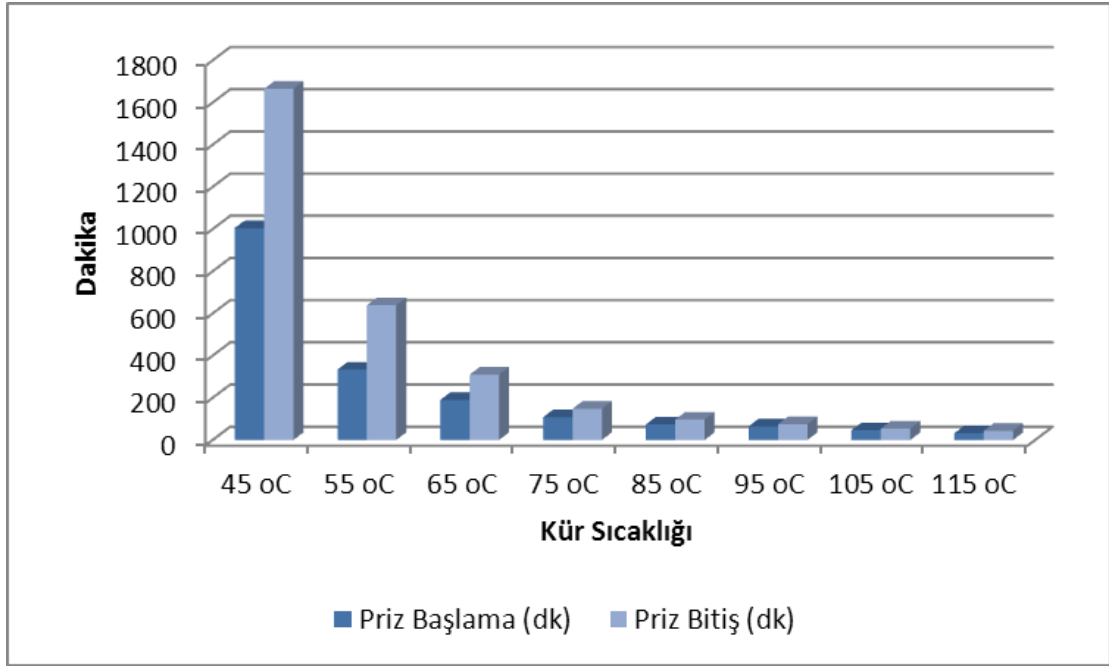


Şekil 4.4. %10 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

Tablo 4.4’de %10 derişimde hazırlanan numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri incelendiğinde priz başlangıç ve bitiş sürelerinin en kısa 115 °C’de ve en uzun 45 °C’de olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.5. %12 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	1005	1665
55 °C	334	639
65 °C	190	310
75 °C	108	148
85 °C	74	97
95 °C	65	75
105 °C	46	54
115 °C	32	44

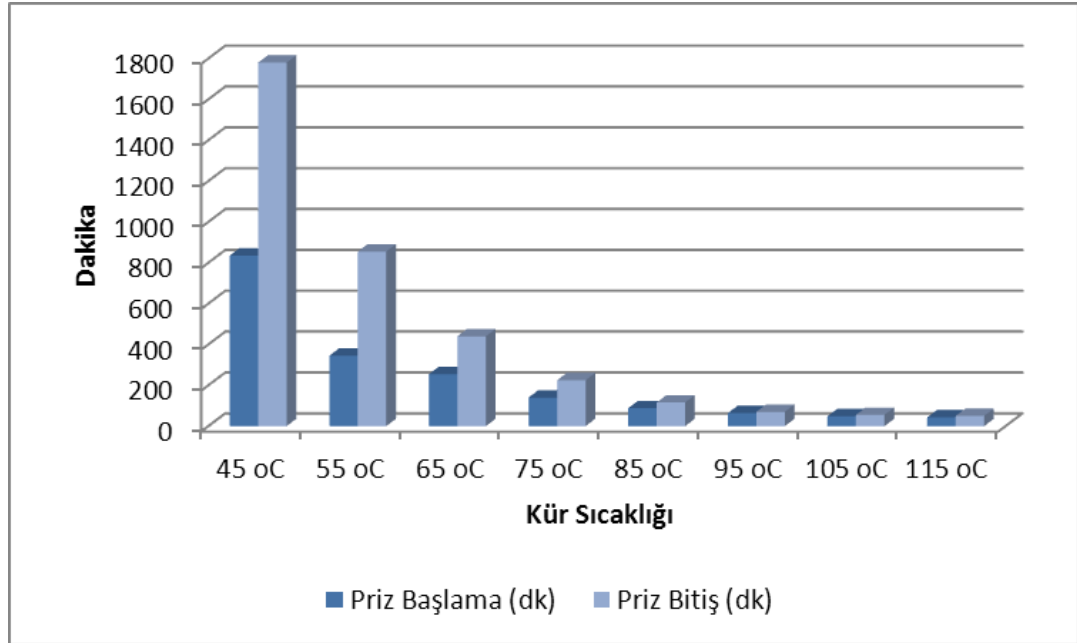


Şekil 4.5. %12 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

%12 derişime ait priz başlama ve bitiş süreleri tablo 4.5’de ve grafik olarak da şekil 4.5’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde diğer derişimlerde olduğu gibi en düşük priz başlama ve bitiş süreleri 115 °C’de ve en yüksek priz başlama ve bitiş süreleri 45 °C’lerde görülmüştür. Priz başlama süreleri 32-1005 dakika arasında değişirken, priz bitiş süreleri 44-1665 dakika arasında değişmektedir.

Tablo 4.6. %14 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	835	1780
55 °C	345	855
65 °C	255	440
75 °C	140	225
85 °C	88	116
95 °C	64	70
105 °C	49	55
115 °C	43	50

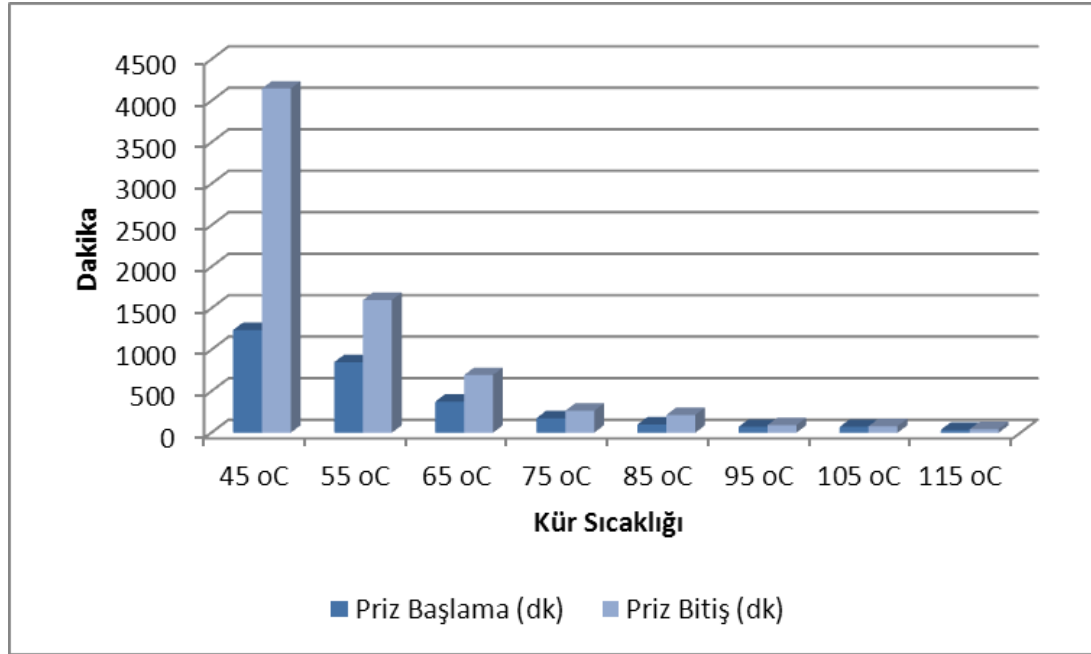


Şekil 4.6. %14 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

Tablo 4.6 ve Şekil 4.6’da %14 derişimde hazırlanan numunelerin farklı sıcaklıklar altındaki priz başlama ve bitiş süreleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde en kısa priz başlama ve bitiş süreleri 115 °C’de görülürken en uzun priz başlama ve bitiş süreleri °C’de olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.7. %16 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	1238	4148
55 °C	850	1600
65 °C	375	695
75 °C	175	265
85 °C	100	215
95 °C	72	92
105 °C	72	79
115 °C	36	43

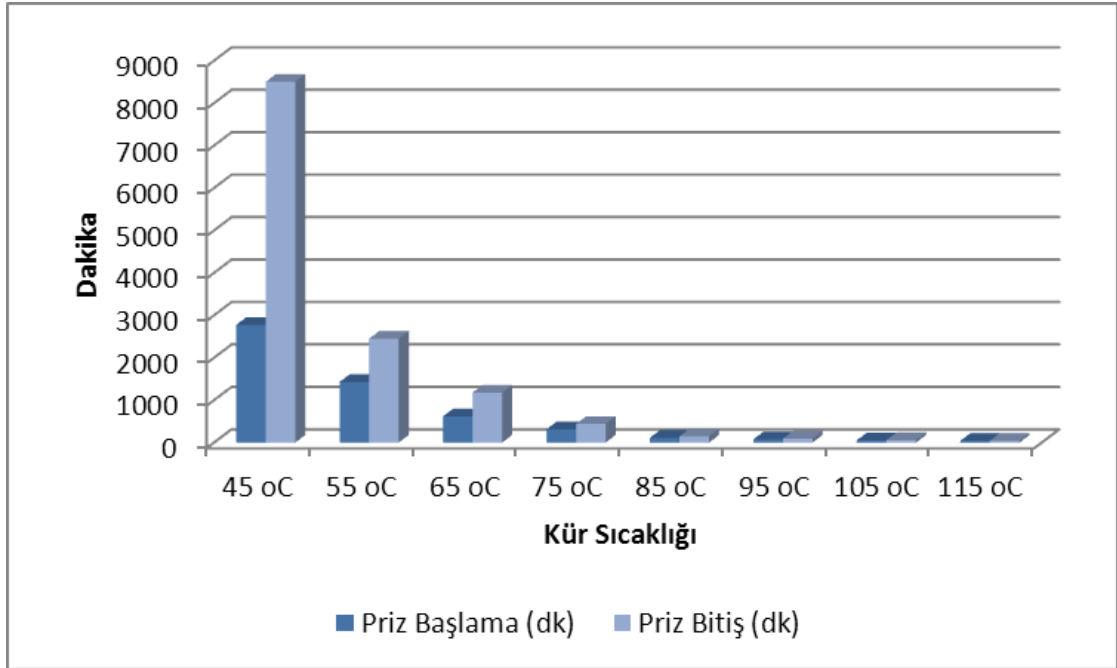


Şekil 4.7. %16 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

%16 derişimde hazırlanan numunelerin priz başlama ve bitiş süreleri Tablo 4.7’de, grafik olarak gösterimi ise Şekil 4.7’de verilmiştir. Tablo incelendiğinde en kısa priz başlama süresi 115 °C’de ve en yüksek priz başlama süresi 45 °C’de olduğu görülmektedir.

Tablo 4.8. %18 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	2775	8505
55 °C	1430	2450
65 °C	620	1180
75 °C	315	440
85 °C	115	150
95 °C	78	95
105 °C	55	59
115 °C	42	46

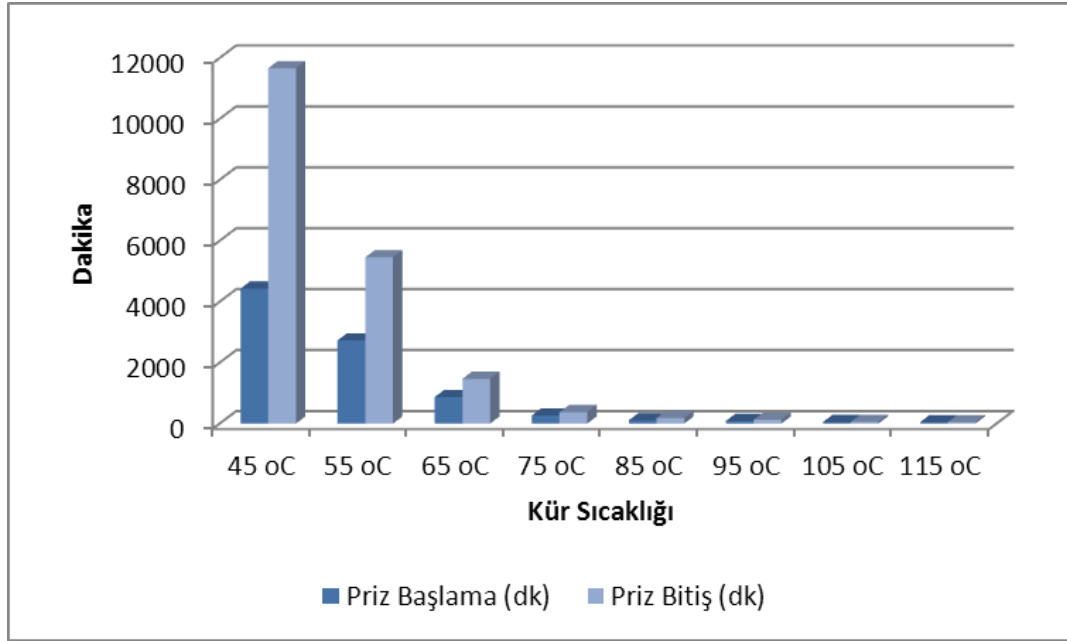


Şekil 4.8. %18 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

Tablo 4.8’de %18 derişimde hazırlanan numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri verilmiştir. Priz başlama süreleri 42-2775 dakika arasında değişirken priz bitiş süreleri 46-8505 dakika arasında değişmektedir.

Tablo 4.9. %20 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlangıç ve Bitiş Süreleri

	Priz Başlama (dk)	Priz Bitiş (dk)
45 °C	4430	11665
55 °C	2730	5460
65 °C	870	1470
75 °C	265	375
85 °C	110	185
95 °C	87	130
105 °C	52	56
115 °C	45	49



Şekil 4.9. %20 Derişimde Hazırlanan Numunelerin Priz Başlama ve Bitiş Süreleri

%20 derişime ait priz başlama ve bitiş süreleri tablo 4.9'da ve grafik olarak da şekil 4.9'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde diğer derişimlerde olduğu gibi en düşük priz başlama ve bitiş süreleri 115 °C'de ve en yüksek priz başlama ve bitiş süreleri 45 °C'lerde görülmüştür.

Genel olarak priz başlangıç ve bitiş sürelerini incelendiğimizde; priz ölçüm sonuçlarında herhangi bir ani priz olayı ile karşılaşılmamıştır. Tablolar incelendiğinde sıcaklığın priz başlangıç ve bitişini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Sıcaklık 45 dereceden 115 dereceye çıkarken %4 derişim için priz başlangıç süresi 314 dakikadan 39 dakikaya düşmüştür, %10 derişim için 750 dakikadan 29 dakikaya düşmüştür, benzer şekilde %20 derişim için 4430 dakikadan 45 dakikaya düşmüştür. Aynı durum priz bitiş süreleri içinde geçerli olup, sıcaklık 45 dereceden 115 dereceye çıkarken %4 derişim için priz bitiş süresi 594 dakikadan 59 dakikaya düşmüştür, %10 derişim için 1185 dakikadan 40 dakikaya düşmüştür, benzer şekilde %20 derişim için 11665 dakikadan 49 dakikaya düşmüştür. Sıcaklığın artması ile polimerizasyon işleminin hızlandığı ve numunenin hızla katılaştığı anlaşılmaktadır. Kür sıcaklığı 45 derece olan karışımlarda priz başlangıç ve priz süresinin ikiside derişimle birlikte sırasıyla dramatik bir şekilde 314 dakikadan 4430 dakikaya, 594 dakikadan 11665 dakikaya çıkmıştır.

Yine tablolardan görüleceği üzere, sıcaklığın yükselmesi ile priz başlangıç ve bitiş süreleri arasındaki farkta oldukça azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ve yüksek derişim oranlarında aradaki fark çok fazla iken yüksek sıcaklık ve derişimlerde çok fazla düşerek priz başlangıcı ile bitiş birbirine neredeyse eşitlenmiştir. Derişim oranı %8 ve sıcaklığı 115 derece olan durumda en kısa priz süreleri ortaya çıkmış olup, priz başlangıç ve bitiş 28 dakika ve 39 dakika olmuştur. Ortalama sıcaklıklarda 65, 75 ve 85 derece civarlarında priz süreleri başlangıç ve bitiş için 60 dakika ve 120 dakika civarlarında olmuştur.

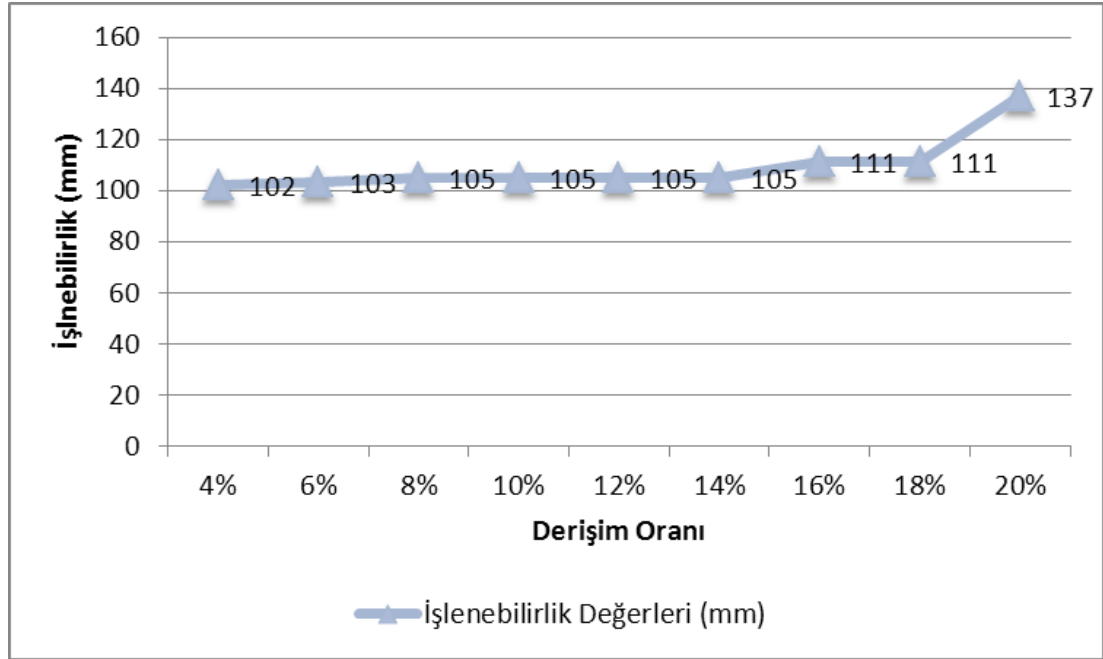
4.1.2. İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

Farklı oranlarda NaOH içeren harçların taze haldeki kıvamı, yayılma değerinin belirlenmesi yoluyla tayin edilmiştir. Harç karışımların kıvamını belirlemede uygulama kolaylığı ve gerçek kıvamı en iyi şekilde belirtmesi bakımından daha önce tarif edilen yayılma tablası yöntemi kullanılmıştır. Yayılma tablası ile taze harç işlenebilirliği tayini TS EN 1015-3 [125]'e göre belirlenmiştir. Taze harç karışımlarının yayılma işlenebilirlik değerleri Tablo 4.10'da verilmiş olup, ayrıca derişim ve işlenebilirlik arasındaki ilişkiyi örnek üzere Şekil 4.10 te grafik olarak sunulmuştur.

Tablo 4.10. Taze Beton Numunelerinin İşlenebilirlik Değerleri

Karışım Oranları	İşlenebilirlik Değerleri (mm)
4%	102
6%	103
8%	105
10%	105
12%	105
14%	105
16%	111
18%	111
20%	137

Tablo 4.10. incelendiğinde 102 mm ile 137 mm arasında değişen işlenebilirlik değerleri hesaplanmıştır. En yüksek işlenebilirlik %20’i NaOH içeren harç numunesinde gözlemlenirken, en düşük işlenebilirlik değeri ise %4 NaOH içeren harç numunesinde gözlenmiştir. Karışımda kullanılan derişim oranı %4 ten %20 ye artarken genel manada bir artış gözlenmektedir (bakınız Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Taze Beton Numunelerinin İşlenebilirlik Değerleri (mm)

4.2. Karışımların Sertleşmiş Haldeki Özellikleri

Karışımların sertleşmiş haldeki özellikleri olan basınç ve eğilme dayanımlarının hangi sıcaklık ve derişim civarında en yüksek olduğunu tespit etmek üzere, priz ölçümü de yapılan bütün durumlar için prizma daha önce boyutleri verilen geoplimer harç prizma numuneler hazırlanarak, her derişim ve sıcaklık için ayrı ayrı olmak üzere numuneler 1, 2 ve 3 gün süreyle etüvde kür edilmişlerdir.

4.2.1. Basınç ve Eğilme Dayanım Sonuçları

Priz süresi ölçümünde kullanılan sıcaklık ve derişim parametreleri ve 1, 2 ve 3 gün kür süreleri için ayrı ayrı numuneler hazırlanmış, kür sürelerini takiben etüvden alınmış ve laboratuvar ortamında birkaç saat soğumaya bırakılmış, 20-25 numune

sıcaklığı laboratuvar sıcaklığına yaklaştığında eğilme ve basınç dayanımları daha önce tarif edildiği gibi çimento pres yardımıyla ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar takibeden başlıklar altında sunularak değerlendirilmiştir.

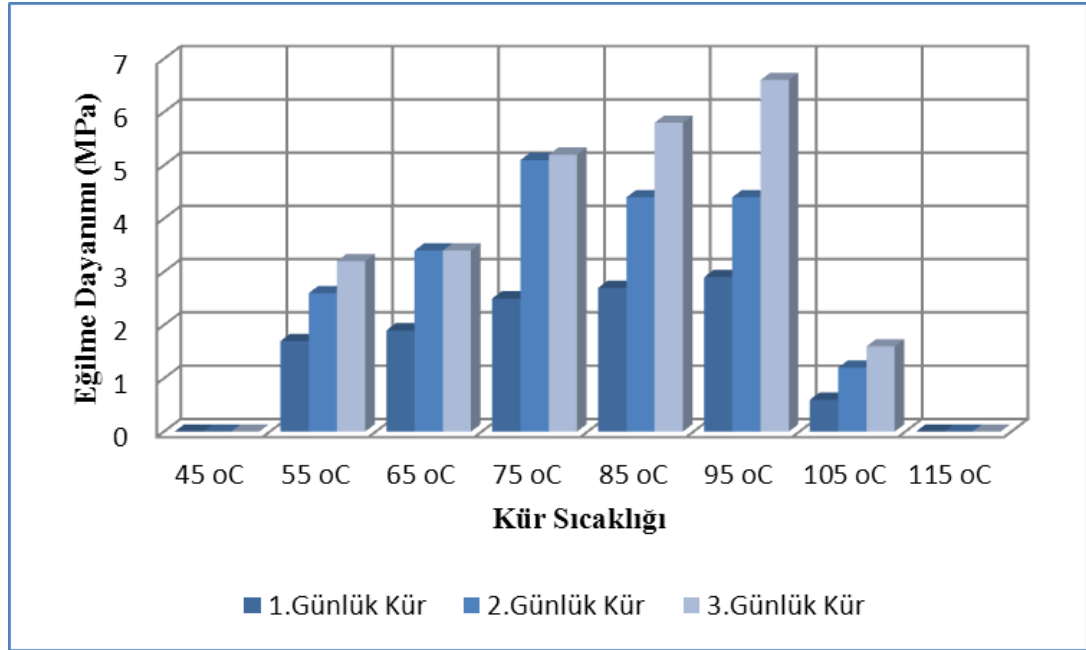
4.2.1.1. Eğilme Dayanımı Sonuçları

En yüksek eğilme dayanımınının hangi parametreler civarında olduğunu anlamak için yürütülen dayanım tarama karışımlarından elde edilen eğilme dayanımları bu bölümde incelenmiş olup sıcaklık ve kür düzeylerine göre farklı derişim oranlarında hazırlanan numunelerin eğilme dayanımları Tablo 4.11 ile 4.19 arasındaki tablolarda sunulmuştur. Tablolara ilaveten her bir sabit derişime ait elde edilen eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.11 – Şekil 4.19 de, sıcaklık ve kür süresi parametreleri ile birlikte sunulmuştur.

Tablo 4.11. %4 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0	0	0
55 °C	1,7	2,6	3,2
65 °C	1,9	3,4	3,4
75 °C	2,5	5,1	5,2
85 °C	2,7	4,4	5,8
95 °C	2,9	4,4	6,6
105 °C	0,6	1,2	1,6
115 °C	0	0	0

Şekil 4.11’de %4 derişime uygun şekilde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2 ve 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanım sonuçları grafik olarak verilmiştir. Grafik incelendiğinde, 45 °C ve 115 °C de eğilme dayanımı gözlenmemiştir. Tablo 4.11’de 45 °C ve 115 °C’de eğilme dayanımları sıfırdır. Söz konusu derişim için en yüksek dayanım 95 °C de 3 günlük kür sonucunda 6,6 Mpa olarak tespit edilirken, en düşük eğilme dayanımı ise 105 °C de 1 günlük kür sonucunda 0,6 MPa olarak tespit edilmiştir. İki günlük kür süresinde eğilme dayanımların bir pik değerine yaklaştığında görülmektedir. Eğilme dayanımlarının ise 90 derece mertebesinde pik değerine yaklaştığı yorumu yapılabilir.

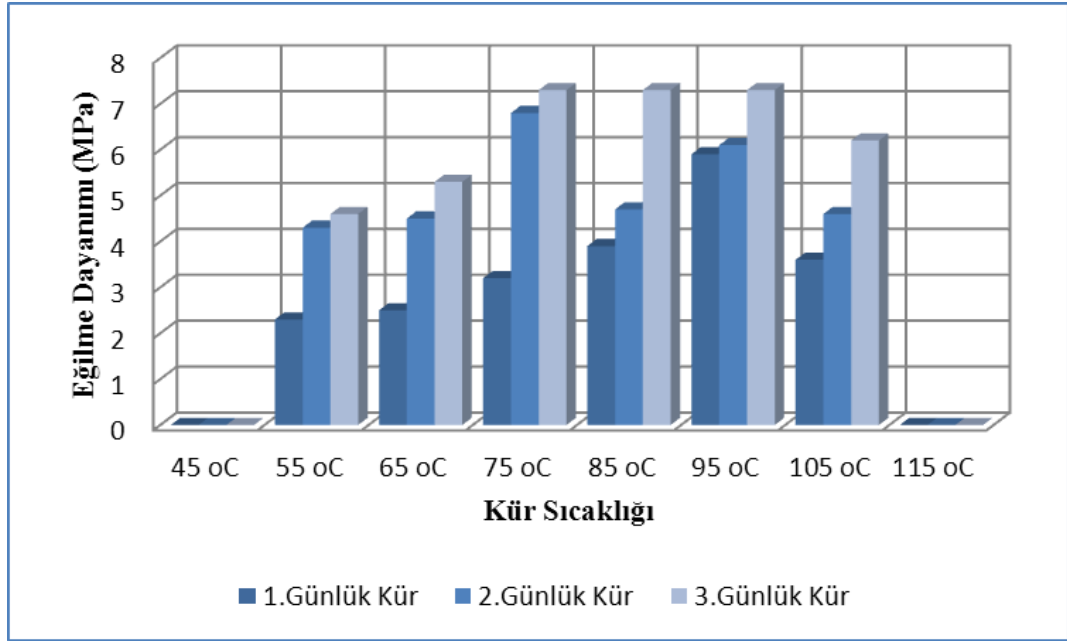


Şekil 4.11. %4 Derişime Ait 1, 2, 3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.12. %6 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	2,3	4,3	4,6
65 °C	2,5	4,5	5,3
75 °C	3,2	6,8	7,3
85 °C	3,9	4,7	7,3
95 °C	5,9	6,1	7,3
105 °C	3,6	4,6	6,2
115 °C	0,0	0,0	0,0

Derişim oranı %6 olarak hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanımları Tablo 4.12’de ve Şekil 4.12’de verilmiştir. 45 ve 115 °C’de eğilme dayanımı gözlenmezken, en yüksek dayanım 75, 85 ve 95 °C’de 3 günlük kür sonucunda 7,3 MPa tespit edilmiş olup, en düşük eğilme dayanımı 55 °C’de 1 günlük kür sonucunda 2,3 MPa tespit edilmiştir. Burada da sıcaklık yükseldikçe dayanıma katkısı azalmaktadır. İki günlük kür süresinde eğilme dayanımlarının doyurucu olduğu düşünülmektedir. Sıcaklığın ise 75 derece civarında doyurucu sonuçlar verdiği kanatına varılabilir.

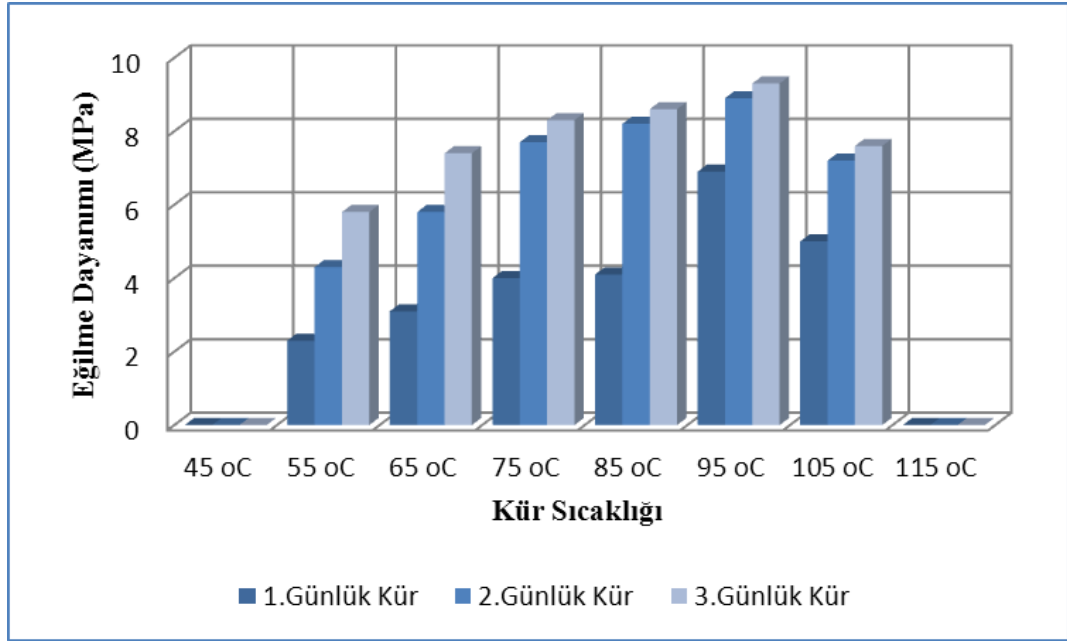


Şekil 4.12. %6 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.13. %8 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	2,3	4,3	5,8
65 °C	3,1	5,8	7,4
75 °C	4,0	7,7	8,3
85 °C	4,1	8,2	8,6
95 °C	6,9	8,9	9,3
105 °C	5,0	7,2	7,6
115 °C	0,0	0,0	0,0

Şekil 4.13'de %8 derişime uygun şekilde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2 ve 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanım sonuçları grafik olarak verilmiş olup Tablo 4.13'de eğilme dayanım sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde, 45 °C ve 115 °C de eğilme dayanımı gözlenmemiştir. En yüksek dayanım 95 °C de 3 günlük kür sonucunda 9,3 Mpa olarak tespit edilirken, en düşük eğilme dayanımı ise 55 °C de 1 günlük kür sonucunda 2,3 MPa olarak tespit edilmiştir.

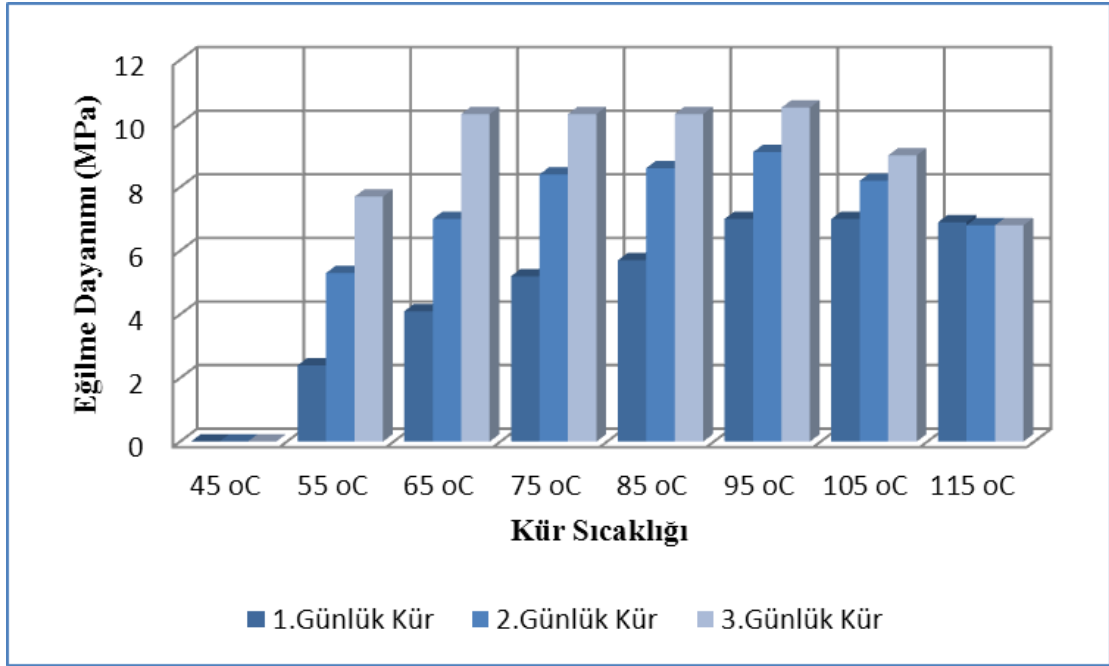


Şekil 4.13. % 8 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.14. %10 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	2,4	5,3	7,7
65 °C	4,1	7,0	10,3
75 °C	5,2	8,4	10,3
85 °C	5,7	8,6	10,3
95 °C	7,0	9,1	10,5
105 °C	7,0	8,2	9,0
115 °C	6,9	6,8	6,8

Derişim oranı %10 için hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanımları Şekil 4.14'de verilmiştir. 45 °C'de eğilme dayanımı gözlenmezken, en yüksek dayanım 95 °C'de 3 günlük kür sonucunda 10,5 MPa tespit edilirken, en düşük eğilme dayanımı 55 °C'de 1 günlük kür sonucunda 2,4 MPa tespit edilmiştir.

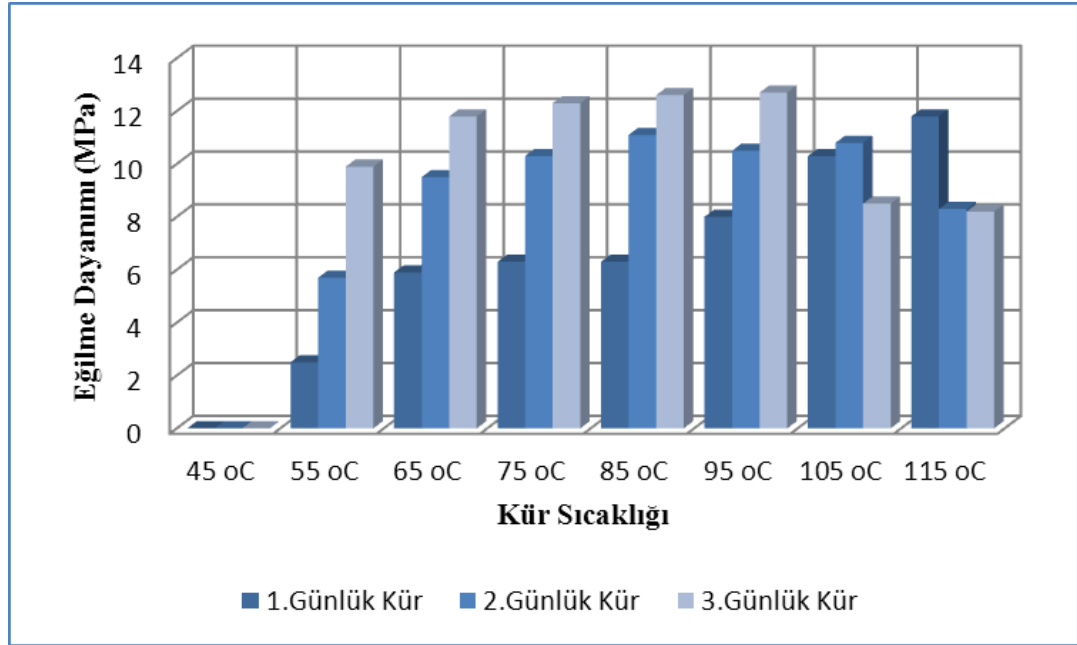


Şekil 4.14. %10 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.15. %12 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	2,5	5,7	9,9
65 °C	5,9	9,5	11,8
75 °C	6,3	10,3	12,3
85 °C	6,3	11,1	12,6
95 °C	8	10,5	12,7
105 °C	10,3	10,8	8,5
115 °C	11,8	8,3	8,2

Derişim oranı %12 için hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanımları Tablo 4.15'de ve grafik olarak Şekil 4.15'de verilmiştir. 45 °C'de eğilme dayanımı gözlenmezken, en yüksek dayanım 95 °C'de 3 günlük kür sonucunda 12,7 MPa tespit edilirken, en düşük eğilme dayanımı 55 °C'de 1 günlük kür sonucunda 2,5 MPa olarak tespit edilmiştir.

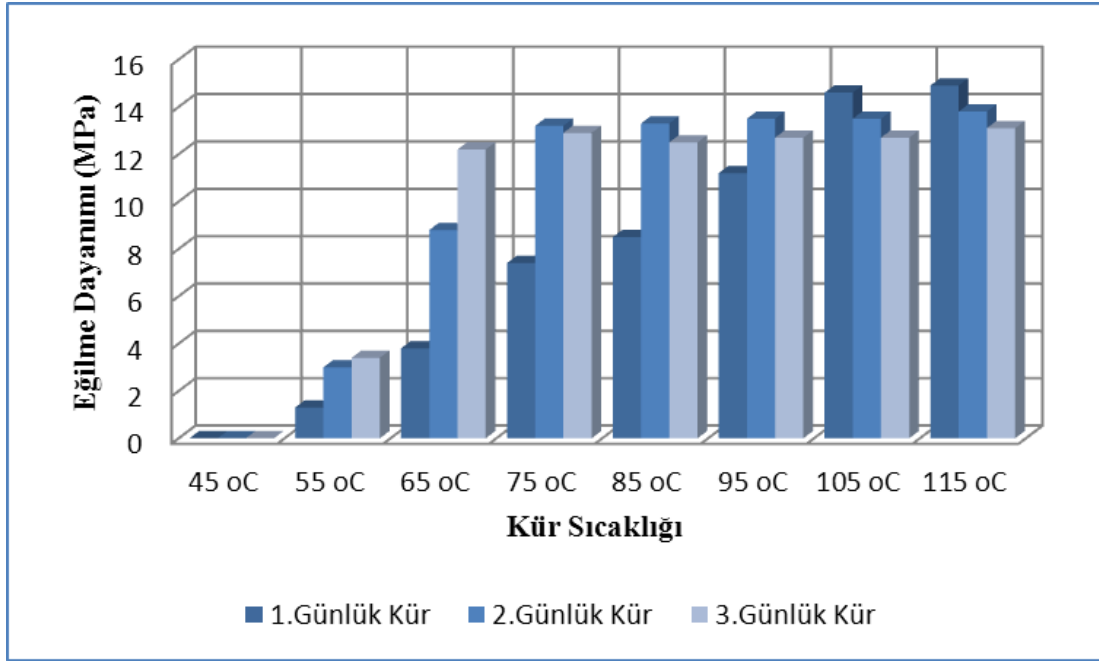


Şekil 4.15. %12 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.16. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	1,3	3	3,4
65 °C	3,8	8,8	12,2
75 °C	7,4	13,2	12,9
85 °C	8,5	13,3	12,5
95 °C	11,2	13,5	12,7
105 °C	14,6	13,5	12,7
115 °C	14,9	13,8	13,1

Şekil 4.16'da %14 derişime uygun şekilde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2 ve 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanım sonuçları grafik olarak verilmiştir. Grafik ve Tablo 4.16 incelendiğinde, 45 °C de eğilme dayanımı gözlenmemiştir. En yüksek dayanım 115 °C'nin 1. gününde 14,9 MPa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca en düşük dayanım ise 55 °C'de 1 günlük kür sonucunda 1,3 MPa olarak tespit edilmiştir. Derişim oranı yükselince, maksimum dayanımı sağlayan sıcaklık 100 derecelere doğru ilerlemiştir. Kür süresi olarak 2 günlük kür süresi ile 3 günlük süre arasında büyük fark gözlenmemiştir.

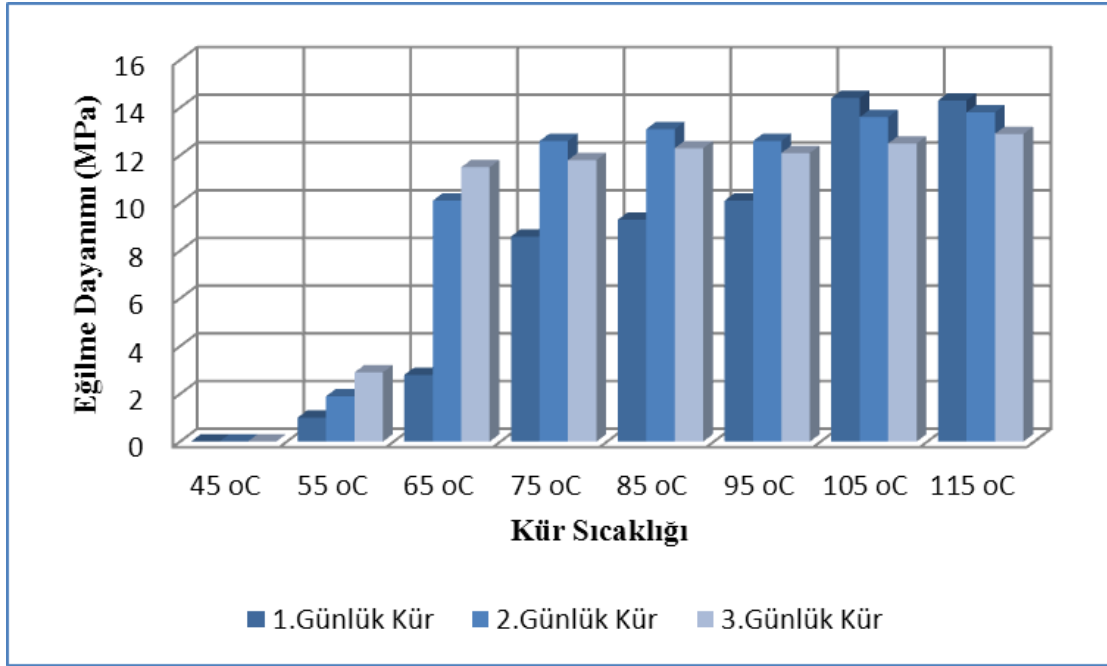


Şekil 4.16. %14 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.17. %16 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	1,0	1,9	2,9
65 °C	2,8	10,1	11,5
75 °C	8,6	12,6	11,8
85 °C	9,3	13,1	12,3
95 °C	10,1	12,6	12,1
105 °C	14,4	13,6	12,5
115 °C	14,3	13,8	12,9

Derişim oranı %16 için hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanımları Tablo 4.17'de ve grafik olarak Şekil 4.17'de verilmiştir. 45 °C'de eğilme dayanımı gözlenmezken, en yüksek dayanım 105 °C'de 1 günlük kür sonucunda 14,4 MPa tespit edilirken en düşük eğilme dayanımı 55 °C'de 1 günlük kür sonucunda 1,0 MPa tespit edilmiştir. Ayrıca 115 °C'de 1 gün kür edilen numunelerin değerleride oldukça yüksek olduğu yorumu yapılabilir.

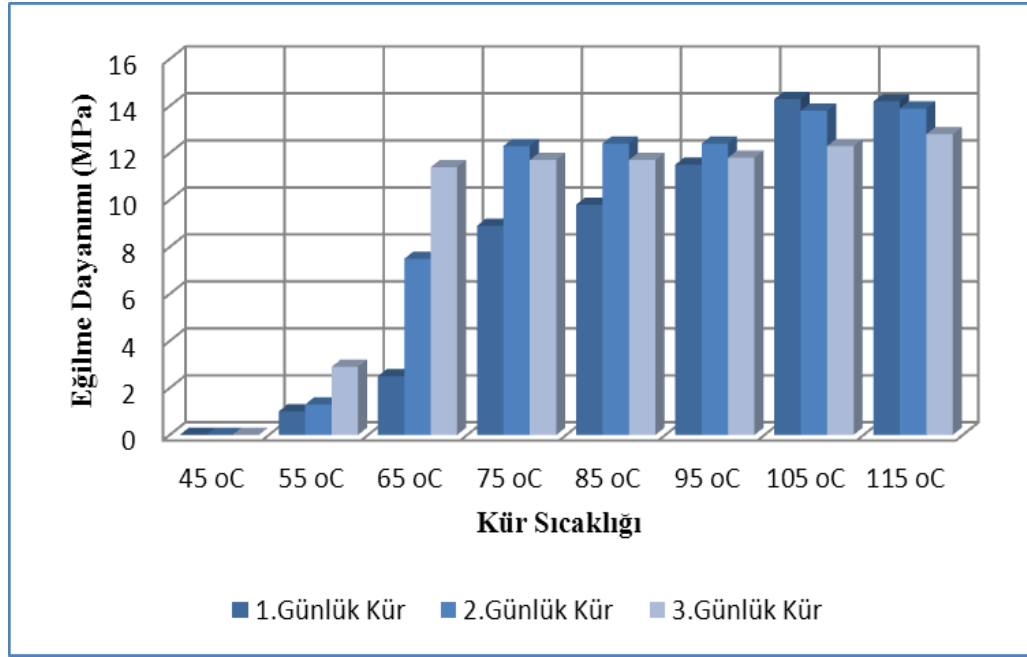


Şekil 4.17. %16 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.18. %18 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	1,0	1,3	2,9
65 °C	2,5	7,5	11,4
75 °C	8,9	12,3	11,7
85 °C	9,8	12,4	11,7
95 °C	11,5	12,4	11,8
105 °C	14,3	13,8	12,3
115 °C	14,2	13,9	12,8

Derişim oranı %18 için hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanımları tablo 4.18'de ve Şekil 4.18'de verilmiştir. 45 °C'de eğilme dayanımı gözlenmezken, en yüksek dayanım 105 °C'de 1 günlük kür sonucunda 14,3 MPa tespit edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı ise 55 °C'de 1 günlük kür sonucunda 1,0 MPa tespit edilmiştir. Sıcaklığı 115 derece olan 1 gün kür edilen numunelerin değerleride maksimum değere çok yakındır.

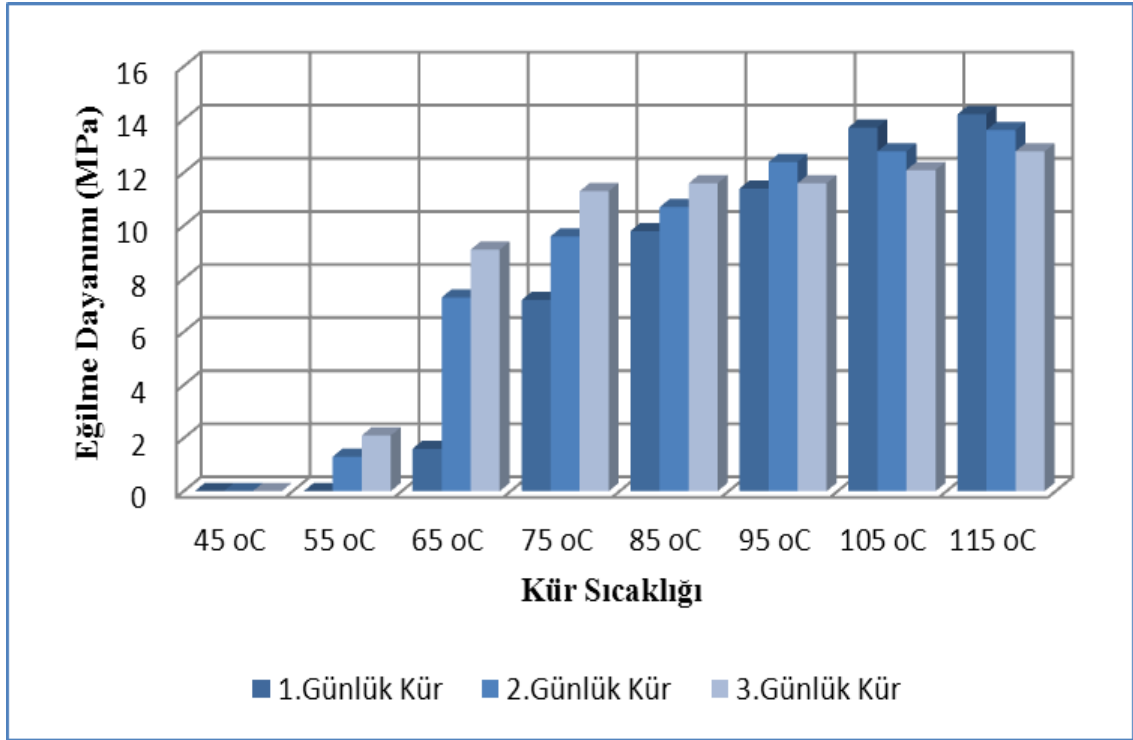


Şekil 4.18. %18 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Tablo 4.19. %20 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	0,0	1,3	2,1
65 °C	1,6	7,3	9,1
75 °C	7,2	9,6	11,3
85 °C	9,8	10,7	11,6
95 °C	11,4	12,4	11,6
105 °C	13,7	12,8	12,1
115 °C	14,2	13,6	12,8

Şekil 4.19 ve Tablo 4.19’da %20 derişime uygun şekilde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2 ve 3 gün kür edilen numunelerin eğilme dayanım sonuçları grafik olarak verilmiştir. Tablo incelendiğinde, 45 °C de ve 55 °C’nin 1 gün kür sonucunda eğilme dayanımı gözlenmemiştir. En yüksek dayanım 115 °C de 1 günlük kür sonucunda 14,2 MPa olarak tespit edilirken, en düşük eğilme dayanımı ise 55 °C de 2 günlük kür sonucunda 1,3 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.19. %20 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Eğilme Dayanımları

Genel olarak yorum yapmak durumunda geoplimer ile elde edilen 15 MPa mertebesinde eğilme dayanımı elde etmenin mümkün olduğu görülmektedir. Elde edilen eğilme dayanımının yüksek dayanım olduğu ve konu ile ilgili literatürde sıkça rastlanmadığı not edilmelidir.

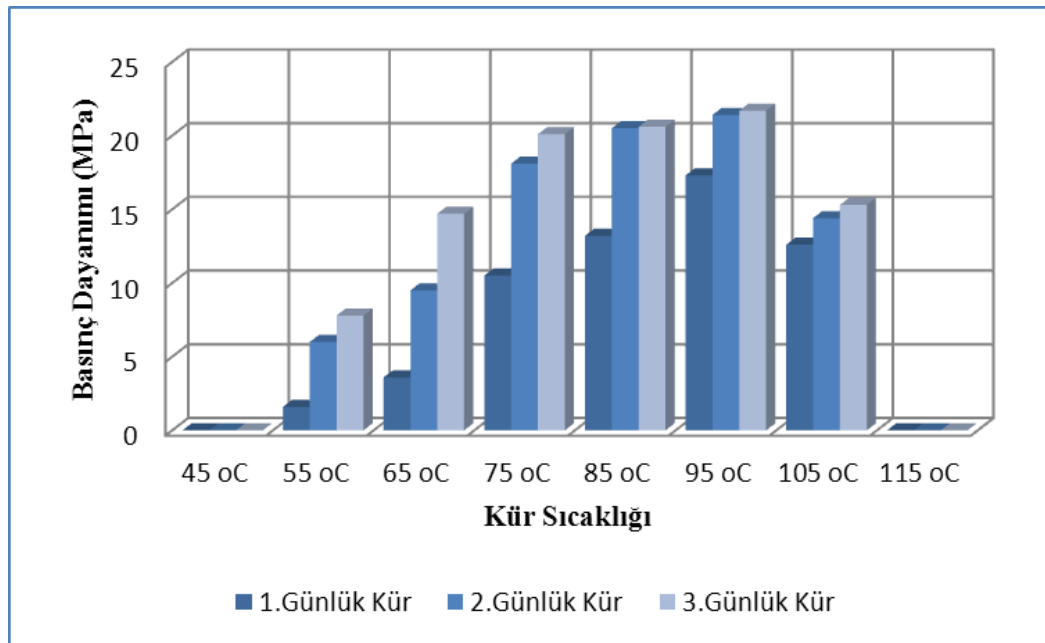
4.2.2.2. Basınç Dayanımı Sonuçları

En yüksek basınç dayanımınının hangi parametreler civarında olduğunu anlamak için yürütülen dayanım tarama karışımlarından elde edilen basınç dayanımları Tablo 4.20 ile 4.28 arasındaki tablolarda sunulmuştur. Tablolara ilaveten her bir sabit derişime ait elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 4.20 – Şekil 4.28 de, sıcaklık ve kür süresi parametreleri ile birlikte sunulmuştur.

Tablo 4.20. %4 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	1,6	6,0	7,8
65 °C	3,6	9,5	14,7
75 °C	10,5	18,1	20,1
85 °C	13,2	20,5	20,6
95 °C	17,3	21,4	21,7
105 °C	12,6	14,4	15,3
115 °C	0,0	0,0	0,0

Derişim oranı %4 için hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, ve 3 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımları Tablo 4.20 ve Şekil 4.20'de gösterilmiştir. 45 °C'de ve 115 °C de 1,2 ve 3 gün kür edilen numunelerde basınç dayanımı görülmemiştir. Bu derişim için hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 95 °C'de 3 gün kür edilen numunelerde 21,7 MPa olarak tespit edilirken, en düşük dayanım 55 °C'de 1 gün kür edilen numunelerde 1,6 MPa olarak tespit edilmiştir.

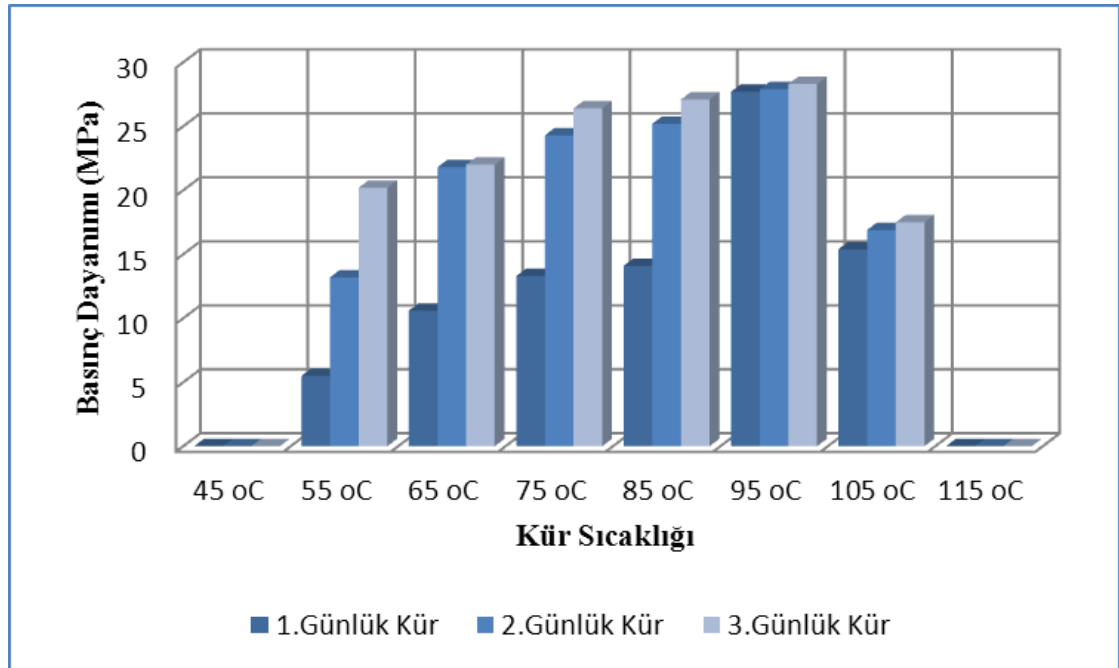


Şekil 4.20. %4 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.21. %6 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	5,5	13,2	20,2
65 °C	10,6	21,8	22,0
75 °C	13,3	24,3	26,4
85 °C	14,1	25,2	27,1
95 °C	27,7	27,9	28,3
105 °C	15,4	16,9	17,5
115 °C	0,0	0,0	0,0

Şekil 4.21’de %6 derişime ait numunelerin basınç dayanımları grafik olarak verilmiştir. %6 derişimde hazırlanan, 45 °C ve 115 °C de kür edilen numunelerde basınç dayanımı gözlenmemiştir. %6 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 95 °C de 3 gün kür edilen numunelerde 28,3 MPa olarak tespit edilirken en düşük dayanım ise 55 °C’de 1 günlük kür sonucunda 5,5 MPa olarak tespit edilmiştir. Kür sıcaklığı 75 ve 85 derece olan karışımların 2-3 günlük kür sonuçları da 28.3 MPa değerinden çok düşük olmadığı gözönünde bulundurulmalıdır (bakınız Tablo 4.21).

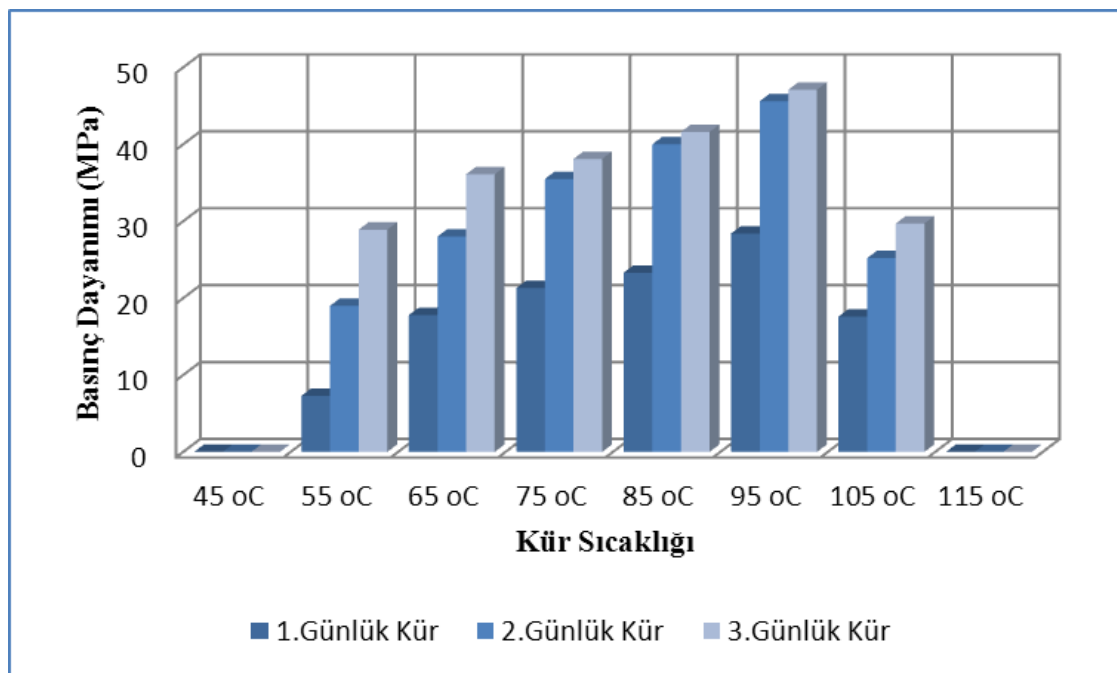


Şekil 4.21. %6 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.22. %8 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	7,3	19,0	28,9
65 °C	17,8	28,0	36,1
75 °C	21,3	35,5	38,1
85 °C	23,3	40,0	41,6
95 °C	28,4	45,6	47,1
105 °C	17,6	25,2	29,7
115 °C	0,0	0,0	0,0

%8 derişimde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, ve 3 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımları Tablo 4.22 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir. 45 °C’de ve 115 °C de 1,2 ve 3 gün kür edilen numunelerde basınç dayanımı görülmemiştir. %8 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 95 °C’de 3 gün kür edilen numunelerde 47,1 MPa mertebesinde tespit edilirken, en düşük dayanım 55 °C’de 1 gün kür edilen numunelerde 7,3 MPa olarak tespit edilmiştir.

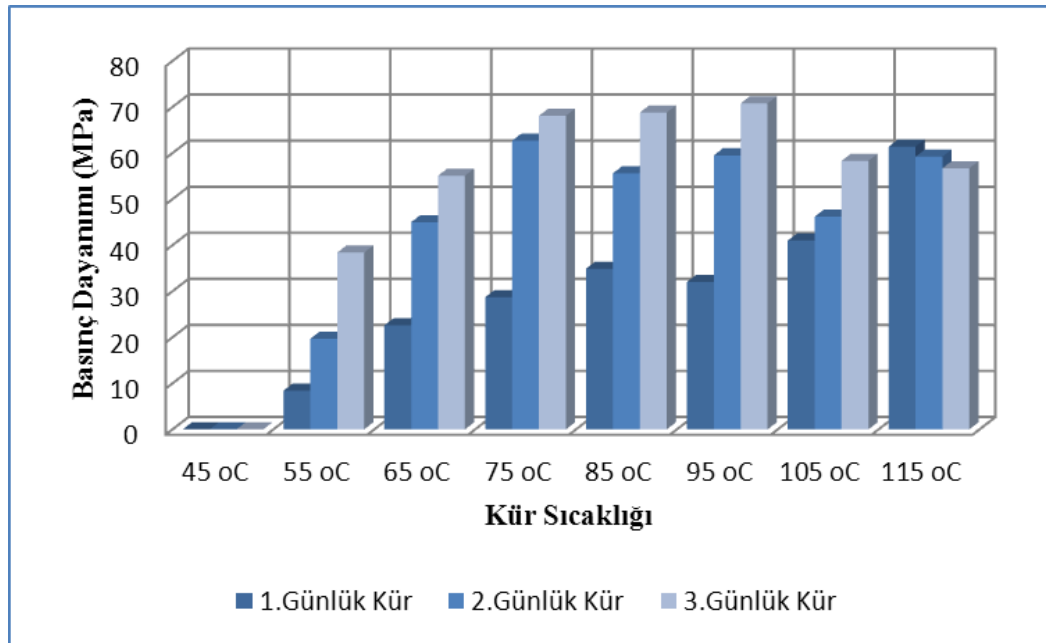


Şekil 4.22. %8 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.23. %10 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	8,4	19,7	38,4
65 °C	22,6	45,0	55,1
75 °C	28,7	62,7	68,1
85 °C	34,9	55,6	68,8
95 °C	32,0	59,5	70,8
105 °C	41,0	46,2	58,3
115 °C	61,4	59,2	56,7

Şekil 4.23’de %10 derişime ait numunelerin basınç dayanımları grafik olarak verilmiştir. %10 derişimde hazırlanan 45 °C de kür edilen numunelerde basınç dayanımı gözlenmemiştir. %10 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 95 °C de 3 gün kür edilen numunelerde 70,8 MPa civarında tespit edilirken en düşük dayanım ise 55 °C’de 1 günlük kür sonucunda 8,4 MPa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca %10 derişime ait numunelerin basınç dayanımları Tablo 4.23’de verilmiştir.

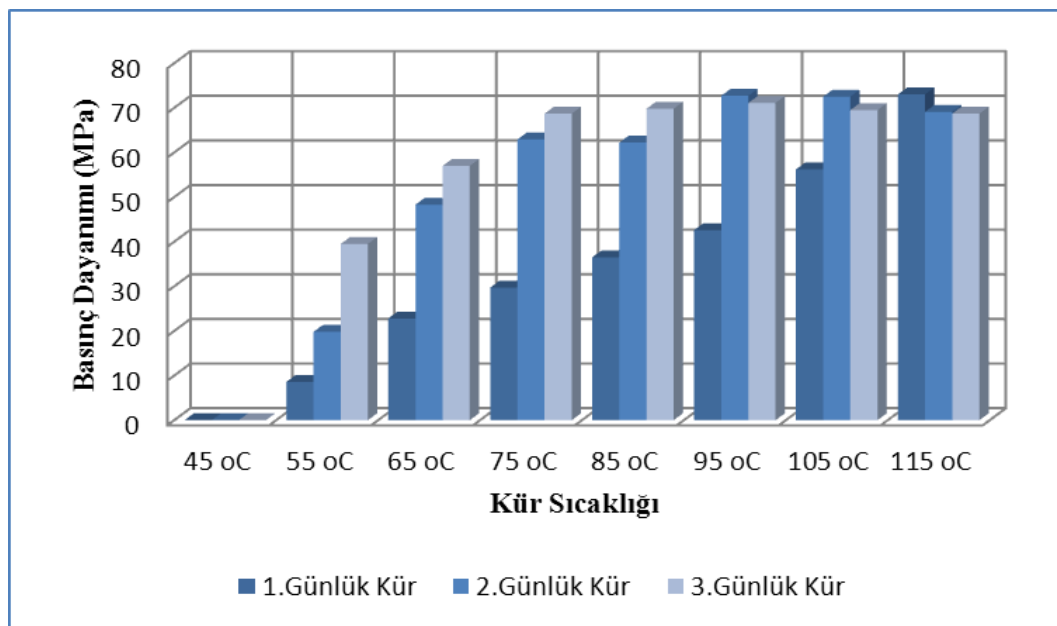


Şekil 4.23. %10 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.24. %12 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	8,6	19,8	39,5
65 °C	22,8	48,3	57,0
75 °C	29,7	62,9	68,7
85 °C	36,5	62,2	69,8
95 °C	42,6	72,7	71,1
105 °C	56,2	72,5	69,5
115 °C	73,0	69,1	68,7

%12 derişimde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, ve 3 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımları Tablo 4.24 ve grafik olarak Şekil 4.24'de gösterilmiştir. 45 °C'de 1,2 ve 3 gün kür edilen numunelerde basınç dayanımı görülmemiştir. %12 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 115 °C'de 1 gün kür edilen numunelerde 73 MPa mertebesinde tespit edilirken, en düşük dayanım 55 °C'de 1 gün kür edilen numunelerde 8,6 MPa olarak tespit edilmiştir.

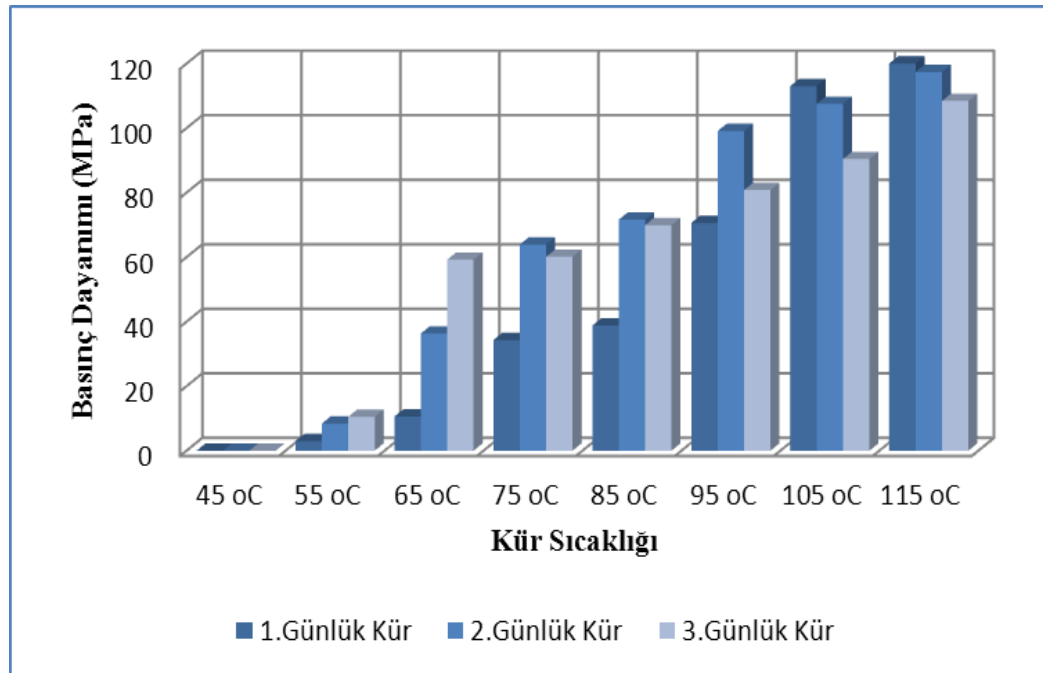


Şekil 4.24. %12 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.25. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	3,0	8,4	10,5
65 °C	10,6	36,3	59,2
75 °C	34,3	63,9	60,1
85 °C	38,8	71,6	69,9
95 °C	70,6	99,1	80,8
105 °C	113,0	107,5	90,4
115 °C	120,0	117,4	108,4

Tablo 4.25’de %14 derişime ait numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. %14 derişimde hazırlanan 45 °C kür edilen numunelerde basınç dayanımı gözlenmemiştir. %14 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 115 °C de 1 gün kür edilen numunelerde 120,0 MPa olarak tespit edilirken en düşük dayanım ise 55 °C’de 1 günlük kür sonucunda 3,0 MPa olarak tespit edilmiştir.

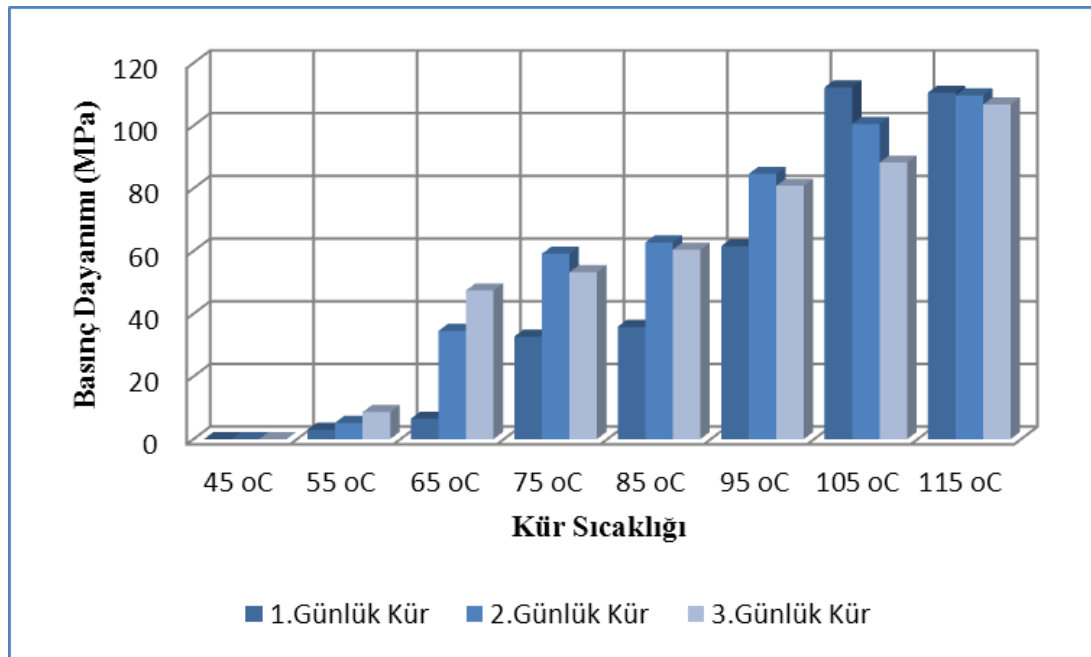


Şekil 4.25. %14 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.26. %16 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	3,0	5,2	8,6
65 °C	6,5	34,5	47,4
75 °C	32,7	59,1	53,2
85 °C	35,8	62,7	60,4
95 °C	61,5	84,6	80,8
105 °C	112,2	100,5	88,2
115 °C	110,5	109,6	106,7

%16 derişimde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, ve 3 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımları Tablo 4.26 ve Şekil 4.26'da verilmiştir. 45 °C'de 1,2 ve 3 gün kür edilen numunelerde basınç dayanımı görülmemiştir. %16 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 105 °C'de 1 gün kür edilen numunelerde 112,2 MPa olarak tespit edilirken, en düşük dayanım 55 °C'de 1 gün kür edilen numunelerde 3,0 MPa olarak tespit edilmiştir.

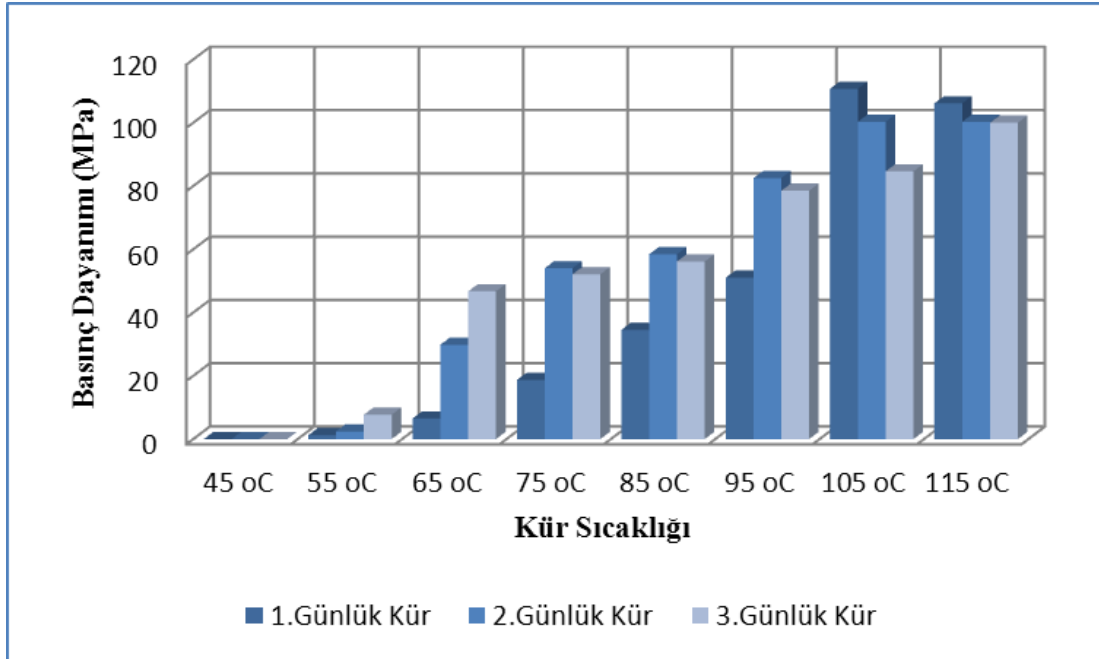


Şekil 4.26. %16 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.27. %18 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	1,2	2,4	7,7
65 °C	6,5	29,8	46,7
75 °C	18,7	54,0	52,1
85 °C	34,5	58,4	56,1
95 °C	51,0	82,5	78,5
105 °C	110,7	100,3	84,6
115 °C	106,1	100,3	100,0

Tablo 4.27 ve Şekil 4.27’de %18 derişime ait numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. %18 derişimde hazırlanan 45 °C kür edilen numunelerde basınç dayanımı gözlenmemiştir. %18 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 105 °C de 1 gün kür edilen numunelerde 110,7 MPa olarak tespit edilirken en düşük dayanım ise 55 °C’de 1 günlük kür sonucunda 1,2 MPa olarak tespit edilmiştir.

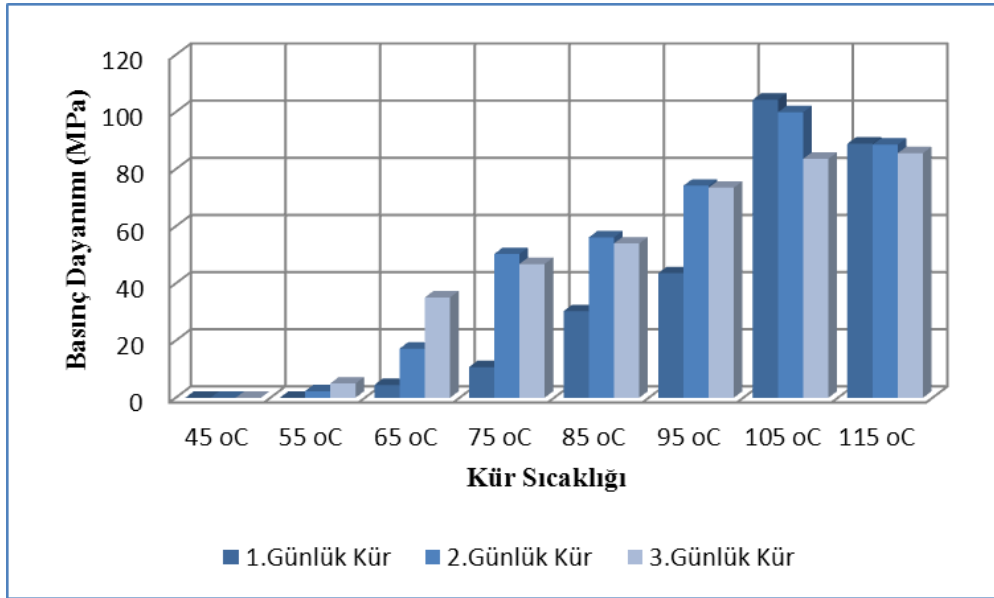


Şekil 4.27. %18 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

Tablo 4.28. %20 Derişime Ait Farklı Sıcaklıklarda 1,2,3 Gün Süresince Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanımları

	1.Günlük Kür	2.Günlük Kür	3.Günlük Kür
45 °C	0,0	0,0	0,0
55 °C	0,0	2,3	5,0
65 °C	4,5	17,2	35,1
75 °C	10,7	50,3	46,8
85 °C	30,3	56,1	54,0
95 °C	43,6	74,2	73,5
105 °C	104,3	99,9	83,6
115 °C	88,9	88,6	85,6

%20 derişimde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda 1, 2, ve 3 gün kür edilen numunelerin basınç dayanımları şekil 4.28’de gösterilmiştir. 45 °C’de 1, 2 ve 3 gün kür edilen numunelerde ve 55 °C de 1 gün kür edilen numunelerde basınç dayanımı görülmemiştir. %20 derişimde hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 105 °C’de 1 gün kür edilen numunelerde 104,3 MPa olarak tespit edilirken, en düşük dayanım 55 °C’de 2 gün kür edilen numunelerde 2,3 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.28. %20 Derişime Ait 1,2,3 Günlük Basınç Dayanımları

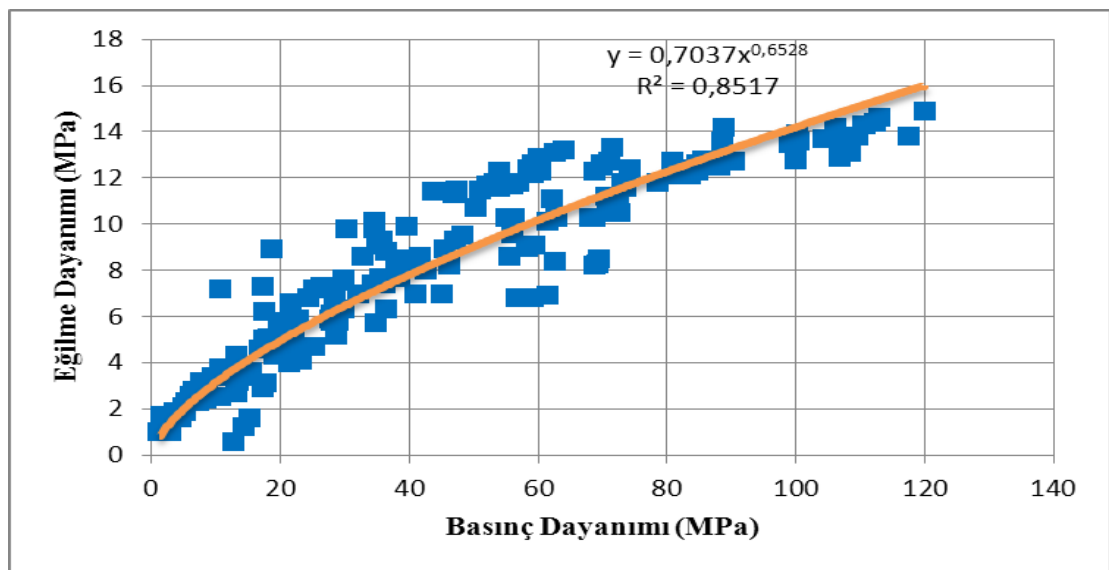
İncelenen tüm derişim oranlarında hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı %14 derişime ait numunelerde tespit edilmiştir. Eğilme dayanımları göz önüne alınarak bir seçim yapılması durumunda farklı derişim ortaya çıkabilir. Ancak

%14 lük derişimden elde edilen eğilme dayanımlarıda gözardı edilemez. Bununla birlikte eğilme dayanımlarının varyasyonu basınç dayanımında oluşan varyasyondan yüksek olduğundan basınç dayanımı optimum derişimi seçmede etkili olmuştur.

Karışım da kullanılan kür ve derişim parametreleri açısından bakıldığında çok sayıda kombinasyon ortaya çıkmaktadır. Bu kombinasyonlar üzerinde tüm deneylerin yapılması iş hacmini aşırı artırmaktadır. Bu nedenle yukarıda yapılan çalışmalar ile yüksek basınç dayanımı ve eğilme dayanımı veren derişim oranı tespit edilmiştir. Optimize edilen %14 derişim içeren karışım üzerinde bazı durabilite deneyleri yürütülerek kontrol karışımları ile kıyaslanmaktadır.

4.2.2.3. Farklı Derişimlerde Hazırlanan Geopolimer Numunelerin Basınç Dayanımları ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

Geopolimer harçların basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla yukarıda sunulan tüm basınç ve eğilme dayanımları bir grafik üzerinde toplu olarak gösterilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 4.29'da sunulmuştur. Grafiğin incelenmesinden eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasında pozitif bir ilişki olduğu ve R^2 'nin 0,85'den yüksek olması ilişkinin güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yapılan korelasyon analizi sonucuna göre (0,91) basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasında pozitif yönlü ve çok güçlü ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 4.29. Basınç ve Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

4.2.3. %14 Derişime Ait Numunelerin Sonuçları

%14 derişim ile hazırlanan numuneler üzerinde birim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımları, aşınma dayanımları, yüksek sıcaklık etkisi ve donma-çözülme deneyleri yapılmış ve sonuçlar bu bölümde incelenmiştir.

4.2.3.1. Birim Ağırlık Sonuçları

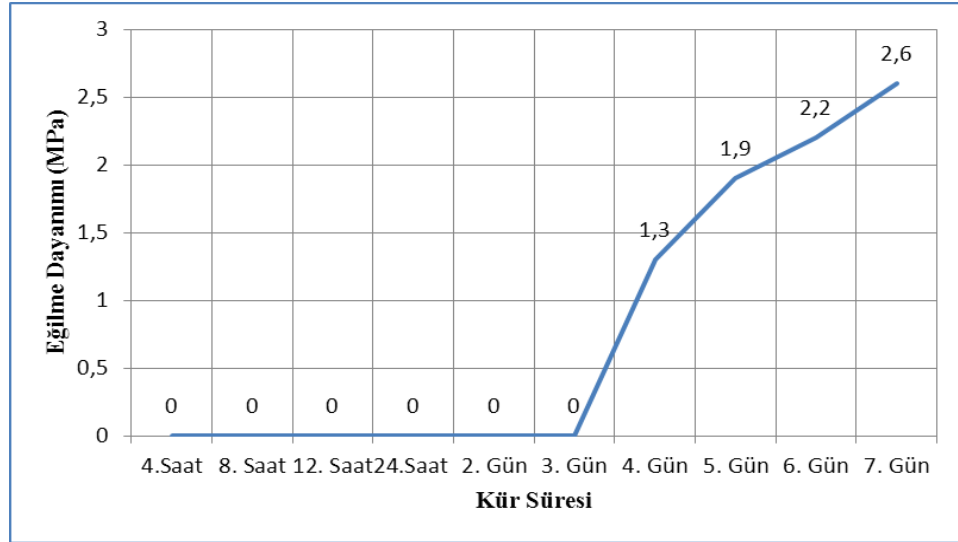
Portland çimento su ile hazırlanan harcın birim ağırlığı $2,04 \text{ gr/cm}^3$ olarak bulunmuştur. NaOH ile aktive edilen harçların ise birim ağırlıkları $2,18-2,28 \text{ gr/cm}^3$ arasında bulunmuştur. %14 NaOH ile aktive edilen harçların birim ağırlıkları Portland çimento ile hazırlanan harçlardan yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4.29. %14 derişimde hazırlanan numunelerin birim ağırlıkları

	Birim Ağırlık(gr/cm^3)
Kontrol	2,04
45 °C	2,22
55 °C	2,18
65 °C	2,24
75 °C	2,28
85 °C	2,21
95 °C	2,22
105 °C	2,21
115 °C	2,19

4.2.3.2. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklık ve Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımı Sonuçları

%14 derişimde hazırlanan ve 45 °C'de 4, 8, 12 saat ve 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 gün sürelerince kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları Şekil 4.30'da verilmiştir. Kür sürelerine göre eğilme dayanımları incelendiğinde ilk 3 gün içinde kür edilen numunelerde eğilme dayanımı gözlenmemiştir. En yüksek eğilme dayanımı 7.günlük kür sonucunda 2,6 MPa olarak tespit edilirken en düşük eğilme dayanımı ise 4 günlük kür sonucunda 1,3 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.30. 45 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

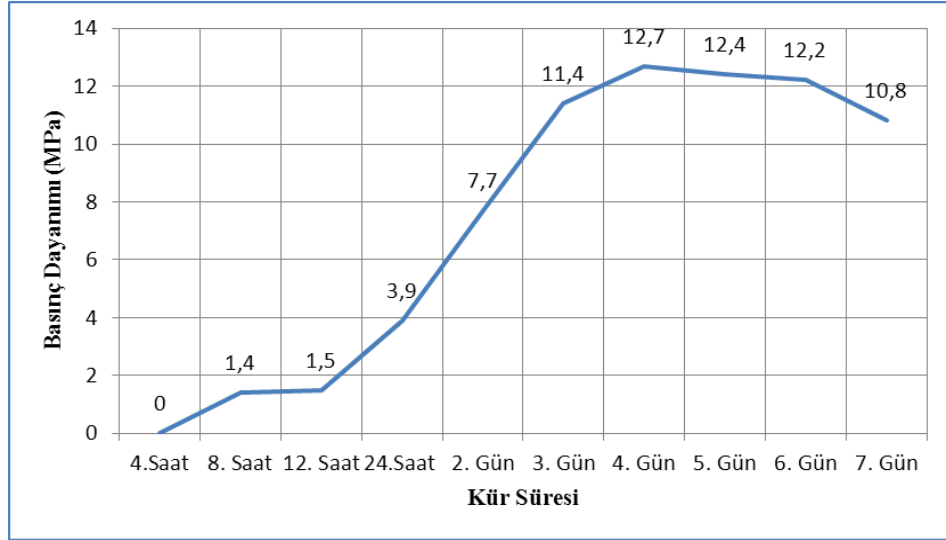
Şekil 4.31’de %14 derişimde hazırlanan ve 55 °C de farklı kür sürelerinde kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları verilmiştir. Eğilme dayanımı gelişim eğrisi incelendiğinde, ilk 24 saat içinde 1,5-2,0 MPa arasında değişen eğilme dayanımları gözlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı 7 günlük küre tabi tutulan numunelerde 10,7 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.31. 55 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

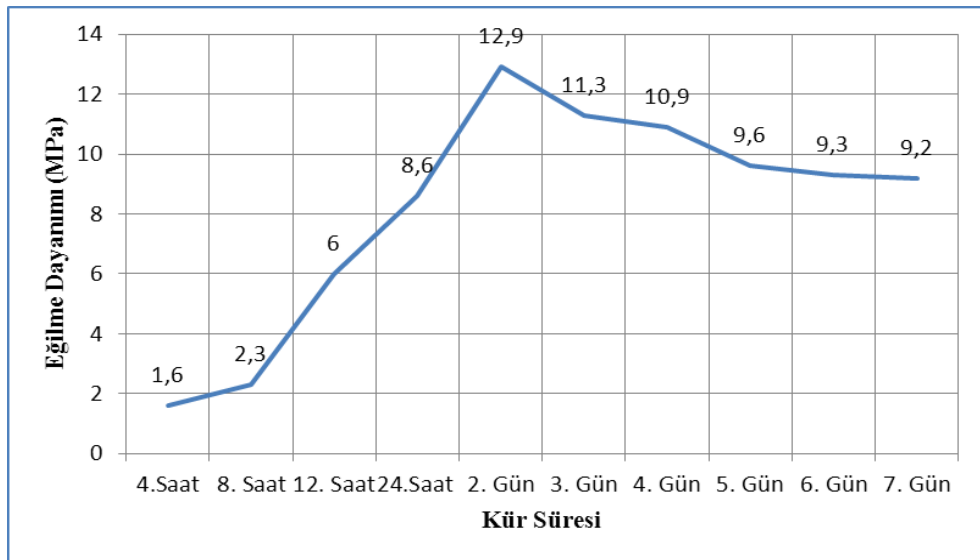
%14 derişimde hazırlanan ve 65 °C’de 4, 8, 12 saat ve 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün sürelerince kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları Şekil 4.32’de verilmiştir. Kür sürelerine göre eğilme dayanımları incelendiğinde ilk 24 saat içinde kür edilen

numunelerde eğilme dayanımı 1,4 ile 3,9 MPa aralığında gözlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı 4 günlük kür sonucunda 12,7 MPa olarak tespit edilirken en düşük eğilme dayanımı ise 8 saatlik kür sonucunda 1,4 MPa olarak tespit edilmiştir.



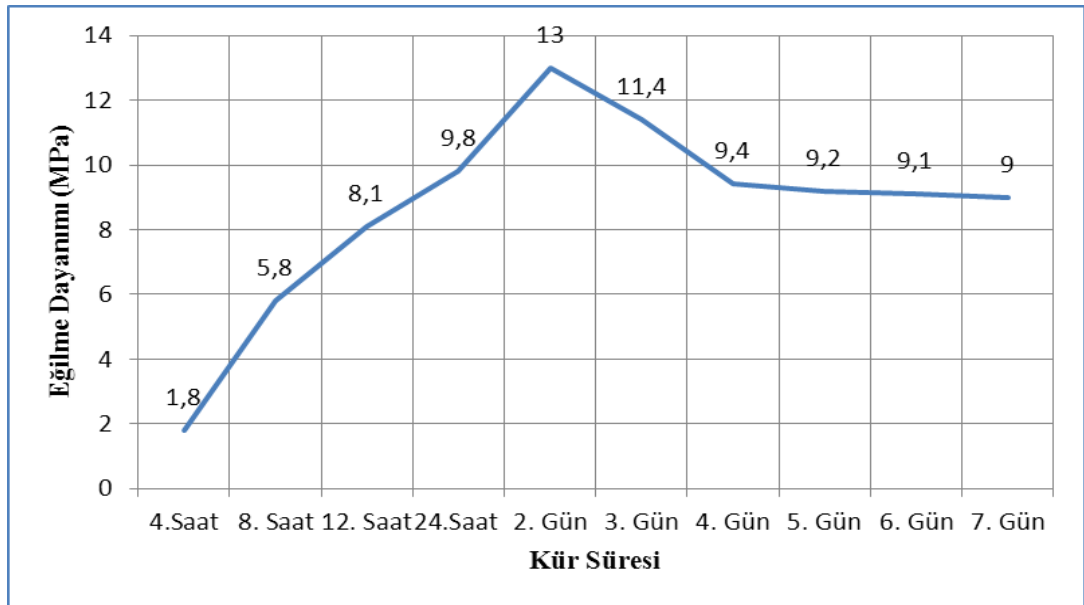
Şekil 4.32. 65 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

Şekil 4.33'de %14 derişimde hazırlanan ve 75 °C de farklı kür sürelerinde kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları verilmiştir. 4 ve 8 saat kür edilen numunelerde eğilme dayanımı sırasıyla 1,6-2,3 MPa olarak tespit edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı ise 2 günlük küre tabi tutulan numunelerde 12,9 MPa olarak tespit edilmiştir.



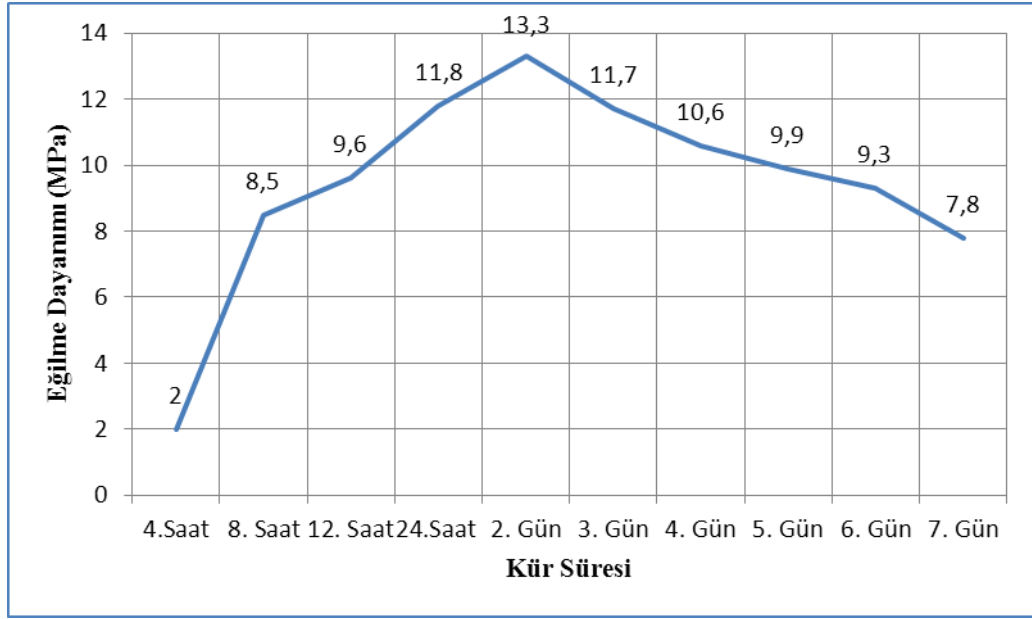
Şekil 4.33. 75 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

%14 derişimde hazırlanan ve 85 °C’de farklı zaman sürelerince kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları Şekil 4.34’de verilmiştir. Kür sürelerine göre eğilme dayanımları incelendiğinde, 4 saatlik kür sonucunda en düşük eğilme dayanımı 1,8 MPa olarak tespit edilirken, en yüksek eğilme dayanımı ise 13,0 MPa ile 2 günlük küre tabi tutulan numunelerde görülmektedir. Ayrıca eğilme dayanımı grafiği incelendiğinde, dayanımın kür süresine bağlı bir şekilde arttığı ve belli bir kür süresinden sonra azalmaya başladığı görülmektedir.



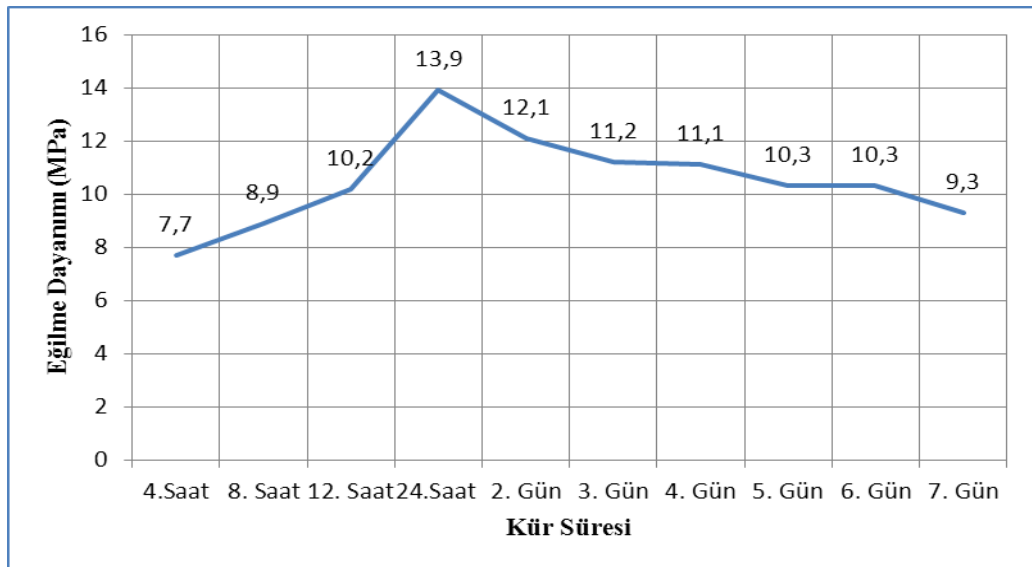
Şekil 4.34. 85 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

Şekil 4.35’de %14 derişimde hazırlanan ve 95 °C de farklı kür sürelerinde kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları verilmiştir. Kür süresine bağlı bir şekilde eğilme dayanımı artan numunelerde en yüksek eğilme dayanımı 2 gün kür edilen numunelerde 13,3 MPa olarak saptanırken, en düşük eğilme dayanımı 4 saat kür edilen numunelerde 2,0 MPa olarak tespit edilmiştir.



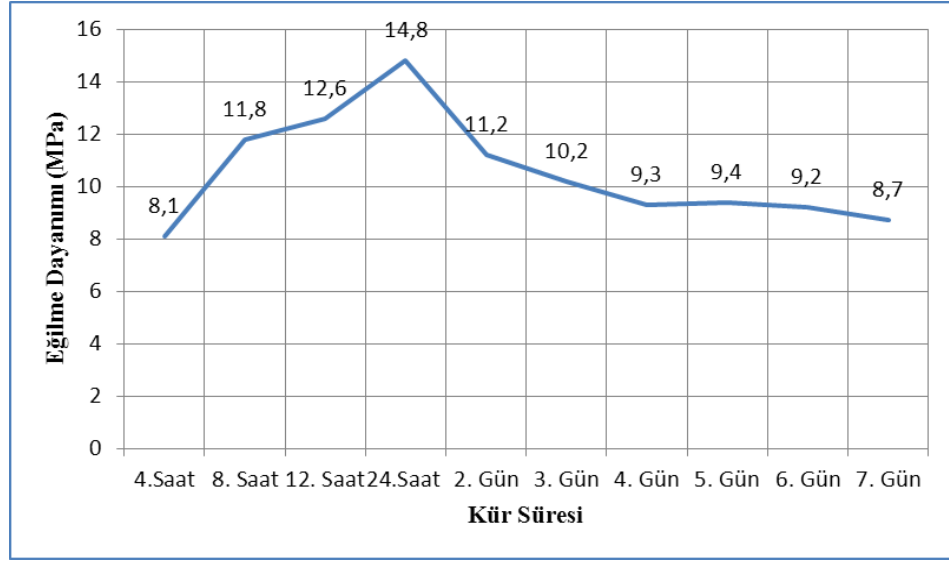
Şekil 4.35. 95 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

%14 derişimde hazırlanan ve 105 °C'de 4, 8, 12 saat ve 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün sürelerince kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları şekil 4.36'da verilmiştir. Kür sürelerine göre eğilme dayanımları incelendiğinde, 4 saatlik kür sonucunda en düşük eğilme dayanımı 7,7 MPa olarak tespit edilirken, en yüksek eğilme dayanımı ise 13,9 MPa ile 1 günlük küre tabi tutulan numunelerde görülmektedir. Ayrıca eğilme dayanımı grafiği incelendiğinde, dayanımın kür süresine bağlı bir şekilde arttığı ve belli bir kür süresinden sonra azalmaya başladığı görülmektedir.



Şekil 4.36. 105 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

Şekil 4.37’de %14 derişimde hazırlanan ve 115 °C de farklı kür sürelerinde kür edilen numunelere ait eğilme dayanımları verilmiştir. Kür süresine bağı bir şekilde eğilme dayanımı değışen numunelerde en yüksek eğilme dayanımı 1 gün kür edilen numunelerde 14,8 MPa olarak saptanırken, en düşük eğilme dayanımı 4 saat kür edilen numunelerde 8,1 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.37. 115 °C Farklı Kür Sürelerindeki Eğilme Dayanımları

Tablo 4.30. % 14 Farklı Sıcaklıklar Eğilme Dayanımları (MPa)

	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	95 °C	105 °C	115 °C
4.Saat	0,0	1,5	0,0	1,6	1,8	2,0	7,7	8,1
8. Saat	0,0	1,6	1,4	2,3	5,8	8,5	8,9	11,8
12. Saat	0,0	1,6	1,5	6,0	8,1	9,6	10,2	12,6
24.Saat	0,0	2,0	3,9	8,6	9,8	11,8	13,9	14,8
2. Gün	0,0	2,6	7,7	12,9	13,0	13,3	12,1	11,2
3. Gün	0,0	3,4	11,4	11,3	11,4	11,7	11,2	10,2
4. Gün	1,3	6,6	12,7	10,9	9,4	10,6	11,1	9,3
5. Gün	1,9	8,6	12,4	9,6	9,2	9,9	10,3	9,4
6. Gün	2,2	10,2	12,2	9,3	9,1	9,3	10,3	9,2
7. Gün	2,6	10,7	10,8	9,2	9,0	7,8	9,3	8,7

%14 derişimde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda kür edilen numunelerin eğilme dayanımları toplu bir şekilde Tablo 4.30’da verilmiştir. Tablo incelendiğinde sıcaklık

arttıkça eğilme dayanımının belirli bir sıcaklığa kadar arttığı, sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Ayrıca sıcaklık artışının eğilme dayanımını arttırdığı gibi, yüksek dayanım için kür süresinde azaltmaktadır. 45 °C de en yüksek eğilme dayanımı 7 gün kür edilen numunelerde görüldükten, 75 °C de 2 gün kür edilen numunelerde en yüksek eğilme dayanımı tespit edilmiştir.

Kür sıcaklığının belirli bir düzeye kadar artması, üretilen geopolimer numeler üzerinde olumlu etki yaratmakta ve aynı zamanda kür süresini azaltmaktadır. Sıcaklık arttıkça eğilme dayanımının artmasının yayınlanmış kaynaklarla uyum içinde olduğu görülmüştür [130, 86, 105].

4.2.3.3. %14 Derişime Ait Farklı Sıcaklık ve Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımı Sonuçları

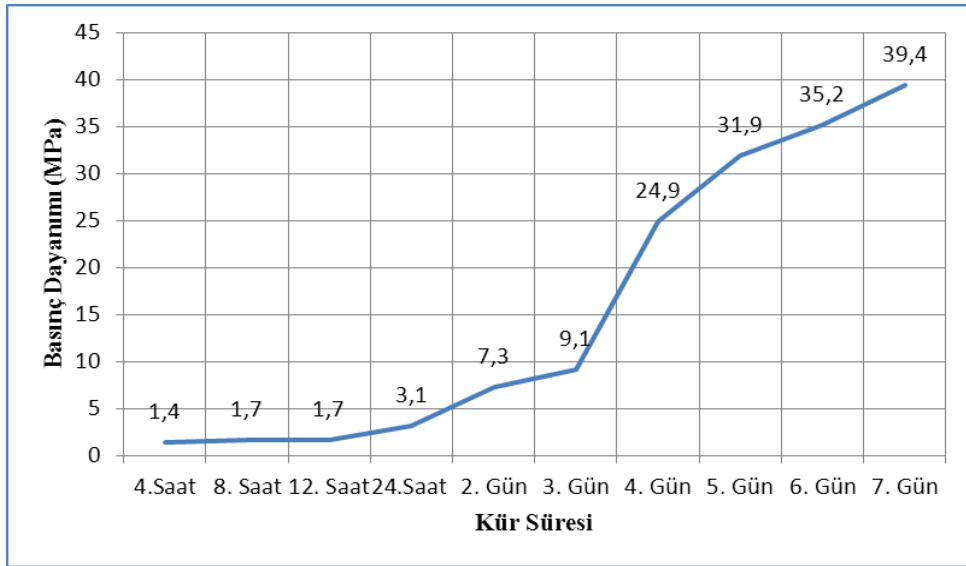
Bu kısımda %14 derişimde hazırlanan, farklı sıcaklık ve farklı kür sürelerine tabii tutulan numunelere ait basınç dayanımları incelenmiştir.

Şekil 4.38'de 45 °C'de farklı kür sürelerinde, kür edilen numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. İlk üç günlük kür sürelerinde basınç dayanımı tespit edilmemiştir. En yüksek basınç dayanımı 7 gün kür edilen numunelerde 6,4 MPa görüldükten en düşük basınç dayanımı ise 4 gün kür edilen numunelerde 2,5 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.38. 45 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

55 °C de kür edilen numunelere ilişkin basınç dayanımları Şekil 4.39 de gösterilmiştir. 55 °C kür edilen numunelerde ilk 12 saatlik kür sürelerinde 1,4 -1,7 MPa arasında değerler tespit edilirken, en yüksek dayanım 7 gün kür edilen numunelerde 39,4 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.39. 55 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

Şekil 4.40'da 65 °C'de farklı kür sürelerinde, kür edilen numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. 8 ve 12 saatlik kür sürelerinde en düşük basınç dayanımı sırasıyla 1,50 ve 3,3 MPa olarak tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı ise 4 gün kür edilen numunelerde 61,8 MPa olduğu tespit edilmiştir.



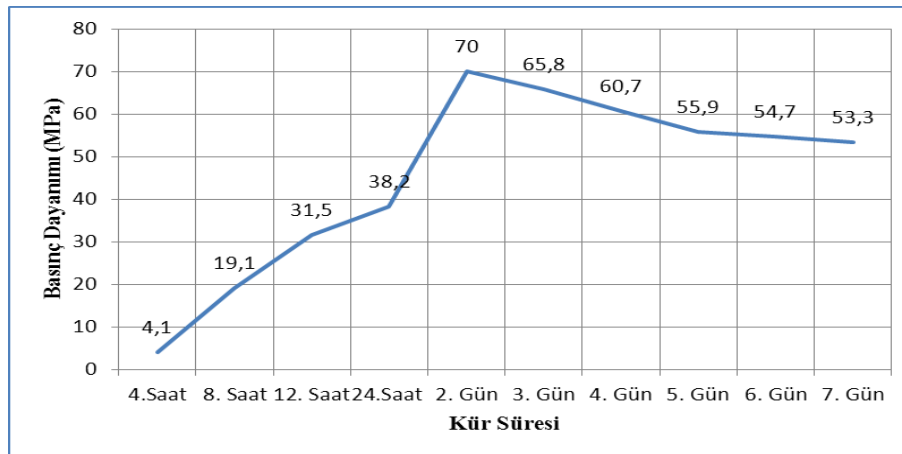
Şekil 4.40. 65 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

75 °C de farklı sürelerde kür edilen numunelere ilişkin basınç dayanımları Şekil 4.41 de gösterilmiştir. 75 °C kür edilen numunelerde en düşük basınç dayanımı 4 saatlik kür süresinde 2,3 MPa olarak tespit edilirken, en yüksek dayanım 2 gün kür edilen numunelerde 63,3 MPa olarak tespit edilmiştir.



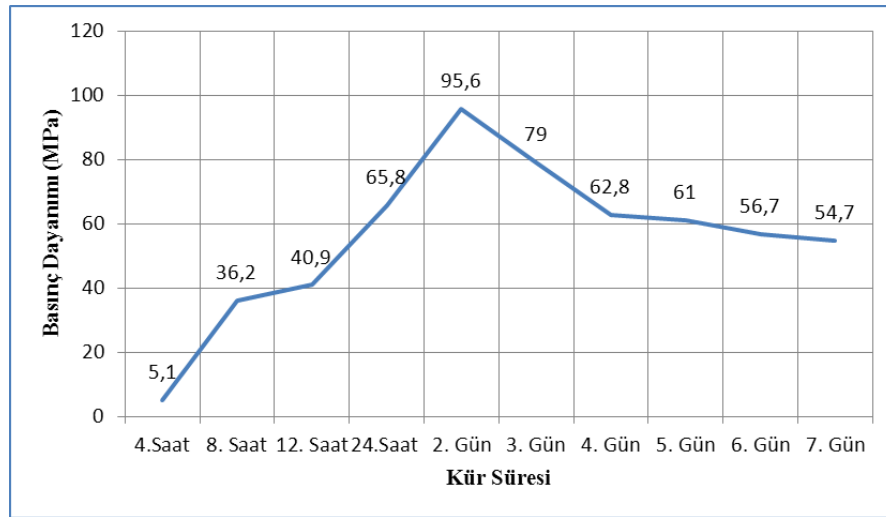
Şekil 4.41. 75 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

Şekil 4.42’de 85 °C’de farklı kür sürelerinde, kür edilen numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. En düşük basınç dayanımı 4 saat kür edilen numunelerde 4,1 MPa olarak tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı ise 2 gün kür edilen numunelerde 70,0 MPa olduğu tespit edilmiştir. Grafik incelendiğinde basınç dayanımı maksimum düzeye gelinceye kadar artan oranlarda artarak pik seviyesine ulaşmış ve sonrasında azalan oranlarda azalarak basınç dayanımında düşüşler gerçekleşmiştir.



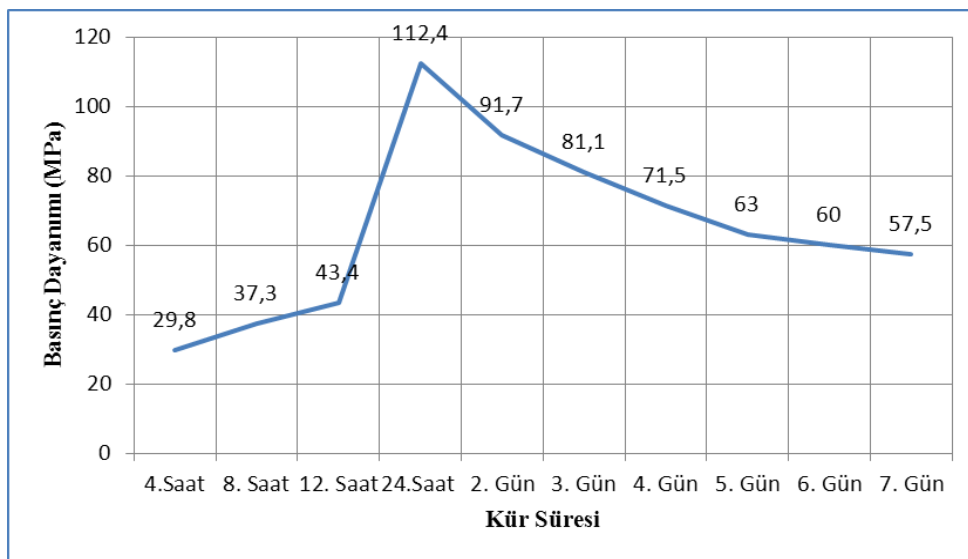
Şekil 4.42. 85 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

95 °C de farklı sürelerde kür edilen numunelere ilişkin basınç dayanımları Şekil 4.43 de gösterilmiştir. 95 °C kür edilen numunelerde en düşük basınç dayanımı 4 saatlik kür süresinde 5,1 MPa olarak tespit edilirken, en yüksek dayanım 2 gün kür edilen numunelerde 95,6 MPa olarak tespit edilmiştir.



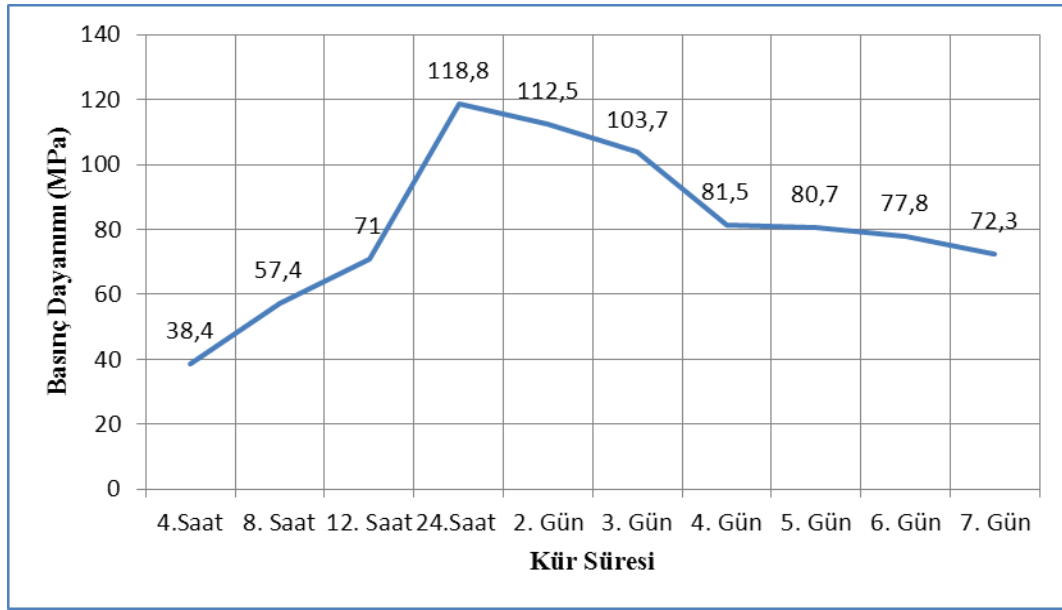
Şekil 4.43. 95 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

Şekil 4.44'de 105 °C'de farklı kür sürelerinde, kür edilen numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. En düşük basınç dayanımı 4 saat kür edilen numunelerde 29,8 MPa olarak tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı ise 1 gün kür edilen numunelerde 112,4 MPa olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.44. 105 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

115 °C de farklı sürelerde kür edilen numunelere ilişkin basınç dayanımları Şekil 4.45 de gösterilmiştir. 115 °C kür edilen numunelerde en düşük basınç dayanımı 4 saatlik kür süresinde 38,4 MPa olarak tespit edilirken, en yüksek dayanım 1 gün kür edilen numunelerde 118,8 MPa olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.45. 115 °C Farklı Kür Sürelerindeki Basınç Dayanımları

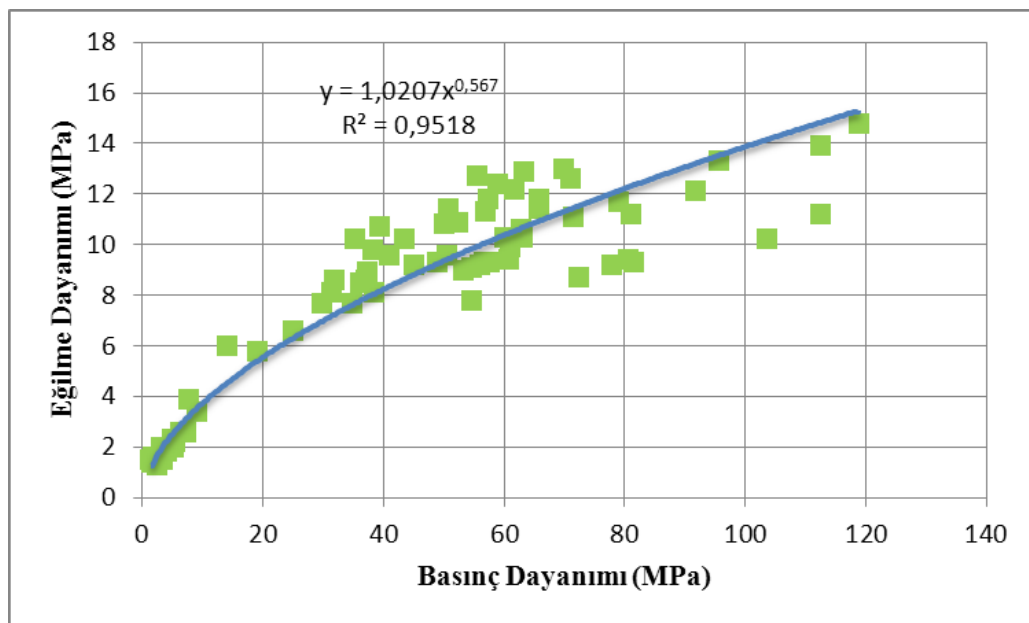
Tablo 4.31. %14 Farklı Sıcaklıklar Basınç Dayanımları (MPa)

	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C	85 °C	95 °C	105 °C	115 °C
4.Saat	0,0	1,4	0,0	2,3	4,1	5,1	29,8	38,4
8. Saat	0,0	1,7	1,5	4,9	19,1	36,2	37,3	57,4
12. Saat	0,0	1,7	3,3	14,0	31,5	40,9	43,4	71,0
24.Saat	0,0	3,1	7,7	37,0	38,2	65,8	112,4	118,8
2. Gün	0,0	7,3	34,8	63,3	70,0	95,6	91,7	112,5
3. Gün	0,0	9,1	50,8	56,9	65,8	79,0	81,1	103,7
4. Gün	2,5	24,9	61,8	52,3	60,7	62,8	71,5	81,5
5. Gün	3,5	31,9	59,0	50,6	55,9	61,0	63,0	80,7
6. Gün	5,5	35,2	55,5	49,0	54,7	56,7	60,0	77,8
7. Gün	6,4	39,4	50,1	45,0	53,3	54,7	57,5	72,3

%14 derişimde hazırlanan ve farklı sıcaklıklarda kür edilen numunelerin basınç dayanımları Tablo 4.31’de toplu olarak verilmiştir. Tablo incelendiğinde sıcaklık arttıkça basınç dayanımının belirli bir sıcaklığa kadar arttığı, sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Ayrıca sıcaklık artışı basınç dayanımını arttırdığı gibi en yüksek dayanımı veren kür süresinide azaltmaktadır. 45 °C de 7 gün kür edilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı görülrken, 115 °C de 24 saat kür edilen numunelerde en yüksek basınç dayanımı tespit edilmiştir.

4.2.3.4. Optimum Derişime Ait Basınç Dayanımı ve Eğilme Dayanımı Arasındaki İlişki

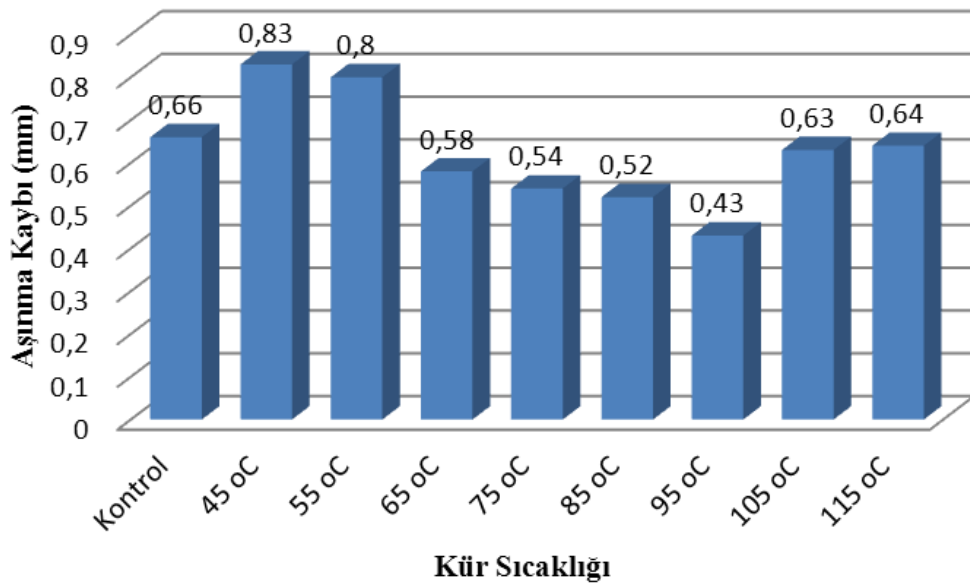
Optimum derişimde hazırlanan, 45 ten 115 dereceye kadar sıcaklıklarda, 4 saatten 7 güne kadar kür edilen numunelerden elde edilen basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla, sözkonusu derişime ait tüm basınç ve eğilme dayanımları bir grafik üzerinde toplu olarak gösterilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 4.46 da sunulmuştur. Grafiğin incelenmesinden eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasında pozitif bir ilişki olduğu ve R^2 ’nin 0,90’dan yüksek olması ilişkinin güçlü olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan korelasyon analizi sonucunda (0,88) Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasında pozitif yönlü ve güçlü bir ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 4.46. Basınç ve Eğilme dayanımları arasındaki ilişki

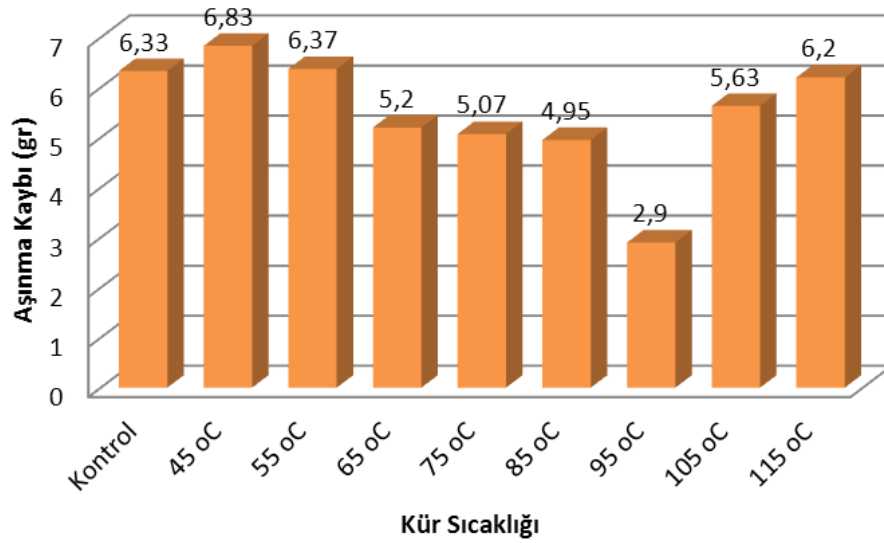
4.2.4. Aşınma Deneyi Sonuçları

Hazırlanan numuneler daha önce tarif edildiği şekilde böhme cihazı yardımıyla aşınmaya tabi tutulmuş, ağırlık ve hacimsel kayıp olarak ölçülen sonuçlar aşağıda verilmiştir. %14 derişimde hazırlanan beton numuneler 45 ila 115 °C arasında küre tabi tutulduktan sonra deney yürütüştür. Ayrıca çimento ile yapılan beton numuneleri ile kıyaslama yapabilmek için kontrol numunesi üzerinde de aynı deney yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Elde edilen aşınma deneyi sonuçları Şekil 4.47 de sunulmaktadır. Numunelerin tek nokta aşınma kayıplarının hacimsel olarak incelendiğinde, en az aşınma kaybının, 95 °C de görülürken, en yüksek hacimsel kayıp 45 °C de kür edilen numunelerde görülmüştür. Ayrıca kontrol numunesinde 0,66 mm aşınma kaybı olduğu görülmüştür. Kür sıcaklığı 65 ten 105 e kadar olan numunelerin tamamı kontrol numunesinden daha az aşınmıştır.



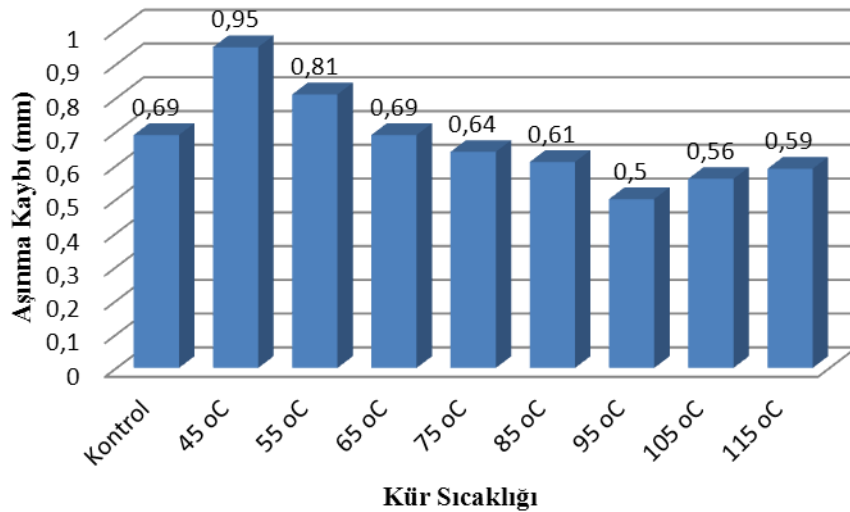
Şekil 4.47. Numunelerin Tek Yüzey Aşınma Kayıpları (mm)

Numunelerin tek yüzey aşınma kayıpları ayrıca ağırlık olarak da incelenmiştir. İnceleme sonucunda en az ağırlık kaybı, 95 °C de olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra en yüksek ağırlık kaybı, 45 °C de ve 45 °C'yi sırasıyla 55 °C ve kontrol numunesi takip etmektedir.



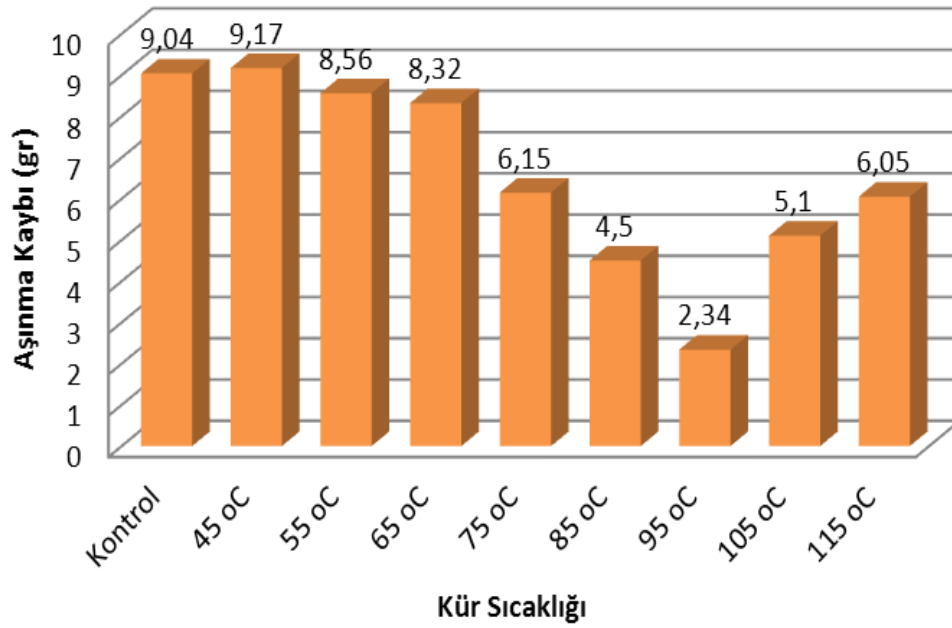
Şekil 4.48. Numunelerin Tek Yüzey Aşınma Kayıpları (gr)

Numunelerin dört yüzey aşınma kayıpları incelendiğinde hacimsel olarak en fazla kayıp (0,95 mm) 45 °C de görülürken, en az kayıp (0,50 mm) 95 °C de görülmüştür. Kontrol numunesinde ise 0,69 mm kayıp olduğu ölçülmüştür.



Şekil 4.49. Numunelerin Dört Yüzey Aşınma Kayıpları (mm)

Numunelerin dört yüzey aşınma kayıplarının ağırlık cinsinden kayıpları incelendiğinde diğer aşınma ölçümleri ile paralel olarak en az ağırlık kaybı 95 °C'de olduğu ve en fazla ağırlık kaybı 45 °C'de tespit edilmiştir. Kontrol numunesi ise 9,04 gr ağırlık kaybı ile ikinci sırada yer almaktadır.



Şekil 4.50. Numunelerin Dört Yüzey Aşınma Kayıpları (gr)

Aşınma deney sonuçlarını genel olarak değerlendirildiğinde, 95 °C de yapılan kür en az aşınma kaybına yol açarken, en yüksek aşınma kaybı tüm ölçümlerde 55 °C de yapılan kür numunelerinde yaşanmıştır. 75, 85, 95, 105 ve 115 °C lerde yapılan kürler kontrol numunesinde görülen aşınma kayıplarından daha az kayıp göstermektedirler.

Numuneler 71x71x71 mm olarak üretilmiştir. Kalıp hatasından kaynaklanan mm oynamaların yanlış yorumlamaya sebebiyet vermemesi için hacimsel ve ağırlık aşınma kayıpları % olarak da hesaplanmıştır. Yüzdelerik sonuçlar incelendiğinde 95 °C de kür edilen numunelerin toplam hacmin %0,71 ve toplam ağırlığın %0,30'u aşınma kaybı göstermiş ve en az kayıp gösteren numune olurken, 55 °C de kür edilen numunelerin toplam hacmin %1,35 ve toplam ağırlığın %1,19'u gibi bir aşınma kaybı göstererek en fazla kayıp olarak hesaplanmıştır. Kontrol numunelerinde ise toplam hacmin %0,97'si ve toplam ağırlığın %1,15'i aşınma kaybı göstermiştir.

Tablo 4.32. Numunelerin 4 Yüzey Aşınma Sonuçları

Sıcaklık	9 Noktanın Aşınma Öncesi		9 Noktanın Aşınma Sonrası		Aşınma Kaybı			
	Yükseklik Ortalaması*	Ağırlık Ortalaması*	Yükseklik Ortalaması*	Ağırlık Ortalaması*	Mm	mm	Gr	gr
	(mm)	(gr)	(mm)	(gr)		(%)		(%)
Kontrol	71,12	783,07	70,43	774,03	0,69	0,97	9,04	1,15
45 °C	70,94	760,33	70,13	752,01	0,95	1,14	9,17	1,09
55 °C	70,62	769,10	69,67	759,93	0,81	1,35	8,56	1,19
65 °C	71,21	792,73	70,52	784,17	0,69	0,97	8,32	1,08
75 °C	71,18	778,62	70,54	772,47	0,64	0,90	6,15	0,79
85 °C	71,12	776,50	70,51	772,00	0,61	0,86	4,50	0,58
95 °C	70,57	772,00	70,07	769,66	0,50	0,71	2,34	0,30
105 °C	71,09	793,77	70,53	788,67	0,56	0,79	5,10	0,64
115 °C	71,16	791,45	70,57	785,40	0,59	0,83	6,05	0,76

*Not: Değerler her parti için 3 adet numune ortalamasıdır.

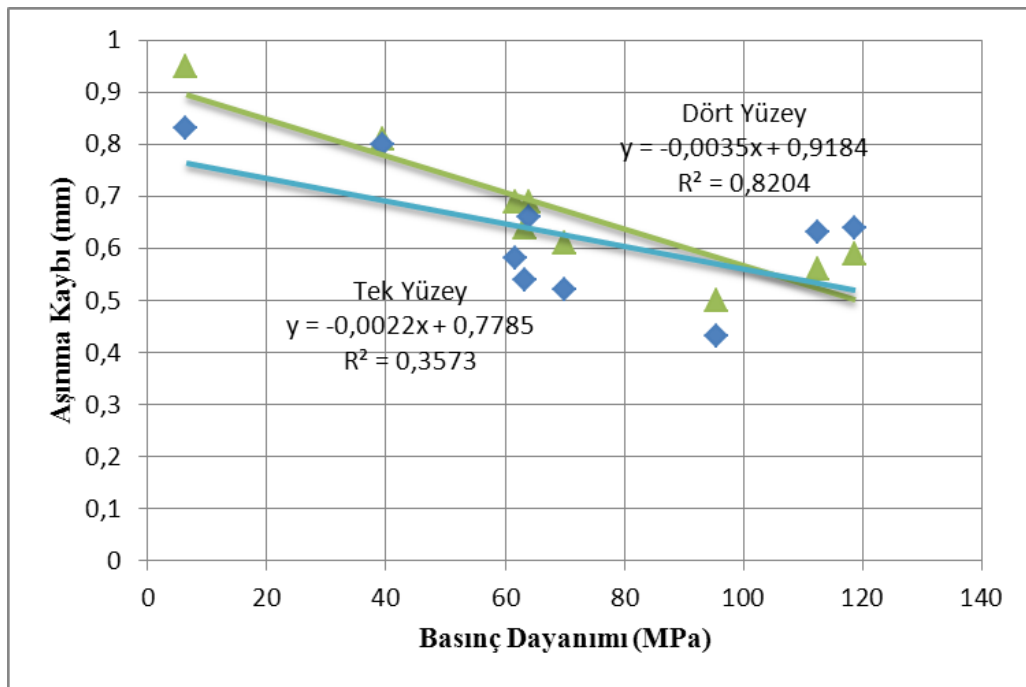
Tablo 4.33. Numunelerin Tek Yüzey Aşınma Sonuçları

Sıcaklık	9 Noktanın Aşınma Öncesi		9 Noktanın Aşınma Sonrası		Aşınma Kaybı			
	Yükseklik Ortalaması*	Ağırlık Ortalaması*	Yükseklik Ortalaması*	Ağırlık Ortalaması*	Mm	Mm	Gr	Gr
	(mm)	(gr)	(mm)	(gr)		(%)		(%)
Kontrol	71,24	779,13	70,58	772,80	0,66	0,93	6,33	0,81
45 °C	71,27	778,17	70,47	771,80	0,83	1,12	6,83	0,82
55 °C	71,23	778,08	70,40	771,25	0,80	1,17	6,37	0,88
65 °C	71,36	780,73	70,78	775,53	0,58	0,81	5,20	0,67
75 °C	71,10	780,20	70,56	775,13	0,54	0,76	5,07	0,65
85 °C	71,27	777,57	70,75	772,62	0,52	0,73	4,95	0,64
95 °C	71,47	765,67	71,04	762,77	0,43	0,60	2,90	0,38
105 °C	71,16	775,13	70,53	769,50	0,63	0,89	5,63	0,73
115 °C	71,19	758,4	70,45	752,20	0,64	1,04	6,20	0,82

*Not: Değerler her parti için 3 adet numune ortalamasıdır.

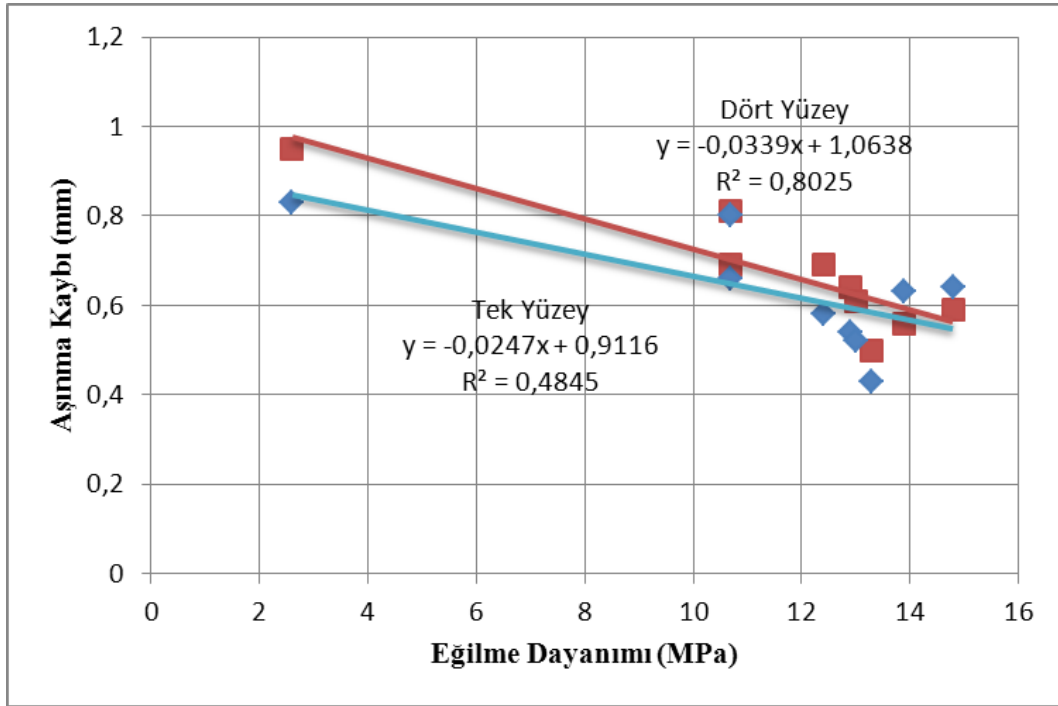
4.2.4.1. Aşınma ile Eğilme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Geopolimer harcın aşınması ile dayanımı arasındaki ilişkinin dercesini örnek üzere basınç dayanımı ve aşınma, eğilme dayanımı ve aşınma arasındaki ilişki grafik olarak Şekil 4.51 ve 4.52’de sunulmaktadır. Yapılan araştırma ve uygulamaların sonuçlarına göre, betonun basınç dayanımı, aşınma dayanıklılığını etkileyen en önemli faktör durumundadır [131, 132]. Beton dayanımının yüksek olması, betonun içerisindeki kapiler boşlukların daha az miktarda yer almasından kaynaklanmakta, sonuç itibariyle dayanımı yüksek olan betonların aşınma dayanıklılığı da yüksek olmaktadır. Şekil 4.51 incelendiğinde literatür ile paralel olarak aşınma kaybı ile basınç dayanımı arasında negatif yönlü bir ilişki bulunmaktadır. Ayrıca yapılan korelasyon analizi sonucunda dört yüzey aşınma kaybı ile basınç dayanımı arasında (-0,91) negatif yönlü çok güçlü bir ilişki olduğu ve tek yüzey aşınma kaybı ile basınç dayanımı arasında (-0,60) negatif yönlü orta güçlü ilişki olduğunu göstermektedir. Hesaplanan R^2 değeri, y’deki değişimin ne kadarının regresyon doğrusu tarafından açıklanabildiğini göstermektedir. Dört yüzey aşınma kaybı ve basınç dayanımı arasında elde edilen regresyon fonksiyonu doğrusu y deki değişimi %82 oranında açıklamaktadır.



Şekil 4.51. Basınç Dayanımı ve Aşınma Arasındaki İlişki

Şekil 4.52’de Eğilme dayanımı ve Aşınma kaybı arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan korelasyon analizi sonucunda eğilme dayanımı ile dört yüzey aşınma kaybı arasında (-0,90) çok güçlü ve negatif yönlü bir ilişki ve tek yüzey aşınma kaybı arasında ise (-0,70) orta güçlü ve negatif yönlü bir ilişki olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.52. Eğilme Dayanımı ve Aşınma Arasındaki İlişki

4.2.5. Yangın Deneyi Sonuçları

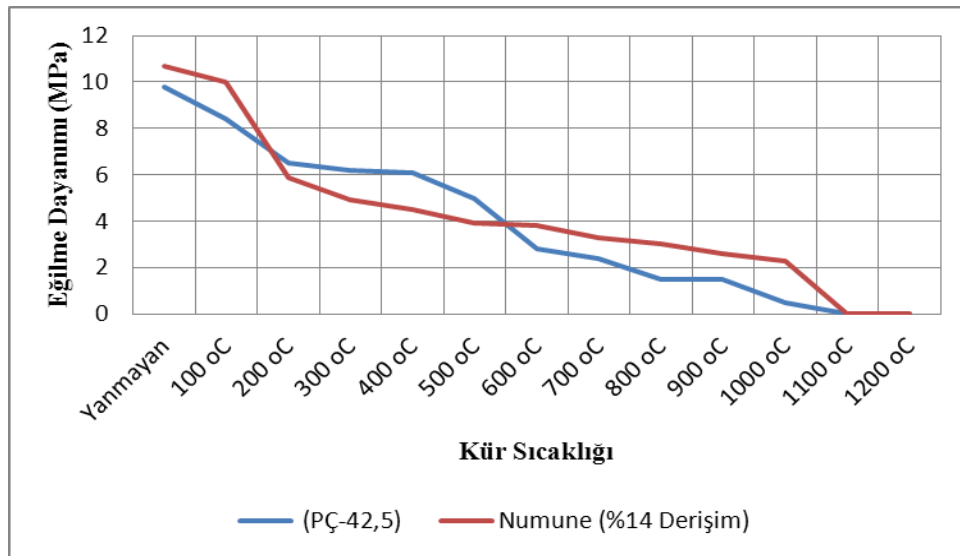
%14 derişimde hazırlanan numuneler etüvde kür edildikten sonra, hada önce tarif edildiği şekilde yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınında çeşitli sıcaklıklara mazruz bırakılan numuneler soğutulduktan sonra basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar tablo ve grafik olarak verilmiştir (Tablo 4.34 ve 4.35). Kontrol ve geopolimer numunelerinde, eğilme dayanımları yüksek sıcaklık etkisiyle azalmaktadır, sıcaklık arttıkça düşüş daha fazla olmaktadır. Çok yüksek sıcaklıklarda geopolimer numunelerin geriye kalan eğilme dayanımları kontrol portland çimentosu karışımından daha yüksek görülmüştür.

Tablo 4.34. Yanma Deneyi Sonrası Eğilme Dayanımları (MPa)

Yüksek Sıcaklık	(PÇ-42,5)	Numune (%14 Derişim)
Yanmayan Kontrol Numunesi	9,8	10,7
100 °C	8,4	10,0
200 °C	6,5	5,9
300 °C	6,2	4,9
400 °C	6,1	4,5
500 °C	5,0	3,9
600 °C	2,8	3,8
700 °C	2,4	3,3
800 °C	1,5	3,0
900 °C	1,5	2,6
1000 °C	0,5	2,3
1100 °C	0,0	0,0
1200 °C	0,0	0,0

Sıcaklık-Kontrol = -0,98, Sıcaklık-Numune=-0,89

Sıcaklık artışı ile doğru orantılı bir şekilde azalan basınç ve eğilme dayanımı, 1100 ve 1200 °C’lerde dayanımına rastlanmamıştır. Ayrıca yapılan korelasyon analizi sonucuna göre, yüksek sıcaklık ile kontrol numunelerinin eğilme dayanımları arasında (-0,98) negatif yönlü güçlü ve yüksek sıcaklık ile deney numunelerinin eğilme dayanımları arasında (-0,89) negatif yönlü güçlü bir bağıntı tespit edilmiştir.



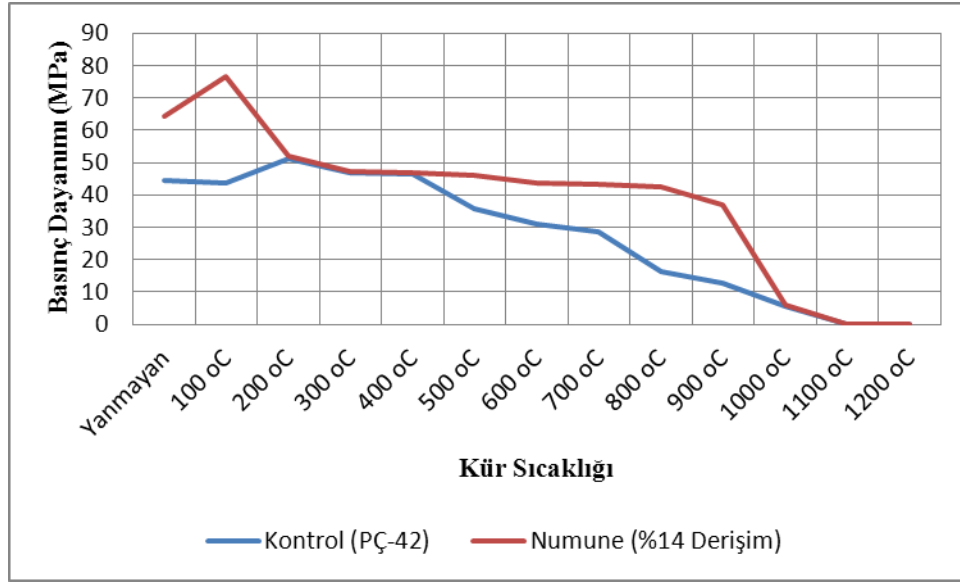
Şekil 4.53. Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımları (MPa)

Tablo 4.35. Yanma Deneyi Sonrası Basınç Dayanımları (MPa)

	Kontrol	
	(PÇ-42)	Numune (%14 Derişim)
Yanmayan	44,6	64,1
100 °C	43,6	76,4
200 °C	51,1	51,8
300 °C	47,0	47,2
400 °C	46,5	47,0
500 °C	35,8	46,2
600 °C	30,9	43,7
700 °C	28,5	43,2
800 °C	16,3	42,5
900 °C	12,8	36,9
1000 °C	5,6	5,8
1100 °C	0,0	0,0
1200 °C	0,0	0,0

Sıcaklık-Kontrol = -0,92, Sıcaklık-Numune= -0,85

Tablo 4.35. de yanma deneyi sonrası numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir. İnceleme sonucuna göre sıcaklık artışı 200 °C den sonra numunelerin dayanımları üzerinde negatif bir etki yaparak basınç dayanımlarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra yapılan korelasyon analizi sonucuna göre, yüksek sıcaklık ile kontrol numunelerinin basınç dayanımları arasında (-0,92) negatif yönlü güçlü ve yüksek sıcaklık ile deney numunelerinin basınç dayanımları arasında (-0,85) negatif yönlü güçlü bir ilişki tespit edilmiştir. Kontrol ve deney numunelerinin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımlarının değişim grafiği Şekil 4.54'de verilmiştir. Yüksek sıcaklık karşısında geopolimer numuneleri kontrole göre oldukça dayanıklı bulunmuştur. İlaveten 1000 dereceden daha düşük sıcaklıklarda geopolimer numunesi oldukça iyi sonuçlar vermiş olup, yüksek sıcaklığa dayanmıştır.



Şekil 4.54. Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımları (MPa)



1000 °C de numunenin şekil deęiřtirmesi



1000 °C de numunenin şekil deęiřtirmesi



1200 °C'de numunenin şekil bozulması

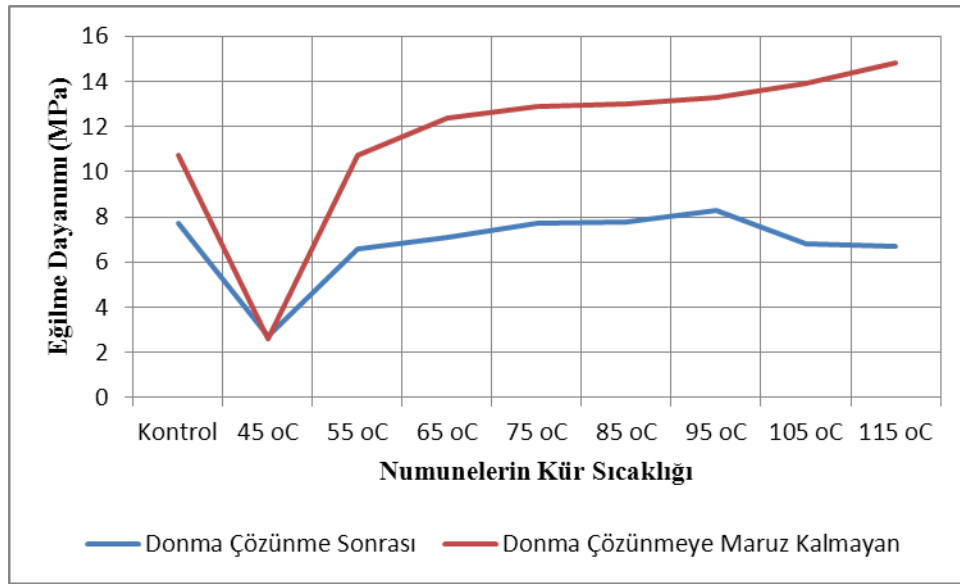
Şekil 4.55. 1000 °C ve 1200 °C lerde yangın dayanımına tabii olan numunelerde görülen şekil bozuklukları

4.2.6. Donma Çözünme Deneyi Sonuçları

Tablo 4.36. Donma Çözünme Deneyi Sonrası Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Sonuçları

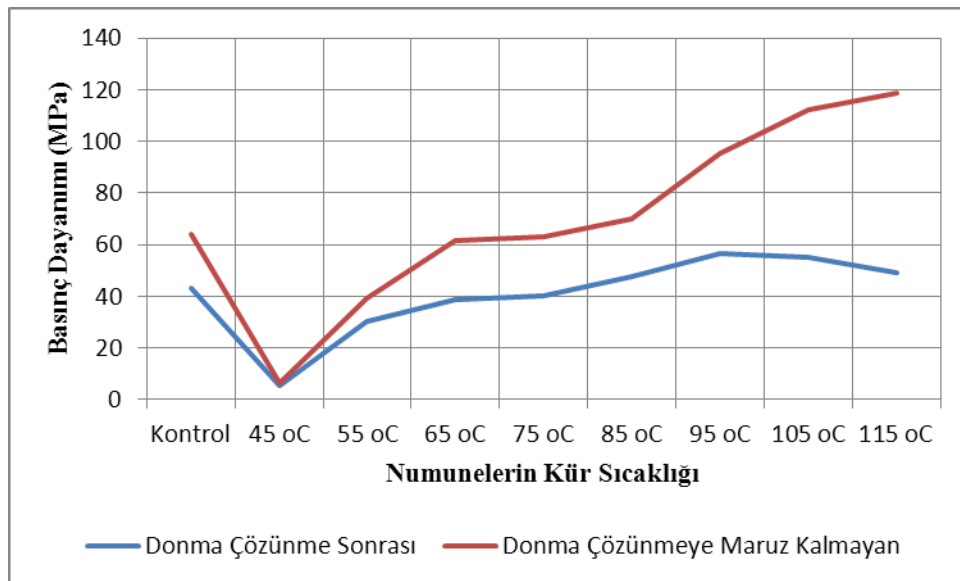
	Donma Çözünme Sonrası		Donma Çözünmeye Maruz Kalmayan	
	Eğilme (MPa)	Basınç (MPa)	Eğilme (MPa)	Basınç (MPa)
Kontrol	7,7	43,1	10,7	64,1
45 °C	2,7	5,6	2,6	6,4
55 °C	6,6	30,1	10,7	39,4
65 °C	7,1	38,5	12,4	61,8
75 °C	7,7	40,3	12,9	63,3
85 °C	7,8	47,5	13,0	70,0
95 °C	8,3	56,4	13,3	95,6
105 °C	6,8	55,3	13,9	112,4
115 °C	6,7	49,2	14,8	118,8

Donma çözünme deneyi sonrasında numunelerin eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde 75, 85 ve 95 °C de kür edilen numunelerin kontrol numunesinden yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu saptanmıştır. En düşük eğilme dayanımı (2,7 MPa) 45 °C de kür edilen numunelerde görülürken en yüksek eğilme dayanımı (8,3 MPa) ise 95 °C de tespit edilmiştir. Ayrıca donma çözünmeye maruz kalmayan numuneleri karşılaştırdığımızda donma çözünmenin eğilme basınç dayanımlarını ciddi oranlarda olumsuz etkilediği görülmektedir. Donma çözünme sonrası elde edilen dayanım değerleri, donma çözünmeye maruz kalmayan numunelere göre yaklaşık %40-50 oranında daha düşük bulunmuştur.



Şekil 4.56. Donma Çözünme Sonrası ve Donma Çözünmeye Maruz Kalmayan Numunelerin Eğilme Dayanım Sonuçları (MPa)

Donma çözünme sonrası basınç dayanımları incelendiğinde eğilme sonuçları ile paralellik gösterdiği gibi en düşük basınç dayanımı 45 °C de kür edilen numunelerde ve en yüksek basınç dayanımı 155 °C de saptanmıştır. Kür sıcaklığı arttıkça basınç dayanımı 95 °C ye kadar artan oranda artarken, 105 °C de azalan oranda artmakta ve 115 °C de azalma eğilimi göstermektedir.



Şekil 4.57. Donma Çözünme Sonrası ve Donma Çözünmeye Maruz Kalmayan Numunelerin Basınç Dayanım Sonuçları (MPa)

4.2.7. Kılcallık, Su Emme ve Boşluk Oranı Sonuçları

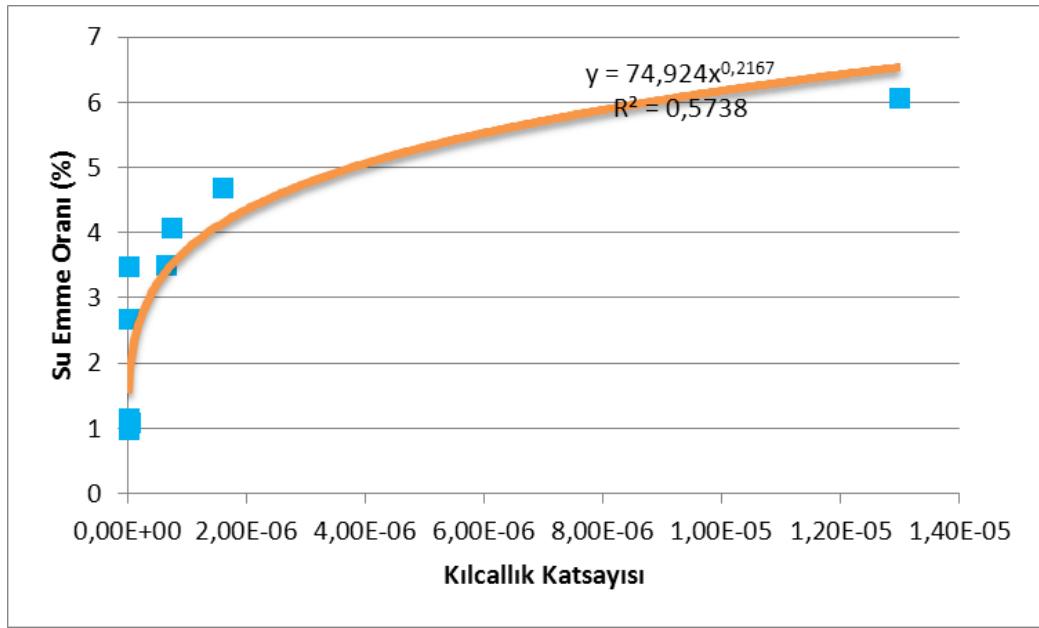
Mikron düzeyinde kılcal boşluklara sahip olan bir cismin herhangi bir yüzeyi suya temas ettiği takdirde, su zamanla cisim içerisinde yükselmeye başlar. Bu durum, önlem alınmadığı takdirde, bir takım istenmeyen olaylara sebep olabilecektir. Beton yapılar da buldukları konum itibariyle muhtelif şekillerde su ve zararlı kimyasal sıvılarla temas halinde olabilirler. Betonun değişik sıvılar ile temas etmesi binaların zemin katlarında bu olay nedeniyle rutubet görülebilmesine neden olmaktadır. Sıvılar, beton elemanlar içerisinde kılcallık (kapilarite) olarak adlandırılan fiziksel bir hareketle yol almaktadır [133].

Tablo 4.37 incelendiğinde en yüksek su emme oranı kontrol numunesinde görülürken en düşük su emme oranı ise 95 °C de kür edilen numunelerde görülmüştür. Kılcallık katsayısında ise en yüksek kılcallık katsayısı 45 °C de kür edilen numunelerde ve en düşük kılcallık katsayısı 95 °C de kür edilen numunelerde görülmüştür.

Tablo 4.37. Farklı Sıcaklıklarda Kür Edilen Numunelerin Kılcallık ve Su Emme Sonuçları

	Su emme (%)	Kılcallık	Boşluk
Kontrol	6,05	1,3E-05	8,97
45	4,69	1,6E-06	1,69
55	4,06	7,3E-07	1,35
65	3,50	6,6E-07	1,18
75	3,47	1,6E-08	1,10
85	1,09	4,8E-08	0,67
95	0,98	2E-08	0,61
105	1,14	2,4E-08	0,98
115	2,67	2,8E-08	0,99

Kılcallık katsayısı ile ağırlıkça su emme oranı arasında bir ilişki kurabilmek amacıyla her bir karışıma ait kılcallık katsayısına karşılık gelen su emme oranları bir grafik üzerinde gösterilmiştir. Kılcallık katsayıları ile ağırlıkça su emme değerlerinin gösterildiği Şekil 4.58'de harçlara ait bu iki özellik arasında su emme oranının artmasıyla kapiler su emme katsayısının arttığını gösteren fakat doğrusal olmayan bir ilişki görülmektedir. Kurulan eğrisel ilişkiye ait korelasyon katsayısı 0,70'dir. Korelasyon analizi sonucu su emme oranı ile kılcallık katsayısı arasında güçlü ve pozitif yönlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.58. Su Emme Oranı ve Kılcallık Katsayısı İlişkisi

5. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Harç numunelerinin içerdiği sodyum hidroksit oranı arttıkça işlenebilirlik düzeyleri artış göstermektedir. 102 mm ile başlayan işlenebilirlik değerleri NaOH miktarının artması ile bir miktar yükselmiştir. Yapılan çalışmalarda genel olarak 225 gr su ile üretilen harç numunelerinde 150 mm civarında olan işlenebilirlik düzeyi, çalışmamızda 137 mm düzeyinde tespit edilmiştir. 150 gr su ile üretilen çalışmamızdaki numuneler su azaltılmasına rağmen iyi bir işlenebilirlik göstermiştir. Nitekim literatür incelendiğinde alkali ile aktive edilen uçucu kül diğer mineral katkılara göre daha yüksek işlenebilirlik göstermektedir [134].

Optimum derişim oranını belirlemek için yapılan basınç ve eğilme dayanımları deneyleri sonucunda, en yüksek eğilme dayanımı %14 derişimle hazırlanan ve 115 °C'de 1 gün kür edilen numunelerde tespit edilmiştir. Ayrıca 45 °C de kür edilen tüm derişim oranlarında hazırlanan numunelerde eğilme dayanımı göstermediği gibi, en düşük eğilme dayanımı 55 °C de kür edilen numunelerde görülmüştür. Derişim oranındaki artışın eğilme dayanımı üzerinde olumlu etki yaratması literatürle uyum göstermektedir [135]. Hazırlanan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde ise en yüksek basınç dayanımı %14 derişimle hazırlanan ve 115 °C de 1 gün süre ile kür edilen numunelerde 120 MPa olarak tespit edilmiştir. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımları kriter olarak ele alındığında en yüksek dayanım gösteren %14'lük derişim seçilmiştir.

%14 NaOH ile aktive edilen uçucu kül harçlarının eğilme dayanımları maksimuma 115 °C de 1 gün kür sonucunda varmıştır. Daha düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerde eğilme dayanımı düşük çıkarken, kür süresi uzamaktadır. Sıcaklığın

belirli bir düzeye kadar artması eğilme dayanımını artırırken, aynı zamanda eğilme dayanımının maksimuma çıkma süresini yani kür süresini azaltmaktadır. %14 ile aktive edilen uçucu kül harçlarının basınç dayanımları maksimuma (118,8 MPa) 115 °C'de 1 gün kür sonucunda ulaşılmıştır. Eğilme dayanımında olduğu gibi basınç dayanımında da sıcaklık kür süresini düşürmekte ve dayanımı artırmaktadır. Bu sonuç, [130, 86, 105] literatürle örtüşmektedir.

Farklı derişim oranlarında ve 1,2,3 gün süre farklı sıcaklıklarda kür edilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasında pozitif yönlü güçlü bir ilişki tespit edilmiş olup, eğilme dayanımı arttıkça basınç dayanımının arttığını göstermektedir.

Optimum derişim oranı olarak belirlenen %14 derişimde hazırlanan numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasında da pozitif yönlü bir ilişki tespit edilirken 0,88 gibi güçlü bir korelasyon katsayısı hesaplanmıştır.

Aşınma kaybı ile basınç ve eğilme dayanımları arasında orta güçlü negatif yönlü bir ilişki saptanmış olup, aşınma oranı arttıkça basınç ve eğilme dayanımlarının arttığını göstermektedir.

NaOH ile aktive edilen uçucu kül ile hazırlanan ve 65 °C ile 105 °C arasında kür edilen numunelerin tek yüzey ve dört yüzey aşınma kayıpları portland çimentosu ile hazırlanan kontrol numunesinden daha iyi tespit edilirken en az hacimsel ve ağırlık olarak aşınma kaybı 95 °C de kür edilen numunelerde tespit edilmiştir.

100-1200 °C arasında 12 farklı sıcaklıkta yangın deneyine tabii tutulan numunelerin eğilme ve basınç dayanımları, portland çimentosu ile hazırlanan ve aynı şekilde yangın dayanımına tabi tutulan kontrol numuneleri ile kıyaslandığında eğilme dayanımı 100 °C'de kontrol numunesinden yüksek bulunurken, basınç dayanımında ise tüm sıcaklıklarda %14 NaOH ile aktive edilen uçucu kül harç numunelerinden daha düşük bulunmuştur. 300 ve 400 °Cde yangın dayanımına tabi olan kontrol numuneleri % 14 NaOH ile aktive edilen uçucu kül harç numunelerinden daha yüksek dayanım göstermiştir. Yanmayan numuneler ile yanan numuneler kıyaslandığında yüksek sıcaklık hem kontrol numunelerinde hemde alkali ile aktive edilen numuneler

üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır. Yüksek sıcaklığın artması basınç ve eğilme dayanımını azaltmakta 900 °C'den sonra dayanım ciddi düşüşler göstermektedir. Ayrıca 1100 ve 1200 °C de yakılan alkali ile aktive edilen numunelerde şekil bozukluğu meydana gelmiştir.

Donma çözünme deneyi sonucunda portland çimentosu 42,5 ile hazırlanan kontrol numunesi 85 °C ve üstündeki sıcaklıklarda kür edilen alkali ile aktive edilen numunelere göre daha düşük dayanım göstermiştir. Maksimum basınç dayanımı 95 °C 56,4 MPa olarak tespit edilmiştir.

Öneriler;

Türkiye'de termik santrallerde üretilen farklı sınıf ve özelliklerdeki uçucu külün bir kısmı çimento üretiminde kullanılırken bir kısmı ise atık olarak atıl bir şekilde durmaktadır. Atıl kalan uçucu külün beton üretimin de kullanılması yaygın olmamasına rağmen yapılan araştırmalar beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanımında betonun dayanım ve durabilitesi üzerinde olumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. Atık bir madde olan uçucu külün üretime dahil edilmesi ile ülke kaynaklarının efektif kullanılması sağlanmış olacaktır. Bu sebeple uçucu külün betonda kullanımının yaygınlaştırılması ve teşvik edilmesi gerekmektedir.

Atıl halde kullanılmayan uçucu külün çevreyi kirlenici özelliği olduğu gibi, çimento üretiminin de karbon salınımını arttırdığı bilinmektedir. Uçucu külün beton üretiminde kullanılması çimento üretiminde oluşan karbon salınımını azaltacağından daha çevreci bir üretimin teşviki için uçucu kül içerikli betonların yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında çalışılmayan, farklı uçucu kül ve NaOH karışım oranlarının çalışılarak, tez kapsamına alınamayan diğer durabilite özelliklerinin incelenmesi fayda sağlayacaktır. Beton örnekler üzerinde de dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması önerilmektedir.

Durabilite ve dayanım olarak en uygun NaOH – Uçucu kül oranının tespit edildiği çalışmamızda, alkali aktivatörlerin maliyet ve verim ilişkilerinin incelenmesi en uygun ekonomik dozaj konusunda bilgi verecektir.

KAYNAKLAR

1. Kapkaç, F.,2012. Çimento Çeşitleri, Özellikleri, Hammaddeleri ve Üretim Aşamaları, Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü, Maden Etüt ve Arama Dairesi Başkanlığı, 223-232, Ankara
2. Koçak, Y., 2011. Termik Santral Atığı Uçucu Külün Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi. **Politeknik Dergisi**, 2:135-140.
3. Roy, D., 1999. Sulfoaluminate-Belite Cement From Low-Calcium Fly Ash and Sulfur-Rich and Other Industrial by-Products, **Cement and Concrete Research**, 29(8):1305-1311
4. Cembureau, 2010. Activity Report, http://www.cembureau.eu/sites/default/files/Activity_Report_2010.pdf (E.T.: Mart 2014)
5. Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Betonda Kullanım Potansiyeli. Gazi Üniversitesi, Ankara, **Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 21 (1).
6. Özodabaş, A., 2014. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçların Performansının Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 21-23
7. Zeybek, O., 2009. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
8. Tokyay, M., 1998. Characterization of Turkish Fly Ashes. Turkish Cement Manufacturers Associations, Ankara.
9. Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara.
10. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ), 2014. <http://www.teias.gov.tr/apkuretim/Tablo1.xls> (E.T.: Mart 2014)

11. <http://www.maden.org.tr/yeni3/yayinlar/raporlar/linyitraporu.htm> (E.T.: Mayıs 2014)
12. Tokyay, M., 1993. Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi). *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu*. Ankara, 29-36, 18-19.
13. <http://www.tfsrc.gov/pubrds/fall94/p94au32.htm> (E.T.: Nisan 2014).
14. Verma, C.L., Handa, S.K., Jain, S.K., 1998. Techno-commercial Perspective Study for Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates in India. **Construction and Building Materials**, 12 (6-7):341-346.
15. Morrison. R.E., 1970. A Review of Ash Specifications. *Symposium on Fly Ash Utilization*, pp. 24-31. Pittsburgh.
16. Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., 2005. Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005, İzmir, Türkiye.
17. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), 1979. Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma Olanakları. Ankara.
18. Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE), 1982. Türkiye uçucu küllerinin özellikleri. EİE Yayını. 82. 21-28.
19. Türker, P., Erdoğan, B., 2004. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. AR-GE TCMA, Ankara.
20. Yaylacı, E., 2010. Uçucu Kül, (Fly Ash), <http://eyupyaylaci.com/ucucu-kul/> (E.T.: Mayıs 2014).
21. Yılmaz Ş., 1992. Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü.

22. Koral, S., Özkul, H., 1997. Endüstriyel Atıklardan Desülfojips ve Uçucu Külün Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*. 3, Bildiri Kitabı, ss. 197-208, Eskişehir
23. ASTM. International Standard, ASTM C 618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
24. TS EN 197-1. Genel Çimento Sınıflarının Bileşimini, Özellikleri ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara, 2012
25. Türker P., Erdoğan B., Katnaş F., Yeğınobalı A., 2009. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB Yayınları, 4. Baskı, Ankara.
26. Erdoğan, T.Y., 1993. Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı-Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanım Sempozyumu*.
27. Caijun Shi, P.V.K., Della Roy, Alkali-Activated Cements and Concretes, 2006, p.245-256
28. Seals, R.K., 1977. Properties of Bottom Ash/Boiler Slag and Fly Ash. Short Course. Technology and Utilization of Power Plant Ash, p.59.
29. Ovens. P.L., 1979. Fly Ash and its Usage in Concrete. Concrete GBt, 13. no. 7. 21-26.
30. Ecoba. 2001. Information Bulletin. **www.ecoba.com Italy. (E.T.: Mart 2014).**
31. Kefelioğlu, S., 1998. Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanılma İmkanları. **Teknoloji Dergisi**.
32. Neville, A.M., 1981. Properties of Concrete. Longman Scientific & Technical, New York.
33. Abdunnur, E.A., 1961. Fly Ash in Concrete-an Evaluation. Highway Research Board Bulletin, No. 284, Washington D.C.

34. Berry, E.E., Malhotra, V.M., 1980. Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review. **ACI Journal, Proceedings**, **77** (2):59-73.
35. ACI Committee 226, 1987. Use of Fly Ash in Concrete. **ACI Materials Journal**, **83**(5):381-409.
36. Manz, O.E., 1999. Coal Fly Ash: a Retrospective and Future Look. **Fuel**, **78** (2):133-136.
37. Sümer, M., 1994. Uçucu Kül Atıklarının Beton Üretiminde Değerlendirilmesi, *I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu*, Salihli, Bildiriler Kitabı, ss. 179-185.
38. Li, B., Liang, W., He, Z., 2002., Study on High-Strength Composite Portland Cement with a Larger Amount of Industrial Wastes. **Cement and Concrete Research**, **32**:1341-1344.
39. Naik, T.R., Singh, S.S., Ramme B.W., 2002. Effect of Source of Fly Ash on Abrasion Resistance of Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, **25**:417-426.
40. Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y. and WU, X., 2002. Studies on Blended Cement with Large Amount of Fly Ash. **Cement and Concrete Research**, **32**:1153-1159.
41. Temiz, H., Yeğınobalı, A., 1995. Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Çimento Hamur ve Harçlarının Bazı Özellikleri, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Bildiriler Kitabı, 213-226, İMO, Ankara.
42. Tokyay, M., Arıöz, Ö., 1997. Uçucu Kül-Desülfürizasyon Alçısı Esaslı Tuğlalar Hakkında Deneysel Bir Çalışma. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, 3, Bildiri Kitabı, ss. 171-186, Eskişehir.
43. Hanehara, S., Tomosawa, F., Kobayakawa, M., Hwang, K., 2001. Effects of Water/Powder Ratio, Mixing Ratio of Fly Ash in Cement Paste. **Cement and Concrete Research**, **31**:31-39.

44. Turanlı, L., Erdoğan, T. ve Karaer, K., 1997. Çayırhan Uçucu Külünün Portland Çimentosu-Uçucu Külü Hamur ve Harçlarının Özelliklerine Etkileri. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*. 3, Bildiri Kitabı, ss. 283-293, Eskişehir.
45. Yıldırım, M.Ş., Yıldırım, V., 1994. Afşin-Elbistan Uçucu Külü İle Üretilen Beton ve Harçların Mekanik ve Isı Yalıtımı Özellikleri Üzerine Bir Araştırma. *I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu*, Salihli, Bildiriler Kitabı, ss. 186-195.
46. Atanur, A., Yağız, F., 1970. Türkiye’de Elde Edilen Uçucu Küllerin Menşeleri, Özellikleri ve Bu Uçucu Küllerin Agregat-Çimento Karışımlarında Portland Çimentosunun Bir Kısmını İkame Edebilmek İmkanlarının Araştırılması. *Teknik Bülten*, Sayı 30, Karayolları Gen. Müd. Araştırma Fen Heyeti Müd. Yay. Ankara.
47. Topçu, İ., Canbaz, M., 2001. Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri, Osmangazi Üniversitesi, **Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 2 (14):115–116 Eskişehir.
48. Atış, C.D., 2002. Heat Evolution of High-Volume Fly Ash Concrete. **Cement and Concrete Research**, 32: 751-756.
49. Ghosh, A., Subbarao, C., 2001. Microstructural Development in Fly Ash Modified with Lime and Gypsum. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 20:65-70.
50. Gül, R., Yıldız, İ., 1996. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanılması. **DSİ Teknik Bülteni**, 87:57-64, Ankara.
51. Tokyay, M., 1989. Uçucu Küllerin Mineralojik Kompozisyonlarının Hidratasyona ve Puzolanik Reaksiyonlara Etkileri. *Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongresi*, ss. 389-401.
52. Kılınçkale, F., 1995. Uçucu Küllü Çimento Üretiminde Uçucu Kül Öğütme Şeklinin Çimento Özelliklerine Etkisi. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Bildiri Kitabı, ss. 33-44, Ankara.

53. Yazıcı, Ş., Baradan, B., 1995. Uçucu Kül Katkılı Yüksek Dayanımlı Beton. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, ss. 59-72, Ankara.
54. Ghosh, S., Nasser, K.W., 1996. Effects of High Temperature and Pressure on Strength and Elasticity of Lignite Fly Ash and Silica Fume Concrete. **ACI Materials Journal**, **93**:51-60.
55. Haque, M.N., Langan, B.W., Ward, M.A., 1984. High Fly Ash Concretes. **ACI Journal**, **81**(8): 54-60.
56. Elkhadiri, I., Dıouri, A., Boukharı A., Arıde, J. and Puertas, F., 2002. Mechanical Behaviour of Various Mortars Made by Combined Fly Ash and Limestone in Moroccan Portland Cement. **Cement and Concrete Research**, **32**:1597-1603.
57. Yoon, Y.S., Won, J.P., Woo, S.K., Song, Y.C., 2002., Enhanced Durability Performance of Fly Ash Concrete for Concrete-Faced Rockfill Dam Application. **Cement and Concrete Research**, **32**:23-30.
58. Mehta, P.K., 2002. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. **Concrete International**, **22**:23-28.
59. Mehta, P.K., 2001. Reducing the Environmental Impact of Concrete. **Concrete International**, **23**:61-66.
60. Mehta, P.K., 2001. Building Durable Structures in the 21st Century. **Concrete International**, **23**:57-63.
61. Mehta, P.K., 1997. Durability-Critical Issues for the Future. **Concrete International**, **24**:27-33.
62. Atış C.D., 2005. Strength Properties Of High-Volume Fly Ash Roller Compacted And Workable Concrete, And Influence Of Curing Condition. **Cement and Concrete Research**, **35**:1112-1121.

63. Huang C., Lin, S.K., Chang, C.S., Chen, H.J., 2013. Mix Proportions and Mechanical Properties of Concrete Containing Very High-Volume of Class F Fly ash, **Construction and Building Materials**, **46**:71–78.
64. Baradan, S.A., Yazıcı, H., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Yayınları. İzmir.
65. Bernal, S.A., Gutierrez, R.M., Pedraza, A.L., Provis, J.L., Rodriguez, E.D., Delvasto, S., 2011. Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. **Cement and Concrete Research**, **41**(1):1-8.
65. Gong, C., Yang, N., 2000. Effect of Phosphate on the Hydration of Alkali-activated red mud-slag cementitious material, **Cement and Concrete Research**, **30** (7):1013-1016
66. Brough, A.R., Holloway, M., Sykes, J., Atkinson, A., 2000. Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars: Part II. The retarding effect of additions of sodium chloride or malic acid, **Cement and Concrete Research**, **30** (9):1375–1379.
67. Aydın, S., 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Curufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
68. Hamalı, Y., 2007. Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri, İnşaat Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
69. Tevrizci, M.M., 2010. Metakaolin Katkılı Harçların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. İnşaat Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir.
70. Mermerdaş, K., 2006. Metakaolinin Havada ve Suda Kür Edilmiş Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri Üzerine Etkisi. İnşaat Mühendisliği. Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
71. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalalı, S., 2008. Alkali Activated Binders: A Review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture. **Construction and Building Materials**, **22** (7): 1315–1322.

72. Davidovits, J., 2008. Geopolymer Chemistry and Applications. Saint Quentin, France.
73. Brady J.E., Holum J.R., 1996. Chemistry. The Study Of Matter And Its Changes, 2nd ed
74. Davidovits, J., 2008. They Built the Pyramids. Published by Institute Geopolymer, *Saint Quentin*, France.
75. Davidovits, J., 1999. Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology. *Geopolymer International Conference*, France.
76. Louise M.K., Van Deventer, S.J., 2006. The Effect Of Coal Ash Composition On Properties Of Waste Based Geopolymers. Advances in Geopolymer Science and Technology Springer Science LLC.
77. Komnitsas K., Zaharakı D., 2007. Geopolymerisation: a Review and Prospects for Mineral Industry. **Elsevier Science Direct Minerals Engineering**, **20**:1261-1277.
78. Pinto, A., Viera, E., 2005. Repairing of Damaged Stone in Monuments and Stone Buildings. Proceedings Of World Congress Geopolymer, France.
79. Latella, B.A., Perera, D.S., 2006. Adhesion of Glass to Steel Using Geopolymer. **Journal Matter**, **41**:1261-1264.
80. Rangan, B.V., Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, M.J., 2005. Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Proceedings of World Congress Geopolymer, France.
81. Brew, D.R.M., Mackenzie, K.J.D., 2007. Geopolymer Synthesis Using Silica Fume and Sodium Aluminate. Journal Mater Science Business, Springer DOI 10.1007/s10853-006-0376.

82. Van Deventer J.S.J., Van Jaarsveld J.G.S., Lukey G.C., 1989. The Effect of Composition and Temperature on The Properties of Fly Ash and Kaolinit Based Geopolymers. **Chemical Engineering Journal**, **1** (3):63-73.
83. Chi, M., Huang, R., 2013. Binding Mechanism and Properties of Alkaliactivated Fly Ash/Slag Mortars. **Construction and Building Materials**, **40**:291-298.
84. Toprak, M.U., 2011. Termik Santral Taban Küllerinin Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi, İnşaat Mühendisliği. Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya
85. Altan, E., Erdoğan, S.T. 2012. Alkali Activation of a Slag at Ambient and Elevated Temperatures. **Cement and Concrete Composites**, **34**(2): 131-139.
86. Bakharev, T., 2005. Geopolymeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. **Cement and Concrete Research**, **35**:1224–1232.
87. Puertas, F., Martinez-Ramirez, S., Alonso, S., Vazquez, T., 2000. Alkali-Activated Fly Ash/Slag Cements: Strength Behaviour and Hydration Products. **Cement and Concrete Research**, **30**(10):1625-1632.
88. Oh, J.E., Monteiro, J.M.P., Jum, S.S., Choi, S., Clark, S.M., 2010. The Evolution of Strength and Crystalline Phases for Alkali-Activated Ground Blast Furnace Slag and Fly Ash-Based Geopolymers. **Cement and Concrete Research**, **40**(2):189-196.
89. Temuujin, J.A. Riessen, V., R. Williams, 2009. Influence of Calcium Compounds on the Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes. **Journal of Hazardous Materials**, **167**:82–88.
90. Songpiriyakij, S., Kubprasit, T., Jaturapitakkul, C., Chindapasirt, P., 2010. Compressive Strength and Degree of Reaction of Biomass- and Fly Ash-Based Geopolymer. **Construction and Building Materials**, 236-240.

91. Xu, H., Li, Q., Shen, L., Wang, W., Zhai, J., 2010. Synthesis of Thermostable Geopolymer from Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Bottom Ashes. **Journal of Hazardous Materials**, **16**:198-204.
92. Guo, X., Shi, H., Chen, L., Warren, A.D., 2010. Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Class C Fly Ash Geopolymer. **Cement & Concrete Composites**, **16**:142-147.
93. Xu, H., Jannie S.J., Deventer, V., 2002. Geopolymerisation of Multiple Minerals. **Minerals Engineering**, **15**:1131–1139.
94. Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer, **Cement & Concrete Composites**, **29**:224–229.
95. Temuujin, J.A., Riessen, V., Mackenzie, K.J.D., 2010. Preparation and Characterisation Of Fly Ash Based Geopolymer Mortars. **Construction and Building Materials** **24**:1906–1910.
96. Diaz, E.I., Allouche, E.N., Eklund, S., 2010. Factors Affecting the Suitability of Fly Ash as Source Material for Geopolymers, **Fuel**, **89**:992–996.
97. Villa, C., Pecina, E.T., Torres, R., Gómez, L., 2010. Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation of Natural Zeolite. **Construction and Building Materials**, **24**:2084–2090.
98. Bakharev, T., 2005. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. **Cement and Concrete Research**, **35**(6): 1233-1246.
99. Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C., 2002. The Effect of Composition and Temperature on The Properties of Fly Ash- and Kaolinite-Based Geopolymers. **Chemical Engineering Journal**, **89**:63-73.

100. Temuujin, J., Riessen, A.V., 2009. Effect of Fly Ash Preliminary Calcination on the Properties of Geopolymer. **Journal of Hazardous Materials** **164**:634-639.
101. Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., 2010. Effect of Elevated Temperatures on Geopolymer Paste, Mortar and Concrete. **Cement and Concrete Research**, **40**:334–339.
102. Li, Y., Sun, Y., 2000. Preliminary Study on Combined-Alkali–Slag Paste Materials. **Cement and Concrete Research**, **30**(6): 963-966.
103. Brough, A.R., Atkinson, A., 2000. Automated Identification of the Aggregate–Paste Interfacial Transition Zone in Mortars of Silica Sand with Portland or Alkali-Activated Slag Cement Paste. **Cement and Concrete Research**, **30**(6): 849-854.
104. Xie, Z., Xi, Y., 2001. Hardening Mechanisms of an Alkaline-Activated Class F Fly Ash. **Cement and Concrete Research**, **31**(9): p. 1245-1249.
105. Bakharev, T., 2005. Resistance of geopolymer materials to acid attack. **Cement and Concrete Research**, **35**(4): 658-670.
106. Aydin, S. and B. Baradan, 2012. Mechanical and Microstructural Properties of Heat Cured Alkali-Activated Slag Mortars. **Materials & Design**, **35**:374-383.
107. Huang, Y., Han, M., 2011. The Influence of α -Al₂O₃ Addition on Microstructure, Mechanical and Formaldehyde Adsorption Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Products. **Journal of Hazardous Materials**, **193**:90-94.
108. Haha, B.M., Lothenbach, B., Le Saout, G., Winnefeld, F., 2011. Influence of Activator Type on Hydration Kinetics, Hydrate Assemblage And Microstructural Development of Alkali Activated Blast-Furnace Slags. **Cement and Concrete Research**, **41**(3): 301-310.

109. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, A., 2005. Composition and Microstructure of Alkali Activated Fly Ash Binder: Effect of the Activator. **Cement and Concrete Research**, **35**(10):1984-1992.
110. Reig, L., Tashima, M.M., Borrachero, M.V., Monzó, J., Cheeseman, C.R., Payá J., 2013. Properties and Microstructure of Alkali-Activated Red Clay Brick Waste. **Construction and Building Materials**, **43**(0):98-106.
111. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., Rattanasak, U., 2009. Comparative Study On The Characteristics Of Fly Ash And Bottom Ash Geopolymers, **Waste Management**, **29**:539–543.
112. Chindaprasit, P., Rattanasak, U., 2010. Utilization of Blended Fluidized Bed Combustion (FBC) Ash ve Pulverized Coal Combustion (PCC) Fly Ash in Geopolymer. **Waste Management**, **30**:667-672.
113. Topçu, İ.B., Toprak, M.U., 2011. Properties of Geopolymer from Circulating Fluidized Bed Combustion Coal Bottom Ash. **Materials Science and Engineering**, **528**:1472-1477.
114. Rattanasak, U., Chindaprasirt, P., 2009. Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer, **Minerals Engineering**, **22**:1073–1078.
115. Görhan, G., Kürklü, G., 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, **Composites Part B: Engineering**, **58**:371–377.
116. Somna, K., Chai, J., Puangrat, K., Chindaprasirt, P., 2011, NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature, **Fuel**, **90**(6): 2118–2124
117. Palomo, A, Grutzeck, M.W, Blanco, M.T., 1999, Alkali-activated fly ashes A cement for the future, **Cement and Concrete Research**, **29**:1323–1329

118. Vargas, A.S.D., Denise C.C., Molin, D., Vilela, A.C.F., Felipe, J.D.S., Bruno, P., VEIT, H., 2011, The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers, **Cement & Concrete Composites**, **33**:653–660.
119. Swanepoel, J.C., Strydom C.A., 2002, Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, **Applied Geochemistry**, **17**:1143–1148.
120. Dimitrios, P., Ioanna P. G., Perraki, T., 2007. Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects**. **301**:246–254
121. Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., Chindaprasit, P., 2014. Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste. **Cement and Concrete Composites**, **45**:9-14.
122. Khalifeh, M., Saasen, A., Vralstad, T., Hodne, H., 2014. Potential utilization of class c fly ash-based geopolymer in oil well cementing operations. **Cement and Concrete Composites**, **53**:10-17.
123. Khan, M.I., Azızzlı, K, Sufian, S., Man, Z., 2015. Sodium silicate-free geopolymers as coating materials: Effects of Na/AL and water/solid ratios on adhesion strength, **Ceramics International**, **65**:2794-2805
124. TSE EN 196-1. Çimento deney metotları-Dayanım tayini, TSE, Ankara, 2002
125. TS EN 1015-3. Kagir Harcı Deney Metodları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). TSE, Ankara, 2000
126. TS EN 196-3. Çimento Deney Metodları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini. TSE, Ankara, 2000
127. TS EN 1015-11. Kagir Harcı Deney Metodları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara, 2000

128. DIN 52108. Testing of Inorganik non-metallic materials- Wear test using the grinding Wheel according to Boehme- Grinding Wheel method, Germany. 2002.
129. TS 3624 Sertleşmiş betonda özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı tayin metodu, TSE, Ankara, 1981.
130. Binici, H., Kapur, S., Arocena, J., Kaplan, H., 2012. The sulphate resistance of cements containing red brick dust and ground basaltic pumice with sub-microscopic evidence of intra-pore gypsum and ettringite as strengtheners, **Cement and Concrete Composites**, **34(2):279-328**.
131. Erdoğan, T.Y., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.S. Yayını
132. Shah, S. P., Ahmad, S. H., 1994. High Performance Concretes and Applications.
133. Bilim, C., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
134. Collins, F., Sanjayan, J.G., 1999. Effects of Ultra-Fine Materials on Workability and Strength of Concrete Containing Alkali-Activated Slag as The Binder. **Cement and Concrete Research**, **29(3):459-462**.
135. Palacios, M., Puertas, F., 2005. Effect of Superplasticizer and shrinkage-Reducing Admixtures on Alkali-Activated Slag Pastes and Mortars, **Cement and Concrete Research**, **35:1358-1367**.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Ela Bahşude GÖRÜR

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 1981- Kahramanmaraş

Medeni Durumu: Bekâr

email: elagorur@hotmail.com

Yazışma Adresi: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü Dulkadiroğlu/KAHRAMANMARAŞ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	KSÜ Fen Bilimleri Enstitüsü	2007
Lisans	Çukurova Üniversitesi	2004

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2007- Halen	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi KMYO İnşaat B1	Öğretim Görevlisi
2005–2007	Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Yurt Dışı

Binici H, Aksogan O Kaplan H, **Gorur E.B**, Bodur M.N, Hydro-abrasive erosion of concrete incorporating ground blast-furnace slag and ground basaltic pumice, Construction and Building Materials, 23 (2009) 804–811.

Binici H, Aksogan O, Kaplan H, **Gorur E.B**, Bodur M.N, Performance of ground blast furnace slag (GBS) and ground basaltic pumice (GBP) concrete against seawater attack Construction and Building Materials 22 (2008) 1515–1526.

Araştırma Makalesi

- Binici, H., **Görür, E.B.**, Sevinç, A.H., Eken, M., Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Hidro Aşınma Özelliklerinin Araştırılması, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1), 27-37, Haziran 2014
- Binici, H., **Görür, E.B.**, Durgun, M.Y., Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Mekanik Aşınması ve Su Geçirimsizliği, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 6, No: 1, 2010 (1-10)
- Binici H, **Görür E.B.**, Durgun, M.Y., Afşin-Elbistan Uçucu Külü Ve Tekstil Fabrikalarının Atık Küllerinin Betonda Katkı Olarak Kullanımı, KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, 9: (2009) 10–19, Kahramanmaraş
- Binici H, Kaplan, H, Temiz, H., **Görür E.B.**, Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Dergisi, 3:4(2008) 309-317, Denizli
- Binici H, Temiz H, **Görür E.B.**, Perlit, Pomza ve Tüf İle Üretilen Hafif Betonların Mühendislik Özellikleri, Hazır Beton, 8(2006) 66–71, İstanbul
- Aksoğan O, Binici H, **Görür E.B.**, Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Durabilite Açısından Avantajları, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Dergisi, 2(2005) 59–66, Adana

Bildiri

- Atış, C.D., İlkentapar, S., **Görür, E.B.**, Karahan, O., Alkali ile Aktifleştirilen Uçucu Kül Geopolimer Harcın Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl Kür Süresinin Etkisi, 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan 2015, Antalya
- Binici H, Kaplan H, Temiz H, **Görür E.B.**, Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Durabilite Özellikleri, Beton 2008 Hazır Beton Kongresi 19–21 Haziran 2008, İstanbul Kongre ve Fuar Merkezi - s:252–263, İstanbul.

Binici H, Kaplan H, Temiz H, Zengin H, **Görür E.B**, Epoksi ve Epoksinin Yapı Güçlendirilmesinde Kullanımı, Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu (YOGS 2006), s:147–153, 7–8 Aralık 2006, Denizli.

Binici H, **Görür E.B**, Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Deniz Yapılarında Kullanılmasının Beton Durabilitesi Açısından Avantajları, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi 2005,15–17 Eylül, s:121–125, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Binici H,Kaplan H, **Görür E.B**, Türkiye’de yaşanan son depremlerde malzeme kalitesi ve kötü işçiliğin neden olduğu hasarlar, Deprem Sempozyumu Kocaeli 2005, 703–707.