T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

F SINIFI UÇUCU KÜLLÜ GEOPOLİMER HARCININ DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hazırlayan
İsmail İsa ATABEY

Danışman
Doç. Dr. Okan KARAHAN

Doktora Tezi

Mayıs 2017
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

F SINIFI UÇUCU KÜLLÜ GEOPOLİMER HARCININ DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Hazırlayan
İsmail İsa ATABEY

Danışman
Doç. Dr. Okan KARAHAN

Bu çalışma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 115M171 kodlu proje ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FDK-2014-5613 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Mayıs 2017
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.



İsmail İsa ATABEY

YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI

"F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması" adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

İsmail İsa ATABEY

Danışman

Doç. Dr. Okan KARAHAN

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Fatih ALTUN

Doç. Dr. Okan KARAHAN danışmanlığında **İsmail İsa ATABEY** tarafından hazırlanan "**F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması** " adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

12 /05 /2017

JÜRİ:

Başkan: Doç. Dr. Okan KARAHAN

Üye :Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Üye :Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER

Üye :Doç. Dr. Cahit BİLİM

Üye :Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 23/05/2017 tarih ve 2017/23-04 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

23 /05 / 2017

Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mehmet AKKURT

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca her aşamada bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve doktora eğitimime başlayıp bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi hocam Sayın Doç. Dr. Okan KARAHAN'a gönülden teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı hocam Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ'e ve Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarındaki çalışmalarımda yardımcı olan Arş. Gör. Serhan İLKENTAPAR ve Arş. Gör. Uğur DURAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca uçucu kül temininde yardımcı olan EKTON İnşaat sahibi Melih KAHRAMAN'a, tüm gayretleriyle deney çalışmalarıma katkıda bulunan Kimyager Furkan SANCAK'a, Ögr. Gör. Serdar ERCİNS'e, öğrencilerim Enes YILDIRIM, Sinan ERBAŞ, Yasin POLAT, Berkan YILMAZ ve M. Fatih İRFANOĞLU'na teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK Proje No: 115M171) ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP Proje No: FDK-2014-5613) teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen eşim Cansu ATABEY'e, kızım Elif Beril ATABEY'e, oğlum Orhan Ali ATABEY'e ve aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İsmail İsa ATABEY

Kayseri, Mayıs 2017

F SINIFI UÇUCU KÜLLÜ GEOPOLİMER HARCININ DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmail İsa ATABEY

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Mayıs 2017
Danışman: Doç. Dr. Okan KARAHAN

ÖZET

Alkali aktivasyonu, alüminosilikat malzemeler ile çimentoya alternatif bağlayıcı üretme yöntemidir. Bu amaçla üretilen geopolimerler, uçucu küllerin alkalilerle aktivasyonu sonucu elde edilmektedir. Bu çalışmada, alkalilerle aktifleştirilmiş iki farklı F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimer harçların üretim ve kür parametrelerinin optimizasyonunu sağlamak amacıyla dayanım ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Sugözü ve Çatalağzı Termik santrali uçucu külleri, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile aktive edilmiştir. Sodyum (Na) oranı %6, %9, %12, %15, ısıl kür sıcaklıkları 60ºC, 80ºC, 100ºC ve ısıl kür süreleri ise 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 saat olacak şekilde deney parametreleri belirlenmiştir.

Geopolimer harç numuneleri üzerinde birim ağırlık ve özgül ağırlık, işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrasonik hız, su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, basınç altında su işleme derinliği, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, hızlı klorür geçirimliliği, karbonatlaşma, rötre, aşınma direnci, yangına dayanıklılık ve hızlandırılmış korozyon deneyleri yürütülmüştür. Çalışma sonucunda üretilen geopolimerlerin dayanım ve durabilite özellikleri açısından en iyi sonuçlar, uçucu küllerin NaOH ile %15 Na oranında 100ºC sıcaklıkta ve 24 saat ısıl kür süresinde aktifleştirilmesi ile elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, alkali aktivasyon, uçucu kül, dayanım, durabilite

INVESTIGATION OF DURABILITY PROPERTIES OF F CLASS FLY ASH GEOPOLYMER MORTAR

İsmail İsa ATABEY

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
PhD. Thesis, May 2017
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Okan KARAHAN

ABSTRACT

Alkali activation is a method of producing an alternative binder to cement with aluminosilicate materials. Geopolymers produced for this purpose are obtained as a result of the activation of fly ash with alkalis. In this study, strength and durability properties were investigated in order to optimize the production and curing parameters of geopolymer mortars produced with two different F fly ash activated by alkalis. Sugözü and Çatalağzı thermal power plant fly ash were activated with sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3). Experimental parameters were selected to be 6%, 9%, 12%, 15% sodium (Na) ratio to fly ash amount and curing times were 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 hours and curing temperatures were 60ºC, 80ºC, 100ºC.

Unit weight and specific gravity, flow workability, flexural strength, compressive strength, ultrasonic velocity, water absorption and void ratio, capillary water absorption, depth of water treatment under pressure, wetting-drying, freezing-thawing, rapid choloride ion penetration, carbonation, shrinkage, abrasion resistance, fire resistance and accelerated corrosion tests were carried out on the geopolymer mortar samples. The optimum results in terms of strength and durability properties of geopolymers produced in the study were obtained by activating the fly ash NaOH at temperature of 100ºC for 24 hours thermal curing time of 15% Na.

Keywords: Geopolymer, alkali activation, fly ash, strength, durability

İÇİNDEKİLER

F SINIFI UÇUCU KÜLLÜ GEOPOLİMER HARCININ DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

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

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Uçucu Küller 8
1.1.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması 12
1.1.2. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri 13
1.1.3. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri 16
1.1.4. Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri 17
1.1.5. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları 18
1.2. Geopolimerler 20
1.2.1. Geopolimerlerin Kimyası 21
1.2.2. Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci 25
1.2.3. Geopolimerlerin Kullanım Alanları 28
1.3. Literatür Çalışması 28

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Malzemeler **42**

2.1.1. Uçucu Küller **42**

2.1.2. Çimento **45**

2.1.3. Standart Kumu **46**

2.1.4. Aktivatörler **46**

2.1.5. Su **48**

2.2. Ön Deneme Çalışmaları **48**

2.3. Deneylerin Tasarımı **50**

2.3.1. Dayanım Deneylerinin Tasarımı **50**

2.3.2. Durabilite Deneylerinin Tasarımı **52**

2.4. Karışım Oranları **53**

2.5. Harç Üretimi ve Kürü **54**

2.6. Deney Yöntemleri **56**

2.6.1. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi **57**

2.6.2. İşlenebilirlik Deneyi **58**

2.6.3. Eğilme Dayanımı Deneyi **59**

2.6.4. Basınç Dayanımı Deneyi **60**

2.6.5. Ultrasonik Hız Tayini **61**

2.6.6. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini **62**

2.6.7. Kılcal Su Emme Katsayısı Tayini **63**

2.6.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini **64**

2.6.9. Islanma-Kuruma Tayini **65**

2.6.10. Donma-Çözülme Direnci Tayini **66**

2.6.11. Hızlı Klorür Geçirimliliği Tayini **67**

2.6.12. Karbonatlaşma Tayini **68**

2.6.13. Rötre Tayini **69**

2.6.14. Aşınma Direnci Tayini **70**

2.6.15. Yangına Dayanıklılık Tayini **72**

2.6.16. Hızlandırılmış Korozyon Tayini 72

3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları 75

3.2. İşlenebilirlik Deney Sonuçları 86

3.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları 88

3.3.1. Kontrol Numunelerinin Eğilme Dayanımı Sonuçları 88

3.3.2. Sugözü Küllü Geopolimerlerin Eğilme Dayanımı Sonuçları 90

3.3.3. Çatalağzı Küllü Geopolimerin Eğilme Dayanımı Sonuçları 92

3.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları 94

3.4.1. Kontrol Numunelerinin Basınç Dayanımı Sonuçları 95

3.4.2. Sugözü Küllü Geopolimerin Basınç Dayanımı Sonuçları 96

3.4.3. Çatalağzı Küllü Geopolimerin Basınç Dayanımı Sonuçları 99

3.5. Ultrasonik Hız Tayini Deney Sonuçları 101

3.6. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini Deney Sonuçları 103

3.7. Kılcal Su Emme Deney Sonuçları 107

3.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları 115

3.9. Islanma-Kuruma Deney Sonuçları 119

3.10. Donma-Çözülme Deney Sonuçları 126

3.11. Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Sonuçları 131

3.12. Karbonatlaşma Deney Sonuçları 133

3.13. Rötre Deney Sonuçları 137

3.14. Aşınma Direnci Tayini Deney Sonuçları 145

3.15. Yangına Dayanıklılık Deney Sonuçları 148

3.16. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları 156

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar 159

4.1.1. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık ile İlgili Sonuçlar 159
4.1.2. İşlenebilirlik ile İlgili Sonuçlar 160
4.1.3. Eğilme Dayanımı ile İlgili Sonuçlar 160
4.1.4. Basınç Dayanımı ile İlgili Sonuçlar 161
4.1.5. Ultrasonik Hız ile İlgili Sonuçlar 162
4.1.6. Su Emme ve Boşluk Oranı ile İlgili Sonuçlar 162
4.1.7. Kılcal Su Emme ile İlgili Sonuçlar 163
4.1.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği ile İlgili Sonuçlar 164
4.1.9. Islanma-Kuruma ile İlgili Sonuçlar 164
4.1.10. Donma-Çözülme ile İlgili Sonuçlar 165
4.1.11. Hızlı Klorür Geçirimliliği ile İlgili Sonuçlar 166
4.1.12. Karbonatlaşma Deneyi ile İlgili Sonuçlar 166
4.1.13. Rötre Deneyi ile İlgili Sonuçlar 166
4.1.14. Aşınma Deneyi ile İlgili Sonuçlar 167
4.1.15. Yangına Dayanıklılık ile İlgili Sonuçlar 168
4.1.16. Hızlandırılmış Korozyon ile İlgili Sonuçlar 168
4.2. Öneriler 169
KAYNAKLAR 170
ÖZGEÇMİŞ 178

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	**Anlamı**
ASTM	Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
CH	Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	Kalsiyum-Silika-Hidrat
ÇA	Çatalağzı Külü
SG	Sugözü Külü
EN	Avrupa Normu
g/cm³	Gram/santimetreküp
MPa	Mega Paskal
N/mm^2	Newton/milimetrekare
Na	Sodyum
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
NH	Sodyum Hidroksit
NS	Sodyum Silikat
PÇ	Portland Çimentosu
TS	Türk Standartları
XRD	X Işını Kırınım Yöntemi
XRF	X Işını Floresans Spektometresi

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Dünyada başlıca çimento üreticileri ve üretim miktarları, milyon ton 6
Tablo 1.2. Türkiye'deki başlıca termik santraller, kömür ve kül tipleri.....10
Tablo 1.3. ASTM C618 'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması.....13
Tablo 1.4. TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması 13
Tablo 1.5. ASTM C618'e göre uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....15
Tablo 1.6. ASTM C618'e göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri 17
Tablo 1.7. Uçucu küllerin mineralojik yapısı 18
Tablo 1.8. Alkali aktivasyonunun tarihsel gelişimi.....27
Tablo 2.1. Sugözü ve Çatalağzı uçucu külü kimyasal ve fiziksel özellikleri 43
Tablo 2.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....45
Tablo 2.3. Çimentonun kimyasal özellikleri 45
Tablo 2.4. CEN standart kumu elek analizi ve sınır değerleri.....46
Tablo 2.5. Sodyum hidroksit (NaOH) analiz değerleri 47
Tablo 2.6. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) analiz değerleri.....48
Tablo 2.7. Durabilite harç gruplarının karışım parametreleri.....52
Tablo 2.8. Harç gruplarının karışım oranları.....53
Tablo 3.1. Kontrol numunelerinin birim ağırlıkları.....75
Tablo 3.2. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları, g/cm^3...77
Tablo 3.3. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimer birim ağırlıkları, g/cm^3.....78
Tablo 3.4. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer birim ağırlıkları, g/cm^3.....79
Tablo 3.5. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer birim ağırlıkları, g/cm^3....80
Tablo 3.6. Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlık ve yoğunlukları.....82
Tablo 3.7. Çatalağzı küllü geopolimerlerin birim ağırlık ve yoğunlukları.....83
Tablo 3.8. Kontrol ve geopolimer harçların işlenebilirlik değerleri.....87
Tablo 3.9. Kontrol numunelerinin eğilme dayanımı, MPa.....89
Tablo 3.10. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa 90
Tablo 3.11. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa 91
Tablo 3.12. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa 92

Tablo 3.13. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa....93
Tablo 3.14. Kontrol numunelerinin basınç dayanımı, MPa.....95
Tablo 3.15. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa.....97
Tablo 3.16. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa.....98
Tablo 3.17. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa.....99
Tablo 3.18. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa ..100
Tablo 3.19. Geopolimerler numunelerin ultrases geçiş hızları 101
Tablo 3.20. Geopolimerler numunelerin su emme ve boşluk oranları 104
Tablo 3.21. Birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları 107
Tablo 3.22. NaOH ile üretilen Sugözü küllü numunelerin kılcal su emmeleri.....109
Tablo 3.23. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü numunelerin kılcal su emmeleri.....111
Tablo 3.24. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü numunelerin kılcal su emmeleri.....112
Tablo 3.25. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü numunelerin kılcal su emmeleri.....114
Tablo 3.26. Basınçlı su işleme derinliği deney sonuçları 116
Tablo 3.27. Islanma-kuruma deneyi sonrası ağırlık kayıpları.....120
Tablo 3.28. Islanma-kuruma deneyi sonrası eğilme dayanımı kaybı.....122
Tablo 3.29. Islanma-kuruma deneyi sonrası basınç dayanımı kaybı 123
Tablo 3.30. Islanma-kuruma deneyi sonrası ultrases hız kaybı 125
Tablo 3.31. Donma-çözülme deneyi sonrası ağırlık ve ultrases hızı kaybı 128
Tablo 3.32. Donma-çözülme deneyi sonrası dayanım kayıpları.....129
Tablo 3.33. Klorür iyonu geçirimlilik sınıfları (ASTM C1202).....131
Tablo 3.34. Hızlı klorür geçirimliliği deney sonuçları.....132
Tablo 3.35. 90, 180 ve 360 günlük karbonatlaşma derinlikleri 135
Tablo 3.36. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin boy değişimi 138
Tablo 3.37. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin boy değişimi 140
Tablo 3.38. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin boy değişimi 142
Tablo 3.39. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin boy değişimi 144
Tablo 3.40. Aşınma deneyi sonucu oluşan aşınma kayıpları.....146
Tablo 3.41. Sugözü külü yangın sonrası eğilme dayanımı değişimi.....150

Tablo 3.42. Çatalağzı külü yangın sonrası eğilme dayanımı değişimi 152
Tablo 3.43. Sugözü külü yangın sonrası basınç dayanımı değişimi 153
Tablo 3.44. Çatalağzı külü yangın sonrası basınç dayanımı değişimi 155
Tablo 3.45. Hızlandırılmış korozyon deneyi ağırlık kaybı ve aderans dayanımı 157

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 2015 yılı dünya çimento üretim miktarı 6
Şekil 1.2. Avrupa ülkelerinde çimento üretimine bağlı CO_2 salınımı 6
Şekil 1.3. Çimento sektörü maliyet bileşenleri 7
Şekil 1.4. Sugözü termik santrali 8
Şekil 1.5. Türkiye'de 2015 yılında elektrik üretiminde faydalanılan kaynaklar 9
Şekil 1.6. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı 14
Şekil 1.7. Geopolimer türleri 22
Şekil 1.8. Davidovits zincir yapı modeli 22
Şekil 1.9. Silikat ve alüminatlarla geopolimer oluşum modeli 24
Şekil 2.1. Uçucu kül içerisinde yer alan iri taneler 43
Şekil 2.2. Sugözü uçucu külü XRD analizi 44
Şekil 2.3. Çatalağzı uçucu külü XRD analizi 44
Şekil 2.4. Numune üretiminde kullanılan TS EN 196-1'e uygun standart kum 46
Şekil 2.5. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat 47
Şekil 2.6. Ön deneme harçlarında erken priz alma ve kristalleşme problemi 50
Şekil 2.7. Çözeltilerin oda sıcaklığına soğutulması 55
Şekil 2.8. Hobart mikserinde harç üretimi 55
Şekil 2.9. Numune üretiminde kullanılan kalıplar 55
Şekil 2.10. Geopolimer harç numunelerine etüvde ısıl kür uygulanması 56
Şekil 2.11. Kontrol numunelerine kür uygulanması 56
Şekil 2.12. Numunelerin havada ve Arşimet terazisinde tartılması 58
Şekil 2.13. Yayılma tablası ile kıvam tayini deneyi 58
Şekil 2.14. Eğilme dayanımı deneyi 59
Şekil 2.15. Basınç dayanımı deneyi 60
Şekil 2.16. Ultrasonik hız tayini deneyi 61
Şekil 2.17. Arşimet terazisi yöntemi ile suda ağırlıkların belirlenmesi 63
Şekil 2.18. Kılcal su emme deneyi 64
Şekil 2.19. Geçirimlilik deney cihazı ve numunenin yarma cihazı ile ayrılması 65

Şekil 2.20. Islanma-kuruma döngüsü 66
Şekil 2.21. Donma-çözülme kabini ve ekran görüntüsü..... 66
Şekil 2.22. Numunelerin kesilip vakumlanarak deneye hazırlanması..... 67
Şekil 2.23. Hızlı klorür geçirimliliği deney düzeneği 68
Şekil 2.24. Karbonatlaşma deneyi 69
Şekil 2.25. Rötre numuneleri ve boy değişimi ölçümü 70
Şekil 2.26. Böhme deney cihazı ve aşınma deneyi numuneleri 71
Şekil 2.27. Böhme deneyi uygulaması 71
Şekil 2.28. Numunelere yangın fırınında yüksek sıcaklık uygulanması 72
Şekil 2.29. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği..... 73
Şekil 2.30. Aderans (pull-out) deney düzeneği ve deney numunesi 73
Şekil 3.1. Kontrol numunelerinin birim ağırlık değişimi 76
Şekil 3.2. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları 77
Şekil 3.3. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları..... 78
Şekil 3.4. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları..... 79
Şekil 3.5. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları..... 80
Şekil 3.6. Harç numunelerinin birim ağırlık ve yoğunlukları 84
Şekil 3.7. Geopolimerlerin Na oranına bağlı görünür birim ağırlık değişimi 84
Şekil 3.8. Geopolimerlerin Na oranına bağlı görünür yoğunluk değişimi 85
Şekil 3.9. Geopolimerlerin Na oranına bağlı kuru yoğunluk değişimi..... 85
Şekil 3.10. Geopolimerlerin Na oranına bağlı DYK yoğunluk değişimi 86
Şekil 3.11. Geopolimer ve kontrol numunelerinin işlenebilirlik tayini..... 87
Şekil 3.12. Taze harç işlenebilirlik değerleri..... 88
Şekil 3.13. Kontrol harç numunelerinin farklı kür sonucu eğilme dayanımı 89
Şekil 3.14. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı..... 90
Şekil 3.15. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı..... 92
Şekil 3.16. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı..... 93
Şekil 3.17. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı 94
Şekil 3.18. Kontrol numunelerinin ısıl kür sonucu basınç dayanımı 95

Şekil 3.19. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin basınç dayanımı 97
Şekil 3.20. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin basınç dayanımı.....98
Şekil 3.21. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin basınç dayanımı.....99
Şekil 3.22. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin basınç dayanımı.....100
Şekil 3.23. Geopolimer ve kontrol numunelerinin ultrases hız değişimi.....102
Şekil 3.24. Geopolimerler ve kontrol numunelerinin su emme ve boşluk oranı.....104
Şekil 3.25. Geopolimer numunelerinin su emme oranı değişimi.....105
Şekil 3.26. Geopolimer numunelerinin boşluk oranı değişimi 105
Şekil 3.27. Birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları 108
Şekil 3.28. NaOH ile üretilen Sugözü külü harcı kılcal su emme değişimi.....110
Şekil 3.29. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü külü harcı kılcal su emme değişimi.....111
Şekil 3.30. NaOH ile üretilen Çatalağzı külü harcı kılcal su emme değişimi.....113
Şekil 3.31. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı külü harcı kılcal su emme değişimi.....114
Şekil 3.32. En yüksek su işleme derinliğinin ölçülmesi 115
Şekil 3.33. Tamamı ve bir kısmı su geçiren numuneler.....116
Şekil 3.34. Geopolimer ve kontrol numuelerinin su işleme derinliği değişimi 117
Şekil 3.35. Na oranına göre geopolimerlerin su işleme derinliği değişimi 117
Şekil 3.36. 10 çevrim sonunda numunelerin görünümü 119
Şekil 3.37. 40 çevrim sonunda numunelerin görünümü 120
Şekil 3.38. 80 çevrim sonunda numunelerin görünümü 120
Şekil 3.39. Numunelerin ıslanma-kuruma sonrası ağırlık kaybı.....121
Şekil 3.40. Numunelerin ıslanma-kuruma sonrası eğilme dayanımı değişimi.....122
Şekil 3.41. Numunelerin ıslanma-kuruma sonrası basınç dayanımı değişimi 124
Şekil 3.42. Numunelerin ıslanma-kuruma sürecinde ultrases hızı değişimi 125
Şekil 3.43. Donma-çözülme sonunda numunelerden parça kopması 127
Şekil 3.44. Donma-çözülme döngülerinde ağırlıkta oluşan kayıp aşamaları.....127
Şekil 3.45. Donma-çözülme sonrası ağırlık ve ultrasonik hız kaybı.....129
Şekil 3.46. Donma-çözülme sonrası eğilme ve basınç dayanımı kaybı.....130
Şekil 3.47. Hızlı klorür geçirimliliği deney cihazı ve ekran görüntüsü 131

Şekil 3.48. Geopolimer ve kontrol numunelerinin hızlı klorür geçirimliliği 132
Şekil 3.49. Kontrol numunesi 360 günlük karbonatlaşma okuması 134
Şekil 3.50. Numunelerin 90 günlük karbonatlaşma görüntüsü 134
Şekil 3.51. Numunelerin 180 günlük karbonatlaşma görüntüsü 135
Şekil 3.52. Numunelerin 360 günlük karbonatlaşma görünüşü 135
Şekil 3.53. Sugözü külü numunelerinin karbonatlaşma derinliği 136
Şekil 3.54. Çatalağzı külü numunelerinin karbonatlaşma derinliği 136
Şekil 3.55. NaOH ile üretilen Sugözü küllü harçların rötre-zaman ilişkisi 139
Şekil 3.56. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü harçların rötre-zaman ilişkisi..... 141
Şekil 3.57. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü harçların rötre-zaman ilişkisi 143
Şekil 3.58. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü harçların rötre-zaman ilişkisi..... 145
Şekil 3.59. Geopolimer ve kontrol numunelerinin aşınma kaybı..... 146
Şekil 3.60. Geopolimer numunelerinin aşınma kaybı değişimi 147
Şekil 3.61. 200 °C yangın sonrası numunelerin görünüşü 149
Şekil 3.62. 1000 °C yangın sonrası numunelerin görünüşü 149
Şekil 3.63. 1000 °C yangın sonrası numunelerde hacimsel değişim 150
Şekil 3.64. Sugözü küllü numunelerin eğilme dayanımı değişimi..... 151
Şekil 3.65. Sugözü küllü numunelerin eğilme dayanımı değişimi..... 152
Şekil 3.66. Sugözü küllü numunelerin basınç dayanımı değişimi 154
Şekil 3.67. Çatalağzı küllü numunelerin basınç dayanımı değişimi 155
Şekil 3.68. Korozyon ve aderans dayanımı deney numuneleri 157

GİRİŞ

Ülkelerin ekonomik büyümelerindeki artış enerji tüketiminin de artmasına sebep olmaktadır. Enerjiye duyulan ihtiyaçlar ve endüstriyel gelişme aynı zamanda atıkların sebep olduğu çevresel olumsuzlukları da beraberinde getirmektedir. Ayrıca küresel ısınma nedeniyle, dünya ülkelerinin fosil kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanması önem kazanmaktadır. Ülkelerin gelişmişlik seviyelerine bağlı olarak geri dönüşüm konusunun önemi artmakta ve atık hammaddelerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır [1].

Enerjinin elde edilebileceği kaynakların kısıtlı olması araştırmacıları yeni alanlara sevk etmiştir. Bu amaçla çeşitli enerji üretim tesisleri geliştirilmiştir. Bunlardan biri de kömürle enerji üreten termik santrallerdir. Türkiye'de enerji politikalarının önemli bir kısmını katı yakıtlar olan kömürle çalışan termik santrallerden enerji üretimi oluşturmaktadır. Ancak kömürün yakılması ile uçucu kül adında atık bir materyal ortaya çıkmaktadır. Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması ile açığa çıkan puzolan olarak kullanılabilen bir yan üründür. Bacadan çıkan atık ürünlerin çeşitli yöntemlerle tutulmasıyla elde edilir. Çevresel problemler oluşturduğu için doğaya bırakılması sakıncalıdır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) 2015 yılı elektrik piyasası gelişim raporuna göre enerji üretiminde ülkemizde kömürden faydalanma oranı %28 dolaylarındadır [1,2,13].

Günümüzde, uçucu külün çeşitli sektörlerde kullanımı ile ilgili birçok araştırmalar yapılmakta ve inşaat sektöründe kullanımına fazlaca önem verilmektedir. Uçucu kül genellikle silisli ve alüminli yapısı nedeniyle puzolanik özellik gösterdiği için çimento ve betonda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. İnce ve küresel olduklarından dolayı taze betonda işlenebilmeyi iyileştirirler [2].

Uçucu kül, beton veya çimento içerisinde doğrudan kullanılabilmektedir. Betonun bir veya birkaç özelliğini değiştirmek için kullanımı yaygındır. Bu amaçla uçucu kül gibi silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi atık materyaller de tercih edilen puzolanik malzemelerdir. Yüksek dayanımlı betonlara yönelik çalışmalarla birlikte, çevreye zararlı endüstriyel atık malzemelerin değerlendirilmesi ve bununla beraber ekonomik bir beton elde etmek amacıyla, taze ve sertleşmiş betonun neredeyse tüm özellikleri, uygun katkılar kullanarak değiştirilip iyileştirilebilmektedir. Bu sebeple, gerek kimyasal katkılar gerekse de puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay malzeme, günümüze kadar inşaat ve beton üretiminde kullanılmıştır. Betonun ana bileşenlerinden olmayan puzolanlar, beton teknolojisindeki gelişmelerle, hem betonun dayanım ve durabilite özelliklerini değiştirmek hem de ekonomi açısından daha uygun beton üretmek için oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle de bu tür özellikteki atık malzemeler puzolanik özellik gösterdikleri için, mineral katkı maddeleri olarak da adlandırılmaktadırlar [3].

Puzolanlar, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak ince öğütüldüğünde ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girdiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan silisli ya da silisli ve alüminli malzemelerdir. Ana oksitleri olan silis ve alümine ek olarak yapılarında demir oksit, kalsiyum oksit, alkali ve karbon bulunur. Bu maddelerin miktarları ise elde edildikleri kaynağa göre değişmektedir. Puzolanlar genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki grupta sınıflandırılırlar. Doğal olarak elde edilen puzolanların elde edilişleri herhangi bir kimyasal işleme tabi tutmadan genellikle kırma, öğütme ve eleme ile sınırlıdır. Volkanik camlar, volkanik tüfler, diatomlu topraklar, traslar ve bazı killer doğal puzolanlardır. Bir diğer grup ise yapay puzolanlar olup bunlar bazı endüstri kollarında yan ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufları en yaygın olarak kullanılan yapay puzolanlardır [4].

Uçucu küllerin çimento ve beton içerisinde kullanımının yanı sıra alkaliler ile aktive edilerek de kullanımı mümkün olabilmektedir. Uçucu kül kullanarak alkali aktivasyonu sonucu üretilen harç ve betonların, geleneksel çimento ile üretilmiş betonlara göre kuruma büzülmesi değerleri oldukça düşük, donatı ile aderans yapma özelikleri ve çevresel etkilere dayanıklılıkları oldukça yüksektir. Geopolimerlerin önemli avantajlarından birisi de kısa zamanda dayanım kazanmaları, dış etkilere karşı dayanıklı

olması, düşük ısı iletkenliği ve yüksek hacim stabilitesine sahip olmalarıdır. Uçucu kül gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu sonucu elde edilen harçlar çimento harçlarına göre daha hafif ve daha dayanıklıdır. Ayrıca tuğla ve gazbeton üretiminde alkalilerin kullanılması kür sıcaklıklarını oldukça düşürmekte ve buna paralel olarak enerji maliyeti düşmektedir [5].

Geopolimerler; uçucu kül, metakaolin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi serbest silis ve alümin içeren malzemelerin sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkaliler ile aktivasyonu ile oluşmuş alüminosilikat bağlayıcı malzeme sınıfıdır. Bu bağlayıcıların yüksek performanslı kullanımı, çevre koşullarına dayanıklı olması ve portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olmalarından dolayı araştırılması gereken konular arasında cazibesini sürdürmektedir [5].

Bu tez kapsamında iki farklı uçucu kül ile iki farklı aktivatör kullanılarak uçucu küllü geopolimer harç numuneleri elde edilerek mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Adana ili Yumurtalık ilçesi Sugözü köyünde bulunan Sugözü Termik Santrali'nde ithal kömür yakılarak elde edilen F sınıfı uçucu külü ve Zonguldak ili Çatalağzı beldesi Işıkveren mevkiinde bulunan taşkömürü yakılarak elde edilen Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu külleri kullanılmıştır. Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında geopolimer harçlar üretilmiştir. Ayrıca kıyaslama yapabilmek için TS EN 196-1 standardına uygun olarak kontrol numuneleri üretilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın temel amaçları;

a. Türkiye'de farklı bölgelerde elde edilen F sınıfı uçucu küllerin en uygun karışım oranı, uygun aktivatör tipi, kür sıcaklığı ve kür süresi belirlenerek yüksek dayanım ve dayanıklılık değerlerine ulaşılabilmesi.
b. Atık malzemelerin geridönüşümü sağlanarak çevresel sorunların azaltılması.
c. Çimentoya alternatif bağlayıcıların gelişmesine katkıda bulunarak üretiminde açığa çıkan karbon miktarı azaltılıp çevresel etki ve yakıt tasarrufu sağlanabilmesi.

d. Elde edilecek olan geopolimer harçlarının sektörel kullanımının önünün açılabilmesi için dayanım ve dayanıklılık koşulları araştırılarak piyasa koşullarında uygun maliyetli üretim yapılmasına katkı sağlanması.

e. Ülkemizde elde edilen F sınıfı uçucu küllerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarının ortaya çıkarılabilmesi.

1. BÖLÜM

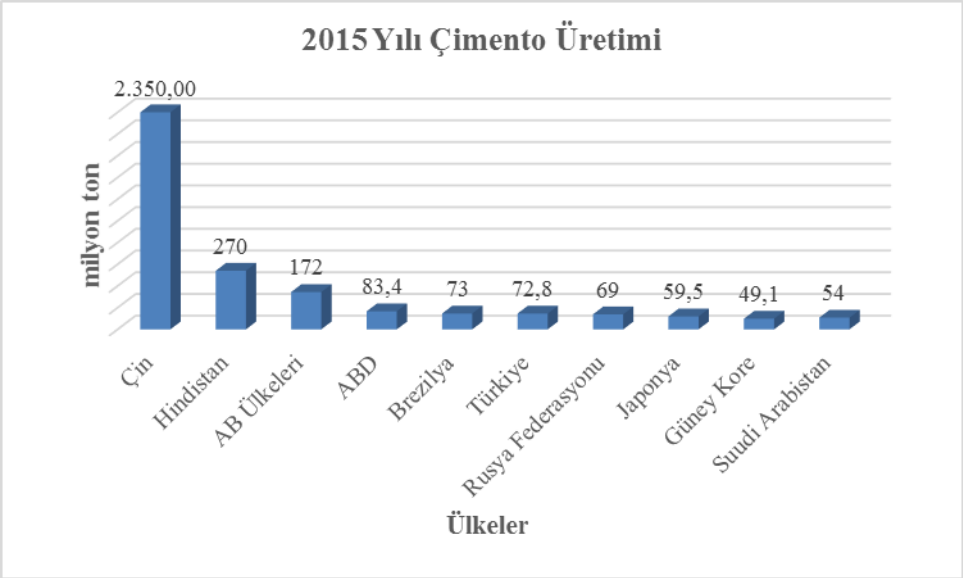
GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çimento sektörü, ülkelerin ekonomik göstergelerinde önemli paya sahiptir. Ancak çimento üretiminin çevresel etkisi ve üretim maliyeti gibi olumsuz özellikleri de bulunmaktadır. Bu ve bunun gibi sebepler çimento dışında yeni bir bağlayıcıya olan ihtiyacı ilgi çekici hale getirmiştir. Bu sebeple uçucu kül, taban külü ve yüksek fırın cürufu gibi yapısında Al_2O_3, SiO_2 ve CaO içeren amorf malzemelerden, alkali aktivatörler kullanılarak çimento harici bir bağlayıcı üretmek mümkündür. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda "geopolimer" adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır [6].

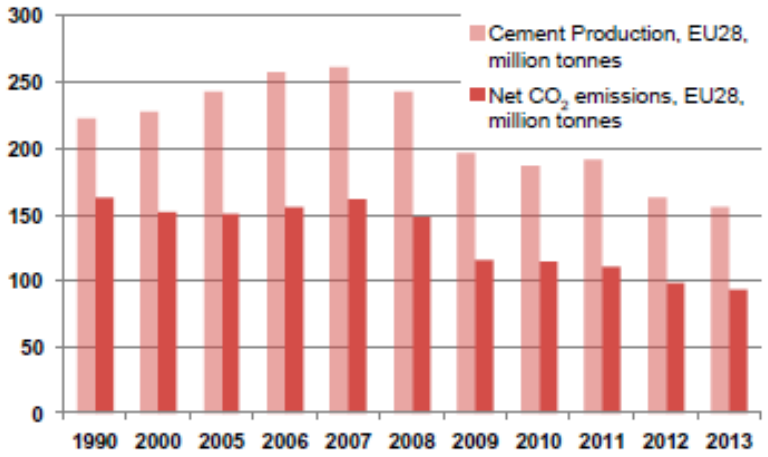
Çimento üretiminin en büyük iki dezavantajı CO_2 salınımı ve yüksek enerji maliyetidir. Dünyada ülkelerin nüfusuna da oranla en yüksek çimento üretimi Çin'de yapılmaktadır (Tablo 1.1). Ancak Türkiye 2015 yılında çimento üretiminde Çin, Hindistan, ABD ve Brezilya'nın ardından 72,8 milyon ton ile 5. sırada (Şekil 1.1) yer almaktadır [7]. Önümüzdeki yıllarda bu rakamların artacağı da düşünüldüğünde atmosfere salınan CO_2 oranında önemli artış görülecektir (Şekil 1.2). Ayrıca çimento sektöründe yüksek maliyet kaleminde yer alan yakıt kullanımı da (Şekil 1.3) üretimin bir diğer önemli problemidir [8].

Tablo 1.1. Dünyada başlıca çimento üreticileri ve üretim miktarları, milyon ton [7]

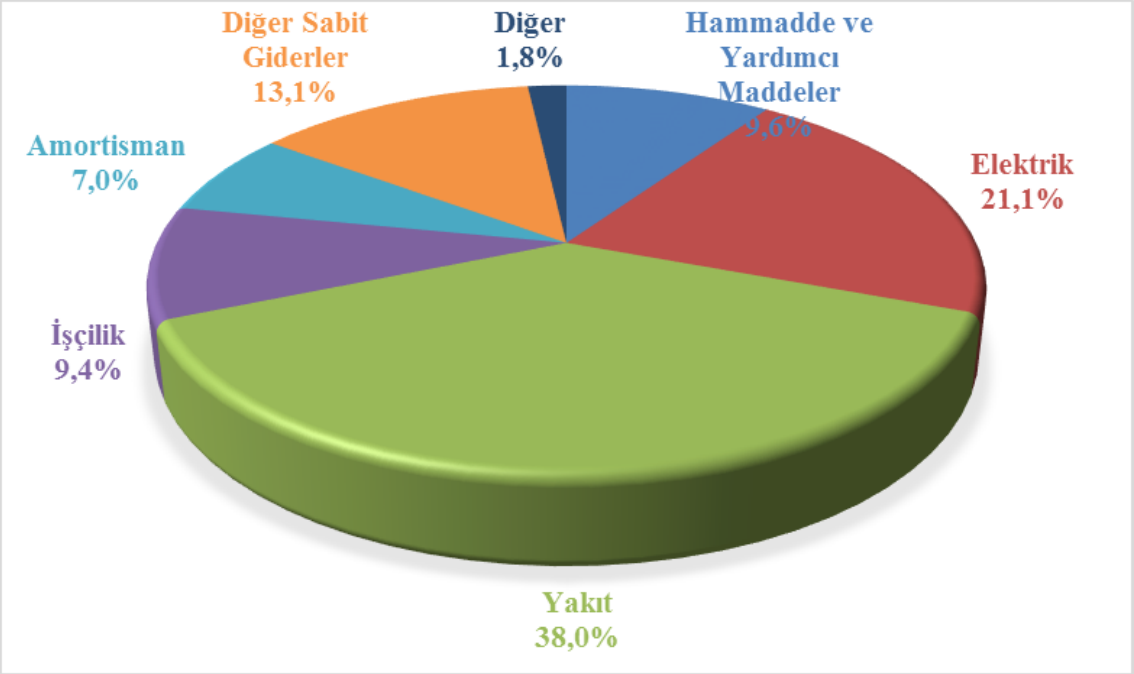
Ülke	2001	2009	2012	2015
Çin	661,0	1.644,0	2.137,0	2.350,0
Hindistan	102,9	205,0	239,0	270,0
AB Ülkeleri	225,6	209,0	170,5	172,0
ABD	88,9	63,9	74,0	83,4
Brezilya	39,4	51,7	68,0	73,0
Türkiye	30,0	54,0	63,8	72,8
Rusya Federasyonu	28,7	44,3	53,0	69,0
Japonya	79,5	59,6	59,3	59,5
Güney Kore	52,0	50,1	46,9	49,1
Suudi Arabistan	20,0	37,8	43,0	54,0



Şekil 1.1. 2015 yılı dünya çimento üretim miktarı [7]



Şekil 1.2. Avrupa ülkelerinde çimento üretimine bağlı CO_2 salınımı [7]



Şekil 1.3. Çimento sektörü maliyet bileşenleri [8]

Çimento kullanımına çevresel etkileri ve enerji tasarrufu açısından bakıldığında uçucu külden çeşitli alanlarda bilinçli olarak yararlanılması hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantaj sağlar, atık bir madde ortadan kalktığı için de çevre korunmuş olur [9].

Bazı ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonun hidratasyon ısısını düşürmek amacıyla olmuştur. Mesela; A.B.D.'de ilk uçucu kül kullanımı 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarında olmuştur. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında uçucu kül kullanılmasına karar verildi ve Türk Standardları Enstitüsü uçucu kül (TS 639) ve uçucu küllü çimento (TS 640) standartlarını yayımladı. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü'nünde bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullandığı bilinmektedir. Fakat uçucu küllü çimento hemen hemen hiç üretilmedi ve katkılı çimentolarda ise kısıtlı miktarlarda kül kullanıldı. Son yıllara kadar ülkemizde uçucu kül kullanımı bu tür uygulamalarla sınırlı kaldı ve kullanılan uçucu kül miktarı, yılda elde edilen miktarın %1'ine bile ulaşamadı. Ancak son yıllarda, özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa normlarına uygun hale getirilen yeni çimento

ve beton standartları çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi arttırmıştır [9].

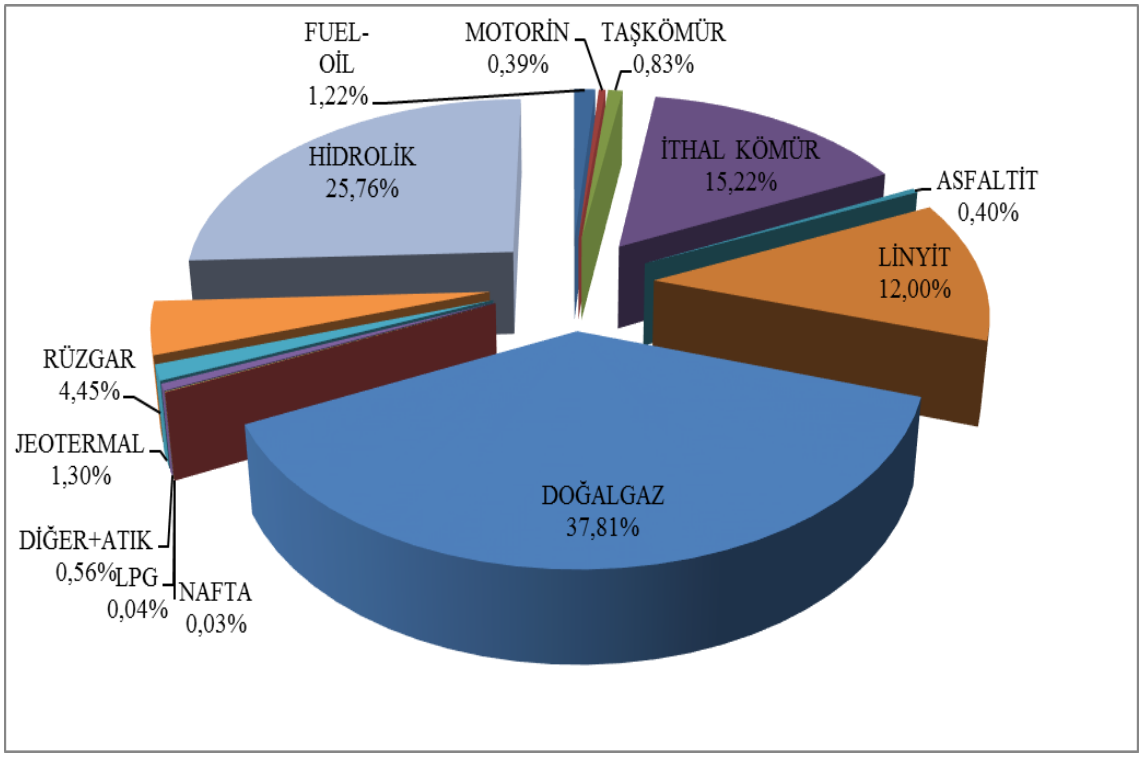
1.1. Uçucu Küller

Uçucu kül, kömürle çalışan termik santrallerde ortaya çıkan atık bir üründür. Çevreyi olumsuz etkileyeceği için uçucu küllerin santral bacasından dumanla birlikte çıkıp havaya karışması önlenir (Şekil 1.4). Bu nedenle küller mekanik veya elektrostatik yöntemlerle toplanarak uygun bir yerde depolanır ve zamanla santral açısından problem oluşturur. Dünyada ortaya çıkan kül miktarı yaklaşık 600 milyon ton civarındadır. Uçucu külün çeşitli alanlarda kullanımı hem kullanıcı hem de külü üreten için ekonomik avantajlar sağlar ve atık madde geri dönüşüm ile çevreye faydalı olur. Tüm bu olumlu özelliklere rağmen dünyada termik santrallerde elde edilen külün sadece %15 gibi küçük bir miktarı kullanılarak değerlendirilmektedir [9].



Şekil 1.4. Sugözü termik santrali [10].

Ülkemizde 2003 yılında toplam 140.580 GWh elektrik üretilirken 2015 yılında 259.690 GWh elektrik üretimi gerçekleşmiştir. Bu üretimin %28'lik kısmında kömürle çalışan termik santrallerden elde edilmiştir (Şekil 1.5). Türkiye'de enerjiye duyulan ihtiyacın giderek artması sebebiyle hala yatırım kapsamında olan kömürle çalışan termik santraller bulunmaktadır. Bu santrallerden faaliyette olanların bir kısmı ve üretilen kül miktarına ilişkin bilgi Tablo 1.2'de verilmiştir. 2012 yılı verilerine göre bu termik santrallerden yılda yaklaşık 19 milyon ton uçucu kül üretilmiştir. Bu oran dünya üretiminin %3'üdür [11]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2010 yılında 50 olan termik santral sayısı 2014 yılında 66 adede (100 MW üstü güç üreten) ulaşmıştır. Bu santrallerden elde edilen toplam atığın %48,3'ü kül dağı/kül barajına atılarak, %21,7'si düzenli depolama sahalarında, %15'i çimento ve beton endüstrisine satılarak veya lisanslı atık bertaraf ve geri kazanım firmalarına gönderilerek, %15'i ise diğer yöntemlerle (maden ve taş ocağına gönderme, belediye çöplüğüne atma, vb.) bertaraf edilmiştir [12].



Şekil 1.5. Türkiye'de 2015 yılında elektrik üretiminde faydalanılan kaynaklar [13]

Tablo 1.2. Türkiye'deki başlıca termik santraller, kömür ve kül tipleri [11,14]

Termik Santral	**Yakıt Tipi**	**Toplam Güç (MW)**	**Kül Üretimi (ton)**	**ASTM C618**		**TS EN 197-1**	
				F	**C**	**V**	**W**
Sugözü	İthal Kömür	1320	340.000	×		×	
Eren	İthal Kömür	1360	350.000	×		×	
İçdaş Biga	İthal Kömür	405	140.000		×		×
Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	1.700.000		×		×
Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	4.300.000		×		×
18 Mart Çan	Linyit	320	730.000		×		×
Çayırhan Park	Linyit	620	1.450.000	×		×	
Kangal	Linyit	457	1.600.000		×		×
Kemerköy	Linyit	630	2.200.000		×		×
Orhaneli	Linyit	210	350.000	×		×	
Seyitömer	Linyit	600	1.000.000	×		×	
Soma A	Linyit	44	4.400.000		×		×
Soma B	Linyit	990			×		×
Tunçbilek A	Linyit	65	500.000	×		×	
Tunçbilek B	Linyit	300		×		×	
Yatağan	Linyit	630	2.200.000		×		×
Yeniköy	Linyit	420	1.600.000		×		×
Çatalağzı	Taş Kömürü	300	600.000	×		×	
Çolakoğlu	İthal Kömür	190	400.000	×		×	
Aksa*	Linyit	270	NA				
Eren*	İthal Kömür	2790	NA				
Atlas*	İthal Kömür	1200	NA				
Tufanbeyli*	Linyit	450	NA				
Silopi*	Asfaltit	405	NA				
İzdemir Aliağa*	İthal Kömür	350	NA				
Yunus Emre*	Linyit	145	NA				
Kardemir*	Kömür	78,5	NA				
Polat*	Linyit	51	NA				

*Yeni santraller olduğu için uçucu kül üretimi ile ilgili bilgi bulunamamaktadır.

Uçucu küller endüstriyel atık olarak elde edilen yapay puzolan sınıfında yer alır. Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki gruba ayrılmaktadır. Uçucu küller, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ile birlikte kullanılan en yaygın yapay puzolanlardır. İnce öğütülmüş puzolanlar, ana bileşenleri olan silis ve alüminin ortamda nem bulunması halinde hidrate olmuş kireç ile reaksiyon yaparak bağlayıcılık kazanırlar. Puzolan ve çimento reaksiyon yapınca puzolanik reaksiyon sebebiyle bağlayıcı hamurdaki serbest kireç zamanla azalmaktadır. Belli bir süre sonunda puzolan içeren betonların hamurlarında portland çimento hamurlarına oranla daha az miktarda serbest kireç ve daha fazla

kalsiyum silika hidrat (C-S-H) bulunmaktadır. Puzolanlı betonlarda bu sayede daha çok C-S-H jeli bulunarak dayanımda artış ve boşluk yapısında azalma oluşmaktadır [4, 15].

Uçucu kül terimi ve portland çimentosu içinde kullanımı 1930'larda ortaya çıkmıştır. 1937 yılında Californiya Üniversitesi'nde R.E. Davis'in yaptığı çalışma uçucu kül kullanımının temeli olarak belirtilmektedir. 1970'lerde nüfus artışı ve enerji maliyetlerindeki yükselmeler kömür kullanımını arttırarak uçucu kül kullanımının dünya genelinde yaygınlaşmasına sebep olmuştur [9,10]. Özellikle de yakıt olarak kullanılması uygun olmayan kalorisi düşük kömür yataklarının yakınlarına termik santraller kurularak enerji üretimi ve dolayısıyla uçucu kül üretimi artmaktadır. Oluşan bu küllerin santral bacalarından atılmasının çevresel sorunlar oluşturması, sahalarda biriktirilmesiyle de bir takım teknik olumsuzluklara yol açması nedeniyle farklı kullanım alanlarında değerlendirilmesi problemlerin çözümü için kolaylık sağlamıştır [16].

Uçucu küller, ısı ile enerji üreten güç üretim tesislerinde öğütülmüş linyit veya taş kömürünün yakılmasıyla bacadan çıkan atık gazlar içinden elde edilen toz halindeki atık malzemelerdir. Günümüz teknolojisinde bu küllerin %99'u bacalardan elektrostatik ya da filtre torbaları yardımı ile tutulmaktadır. Uçucu külün ana bileşenleri Al_2O_3, SiO_2 ve Fe_2O_3'tür. Uçucu kül çeşidine bağlı olarak ana bileşenlerin yanı sıra CaO, MgO ve yanmamış karbon da içerir. Uçucu küller puzolanik özellik gösterdikleri için kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri ya çok az ya da hiç yoktur. Fakat nemli ortamda bulunan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyon yaparak bağlayıcılık kazanır [17].

Termik santrallerde ince öğütülmüş kömürün yakılmasıyla üç farklı kül elde edilebilmektedir. Bunlar;

- Göreceli olarak iri taneli olduğu için baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen "taban külü",
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulup uzaklaştırılmasıyla elde edilen "ham kül" ve
- Çok ince tane boyutuna sahip olup bacadan çıkan gazlarla taşınabilen "uçucu kül" [9].

Çevreyi olumsuz etkileyeceği için uçucu küllerin baca gazları ile havaya karışması önlenir. Bu nedenle mekanik veya elektrostatik yöntemlerle kül toplanarak santral çevresinde depolanır. Ancak büyük yığınlar haline geldiğinde problemler oluşturmaya başlar. Dünyada 600 milyon ton civarında kül ortaya çıktığı bilinmektedir [9].

Uçucu küllerin termik santral bacasından tutulması hava ve toprak kirliliği açısından önemlidir. Uçucu küllerin çevreye verdiği zararlar arasında tozlanma, tarım arazilerinde bozulma, yağmur sebebiyle toprakta süzülerek toksik atıklar bırakıp tarım ürünlerinin zarar görmesi ve dolayısıyla bölgesel su, hava, toprak ve tarım ürünleri kirliliği gibi çevresel sorunlar sayılabilir. Bu sorunların önlenmesi, uçucu küllerin çeşitli alanda kullanılarak ülke ekonomisine doğrudan ya da dolaylı olarak fayda sağlaması ile mümkün olabilmektedir [18].

Uçucu küllerin özellikleri yakılan kömür özelliklerine ve yakma yöntemine bağlı olarak değişir. Silis ve alümin içermesi puzolanik özellik göstermesini sağlayarak çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilir. İnce ve küresel taneli olması betonda işlenebilmeyi arttırır ve hidratasyon ısısını düşürür. Çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı jel oluşturarak dayanıma katkı sağlarlar. Uçucu küller genellikle ince taneli olarak elde edildiği için ayrı bir öğütmeye ihtiyaç duymaz fakat eleklerden geçirilmesi olumlu özellik kazandırır. Tüm bu olumlu özelliklerine rağmen elde edilen külün kullanımı dünya ortalamasında sadece %15 civarında olduğu bilinmektedir [9].

1.1.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri ya hiç yoktur ya da çok azdır. Puzolanik özellik gösterdikleri için nemin varlığı ile $Ca(OH)_2$ ile kimyasal reaksiyon yaparak C-S-H jeli oluşturarak bağlayıcı özellik kazanırlar. Bu nedenle puzolanik ve bağlayıcılık özelliklerini kimyasal ve mineralojik yapısı doğrudan etkiler. İçerisinde yer alan bileşenlere bağlı olarak çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Uçucu küllerin sınıflandırmasında CaO ve SO_3 miktarına göre yapılan sınıflandırma bulunmaktadır. Son yıllarda kabul gören CaO miktarı esaslı olsa da kireç ve SO_3 miktarını esas alan sınıflandırma üç alt sınıftan oluşmaktadır [19, 20, 21].

a. Silikoalüminoz uçucu küller: Taş kömüründen elde edilen ve esas yapısı silikoalüminatlardan oluşan uçucu küllerdir.

b. Sülfokalsik uçucu küller: Genellikle linyit kömüründen elde edilen ve diğerlerine oranla yüksek miktarda kireç ve SO_3 içeren küllerdir.
c. Silikokalsik uçucu küller: Genellikle linyit kömüründen elde edilen, kireç ve silis miktarı yüksek uçucu küllerdir.

Uçucu küller CaO esaslı sınıflandırmada, %10'dan daha az CaO içerenler "düşük kireçli uçucu küller" ve %10'dan daha çok CaO içeren uçucu küller "yüksek kireçli uçucu küller" olarak da bilinirler. ASTM C618'e ve TS EN 197-1'e göre uçucu küller ve diğer puzolanlar Tablo 1.3 ve Tablo 1.4'de gösterilmiştir. [22,23].

Tablo 1.3. ASTM C618 'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması

Sınıf	Tanım
F	Toplam $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq$%70 antrasit ya da bitiminous kömürden elde edilir, sadece puzolanik özelliğe sahiptir.
C	Toplam $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq$%50 linyit ya da alt bitiminous kömürden elde edilir; CaO muhtevası %10'dan fazla olduğunda hem puzolanik hem de bağlayıcı özellik gösterir.
N	Doğal puzolanlar, bunlar diatomik topraklar, apolin, chertz, şeyller, tüfler, volkanik küller, ısıl işlemden geçirilmiş bazı killerdir.

Tablo 1.4. TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması

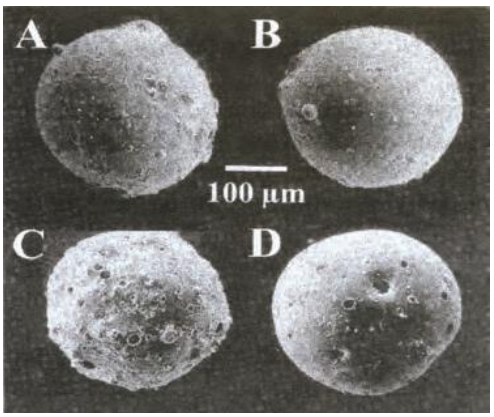
Sınıf	Tanım
V (Silissi)	Reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitden (Al_2O_3) oluşan; gerikalanı demir oksit (Fe_2O_3)ve diğer bileşenleri içeren, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis (SiO_2) miktarının %25'den fazla olan uçucu küller.
W (Kalkersi)	Reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe2O3) ve diğer bileşenlerden oluşan, reaktif kireç (CaO) oranı %10'dan fazla, reaktif silis miktarı da %25'ten fazla olan uçucu küller.

1.1.2. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri yakılan kömürün özelliklerine ve yanma sisteminin kalitesine göre çeşitlilik göstermektedir. Genel olarak gri renktedirler, fakat içerisindeki yanmamış karbon oranının artması rengin koyuya dönmesine yol açar. Tane yapıları ise

yuvarlak olup çimento inceliğine yakın incelik değerlerindedir. Bu nedenle ayrı bir öğütmeye ihtiyaç duymadan kullanılabilme yapısına sahiptir [18].

Küllerin tanecik şekil ve büyüklüğü, uçucu kül tipi ve bacalardan toplama sistemine göre farklılık gösterebilmektedir. Camsı küresel tanecikler içi boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük küme içinde küçük küreler kümesi (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklu yapılar, yüzey tabakası kristal ile kaplanmış tabakalar, deforme olmuş yapılar ve yüzeyde şekilsiz birikmiş yapılarda (Şekil 1.6) bulunabilirler [21,24].



A: Yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik

B: Camsı küresel tanecik

C:Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik

D: Boşluklu küresel tanecik

Şekil 1.6. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı [9]

Uçucu kül taneleri içindeki boşlukların ağırlıkça %5'i hacimce %20'si nitrojen ve CO_2 gazı ile doludur. Küresel yapıda bulunmayan taneler yanma işlemine katılmamış kömürden gelen kuvars, feldspat gibi mineraller ile kil kalıntısı, yanmamış karbon gibi gözenekli yapılardan oluşmaktadır [21,25].

Uçucu küllerin şekli ve tane büyüklük dağılımı betonun su ihtiyacını ve işlenebilirliğini doğrudan etkilemektedir. İncelik değerleri termik santrallerde küllerin toplanma yöntemine bağlıdır. Elektrostatik yöntemlerle tutulan küller beton ve çimento üretiminde kullanıma daha uygundur. Küllerin blaine özgül yüzeyleri genellikle 1800/5000 cm^2/g arasında değişmektedir. Ama en pratik yöntem 45 mikron eleğin üstünde kalan kül yüzdesinin tayin edilmesidir [21].

Uçucu küllerin rengi açık griden koyu griye değişmektedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri, daha çok demir içerenler ise açık gri renkte yer alırlar. Silisli alüminli yapıya sahip oldukları için doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik gösteren

uçucu küller hem portland-puzolan tipi çimento üretimde hemde beton içerisinde mineral katkı olarak doğrudan kullanılabilmektedir. Beton katkı malzemesi olarak çimento ağırlığının %15'i ile %50'si arasında değişen miktarlarda kullanılmaktadır [26].

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri TS EN 450-1'e göre incelik, aktivite indeksi, genleşme, tanecik yoğunluğu, priz başlangıç süresi ve su ihtiyacıdır. Bu fiziksel özellikler, yakılan kömürün bileşenlerine, kömür öğütülme inceliği, yanma oranına ve etkinliğine, yakma düzeneğinin tipine ve uçucu kül toplama sistemine göre değişiklik göstermektedir. Uçucu küllerin bu özellikleri kullanıldığı taze ve sertleşmiş betonu doğrudan etkiler. Uçucu küller çimentolara göre daha koyu renge sahiptir [27].

Tane büyüklüğü 1-150 μ arasında değişmekte olup %75'den fazlası 45 μ (No 325) elekten geçer. Uçucu küllerin dayanım aktivite indeksi puzolanik reaksiyon yapma yeteneğini ve dayanım kazanma kapasitesini gösterir. Bu nedenle 28 günlük dayanım aktivite indeksi %75'den fazla olmalıdır. Uçucu küllerin genleşmesi EN 196-3'e göre belirlenmeli ve kütlece %30 uçucu kül ve %70 deney çimentosu olan karışımda 10 mm'den fazla genleşmelere yol açmamalıdır. Normalde uçucu küllerin yoğunluğu 2,10 ile 2,70 g/cm³ (ortalama 2,40 g/cm³) civarındadır. Yoğunluk değeri incelikle doğrudan ilgilidir. Uçucu küllerin priz başlangıç süresi, %25 uçucu kül ve %75 deney çimentosu (her ikisi de kütlece) ile hazırlanan çimento pastası kullanılarak EN 196-3'e göre belirlenir ve kütlece %100 çimento ile hazırlanan hamurun priz başlangıç süresi iki katından fazla olmamalıdır [28]. Uçucu küllerin su ihtiyacı deney çimentosu ile belirlenen su ihtiyacı değerinin %95'inden fazla olmamalıdır [27]. ASTM C618'e göre uçucu küllerin fiziksel özellikleri de Tablo 1.5'te gösterilmiştir [22].

Tablo 1.5. ASTM C618'e göre uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	**(%)**	**F**	**C**	**N**
İncelik + 45 Mikron	Maks	34	34	34
Dayanım Aktivite İndeksi	Min	75	75	75
Su İhtiyacı	Maks	105	105	115
Genleşme	Maks	0,8	0,8	0,8
Yoğunluktan Sapma	Maks	5	5	5
45 Mikron Elekte Kalan, Sapma	Maks	5	5	5

1.1.3. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özelliği yakılan kömürün cinsine, jeolojik kökenine, yanma, toplama şartlarına bağlı olarak oluşur. Uçucu küllerde başlıca bileşenler SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve CaO olup, diğer bileşenler SO_3, MgO ve alkali oksitlerdir. Bunlara ek olarak yanmamış karbon, mangan, berilyum, fosfor ve molibden eser miktarlarda bulunabilmektedir. Temel oksitler olan SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve CaO miktarları külün silissi veya kalkersi olarak sınıflandırılmasına temel teşkil etmektedir. Uçucu külde SiO_2 %25-60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 ve CaO %1-40 arasında değişen oranlarda yer almaktadır [9, 29, 30].

Kızdırma kaybı, kömürdeki yanmamış karbonu ifade etmektedir. Kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış haldeki su veya CO_2 kaybını da kapsamaktadır. Genel olarak küllerde %1-10 arasında değişmektedir [9].

Uçucu kül bileşeninde yer alan reaktif silis ve reaktif kireç çimentonun reaksiyonu sonucunda oluşan ve dayanımda önemli rol oynayan C-S-H jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle de reaktif halde bulunan silis puzolanik reaksiyona girmek üzere alkali ortamda çözünen silis olarak bilinen külün aktif bileşenidir. Bu oksitler amorf veya camsı faz halinde bulunurken, mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olarak kristalize halde bulunurlar. Reaktif SiO_2 miktarı uçucu külün tipinden bağımsız olmak üzere en az %25 olması gerekir. Reaktif CaO ise düşük kireçli kül tipinde %10 altında, yüksek kireçli küllerde ise %10-15 arasında değişmektedir [9].

Uçucu kül içerisinde yer alan serbest kireç hidratasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) haline dönüşerek, betonda genleşme ve çatlak meydana getireceği için TS EN 450-1'de %1 den fazla olması istenmez. MgO ise, hidratasyonu yavaş oluşur ancak hidrate olup beton içerisinde yer aldığında reaksiyon ürünleri geniş yer kaplar ve sertleşmiş betonun genleşip çatlamasına sebep olur. Uçucu külde yer alan yüksek miktarda SO_3, ileri yaşlarda betonda aşırı miktarda kalsiyum alümina sülfat hidrate (etrenjit) oluşumuna yol açar. Bu durum sertleşmiş beton içerisinde genleşme ve bozulma oluşturur. Uçucu küllerde bulunan amorf silis beton içerisinde oluşacak olan alkali-silika reaksiyonunu azaltmaktadır. Bu nedenle küllerde %1,5'dan az Na_2O eşdeğeri alkali oksit bulunması olumsuz etkiyi azaltmaktadır [21].

TS EN 450-1'e göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri kızdırma kaybı, klorür, sülfürik anhidrit, serbest kalsiyum oksit, reaktif kalsiyum oksit, reaktif silisyum dioksit, silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) , demir oksit (Fe_2O_3), toplam alkali muhtevası, magnezyum oksit ve çözünebilir fosfattır [16]. Bunlardan uçucu külün özelliklerini etkileyen en önemli özellik silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) kütlesi %70'den az olmamalıdır. Bu yönüyle ASTM ile TS benzerlik göstermektedir. Uçucu kül içerisinde magnezyum oksit (MgO) oranı %4'ten fazla, klorür muhtevası %0,10'dan fazla olmamalıdır. Toplam alkali miktarı Na_2O eşdeğeri olarak hesaplanmalı ve kütlece %5'ten fazla olmamalıdır. Sülfürik anhidrit (SO_3) %3'ten fazla olmamalıdır. ASTM C618'e göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri ise Tablo 1.6'da gösterilmiştir [22].

Tablo 1.6. ASTM C618'e göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	**(%)**	**F**	**C**	**N**
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	Min	70	50	70
SO_3	Maks	5	5	4
Nem İçeriği	Maks	3	3	3
Kızdırma Kaybı	Maks	6	6	10

1.1.4. Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri

Uçucu küllerin mineralojik yapısı, yakılan kömürün içerisinde bulunan kil, kuvars, alçıtaşı, pirit, karbonat minerallerinin varlığına, kömürün jeolojik kökenine, hazırlama ve yakma sistemlerinin özelliklerine bağlı olmak üzere değişiklik gösterebilir. Genel olarak camsı veya kristalize bileşenli yapılardan oluşmaktadır. Kimyasal yapıda Si, Al, Ca, Fe ve S ana elementler olarak yer alır. Kömürün yanma şekline göre bu elementler SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, SO_3 gibi ana bileşenleri oluşturur ve bunlara ek olarak MgO, Na_2O, K_2O, TiO_2 gibi oksitler bulunabilmektedir. Düşük CaO içeren küllerde camsı faz ve minör kuvars (SiO_2), mullit ($3Al_2O_32SiO_2$), manyetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) yer almaktadır. Yüksek CaO yer alan küllerde bu bileşenlere ek olarak bazen daha çok miktarda serbest kireç (CaO), anhidrit ($CaSO_4$), trikalsiyum alüminat ($Ca_3Al_2O_6$), felspat, gehlenit gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır [31, 32, 33].

Uçucu küllerin inşaat sektöründe beton ve çimentoda yaygın olarak kullanımının nedeni kimyasal bileşiminden çok mineralojik yapısına bağlıdır. Uçucu Külün mineralojik bileşiminde yer alan camsı faz ve kristal yapı puzolanik özelliklerine etki etmektedir. Daha çok camsı faz kül reaktivitesinde etkin rol oynamaktadır. Düşük kireçli küllerde yer alan zengin SiO_2, polimerize silis veya alüminyum içeren alüminosilikat bileşimler camsı fazın yapısını oluşturmaktadır. Bu tip küllerde silissi veya alümino silikat camsı faz reaktif bileşen olarak görev alıp su ve kalsiyum hidroksitlerle reaksiyona girerek puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli yapıda silisyum da içeren kalsiyum alüminatlar, camsı fazın yanı sıra kristalize fazda yer almaktadır. Düşük kireçlilere göre yüksek kireçlilerde camsı faz az olduğu için içerdikleri serbest kireç nedeniyle de puzolanik özellik düşük kalmakta ve bir miktar da bağlayıcılık özelliği göstermektedirler. Uçucu küllerin mineralojik özellikleri Tablo 1.7'de verilmiştir.

Tablo 1.7. Uçucu küllerin mineralojik yapısı [33]

Mineral (%)	**Silikoaluminöz**	**Sülfokalsik**	**Silikokalsik**
Camsı ve amorf faz	60	35	50
Mullit	20	1	5
Hematit	7	4	3
Manyetit	6	1	1
Kuvars	5	5	5
Anhidrit	-	15	5
Serbest kireç	-	20	10
Feldspat ve gehlenit	-	≥20	≥15

1.1.5. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları

Uçucu külün katkı malzemesi olarak çimento ve betonun özelliklerine etkisi, içine ilave edilen kül miktarı, külün özellikleri, çimentoya ilave veya tamamen yerine katılması gibi birkaç etkene bağlıdır [9].

Uçucu küller ile ilgili dünyada 1970'li yıllardan sonra petrol krizi ile enerji kullanımını azaltmak için alternatif malzemelerin kullanımının yaygınlaşması açısından araştırmalar artmıştır. Fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde inşaat sektöründe alternatif bir kaynak olabileceği belirlenmiştir. İnşaat sektöründe uçucu küller çimento

mineral katkısı, agrega içerisinde, beton üretiminde, kerpiç ve tuğla elde etmede, yalıtım endüstrisinde, baraj ve yol yapımında, zemin enjeksiyonu gibi geoteknik alanlarda kullanılabilmektedir [18].

Uçucu küller çimento içerisine ham madde olarak, öğütmeden önce klinker ve alçı taşı ile birlikte veya doğrudan üretimi yapılmış çimentoya ilave edilerek kullanılabilmektedir. Klinkere kül eklendiğinde öğütme işlemi kolaylaşmakta ve üretim kapasitesi artmaktadır. Uçucu küller ince taneli olduğu için ayrıca bir öğütmeye ihtiyaç duymamaktadır. Doğrudan çimento içerisine veya klinker esnasında ilavesi aynı sonuçları vermektedir. TS EN 197-1'e göre CEM II/A-V, CEM II/B-V , CEM II/A-W , CEM II/B-W olmak üzere A grubunda kütlece %6-20 ile B grubunda %21-35 arasında uçucu kül kullanılan dört grup Portland Uçucu Küllü Çimento bulunmaktadır [32].

Beton içerisinde uçucu küller, bağlayıcı malzeme olarak kullanılan portland çimentosunun bir kısmının yerine mineral katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Betonun bazı özelliklerini iyileştirmesi ve ekonomi sağlaması önemli avantajlarındandır. Bazen ince agreganın bir kısmının yerine de uçucu kül kullanılabilmektedir [32].

Kısaca uçucu kül inşaat sektöründe;

- Çimento içerisinde katkı, hammadde veya ikame malzemesi olarak,
- Agrega içerisinde ince agreganın bir kısmının yerine,
- Beton içerisinde mineral katkı olarak,
- Tuğla üretiminde katkı malzemesi olarak,
- Kerpiç yapımında bağlayıcı olarak,
- Yapı malzemesi olarak Panel, duvar, gaz beton, beton boru, harç yapımında ,
- Baraj inşaatlarında hidratasyon ısısı problemine katkı sağlaması için,
- Otoyol, nükleer santral yapımında,
- Geoteknik uygulamalarda zemini güçlendirebilmek için,
- Geopolimer harç ve beton üretiminde aktivatörler ile bağlayıcı olarak kullanılabilmektedir [18].

1.2. Geopolimerler

Dünyada CO_2 salınımının önemli bir kısmından çimento sektörünün sorumlu olduğu ileri sürülmektedir. Çimento üretiminin azaltılması çok da mümkün olmadığından alternatif bağlayıcıların üretimi son yıllarda önemli hale gelmiştir. Çimento içerisinde katkı olarak kullanılan birçok puzolanik malzemeler de bireysel olarak bağlayıcılık kazanabilmektedir [34]. Çimento üretimi çevresel etkisi, yeterli dış etkilere dayanıklılık göstermemesi ve yüksek üretim maliyeti gibi çeşitli olumsuz özelliklere sahiptir. Bu ve bunun gibi sebepler çimento dışında yeni bir bağlayıcıya olan ihtiyacı ilgi çekici hale getirmiştir. Puzolanik malzemelerle çimento gibi karakteristik özellik gösteren geopolimer adında yeni bir materyal geliştirilmiştir. Gepolimerizasyon olarak da isimlendirilen alkali aktivasyon süreci yüksek alkali özellikli aktivatörler ile silis ve alüminli malzemelerin çözülmesiyle elde edilmektedir [35]. Böylece uçucu kül, taban külü ve yüksek fırın cürufu gibi yapısında Al_2O_3, SiO_2 ve CaO içeren amorf malzemelerden alkali aktivatörler kullanılarak çimento harici bir bağlayıcı üretilmektedir. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda "geopolimer" adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır [6].

Geopolimerler; uçucu kül, metakaolin, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi serbest silis ve alümin içeren malzemelerin sodyum silikat, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi alkaliler ile aktivasyonu ile oluşmuş alüminosilikat bağlayıcı malzeme sınıfıdır. Bu bağlayıcıların yüksek performanslı kullanımı, çevre koşullarına dayanıklı olması ve portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olmalarından dolayı üzerinde çalışmalar yoğunlaşarak devam etmektedir. İçerik olarak bakıldığında silis ve alümin içeren malzemeler alkaliler ile aktive edilebilir. Bugün yaygın olarak yüksek fırın cürufu, uçucu küller, metakaolin, kaolinitik küller kullanılmak suretiyle yüksek dayanımlara ulaşılabilmektedir. Bu dayanım alüminasilikat malzemenin içyapısına bağlıdır. Doğal malzemelerde yüksek dayanımlar elde edilememektedir. Kalsine edilmiş uçucu kül yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin silis ve amorf alümin miktarı fazla ve puzolanik özellikleri de yüksek olduğu için alkali aktivasyonu ile daha yüksek dayanımlar elde edilebilmektedir. Uçucu küller ile yapılan harçlar sertleşmek için genel olarak 60-80ºC'nin üzerinde sıcaklığa ihtiyaç duyarlar [5, 6, 36].

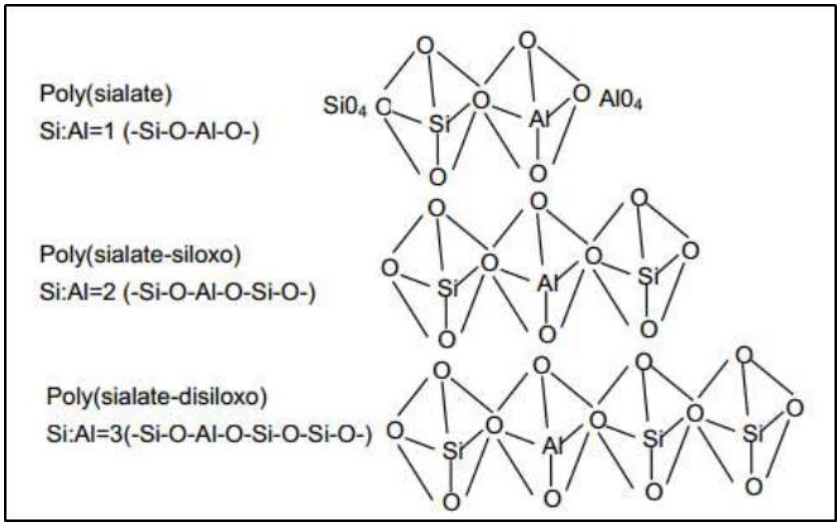
Geopolimerler, güçlü fiziksel ve kimyasal yapısı sayesinde prefabrik yapı imalatında, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı elemanlarında, süsleme işlerinde, yol kaplamalarında, kaldırım kaplamalarında, nükleer ve zehirli atık depolanmasında, yangına dayanıklı yapı elemanı üretiminde kullanılabilmektedir. Kullanımının yaygınlaşmasıyla enerji tüketimini azaltmakta, gaz salınımını sınırlamakta ve çoğunlukla atık malzemeden elde edilmesi sebebiyle atıkların depolanması ve geri dönüşümü ile ilgili çevresel faydaları olukça fazla olacaktır [34,37].

1.2.1. Geopolimerlerin Kimyası

Çimento dışında bir bağlayıcı elde etmek için son yıllara yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi alümin ve silikat içeren endüstriyel atık malzemeler alkaliler ile aktive edilmektedir. Araştırmalarda aktivatör olarak da sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), camsuyu diye adlandırılan sodyum silikat ($nSiO_2Na_2O$) ve potasyum silikat ($nSiO_2K_2O$) veya bunların karışımları kullanılmaktadır. En uygun aktivatör kullanılan bağlayıcıya göre hidroksitler veya suda çözünebilen silikatlar ile üretilenlerdir [6, 34].

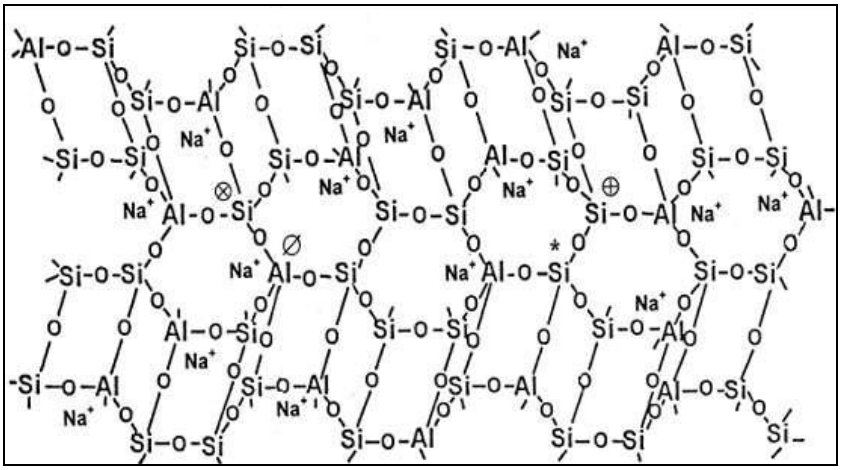
Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi amorf yapıda bulunan endüstriyel atıklar bir aktivatör ile aktifleştirilerek bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Aluminosilikat yapıdaki uçucu küller aktivatörler ile reaksiyon yaparak "geopolimer" olarak isimlendirilen amorf yapılı inorganik polimerler oluştururlar. Yüksek fırın cürufu ise alkali aktivatör ile reaksiyon sonucu çimentodaki su ile reaksiyon sonucu ortaya çıkan C-S-H jeline benzer kalsiyum silikat oluşturmaktadır [6].

Geopolimerizasyon, yüksek alkali ortamlardaki moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve çoklu yoğuşma hareketinden oluşan bir ekzotermik kimyasal süreçtir [38]. Geopolimerlerin üretim sürecinde molekül yapısını belirleyici olan etken aktifleştirilecek malzemeler ile aktivatörlerde yer alan alkali silikatların Si/Al molar oranıdır. Bu oran 1 olduğunda zeolit kristaline benzer tuğla, seramik ve yangın koruyucu malzemeler ortaya çıkabilir. Oran 2 olduğunda seramik amorf yapı oluşur ve çimento gibi bağlayıcı yapı ile beton üretildiği gibi daha ileri bir teknoloji ile radyoaktif atık depolama tesisleri üretilebilmektedir. Si/Al oranı 3 olduğunda akışkan polimerik karakteri daha da artmakta ve fiber glass yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler üretilebilmektedir (Şekil 1.7) [39].



Şekil 1.7. Geopolimer türleri [39]

Davidovits, geopolimer malzemeleri alümina silikat malzemelerin poli-yoğunlaşması sonucu meydana gelen geopolimerizasyon olarak tanımlamaktadır. Alkali aktivasyon esnasında geopolimer oluşumu için reaksiyona giren ve oluşan molekül gruplarını belirleyerek zincir yapının modelini ortaya koymuştur (Şekil 1.8) [39].



Şekil 1.8. Davidovits zincir yapı modeli [39]

Geopolimerizasyon süreci yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi atık ürünler, volkanik tüf, doğal başkalaşım kayaçları, 750ºC'de fırınlanmış kaolinit kili gibi alkali siikat ve alkali tuzların düşük ısıda tepkime yapmasıyla başlar. Ortaya çıkacak ürünün fiziksel özellikleri, katı malzemenin yapısı, kimyasalların molar oranlarda tepkimeye sokulması, ısıl kür ya da kalsinasyon ısısı ve süresine bağlı olarak oluşan molekül yapısına göre değişiklik gösterir. Geopolimer, kısaca fırınlanmış kil içinde yer alan alüminatlar ile silikatların oksijen atomu elektronlarını paylaşması ile kovalent bağlı

bileşik meydana getirme sentezine dayanır. Silikat (SiO_2) mineralleri son derece kararlı bileşiklerdir. Alkali aktifleştiricilerin SiO_2 monomerlerinin heliks üç boyutlu ağ yapısını zayıflatması ile ardından gelen tepkime sürecinde geopolimer ana bileşiği olan Si-O-Al sialatların oluşum sürecini sağlar [40].

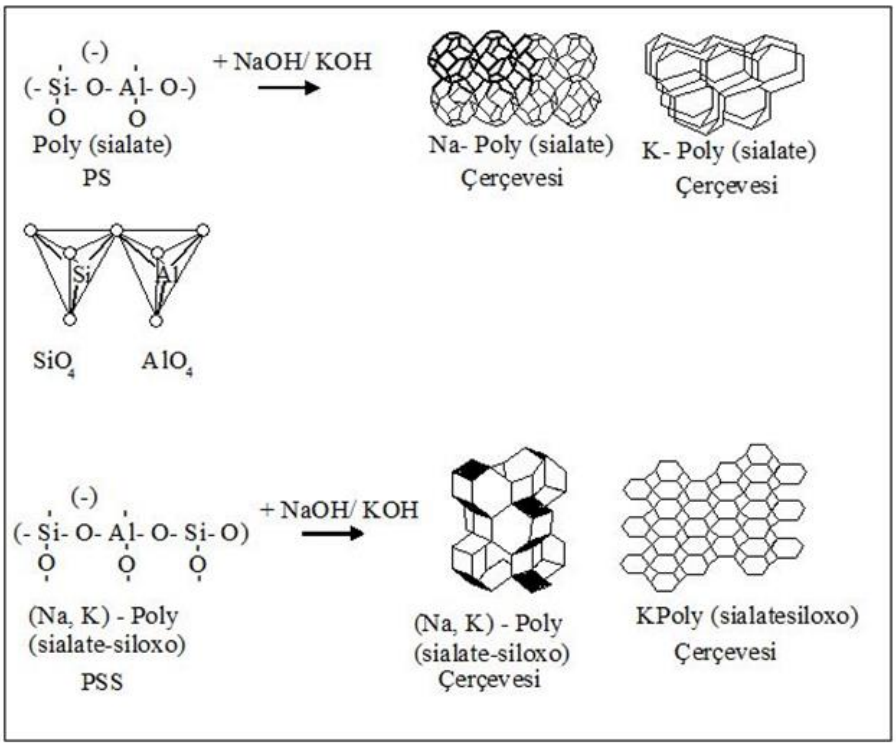
Alkali aktivatör olarak NaOH, geopolimer üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu aktivatör çözeltisinin yoğunluğu ve molaritesi, oluşan harcın özelliklerini belirlemektedir. Fazla oranda NaOH ilave edilmesi kimyasal çözünmeyi hızlandırırken, bağlayıcı oluşumu esnasında etrenjit ve CH yapısını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, daha yüksek NaOH oranı, reaksiyonun erken aşamalarında daha yüksek dayanımı teşvik eder. Fakat fazla OH nedeniyle çözelti içinde arzu edilmeyen morfoloji, son ürünlerin düzensizliklerine neden olur. NaOH ile aktive edilmiş geopolimerin kristal yapısının daha gelişmiş olduğu sülfat ve asitli ortamlara karşı daha istikrarlı olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber, aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılması, hidrasyon aktivitesi doğrudan geopolimer ana C-S-H ürünün oluşumunu etkiler. NaOH oranı arttıkça ısı oluşumu artmaktadır. Bununla birlikte, NaOH oranı ve maksimum hidratasyon ısısı zamanı arasında bir ters ilişki bulunmaktadır [41].

Aktivasyon sürecinde kullanılan sodyum silikatlar, $nSiO_2Na_2O$ ile gösterilen kimyasal bileşiklerin adıdır. Üretildikleri aside göre ortosilikat, metasilikat, disilikat ve tetrasilikat olarak isimlendirilirler. Renksiz, camsı toz veya su içinde şurupsu viskoz bir çözelti olarak mevcuttur. Aktivatör olarak kullanım için MS değeri (SiO_2 / Na_2O) göz önüne alınır. MS oranının düşürülmesi gerektiğinde NaOH çözeltiye ilave edilir. Yüksek MS değerinde kullanımı uçucu küllerde erken priz alma gibi problemlere yol açmaktadır [37].

Alkali aktivasyonunda kimyasal yapı farklılıkları, aktivatör çeşidi ve konsantrasyon miktarı elde edilen ürünlerin farklı oluşmasına yol açmaktadır. Alkali aktivasyonunda reaksiyona ve ürünün özelliklerine etki eden en önemli etken aktive edilen hammaddenin yapısındaki silis ve alümin miktarıdır. Alkali aktivasyonun oluşum sürecinde iki model belirtilmektedir. Birincisi zengin kalsiyum içeren hammaddenin CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO dörtlü sistemidir. Bu sistemde SiO_2/Al_2O_3 ve CaO/Al_2O_3 oranı yaklaşık 3'tür. İkinci model türünde ise CaO oranı düşük (<%1) fakat SiO_2 ve Al_2O_3 oranı yüksek olan hammaddelerden oluşmaktadır. İlk modelde oluşan yapı öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu işaret etmektedir. Başlıca reaksiyon ürünü C-S-H jeline

benzeyen hidrate kalsiyum silikatlardır. Çimento reaksiyonu sonucu oluşan C-S-H jelinden farklılıkları olup Ca/Si oranı daha azdır. Diğer faz oluşumu kür koşulları, aktivatör tipi ve konsantrasyonuna bağlı olarak değişmektedir. İkinci modelde belirtilen grup, silis-alümin miktarı olarak zengin olduğu belirtilen uçucu küllerdir. Uçucu küllerde reaksiyon sıcaklığı önemli etkiye sahiptir. Ortam sıcaklıklarında reaksiyon hızı düşüktür. Fakat 40-85ºC kür uygulandığında 2 saatte 20 MPa dayanım elde edilebilmektedir. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan ürünler hidrate alümina silikat zincirlerince oluşturulan alkalin iyonlar tarafından negatif yük dengesi sağlanmış amorf yapılı inorganik polimerlerdir [42].

Geopolimerler, alüminyum ve silika atomlarının K ve Na gibi alkalileri ile tetrahedral yapı oluşturarak birleşirler. Ortamda bulunan oksijen atomunu dönüşümlü olarak kullanırlar. Al-O-Si yapısı geopolimerin temelini oluşturmaktadır. Alüminat ve silikatların hidroksitler ve alkali tuzlarla çözünmesiyle geopolimer reaksiyonları oluşmaktadır. Şekil 1.9'da alüminat ve silikatların alkali metaller ile çözünüp polimerleşerek yüksek reaktif yapı oluşumu gösterilmektedir [42]. Torgal ve ark. (2008), Davidovits geopolimer kimyasını tanımlarken alümina silika toksitin kısaltılmış hali olan Polisialat'ı önerdiğini belirtmektedirler [43, 44].



Şekil 1.9. Silikat ve alüminatlarla geopolimer oluşum modeli [44]

1.2.2. Geopolimerlerin Alkali Aktivasyon Süreci

Çimentonun olumlu özelliklerinin yanı sıra bazı olumsuz özelliklerinden yola çıkılarak daha ekonomik alternatif bağlayıcılar üretmek için yapılan araştırmalar son yıllarda artmıştır. Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların alkali aktivatörler kullanılarak bağlayıcılık kazandırma özelliği bu nedenle oldukça ilgi çekmektedir. İçeriğinde silis ve alümin olan toz malzemelerin alkalilerle aktive edilebilmektedir. Kaolinitik kil, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu alkali aktivasyonda yaygın kullanılan malzemelerdir. Alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya potasyum cam suyu ($nSiO_2K_2O$) karışımlarıdır [21, 44].

Alkalilerle aktive edilerek kullanılan puzolanlar [45, 46];

1. Metakaolin
2. Kaolin Kili
3. Yüksek fırın cürufu
4. Uçucu küller
5. Uçucu kül ve cüruf karışımı
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

Alkali aktivatörler ise [45,47];

1. Kostik alkaliler (Alkali hidroksitler): MOH
2. Silikatlar: $M_2O.nSiO_2$
3. Zayıf asitli tuzlar: M_2CO_3, M_2SO_3, M_3PO_4 vd.
4. Alüminatlar: $M_2O.nAl_2O.(2\text{-}6).SiO_2$

5. Alüminosilikatlar: $M_2O.nAl_2O_3.(2\text{-}6).SiO_2$
6. Güçlü asitli tuzlar: M_2SO_4

En çok kullanılan alkali aktivatörler sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfattır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat üretilerek elde edilirken sodyum karbonat ve sodyum sülfat doğal kaynaklardan elde edilir. Sodyum silikatların içerisindeki su miktarı arttıkça yoğunluğu düşmektedir [45, 47].

Geopolimerlerin alkali aktivasyon sürecinde 60°C'nin üzerindeki yüksek kür sıcaklıklarında iyi mekanik özellik kazandığı bilinmektedir. Kolay sentezlenme süreci ve düşük çevresel etkisi sebebiyle yapı malzemesi olarak kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Uçucu kül ile elde edilen geopolimerlerin kullanımının artışı da çevresel ve ekonomik faydası, yüksek teknolojik özellikli üretimi ve kolay uygulanabilirliği açısından dikkat çekmektedir. Uçucu kül geopolimerizasyonunda kimyasalların reaktivitesi önemli bir özelliktir. Bu yüzden iki temel faktör uçucu kül geopolimer sistemini etkilemektedir. Birincisi reaktif amorf yapının varlığı ve diğeri de ince tane boyutudur [48, 49].

Alkali ile aktivasyon süreci 1939'da Feret ve 1940'da Purdon'ın cüruf üzerindeki çalışmalarıyla başlamıştır. Betonun yapısındaki alkaliler ile alkali aktivasyondaki alkaliler arasındaki farkı Krivenko 1994'de açıklamıştır. Daha sonraki süreçte alkali aktivasyonu hammadde kullanımına göre sınıflandırılmaya başlanmıştır. Aktivasyon alanında önemli çalışmalar yapan Davidovits 1979 yılında kaolinit ve kireç taşının sinterleşmiş ürünlerini ve dolomit gibi alüminosilikatları kullanarak yeni bir bağlayıcı geliştirmiştir [42]. Alkali aktivasyonun tarih boyunca gelişim süreci Tablo 1.8'de belirtilmektedir.

Tablo 1.8. Alkali aktivasyonunun tarihsel gelişimi [46]

Tarih	Gelişme	Yazar
1939	Çimentoda cüruf kullanımı	Feret
1940	Alkali-cüruf birleşiminin kullanımı	Purdon
1959	Alkalin çimentoların teorik esasları ve gelişimi	Glukhovsky
1965	Bileşen olarak doğal maddelerin kullanılmasıyla "alkalin çimentolar" adının ilk kullanımı	Glukhovsky
1986	Sentetik Melit cüruflarının aktivasyonu	Malolepsy ve Petri
1989	Cürufun alkali aktivasyonu	Talling ve Brandstetr
1990	Cüruflu çimentoların aktivasyonu	Wu ve diğer.
1991	Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcıların geliştirilmesi	Roy ve diğer.
1993	Cüruf çimentosu	Roy ve Malek
1994	Alkalin bağlayıcılar	Krivenko
1995	Alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapı incelemeleri	Wang ve Scrivener
1996	Alkalilerle aktive edilmiş cürufların dayanımı, geçirimliliği ve boşluk yapısı	Shi
1997	Alkalilerle aktive edilmiş cürufların kinetik çalışmaları	Fernández-Jiménez ve Puertas
1998	Alkali aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapısı	Katz
1999	Geopolimer sistemlerin kimyası ve teknoloji	Davidovits
2000	Alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül- cüruf çimentosu	Puertas
2001-2002	Alkalilerle aktive edilmiş cüruflu beton	Bakharev
2003	Atıkların bertaraf edilmesi	Palomo
2004	Zeolit oluşumu	Grutzeck
2008	Geopolimerlerin tek başına kullanımı	Hajimohammadi ve ark.
2009	Geopolimerlerin yapısı, üretimi, özellikleri ve uygulama alanları	Provis ve van Deventer

1.2.3. Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Uçucu küllerin alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcı kullanılarak elde edilen harç ve betonların, geleneksel çimento ile üretilmiş betonlara göre kuruma büzülmesi değerleri oldukça düşük, donatı ile aderans yapma özelikleri ve çevresel dış etkilere dayanıklılıkları oldukca yüksektir. Geopolimerlerin önemli avantajlarından birisi de kısa

zamanda dayanım kazanmaları, dış etkilere karşı dayanıklı olması, düşük ısı iletkenliği ve yüksek hacim stabilitesine sahip olmalarıdır. Uçucu kül gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu sonucu elde edilen harçlar çimento harçlarına göre daha dayanıklıdır. Ayrıca tuğla ve gazbeton üretiminde alkalilerin kullanılması kür sıcaklıklarını oldukça düşürmekte ve enerji maliyeti azalmaktadır [5]. Alkali aktivasyonunda dezavantajı da ani priz, mikro çatlak ve çiçeklenme gibi özellikler gösterilmektedir [34].

Alkali ile aktive edilen alkalin bağlayıcıların uygulama alanları [45,47];

1. Yapısal betonlar
2. Duvar blok elemanı üretimi
3. Beton kaldırım yapımı
4. Beton büz boru yapımı
5. Elektrik direkleri
6. Gaz beton uygulamaları
7. Yüksek sıcaklığa dayanıklı beton yapımı
8. Petrol kuyuları
9. Tehlikeli ve radyoaktif atık stabilizasyon betonları
10. Sulama sistemi ve dalgakıran yapımı
11. Döşeme ve temel yapımı
12. Prefabrik yapı inşaatı

1.3. Literatür Çalışması

Atiş vd. [50], F sınıfı uçucu külü NaOH ile aktive ederek yüksek pH değeri sağlayan alkali ortam sağlayarak ısıl kür sıcaklığı, kür süresi ve Na konsantrasyonunun basınç ve eğilme dayanımına etkisini araştırmışlardır. Karışımda kum/bağlayıcı 3, su/bağlayıcı 1/3 oranlarında seçilmiştir. Na konsantrasyonu %4 ile %20 arasında %2 artış yapılarak adım adım arttırılmıştır. Sıcaklık kürü 45ºC'den 105ºC'ye kadar 10ºC artış yapılarak ulaşılmıştır. Isıl kür süresi olarak 24, 48 ve 72 saat seçmişlerdir. Her parametre etkisini araştırmak için üçer adet 40 mm x 40 mm x 160 mm numuneler üretip kür edildikten sonra oda sıcaklığına getirip eğilme ve basınç dayanım değerlerini belirlemişlerdir. %14 Na oranı, 115ºC ve 24 saat kür süresinde 15 MPa eğilme dayanımına, 120 MPa basınç dayanımına ulaşmışlardır. Geopolimer harç karışımlarında alkali aktivatör

konsantrasyonu ve ısıl kür sıcaklığı arttıkça basınç ve eğilme dayanımları optimum noktasına kadar artmış ancak aşırı yüksek Na oranı ve kür sıcaklığı için azalmıştır. Kür süresindeki artışın belirli bir noktaya kadar eğilme ve basınç dayanımı arttırdığını belirlemişlerdir. Düşük kür sıcaklığında 72 saat kür süresi yeterli gelmekte iken yüksek kür sıcaklığında 24 saat yeterlidir. Na konsantrasyonu %8'in altında yüksek ısıda dayanım gelişimi gözlemleyememişlerdir. 45ºC sıcaklıkta 72 saat kürden sonra bile dayanım gözlemleyememişlerdir. Bu da F sınıfı küllerin belirli sıcaklık altında alkali aktivasyon sürecinin yavaşladığını göstermektedir. Yüksek mukavemete ulaşılan F sınıfı uçucu küllerin alkali aktivasyon yöntemiyle yapı malzemesi üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Kaya [37] doktora tez çalışmasında Tunçbilek Termik Santralinden elde ettiği F sınıfı uçucu kül ile Kangal Termik Santralinden elde ettiği C sınıfı uçucu külleri sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ($nSiO_2Na_2O$) kullanarak geopolimer harç üretmiştir. Isıl kür uygulanan numuneleri 28 gün havada kür ederek dayanım deneylerine tabi tutmuştur. En yüksek basınç dayanım değerini veren numune grubuna durabilite deneyleri uygulamıştır. En yüksek dayanımı F sınıfı uçucu kül ile 50,64 MPa olarak belirlemiştir. C sınıfı uçucu kül ile 13,88 MPa basınç dayanımına ulaşabilmiştir. Durabilitede özellikle rötre sonuçlarının çimento harçlarına göre düşük değerlerde kaldığını belirlemiştir.

Görür [34] doktora tez çalışmasında, Sugözü F sınıfı uçucu külünü sodyum hidroksit (NaOH) kullanarak aktive etmiştir. Farklı sodyum oranlarında harçlar hazırlayarak durabilite deneyleri için uygun karışım parametreleri olarak %14 Na oranı ve 115ºC olarak belirlemiştir. En yüksek dayanım değerlerine bu parametrelerle 118,8 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Ayrıca 55ºC sıcaklık altında numunelerin dayanım kazanmadığını belirlemiştir. Durabilite deneylerinde de yangın dayanımı, aşınma, donma çözülme değerleri çimentolu harçlara göre daha olumlu sonuçlar vermiştir.

Hamidi et al. [51], NaOH konsantrasyonunun geopolimerlerin mekanik ve içyapı özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla uçucu külü %4 ile %18 Na aralığında %2 artan oranlarda NaOH ile aktive etmişlerdir. Kür süresi olarak 24 saat, ısıl kür sıcaklığı olarak 60ºC belirlemişlerdir. Geopolimerlerin yapısını açıklamak için Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), içyapıyı gözlemlemek için Scanning Electron

Microscope (SEM) ve mekanik özellikleri belirlemek için eğilme dayanımı deneyi uygulamışlardır. FTIR ile düşük frekanslarda Si-O-Si ve Al-O-Si bağlarını, yüksek frekanslarda su moleküllerinin varlığını belirlemişlerdir. Bunlara ek olarak sodyum karbonat oluşumu da gözlemlenmiştir. Yani genel olarak geopolimer matris oluşumunda bir düzen olduğu görülmektedir. Ayrıca eğilme dayanımı değerleri, %4, 6, 8, 10 ve 12'de NaOH artışı ile artmış fakat %14, 16, ve 18'de azalmıştır. Kür süresi 24 saat, ısıl kür sıcaklığı 60ºC için optimum Na konsantrasyonunun %12 olduğunu belirlemişlerdir.

Okoye et al. [52], uçucu küllü geopolimer betonlarının silis dumanı ile ikame ederek durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Bu amaçla bir grup çimentolu kontrol grubu, bir grup %10 silis dumanı ikameli, bir grup %20 silis dumanı ikameli bir grup %100 uçucu küllü geoplimer betonları üretmişlerdir. Geopolimerleri NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı aktivatör kullanarak 72 saat 100ºC'de kür etmişlerdir. Su/bağlayıcı 0,20 NaOH 14M ve alkali/uçucu kül 0,40 olarak belirlemişler ve işlenebilirlik için süper akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Tüm numuneleri %2 sülfirik asit çözeltisine ve %5 sodyum klorür çözeltisine maruz bırakıp fiziksel görünüşünü, ağırlık kaybını ve basınç dayanım kaybını incelemişlerdir. Sülfirik aside maruz kalan numunelerde, %20 silis dumanı ile değiştirilen uçucu küllü betonlarda asit erozyonu ve bozulma gözlemlenememiş. Her numune ağırlık kaybına uğrasa da en çok kayıp kontrol numunelerinde en az kayıp %20 silis dumanı ile üretilen numunelerde görülmüştür. Basınç dayanımda en fazla kayıp kontrol numunelerinde en az %20 silis dumanı ile üretilen uçucu küllü geopolimerlerde gözlemlenmiştir. %100 uçucu küllü numunelerde dayanım kaybı fazla olmasına rağmen kontrol numunelerinden daha az bulunmuştur. Sodyum klorüre maruz kalan numunelerde %20 silis dumanı ile üretilenlerde bozulma gözlemlenmemiştir. En fazla ağırlık kaybı kontrol numunelerinde en az %20 silis dumanı ile üretilen numunelerde belirlenmiştir. Kontrol numunelerinde zamana bağlı olarak basınç dayanım kaybı artmış ve en yüksek bu grupta olmuştur. En düşük dayanım kaybını yine %20 silis dumanlı geopolimer numunelerinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Genel olarak uzun sürede durabilite özelliklerine %20 silis dumanı varlığının olumlu etkidiğini ve farklı silis dumanı oranlarında denenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Castel ve Foster [53], farklı kür koşullarında elde edilen geopolimer betonların donatı aderansını belirlemek için çekme çıkarma (pull-out) deneyi yapmışlardır. Aktivatör

olarak NaOH ve Na_2SiO_3 karışımı kullanarak F sınıfı uçucu kül cüruf karışımı bağlayıcıları aktive etmişlerdir. Numunelere iki farklı kür uygulamışlardır. İlk gruba 1 gün 80ºC fırında ve 1 gün 80ºC su banyosunda ve 28 güne kadar oda sıcaklığında, ikinci gruba 1 gün 80ºC fırında ve 6 gün 80ºC su banyosunda ve 28 güne kadar oda sıcaklığında küre tabi tutulmuşlardır. Su/bağlayıcı 0,35, NaOH molaritesi 12M, Na_2SiO_3/NaOH 2,5 olarak belirlenmiştir. Geopolimerlerin mekanik karakteristikleri kür şartlarına bağlı olarak artmakta olduğunu belirlemişlerdir. 2 gün kür edilen numunler normal portland çimentolu numuneler ile yakın aderans dayanımına sahip iken 7 gün kür edilen numuneler en yüksek değerlere ulaşmışlardır. Ayrıca geopolimerlerin prekast yapı elemanı üretiminde kullanımının uygun olabileceğini belirtmişlerdir.

Assi et al. [54], çalışmalarında aktivasyon solüsyon tipi, kür uygulaması ve uçucu kül kaynağının uçucu küllü geopolimer betonlarının basınç dayanımıyla olan ilişkisini araştırmışlardır. Geopolimer harçların mikroyapısı, yoğunluğu, su emme ve boşluk oranı incelenmiştir. İlk aktivatör karışımında sodyum hidroksit, silis dumanı ve su; ikinci karışımda sodyum hidroksit, sodyum silikat ve su kullanılmıştır. İlk karışım iki gün ortam koşullarında, iki gün 75ºC ısıl kürde, ikici karışım grubu bir gün ortam koşullarında yine iki gün 75ºC ısıl küre tabi tutulmuştur. 7 gün sonra basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Silis dumanı ile elde edilen karışımın erken dayanım değeri 105,1 MPa değerlerine ulaşmıştır. Sodyum silikat ile elde edilen karışımdan silis dumanlı karışım daha yüksek değerler vermiştir. Ayrıca farklı uçucu küllerin mikro yapı ve tane büyüklüğü değiştikçe basınç dayanımının da aynı oranda etkilendiği belirlenmiştir.

Xie ve Kayali [55], iki farklı F ve C sınıf uçucu kül kullanarak iki farklı içerikte naftalin ve polikarboksilat kökenli süperplastikleştirici kullanarak mini flow yöntemi ile işlenebilirlik değerleri üzerine iyileştirmeyi araştırmışlardır. Her iki akışkanlaştırıcı katkının da çimentolu karışımlara yaptığı etkiden geopolimerlere daha az etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Polikarboksilat kökenli katkının C sınıfı uçucu külde daha etkili olduğunu ve F sınıf küllerde düşük etki ettiğini belirtmişlerdir. C sınıfına iyi etki mekanizmasına pozitif yüklü kalsiyum iyonları sebep olmuştur. Naftalin kökenli süperplastikleştiriciler, her iki kül grubunda da benzer etki göstermiştir. Ancak polikarboksilat içeriklilerle kıyasla F sınıfında daha iyi sonuç vermekte olduğunu ortaya koymuşlardır.

Noushini ve Castel [56], çalışmalarında çeşitli kür şartlarında elde edilen geopolimer betonların boşluk yapısına bağlı olarak çeşitli iletim özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için 12 farklı kür koşulu olan 60, 75, 90ºC sıcaklık ve 8, 12, 18 ve 24 saat ısıl kür sürelerinde numuneleri sıcaklık kürüne ve bir grubu da ortam koşullarında küre tabi tutmuşlardır. Çimentolu kontrol numuneleri 23ºC suda 28 gün, geopolimerler de ısıl kür sonrası 28 güne kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksiti karışım yaparak kullanmışlardır. Üretilen numunelere basınç dayanımı, elastisite modulü, ultrases geçiş hızı, su emme, geçirgen boşluk hacmi, boşluk büyüklüğü dağılımı ve direnç ölçümü yapmışlardır. Isıl kür sıcaklığı 75ºC ve kür süresi 24 saat üzerine çıktığında basınç dayanımının 27,4 - 62,3 MPa arasında, elastisite modulünün ise 13,5 – 25,9 GPa arasında artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ortam koşullarında kür edilen geopolimerlerin basınç dayanım değeri çok düşük çıkmıştır. 75ºC'nin altında ve 18 saatten az kür sürelerinde geçirimli boşluklarda artış olduğunu belirtmişlerdir. Optimum geçirimli boşluk oluşumu 75 – 90ºC sıcaklık arasında ve 18-24 saat kür süresi arasında belirlemişlerdir. 60ºC'de kür edilen numunelerde yüksek kılcal su emme görülmüş, ısıl kür süresi ve sıcaklığı artınca azalmıştır. Rezistivite nem oranın artmasıyla artmıştır. Kontrol grubu numunelerin elektrik geçirimliliği daha yüksek olmuştur. Nem %40'ın altında iken elektrik geçirimliliği artış hızı azalmıştır. Geopolimer betonlarda basınç dayanımı 60 MPa'dan 40 MPa'a düşünce rezistivite %50 azalmıştır. Bu sonuçların geleneksel portland çimentolu betonlar gibi geopolimerlerin de kalitesinin basınç dayanım deneyleri ile değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir.

Leong et al. [57], uçucu külleri alkali hidroksitler (NaOH, KOH ya da $Ca(OH)_2$) ile sodyum silikatı karıştırarak basınç dayanım değişimini araştırmışlardır. Uçucu kül/kum oranı 1/2 seçerek çeşitli Na_2AiO_3/NaOH (KOH veya $Ca(OH)_2$) ve farklı alkali aktivatör / kül oranı belirleyerek numune hazırlamışlardır. Tüm numuneler nemini kaybetmemesi için plastik bir örtü ile kaplayıp 60ºC'de 24 saat ısıl küre tabi tutmuşlardır. Yüksek Na_2AiO_3 / NaOH (KOH) oranının yüksek basınç dayanımı vermediğini, en uygun dayanımın alkali aktivatör/kül 0,4 ve alkali aktivatör olarak NaOH yada KOH kullanarak Na_2SiO_3 / NaOH =2 ve Na_2SiO_3 / KOH =1 oranlarında elde etmişlerdir. Yüksek oksit molar değerleri yüksek basınç dayanım verememektedir. CaO/Al_2O_3, SiO_2/Al_2O_3, CaO/SiO_2 oksitleri NaOH ve KOH tipi aktivatörlerde benzer sonuçlar

vermiştir. $Ca(OH)_2$ alkali aktivatör olarak kullanıldığında NaOH ve KOH ile elde edilen dayanım değerlerinden çok düşük sonuçlar elde edildiğini görmüşlerdir. $Ca(OH)_2$ ile üretilen numunelerin NaOH ve KOH tabanlı geopolimerlerden çabuk sertleştiği gözlemlemişlerdir. Na_2SiO_3 / NaOH oranı 0,5 ve 1 olduğunda KOH tabanlı geopolimerlerin daha yüksek dayanım verdiğini fakat Na_2AiO_3 / NaOH oranının 1,5'dan büyük olması halinde NaOH tabanlı geopolimerlerin daha yüksek basınç dayanımına ulaştığı belirtilmiştir.

Helmy [58], F sınıfı uçucu kül kullanarak aralıklı kür uygulayarak basınç dayanımlarını değerlendirmiştir. Aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 karışımını değişik oranlarda kullanmıştır. Aralıklı kür yönteminde numuneler bir günde 6 saat 70ºC'de, 18 saat ortam koşullarında bırakılarak bir döngü sayılmış ve toplam dört döngü yapılmıştır. Sabit uçucu kül/kum oranında 21 farklı karışım hazırlamış ve 24, 48, 72, 96 saat ve 7 günlük basınç dayanımına bakmıştır. Aralıklı kür döngüsünün her adımında basınç dayanımında artma olduğu görülmüştür. Dayanımdaki artışın yüksek özgül ağırlıklı sodyum silikat, kullanılan NaOH'ın molar oranı, alkali/uçucu kül oranı ve H_2O/Na_2O oranı ile doğrudan orantılı olduğunu belirtmiştir.

Ma ve Ye [59], farklı oranlarda sodyum silikat çözeltisi ile hazırlanan F sınıfı uçucu küllü geopolimer pastasını 40ºC'de 7 gün boyunca kür ederek otojen ve kuruma büzülmesini araştırmışlardır. Kontrol için su/bağlayıcı 0,4 olan CEM I 42,5 çimento pastası üreterek 7 gün 20ºC'de kür etmişlerdir. Geopolimer karışımların SiO_2 ve Na_2O molar değerlerini değiştirerek su/uçucu kül 0,35 olan üç adet karışım hazırlamışlardır. SiO_2 ve Na_2O'nun molar değerleri 1'den 1,5'a kadar arttıkça basınç dayanım değerlerinde artış gözlemlemişlerdir. Yüksek SiO_2 ve Na_2O oranlarında bünyesel ve kuruma büzülmeleri de artmıştır. Alkali aktifleştirilen numunelerde otojen büzülme en fazla 1-3 gün arasında gözlemlenmiştir. Erken yaşlarda otojen büzülmeye bağlı olarak çatlak oluşumu görememişlerdir. Otojen büzülmede çimento ile alkali aktifleştirilen harçlar farklı tepki vermiştir.180 günlük kuruma büzülmelerinde çimento pastasına göre SiO_2 ve Na_2O molar değerleri 1,0-1,5 ve 1,0-1,0 olan daha düşük çıkmasına rağmen 1,5-1,5 olan alkali ile aktifleştirilen numunelerin kurumu büzülmeleri yakın çıkmıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerin SiO_2 ve Na_2O oranı arttıkça kurumu büzülmesi yükselmiş ancak ağırlık kayıpları orantılı olmamıştır. Farklı ağırlık kaybı/kuruma

büzülmesi oranının oluşmasına alkali ile aktifleştirilen numunelerin farklı boşluk yapısında oluşan kılcal basıncın olabileceğini belirtmişlerdir.

Topçu ve Toprak [5], çalışmalarında Seyitömer termik santral taban külünü sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile hazırlanan çözelti ile aktifleştirerek 4x4x16 cm numuneler üretmişlerdir. Numunelere 20 saat 75ºC'de etüvde veya 20ºC havada kür uygulamışlardır. Örneklerin 1., 7. ve 28. günde birim ağırlık, donma çözülme, ultrases ve basınç dayanımları açısından araştırmışlardır. En iyi değerleri oda sıcaklığında kür edildiğinde sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı ile elde etmişlerdir. En yüksek birim ağırlık değerini 1,59 g/cm³, en yüksek basınç dayanımını 18,51 MPa ve su emmeyi %6,58 bulmuşlardır. Kür süresi arttıkça ultrases geçiş hızının arttığını belirlemişlerdir. 80 donma-çözülme çevrimi sonucunda silikat ve hidroksit karışımı çözelti ile elde edilen harçların kütle kaybını %6,2 ve dayanım kaybını %11,5 olarak belirtmektedirler.

Ryu et al. [60], çalışmalarında alkalilerle aktive edilen uçucu küllü betonların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. F sınıfı uçucu küllerin aktivasyonunda aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Hazırlanan numunelere önce 24 saat süreyle 60ºC fırında, ardından havada 24 saat süreyle 23±2ºC'de kür uygulamışlardır. 50x50x50 mm'lik prizmatik numunelere basınç dayanımı deneyi uygulanmış ve yüksek sodyum hidroksit konsantrasyonunda erken basınç dayanım değerinin arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca alkali aktivatörlerin yüksek molaritede kimyasal değişimlerinin dayanımında etkili olduğunu ve optimum aktivatör çözeltisinin 9 molaritedeki çözelti olduğu kanısına varmışlardır.

Sarker et al. [61], F sınıfı uçucu kül tabanlı geopolimer betonların yangın dayanımı, çatlama ve pullanma özellikleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kullanılan uçucu külün 45 mikron elek bakiyesi %25'tir. Aktivatör olarak da sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Geopolimer betonlara 60 ve 80ºC buhar kürü uygulamışlardır. Normal portland çimentosu ve geopolimer betonunu 1000ºC'nin üzerinde yüksek sıcaklıklara maruz bırakmışlardır. Geopolimer betonun basınç dayanımlarını 39-58 MPa arasında elde etmişlerdir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra Portland çimentolu şahit betona göre uçucu küllü geopolimer betonunun daha az hasar gördüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca 800-1000ºC sıcaklıkta Portland çimentolu

betonlarda ciddi pullanmalar görülürken, geopolimer betonda kabarma saptamamışlardır. Genel olarak geopolimer betonlar, şahit betona kıyasla dayanımını korumuştur. Elektron mikroskobu ile yapılan taramalarda, sıcaklık artışı ile mikro yapıda hasarın arttığını, geopolimer betonunun hasar görmesindeki başlıca sebebin ise agrega ve geopolimer matrisinin sıcaklıkla farklı genleşmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Görhan ve Kürklü [62], çalışmalarında Kütahya Seyitömer Termik Santrali F sınıfı uçucu külünü kullanarak kür sıcaklık ve zamanında değişiklikler yaparak, geopolimer betonu üretmişlerdir. Çalışmalarında farklı zaman dilimi ve farklı kür sıcaklığının alkali konsantrasyonu ile ilişkisini araştırmışlardır. Bu nedenle 3M, 6M ve 9M sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi kullanmışlardır. Kür sıcaklığı olarak 65 ve 85ºC sıcaklıklar seçilmiştir. 7 gün kür süresi sonucunda birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, porozite ve su emme gibi fiziksel özellikleri ile eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, kür süresi ve aktivatör konsantrasyonu arttığında porozitenin azaldığını rapor etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımını 6M sodyum hidroksit ile üretilen geopolimer betonunda gözlemlemiş olup, maksimum 22 MPa basınç dayanımına 24 saat 85ºC kür sıcaklığında ulaşmışlardır. Genel olarak kür sıcaklığı artışının basınç dayanımı arttırdığını fakat fiziksel özellikleri önemli derecede etkilemediğini belirtmişlerdir.

Komljenovi´c et al. [63], Sırbistan'da F sınıfı uçucu küllerle elde edilen geopolimer betonların mekanik ve mikro yapılarını araştırmışlardır. Altı farklı termik santral külünü incelemişlerdir. Kullanılan uçucu küller 43 mikron elekten geçmiş olup, NaOH+Na_2CO_3, KOH, $Na_2O.nSiO_2$ ve NaOH ile aktifleştirilmiştir. 40x40x160 mm prizma numuneler üretilmiş, önce 20ºC'lik oda sıcaklığında 1 gün, ardından 6 gün 55ºC de kür edilmişlerdir. Eşit aktivatör konsantrasyonunda aktivasyon potansiyeli açısından KOH< NaOH+Na_2CO_3<NaOH< $Na_2O.nSiO_2$ şeklinde bir sonuca varmışlardır. En yüksek basınç dayanımını sodyum silikat ile 40 MPa elde etmişlerdir. Ayrıca sodyum silikat içerisinde bulunan SiO_2/Na_2O oranın artmasıyla reaksiyon sonucu ortaya çıkan Si/Al oranını arttırdığını ve dayanım değerlerinin de Si/Al oranı ile ilgili olduğunu belirlemişlerdir.

Aydın ve Baradan [64], yapmış oldukları çalışmada, kimyasal ve mineral katkı kullanımının alkalilerle aktive edilmiş cüruflu harçların özelliklerine etkisini araştırmıştır. Mineral katkı olarak, uçucu kül, silis dumanı, metakaolin kullanmış, kimyasal katkı olarak ise hava sürükleyici, köpük önleyici ve büzülme önleyici katkılar kullanmışlardır. Kimyasal katkıların işlenebilirliğe etkisinin olmadığını belirlemişler, silis dumanı ve F tipi uçucu külün işlenebilirliği olumlu etkilediğini saptamışlardır. F sınıfı uçucu külün büzülme davranışını etkilemediği belirtilmiştir. Mineral katkı olarak F sınıfı uçucu kül kullanılması halinde dayanım değerinin normal kür koşullarında 87,2 MPa ve buhar kürü uygulanması halinde 90,7 MPa dolaylarında olduğunu belirlemişlerdir.

Ariffin et al. [65], çalışmalarında uçucu kül ve palmiye yağı külü ile elde edilmiş geopolimer betonlarını 18 ay süreyle %2 sülfürik aside maruz bırakarak durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Karşılaştırma yapabilmek için portland çimentosu ile şahit numuneler üretmişlerdir. Çalışmada, basınç dayanım, kütlesel değişim ve mikro yapıdaki bozulmaları değerlendirmişlerdir. Malezya'da elde edilen uçucu külü ve palmiye yağı külünü 45 mikron altında kullanmışlardır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Ayrıca çalışabilirliği kolaylaştırması için süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi ilave etmişlerdir. 100x100x100 mm ebatlarında küp numuneler üreterek 28ºC oda sıcaklığında 28 gün bekletmişlerdir. Şahit portland çimentosu ile elde edilen numuneler 28 gün suda kür edilmiştir. Sonuç olarak, 18 ay sonunda sülfürik aside maruz kalan portland çimentolu numunelerin kütle kaybı %20 iken, küllerle yapılan geopolimer betonun kütle kaybı %8 olarak bulunmuştur. Basınç dayanım kaybı geopolimer betonunda %35 olurken, şahit betonda bu oran %68 olarak bulunmuştur.

Olivia ve Nikraz [66], çalışmalarında uçucu küllerle elde edilen geopolimer betonunun mekanik ve durabilite özelliklerine en uygun karışımın Taguchi metodu ile optimizasyonunu araştırmışlardır. Agrega içeriği, uçucu kül alkali solüsyon oranı, sodyum hidroksit ve sodyum silikat oranı ve kür koşullarının belirlenmesi için dokuz tip karışım seçmişlerdir. 28 günde geopolimer betonu ile 55 MPa basınç dayanımına kadar ulaşmışlardır. Malzeme olarak F sınıfı uçucu kül, üç tip agrega ve aktivatör olarak da sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonu kullanmışlardır. Geopolimer betonu dayanımın maksimum olması için en uygun karışımı Taguchi metodu ile

belirlemişlerdir. Geopolimer betonlarına üç farklı buhar kürü uygulamışlardır. Karışımlarda zamanla basınç dayanımda artış görülmüş ve 28 gün sonunda en yüksek basınç dayanımı 54,89 MPa ve en düşük ise 29,71 MPa olarak bulmuşlardır. Çekme dayanımı, kontrol numunelerine göre %8-12 daha büyük ve elastisite modulü %14,9-28,8 daha düşük bulmuşlardır. Genel olarak geopolimer betonunun mekanik özelliklerinin normal portland çimentolu betondan daha iyi olduğunu ve ayrıca deniz suyunda ıslanma-kuruma döngülerine geopolimer betonunun daha dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir.

Zhu et al. [67], geopolimer betonunda kullanılan kütlece sıvı/katı oranına bağlı olarak porozitenin değişimi ve buna bağlı olarak klor penetrasyonunda oluşan değişim ile uçucu kül ile %40'a varan cüruf değişiminde alkali ile aktive edilmiş uçucu küllerin durabilitesindeki etkinin ortaya çıkarılmasını amaçlamışlardır. Bunun için, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanmışlar, geopolimer betonunu 1 gün 20ºC %95 nemde, 2 gün 65ºC'de kapalı küre ve 14 gün 20ºC'de %95 nemde küre tabi tutmuşlardır. Çimento harcı ile hazırlanan şahit numunelere ise 1 gün 20ºC'de %95 nemde, 14 gün 50ºC su banyosunda kür uygulamışlardır. Basınç dayanımı için 20x20x20 mm küp numune, klor penetrasyonu için de ø20x80 mm silindir numuneler hazırlanmış ayrıca su emme deneyi ve SEM analizleri de yapmışlardır. Harçların uygun işlenebilirliği için sıvı/katı oranını kütlece 0,6, klor penetrasyonunun etkisini araştırmak için sıvı/katı oranı 0,7-0,8 arasında, %20-40 oranında uçucu kül-cüruf yer değişimi harçlarında sıvı/katı 0,7 seçmişlerdir. Deneyler sonucunda, doymamış alkali ile aktive edilen uçucu küllerin klor geçirgenliğini portland çimentosu harcından daha yüksek bulmuşlardır. Sıvı/katı oranının 0,8'den 0,6'ya düşmesi klor geçirgenliğini %40-60 oranında azaltmıştır. Sabit sıvı/katı oranı 0,7 seçildiğinde uçucu kül-cüruf değişiminde porozitenin çok fazla değişmediği fakat boşluk çapını düşürerek boşluğun eğriliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Özellikle doymamış alkali ile aktive edilen uçucu küllerin betonda donatıya klor penetrasyonuna sebep verecek olmasından dolayı durabilite açısından düşünülmesi gereken bir özellik olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca poroziteyi düşürmek için su miktarını azaltacak süper akışkanlaştırıcılar kullanılmasını ve boşluk özelliklerini iyileştirmek için etkili miktarda cüruf eklenmesini önermektedirler. Uçucu külün iri olması halinde aktivatör miktarının arttığını ve porozitenin olumsuz etkilendiğini, bununda klorun donatıya ulaşarak korozyon oluşmasına yol açabileceğini

belirtmişlerdir. Yüksek fırın cürufunun uçucu kül ile yer değişimi yapması halinde yüksek kalsiyum kaynağı sağlamasına yol açtığı ifade edilmiştir.

Jun ve Oh [68], Kore'de 6 farklı F sınıfı uçucu külü kullanarak geopolimer betonu üretmişler ve bu betonların mekanik ve mikro yapılarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmayı yapabilmek için uçucu küle XRF (X-ray fluorescence) analizi, geopolimer numunelerine ise basınç dayanımı deneyi, XRD (X-ray diffraction) ve FE-SEM (Field emission scanning electron microscopy) analizleri yapmışlardır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanmışlardır. Elde edilen geopolimer harçlarını 5 dakika oda sıcaklığında, 24 saat 60ºC'de kür ettikten sonra, deney yapılana kadar nem kabında 23±2ºC'de %99 nemli ortamda tutmuşlardır. Basınç dayanımı deneyi için ise numuneleri 7 ve 28 gün küre tabi tutmuşlardır. XRD ve SEM/EDS deneyleri için 28 günlük numuneler kullanılmıştır. Sonuç olarak; en yüksek basınç dayanımını 9,93 MPa olarak SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 toplam oksit yüzdesi en az olan uçucu kül numunelerinde bulmuşlardır. Basınç dayanım değerlerinde farklılıklar olmasına rağmen aktive edilmiş örneklerin mikro yapılarında küçük farklılıklar olduğunu gözlemlemişler ve aktive olmayan tanelerden dolayı boşlukların bulunduğunu belirtmişlerdir.

Al Bakri et al. [69], uçucu küllü geopolimer betonlarına genel bir bakış olması açısından çeşitli çalışmaları taramışlar ve bazı sonuçları derleyerek ortaya aktivasyon çalışmalarına yol gösterici bilgiler sunmuşlardır. Buna göre portland çimentolu betonlara göre geopolimer betonlarının daha iyi dayanım ve dayanıklılık özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir. Sıcaklığın artmasıyla polimerizasyonun daha hızlı gerçekleştiğini ve geopolimer betonlarının basınç dayanımının yaklaşık %70'ini kürün ilk 3-4 saatte kazandığını belirtmişlerdir. Suyun artmasıyla geopolimer betonunda da diğer betonlarda olduğu gibi porozitenin arttığını ifade etmişlerdir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat miktarının artmasıyla harç kıvamının ise azaldığını belirtmişlerdir. İşlenebilirliği iyileştirmek için ekstra su veya süper akışkanlaştırıcı ilave edilebileceğini ancak süper akışkanlaştırıcı kullanımının basınç dayanımı değerini düşürdüğünü ifade etmişler, bu nedenle su ilavesinin basınç dayanımına daha az olumsuz etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Basınç dayanımının kür sıcaklığı ve kür süreleri ile doğrudan ilişkili olduğunu, 60-90ºC'lik kür sıcaklığı ve 24-72 saatlik kür süresi ile 40-50 MPa mertebesinde basınç dayanım değerleri elde edildiğini belirtmişlerdir. 43 μm'dan daha düşük uçucu küllerin basınç dayanımı açısından daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir.

En yüksek basınç dayanımın, aktivatör olarak sodyum silikatın kullanılması halinde elde edildiği ifade edilmiştir. Sonuç olarak, geopolimer betonların basınç dayanımı, olumsuz çevresel etkiler, işlenebilirlik ve yüksek sıcaklığa maruz kalma gibi özellikler açısından normal betonlara göre daha olumlu özellikler göstermekte olduğu belirtilmiştir.

Rashad ve Zeedan [70], sodyum silikat kullanılarak aktive edilen, aktivatör içeriği %20, %30 ve %40 oranlarında değişen uçucu küllü harçların farklı sıcaklıklarda basınç dayanımı değişimini incelemişler ve 200ºC ile 1000ºC arasında değişen yüksek sıcaklıklara maruz bırakarak normal portland çimentosu ile karşılaştırmışlardır. Çalışma için özgül ağırlığı 2,4 olan F sınıfı uçucu kül ve CEM I 42,5 N Portland çimentosu ile aktivatör olarak sıvı sodyum silikat kullanmışlardır. Sıvı/katı oranını 0,35 olarak seçmişlerdir. İçerisindeki cam suyu oranı %20, %30 ve % 40 olan üç adet %100 uçucu küllü aktive edilmiş harç ve kontrol için portland çimentosu harcı hazırlamışlar ve geopolimer harcını 60ºC'de 2 gün kür etmişlerdir. Basınç dayanımı deneyi için kalıptan çıkarılan numunelerin 3, 7 ve 28 günlük dayanım değerlerini araştırmışlardır. 28 günlük numunelerin bir kısmını, etüvde kurutarak 2 saatte 200ºC'den 1000ºC'ye çıkacak şekilde termal şoka maruz bırakmışlardır. Ayrıca numunelerin pH ölçümlerine bakarak iç özellikleri hakkında bilgi edinmişlerdir. Deneyler sonucunda alkali ile aktive edilen uçucu küllü harçların normal portland çimentosuna göre yüksek sıcaklığa daha dayanıklı olduğunu belirlemişlerdir. Aktivatör konsantrasyonu arttıkça ilk günkü ve kalıcı dayanımın arttığını ortaya koymuşlardır. Fakat alkali konsantrasyonu arttıkça basınç dayanım artsa da yangın sonrasına göre bağıl dayanım azalmıştır. Yüksek konsantrasyonda (%40) 47,28 MPa, yangından sonra (1000ºC) 33,35 MPa dayanım elde edilirken düşük konsantrasyonda (%20) 5,45 MPa, orta seviye konsantrasyonda (%30) 15,57 MPa dayanım elde etmişlerdir. Fakat yangın sonrası (1000ºC) düşük konsantrasyonda 36,29 MPa, orta seviye konsantrasyonda ise 40,27 MPa dayanım değeri elde edilmiştir. Ancak termal şok etkisi için tüm konsantrasyon tipleri normal portland çimentosundan daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca aktivatör konsantrasyonu arttıkça termal şok dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. İçyapının pH değeri portland çimentolu numunelerde sıcaklık sonrası azalırken, uçucu külle aktive edilen numunelerde 600ºC'den sonra hafif düşüşe yol açmıştır. Aktivatör konsantrasyonu

arttıkça pH değeri arttığı belirtilmektedir. Bu artış da donatı üzerinde pasif bir tabaka oluşturarak donatının korozyonunu önlemeye yardımcı olduğunu belirtmektedirler.

Criado et al. [71], F sınıfı uçucu küllerin aktivasyonu sonucu ortaya çıkan N-A-S-H jeli ve zeolitlere küçük miktar sülfatın (SO_4) etkisini araştırmışlardır. Sodyum oksit oranı yaklaşık %20 olan sodyum silikat ve sodyum hidroksitten oluşan sıvı/katı oranı 0,4 olan üç ayrı solüsyon hazırlamışlardır. Üretilen numuneleri 8 saat 85ºC fırında kür etmişler ve 7, 28 ve 180 günlük basınç dayanımlarını incelemişlerdir. Sodyum sülfat, uçucu kül ağırlığının %2,5'u kadar ilave etmişlerdir. Sonuçlar değerlendirildiğinde sodyum sülfat reaksiyonları azaltmış ve basınç dayanımı düşürmüştür. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanıldığında sülfatın etkisinin daha fazla olduğunu ve sülfatın varlığının yeni bileşimlerin oluşumuna sebep olmadığını gözlemlemişlerdir. Gözeneklerin içerisinde sülfatın varlığı N-A-S-H jeli oluşumuna olumsuz etki ederek jel oluşumunu geciktirmekte ve bu durum ortamdaki pH değerinin düşmesine sebep olarak reaksiyon yoğunluğunu azalttığını gözlemlemişlerdir.

Kumar et al. [72], uçucu külde tane dağılımının aktivasyon harçlarına olan etkisini araştırmışlardır. 40.37, 23.64, 10.33 ve 2.98 μm boyutunda küller elektrostatik yöntemle toplanmış, 6M NaOH ile aktive ederek 60°C'de kür uygulamışlardır. Bütün fiziksel testlerde sıvı/katı oranını 0,35 olarak kullanmışlardır. 24 saat süreyle 60°C'de kür edilen numuneler basınç dayanımı için 27±2°C'de bekletilerek 3, 7, 14 ve 28 günlük deney sonuçları alınmıştır. Geopolimerizasyon ve mikro yapı hakkında bilgi alabilmek için ısı iletim kalorimetresi (ICC), X-ray difraktometri (XRD), elektron mikroskobu ile tarama (SEM –EDS) ve foruier kızılötesi dönüşüm spektroskopisi (FTIR) kullanmışlardır. Sonuç olarak farklı tane boyutundaki uçucu küllerin farklı kimyasal ve mineralojik yapıya sahip olduğunu, SiO_2/Al_2O_3 oranının inceliğin artmasıyla arttığını, geopolimer reaksiyonu oluşumu ile uçucu külün silis oranı arasında ilişki olduğunu belirtmektedirler. Çok ince taneli 10.33 ve 2.98 μm çapındaki uçucu küllerde daha fazla reaksiyon ürünü elde etmişlerdir. Bununla yüksek sıcaklıkta erken mukavemet gelişiminin yüksek olduğunu açıklamaktadırlar. Basınç dayanımı, geopolimerizasyon reaksiyonları ve mikro yapının SiO_2/Al_2O_3 oranı ile doğrudan etkilendiğini belirtmektedirler. Elektron mikroskobu görüntülerinde en iyi tane dağılımının ince küllerde oluştuğunu ve iri taneli küllerde reaksiyona girmeyen tanelerin olduğunu saptamışlardır.

Fernández-Jiménez ve Palomo [73], çalışmalarında uçucu külü sodyum hidroksit ile aktive ederek 85ºC'de 24 saat kür etmişlerdir. Basınç dayanımını 35-40 MPa arasında belirlemişlerdir. Karışıma sodyum silikat da ilave edildiğinde, basınç dayanımının 90 MPa'a kadar yükselmekte olduğunu belirtmektedirler.

Vijai et al. [74], yüksek miktarda alüminyum ve silis içeren uçucu kül ile geopolimer elde etmiştir. Geopolimer çimentosunun, yoğunluğu ve basınç dayanımı üzerinde çalışılmıştır. Aynı zamanda, uçucu kül tabanlı geopolimer çimentoların farklı kürlerde basınç dayanımları incelenmiştir. Uçucu külle birlikte, agrega kullanılmış, aktivatör olarak ise sodyum silikat, sodyum hidroksit su ile birlikte katılarak geopolimer beton üretilmiştir. Numuneler, ortam sıcaklığında ve 60ºC de ayrı ayrı kür edilmiştir. Sıcak ortamda kür edilen numuneler daha yüksek dayanım vermiş olup, 30 MPa mertebesinde dayanıma ulaşılmıştır.

Sathonsaowaphak et al. [75], yaptıkları çalışmada, linyitten elde edilen uçucu külü geopolimer üretmede kullanmışlardır. Aktivasyonda sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Küllerin inceliği, alkali derişimi, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı gibi parametrelerin dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Linyit külünden elde edilen geopolimerlerin 20 ile 60 MPa aralığında dayanıma ulaştığı bildirilmiştir.

Oh et al. [76], Kore'de termik santralden elde ettikleri kimyasal ve fiziksel özellikleri birbirinden farklı iki ayrı F sınıfı uçucu külü NaOH ile aktifleştirerek 60ºC de kür ederek çözelti/uçucu kül oranını 0,60 olarak uygulamışlardır. Çalışma kapsamında alkalilerle aktive edilen ürünlere XRD analizi, basınç dayanım deneyi, partikul büyüklüğü dağılım analizi, XRF analizi, x-Ray analizi, nükleer manyetik rezonans (MAS NMR) analizi uygulanmıştır. Birinci grup numunelerin (FA1) Si/Al= 3, Ca/Si= 0,1, ikinci grup numunelerin (FA2) Si/Al=2,6, Ca/Si=0,4 olarak belirlenmiştir. FA1 grubu numunelerin 1 günlük basınç dayanımı 1,3 MPa iken FA2 grubunda 6,6 MPa olarak belirlenmiştir. FA1 grubu numunelerin 28 günlük basınç dayanımı 8,7 MPa iken FA2 grubunda 41,6 MPa olarak tespit edilmiştir. İkinci grupta dayanım değerinin yüksek çıkmasının sebebi olarak tane boyutunun küçülmesiyle aktivasyonun arttığını belirlemişlerdir. FA2 grubu numunelerin ilk günkü dayanımlarının yüksek çıkmasında da CaO oranının yüksek olmasının neden olduğu belirtilmektedir.

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında iki farklı F sınıfı uçucu kül ile geopolimer harcı üretilmiştir. Alkali aktivasyon ile üretilen uçucu küllü geopolimer harçlar üzerinde uçucu kül tipi, aktivatör tipi, sodyum konsantrasyonu, ısıl kür sıcaklığı ve ısıl kür süresi gibi parametrelerinin dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Uçucu kül olarak F sınıfı iki farklı Sugözü ve Çatalağzı Termik santrali uçucu külleri kullanılmıştır. Aktivatör tipi olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) ayrı ayrı kullanılmıştır. Sodyum (Na) oranı %6, %9, %12 ve %15 olarak belirlenmiştir. Çalışmada uygun parametrelerin belirlenmesi için ısıl kür sıcaklıkları 60ºC, 80ºC, 100ºC ve ısıl kür süreleri ise 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 saat seçilerek dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda ısıl kür süresi 24 saat ve ısıl kür sıcaklığı 100ºC seçilerek durabilite deneyleri yapılmıştır. Malzemeler, ön deneme çalışmaları, deneylerin tasarımı, karışım oranları, harç üretimi ve kürü ve deney yöntemleri aşağıda açıklanmıştır.

2.1. Malzemeler

2.1.1. Uçucu Küller

Çalışmada, Adana ili Yumurtalık ilçesi Sugözü köyünde bulunan Sugözü Termik Santrali'nde ithal kömür yakılarak elde edilen F sınıfı uçucu külü ve Zonguldak ili Çatalağzı Beldesi Işıkveren mevkiinde bulunan taşkömürü yakılarak elde edilen Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu külleri kullanılmıştır.

Temin edilen uçucu küller laboratuvarda 200 μm'lik elekten elenerek kullanılmıştır (Şekil 2.1). Sugözü uçucu külünün 28 günlük puzolanik dayanım aktivite endeksi %87 ve Çatalağzı uçucu külünün 28 günlük puzolanik dayanım aktivite endeksi %83'tür.



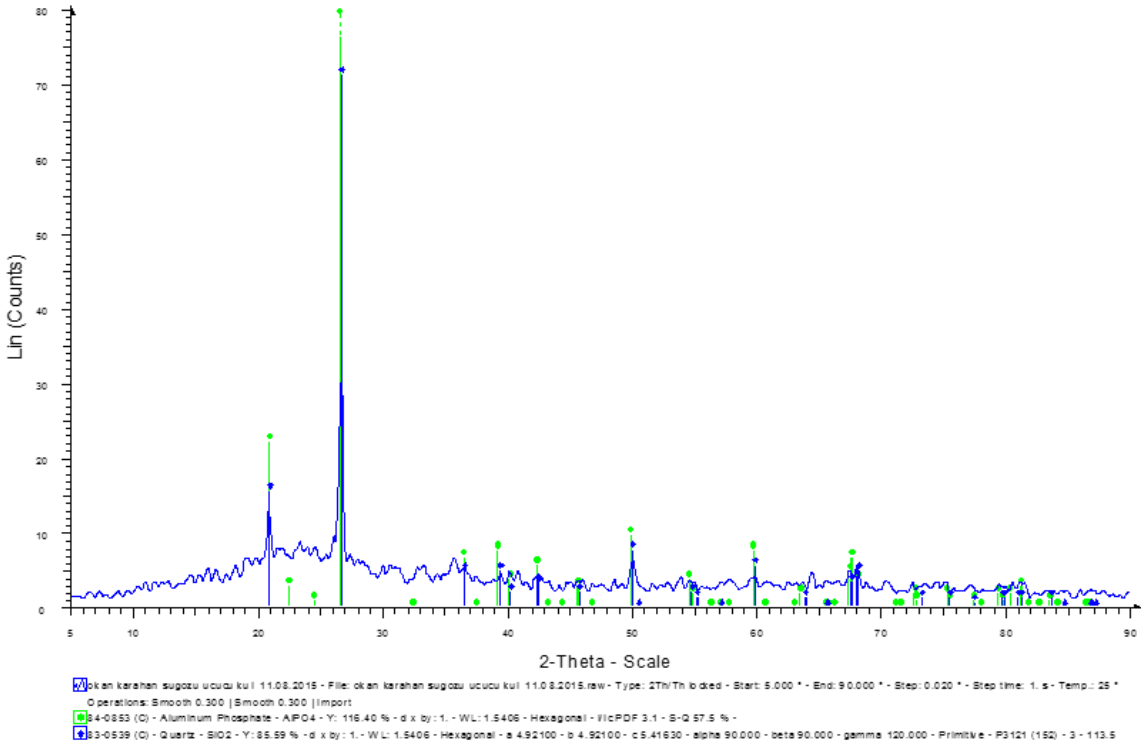
Şekil 2.1. Uçucu kül içerisinde yer alan iri taneler

Sugözü ve Çatalağzı uçucu külleri $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ miktarı kütlece %70'den fazla ve CaO oranı %10'dan az olduğu için ASTM C618'e göre düşük kireçli F sınıfı uçucu kül sınıfında yer almaktadır. Aynı zamanda bu uçucu küller, TS EN 197-1'e göre CaO içeriği %10'dan az oldukları için V (Silissi) uçucu kül sınıfında yer almaktadırlar.

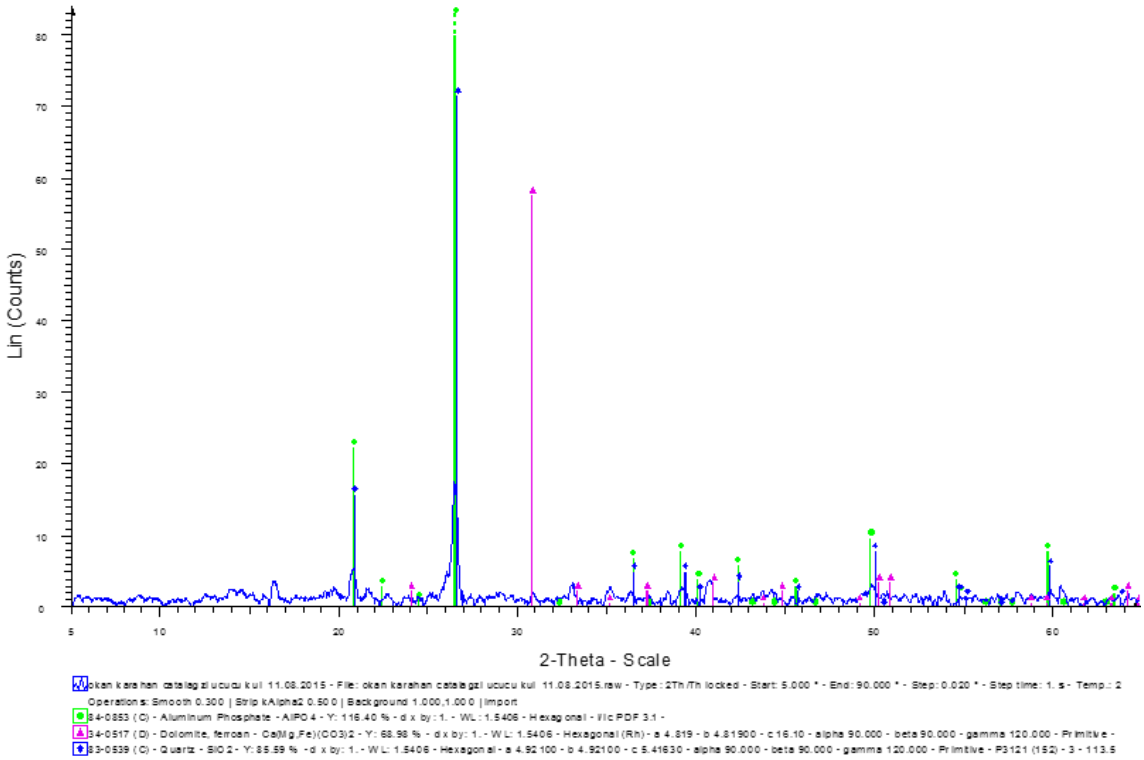
Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) tarafından yapılan, Sugözü ve Çatalağzı uçucu külü fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Erciyes Üniversitesi TAUM tarafından yapılan Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin XRD analizleri ise Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te sunulmuştur.

Tablo 2.1. Sugözü ve Çatalağzı uçucu külü kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal ve Fiziksel Özellikler	**Sugözü Uçucu Külü**	**Çatalağzı Uçucu Külü**	**TS EN 450-1**	**ASTM C618**	**TS EN 197-1**
			V	**F**	**V**
SiO_2 (%)	60,51	54,68			
Al_2O_3 (%)	21,69	25,94			
Fe_2O_3 (%)	7,85	6,81			
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq$ %70	90,05	87,43	≥ 70	≥ 70	
K_2O (%)	2,58	3,97			
Na_2O (%)	0,92	0,39			
MgO (%)	1,65	1,55	< 4		
CaO (%)	1,52	3,12			
SO_3 (%)	0,53	0,34	< 3	< 5	
Cl^- (%)	0,010	0,0043	< 0,10		
Serbest CaO (%)	0,183	0,02	< 2,5		
Kızdırma Kaybı (%)	2,42	3,30	< 5	< 6	< 5
Yoğunluk (kg/m³)	2290	2130			
> 45 Mikron (%)	18,47	29,0		< 34	



Şekil 2.2. Sugözü uçucu külü XRD analizi



Şekil 2.3. Çatalağzı uçucu külü XRD analizi

2.1.2. Çimento

Bu çalışmada, kontrol numunelerinin üretimi için TS EN 197-1 standardı ile uyumlu CEM I 42,5R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal analizleri aşağıda Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'de yer almaktadır.

Tablo 2.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellikler	Değerler	TS EN 197-1 Sınırları
Blaine, cm²/gr	3561	-
Özgül Ağırlık	3,15	-
90 Mikron elek üstü, %	0,3	-
Priz Başlangıcı, dak	144	60 Min.
Priz Sonu, dak	215	600 Maks.
Hacim Genleşmesi, mm	1,0	10 Maks.
2 günlük dayanım, MPa	27,8	20 Min.
7 günlük dayanım, MPa	43,7	-
28 günlük dayanım, MPa	54,7	42,5 Min.62,5 Maks.

Tablo 2.3. Çimentonun kimyasal özellikleri

Bileşenler	Değerler, %	TS EN 197-1 Değerleri, %
SiO_2	18,80	≥ 50
CaO	62,90	
Al_2O_3	5,81	-
Fe_2O_3	2,61	-
MgO	1,29	5,0 Maks.
SO_3	2,74	4,0 Maks.
Klorür (Cl^-)	0,033	0,1 Maks.
Toplam Alkali, $Na_2O+0,658K_2O$	0,74	-
Kızdırma Kaybı	3,27	5,0 Maks.
Çözünmeyen Kalıntı	0,51	5,0 Maks.
Serbest CaO	0,70	-

2.1.3. Standart Kumu

Deneylerde ince agrega olarak Şekil 2.4'ten de görüleceği üzere, Limak Batı Çimento Sanayi Trakya Şubesi'nden temin edilen TS EN 196-1'e [77] uygun, maksimum tane çapı 2,00 mm olan 1350 g'lık paketler halinde satışa sunulmuş CEN Standart Kumu kullanılmıştır. Referans kum üzerinde yapılan özgül ağırlık ve su emme deneyleri sonucunda kuru özgül ağırlığı 2,63, doygun kuru yüzey özgül ağırlığı 2,65 ve su emme oranı %0,57 olarak belirlenmiştir. Referans kum elek analizi deney sonuçları ve TS EN 196-1 sınır değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. CEN standart kumu elek analizi ve sınır değerleri [77]

Özellik	**Elek Çapı (mm)**					
	2,00	**1,60**	**1,00**	**0,50**	**0,16**	**0,08**
Elek Üstü Kalan (%)	0,0	3,1	32,7	68,9	87,1	99,6
TS EN 196-1 Sınır Değerleri (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1



Şekil 2.4. Numune üretiminde kullanılan TS EN 196-1'e uygun standart kum

2.1.4. Aktivatörler

Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) ayrı ayrı iki farklı aktivatör olarak kullanılmıştır. Piyasada kostik olarak bilinen NaOH'in, ucuz olması ve kolay temini önemli avantajıdır. Beyaz pul veya boncuk şeklinde, su ile ısı vererek çözünür. Nemden etkilenip bozulabilmektedir. Potasyum hidroksit ile aynı özellik gösterir fakat daha az yakıcı bir bazdır. Diğer aktivatör olarak kullanılan Na_2SiO_3, piyasada cam suyu olarak da bilinen suda çözünen bir cam türüdür. Seramik sanayi

başta olmak üzere birçok sektörde kullanılır. Kolaylıkla gerekli miktarda temini mümkündür [78].

Aktivatör olarak kullanılan malzemeler, Koruma Klor Alkali Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den sodyum hidroksitler 25 kg'lık torbalar halinde pul pul olarak, sodyum silikat sıvı olarak 30 lt'lik bidonlarla temin edilmiştir ve Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Sodyum hidroksite ait analiz sonuçları Tablo 2.5'te, sodyum silikata ait analiz sonuçları ise Tablo 2.6'da sunulmuştur.



Şekil 2.5. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat

Tablo 2.5. Sodyum hidroksit (NaOH) analiz değerleri

Sodyum Hidroksit (NaOH)				
Analizler	**Spesifikasyonlar**	**Birim**	**Sonuçlar**	**Analiz Yöntemi**
Görünüş	Beyaz pul şeklinde	-	Beyaz pul	Görsel
Sodyum Hidroksit	Min, 98,00	%	98,27	Titrimetrik
Sodyum Karbonat	Maks. 0,40	%	0,35	Titrimetrik
Sodyum Klorür	Maks. 0,10	%	0,020	Titrimetrik
Demir (Fe)	Maks. 15	ppm	13,17	Spektrofotometre

Tablo 2.6. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) analiz değerleri

Sodyum Silikat (Na_2SiO_3)				
Yapılan Analizler	**Spesifikasyonlar**	**Birim**	**Sonuçlar**	**Analiz**
Görünüş	Renksiz berrak	-	Renksiz berrak	Görsel
Sodyum Oksit, Na_2O	12,0 - 13,5	%	13,14	Titrimetrik
Silis, SiO_2	23,5 - 27,0	%	25,75	Volumetrik
Bome (20°C)	Min 43,00	°B	43,00	Bomemetre
Modül	Min 2,00	-	2,02	-
Dansite (20°C)	1,422 – 1,436	g/cm³	1,422	Dansimetre

2.1.5. Su

Numune üretiminde, şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. TS EN 1008 [79] standardında karışım suyu olarak içilebilen suların kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir.

2.2. Ön Deneme Çalışmaları

Çalışmada yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmek için bir takım karışım geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu kapsamda sodyum hidroksit ile hazırlanan karışımlarda su/bağlayıcı oranı üzerinde değişim yapılarak, sodyum silikat ile hazırlanan karışımlarda su/bağlayıcı oranı ve MS (SiO_2/Na_2O) değerlerinde değişim yapılarak karışımlar hazırlanıp mekanik dayanımları incelenerek en uygun karışım oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Deneme çalışmaları esnasında literatürdeki genel eğilime de dikkat edilerek 24 saat 100ºC'de kür veya 48 saat 80ºC'de kür süresi ve sıcaklıkları uygulanmıştır.

Sodyum hidroksit ve sugözü külü ile yapılan çalışmalarda %15 Na oranının üstünde 0,30 su/bağlayıcı oranında çözelti hazırlanamamış ve kristalleşmiştir. %18 Na ile su/bağlayıcı oranı 0,35 ile harç hazırlanabilmiş ancak su/bağlayıcı 0,30 ile %15 Na değerinde 113 MPa basınç dayanım değerine ulaşılırken %18 Na ve su/bağlayıcı 0,35 ile 83 MPa basınç dayanım değerine ulaşılabilmiştir. Böylece 0,30 su/bağlayıcı ve %15 Na değerinin daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiş olup ayrıca %18 Na oranında su/bağlayıcı 0,30 seçildiğinde çözelti kristalleştiği için en yüksek Na oranının %15 olabileceği kanısına varılmıştır.

Sodyum silikat ve sugözü külü ile hazırlanan karışımlarda MS (SiO_2/Na_2O) değeri ve su/bağlayıcı oranları değiştirilerek ön denemeler yapılmıştır. MS değeri yükseldikçe erken priz alma ve kalıba yerleşememe problemleri oluşmaktadır (Şekil 2.6). MS değerinin yükselmesi halinde su/bağlayıcı oranı da artmasıyla ancak karışım hazırlanabilmektedir. Fakat su/bağlayıcı oranı 0,30 ve MS değeri 0,2 ile elde edilen dayanım değerleri, yüksek MS ve su/bağlayıcı oranlarında elde edilememiştir. %15 Na oranında MS=0,5 için çözelti katılaştığı için numune dökülememiştir. Ancak %15 Na-Na_2SiO_3- 80°C- MS=0,4, S/B=0,30 değerlerinde 49 MPa gibi bir basınç dayanım değeri alınmıştır. %15 Na- Na_2SiO_3- 100°C-MS=0,3, S/B=0,35 ile 56,9 MPa basınç dayanımına ulaşılabilmiştir. %15 Na-Na_2SiO_3-100°C-MS=0,2, S/B=0,35 ile 78,3 MPa basınç dayanım değeri alınırken, %15 Na- Na_2SiO_3- 100°C-MS=0,2, S/B=0,30 ile 110 MPa gibi oldukça yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Deneme çalışmaları sonucunda erken priz almadan ve çözelti kristalleşmeden yüksek dayanım elde edilen MS değeri 0,20 ve su/bağlayıcı oranı 0,30 olarak belirlenmiştir**.**

Çatalağzı külünün tane yapısı sebebiyle su ihtiyacı Sugözü külüne göre daha fazladır. Su/bağlayıcı oranı 0,30, 0,32 ve 0,35 olarak NaOH ile aktive edilerek üç farklı oranda denemeler yapılmıştır. 0,35 oranında karışımın kalıba yerleşmesi iyi, fakat 0,30 oranına göre dayanımı oldukça düşük çıkmıştır. 0,30 oranında kalıba yerleşmede problem olmamış fakat işlenebilirlik yok denecek kadar az olduğu görülmüştür.

Sodyum silikat ile yapılan deneme karışımları ağırlıklı olarak Sugözü uçucu külü ile yapılmıştır. Çatalağzı ve Sugözü külü MS oranlarına benzer tepki vermiştir. MS değeri yükseldikçe erken priz alma hızlanmış ve dayanım oldukça düşmüştür.

Tüm ön deneme çalışmaları sonucunda yüksek dayanım değerleri ve erken priz olmadan harç hazırlama durumları da göz önüne alınarak NaOH ile aktive edilecek küller için en uygun su/bağlayıcı oranı 0,30 olarak belirlenmiştir. Na_2SiO_3 ile aktive edilecek küller için ise çözelti kristalleşmesi ve harçlarda erken priz oluşmadan yüksek dayanım değerlerine ulaşılabilen su/bağlayıcı 0,30 ve MS değeri 0,2 seçilerek karışım hazırlanmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.6. Ön deneme harçlarında erken priz alma ve kristalleşme problemi

2.3. Deneylerin Tasarımı

Ön çalışmalar sonucunda yüksek dayanımlı ve dayanıklı geopolimer numuneleri elde edilmesi amacıyla en uygun su/bağlayıcı oranı ve MS oranı belirlenmiştir. Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalar iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, taze harca yapılan işlenebilirlik, numunelerin ağırlığına bağlı olarak kontrolünün yapılabilmesi için birim ağırlık ve eğilme ile basınç dayanım deneylerinden oluşmaktadır. İkinci aşamada ise ilk aşama sonucu belirlenen yüksek dayanım değerleri veren parametreler ile üretilen numunelere yapılan durabilite deneylerini kapsamaktadır. Bu amaçla ultrasonik hız, su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, basınç altında su işleme derinliği, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, hızlı klorür geçirimliliği, karbonatlaşma, rötre, aşınma direnci, yangına dayanıklılık ve hızlandırılmış korozyon olmak üzere durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım ve durabilite deney sonuçlarında tablo ve grafik üzerinde Sugözü külü (SG), Çatalağzı külü (ÇA), sodyum hidroksit (NaOH) NH, sodyum silikat (Na_2SiO_3) NS şeklinde kısaltılarak verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki aşamalarla gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Dayanım Deneylerinin Tasarımı

i. Su/bağlayıcı ve MS oranını belirlemek için bir dizi ön deneme karışımları yapılmış ve yukarıda Bölüm 2.2.'de özetlenmiştir. Çalışma başlangıcında belirlenen %6, %9, %12 ve %15 Na miktarları referans alınarak üretilen harçlarda su/bağlayıcı oranı 0,30 olarak belirlenmiştir. Ayrıca sodyum silikat ile dökülecek numunelerin MS oranı (SiO_2/Na_2O) 0,20 seçilmiştir. Bunun sebebi silikat ile dökülen harçların priz almadan 0,30 su/bağlayıcı oranında rahatça üretilebildiği MS değeri deneme karışımları sonucu 0,20 ve altında çıkmasıdır.

ii. Sugözü uçucu külünü sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum oranı (%6, %9, %12 ve %15), 3 farklı ısıl kür sıcaklığı (60°C, 80°C, 100°C) ve 7 farklı ısıl kür süresi (3, 6, 12, 24, 48, 72, 96) esas alınarak 12 grup numune üretimi yapılmıştır.

iii. Sugözü uçucu külünü sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum oranı (%6, %9, %12 ve %15), 3 farklı ısıl kür sıcaklığı (60°C, 80°C, 100°C) ve 7 farklı ısıl kür süresi (3, 6, 12, 24, 48, 72, 96) esas alınarak 12 grup numune üretimi yapılmıştır.

iv. Çatalağzı uçucu külünü sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum oranı (%6, %9, %12 ve %15), 3 farklı kür sıcaklığı (60°C, 80°C, 100°C) ve 7 farklı kür süresi (3, 6, 12, 24, 48, 72, 96) esas alınarak 12 grup numune üretimi yapılmıştır.

v. Çatalağzı uçucu külünü sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum oranı (%6, %9, %12 ve %15), 3 farklı kür sıcaklığı (60°C, 80°C, 100°C) ve 7 farklı kür süresi (3, 6, 12, 24, 48, 72, 96) esas alınarak 12 grup numune üretimi yapılmıştır.

vi. Portland çimentolu harçlar ile uçucu küllü geopolimer harçların kıyaslanması ve merak ettiğimiz için kontrol grubu olarak PÇ CEM I 42,5R sınıfı ile 3 farklı kür sıcaklığı (60°C, 80°C, 100°C) ve 7 farkı kür süresi (3, 6, 12, 24, 48, 72, 96) esas alınarak 3 grup numune üretimi yapılmıştır.

vii. Ayrıca suda 20±1ºC kür koşullarında da kontrol numunesi üretimi için PÇ CEM I 42,5R sınıfı çimento ile harç üretimi yapılarak 28 gün suda kür uygulanan 1 grup numune üretimi yapılmıştır. Bu TS EN 196-1 de belirtilen standart karışım asıl kontrol karışımıdır.

viii. Tüm üretilen taze harç gruplarının işlenebilirlik değerleri yayılma tablası yöntemiyle belirlenmiştir. Ayrıca sertleşmiş harç numunelerinin ağırlıkları kaydedilerek birim ağırlıkları belirlenmiştir.

ix. Her değişkene bağlı olarak üçer numune üretilmiş ve önce eğilme deneyi ve ikiye ayrılan her parçaya basınç dayanım deneyi yaparak sonuçlar kaydedilmiştir.

2.3.2. Durabilite Deneylerinin Tasarımı

Durabilite deneyleri için üretilecek harç karışımlarının tasarımı belirlenirken yüksek dayanım değerlerini veren parametreler göz önüne alınmıştır. Bu amaçla, durabilite deneyleri için geopolimer üretiminde, optimum ısıl kür sıcaklığı için 100°C ve ısıl kür süresi 24 saat olarak belirlenmiştir. Durabilite deneylerinde üretilen geopolimer harçlara ait karışım parametreleri aşağıda Tablo 2.7'de sunulmuştur.

Tablo 2.7. Durabilite harç gruplarının karışım parametreleri

Uçucu Kül Tipi	**Aktivatör Tipi**	**Na Konsantrasyonu (%)**	**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**	**Isıl Kür Süresi (saat)**
Sugözü, Çatalağzı	Sodyum Hidroksit Soyum Silikat	6, 9, 12, 15	100	24

i. Sugözü uçucu külünü sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum (Na) oranı (%6, %9, %12 ve %15), ısıl kür sıcaklığı 100°C ve ısıl kür süresi 24 saat esas alınarak 4 grup numune üretimi yapılmıştır.

ii. Sugözü uçucu külünü sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum (Na) oranı (%6, %9, %12 ve %15), ısıl kür sıcaklığı 100°C ve ısıl kür süresi 24 saat esas alınarak 4 grup numune üretimi yapılmıştır.

iii. Çatalağzı uçucu külünü sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum (Na) oranı (%6, %9, %12 ve %15), ısıl kür sıcaklığı 100°C ve ısıl kür süresi 24 saat esas alınarak 4 grup numune üretimi yapılmıştır.

iv. Çatalağzı uçucu külünü sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile aktive etmek için 4 farklı sodyum (Na) oranı (%6, %9, %12 ve %15), ısıl kür sıcaklığı 100°C ve ısıl kür süresi 24 saat esas alınarak 4 grup numune üretimi yapılmıştır.

v. Ayrıca suda 20±1ºC'de kür koşullarında kontrol numunesi üretimi için CEM I 42,5 R Portland Çimento ile harç üretimi yapılarak 28 gün suda kür uygulanarak 1 grup numune üretimi yapılmıştır. TS EN 196-1 de belirtilen bu standart karışım durabilite deneylerinde geopolimer harçlarla kıyaslama yaptığımız kontrol grubudur.

vi. Üretilen tüm harç gruplarına ultrasonik hız, su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, basınç altında su işleme derinliği, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, hızlı klorür geçirimliliği, karbonatlaşma, rötre, aşınma direnci, yangına dayanıklılık ve hızlandırılmış korozyon deneyleri uygulanmıştır.

2.4. Karışım Oranları

Deneysel çalışma kapsamında dayanım ve durabilite deneyleri için üretilen Sugözü (SG) ve Çatalağzı (ÇA) uçucu küllü geopolimer harçları ile kontrol harcından oluşan toplam 17 grup harcın karışım oranları Tablo 2.8'de verilmiştir. Aktivatör kullanılarak üretilen harçlarda su/bağlayıcı 0,30 ve kum/bağlayıcı 3 olarak seçilmiştir. Aktivatör katkısı ise %6, %9, %12, %15 Na oranı olarak belirlenmiştir. Kontrol grubunda standart karışım olan su/bağlayıcı 0,50 ve kum/bağlayıcı 3 sabit oranı seçilmiş ve PÇ CEM I 42,5R sınıfı çimento kullanılmıştır. Ayrıca sodyum silikat ile dökülecek numunelerin MS (SiO_2/Na_2O) oranı deneme karışımları sonucu 0,20 olarak seçilmiştir.

Tablo 2.8. Harç gruplarının karışım oranları

Karışım No	Çimento, g	Uçucu Kül tipi	Uçucu kül g	Kum g	Aktivatör tipi	Na oranı, %	Toplam Su, g	NaOH su, g	Na_2SiO_3 su, g	Net su, g
0	450	-	-	1350	-	-	225	-	-	-
1	-	SG	450	1350	NaOH	6	135	10,56	-	124,44
2	-	SG	450	1350	NaOH	9	135	15,85	-	119,15
3	-	SG	450	1350	NaOH	12	135	21,13	-	113,87
4	-	SG	450	1350	NaOH	15	135	26,41	-	108,59
5	-	SG	450	1350	Na_2SiO_3	6	135	9,49	17,27	108,24
6	-	SG	450	1350	Na_2SiO_3	9	135	14,23	25,91	94,86
7	-	SG	450	1350	Na_2SiO_3	12	135	18,97	34,55	81,48
8	-	SG	450	1350	Na_2SiO_3	15	135	23,72	43,18	68,10
9	-	ÇA	450	1350	NaOH	6	135	10,56	-	124,44
10	-	ÇA	450	1350	NaOH	9	135	15,85	-	119,15
11	-	ÇA	450	1350	NaOH	12	135	21,13	-	113,87
12	-	ÇA	450	1350	NaOH	15	135	26,41	-	108,59
13	-	ÇA	450	1350	Na_2SiO_3	6	135	9,49	17,27	108,24
14	-	ÇA	450	1350	Na_2SiO_3	9	135	14,23	25,91	94,86
15	-	ÇA	450	1350	Na_2SiO_3	12	135	18,97	34,55	81,48
16	-	ÇA	450	1350	Na_2SiO_3	15	135	23,72	43,18	68,10

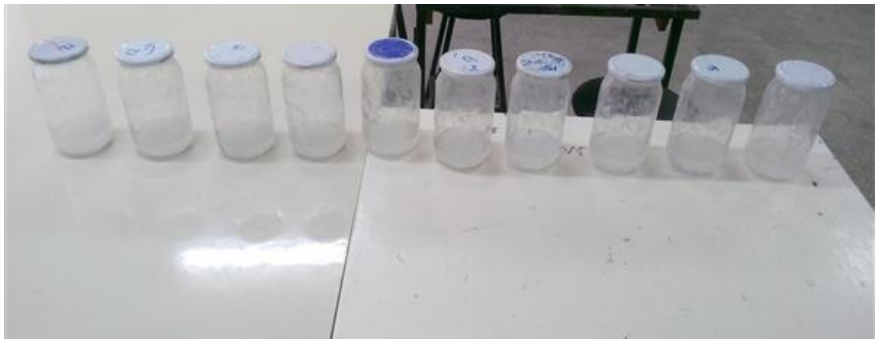
Sodyum hidroksit ile hazırlanan çözeltilerde, pul halindeki sodyum hidroksitin reaksiyonu sırasında içerisindeki su açığa çıktığı için karışım su miktarını arttırmaması amacıyla çözeltiye dışarıdan girecek su miktarından düşülmüştür. Aynı şekilde sodyum silikat ile hazırlanan çözeltilerde hem sıvı sodyum silikatın içerisindeki su hem de sodyum silikatın MS (SiO_2/Na_2O) değerinin 0,20'ye düşürülmesi için dışarıdan ilave

edilen sodyum hidroksitten açığa çıkacak olan su, karışım suyu miktarından düşülerek harç hazırlanmıştır. Düşülen su miktarları sonucu karışıma giren net su Tablo 2.8'de verilmiştir.

2.5. Harç Üretimi ve Kürü

Deneysel çalışmalarda üretilen harç karışımları TS EN 196-1'e uygun olarak hazırlanmıştır. Kontrol karışımlarında su ve çimento önce karıştırma kabına konup 30 saniye karıştırdıktan sonra ikinci 30 saniye içerisinde kum ilave edilmiştir. Ardından yüksek hızda 30 saniye daha karıştırmaya devam edilmiştir. Karıştırıcı durdurulup ilk 30 saniyede kabın çeperlerindeki harç ortaya toplanarak toplam 90 saniye beklenmiştir. Ardından 60 saniye daha yüksek hızda devam edilerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır.

Aktivatörler ile hazırlanan harçlarda da standardın öngördüğü süre ve karışım hızları referans alınmıştır. Sodyum hidroksit ile hazırlanan harçlarda önce karışıma girecek su cam kavanoz içine dökülüp üzerine sodyum hidroksit ilave edilerek sodyum hidroksit tamamen eriyinceye kadar kavanoz çalkalanmıştır. Sodyum hidroksitin su ile tepkimesi ekzotermik olduğu için oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Daha sonra karıştırma kabına uçucu kül konup üzerine çözelti ilave edilip ardından kum eklenmiştir. Toplamda 4 dakikalık karıştırma süresi uygulanmıştır. Sodyum silikat çözeltisinde de karıştırma işlemi sodyum hidroksit ile aynı şekilde yapılmıştır. Fakat çözelti hazırlanırken cam kavanoza önce su sonra sodyum hidroksit ve ardından sodyum silikat konarak iyice çalkalanıp oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur (Şekil 2.7). Uçucu kül, kum ve çözelti hobart mikserinde karıştırılarak harç hazırlanarak kıvamı da belirlenmiştir (Şekil 2.8). Tüm harç grupları dayanım veya durabilite deneyleri için numune türüne göre Şekil 2.9'da görülen 40×40×160 mm, 71×71×71 mm, 50×50×200 mm, Ø100×200 mm ve 150×150×150 mm boyutlarındaki kalıplara sıkıştırma işlemi yapılarak yerleştirilmiştir.



Şekil 2.7. Çözeltilerin oda sıcaklığına soğutulması



Şekil 2.8. Hobart mikserinde harç üretimi



Şekil 2.9. Numune üretiminde kullanılan kalıplar

Hazırlanan harç numuneleri kalıpları ile birlikte Şekil 2.10'da görülen etüve konularak ısıl kür sıcaklığı süresini tamamlamaları beklenmiştir. Kür süresi tamamlanan numuneler etüvden alınarak laboratuvarda oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir.



Şekil 2.10. Geopolimer harç numunelerine etüvde ısıl kür uygulanması

Kontrol grubu numuneler Hobart mikserinde karıştırılıp kalıplara yerleştirildikten sonra 24 saat laboratuvarda bekletilip su havuzuna konmuştur (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Kontrol numunelerine kür uygulanması

2.6. Deney Yöntemleri

Geopolimer harçlar ile kontrol harç gruplarına iki aşamada deney uygulanmıştır. Birinci aşamada yüksek dayanım veren ısıl kür süresi ve sıcaklığı belirlenmiştir. İkinci aşamada, ilk aşamada belirlenen parametreler esas alınarak durabilite deneyleri yapılmıştır.

Numune üretiminde yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmek için 4 farklı Na oranı (%6, %9, %12 ve %15), 3 farklı kür sıcaklığı (60°C, 80°C, 100°C) ve 7 farklı kür süresi (3 saat, 6 saat, 12 saat, 24 saat, 48 saat, 72 saat, 96 saat) esas alınmıştır. Bu numunelere işlenebilirlik deneyi, birim ağırlık deneyi, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır.

Çalışmanın her aşamasında kontrol numuneleri TS EN 196-1 standardına uygun olarak CEM I 42,5R portland çimentosu ile üretilerek geopolimer numuneleri ile kıyaslamak için kullanılmıştır.

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında yüksek dayanım değerlerini veren parametreler belirlenerek ikinci aşamada durabilite deneyleri için numune üretimi yapılmıştır. Birinci aşamada belirlenen ısıl kür sıcaklığı 100°C ve ısıl kür süresi 24 saat alınarak 4 farklı Na oranında (%6, %9, %12 ve %15) geopolimer numuneleri ve beraberinde kontrol grubu numuneleri üretilmiştir. Bu numunelere ultrasonik hız, su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, basınç altında su işleme derinliği, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, hızlı klorür geçirimliliği, karbonatlaşma, rötre, aşınma direnci, yangına dayanıklılık ve hızlandırılmış korozyon deneyleri uygulanmıştır.

2.6.1. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi

Geopolimer harçların görünür birim ağırlık, görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve doygun kuru yüzey yoğunluk değerleri ASTM C 642'ye [80] göre belirlenmiştir. Deney numunelerine etüvde ısıl kür uygulandıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğuması için beklenip havadaki ağırlıkları Şekil 2.12'de görüldüğü gibi tartılarak kaydedilmiştir (A_{FK}). Daha sonra numune hacmi hesaplanarak (4×4×16 cm) bu hacme bölünerek birim ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Yoğunluk özelliklerinin belirlenmesi sırasında Arşimet prensibine göre; numuneler su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları, suya doygun yüzey kuru ağırlıkları ve etüv kurusu ağırlıkları belirlenmiştir. Bu değerler yardımıyla örneklerin birim hacim ağırlık ve yoğunluk değerleri Bağıntı 2.1, Bağıntı 2.2, Bağıntı 2.3 ve Bağıntı 2.4 ile hesaplanmıştır.

$$\text{Görünür Birim Ağırlık}\,(g/cm^3) = \frac{A_{FK}}{\text{Numune Boyutları}} \qquad \text{(Bağıntı 2.1)}$$

$$\text{Görünür Yoğunluk}\,(g/cm^3) = \frac{A_{FK}}{A_{FK} - A_{SU}} \qquad \text{(Bağıntı 2.2)}$$

$$\text{Kuru Yoğunluk}\,(g/cm^3) = \frac{A_{FK}}{A_{KYD} - A_{SU}} \qquad \text{(Bağıntı 2.3)}$$

$$\text{KYD Yoğunluk}\,(g/cm^3) = \frac{A_{KYD}}{A_{KYD} - A_{SU}} \qquad \text{(Bağıntı 2.4)}$$

A_{FK}: Fırın kurusu ağırlığı (g)

A_{KYD}: Kuru yüzey doygun ağırlığı (g)

A_{SU}: Su içindeki ağırlığı (g)



Şekil 2.12. Numunelerin havada ve Arşimet terazisinde tartılması

2.6.2. İşlenebilirlik Deneyi

Çalışmada üretilen taze harçlara, TS EN 1015-3 [81] standardına uygun olarak kıvam deneyi olarak bilinen Şekil 2.13'de görülen yayılma tablası yöntemi deneyi yapılmıştır. Üst iç çapı 70 mm taban iç çapı 100 mm ve yüksekliği 50 mm olan konik kap yayılma tablası merkezine yerleştirilerek her tabakaya 10 vuruş olacak şekilde 40 mm çaplı 0,250 kg ağırlığındaki tokmak ile 2 tabaka halinde sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra kalıp yukarı doğru çekilerek alınmış ve 1,25 cm yükseklikten her saniyede 1 düşüş olacak şekilde 15 defa yayılma tablasına düşüş yaptırılmıştır. Yayılan harç kütlesi her tarafından kumpas ile ölçülerek ortalama değer mm cinsinden kaydedilmiştir.



Şekil 2.13.Yayılma tablası ile kıvam tayini deneyi

2.6.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

Deneysel çalışmalarda üretilen 40×40×160 mm boyutlarındaki sertleşmiş numunelere TS EN 1015-11 [82] standardına uygun olarak Şekil 2.14'de görüldüğü gibi mesnet açıklığı 100 mm olacak şekilde tek noktadan yükleme yapılmıştır. Numuneler kalıptan çıkarılan yan yüzleri üzerine mesnet silindirleri üstüne dik şekilde yerleştirilip yükleme uygulanmıştır. Yükleme sırasında ani sıçrama olmaksızın kırılma gerçekleşecek şekilde 50 N/s yükleme hızı seçilmiştir.

Eğilmede çekme dayanımı (R_f) değeri Bağıntı 2.5 kullanılarak N/mm² cinsinden elde edilmiştir. Bir kalıptan çıkan 3 numuneye eğilme deneyi uygulanmıştır. Ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması eğilme dayanımı değeri olarak alınmıştır.

$$R_f = 1,5\frac{F \times l}{b^3} \qquad \text{(Bağıntı 2.5)}$$

Burada;

R_f: Eğilmede çekme mukavemeti, N/mm²

b: Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)

F: Prizmanın ortasına uygulanmış olan kuvvet, (Newton)

l: Destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm)



Şekil 2.14. Eğilme dayanımı deneyi

2.6.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyi uygulanıp ortadan ikiye bölünmüş numunelerin düzgün kalıp yüzeylerine basınç dayanımı deneyi TS EN 1015-11 [82] standardında belirtilen şekilde Şekil 2.15'te görüldüğü gibi uygulanmıştır. Elde edilen yarım numuneler 40×40 mm cihaz başlığı arasına yerleştirilerek 500 N/s hızında yük uygulanarak kırılmıştır. Kırılma anındaki yük değeri yükün uygulandığı alana bölünerek basınç dayanım değeri Bağıntı 2.6 ile elde edilmiştir. Bir kalıptan çıkan 3 numuneye eğilme deneyi sonucu oluşan 6 yarım numuneye uygulanan basınç dayanımı deneyi sonucu ortaya çıkan değerlerin aritmetik ortalaması basınç dayanım değeri olarak alınmıştır.

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \qquad \text{(Bağıntı 2.6)}$$

Burada;

R_c: Basınç mukavemeti, N/mm²

b: Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F_c: Kırılmadaki en büyük kuvvet, (Newton)



Şekil 2.15. Basınç dayanımı deneyi

2.6.5. Ultrasonik Hız Tayini

Numunelerin ultrases dalga hızları ASTM C 597'e [83] göre Pundit (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) olarak adlandırılan Şekil 2.16'da görülen Proceq marka bir cihaz ile ölçülmüştür. Cihazdan gönderilen düşük frekanslı ultrasonik sinyaller numune içerisinden geçerek transducerler tarafından algılanır ve böylece ultrasonik sinyallerin numune içerisinden geçiş süresi hassas olarak ölçülür. Numunelerin pürüzlü yüzeyine dolgu için jel sürülerek transducerler numunenin boyu doğrultusunda yerleştirilerek 0,16 m'lik kısmından okumalar yapılmıştır. Direkt iletim yöntemi kullanılarak geçiş süresi T, µs cinsinden kaydedilmiştir. Ultrasonik sinyallerin geçiş süresi numune yoğunluğuna bağlıdır. Ultarasonik testler sonucunda; harçların homojenliği, içindeki boşluklar, harçların yapısında meydana gelen değişimler ile harçların dayanımı ve kalitesi ile ilgili bilgiler elde edilmiştir. Ölçümler esnasında deneyler 3 adet 40×40×160 mm'lik prizmatik harç numuneleri üzerinde yürütülerek ortalamaları kaydedilmiştir. Geçiş süresi T mikrosaniye cinsinden saniye cinsine dönüştürülerek ultrasonik ses hızı, aşağıda verilen Bağıntı 2.7 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = \frac{L}{T} \qquad \text{(Bağıntı 2.7)}$$

Burada;

V: Ultrasonik hız, m/s

L: Geçiş uzunluğu, m

T: Geçiş zamanı, s



Şekil 2.16. Ultrasonik hız tayini deneyi

2.6.6. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini

Deneyler kapsamında yer alan harçlara ait su emme ve boşluk oranları tayini, geopolimer harçların 24 saat etüvde 100ºC'de ısıl kür sonrasında, Portland çimentosundan üretilen kontrol numunelerinde ise 20±1°C de ki su içerisinde 28 gün suda kür edildikten sonra, 40×40×160 mm'lik prizma numuneler üzerinde yürütülmüştür. Numunelerin fiziksel özelliklerini tespit etmek için etüv kurusu ağırlıkları, kuru yüzey doygun ağırlıkları ve Şekil 2.17'de gösterilen Arşimet terazisi ile su içindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Bu üç değerin yardımıyla su emme ve boşluk oranları hesaplanmıştır. Numunelerin kuru haldeki ve su içindeki ağırlık farkı hacmine eşittir. Sertleşmiş numunede su emme oranı, etüv kurusu numunelerin suya doygun kuru yüzeyli duruma getirilmesi ile ortaya çıkan ağırlık artışının, etüv kurusu betonun ağırlığına oranıdır. Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunesi ve uçucu kül ile hazırlanan geopolimer harçlarının su emme ve boşluk oranı değerleri aşağıda verilen Bağıntı 2.8 ve Bağıntı 2.9 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Boşluk Oranı}(\%) = \frac{(A_{KYD} - A_{FK})}{(A_{KYD} - A_{SU})} \times 100 \qquad \text{(Bağıntı 2.8)}$$

$$\text{Su Emme Oranı}(\%) = \frac{A_{KYD} - A_{FK}}{A_{FK}} \times 100 \qquad \text{(Bağıntı 2.9)}$$

Burada;

A_{FK}: Fırın kurusu ağırlığı (g)

A_{KYD}: Kuru yüzey doygun ağırlığı (g)

A_{SU}: Su içindeki ağırlığı (g)



Şekil 2.17. Arşimet terazisi yöntemi ile suda ağırlıkların belirlenmesi

2.6.7. Kılcal Su Emme Katsayısı Tayini

Kılcal su emme deneyi ASTM C1585-13'de [84] anlatılan yönteme göre gerçekleştirilmiştir. Her değişken için 3 adet 40×40×160 mm numune üretilip geopolimer numuneler 24 saat 100ºC'de kür edildikten sonra oda sıcaklığına gelmesi beklenip, kontrol numuneleri 28 gün suda kür edildikten sonra 24 saat 105ºC'de kurutulup deneye tabi tutulmuştur. Numunelerin yan ve üst yüzeyi alüminyum folyo bant ile kaplanarak havadaki nemden korunmuştur. Yan yüzeylerde 2±1 mm açıklık bırakılarak alt yüzey ile birlikte suya temas etmesi sağlanmıştır. Cam bir havuz oluşturarak numunelerin alt kısmı suya gelecek şekilde destekler yerleştirilmiştir (Şekil 2.18). Destekler üzerine konan numuneler birbirine temas etmeden kılcal olarak su emmesi sağlanmış ve her sudan çıkarıldığında suya temas eden yüzeyi kağıt havlu ile silinerek sadece kılcal olarak emdiği su miktarı hesap edilmiştir. Her numuneye 1, 5, 10, 20 ve 30. dakikada, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6. saatte ve 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. günde ağırlık okumaları yapılarak kılcal su emme miktarları tayin edilmiştir. Zamana bağlı kılcal su emme miktarları numune temas alanına bölünerek I değerleri Bağıntı 2.10 ile hesap edilmiştir. Ayrıca grafik çizilerek birincil ve ikincil kılcallık katsayısı tayin edilip ilk 6 saat ve 1 ile 8 gün arasındaki kılcal su emmeleri belirlenmiştir.

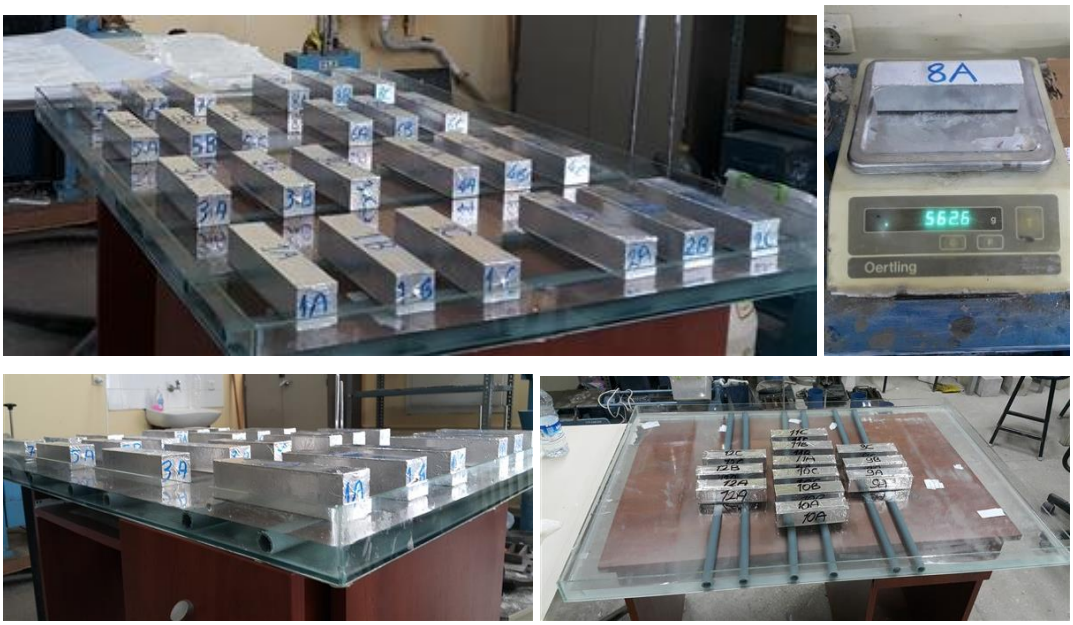
$$I = \frac{m_t}{a \times d} \qquad \text{(Bağıntı 2.10)}$$

I: Su emme, mm

m_t: t süresinde numune ağırlığındaki gram cinsinden değişim

a: Numunenin suya temas eden alanı, mm^2

d: Suyun yoğunluğu, g/mm^3



Şekil 2.18. Kılcal su emme deneyi

2.6.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini

Basınç altında su geçirimlilik deneyi için TS EN 12390-8 [85] standardına uygun olarak 150×150×150 mm ebatlı küp numuneler üretilmiştir. Geopolimer numuneler ısıl kür sonrası oda sıcaklığına gelince, kontrol numuneleri 28 gün suda kür uygulandıktan sonra deneye tabi tutulmuştur. Kalıptan çıkarılan numunelerin yan yüzeylerine su basıncı uygulanmıştır (Şekil 2.19). Numunelerin 24 saat içindeki su işleme derinlikleri yarma deneyi ile ortadan ikiye bölünerek belirlenmiştir. Basınçlı suyun erken üst yüzeye ulaşması halinde deney sonlandırılmış ve kaydedilmiştir. Yarma deneyi sonucu ortadan ikiye ayrılan numunenin üzerindeki su silinip içerisine işleyen suyun en yüksek işleme derinliği kumpas ile ölçülerek mm cinsinden kaydedilmiştir.



Şekil 2.19. Geçirimlilik deney cihazı ve numunenin yarma cihazı ile ayrılması

2.6.9. Islanma-Kuruma Tayini

Islanma-Kuruma deneyi ASTM D5313 [86] standartları göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler 40×40×160 mm boyutlarında üretilerek geopolimer numuneleri fırında kür uygulandıktan sonra, kontrol numuneleri de 12 saat 110±5ºC'de kurutulduktan sonra ağırlıkları alınarak A değeri olarak kaydedilmiştir. Ayrıca numuneler ıslanma-kuruma döngüsüne başlamadan kuru olarak ultrases geçiş hızı deneyine tabi tutulmuştur. Daha sonra 12 saat saf su içerisinde 6 saat 65±5ºC sıcaklıkta bekletilerek bu işlemler 1 çevrim olacak şekilde 80 çevrim yapılmıştır (Şekil 2.20). Her 10 çevrim sonucu numunelerde meydana gelen fiziksel değişimi gözlemlemek için fotoğraf alınmıştır. Ayrıca 40 çevrim sonunda ara değer olarak ağırlık ve ultrases değerleri alınmıştır. 80 çevrim sonunda 12 saat 110±5ºC'de kurutularak tartılmış ve B değerleri kaydedilmiştir. Kuru olarak yine ultrases geçiş hızı deneyi uygulanarak başlangıç ile bitiş arasındaki ultrases hızları farkı araştırılmıştır. Tüm numunelere eğilme ve basınç deneyi yapılarak dayanım kayıpları da belirlenmiştir. Islanma-kuruma döngüsü sonrası ağırlık kaybı Bağıntı 2.11 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Kütle Kaybı} = \frac{A - B}{A} \times 100 \qquad \text{(Bağıntı 2.11)}$$

A: Numunenin ıslanma-kuruma deneyi öncesi kuru kütlesi, g

B: Numunenin ıslanma-kuruma deneyi sonrası kuru kütlesi, g



Şekil 2.20. Islanma-kuruma döngüsü

2.6.10. Donma-Çözülme Direnci Tayini

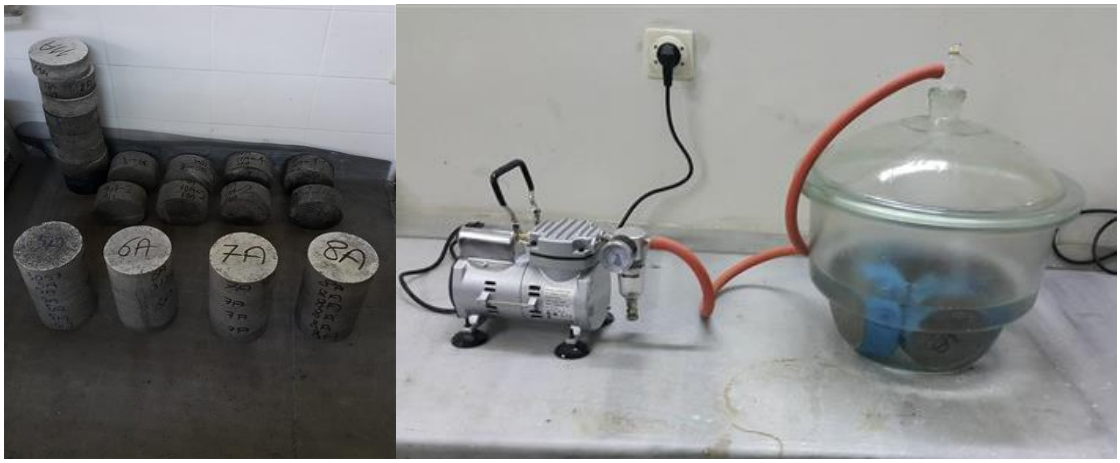
Geopolimer harçlar ve kontrol grubunun donma-çözülme deneyi ASTM C 666 [87] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. ASTM C 666 standardına göre yapılan donma-çözülme tekrarları, otomatik çevrim uygulayan ve proje kapsamında alınan Şekil 2.21'deki donma-çözülme deney cihazı ile yapılmıştır. Numuneler ısıl kür uygulamasından sonra suya doygun hale getirilmiştir. Kontrol numunesi ile tüm geopolimer numuneler donma çözülme cihazındaki su dolu hazneye yerleştirilmiştir. Harç numunelerinin tamamı -18°C ile +4°C arasında donma-çözülme çevrimlerine tabi tutulmuştur. Donma çözülme deney esnasında alınan ekran görüntüsü ise Şekil 2.21'de verilmiştir. Numuneler 3 saatte -18ºC ulaştıktan sonra 1 saat dondurulmuş ve 1 saatte +4ºC'ye ulaştıktan sonra 1 saat ise çözdürülerek 1 çevrim toplam 6 saat olacak şekilde 300 çevrim şeklinde gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında her 60 çevrim sonunda ağırlık ölçümleri ve ultrases ölçümleri yapılmıştır. Donma-çözülme çevrimi öncesi ve sonrası numuneler üzerinde ağırlık ölçümleri, ultrasonik ses hızı ölçümleri ile basınç ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.21. Donma-çözülme kabini ve ekran görüntüsü

2.6.11. Hızlı Klorür Geçirimliliği Tayini

Bu deney ASTM C1202-12 [88] standardında belirtilen kriterlere göre gerçekleştirilmiştir. Ø100×200 mm ebatında silindir numuneler üretilerek 50 mm kalınlığında olacak şekilde silindirin orta kısmından 2 adet deney numunesi taş kesme makinesi ile kesilerek deney standardına uygun hale getirilmiştir. Çapı 100 mm, kalınlığı 50 mm olarak kesilen numuneler bir desikatör içerisine konarak 50 mm Hg (6650 Pa) vakum gücü üreten bir pompa yardımıyla 3 saat vakumlanarak havası alınmıştır (Şekil 2.22). Ardından desikatör su ile doldurularak 1 saatte numuneler su içerisinde kalacak şekilde vakum uygulanmıştır. 18±2 saat de vakum pompası kapatıldıktan sonra numuneler su içinde bırakılmıştır. Deneye hazırlık sürelerinin sonunda numuneler sudan çıkarılarak klorür geçirgenliği hücrelerinin arasına sabitlenmiştir (Şekil 2.23). Hücrelerin birinin içine %3 NaCl çözeltisi diğerine %0,3 N NaOH çözeltisi doldurulmuştur. Çözeltiler için saf su kullanılmıştır. Hızlı klorür geçirgenliği cihazına aynı anda 4 örnek bağlanmış ve 6 saat boyunca 50 mm kalınlıktaki numuneden 60 V dc akımın iletimi sağlanmıştır. Örneklerin klorür iyonu penterasyon direncine bağlı olarak Coulomb (amper şiddetindeki bir elektrik akımının bir iletken üzerinde 1 saniye süreyle akması durumunda taşıdığı elektrik yükü) [92] cinsinden klorür geçirgenlik değeri belirlenmiştir.



Şekil 2.22. Numunelerin kesilip vakumlanarak deneye hazırlanması



Şekil 2.23. Hızlı klorür geçirimliliği deney düzeneği

2.6.12. Karbonatlaşma Tayini

Karbonatlaşma derinliğinin tayini 40×40×160 mm'lik prizmatik numuneler üzerinde TS EN 14630'a [89] göre yapılmıştır. Geopolimer harç numuneleri ısıl kürden sonra sıcaklığı 23±2ºC ve bağıl nemi %55±5 bağıl nemde tutulmuştur. Karbonatlaşma derinliği ölçümleri 90, 180 ve 360 günlük numunelerde yapılmıştır. Geopolimer ve kontrol numunelerinin karbonatlaşma derinliği, numunelerin ikiye bölünmüş kırılma yüzeylerine fenolftalein çözeltisi püskürtülerek Şekil 2.24'deki gibi ölçülmüştür. Serbest $Ca(OH)_2$ pembe renk gösterirken, karbonatlaşmış kısımlar ise renk değişimine uğramamıştır. Karbonatlaşma derinliği 40 mm'lik yüzey alanında aşağıda verilen Bağıntı 2.12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} \qquad \text{(Bağıntı 2.12)}$$

Burada;

D: Karbonatlaşma derinliği, mm

$A_{1,2,3,4}$: Dört kenardaki karbonatlaşma derinlikleri, mm



Şekil 2.24. Karbonatlaşma deneyi

2.6.13. Rötre Tayini

Büzülmeye bağlı boyda meydana gelen değişimin hesaplanması için ASTM C157/C157M [90] standardı referans alınmıştır. Her bir karışım için 3 adet 50×50×200 mm ebatında büzülme numuneleri üretilmiştir. Numune ebatları geopolimer harçlarının etüvde kür esnasında deforme olmaması için büyük ebatlı rötre kalıpları seçilmiştir. Geopolimer harçlarda numuneler etüvden çıkarılıp oda sıcaklığına gelince ilk ölçüm yapılmıştır. Kontrol harçları 24 saat kalıpta bekledikten sonra kalıptan çıkarılarak ilk ölçüm yapılmıştır. Numuneler deney süresince 23±2ºC sıcaklık ve %50±4 bağıl nemi bulunan laboratuvar ortamında bekletilmiştir (Şekil 2.25). İlk 14 gün boyunca her gün, 91 güne kadar her hafta ve daha sonra her ay ölçüm yapılarak 6 aylık periyotda boydaki değişim belirlenmiştir. Ölçümler 0,002 mm hassasiyetli deformasyon saatine sahip ölçüm aletinde yapılmıştır (Şekil 2.25). Her numunede boyda meydana gelen değişim aşağıdaki Bağıntı 2.13 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\Delta L_x = \frac{\text{CRD} - \text{initial CRD}}{\text{G}} \times 100 \qquad \text{(Bağıntı 2.13)}$$

ΔL_x: Numunenin yaşına bağlı olarak boydaki değişimi, %

CRD: Ölçüm aletinin yaşa bağlı olarak okuduğu son değer, mm

İnitial CRD: Ölçüm aletinin referans için deney başlangıcında okuduğu ilk değer, mm
G: Ölçüm noktaları arasındaki mesafe, mm



Şekil 2.25. Rötre numuneleri ve boy değişimi ölçümü

2.6.14. Aşınma Direnci Tayini

Geopolimer harç numunelerinin aşınma direnci, Böhme aşındırma cihazı üzerinde 71×71×71 mm boyutlarında küp numunelere TS 2824 EN 1338'e [91] göre sürtünme yolu ile aşınma uygulanarak bulunmuştur. Çalışmada kullanılan Böhme aşındırma deney aleti ve numuneleri Şekil 2.26'da gösterilmektedir. Baskı pistonu yükleme koluna asılan ağırlık vasıtası ile bastırılmıştır. Sürtünme yolu üzerine standart aşındırıcı olarak 20 gr suni korundum tozu yayıldıktan sonra cihaz çalıştırılmıştır. Bu durumda disk numuneye 294 N'luk aşındırma kuvveti uygulamaktadır. Disk 22 devirden sonra (1 peryot) otomatik olarak durur. Numune saat yönünde 90º döndürülür ve ize yeni aşındırıcı toz konur. Her defasında disk ve temas yüzeyi temizlenir. Bu şekilde ikinci, üçüncü ve dördüncü yüzeyleri de aşındırılır ve toplam 88 devir yani 4 peryot sonunda birinci aşama tamamlanır. Araştırmada her numune üzerine toplam 16 peryot ile 352 devir uygulamıştır. 16 peryot sonunda fırça ile temizlenen numuneler ağırlıkları

tartılmıştır. Aşınma kayıpları bulmak için en başta her numunenin ilk ağırlığı ve ilk hacmi belirlenmiş ve bu şekilde numunelerin yoğunluğu hesaplanmıştır. Sonrasında ilk ağırlık ile deney sonundaki ağırlık farkı hesaplanmıştır (Şekil 2.27). Ağırlık farkını her numunenin yoğunluğuna bölerek hacim kaybı hesaplanmıştır. Aşınma kaybı hacim azalması cinsinden Bağıntı 2.14 ile hesaplanmıştır.

Aşınma Kaybı (ΔV, $mm^3/5000\ mm^2$)

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho R} \qquad \text{(Bağıntı 2.14)}$$

Burada;

ΔV: 16 peryot sonra hacim kaybı, mm^3

Δm: 16 peryottan sonra kütle kaybı, g,

ρR: Numunenin yoğunluğu, g/mm^3



Şekil 2.26. Böhme deney cihazı ve aşınma deneyi numuneleri



Şekil 2.27. Böhme deneyi uygulaması

2.6.15. Yangına Dayanıklılık Tayini

Geopolimer ve kontrol numuneleri 40×40×160 mm ebatlarında üretilerek yangına dayanıklılık deneyi uygulanmıştır. Üretilen numuneler yangın dolabında 1ºC/dakika sıcaklık artışı uygulanacak sıcaklığa getirilmiş ve 60 dakika 200, 400, 600, 800, 1000ºC'de ayrı ayrı yüksek sıcaklığa maruz bırakılmışlardır (Şekil 2.28). Fırında deney tamamlandıktan sonra numunelerin oda sıcaklığına kadar soğuması beklenip eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.28. Numunelere yangın fırınında yüksek sıcaklık uygulanması

2.6.16. Hızlandırılmış Korozyon Tayini

Korozyon deneyi için 16 mm çapında nervürlü S420 çeliği kullanılmıştır. NaCl çözeltisi için sanayi tipi tuz kullanılmıştır. Donatı Ø100×200 mm silindir kalıp ortasına yerleştirilerek yüksekliği 25 mm olan plastik pas payı aparatı ile donatının kalıp tabanına değmesi önlenmiştir. Geopolimer numuneler 24 saat 100 ºC'de ısıl küresi sonunda oda sıcaklığına gelince, kontrol numuneleri ise donatıya su değmeyecek şekilde suda 28 gün kür edildikten sonra deneye tabi tutulmuştur Deney düzeneği için plastik havuz kullanılarak havuz tabanına metal tel örtü serilip elektriği iletmesi sağlanmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyi için tuz çözelti konsantrasyonu %5 olarak ayarlanmıştır. Sisteme 12 volt sabit gerilim uygulayan doğru akım kaynağının pozitif kutbu donatının üst ucuna (çalışan elektrot), negatif kutbu altta yer alan metal örtüye bağlanmıştır (Şekil 2.29). Böylece donatı çubuğu anot, metal tel örtü katot ve NaCl

çözeltisi de elektrolit görevi üstlenmiştir. Hazırlanan deney düzeneğine aynı anda 4 adet doğru akım kaynağında yer alan 8 kanala 8 adet deney numunesi bağlanmıştır. Korozyon sonrası donatılardaki ağırlık ve numunelerdeki aderans kaybı belirlenmiştir.



Şekil 2.29. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği



Şekil 2.30. Aderans (pull-out) deney düzeneği ve deney numunesi

Korozyona uğratılan numunelerin aderans kaybını belirlemek için ASTM A944-10 [93] standardına göre çekme çıkarma (pull-out) deneyi yapılmıştır (Şekil 2.30). Deney, bir grup korozyona uğramış numuneler ile kıyaslama yapabileceğimiz korozyona uğratılmamış ikinci bir gruba da uygulanmıştır. Böylece hiç korozyona uğramamış numuneler ile korozyon ile zarar görmüş numunelerin aderans değişimleri ortaya konmuştur. Deney sonucunda hesaplamalar Bağıntı 2.15 yardımıyla yapılmıştır.

$$\tau = \frac{\text{Aderans Kuvveti}}{\pi . \varnothing . l} \qquad \text{(Bağıntı 2.15)}$$

Aderans Kuvveti: Donatının numuneden sökülme kuvveti, N

Ø: Donatı çapı, mm

l: Aderans boyu (numuneye gömülü donatı uzunluğu) , mm

3. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde yüksek dayanım değerlerinin belirlenmesi için %6, %9, %12 ve %15 Na ve 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 saat kür süresi, 60, 80 ve 100ºC ısıl kürde üretilen numunelerin birim ağırlık, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deney sonuçları ile durabilite deneyleri için belirlenen parametreler olan %6, %9, %12 ve %15 Na ve 24 saat 100ºC'de kür edilerek elde edilen numunelerin birim ağırlık ve özgül ağırlık, işlenebilirlik, ultrasonik hız, su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, basınç altında su işleme derinliği, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, hızlı klorür geçirimliliği, karbonatlaşma, rötre, aşınma direnci, yangına dayanıklılık, hızlandırılmış korozyon deney sonuçları verilmiştir.

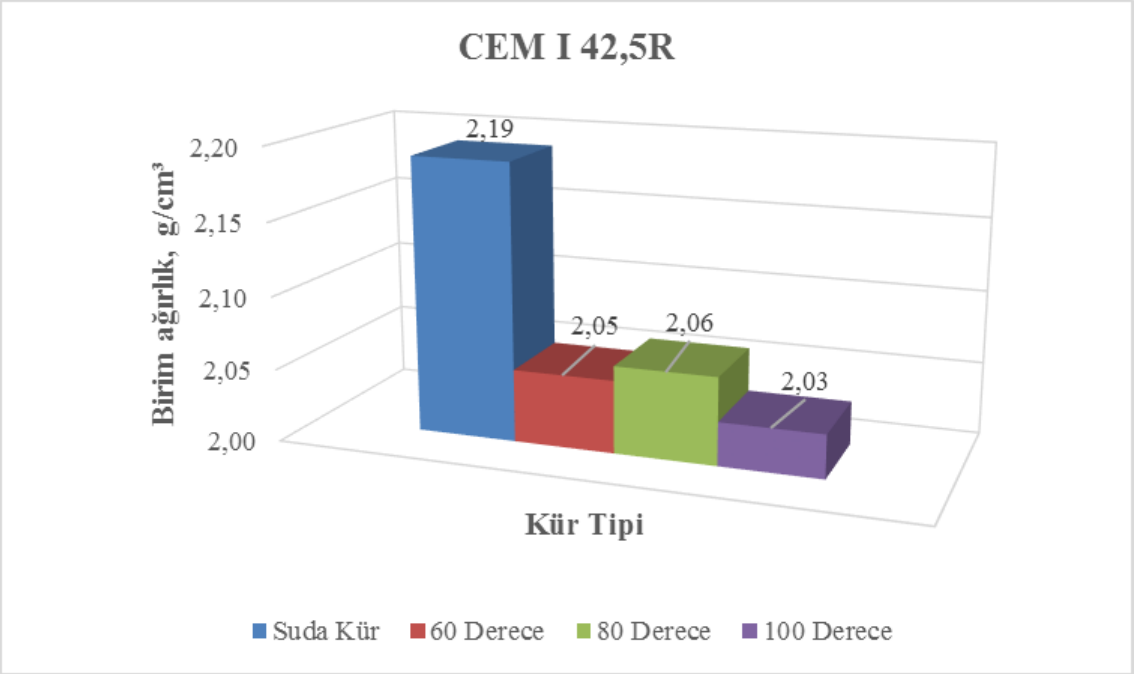
3.1. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen aktivasyon numunelerinin ağırlıkları etüv sonrası oda sıcaklığında alınmış, suda kür edilen kontrol numunelerin de kalıp sonrası ağırlıkları alınıp hacmine bölünerek birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunelerinin ısıl kür sıcaklığı ve ısıl kür süresi ile değişen birim hacim ağırlıkları Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Kontrol numunelerinin birim ağırlıkları

Portland Çimentolu Kontrol Numuneleri Birim Hacim Ağırlıkları (g/cm^3)				
Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı**			**Suda kür**
	60°C	**80°C**	**100°C**	**20°C**
3	2,15	2,13	2,12	-
6	2,09	2,10	2,05	-
12	2,04	2,08	2,07	-
24	2,05	2,06	2,03	-
48	2,10	2,07	2,06	-
72	2,05	2,09	2,06	-
96	2,06	2,09	2,04	-
28 gün	-	-	-	2,19

Çalışmada üretilen Portland çimentolu kontrol numunelerinden ısıl küre tabi tutulanların birim hacim ağırlıkları 2,03 - 2,15 g/cm^3 arasında bulunmuştur. Isıl kür sıcaklığının ve süresinin çimentoya etkisinin olmadığı görülmüştür. Hatta sıcaklık artışı su kaybına neden olduğu için birim ağırlıklarda genel bir azalma görülmüştür. Çimentolu kontrol numunesinin 28 gün suda kür edilmiş olan numunenin birim hacim ağırlığı ise 2,19 g/cm^3 olarak en yüksek değer olarak hesaplanmıştır. Durabilite deney parametreleri olan 100 °C kür sıcaklığı 24 saat kür süresinde elde edilen kontrol numuneleri ile suda kür edilen kontrol numunelerindeki birim ağırlık değişimi Şekil 3.1'de görülmektedir.



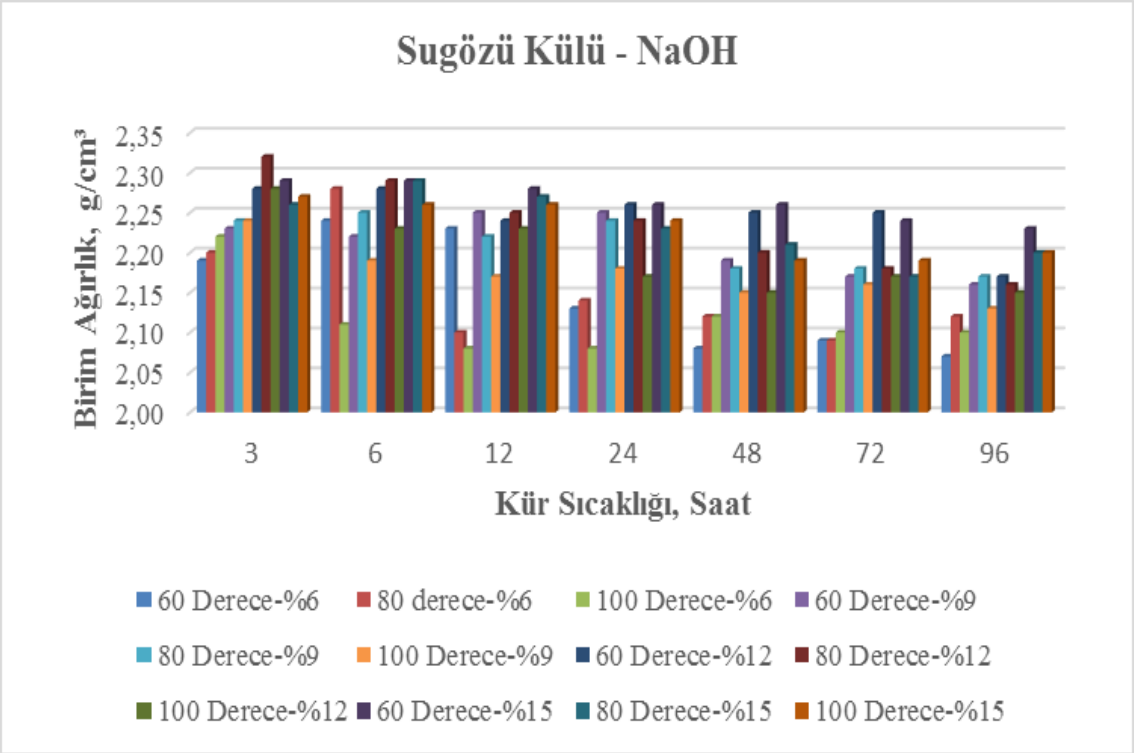
Şekil 3.1. Kontrol numunelerinin birim ağırlık değişimi

Alkali ile aktifleştirilen uçucu küllü geopolimer harçlarının ısıl kür sıcaklığına ve ısıl kür süresine bağlı olarak değişen birim hacim ağırlıkları ise Tablo 3.2, Tablo 3.3, Tablo 3.4 Tablo 3.5'de ve grafiksel anlatım ile de Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te sunulmuştur.

NaOH ile aktive edilen Sugözü geopolimer harçların birim ağırlıkları 2,07 ve 2,29 g/cm^3 arasında bulunmuştur. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü geopolimer harçların birim ağırlıkları ise 2,07 ve 2,24 g/cm^3 arasında bulunmuştur. NaOH ile aktive edilen Çatalağzı geopolimer harçların birim ağırlıkları 1,98 ve 2,18 g/cm^3 arasında bulunmuştur. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı geopolimer harçların birim ağırlıkları ise 1,99 ve 2,20 g/cm^3 arasında bulunmuştur.

Tablo 3.2. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları, g/cm^3

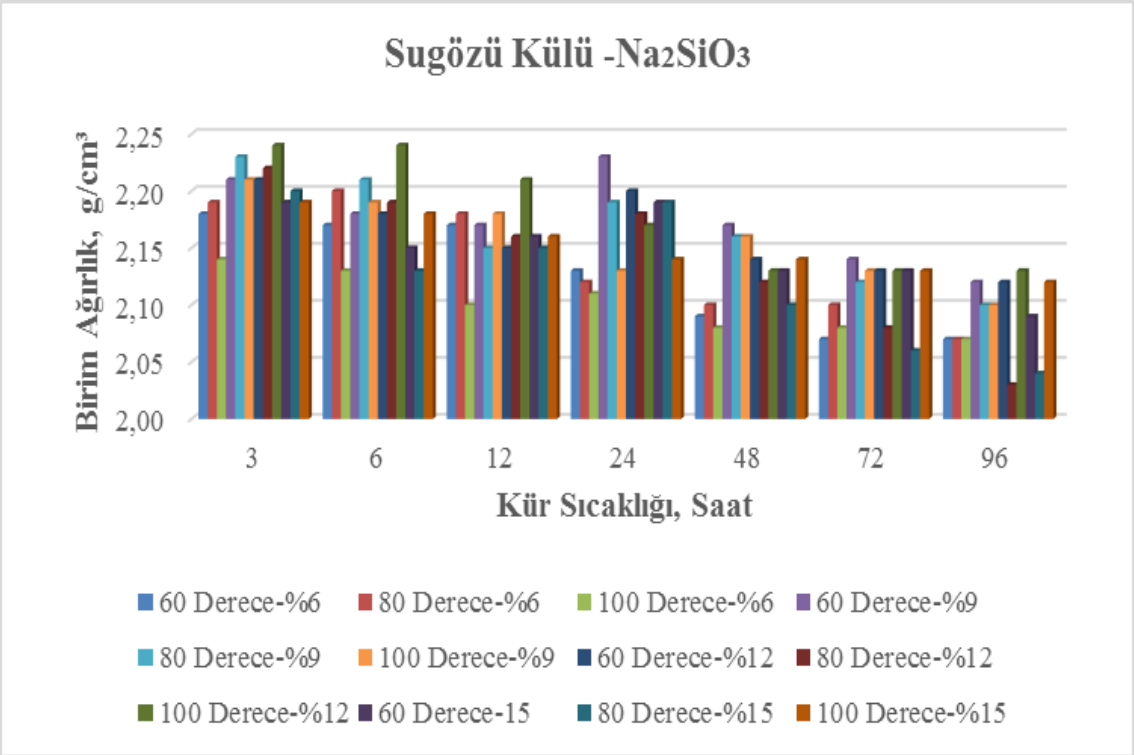
NaOH	%6 Na			%9 Na			%12 Na			%15 Na		
Isıl Kür Süresi (saat)	Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)		
	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100
3	2,19	2,20	2,22	2,23	2,24	2,24	2,28	2,32	2,28	2,29	2,26	2,27
6	2,24	2,28	2,11	2,22	2,25	2,19	2,28	2,29	2,23	2,29	2,29	2,26
12	2,23	2,10	2,08	2,25	2,22	2,17	2,24	2,25	2,23	2,28	2,27	2,26
24	2,13	2,14	2,08	2,25	2,24	2,18	2,26	2,24	2,17	2,26	2,23	2,24
48	2,08	2,12	2,12	2,19	2,18	2,15	2,25	2,20	2,15	2,26	2,21	2,19
72	2,09	2,09	2,10	2,17	2,18	2,16	2,25	2,18	2,17	2,24	2,17	2,19
96	2,07	2,12	2,10	2,16	2,17	2,13	2,17	2,16	2,15	2,23	2,20	2,20



Şekil 3.2. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları

Tablo 3.3. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimer birim ağırlıkları, g/cm^3

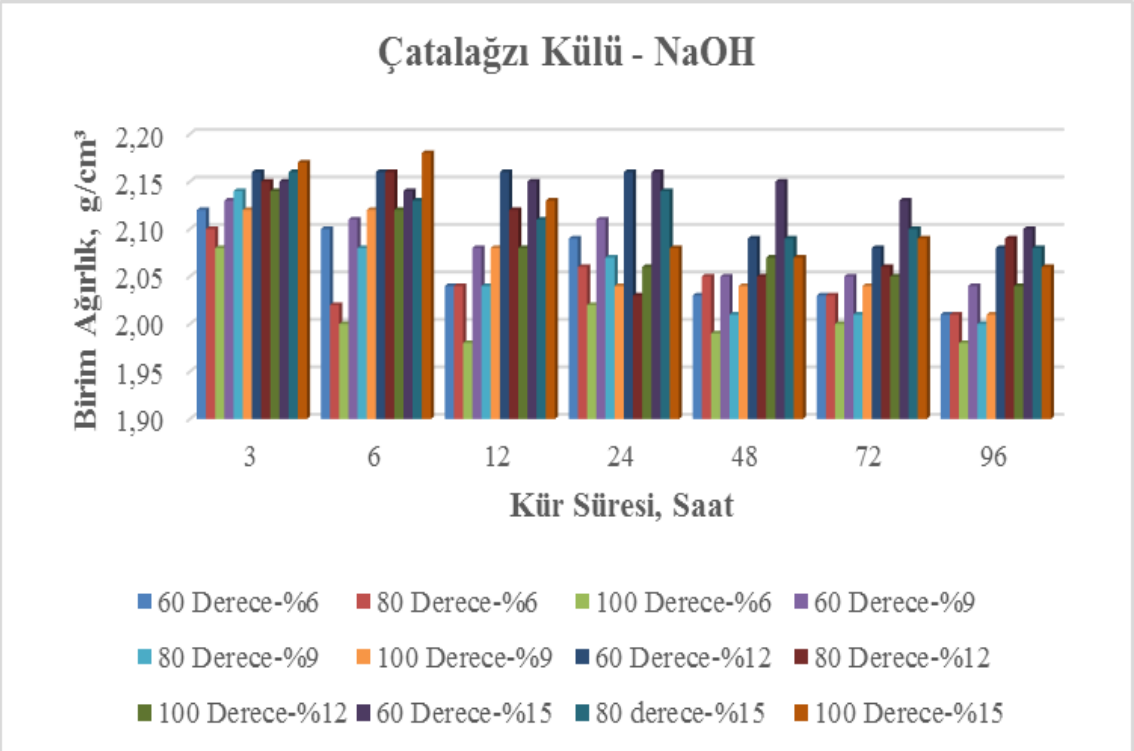
Na_2SiO_3	%6 Na			%9 Na			%12 Na			%15 Na		
Isıl Kür Süresi (saat)	Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)		
	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100
3	2,18	2,19	2,14	2,21	2,23	2,21	2,21	2,22	2,24	2,19	2,20	2,19
6	2,17	2,20	2,13	2,18	2,21	2,19	2,18	2,19	2,24	2,15	2,13	2,18
12	2,17	2,18	2,10	2,17	2,15	2,18	2,15	2,16	2,21	2,16	2,15	2,16
24	2,13	2,12	2,11	2,23	2,19	2,13	2,20	2,18	2,17	2,19	2,19	2,14
48	2,09	2,10	2,08	2,17	2,16	2,16	2,14	2,12	2,13	2,13	2,10	2,14
72	2,07	2,10	2,08	2,14	2,12	2,13	2,13	2,08	2,13	2,13	2,06	2,13
96	2,07	2,07	2,07	2,12	2,10	2,10	2,12	2,03	2,13	2,09	2,04	2,12



Şekil 3.3. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları

Tablo 3.4. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer birim ağırlıkları, g/cm^3

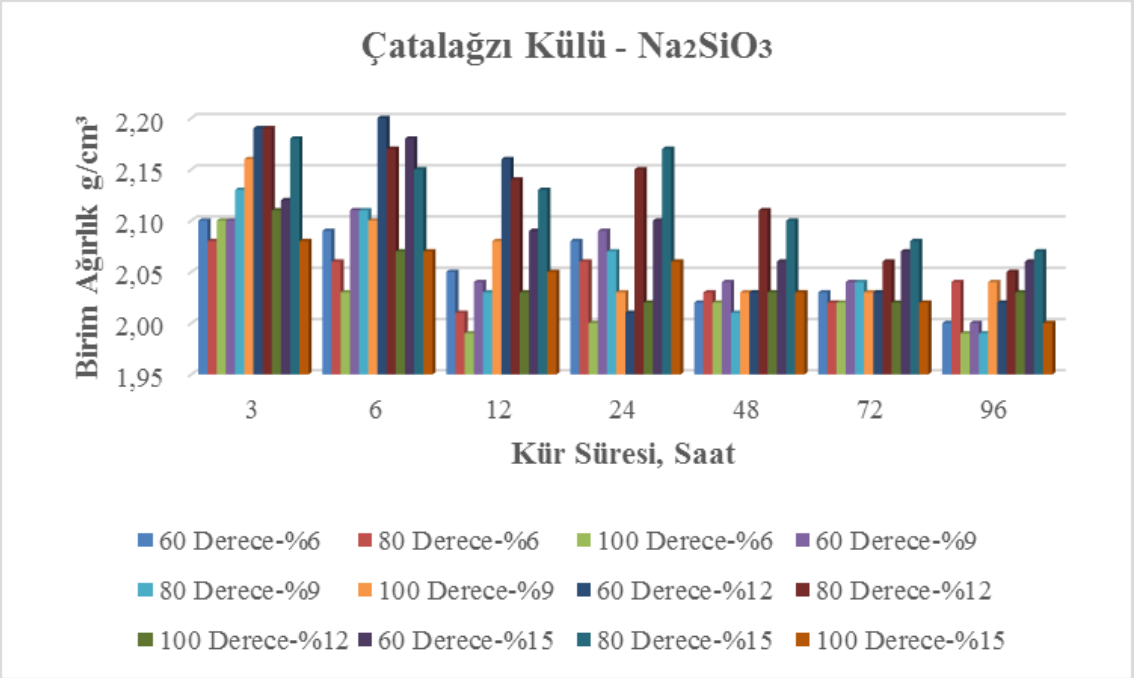
NaOH	%6 Na			%9 Na			%12 Na			%15 Na		
Isıl Kür Süresi (saat)	Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)		
	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100
3	2,12	2,10	2,08	2,13	2,14	2,12	2,16	2,15	2,14	2,15	2,16	2,17
6	2,10	2,02	2,00	2,11	2,08	2,12	2,16	2,16	2,12	2,14	2,13	2,18
12	2,04	2,04	1,98	2,08	2,04	2,08	2,16	2,12	2,08	2,15	2,11	2,13
24	2,09	2,06	2,02	2,11	2,07	2,04	2,16	2,03	2,06	2,16	2,14	2,08
48	2,03	2,05	1,99	2,05	2,01	2,04	2,09	2,05	2,07	2,15	2,09	2,07
72	2,03	2,03	2,00	2,05	2,01	2,04	2,08	2,06	2,05	2,13	2,10	2,09
96	2,01	2,01	1,98	2,04	2,00	2,01	2,08	2,09	2,04	2,10	2,08	2,06



Şekil 3.4. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları

Tablo 3.5. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer birim ağırlıkları, g/cm^3

Na_2SiO_3	%6 Na			%9 Na			%12 Na			%15 Na		
Isıl Kür Süresi (saat)	Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)		
	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100
3	2,10	2,08	2,10	2,10	2,13	2,16	2,19	2,19	2,11	2,12	2,18	2,08
6	2,09	2,06	2,03	2,11	2,11	2,10	2,20	2,17	2,07	2,18	2,15	2,07
12	2,05	2,01	1,99	2,04	2,03	2,08	2,16	2,14	2,03	2,09	2,13	2,05
24	2,08	2,06	2,00	2,09	2,07	2,03	2,01	2,15	2,02	2,10	2,17	2,06
48	2,02	2,03	2,02	2,04	2,01	2,03	2,03	2,11	2,03	2,06	2,10	2,03
72	2,03	2,02	2,02	2,04	2,04	2,03	2,03	2,06	2,02	2,07	2,08	2,02
96	2,00	2,04	1,99	2,00	1,99	2,04	2,02	2,05	2,03	2,06	2,07	2,00



Şekil 3.5. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin birim ağırlıkları

Alkali ile aktive edilen Sugözü uçucu külü geopolimer harçlarının birim hacim ağırlıklarının Çatalağzı geopolimer harçlarına göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Na konsantrasyonunun artması ile birim ağırlıkların arttığı da gözlenmiştir. Hem ısıl kür sıcaklığının artması hem de ısıl kür süresinin uzaması geopolimer harçlarının birim hacim ağırlıklarının azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni de içerisindeki suyun, sıcaklığın ve sürenin etkisiyle azalmasıdır. Alkali ile

aktifleştirilen uçucu kül geopolimer harçlarında yüksek dayanım esas alındığından, yürütülecek durabilite deneyleri için üretilecek karışım gruplarının ısıl kür sıcaklığının 100ºC ve ısıl kür süresinin ise 24 saat olmasına karar verilmiştir. Kontrol olarak da 28 gün suda kür edilmiş Portland çimentolu karışım esas alınacaktır.

Buna göre NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2,08, 2,18, 2,17 ve 2,24 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla 2,11, 2,13, 2,17 ve 2,14 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır. NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2,02, 2,04, 2,06 ve 2,08 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birim hacim ağırlıkları ise sırasıyla 2,00, 2,03, 2,02 ve 2,06 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında en yüksek dayanım değerlerinin belirlenmesi için %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında, 3, 6, 12, 24, 48, 72, 96 saat kür süresi, 60, 80 ve 100ºC'de üretilen numunelerin birim ağırlık sonuçları yukarıda verilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında durabilite deneyleri için belirlenen parametreler olan %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında, 24 saat ısıl kür süresinde ve 100ºC'de kür edilerek elde edilen numunelerin birim ağırlık değerleri yeniden ve yoğunlukları da ilk defa hesaplanarak aşağıda verilmiştir.

Durabilite deneyleri için üretilen sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktifleştirilmiş uçucu küllü sertleşmiş geopolimer harç numunelerinin birim ağırlık ve yoğunluk değerlerleri belirlenmiştir. Durabilite deneyleri kapsamında TS EN 197-1'e uygun CEM I 42,5R çimentosu ile üretilen kontrol numuneleri karşılaştırma için kullanılmıştır. Geopolimerler için %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktive edilmiş Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllü geopolimer numunelerinin görünür birim ağırlık, görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve doygun yüzey kuru yoğunluk değerleri sırasıyla Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.6. Sugözü küllü geopolimerlerin birim ağırlık ve yoğunlukları

No	Birim Ağırlık ve Yoğunluk (g/cm^3)				
	Karışım	**Görünür Birim Ağırlık**	**Görünür Yoğunluk**	**Kuru Yoğunluk**	**DYK Yoğunluk**
0	CEM I 42,5R	2,22	2,27	2,18	2,22
1	NaOH-%6	2,11	2,32	2,07	2,18
2	NaOH-%9	2,16	2,33	2,11	2,20
3	NaOH-%12	2,23	2,31	2,20	2,24
4	NaOH-%15	2,25	2,28	2,21	2,24
5	Na_2SiO_3-%6	2,11	2,34	2,08	2,19
6	Na_2SiO_3-%9	2,15	2,32	2,13	2,21
7	Na_2SiO_3-%12	2,15	2,30	2,15	2,21
8	Na_2SiO_3-%15	2,15	2,27	2,14	2,20

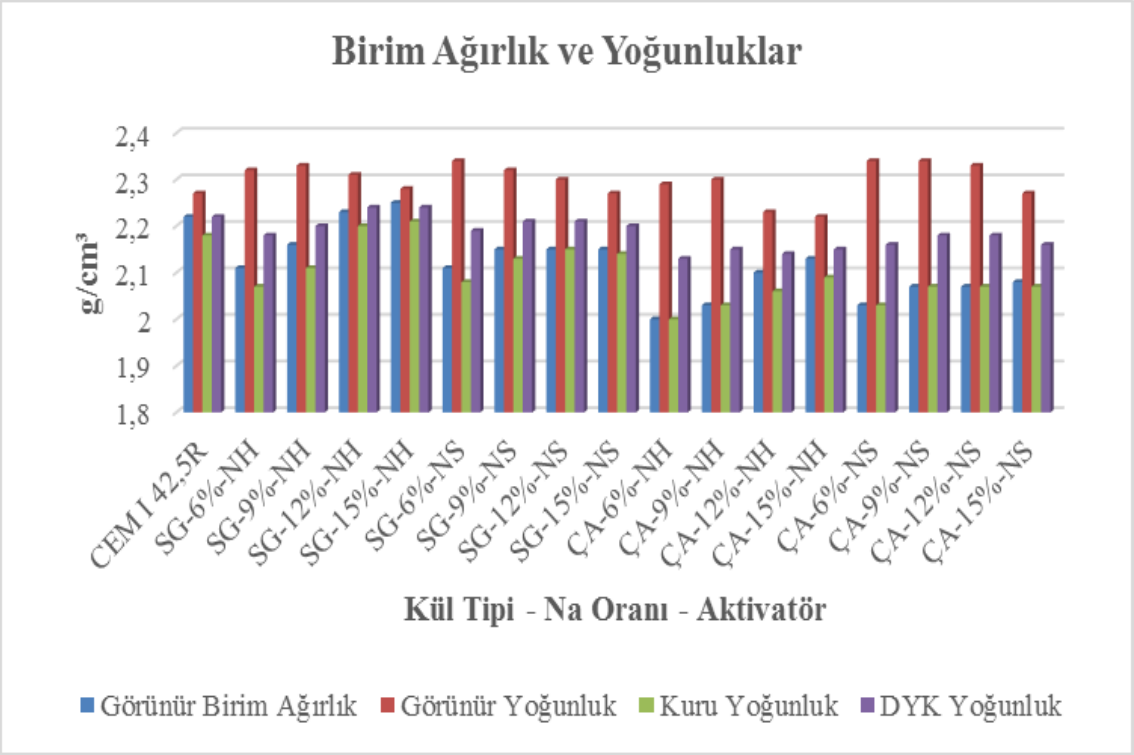
Çimento ile üretilen sertleşmiş kontrol harcının görünür birim ağırlığı 2,22 g/cm^3 ve görünür yoğunluğu 2,27 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. %6, 9, 12 ve 15 Na içeren ve NaOH ile aktifleştirilmiş Sugözü uçucu külü ile üretilen harçların görünür birim ağırlıkları değerleri 2,11-2,25 g/cm^3 ve yoğunlukları ise 2,28-2,33 g/cm^3 arasında ölçülmüştür. Sugözü uçucu külün Na_2SiO_3 ile %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aktifleştirilmesi ile üretilen sertleşmiş harçların görünür birim ağırlıkları 2,11-2,15 g/cm^3 ve yoğunlukları ise 2,27-2,34 g/cm^3 arasında ölçülmüştür. Na konsantrasyonundaki artışın sertleşmiş harçların birim ağırlıklarını çok az arttırdığı ancak yoğunlukları ise biraz düşürdüğü görülmüştür.

Tablo 3.7. Çatalağzı küllü geopolimerlerin birim ağırlık ve yoğunlukları

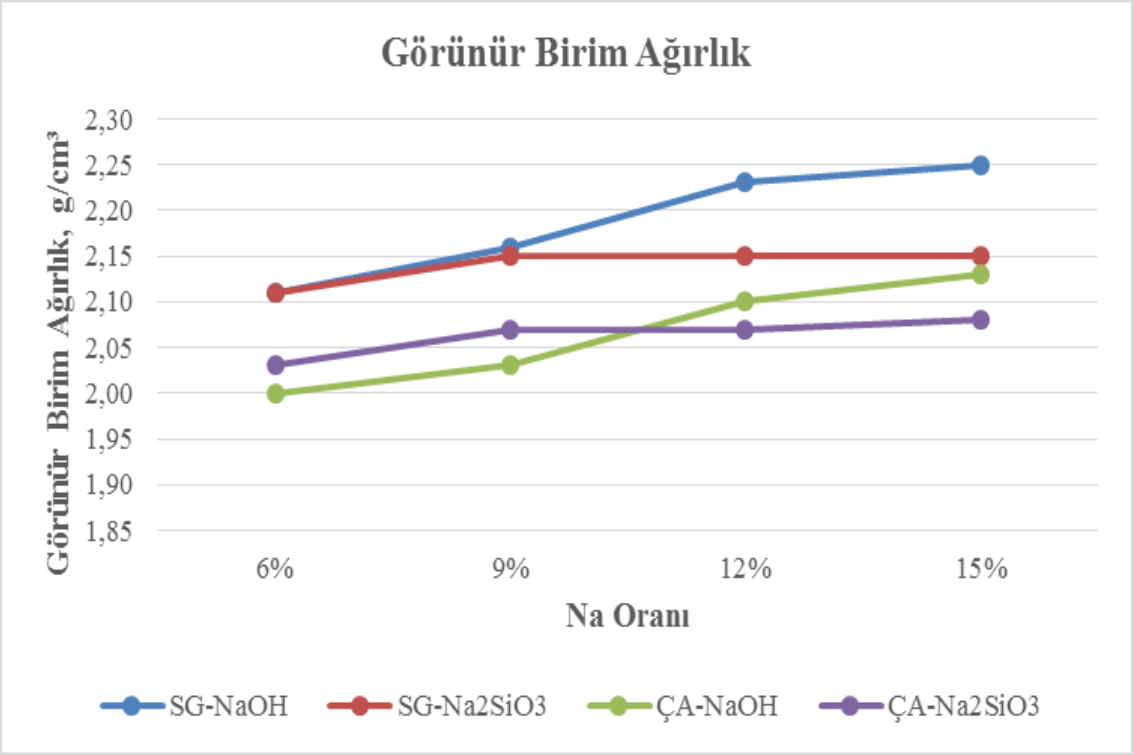
No	Birim Ağırlık ve Yoğunluk (g/cm^3)				
	Karışım	**Görünür Birim Ağırlık**	**Görünür Yoğunluk**	**Kuru Yoğunluk**	**DYK Yoğunluk**
0	PÇ 42,5R	2,22	2,27	2,18	2,22
9	NaOH-%6	2,00	2,29	2,00	2,13
10	NaOH-%9	2,03	2,30	2,03	2,15
11	NaOH-%12	2,10	2,23	2,06	2,14
12	NaOH-%15	2,13	2,22	2,09	2,15
13	Na_2SiO_3-%6	2,03	2,34	2,03	2,16
14	Na_2SiO_3-%9	2,07	2,34	2,07	2,18
15	Na_2SiO_3-%12	2,07	2,33	2,07	2,18
16	Na_2SiO_3-%15	2,08	2,27	2,07	2,16

Geopolimer harçlarda %6, %9, %12 ve %15 Na içeren ve NaOH ile aktifleştirilmiş Çatalağzı uçucu külü ile üretilen harçların görünür birim ağırlıkları değerleri 2,00-2,13 g/cm^3 ve yoğunlukları ise 2,22-2,29 g/cm^3 arasında ölçülmüştür. Çatalağzı uçucu külün Na_2SiO_3 ile %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aktifleştirilmesi ile üretilen sertleşmiş harçların görünür birim ağırlıkları 2,03-2,08 g/cm^3 ve yoğunlukları ise 2,27-2,34 g/cm^3 arasında ölçülmüştür.

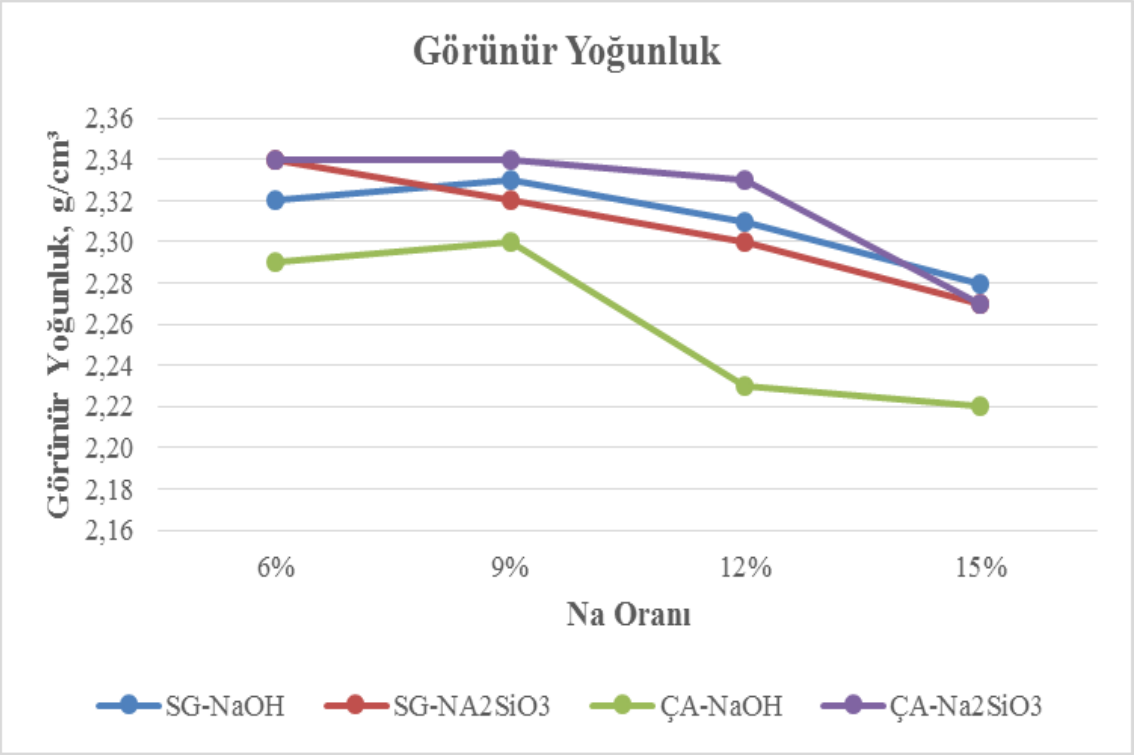
Çalışmada elde edilen tüm numune gruplarının birim ağırlık ve yoğunlukları Şekil 3.6'da, geopolimerlerin Na oranına bağlı birim ağırlık ve yoğunluk değişimleri ise Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da grafiklerle gösterilmiştir.



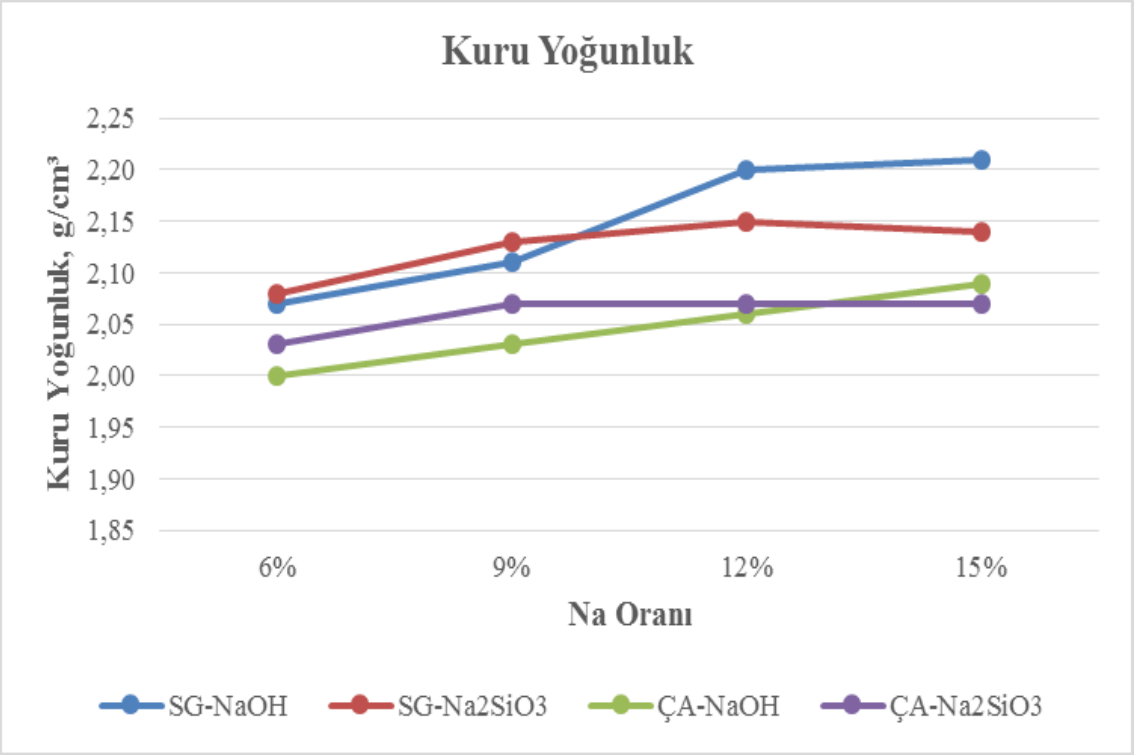
Şekil 3.6. Harç numunelerinin birim ağırlık ve yoğunlukları



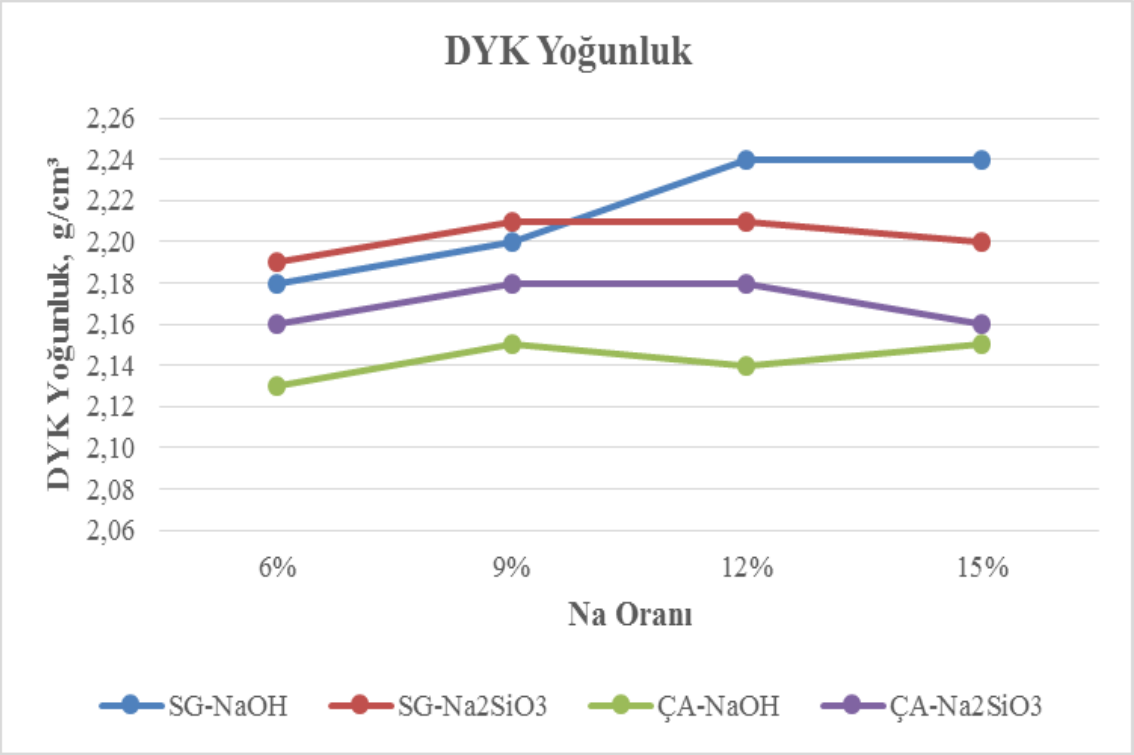
Şekil 3.7. Geopolimerlerin Na oranına bağlı görünür birim ağırlık değişimi



Şekil 3.8. Geopolimerlerin Na oranına bağlı görünür yoğunluk değişimi



Şekil 3.9. Geopolimerlerin Na oranına bağlı kuru yoğunluk değişimi



Şekil 3.10. Geopolimerlerin Na oranına bağlı DYK yoğunluk değişimi

Na konsantrasyonundaki artışın sertleşmiş harçların birim ağırlıklarını çok az arttırdığı ancak görünür yoğunlukları ise biraz düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca Na oranı artışı kuru yoğunluklarda biraz artış gösterse de doygun yüzey kuru yoğunluklarda önemli bir değişim göstermemektedir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ya da sodyum silikat kullanımının arasında birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin benzer sonuçlar verdiği, dolayısıyla da sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Portland çimentosu ile üretilen harçların birim ağırlığının aktivatörler ile aktifleştirilen uçucu küllü harçlardan biraz yüksek olduğu ancak yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

3.2. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer taze harç numunelerinin yayılma değeri, yayılan harç numunenin ortalama çapının ölçülmesiyle belirlenmiştir. Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktive edilmiş geopolimer numuneler ile kontrol numuneleri üzerinde TS EN 1015-3'e göre yapılan yayılma tablası deneyine ait kıvam değerleri ve kontrol harcı kıvam değeri Tablo 3.8'de verilmiştir.

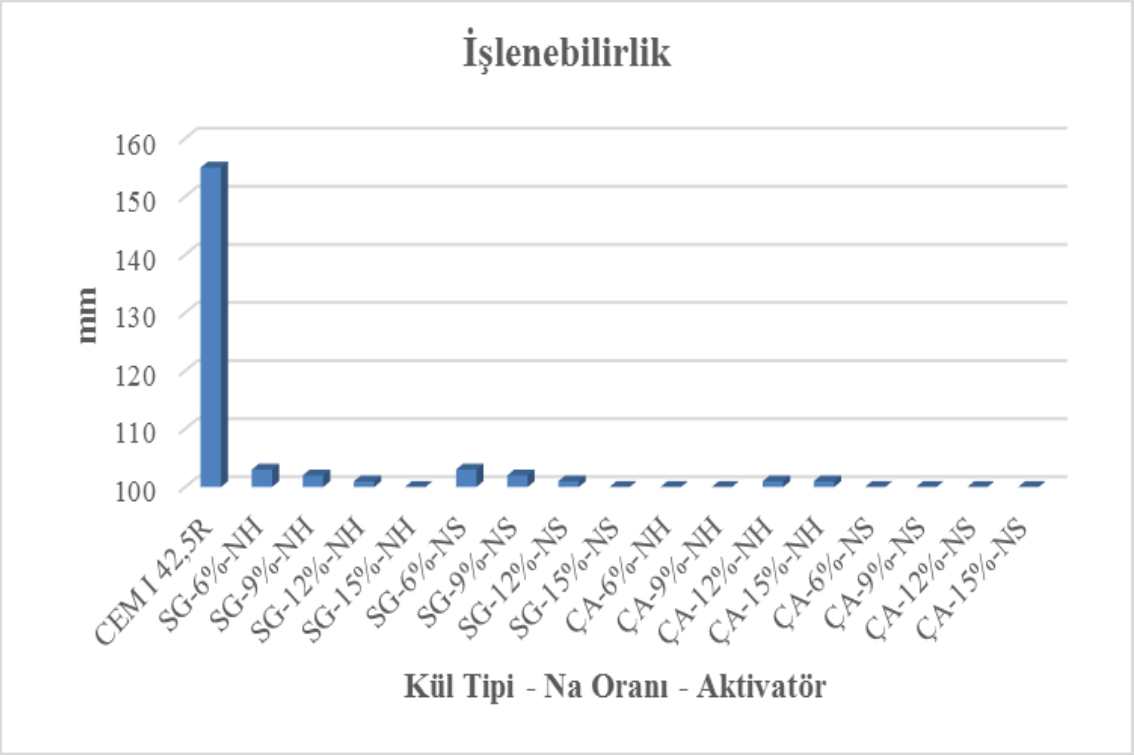
Tablo 3.8. Kontrol ve geopolimer harçların işlenebilirlik değerleri

Kül Tipi	**Sugözü Uçucu Külü**		**Çatalağzı Uçucu Külü**	
Aktivatör	**NaOH**	**Na_2SiO_3**	**NaOH**	**Na_2SiO_3**
Na Oranı (%)	**Yayılma Çapı (mm)**		**Yayılma Çapı (mm)**	
6	103	103	100	100
9	102	102	100	100
12	101	101	101	100
15	100	100	101	100
CEM I 42,5R Çimentolu Kontrol Harcı			155	

Alkaliler ile aktifleştirilmiş Sugözü uçucu külü ile üretilen harçların yayılma değerleri 100-103 mm arasında ölçülmüştür. Çatalağzı uçucu külün aktifleştirilmesi ile üretilen taze harçların yayılma değerleri ise 100-101 mm arasında ölçülmüştür. Na konsantrasyonundaki artışın taze harç kıvamlarını çok az düşürme eğiliminde olduğu görülmüştür. Bunun birinci sebebi teorik olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat reaksiyonu sonucu açığa çıkacak su miktarının karışıma dışardan girecek su miktarından düşülmesidir. İkincisi ise alkali ile aktifleştirilen numunelerin su/bağlayıcı oranının 0,30 olması harçların işlenebilirliğinin oldukça düşük olmasına yol açmasıdır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ya da sodyum silikat kullanımının kıvama etkisi açısından benzer sonuçlar verdiği, dolayısıyla da sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Çatalağzı külünün sodyum silikat ile aktifleştirilmesi sonucu yayılma hiç olmamıştır. Çimento ile üretilen taze harcın kıvam değeri 155 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12).



Şekil 3.11. Geopolimer ve kontrol numunelerinin işlenebilirlik tayini



Şekil 3.12. Taze harç işlenebilirlik değerleri

3.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen çimentolu kontrol harç numuneleri suda ve ısıl kür edilerek, alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harç numuneleri ise ısıl kür işlemi sonrası oda sıcaklığına getirildikten sonra 3 adet 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler tek noktadan eğilme deneyine tabi tutulmuştur.

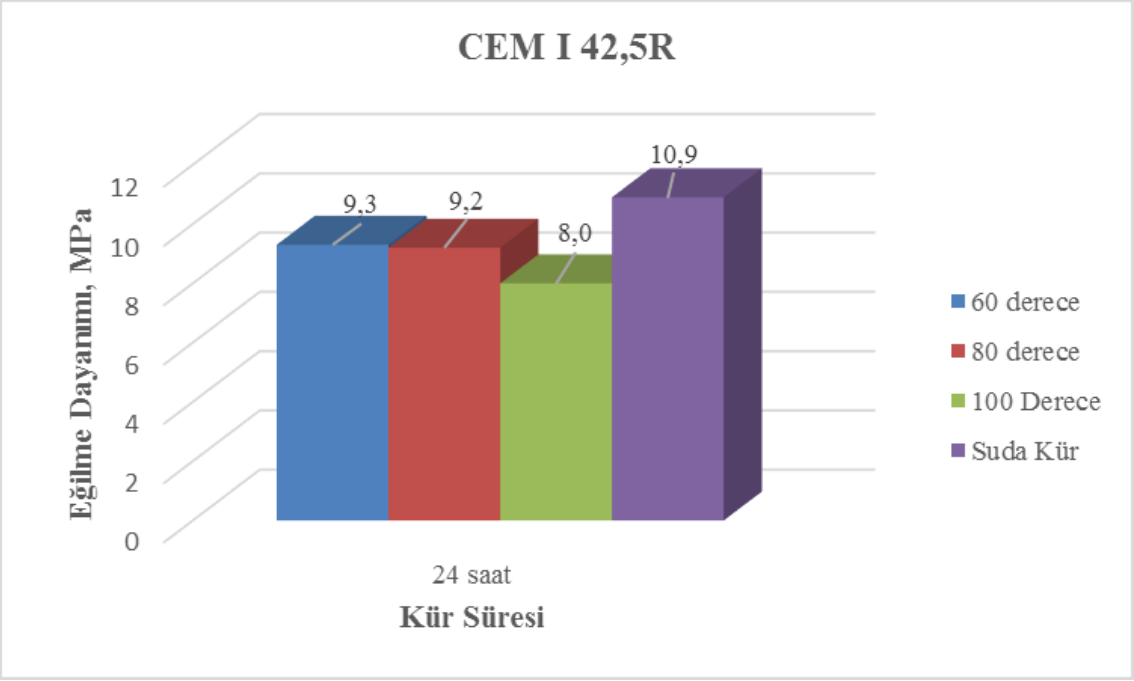
3.3.1. Kontrol Numunelerinin Eğilme Dayanımı Sonuçları

CEM I 42,5R Portland çimentosu ile üretilen kontrol harçlara ısıl kür sıcaklığının ve ısıl kür süresinin eğilme dayanımı üzerine olan etkisi Tablo 3.9'da verilmiştir. Portland çimentosunun 28 gün 20°C'de suda kür sonucu elde edilen eğilme dayanımı 10,9 MPa olmuştur. Durabilite deneylerinde kontrol numunesi olarak suda kür edilmiş bu standart karışım üretilerek geopolimer harçları ile kıyaslamak için kullanılmıştır.

Tablo 3.9. Kontrol numunelerinin eğilme dayanımı, MPa

Kontrol Numuneleri, CEM I 42,5R				
Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı**			**Suda kür**
	60°C	**80°C**	**100°C**	**20°C**
3	8,2	8,2	6,9	-
6	6,3	8,5	7,1	-
12	6,6	7,9	9,0	-
24	9,3	9,2	8,0	-
48	8,7	9,2	7,7	-
72	8,9	9,7	7,8	-
96	8,2	9,9	8,1	-
28 gün	-	-	-	10,9

Geopolimer harçlarda durabilite deneylerinde kullanılan 24 saat 100°C parametreleri ile üretilen ısıl kür uygulanan çimentolu harçlar ile suda kür uygulanan kontrol grubunun eğilme dayanımları Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13. Kontrol harç numunelerinin farklı kür sonucu eğilme dayanımı

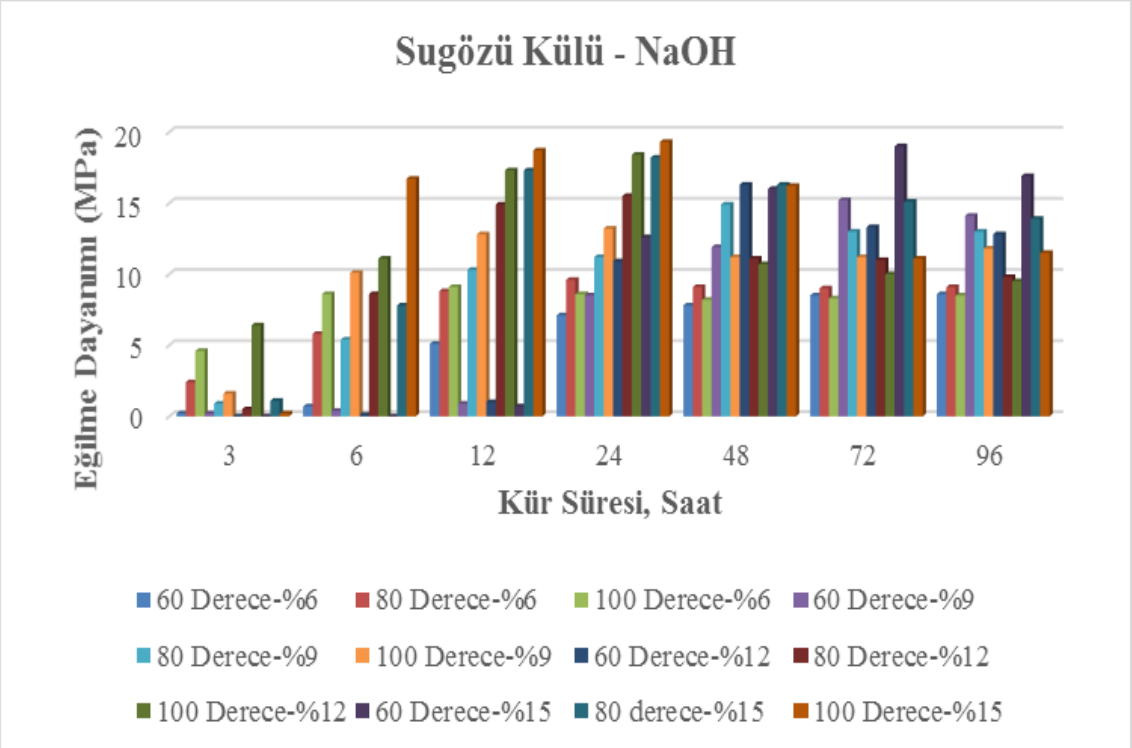
Geopolimer numunelere ısıl kür uygulandığı için benzer şartlar altında kontrol numunelerinin eğilme dayanımı tepkisi araştırılmıştır. Ancak ısıl kürün çimentolu numunelere olumlu bir katkısının olmadığı hatta numune içindeki nemi kaybetmesinden dolayı dayanımının bir miktar düştüğü görülmüştür.

3.3.2. Sugözü Küllü Geopolimerlerin Eğilme Dayanımı Sonuçları

Sugözü külünün sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktifleştirilen ve farklı ısıl kür sıcaklığına ve farklı kür süresine tabi tutulduktan sonra yapılan eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 3.10. ve Tablo 3.11'de sunulmuştur.

Tablo 3.10. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa

NaOH	%6 Na			%9 Na			%12 Na			%15 Na		
Isıl Kür Süresi (saat)	Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)		
	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100
3	0,2	2,4	4,6	0,2	0,9	1,6	0,0	0,5	6,4	0,0	1,1	0,2
6	0,7	5,8	8,6	0,4	5,4	10,1	0,1	8,6	11,1	0,0	7,8	16,7
12	5,1	8,8	9,1	0,9	10,3	12,8	1,0	14,9	17,3	0,7	17,3	18,7
24	7,1	9,6	8,6	8,5	11,2	13,2	10,9	15,5	18,4	12,6	18,2	19,3
48	7,8	9,1	8,2	11,9	14,9	11,2	16,3	11,1	10,7	16,0	16,3	16,2
72	8,5	9,0	8,3	15,2	13,0	11,2	13,3	11,0	10,0	19,0	15,1	11,1
96	8,6	9,1	8,5	14,1	13,0	11,8	12,8	9,8	9,5	16,9	13,9	11,5



Şekil 3.14. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı

NaOH ile %15 Na oranında aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen eğilme dayanımı 0,2 MPa'dır. Bu değer daha

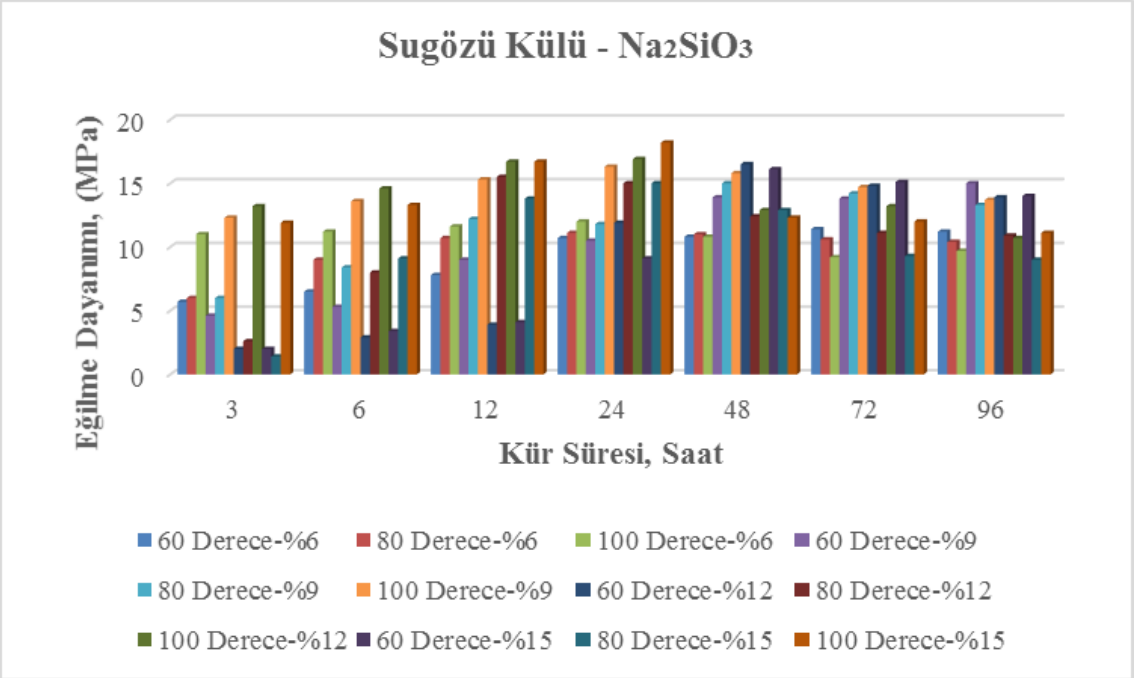
sonra 0,2 MPa dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 16,7, 18,7, 19,3, 16,2, 11,1 ve 11,5 MPa eğilme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 19,3 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır.

Na_2SiO_3 ile %15 Na oranında aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen eğilme dayanımı 11,9 MPa'dır. Bu değer daha sonra 11,9 MPa dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 13,3, 16,7, 18,2, 12,3, 12,0 ve 11,1 MPa eğilme dayanımı değerlerine ulaşmıştır.

Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 18,2 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır.

Tablo 3.11. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa

Na_2SiO_3	**%6 Na**			**%9 Na**			**%12 Na**			**%15 Na**		
Isıl Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**		
	60	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**
3	5,7	6,0	11,0	4,6	6,0	12,3	2,0	2,6	13,2	2,0	1,4	11,9
6	6,5	9,0	11,2	5,3	8,4	13,6	2,9	8,0	14,6	3,4	9,1	13,3
12	7,8	10,7	11,6	9,0	12,2	15,3	3,9	15,5	16,7	4,1	13,8	16,7
24	10,7	11,1	12,0	10,5	11,8	16,3	11,9	15,0	16,9	9,1	15,0	18,2
48	10,8	11,0	10,8	13,9	15,0	15,8	16,5	12,4	12,9	16,1	12,9	12,3
72	11,4	10,6	9,2	13,8	14,2	14,7	14,8	11,1	13,2	15,1	9,3	12,0
96	11,2	10,4	9,7	15,0	13,3	13,7	13,9	10,9	10,7	14,0	9,0	11,1



Şekil 3.15. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı

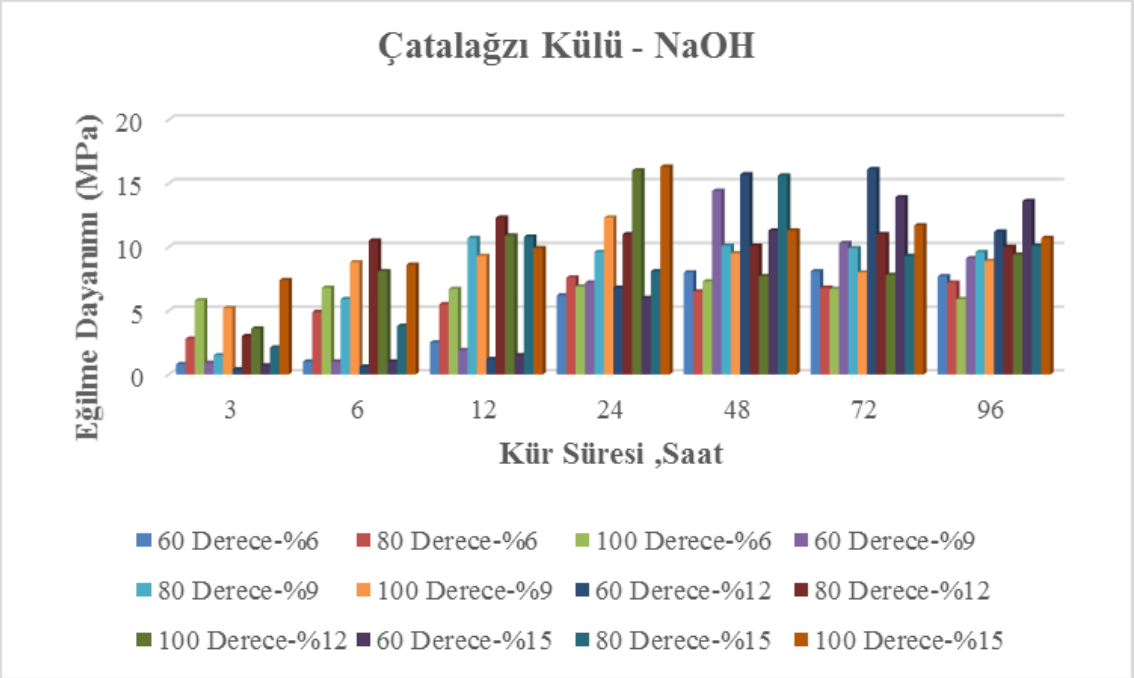
NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu külü geopolimer numunelerinin sıcaklık ve kür süresi arttıkça eğilme dayanım değerleri artmakta fakat optimum süre ve sıcaklıktan sonra düşüşe geçmektedir. Ancak süre artışıyla dayanım artışı sadece düşük sıcaklıklarda (60ºC) devam etmektedir (Şekil 3.14 ve Şekil 3.15).

3.3.3. Çatalağzı Küllü Geopolimerin Eğilme Dayanımı Sonuçları

Çatalağzı uçucu külünün sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktifleştirilen ve farklı ısıl kür sıcaklığına ve farklı kür süresine tabi tutulduktan sonra yapılan eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 3.12 ve Tablo 3.13'te sunulmuştur.

Tablo 3.12. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa

NaOH	**%6 Na**			**%9 Na**			**%12 Na**			**%15 Na**		
Isıl Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**		
	60	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**
3	0,8	2,8	5,8	0,9	1,5	5,2	0,4	3,0	3,6	0,7	2,1	7,4
6	1,0	4,9	6,8	1,0	5,9	8,8	0,6	10,5	8,1	1,0	3,8	8,6
12	2,5	5,5	6,7	1,9	10,7	9,3	1,2	12,3	10,9	1,5	10,8	9,9
24	6,2	7,6	6,9	7,2	9,6	12,3	6,8	11,0	16,0	6,0	8,1	16,3
48	8,0	6,5	7,3	14,4	10,1	9,5	15,7	10,1	7,7	11,3	15,6	11,3
72	8,1	6,8	6,7	10,3	9,9	8,0	16,1	11,0	7,8	13,9	9,3	11,7
96	7,7	7,2	5,9	9,1	9,6	8,9	11,2	10,0	9,4	13,6	10,1	10,7

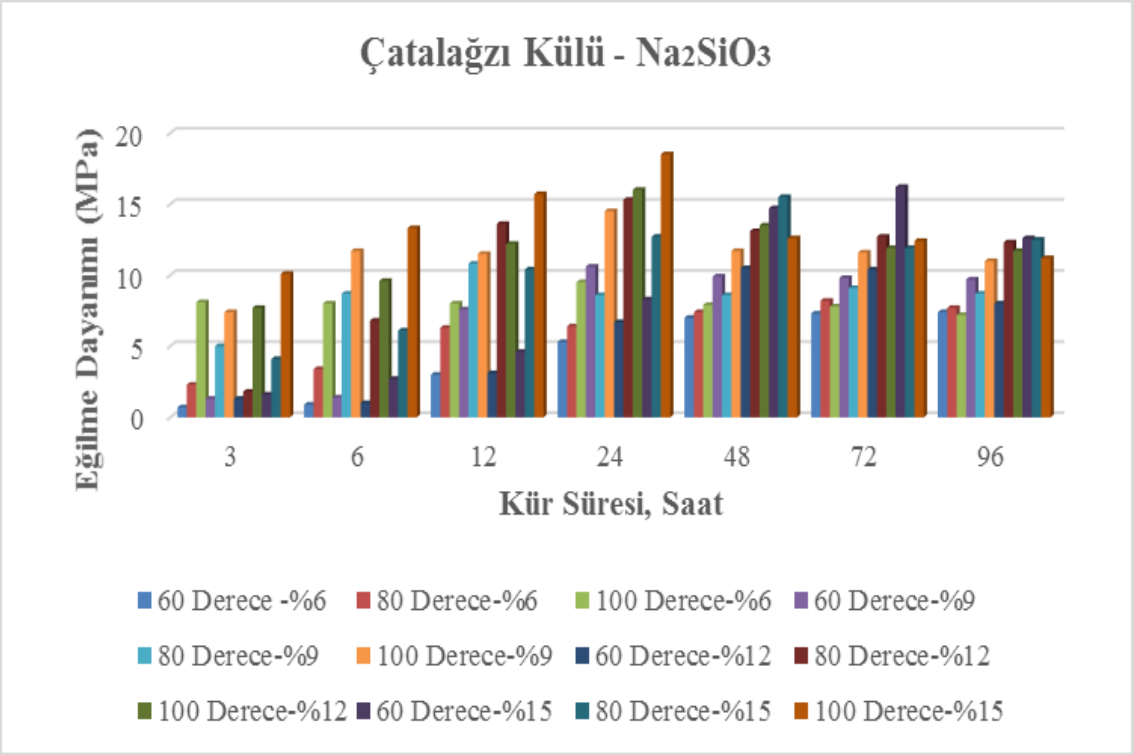


Şekil 3.16. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı

NaOH ile %15 Na oranında aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen eğilme dayanımı 7,4 MPa'dır. Bu değer daha sonra 7,4 MPa dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 8,6, 9,9, 16,3, 11,3, 11,7 ve 10,7 MPa eğilme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerde en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 16,3 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır.

Tablo 3.13. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer eğilme dayanımı, MPa

Na_2SiO_3	**%6 Na**			**%9 Na**			**%12 Na**			**%15 Na**		
Isıl Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**		
	60	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**
3	0,7	2,3	8,1	1,3	5,0	7,4	1,3	1,8	7,7	1,6	4,1	10,1
6	0,9	3,4	8,0	1,4	8,7	11,7	1,0	6,8	9,6	2,7	6,1	13,3
12	3,0	6,3	8,0	7,6	10,8	11,5	3,1	13,6	12,2	4,6	10,4	15,7
24	5,3	6,4	9,5	10,6	8,6	14,5	6,7	15,3	16,0	8,3	12,7	18,5
48	7,0	7,4	7,9	9,9	8,6	11,7	10,5	13,1	13,5	14,7	15,5	12,6
72	7,3	8,2	7,8	9,8	9,1	11,6	10,4	12,7	11,9	16,2	11,9	12,4
96	7,4	7,7	7,2	9,7	8,7	11,0	8,0	12,3	11,7	12,6	12,5	11,2



Şekil 3.17. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin eğilme dayanımı

Na_2SiO_3 ile %15 Na oranında aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen eğilme dayanımı 10,1 MPa'dır. Bu değer daha sonra 10,1 MPa'dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 13,3, 15,7, 18,5, 12,6, 12,4 ve 11,2 MPa eğilme dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerde en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 18,5 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır.

NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu külü geopolimer numunelerinin sıcaklık ve kür süresi arttıkça eğilme dayanım değerleri artmakta fakat optimum süre ve sıcaklıktan sonra düşüşe geçmektedir. Ancak süre artışıyla dayanım artışı sadece düşük sıcaklıklarda (60ºC) devam etmektedir (Şekil 3.16 ve Şekil 3.17).

3.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen kontrol numuneleri ısıl kür ve suda küre tabii tutulup eğilme dayanımı ile ikiye bölünen numunelere basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harç numuneleri ise ısıl kür işlemine tabii tutulmuş ve sonra oda sıcaklığına getirildikten sonra 3 adet 40×40×160 mm boyutlarındaki

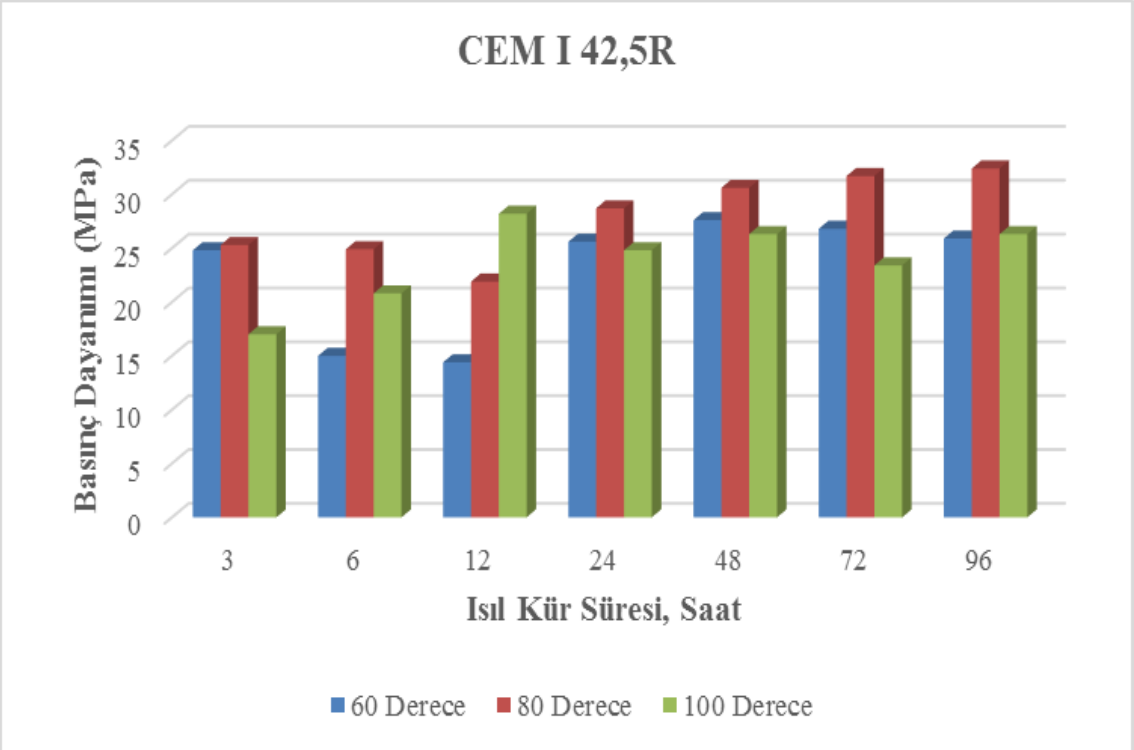
prizmatik numuneler önce eğilme deneyi ile iki parçaya bölünmüş ve bu parçanın her biri basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur.

3.4.1. Kontrol Numunelerinin Basınç Dayanımı Sonuçları

CEM I 42,5R Portland çimentosu ile üretilen kontrol harçlara ısıl kür sıcaklığının ve ısıl kür süresinin basınç dayanımı üzerine etkisi Tablo 3.14'te verilmiştir.

Tablo 3.14. Kontrol numunelerinin basınç dayanımı, MPa

Portland Çimentolu Kontrol Numuneleri CEM I 42,5R				
Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı**			**Suda kür**
	60°C	**80°C**	**100°C**	**20°C**
3	24,8	25,3	17,0	-
6	15,0	24,9	20,8	-
12	14,4	21,9	28,2	-
24	25,6	28,7	24,8	-
48	27,6	30,6	26,3	-
72	26,8	31,7	23,4	-
96	25,9	32,4	26,3	-
28 gün	-	-	-	50,5



Şekil 3.18. Kontrol numunelerinin ısıl kür sonucu basınç dayanımı

Portland çimentosunun 28 gün 20°C'de suda kür sonucu basınç dayanımı 50,5 MPa olmuştur. Isıl kür uygulanan numunelerde dayanım su kaybının da etkisiyle çoğunluğu 30 MPa'ın altına düşmüştür (Şekil 3.18). Durabilite deneylerinde kontrol numunesi olarak suda kür edilen standart karışım üretilerek, geopolimer harçları ile kıyaslamak için kullanılmıştır.

3.4.2. Sugözü Küllü Geopolimerin Basınç Dayanımı Sonuçları

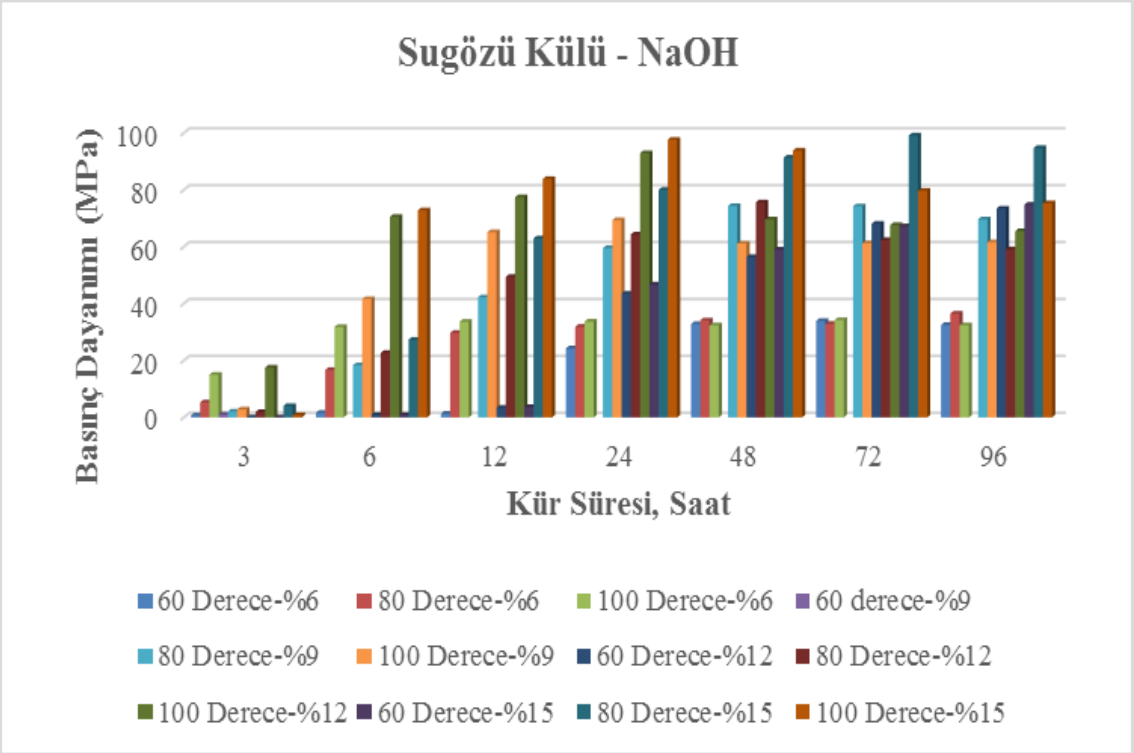
Sugözü uçucu küllerinin sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktifleştirilen ve farklı ısıl kür sıcaklığına ve farklı kür süresine tabi tutulduktan sonra yapılan basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 3.15 ve Tablo 3.16'da, grafiksel anlatım Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de sunulmuştur.

Basınç dayanımlarının Na konsantrasyonunun %6'dan %15'e kadar artışı ile genel olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca ısıl kür sıcaklığının 60ºC'den 100ºC'ye kadar artışı ile de geopolimer harçlarının basınç dayanımının artış gösterdiği görülmüştür. Isıl kür süresinin artışı ise belirli bir değere kadar basınç dayanımda artış gösterdiği sonrasında ise azaldığı görülmüştür. Isıl kür süresinin genel olarak 3 saat ten 24 saate kadar artmasıyla birlikte dayanımlarının önemli oranda arttığı ve geliştiği belirlenmiştir. 60ºC ve 80ºC'lik ısıl kür işleminde daha uzun kür süresi gerekiyorken 100ºC'lik ısıl kür işleminde 24 saatlik kür süresinin yeterli olduğu görülmüştür. 60ºC ve 80ºC'lik ısıl kür işleminde kür süresi ile basınç dayanımları artmakta iken, 100ºC'lik ısıl kür işleminde 24 saatten sonra basınç dayanımlarının düştüğü görülmüştür.

Örneğin, NaOH ile %6 Na oranında aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 60ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen basınç dayanımı 0,7 MPa'dır. Bu değer daha sonra 0,7 MPa'dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 1,6, 1,3, 24,3, 32,8, 33,9 ve 32,5 MPa basınç dayanımı değerlerine erişmiştir. Bu artış reaksiyon kinetiklerine bağlanmaktadır. Bilindiği üzere ısıl kür kimyasal reaksiyonları artırmaktadır, ayrıca reaksiyonlar bir süreç içinde yer aldığından kür zamanının artması da yüksek pH değerine sahip alkali ortamında amorf silis ve alümina arasındaki reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürün miktarlarını artırmaktadır [34,37].

Tablo 3.15. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa

NaOH	%6 Na			%9 Na			%12 Na			%15 Na		
Isıl Kür Süresi (saat)	Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)		
	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100
3	0,7	5,3	15,0	0,6	2,1	2,8	0,0	1,9	17,5	0,0	4,0	0,8
6	1,6	16,7	31,8	1,1	18,3	41,6	0,9	22,7	70,5	0,9	27,3	72,8
12	1,3	29,7	33,6	2,2	42,2	65,1	3,4	49,4	77,4	3,7	62,9	83,8
24	24,3	31,9	33,7	33,2	59,5	69,3	43,5	64,3	92,9	46,7	80,0	97,6
48	32,8	34,1	32,4	51,8	74,3	61,1	56,4	75,6	69,6	59,0	91,3	93,8
72	33,9	32,9	34,2	65,0	74,2	61,2	68,1	62,3	67,6	67,2	99,1	79,7
96	32,5	36,5	32,4	63,4	69,6	61,6	73,4	59,1	65,5	74,8	94,7	75,3

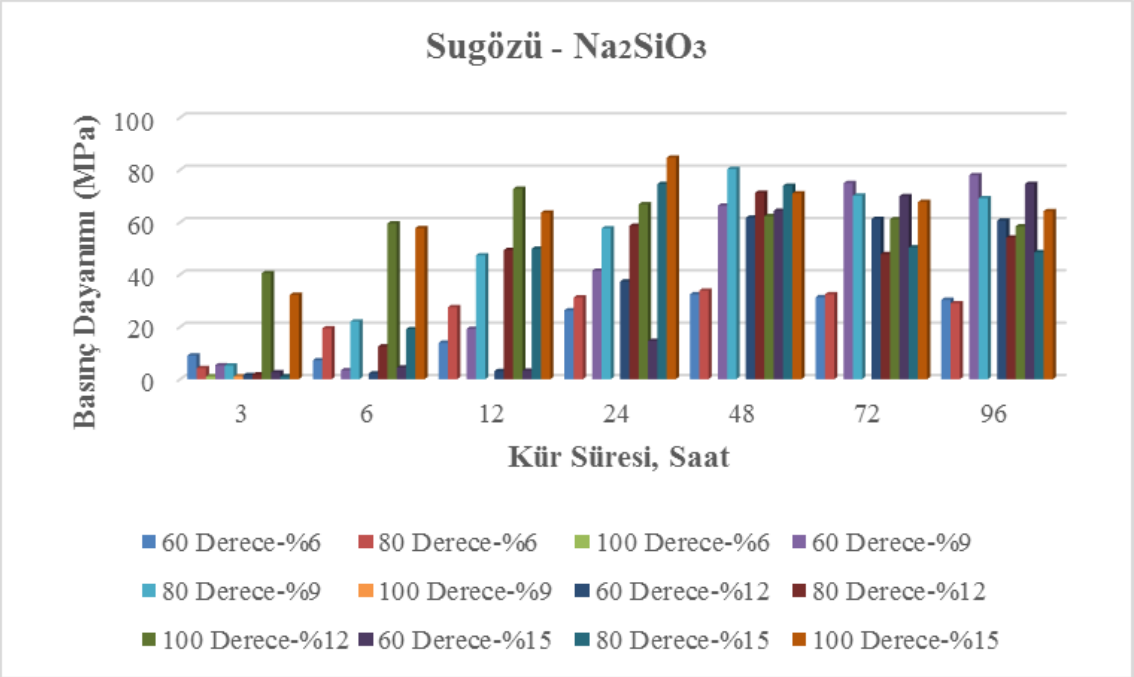


Şekil 3.19. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin basınç dayanımı

NaOH ile %15 Na oranında aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen basınç dayanımı 0,8 MPa'dır. Bu değer daha sonra 0,8 MPa'dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 72,8, 83,8, 97,6, 93,8, 79,7 ve 75,3 MPa basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 97,6 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Tablo 3.16. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa

Na_2SiO_3	%6 Na			%9 Na			%12 Na			%15 Na		
Isıl Kür Süresi (saat)	Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)			Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)		
	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100
3	9,0	4,2	30,3	5,3	5,2	46,9	1,5	1,8	40,5	2,6	1,0	32,2
6	7,2	19,4	34,4	3,4	22,0	62,7	2,2	12,5	59,5	4,4	19,1	57,7
12	13,9	27,5	37,9	19,2	47,3	68,2	3,1	49,3	72,7	3,2	49,8	63,6
24	26,3	31,2	41,1	41,4	57,6	73,1	37,3	58,6	66,8	14,6	74,6	84,6
48	32,4	33,8	40,3	66,3	80,3	70,6	61,7	71,2	62,3	64,3	73,9	71,0
72	31,3	32,4	35,1	74,9	70,1	65,8	61,2	47,8	61,1	69,9	50,3	67,7
96	30,3	29,0	36,8	77,9	69,1	67,8	60,6	54,1	58,4	74,6	48,5	64,2



Şekil 3.20. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin basınç dayanımı

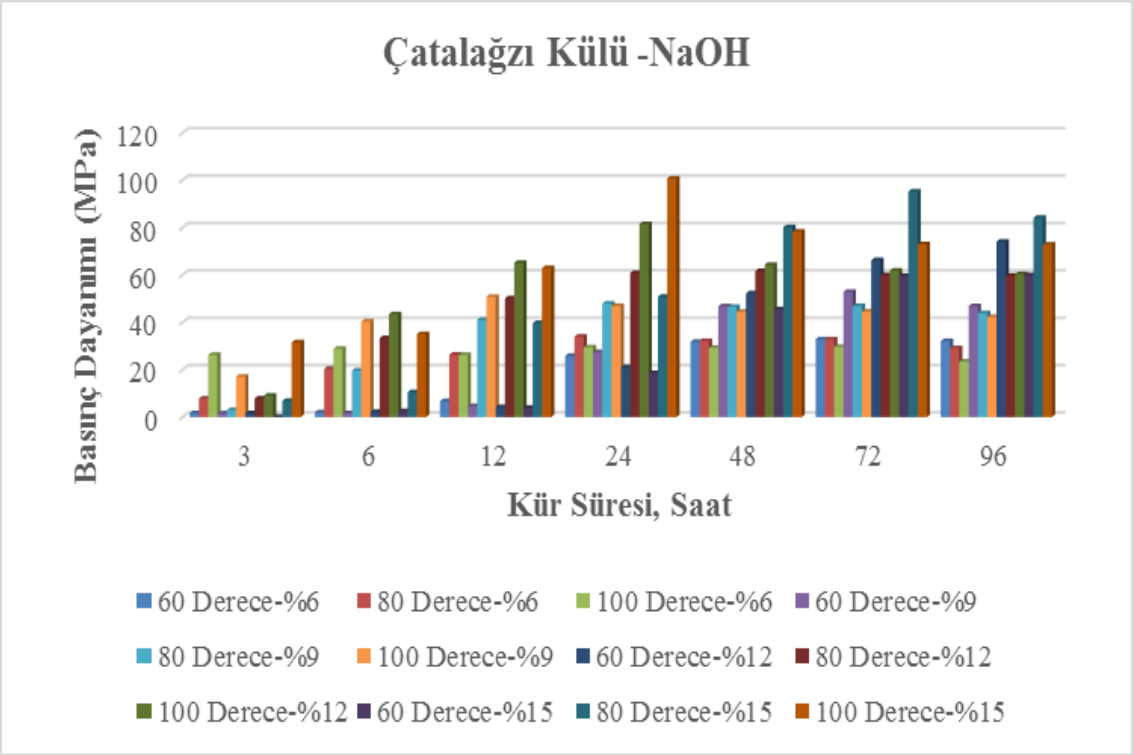
Na_2SiO_3 ile %15 Na oranında aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen basınç dayanımı 32,2 MPa'dır. Bu değer daha sonra 32,2 MPa dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 57,7, 63,6, 84,6, 71,0, 67,7 ve 64,2 MPa basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 84,6 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır.

3.4.3. Çatalağzı Küllü Geopolimerin Basınç Dayanımı Sonuçları

Çatalağzı uçucu külünün sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktifleştirilen ve farklı ısıl kür sıcaklığına ve farklı kür süresine tabi tutulduktan sonra yapılan basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 3.17 ve Tablo 3.18'de, grafiksel anlatım Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de sunulmuştur.

Tablo 3.17. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa

NaOH	**%6 Na**			**%9 Na**			**%12 Na**			**%15 Na**		
Isıl Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**		
	60	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**
3	1,6	7,8	26,2	1,5	2,9	17,0	1,6	7,8	9,0	0,0	6,8	31,5
6	2,0	20,3	28,8	1,6	19,6	40,3	2,1	33,3	43,4	2,5	10,4	35,0
12	6,7	26,3	26,2	4,6	41,0	50,7	4,2	50,1	65,1	3,9	39,7	62,9
24	25,8	33,9	29,4	27,4	47,9	46,9	21,0	60,8	81,4	18,6	50,8	100,7
48	31,7	32,1	29,2	46,7	46,5	44,4	52,2	61,6	64,2	45,5	80,1	78,2
72	32,8	32,8	29,6	52,8	46,9	44,5	66,2	59,9	61,8	59,6	95,2	72,9
96	32,1	29,1	23,4	46,8	43,8	42,2	74,0	59,7	60,3	59,9	84,1	72,8

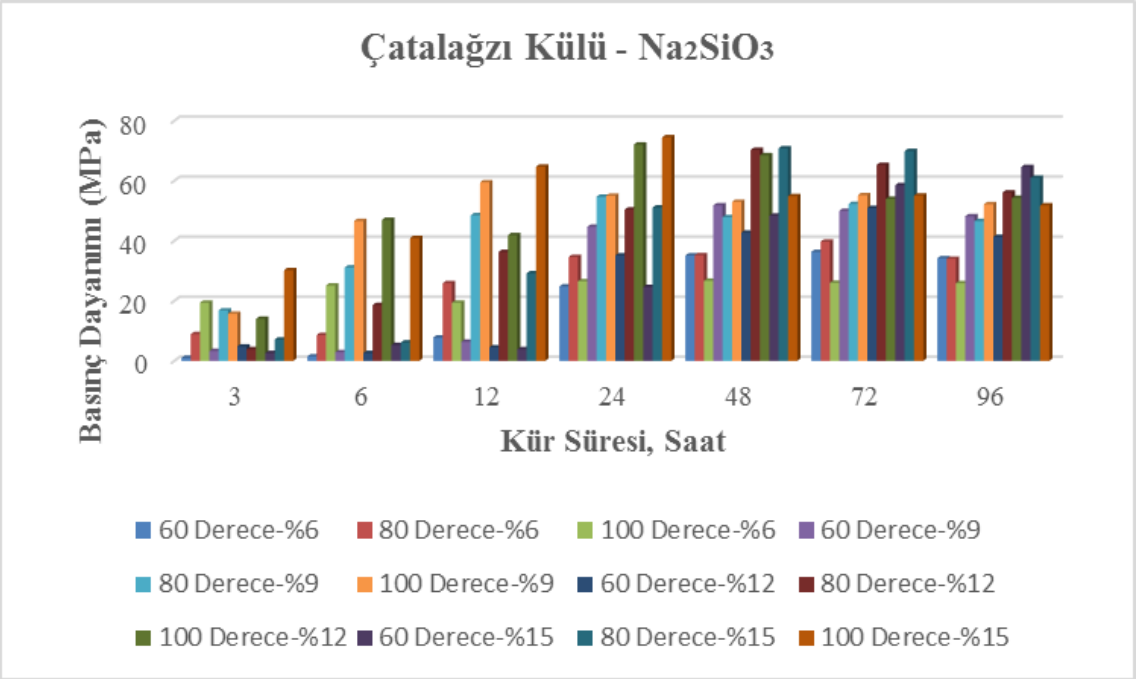


Şekil 3.21. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin basınç dayanımı

NaOH ile %15 Na oranında aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen basınç dayanımı 31,5 MPa'dır. Bu değer daha sonra 31,5 MPa dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 35,0, 62,9, 100,7, 78,2, 72,9 ve 72,8 MPa basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerler de en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 100,7 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Tablo 3.18. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimer basınç dayanımı, MPa

Na_2SiO_3	**%6 Na**			**%9 Na**			**%12 Na**			**%15 Na**		
Isıl Kür Süresi (saat)	**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**			**Isıl Kür Sıcaklığı (ºC)**		
	60	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**	**60**	**80**	**100**
3	1,0	8,9	19,4	3,3	16,8	15,7	4,8	3,9	14,0	2,6	7,1	30,2
6	1,5	8,6	25,1	2,9	31,1	46,6	2,6	18,6	47,0	5,3	6,1	40,9
12	7,8	25,9	19,4	6,4	48,5	59,5	4,5	36,3	41,9	3,9	29,2	64,7
24	24,8	34,6	26,5	44,7	54,7	55,0	35,1	50,4	72,1	24,6	51,1	74,5
48	35,1	35,2	26,7	51,8	47,9	53,0	42,7	70,3	68,5	48,4	70,8	54,9
72	36,3	39,7	26,0	50,0	52,3	55,2	50,9	65,3	54,0	58,5	69,9	55,1
96	34,2	34,0	25,9	48,2	46,6	52,2	41,3	56,1	54,3	64,6	61,0	51,8



Şekil 3.22. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin basınç dayanımı

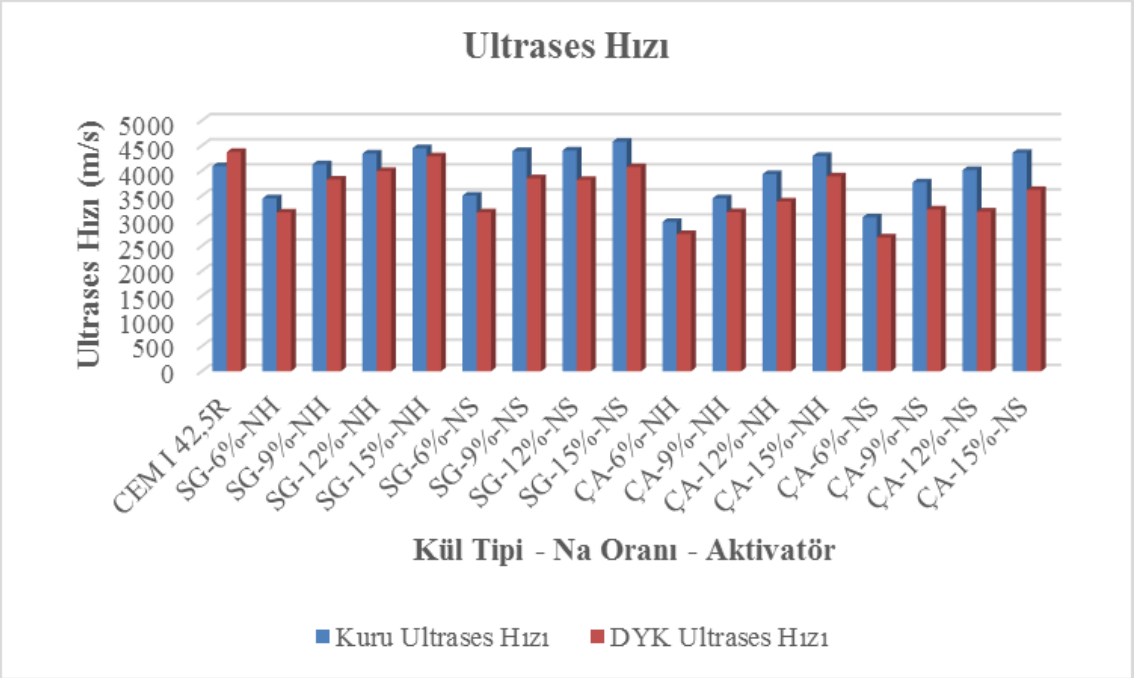
Na_2SiO_3 ile %15 Na oranında aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 3 saat 100ºC'de ısıl kür sonrasında elde edilen basınç dayanımı 30,2 MPa'dır. Bu değer daha sonra 30,2 MPa dan sırasıyla 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat ısıl kürler için 40,9, 64,7, 74,5, 54,9, 55,1 ve 51,8 MPa basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerler de en yüksek dayanım %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 74,5 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır.

3.5. Ultrasonik Hız Tayini Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, 9, 12 ve 15 Na) ile aktivasyonundan elde edilen numunelerinin 100°C de 24 saat ısıl kür sonrasında oda sıcaklığına soğuduktan sonra kuru ve doyun yüzey kuru hallerinde ultrasonik sesin geçiş süresi ölçülmüştür. Ölçülen sürelerin mikrosaniyeden saniyeye dönüştürülmesi ve numune uzunluğu olan 0,16 m'nin bu sürelere bölünmesi ile ultrasonik hızlar hesaplanmıştır. Kuru ve doygun kuru yüzey için hesaplanmış olan ultrasonik hız değerleri aşağıdaki Tablo 3.19 ve ultrases hızlarda değişim grafiği Şekil 3.23'te verilmiştir. Ayrıca Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunesinin 28 gün suda kür edilmiş olan numunelerinin ultrasonik hızları alkali ile aktifleştirilen geopolimer harçları ile kıyaslamak amacıyla verilmiştir. Numunelerin doygun kuru yüzey haldeki ultrasonik hızları donma çözülme deneyleri için ölçülmüştür. Burada ise kuru ile doygun kuru yüzey hallerinin kıyaslaması amacıyla sunulmuştur.

Tablo 3.19. Geopolimerler numunelerin ultrases geçiş hızları

Na	**Ultrasonik Hız (m/s)**				
	Özellik	**Kuru**	**Doygun Kuru Yüzey**	**Kuru**	**Doygun Kuru Yüzey**
	CEM I 42,5R	4092	4372	4092	4372
Aktivatör		**Sugözü**		**Çatalağzı**	
%6	**NaOH**	3449	3169	2980	2738
%9		4128	3825	3449	3175
%12		4344	3994	3932	3385
%15		4449	4286	4294	3887
%6	**Na_2SiO_3**	3504	3171	3071	2669
%9		4392	3849	3768	3226
%12		4404	3817	4012	3185
%15		4580	4072	4356	3616



Şekil 3.23. Geopolimer ve kontrol numunelerinin ultrases hız değişimi

Kontrol numunesi CEM I 42,5R çimentosu ile üretilen ve 28 gün suda kür edilmiş numunelerin ultrasonik hızları kuru ve doygun kuru yüzey halleri için sırasıyla 4092 m/s ve 4372 m/s olarak ölçülmüştür. Doygun kuru yüzey haldeki kontrol numunelerinin ultrasonik hız değerlerinin kuru haldeki numunelerin ultrasonik hızından daha yüksek olduğu görülmüştür. Numunenin içerisindeki nem ve suyun bulunmasından dolayı dalga hızı daha yüksek olmaktadır.

Sugözü uçucu küllünün NaOH ile aktive edilen ve 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki kuru ultrasonik hızları sırasıyla 3449, 4128, 4344 ve 4449 m/s olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ultrasonik hızları ise sırasıyla 3504, 4392, 4404 ve 4580 m/s olarak hesaplanmıştır. Hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ultrasonik hız sonuçları kıyaslandığında sonuçların kendi Na oranları için birbirine yakın olduğu görülmüştür. Doygun kuru yüzey ultrasonik hız ölçümlerinin kuru hale göre daha düşük olduğu görülmüştür. Sugözü ile üretilen geopolimerler içerisinde ultrasonik hızın en yüksek olduğu numuneler hem NaOH ve hem de Na_2SiO_3 için %15 Na oranında bulunmuştur. Kontrol numunesinin kuru haldeki ultrasonik hızı 4092 m/s iken Sugözü külünün %15 Na

oranında NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen geopolimerin ultrasonik hızları sırasıyla 4449 ve 4580 m/s olarak ölçülmüştür.

Çatalağzı uçucu küllünün NaOH ile aktive edilen ve 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki kuru ultrasonik hızları sırasıyla 2980, 3449, 3932 ve 4294 m/s olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ultrasonik hızları ise sırasıyla 3071, 3768, 4012 ve 4356 m/s olarak hesaplanmıştır. Çatalağzı külü için de hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ultrasonik hız sonuçları kıyaslandığında sonuçların kendi Na oranları için birbirine yakın olduğu görülmüştür. Doygun kuru yüzey ultrasonik hız ölçümleri kuru hale göre daha düşük olduğu görülmüştür. Çatalağzı ile üretilen geopolimerler içerisinde ultrasonik hızın en yüksek olduğu karışım hem NaOH hem de Na_2SiO_3 için %15 Na oranında bulunmuştur.

Her iki uçucu külün hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesi ile kendi Na konsantrasyonlarındaki ultrasonik hız sonuçları birbiri ile kıyaslandığında sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Geopolimer harçlarının doygun kuru yüzey halde ölçülen ultrasonik hız değerlerinin kuru hale göre daha düşük olduğu görülmüştür. Her iki kül ile üretilen geopolimerler içinde en yüksek ultrasonik hız değerleri %15 Na oranında bulunmuştur. Kontrol numunesinin kuru haldeki ultrasonik hızı 4092 m/s iken Sugözü külünün %15 Na oranında NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen geopolimerin ultrasonik hızları sırasıyla 4449 ve 4580 m/s olarak ölçülmüştür. Çatalağzı külünün %15 Na oranında NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen geopolimerin ultrasonik hızları ise 4294 ve 4356 m/s olarak belirlenmiştir. Genel olarak Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen geopolimerlerin dalga hızları NaOH ile aktifleştirilen uçucu küllere göre daha yüksek çıkmıştır.

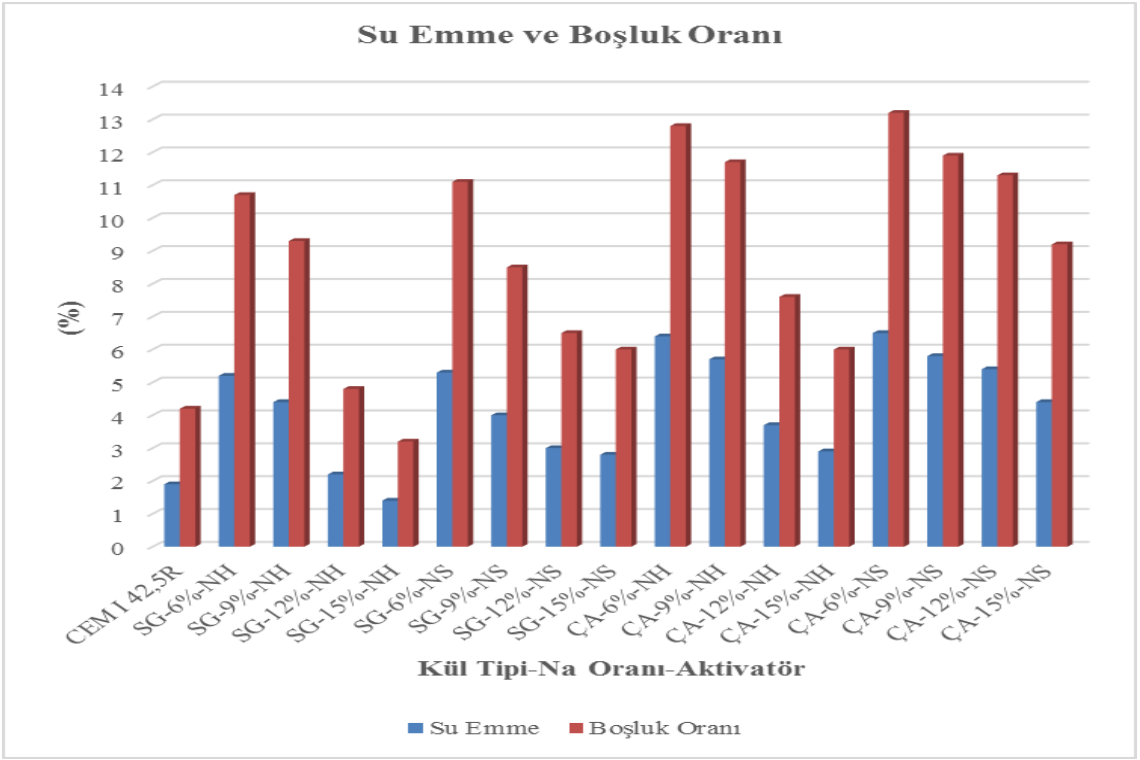
3.6. Su Emme ve Boşluk Oranı Tayini Deney Sonuçları

Geopolimer numunelerinin etüv kurusu ağırlıkları 100°C de 24 saat ısıl kür sonrasında oda sıcaklığına soğuduktan sonra en az 24 saat suda bekletilerek havadaki doygun yüzey kuru ağırlıkları tartılmış akabinde de su içerisinde ağırlıkları ölçülmüştür. Ölçülen ağırlıklar kullanılarak su emme ve boşluk oranları tayin edilmiştir. Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinden %6, 9, 12 ve 15 Na oranlarında NaOH ve Na_2SiO_3 ile

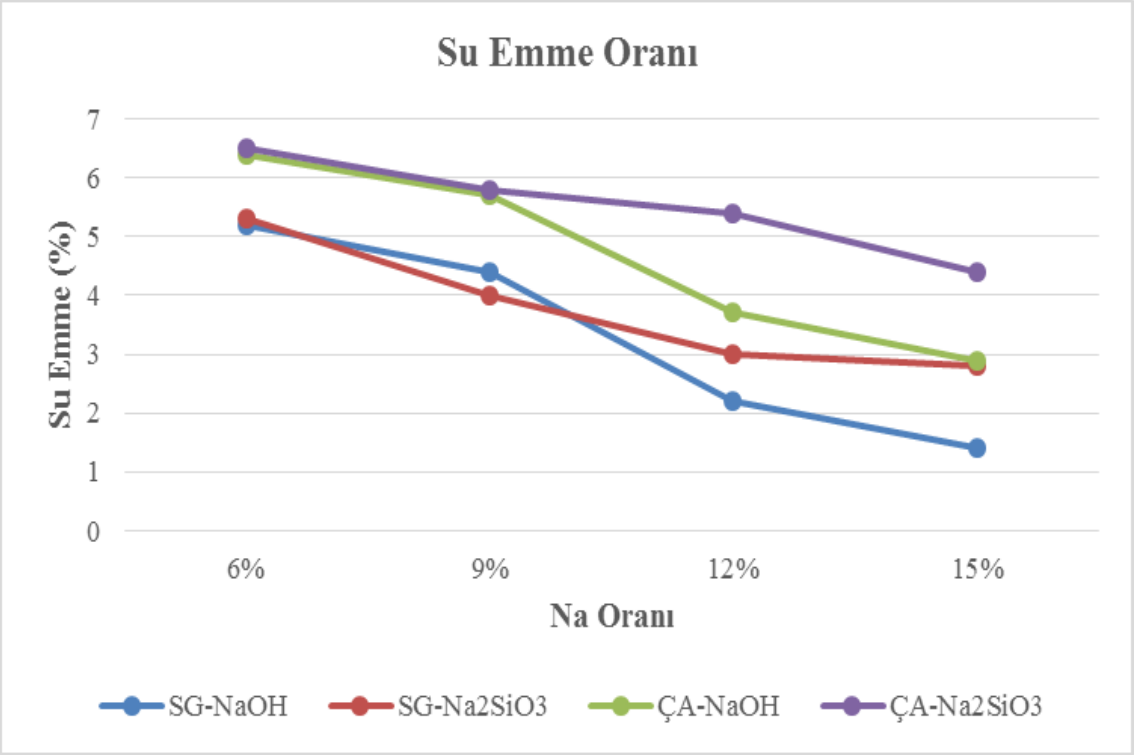
aktifleştirilen geopolimerler ile Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunesinin su emme ve boşluk oranları Tablo 3.20'de sunulmuştur.

Tablo 3.20. Geopolimerler numunelerin su emme ve boşluk oranları

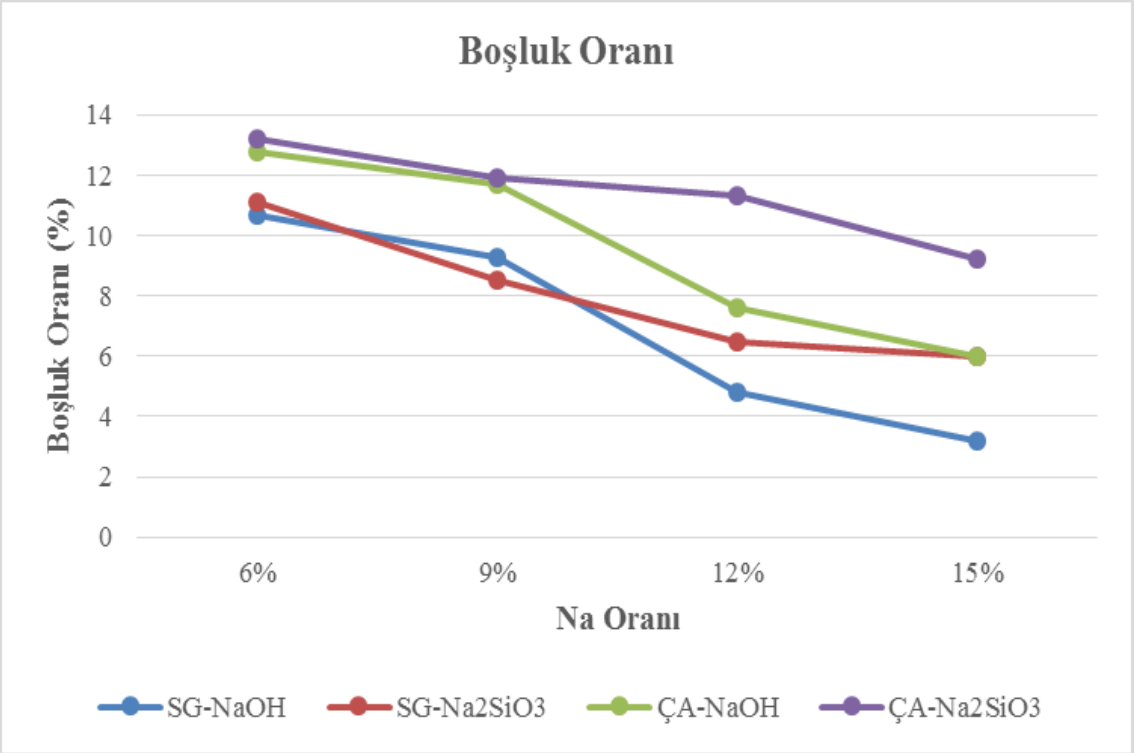
Na	Su Emme ve Boşluk Oranı (%)				
	Özellik	**Su Emme Oranı**	**Boşluk Oranı**	**Su Emme Oranı**	**Boşluk Oranı**
	CEM I 42,5R	1,9	4,2	1,9	4,2
Aktivatör		**Sugözü**		**Çatalağzı**	
%6	**NaOH**	5,2	10,7	6,4	12,8
%9		4,4	9,3	5,7	11,7
%12		2,2	4,8	3,7	7,6
%15		1,4	3,2	2,9	6,0
%6	**Na_2SiO_3**	5,3	11,1	6,5	13,2
%9		4,0	8,5	5,8	11,9
%12		3,0	6,5	5,4	11,3
%15		2,8	6,0	4,4	9,2



Şekil 3.24. Geopolimerler ve kontrol numunelerinin su emme ve boşluk oranı



Şekil 3.25. Geopolimer numunelerinin su emme oranı değişimi



Şekil 3.26. Geopolimer numunelerinin boşluk oranı değişimi

NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki su emme oranları sırasıyla % 5,2, 4,4, 2,2, ve 1,4 ve boşluk oranları ise % 10,7, 9,3, 4,8 ve 3,2 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki su emme oranları sırasıyla % 5,3, 4,0, 3,0, ve 2,8 ve boşluk oranları ise % 11,1, 8.5, 6.5 ve 6.0 olarak hesaplanmıştır.

NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki su emme oranları sırasıyla % 6,4, 5,7, 3,7, ve 2,9 ve boşluk oranları ise % 12,8, 11,7, 7,6 ve 6,0 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki su emme oranları sırasıyla % 6,5, 5,8, 5,4, ve 4,4 ve boşluk oranları ise % 13,2, 11,9, 11,3 ve 9,2 olarak hesaplanmıştır.

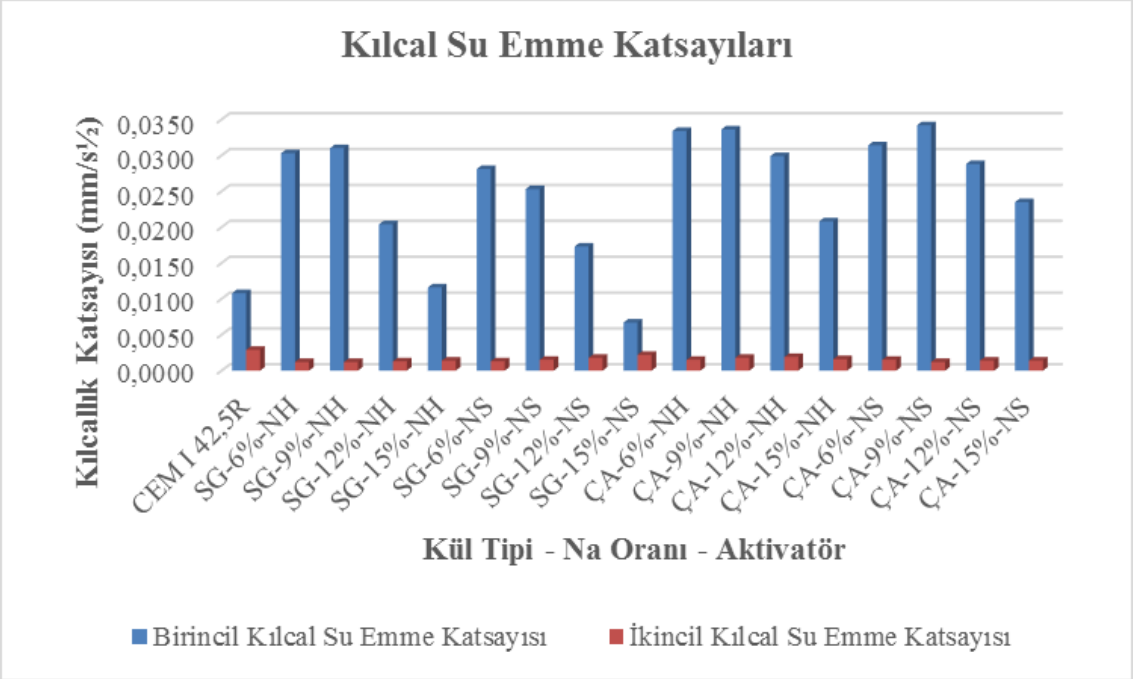
Kontrol numunesi olarak 28 gün suda kür edilmiş portland çimentolu harç karışımının su emme ve boşluk oranı değerleri ise sırasıyla %1,9 ve %4,2 olarak bulunmuştur. Kontrol numunesi ile alkali ile aktifleştirilen uçucu küllü geopolimerler kıyaslandığında kontrol numunesine en yakın ve benzer sonuçların Sugözü uçucu külünün NaOH aktifleştirilen %12 Na ve %15 Na oranlarında olduğu hatta %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu külünün su emme %1.4 ve boşluk oranı %3,2 değerlerinin kontrol numunesinden bile daha iyi olduğu görülmüştür. Sugözü uçucu külünün Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesi ile en düşük su emme %2,8 ve boşluk oranı %6.0 değerleri ise %15 Na oranı ile elde edilmiştir. Na oranındaki artışın hem Sugözü hem de Çatalağzı uçucu külleri ile üretilen geopolimerlerin su emme ve boşluk oranları değerlerini azalttığı sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26). Ayrıca Sugözü uçucu külü ile üretilen geopolimerlerin Çatalağzı uçucu külü ile üretilen geopolimerlere göre su emme ve boşluk oranları açısından daha iyi olduğunu söyleyebiliriz. Yine diğer önemli bir sonuç olarak su emme ve boşluk oranları açısından uçucu küllü geopolimerlerde aktivatör olarak NaOH'in Na_2SiO_3'den daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

3.7. Kılcal Su Emme Deney Sonuçları

Çalışmada, Sugözü ve Çatalağzı külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, 9, 12 ve 15 Na) kullanılarak aktive edilen harç numuneleri 100°C de 24 saat ısıl kür edildikten sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuş, kontrol numuneleri ise 28 gün suda kür edilmiştir. Daha sonra etüvde kurutulan kontrol numuneleri ve oda sıcaklığındaki geopolimer numuneleri ASTM C1585 standardına uygun olarak kılcal su emme deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin 1, 5, 10, 20, 30 dakika ile 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 saat su emme sonucu birincil kılcal su emme katsayısı ile 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. gün kılcal su emme sonucu ikincil kılcal su emme katsayısı hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 3.21'de ve grafiksel olarak Şekil 3.27'de verilmiştir.

Tablo 3.21. Birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları

Na	**Kılcal Su Emme Katsayıları, mm/s½**				
	Özellik	**Birincil Kılcal Su Emme Katsayısı**	**İkincil Kılcal Su Emme Katsayısı**	**Birincil Kılcal Su Emme Katsayısı**	**İkincil Kılcal Su Emme Katsayısı**
	CEM I 42,5R	0,0108	0,0029	0,0108	0,0029
Aktivatör		**Sugözü**		**Çatalağzı**	
%6	**NaOH**	0,0303	0,0012	0,0334	0,0015
%9		0,0310	0,0012	0,0336	0,0018
%12		0,0204	0,0013	0,0299	0,0019
%15		0,0116	0,0014	0,0208	0,0016
%6	**Na_2SiO_3**	0,0281	0,0013	0,0314	0,0015
%9		0,0253	0,0015	0,0342	0,0012
%12		0,0173	0,0018	0,0288	0,0014
%15		0,0067	0,0022	0,0235	0,0014



Şekil 3.27. Birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları

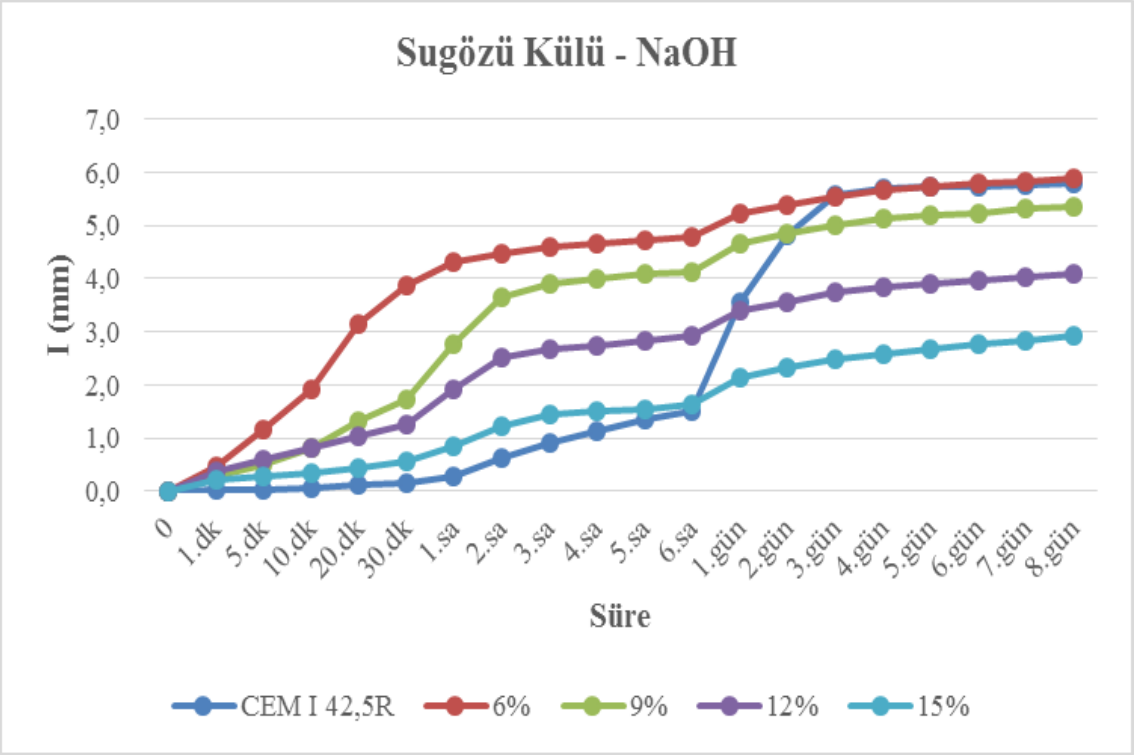
NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birincil kılcal su emme katsayıları sırasıyla 0,0303, 0,0310, 0,0204 ve 0,0116, ikincil kılcal su emme katsayıları ise 0,0012, 0,0012, 0,0013 ve 0,0014 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birincil kılcal su emme katsayıları sırasıyla 0,0281, 0,0253, 0,0173 ve 0,0067 ve ikincil kılcal su emme katsayıları ise 0,0013, 0,0015, 0,0018 ve 0,0022 olarak hesaplanmıştır.

NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birincil kılcal su emme katsayıları sırasıyla 0,0334, 0,0336, 0,0299 ve 0,0208, ikincil kılcal su emme katsayıları ise 0,0015, 0,0018, 0,0019 ve 0,0016 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki birincil kılcal su emme katsayıları sırasıyla 0,0314, 0,0342, 0,0288 ve 0,0235 ve ikincil kılcal su emme katsayıları ise 0,0015, 0,0012, 0,0014 ve 0,0014 olarak hesaplanmıştır.

Kontrol numunesi olarak 28 gün suda kür edilmiş portland çimentolu harç karışımının birincil ve ikincil kılcal su emme değerleri ise sırasıyla 0,0108 ve 0,029 olarak bulunmuştur. Kontrol numunesi ile alkali ile aktifleştirilen uçucu küllü geopolimerler kıyaslandığında birincil kılcal su emme katsayısı için kontrol numunesine en yakın ve benzer sonuç Sugözü külünün NaOH ile aktifleştirilmesinde %15 Na değerinde bulunmuştur. Ancak ikincil kılcal su emme katsayısı olan 0,0029 değeri tüm geopolimer numunelerden yüksek çıkmıştır. Geopolimer numunelerde Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin NaOH ile aktive edilmesinde Na oranındaki artış ile %6'dan %15'e doğru birincil kılcal su emme değerleri azalmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu külü ile üretilen numunelerde de birincil kılcal su emme katsayısı Na oranı artışı ile azalmıştır. Ancak Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu külü numuneleri içinde Na oranı artışına bağlı bir azalma olsa da orantısal bir azalma değildir. Bütün gruplarda Na oranı artışı ile ikincil kılcal su emme katsayısı çok değişmemiş birbirine yakın değerler elde edilmiştir.

Tablo 3.22. NaOH ile üretilen Sugözü küllü numunelerin kılcal su emmeleri

Sugözü Külü, NaOH										
Süre	**CEM I 42,5R**		**%6**		**%9**		**%12**		**%15**	
	Su Emme (g)	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**
0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
1.dk	0,1	0,02	3,1	0,48	1,7	0,27	2,3	0,36	1,3	0,20
5.dk	0,2	0,03	7,5	1,17	3,2	0,50	3,8	0,59	1,8	0,28
10.dk	0,4	0,06	12,2	1,91	5,1	0,80	5,1	0,80	2,2	0,34
20.dk	0,7	0,11	20,2	3,16	8,4	1,31	6,6	1,03	2,7	0,42
30.dk	0,9	0,14	24,8	3,88	11,1	1,73	8,0	1,25	3,5	0,55
1.sa	1,7	0,27	27,5	4,30	17,8	2,78	12,2	1,91	5,3	0,83
2.sa	3,9	0,61	28,7	4,48	23,4	3,66	16,0	2,50	7,8	1,22
3.sa	5,8	0,91	29,5	4,61	25,0	3,91	17,1	2,67	9,2	1,44
4.sa	7,3	1,14	29,9	4,67	25,6	4,00	17,6	2,75	9,6	1,50
5.sa	8,6	1,34	30,2	4,72	26,2	4,09	18,1	2,83	9,9	1,55
6.sa	9,7	1,52	30,6	4,78	26,4	4,13	18,8	2,94	10,5	1,64
1.gün	22,7	3,55	33,5	5,23	29,9	4,67	21,7	3,39	13,7	2,14
2.gün	30,8	4,81	34,5	5,39	31,0	4,84	22,8	3,56	15,0	2,34
3.gün	35,7	5,58	35,4	5,53	32,0	5,00	23,9	3,73	15,9	2,48
4.gün	36,4	5,69	36,3	5,67	32,8	5,12	24,5	3,83	16,5	2,58
5.gün	36,6	5,72	36,6	5,72	33,3	5,20	25,0	3,91	17,1	2,67
6.gün	36,6	5,72	37,1	5,80	33,5	5,23	25,5	3,98	17,8	2,78
7.gün	36,9	5,77	37,3	5,83	34,1	5,33	25,8	4,03	18,2	2,84
8.gün	37,1	5,80	37,6	5,88	34,3	5,36	26,1	4,08	18,8	2,94

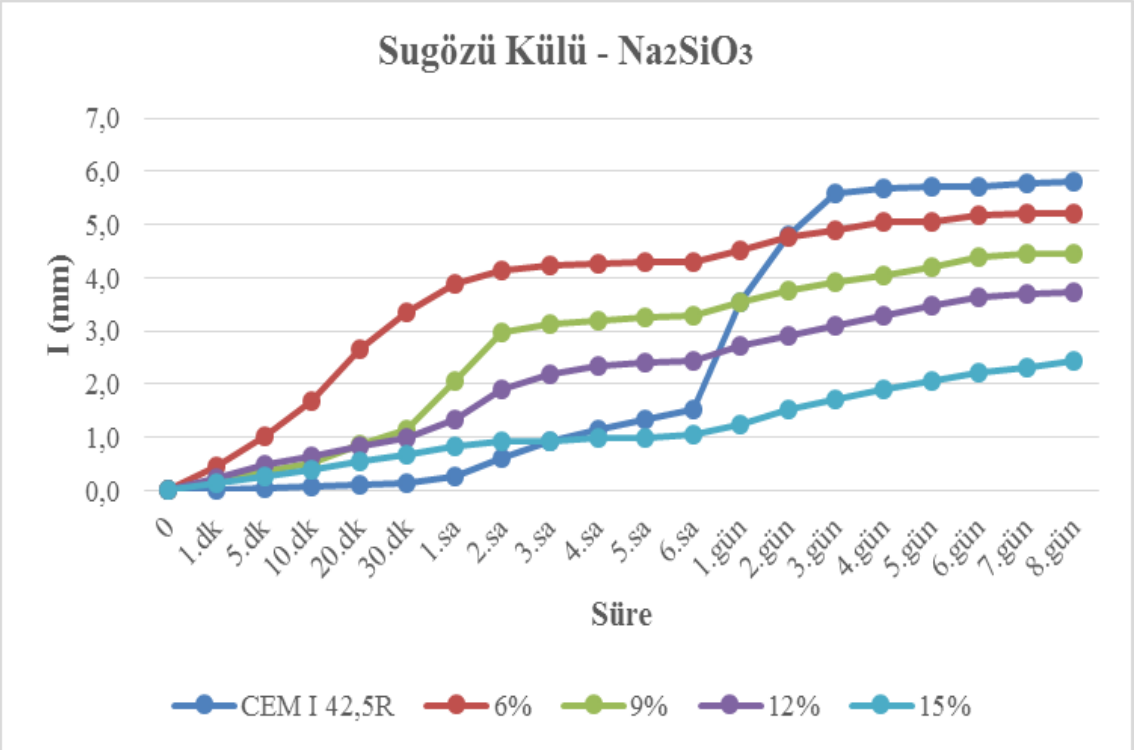


Şekil 3.28. NaOH ile üretilen Sugözü külü harcı kılcal su emme değişimi

NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin 8.gün sonundaki kılcal olarak emilen su miktarları sırasıyla 37,6, 34,3, 26,1 ve 18,8 gram, kılcal su emme (I) ise 5,88, 5,36, 4,08 ve 2,94 mm olarak hesaplanmıştır. Kılcal su emme miktarı ve kılcal su yükselme değerleri Na oranı artışı ile azalmıştır. %6 Na oranındaki alkali aktifleştirilen numuneler, kılcal su emme miktarı 37,1 gram ve kılcal su emme (I) 5,80 mm olan kontrol numuneleri ile en yakın kılcal su emme değerlerine ulaşmıştır. %9, %12 ve %15 Na oranındaki geopolimerlerin kontrol numunelerinden daha düşük kılcal su emme değerlerine sahip olduğu görülmüştür (Tablo 3.22 ve Şekil 3.28).

Tablo 3.23. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü numunelerin kılcal su emmeleri

Sugözü Külü, Na_2SiO_3										
Süre	CEM I 42,5R		%6		%9		%12		%15	
	Su Emme (g)	I (mm)	Su Emme (g)	I (mm)	Su Emme (g)	I (mm)	Su Emme (g)	I (mm)	Su Emme (g)	I (mm)
0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
1.dk	0,1	0,02	2,8	0,44	1,3	0,20	1,5	0,23	0,8	0,13
5.dk	0,2	0,03	6,6	1,03	2,4	0,37	3,1	0,48	1,7	0,27
10.dk	0,4	0,06	10,7	1,67	3,4	0,53	4,1	0,64	2,4	0,38
20.dk	0,7	0,11	17,1	2,67	5,5	0,86	5,3	0,83	3,5	0,55
30.dk	0,9	0,14	21,5	3,36	7,4	1,16	6,3	0,98	4,2	0,66
1.sa	1,7	0,27	24,9	3,89	13,1	2,05	8,5	1,33	5,3	0,83
2.sa	3,9	0,61	26,4	4,13	19,0	2,97	12,1	1,89	6,0	0,94
3.sa	5,8	0,91	27,0	4,22	20,0	3,13	14,1	2,20	5,9	0,92
4.sa	7,3	1,14	27,4	4,28	20,4	3,19	14,9	2,33	6,4	1,00
5.sa	8,6	1,34	27,6	4,31	20,8	3,25	15,4	2,41	6,4	1,00
6.sa	9,7	1,52	27,6	4,31	21,0	3,28	15,7	2,45	6,7	1,05
1.gün	22,7	3,55	28,9	4,52	22,7	3,55	17,5	2,73	8,0	1,25
2.gün	30,8	4,81	30,5	4,77	24,1	3,77	18,7	2,92	9,8	1,53
3.gün	35,7	5,58	31,4	4,91	25,1	3,92	19,9	3,11	11,0	1,72
4.gün	36,4	5,69	32,3	5,05	26,0	4,06	21,1	3,30	12,2	1,91
5.gün	36,6	5,72	32,4	5,06	26,8	4,19	22,2	3,47	13,1	2,05
6.gün	36,6	5,72	33,2	5,19	28,1	4,39	23,3	3,64	14,2	2,22
7.gün	36,9	5,77	33,3	5,20	28,4	4,44	23,6	3,69	14,7	2,30
8.gün	37,1	5,80	33,4	5,22	28,4	4,44	23,8	3,72	15,6	2,44

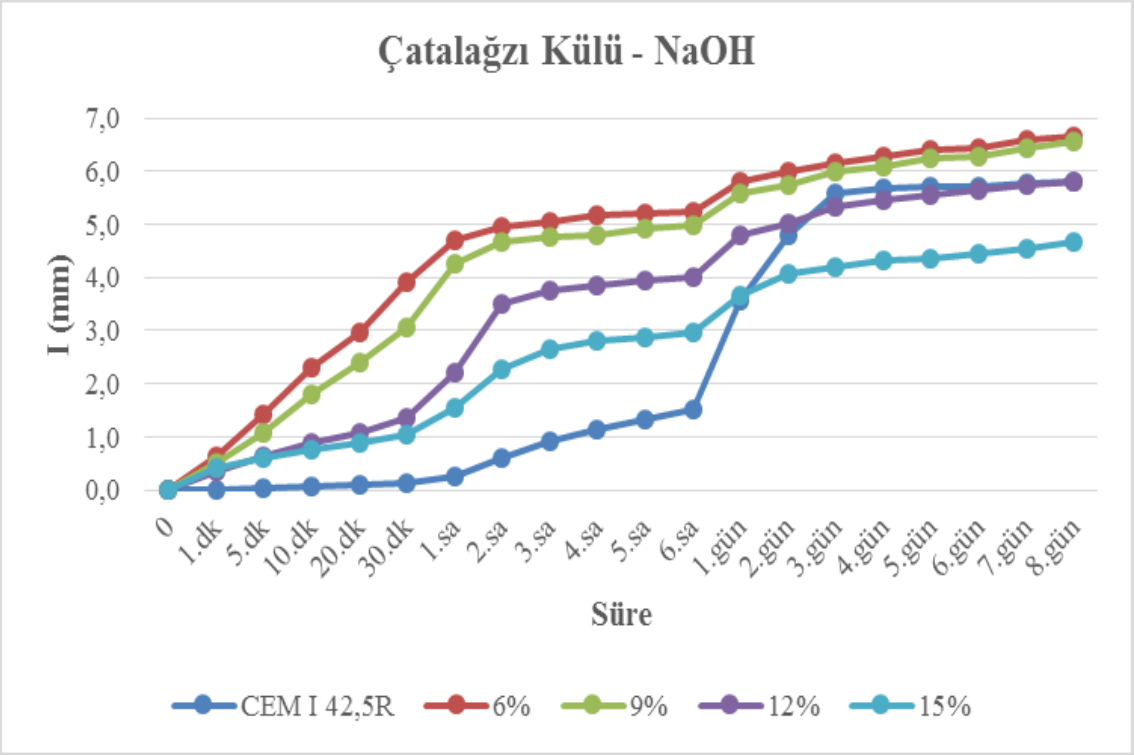


Şekil 3.29. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü külü harcı kılcal su emme değişimi

Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin 8.gün sonundaki kılcal olarak emilen su miktarları sırasıyla 33,4, 28,4, 23,8 ve 15,6 gram, kılcal su emme (I) ise 5,22, 4,44, 3,72 ve 2,44 mm olarak hesaplanmıştır. Kılcal su emme miktarı ve kılcal su yükselme değerleri Na oranı artışı ile azalmıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerin tamamı, kılcal su emme miktarı 37,1 gram ve kılcal su emme (I) 5,80 mm olan kontrol numunelerinin altında kılcal su emme değerlerine ulaşmıştır. Ancak kontrol numunelerine en yakın kılcal su emme değerlerine %6 Na oranındaki geopolimerlerin sahip olduğu görülmüştür (Tablo 3.23 ve Şekil 3.29).

Tablo 3.24. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü numunelerin kılcal su emmeleri

Çatalağzı Külü, NaOH										
Süre	**CEM I 42,5R**		**%6**		**%9**		**%12**		**%15**	
	Su Emme (g)	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**
0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
1.dk	0,1	0,02	4,1	0,64	3,2	0,50	2,2	0,34	2,7	0,42
5.dk	0,2	0,03	9,0	1,41	6,8	1,06	4,0	0,63	3,8	0,59
10.dk	0,4	0,06	14,8	2,31	11,6	1,81	5,7	0,89	4,9	0,77
20.dk	0,7	0,11	19,1	2,98	15,3	2,39	6,9	1,08	5,7	0,89
30.dk	0,9	0,14	25,0	3,91	19,6	3,06	8,7	1,36	6,6	1,03
1.sa	1,7	0,27	30,0	4,69	27,2	4,25	14,2	2,22	9,9	1,55
2.sa	3,9	0,61	31,7	4,95	29,8	4,66	22,4	3,50	14,6	2,28
3.sa	5,8	0,91	32,4	5,06	30,5	4,77	24,1	3,77	16,9	2,64
4.sa	7,3	1,14	33,0	5,16	30,7	4,80	24,7	3,86	18,0	2,81
5.sa	8,6	1,34	33,2	5,19	31,4	4,91	25,2	3,94	18,4	2,88
6.sa	9,7	1,52	33,5	5,23	31,8	4,97	25,7	4,02	19,1	2,98
1.gün	22,7	3,55	37,2	5,81	35,7	5,58	30,6	4,78	23,4	3,66
2.gün	30,8	4,81	38,3	5,98	36,8	5,75	32,1	5,02	26,0	4,06
3.gün	35,7	5,58	39,4	6,16	38,4	6,00	34,1	5,33	26,9	4,20
4.gün	36,4	5,69	40,2	6,28	39,0	6,09	34,9	5,45	27,7	4,33
5.gün	36,6	5,72	40,9	6,39	40,0	6,25	35,6	5,56	27,9	4,36
6.gün	36,6	5,72	41,1	6,42	40,2	6,28	36,2	5,66	28,4	4,44
7.gün	36,9	5,77	42,1	6,58	41,2	6,44	36,8	5,75	29,0	4,53
8.gün	37,1	5,80	42,5	6,64	42,0	6,56	37,2	5,81	29,8	4,66

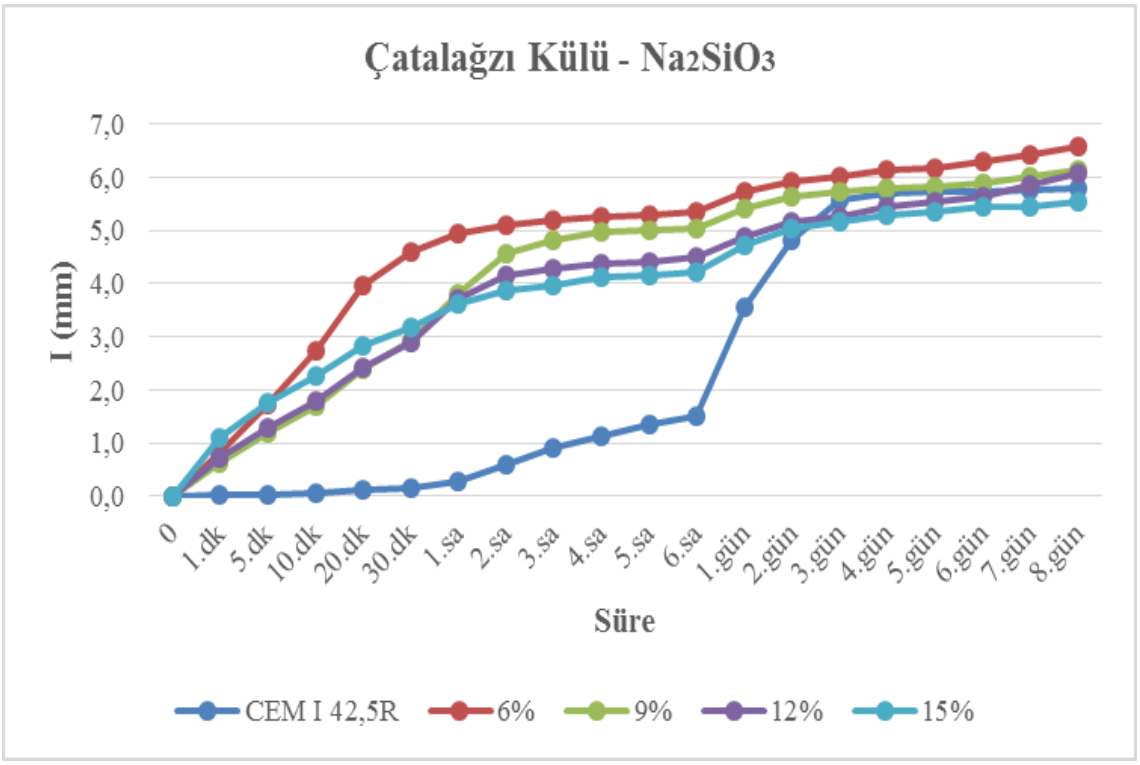


Şekil 3.30. NaOH ile üretilen Çatalağzı külü harcı kılcal su emme değişimi

NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin 8.gün sonundaki kılcal olarak emilen su miktarları sırasıyla 42,5, 42,0, 27,2 ve 29,8 gram, kılcal su emme (I) ise 6,64, 6,56, 5,81 ve 4,66 mm olarak hesaplanmıştır. Kılcal su emme miktarı ve kılcal su yükselme değerleri Na oranı artışı ile azalmıştır. Ancak %6 ve %9 Na oranlarında alkali ile aktifleştirilen numuneler, kılcal su emme miktarı 37,1 gram ve kılcal su emme (I) 5,80 mm olan kontrol numunelerinden daha yüksek kılcal su emme değerlerine ulaşmıştır. Kontrol numunelerine en yakın kılcal su emme değerlerine %12 Na oranındaki geopolimerlerin sahip olduğu görülmüştür. Kontrol numunelerinin altında kılcal su emme değerlerine sadece %15 Na oranında ulaşılmıştır (Tablo 3.24 ve Şekil 3.30).

Tablo 3.25. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü numunelerin kılcal su emmeleri

Çatalağzı Külü, Na_2SiO_3										
Süre	**CEM I 42,5R**		**%6**		**%9**		**%12**		**%15**	
	Su Emme (g)	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**	**Su Emme (g)**	**I (mm)**
0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00
1.dk	0,1	0,02	5,2	0,81	4,1	0,64	4,7	0,73	7,1	1,11
5.dk	0,2	0,03	11,1	1,73	7,7	1,20	8,3	1,30	11,3	1,77
10.dk	0,4	0,06	17,6	2,75	10,8	1,69	11,4	1,78	14,4	2,25
20.dk	0,7	0,11	25,4	3,97	15,2	2,38	15,4	2,41	18,2	2,84
30.dk	0,9	0,14	29,4	4,59	18,7	2,92	18,5	2,89	20,3	3,17
1.sa	1,7	0,27	31,7	4,95	24,4	3,81	23,8	3,72	23,1	3,61
2.sa	3,9	0,61	32,6	5,09	29,2	4,56	26,7	4,17	24,7	3,86
3.sa	5,8	0,91	33,3	5,20	30,9	4,83	27,4	4,28	25,5	3,98
4.sa	7,3	1,14	33,6	5,25	31,8	4,97	28,1	4,39	26,3	4,11
5.sa	8,6	1,34	33,9	5,30	32,0	5,00	28,3	4,42	26,7	4,17
6.sa	9,7	1,52	34,2	5,34	32,3	5,05	28,8	4,50	27,1	4,23
1.gün	22,7	3,55	36,6	5,72	34,6	5,41	31,3	4,89	30,2	4,72
2.gün	30,8	4,81	37,9	5,92	36,1	5,64	33,0	5,16	32,2	5,03
3.gün	35,7	5,58	38,4	6,00	36,6	5,72	33,7	5,27	33,1	5,17
4.gün	36,4	5,69	39,2	6,13	37,2	5,81	34,9	5,45	33,8	5,28
5.gün	36,6	5,72	39,5	6,17	37,3	5,83	35,5	5,55	34,3	5,36
6.gün	36,6	5,72	40,3	6,30	37,7	5,89	36,0	5,63	34,8	5,44
7.gün	36,9	5,77	41,2	6,44	38,4	6,00	37,5	5,86	34,9	5,45
8.gün	37,1	5,80	42,1	6,58	39,2	6,13	38,9	6,08	35,4	5,53



Şekil 3.31. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı külü harcı kılcal su emme değişimi

Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin 8.gün sonundaki kılcal olarak emilen su miktarları sırasıyla 42,1, 39,2, 38,9 ve 35,4 gram, kılcal su emme (I) ise 6,58, 6,13, 6,08 ve 5,53 mm olarak hesaplanmıştır. Kılcal su emme miktarı ve kılcal su yükselme değerleri Na oranı artışı ile azalmıştır. Ancak %6, %9 ve %12 Na oranlarında alkali ile aktifleştirilen numuneler, kılcal su emme miktarı 37,1 gram ve kılcal su emme (I) 5,80 mm olan kontrol numunelerinden daha yüksek kılcal su emme değerlerine ulaşmıştır. Kontrol numunelerinin altında kılcal su emme değerlerine sadece %15 Na oranında ulaşılmıştır (Tablo 3.25 ve Şekil 3.31).

3.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği Deney Sonuçları

Çeçirimlilik deneyinde kullanılmak üzere Sugözü ve Çatalağzı külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, 9, 12 ve 15 Na) kullanılarak aktive edilen harç numuneleri 100°C de 24 saat ısıl kür edildikten sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuş, kontrol numuneleri ise 28 gün suda kür edilmiştir. 150x150x150 mm ebatlı numuneler geçirimlilik cihazına bağlanarak 24 saat sonundaki en yüksek su işleme derinlikleri belirlenmiştir (Şekil 3.32 ve Şekil 3.33). Na oranlarına bağlı olarak değişiklik gösteren su işleme derinlikleri Tablo 3.26 ve Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



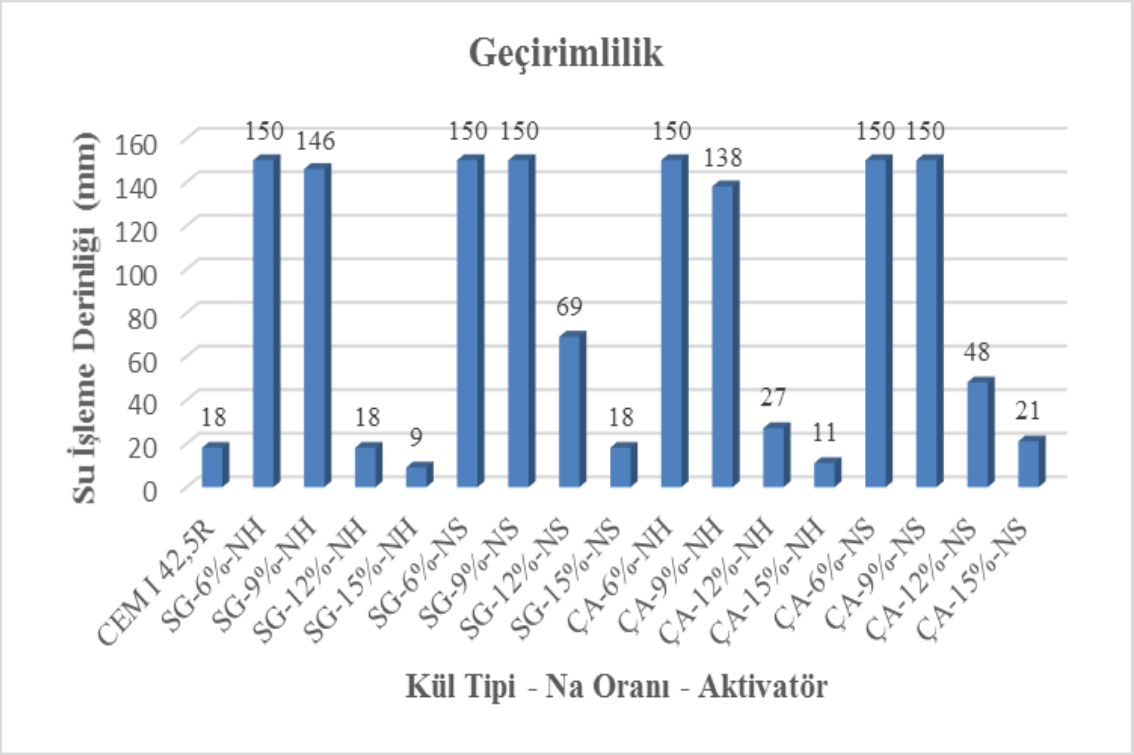
Şekil 3.32. En yüksek su işleme derinliğinin ölçülmesi



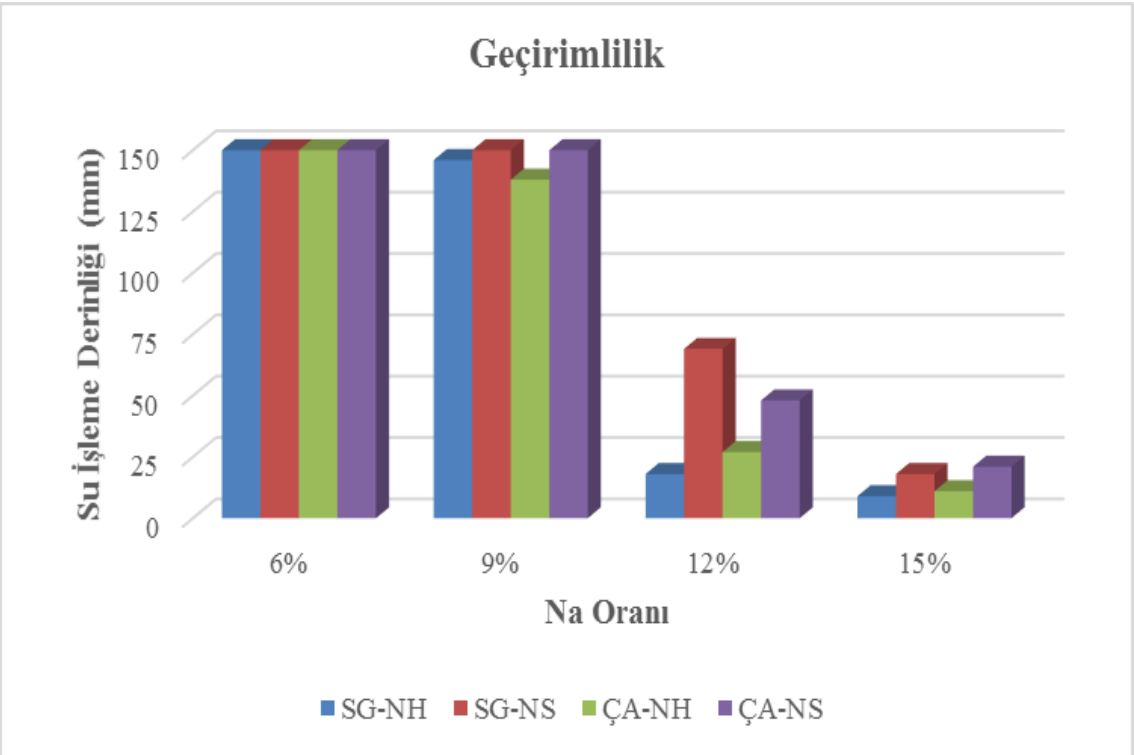
Şekil 3.33. Tamamı ve bir kısmı su geçiren numuneler

Tablo 3.26. Basınçlı su işleme derinliği deney sonuçları

Na		Geçirimlilik					
	Özellik	Su İşleme Derinliği (mm)	Emilen Su Miktarı (g)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Su İşleme Derinliği (mm)	Emilen Su Miktarı (g)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
	CEM I 42,5R	18	13	2,7	18	13	2,7
Aktivatör		Sugözü			Çatalağzı		
%6	NaOH	150	377	1,6	150	380	1,9
%9		146	239	2,3	138	137	2,5
%12		18	45	4,9	27	63	3,5
%15		9	19	5,4	11	37	3,9
%6	Na_2SiO_3	150	169	0,7	150	173	1,1
%9		150	142	2,2	150	145	2,5
%12		69	106	2,9	48	116	3,1
%15		18	66	4,0	21	65	3,1



Şekil 3.34. Geopolimer ve kontrol numuelerinin su işleme derinliği değişimi



Şekil 3.35. Na oranına göre geopolimerlerin su işleme derinliği değişimi

Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki basınçlı su işleme derinliği sırasıyla 150, 146, 18 ve 9 mm olarak ölçülmüştür. Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki basınçlı su işleme derinliği ise sırasıyla 150, 150, 69 ve 18 mm olarak ölçülmüştür. %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen numunelerin 9 mm su işleme derinliği kontrol numunelerinin 18 mm su işleme derinliğinden daha düşük olduğu görülmüştür. %15 Na oranında Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerin 18 mm su işleme derinliğinin kontrol numunelerine eşit olduğu görülmüştür. Her iki aktivatör içinde %6 Na oranlarında basınçlı su numunenin üst kısmına ulaşarak 150 mm değeri görülmüştür. %9 Na oranlarında ise NaOH ile aktifleştirilen numuneler 146 mm değerine ulaşıp neredeyse üst yüzeye çıkma seviyesine gelmiştir. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerde %9 Na oranı 150 mm ölçülerek numunenin tamamı su geçirmiştir. %12 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu külü 18 mm ölçülerek kontrol numunesine eşdeğer bulunmuştur. %12 Na oranında Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerde ise 69 mm değerine ulaşarak daha yüksek basınçlı su işleme derinliği değerine çıkmıştır. Genel olarak NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Sugözü uçucu külünde NaOH ile aktifleştirilen numunelerde %6'dan %15'e Na oranlarındaki artışa bağlı olarak basınçlı su işleme derinliği düşmüştür. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerde ise düşüş %9'dan %15'e doğru olup %6 ve %9 Na oranında numunenin tamamından üst kısmına basınçlı su ulaşmıştır (Şekil 3.33 ve Şekil 3.35).

Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki basınçlı su işleme derinliği sırasıyla 150, 138, 27 ve 11 mm olarak ölçülmüştür. Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki basınçlı su işleme derinliği ise sırasıyla 150, 150, 48 ve 21 mm olarak ölçülmüştür. %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen numunelerin 11 mm su işleme derinliği kontrol numunelerinin 18 mm su işleme derinliğinden daha düşük olduğu görülmüştür. %15 Na oranında Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerin 21 mm su işleme derinliğinin kontrol numunelerine yakın

olduğu görülmüştür. Her iki aktivatör içinde %6 Na oranlarında basınçlı su numunenin üst kısmına ulaşarak 150 mm değeri görülmüştür. %9 Na oranlarında ise NaOH ile aktifleştirilen numuneler 138 mm değerine ulaşmıştır. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerde %9 Na oranı 150 mm ölçülerek numunenin tamamı su geçirmiştir. %12 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen numunelerde 27 mm, Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerde ise 48 mm ölçülerek NaOH ile aktifleştirilenlerin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Genel olarak NaOH ile aktifleştirilen Çatalağzı uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerden daha iyi sonuçlar vermiştir. Çatalağzı uçucu külünde NaOH ile aktifleştirilen numunelerde %6'dan %15'e Na oranlarındaki artışa bağlı olarak basınçlı su işleme derinliği düşmüştür. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerde ise düşüş %9'dan %15'e doğru olup %6 ve %9 Na oranında numunenin tamamından üst kısmına basınçlı su ulaşmıştır (Şekil 3.35).

3.9. Islanma-Kuruma Deney Sonuçları

Islanma-kuruma çevrimi için Sugözü ve Çatalağzı külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, 9, 12 ve 15 Na) kullanılarak aktive edilen harç numuneleri 100°C de 24 saat ısıl kür edildikten sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuş, kontrol numuneleri ise 28 gün suda kür edilmiştir. Tüm numuneler ASTM D5313 standardında belirtilen şekliyle ağırlıkları kaydedilerek ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Ayrıca numuneler ıslanma-kuruma döngüsüne başlamadan, ara değer olarak 40 çevrim sonunda ve son olarak 80 çevrim sonunda kuru halde ultrases hızı değişimleri belirlenmiştir. Görsel olarak incelemek için 10 çevrim sonunda, 40 çevrim sonunda ve 80 çevrim sonunda resimleri çekilerek incelenmiştir (Şekil 3.36, Şekil 3.37 ve Şekil 3.38). Deney sonunda tüm numuneler eğilme ve basınç dayanımı deneyine tabi tutularak eğilme ve basınç dayanımdaki kayıp araştırılmıştır.



Şekil 3.36. 10 çevrim sonunda numunelerin görünümü



Şekil 3.37. 40 çevrim sonunda numunelerin görünümü

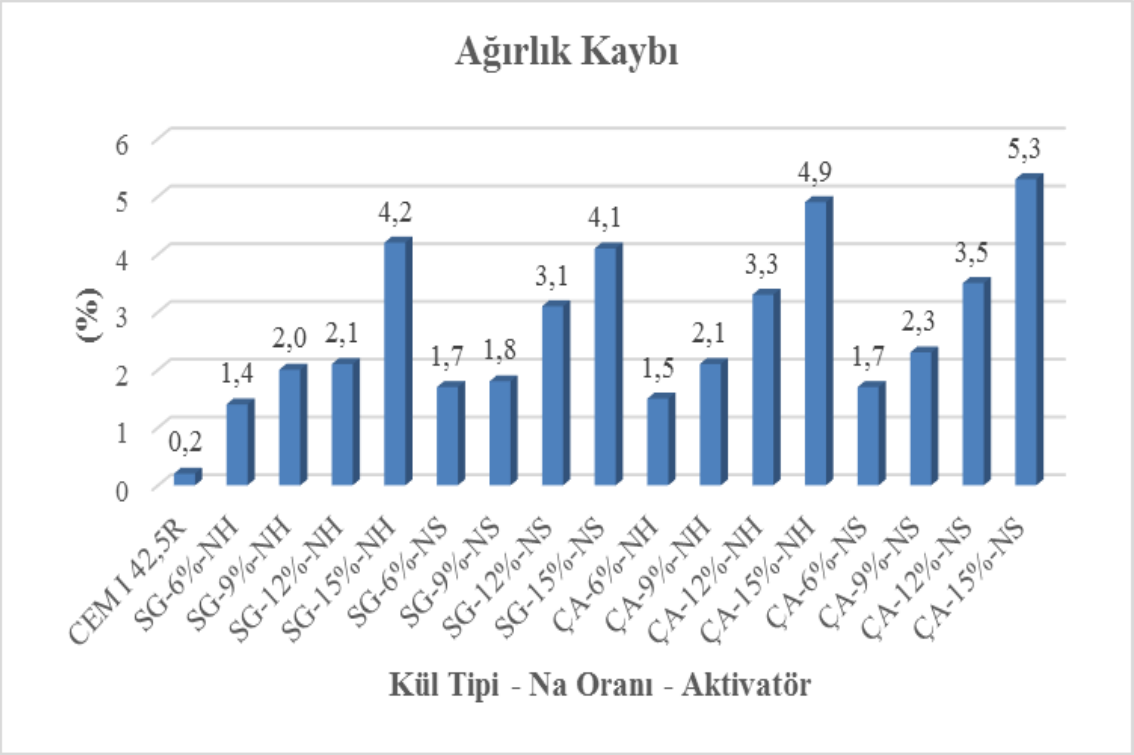


Şekil 3.38. 80 çevrim sonunda numunelerin görünümü

Islanma-kuruma döngüsünde görsel olarak incelendiğinde tüm çevrim boyunca numuneler çok büyük parça kayıplarına uğramamıştır. Ancak %15 Na oranında Na_2SiO_3 ile üretilen numunelerin özellikle köşe kısımlarında parça kopmaları oluşmaya başlamıştır. Zaten tüm numuneler içerisinde %15 Na oranında üretilen numuneler en fazla ağırlık kaybına uğramıştır (Tablo 3.27 ve Şekil 3.39).

Tablo 3.27. Islanma-kuruma deneyi sonrası ağırlık kayıpları

Na	**Ağırlık Kaybı, %**		
	Özellik	**Ağırlık Kaybı**	
	CEM I 42,5R	0,2	
Aktivatör		**Sugözü**	**Çatalağzı**
%6	**NaOH**	1,4	1,5
%9		2,0	2,1
%12		2,1	3,3
%15		4,2	4,9
%6	**Na_2SiO_3**	1,7	1,7
%9		1,8	2,3
%12		3,1	3,5
%15		4,1	5,3



Şekil 3.39. Numunelerin ıslanma-kuruma sonrası ağırlık kaybı

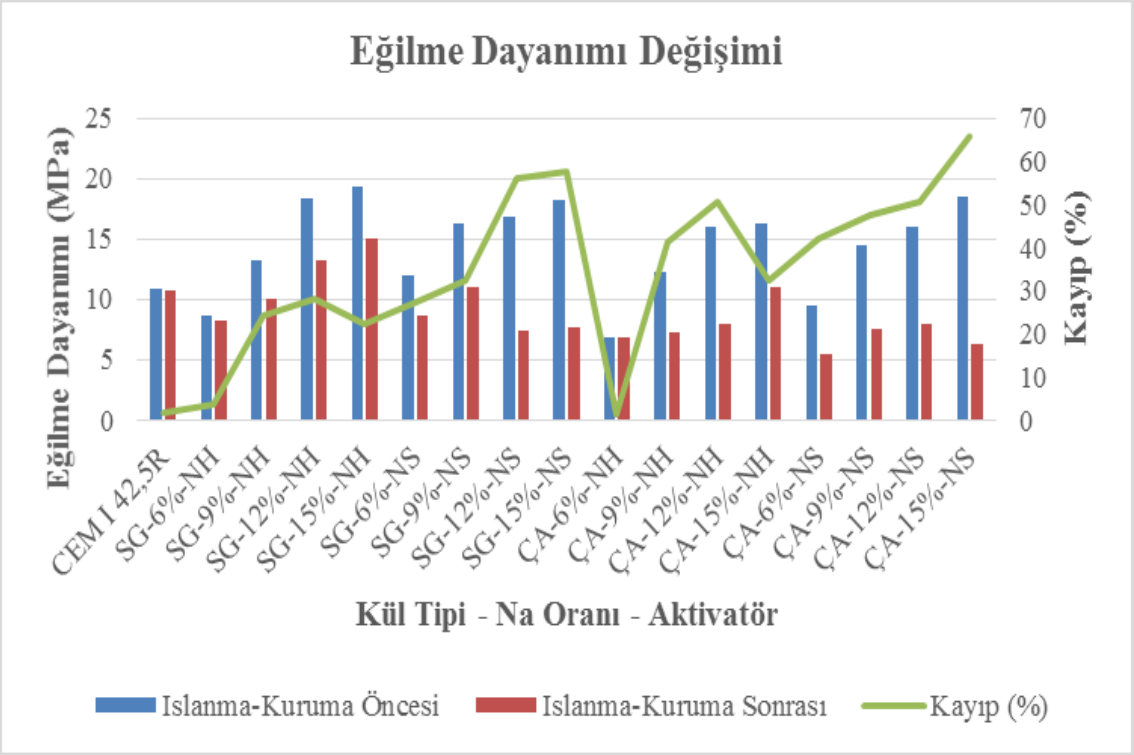
Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin ağırlık kaybı sırasıyla %1,4, %2,0, %2,1 ve %4,2 olarak belirlenmiştir. Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki ağırlık kaybı ise sırasıyla %1,7, %1,8, %3,1 ve %4,1 olarak belirlenmiştir. Hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerin ağırlık kaybı, %0,2 ağırlık kaybına sahip kontrol numunelerinden fazladır. Ancak en yakın değerler %6 Na oranlarında elde edilmiştir. Sugözü külü ile üretilen numunelerin Na oranlarındaki artışa bağlı olarak ağırlık kayıpları da artmıştır.

Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin ağırlık kaybı sırasıyla %1,5, %2,1, %3,3 ve %4,9 olarak belirlenmiştir. Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki ağırlık kaybı ise sırasıyla %1,7, %2,3, %3,5 ve %5,3 olarak belirlenmiştir. Hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerin ağırlık kaybı, %0,2 ağırlık kaybına sahip kontrol numunelerinden fazladır.

Ancak en yakın değerler %6 Na oranlarında elde edilmiştir. Çatalağzı külü ile üretilen numunelerin Na oranlarındaki artışa bağlı olarak ağırlık kayıpları da artmıştır.

Tablo 3.28. Islanma-kuruma deneyi sonrası eğilme dayanımı kaybı

Na	Eğilme Dayanımı, MPa						
	Özellik	Islanma-Kuruma Öncesi	Islanma Kuruma Sonrası	Kayıp %	Islanma Kuruma Öncesi	Islanma Kuruma Sonrası	Kayıp %
	CEM I 42,5R	10,9	10,7	1,8	10,9	10,7	1,8
Aktivatör		Sugözü			Çatalağzı		
%6	NaOH	8,6	8,3	3,5	6,9	6,8	1,4
%9		13,2	10,0	24,2	12,3	7,2	41,5
%12		18,4	13,2	28,3	16,0	7,9	50,6
%15		19,3	15,0	22,3	16,3	11,0	32,5
%6	Na_2SiO_3	12,0	8,7	27,5	9,5	5,5	42,1
%9		16,3	11,0	32,5	14,5	7,6	47,6
%12		16,9	7,4	56,2	16,0	7,9	50,6
%15		18,2	7,7	57,7	18,5	6,3	65,9



Şekil 3.40. Numunelerin ıslanma-kuruma sonrası eğilme dayanımı değişimi

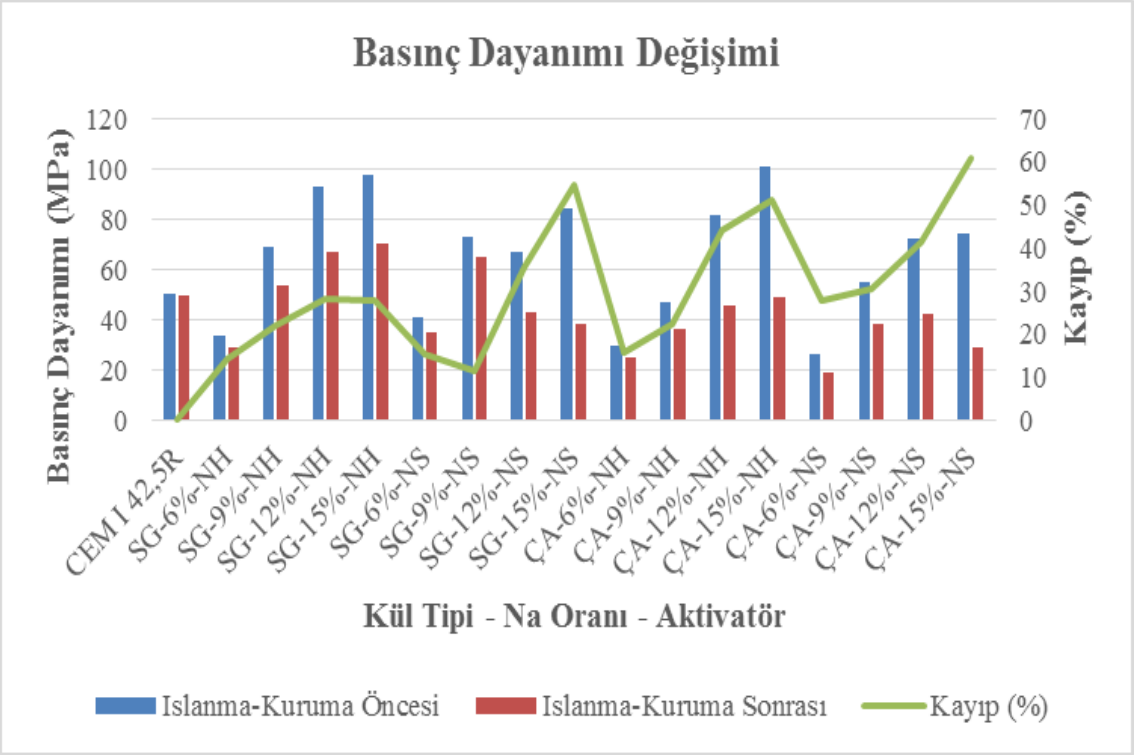
Sugözü uçucu külü NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin eğilme dayanımı kaybı

sırasıyla %3,5, %24,2, %28,3 ve %22,3 olarak belirlenmiştir. Sugözü uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin eğilme dayanımı kaybı ise sırasıyla %27,5, %32,5, %56,2 ve %57,7 olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin eğilme dayanımı kaybı %1,8'dir. NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu külü numunelerinin eğilme dayanımı kaybı %6'dan %12 Na oranına kadar artmış, fakat %15 Na oranında dayanım kaybı azalma göstermiştir. Na_2SiO_3 ile üretilen numunelerde ise Na oranı artışı ile %6'dan %15'e kadar eğilme dayanımı kayıpları artmıştır (Tablo 3.28 ve Şekil 3.40).

Çatalağzı uçucu külü NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin eğilme dayanımı kaybı sırasıyla %1,4, %41,5, %50,6 ve %32,5 olarak belirlenmiştir. Çatalağzı uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin eğilme dayanımı kaybı ise sırasıyla %42,1, %47,6, %50,6 ve %65,9 olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin eğilme dayanımı kaybı %1,8'dir. NaOH ile aktifleştirilen Çatalağzı uçucu külü numunelerinin eğilme dayanımı kaybı %6'dan %12 Na oranına kadar artmış, fakat %15 Na oranında dayanım kaybı azalma göstermiştir. Na_2SiO_3 ile üretilen numunelerde ise Na oranı artışı ile %6'dan %15'e kadar eğilme dayanımı kayıpları artmıştır (Tablo 3.28 ve Şekil 3.40).

Tablo 3.29. Islanma-kuruma deneyi sonrası basınç dayanımı kaybı

Na	**Basınç Dayanımı, MPa**						
	Özellik	**Islanma-Kuruma Öncesi**	**Islanma Kuruma Sonrası**	**Kayıp %**	**Islanma Kuruma Öncesi**	**Islanma Kuruma Sonrası**	**Kayıp %**
	CEM I 42,5R	50,5	50,0	0,1	50,5	50,0	0,1
Aktivatör		**Sugözü**			**Çatalağzı**		
%6	**NaOH**	33,7	28,9	14,2	29,4	24,8	15,6
%9		69,3	54,0	22,1	46,9	36,5	22,2
%12		92,9	66,8	28,1	81,4	45,6	44,0
%15		97,6	69,5	28,8	100,7	49,1	51,2
%6	**Na_2SiO_3**	41,1	34,8	15,3	26,5	19,1	27,9
%9		73,1	64,7	11,5	55,0	38,3	30,4
%12		66,8	43,0	35,6	72,1	42,1	41,6
%15		84,6	38,3	54,7	74,5	29,1	60,9



Şekil 3.41. Numunelerin ıslanma-kuruma sonrası basınç dayanımı değişimi

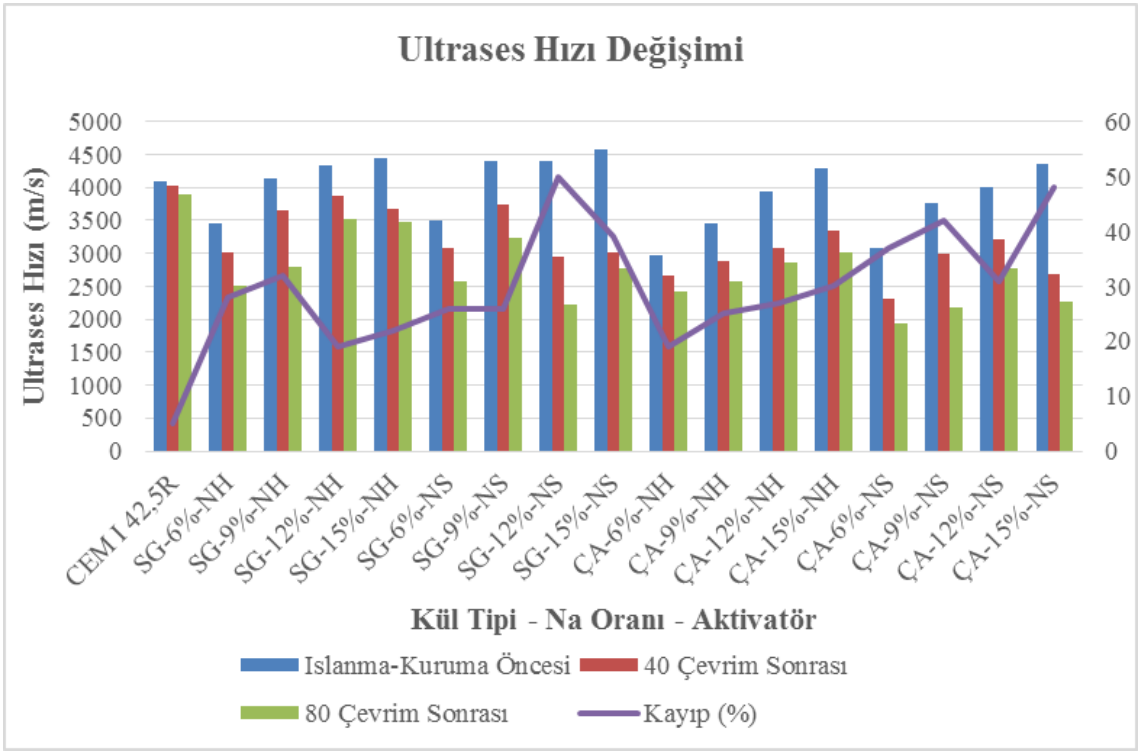
Sugözü uçucu külü NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin basınç dayanımı kaybı sırasıyla %14,2, %22,1, %28,1 ve %27,9 olarak belirlenmiştir. Sugözü uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin basınç dayanımı kaybı ise sırasıyla %15,3, %11,5, %35,6 ve %54,7 olarak belirlenmiştir. Kontrol numunelerinin basınç dayanım kaybı %0,1 gibi düşük bir değerde kalmıştır. Sugözü uçucu külü ile üretilen geopolimer numunelerin tamamı kontrol numunelerine göre yüksek basınç dayanım kaybına uğramıştır (Tablo 3.29 ve Şekil 3.41).

Çatalağzı uçucu külü NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin basınç dayanımı kaybı sırasıyla %15,6, %22,2, %44,0 ve %51,2 olarak belirlenmiştir. Çatalağzı uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin basınç dayanımı kaybı ise sırasıyla %27,9, %30,4, %41,6 ve %60,9 olarak belirlenmiştir. Hem NaOH ile hem de Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı küllü numunelerin basınç dayanım kaybı artışı Na oranının %6'dan

%15'e artışı ile artmıştır. Çatalağzı uçucu külü ile üretilen geopolimer numunelerin tamamı kontrol numunelerine göre yüksek basınç dayanım kaybına uğramıştır (Tablo 3.29 ve Şekil 3.41).

Tablo 3.30. Islanma-kuruma deneyi sonrası ultrases hız kaybı

Na		Ultrases Hızı, m/s							
	Özellik	0 Çevrim Ultrases Hızı	40 Çevrim Ultrases Hızı	80 Çevrim Ultrases Hızı	80 Çevrim Ultrases Hız Kaybı, %	0 Çevrim UltrasesHızı	40 Çevrim Ultrases Hızı	80 Çevrim Ultrases Hızı	80 Çevrim Ultrases Hız Kaybı, %
	CEM I 42,5R	4092	4024	3900	5	4092	4024	3900	5
Aktivatör		Sugözü				Çatalağzı			
%6	NaOH	3449	3019	2499	28	2980	2667	2415	19
%9		4128	3650	2806	32	3449	2887	2581	25
%12		4344	3881	3531	19	3932	3088	2862	27
%15		4449	3676	3475	22	4294	3350	3013	30
%6	Na_2SiO_3	3504	3089	2582	26	3071	2322	1941	37
%9		4392	3741	3237	26	3768	2984	2183	42
%12		4404	2941	2217	50	4012	3215	2782	31
%15		4580	3026	2776	39	4356	2694	2259	48



Şekil 3.42. Numunelerin ıslanma-kuruma sürecinde ultrases hızı değişimi

Sugözü uçucu külü NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin ıslanma-kuruma öncesi ultrases hızları sırasıyla 3449, 4128, 4344 ve 4449 m/s olarak belirlenmiştir. 40 çevrim ıslanma-kuruma sonrası sırasıyla 3019, 3650, 3881 ve 3676 m/s, 80 çevrim sonunda sırasıyla 2499, 2806, 3531 ve 3475 m/s olarak ölçülmüştür. Sugözü uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin ıslanma-kuruma öncesi ultrases hızları ise sırasıyla 3504, 4392, 4404 ve 4580 m/s olarak belirlenmiştir. 40 çevrim ıslanma-kuruma sonrası sırasıyla 3089, 3741, 2941 ve 3026 m/s, 80 çevrim sonunda sırasıyla 2582, 3237, 2217 ve 2776 m/s olarak ölçülmüştür. Kontrol numuneleri ıslanma-kuruma öncesi 4092 m/s, 40 çevrim sonunda 4024 m/s ve 80 çevrim sonunda 3900 m/s olarak hesaplanmıştır. Sugözü külü alkali ile aktifleştirilen numunelerin ultrases hız kayıpları kontrol numunelerinin oldukça üstünde çıkmıştır. Ayrıca Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelerin %12 ve %15 Na oranlarında NaOH ile aktifleştirilen numunelerden hız kaybının çok fazla olduğu görülmektedir (Tablo 3.30 ve Şekil 3.42).

Çatalağzı uçucu külü NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin ıslanma-kuruma öncesi ultrases hızları sırasıyla 2980, 3449, 3932 ve 4294 m/s olarak belirlenmiştir. 40 çevrim ıslanma-kuruma sonrası sırasıyla 2667, 2887, 3088 ve 3350 m/s, 80 çevrim sonunda sırasıyla 2415, 2581, 2862 ve 3013 m/s olarak ölçülmüştür. Çatalağzı uçucu külü Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin ıslanma-kuruma öncesi ultrases hızları ise sırasıyla 3071, 3768, 4012 ve 4356 m/s olarak belirlenmiştir. 40 çevrim ıslanma-kuruma sonrası sırasıyla 2322, 2984, 3215 ve 2694 m/s, 80 çevrim sonunda sırasıyla 1130, 1585, 1230 ve 2097 m/s olarak ölçülmüştür. Kontrol numuneleri ıslanma-kuruma öncesi 4092 m/s, 40 çevrim sonunda 4024 m/s ve 80 çevrim sonunda 3900 m/s olarak hesaplanmıştır. Çatalağzı külü alkali ile aktifleştirilen numunelerin ultrases hız kayıpları kontrol numunelerinin oldukça üstünde çıkmıştır (Tablo 3.30 ve Şekil 3.42).

3.10. Donma-Çözülme Deney Sonuçları

Çalışmada üretilen alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer harç numuneleri ısıl kür işlemine tabii tutulmuş ve sonra oda sıcaklığına getirildikten sonra suya doygun

halde her karışımdan 3 adet 40×40×160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler donma çözülme test kabinine yerleştirilmiştir. Deney numuneleri 3 saatte -18ºC'ye ulaştıktan sonra 1 saat dondurulmuş ve 1 saatte +4ºC'ye ulaştıktan sonra da 1 saat süre ile çözdürülerek toplam 6 saat'lik bir donma çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Günde 4 çevrim yapılmıştır. Deney toplamda 300 çevrim olmak üzere yaklaşık 10 hafta sürmüştür. Her 60 çevrimden sonra numunelerin ağırlıkları ve ultrasonik hızları ölçülmüştür. 300 donma çözülme çevrimi sonunda ağırlık kayıpları, ultrasonik hızdaki azalma ve dayanım kayıpları belirlenmiştir. Deney sonrası numunelerde oluşan parça kopmaları Şekil 3.43'de, ağırlık kaybı değişimi ise Şekil 3.44'de görülmektedir. Donma çözülme sonrası ağırlık kayıpları ile ultrasonik hız değişimleri yüzde (%) olarak hesaplanarak Tablo 3.31'de verilmiştir. Yine donma çözülme sonucu eğilme ve basınç dayanımlarındaki kayıplar ise Tablo 3.32'de sunulmuştur. Ayrıca ağırlık kayıpları ile ultrasonik hız değişimleri grafiksel olarak Şekil 3.45'te, eğilme ve basınç dayanımlarındaki kayıplar ise Şekil 3.46'da verilmiştir.



Şekil 3.43. Donma-çözülme sonunda numunelerden parça kopması



Şekil 3.44. Donma-çözülme döngülerinde ağırlıkta oluşan kayıp aşamaları

Tablo 3.31. Donma-çözülme deneyi sonrası ağırlık ve ultrases hızı kaybı

Na	Ağırlık ve Ultrases Hız Kayıpları				
	Özellik	**Ağırlık Kaybı (%)**	**Ultrasonik Hız Kaybı (%)**	**Ağırlık Kaybı (%)**	**Ultrasonik Hız Kaybı (%)**
	CEM I 42,5R	2,6	4	2,6	4
Aktivatör		**Sugözü**		**Çatalağzı**	
%6	**NaOH**	2,5	15	6,9	16
%9		0,6	13	3,7	14
%12		1,3	13	3,1	15
%15		3,4	29	1,3	28
%6	**Na_2SiO_3**	1,3	14	7,2	14
%9		1,2	20	4,2	19
%12		2,6	20	3,0	17
%15		7,2	30	6,8	33

Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunesinin donma çözülme sonucu meydana gelen ağırlık kaybı %2,6 olmuştur. Sugözü uçucu külünün NaOH ile aktive edilen ve 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ağırlık kayıpları %0,6 ile %3,4 arasında hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ağırlık kayıpları ise %1,2 ile %7,2 olarak hesaplanmıştır.

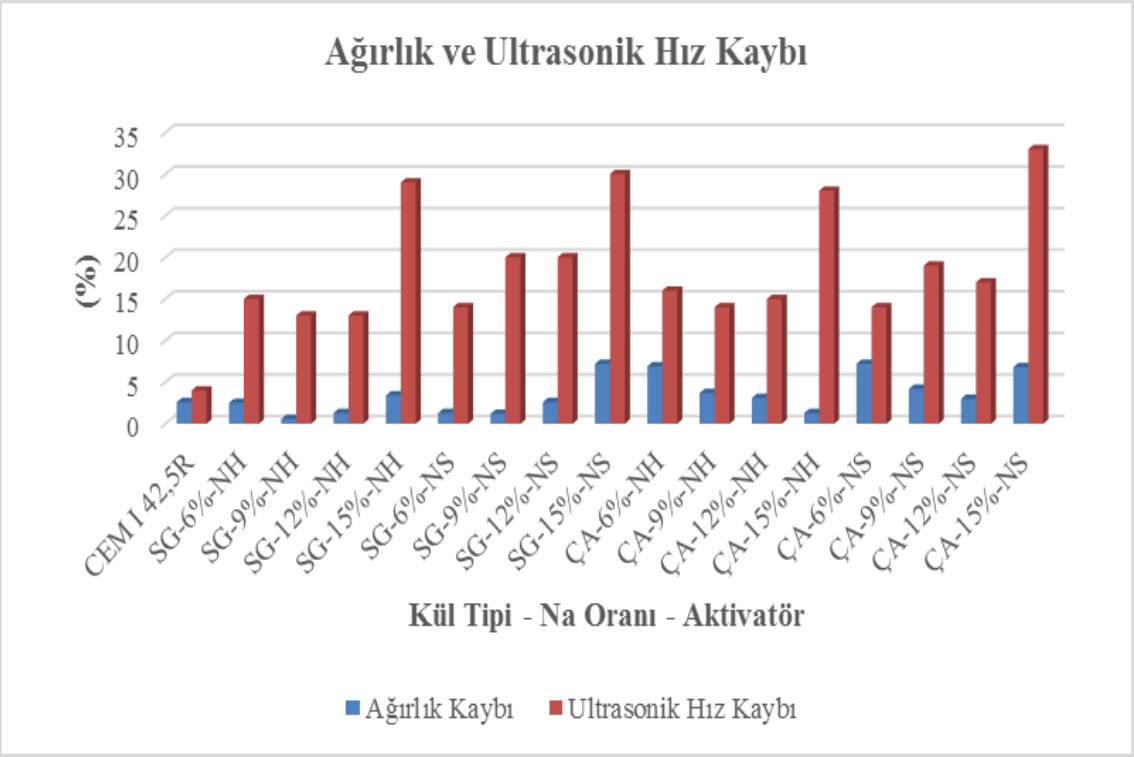
Çatalağzı uçucu külünün NaOH ile aktive edilen ve 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ağırlık kayıpları %1,3 ile %6,9 arasında hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ağırlık kayıpları ise %3,0 ile %7,2 olarak hesaplanmıştır. Ağırlık kayıpları sonuçlarının çok sağlıklı olmadığı görülmüştür.

Portland çimentosunun ile üretilen kontrol numunesinin donma çözülme sonucu meydana gelen ultrasonik hız kaybı ise %4 olmuştur. Sugözü uçucu külünün NaOH ile aktive edilen ve 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ultrasonik hız kayıpları sırasıyla %15, %13, %13 ve %29 olmuştur. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ultrasonik hız kayıpları ise sırasıyla %14, %20, %20 ve %30 olmuştur.

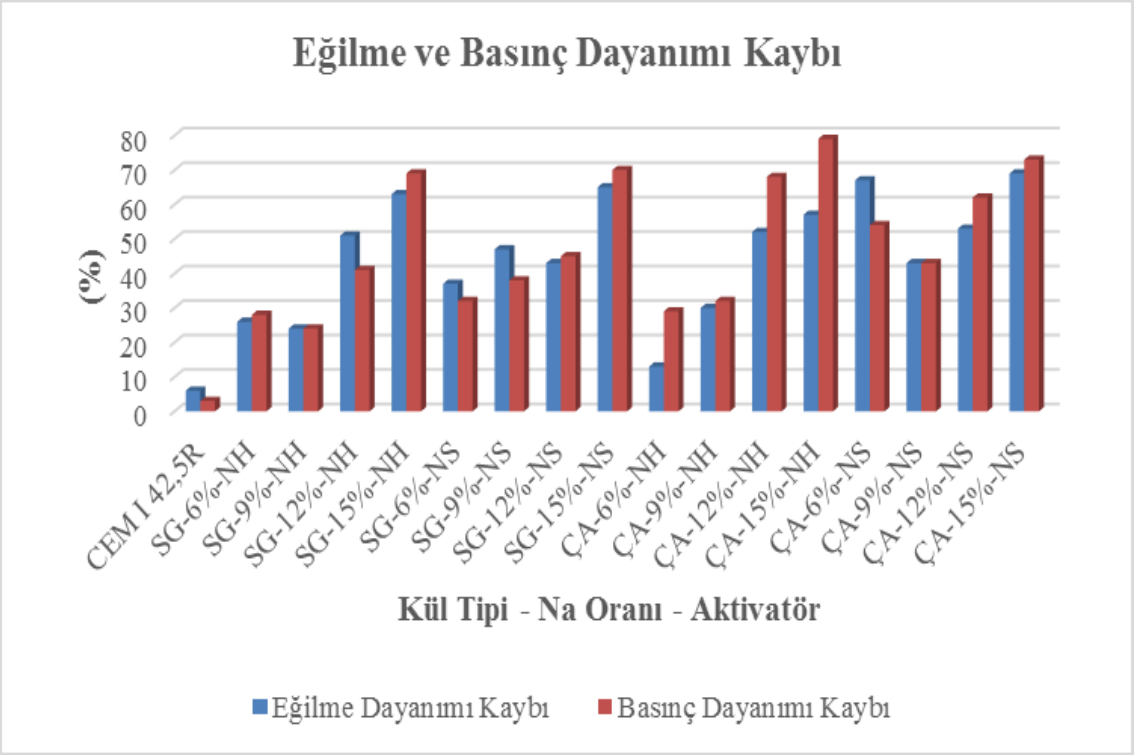
Çatalağzı uçucu küllünün NaOH ile aktive edilen %6, %9, %12 ve %15 Na oranındaki ultrasonik hız kayıpları %16, %14, %15 ve %28 olurken, Na_2SiO_3 ile aktive edilenlerde yine sırasıyla %14, %19, %17 ve %33 olmuştur.

Tablo 3.32. Donma-çözülme deneyi sonrası dayanım kayıpları

Na	Dayanım Kayıpları				
	Özellik	Eğilme Kaybı (%)	Basınç Kaybı (%)	Eğilme Kaybı (%)	Basınç Kaybı (%)
	CEM I 42,5R	6	3	6	3
Aktivatör		Sugözü		Çatalağzı	
%6	NaOH	26	28	13	29
%9		24	24	30	32
%12		51	41	52	68
%15		63	69	57	79
%6	Na_2SiO_3	37	32	67	54
%9		47	38	43	43
%12		43	45	53	62
%15		65	70	69	73



Şekil 3.45. Donma-çözülme sonrası ağırlık ve ultrasonik hız kaybı



Şekil 3.46. Donma-çözülme sonrası eğilme ve basınç dayanımı kaybı

NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki donma çözülme sonrası eğilme dayanımlarındaki kayıplar sırasıyla %26, 24, 51, ve 63 ve basınç dayanımlarındaki kayıplar ise % 28, 24, 41 ve 69 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki donma çözülme sonrası eğilme dayanımlarındaki kayıplar sırasıyla % 37, 47, 43, ve 65 ve basınç dayanımlarındaki kayıplar ise % 32, 38, 45 ve 70 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.46).

NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki donma çözülme sonrası eğilme dayanımlarındaki kayıplar sırasıyla %13, 30, 52 ve 57 ve basınç dayanımlarındaki kayıplar ise % 29, 32, 68 ve 79 olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki donma çözülme sonrası eğilme dayanımlarındaki kayıplar sırasıyla % 67, 43, 53, ve 69 ve basınç dayanımlarındaki kayıplar ise % 54, 43, 62 ve 73 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.46).

Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen geopolimerlerde Na oranındaki artış ile genel olarak donma çözülme sonrası dayanımlarda azalmaların olduğu görülmüştür. Yine genel olarak eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalmaların benzer olduğu söylenebilir.

3.11. Hızlı Klorür Geçirimliliği Deney Sonuçları

Çalışmada, Sugözü ve Çatalağzı külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, 9, 12 ve 15 Na) kullanılarak aktive edilen harç numuneleri 100°C de 24 saat ısıl kür edildikten sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuş, kontrol numuneleri ise 28 gün suda kür edilmiştir. Taş kesme makinesinde 50 mm kalınlıkta Ø100 mm çapında kesilen deney örneklerine ASTM C1202 standardına uygun olarak hızlı klorür geçirimliliği deneyi uygulanmıştır. Numunelerin 6 saat sonundaki Coulomb cinsinden geçen yük değeri kaydedilmiştir (Tablo 3.34). Elde edilen yük değerlerine klorür geçiş sınıfı standartta yer alan aralıklara göre değerlendirilmiştir (Tablo 3.33). Deney cihazı ve ekran görüntüsü Şekil 3.47'de, klorür geçrimliliğindeki değişim ise grafiksel olarak Şekil 3.48'de verilmiştir.



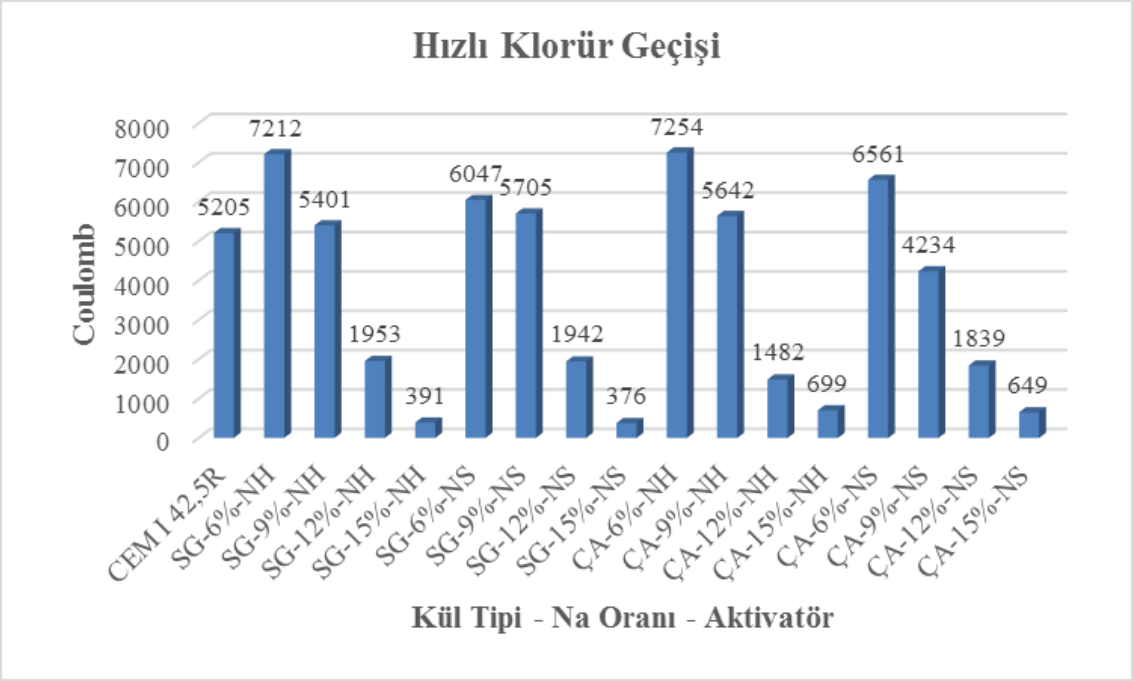
Şekil 3.47. Hızlı klorür geçirimliliği deney cihazı ve ekran görüntüsü

Tablo 3.33. Klorür iyonu geçirimlilik sınıfları (ASTM C1202)

Numuneden Geçen Yük Değeri (Coulomb)	**Klorür İyonu Geçirimlilik Sınıfı**
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Tablo 3.34. Hızlı klorür geçirimliliği deney sonuçları

Na	Hızlı Klorür Geçirimliliği				
	Özellik	**Klorür İyonu Geçirimliliği (Coulomb)**	**Klorür İyonu Geçirimlilik Sınıfı**	**Klorür İyonu Geçirimliliği, (Coulomb)**	**Klorür İyonu Geçirimlilik Sınıfı**
	CEM I 42,5R	5205	Yüksek	5205	Yüksek
Aktivatör		**Sugözü**		**Çatalağzı**	
%6	**NaOH**	7212	Yüksek	7254	Yüksek
%9		5401	Yüksek	5642	Yüksek
%12		1953	Düşük	1482	Düşük
%15		391	Çok Düşük	699	Çok Düşük
%6	**Na_2SiO_3**	6047	Yüksek	6561	Yüksek
%9		5705	Yüksek	4234	Yüksek
%12		1942	Düşük	1839	Düşük
%15		376	Çok Düşük	649	Çok Düşük



Şekil 3.48. Geopolimer ve kontrol numunelerinin hızlı klorür geçirimliliği

Sugözü uçucu küllü NaOH kullanılarak alkali aktifleştirilen, 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin hızlı klorür geçirimlilik değerleri sırasıyla 7212, 5401, 1953 ve 391 Coulomb olarak ölçülmüştür. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki hızlı klorür geçirimlilik değerleri ise sırasıyla 6047, 5705, 1942 ve 376 Coulomb ölçülmüştür. Kontrol

numunelerinin ise hızlı klorür geçirimlilik değeri 5205 Coulomb olarak belirlenmiştir. ASTM C1202 standardına göre %6 ve %9 Na oranındaki hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerler ile kontrol numuneleri 4000 Coulomb sınırını aştığı için yüksek klorür geçirimlilik sınıfında yer almaktadır. %12 Na oranındaki numuneler düşük, %15 Na oranındaki numuneler ise çok düşük hızlı klorür geçirimliliği sınıfında yer almaktadır.

Çatalağzı uçucu küllü NaOH kullanarak alkali ile aktifleştirilen, 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki numunelerin hızlı klorür geçirimlilik değerleri sırasıyla 6561, 4234, 1839 ve 649 Coulomb olarak ölçülmüştür. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na konsantrasyonlarındaki hızlı klorür geçirimlilik değerleri ise sırasıyla 7254, 5642, 1482 ve 699 Coulomb ölçülmüştür. Kontrol numunelerinin ise hızlı klorür geçirimlilik değeri 5205 Coulomb olarak belirlenmiştir. ASTM C1202 standardına göre %6 ve %9 Na oranındaki hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerler ile kontrol numuneleri 4000 Coulomb sınırını aştığı için yüksek klorür geçirimlilik sınıfında yer almaktadır. %12 Na oranındaki numuneler düşük, %15 Na oranındaki numuneler ise çok düşük hızlı klorür geçirimliliği sınıfında yer almaktadır.

Alkali ile aktifleştirilen numunelerde hızlı klorür geçişi Na oranının %6'dan %15'e doğru artışı ile azalmıştır. Ancak %6 ve %9 Na oranlarında tüm numunelerde yüksek klor geçişi görülmüştür. En az klor geçişi hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı ve Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde %12 Na oranında düşük ve %15 Na oranında çok düşük klor geçiş sınıfı belirlenerek kontrol grubu numunelerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

3.12. Karbonatlaşma Deney Sonuçları

Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, %9, %12 ve %15 Na) ile aktivasyonundan elde edilen numunelerinin 100°C de 24 saat ısıl kür sonrasında, sıcaklığı 23±2ºC ve bağıl nemi %55±5 olan laboratuvar ortamında bekletilmişlerdir. Numuneler ikiye bölünmüş şekilde yüzeylerine fenolftalein çözeltisi püskürtülmüştür. Numune yüzeylerindeki renk değişimi göstermeyen kısımlar kumpas yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.49). Karbonatlaşma derinliği ölçümleri 90, 180 ve 360 günlük

numunelerde yapılmıştır (Şekil 3.50, Şekil 3.51 ve Şekil 3.52). Ortalama karbonatlaşma derinlikleri mm olarak Tablo 3.35'de verilmiştir. Ayrıca numunelerdeki karbonatlaşma değişimi grafiksel olarak Şekil 3.53 ve Şekil 3.54'de gösterilmiştir.



Şekil 3.49. Kontrol numunesi 360 günlük karbonatlaşma okuması



Şekil 3.50. Numunelerin 90 günlük karbonatlaşma görüntüsü



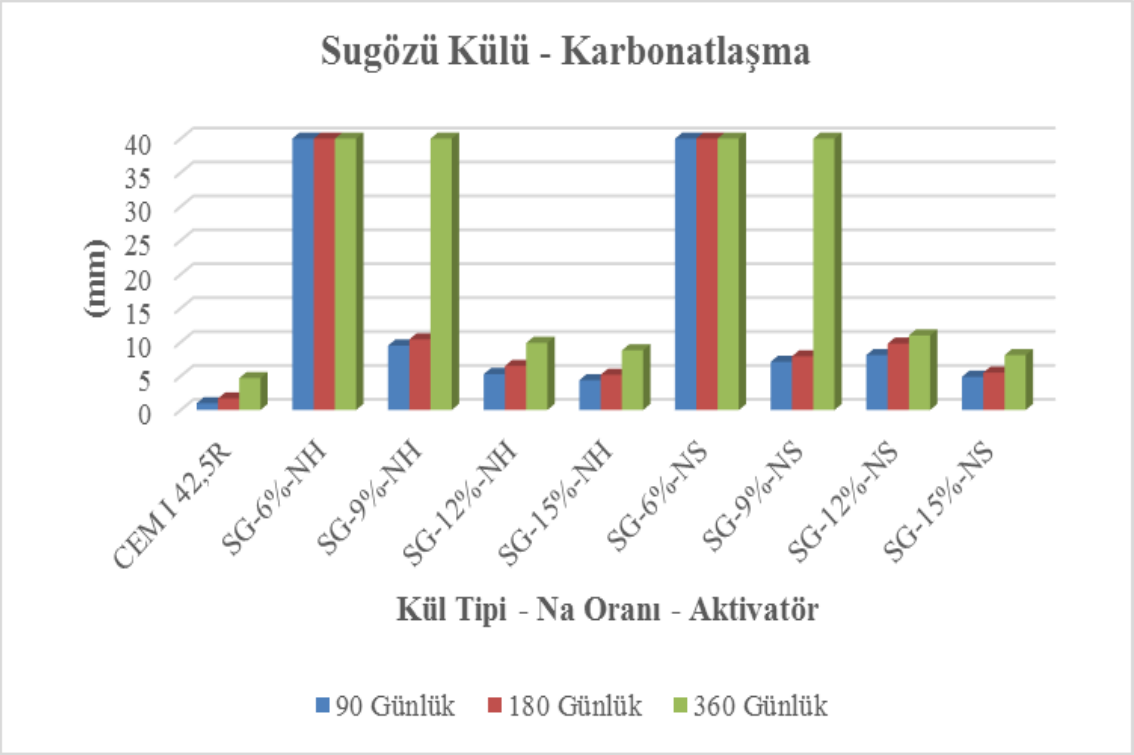
Şekil 3.51. Numunelerin 180 günlük karbonatlaşma görüntüsü



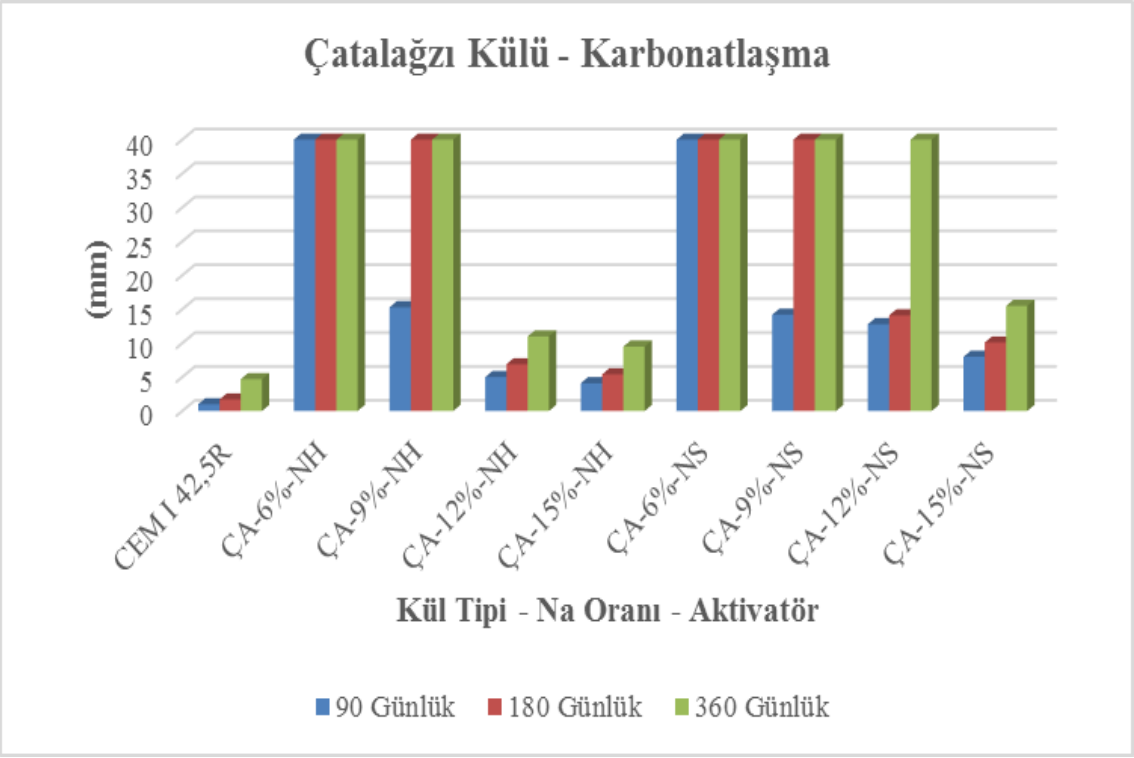
Şekil 3.52. Numunelerin 360 günlük karbonatlaşma görünüşü

Tablo 3.35. 90, 180 ve 360 günlük karbonatlaşma derinlikleri

Na		Karbonatlaşma derinliği (mm)					
	Özellik	**90 Günlük**	**180 Günlük**	**360 Günlük**	**90 Günlük**	**180 Günlük**	**360 Günlük**
	CEM I 42,5R	1,0	1,7	4,7	1,0	1,7	4,7
Aktivatör		**Sugözü**			**Çatalağzı**		
%6	**NaOH**	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
%9		9,5	10,4	40,0	15,3	40,0	40,0
%12		5,3	6,5	9,9	5,0	6,9	11,0
%15		4,4	5,2	8,8	4,1	5,4	9,5
%6	**Na_2SiO_3**	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
%9		7,1	7,9	40,0	14,2	40,0	40,0
%12		8,1	9,8	11,0	12,8	14,1	40,0
%15		4,9	5,5	8,1	8,0	10,1	15,5



Şekil 3.53. Sugözü külü numunelerinin karbonatlaşma derinliği



Şekil 3.54. Çatalağzı külü numunelerinin karbonatlaşma derinliği

NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarındaki karbonatlaşma derinlikleri 90 gün

için sırasıyla 40,0 9,5, 5,3 ve 4,4 mm olarak ölçülmüştür. 180 günlük karbonatlaşma derinlikleri 40,0 10,4, 6,5 ve 5,2 ve 360 günlük karbonatlaşma derinlikleri ise 40,0, 40,0, 9,9 ve 8,8 mm olarak ölçülmüştür. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında ise karbonatlaşma derinlikleri ise 90 gün için sırasıyla 40, 7,1, 8,1 ve 4,9 mm olarak ölçülmüştür. 180 gün için sırasıyla 40, 7,9, 9,8 ve 5,5 mm ve 360 günlük karbonatlaşma derinlikleri ise 40,0, 40,0, 11,0 ve 8,1 mm olarak ölçülmüştür.

NaOH ile aktive edilen Çatalazğı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarındaki numuneler, karbonatlaşma derinlikleri 90 gün için sırasıyla 40,0 15,3, 5,0 ve 4,1 mm olarak ölçülmüştür. 180 günlük karbonatlaşma derinlikleri 40,0 40,0 6,9 ve 5,4 mm ve 360 günlük karbonatlaşma derinlikleri ise 40,0, 40,0 11,0 ve 9,5 mm olarak ölçülmüştür. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında ise karbonatlaşma derinlikleri 90 gün için sırasıyla 40, 14,2, 12,8, ve 8,0 mm, 180 gün için sırasıyla 40, 40, 14,1 ve 10,1 mm ve 360 günlük karbonatlaşma derinliği ise 40,0, 40,0, 40,0 ve 15,5 mm olarak ölçülmüştür.

Kontrol numunesinin 90, 180 ve 360 günlük karbonatlaşma derinlikleri sırasıyla 1,0 mm, 1,7 mm ve 4,7 mm olarak ölçülmüştür. Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesi ile karbonatlaşmanın arttığını ve özellikle düşük Na oranlarında bunun daha fazla olduğu görülmektedir. %6 Na oranındaki tüm geopolimerlerin tamamının 90 günde karbonatlaştığı görülmüştür. %9 Na oranındaki tüm numuneler ise 360 günde karbonatlaşmaya uğramıştır. Geopolimerler içerisinde en düşük karbonatlaşma derinliği hem NaOH hem de Na_2SiO_3 için %15 Na oranında olduğu görülmüştür. Sugözü uçucu külünün hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen %12 ve %15 Na oranındaki numuneler 360 gün sonunda Çatalağzı külünden daha düşük karbonatlaşma değerlerine sahiptir.

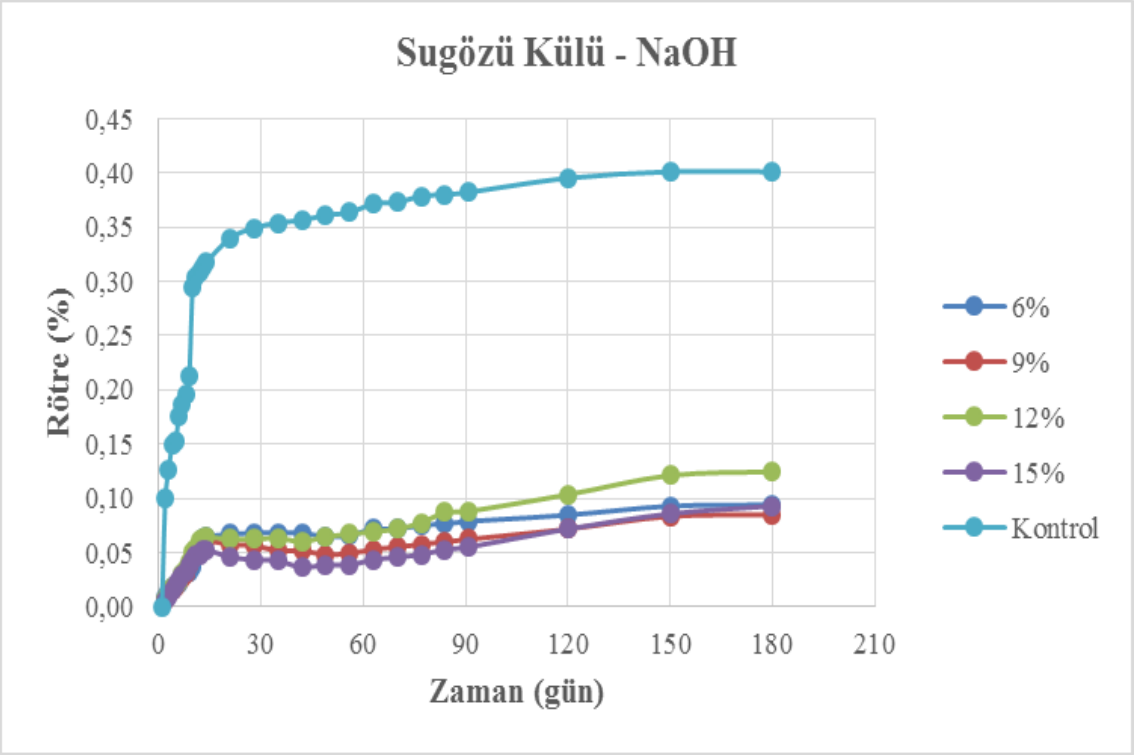
3.13. Rötre Deney Sonuçları

Sugözü ve Çatalağzı külleri, NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatör olarak %6, 9, 12 ve 15 Na oranlarında kullanılarak aktive edilen harç numuneleri 100°C de 24 saat ısıl kür edildikten sonra oda sıcaklığına kadar soğutulup ölçülmüş, kontrol harçları ise 24 saat kalıpta bekledikten sonra kalıptan çıkarılarak ilk ölçüm yapılmıştır. Numuneler deney

süresince 23±2ºC sıcaklık ve %50±4 bağıl nemi bulunan laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Büzülmeye bağlı boyda meydana gelen değişimin hesaplanması için ASTM C157/C157M standardı referans alınarak ilk 14 gün boyunca her gün, 91 güne kadar her hafta ve 6 ay boyunca her ay ölçüm yapılarak boydaki değişim belirlenmiştir.

Tablo 3.36. NaOH ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin boy değişimi

Numune Yaşı (Gün)	Sugözü Külü, NaOH				
	CEM I 42,5R	%6	%9	%12	%15
	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,10	0,01	0,01	0,01	0,01
3	0,13	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0,15	0,02	0,02	0,02	0,02
5	0,15	0,02	0,02	0,02	0,02
6	0,18	0,02	0,02	0,02	0,02
7	0,19	0,03	0,03	0,03	0,03
8	0,20	0,03	0,03	0,04	0,03
9	0,21	0,03	0,04	0,04	0,04
10	0,29	0,04	0,04	0,05	0,04
11	0,30	0,05	0,05	0,05	0,05
12	0,31	0,06	0,06	0,06	0,05
13	0,31	0,06	0,06	0,06	0,05
14	0,32	0,06	0,06	0,06	0,05
21	0,34	0,07	0,06	0,06	0,05
28	0,35	0,07	0,06	0,06	0,04
35	0,35	0,07	0,05	0,06	0,04
42	0,36	0,07	0,05	0,06	0,04
49	0,36	0,06	0,05	0,06	0,04
56	0,36	0,07	0,05	0,07	0,04
63	0,37	0,07	0,05	0,07	0,04
70	0,37	0,07	0,06	0,07	0,05
77	0,38	0,08	0,06	0,08	0,05
84	0,38	0,08	0,06	0,09	0,05
91	0,38	0,08	0,06	0,09	0,06
120	0,40	0,08	0,07	0,10	0,07
150	0,40	0,09	0,08	0,12	0,09
180	0,40	0,09	0,08	0,12	0,09

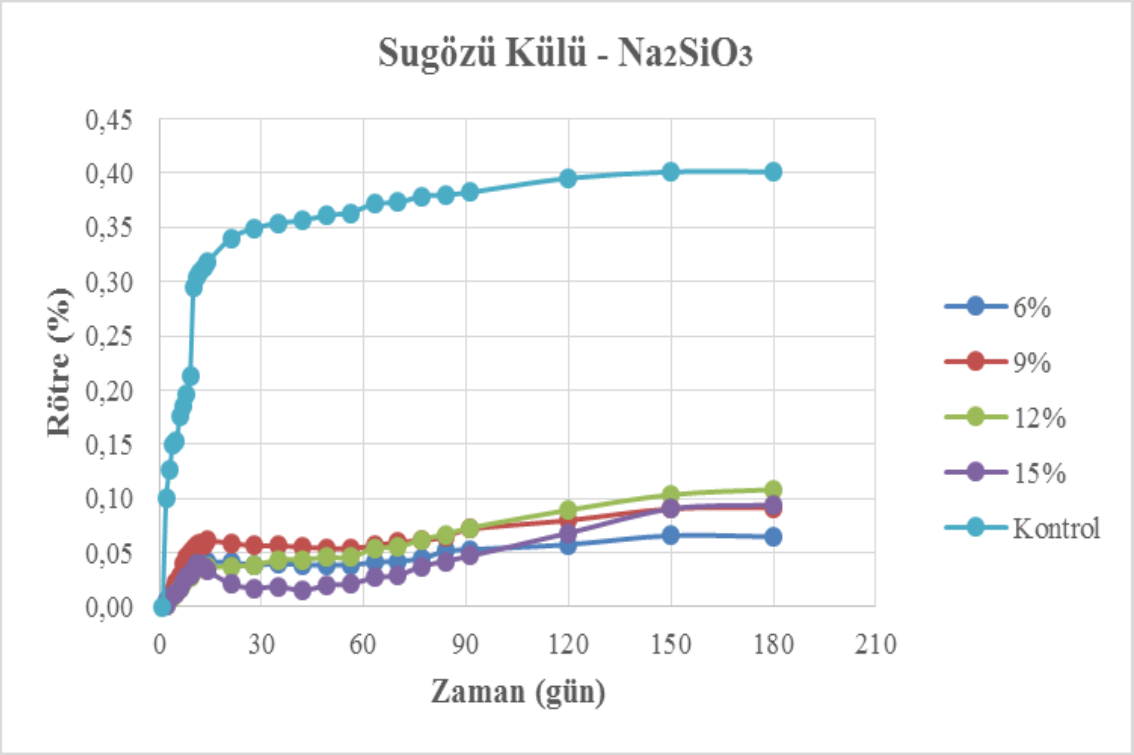


Şekil 3.55. NaOH ile üretilen Sugözü küllü harçların rötre-zaman ilişkisi

NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin, %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında ilk 14 gün sonunda rötre değerleri sırasıyla %0,06 %0,06, %0,06 ve %0,05 olarak belirlenmiştir. 180 gün sonundaki %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarındaki rötre değerleri ise sırasıyla %0,09, %0,08, %0,12 ve %0,09 olarak ölçülmüştür. Kontrol numuneleri 14 gün sonunda %0,32, 180 gün sonunda %0,40 boy değişimine uğramıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerde ilk günlerde boy değişimi birbirine yakın ilerlerken, zamana bağlı olarak Na oranlarının da etkisiyle boy değişim yüzdeleri farklılıklar görülmüştür. Ancak 180 gün sonunda %6 ve %15 Na oranlarındaki numunelerin boy değişimi birbiri ile aynı değerlere ulaşırken, en fazla boy değişimi %12 Na oranındaki numunede görülmüştür. Tüm numunelerde 150 günden sonra boydaki değişim sabit hale gelmiştir. Kontrol numunelerine oranla oldukça düşük boy değişimi göstermişlerdir (Tablo 3.36 ve Şekil 3.55).

Tablo 3.37. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü geopolimerlerin boy değişimi

Numune Yaşı (Gün)	Sugözü Külü, Na_2SiO_3				
	CEM I 42,5R	%6	%9	%12	%15
	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,10	0,01	0,00	0,00	0,00
3	0,13	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0,15	0,01	0,02	0,01	0,01
5	0,15	0,02	0,02	0,01	0,01
6	0,18	0,02	0,03	0,02	0,02
7	0,19	0,03	0,04	0,02	0,02
8	0,20	0,03	0,05	0,03	0,03
9	0,21	0,03	0,05	0,03	0,03
10	0,29	0,04	0,05	0,03	0,04
11	0,30	0,04	0,06	0,04	0,04
12	0,31	0,04	0,06	0,04	0,04
13	0,31	0,04	0,06	0,04	0,04
14	0,32	0,04	0,06	0,04	0,03
21	0,34	0,04	0,06	0,04	0,02
28	0,35	0,04	0,06	0,04	0,02
35	0,35	0,04	0,06	0,04	0,02
42	0,36	0,04	0,06	0,04	0,02
49	0,36	0,04	0,05	0,05	0,02
56	0,36	0,04	0,05	0,05	0,02
63	0,37	0,04	0,06	0,05	0,03
70	0,37	0,04	0,06	0,06	0,03
77	0,38	0,04	0,06	0,06	0,04
84	0,38	0,05	0,06	0,07	0,04
91	0,38	0,05	0,07	0,07	0,05
120	0,40	0,06	0,08	0,09	0,07
150	0,40	0,07	0,09	0,10	0,09
180	0,40	0,06	0,09	0,11	0,09

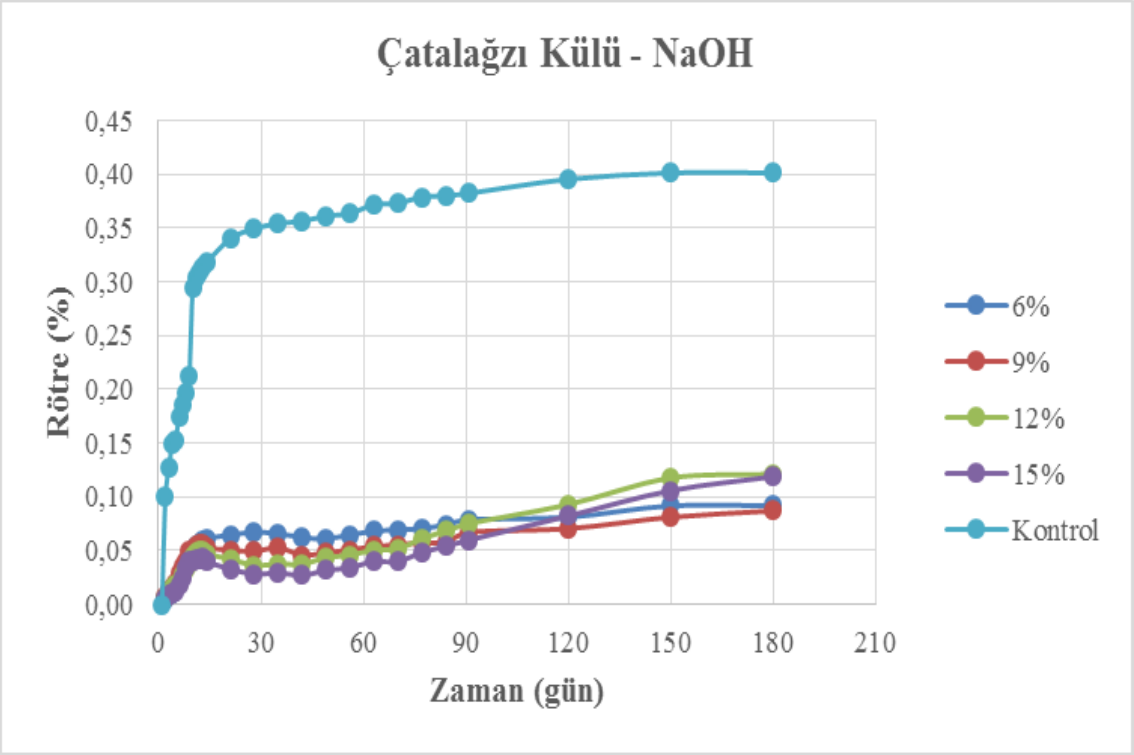


Şekil 3.56. Na_2SiO_3 ile üretilen Sugözü küllü harçların rötre-zaman ilişkisi

Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin, %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında ilk 14 gün sonunda rötre değerleri sırasıyla %0,04 %0,06, %0,04 ve %0,03 olarak belirlenmiştir. 180 gün sonundaki %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarındaki rötre değerleri ise sırasıyla %0,06, %0,09, %0,11 ve %0,09 olarak ölçülmüştür. Kontrol numuneleri 14 gün sonunda %0,32, 180 gün sonunda %0,40 boy değişimine uğramıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerde ilk günlerde boy değişimi birbirine yakın ilerlerken, zamana bağlı olarak Na oranlarının da etkisiyle boy değişim yüzdelerinde farklılıklar görülmüştür. Ancak 180 gün sonunda %9 ve %15 Na oranlarındaki numunelerin boy değişimi birbiri ile aynı değerlere ulaşırken, en fazla boy değişimi %12 Na oranındaki numunede görülmüştür. Kontrol numunelerine kıyasla oldukça düşük boy değişimi göstermişlerdir (Tablo 3.37 ve Şekil 3.56).

Tablo 3.38. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin boy değişimi

Numune Yaşı (Gün)	Çatalağzı Külü, NaOH				
	CEM I 42,5R	%6	%9	%12	%15
	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,10	0,00	0,01	0,01	0,01
3	0,13	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0,15	0,01	0,02	0,02	0,01
5	0,15	0,02	0,02	0,02	0,01
6	0,18	0,02	0,03	0,02	0,02
7	0,19	0,03	0,04	0,03	0,02
8	0,20	0,04	0,04	0,03	0,03
9	0,21	0,04	0,05	0,04	0,04
10	0,29	0,05	0,05	0,04	0,04
11	0,30	0,05	0,06	0,05	0,04
12	0,31	0,06	0,06	0,05	0,04
13	0,31	0,06	0,06	0,05	0,04
14	0,32	0,06	0,05	0,05	0,04
21	0,34	0,06	0,05	0,04	0,03
28	0,35	0,07	0,05	0,04	0,03
35	0,35	0,07	0,05	0,04	0,03
42	0,36	0,06	0,05	0,04	0,03
49	0,36	0,06	0,05	0,04	0,03
56	0,36	0,06	0,05	0,05	0,03
63	0,37	0,07	0,05	0,05	0,04
70	0,37	0,07	0,06	0,05	0,04
77	0,38	0,07	0,06	0,06	0,05
84	0,38	0,07	0,06	0,07	0,05
91	0,38	0,08	0,07	0,08	0,06
120	0,40	0,08	0,07	0,09	0,08
150	0,40	0,09	0,08	0,12	0,11
180	0,40	0,09	0,09	0,12	0,12

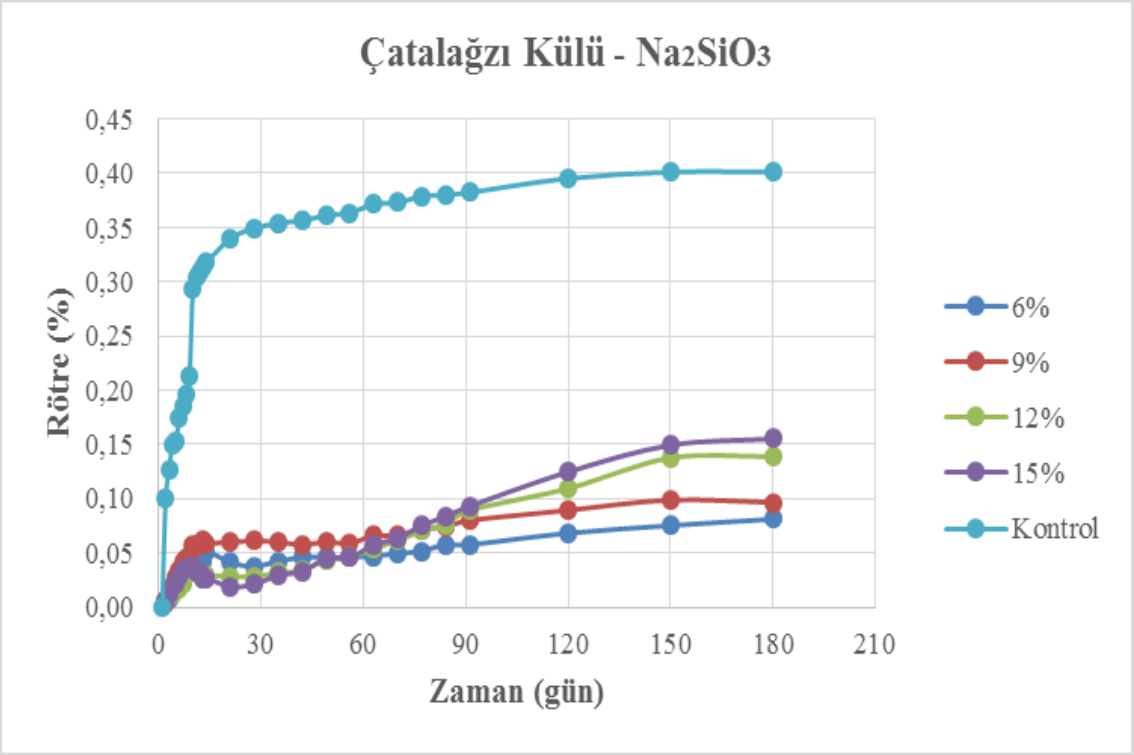


Şekil 3.57. NaOH ile üretilen Çatalağzı küllü harçların rötre-zaman ilişkisi

NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin, %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında ilk 14 gün sonunda rötre değerleri sırasıyla %0,06 %0,05, %0,05 ve %0,04 olarak belirlenmiştir. 180 gün sonundaki %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarındaki rötre değerleri ise sırasıyla %0,09, %0,09, %0,12 ve %0,12 olarak ölçülmüştür. Kontrol numuneleri 14 gün sonunda %0,32, 180 gün sonunda %0,40 boy değişimine uğramıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerde ilk günlerde boy değişimi birbirine yakın ilerlerken, zamana bağlı olarak Na oranlarının da etkisiyle boy değişim yüzdelerinde biraz farklılıklar görülmüştür. Ancak 180 gün sonunda %6 ve %9 Na oranlarındaki numunelerin boy değişimi birbiri ile aynı değerlere ulaşırken, en fazla boy değişimi %12 ve %15 Na oranındaki numunelerde eşit şekilde görülmüştür. Kontrol numunelerine oranla oldukça düşük boy değişimi göstermişlerdir (Tablo 3.38 ve Şekil 3.57).

Tablo 3.39. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü geopolimerlerin boy değişimi

Numune Yaşı (Gün)	Çatalağzı Külü, Na_2SiO_3				
	CEM I 42,5R	%6	%9	%12	%15
	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)	Boy Değişimi (%)
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,10	0,00	0,00	0,01	0,01
3	0,13	0,01	0,01	0,01	0,01
4	0,15	0,01	0,02	0,01	0,02
5	0,15	0,02	0,03	0,02	0,02
6	0,18	0,03	0,03	0,02	0,03
7	0,19	0,03	0,04	0,02	0,03
8	0,20	0,04	0,04	0,03	0,04
9	0,21	0,05	0,05	0,03	0,04
10	0,29	0,05	0,06	0,03	0,04
11	0,30	0,05	0,06	0,03	0,03
12	0,31	0,04	0,06	0,03	0,03
13	0,31	0,04	0,06	0,03	0,03
14	0,32	0,05	0,06	0,03	0,03
21	0,34	0,04	0,06	0,03	0,02
28	0,35	0,04	0,06	0,03	0,02
35	0,35	0,04	0,06	0,03	0,03
42	0,36	0,05	0,06	0,03	0,03
49	0,36	0,05	0,06	0,04	0,04
56	0,36	0,05	0,06	0,05	0,05
63	0,37	0,05	0,07	0,05	0,06
70	0,37	0,05	0,07	0,06	0,06
77	0,38	0,05	0,07	0,07	0,08
84	0,38	0,06	0,07	0,08	0,08
91	0,38	0,06	0,08	0,09	0,09
120	0,40	0,07	0,09	0,11	0,12
150	0,40	0,08	0,10	0,14	0,15
180	0,40	0,08	0,10	0,14	0,16



Şekil 3.58. Na_2SiO_3 ile üretilen Çatalağzı küllü harçların rötre-zaman ilişkisi

Na_2SiO_3 ile aktive edilen 24 saat 100ºC'de ısıl küre tabi tutulan Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin, %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında ilk 14 gün sonunda rötre değerleri sırasıyla %0,05 %0,06, %0,03 ve %0,03 olarak belirlenmiştir. 180 gün sonundaki %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarındaki rötre değerleri ise sırasıyla %0,08, %0,10, %0,14 ve %0,06 olarak ölçülmüştür. Kontrol numuneleri 14 gün sonunda %0,32, 180 gün sonunda %0,40 boy değişimine uğramıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerde zamana bağlı olarak Na oranlarının etkisiyle boy değişim yüzdelerinde farklılıklar görülmüştür. Ancak 180 gün sonunda %6 ve %9 Na oranlarındaki numunelerin boy değişimi daha düşük iken, %12 ve %15 Na oranındaki numunelerde daha yüksek boy değişimi görülmüştür. Alkali ile aktifleştirilen numuneler kontrol numunelerine kıyasla oldukça düşük boy değişimi göstermişlerdir (Tablo 3.39 ve Şekil 3.58).

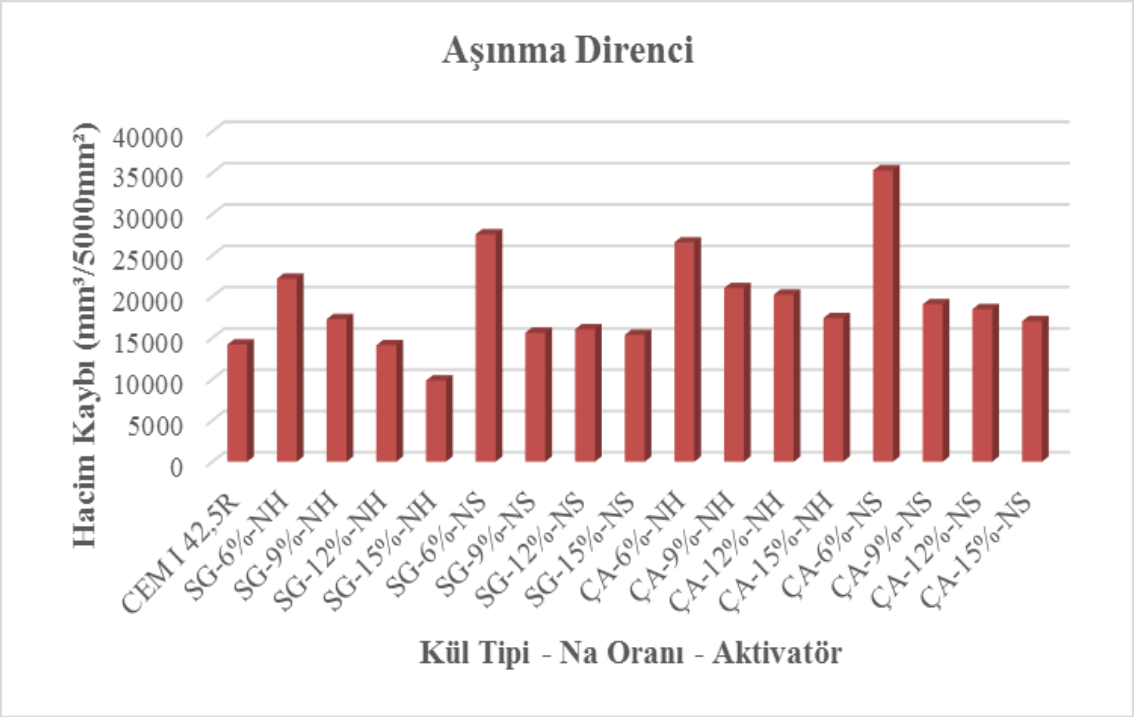
3.14. Aşınma Direnci Tayini Deney Sonuçları

Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, %9, %12 ve %15 Na) ile aktivasyonundan elde edilen numunelerin, 100°C de 24 saat ısıl kür sonrasında oda sıcaklığına soğuduktan sonra böhme yatay aşınma cihazında aşınma dirençleri

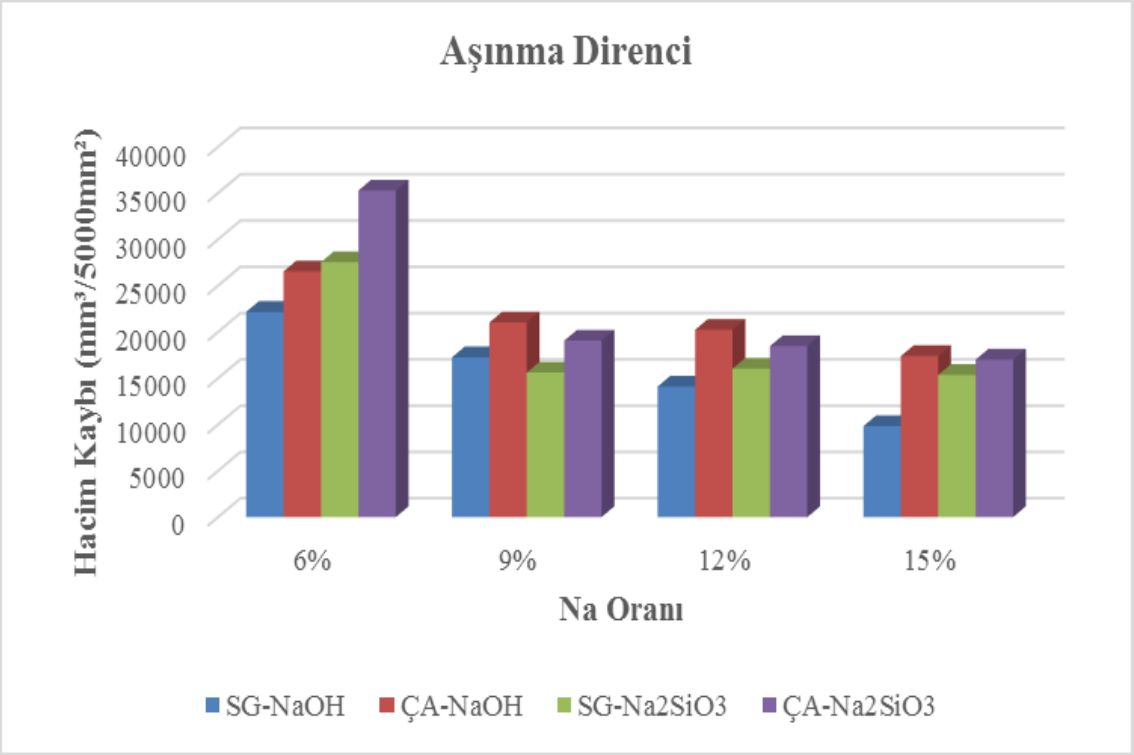
belirlenmiştir. Ayrıca portland çimentosu ile üretilen kontrol numunesinin 28 gün suda kür edilmiş olan numunenin ağırlık kaybı ve hacim kaybı değerleri de geopolimer numuneleri ile kıyaslanmak amacıyla belirlenmiştir. Böhme aşınma deneyi sonunda aşınma kayıpları, ağırlık kaybı ve hacim kaybı esas alınarak sonuçlar Tablo 3.40'da verilmiştir.

Tablo 3.40. Aşınma deneyi sonucu oluşan aşınma kayıpları

Na	**Aşınma Direnci**				
	Özellik	**Ağırlık Kaybı (g)**	**Hacim Kaybı (mm^3/5000mm^2)**	**Ağırlık Kaybı (g)**	**Hacim Kaybı (mm^3/5000mm^2)**
	CEM I 42,5R	31,3	14187	31,3	14187
Aktivatör		**Sugözü**		**Çatalağzı**	
%6	**NaOH**	45,9	22162	54,1	26544
%9		36,5	17254	43,3	21017
%12		30,4	14102	42,6	20224
%15		21,5	9831	37,2	17387
%6	**Na_2SiO_3**	57,9	27533	72,3	35271
%9		33,1	15611	39,9	19059
%12		34,6	16029	38,6	18469
%15		33,3	15357	35,7	17006



Şekil 3.59. Geopolimer ve kontrol numunelerinin aşınma kaybı



Şekil 3.60. Geopolimer numunelerinin aşınma kaybı değişimi

NaOH ile 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin elde edilen aşınma kayıpları ağırlıkça %6 Na oranı için 45,9 g iken %9, %12 ve %15 Na oranlarında sırasıyla 36,5, 30,4 ve 21,5 g olmuştur. Benzer şekilde hacim kaybı değerleri ise sırasıyla 22162, 17254, 14102 ve 9831 $mm^3/5000mm^2$ olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin elde edilen aşınma kayıpları ağırlıkça %6 Na oranı için 57,9 g iken %9, %12 ve %15 Na oranlarında sırasıyla 33,1, 34,6 ve 33,3 g olmuştur. Hacim kaybı değerleri ise sırasıyla 27533, 15611, 16029 ve 15357 $mm^3/5000mm^2$ olarak hesaplanmıştır. Aşınma dirençleri genel olarak Na konsantrasyonunun %6'dan %15'e kadar artışı ile arttığı görülmüştür. Hem ağırlıkça aşınma kayıpları hem de hacim kaybı değerleri azalmıştır. NaOH ile aktifleştirilen Sugözü geopolimerlerin aşınma direncinin, Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerden daha iyi olduğu hatta aşınma direncinin Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunesinden bile daha fazla olduğu görülmüştür. Sugözü uçucu külü ile NaOH ile %12 Na oranında aktifleştirilen geopolimerlerin aşınma direncinin Portland çimentolu kontrol grubuna eşdeğer olduğu belirlenmiştir. %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin aşınma

direncinin ise Portland çimentolu kontrol grubundan bile daha iyi olduğu görülmüştür (Şekil 3.59 ve Şekil 3.60).

NaOH ile 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin elde edilen aşınma kayıpları ağırlıkça %6 Na oranı için 54,1 g iken %9, %12 ve %15 Na oranlarında sırasıyla 43,3, 42,6 ve 37,2 g olmuştur. Benzer şekilde hacim kaybı değerleri ise sırasıyla 26544, 21017, 20224 ve 17387 $mm^3/5000mm^2$ olarak hesaplanmıştır. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin elde edilen aşınma kayıpları ağırlıkça %6 Na oranı için 72,3 g iken %9, %12 ve %15 Na oranlarında sırasıyla 39,9, 38,6 ve 35,7 g olmuştur. Hacim kaybı değerleri ise sırasıyla 35271, 19059, 18469 ve 17006 $mm^3/5000mm^2$ olarak hesaplanmıştır. NaOH ile aktifleştirilen Çatalağzı geopolimerlerin aşınma direncinin, Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Çatalağzı uçucu külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 ile %15 Na oranında aktifleştirilen geopolimerlerin aşınma direncinin Portland çimentolu kontrol grubuna yakın olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.59 ve Şekil 3.60).

3.15. Yangına Dayanıklılık Deney Sonuçları

Yüksek sıcaklık etkisini araştırmak için Sugözü ve Çatalağzı uçucu külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 (%6, %9, %12 ve %15 Na) kullanılarak aktive edilen harç numuneleri 100°C de 24 saat ısıl kür edildikten sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuş, kontrol numuneleri ise 28 gün suda kür edilmiştir. Fırın sıcaklığı 1°C/dak sıcaklık artışı ile 200, 400, 600, 800, 1000 °C sıcaklıklarda 60 dakika deney sıcaklığına tabi tutulmuşlardır. 200°C ve 1000°C yangın sonrası mumunelerin görünüşü Şekil 3.61 ve Şekil 3.62'deki gibidir. Numuneler oda sıcaklığına soğuduktan sonra eğilme ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi sonucu oluşan eğilme dayanımı Tablo 3.41 ve 3.42'de, basınç dayanımları kayıpları Tablo 3.43 ve Tablo 3.44'de verilmiştir. 1000°C sonrası %15 Na oranındaki numunlerde oluşan hacim değişikliği de Şekil 3.63'de gösterilmiştir.



Şekil 3.61. 200 °C yangın sonrası numunelerin görünüşü



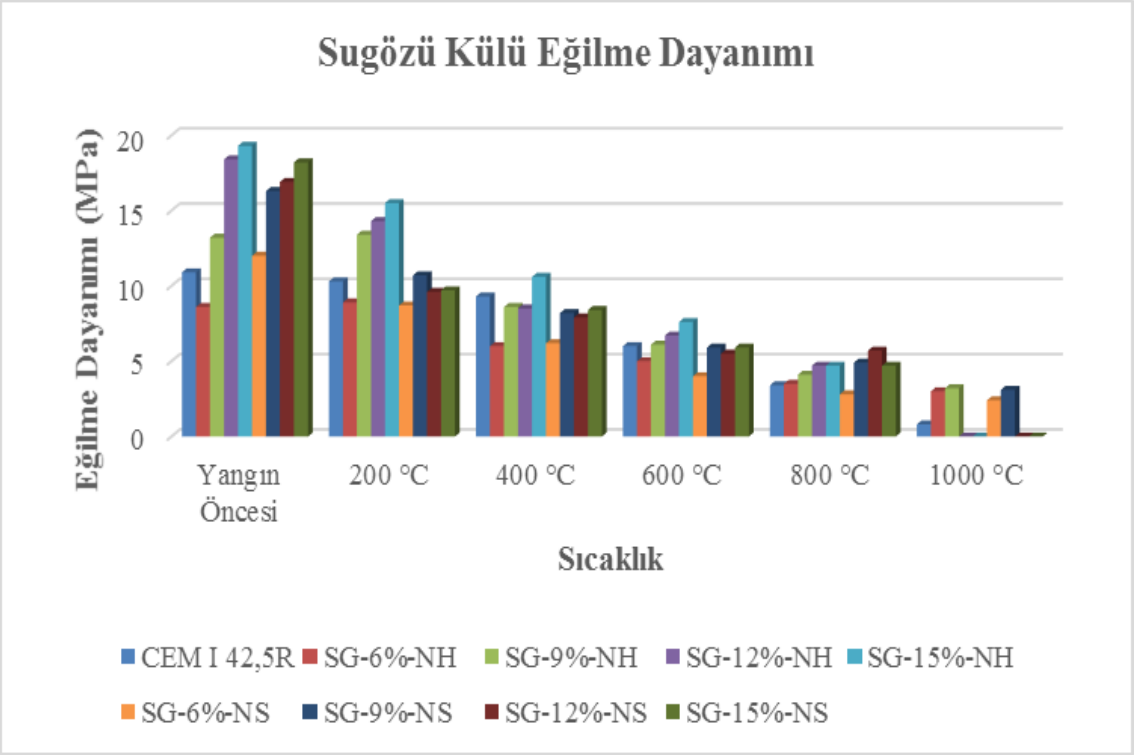
Şekil 3.62. 1000 °C yangın sonrası numunelerin görünüşü



Şekil 3.63. 1000 °C yangın sonrası numunelerde hacimsel değişim

Tablo 3.41. Sugözü külü yangın sonrası eğilme dayanımı değişimi

Na	**Sugözü Külü Eğilme Dayanımı, MPa**						
	Özellik	**Yangın Öncesi**	**200**°C	**400**°C	**600**°C	**800**°C	**1000**°C
	CEM I 42,5R	10,9	10,3	9,3	6,0	3,4	0,8
%6	**NaOH**	8,6	8,9	6,0	5,0	3,5	3,0
%9		13,2	13,4	8,6	6,1	4,1	3,2
%12		18,4	14,3	8,5	6,7	4,7	-
%15		19,3	15,5	10,6	7,6	4,7	-
%6	**Na_2SiO_3**	12,0	8,7	6,2	4,0	2,8	2,4
%9		16,3	10,7	8,2	5,9	4,9	3,1
%12		16,9	9,6	7,9	5,5	5,7	-
%15		18,2	9,7	8,4	5,9	4,7	-



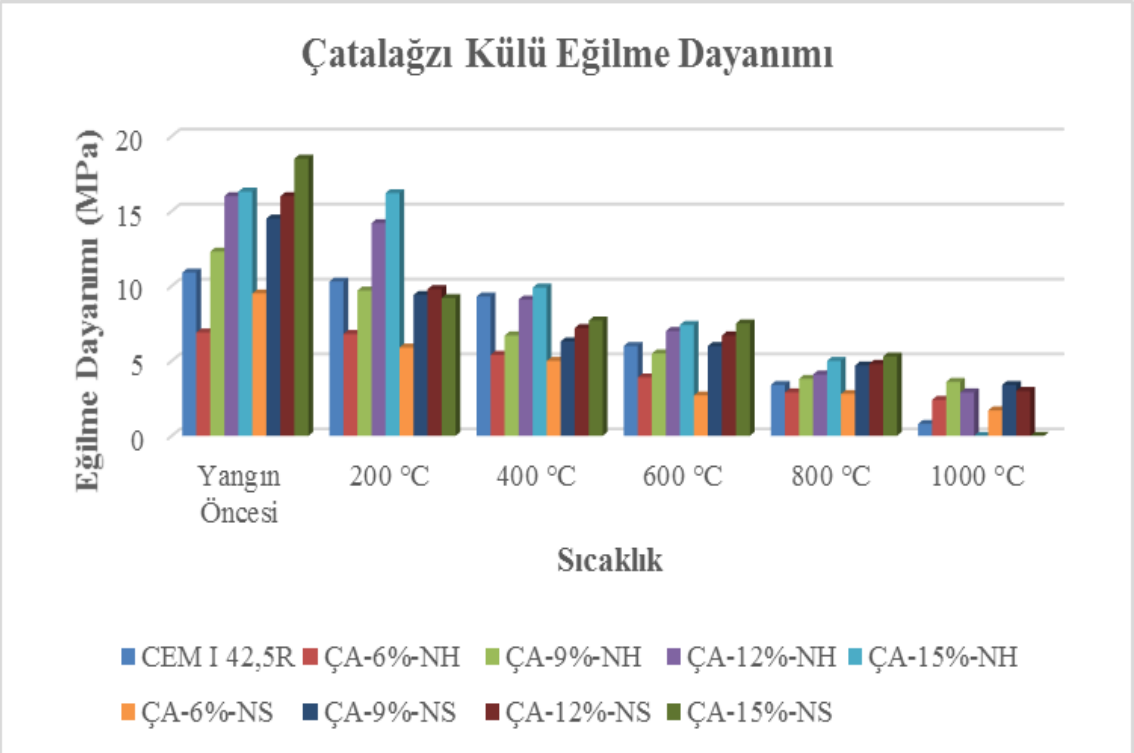
Şekil 3.64. Sugözü küllü numunelerin eğilme dayanımı değişimi

NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Sugözü uçucu küllü geopolimerlere, yangın öncesi ve yangın sonrası eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 8,6, 8,9, 6,0, 5,0, 3,5 ve 3,0 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 19,3, 15,5, 10,6, 7,6, 4,7 MPa ve 0,0 olarak belirlenmiştir. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 12,0, 8,7, 6,2, 4,0, 2,8 ve 2,4 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 18,2, 9,7, 8,4, 5,9, 4,7 MPa ve 0,0 olarak belirlenmiştir. Her Na oranı için 200ºC'den 1000ºC'ye doğru eğilme dayanımında azalma eğilimi görülmektedir. Fakat 1000ºC'de %12 ve %15 Na oranlarında numunenin aşırı hacimsel şişmesinden dolayı numuneler eğilme aparatına yerleştirilememiş ve eğilme dayanımı alınamamıştır. Kontrol numunelerinin yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 10,9, 10,3, 9,3, 6,0, 3,4 ve 0,8 MPa olarak belirlenmiştir. Alkali ile aktifleştirilen numunelerde %6 ve %9 Na oranlarında

1000ºC sonrası eğilme dayanım değerleri birbirine yakın fakat kontrol numunelerinden biraz yüksek değerlerdedir. Genel olarak bütün numuneler 400ºC sonrası eğilme dayanımının yarısından fazlasını kaybettiği görülmüştür (Şekil 3.64).

Tablo 3.42. Çatalağzı külü yangın sonrası eğilme dayanımı değişimi

Na	Çatalağzı Külü Eğilme Dayanımı, MPa						
	Özellik	**Yangın Öncesi**	**200**°C	**400**°C	**600**°C	**800**°C	**1000**°C
	CEM I 42,5R	10,9	10,3	9,3	6,0	3,4	0,8
%6	**NaOH**	6,9	6,8	5,4	3,9	2,9	2,4
%9		12,3	9,7	6,7	5,5	3,8	3,6
%12		16,0	14,2	9,1	7,0	4,1	2,9
%15		16,3	16,2	9,9	7,4	5,0	-
%6	**Na_2SiO_3**	9,5	5,9	5,0	2,7	2,8	1,7
%9		14,5	9,4	6,3	6,0	4,7	3,4
%12		16,0	9,8	7,2	6,7	4,8	3,0
%15		18,5	9,2	7,7	7,5	5,3	-

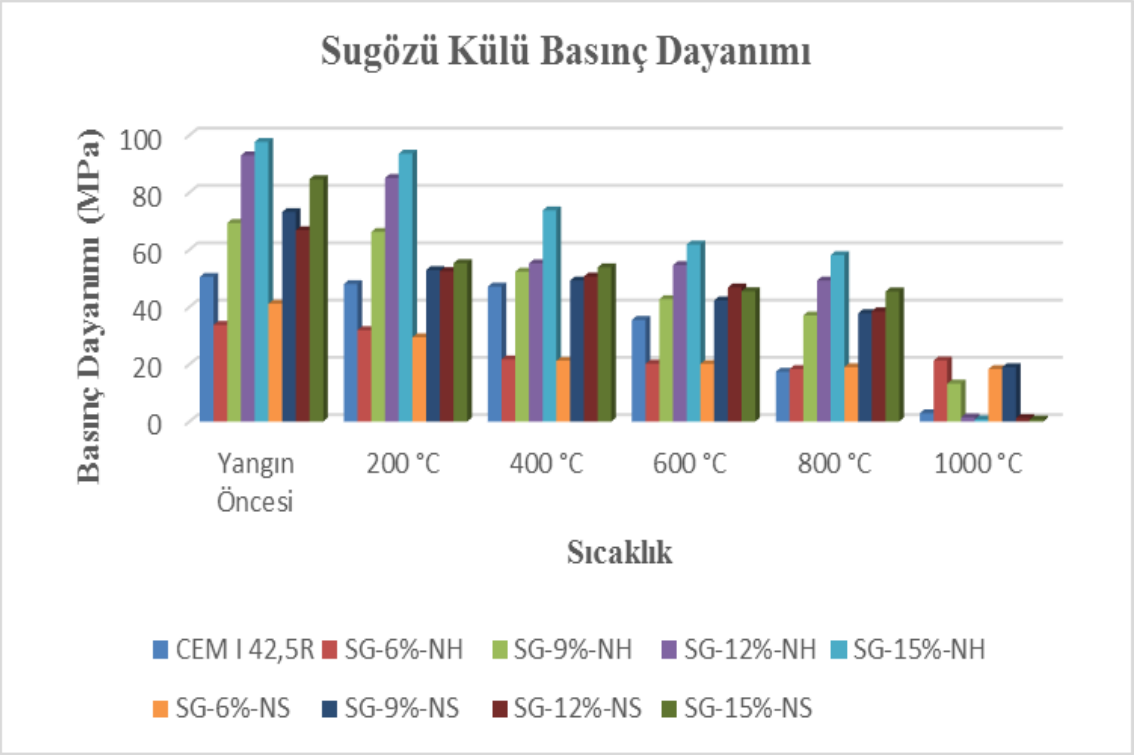


Şekil 3.65. Sugözü küllü numunelerin eğilme dayanımı değişimi

NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlere, yangın öncesi ve yangın sonrası eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 6,9, 6,8, 5,4, 3,9, 2,9 ve 2,4 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 16,3, 16,2, 9,9, 7,4, 5,0 MPa ve 0,0 olarak belirlenmiştir. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerin %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 9,5, 5,9, 5,0, 2,7, 2,8 ve 1,7 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 18,5, 9,2, 7,7, 7,5, 5,3 MPa ve 0,0 olarak belirlenmiştir. Her Na oranı için 200ºC'den 1000ºC'ye doğru eğilme dayanımında azalma eğilimi görülmektedir. Fakat 1000ºC'de hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktive edilen numunelerde %15 Na oranlarında numunenin aşırı hacimsel şişmesinden dolayı numuneler eğilme aparatına yerleştirilememiş ve eğilme dayanımı alınamamıştır. Alkali ile aktifleştirilen numunelerde %6, %9 ve %12 Na oranlarında 1000ºC sonrası eğilme dayanım değerleri birbirine yakın fakat kontrol numunelerinden biraz yüksek değerlerdedir. Bütün numunelerde 400ºC sonrası eğilme dayanımının yaklaşık yarısından fazlasını kaybettiği görülmüştür (Şekil 3.65).

Tablo 3.43. Sugözü külü yangın sonrası basınç dayanımı değişimi

Na	**Sugözü Külü Basınç Dayanımı, MPa**						
	Özellik	**Yangın Öncesi**	**200**°C	**400**°C	**600**°C	**800**°C	**1000**°C
	CEM I 42,5R	50,5	48,0	47,1	35,5	17,4	2,9
%6	**NaOH**	33,7	31,9	21,7	20,2	18,3	21,3
%9		69,3	66,2	52,3	42,7	37,0	13,3
%12		92,9	85,0	55,2	54,6	49,2	1,4
%15		97,6	93,5	73,7	61,8	58,1	0,8
%6	**Na_2SiO_3**	41,1	29,4	21,2	20,1	19,0	18,3
%9		73,1	52,9	49,2	42,3	37,8	19,0
%12		66,8	52,5	50,6	46,8	38,5	1,2
%15		84,6	55,3	53,8	45,5	45,4	0,7



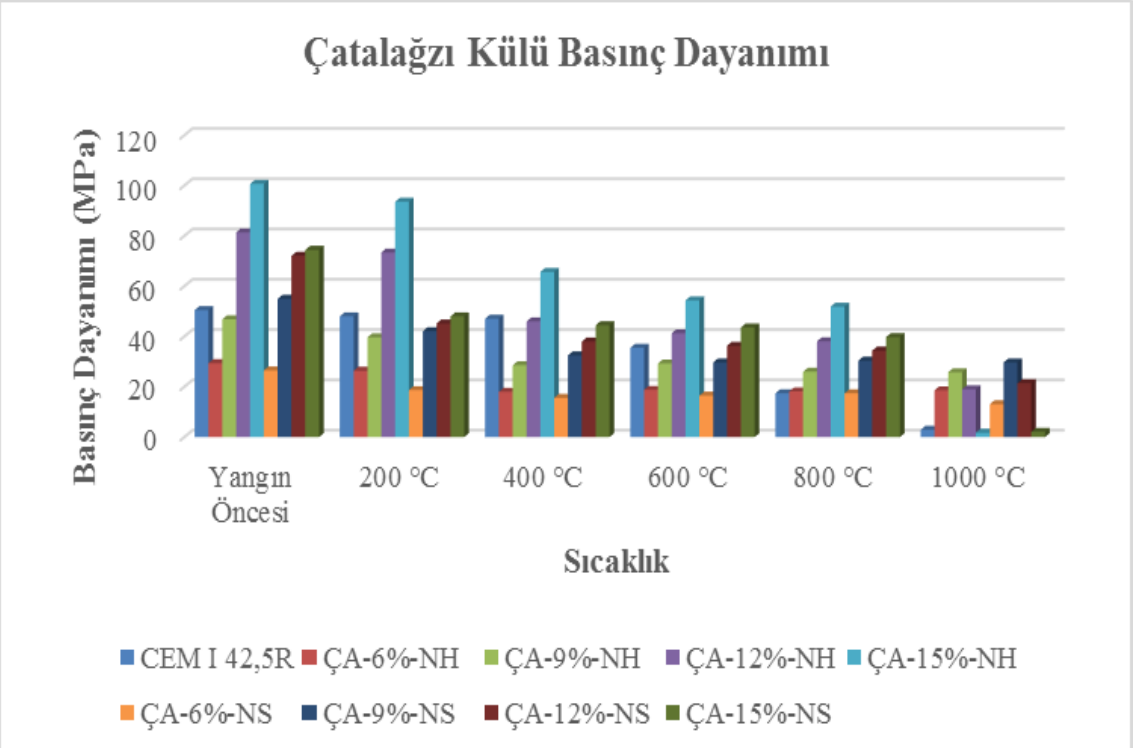
Şekil 3.66. Sugözü küllü numunelerin basınç dayanımı değişimi

NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Sugözü uçucu küllü geopolimerlere, yangın öncesi ve yangın sonrası basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 33,7, 31,9, 21,7, 20,2, 18,3 ve 21,3 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 97,6, 93,5, 73,7, 61,8, 58,1, 0,8 MPa olarak belirlenmiştir. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 41,1, 29,4, 21,2, 20,1, 19,0, 18,3 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 84,6, 55,3, 53,8, 45,5, 45,4, 0,7 MPa olarak belirlenmiştir. Her Na oranı için 200ºC'den 1000ºC'ye doğru basınç dayanımı giderek azalmaktadır. Fakat 1000ºC'de en fazla basınç dayanım kaybı %12 ve %15 Na oranlarında görülmektedir. Kontrol numunelerinin yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 50,5, 48,0, 47,1, 35,5, 17,4, 2,9 MPa olarak belirlenmiştir. %6 ve %9 Na oranlarında 1000ºC sonrası basınç dayanım değerleri kontrol numunesinden yüksek değerlerdedir. Ancak %12 ve %15 Na

oranlarındaki 1000ºC sonrası basınç dayanım değerleri kontrol numunesinden biraz düşük çıkmıştır (Şekil 3.66). 1000ºC sonrası özellikle %15 Na oranındaki numunelerde büyük hacimsel genişleme oluşmuştur (Şekil 3.63).

Tablo 3.44. Çatalağzı külü yangın sonrası basınç dayanımı değişimi

Na	Çatalağzı Külü Basınç Dayanımı, MPa						
	Özellik	**Yangın Öncesi**	**200**°C	**400**°C	**600**°C	**800**°C	**1000**°C
	CEM I 42,5R	50,5	48,0	47,1	35,5	17,4	2,9
%6	**NaOH**	29,4	26,4	18,0	18,8	18,2	18,6
%9		46,9	39,7	28,6	29,3	26,0	25,8
%12		81,4	73,4	46,0	41,3	38,1	19,0
%15		100,7	93,6	65,7	54,4	51,9	1,8
%6	**Na_2SiO_3**	26,5	18,7	15,6	16,5	17,4	13,1
%9		55,0	42,1	32,5	29,7	30,4	29,7
%12		72,1	45,2	38,0	36,3	34,4	21,4
%15		74,5	48,0	44,5	43,6	39,8	2,1



Şekil 3.67. Çatalağzı küllü numunelerin basınç dayanımı değişimi

NaOH ile aktive edilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlere, yangın öncesi ve yangın sonrası basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 29,4, 26,4, 18,0, 18,8, 18,2, 18,6 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 100,7, 93,6, 65,7, 54,4, 51,9, 1,8 MPa olarak belirlenmiştir. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin %6 Na oranı için yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 26,5, 18,7, 15,6, 16,5, 17,4, 13,1 MPa olarak belirlenmiştir. %15 Na oranı için ise, yangın öncesi, 200ºC, 400ºC, 600ºC, 800ºC ve 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımları sırasıyla 74,5, 48,0, 44,5, 43,6, 39,8, 2,1 MPa olarak belirlenmiştir. Her Na oranı için 200ºC'den 1000ºC'ye doğru basınç dayanımı giderek azalmaktadır. Fakat Çatalağzı uçucu külünde 1000ºC'de en fazla basınç dayanım kaybı %15 Na oranlarında görülmektedir. Kontrol numunelerinin yangın öncesi, 1000ºC yangın sonrası basınç dayanımı 2,9 MPa olarak belirlenmiştir. %6, %9 ve %12 Na oranlarında 1000ºC sonrası basınç dayanım değerleri kontrol numunelerinden yüksek değerlerdedir. Ancak %15 Na oranındaki 1000ºC sonrası basınç dayanım değerleri kontrol numunelerinden biraz düşük çıkmıştır (Şekil 3.67).

3.16. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları

Alkali ile aktifleştirilen nunumelerin korozyon ve donatı aderansını araştırmak için, Sugözü ve Çatalağzı uçucu külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 kullanılarak %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aktive edilen harç numuneleri 100°C de 24 saat ısıl kür edildikten sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Kontrol numuneleri ise 28 gün suda kür edilerek deneye hazırlanmıştır. Korozyon deneyi için donatıların korozyon öncesi ağırlığı ve korozyon sonrası ağırlıkları alınarak ağırlık kaybı belirlenmiştir. Aderans deneyi, hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulan ve kontrol grubu Ø100×200 mm silindir numunelerin ortasında yer alan donatının aderans kaybını belirlemek için yapılmıştır (Şekil 3.68). Donatı geopolimer ve kontrol harç numunelerinden sıyrılarak sökülüp, söküldüğü andaki maksimum kuvvet cihazdan okunarak kaydedilmiş ve aderans dayanımı belirlenmiştir (Tablo 3.45).



Şekil 3.68. Korozyon ve aderans dayanımı deney numuneleri

Tablo 3.45. Hızlandırılmış korozyon deneyi ağırlık kaybı ve aderans dayanımı

Na		Korozyon					
	Özellik	**Donatı Ağırlık Kaybı (%)**	**Kontrol Grubu Aderans Dayanımı (MPa)**	**Korozyon Sonrası Aderans Dayanımı (MPa)**	**Donatı Ağırlık Kaybı (%)**	**Kontrol Grubu Aderans Dayanımı (MPa)**	**Korozyon Sonrası Aderans Dayanımı (MPa)**
	CEM I 42,5R	0,3	10,8	8,1	0,3	10,8	8,1
Aktivatör		**Sugözü**			**Çatalağzı**		
%6	**NaOH**	0,0	4,2	3,6	0,4	5,0	4,7
%9		0,0	11,8	7,3	0,9	6,5	5,6
%12		0,0	12,9	8,0	0,2	9,0	5,6
%15		0,0	13,4	8,2	0,1	12,7	9,5
%6	**Na_2SiO_3**	0,3	4,2	2,9	0,1	4,7	3,0
%9		0,0	6,6	6,0	0,4	7,6	3,3
%12		0,0	8,5	8,1	0,0	7,9	4,5
%15		0,1	12,6	8,7	0,1	8,8	4,6

NaOH ile aktifleştirilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Sugözü uçucu küllü korozyona uğramamış geopolimer kontrol numunelerinin %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 4,2, 11,8, 12,9 ve 13,4 MPa'dır. Korozyon sonrası ise %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 3,6, 7,3, 8,0 ve 8,2 MPa olarak belirlenmiştir. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Sugözü uçucu küllü korozyona uğramamış geopolimer kontrol numunelerinin %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 4,2, 6,6, 8,5 ve 12,6 MPa'dır. Korozyon sonrası ise %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 2,9, 6,0, 8,1 ve 8,7 MPa olarak bulunmuştur. Portland çimentolu kontrol

numuneleri ise korozyona uğramamış 10,8 MPa iken, korozyon sonrası 8,1 MPa olarak hesap edilmiştir. Sugözü külünde kontrol numunelerinde en yüksek aderans dayanımı %15 Na oranında NaOH ile elde edilirken korozyon sonrası %15 Na oranında Na_2SiO_3 ile elde edilmiştir. NaOH ile üretilen kontrol harçlarında %9 Na oranında bile portland çimentolu numuneden yüksek dayanım elde edilirken Na_2SiO_3 ile sadece %15 Na oranında daha yüksek değer elde edilmiştir.

NaOH ile aktifleştirilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Çatalağzı uçucu küllü korozyona uğramamış geopolimer kontrol numunelerinin %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 5,0, 6,5, 9,0 ve 12,7 MPa'dır. Korozyon sonrası ise %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 4,7, 5,6, 5,6 ve 9,5 MPa olarak belirlenmiştir. Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen 24 saat 100ºC de ısıl işlem görmüş Çatalağzı uçucu küllü korozyona uğramamış geopolimer kontrol numunelerinin %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 4,7, 7,6, 7,9 ve 8,8 MPa'dır. Korozyon sonrası ise %6, %9, %12 ve %15 Na oranlarında aderans dayanımı sırasıyla 3,0, 3,3, 4,5 ve 4,6 MPa olarak bulunmuştur. Portland çimentolu kontrol numuneleri ise korozyona uğramamış 10,8 MPa iken, korozyon sonrası 8,1 MPa olarak hesap edilmiştir. Çatalağzı külünde kontrol numnelerinde ve korozyon sonrası en yüksek aderans dayanımı %15 Na oranında NaOH ile elde edilmiştir. NaOH ile üretilen kontrol harçlarında %12 Na oranında bile portland çimentolu numuneden yüksek dayanım elde edilirken Na_2SiO_3 ile sadece %15 Na oranında daha yüksek değer elde edilmiştir. Ancak kontrol grubunda %12 portland çimentolu numunelere yakın değerdedir. Korozyon sonrası Çatalağzı külünde sadece %15 Na oranında NaOH ile üretilen numuneler portland çimentolu numunelerden daha iyi değerlere sahiptir.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Çalışmada, ilk aşamada yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmek için dayanım deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamada dayanım deneyleri sonucu belirlenen parametrelerle durabilite deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın amacı olan F sınıfı uçucu küllerinin durabilite özelliklerinin belirlenmesi için yapılan dayanım ve durabilite deneyleri sonucunda elde edilen veriler değerlendirilerek sonuçlar aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

4.1.1. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık ile İlgili Sonuçlar

- NaOH ile aktive edilen Sugözü geopolimer harçların birim ağırlıkları 2,07 ve 2,29 g/cm^3 arasında bulunmuştur. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü geopolimer harçların birim ağırlıkları ise 2,07 ve 2,24 g/cm^3 arasında bulunmuştur.
- NaOH ile aktive edilen Çatalağzı geopolimer harçların birim ağırlıkları 1,98 ve 2,18 g/cm^3 arasında bulunmuştur. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı geopolimer harçların birim ağırlıkları ise 1,99 ve 2,20 g/cm^3 arasında bulunmuştur.
- Alkali ile aktive edilen Sugözü uçucu külü geopolimer harçlarının birim hacim ağırlıklarının Çatalağzı geopolimer harçlarına göre, Sugözü uçucu külünün yoğunluğunun Çatalağzı uçucu külünden fazla olmasından dolayı biraz daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Na konsantrasyonunun artması ile birim ağırlıkların arttığı da gözlenmiştir. Hem ısıl kür sıcaklığının artması hem de ısıl kür süresinin uzaması ise geopolimer harçlarının birim hacim ağırlıklarının azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni de içerisindeki suyun sıcaklığın ve sürenin etkisiyle azalmasıdır.

- Na konsantrasyonundaki artışın sertleşmiş harçların görünür yoğunluklarını biraz düşürdüğü, kuru ve doygun yoğunlukları biraz arttırdığı görülmüştür.
- Aktivatör olarak sodyum hidroksit ya da sodyum silikat kullanımında birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin benzer sonuçlar verdiği, dolayısıyla da sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- Portland çimentosu ile üretilen harçların birim ağırlığının aktivatörler ile aktifleştirilen uçucu küllü harçlardan biraz yüksek olduğu ancak görünür yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

4.1.2. İşlenebilirlik ile İlgili Sonuçlar

- Alkaliler ile aktifleştirilmiş Sugözü uçucu külü ile üretilen harçların yayılma değerleri 100-103 mm arasında ölçülmüştür. Çatalağzı uçucu külünün aktifleştirilmesi ile üretilen taze harçların yayılma değerleri ise 100-101 mm arasında ölçülmüştür.
- Na konsantrasyonundaki artışın taze harç kıvamlarını çok az düşürme eğiliminde olduğu görülmüştür.
- Aktivatör olarak sodyum hidroksit ya da sodyum silikat kullanımının arasında kıvama etkisi açısından benzer sonuçlar verdiği, dolayısıyla da sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- Çimento ile üretilen taze harcın kıvam değeri ise 155 mm olarak ölçülmüştür. Çimentolu harçların su/bağlayıcı oranının 0,50 olması geopolimer harçlara göre daha yüksek işlenebilrilik değerine sahip olmasını sağlamıştır.
- Geopolimer harçlarda su/bağlayıcı oranının 0,30 olması ve aktivatörlerin kimyasal yapısından dolayı açığa çıkan teorik su, harca girecek toplam su miktarından düşüldüğü için işlenebilirlik değerleri kontrol harcına göre oldukça düşüktür.
- Karışımda kullanılan kül tipi, külün yoğunluğu, tane büyüklüğü işlenebilirlik değerine etki etmektedir. Çatalağzı külü ile elde edilen geopolimer harçları, aynı özellikteki Sugözü külü ile elde edilen geopolimer harçlarından daha kuru görünmektedir.

4.1.3. Eğilme Dayanımı ile İlgili Sonuçlar

- CEM I 42,5R Portland çimentosunun 28 gün 20°C'de suda kür sonucu basınç dayanımı 50,5 MPa ve eğilme dayanımı 10,9 MPa ölçülmüştür. Durabilite

deneylerinde kontrol numune olarak bu standart karışım üretilerek, geopolimer harçları ile kıyaslamak için kullanılmıştır.

- Na konsantrasyonunun %6'dan %15'e kadar artışı ile eğilme dayanımların genel olarak arttığı görülmüştür. Ayrıca ısıl kür sıcaklığının 60ºC'den 100ºC'ye kadar artışı ile de geopolimer harçların eğilme dayanımının artış gösterdiği görülmüştür.
- Isıl kür süresinin ise eğilme dayanımında belirli bir değere kadar artış gösterdiği sonrasında ise azaldığı görülmüştür. Isıl kür süresinin genel olarak 3 saatten 24 saate kadar artmasıyla birlikte önemli oranda arttığı ve geliştiği belirlenmiştir.
- NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 19,3 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 18,2 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır.
- NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 16,3 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 18,5 MPa'lık eğilme dayanımına ulaşılmıştır.
- Sugözü ve Çatalağzı külü ile üretilen geopolimer numuneler aynı şartlarda yakın eğilme dayanımı özellikleri gösterse de en yüksek dayanıma Sugözü külünün NaOH ile aktifleştirilmesiyle ulaşılmıştır. Bu da Sugözü külünün fiziksel ve kimyasal özelliklerinin daha iyi olduğunu ve aktivatör olarak NaOH'ın daha etkili aktivasyon süreci gerçekleştirdiğini göstermektedir.

4.1.4. Basınç Dayanımı ile İlgili Sonuçlar

- 60ºC ve 80ºC'lik ısıl kür işleminde daha uzun kür süresi gerekiyorken 100ºC'lik ısıl kür işleminde 24 saatlik kür süresinin yeterli olduğu görülmüştür. 60ºC ve 80ºC'lik ısıl kür işleminde kür süresi ile basınç dayanımları artmakta ancak 100ºC'lik ısıl kür işleminde 24 saatten sonra basınç dayanımlarında düşüşler görülmüştür.
- NaOH ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 97,6 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Sugözü uçucu küllü

geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 84,6 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır.

- NaOH ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 100,7 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır. Na_2SiO_3 ile aktive edilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerde %15 Na konsantrasyonu için 24 saat 100ºC'de yapılan ısıl kür işlemi ile 74,5 MPa'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır.
- Hem Sugözü hem de Çatalağzı F sınıfı uçucu külleri ile üretilen geopolimer harçlarının NaOH ile aktive edilmesi Na_2SiO_3 ile aktive edilenlere kıyasla daha yüksek basınç dayanımlarına ulaşılmasını sağlamıştır.

4.1.5. Ultrasonik Hız ile İlgili Sonuçlar

- Her iki uçucu külün hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesi ile kendi Na konsantrasyonlarındaki ultrasonik hız sonuçları birbiri ile kıyaslandığında sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- Geopolimer harçlarının doygun kuru yüzey halde ölçülen ultrasonik hız değerlerinin kuru hale göre daha düşük olduğu görülmüştür.
- Her iki kül ile üretilen geopolimerler içinde en yüksek ultrasonik hız değerleri %15 Na oranında bulunmuştur.
- Kontrol numunesinin kuru haldeki ultrasonik hızı 4092 m/s iken Sugözü külünün %15 Na oranında NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen geopolimerin ultrasonik hızları sırasıyla 4449 ve 4580 m/s olarak ölçülmüştür.
- Çatalağzı külünün %15 Na oranında NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen geopolimerin ultrasonik hızları ise 4294 ve 4356 m/s olarak belirlenmiştir.
- Genel olarak Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen geopolimerlerin dalga hızları NaOH ile aktifleştirilen uçucu küllere göre daha yüksek çıkmıştır.

4.1.6. Su Emme ve Boşluk Oranı ile İlgili Sonuçlar

- Kontrol numunesi olarak 28 gün suda kür edilmiş Portland çimentolu harç karışımının su emme ve boşluk oranı değerleri ise sırasıyla %1,9 ve %4,2 olarak bulunmuştur. Kontrol numunesi ile alkalilerle aktifleştirilen uçucu küllü geopolimerler kıyaslandığında kontrol numunesine en yakın ve benzer sonuçların Sugözü uçucu külünün NaOH ile aktifleştirilen %12 Na ve %15 Na oranlarında

olduğu görülmektedir. Hatta %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu külünün su emme %1,4 ve boşluk oranı %3,2 değerlerinin kontrol numunesinden bile daha iyi olduğu görülmüştür.

- Sugözü uçucu külünün Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesi ile en düşük su emme %2,8 ve boşluk oranı %6,0 değerleri %15 Na oranı ile elde edilmiştir. Na oranındaki artışın hem Sugözü hem de Çatalağzı uçucu külleri ile üretilen geopolimerlerin su emme ve boşluk oranları değerlerini azalttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Ayrıca Sugözü uçucu külü ile üretilen geopolimerlerin Çatalağzı uçucu külü ile üretilen geopolimerlere göre su emme ve boşluk oranları açısından daha iyi olduğunu söyleyebiliriz.
- Diğer önemli bir sonuç olarak da su emme ve boşluk oranları açısından uçucu küllü geopolimerlerde aktivatör olarak NaOH'in Na_2SiO_3'den daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.1.7. Kılcal Su Emme ile İlgili Sonuçlar

- Genel olarak bakıldığında en düşük kılcal su emme değerlerine, kılcal emilen su 15,6 gram ve kılcal su yükselmesi 2,44 mm ile Sugözü külünün Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilmiştir.
- Yine birincil kılcal su emme değerinin en düşük değerine Sugözü külünün %15 Na oranında Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle ulaşılmıştır. %15 Na oranında hem NaOH hem de Na_2SiO_3 kullanılarak aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı külleri ile elde edilen numunelerin tamamı kontrol numunelerinden daha az kılcal su emme değerlerine sahiptir.
- Na oranlarındaki artışa bağlı olarak %6'dan %15'e kadar hem NaOH hem de Na_2SiO_3 kullanılarak aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllü numunelerde kılcal su emme değerleri azalmıştır.
- Geopolimer numunelerinin birincil kılcal su emme değerleri kontrol numunelerine göre yüksektir. Bunun sebebi ısı ile kür edilen geopolimerlerin suyunu kaybedip ilk aşamada daha fazla su emme isteği olabilmektedir.
- Geopolimer numunelerin ikincil kılcal su emme değeri birbirine yakındır. Bu da ısıl kür edilip oda sıcaklığında deneye tabi tutuldukları için ilk etapta çok fazla su emip boşlukların büyük kısmını ilk 6 saatte doldurmasıdır.

4.1.8. Basınç Altında Su İşleme Derinliği ile İlgili Sonuçlar

- Genel olarak bakıldığında, basınçlı su işleme derinliği NaOH ile aktifleştirilen numunelerde Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllü numunelerin %6 ve %9 Na oranında tamamı su geçirerek 150 mm değerine ulaşmıştır.
- %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllü numunelerin geçirimliliği kontrol numunelerinden daha düşük değerlerde çıkmıştır.
- NaOH ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllü numunelerde Na oranının %6'dan %15'e artışına bağlı olarak basınçlı su işleme derinliği azalma göstermiştir.
- Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllü numunelerde %6 ve %9 Na oranında tamamı su geçirdikten sonra Na oranının %9'dan %15'e doğru artışı ile basınçlı su işleme derinliği azalmıştır.
- Her iki kül ve her iki aktivatör tipi için %6 ve %9 Na oranında elde edilen numunelerin geçirimliliği iyi sonuç vermemektedir. En iyi sonuç %15 Na oranında elde edilmiştir.
- Kontrol numunelerinin geçirimlilik değerine Sugözü külünün NaOH ile aktivasyonunda %12 Na oranında eşit değer elde edilmiştir. Sugözü külünün Na_2SiO_3 ile aktivasyonu ve Çatalağzı külünün hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktivasyonunda %12 Na oranında kontrol numunelerine göre daha kötü değerler elde edilmiştir.

4.1.9. Islanma-Kuruma ile İlgili Sonuçlar

- Islanma-Kuruma deneyinde 80 çevrim sonucunda alkali ile aktifleştirilen numunelerin her Na oranındaki ağırlık kayıpları kontrol numunelerinden fazla olmuştur.
- Hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllü numunelerde Na oranının artışına bağlı olarak ağırlık kaybı artmıştır. Bu durum Na oranı artışı ile boşluk oranının azalması sonucu ıslanma kuruma döngüsünden etkilenme oranının artmasıdır.
- Hem Sugözü hem de Çatalağzı küllerinin Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen numunelerde Na oranının %6'dan %15'e doğru artışı ile eğilme dayanımı kaybı artmıştır. Fakat NaOH ile üretilen numunelerde Na oranının %6'dan %12'ye kadar

artışıyla eğilme dayanımı kaybı artmış %15 Na oranında ise azalma yönünde eğilim göstermiştir.

- Çatalağzı uçucu külünün %6 Na oranında NaOH ile aktifleştirilmesiyle elde edilen numunelerin eğilme dayanımı kaybı kontrol numunelerine yakın çıkmıştır. Diğer tüm numuneler kontrol numunelerinden fazla eğilme dayanımı kaybına uğramıştır.
- Geopolimer numunelerinin ıslanma-kuruma döngüsü sonrası basınç dayanım kayıpları kontrol numunelerinden fazladır. Na oranı artışına bağlı olarak genel bir basınç dayanım kaybı artışı söz konusudur. Kontrol numuneleri suda kür özelliğine sahip olduğu için dayanımından pek bir kayıp olmamıştır. Islanma-kuruma döngüsündeki kuruma sıcaklığı 65±5ºC olduğu için kontrol numunelerinin sıcaklık etkisi bozulması düşük seviyelerde kalmıştır.
- Tüm alkali ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı külü numuneleri, basınç dayanım kayıplarında olduğu gibi kontrol numunelerinden daha kötü ultrases hızı değişimine uğramıştır. Suda kür edilen kontrol numuneleri ıslanma-kuruma döngüsünden daha az etkilenmiştir. Alkali ile aktifleştirilen numunelerde farklı geopolimerizasyon reaksiyonları oluştuğu için Na oranına bağlı bir orantısal azalmadan söz etmek mümkün değildir.

4.1.10. Donma-Çözülme ile İlgili Sonuçlar

- Donma çözülme direncinin değerlendirilmesinde ağırlık kayıp sonuçlarının çok anlamlı olmadığı görülmüştür.
- Ultrasonik hızlarda değişime bakıldığında ise %6, %9 ve %12 Na oranlarındaki azalmanın her iki uçucu kül hem de her iki farklı aktivatör tiplerinde birbirine yakın olduğu ancak %15 Na oranlarındaki geopolimerlerde dalga hızındaki kaybın daha fazla olduğu görülmüştür.
- Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen geopolimerlerde Na oranındaki artış ile genel olarak donma çözülme sonrası eğilme ve basınç dayanımlarda azalmaların olduğu görülmüştür.
- Yine genel itibariyle eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalmaların yüzde değeri olarak benzer olduğu söylenebilir.
- Genel olarak %12 ve %15 Na oranlarındaki geopolimer harçlarının dayanımlarındaki kayıplar artmıştır.

4.1.11. Hızlı Klorür Geçirimliliği ile İlgili Sonuçlar

- Klorür geçişi, alkali ile aktifleştirilen hem Sugözü hem de Çatalağzı külü ile üretilen numunelerde %6 ve %9 Na oranı için oldukça kötü çıkmaktadır. Her iki Na oranında da deney 6 saatlik süresini tamamlamadan sıcaklığı artarak yüksek klorür geçişine yol açmaktadır. Ancak kontrol numunelerinde klorür geçişi yüksek olsa da deney 6 saatte tamamlanmaktadır.
- Kontrol numuneleri deneyi 6 saatte tamamlasalar da yüksek klorür geçirgenliğine sahiptir.
- Alkali ile aktifleştirilen numunelerde %12 ve %15 Na oranındaki numunelerin klorür geçişi düşük ve kontrol numunesinden iyidir.
- En düşük klorür geçirimliliği hem Sugözü hem de Çatalağzı külünde iki aktivatör ile de (NaOH ve Na_2SiO_3) %15 Na oranında elde edilmiştir.

4.1.12. Karbonatlaşma Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Kontrol numunesinin 360 günlük karbonatlaşma derinliği 4,7 mm ölçülerek tüm geopolimer numunelerinden daha düşüktür.
- Sugözü ve Çatalağzı uçucu küllerinin hem NaOH hem de Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesi ile karbonatlaşmanın arttığını ve özellikle düşük Na oranlarında bunun daha fazla olduğu görülmektedir.
- %6 Na oranındaki tüm geopolimerlerin tamamının 90 günde karbonatlaştığı görülmüştür. Geopolimerler içerisinde en düşük karbonatlaşma derinliği hem NaOH hem de Na_2SiO_3 için %15 Na oranında olduğu görülmüştür.
- %6 ve %9 Na oranındaki tüm geopolimer numuneleri 360 gün sonunda tamamen karbonatlaşmıştır.
- %12 ve %15 Na oranlarında her iki aktivatörle üretilen Sugözü külü numuneleri Çatalağzı külü numunelerinden daha iyi karbonatlaşma değerlerine sahiptir.

4.1.13. Rötre Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Kontrol numunesinin 180 günlük rötre değeri %0,4 olarak ölçülmüştür. Bu değer alkali aktifleştirilmesiyle elde edilen numunelerin yaklaşık 3-4 katı dolaylarındadır.
- Kontrol numuneleri içerisindeki su zamanla azalarak ağırlığını kaybederek boyda değişim olmaktadır. Fakat geopolimer numuneleri fırında kür edildiği için rötre

deneyi süresince laboratuvar ortamındaki nemin etkisiyle çok az da olsa ağırlık artışı görülmektedir.

- Geopolimer numuneleri fırında 100ºC'de kür edildiği için içerisindeki suyun azalmasıyla kontrol numunelerine göre daha az büzülme göstermektedir.
- Geopolimer numunelerde karışım içrisine giren kimyasal aktivatör miktarı %12 ve %15 Na oranında daha fazla olduğu için genel olarak %6 ve %9 Na oranındaki numunelerden fazla büzülme göstermiştir.
- Ayrıca kontrol numunelerinde su/bağlayıcı 0,50 iken geopolimerlerde 0,30 olması az su kaybından dolayı büzülmeyi de azaltmıştır.
- Kontrol numuneleri toplam boy değişiminin yaklaşık %75'ini ilk 14 günde tamamlamıştır.
- Geopolimer ve kontrol numunelerinde 150 günden sonra boyda değişim artık çok küçük seviyelerde oluşmaktadır.
- Kontrol numunelerinde sürekli artan bir boy değişimi görülürken geopolimer numunelerde 14 ile 90 gün arasında büzülme yerine genişleme de görülmüştür.
- Geopolimerlerin boy değişimi birbirine yakın olsa da en yüksek boy değişimi Çatalağzı külünün %15 Na oranında Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen numunelerde görülmüştür.

4.1.14. Aşınma Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Aşınma dirençleri genel olarak Na konsantrasyonunun %6'dan %15'e kadar artışı ile genel olarak arttığı görülmüştür. Hem ağırlıkça aşınma kayıpları hem de hacim kaybı değerleri azalmıştır.
- NaOH ile aktifleştirilen Sugözü geopolimerlerin aşınma direncinin, Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerden daha iyi olduğu hatta aşınma direncinin Portland çimentosu ile üretilen kontrol numunesinden bile daha fazla olduğu görülmüştür.
- Sugözü uçucu külü ile NaOH ile %12 Na oranında aktifleştirilen geopolimerlerin aşınma direncinin Portland çimentolu kontrol grubuna eşdeğer olduğu belirlenmiştir. %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu küllü geopolimerlerin aşınma direncinin ise Portland çimentolu kontrol grubundan bile daha iyi olduğu görülmüştür.

- NaOH ile aktifleştirilen Çatalağzı geopolimerlerin aşınma direncinin, Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Çatalağzı uçucu küllü geopolimerlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Çatalağzı uçucu külü ile NaOH ve Na_2SiO_3 ile %15 Na oranında aktifleştirilen geopolimerlerin aşınma direncinin Portland çimentolu kontrol grubuna yakın olduğu belirlenmiştir.

4.1.15. Yangına Dayanıklılık ile İlgili Sonuçlar

- Kontrol numuneleri 1000ºC sonrası dayanımının yaklaşık %94'ünü kaybederken %15 Na oranında NaOH ile aktifleştirilen Sugözü uçucu külü yaklaşık %99 basınç dayanım kaybına uğramıştır. %6 Na oranında ise basınç dayanım kaybı yaklaşık %37'dir.
- %15 Na oranında fazla, %6 Na oranında düşük dayanım kaybı, geopolimerlerde yüksek Na oranlarında boşluk oranındaki azalmaya bağlı olarak dayanım kaybını arttırdığını göstermektedir.
- Geopolimer ve kontrol numunelerinde sıcaklığın 200, 400, 600, 800 ve 1000ºC'ye her artış aşamasında eğilme ve basınç dayanım kayıpları da artmıştır.
- Sugözü külü ile üretilen geopolimerler %6 ve %9 Na oranında, Çatalağzı külü ile üretilen geopolimerlerde ise %6, %9 ve %12 Na oranlarında 1000ºC sıcaklık sonrası bile kontrol numunelerine oranla oldukça yüksek basınç dayanım değerlerine sahiptir.
- Sugözü külü ile üretilen geopolimerler %12 ve %15 Na oranında, Çatalağzı külü ile üretilen geopolimerlerde ise %15 Na oranlarında 1000ºC sıcaklık sonrası erime sonrası aşırı şekil bozukluğu sebebiyle eğilme dayanımı değeri alınamamıştır.
- Hem eğilme hem de basınç dayanımda önemli azalmalar NaOH ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı külünde 400ºC sıcaklıktan sonra, Na_2SiO_3 ile aktifleştirilen Sugözü ve Çatalağzı külünde ise 200ºC sıcaklıktan sonra başlamaktadır.
- Düşük Na oranlarında yangın direncinin daha iyi olduğu görülmüştür.

4.1.16. Hızlandırılmış Korozyon ile İlgili Sonuçlar

- Korozyon deneyi uygulanan tüm numuneler deney sonunda aderans dayanımı kaybına uğramıştır. Ancak donatıların ağırlığında önemli bir azalma oluşmamıştır.

- Sugözü külü ile üretilen numuneler Çatalağzı külü ile üretilenlerden, NaOH ile üretilen numuneler Na_2SiO_3 ile üretilenlerden daha yüksek aderans dayanımına sahiptir.
- En düşük aderans dayanımı değerleri Çatalağzı külünün Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilmiştir.
- Sugözü külünün %12 ve %15 Na oranında NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktifleştirilmesiyle elde edilen numunelerin korozyon sonrası aderans dayanımı, portland çimentolu numunelerin korozyon sonrası aderans dayanımına çok yakın veya eşittir.

4.2. Öneriler

- Türkiye'de üretilen külün çok az bir kısmı kullanılabildiği için, daha fazla kül kullanımı teşvik etmek adına geopolimer beton üretimi desteklenmelidir.
- Geleneksel beton üretimine alternatif olabilmesi için üretim maliyetinin azaltılması üzerine araştırmalar yapılabilir.
- Geopolimerlerin işlenebilirliğinin arttırılması için kimyasal katkı kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılabilir.
- Donma-çözülme ve ıslanma-kuruma gibi özelliklerinin iyileştirilmesi için araştırmalar yapılabilir.
- Prefabrik sektöründe otoklav fırınlarında kür edilerek kullanılabilmesi için buhar kürü ile yüksek dayanım ve durabilite özellikleri araştırılabilir.
- Standart, yönetmelik vb. belgeler ile prefabrik sektöründe üretim ve denetime resmiyet kazandırılabilir.
- Lifli betonlar üretilerek çekme özelliklerinin geliştirilmesi üzerine araştırma yapılabilir.
- Yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi farklı puzolanik bağlayıcılar ile uçucu kül yer değişimi yaptırılarak ikame özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S., Demir, İ., 2008. Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, **Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi,** 2: 85-94.
2. Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 99 s.
3. Yakupoğlu, A., 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Cüruflu Harçların Özellikleri, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 60 s
4. Bilim, C., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 206 s.
5. Topçu, İ.B., Toprak, M.U, 2009. Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22** (2): 153-164.
6. Aydın, S. , 2010. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Bağlayıcılı Lifli Kompozit Geliştirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 317 s.
7. The European Cement Association (Cembureau), Activity Report 2015, Brussels, 46 s.
8. Köleli, Y., 2015. TR 63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu 2015, Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, 26 s.
9. Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A., 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 112 s.
10. Sugözü Termik Santrali, ***www.teknikateknik.com.tr/turkce/sugozu_projesi.htm***, (Erişim Tarihi: Nisan 2017).

11. Uyanık, S., Topeli, M., 2014. The opportunities and challanges of fly ash in Turkey, İsken.

12. Termik Santral, Su, Atık Su, ve Atık İstatistikleri 2014. ***http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18782***, (Erişim Tarihi: Nisan 2017).

13. Elektrik Piyasası 2015 Yılı Piyasa Gelişim Raporu, 2016. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara.

14. Kömür ve Linyit Yakıtlı Termik Santraller, ***www.enerjiatlasi.com/komur/***, (Erişim Tarihi: Nisan 2017).

15. Özturan, T., 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği. 2.Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s. 280–293.

16. Tokyay, M., Erdoğdu, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ar-Ge, Ankara, 69s.

17. Atiş, C.D., 2013. Beton Katkı Malzemeleri Ders Notu, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 57s.

18. Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt No 21, No 1, 193-203.

19. Tokyay, M. ve Erdoğdu, K. 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB AR-GE, Ankara.

20. Erdoğan, T.Y., 1997. Admixtures for Concrete, Middle East Technical University Press, Ankara.

21. Baradan, A., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334, İzmir, 825 s.

22. ASTM C618, 2012. Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.

23. TS EN 197-1. , 2012. Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

24. Bosbach D., Enders M., 1998. Microphotography of high calcium fly ash particle surfaces. **Advences in Cement Research, 10**(1):17-24.

25. Diamond, S., 1986. Particle morphologies in fly ash . **Cement and Concrete Research. 16**(4): 569-579.

26. Erdoğan, T.Y., 2010. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim, Semih Ofset Matbaacılık Yayıncılık, Ankara, 757 s.

27. TS EN 450-1, 2013. Uçucu Kül – Betonda kullanılan- Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

28. TS EN 196-3, 2002. Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

29. HEWLETT, P.C: Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Fourth Edition, Arnold,1998.

30. ACI (1987). Committee 226: Use of Fly Ash in Concrete, **ACI Materials Journal, 84**,(5):381-409.

31. Kara, İ.,2008. Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi, Osmangazi Üniveritesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 99 s.

32. Karahan, O. , 2006. Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 256 s.

33. Şimşek, O., 2004. Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 263 s.

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

35. Görhan, G., Kürklü, G. 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, **Composites: Part B, 58**, 371–377.

36. Davidovits, J, 2013. Geopolymer Cement; A Review by Professor Joseph Davidovits, Geopolymer Institute, France, 11 s.

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

38. Davidovits, J., (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology, Proceeding of the 2nd International Conference on Geopolymer'99, Saint Qunentin, 9-39.

39. Davidovits, J. , 2008. Geopolymer Chemistry and Applications, 4th Edition, Geopolymer Institute, United States, 644 s.

40. Davidovits, J. , 2008. They Built the Pyramids. Published by Institute Geopolymer, Saint Quentin, France.

41. Petermann, J.C., Saeed, A., Hammons, M.I. 2010. Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review. Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate, 92 s.

42. Balçıkanlı, M., (2016). Alkalilerle Aktive Edilmiş Çimentosuz Cüruflu Betonların Mekanik ve Geçirimlilik Özellikleri, İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun, 141 s.

43. Torgal F.P. , Gomes J.C. ve Jalali S, 2008. Alkali-activated binders: a review part 1. historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials, 22**: 1305–1314.

44. Khale D., Chaudhary R., 2007. Mechanism of geopolimerization and factors influencing its development: a review. **Materials Science, 42**(3): 729- 746.

45. Özodabaş, A., 2014. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflu Harçların Performansının Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 201 s.

46. Pacheco-Torgal, F., J. Castro-Gomes, S. Jalali, 2008. Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. **Construction and Building Materials, 22**: 1315- 1322.

47. Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D., 2005. Alkali-Activated Cements and Concretes, CRC Press, 392 p.

48. Kumar, S., Kristaly, F., Mucsi, G. , 2015. “Geopolymerisation behaviour of size fractioned fly ash”, **Advanced Powder Technology, 26**, 24-30.

49. Lee, N.K., Jang, J.G., Lee, H.K., 2014. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages, **Cement and Concrete Composites, 53**, 239-248

50. Atiş, C.D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., Luga, E., 2015. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration, **Construction and Building Materials, 96**: 673-678.

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

52. Okoye, F.N., Prakash S., Singh, N.B., 2016. Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume, **Journal of Cleaner Production, 149**: 1062-1067.

53. Castel, A. , Foster, S. J., 2015. Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement, **Cement and Concrete Research, 72**: 48-53.

54. Assi, L. N., Deaver, E., Elbatanouny, M.K., Ziehl, P., 2016. Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, **Construction and Building Materials,** 112:807-815.

55. Xie, J., Kayali, O., 2016. Effect of superplasticiser on workability enhancement of Class F and Class C ash-based geopolymers, **Construction and Building Materials,** 122:36-42.

56. Noushini, A., Castel, A.,2016. The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, **Construction and Building Materials,** 112:464-477.

57. Leong, H. Y., Ong, D. E. L., Sanjayan, J. G., Nazari, A., 2016. The effect of different Na_2O and K_2O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer, **Construction and Buildings Materials**, 106: 500-511.

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

59. Ma, Y., Ye, G. 2015. The shrinkage of alkali activated fly ash, **Cement and Concrete Research, 68**: 75-82.

60. Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S. 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators, **Construction and Building Materials, 47**: 409–418.

61. Sarker, P.K. , Kelly, S. ,Yao, Z., 2014. Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete, **Materials and Design, 63**: 584–592.

62. Görhan, G., Kürklü, G. 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures, **Composites: Part B, 58**: 371–377.

63. Komljenovi´c, M., Bascarevi´c, Z., Bradi´c, V. 2010. "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers", **Journal of Hazardous Materials, 181**, 35–42.

64. Aydın, S., Baradan, B. 2013. Mineral ve kimyasal katkıların alkalilerle aktive edilmiş harçların özelliklerine etkisi, Bildiri, Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 200-209.

65. Ariffin, M.A.M., Bhutta, M.A.R., Hussin, M.W., Tahir, M.M., Aziah,N. 2013. Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete, **Construction and Building Materials, 43**:80–86.

66. Olivia, M., Nikraz, H. 2012. Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method, **Materials and Design, 36**: 191–198.

67. Zhu, H., Zhang, Z., Zhu, Y., Tian, L. 2014. Durability of alkali-activated fly ash concrete: Chloride penetration in pastes and mortars, **Construction and Building Materials, 65**: 51-59.

68. Jun, Y., Oh, J. E., 2014. Mechanical and microstructural dissimilarities in alkali-activation for six Class Korean fly ashes, **Construction and Building Materials, 52**: 396-403.

69. Bakri A.M.M.A., Mohammed H. , Kamarudin H. , Niza I. K. , and Zarina Y., 2011. Review on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Without Portland Cement, **Journal of Engineering and Technology Research , 3**(1):1-4.

70. Rashad, A.M., Zeedan, R. S., 2011. The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load, **Construction and Building Materials, 25**: 3098–3107.

71. Criado, M., Jiménez, A. F., Palomo, A., 2010. Effect of sodium sulfate on the alkali activation of fly ash, **Cement and Concrete Composites, 32**: 589–594.

72. Kumar, S., Kristaly, F., Mucsi, G. , 2015. Geopolymerisation behaviour of size fractioned fly ash, **Advanced Powder Technology, 26**: 24-30.

73. Fernández-Jiménez A., Palomo A., 2005. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator, **Cement and Concrete Research, 35**: 1984-1992.

74. Vijai K., Kumutha R., Vishnuram B. G., 2010. Effect of Types of Curing on Strength of Geopolymer Concrete, **International Journal of the Physical Sciences, 5**: 1419-1423.

75. Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Pimraksa K. 2009. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar, **Journal of Hazardous Materials, 168**: 44-50.

76. Oh, J.E., Jun, Y., Jeong, Y. , 2014. Characterization of geopolymers from compositionally and physically different Class F fly ashes, **Cement and Concrete Composites, 50**: 16–26

77. TS EN 196-1., 2009. Çimento Deney Metodları – Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

78. Canbaz, M., 2007. Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cüruflu Harçların Özellikleri, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 206 s.

79. TS EN 1008, 2003. Beton karma suyu- Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

80. ASTM C642-13. Standard Test Method forDensity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.

81. TS EN 1015-3., 2000. Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

82. TS EN 1015-11., 2000. Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

83. ASTM C597-09. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.

84. ASTM C1585-13. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, Annual Book of ASTM Standarts.

85. TS EN 12390-8., 2010. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

86. ASTM D5313. Evaluation of Durability of Rock for Erosion Control Under Wetting and Drying Conditions, Annual Book of ASTM Standarts.

87. ASTM C666/C666M-15. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM Standarts.

88. ASTM C1202-12. Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Annual Book of ASTM Standarts.

89. TS EN 14630, 2012. Beton Yapılar – Koruma ve Tamir için Mamul ve Sistemler – Deney Yöntemleri – Sertleşmiş Betonda Karbonatlaşma Derinliğinin Fenolftaleyn Yöntemi ile Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

90. ASTM C157/C157M. Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.

91. TS 2824 EN 1338, 2005. Zemin Döşemesi için Beton Kaplama Blokları- Gerekli Şartlar ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

92. Coulomb***, https://tr.wikipedia.org/wiki/Coulomb***, (Erişim Tarihi: Nisan 2017).

93. ASTM A944-10, Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens, Annual Book of ASTM Standarts.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: İsmail İsa ATABEY
Uyruğu: Türkiye (TC)
Doğum Tarihi ve Yeri: 13 Mart 1982, Ceyhan
Medeni Durumu: Evli
Tel: +90 505 439 19 16
email: ismailatabey@gmail.com
Yazışma Adresi: Cumhuriyet Üniversitesi Sivas MYO İnşaat Bölümü SİVAS

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği	2017
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi	2011
Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi. Müh. Fakültesi İnşaat Mühendisliği	2015
Lisans	Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2009- Halen	Cumhuriyet Üniversitesi Sivas MYO İnşaat Bölümü	Öğretim Görevlisi
2005–2009	Özel Sektör - Şantiye ve Teknik Ofis	Teknik Eleman

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

Projeler

1. Karahan, O., Atiş, C. D., Bilim, C., Atabey İ.İ., Alkali ve Isı ile Aktifleştirilen Yüksek Dayanımlı F Sınıfı Uçucu Kül Geopolimer Harçların Durabilitesi", TÜBİTAK Projesi, 115M171, Bursiyer, (2015-Devam Ediyor).

2. Karahan, O., Atabey İ.İ. "F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması", Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, FDK-2014-5613, Araştırmacı, Kayseri, (2014- Devam Ediyor).

3. Karahan, O., Almaz Özcan, Z. , Atabey İ.İ. "Atık EPS Agregalı Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, FBA-2014-5191, Araştırmacı, Kayseri, (2014 - 2016).

Ulusal Dergilerdeki Yayınlar

1. Atabey, İ. İ. , Kanıt, R. , Yığma Bir Okul Binasının Deprem Performans Analizi, Selçuk Üniversitesi Teknik-Online Dergisi, Cilt 13, Sayı:1-2014, (2014).

2. Atabey, İ. İ. , Bozdoğan, K.B. , Yapı Denetim Kanunu Uygulamalarında Sivas Örneği, e-Journal of New World Sciences Academy, Volume:7, Number:1, Article Number:1A0284, (2012).

Bildiriler

1. Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İ.İ., Atiş, C. D., Karahan, O., "Influence of Incubation Period on Strength Development of NaOH and Heat Cured Fly Ash Based Geopolymer Mortar", International Conference on Civil and Enviromental Engineering, 8-10 May, Cappadocia, Turkey, (2017).

2. Karahan, O., Atabey, İ.İ. "Strength properties of Çatalagzı class F fly ash geopolymer mortar activated with different NaOH amount", International Conference on Engineering and Natural Science, 24-28 May, Sarajevo, (2016).

3. Ercins, S., Duran, Z., Atabey, İ.İ. "Bir Bazalt Ocağı Malzemesinin Beton Travers Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", 7.Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, (2015).

4. Duran, Z. , Atabey, İ.İ. ,Erdem, B. , Bekem, İ. "İnşaat ve Maden Teknolojisi Programı Öğrencilerinin İş Sağlığı ve Güvenliği Farkındalıklarının Araştırılması", Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, Adana, (2013).

5. Bekem, İ. , Atabey, İ.İ. "Ön Lisans İnşaat Teknolojisi Programı Öğrencilerinin İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Konusundaki Farkındalıklarının Araştırılması", 4. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, Konya, (2013).

6. Atabey, İ. İ., Yurt, Ü. , Yılmaz, H. “Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü Öğrencilerinin Mevcut Durumu Ve Geleceğe Bakışı”, Ulusal Meslek Yüksekokulları Çalıştayı ve Öğrenci Sempozyumu – UMÇÖS-2012, Nevsehir, (2012).

7. Atabey, İ. İ. , Bozdoğan, K.B. “Yapı Denetim Kanunu Uygulamalarında Sivas Örneği”, 6. İnşaat Yönetimi Kongresi, Bursa, 308-318, (2011).

8. Atabey, İ. İ , Dündar, B., Bulut, B. “LEED ve BREAM Yeşil Bina Değerlendirme Sistemleri”, Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, Ankara, 681-685, (2010).

Üyelik

İnşaat Mühendisleri Odası, TMMOB

Bilgisayar Programı

AutoCAD, StatiCAD-Yığma