

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

**FARKLI TÜR UÇUCU KÜLLER KULLANILARAK ÜRETİLEN  
ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN MEKANİK VE  
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mehmet KAYA**

**Enstitü Ana Bilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ**  
**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ**  
**Ortak Danışman : Doç. Dr. Mücteba UYSAL**

**Haziran 2016**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

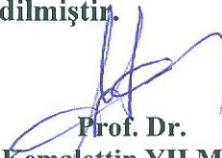
**FARKLI TÜR UÇUCU KÜLLER KULLANILARAK ÜRETİLEN  
ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN MEKANİK VE  
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

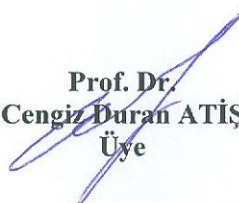
**DOKTORA TEZİ**

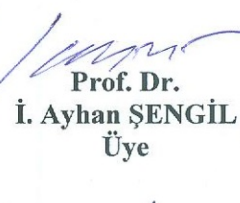
Mehmet KAYA


Enstitü Ana Bilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ

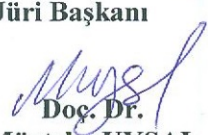
Bu tez 02/06/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

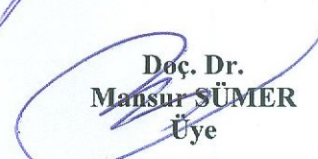
  
Prof. Dr.  
Kemalettin YILMAZ  
Jüri Başkanı

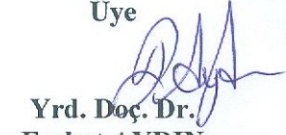
  
Prof. Dr.  
Cengiz Duran ATIŞ  
Üye

  
Prof. Dr.  
İ. Ayhan ŞENGİL  
Üye

  
Doç. Dr.  
Okan KARAHAN  
Üye

  
Doç. Dr.  
Mücteba UYSAL  
Üye

  
Doç. Dr.  
Mansur SÜMER  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr.  
Ferhat AYDIN  
Üye

## BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

  
Mehmet KAYA  
02.06.2016

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında, doktora eğitimimin başlangıcından beri her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen danışman Hocam Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ ve ikinci danışman hocam Doç. Dr. Mücteba UYSAL'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bana yön verip destekleyen, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Cengiz ATIŞ'e ve Doç. Dr. Okan KARAHAN'a, laboratuvar çalışmalarım sırasında destek sağlayan, Bozok Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Fuat KÖKSAL ve Meslek Yüksek Okulu öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Ömer DEMİR'e, aktivatör kimyası hakkında fikir veren Kimya Bölümü Öğretim üyesi Doç. Dr. İrfan KOCA'ya, Bozok Üniversitesi Bilgi ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdürü Yrd. Doç. Avni AKÇE'ye, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Murat ŞAHİN'e teşekkürü borç bilirim. 2015-50-02-029 no'lu proje ile tez çalışmamı destekleyen Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca bana her türlü desteğini esirgemeyen eşim ve çocuklarıma teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxii
SUMMARY .....	xxiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
UÇUCU KÜL ve ALKALİ AKTİVASYONU.....	7
2.1. Uçucu Kül.....	7
2.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırması.....	10
2.3. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	12
2.4. Uçucu Külün Kullanım Alanları.....	14
2.5. Uçucu Külün Çimento ve Beton Sektöründe Kullanımı .....	16
2.6. Alkali Aktivasyonu .....	18
2.7. Alkalilerin Sınıflandırılması .....	20
2.7.1. Alkali hidroksitler .....	21
2.7.1.1. Sodyum hidroksit (NaOH).....	21
2.7.1.2. Potasyum hidroksit (KOH).....	22
2.7.2. Alkali silikatlar .....	23

2.7.2.1. Sodyum silikat ( $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ ) .....	24
2.7.3. Alkali karbonatlar .....	24
2.7.4. Alkali sülfatlar .....	25
2.8. Alkali aktive edilmiş harçların kimyasal özellikleri .....	25
BÖLÜM 3.	
KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI .....	32
3.1. Uçucu Kül İçeren Alkali Aktive Edilmiş Harçlarla İlgili Çalışmalar...	32
3.2. Yüksek Fırın Cürufu İçeren Alkali Aktive Edilmiş Harçlarla İlgili Çalışmalar .....	47
3.3. Diğer Puzolanların Alkali Aktivasyonu İle İlgili Çalışmalar .....	52
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	59
4.1. Kullanılan Malzemeler .....	59
4.1.1. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ).....	59
4.1.2. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).....	59
4.1.3. Uçucu kül .....	60
4.1.3.1. Tunçbilek f sınıfı uçucu kül .....	60
4.1.3.2. Kangal c sınıfı uçucu külü .....	63
4.1.3.3. Soma c sınıfı uçucu külü.....	66
4.1.4. Su.....	69
4.1.5. Kum.....	69
4.1.6. Kontrol numuneleri üretiminde kullanılan çimento .....	70
4.1.7. Sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) .....	70
4.1.8. Magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) .....	71
4.1.9. Sodyum bikarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) .....	71
4.1.10. Fenolftalein ( $\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$ ).....	71
4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması .....	71
4.2.1. Ön deneme karışımları .....	77
4.2.2. Uygun aktivatör tespiti için yapılan deneme karışımları .....	78
4.2.3. Karışım geliştirme çalışmaları .....	81

4.2.3.1. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar.....	81
4.2.3.2. Soma c sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarının karşılaştırılması .....	82
4.2.3.3. C sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar..	83
4.3. Deney Yöntemleri.....	84
4.3.1. Puzolanik aktivite deneyi .....	84
4.3.2. Yayılma tablası deneyi .....	86
4.3.3. Birim ağırlık .....	86
4.3.4. Su emme ve boşluk oranı tayini .....	87
4.3.5. Mekanik deneyler .....	88
4.3.5.1. Eğilme deneyi .....	88
4.3.5.2. Basınç dayanımı deneyi .....	88
4.3.6. Ultrases geçiş hızı deneyi.....	89
4.3.7. Durabilite deneyleri.....	90
4.3.7.1. Yüksek sıcaklık etkisi deneyi .....	90
4.3.7.2. Donma-çözülme etkisi deneyi .....	91
4.3.7.3. Büzülme (rötre) etkisi deneyi .....	92
4.3.7.4. Sülfat etkisi deneyi .....	94
4.3.7.4.1.Sodyum sülfat etkisi deneyi .....	94
4.3.7.4.2.Magnezyum sülfat etkisi deneyi.....	95
4.3.7.5. Karbonatlaşma deneyi .....	96
4.3.7.6. Kapiller su emme deneyi .....	97
4.3.7.7. Aşınma direnci deneyi .....	98
4.3.7.8. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi.....	99
BÖLÜM 5.	
DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ .....	101
5.1.Ön Deneme Karışımı Sonuçları.....	101
5.2. Uygun Aktivatör Tespiti İçin Yapılan Deneme Karışımları Sonuçları	105

5.2.1. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası deneyi sonuçları.....	105
5.2.2. C Sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası deneyi sonuçları.....	106
5.2.3. Birim ağırlık deneyi sonuçları.....	107
5.2.4. Su emme ve boşluk oranı .....	110
5.2.5. Mekanik deneyler .....	112
5.2.5.1. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme ve basınç dayanımları .....	112
5.2.5.2. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme ve basınç dayanımları .....	114
5.3. Karışım Geliştirme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar .....	117
5.3.1. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar .....	117
5.3.1.1. Farklı kum ve su oranlarının mekanik dayanıma etkisi.....	117
5.3.1.2. Farklı sürelerde sıcaklık kürenün mekanik dayanıma etkisi.....	118
5.3.1.3. Sıcaklık kürende su kaybını azaltmanın mekanik dayanıma etkisi .....	119
5.3.1.4. Silis dumanı ilavesinin mekanik dayanım üzerine etkisi.....	120
5.3.2. Kangal c sınıfı uçucu külü ve Soma c sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarının karşılaştırılması.....	121
5.3.3. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar .....	123
5.3.3.1. Silis dumanı ilavesinin mekanik dayanım üzerine etkisi .....	123
5.4. Uygun aktivatör ile yapılan deney sonuçları .....	124
5.4.1. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlık deneyi sonuçları.....	124



5.4.2. C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlık deneyi .....	127
5.4.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme ve geçirimli boşluk oranı .....	128
5.5. Mekanik Deneyler .....	131
5.5.1. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları.....	131
5.5.2. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları .....	133
5.5.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ilişkisi.....	134
5.5.4. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile geçirimli boşluk ilişkisi.....	135
5.5.5. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları.....	136
5.5.6. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları .....	137
5.5.7. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ilişkisi.....	138
5.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları .....	139
5.6.1. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları .....	139
5.6.2. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	141
5.6.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızı ile geçirimli boşluk ilişkisi .....	141
5.6.4. C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları .....	142
5.6.5. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi.....	143
5.7. Varyans Analizi (Çoklu Regresyon).....	144

5.7.1. F sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları analizi .....	145
5.7.2. F sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları analizi .....	146
5.7.3. C sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları analizi .....	147
5.7.4. C sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları analizi .....	148
5.7.5. F sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı analizi .....	149
5.7.6. F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde, değişkenlerin basınç dayanımı üzerine etkileri.....	150
5.8. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numuneler ile yapılan durabilite deneyleri .....	152
5.8.1 Yüksek sıcaklık etkisi deneyi.....	152
5.8.2. Donma-çözülme etkisi deneyi.....	158
5.8.3. Büzülme (rötre) etkisi deneyi.....	162
5.8.4. Sülfat etkisi deneyi.....	163
5.8.4.1. Sodyum sülfat etkisi deneyi.....	163
5.8.4.2. Magnezyum sülfat etkisi deneyi sonuçları .....	166
5.8.4.3. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ve MgSO <sub>4</sub> 'ün dayanıma etkisinin karşılaştırılması.....	170
5.8.5. Karbonatlaşma deneyi sonuçları .....	171
5.8.6. Kapiller su emme deneyi sonuçları .....	172
5.8.7. Aşınma direnci deneyi sonuçları .....	174
5.8.8. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi sonuçları.....	177
5.9. Numunelerin içyapı incelemeleri.....	179
5.9.1. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunenin içyapı incelemesi.....	179
5.9.2. C Sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunenin içyapı incelemesi.....	180

5.9.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık deneyi sonrası içyapı incelemesi .....	182
5.9.4. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma çözülme deneyi sonrası içyapı incelemesi .....	186
5.9.5. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) etkisi deneyi sonrası içyapı incelemesi .....	188
5.9.6. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) etkisi deneyi sonrası içyapı incelemesi .....	189
<b>BÖLÜM 6.</b>	
<b>TARTIŞMA ve SONUÇ</b> .....	192
<b>KAYNAKLAR</b> .....	197
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	208

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alemnium oksit
Ca	: Kalsiyum
C-N-A-S-H	: Kalsiyum sodyum alümina silikat hidrat
CaO	: Kalsiyum oksit
EDS	: Enerji dağılımlı X ışınları spektroskopisi
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Demir oksit
FT-IR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
K <sub>2</sub> O	: Potasyum oksit
MgO	: Magnezyum oksit
Na <sub>2</sub> O	: Sodyum oksit
N-A-S-H	: Sodyum alümina silikat hidrat
XRD	: X ışınları difraktometresi
XRF	: X ışınları floresans spektrometresi
TGA	: Termogravimetrik analiz

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dünyada çimento üretiminin bölgelere göre ve yıllara göre dağılımı (Cembureau, 2014).....	2
Şekil 1.2. Çimento üretici ülkeler (Cembureau, 2014) .....	2
Şekil 1.3. Dünyada CO2 salınımının sektörlere göre dağılımı .....	3
Şekil 1.4. Dünyadaki karbondioksit salınımının ülkelere göre dağılımı ( <a href="http://stats.oecd.org">http://stats.oecd.org</a> ).....	4
Şekil 2.1. 2014 yılı sonu itibariyle elektrik üretimin kaynaklara göre dağılımı ...	8
Şekil 2.2. Uçucu Kül taneciklerinin morfolojik yapısı (Yeğınobalı, 2009).....	12
Şekil 2.3. F sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü .....	13
Şekil 2.4. C sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü.....	14
Şekil 2.5. Uçucu külün kullanım alanları.....	16
Şekil 2.6. Geopolimer türleri.....	25
Şekil 2.7. Davidovits modeli.....	26
Şekil 2.8. Barbosa modeli .....	27
Şekil 2.9. Geopolimerleşme dizisi (Zhang ve ark., 2016).....	27
Şekil 4.1. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x2000) .....	60
Şekil 4.2. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x4000) .....	61
Şekil 4.3. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x5000) .....	61
Şekil 4.4. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x7000) .....	62
Şekil 4.5. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün XRD analizi .....	62
Şekil 4.6. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x1000) .....	63
Şekil 4.7. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x2000) .....	64
Şekil 4.8. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x7000) .....	64
Şekil 4.9. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x7000) .....	65
Şekil 4.10. Kangal C sınıfı uçucu külünün XRD analizi .....	65
Şekil 4.11. Soma C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x1000).....	66

Şekil 4.12. Soma C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x8000).....	67
Şekil 4.13. Soma C sınıfı uçucu külünün SEM Görüntüsü (x8000) .....	67
Şekil 4.14. Soma C sınıfı uçucu külünün SEM Görüntüsü (x30000) .....	68
Şekil 4.15. Soma C sınıfı uçucu külünün XRD analizi.....	68
Şekil 4.16. Standart kum .....	69
Şekil 4.17. Harç mikseri.....	72
Şekil 4.18. TS-EN 196-1 'e uygun 40x40x160 mm boyutlarında prizma kalıp ...	73
Şekil 4.19. Numunelerin etüve yerleştirilmesi.....	73
Şekil 4.20. Alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin hazırlanması şeması...	74
Şekil 4.21. Mekanik deney aşamaları şeması.....	75
Şekil 4.22. Durabilite deneyleri şeması.....	76
Şekil 4.23. Tunçbilek F sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları .....	79
Şekil 4.24. Kangal C sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları ve kodlamaları.....	80
Şekil 4.25. Yanmaz fırın poşeti ile sarılan numuneler .....	81
Şekil 4.26. Yanmaz pırın poşetli numunelerin etüv görüntüsü.....	82
Şekil 4.27. Suda bekletilen c sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numuneler.....	83
Şekil 4.28. Suda bekletilen ve kurutulan c sınıfı Kangal uçucu külü .....	84
Şekil 4.29. Yayılma Tablası .....	86
Şekil 4.30. Arşimet deney seti .....	87
Şekil 4.31. Eğilme deneyi .....	88
Şekil 4.32. Eğilme ve basınç deney seti.....	89
Şekil 4.33. Ultrases ölçüm cihazı.....	90
Şekil 4.34. Yüksek sıcaklık deneyi resimleri .....	91
Şekil 4.35. Donma-çözülme çevrimi.....	92
Şekil 4.36. Donma-çözülme deneyi resimleri .....	92
Şekil 4.37. Rötire için 40x40x160 mm boyutlu prizmatik harç numune kalıbı .....	93
Şekil 4.38. Büzülme(rötire) etkisi deneyi.....	93
Şekil 4.39. Sodyum sülfat etkisi deney resimleri.....	94
Şekil 4.40. Magnezyum sülfat etkisi deney resimleri .....	95

Şekil 4.41. 71×71×71 mm boyutlu küp kalıp ve numunelere .....	96
Şekil 4.42. Karbonatlaşma deneyi numuneleri .....	97
Şekil 4.43. Fenolftalein püskürtülmüş numuneler .....	97
Şekil 4.44. Kapiller su emme deney numuneleri .....	98
Şekil 4.45. Aşınma direnci deneyi .....	99
Şekil 4.46. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi .....	100
Şekil 5.1. Kangal C sınıfı uçucu külü ile üretilen su/bağlayıcı=0,45 olan numune .....	102
Şekil 5.2. Kangal C sınıfı uçucu külü ile üretilen numune (su/bağlayıcı=0,70 bağlayıcı/kum=1/3) .....	103
Şekil 5.3. Ms oranı 0,60'tan büyük numunelerde görülen ani priz.....	103
Şekil 5.4. Aktivatör karışımlarında 24 saatten fazla bekleme sonucu kristalleşme .....	104
Şekil 5.5. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri.....	105
Şekil 5.6. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri.....	107
Şekil 5.7. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları	108
Şekil 5.8. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları .....	109
Şekil 5.9. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları .....	110
Şekil 5.10. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin geçirimli boşluk oranları.....	111
Şekil 5.11. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları.....	113
Şekil 5.12. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları.....	114
Şekil 5.13. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları.....	115
Şekil 5.14. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları.....	116

Şekil 5.15. Uygun Aktivatörle Farklı kum ve su oranlarında üretilen numunelerin mekanik dayanımları .....	118
Şekil 5.16. Sıcaklık kürü süresinin dayanım üzerine etkisi .....	119
Şekil 5.17. Yanmaz Fırın torbasında sıcaklık kürü uygulamasının mekanik dayanım üzerine etkisi.....	120
Şekil 5.18. Kangal ve Soma C sınıfı uçucu küllü numunelerin mekanik dayanımları.....	122
Şekil 5.19. F sınıfı uçucu kül kullanılarak uygun aktivatör ile üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları .....	126
Şekil 5.20. C sınıfı uçucu kül kullanılarak uygun aktivatör ile üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları .....	128
Şekil 5.21. F Sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları ve geçimli boşluk oranları .....	130
Şekil 5.22. F Sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranı ilişkisi .....	131
Tablo 5.23. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları.....	132
Şekil 5.24. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları .....	134
Şekil 5.25. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ilişkisi .....	135
Şekil 5.26. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile geçirimli boşluk ilişkisi.....	135
Şekil 5.27. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımı .....	137
Şekil 5.28. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları .....	138
Şekil 5.29. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişki .....	139
Şekil 5.30. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları .....	140
Şekil 5.31. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişki .....	141



Şekil 5.32. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerde ultrases geçiş hızı ile geçirimli boşluk ilişkisi .....	142
Şekil 5.33. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları .....	143
Şekil 5.34. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişki .....	144
Şekil 5.35. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımları .....	154
Şekil 5.36. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımları .....	155
Şekil 5.37. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kayıpları.....	156
Şekil 5.38. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranları .....	157
Şekil 5.39. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu eğilme dayanımları .....	158
Şekil 5.40. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu basınç dayanımları .....	160
Şekil 5.41. F tipi uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu ağırlık kayıpları oranı.....	161
Şekil 5.42. Ağırlık kaybı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	162
Şekil 5.43. Numunelerin kuruma büzülmesi.....	163
Şekil:5.44. Numunelerin Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisinde boy değişimleri .....	164
Şekil 5.45. Numunelerin Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisinde eğilme dayanımı değişimleri.....	165
Şekil 5.46. Numunelerin Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisinde basınç dayanımı değişimleri .....	166
Şekil 5.47. Numunelerin MgSO <sub>4</sub> etkisinde boy değişimleri .....	167
Şekil 5.48. Numunelerin MgSO <sub>4</sub> etkisinde eğilme dayanımları değişimi .....	168
Şekil 5.49. Numunelerin MgSO <sub>4</sub> etkisinde basınç dayanımları değişimi.....	169
Şekil 5.50. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ve MgSO <sub>4</sub> numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması .....	170
Şekil 5.51. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ve MgSO <sub>4</sub> numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması .....	171
Şekil 5.52. Numunelerin karbonatlaşma derinlikleri .....	172

Şekil 5.53. Numunelerin kapiler su emme katsayıları .....	173
Şekil 5.54. Kapiler su emme-zaman grafiği.....	174
Şekil:5.55. Numunelerin aşınma sonrası yükseklik kayıpları.....	175
Şekil 5.56. Numunelerin aşınma sonrası ağırlık kayıpları .....	176
Şekil 5.57. Eğilme dayanımı ile aşınma arasındaki ilişki .....	176
Şekil 5.58. Basınç dayanımı ile aşınma arasındaki ilişki.....	177
Şekil 5.59. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi yük-zaman grafiği.....	178
Şekil 5.60. FN14M2 Numunesinin $\times 1000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	179
Şekil 5.61. FN14M2 numunesinin $\times 8000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	180
Şekil 5.62. CN12M6 numunesinin $\times 1000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü .....	181
Şekil 5.63. CN12M6 numunesinin $\times 8000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü .....	181
Şekil 5.64. F90-800 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra $\times 1000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	182
Şekil 5.65. F90-800 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra $\times 8000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	183
Şekil 5.66. F50 -800 numunesinin 800 C sıcaklık etkisinden sonra $\times 1000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	183
Şekil 5.67. F50-800 numunesinin 800 C sıcaklık etkisinden sonra $\times 8000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	184
Şekil 5.68. Kontrol numunelerinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra $\times 1000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	184
Şekil 5.69. Kontrol numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra $\times 15000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	185
Şekil 5.70. F100 numunesinin donma-çözülme etkisinden sonra $\times 1000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	187
Şekil 5.71. F100 numunesinin donma-çözülme etkisinden sonra $\times 4000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	187
Şekil 5.72. F90 numunesinin $\text{Na}_2\text{SO}_4$ etkisinden sonra $\times 1000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü .....	188
Şekil 5.73. F90 numunesinin $\text{Na}_2\text{SO}_4$ etkisinden sonra $\times 8000$ kat büyütülmüş SEM görüntüsü .....	189

Şekil 5.74. F90 numunesinin MgSO <sub>4</sub> etkisinden sonra ×1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü .....	190
Şekil 5.75. F90 numunesinin MgSO <sub>4</sub> etkisinden sonra ×15000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü .....	190



## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Türk çimento sektöründe maliyet kalemleri (SGM,2015) .....	3
Tablo 2.1. Dünyada uçucu kül üretimi (CCP, 2015).....	8
Tablo 2.2. Türkiye’de bulunan termik santraller (Uyanık ve Topeli, 2012).....	9
Tablo 2.3. Türkiye’de uçucu kül üretimi (Uyanık ve Topeli, 2012).....	10
Tablo 2.4. Termik Santrallerde üretilen uçucu küllerin kimyasal özellikleri (Yeğınobalı, 2009) .....	10
Tablo 2.5. Alkali aktive ve alkalın bağlayıcıların tarihsel gelişimi (Roy, 1999)..	19
Tablo 4.1. NaOH’un kimyasal kompozisyonu.....	59
Tablo 4.2. Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ’ün kimyasal kompozisyonu .....	59
Tablo 4.3. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	60
Tablo 4.4. Kangal C Sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	63
Tablo 4.5. Soma C sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	66
Tablo 4.6. Yozgat içmesuyu şebekesinden alınan suyun kimyasal özellikleri .....	69
Tablo 4.7. Standart kumun granülmetrisi ve sınır değerleri.....	70
Tablo 4.8. CEM I 42,5R portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri.	70
Tablo:4.9. Deneme karışımları kodlama açıklamaları .....	78
Tablo 4.10. Tunçbilek F sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları ve kodlamaları.....	79
Tablo 4.11. Kangal C sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları ve kodlamaları.....	80
Tablo 4.12. Uçucu küllerin puzolanik aktivite indeksleri .....	85
Tablo 5.1. Ön deneme numunelerinin eğilme ve basınç değerleri.....	100
Tablo 5.2. F sınıfı uçucu küle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri (mm).....	105

Tablo 5.3. C sınıfı uçucu külle ile üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası deneyi sonuçları .....	106
Tablo 5.4. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları .....	107
Tablo 5.5. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları .....	109
Tablo 5.6. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları .....	110
Tablo 5.7. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin geçirimli boşluk oranları.....	111
Tablo 5.8. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları.....	112
Tablo 5.9. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları.....	113
Tablo 5.10. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları.....	115
Tablo 5.11. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları.....	116
Tablo 5.12. Uygun aktivatörle farklı kum ve su oranlarında üretilen numunelerin mekanik dayanımları .....	117
Tablo 5.13. F sınıfı uçucu külle çimentosuz numunelerin farklı sürelerde sıcaklık kürü sonucu mekanik dayanımları .....	118
Tablo 5.14. Yanmaz fırın torbasında sıcaklık kürü uygulamasının mekanik dayanım üzerine etkisi.....	120
Tablo 5.15. Silis dumanı ilavesini F tipi uçucu külle numunelerin dayanımına etkisi .....	121
Tablo 5.16. Kangal ve Soma C sınıfı uçucu külle çimentosuz numunelerin mekanik dayanımları .....	122
Tablo 5.17. Silis dumanı ilavesini C tipi uçucu külle numunelerin dayanımına etkisi .....	124
Tablo 5.18. Uygun aktivatör ile üretilen F sınıfı uçucu külle çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları .....	125

Tablo 5.19. Uygun aktivatör ile üretilen C sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları .....	127
Tablo 5.20. F sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları ve geçimli boşluk oranları .....	129
Tablo 5.21. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları .....	132
Tablo 5.22. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları .....	133
Tablo 5.23. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları .....	136
Tablo 5.24. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları .....	137
Tablo 5.25. F sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızları .....	140
Tablo 5.26. C sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızları .....	143
Tablo 5.27. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları .....	145
Tablo 5.28. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları varyans analizi.....	145
Tablo 5.29. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları .....	146
Tablo 5.30. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları varyans analizi.....	147
Tablo 5.31. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları .....	147
Tablo 5.32. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları varyans analizi.....	148
Tablo 5.33. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları .....	149
Tablo 5.34. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları varyans analizi.....	149
Tablo 5.35. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları .....	150
Tablo 5.36. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı varyans analizi .....	150
Tablo 5.37. Değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri .....	151

Tablo 5.38. Model özeti .....	151
Tablo 5.39. Malzemeler ile basınç dayanımının varyans analizi .....	151
Tablo 5.40. Malzemelerin İlişki katsayıları .....	152
Tablo 5.41. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımları .....	153
Tablo 5.42. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımları .....	154
Tablo 5.43. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kayıpları .....	155
Tablo 5.44. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranları .....	157
Tablo 5.45. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu eğilme dayanımları .....	158
Tablo 5.46. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu basınç dayanımları .....	159
Tablo 5.47. F Tipi uçucu kül Kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu ağırlık kayıpları oranı .....	161
Tablo 5.48. Numunelerin Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisi sonundaki eğilme dayanımları .....	165
Tablo 5.49. Numunelerin Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisi sonundaki basınç dayanımları .....	166
Tablo 5.50. Numunelerin MgSO <sub>4</sub> etkisi sonundaki eğilme dayanımları .....	168
Tablo 5.51. Numunelerin MgSO <sub>4</sub> etkisi sonundaki basınç dayanımları .....	169
Tablo 5.52. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin karbonatlaşma derinlikleri .....	171
Tablo 5.53. Numunelerin kapiler su emme katsayıları .....	173
Tablo 5.54. Numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ölçüm değerleri .....	175
Tablo 5.55. Hızlı klorür geçirimliliği sınıfları (ASTM C 1202) .....	177
Tablo 5.56. FN14M2 numunesinin XRF analiz sonuçları .....	180
Tablo 5.57. CN12M6 numunesinin XRF analiz sonuçları .....	182
Tablo 5.58. F90-800 numunesinin XRF analiz sonuçları .....	185
Tablo 5.59. F50-800 numunesinin XRF analiz sonuçları .....	186
Tablo 5.60. Kontrol numunesinin XRF analiz sonuçları .....	186
Tablo 5.61. F100 numunesinin donma-çözülme sonrası XRF analiz sonuçları ..	188

Tablo 5.62. F90 numunesinin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinden sonra XRF analiz sonuçları.... 189

Tablo 5.63. F90 numunesinin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinden sonra XRF analiz sonuçları.... 191





## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Uçucu Kül, alkali, aktivatör, sodyum hidroksit, mekanik dayanım, durabilite.

Çimento, 19. yüzyıldan günümüze kadar inşaat sektörünün en önemli bir bağlayıcı yapı malzemesidir. Bununla birlikte çimento sektörünün, gerek milyonlarca ton klinker hammaddesinin arazilerden kazılarak çıkarılması, gerekse klinkerin yüksek sıcaklık fırınlarında yakılması sırasında atmosfere saldığı karbondioksit gazı nedeniyle ekolojik dengeyi olumsuz etkilediği bilinen bir gerçektir. Bu sebeple çimento üretimi günümüzde ve gelecekte vazgeçilmez bir sektör olarak görünse de, çevre koruma faaliyetlerinin sürdürülebilirliği bakımından çimentoya alternatif bağlayıcı yapı malzemesi üretme çalışmaları hızla devam etmektedir.

Uçucu külün çeşitli alkalilerle aktive edilmesi sonucu yüksek dayanımlı harç üretmek mümkündür. Bu çalışmada Tunçbilek Termik Santrali'nden sağlanan F sınıfı uçucu kül ve Kangal Termik Santrali'nden sağlanan C sınıfı uçucu kül, kum, su, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ( $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ ) karıştırılarak sıcaklık kürü uygulanmıştır. Üretilen çimentosuz harç numuneler 28 gün boyunca oda sıcaklığında hava küründe bekletilmiştir. Daha sonra numunelerin eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değerine ulaşan numunedeki aktivatör miktarı, en uygun aktivatör oranı olarak belirlenmiştir. Böylece, bu çalışma kapsamında kullanılan F sınıfı ve C sınıfı uçucu küllerin yüksek dayanım veren en uygun aktivatör oranları tespit edilmiştir. En uygun aktivatör ile üretilen karışımların, farklı sıcaklık kürü uygulanması sonucu 3,21-50,64 MPa arasında basınç dayanımına sahip alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numune elde edilmiştir. Bu numunelerin üretiminden 1 yıla kadar geçen süre içerisindeki dayanım değişimleri gözlenmiştir. Daha sonra en uygun aktivatörle aktive edilen F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin, çimento bağlayıcılı numuneler ile durabilite özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada çimento bağlayıcılı kompozitlere alternatif olarak yüksek dayanım ve dayanıklılıkta alkali aktive edilmiş kompozit elde edilmesi, buna bağlı olarak ülkemizde termik santrallerin atık ürünü olan uçucu küllerin çevreye verdiği zararın azaltılması amaçlanmaktadır.

# EXAMINATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF VARIOUS TYPES OF FLY ASH PRODUCED BY USING ALKALI ACTIVATED MORTARS

## SUMMARY

Keywords: Fly ash, alkali, activator, sodium hydroxide, mechanical strength, durability.

Cement has been the most important building material in construction industry from the 19th century until today. With this, however, the cement sector is known as a fact of affecting the ecological balance adversely by excavating millions of tons of clinker raw materials from the land and releasing carbon dioxide gas into the atmosphere during the high-temperature incineration furnaces of clinker. However cement production seems to be an indispensable sector of today and future, in terms of sustainability of environmental protection activities, producing alternative building materials to the cement binder is also continuing rapidly.

It is possible to produce high-strength mortar as a result of activating various alkaline fly ash. In this study F Class fly ash is obtained from Tunçbilek Thermal Power Plant and C Class fly ash obtained from Kangal Thermal Power Plant, sand, water, sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate ( $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ ) is applied by dry-blending temperature cure. Produced cement mortar samples were immersed in the air cure at room temperature for 28 days. Then flexure and compressive strengths of the samples were tested. Reaching the maximum compressive strength of the sample amount of the activator was determined as the ratio of the appropriate activator. Thus, high strength of F Class and C Class fly ashes that are used in this study have been identified the most suitable activator ratios. With the mixtures the production of the most appropriate activator, as a result of the implementation of different curing temperatures 3,21-50,64 MPa having a compressive strength in alkali activated cement mortar sample was obtained. From the production of these samples, in the period of time up to 1 year strength changes were observed. Then the samples of the produced cement which were activated from the most appropriate activator of F Class fly ash were compared with the cement-bound samples of durability characteristics. In this study, to obtain high strength and toughness in the alkali activated composite as an alternative to cement-bonded composites and to reduce the damage which is given to the environment by the thermal power plants waste product “fly ash” in our country, is aimed.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

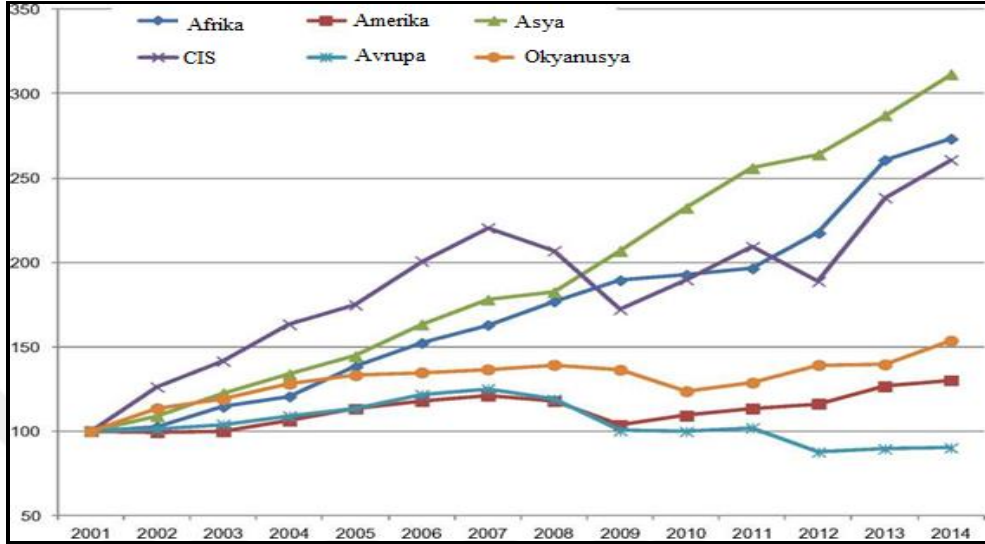
Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmesi sonucu ortaya çıkan ve klinker adı verilen malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen, hidrolik bağlayıcılık özelliği olan bir yapı malzemesidir (Erdoğan, 2010).

1824 yılında İngiltere’de Joseph Aspdin isimli bir duvar ustasının ince taneli kalker ve kili karıştırıp pişirmiş ve bu malzemeyi öğütüp kum ve su ile karıştırdıktan sonra sertleştiğini keşfetmiş, malzemenin renk ve özellik bakımından Portland isimli adadan getirilen taşlara benzediğini görmüştür. Bunun üzerine “portland çimentosu” ismini taşıyan patentini almıştır (Erdoğan, 2010).

Çimento, yapı sektörüne girdiği 19. yüzyıldan günümüze kadar, en yaygın, en çok kullanılan bağlayıcı bir yapı malzemesidir. Hammaddesinin kolay temin edilebilmesi, dayanım ve dayanıklılığı yüksek beton üretimindeki özelliği, üretim sektörünün dünya genelinde yaygınlığı ve ekonomisi, dikkate alındığında çimentonun ilerleyen yıllarda kolay vazgeçilebilecek bir yapı malzemesi olmadığı düşünülmektedir.

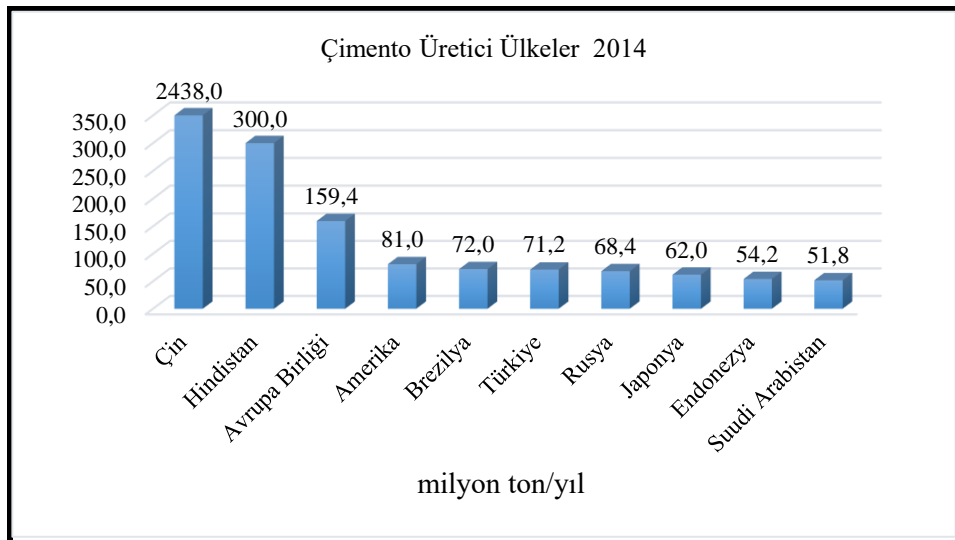
2014 yılı itibariyle dünya genelinde çimento üretiminin 4,3 milyar tona ulaştığı belirtilmektedir (Cembureau, 2014). Şekil 1.1’de 2014 yılı itibariyle dünyada çimento üretiminin bölgelere ve yıllara göre dağılımı verilmiştir.

2014 yılı itibariyle Gelişmiş 20 ülkenin çimento üretim miktarları Şekil 1.2'de verilmiştir. Türkiye, 2014 yılı itibariyle yıllık 71,2 milyon ton çimento üretimiyle 7. sırada yer almaktadır (Cembureau, 2014).



Şekil 1.1. Dünyada çimento üretiminin bölgelere göre ve yıllara göre dağılımı (Cembureau, 2014)

Çimento üretiminde 2014 yılı itibariyle, yıllık yaklaşık 320 milyon ton üretimiyle Asya ülkeleri önde gelirken, yıllık yaklaşık 90 milyon ton üretimle Avrupa ülkeleri son sırayı almaktadır.



Şekil 1.2. Çimento üretici ülkeler (Cembureau, 2014)

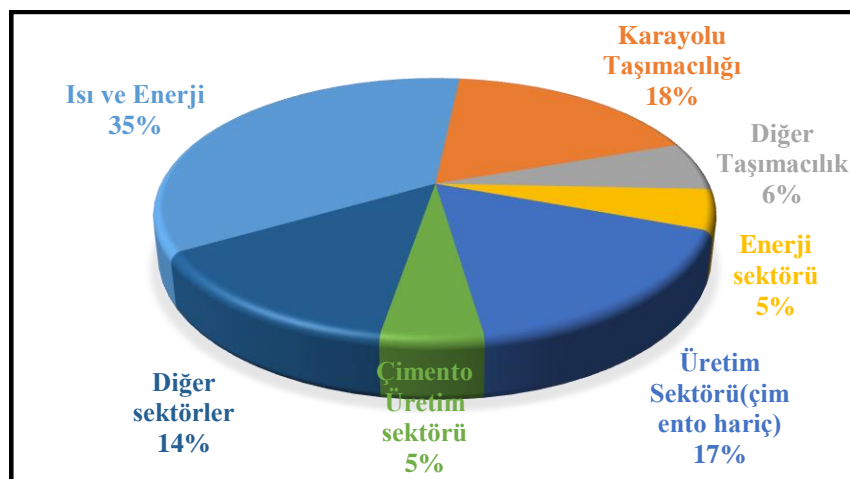
Çimento üretimi sırasında klinker, döner fırınlarda yaklaşık 1450 °C'de pişirilmektedir. Bu kadar yüksek bir sıcaklığa erişmek için de yüksek miktarda enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Yani çimento üretimi enerjiye bağımlı sektördür. Elektrik ve yakıt olmak üzere, çimento maliyetinin %59,1'ini enerji kalemi oluşturmaktadır (SGM, 2015). Türkiyede çimento sektörünün maliyet kalemler, Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Türk çimento sektöründe maliyet kalemleri (SGM, 2015)

Türk Çimento Sektörü Sınai Maliyet Kalemleri	Ortalama Maliyet %
Hammadde ve Yardımcı Maddeler	9,6
Elektrik	21,1
Yakıt	38
İşçilik	9,4
Amortisman	7
Diğer Sabit Giderler	13,1
Diğer	1,8
Toplam	100

Çimento üretimi sırasında havaya karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı çıkmaktadır. 1 ton çimento üretimi sırasında atmosfere yaklaşık 900 kg CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir.

Dünyada 30 gigametrik ton CO<sub>2</sub> salınımının %5'i, çimento sektöründen kaynaklanmaktadır (Khalil, 2014 ). Karbondioksit salınımının sektörlere göre dağılımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

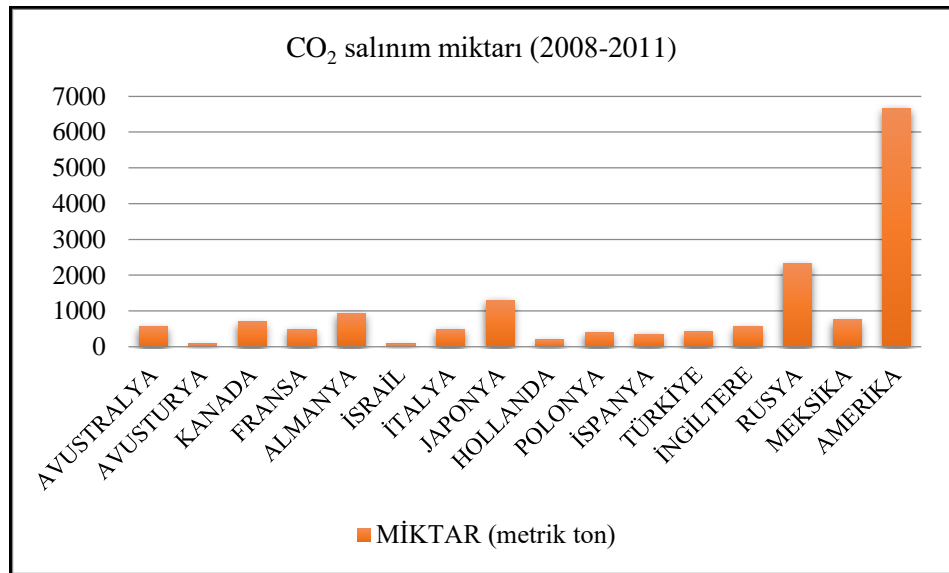


Şekil 1.3. Dünyada CO<sub>2</sub> salınımının sektörlere göre dağılımı

Çimento sektörü içerisinde CO<sub>2</sub> salınım %50 kalsinasyon sırasında, %40 yakıtların yakılması sırasında % 10 ise elektrik ve taşıma işlemlerinden kaynaklanmaktadır. CO<sub>2</sub> salınımının atmosfere oluşturduğu sera etkisi ve milyarlarca ton çimento üretimi için ihtiyaç duyulan klinker miktarı düşünüldüğünde, çimento sektörünün çevreye olumsuz bir etki yaptığı bilinen bir gerçektir. Şekil 1,4'te dünyadaki karbondioksit salınımının ülkelere göre dağılımı gösterilmiştir (Barış, 2004).

Türkiye'de 2014 yılı çimento üretiminin yaklaşık 69,7 milyon ton olduğu ve önümüzdeki yıllarda bu miktarın artacağı düşünüldüğünde, atmosfere salınan CO<sub>2</sub> ve diğer gazların her geçen gün çevreye vereceği zararın artacağı kaçınılmazdır (Çimento sektör raporu, 2015).

Kömürle çalışan termik santrallerde bacadan uzaklaşan ve uçucu kül olarak tanımlanan önemli atık malzeme, yanma nedeniyle baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları elektro filtrelerde yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir (Barış, 2004).



Şekil 1.4. Dünyadaki karbondioksit salınımının ülkelere göre dağılımı (<http://stats.oecd.org>)

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yapısında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> ve CaO içeren amorf malzemelerden alkali aktivatörler kullanılarak kuvvetli bir bağlayıcı madde üretimi 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. Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek mekanik performans, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz salınımları (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> vb.) ve çevrenin daha az tahribi gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, büyük ölçüde atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama sorunları önemli ölçüde azalacaktır (Aydın 2010).

Bağlayıcı olarak geopolimer kullanılan betonların çimento ile üretilen betonlara göre kuru büzülme değerleri düşük, donatı ile aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları ise yüksektir (Glukhovsky, 1980).

Bu çalışmada iki farklı sınıfta uçucu külün mekanik özellikleri incelenmiş ve çimento bağlayıcılı kontrol numuneleri ile durabilite özellikleri karşılaştırılmıştır. Türkiye’de halen faaliyette bulunan Sivas Kangal Termik Santrali’nden elde edilen C sınıfı uçucu kül ve Kütahya Tunçbilek Termik Santrali’nden elde edilen F sınıfı uçucu kül, değişik oranlarda alkali aktivatörler ile aktive edilerek üretilen harç numunelerin mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Literatürce C sınıfı uçucu külün alkali aktivasyon problemleri dikkate alınarak karşılaştırma amacıyla ayrıca Manisa Soma Termik Santrali’nden elde edilen C sınıfı uçucu kül ile de deneme karışımları yapılmıştır.

Bu çalışmanın başlıca amaçları;

- a. Daha önce kısıtlı sayıda araştırma yapılmış olan C ve F sınıfı uçucu küllerin aktive edilmesi için gerekli olan optimum aktivatör miktarı, kür sıcaklığı ve karışım oranlarını tespit edilmesi.
- b. C ve F sınıfı uçucu küllerden hangisinin dayanım ve durabilite özelliklerinin daha üstün olduğu belirlenmesi.
- c. Türkiye’deki farklı tip uçucu küllerin alkali aktivasyonu ile yapılacak kompozit ile ilgili tesislerin yan ürünü olan uçucu küllerine ait verimliliklerinin belirlenmesi.

- d. Gerek Türkiye’de, gerekse dünyada çimentoya dayalı sektörlerin çevreye vermiş olduğu zararı minimuma indirmek için yapılacak çalışmalara katkı sağlanması.
- e. Uçucu küllerin alkali aktivasyonunda sağlanabilecek gelişmeler ile çimentoya dayalı bağlayıcı üretim sektöründeki enerji ihtiyacına gerek kalmayacak ve tüketilen bu enerji farklı sektörlerin ihtiyacına yönlendirilebilecektir.
- f. Geliştirilecek olan kompozitin, ilerleyen yıllarda yapı sektöründe kullanımı sağlanabilirse üretim maliyetlerinin düşmesine sebep olacak ve dolayısıyla ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.





## BÖLÜM 2. UÇUCU KÜL VE ALKALİ AKTİVASYONU

### 2.1. Uçucu Kül

Uçucu kül, pulvarize (öğütülmüş) kömür ile çalışan termik santrallerin, yanma sonucu elde edilen bir yan ürünü olan çok ince kalıntılardır (Baradan, 2012).

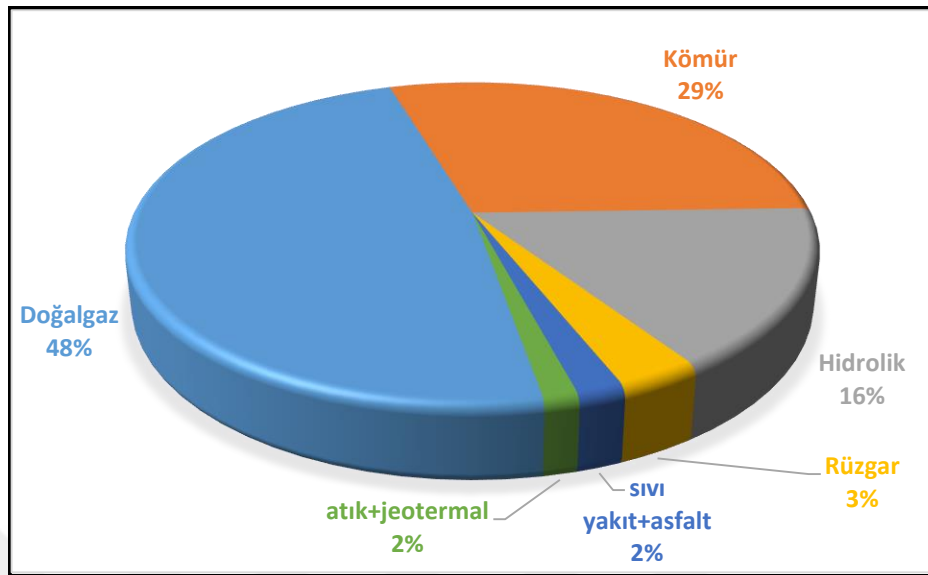
Termik santrallerde kullanılan taş kömürünün % 10-15'i, linyit kömürünün ise % 20-40'ı küldür. Termik santral, 1 kwh'lık elektrik enerjisi üretimi yaklaşık 110 g külün atık madde olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, 1000 mw'lık bir santraldan bir yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Bu mertebedeki bir kül üretiminin depolanabilmesi için yılda 60.000 m<sup>2</sup>, santralın hizmet süresi olarak kabul edilen 30 yıllık süre içinde ise 1.800.000 m<sup>2</sup> civarında bir araziye ihtiyaç bulunmaktadır (Yeğınobalı, 2009).

Termik santrallerde çok ince öğütülerek yakılan kömürden aşağıda belirtilen üç farklı külün elde edilmesi mümkündür:

- a. Göreceli olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen "taban külü",
- b. Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulularak uzaklaştırılması ile elde edilen "ham kül",
- c. Çok ince olup baca gazları ile taşınan "uçucu kül" (Yeğınobalı, 2009).

Türkiye'de enerji kaynağı olarak üretim yapan tesislerin tamamının kurulu güç kapasitesi 69.519,07 MW olup bunun 14.636 MW'lık kısmı linyit, taş kömürü ve ithal kömür yakan termik santrallerden oluşmaktadır. Türkiye, ihtiyacı olan elektrik enerjisinin %21,05'ini termik santrallerden sağlamaktadır. Türkiye'nin 2014 yılı elektrik üretiminin 251.962,8 GWh elektrik üretiminin %29,2'si termik santrallerinden karşılanmaktadır. 2014 yılı sonu itibariyle elektrik üretimin kaynaklara göre dağılımı

Şekilde 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. 2014 yılı sonu itibariyle elektrik üretimin kaynaklara göre dağılımı (EÜAŞ, 2014)

Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 900 milyon ton civarındadır (Gamage ve ark.,2011). Dünyada uçucu kül üretimi ve kullanım oranları Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Dünyada uçucu kül üretimi (CCP, 2015)

ÜLKE	Kül Üretimi (Milyon ton)	Kül Kullanımı (Milyon ton)	Kullanım Oranı (%)
Avustralya	13,1	6,00	45.8
Kanada	6,8	2,30	33.8
Çin	395,0	265	67.1
Avrupa Birliği (Eu15)	52,6	47,8	90.9
Hindistan	105,0	14,5	13.8
Japonya	11,1	10,7	96.4
Orta doğu/afrika	32,2	3,4	10.6
Amerika	118,0	49,7	42.1
Asya	16,7	11,1	66.5
Türkiye	24,0	2,4	10
Rusya	26,6	5,0	18.8
Toplam	800,1	417,9	52.2

Türkiye’de, kömürle çalışan 18 adet termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ait bilgiler Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Türkiye’de bulunan termik santraller (Uyanık ve Topeli, 2012)

No	Termik Santral	Yakıt Cinsi	Kurulu Güç	Bulunduğu İl
1	Afşin-Elbistan A	Yerli Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin Elbistan B	Yerli Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çatalağzı	Yerli Kömür	300	Zonguldak
4	Çayırhan	Yerli Kömür	640	Ankara
5	Çolakoğlu	İthal Kömür	180	Kocaeli
6	Eren Enerji	İthal Kömür	1390	Zonguldak
7	18 Mart Çan	Yerli Linyit	320	Çanakkale
8	İçdaş Değirmencik	İthal Linyit	405	Çanakkale
9	İçdaş Bekirli	İthal Linyit	1200	Çanakkale
10	Kangal	Yerli Linyit	457	Sivas
11	Kemerköy	Yerli Linyit	630	Muğla
12	Orhaneli	Yerli Linyit	210	Bursa
13	Seyitömer	Yerli Linyit	600	Kütahya
14	Soma	Yerli Kömür	1034	Manisa
15	Sugözü	İthal Kömür	1320	Adana
16	Tunçbilek	Yerli Linyit	365	Kütahya
17	Yatağan	Yerli Kömür	630	Muğla
18	Yeniköy	Yerli Linyit	420	Muğla

Bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi ortalama 23,8 milyon tondur (Uyanık ve Topeli, 2012). Ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir (Yeğinobalı, 2009).

2012 yılı itibariye Türkiye’de bulunan termik santrallerde üretilen uçucu kül miktarı ve kaynağına göre dağılımı Tablo 2.3’te verilmiştir.

Türkiye’deki Termik Santrallerde üretilen uçucu küllerin kimyasal özellikleri Tablo 2.4’te gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Türkiye’de uçucu kül üretimi (Uyanık ve Topeli, 2012)

Termik Santral	Kurulu Güç	Kömür Tüketimi	Uçucu Kül Üretimi
İthal Kömür	3085 MW	8.300.000 ton	830.000 ton
Linyit	8081 MW	69.400.000 ton	22.030.000 ton
Taş Kömürü	480 MW	2.600.000 ton	1.000.000 ton
TOPLAM	11.646 MW	80.300.000 ton	23.860.000 ton

Tablo 2.4. Termik Santrallerde üretilen uçucu küllerin kimyasal özellikleri (Yeğinoğlu, 2009)

Termik Santral	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TSE	ASTM
Afşin-Elbistan A	18,27	9,16	3,26	53,44	1,75	0,38	11,42	0,19	W	C
Çatalağzı	58,75	25,24	5,76	1,46	2,22	4,05	0,08	0,6	V	F
Çayırhan	49,13	15,14	8,25	13,2	4,76	1,76	3,84	2,2	V	F
Kangal	34,29	14,94	4,25	30,82	2,08	0,97	7,02	0,61	W	C
Kemerköy	25,2	12,58	5,98	38,49	1,27	1,18	13,88	0,41	W	C
Orhaneli	48,53	24,61	7,59	9,48	2,28	2,51	2,48	0,35	V	F
Seyitömer	54,49	20,58	9,27	4,26	4,48	2,01	0,52	0,65	V	F
Soma	42,82	20,82	4,57	23,45	1,74	1,31	1,47	0,32	W	C
Sugözü	18,69	5,61	2,52	62,68	2,63	0,77	2,73	0,13	W	F
Tunçbilek	59,06	17,27	12,44	1,68	4,54	1,15	0,6	0,3	V	F
Yatağan	59,06	17,27	12,44	1,68	4,54	1,15	0,6	0,3	V	F
Yatağan	51,5	23,08	6,07	10,53	2,42	2,54	1,32	0,77	W	F

Türkiye’deki termik santrallerde üretilen uçucu küllerin yaklaşık %10’u geridönüşüm olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık %90’lık kısmı ise kontrollü veya kontrolsüz olarak depolanmakta veya doğaya bırakılmaktadır (Görhan ve ark., 2008).

Uçucu külün üretimi ve karakteristikleri; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi, kömür kompozisyonu ve yakma sistemine göre değişmektedir (Görhan ve ark., 2008).

## 2.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırması

Uçucu Kül, kimyasal kompozisyonlarına göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır.

Kireç ve SO<sub>3</sub> miktarına göre sınıflandırma: Bu sınıflandırmaya göre,

- a. Silikoalüminöz uçucu küller: Esas yapısı silikoalüminatlardan meydana gelen ve genellikle taş kömüründen elde edilen uçucu kül
- b. Sülfokalsik uçucu küller: Genellikle linyit kömüründen elde edilen ve diğerlerine oranla yüksek miktarda  $SO_3$  ve CaO içeren küller.
- c. Silikokalsik uçucu küller: Genellikle linyit kömüründen elde edilen kireç ve silika miktarı yüksek uçucu küller.

CaO Miktarına Göre Sınıflandırma: Uçucu külün içerdiği analitik CaO miktarına dayanmaktadır. Buna göre, CaO miktarı % 10'un altında olan uçucu küller, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, % 10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak adlandırılırlar. Silikoalüminöz küller ASTM F sınıfına dahildirler. Silikokalsik uçucu küllerin kimi F sınıfı kimi C sınıfına, sülfokalsik uçucu küllerin bir çoğu ise C sınıfına girerler.

ASTM C618'e göre uçucu küller iki geniş kategoriye ayrılmaktadır.

- a. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerden elde edilip  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$  şartını sağlayan küllerdir,
- b. C sınıfı küller ise genelde linyitler ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilip  $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%50$  şartını sağlayan küllerdir (Aruntaş, 2006).

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar (Yeğinoğlu, 2009).

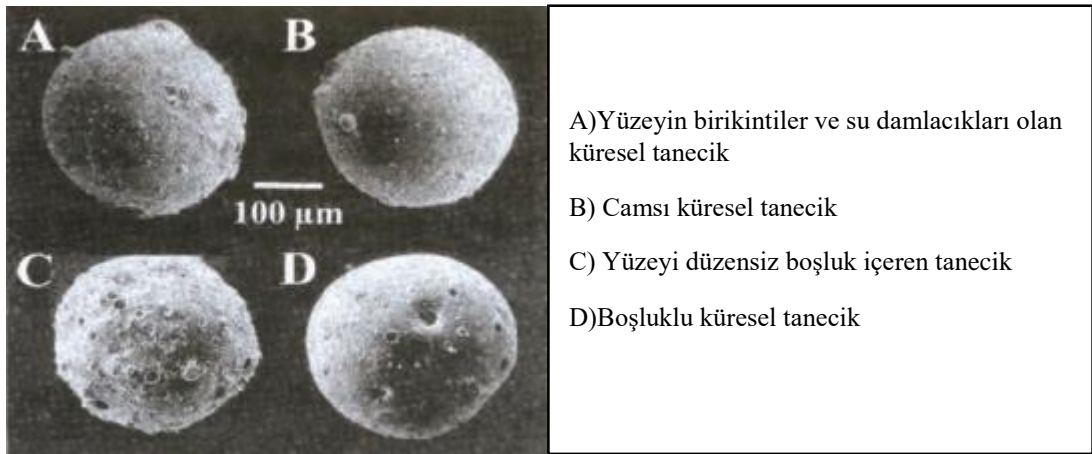
- a. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit ( $SiO_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $Al_2O_3$ ) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.
- b. W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif  $SiO_2$  ve  $Al_2O_3$ 'den oluşan; geri kalanı demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif

kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir.

### 2.3. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin tanecik şekilleri ve büyüklük dağılımında, kömürün orjini ve uniform olması, kömürün pulverizasyon durumu yanma sırasındaki sıcaklık ve oksijen seviyesi, yanmanın uniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi üretime bağlı faktörler etkili olmaktadır.

Uçucu külde büyüklükleri  $0.5\mu\text{m}$ - $200\mu\text{m}$  arasında değişen camsı, küresel, ve düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Spesifik yüzeyleri  $1800$ - $5000\text{ cm}^2/\text{gr}$  arasında değişmekle birlikte, ortalama  $2800$ - $3800\text{ cm}^2/\text{gr}$  dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu  $2,2$ - $2,7\text{ gr}/\text{cm}^3$  arasındadır. Uçucu Külün tipine göre bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıklar oluşmaktadır. Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapılar, boşluklu küreler (büyük bir küre içinde, küçük küreler kümesi içeren yapılar, yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir (Yeğinoğlu, 2009).

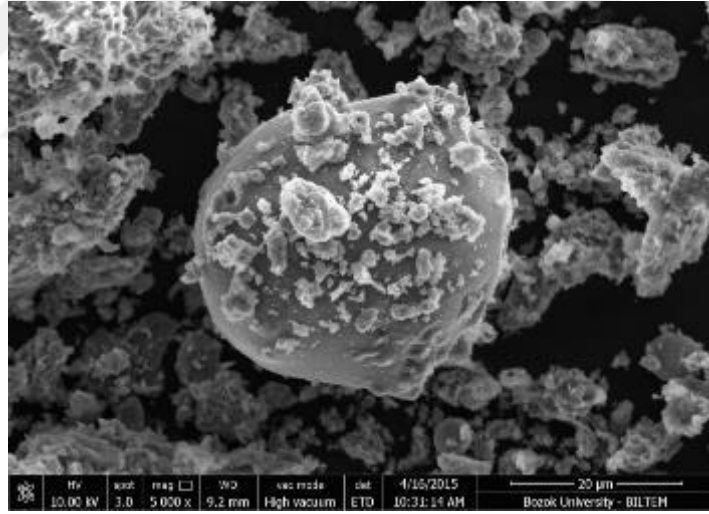


Şekil 2.2. Uçucu Kül taneciklerinin morfolojik yapısı (Yeğinoğlu, 2009)

Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış kuvars, feldispatlar gibi mineraller, kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan oluşmaktadır.

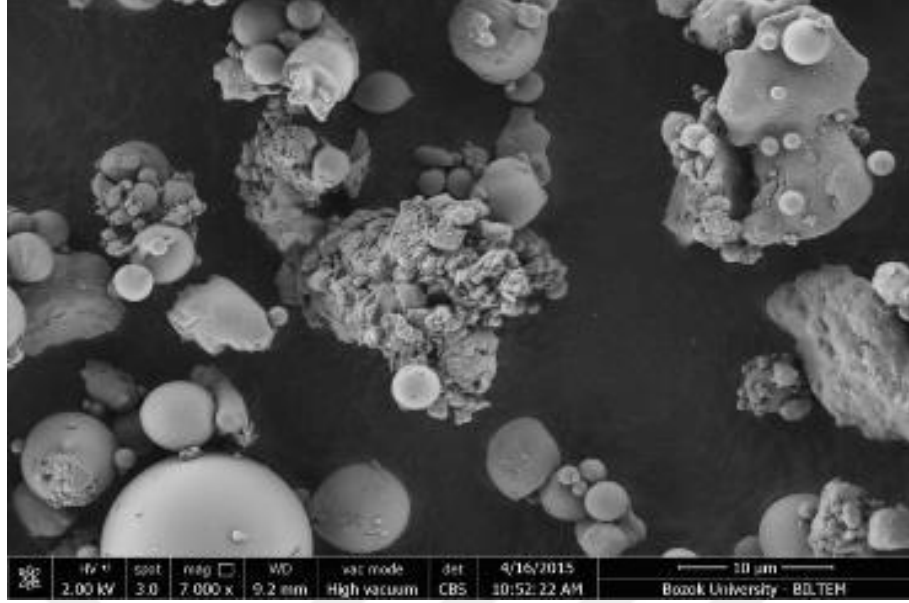
Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler bulunmaktadır. Bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikro yapıya sahiptirler. Şekil 2.3'te düşük kireçli F sınıfı uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir.

Yüksek kireçli küllerde, mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin birarada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir. Taneciklerin şekli ve büyüklük dağılımlarının, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki ettiği bilinmektedir.



Şekil 2.3. F sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü

Şekil 2.4'te yüksek kireçli C sınıfı uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.4. C sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü

Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun  $40\ \mu\text{m}$ 'nin altında olması ( $10\text{-}20\ \mu\text{m}$ ) ve şeklinin de genelde küresel olması puzolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler, yüzey alanları büyük olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler.

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve üretim koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfürizasyon gibi) bağlıdır.

Uçucu kül içinde başlıca  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  gibi bileşenler bulunmakta olup bunların miktarı uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$  ve alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden  $\text{SiO}_2$  % 25-60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  % 10-30,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  % 1-1,5 ve  $\text{CaO}$  % 1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu kül tipini karakterize etmektedir (Yeğınobalı, 2009).

#### 2.4. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Dünya'da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda yaklaşık 2008 yılı itibariyle, 900 milyon ton civarındadır (Game ve ark.,2011).

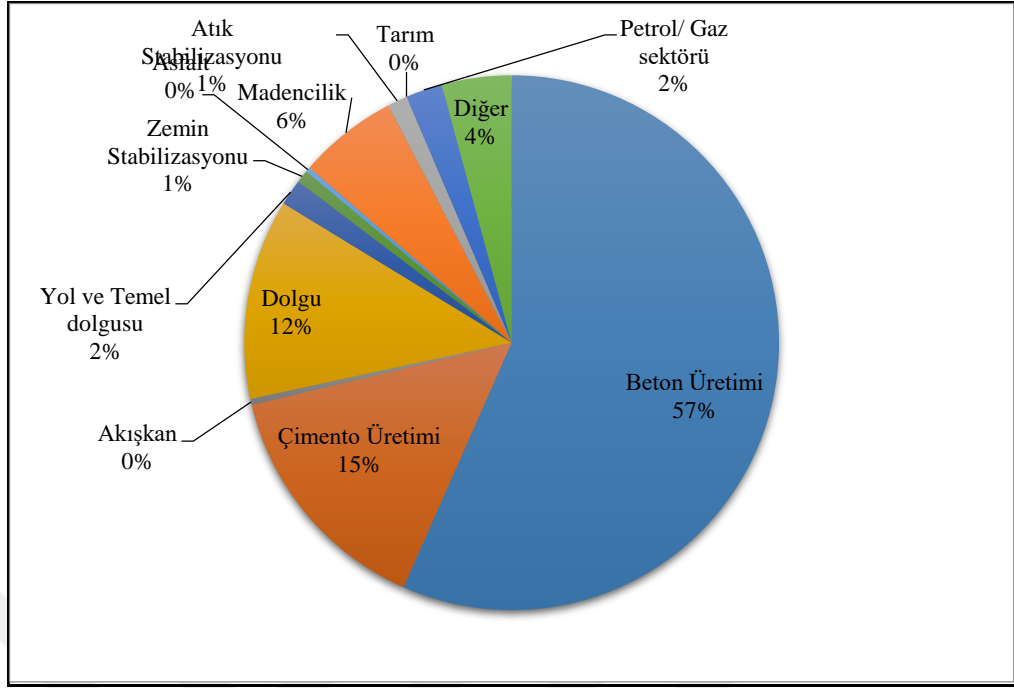


Uçucu külün başlıca kullanım alanları aşağıdak gibi sıralanabilir:

- a. Çimento sektöründe uçucu küllü çimento üretmek için
- b. Beton üretiminde agrega yerine
- c. Genellikle yol inşaatlarında dolgu malzemesi olarak
- d. Dolgu işlemlerinde enjeksiyon malzemesi olarak
- e. Atık stabilizasyonu ve katılaştırma işlemlerinde
- f. Çimento klinkeri üretiminde kil gibi ilave malzeme olarak
- g. Maden Islahlarında
- h. Yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda
- i. Yol inşaatlarında alt temel malzemesi olarak
- j. Tuğla üretiminde ilave agrega malzemesi olarak
- k. Asfaltik betonlarda mineral dolgu olarak
- l. Tarımsal kullanım alanları: Toprak değişiklik, gübre, sığır besleyiciler, stok yem bahçelerinde toprak stabilizasyonu ve tarımsal kazıklar.

Bunların dışında zemin ve tavan döşemeleri, bowling topları, flotasyon cihazları, sıva, mutfak eşyaları, alet sapları, hücresel beton, geopolimer, kiremit, çatı granülleri, zemin kaplaması dahil, cüruf blok, PVC boru, yapısal izoleli paneller, yapı mantolama elektrik direkleri, demiryolu traversleri, karayolu ses bariyerleri, deniz kazıkları, taşlar, park bankları, peyzaj vb imalatlarda kullanılmaktadır (<https://en.wikipedia.org>, 2016).

Termik santrallerin atık ürünü olan uçucu kül, taban külü ve ham külün ABD'de kullanım alanlarını gösteren grafik Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Uçucu külün kullanım alanları

Türkiye’de uçucu kül kullanımına yönelik ilk çalışmalara 1964 yılında Devlet Su İşleri tarafından başlanmıştır. Yapımı 1967-1971 yılları arasında süren Gökçekaya Barajı’nda ilk kez uçucu kül kullanılmıştır. İlgili standart ise 1968 yılında TSE tarafından yayınlanmıştır. Günümüzde Türkiye’de yıllık 15 milyon ton civarında uçucu kül açığa çıkmaktadır. Bunun yaklaşık %25’i betonda kullanılabilir niteliktedir. Bu oran tamamen tecrübeye ve çok güvenilir olmayan verilere dayanmaktadır. 2013 yılında ülkemizde hazır beton üretiminde 2 milyon ton uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Bunun 1-1,5 milyon ton arası uçucu küldür (<http://www.betonvecimento.com>, 2016).

## 2.5. Uçucu Külün Çimento ve Beton Sektöründe Kullanımı

İnşaat sektöründe uçucu külün yaygın olarak kullanıldığı alanların başında çimento sanayisi gelmektedir. 1980’li yıllardan itibaren Türkiye’de katkılı çimentoların çimento üretimindeki payı, % 90’ların üstüne çıkmıştır. Uçucu küllerin çimentoda; hammadde, katkı maddesi ve ikame malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Uçucu kül, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere hammadde olarak karıştırılarak klinker üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu kül çimentoda katkı olarak

kullanıldığında enerji tasarrufu sağlanmakta ve daha ucuz çimento elde edilmektedir. Yine uçucu külün, ikame malzemesi olarak çimentoda kullanılması durumunda da ekonomi sağlanmaktadır (Yeğinoğlu, 2009).

Uçucu külün agrega olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar, özellikle son yıllarda hız kazanmıştır. Beton karışımına ince agreganın bir kısmı yerine uçucu kullanılarak yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar elde edilmiş ve uçucu külün ince agreganın bir bölümü yerine kullanılabileceği tespit edilmiştir. Uçucu külden elde edilen hafif agregalarla ilgili literatürde birçok çalışma vardır. Yapılan bu çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta sinterlenerek yapay iri hafif agrega olarak üretilen uçucu kül, hafif beton yapımında kullanılmış ve beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Diğer taraftan yüksek oranda uçucu kül ile bir miktar portland çimento karıştırılarak elde edilen iri hafif agregaların, hafif beton üretiminde kullanıldığı ve taşıyıcı betonlar elde edildiği görülmektedir. Başka bir çalışmada uçucu kül, kil ile birlikte yapay agrega olarak üretilmiş ve betonda, yıkıntı atığı ile birlikte başarıyla kullanılmıştır. Öte yandan uçucu külün bir dizi işlem sonrası beton içinde tekrar kullanılan agrega (recycled agrega) olarak kullanıldığı bir çalışmada, doğal agrega kullanılarak üretilen beton ile atık agrega içeren betonda benzer sonuçlar elde edilmiştir. İngiltere’de inşa edilen nükleer bir santral inşaatında 1.300 ton sinterlenmiş uçucu kül, hafif agrega olarak beton içinde kullanılmıştır (Aruntaş, 2006).

Uçucu küller kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. Uçucu küller daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar. Araştırmalar ağırlıkça % 20 oranında uçucu kül kullanılmasının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bunun yanında uçucu kül kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte, prizi geciktirmektedir. Küçük danelerden oluştuğu için uçucu kül, katkılı beton daha düzgün yüzeye sahiptir. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olur. Uçucu kül katkılı betonun hidratasyon ısısı düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmaz dolayısıyla kütle betonları için uygundur. Uçucu küller küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük

bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilirlik sağlarlar. Uçucu küllü betonlarda kür sıcaklığının artırılması basınç dayanımını iyileştirmiş, birim ağırlıkları düşürmüş ve hacimce su emmelerde artışa neden olmuştur (Topçu, 2001).

## 2.6. Alkali Aktivasyonu

Çimento kullanmadan bağlayıcı üretmek için son yıllarda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıklar, çeşitli alkalilerle aktive edilmektedir.

Teorik olarak silika ve alümina içeren her malzeme alkalilerle aktive edilebilir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killer, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, uçucu kül-cüruf karışımları, metakaolin-uçucu kül karışımları, metakaolin-cüruf karışımları, cüruf-kırmızı çamur karışımları, uçucu kül ile kaolin ve bir tür zeolit minerali olan stabilite gibi kalsine olmamış maddelerin karışımları kullanılmıştır. Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların mekanik dayanımı, alüminosilikat malzemelerin yapısına bağlıdır. Doğal malzemeler daha düşük dayanımlı ürünlerin oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Daha yüksek mekanik dayanımlar, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi kalsine malzemelerin kullanımı ile elde edilebilmektedir. Puzolanik aktivite de olduğu gibi, alkali aktivasyon reaktivitesi amorf alüminyum ve silis içeriğine bağlıdır (Aydın, 2008).

Sertleşmiş portland çimentosuyla karşılaştırma yapmak için alümina ve silika içeren katı malzemelerle alkali aktivasyonu, ilk defa Alman kimyacı ve mühendis Kühl tarafından 1908 yılında yapılmıştır. Camsı cüruf, alkali sülfat ya da karbonata oksit ya da hidroksit eklenip eklenmemesi gibi kombinasyonlarla tamamen portland çimentosuna benzer bir performans elde edilmiştir. Bu bilimsel tezi baz alarak Purdon 1940 yılında alkali bağlayıcı çalışmalarını geliştirmiştir (Porvis, 2014).

Alümina silikat malzemelerin alkali aktivasyon mekanizması henüz tam anlaşılabilmiş değildir. Güçlü bir alkali alümina silikatlar çevre sorunu, her şeyden önce Si-O-Si bağların bir dökümünde, daha sonra ortaya çıkan yeni fazlar ve oluşumları çözüm içeren bir süreç gibi görünmektedir. Si-O-Si bağ yapısı içerisinde tüm Al atomlarının penetrasyonu bu reaksiyonun önemli bir özelliğini temsil eder. Bu reaksiyonlar

sonucunda çoğunlukla alümina-silikat jeller oluştuğu gözlenmiştir. Bunların karışım karakteri  $M_n[-(Si-O)_z-Al-O]_n \cdot wH_2O$  olarak formüle edilir. Başlangıç malzemeleri ve bunların karışım koşulları C-S-H ve C-A-H kökenli olabilir. Hatta bu sırada ikinci  $H_2O$  (poli yoğunlaşma reaksiyonu) oluşabilir. Ham başlangıç maddeleri ve reaksiyon şartlarına bağlı olarak jel benzeri amorf ya da kısmen amorf veya kristal kökenli olabilir. Katı madde miktarı alkali aktivasyon sürecinde önemli bir rol oynar. Çoğunlukla kristal zeolit tipi ürünler (analsim, hidro- sodalit ve diğerleri) son derece seyreltilmiş süspansiyonlar oluşturur.

Tablo 2.5. Alkali aktive ve alkalın bağlayıcıların tarihsel gelişimi (Roy, 1999)

Yazarlar	Yıl	Konu
Feret	1939	Çimentoda cüruf kullanımı
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkalın çimentoların teorik esasları ve gelişimi
Glukhovsky	1965	Bileşen olarak doğal maddelerin kullanımı nedeniyle "alkalin çimentolar" adının kullanımı.
Davidovits	1979	Geopolimer" terimi-daha fazla polimerizasyonu
Malinowski	1979	Antik kemerli su yollarının karakterizasyonu
Fors	1983	F-çimentosu (cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemelerinin karakterizasyonu.
Davidovits ve Sawyer	1985	"Pyrament" patent
Krivenko	1986	$R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$ .
Malolepsy ve Petr	1986	Sentetik melit cüruflarının aktivasyonu
Malek ve diğerleri	1986	Cüruf çimentoları-düşük seviyede radyoaktif atık oluşturur.
Davidovits	1987	Antik ve modern çimentoların kıyaslanması
Deja ve Malolepsy	1989	Klorürlere direnç görülmüştür.
Kausal ve diğerleri	1989	Zeolit oluşumunu içeren alkalın karışımlarından adiabatik (tam yalıtımlı) kür edilmiş nükleer atık oluşumları.
Roy ve Langton	1989	Antik beton ile benzerlikleri
Majumdar ve diğerleri	1989	C12A7-cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf.
Wu ve diğerleri	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy ve diğerleri	1991	Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcılar
Roy ve Silsbee	1992	Alkali-aktive bağlayıcılar: genel bakış
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosu
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek betonları
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikro yapısı

Geleneksel Portland çimentosu ile geopolimer aynı işlevi yerine getirmektedir. Aralarında benzerliklerin yanı sıra belirgin farklar bulunmaktadır. Bunlar:

- a. Dayanım kazanma mekanizmaları: C-S-H, hidrasyon yoluyla dayanım kazanırken, geopolimerleşme dehidroksilasyon ile dayanım kazanır. Bunlar zıt süreçlerdir. Bununla birlikte, C-S-H ve geopolimerin dayanım kazanması  $\text{SiO}_2$  içeren bağları oluşturmasıyla gerçekleşir.
- b. Maliyet: Portland çimentoların maliyeti, yer, kalite ve atıkların maliyetine göre farklılık gösterir. Birçok geopolimerin asıl malzemesi uçucu kül gibi atıklardır. Bununla birlikte alkali aktive edilmiş betonların maliyeti geleneksel portland çimento maliyetinden yüksektir. Ayrıca yüksek performans tasarıma bağlıdır.
- c. Kimyasal seçim: Portland çimentosu karışımı, geopolimere göre, fosfatlar ve bileşim içindeki küller gibi pekçok değişken içerir.
- d. Sürdürülebilirlik: Geopolimerin, geleneksel portland çimentosuna göre düşük karbon salınımı ve sürdürülebilirlik gibi avantajı bulunmaktadır. Portland çimentosu, madencilik, yakma, kalsinasyon, salınım gibi pekçok süreç gerektirir. Geopolimerin ise depolama alanlarından tasarruf ve karbon salınımının olumsuz etkilerini azaltma gibi etkileri vardır (Mahbob, 2014).
- e. Aktivatörler, silikat ve alüminatların hızlı bir şekilde yoğunlaşım kristalleşmesine yardımcı olur.  $\text{OH}^-$  reaktivite için bir katalizör olarak hareket eder ve temel elementlerden metal katyon yapısı oluşturmayı sağlar. Uçucu kül ya da diğer puzolanlara alkali çözelti karıştırıldığında, oluşan bileşimler çabuk çözülür. Elde edilen jelin iyi bir şekilde kristalleşmiş yapıya doğru büyümesi için yeterli bir zaman yoktur. Bunun bir sonucu olarak, bir mikro-kristalin, amorf veya yarı amorf yapı oluşturulmaktadır (Mahbob, 2014)

## 2.7. Alkalilerin Sınıflandırılması

Alkalileri 6 grupta incelenebilir (Caijun ve ark., 2006);

- a. Kostik alkaliler (Alkali Hidoksitler):  $\text{MOH}$
- b. Silikatlar:  $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$
- c. Zayıf asitli tuzlar:  $\text{M}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{M}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{M}_3\text{PO}_4$  vd.
- d. Alüminatlar:  $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$
- e. Alüminosilikatlar:  $\text{M}_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2-6) \cdot \text{SiO}_2$
- f. Güçlü asitli tuzlar:  $\text{M}_2\text{SO}_4$

Ortak aktivatörleri NaOH, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, cam suyu, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KOH, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> yer alırken, en çok kullanılan alkali aktivatörler sodyum ya da potasyum bir karışımı olan hidroksitler (NaOH, KOH) ve sodyum silikat (nSiO<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>O) veya potasyum silikat (nSiO<sub>2</sub>K<sub>2</sub>O)' tır (Peterman ve Athar, 2010).

### 2.7.1. Alkali hidroksitler

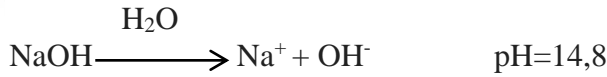
Genel olarak alkali aktivasyonunda kullanılan alkali oksitler, sodyum, potasyum, lityum, rubidyum ve sezyum gibi maliyeti yüksek ve kısıtlı hidroksitlerdir. LiOH'in suda çözünebilirliği düşüktür (5,4 mol/kg H<sub>2</sub>O 25 °C de). Suda daha çok çözünebilen sodyum hidroksit ve potasyum hidrosit (20 mol/kg H<sub>2</sub>O'an fazla 25 °C'de ) özellikle F tipi uçucu külün alkali aktivasyonu çalışmalarında, yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. NaOH, ağırlıklı olarak Cl<sub>2</sub> ile birlikte klor-alkali olarak üretilir. Alkali aktivasyonundaki bu kullanımın önemli çevresel etkileri vardır. Benzer şekilde potasyum klorürün hidrolizi sonucu potasyum hidroksit elde edilir.

Bununla birlikte asidin aşındırıcı yapısı, aktivatör oranı, viskozite, karışım hazırlama sırasında açığa çıkan ısı gibi durumlar, alkali oksitlerin en önemli özellikleridir. Viskozite, alkali oksit karışımının konstantrasyonuna ve alkali silikatın karışım içerisindeki miktarına göre değişir. 10 mol NaOH'un 1 litre su içerisinde çözüldürülmesi sırasında 400 kJ ısı açığa çıkar. Diğer bir ifadeyle karışımın sıcaklığı 90 °C ye ulaşır. Çoğu zaman ısı çevreye yayılma ve buharlaşma yoluyla bir süre sonra kaybolur. Bu sebeple ısı yayan kostik sıvıların kullanılmasında ısı salınımı dikkatle izlenmelidir. Yüksek konstantrasyonlu alkali aktivatörlerle hazırlanan bağlayıcı karışımlarda tozuma önemli bir problemdir (Peterman ve Hammons, 2010).

#### 2.7.1.1. Sodyum hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit eskiden "kostik soda" olarak bilinen sodyum karbonattan, türemiştir. Eski Mısır'da, sodyum karbonat önce bir alkali sentezlemek için kireç ile karıştırılırdı. Hidroksit iyonu OH çözültide sodyum ile Na<sup>+</sup> iyonu çağlar boyunca, çeşitli süreçlerde bunu böyle sentezlemek için geliştirilmiştir 1861'de bugün Solvay işlemi olarak, sodyum hidroksit, çoğunlukla sodyum klorür çözültisi elektrolizi ile

üretimiştir. Sodyum hidroksit, laboratuvar ve endüstriyel ortamda en çok kullanılan kimyasal maddelerden biridir. Plastik, sentetik tekstil, temizlik, kağıt hamurundan ve çeşitli kimyasal ürünlerin üretiminde, hatta sabun ya da benzin ve biyodizel üretiminde yurt içi ve endüstriyel kullanım için ürünler. Aynı zamanda, bir gıda maddesi olan E524 üretiminde kullanılır. Saf sodyum hidroksit, beyaz bir katıdır. Bu saydam ve çok higroskopik -su moleküllerini tutan- bir yapıya sahiptir. Bu havadan, havanın neminden ya da herhangi bir ıslak bir yüzeyde suyla kolayca reaksiyona girer. Su içinde kostik soda çözünen bir ısıya eşlik edebilir. Sodyum hidroksit güçlü bir bazdır. Sulu ortam tamamen ayrıştır ve bu yüzden OH<sup>-</sup> iyonu serbest bırakır (<https://en.wikipedia.org>, 2016).



Havadaki karbondioksit, sulu bir ortamda çözülür ve sodyum hidroksit ile reaksiyona girerek karbonatlar oluşturur.



NaOH, geopolimer üretiminde yaygın bir alkali aktivatör olarak kullanılır. Bu aktive edici çözeltinin yoğunluğu ve molaritesi, elde edilen harcın özelliklerini belirler. Fazla miktarda NaOH ilavesi kimyasal çözünmeyi hızlandırırken, bağlayıcı oluşumu sırasında etrenjit ve CH yapısını olumsuz etkilemektedir. Dahası, daha yüksek NaOH oranı, reaksiyon 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 birlikte, aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılması, hidrasyon aktivitesi doğrudan geopolimer ana C-S-H ürünün oluşumunu etkiler. NaOH oranı ve ısı üretimi arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bununla birlikte, NaOH oranı ve maksimum hidrasyon ısısı zamanı arasında bir ters ilişki bulunmaktadır (Peterman ve Hammons, 2010).

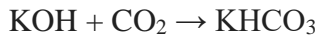


### 2.7.1.2. Potasyum hidroksit (KOH)

Potasyum hidroksit ya da potasyum hidrat bir kimyasal bileşiktir. Akkor derecede uçucu olan, 360 °C'de eriyen, suda ısı açığa çıkararak çözünen, beyaz renkte katı bir maddedir. Alkalik bir baz olan potasyum hidroksidin geniş bir kullanım alanı vardır. Endüstride arap sabunu üretiminde, pillerde elektrolit olarak ve gübre yapımında kullanılır.

Potasyumhidroksit tarımda asidik toprakların pH derecesini dengelemek amacıyla sıkça kullanılır. Ayrıca tarım ilaçlarının yapımında da kullanılır. Bunun yanında tıpta, endüstriyel kimyada da kullanılır.

Potasyum hidroksit endüstriyel kimyada geniş kullanım alanlarına sahiptir. Geri dönüşümlü kâğıtların yapımı, sıvı sabun yapımı ve birçok temizlik ürününün üretiminde potasyum hidroksitten yararlanır. Ayrıca veteriner hekimliğinde bazı hayvan ilaçlarının yapımında kullanılmaktadır. Potasyum hidroksit CO<sub>2</sub> tutucudur. Bu yüzden bitkisel deneylerde yararlanılmaktadır (<https://tr.wikipedia.org>, 2016).



KOH ile yüksek basınç dayanımına sahip ve boşluk miktarı azaltılmış geopolimer üretmek mümkündür. K<sup>+</sup> diğer aktivatör iyonlarına göre daha basit, çözelti içerisindeki polimerik iyonizasyonu daha iyi, sonuç ürünün matris yapısı daha doygun ve daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Bunun yanı sıra 10 M üzerindeki KOH konantrasyonları basınç dayanımının düştüğünü göstermiştir. KOH büyük ölçüde çözülme sağlamak için mantıklı olsa da onun daha yüksek alkaliniteye sahip olması nedeniyle, NaOH aslında daha büyük bir kapasiteye sahip silikat ve alüminat monomerleri oluşturur (Peterman ve Hammons, 2010).

### 2.7.2. Alkali silikatlar

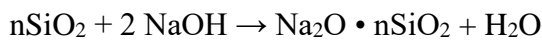
Hidroksitlerde olduğu gibi, sodyum silikat ve potasyum silikat, alkali aktivasyonu için yaygın olarak kullanılan endüstriyel ürünlerdir. Lityum silikat pekçok alkali yeterince çözünebilme özelliği ile yüksek maliyetli ve kısıtlı üretimi olan rubidyum ve

sezyum göre alkali aktive edilmiş bağlayıcı sistemlerde en çok kullanılan silikatlardandır. Alkali silikatlar genellikle belli oranlarda suda çözünen karbonat tuzları ve silikanın kalsinasyonu ile birlikte enerji tüketimi ve CO<sub>2</sub> salınımı sonucu üretilir. Bununla birlikte alkali aktive edilmiş harçların üretimi sırasındaki karbonatların kalsinasyonu sırasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> salınımı, çimento üretimi sırasındaki CO<sub>2</sub> salınım miktarından çok daha düşük miktarda olduğu literatürde tartışılan bir durumdur. (Peterman ve Hammons, 2010).

Sıvı ve katı halini içeren silis kimyası, karbondan başka diğer elementlere göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve göreceli olarak pek anlaşılabilir değildir.

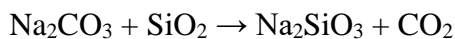
### 2.7.2.1. Sodyum silikat (nSiO<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>O)

Sodyum silikat, genel formülü (nSiO<sub>2</sub>Na<sub>2</sub>O) ile gösterilen kimyasal bileşiklerin ortak adıdır. Bu serinin en iyi bilinen üyesi formülü Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> olan sodyum metasilikat'tır. Ayrıca su camı veya sıvı cam olarak da bilinen bu malzemeler, sulu çözelti içinde veya bir katı içinde kullanılabilir. Saf bileşimler renksiz ya da beyaz renktedir ancak ticari örnekleri demir-ihativa eden yabancı maddelerin varlığı nedeniyle, genellikle yeşilimsi veya mavidir.



Bu bileşikler çimentolarda, pasif yangın korumada, tekstilde, kereste işlemede, refrakter malzemelerde, otomobillerde ve diğer çeşitli alanlarda kullanılır (<https://tr.wikipedia.org>, 2016).

Sodyum karbonat ve silikon dioksit'in eriyip tepkimeye girmesiyle sodyum silikat ve karbon dioksit oluşur;



### 2.7.3. Alkali karbonatlar

Alümina-silikatların karbonatlarla aktivasyonu da henüz tam olarak anlaşılabilir değildir. Alkali karbonatların karbonat tuzlarının maden olarak çıkarılması ile elde edilir.

Postasyum karbonat ve diğerk alkali metalleri, alkali aktive edilmiş bağlayıcı üretiminde sık kullanılan alkaliler içerisinde değildir.

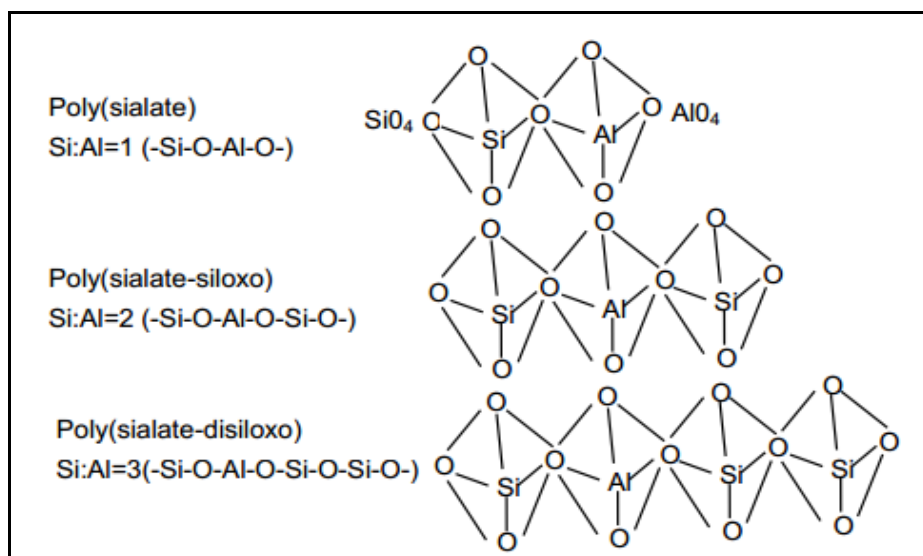
Alkali aktivatörlerin karışım sırasında yapışkanlık sorunları vardır. Sodyum karbonat yerine, aktivatörler olarak silikatlar kullanımı da tam olarak bu malzemelerin yapışkanlık sorunu ortadan kaldırmaz (Peterman ve Hammons, 2010).

#### 2.7.4. Alkali sülfatlar

Karbonatlı çözeltilerde olduğu gibi bazı alümina-silikat malzemelerin sodyum sülfat ilavesi ile alkali aktivasyonu mümkündür. Sodyum sülfat aktivasyonu, bağlayıcı üretimi sırasındaki sera gazı salınımının azalmasına yardımcı olur (Peterman ve Hammons, 2010).

### 2.8. Alkali Aktive Edilmiş Harçların Kimyasal Özellikleri

1976-1979 arası, Davidovits, Gluchovskij'tin geocement teriminden yaklaşık 20 yıl sonra geopolimer terimini kullanmıştır. Davidovits, geopolimer malzemeyi alümina silikat malzemelerin poli-yoğunlaşması sonucu oluşan geopolimerizasyon olarak tanımlamıştır. Davidovits Modeli aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi literatüre girmiştir.

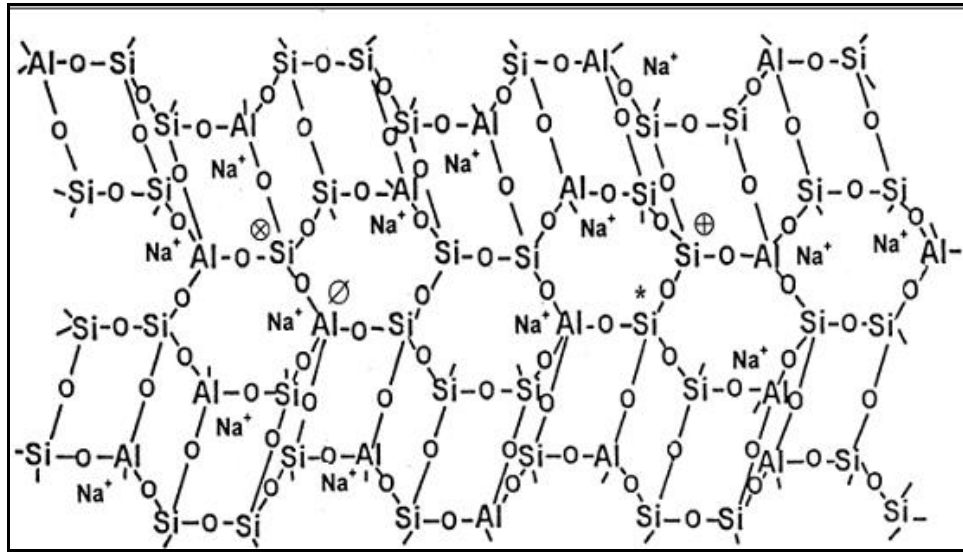


Şekil 2.6. Geopolimer türleri

Alkali aktivasyonu sırasında geopolimer reaksiyonuna giren ve oluşan molekül grupları Davidovits tarafından aşağıdaki şekilde gruplandırılmıştır. (Davidovits, 2008).

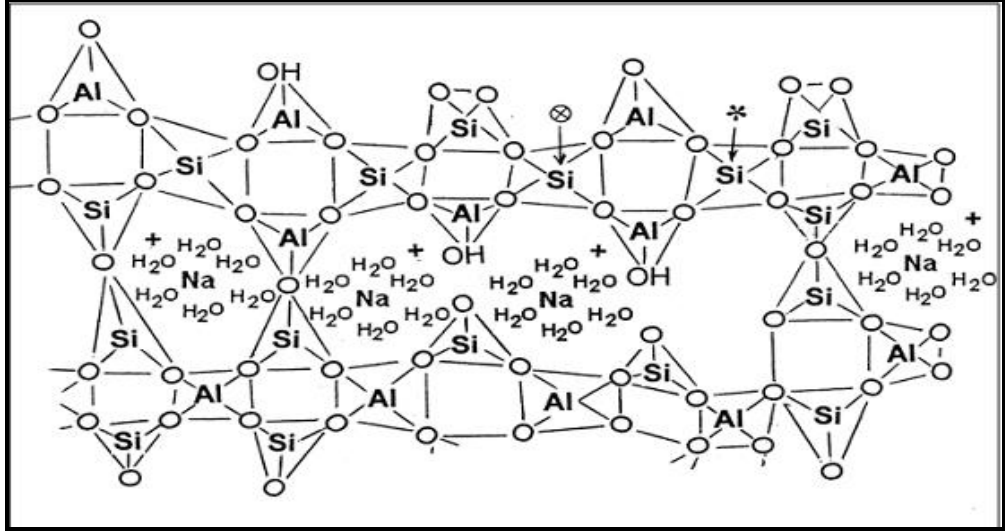
- a. Si-O-Si-O-siloxo, poly (siloxo) (camsuyu alkalı-silikatlar) bağlayıcılık kazandırıcı hammadde
- b. Si-O-Al-O- sialate, poly (sialate)
- c. Si-O-Al-O-Si-O- sialate-siloxo, poly (sialate-siloxo)
- d. Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialate-disiloxo, poly (sialate-disiloxo)
- e. P-O-P-O- phosphate, poly (phosphate)
- f. P-O-Si-O-Al-O-P-O- phospho-sialate, poly (phospho-sialate)
- g. (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-siloxo, poly-silicone

Şekil 2.7’de geopolimer reaksiyonu sonucu oluşan zincir yapının Davidovits tarafından ortaya konulmuş olan modeli verilmiştir.



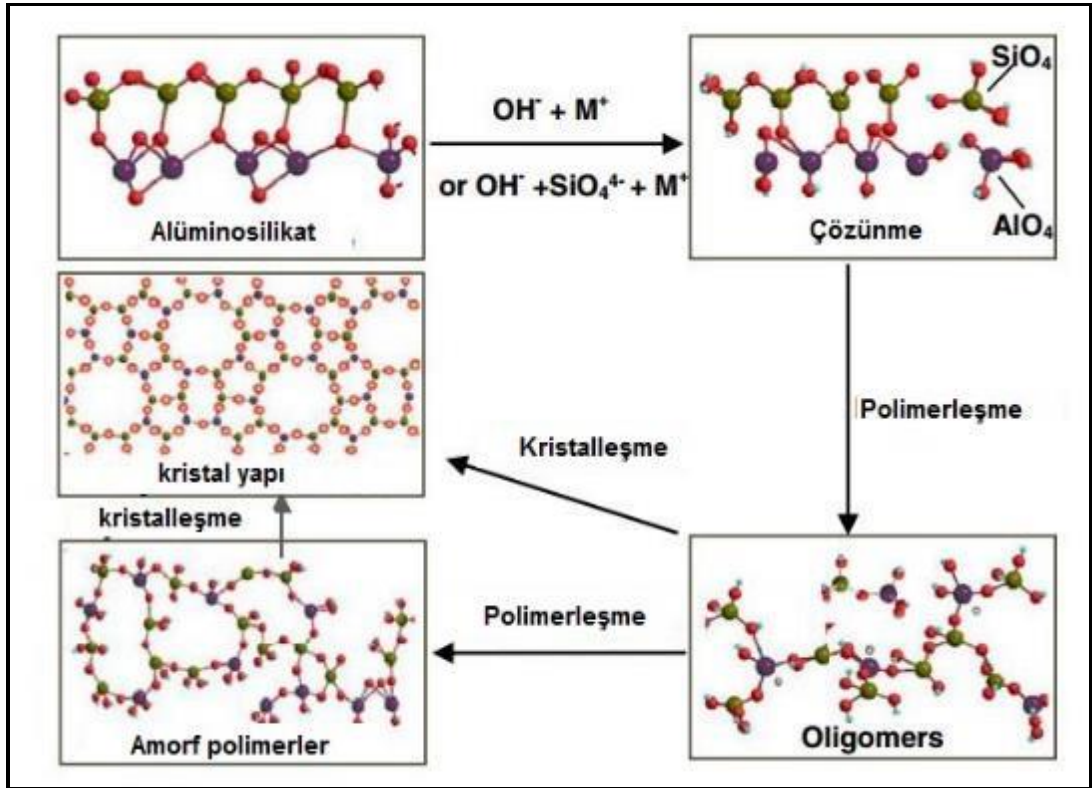
Şekil 2.7. Davidovits Modeli

Mikroyapıda daha fazla ilerleme ve çalışmalar sonucunda Barbosa, değiştirilmiş bir modeli önermiştir. Bu modele göre Si-O-Al-O bağları arasında H<sub>2</sub>O moleküllerinin ve Na iyonlarının bulunduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.8. Barbosa Modeli

Geopolimer yapı arkasındaki kimyasal işlemler tamamen anlaşılır değildir. Süreçle ilgili basitleştirilmiş açıklamalar vardır. Literatürde, bazı çeşitli teoriler ileri sürülmüş olup bunlardan başka alümina silikat atık malzemelerin geopolimerleşme dizileri aşağıda verilmiştir (Zhang ve ark., 2016).



Şekil 2.9. Geopolimerleşme dizisi (Zhang ve ark., 2016)

Geopolimerleşme sırasında oluşan reaksiyonlar başlıca 3 temel adımda özetlenebilir:

- a. Alüminosilikat katıların çözünmesi: Puzolanik katılar içinde bulunan alüminosilikatlar yüksek pH derecesine sahip alkali aktivatörler içerisinde çözünür. Bu durumda, silikat, alüminat ve alüminosilikat formunda yapı oluşur.
- b. Jel oluşumu: Çözünme sırasında yayılan türler sulu faz tarafında tutulur. Bu aşırı doymuş alüminosilikat çözeltisi; oligomerleri uzun zincirler ve ağlar oluşturacak şekilde bir jel oluşturur. Bu aşamada gözenekli ve sulu bir yapı oluşur.
- c. Polikondensasyon: Jel parçaları yeniden düzenlenmeye devam eder, giderek daha büyük bir ağ oluştururlar. Bu durum üç boyutlu geopolimer yapı oluşmasıyla sonuçlanır (Soutsos ve ark., 2016)

Geopolimerlerin kimyasal bileşenleri doğadaki zeolitik malzemelere benzemektedir, mikro yapıları ise amorf özellik göstermektedir. Polimerleşme ile alkali çözelti içindeki Si-Al mineralleri üzerinde yeterli sayıda ve hızlı kimyasal reaksiyonlar sonucunda Si-O-Al-O bağlarında geopolimeri oluştururlar. Araştırmacılar serbest silis ve alümin içeren malzemelerin alkalilerle aktivasyonunun; alüminosilikatların kuvvetli alkali çözeltilerde çözünmesi, serbest iyon gruplarının dağılması ve polikondensasyon olmak üzere üç aşamada oluştuğunu, bu oluşumun hızlı ve karışık reaksiyonlar sonucu tamamlandığını belirtmişlerdir (Toprak, 2011).

En yaygın aktivatör sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) tir. En yüksek gözlenen mekanik dayanım, KOH'in değişen oranlarda kullanımından kaynaklanmaktadır. Potasyum iyonlarının suda daha fazla çözünmesi ve yoğun reaksiyonu, basınç dayanımında artış sağlar. Bu durumun aksine düşük oranlardaki sodyum hidroksitin, düşük kalsiyumlu uçucu kül ile yüksek basınç dayanımı verdiğini savunanlar da vardır (Peterman v e Hammons, 2010).

Seçilen aktivatörün cinsi ne olursa olsun, aktivatör oranı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. Aktivatör çözeltisinin pH derecesi, nihai çimento performansının etkilemektedir. Khale ve Chaudhary, pH 14 olan numunelerin ölçülen dayanımlarının

pH 12 olan numunelerin dayanımlarından beş kat daha fazla olduğu belirtmişler ve yüksek dayanımlı geopolimer için en uygun pH aralığı 13-14 olduğu sonucuna varmışlardır (Peterman v e Hammons, 2010).

Alkali ile aktive edilmiş çimento ürünlerin mekanik dayanımlarında tatmin edici sonuçlar gözlenirken, geopolimer üretiminin temel kaygısı uygun kür sıcaklığıdır. Çoğu uygulamalarında kür sorunu geopolimerin, pratik bir yapı malzemesi olup olmadığı sorusunu gündeme getirir.

Sodyum ya da potasyum silikatlar, sodyum veya  $\text{SiO}_2$ 'nin 1100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çözünen  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ya da  $\text{K}_2\text{CO}_3$  'ın yüksek basınç ve sıcaklık altında kaynaştırılması ile üretilen ve cam suyu adı verilen aktivatörlerdir. Cam suyu nadiren tek başına kullanılan bir aktivatördür. Çünkü aktivasyon potansiyeli tek başına puzolanik reaksiyonu başlatma için yeterli değildir. Bunun yerine NaOH ve KOH ile alkaliniteyi artırıp numunenin dayanımını artırmak için karıştırılır. Geopolimerleşme için en yaygın olarak kullanılan aktivatörler Sodyum hidroksit, potasyum hidroksit, sodyum silikat ve potasyum silikattır (Peterman ve Hammons, 2010).

Sodyum silikat çözeltisi, farklı derecelerde ticari olarak temin edilebilir. Ancak toz halinde sodyum silikat sıvı haldekine göre dayanımı düşürmektedir. En iyi sonuç veren karışımın  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 2 olan ve molaritesi 8-16 M aralığında ve kullanılmadan 24 saat önce hazırlanan silikat çözeltisi olduğu belirtilmektedir. Bu ürünün en önemli özelliği  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 1,5-3,2 aralığında satışı sunulmuş olmasıdır. Test sonuçları, az veya zayıf çözünen silikat içeren harçların basınç dayanımlarının, çok çözünebilen silikatlara göre belirgin şekilde düşük olduğunu göstermiştir. Bu tür silikatlar agrega yüzeyi ile bağlayıcı arasındaki ara yüzeyi güçlendirir. Bazı çalışmalar, artan sıcaklık etkisinde cam suyunun basınç dayanımını azalttığı, NaOH ve KOH 'un ise basınç dayanımını artırdığını göstermiştir (Peterman v e Hammons, 2010).

Geopolimer bağlayıcının özellikleri, aktivatörün sıvı içerisindeki yoğunluğuna, oranına ve bileşenlerin karıştırılmasına bağlıdır. Her ana bileşen ve bileşenin miktarı nihai ürünün özelliklerini etkilemektedir. Alkali aktivatörün oranı, başarılı bir geopolimer oluşumu ve yüksek basınç dayanımı için en önemli faktördür. Her

durumda, aktivatör oranının artması reaksiyon hızını, geopolimerin gözenekliliğini ve güçlü bir bağlayıcı malzeme oluşumunu etkiler. Aktivatör miktarının artması uçucu kül tabanlı geopolimerlerde gözenekliliği düşürmektedir. Böylece harç numunelerin erken dayanımları artmaktadır. Aktivatör oranının etkisi zamanla artar. Aktivatörün nominal molaritesi uçucu küllü karışımlarda 2-10 M dür. Aktivatör oranı miktarı arttıkça dayanımı artar (Peterman v e Hammons, 2010).

Genellikle yüksek aktivatör oranının yüksek dayanıma sebep olduğu kabul edilirken her aktivatör için optimum bir sınır vardır. 10 M KOH ile oluşturulmuş örnekler 60 MPa basınç dayanım gösterirken, oran 15 M'a çıkarıldığında basınç dayanımı düşmüştür. Aktivatör oranının, karışımın doyma noktasını aştığı ve reaksiyona girmemiş  $K^+$  iyonlarının dayanımı düşürdüğü düşünülmektedir. Sonuç olarak aktivatör oranının yüksek olması zamanı ayarlama, iyonların fazlalığı, onların hareketliliğini ve ortamdaki etkileşmelerini kısıtlamaktadır. Bu nedenle, bir karışımdaki oranlar net bir şekilde belirlenmelidir.

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalsine killer gibi puzolanların seçilen aktivatör ile oranları geopolimerin bazı kritik özelliklerini etkilemektedir. Genel dayanım bu özellik tarafından etkilenmektedir. Genellikle alkali sıvı/uçucu kül oranı 0,30-0,45 aralığında tavsiye edilmektedir. Alkali/ uçucu kül oranı 0,40 ve 5 M oranına sahip deneylerde yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Uçucu kül/aktivatör oranının geopolimer pastaların basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık direnci üzerinde etkilidir (Peterman v e Hammons, 2010).

Tek başına NaOH miktarının karışım içerisinde artırılması, basınç dayanımını artırmaktadır. Bunun yanı sıra her maddenin diğeri madde ile oranına da dikkat edilmelidir. Laboratuvar deneylerinde kütlece  $Na_2SiO_3/NaOH$  oranın 2,5 civarında ayarlanması gerektiği tecrübe edilmiştir.

$SiO_2/Na_2O$  oranı geopolimer tasarımında çok önemli bir parametredir.  $SiO_2/Na_2O$  oranındaki değişimler polimerleşmeyi önemli oranda değiştirir. Böylece ürünün mekanik özellikleri ve jel yapısındaki değişiklikler de meydana gelir. Yüksek silis yüzdesine sahip polimer sistemler, silis iyonları, uçucu külün çözülmesini geciktirir.



Kısa aralıklarla çözünebilir silis miktarının artması yüksek mekanik dayanımın artmasını sağlarken uzun kür süreleri de dayanımı artırır. Çözünür silisin varlığı reaksiyon hızını doğrudan etkiler. Kristalleşme hızı ve ortamdaki Si varlığı malzemenin dayanım gelişimi üzerinde etkilidir (Peterman ve Hammons, 2010).

Geopolimerin basınç dayanımı ve dayanım gelişimi üzerindeki en önemli faktörlerden birisi pH aralığının 13-14 aralığında olmasıdır. Aktivatörün oranının artması pH derecesini ve reaksiyon hızını artırır. Puzolanik reaksiyonun artması ile reaksiyona girmeyen malzeme boşluk yapısı azalmış daha yoğun ve güçlü bir matris oluşur. pH aynı zamanda karışım viskozitesini etkiler. Daha düşük pH ise pH viskozitesini azaltır ve daha yapışkan ve macun kıvamlı bir malzeme oluşmasına neden olur. Yüksek pH monomer zincir oluşumuna yardımcı olurken düşük pH düşük monomer yapı oluşturur (Peterman ve Hammons, 2010).



## **BÖLÜM 3. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ÇALIŞMALARI**

### **3.1. Uçucu kül içeren alkali aktive edilmiş harçlarla ilgili çalışmalar**

Geopolimer betonlar, uçucu kül, taban külü ve yüksek fırın cürufu gibi silis ve alüminli malzemelerin  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  ve  $\text{KOH}$  gibi alkalilerle aktivasyonu ile üretilmektedir. Öğütme, kür sıcaklığı ve süresi, alkali tip ve miktarı geopolimerlerin özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerdir (Barbosa ve ark., 2000).

Alkali aktivasyonu ile uçucu külden bağlayıcı elde edilmesinde en uygun uçucu külün özellikleri; çözünmeyen kalıntının %5'in altında olması, serbest kireç miktarının düşük olması, reaktif silika miktarının % 40-50, 45 mikron elek altı kül miktarının % 80-90 arasında olması, uçucu külün camsı yapı oranının yüksek olması şeklinde sıralanmaktadır (Aydın, 2010).

Araştırmacılar, alkali aktivasyonunun alkalinin pH derecesi, uçucu kül ve su oranına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Uçucu kül içindeki reaktif silikanın büyük bölümü camsı yapıya sahip alüminosilikat ve kalsiyum alüminosilikatlarda bulunur. Reaktif olmayan silika ise quartz ve kristal yapıdaki alüminosilikatlarda bulunur. Havada soğutma (yavaş soğutma) uçucu külden kristal yapı oluştururken, suda soğutma (hızlı soğutma) amorf yapı oluşturmaktadır (Türker ve ark., 2009).

Çimento pastası sertleştiğinde yapısında su bulunan C-S-H jelleri içerdiği için refrakter malzeme yapımında bağlayıcı olarak kullanılamamaktadır. Geopolimerlerin ana yapısı olan N-A-S-H jellerinde ise su bulunmamaktadır. Geopolimerlerde karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirlik için kullanılmakta, geopolimerin kuruması sırasında geopolimer içerisinde süresiz ve küçük boşluklar bırakarak geopolimeri terk etmektedir. Bu durum geopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın direnci gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır (Rangan, 2008).

Tokyay ve Ayturan (2010), NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  kullanarak ürettikleri ve  $65\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 gün beklettikleri geo harçlarda 2,3 MPa ile 39,6 MPa arasında değişen basınç dayanımları elde etmişlerdir. Oda sıcaklığında ise 2 günde dayanım elde edilememiştir. Kütlece % 4  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren ve  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 0,75 olan karışım 7 MPa basınç dayanımı verirken,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranının 1,25'e çıkması dayanımı 16 MPa'ya çıkarmıştır. Kütlece % 5  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren karışımlarda ise  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 0,75 ve 1,25 için basınç dayanımları sırasıyla 22,1 ve 29,6 MPa olmuştur.

Jueshi ve arkadaşları (2001), karışımında % 84 kül, % 13 kireç ve % 3  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  bulunan, 20 MPa basınçla sıkıştırılan ve  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 'de bekletilen geopolimer tuğlaların 28 günlük basınç dayanımını 13 MPa olarak bulmuştur.

Fernandez ve arkadaşları (2005), 8 M NaOH veya (% 85 12,5 M NaOH + % 15  $\text{NaSiO}_2$ ) alkali çözeltileri ile aktive ettiği F tipi uçucu küllerde 20 saat  $85\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kür ile bir günlük basınç dayanımı 70-80 MPa olan betonlar üretmeyi başarmıştır.

Ryu ve arkadaşları (2013), çalışmalarında alkalilerle aktive edilen uçucu küllü betonların mekanik özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül ile aktivatör olarak Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sodyum Silikat kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere önce 24 saat süreyle  $60\text{ }^\circ\text{C}$  fırında, ardından havada 24 saat süreyle  $23\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kür uygulanmıştır.  $50\times 50\times 50\text{ mm}$ 'lik prizmatik numunelere basınç dayanımı deneyi uygulanmış ve yüksek NaOH oranlarında erken basınç dayanım değerinin arttığını gözlemlenmiştir.

Rashad ve Zeedan, 2010 yılında yaptıkları çalışmada, uçucu külü ağırlıkça %20, %30 ve %40 oranlarında sodyum silikat ile aktive etmişlerdir. Daha sonra numuneleri  $200\text{ }^\circ\text{C}$  ila  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  arasında değişik sıcaklıklara maruz bırakmışlar, X ışınımı kırınım testi (XRD), Termogrametrik analiz (TGA), diferansiyel termal analiz (DTG) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizlerini yapmışlardır. Yüksek sıcaklıklardaki bozulmaların portland çimentolu sistemlere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sertleşmiş alkali aktive edilmiş uçucu küllü hamurlarda aktivatör oranı arttıkça, sıcaklık uygulanmış numunelerdeki basınç dayanım değerinin düştüğü gözlenmiştir. Aktivatör oranı arttıkça, termal sıcaklık dayanımı azalmış, pH derecesi normal

Portland çimentolu hamurlarda hafif düşerken, Alkali aktive edilmiş uçucu küllü hamurlarda 600 °C'den sonra düşme eğilimi olduğu tespit edilmiştir. Alkali oranı arttıkça pH değerinin arttığı belirlenmiştir.

Vargas ve arkadaşları (2010), çeşitli oranlarda NaOH ve Ca(OH)<sub>2</sub> kombinasyonu kullanarak, bütün numunelerde Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> =0,3 olarak uygulamışlardır. Sırasıyla 0,05- 0,15 ve 0,25 CaO/SiO<sub>2</sub> molar oranlarını kullanarak M5, M15, M25 kodlu numuneler hazırlamışlardır. M25 karışım oranında 7 günde 30 MPa basınç dayanımı, 28 ve 91. günde ise 22 MPa ve 16 MPa basınç dayanım değeri ölçülmüştür. M15 karışım oranlarında da benzer basınç dayanım düşmesi gözlenmekle birlikte M5 karışım oranlarında ilerleyen zamanlarda basınç dayanımının biraz arttığı gözlenmiştir. SEM taramasında M5 kodlu numunelerde sertleşmiş alüminosilikat jeli gözlenirken, M25 kodlu numunelerde 28. günde, daha zayıf bir malzeme olan süngerimsi alüminosilikat jeli gözlenmiştir. Basınç dayanımının zamanla azalmasının sebebinin C/S ve C/N oranlarıyla ilgili olduğunu belirtmişlerdir.

Motorwala ve arkadaşları (2013), uçucu küllü sırasıyla 10 M, 12 M, 14 M, 16 M, oranlarında KOH ile Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH ile aktive ederken süperakışkanlaştırıcı katkı kullanmışlardır. Su/ bağlayıcı oranının 0,40 olarak belirlendiği ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/ NaOH oranının 2,5 olarak alındığı 80 °C'de kür edilen numunelerden 14 M olanlar 7. günde 26.67 MPa basınç dayanımına ulaşmışlardır. Numunelerde uygulanan 30°C- 90°C arasındaki kür sıcaklığındaki artışların basınç dayanımını artırdığını belirtmişler, aynı zamanda 4-96 saat arasında değişen kür sürelerindeki artışın da basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini kaydetmişlerdir. Plastik ile sarılan ve nemini en iyi koruyan numunelerin en yüksek basınç dayanım değerine ulaştığını tespit etmişlerdir.

Chi ve Huang yaptıkları bir çalışmada (2012), değişik oranlarda uçucu kül ve cüruf karışımlarını sıvı sodyum silikat ile aktive ederek, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme ve kuruma büzülmesi deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Ağırlıkça %4 Na<sub>2</sub>O ve % 6 Na<sub>2</sub>O oranlarına karşılık Ms=1 olan ve su/bağlayıcı oranı 0.50 olan 2 grup numune hazırlamışlardır. Deney sonuçlarında, cüruf/uçucu kül oranı ve aktivatördeki ağırlıkça Na<sub>2</sub>O oranının bağlayıcılık üzerinde etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Cüruf ve uçucu külün aktivasyonu sonucu oluşan hidrasyon ürünlerini SEM ve XRD ile

incelemişler, amorf alkali alüminosilikat ve düşük kristalli kalsiyum silikat jeli gözlemlemişlerdir. Geopolimerlerin, kuruma büzülmesi dışında, basınç ve eğilme dayanımı, su emme özelliklerinde, portland çimentolu karışımlardan daha olumlu sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Aktive edilmiş harçtaki  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının artması bağlayıcı mekanizmasını geliştirmiştir. Optimum karışım oranını uçucu kül/cüruf oranı 0.50,  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarı % 6 olarak bulunmuş, su emme oranın ise çimentolu numunelerden daha az olduğu gözlenmiştir.

Oh ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı olan ve 2 ayrı tesisten tedarik edilen F sınıfı uçucu külü NaOH ile  $60^\circ\text{C}$ 'de ve 0,60 sıvı/bağlayıcı oranında aktive ederek 1 ve 28 günlük basınç dayanımlarını incelemişlerdir. FA1 ile kodlanan uçucu külün Si/Al oranı 3, Ca/Si oranı 0,1 dir. FA2 ile kodlanan uçucu külün Si/Al oranı 2,6 ve Ca/Si oranı ise 0.40 olup 1 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri ve uçucu küllerin tane dağılımlarını tespit etmişlerdir. Uçucu küllerin XRD analizi tane dağılımı analizi testi XRF ve nano görüntüleme işlemleri yapılmıştır. Sonuç olarak; FA1 kodlu uçucu külle üretilen numunelerin FA2 kodlu uçucu küllerle üretilen numunelerden 1 ve 28 günlük basınç dayanım değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun sebeplerini ise, yüzeyi oyuklu tanecikleri olan FA2 kodlu uçucu külün, düz ve dolu yüzeyli taneciklere sahip FA2 uçucu külünden daha reaktif olduğunu, uçucu külde inceliğin arttıkça geopolimerleşme mekanizmasının daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir.

Yapılan bir diğer çalışmada, uçucu külle aktive edilmiş harç içerisine gömülmüş, İspanya'da üretilen düşük nikelli AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 650 gün sonraki korozyon davranışını gözlemlenmiştir. Çalışmada, uçucu külü 8 M NaOH ile karıştırarak harç numuneleri oluşturulmuştur. Bu harçla  $8,5 \times 5,5 \times 2$  cm boyutlarındaki plakların içerisine çapı 10 mm ve uzunluğu 10 mm olan östenitik çelik yerleştirilerek 20 saat ve  $80^\circ\text{C}$ 'de aktive edilmiştir. 28 gün laboratuvar ortamında ve atmosferde, 60 gün oda sıcaklığında %65 nemli ortamda, geri kalan sürede toplam 650 gün NaCl içeren çözelti içerisinde bekletilen numunelere pH değeri 9,5 olan korozyona sebep olabilecek ortam oluşturulmuştur. İlk 150 gün 0,2 M NaCl ile başlayıp, daha sonra 0,4 M oranına çıkılarak deneylere devam edilmiştir. Deney sonunda Alkali aktive edilmiş harçlarda ve Portland çimentolu harçların içinde kalan çeliklerin yüzeyinde hafif

karıncalanma gözlenmiştir. Alkali aktive edilmiş harçlar ve portland çimentolu harçlardaki klor geçirgenliğinin benzer olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca alkali aktive edilmiş harçların karbonatlaşmaya karşı, geleneksel harçlardan daha dirençli olduğunu belirtilmiştir (Monticelli ve ark., 2014).

Silva ve arkadaşları (2013), uçucu külü sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı aktivatörlerle 5 saat 80°C’de aktive ederek 28 gün sonra basınç dayanımı 24 MPa olan yol kaplama parkesi imal etmişlerdir.

Zhu ve arkadaşları (2014), alkali aktive edilmiş uçucu küller ile portland çimentolu hamur ve harçların klorür geçirgenliğini incelemişlerdir. Çalışmada kaba uçucu kül ile % 0- % 40 arasında değişen oranlarda granüle yüksek fırın cürufunu yer değiştirerek ürettikleri 0,6-0,8 su/bağlayıcı oranlarında Ms oranı 1 olan sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımını 40 °C’de aktive etmişlerdir. 20 °C’de ve 65 °C’de 1 gün ve 2 gün kür ettikten sonra 14 gün bekletip 20×20×20 cm boyutlu numunelerin mekanik dayanımını ve 20/80 mm silindir numunelerin klorür geçirgenliğini incelemişlerdir. Sonuç olarak, suya doygun olmayan alkali aktive edilmiş uçucu küllü hamur ve harçların, Cl<sup>-</sup> geçirgenliğinin, Portland çimentolu hamur ve harçlardan daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. Klorür geçirgenliğinin ve porozitenin, su/bağlayıcı oranı ve cüruf ile ikame miktarına bağlı olduğu, su/toplam katı oranı 0.41’den 0.32’ye indiğinde porozitenin azaldığı, buna bağlı olarak klor geçirgenliğinin de azaldığı gözlenmiştir. %20-%40 arası cüruf yer değiştirmesinin poroziteyi çok etkilemediği fakat klorür geçirgenliğini azalttığı belirtilmiştir.

Criado ve arkadaşları (2009), sodyum sülfatın alkali aktive edilmiş uçucu kül üzerindeki etkisini incelemiştir. F sınıfı uçucu külü sırasıyla; 8 M ve %85 NaOH, 10 M ve %85 sodyum silikat, sodyum silikat ve katı NaOH olmak üzere oluşturdukları 3 ayrı karışımla aktive etmişlerdir. 1×1×6 cm’lik prizma numuneleri 85 °C’de 8 saat kür edildikten sonra 7, 28 ve 180 günlük dayanımlarını incelenmiştir. Numunelerin karışım harmanı içerisine ağırlıkça % 2,5 sodyum sülfat ilave edilmiştir. Yapılan XRD analizlerinde, N-A-S-H jel oluşumları gözlenmiştir. Sodyum sülfatın varlığı, uçucu külün aktivasyonunu engellemektedir. Bununla birlikte ortamda çözünür silis içeriği arttıkça, reaksiyonun mekanik dayanım üzerindeki etkisinin azaldığı gözlenmiştir.

Sülfatın varlığında, yeni bileşimlerin oluşumu gözlenmemiştir. Bunun yanı sıra gözenek içerisindeki sülfat iyonlarının alüminosilikatlar üzerinde olumsuz etki yaptığı N-A-S-H jel oluşumunu geciktirdiği belirtilmiştir.

Jang ve arkadaşları (2013), süperakışkanlaştırıcı katkı içeren alkali aktive edilmiş uçucu kül/cüruf hamurlarının taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini incelemiştir. Çalışmada uçucu kül/cüruf oranı sırasıyla 0, 0,3, 0,5, 0,7 ve 1 oranlarında karıştırılarak, NaOH ve sodyum silikat ile aktive edilmiş, karışım içerisine bağlayıcı ağırlığının %0, %1, % 2, % 3 ve % 4'ü oranında polikarboksilat ve naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı konularak, oda sıcaklığında kür etmişlerdir. Deneyle sonunda cüruf içeriği fazla olan alkali aktive edilmiş hamurun basınç dayanımının yüksek olduğu, fakat %70 ve %100 cüruf içeren karışımlarda otojen rötre nedeniyle hızlı çatlak oluşumu gözlenmiştir. Polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı, alkali aktive edilmiş uçucu kül ve cüruf ihtiva eden numunelerin katılma özellikleri üzerinde geciktirici etki yapmıştır. SEM ve EDS test sonuçlarında, daha fazla cüruf içeren numunelerde hidratasyon ürünlerinin yoğun bir matris oluşturduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte süperakışkanlaştırıcı ilavesi, hidratasyon ürünlerinin artışına katkı sağlamamıştır.

Kumar ve arkadaşları (2014), uçucu kül tane dağılımının geopolimer davranışı üzerine etkisini incelemiştir. Sırasıyla, 40,47 µm, 23,64 µm, 10,33 µm ve 2,98 µm inceliğe sahip uçucu külleri 6 M ve % 98 saflıktaki NaOH ile 60°C'de kür etmişlerdir. Isı iletim kalorimetresi (ICC), ve XRD, SEM ve fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılarak yapılan mikroyapı incelemelerinde, uçucu külün silis içeriği ile geopolimer arasında bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Ortam sıcaklığında ve yükseltelen sıcaklıklarda SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı, tanecik boyutu ve silis içeriğinden etkilenmektedir. SEM/ EDS çalışmaları en iyi tane dağılımlarının en iyi reaksiyon ürünü verdiğini, kaba karışımlarda reaksiyona girmeyen parçacıkların olduğunu tespit etmişlerdir.

Marjanovic ve arkadaşları (2013), dört değişik enerji tesisinden aldıkları F sınıfı uçucu külü sodyum silikat ile 95 °C'de 4 saat süreye kadar aktive etmişler, uçucu kül aktivasyonunun 15 dakikalık bir süre içerisinde belirgin bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Bu durumu mekanik dayanımdaki artışla desteklemişlerdir.

Sarker ve arkadaşları (2014), F sınıfı uçucu külle, 100 mm x 200 mm silindir biçiminde geoplomer numuneler üreterek, numunelerin, yangın dayanımı, çatlama ve pullanma özellikleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kullanılan uçucu külün % 75'i 45 mikron elekten geçmektedir. Aktivatör olarak da sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Portland çimentolu numunelerine suda kür, geopolimer betonlarına 60 °C ve 80 °C'de buhar kürü uygulamışlardır. Portland çimentosu ve geopolimer betonunu 1000 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yangına tabi tutmuşlar ve basınç dayanımlarını 39-58 MPa arasında tespit etmişlerdir. Sıcaklığa maruz kaldıktan sonra Portland çimentolu betona göre uçucu küllü geopolimer betonunun daha az hasar gördüğünü tespit etmişlerdir. Bununla birlikte 800-1000 °C sıcaklıkta çimentolu betonlarında belirgin pullanmalar görülürken, geopolimer betonda kabarma saptanmamıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerinde, sıcaklık artışı ile mikro yapıda hasar olduğu gözlenmiştir. Geopolimer betonunun hasar görmesindeki başlıca sebep olarak agrega ve geopolimer matrisinin sıcaklıkla farklı genişmesi olarak belirtmişlerdir.

Hlavacek ve arkadaşları (2014), gazbeton üretiminde kullanılan inorganik köpük yerine, alkali aktive edilmiş uçucu kül kullanarak, uçucu kül tabanlı köpük üretmişlerdir. Uçucu külü NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile aktive ederek basınç dayanımı, eğilme, ısı iletkenlik kapasitesi, yüksek sıcaklık davranışı ve kimyasal etkilere karşı direnç özelliklerini incelemişlerdir. Mekanik dayanımın gaz betonla benzer özellik gösterdiğini, üretilen numunelerin yoğunluğunun 400-800 kg/ m<sup>3</sup> arasında değiştiğini belirtmişlerdir. 1100 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda direnç göstermenin yanı sıra, yüksek büzülme ve malzeme sinterleşme durumu tespit edilmiştir. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, NaCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ve HCl gibi kimyasal etkiler karşısında gözlemlenen kimyasal dayanıklılığın, kapalı gözenekli yapı ve kalsiyumdan kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir.

Jun ve arkadaşları (2013), 6 değişik F sınıfı uçucu külü NaOH ile aktive ederek, basınç dayanımı deneyi, XRF, XRD ve SEM/EDS analizlerine tabi tutmuşlardır. Orjinal uçucu küllerin XRD ve XRF verilerinde büyük değişiklik olmamasına rağmen, aktivasyon sonunda değişik reaksiyon ürünleri oluşturdukları gözlenmiştir. Alüminyumca zengin şabazit içeren numunelerin, alüminyum-sodyum içeren zeolitli



numunelerden daha yüksek basınç dayanım değeri verdiğini tespit etmişlerdir. Uçucu küllerde Si/Al atomik oranı arttıkça basınç dayanımının arttığını belirtmişlerdir.

Komljenovic ve arkadaşları (2009), 6 değişik F sınıfı uçucu külü, 3/1 kum/bağlayıcı oranında; kireç+uçucu kül ve sadece uçucu kül içeren karıştırarak NaOH ve NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, KOH ve nSiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O gibi çeşitli aktivatörlerle aktive ederek numuneler hazırlamışlardır. 43 µm altında tanecikleri fazla olan uçucu küllerin, basınç dayanımının en yüksek değeri verdiğini tespit etmişlerdir. Uçucu küllerin karakteristikleri ne olursa olsun aktivasyon sonucu tamamının amorf yapıda olduğunu gözlemlemişlerdir. En yüksek dayanımın sodyumsilikat içeren aktivatör ile elde edildiğini, bunun yanında SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O kütle oranı ve Si/Al atomik oranı arttıkça basınç dayanımının arttığını, yüksek basınç dayanımının direct olarak Si/Al atomik oranıyla ilgili olduğunu belirlemişlerdir.

Shi ve arkadaşları (2012), F tipi uçucu külü sırasıyla, % 0, % 50, % 100 oranlarında geri dönüşüm agregası içeren 4,75 mm altındaki agrega kullanarak Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH karışımı aktivatörlerle 80 °C'de 24 saat süreyle kür ettikten sonra numunelerin SEM, EDX analizlerini yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır. Çimento yerine uçucu kül kullanımı, basınç dayanımını olumlu etkilemiş, geri dönüşüm agregası kullanımı hem Portland çimentolu numunelerde hem de geopolimer numunelerde basınç dayanımını düşürmüştür. Geri dönüşüm agregalı numunelerde arayüzey dayanımının zayıfladığını, bunun yanında alkali aktive edilmiş uçucu külün varlığının Portlandit (Ca(OH)<sub>2</sub>) varlığını ve içyapı boşluklarını azalttığını tespit etmişlerdir. Mikro yapıda alüminosilikat jel gibi değişik reaksiyon ürünleri gözlemlemişlerdir.

Changming ve diğerleri (2014), Çin'in kuzeybatı bölgesi'nde bulunan Pisha ismiyle anılan kumtaşının, geopolimer üretimi için uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Uçucu külü NaOH ile 80 °C'de 24 saat kür ederek numune üretmişler, 90. günde ağırlıkça % 13,8 uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımlarını 20,3 MPa olarak tespit etmişlerdir. Üretilen geopolimerin yapısında C-S-H jeli görmüşler, Pisha kumtaşının geopolimer üretimi için ucuz ve güvenilir bir inşaat malzemesi olabileceğini ifade etmişlerdir.

İsmail ve arkadaşları (2013), yüksek fırın cürufuna uçucu kül katılmasıyla oluşan faz evrimini inceledikleri çalışmalarında; aktivasyon sonucu doğal jel oluşumunu cüruf/uçucu kül oranı ile bağlayıcının kimyasal ve mineralojik oranlarındaki değişime bağlamışlardır. C-S-H jelinin Al ve Na içeren (C-N-A-S-H) olarak tanımlanan reaksiyon ürününe dönüştüğünü belirtmişlerdir. Cüruf/ uçucu kül oranı azaldıkça porozitenin azaldığı ve jelin C-A-S-H durumdan N-C-A-S-H jeline geçiş gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Somna ve arkadaşları (2010), taban külünü 4,5 M ve 16,5 M NaOH ile oda sıcaklığında aktive ederek geopolimer hamur ve ortalama tane büyüklüğü 10.5 µm olan agrega karışımıyla geopolimer harç üretmişlerdir. Taban külü ile oluşturulan geopolimer hamurun, orjinal uçucu küle oluşturulan geopolimer hamurdan basınç dayanımının daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. Taban külünün, oda sıcaklığında kür edilebilecek geopolimer için kaynak bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Molaritenin 4.5'ten 14'e çıkmasıyla hamurun basınç dayanımının arttığı, 12M-14M aralığında yeni sodyum- alüminosilikat jellerin oluştuğunu belirtilmiştir. 28. günde basınç dayanım değerini 20-23 MPa olarak gözlemlemişler, sodyum oranının artmasının erken yaşlardaki alüminosilikat ürünleri oluşması nedeniyle dayanımı azalttığını tespit etmişlerdir.

Ariffin ve arkadaşları (2013), uçucu kül ve palmye yağı külü ile edilmiş geopolimer betonlarını 18 ay süreyle % 2 sülfirik aside maruz bırakarak durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, basınç dayanım, kütleli değişim ve mikro yapıdaki bozulmalar incelenmiştir. Çalışmada Malezya'dan elde edilen uçucu kül ve palmye yağı külü 45 mikron altında kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Agrega olarak 2,62 ve 2,68 özgül ağırlıklı yerel granit kumu kullanılmıştır. Ayrıca işlenebilirliği artırmak için süper akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanmışlardır. 100x100x100 mm ebatlarında küp numuneler üreterek oda sıcaklığında 28 gün bekletilmiştir. Sonuç olarak, 18 ay sonunda Portland çimentolu numunelerin kütle kaybı %20, uçucu küllerle yapılan geopolimer betonun kütle kaybı %8 olarak tespit edilmiştir. Basınç dayanım kaybı geopolimer betonunda % 35 olarak ölçülmüş, Portland çimento ile üretilen betonunda basınç kaybı oranı % 68 olarak

ölçülmüştür. Portland çimento ile üretilen betonunda bozulmanın daha fazla olduğu bunun da kalsiyumdan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Cristelo ve diğerleri (2013), alkali aktive edilmiş uçucu küllerin jet grout uygulamasındaki reolojik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  karışımından oluşan aktivatörler ile hazırlanmış alkali aktive edilmiş uçucu küllü jet grout olarak isimlendirdikleri geoplomeri toprak içerisine yerleşmişlerdir. Karışımın akışkanlık, kılcal su emme, büzülme ve genleşme davranışlarını incelemişler, 28 günlük basınç dayanım değerini test etmişlerdir. Akışkanlık artışının erken dayanımı artırdığını, fakat zamanla azalttığını gözlemlemişlerdir. Portland çimentosu ile oluşturulan grouttan daha düşük boşluk oranına sahip toprak/grout elde etmişlerdir. Üretilen alkali aktive edilmiş groutun, Portland çimentolu grouttan kuruma rötresi değerlerinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Bignozzi ve arkadaşları (2014), oda sıcaklığında aktive edilen uçucu küllerde  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  oranının etkisini araştırdıkları çalışmalarında, 2 ayrı tip uçucu külü,  $\text{NaOH}$ 'le sırasıyla 0.12 ve 0.20  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  molar oranlarıyla karıştırarak aktive etmişlerdir. Geopolimerin taze ve sertleşmiş durumdaki davranışının, uçucu külün tipi, tane dağılımı, mineralojik kompozisyonu ve artan sodyum silikat karışım oranlarıyla etkileniğini belirtmişlerdir.

Lee ve diğerleri (2014), alkali aktive edilmiş uçucu kül/ cüruf hamuru ve harçların erken yaşlardaki rötre karakteristiklerini inceledikleri çalışmalarında, numunelerin kimyasal, otojenik ve kuruma rötrelere gözlemlemişlerdir. Cüruf oranının artmasıyla içyapı da C-N-A-S-H jelin oluştuğunu belirtmişlerdir. Taze haldeyken görülen kimyasal rötre, sertleşme ile birlikte otojen rötreye dönüşmüştür. Alkali aktive edilmiş uçucu kül ve cüruf karışım hamurların, normal Portland çimentolu hamurlardan daha fazla kuruma rötresi gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Görhan ve Kürklü (2014), yaptıkları bir çalışmada, Kütahya Seyitömer Termik Santrali F sınıfı uçucu külünü kullanarak geopolimer betonu üretmişlerdir. Aktivatör olarak, 3M, 6M ve 9M sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisi ile 65 ve 85 °C sıcaklıklarda numuneleri 24 saat kür etmişlerdir. 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. Kür süresi ve aktivatör oranı arttığında boşluk oranının azaldığını, 65 °C sıcaklıkta bir değişiklik olmamasına rağmen kür süresinin artmasıyla 85 °C kür sıcaklığında yoğunlukta artış olduğunu gözlemlemişlerdir. En yüksek basınç dayanımını 6M NaOH ile üretilen geopolimer betonunda tespit etmişler ve 22 MPa basınç dayanımına 24 saat 85 °C kür sıcaklığında ulaşmışlardır.

Chi (2015), sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat aktivatörleri  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 0,80 ve 1,23, sıvı/bağlayıcı oranı 0,35, 0,50 ve 0,65 kum/bağlayıcı oranı 2,75 olan değişik kombinasyonlarda karışımlar üretmiştir. Numunelerin basınç dayanımı, rötre, su emme, ilk yüzey emilim testi, civalı gözenek testi (MIP), taramalı elektron mikroskobu ve X ışınları difraktometersi analizlerini yapmıştır. Test ve analizleri normal portland çimentolu kontrol numuneleri ile karşılaştırmış,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı ve alkalin modülünün, alkali aktive edilmiş harçların özelliklerini etkileyen iki önemli faktör olduğunu ifade etmiştir. En yüksek alkali oranı ve  $\text{Na}_2\text{O}$  dozajında en üstün özellikli harcı elde ettiğini, alkaline modülü 1,23 sıvı/bağlayıcı oranı 0,60 ve  $\text{Na}_2\text{O}$  dozajı 150 kg/m<sup>3</sup> olan optimumum karışım olduğunu kaydetmiştir. SEM ve XRD analizlerinde, harçların aform alümina silikat jel içerdiğini gözlemlemiştir.

Leong ve arkadaşları (2016), uçucu kül ile  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$  veya  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$  gibi değişik alkali aktivatör karışımlarını bir arada kullanarak,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  oranının alkali aktive edilmiş uçucu küllü harçlarda basınç dayanımına etkisini incelemişlerdir. Yüksek molar oranının mutlaka yüksek basınç dayanımı vermediği sonucuna varmışlardır.  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$  ağırlık oranlarının NaOH ve KOH tabanlı geopolimerlerin basınç dayanımları üzerinde farklı etkileri olduğunu tespit etmişlerdir. NaOH içerisindeki  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$  nun azaltılması, KOH tabanlı geopolimer içerisinde  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  kullanılması dayanım kapasitesini artırmıştır.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tabanlı geopolimerde  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$  yüksek basınç dayanımı ve işlenebilirlik sağlarken NaOH ve KOH tabanlı geopolimerlerde daha zayıf dayanıma sebep olmaktadır.  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  'nun NaOH ve KOH tabanlı geopolimerlerde dayanım gelişimi için en önemli alkali oksitler

olduğu, bununla birlikte  $K_2O$  miktarının KOH tabanlı geopolimerde dayanımı artırması için  $Na_2O$  miktarının azaltılması gerektiğini bulmuşlardır.

Juanid ve arkadaşları (2015), F uçucu külü  $Na_2SiO_3$  ve NaOH ile aktive ederek harç üretimini sistematik bir yaklaşımlar ele almak için birtakım çalışmalar yapmışlardır. Literatürde su/ geopolimer oranı ve aktivatör/uçucu kül oranının basınç dayanımı ve işlenebilirlik üzerine direk etkisi olduğunun belirtildiğini, sıvı alkali/su oranın geopolimerin dayanımına en etkili faktör olduğunu ifade etmişlerdir.

Ma ve Y (2015), değişik oranlarda F tipi uçucu Külü NaOH ile aktive etmiş, 40 °C de 7 gün boyunca ısı işlem uygulayarak geopolimer pasta üretmişlerdir. Ürettikleri geopolimeri normal çimento pastası numunler ile karşılaştırarak otojen rötre ve kuruma rötresi değerlerini incelemişlerdir. Yüksek  $Na_2O$  ve  $SiO_2$  içerikli numunelerin en yüksek otojen rötre ve kuruma rötrelerisi gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte en yüksek otojen rötre 1-3 gün arasında gözlenmiş, suyun bir reaksiyoncu olmadığını fakat ortamda bulunduğunu belirtmişlerdir. Deney sonuçları alkali aktive edilmiş harçların otojen büzölmeye neden olmadığını fakat sürekli ve yeniden alimına silikat yapının polimerleştiğini göstermiştir. Alkali aktive edilmiş pastalarda yüksek bir ağırlık kaybı ve kuruma büzölmesi tespit edilmiştir. Mikroyapı özellikleri farklı karışımdaki alkali aktive edilmiş harçların farklı kuruma büzölmesine yol açtığını desteklemektedir.

Yapılan bir çalışmada, F tipi uçucu külün alkali aktivasyonunda aralıklı kür uygulamasının etkisini araştırmışlardır. NaOH ve  $Na_2SiO_3$ 'ü değişik oranlarda içinde ilave su olan ve olmayan karışımlar olarak tasarlamışlardır. Numunelerin kür yöntemi olarak 6 saat 70 °C de ısı işlem uygulanan numuneler 18 saat ortam sıcaklığında bekletilmiş böylece bir döngü sağlanmışır. Aralıklı kür, toplam dört döngü olarak tekrarlanmışır. Sabit kül ve kum oranında yirmibir farklı geopolimer karışımı hazırlanmışır. 24, 48, 72, 96 saat ve 7 gün sonundaki basınç dayanımları test edilmiştir. Her bir aralıklı kür döngüsü içinde tüm numunelerin basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. 13 geopolimer karışımı 27 MPa dayanımı aşmışır. Aralıklı kür yönetimi, kullanılan sodyum silikatın artan yoğunluğu, NaOH'un molaranı, alkali/uçucu kül oranı, bekletme periyoduna,  $SiO_2/Na_2O$  ile orantılıdır. Yine

de kullanılan su içeriği,  $H_2O/Na_2O$  mol oranı ve su/ katı oranı ile ters orantılıdır (Helmy, 2016).

Geopolimer teknolojisindeki son yeniliklerden birisi de geopolimer matris içerisine köpük yapıcı maddeler katarak çok gözenekli polimer esaslı köpük üretmektir. Bu köpük yapıcı maddeler, geopolimer içerisindeki oksijen ile birleşerek sertleşme öncesi karışımda oksijenin dışarı çıkmasını ve gözenekli bir yapı oluşmasını sağlarlar. Sertleşmiş yapı iyi mekanik ve termal özelliklere sahiptir. Bu nedenle aküstik malzemeler, termal paneller ve hafif prefabrik elemanlar üretmek için uygundur (Ducman ve Korat, 2016).

Uçucu kül içeren alkali aktive edilmiş betonların reaksiyonu üzerinde birtakım etkenler vardır. Bunların içinde, uçucu kül kaynağının fiziksel ve kimyasal özellikleri, karışımın yüksek fırın cürufu içermesi, kimyasal aktivatörlerin dozajı ve kür sıcaklığı gibi faktörler sayılabilir. Alkali aktive edilmiş uçucu küllü harçların dayanım kazanabilmeleri için uygun sıcaklık ve yüksek alkali oranının sağlanması gerekir.  $NaOH$  ve  $Na_2SiO_3$ 'ün karıştırılması ile yapılan bir çalışmada 28 günde 70 MPa basınç dayanımı elde edilmiş ve mikroyapı incelemesinde reaksiyon ürünleri olarak C-A-S-H Jele sodyum eklenmiş yapı gözlenmiştir. (Soutsos ve ark., 2016).

Geri dönüşüm agregasının alkali aktive edilmiş uçucu küllü betonların içerisinde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bir çalışmada, sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı aktivatör olarak kullanılmıştır. Geri dönüşüm agregasının kaba agrega olarak kullanıldığı yüksek kalsiyumlu uçucu küllü betonlar 7 günde 30,6-38,4 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Geri dönüşüm agregalı numunlerin basınç dayanımı kalker kırmataş agregalı numunelere göre hafif düşüş göstermiştir. (Nuaklong ve ark., 2016)

Uçucu kül karakteristiğinin gecikmiş yüksek dayanım gelişimi üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, uçucu külün tane boyutu arttıkça dayanım gelişiminin geciktiği ve bu gelişimin  $SiO_2/Al_2SiO_3$  oranından etkilendiği tespit edilmiştir (Jang ve Lee, 2016).

Toprak, doktora tezinde (2011), termik santral taban külünün alkali aktivasyonu ile geopolimer harç üretmiş, bu harçların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları, geopolimer pasta numunelerin priz süreleri ve hacim sabitliklerini belirlemiştir. Geopolimer harçların, sülfat, asit, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklılıkları incelenmiştir. Alkali ve kür tipinin, sülfat, asit, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık etkilerinin geopolimer harçlarda mikroyapısına etkileri SEM-EDX analizleri ile araştırılmıştır. Taban külüne göre ağırlıkça %12 Na<sub>2</sub>O ve %8 SiO<sub>2</sub> içeren alkali çözelti ile aktive edilen geopolimer harçlarda 20 °C'de 28 günde 25-30 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır.

Zeybek (2009), temin ettiği en uygunsuz kompozisyondaki C sınıfı uçucu kül ile en uygun kompozisyondaki F sınıfı uçucu külle yaptığı deneysel çalışmada, uçucu külün alkali aktivasyonun ile yapı tuğlası üretmiştir. Tuğlalar, 30 MPa basınçla şekillendirilen 40 °C, 60 °C, 80 ° ve 100 °C arasındaki sıcaklıklarda 2, 4, 6, 24, 48, 72 saat aralığındaki ısıtma işlemleri ile üretilmiştir. Üretilen geopolimer tuğlaların basınç, su tutma, yoğunluk değerleri ve donma çözülme dirençleri incelenmiştir. F sınıfı uçucu külden üretilen geopolimer tuğlalar Si /Al molar oranının 2 olduğu 60 °C sıcaklıkta etüvde 24 saat uygulanan ısıtma işlem sonrasında uygun değer basınç dayanımı değerini 45 MPa olarak tespit edilmiştir. C tipi uçucu külle ile suda çözme kurutma ve öğütme işlemleri sonrasında üretilen geopolimer tuğlaların, geleneksel tuğla malzeme standartlarına ulaştığı belirtilmiştir.

Atış ve arkadaşları (2015), F Tipi Sugözü uçucu külü ile ürettikleri geopolimer harcın mekanik özellikleri üzerine ısıtma kür süresinin etkisi araştırılmıştır. Geopolimer harç üretiminde Sugözü F tipi uçucu külü, CEN referans kumu, sodyum hidroksit ve içme suyu kullanılarak üretim yapmışlardır. Karışım oranları, ağırlıkça, kum/uçucu kül oranı, su/uçucu kül oranı 0,29 ve sodyum/uçucu kül oranı 0,1 olarak alınmış, hazırlanan karışımlar 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75°C sıcaklıkta kür edilerek deneylere tabi tutulmuştur. Ayrıca aynı oranlardaki karışımlar 4 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün ve 7 gün süresince 75°C sıcaklığında küre tabi tutulduktan sonra toplamda kür süresi 28 gün olacak şekilde laboratuvar ortamında (23±2°C ve bağıl nemi %50±5) havada kür edilmiştir. Alkali ile aktive edilen uçucu kül harçların basınç dayanımı, eğilme çekme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı özellikleri test

edilmiştir. Isıl kür süresinin artmasıyla dayanımların önemli oranda etkilenecek arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, 75°C'lik ısı kür ile 75 MPa mertebesinde basınç dayanımına ulaşılmıştır.

Yüksek basınç ve dayanıklılık sağlayacak geopolimer malzemeler üretebilmekte, kullanılan uçucu kül kompozisyonunun bulundurması gereken özellikler ise şu şekilde tespit edilmiştir: (Ariöz vd., 2009).

- a.  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  bileşiklerinin uçucu kül kompozisyonu içindeki kütlece oranı 2-3,5 arasında olmalıdır.
- b. Uçucu kül kompozisyonu içinde fırınlanma etkisi görmemiş malzeme oranı %5'i geçmemelidir.
- c. Puzolan olarak kullanımında da gerektiği gibi CaO oranı düşük olmalıdır.
- d. Camsı fazdaki tanecikler daha fazla olmalıdır. Böylece alkalinyasyon prosesi hızlanarak reaksiyon derecesi artar. Mullit ve kuartz kristallerinin fazla olması ise Al Si oranını düşürmektedir. Kompozisyon içindeki mullit miktarı kütlece %5'in altında olmalıdır.
- e. Uçucu külün 4  $\mu\text{m}$ 'nin altında incelikte olması, basınç dayanımını direkt artırıcı bir etkisi yoktur, ancak kalın partiküllerle de olumlu bir sonuç elde edilememektedir. Uçucu külün ortalama 10–40  $\mu\text{m}$  iyi derecelenmiş kompozisyonu uygun toklukta malzemeyi sağlayacaktır.
- f. Kompozisyon içerisinde sülfid bileşikleri ve metal madenler bulunmamalıdır.
- g.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bileşiği, hematit ve magnetit kristalleri geopolimer reaksiyonunu yavaşlatmakta, düşük basınç dayanımı vermektedir.
- h. Kömür içindeki yanmamış karbon parçacıklarının varlığı da malzeme özelliklerini olumsuz etkileyeceğinden kompozisyon içinde fazla bulunmamalıdır (Ariöz ve ark., 2009).



### 3.2. Yüksek Fırın Cürufu İçeren Alkali Aktive Edilmiş Harçlarla İlgili Çalışmalar

Yüksek fırın cürufu içeren alkali aktive edilmiş harçlar, Doğu Avrupa, İskandinavya ve Çin’de kullanılmaktadır. Kullanılan aktivatörden bağımsız olarak, ana hidrasyon ürünü düşük C/S oranlı ve değişen derecelerde kristaliniteye sahip C-S-H’tır. Ayrıca, NaOH veya cam suyu ile aktivatörün tipine ve oranına bağlıdır. En iyi dayanım gelişimi sodyum silikat esaslı aktivatör kullanımıyla elde edilmiştir (Chang, 2003).

Alkalın bağlayıcılarla ilgili çalışmaların çoğunda, yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktivasyonu ile denemeler bulunmaktadır. Bir alkali kaynağının ilavesi ile bu cüruflar  $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  sisteminin alanına girer. “Alkali ile aktive edilmiş” terimi  $\text{R}^+$ (alkali) iyonlarının bu malzemelerde ilk aşamada katalitik rol oynadığına ve sonraki aşamadayapıyla birleşerek zeolit benzeri fazlar oluşturduğunu savunan araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. (Roy, 1999).

Yüksek fırın cürufu su ile çok yavaş reaksiyona girer. Alkali aktivatörden gelen hidroksil iyonlarının ( $\text{OH}^-$ ) yüksek fırın cürufundaki yapının çözünmesini sağlayarak hidrasyon hızını artırır. Hidrolitik iyonlar NaOH, KOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  gibi güçlü alkalilerden ortaya çıkabilmektedir. Alkaliler çeşitli kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşmaktadır (Zivica, 2006).

Fernandez ve arkadaşları (1999), karışımlarda, yüksek fırın cürufu ağırlığının %3 ve %5’i arasında  $\text{Na}_2\text{O}$  kullanılmasını önermişlerdir. Daha düşük oranlar kullanıldığında aktivasyon üretimi gecikirken, daha yüksek değerlerde ise sertleşme, çiçeklenme problemleri ve harcın ekonomik olmaması gibi durumlar ortaya çıkmaktadır. Aktivatör tipi, aktivatör oranı, kür sıcaklığı, yüksek fırın cürufunun özgül yüzeyi, mekanik dayanım üzerinde etkili olan değişkenlerdir. Dayanım üzerinde etkili en önemli faktör aktivatörün tipidir. Etki sıralaması  $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH} \gg \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaOH}$  şeklindedir.

Fernandez ve arkadaşları (2002), alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu betonlarında alkali silika reaksiyonu etkisini araştırmışlardır. Aktivatör olarak cam suyu

kullanılmıştır. Reaktif silisli agregalar kullanıldığında Portland çimentolarında meydana gelen genişlemenin alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu betonlara göre 4 kat daha fazla olduğunu, kalkerli agregalar kullandıklarında ise her iki harçta da genişleme olmadığını tespit etmişlerdir.

Türker ve arkadaşları (2016), yüksek fırın cürufunu NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile aktive ederek oluşturdukları karışımın 800 °C yüksek sıcaklık uygulanması sonucu mikroyapı, X ışınları difraktometresi ve termogrametrik analizlerini incelemişlerdir. Bağlayıcı ağırlığına göre %5 sodyum içeren ve silikat modülü Ms=1,0 olan numuneler hazırlandıktan sonra 6 saat süre ile 60 C de kür edilmiş daha sonra 24 saat süre ile oda sıcaklığında kalıpta bekletilmiştir. Kontrol amacıyla olarak da portland çimentosu ile numunler üretilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numuneler üzerinde 28 gün sonra ortam sıcaklığında eğilme ve basınç testleri yapılmıştır. Test sonuçları, alkali aktive edilmiş harç numuneler ile çimentolu numunelerin birbirinden farklı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Beklenin aksine belirgin mekanik ve yüksek sıcaklık direnci alkali aktive edilmiş cüruf harçların kür koşullarına bağlı olmadığını göstermiştir.

Mithun ve Narasimhan (2016), alkali aktive edilmiş granüle yüksek fırın cürufu harç içerisine, nehir agregası yerine alternatif olarak bakır cürufu kullanmış, kontrol için çimento bağlayıcılı numune üretmişlerdir. Nehir agregalı, bakır cürufu agregalı ve çimento bağlayıcılı geleneksel harç numunelerin bağıl dayanım ve durabilite parametrelerini kontrol etmişlerdir. Alkali aktive edilmiş cürufu harç içerisinde kum yerine tamamen bakır cürufu kullanılması, dayanım özelliklerinde değişikliğe yol açmamıştır. Alkali aktive edilmiş granüle yüksek fırın cürufu kumlu numunelerin, bakır cürufu agregalı numunelerden elastise modüllerinin farklı olmadığı, daha düşük boşluk oranı, daha az su emme, kontrol numunleri ile karşılaştırıldığında daha az klor geçirgenliği gözlenmiştir. Ayrıca numunelerin sülfat ve asitli ortamda dayanıklılık da gözlenmiştir. Bakır cürufunun agrega olarak kullanıldığı alkali aktive edilmiş harçların normal portland çimentolu numunlerden daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Kathirvel ve Kariyaperumal (2016), geri dönüşüm agregası ve yüksek fırın cürufunu kullanarak NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivatörleri ile ortam sıcaklığında kür ederek ürettikleri

alkali aktive edilmiş harçların, normal çimentolu betonlar, kaba agregalı yüksek fırın cürüflü alkali aktive edilmiş betonlar ile fiziksel, mekanik ve eğilme karakteristiklerini karşılaştırmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,50, alkalın oranı 2,00 olan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile 14 M oranındaki NaOH aktivatör ile kaba agrega ve yüksek fırın cürufu süper plastikleştirici ile karıştırılıp ortam sıcaklığında kür edilmiştir. Sonuç olarak, geridönüşüm agregalı numuneler dahil olmak üzere alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü numunelerin, dayanım özelliklerinin geliştiği gözlenmiştir.

Rashad ve arkadaşları (2016), demir yüksek fırın cürufu ve ince agrega karışımının alkali aktivasyonu sonucu üretilen harçların yüksek sıcaklık etkisini inceledikleri çalışmalarında, kum/bağlayıcı oranını  $\frac{1}{2}$  olarak almışlar, kum yerine sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 demir cürufu ikame etmişler, bağlayıcıya ağırlıkça oranı %4  $\text{Na}_2\text{O}$  olan  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  aktivatörü ilave etmişleridir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranını 0,30 olarak kullanmışlardır. 50 °C de 24 saat ısıl işlem uyguladıkların numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Numuneleri 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda 2 saat süreyle beklettikten sonra basınç dayanım testi uygulamışlardır. Numunelerin SEM, XRD, TGA ve EDS analizlerini yapmışlar, sonuç olarak, yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında numunelerin içerisindeki demir cüruf agregasının artmasıyla basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların, yüksek kuruma büzülmesine sahip olması, inşaat malzemesi olarak kullanımını engelleyen bir özelliğidir. Yang ve arkadaşları, Nano- $\text{TiO}_2$ 'yi Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların içerisine ilave ederek, mekanik özellikleri ve kuruma büzülmesini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar Nano- $\text{TiO}_2$  ilavesinin basınç dayanımını artırdığını, kuruma büzülmesini ise azalttığını göstermiştir (Yang ve ark., 2015).

Balçıkınlı ve Özbay, düşük oksijen/klor geçirgenliği ve düşük ısıl iletkenliğe sahip Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harç elde etmek için yapmış oldukları çalışmalarında, sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı alkali aktivatör kullanmışlardır. Çalışmada kür sıcaklığı, kür süresi, sodyum oranı ve silikat modülünün, basınç dayanımı, klor geçirgenliği, oksijen geçirgenliği, ısıl iletkenlik üzerine karşılıklı etkileşimleri incelenmiştir. Kür sıcaklığı, kür süresi, sodyum oranı

ve silikat modülünün en iyi kombinasyonun, Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçlarda, basınç dayanımında artışa, klor ve oksijen geçirimsizliğinde ve ısı iletkenlikte azalmaya sebep olduğu kaydedilmiştir. Basınç dayanımında artışa, klor ve oksijen geçirimsizliğinde ve ısı iletkenlikte azalmaya etki eden optimum kombinasyonun, 46,8 C sıcaklık, 8,3 saat kür süresi, %5,5 sodyum oranı ve 2,0 silikat modülü olduğunu tespit etmişlerdir (Balcıkanlı ve Özbay, 2016).

Nicaloic ve arkadaşları (2014), yüksek fırın cürufunu  $M_s=3,2$  olan  $Na_2SiO_3$  ve 14 M NaOH ile karıştırarak 48 saat 65 °C de ısı ışlem uygulayarak alkali aktive etmişlerdir. Daha sonra numunelere 14 gün ortam sıcaklığında kür uygulamışlardır. Numuneleri 600 °C-800 °C ve 1000 °C de yüksek sıcaklığa maruz bırakmışlardır. Sıcaklık uygulanmadan önce ve 600°C-800°C-1000°C sıcaklık uygulandıktan sonra numunelerin basınç dayanımlarını sırası ile 38,80 MPa- 44,32 MPa-42,43 MPa-51,05 MPa olarak ölçmüşlerdir. Sıcaklık artışı ile numunelerin basınç dayanım değerlerinin arttığı mikro yapılarının değiştiğini gözlemişlerdir.

Bilim ve arkadaşları (2013), farklı doz ve modüldeki sıvı sodyum silikat aktivatör ile aktive ettikleri yüksek fırın cürufuna, büzülme azaltan, süper plastikleştirici, priz geciktirici gibi katkıları ilave ederek, farklı kür koşullarında alkali aktive edilmiş harçların özelliklerini incelemişlerdir. Bunun yanı sıra taze ve sertleşmiş harçların kıvam, priz süresi, eğilme ve basınç dayanımı ile karbonatlaşma özelliklerini kontrol etmişlerdir. Ağırlıkça %4 ve %6 Na oranında ve  $SiO_2/Na_2O$  oranı 0,75 ve 1 olan 15 grup pasta ve harç numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numuneleri 24 saat sonra kalıpta çıkarıp üç farklı şekilde kür etmişlerdir. Birinci grup numuneleri, ıslak kür, ikinci grup numuneleri kuru kür, üçüncü grup numunelere ise 65 °C sıcak su kürü uygulamışlardır. Sonuçlar, yüksek oranda sodyum oranının, yüksek dayanım, işlenebilirlik ve hızlı priz süresine neden olmakla birlikte sıvı sodyum silikatın ani prize yol açtığını göstermiştir. Hiçbir karışımın alkalik aktive edilmiş pastanın priz süresi üzerinde etkisi olmamıştır. Priz geciktirici katkıları alkali aktive edilmiş harcın akıcılığını artırırken büzülme azaltan katkı kısmen akış değerini etkilemiştir. Büzülme azaltan katkı, alkali aktive edilmiş harçların karbonatlaşmasında hafif bir düşüş sağlamıştır. Süperplastikleştirici ve priz geciktirici katkıları, alkali aktive edilmiş harçların büzülme değerlerini azaltmıştır. Bununla birlikte alkali aktive edilmiş harçların büzülme değerleri portland

çimentolu numunelerden fazladır. Kür şartlarının, portland çimentolu harçlarla kıyaslandığında alkali aktive edilmiş harçların mekanik davranışı üzerine etkisi vardır.

MgO ilavesinin alkali aktive edilmiş yüksek fırın cüruf pastasının özelliklerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, ağırlıkça cüruf yerine %5 MgO ikamesi geoplimerin bir günlük basınç dayanımını yaklaşık %26 artırmış ve kuruma büzülmesini azaltmıştır (Andel-Gawwad, 2014).

Granüle yüksek fırın cürufunun sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum metasilikat ve sodyum silikat ile aktive edilerek üretildiği alkali aktive edilmiş çimentosuz harç üretilen çalışmada, kum/bağlayıcı oranı 3, su/bağlayıcı oranı ise 0,5 olarak alınmıştır. Alkali ile aktive edilen cürufli harçların kıvam, birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, eğilme ve basınç dayanımları, aşınma direnci ve yangın direnci özellikleri incelenmiştir. Üretilen harçlarda bütün deneyler suda 28 gün kür edildikten sonra yapılmıştır. En yüksek aşınma direnci sodyum silikat ve sodyum metasilikat ile aktive edilmiş cürufli harçlarda gözlenmiştir. Sodyum hidroksit ile aktive edilen cürufli harçlar portland çimentolu kontrol ve diğer alkaliler ile aktive edilen harçlara göre yangın etkisine karşı yüksek bir direnç göstermişlerdir (Yakupoğlu, 2010).

Çimento ve yüksek fırın cürufunun değişik oranlarda karıştırılarak alkali aktive edilmiş harç üretildiği bir çalışmada, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat, sodyum silikat kullanılmıştır. Türkiye’de bulunan üç demir çelik fabrikasının atığı olan yüksek fırın cürufları temin edilmiş ve çimento yerine % 0, % 25, % 50, % 75, % 85, % 90, % 95 % 100 oranlarında kullanılmıştır. Deney numuneleri 28, 56, 90 gün standart kür koşullarında tutulmuştur. Numuneler üzerinde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, rezonans frekansı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Priz süreleri ve hacim genleşmeleri belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin donma çözülme, sülfat, asit gibi etkilere karşı dayanıklılığı araştırılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde XRD ile kimyasal analizleri, SEM ile mikro yapı fotoğrafları çekilerek, alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun, harcın iç yapısına etkisi gözlenmiştir. Çeşitli dayanıklılık etkilerine maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları, yapay sinir ağları ve bulanık mantık kullanılarak modellenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en etkili aktivatör türünün sodyum

hidroksit, sodyum karbonat olduğu görülmüştür. İstenilen dayanımları sağlamak ve dayanıklılığı arttırmak için aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun çimento yerine % 75-100 arasında kullanılması uygun olduğu tespit edilmiştir (Canbaz, 2007).

İlkenntapar (2010), alkali ile aktive edilmiş cürufllu bağlayıcıların uygulamalardaki kullanımlarına engel teşkil eden hızlı priz alma ve yüksek kuruma rötresi gibi problemlerinin çözümünde, kimyasal katkıların ve kür koşullarının etkileri araştırmıştır. Normal çimento için geliştirilmiş olan rötre azaltıcı, süperakışkanlaştırıcı ve priz geciktici kimyasalların alkali aktive edilmiş çimentosuz cüruf harçların işlenebilirliği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Daha sonra bu harçların %95 bağıl nem altında, %50 bağıl nem altında ve ısıtmalı kür havuzunda 65 °C 'de kür olmak üzere toplam üç değişik kür koşullarında mekanik etkilerini incelemiştir. Devamında ise kimyasal katkıların farklı kür koşullarındaki alkali aktive edilmiş harçlar üzerindeki etkisini kontrol etmiştir. Deney sonuçları, kullanılan kimyasal katkıların, cürufllu karışımların taze haldeki özelliklerinde bir miktar iyileşme sağlamalarına karşın, normal portland çimentolu karışımlardaki kadar etkili olmadıklarını göstermiştir. Bunun yanı sıra kimyasal katkıların rötre deformasyonlarının azaltılmasında yararlı olduklarını tespit etmiştir. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarının mekanik özelliklerinin iyileşmesi açısından, kür koşullarının oldukça önemli olduğu ve sıcak kür işlemine maruz bırakıldıklarında, aktive edilmiş cüruf harçlarının erken dönem mukavemet gelişiminin, portland çimentolu karışımlardan çok daha hızlı olduğu belirlenmiştir.

### 3.3. Diğer Puzolanların Alkali Aktivasyonu İle İlgili Çalışmalar

Chi ve Huang (2013), değişik oranlarda uçucu kül/yüksek fırın cürufunun alkali aktive edilmesiyle ürettikleri harçların bağlayıcı mekanizmasını incelemişlerdir. Çalışmalarında harçların eğilme ve basınç dayanımları, su emme özellikleri, rötre, mikro yapı ve x ışınları difraktometresi analizlerini yapmışlardır. Aktivatörün oranını, ağırlıkça sodyum oksit ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) oranı %4 ve %6 ve Silikat modülü  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 1$ , sıvı/bağlayıcı oranını 0,5 olarak kullanmışlardır. Sonuç olarak uçucu kül/cüruf oranı ve  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının bağlayıcı mekanizması üzerinde iki önemli faktör olduğu kanaatine varmışlardır. Mikroyapı ve XRD incelemelerinde amorf alkali aluminasilikat ve düşük

kristalleşmiş C-S-H jellerine rastlanmıştır. Alkali aktive edilmiş harçların, çimento bağlayıcılı harçlara kıyasla, kuruma büzülmeleri hariç, eğilme ve basınç dayanımları, su emme özelliklerin daha iyi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Bernal (2015), aktivatör dozajının cüruf/metakaolin bağlayıcılı harçlar üzerindeki etkisini incelediği çalışmasında, taze ve sertleşmiş numunelerin ısı evrimi, dayanım ve hızlandırılmış karbonatlaşma etkilerini incelemiştir. %10, %20 metakaolin/yüksek fırın cürufu ve metakaolinsiz yüksek fırın cürufu bağlayıcılar  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı 0,90-1,50 olan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ve  $\text{NaOH}$  karışımı aktivatör ile aktive edilmiş kalıba yerleştirilen harç numunler 28 gün ortam sıcaklığında kür edilmiştir. Yüksek aktivatör oranı, basınç dayanımı ve cüruf çözünme hızını etkileyen önemli faktör olduğu, aktivatör oranının artması ile basınç dayanımı, metakaolin çözünme hızı ve geçirimsizlik özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir. Metakaolin ilavesi ve artan aktivatör oranı karbonatlaşmayı azalttığı belirtilmiştir. Bir alkali aktive edilmiş cüruf sistemine, öncü bir alüminosilikat ilavesi, aktivatör oranına bağlıdır.

Gao ve arkadaşları (2015;a), alkali aktive edilmiş uçucu kül/cüruf karışımı harçlara kalker ilavesinin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, karışımların mekanik davranışları ve mikro yapılarını incelemiştir. Uçucu kül ve kalker ilavesinin yayılma değerinde artışa neden olduğunu belirtmişlerdir. Çimento fazlı sistemlerden farklı olarak Ca ve Al miktarının artması kristalleşme miktarında artışa yol açmamıştır. Kalker miktarının artması ile hem fiziksel hem de kimyasal olarak su miktarının bir miktar arttığını belirtmişlerdir.

Alkali aktive edilmiş cüruf, 50 °C'ye maruz bırakıldığında tamamen dağılabilmektedir. Li ve arkadaşları, cüruf içerisine silis dumanı ve uçucu kül ikamesi ile dağılmayı önlemek için çalışma yapmışlardır. Cüruf yerine bir miktar silis dumanı konulmasının, dayanım kaybını azalttığını bildirmişlerdir. %50 Cüruf ve %50 silis dumanı içeren karışımlar 25 ile 60 °C arasında kür edilmiş, dağılmadan sonra hiçbir dayanım kaybı yaşanmamıştır. Buna karşı %50 cüruf %50 uçucu kül içeren 25 °C de kür edilen karışımlarda %55 civarında dayanım kaybı gözlenmiştir. Bununla birlikte kür sıcaklığı 65 °C ye çıkarıldığında dayanım kaybı %50 azalmıştır. Alkali aktive edilmiş cüruf pastalarda kireç varlığı dayanımı düşürmektedir. (Li ve ark., 2014).

Oda sıcaklığında alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların avantajı, saha çalışmalarında uygulanabilir olmasıdır. Alkali aktive edilmiş harçların, kendisini oluşturan malzemelerin bileşimine olağanüstü duyarlı olduğu bilinmektedir. Gao ve arkadaşları, Silikat modülü  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  ve cüruf/uçucu kül oranını aktivasyon kinetiği, jel karakteri ve basınç dayanımı üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada silikat modülü 1,0-1,8 aralığında değişen, cüruf/uçucu kül oranını ise 90/10 ile 50/50 aralığında değişen numuneler üretmişlerdir. Silikat modülünün düşmesi ile erken yaş reaksiyonun hız ve yoğunluğunun arttığı, bu artışın cüruf miktarının artması ve düşük aktivatör modülü ile belirginleştiği gözlenmiştir. Su oranı ve ısıl özellikler, her durumda C-A-S-H jel zincir yapısı üzerinde, iki önemli faktördür ve tipik N-A-S-H jel formu sistemler oluşmaz. Basınç dayanım sonuçları optimum aktivatör oranının ve cüruf/ uçucu kül oranının değişmesi, aktivatör oranının artıp azalması ile etkilenmektedir (Gao ve ark., 2015).

Yliniemi ve arkadaşları (2009), turba odunu uçucu külünü hafif agrega olarak kullanmışlardır. Turba odun külünü potasyum silikat ve sodyum alüminat ile toz haline getirmişler, yardımcı bağlayıcı yüksek fırın cürufu, kömür uçucu külü ve metakaolin kullanmışlardır. Aktivatör olarak  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2= 0.8$  olan potasyum silikat ile  $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3=2.2$  sodyum alüminatı karıştırmışlar, sıvı/katı oranı 0,34-0,43 aralığında olan, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolini %20 ve %40 oranlarında turba odunu uçucu külüne karıştırarak numuneler üretmişlerdir. Sonuç olarak tüm yardımcı bağlayıcıların taneciklerin dayanımını artırdığını, fakat en etkili dayanım artıran bağlayıcının yüksek fırın cürufu olduğunu, belirtilen malzemelerin eş zamanlı kullanılması ile alkali aktivasyonun gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Alkali aktivasyon mekanizmasının karmaşıklığı nedeniyle az sayıda çalışma bir aktivatör ile aktive edilen iki kaynaktan elde edilen bağlayıcı ile üretilen geoplolimerin reaksiyon ürünlerini incelemiştir. Le ve Le (2015), çalışmalarında, sodyum silikat ve sodyum hidroksiti F tipi uçucu kül ve cüruf ile değişik oranlarda karıştırarak ürettikleri geopolimerin mikroyapı, reaksiyon ürünleri, alkali reaksiyonlarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda reaksiyon ürünlerinin miktarındaki değişimin öncelikle cüruf miktarına bağlı olduğu ve cürufun silikat yapısı ve eklenen cüruf miktarı artmasıyla birlikte C-S-H jel miktarının arttığı, alümina silikat jel miktarının azaldığını



belirtmişlerdir. Kimyasal yapı ve silikat miktarı göz önüne alındığında, alüminyum tabanlı alümina silikat jel ile kalsiyum tabanlı N-C-A-S-H jel yapısının benzer olduğunu, kalsiyum tabanlı geopolimerde C-S-H yapısı benzer olsa da diğer silikat yapıların farklılık gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Duan ve arkadaşları (2016), farklı orandaki akışkan yataklı uçucu kül-metakaolin karışımlarını, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivatör karışımları ile aktive ederek 40 °C mikrodalga fırında 1 gün süre ile kür etmiş, daha sonra çimentolu şahit numuneler ile birlikte 1000 °C ye ulaşan değişik yüksek sıcaklıklara maruz bırakmıştır. Ayrıca numunelerin kuruma büzülmesi ve asit etkisine karşı dayanıklılıklarını kontrol etmişlerdir. Yüksek sıcaklık ve aside karşı direnç bakımından alkali aktive edilmiş harçların, çimentolu kontrol numunelerine göre daha az dayanım kaybı ve daha az kütle kaybına uğradıkları gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımı kontrol numunelerinde düşerken 400 °C den sonra alkali aktive edilmiş harç numunelerde belirgin şekilde artmıştır. Geopolimer numuneler 28 gün sonra kontrol numunelerine göre daha az su emme özelliği göstermişlerdir.

Duan ve arkadaşları (2015), değişik oranlarda uçucu kül ve metakaolini, farklı oranlarda NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile aktive ederek geopolimer pasta üretmişler, üretilen numunelerin çimento pastalı kontrol numuneleri ile 180 gün boyunca sülfat etkisine karşı dirençlerini gözlemlemişlerdir. Deney sonuçları, sülfat etkisindeki geopolimer numunelerin dayanım kaybına uğradıklarını fakat ağırlıkça %5 ile %20 arasında uçucu külün metakolin yerine ikame edildiği numunelerde %15'in üzerindeki uçucu kül ikamesinin basınç dayanımının arttırdığını göstermiştir.

Özodabaş ve Yılmaz (2013), NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivatörlerini silikat modülü olan Ms=0,5, 0,75 ve 1,00 olacak şekilde ayarladıkları aktivatör karışımı kullanarak, yüksek fırın cürufu, pomza ve çimento karışımı alkali aktive edilmiş harç üretmişlerdir. Na<sub>2</sub>O oranını uçucu kül ağırlığının %8, bağlayıcı/kum oranını 1/3 olarak ayarlayıp yüksek fırın cürufunu %60 ve %80 oranlarında çimento yerine kullanmışlar, ikinci aşamada yüksek fırın cürufunun ağırlıkça %5 ve %10 kadar pomza ilavesi ile ürettikleri numunelerin 7, 28 ve 90 gün sonundaki eğilme basınç değerlerini ölçmüşlerdir. Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu+ pomza numunelerin büzülme

ve sülfat etkisine karşı dayanıklılıklarının çimento bağlayıcılı kontrol numunelerinden daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir.

Bilim ve Atış (2012), NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> aktivatörler ile Ms=0,75 olan aktivatör karışımı hazırlamışlar, 1:2,75:0,50 bağlayıcı, kum ve su oranında, yüksek fırın cürufunu çimento ile %0, %20, %40, %60, %80 ve %100 oranlarında yer değiştirerek alkali aktive edilmiş harç üretmişlerdir. Üretilen harçların eğilme ve basınç dayanımları ile karbonatlaşma özelliklerini incelemişlerdir. Test sonuçları aktivatör dozajının artması ile karbonatlaşma derinliğinin düştüğünü, bununla birlikte eğilme ve basınç dayanımının aktivatör dozajı ve cüruf ikamesinin artması ile arttığını göstermiştir. Porland çimentosu/cüruf karışımların alkali aktivasyonu ile oluşturulan harçların dayanımları, sadece cürufun alkali aktive edildiği harçlardan daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Timakul ve arkadaşları (2016), C tipi uçucu külün içerisine ağırlıkça %10-%30 bazalt fiber ilave ederek, 5 M NaOH ve ağırlıkça 2,5:1 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör yardımıyla kative etmiş, 48 saat 25 C ortam sıcaklığında nümerli kür ettikten sonra kalıpta çıkarmıştır. Daha sonra 48 saat süreyle 50 °C fırında tutmuş, fırından çıkardığı numuneleri 7 ve 28. Gün yaşına ulaşıncaya kadar 25 °C ortam sıcaklığında kür etmişlerdir. Bazalt fibersiz numunle 28. Gün sonunda 35 MPa basınç dayanımına ulaşmış, %10 bazalt fiber ilave edilmiş numunlerin basınç dayanım değerleri %37 artmıştır. Bununla birlikte ağırlıkça %15- %30 basalt fiber ilavesi basınç dayanımında önemli bir gelişme sağlamamıştır. Bununla birlikte basınç dayanımı yüksek Ca/Si oranı ve C-S-H geopolimer matrisi gözlenen numunelerin basınç dayanım değerlerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bazalt fiberin geopolimer kompozit geliştirmek için takvive bir malzeme olabileceği ileri sürülmüştür.

Potansiyel olarak tehlikeli atıkların ağır metallerin geopolimer matis içinde sabitlenmesi dikkat çeken bir konudur. Kurşunun geopolimer içerisinde sabitlendiği biline bir konudur. Fakat kurşunun geopolimer içerisindeki mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır. Lee ve arkadaşları, geopolimer içerisinde kurşunun sabitlenmesi için, % 0,5 ve %1 oranında kurşun nitratı, uçucu kül ve aktivatör ile karıştırmışlardır. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat ya da sodyum aluminat Si:Al oranı 2,0 ve 5,0

olacak şekilde geopolimer içinde kullanılmıştır. Geopolimer içinde Si:Al oranı 2,0 olacak şekilde zeolit kullanılmıştır fakat kurşun içeriği arttıkça zeolit kristalleşmesi bastırılmıştır. XRD ve elektron diftasyon testi (FT-IR) sonucunda başkaca bir kristalleşme gözlenmemiştir. Kurşunun parçalanması için sıralı özütleme prosedürü, aktivatör türü ne olursa olsun, kurşunun geopololimer içinde değiştirilebilir bir iyon olarak var olmadığını göstermiştir. Alüminatlı aktivatör, kurşunun en iyi sabitlendiği belirtilmiştir (Lee ve ark., 2016).

KOH ve  $K_2SiO_3$ 'ün belirli oranlarda karıştırılarak aktivatör olarak kullanıldığı metakaolin tabanlı geopolimer üretmek için yapılan bir çalışmada, 40 °C'de 24 saat ısıl işlem uygulanan numuneler daha sonra 28 gün ortam sıcaklığında bekletilmiştir. 28 gün sonunda 30,3 Mpa Basınç dayanımına erişmiştir. 200-400-600-800-1000 °C değişik yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler 550 °C'de 34,75 MPa basınç dayanım değerine ulaşmıştır. Mikroyapı incelemeleri, yüksek sıcaklığa maruz numunelerin, yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numunelerden daha olgun geopolimer matis yapıya sahip olduğunu göstermiştir (Tippayamas ve ark., 2016).

Alkali aktive edilmiş harçlar içinde uçucu küllü geopolimerlerin en düzenli amorf yapıya sahip karışımlar olduğunu belirlemeye yönelik bir çalışmada F sınıfı uçucu kül yüksek fırın cürufu ile değişik oranlarda karıştırılıp NaOH ve  $Na_2SiO_3$  ile aktive edilerek 80 °C'de 90 gün süre ile sulu ortamda hızlandırılmış kür yönetimine tabi tutulmuştur. Sadece uçucu kül kullanılarak aktive edilmiş harçların 28 gün sonra kısmi kristalleşme eğilimi gösterdiği gözlenmiştir (Ma ve ark., 2016).

Aleminyum hidroksit atığının uçucu küllü alkali aktive edilmiş harç içerisinde sabitleştirilmesi ile ilgili yapılan bir çalışmada, aleminyum hidroksit, uçucu kül içerisinde ağırlıkça %10-60 arasında değişik oranlarda kullanılmış,  $SiO_2/Na_2O$  oranı 2,5 olarak sabitlenen ve NaOH oranı 5,10 ve 15 M olarak ayarlanan NaOH ve  $Na_2SiO_3$  karışımı aktivatör ile değişik karışımlar hazırlanmıştır. %40 Aleminyum hidroksit atığı içeren ve 80 °C de 24 saat kür edilen numuneler ile 40 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır (Ma ve ark., 2015).

Aydın, amorf karakterli bir malzeme olan yüksek fırın cürufunu, sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive bağlayıcı üretilmiştir. İlk aşamada, standart su, buhar ve otoklav kürü gibi farklı kür koşulları altında  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  ve ağırlıkça  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı bakımından en uygun aktivatör çözeltisini araştırmıştır. Karışım özelliklerini geliştirmeye yönelik olarak yüksek fırın cürufu yerine, belirli oranlarda uçucu kül, silis dumanı, metakaolin, alçı ve hava sürükleyici, büzülme önleyici ve köpük önleyici gibi bazı kimyasal katkıların kullanım olanakları araştırmıştır. Sonuç olarak portland çimentosu kullanılmadan basınç dayanımı 200 MPa'ın üzerinde olan Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilmiş reaktif pudra betonu adı verilen bazı özellikleri bakımından reaktif pudra betonundan üstün performanslı lifli kompozit üretmiştir. Son olarak, bu kompozitin çeşitli dış etkilere karşı dayanıklılığı klasik reaktif pudra betonu karışımı ile karşılaştırmıştır. Deney sonuçları, her iki karışımında dış etkilere karşı dayanıklılığının oldukça iyi olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra, genel olarak alkali aktive edilmiş reaktif pudra betonunun dış etkilere karşı dayanıklılığının klasik reaktif pudra betonundan daha iyi olduğu görülmüştür (Aydın, 2010).

## BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Kullanılan Malzemeler

#### 4.1.1. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH)

Deneysel çalışmada kullanılan sodyum hidroksitin (NaOH) kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. NaOH’un kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Adı	Sodyum Hidroksit (Kostik)
Kimyasal Formülü	NaOH
Molekül ağırlığı	40 gr/mol
Asidimetrik	≥97
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	≤1
Cl	<0,01
SO <sub>4</sub>	≤0,01
Ağır Metal	≤0,002
Al	≤0,002
Fe	≤0,002

#### 4.1.2. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)

Cam suyu olarak da bilinen Sodyum silikat ticari olarak kapalı plastik ve cam kaplarda sıvı olarak satılmaktadır. Çalışmada kullanılan sodyum silikatın kimyasal kompozisyonu Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>’ün kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Adı	Sodyum Silikat (Cam suyu)
Kimyasal Formülü	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> nH <sub>2</sub> O
Molekül ağırlığı	122,06 g/mol
Yoğunluk	1,39 g/cm <sup>3</sup> (20 C’de)
Ağırlıkça Modül SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	2,00
Na <sub>2</sub> O	%11,71
SiO <sub>2</sub>	%23,46
Demir(Fe)	39 ppm
Klor (Cl)	%0,01
Sülfat (SO <sub>4</sub> )	%0,01

### 4.1.3. Uçucu kül

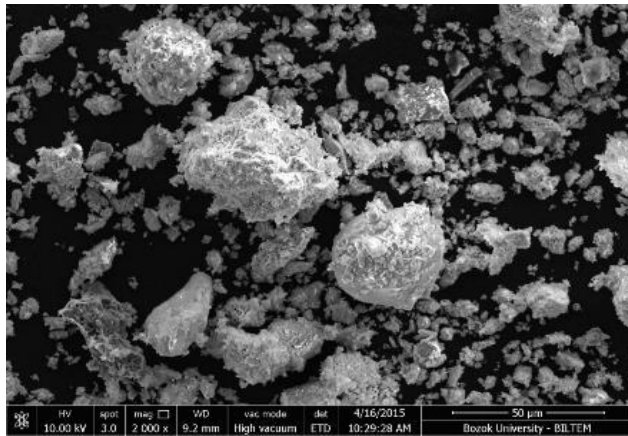
#### 4.1.3.1. Tunçbilek F sınıfı uçucu kül

Çalışmada kullanılan F Sınıfı uçucu kül, Kütahya Tavşanlı'da Bulunan Tunçbilek Termik Santrali'nden tedarik edilmiştir. Tunçbilek F sınıfı uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

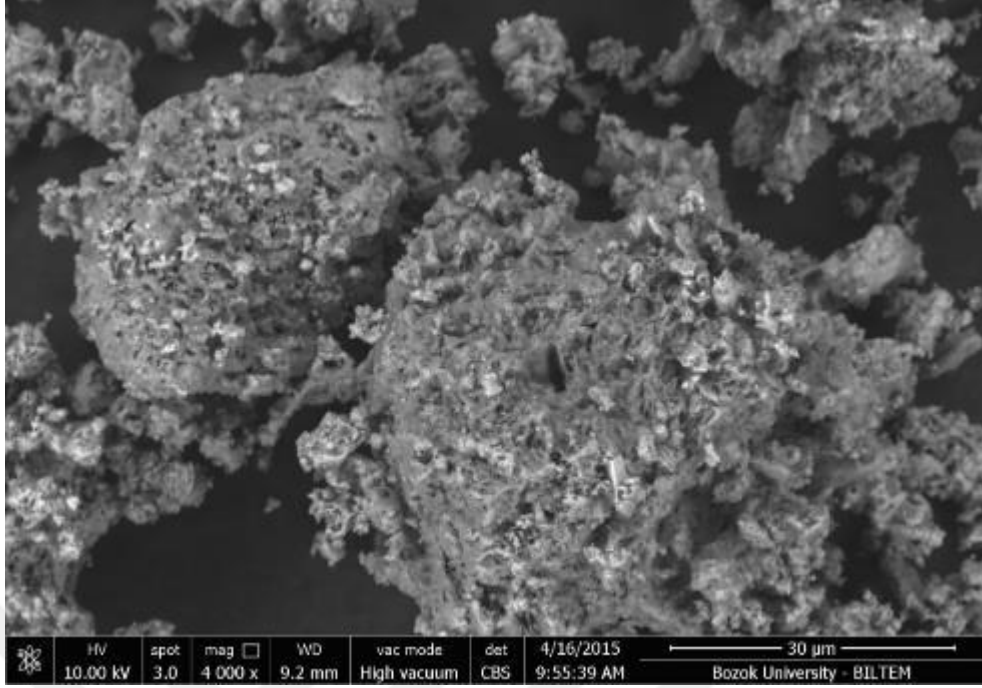
Tablo 4.3. Tunçbilek f sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal kompozisyon	(%)
MgO	3,68
Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	21,41
SiO <sub>2</sub>	58,73
SO <sub>3</sub>	0,25
Na <sub>2</sub> O	0,28
Ka <sub>2</sub> O	1,65
CaO	1,88
Fe <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	10,46
Çözünmez kalıntı	24,33
Kızdırma kaybı	0,64
TOPLAM	98,98
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık (ton/m <sup>3</sup> )	2,24
45 mikron elek bakiyesi (%)	4,9
Blain özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3703

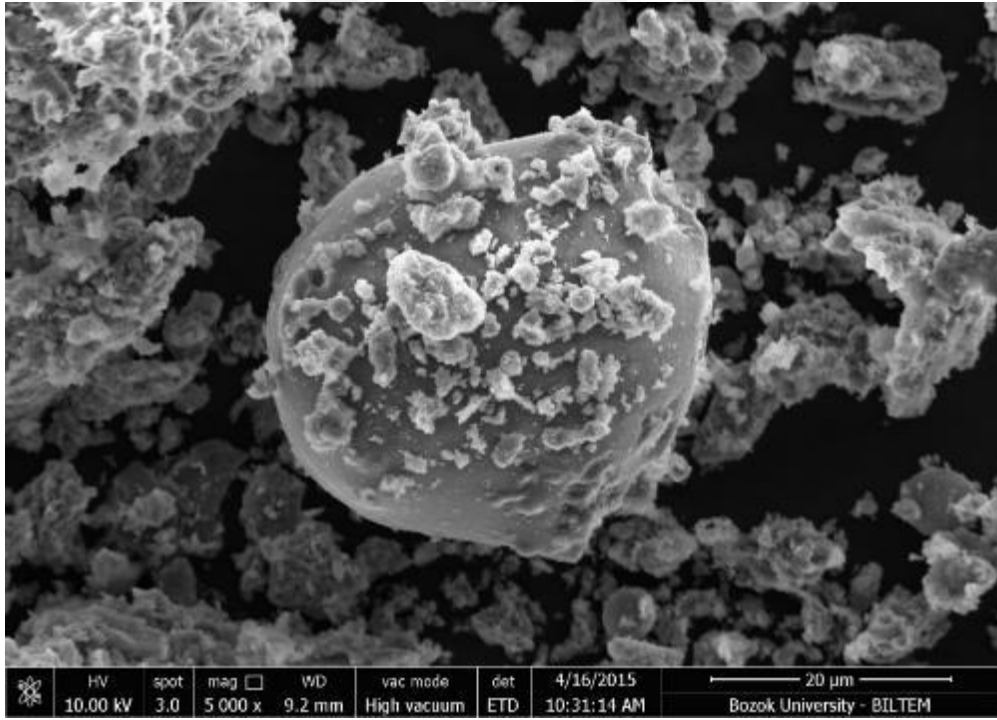
Tunçbilek F sınıfı uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.1-4-4 'de verilmiştir.



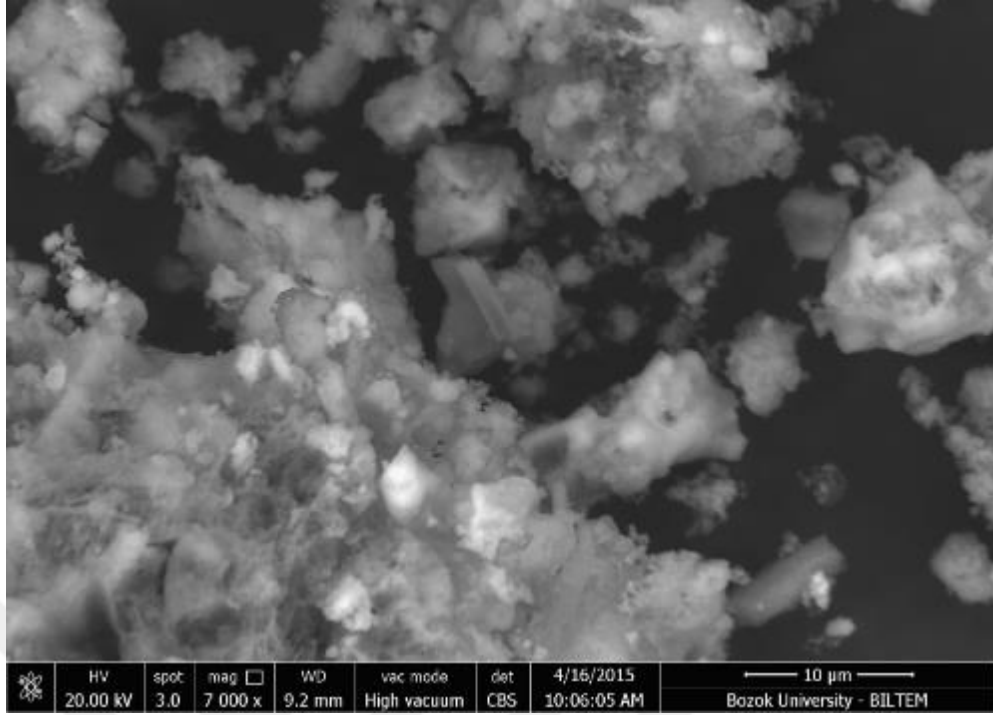
Şekil 4.1. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x2000)



Şekil 4.2. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x4000)

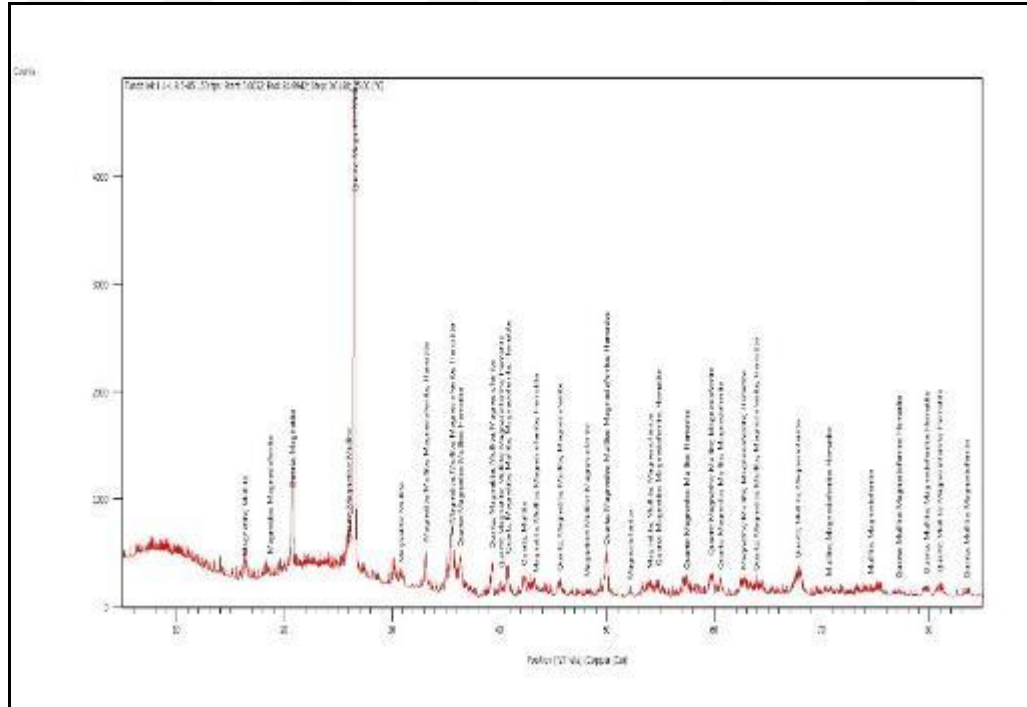


Şekil 4.3 Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x5000)



Şekil 4.4 Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x7000)

Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün X ışınları difraktometresi (XRD) analizi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün XRD analizi



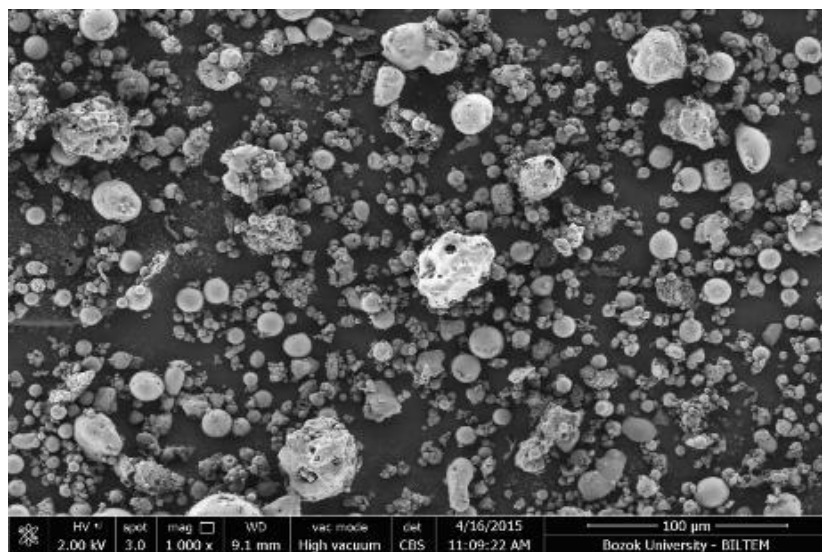
#### 4.1.3.2. Kangal C sınıfı uçucu külü

Çalışmada kullanılan C sınıfı uçucu kül, Sivas Kangal'da bulunan Kangal Termik Santrali'nden tedarik edilmiştir. Kangal C tipi uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

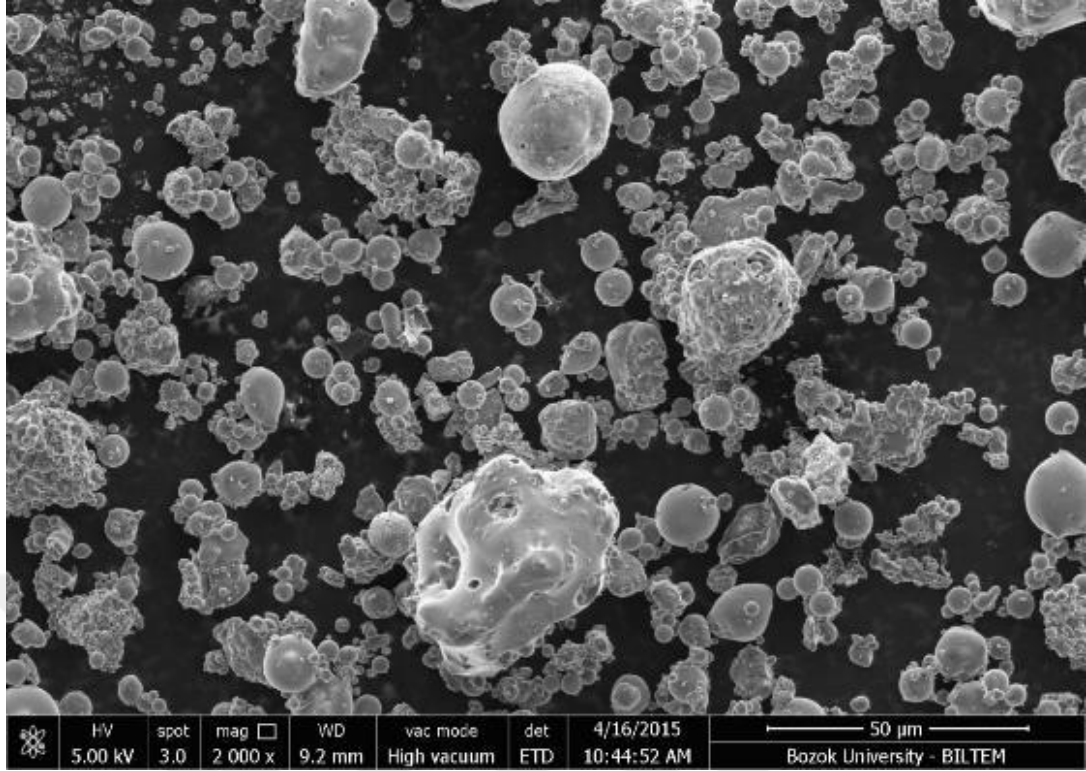
Tablo 4.4. Kangal C Sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal kompozisyon	(%)
MgO	3,12
Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	14,2
SiO <sub>2</sub>	35,01
SO <sub>3</sub>	7,56
Na <sub>2</sub> O	1,21
K <sub>2</sub> O	1,06
CaO	25,75
Fe <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	5,42
Çözünmez kalıntı	24,21
Kızdırma kaybı	6,02
TOPLAM	99,35
Fiziksel kompozisyon	
Özgül ağırlık (ton/m <sup>3</sup> )	2,72
45 mikron elek bakiyesi (%)	44,3
Blain özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3320

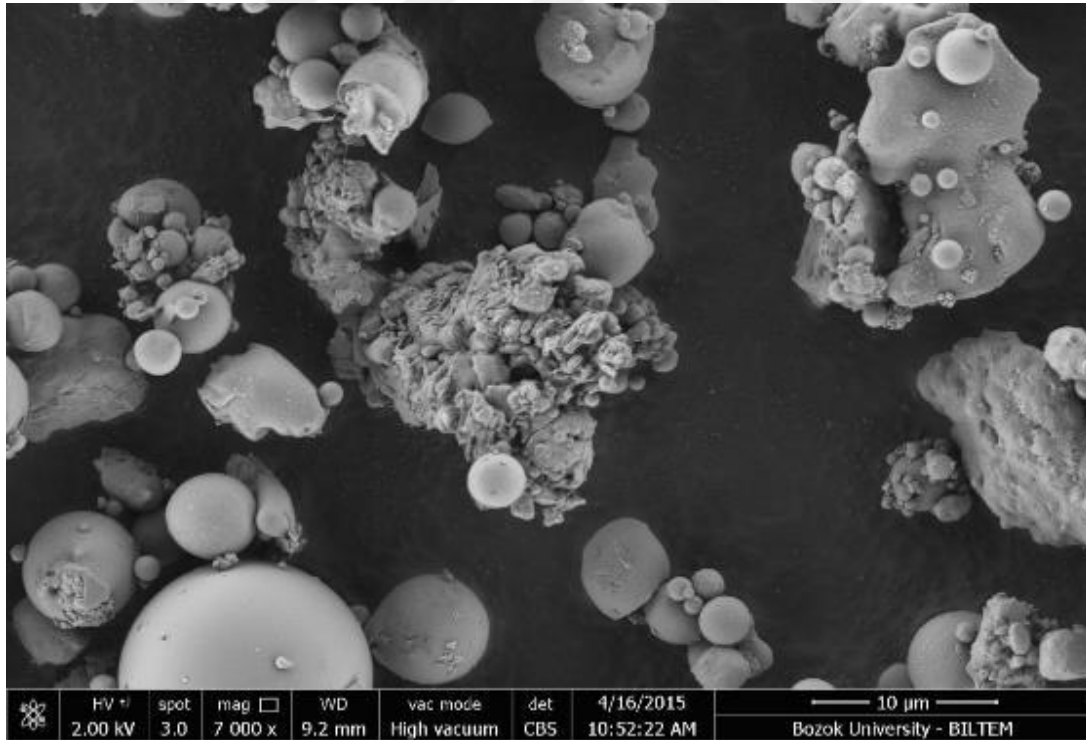
Kangal C sınıfı uçucu külünün taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.6-4.9'da verilmiştir.



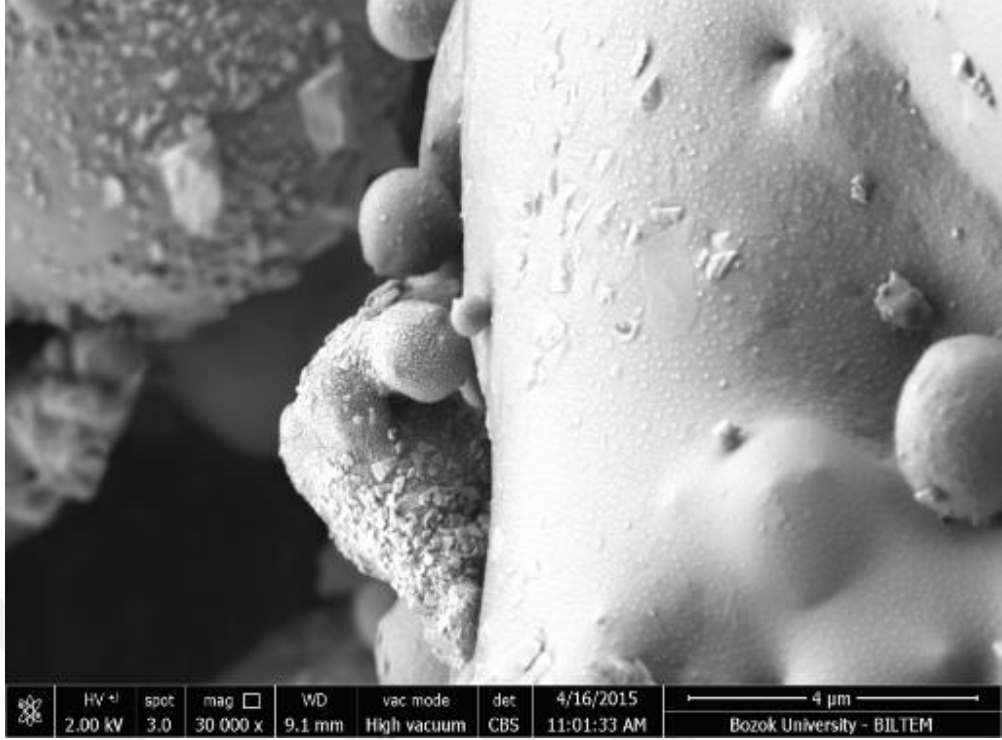
Şekil 4.6. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x1000)



Şekil 4.7. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x2000)

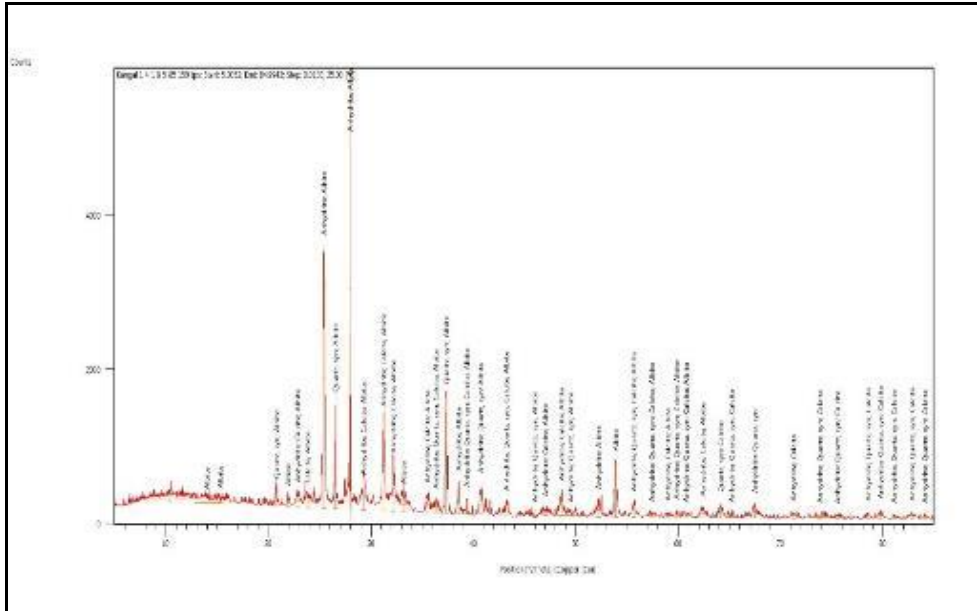


Şekil 4.8. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x7000)



Şekil 4.9. Kangal C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x7000)

Kangal C sınıfı uçucu külün X ışınları difraktometresi (XRD) analizi Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Kangal C sınıfı uçucu külünün XRD analizi

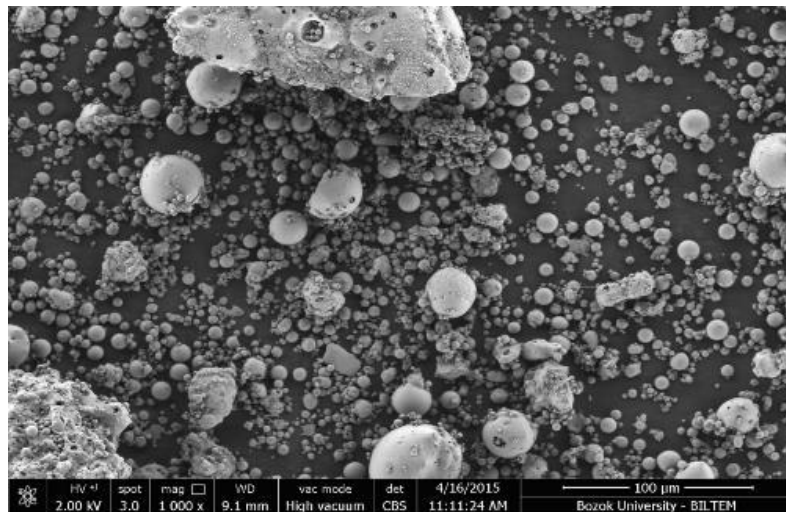
#### 4.1.3.3. Soma C sınıfı uçucu külü

Çalışmada, Kangal C sınıfı uçucu külü ile karşılaştırma için kullanılan diğer bir uçucu C sınıfı uçucu kül, Manisa Soma'da bulunan Soma Termik Santrali'nden tedarik edilmiştir. Soma C sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.5.'te verilmiştir.

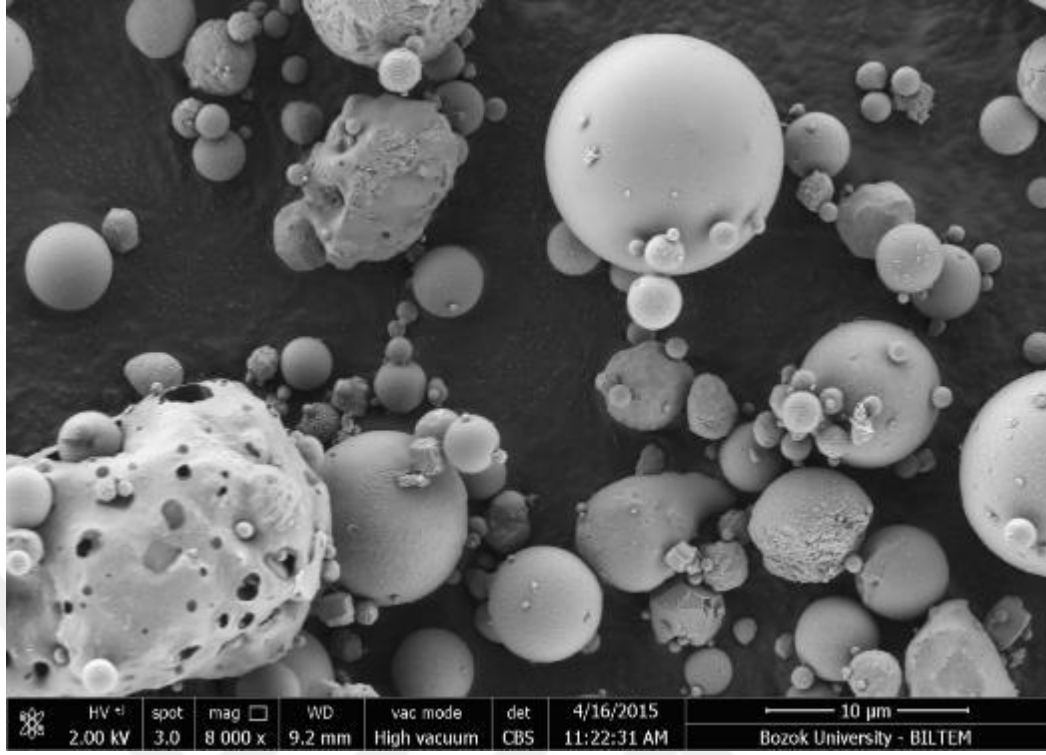
Tablo 4.5. Soma C sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal kompozisyon (%)	(%)
MgO	2,30
Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	11,71
SiO <sub>2</sub>	38,06
SO <sub>3</sub>	3,02
Na <sub>2</sub> O	0,54
K <sub>2</sub> O	1,06
CaO	32,10
Fe <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	4,20
Çözünmez kalıntı	24,67
Kızdırma kaybı	0,67
TOPLAM	99,24
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık (ton/m <sup>3</sup> )	2,65
45 mikron elek bakiyesi (%)	8,8
Blain özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	2360

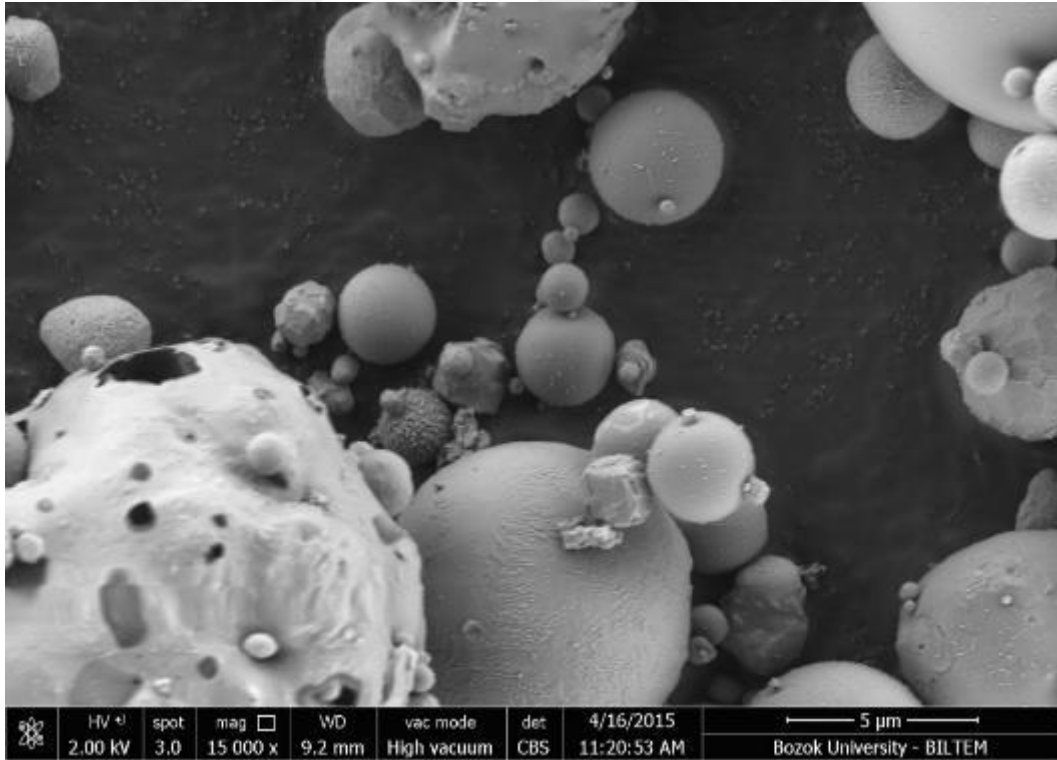
Soma C sınıfı uçucu külün taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 4.11-4.14 'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Soma C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x1000)



Şekil 4.12. Soma C sınıfı uçucu külünün SEM görüntüsü (x8000)



Şekil 4.13. Soma C sınıfı uçucu külünün SEM Görüntüsü (x8000)



Uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal analizleri Sivas Çimento Fabrikası Laboratuvarında, SEM ve XRD analizleri ise Bozok Üniversitesi Bilim Teknoloji ve Araştırma Merkezi laboratuvarında yapılmıştır.

#### 4.1.4. Su

Çalışmada harç karışımlarının tamamında Yozgat içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmış olup kimyasal özellikleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Yozgat içmesuyu şebekesinden alınan suyun kimyasal özellikleri

Al ( $\mu\text{g/l}$ )	Fe ( $\mu\text{g/l}$ )	Amonyum ( $\text{mg/l}$ )	İletkenlik ( $\mu\text{g/cm}$ )	Nitrit ( $\text{mg/l}$ )	pH
0	0,13	10	730	0	7,96

#### 4.1.5. Kum

Deneylerde, TS EN 196-1 e uygun maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumu tipik resmi Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Standart kum

Standart kumun elek analizi yapılmış olup, standart sınır değerler içerisinde kaldığı gözlenmiştir. Tablo 4.7’de standart kumun granülmetrisi ve sınır değerleri verilmiştir.

Tablo 4.7. Standart kumun granülmetrisi ve sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1	1,6	2
Kalan (%)	99	85	64	36	9	0
Sınır Değer (%)	99±1	87±5	67±5	33±	7±5	0

#### 4.1.6. Kontrol numuneleri üretiminde kullanılan çimento

Kontrol numuneleri üretiminde, CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8. CEM I 42,5R portland çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal kompozisyon	%	Fiziksel özellikleri	
SiO <sub>2</sub>	18,60	Özgül Ağırlık	3,10
Al <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	5,70	Priz Başlangıç (dk)	160
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,1	Priz Bitiş (dk)	210
CaO	62,60	Hacim Genleşmesi (mm)	0,70
MgO	2,3	Blane özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3331
Na <sub>2</sub> O	0,2	2 günlük basınç dayanımı (Mpa)	32,3
K <sub>2</sub> O	1,2	7 günlük basınç dayanımı (Mpa)	45,5
SO <sub>3</sub>	2,73	28 günlük basınç dayanımı (Mpa)	54,7
Cl <sup>-</sup>	0,01		
Kızıldırma kaybı	2,9		
Çözünmeyen kalıntı	0,70		
Serbest CaO	0,70		

#### 4.1.7. Sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Durabilite deneyleri kapsamında üretilen numunelerin sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) etkisini test etmek için, Ankara Emir Kimya Ltd. Şti’nde tedarik edilen toz halindeki Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılmıştır. Kullanılan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>’ün molekül ağırlığı 142,04 g/mol olup, saflık derecesi %99 tur.



#### 4.1.8. Magnezyum sülfat ( $MgSO_4$ )

Durabilite deneyleri kapsamında üretilen numunelerin magnezyum sülfat ( $MgSO_4$ ) etkisini test etmek için, Ankara Emir Kimya Ltd. Şti'nde tedarik edilen toz halindeki  $MgSO_4$  kullanılmıştır. Kullanılan  $MgSO_4$ 'ün molekül ağırlığı 246,46 g/mol olup, saflık derecesi %99 tur.

#### 4.1.9. Sodyum bikarbonat ( $NaHCO_3$ )

Numunelerin karbonatlaşma etkisini test etmek için, Ankara Emir Kimya Ltd. Şti'nde tedarik edilen toz halindeki  $NaHCO_3$  kullanılmıştır. Kullanılan  $NaHCO_3$ 'ün molekül ağırlığı 84,01 g/mol olup, saflık derecesi %99 dur.

#### 4.1.10. Fenolftalein ( $C_{20}H_{14}O_4$ )

Karbonatlaşma etkisi deneyinde, numunelerin karbonatlaşma derinliklerini tespit etmek için fenolftalein çözeltisi kullanılmıştır. Fenolftalein bir indikatör olup ortamın pH derecesine göre pembe renk almaktadır.

### 4.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Alkali aktive edilmiş harç numunelerinin tamamı, bölüm 4.2.2.'de belirtilen karışım miktar ve oranlarına göre sırasıyla harç mikserinde karıştırılarak hazırlanmıştır. Harç mikseri TS EN-196-1 standardına uygun olup dakikada 140 ve 285 devir ile çalışmaktadır. Elektronik beyin vasıtasıyla tam otomatik çalışma imkânı sağlamaktadır. Standartta belirtildiği gibi çift program ile çalışmaktadır. Opsiyonel olarak otomatik kum boşaltma haznesi bulunmaktadır.

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç karıştırma işleminde ilk olarak sodyum hidroksit kavanoz içerisine konulmuş, daha sonra üzerine sodyum silikat ilave edilmiştir. Harç karışımında su oranını tamamlayacak kadar su ilave edildikten sonra tüm sıvı karışım iyice karıştırılmak suretiyle sodyum hidroksitin erimesi sağlanmıştır. Çözelti soğumaya bırakılmıştır. Standart kum ve uçucu kül harç mikserinin içerisine

yerleştirilmiş 60 sn süre ile kuru karışım olarak karıştırılmıştır. Daha sonra soğumuş olan çözelti kum+uçucu kül karışımı üzerine dökülürken mikser 90 sn yavaş devirde çalıştırılmıştır. 2. Aşamada ise mikser 90 sn hızlı devirde çalıştırılarak karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Alkali aktive edilmiş harç karışımlarının tamamı 1 dakika kuru, 3 dakika aktivatör ilave edilmiş olarak toplamda 4 dakika karıştırma işlemine tabi tutulduktan sonra kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Deney karışımlarının hazırlanmasında kullanılan harç mikseri Şekil 4.17’te gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Harç mikseri

Kontrol numunelerinin üretiminde mikser TS EN 196-1’e göre otomatik olarak çalıştırılmıştır. Birinci aşamada yavaş ayarda 30 saniye karıştırılan harç, ikinci aşamada 30. saniyeden sonra karıştırma işlemi sürerken kum yavaşça karışıma boşaltılır. Bu durumda 30 saniye yine yavaş olarak mikser karıştırmaya devam eder. Sonra aşamada ise mikser birden hızlanır ve 30 saniye hızlı olarak harcı karıştırır. Dördüncü aşamada mikser hızlı olarak 30 saniye karıştırdıktan sonra durur. Karışım 15 saniye dinlenir. Son aşamada mikser 60 saniye hızlı ayarda harcı karıştırır. Karıştırma işlemi bittikten sonra harç mikserin kabı içerisinden alınarak küçük el küreği ile kalıba iki aşamada sıkıştırılarak yerleştirilir.

Mekanik deney numuneleri 40x40x160 mm boyutlarında prizma olarak hazırlanmıştır. Şekil 4.18’de, numune üretiminde kullanılan kalıp gösterilmiştir.



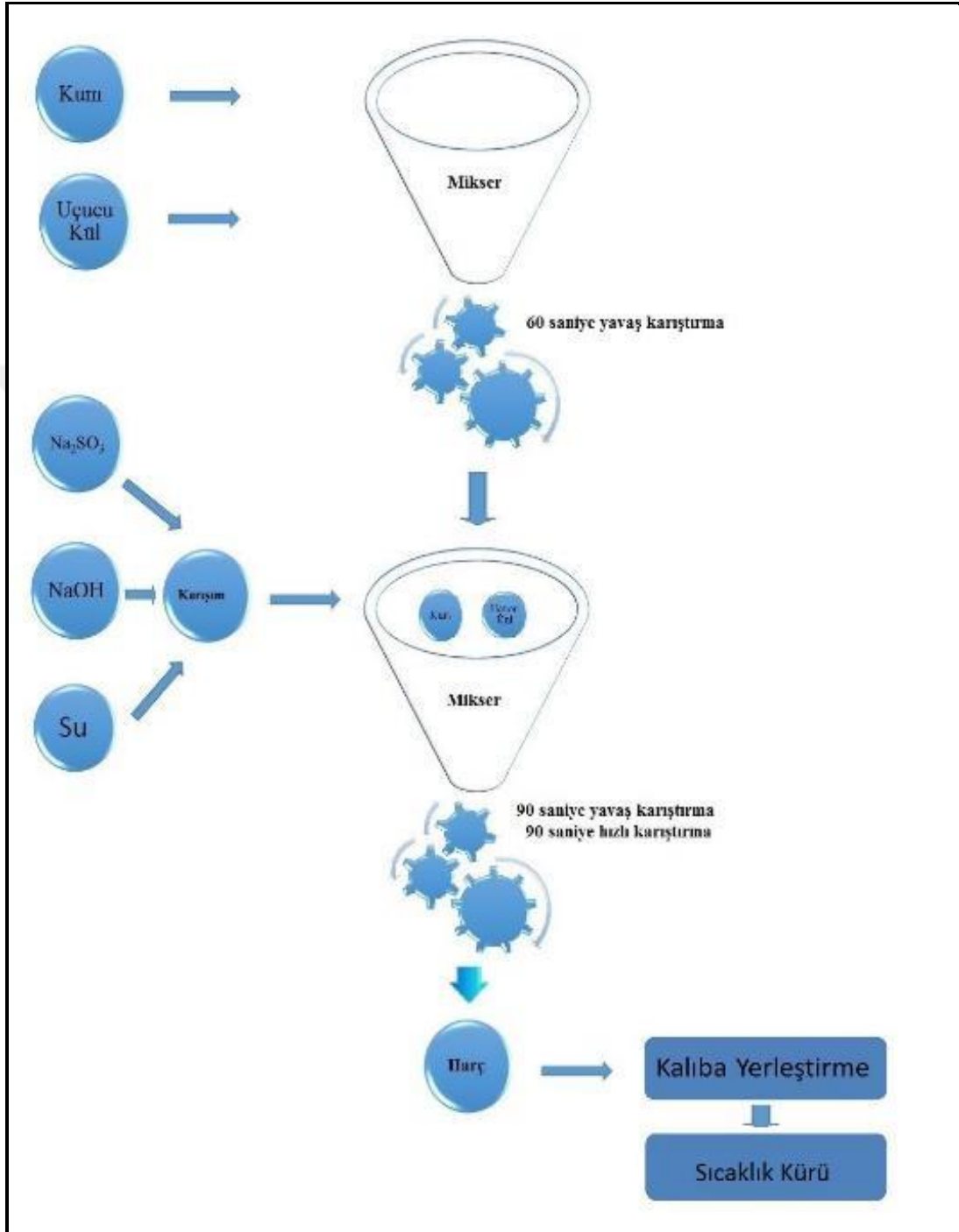
Şekil 4.18. TS-EN 196-1 'e uygun 40x40x160 mm boyutlarında prizma kalıp

Kalıplara sıkıştırılarak doldurulan numunelere üzeri düzlendikten sonra kuru etüv içerisine konularak sabit veya değişken sıcaklıklarda kür uygulanmıştır. Şekil 4.19’da, deneyler sırasında sıcaklık kürü için kullanılan etüvün resmi görülmektedir.

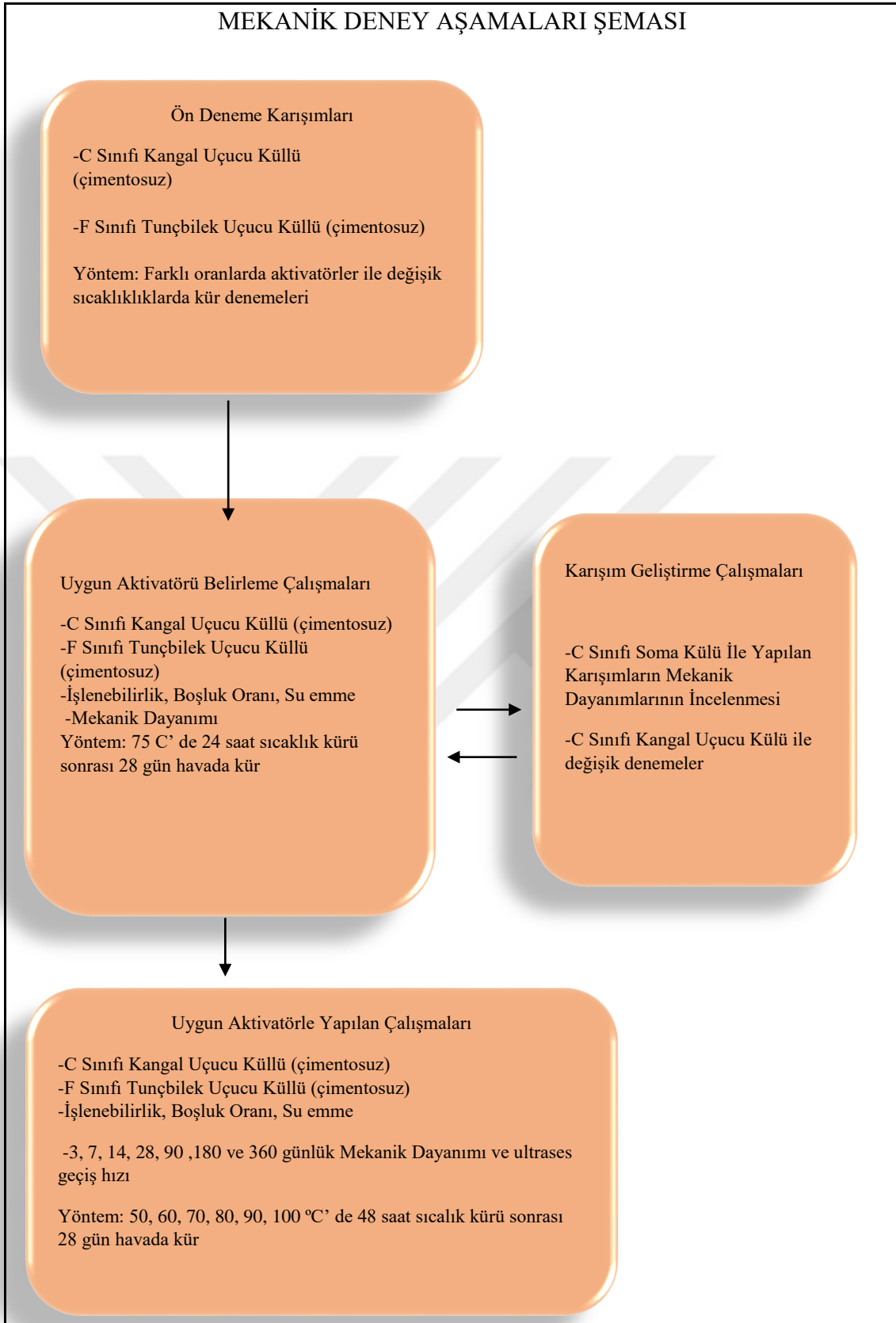


Şekil 4.19. Numunelerin etüve yerleştirilmesi

Deney karışımlarının hazırlanması, mekanik deneyler şeması Şekil 4.20’de durabilite deneyleri şeması ise Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin hazırlanması şeması



Şekil 4.21. Mekanik deney aşamaları şeması

## DURABİLİTE DENEYLERİ ŞEMASI

### Yüksek Sıcaklı Etkisi Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile 200 C, 400 C, 600 C, 800 C sıcaklık etkilerinin karşılaştırılması  
( Numune boyutları 40×40×160 mm)

### Donma-Çözülme Etkisi Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile donma-çözülme etkilerinin karşılaştırılması  
( Numune boyutları 40×40×160 mm)

### Kuruma Büzülmesi (rötre) Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile kuruma büzülmelerinin 6 ay süre ile karşılaştırılması  
( Numune boyutları 40×40×160 mm )

### Sülfat Etkisi Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> içerisinde 6 ay süre ile karşılaştırılması  
( Numune boyutları 40×40×160 mm)

### Karbonatlaşma Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile NaHCO<sub>3</sub> içerisinde 6 ay süre ile karbonatlaşma derinliklerinin karşılaştırılması  
( Numune boyutları 71×71×71 mm küp)

### Kapiller Su Emme Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile kapiller su emme özelliklerinin karşılaştırılması  
( Numune boyutları 100 mm çaplı 5 mm kalınlıkta silindir)

### Hızlı Klorür Geçirgenliği Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile klorür geçirgenliği özelliklerinin karşılaştırılması  
( Numune bBoyutları 100 mm çaplı 5 mm kalınlıkta silindir)

### Aşınma Deneyi

Alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerin, çimentolu kontrol numuneleri ile aşınma özelliklerinin karşılaştırılması  
( Numune boyutları 71×71×71 mm küp)

Şekil 4.22. Durabilite deneyleri şeması

#### 4.2.1. Ön deneme karışımları

Deneyleerin başlangıcında alkali aktive edilmiş harç elde etmek için birtakım ön deneme karışımları hazırlanmıştır. Ön deneme karışımlarının hazırlanmasındaki başlıca amaçlar şunlardır:

- a. Alkali aktivatörlerin tek başlarına veya karıştırılarak kullanılması durumunda taze karışım ve sertleşmiş karışım üzerine etkilerini gözlemlemek.
- b. Uçucu küllerin alkali aktivatörlerle en ideal şekilde nasıl karıştırılması gerektiğini tespit etmek.
- c. Su/bağlayıcı etkisini izlemek.
- d. Kül tiplerine göre uygun miktarda ve denenebilir aktivatör dozajı ve aktivatör karışım oranı aralıklarını tahmin edebilmek.
- e. Hazırlanan aktivatör karışımlarının, oluşturulacak karışıma en uygun hangi zamanında katılması gerektiğini tespit edebilmek.
- f. Bağlayıcı/kum, aktivatör/bağlayıcı su/bağlayıcı içeriğinin birbiri ile etkileşimini kavrayabilmek.
- g. Hazırlanan alkali aktive edilmiş harcın sertleşip dayanım kazanabilmesi için gerekli olan ısı aralıklarını tayin edebilmek amacıyla çeşitli deneme karışımları yapılmıştır.

Ön deneme karışımlarında, bağlayıcı miktarının ağırlığına göre sodyum ağırlığı yüzdesi (% Na) ve silikat modülü  $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı dikkate alınarak çeşitli karışımlar üretilmiştir.

Üretilen harcın taze karışım halindeyken kıvamı, kalıba yerleştirilebilirliği, ısı işlem süresine bağlı olarak sertleşip sertleşmediği, kalıptan çıkarılabilirliği gibi, aktivatörün karıştırıldıktan sonra bekleme süresinin etkileri gibi durumlar dikkate alınarak bazı ön deneme üretimleri yapılmıştır.

Ön deneme karışımlarında numune kodlamaları ve içeriği aşağıdaki örnekte açıklanmıştır:

Tablo 4.9. Deneme karışımları kodlama açıklamaları

CN2M2-60-24 kodlu numunede;	FN12M2-90-48 kodlu numunede;
C: Uçucu kül tipini,	F: Uçucu kül tipini,
N2: Ağırlıkça %2 Na içerdiğini	N12: Ağırlıkça %12 Na içerdiğini
M2: Silikat Modülünün $M_s=0,2$ olduğunu	M2: Silikat Modülünün $M_s=0,2$ olduğunu
60: Kür sıcaklığının C olarak değerini	90: Kür sıcaklığının C olarak değerini
24: Isıl işlem uygulama süresi (saat)	48: Isıl işlem uygulama süresi (saat)

Yapılan ön deneme karışımları ve deneme sonuçları aşağıda verilmiştir. Ön deneme karışımlarında C tipi kangal uçucu külü ve F tipi Tunçbilek uçucu külü kullanılmıştır. C sınıfı ve F sınıfı kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harç numunelerde sıcaklık kürü sonrası oda sıcaklığında kür işlemi uygulanmıştır.

#### 4.2.2. Uygun aktivatör tespiti için yapılan deneme karışımları

Ön deneme karışımları sonucunda uçucu kül, aktivatör karışımları, su/bağlayıcı, bağlayıcı/aktivatör oranları, ısıl işlem süresi ve ısıl işlem sıcaklığının alkali aktive edilmiş harçların taze karışım özellikleri ve mekanik dayanımları üzerine etkisi gözlenmiştir. Bu aşamadan sonra F sınıfı Tunçbilek uçucu külü ve C sınıfı Kangal Uçucu külü için en uygun aktivatör karışımını belirlemek amacıyla deneme karışımları üretimine başlanmıştır.

F sınıfı uçucu Tunçbilek uçucu külü ile su/bağlayıcı oranı 0,35, kum/bağlayıcı oranı 2,5 alınmıştır.  $M_s=0$ ,  $M_s=0,2$   $M_s=0,60$  ve ağırlıkça sodyum (%Na) oranları %10, %12, %14, %16, %18, %20 olacak biçimde karışımlar hazırlanıp,  $40 \times 40 \times 160$  mm kalıplarda  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 48 saat süre ile sıcaklık kürü uygulanmıştır. Tablo 4.10'da Tunçbilek F sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları ve kodlamaları verilmiştir.



Tablo 4.10. Tunçbilek F sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları ve kodlamaları

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	FN10M0	FN10M2	FN10M4	FN10M6	FN <sub>a2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
12	FN12M0	FN12M2	FN12M4	FN12M6	FN <sub>a2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
14	FN12M0	FN12M2	FN12M4	FN12M6	FN <sub>a2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
16	FN12M0	FN12M2	FN12M4	FN12M6	FN <sub>a2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
18	FN18M0	FN18M2	FN18M4	FN18M6	FN <sub>a2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
20	FN20M0	FN20M2	FN20M4	FN20M6	FN <sub>a2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)

\*Ms=0,6 içerisindeki Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> miktarı ile NaOH'suz üretilen numune

F sınıfı Tunçbilek uçucu külü ile 30 kalıp (90 adet) 40mm×40mm×160mm boyutlarında prizma numune üretilmiş olup ısı işlem sonrasında, bütün numuneler 28 günü tamamlayacak biçimde oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. 28 gün sonunda numunelerin mekanik dayanımları incelenmiş, basınç dayanımı en yüksek olan numune içindeki aktivatör, en uygun aktivatör olarak seçilmiştir.



Şekil 4.23. Tunçbilek F sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları

C sınıfı uçucu Kangal uçucu külü ile su/bağlayıcı oranı 0,70, kum/bağlayıcı oranı 2,5 alınmıştır. Ms=0, Ms=0,2 Ms=0,60 ve ağırlıkça sodyum (%Na) oranları %10, %12,

%14, %16, %18, %20 olacak biçimde karışımlar hazırlanıp, 40×40×160 mm kalıplarda 75 °C’de 48 saat süre ile sıcaklık kürü uygulanmıştır.

Tablo 4.11. Kagal C sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları ve kodlamaları

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	CN10M0	CN10M2	CN10M4	CN10M6	CNa <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
12	CN12M0	CN12M2	CN12M4	CN12M6	CNa <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
14	CN12M0	CN12M2	CN12M4	CN12M6	CNa <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
16	CN12M0	CN12M2	CN12M4	CN12M6	CNa <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
18	CN18M0	CN18M2	CN18M4	CN18M6	CNa <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)
20	CN20M0	CN20M2	CN20M4	CN20M6	CNa <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (*)

\*Ms=0,6 içerisindeki Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> miktarı ile NaOH’suz üretilen numune

Numune kodlama biçimi ve izahı Tablo 4.9’da belirtilmiştir. Tablo 4.11’de Ms=2,0 sütununda yer alan aktivatör karışımı sadece Ms=0,60 aktivatör karışımındaki Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> miktarı kadar Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (cam suyu) içeren yani NaOH içermeyen karışımı ifade eder.



Şekil 4.24. Kagal C sınıfı uçucu kül ile üretilen, en uygun aktivatör deneme karışımları ve kodlamaları

C sınıfı Kagal uçucu külü ile 30 kalıp (90 adet) 40mm×40mm×160mm boyutlarında prizma numune üretilmiş olup sıcaklık kürü sonrasında, bütün numuneler 28 günü

tamamlayacak biçimde oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. 28 gün sonunda numunelerin mekanik dayanımları incelenmiş, basınç dayanımı en yüksek olan numune içindeki aktivatör, en uygun aktivatör olarak seçilmiştir.

### 4.2.3. Karışım geliştirme çalışmaları

#### 4.2.3.1. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar

Uygun aktivatör tespiti için yapılan deneme çalışmaları sonucunda, F tipi Tunçbilek uçucu küllu ile 28 gün sonunda, en yüksek basınç dayanımı %14 Na oranı  $M_s=0,2$  olan FN14M2 kodlu numune ile 35,44 MPa olarak elde edilebilmiştir. Deney sonuçları bölüm 5.3.1’de verilmiştir.

%14 Na ve  $M_s=0,2$  olan Alkali aktivatör karışımı ile 90 °C’de 48 saat süre ısı işlem uygulanarak üretilen F tipi uçucu küllu çimentosuz numunelerin farklı su/bağlayıcı ve bağlayıcı/kum oranlarındaki mekanik dayanımları kontrol edilerek, sabit aktivatör ve sabit sıcaklıkta su/bağlayıcı oranı ve bağlayıcı/kum oranının mekanik dayanım üzerine etkisi gözlenmiştir.

Sıcaklık kürü uygulanması sırasında alternatif bir yöntem olarak, kalıba yerleştirilmiş taze harç numunelerinin fırın içerisine konulmadan önce, yanmaz fırın torbası ile sarılmak suretiyle, sıcaklık etkisinde su kaybını azaltılması hedeflenmiştir.



Şekil 4.25. Yanmaz fırın poşeti ile sarılan numuneler

Sıcaklık kürü sırasında numunelerdeki su kaybını azaltıp veya geciktirerek, aktivasyon sırasındaki polimer ağ yapısının güçlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemle üretilen numunelerin mekanik dayanımları bölüm 5.3.1.3'te verilmiştir.



Şekil 4.26. Yanmaz pırın poşetli numunelerin etiv görüntüsü

#### 4.2.3.2. Soma C sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarının karşılaştırılması

Uygun aktivatör tespiti için yapılan deneme çalışmaları sonucunda, C sınıfı Kangal uçucu külü ile 28 gün sonunda, en yüksek basınç dayanımı %12 Na oranı  $M_s=0,6$  olan CN12M6 kodlu numune ile 14,30 MPa olarak elde edilebilmiştir. Deney sonuçları bölüm 5.2.5.2'de verilmiştir.

C sınıfı Kangal uçucu külü ile üretilen alkali aktive edilmiş çimentosuz harç numunelerde, yüksek dayanım elde edilemediği için, alternatif bir C sınıfı kül kullanarak karşılaştırma yoluna gidilmiştir. Bunun için Manisa Soma Termik Santralin'den tedarik edilen C sınıfı Soma uçucu külü ile benzer aktivatör oranlarından bazıları kullanılarak, değişik sıcaklıklarda ısıl işlem uygulamak suretiyle numune üretilmiş ve mekanik dayanımları kontrol edilmiştir. Deney sonuçları bölüm 5.3.2.'de verilmiştir. C sınıfı Soma uçucu külü ile üretilen alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerde de benzer şekilde düşük mekanik dayanımlar tespit edilmiştir.

#### 4.2.3.3. C sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar

C sınıfı Kangal uçucu külüne silis dumanı ilave edilerek dayanım artışı olup olmadığı araştırılmış, araştırma sonuçları bölüm 5.3.3.1’de verilmiştir.

C sınıfı Kangal uçucu külü ile üretilen alkali aktive edilmiş harç numunelerinin ön deneme ve uygun aktivatörü belirleme çalışmalarındaki tespit edilen en olumsuz özelliği, sıcaklık kürü sonrasında sertleşmiş numunelerin su içerisinde şişerek dağılmalarıdır. Suda bekletilen numunelerin resimleri Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

C sınıfı Kangal uçucu külü ile üretilen alkali aktive edilmiş harç numunelerinin su içerisinde şişip dağılmalarının, külün yapısında bulunan yüksek CaO’in kimyasal özelliklerinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.27. Suda bekletilen C sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numuneler

Suda dağılma özelliği C sınıfı Soma uçucu külü ile üretilen alkali aktive edilmiş sertleşmiş harç numunelerinde de gözlenmiştir. Bu sebeple alternatif bir yöntem olarak

C sınıfı Kangal uçucu külünü su içerisinde 48 saat beklettikten sonra etüvde 100 °C’de 24 saat süre ile kurutma işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.28. Suda bekletilen ve kurutulan c sınıfı Kangal uçucu külü

Daha sonra C sınıfı için belirlenen uygun aktivatör oranı (%12 Na,  $M_s=0,2$ ) ile karışım hazırlanmaya çalışılmış, fakat uçucu külün iri parçalar oluşturması nedeniyle kalıba yerleştirilebilecek homojen bir harç elde edilememiştir.

### 4.3. Deney Yöntemleri

#### 4.3.1. Puzolanik aktivite deneyi

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği puzolanik aktivite olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik malzemelerin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması, ve yeterli miktarda silis, alümin ve demiroksit içermesi gerekmektedir. ( Erdoğan, 2010)

Puzolanik aktivite, büyük ölçüde puzolanın özelliklerine ve içerisinde bulunan aktif fazların kalitesine ve miktarına bağlıdır. Puzolanlar heterojen bir yapıda olmaları ve hidrasyonun karmaşık olması nedeniyle, puzolanik aktiviteyi açıklayıcı bir model bir model geliştirilememiştir. Bununla birlikte puzolanik aktivite, puzolanın bağladığı kireç miktarına, özgül yüzeye, kimyasal ve mineralojik özelliklere,  $SiO_2$  miktarına, puzolanın kaynağına ve kür şartlarına bağlıdır (Baradan, 2011).

ASTM C 618 (1998) standardında hem F sınıfı hem de C sınıfı uçucu küller için dayanım aktivite indeksinin 7 ve 28 gün için en az %75 olması gerektiğini belirtilmektedir.

ASTM C 618 standartına göre önce 500 gr portland çimentosu +1375 gram kum + 242 ml su kullanılarak kontrol harcı hazırlanmaktadır. Daha sonra 400 gr portland çimentosu+ 100 gr puzolan, kontrol karışımın gösterdiği akmayı sağlayabilecek kadar ilave edilerek harç elde edilmektedir. Bu iki harçtan 5 cm boyutlarındaki küp numuneler hazırlanarak 7 ve 28 gün sonundaki basınç dayanımına bakılmaktadır.

TS EN 450-1:2015 standardına göre ise kütlece %75 referans çimento ile %25 puzolan ile hazırlanmış standart harç numuneleri üzerinde basınç dayanım testleri uygulanmaktadır. Puzolanik aktivite, “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değer hesaplanmasıyla ifade edilmektedir. Bu değer aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\text{Dayanım aktivite indeksi}=(A/B)\times 100$$

Burada,

A= Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı

B=Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Bu çalışmada kullanılan uçucu küllerin dayanım aktivite indeksleri, TS EN450-1 standardına e göre belirlenmiş olup sonuçlar Tablo 4.12.'de verilmiştir.

Tablo 4.12. Uçucu Küllerin puzolanik aktivite indeksleri

Numune	28 Günlük	90 Günlük	28 Günlük aktivite(%)	90 Günlük Aktivite (%)
	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)		
Referans KPÇ 42,5	43,4	54,68	---	---
Kangal Uçucu Külü	37,51	48,01	86,43	87,80
Tunçbilek Uçucu Külü	36,25	47,08	83,53	86,10
Soma Uçucu Külü	36,57	48,32	84,26	88,37

### 4.3.2. Yayılma tablası deneyi

Taze harç işlenebilirliği tayini için, TS EN 1015-3'te taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile) metodu kullanılmıştır. Deney kapsamında taban çapı 100 mm, üst çapı 70 mm, yüksekliği 50 mm olan konik kap, sarma tablası üzerinde iken her tabakaya tokmak ile on defa vuruş yapılarak iki seferde alkali aktive edilmiş harç doldurulmuş ve üzeri düzlenmiştir. Daha sonra konik kalıp düşey olarak yukarı doğru çekilmiştir. Yayılma tablasının kolu çevrilerek 1,25 cm yükseklikten 15 saniyede 15 defa düşürüldükten sonra yayılma değeri 4 farklı yönden ölçülerek, ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması mm cinsinden yayılma değeri olarak ifade edilmiştir.

$$\text{İşlenebilme} = [(D_s - D_t) / D_t] \times 100 \quad (4.1)$$

D<sub>s</sub>: Deney sonucundaki çap

D<sub>t</sub>: Deneye başlamadan önceki çap olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.29. Yayılma Tablası

### 4.3.3. Birim ağırlık

Deneyde üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler, önce kuru ağırlık olarak tartılmış, daha sonra numune hacmine bölünmüştür. Bu şekilde her bir numunenin birim ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Birim ağırlık aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Birim Ağırlık} = A/B \quad (4.2)$$



A= Numunenin kuru haldeki ağırlığı

B=Numunenin hacmi

#### 4.3.4. Su emme ve boşluk oranı tayini

Su emme miktarı ve bağlantılı boşluk miktarı ASTM C 642 standardına göre belirlenmiştir. Harç numunelerin, etüvden çıkarıldıktan sonra kuru birim ağırlık tartılmıştır (A). Sonraki aşamada, numuneler 21 °C sıcaklığındaki su içerisinde 48 saat süreyle bekletilerek kuru yüzey doygun ağırlığı belirlenmiştir (B). Son olarak, numunenin su içerisindeki ağırlığı ölçülmüştür (C). Denklem 4.3 ve 4.4 yardımıyla su emme ve geçirimli boşluk oranları hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme (\%)} = [(B-A)/ A] \times 100 \quad (4.3)$$

$$\text{Geçirimli boşluk (\%)} = [(B-A)/(B-C)] \times 100 \quad (4.4)$$



Şekil 4.30. Arşimet deney seti

### 4.3.5. Mekanik deneyler

#### 4.3.5.1. Eğilme deneyi

Eğilme deneyi, 40x40x160 mm boyutlu prizmatik örnekler üzerinde TS EN 1015-11 standardına göre 100 mm mesnet açıklığı kullanılarak ve tek noktadan yük kontrollü yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Numune, deney cihazına yan yüzeylerden biri üzerine ve uzunluğuna eksenine mesnet silindirlerinin eksenine dik olacak şekilde mesnet silindirleri üzerine yerleştirilir. Yük, yükleyici silindir yardımı ile prizmanın karşı yan yüzünden dik olarak uygulanır ve düzgün olarak  $(50 \pm 10)$  N/s hızında olacak şekilde prizma numune kırılıncaya kadar artırılır. Kırılma anındaki kuvvet değerinden yararlanılarak, 3 adet numunenin kırılma değerleri ortalaması, eğilme dayanımı değeri tespit edilir. İki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç dayanım deneyine kadar muhafaza edilir.



Şekil 4.31. Eğilme deneyi

#### 4.3.5.2. Basınç dayanımı deneyi

TS EN 1015-11 standardına göre eğilme deneyi uygulanmış 3 adet numunenin kırılması ile elde edilen 6 adet prizma, yan yüzeylerinden yüklemek suretiyle deney uygulanır. Yarım prizmalar, cihazın plakaları arasına  $\pm 0,5$  mm.den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek 40x40mm metal kırma başlığı arasına yerleştirilir. Yük (2400

$\pm 200$ ) N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, prizma kırılana kadar otomatik olarak artırılır. Kırılma yükü kesit alanına bölünerek basınç dayanımı değeri hesaplanacaktır. 6 adet prizmanın ortalama basınç dayanım değeri, o numunenin basınç dayanımı değeri olarak alınır.



Şekil 4.32. Eğilme ve basınç deney seti

#### 4.3.6. Ultrases geçiş hızı deneyi

Basınç ve eğilme deneyi ile yüksek sıcaklık deneyi için hazırlanmış olan numunelerin tamamına, sıcaklık uygulanmadan önce ve sıcaklık uygulandıktan sonra TS EN 12504-4'te belirtilen ultrases geçiş hızının tayini deneyi uygulanmıştır. Deneyde, 0,1  $\mu$ s duyarlıklı ultrases aleti ile t,  $\mu$ s ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Deneyde numunelerin pürüzlü yüzeylerine vazelin sürülerek transduserler numunenin boyu doğrultusunda yerleştirilmiştir. Direkt iletim yöntemi ile geçiş süresi olan t,  $\mu$ s değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra transduserler yer değiştirilerek ikinci bir okuma kaydedilmiş, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınmıştır. Kaydedilen bu değer Denklem 4.5 bağıntısı ile ses geçiş hızı  $V_{ses}$  km/sn cinsinden hesaplanmıştır.

$$V_{ses} = L/t \quad (4.5)$$

$V_{ses}$ : Ultrases geçiş hızı (km/sn)

L : İki transduser arası mesafe (160 mm)

t : Ultrases geçiş hızı ( $\mu$ s)  
olarak ifade edilmektedir.



Şekil 4.33. Ultrases ölçüm cihazı

#### 4.3.7. Durabilite deneyleri

##### 4.3.7.1. Yüksek sıcaklık etkisi deneyi

TS EN 1363-2 yangına dayanıklılık deneyleri standardına uygun olarak yapılan deney kapsamında, 40x40x160 mm boyutlarında alkali aktive edilmiş prizma numuneler üretilmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık uygulanmaları önce ağırlıkları ve ultrases geçiş hızları ölçülmüştür. Üretilen numuneler 1 saat boyunca ayrı ayrı 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C'deki sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınında ısı artış hızı 7 °C/dk. olarak tespit edilmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler daha sonra, 24 saat oda sıcaklığında soğuması için laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Soğuyan numuneler, ağırlık kayıplarını ölçmek amacıyla tartılmış, ayrıca ultrases geçiş hızları ölçülmüştür.

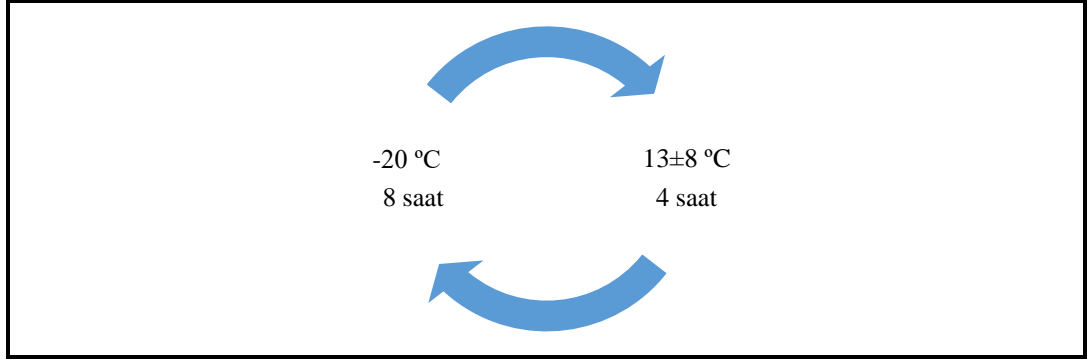
Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerin eğilme ve basınç dayanımını değerleri test edilerek, sıcaklık öncesi dayanımları ile karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4.34. Yüksek sıcaklık deneyi resimleri

#### 4.3.7.2. Donma-çözülme etkisi deneyi

Bu deneyde, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ağırlık kaybı deneylerinde kullanılmak üzere her seri ve yaş için 3'er adet 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Numuneler 28 gün boyunca  $20 \pm 2$  °C oda sıcaklığında bekletilmiş, daha sonra numunelere donma-çözülme deneyi uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyi TS EN 15177 standardına göre yapılmıştır. Donma-çözülme çevrimlerinde, numuneler suya doygun hale getirilerek daha önceden  $-20 \pm 2$  °C'ye ayarlanmış donma-çözülme kabinine yerleştirilecek ve 8 saat bekletilmiştir. Donma işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler su içerisinde 4 saat  $13 \pm 8$  °C de bekletilmiştir. Böylece bir çevrim tamamlanmıştır.



Şekil 4.35. Donma-çözülme çevrimi

Numunelerin  $7\pm 1$ ,  $14\pm 1$ ,  $28\pm 1$ ,  $42\pm 1$  ve  $56$ . döngü sonunda kütleleri uygun bir terazi ile  $1\text{ gr}$  doğrulukla tartılmıştır. Numunelere toplamda  $56$  çevrim donma-çözülme testi uygulanmış, daha sonra eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.36. Donma-çözülme deneyi resimleri

#### 4.3.7.3. Büzülme (rötire) etkisi deneyi

Röre etkisi deneyi için ölçümleri  $40\times 40\times 160\text{ mm}$  boyutlu prizmatik harç çubuğu numuneler hazırlanmıştır. Kuruma büzülmesi deneyi, numuneler üzerinde ASTM C 596 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 4.37'de rötire deneyi için kullanılan harç numunesinin kalıbı gösterilmiştir.



Şekil 4.37. Rötre için 40x40x160 mm boyutlu prizmatik harç numune kalıbı

Hazırlanan karışımlar, 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp ve 2 gün süre ile 20 °C sıcaklıkta su içerisinde kür edildikten sonra atmosfer koşullarında bekletilmiştir. Harç çubuklarının boy değişimi 0,002 hassasiyetindeki komparatör yardımıyla 6 ay boyunca ölçülmüştür. Şekil 4.38’de büzülme deneyi resmi gösterilmiştir.



Şekil 4.38. Büzülme(rötre) etkisi deneyi

#### 4.3.7.4. Sülfat etkisi deneyi

##### 4.3.7.4.1. Sodyum sülfat etkisi deneyi

Bu deneyde boy değişimleri için 3’er adet 40×40×160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri hazırlanmıştır. ASTM C 1012 de belirtilen esaslara göre numuneler, sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) çözeltisi içerisinde konulmuştur. Numunelerin kür ortamı ve

test ortamı sıcaklıkları  $23.0 \pm 2.0$  °C oda sıcaklığıdır. 50.0 g  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  1000 ml saf su içerisinde çözdürülmüştür. Çözelti, kullanılmadan 1 gün önce hazırlanacak ve PH değeri 6,9 olarak ölçülmüştür. Çözeltinin hacmi 1 adet  $40 \times 40 \times 160$  mm boyutlarında prizmatik numune için 1000 ml olacak şekilde hazırlanmıştır. Çözelti içerisine konulan numunelerin 1,2, 3, 4, 8, 13 ve 15 haftalık boy değişimleri komparatör ile ölçülmüştür. 15. haftadan sonra 4, 5 ve 6 ay olmak üzere üç ölçüm daha yapılmış, toplam 6 ay boyunca numuneler kontrol edilmiştir.

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisi 1. ve 3. aylarda değiştirilmiştir. Numunelerin 1. Ay, 3. Ay ve 6. ay sonundaki boy, ağırlık değişimleri ile eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.39. Sodyum sülfat etkisi deney resimleri

Yapılan ölçümler sonucunda, boy değişimleri Denklem (4.6) ile hesaplanmıştır.

$$\Delta L = (L_x - L_i) / L_g \times 100 \quad (4.6)$$

$\Delta L$  = Herhangi bir yaştaki boy değişim yüzdesi

$L_x$  = Numunenin herhangi bir yaştaki komparatör okuma değeri

$L_i$  = Numunenin komparatör ile ilk okuma değeri

$L_g$  = Nominal ölçü uzunluğu veya 160 mm



#### 4.3.7.4.2. Magnezyum sülfat etkisi deneyi

Bu deneyde, boy değişimleri için 3'er adet 40×40×160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri hazırlanmıştır. ASTM C 1012 de belirtilen esaslara göre numuneler, sodyum sülfat ( $MgSO_4$ ) çözeltisi içerisine konulmuştur. Numunelerin kür ortamı ve test ortamı sıcaklıkları  $23.0 \pm 2.0$  °C oda sıcaklığıdır. 50,0 g  $MgSO_4$  1000 ml saf su içerisinde çözdürülmüştür. Çözelti, kullanılmadan 1 gün önce hazırlanacak ve pH değeri 6,7 olarak ölçülmüştür. Çözeltinin hacmi 1 adet 40×40×160 mm boyutlarında prizmatik numune için 1000 ml olacak şekilde hazırlanmıştır. Çözelti içerisine konulan numunelerin 1,2, 3, 4, 8, 13 ve 15 haftalık boy değişimleri komparatör ile ölçülmüştür. 15. haftadan sonra 4, 5 ve 6 olmak üzere üç ölçüm daha yapılmış, toplam 6 ay boyunca numuneler kontrol edilmiştir.  $Na_2SO_4$  çözeltisi 1. ve 3. aylarda değiştirilmiştir. Numunelerin 1. Ay, 3. Ay ve 6. ay sonundaki boy, ağırlık değişimleri ile eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.40. Magnezyum sülfat etkisi deney resimleri

Yapılan ölçümler sonucunda, boy değişimleri bölüm 4.3.7.4.1'de verilen Denklem 4.6 ile hesaplanmıştır.

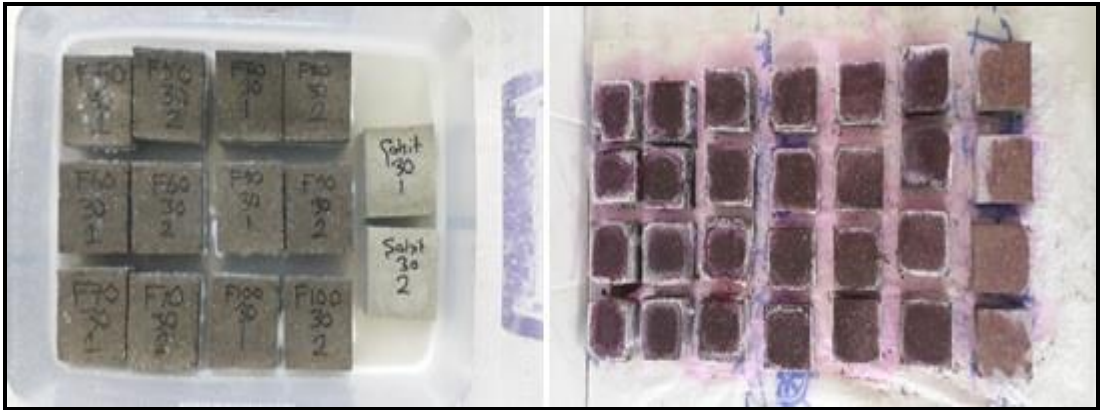
#### 4.3.7.5. Karbonatlaşma deneyi

Karbonatlaşma deneyi kapsamında en yüksek dayanımı veren alkali aktive edilmiş harç karışımıyla hazırlanan numuneler 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C ve 100 °C sıcaklıklarda 48 saat süreyle ısıtılacak şekilde ısıtıldıktan sonra 28 gün oda koşullarında kür edilmiştir. Deney için 71×71×71 mm boyutlu küp kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 4.41. 71×71×71 mm boyutlu küp kalıp ve numunelere

Hazırlanan numuneler karbonatlaşma etkisini kontrol amacıyla sodyum bikarbonatlı suya konularak 30-90-180 gün sonundaki karbonatlaşma derinlikleri ölçülecektir. Numune başına 50 gr  $\text{NaHCO}_3$ , 1 litre saf su ile karıştırdıktan sonra 24 saat beklemeye bırakılmıştır. Daha sonra numuneler karbonatlı su içerisine yerleştirilmiştir. Karbonatlı su çözeltisinin pH değeri 7,3 olarak ölçülmüştür. Karbonatlı su 1. ay ve 3. ay da yenilenmiştir. Numuneler 1. ay, 3. ay ve 6. ay sonunda karbonatlı su içerisinden çıkarılmış, daha sonra iki parçaya kesilmiştir. Numunelerin iç yüzeyine fenolftalein indikatör çözeltisi püskürtülmüştür. Karbonatlaşmayan kısımlar pembe, karbonatlaşan kısım ise beyaz renk almıştır. 1. ay, 3. ay ve 6. ay sonundaki karbonatlaşma derinlikleri mikrometre ile ölçülmüştür.



Şekil 4.42. Karbonatlaşma deneyi numuneleri



Şekil 4.43. Fenolftalein püskürtülmüş numuneler

#### 4.3.7.6. Kapiller su emme deneyi

Kapiller su emme deneyi,  $100 \pm 6$  mm çapında,  $50 \pm 3$  mm kalınlıkta silindir biçiminde üretilen numuneler üzerinde ASTM C1585 deney yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Deney için 2 numune kullanılmıştır. Sonra numuneler birbirleri ile temas etmeyecek biçimde su dolu kaba içerisine, daha önceden yerleştirilmiş mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Numunelerin suya temas eden yüzeyleri 0,10 mm hassasiyetle belirlenmiştir. Numunelerin su ile temas etmeyen üst yüzeyleri plastik levha ile yan yüzeyleri ise parafin ile kaplanmıştır. Deney numunelerinin 10 dakikaya kadar 2 dakika ara ile 20, 30, 60 dakikada ara ile su emme miktarları ölçülmüştür. Daha sonra her  $60 \pm 2$  dakikada 1 defa olmak üzere 6 saat boyunca, su emme miktarları ölçüm yapılmıştır. 3 gün boyunca, 6 saatte bir su emme miktarları kaydedilmiştir. 4-7 gün arasında ise her 24 saatte bir su emme miktarları not edilmiştir. Her ölçüm işleminde, numune sudan çıkarılıp temas yüzeyi silinerek tartılıp ve ölçüm değerleri not edilmiştir. Ölçülen değerlerden;

$I$  = su emme

$mt$  =  $t$  zaman aralığında kütledeki gram değişimi

$a$  = numunenin temas yüzeyi

$d$  = suyun yoğunluğu  $g/mm^3$

olmak üzere  $I = mt / (a \cdot d)$  denklemi ile su emme miktarı bulunmuştur. (4.7)

Şekil 4.44'te su kapiller su emme deneyi resimleri verilmiştir.



Şekil 4.44. Kapiller su emme deney numuneleri

#### 4.3.7.7. Aşınma direnci deneyi

Aşınma direnci deneyinde, 71x71x71 mm boyutlarında hazırlanan harç numunelerin aşınma direncinin belirlenmesinde Böhme aşınma deneyi (TS 2824, EN 1338, DIN 52108) kullanılmıştır. Bu deneyde dakikada  $30 \pm 1$  devir hızla dönen 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş döner bir aşındırıcı çelik disk bulunmaktadır. Döner disk üzerindeki yerine konulup sabitlenen numuneye çelik bir manivela ile  $294 \pm 3$  N düşey yük uygulanmaktadır. Düzenek üzerinde diskin 22 devrinden sonra otomatik durdurma tertibatı bulunmaktadır. Her seri için üçer adet numune, TS 2824'e uygun olarak kenar uzunluğu  $71 \pm 1.5$  mm olan küp numuneler hazırlanmıştır. Deney aletine yerleştirilen numunelerin sürtünme yolu üzerine  $20 \pm 0.5$  gr aşındırıcı toz kullanılmıştır. Çalışmada, her bir numune için 20 kez 22 devir toplamda 440 devir yaptırılarak aşındırma deneyi tamamlanmıştır. Üretilen numunelerin her bir kenarında üç nokta ve ortada bir nokta olmak üzere belirlenen dokuz noktada 0.01 hassasiyette elektronik kumpas ile yükseklik ölçümleri alınmıştır. Deney sonunda numunelerin ağırlık ve yükseklik kayıpları belirlenmiştir.



Şekil 4.45. Aşınma direnci deneyi

#### 4.3.7.8. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi

ASTM C1202-97 standardına göre yapılan deneyde, her seri için silindir numunelerden kesilmiş, çapı 100 mm, kalınlığı  $51 \pm 2$  mm olan, numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin yan yüzeyleri elektrik iletmeyen bir malzeme ile kaplandıktan sonra numunelere 3 saat boyunca vakum uygulanmıştır. Daha sonra vakum haznesine su doldurularak numunelerin vakum etkisinde 1 saat su emmesi sağlanmıştır. Bu işlemlerden sonra numuneler su içine yerleştirilmiştir. Böylece deney başlangıcına kadar numunelerin suya doymuş halde kalması sağlanmıştır. Numuneler sudan çıkartıldıktan sonra çözelti hücreleri arasına yerleştirilmiştir. Deney için hücrelerden birisi sodyum klorür, diğeri ise sodyum hidroksit ile doldurulmuştur. Ardından 60 V sabit potansiyel farkı uygulanarak numunelerden geçen elektrik akım şiddeti miktarı belirli aralıklarla kaydedilmiştir. 6 saat sonunda numuneden geçen akım şiddeti–zaman grafiği çizilerek ve iletilen elektrik akımı miktarı coulomb cinsinden hesaplanmıştır. Şekil 4.46’da hızlı klorür geçirgenliği deneyi ait resimler verilmiştir.



Şekil 4.46. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi

## BÖLÜM 5. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.1. Ön Deneme Karışımı Sonuçları

Ön deneme karışımlarında üretilen numunelerin eğilme ve basınç deneyleri sonuçları Tablo 5.1’de verilmiştir. Numune kodlamaları ile ilgili açıklamalar Tablo 5.1’de açıklanmıştır.

Tablo 5.1.Ön deneme numunelerinin eğilme ve basınç değerleri

No	Numune Kodu	Kırma Yaşı	Eğilme Dayanımı Mpa	Basınç Dayanımı Mpa	Su/Çimento Oranı	Kum/Bağlayıcı Oranı
1	CN2M2-60--24	6	1,24	5,01	0,6	2
2	CN2M4-60-24	7	1,23	6,43	0,6	2
3	CN2M6-60-24	6	1,60	9,56	0,6	2
4	CN2M6-80-7	3	1,14	8,68	0,6	2
5	CN2M6 80-24	3	1,23	7	0,6	2
6	CN2M8-60-24	7	1,00	7,47	0,6	2
7	CN4M0-90-48	2	1,09	10,47	0,7	2,5
8	CN4M2-60-24	6	1,60	9,40	0,62	2
9	CN4M2-80--7	3	1,34	9,32	0,62	2
10	CN4M2- 80-24	3	1,08	6,64	0,6	2
11	CN4M2-90-48	3	1,21	11,2	0,65	2,5
12	CN4M4-60-24	6	1,23	8,47	0,62	2
13	CN4M4-90-48	2	0,99	6,78	0,7	2,5
14	CN4M6-24	5	1,76	9,50	0,62	2
15	CN4M6-80-7	3	1,76	10,25	0,62	2
16	CN4M6-80-24	3	1,27	9,59	0,75	2
17	CN4M8-60-24	6	1,10	8,17	0,62	2
18	CN6M2-60-24	5	1,42	5,95	0,62	2
19	CN6M4-60-24	5	0,65	3,60	0,62	2
20	CN6M6-60-24	4	0,57	4,13	0,62	2
21	CN6M8-90-24	3	0,49	4,56	0,6	2
22	CN8M4 90-24	3	0,81	5,6	0,7	2
23	CN10M4 90-24	3	1,09	6,88	0,7	2
24	CN12M4 90-24	2	1,04	7,9	0,7	2
25	CN12M2-90-48	3	0,77	5,28	0,65	2,5
26	CN12M2-90-48	3	0,96	6,4	0,7	2,5
27	CN14M0-90-48	3	2,84	12,93	0,7	2,5

Tablo 5.1.(devamı)

No	Numune Kodu	Kırma Yaşı	Eğilme Dayanımı Mpa	Basınc Dayanımı Mpa	Su/Çimento Oranı	Kum/Bağlayıcı Oranı
31	FN4M2-90-48	3	0,58	2,17	0,45	2
32	FN6M8-90-48	3	0,41	1,81	0,4	2,5
33	FN10M2-90-48	3	3,25	14,54	0,4	2,5
34	FN12M2-90-24	3	2,69	11,14	0,45	2,5
35	FN12M2-90-48	3	5,42	23,36	0,45	2,5
36	FN14M0-90-48	3	11,69	40,52	0,4	2,5
37	FN14M0-90-72	3	7,06	31,44	0,35	2,5
38	FN14M4-90-72	3	11,06	45,76	0,35	2,5
39	FN20M0-90-48	2	13,71	50,38	0,35	2,5
40	FN20M6-90-48	2	6,1	25,91	0,35	2,5

Yapılan ön deneme karışımlarında, aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- Aynı oranlarda kum ve aktivatör kullanmak koşuluyla, C sınıfı uçucu külü karıştırmak için gerekli su miktarı, F sınıfı uçucu külü karıştırmak için gerekli su miktarından daha fazladır. C sınıfı Kangal uçucu külü ile 0,60 su/bağlayıcı oranının altında 60-90 °C sıcaklık 24-48 saat ısıtılma aralığında sertleşmiş ve sağlam numune üretmek mümkün olmamıştır.



Şekil 5.1. Kangal C sınıfı uçucu külü ile üretilen su/bağlayıcı=0,45 olan numune



- b. Özellikle C sınıfı uçucu külü olmak üzere, kullanılan C ve F sınıfı küllerde bağlayıcı/kum oranı 1/3 olarak alındığında, karışımın bazı aktivatör oranlarında tutmadığı, ısıtma işlemi sonrası numune yüzeylerinde dökülmeler olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.2. Kargal c sınıfı uçucu külü ile üretilen numune (su/bağlayıcı=0,70 bağlayıcı/kum=1/3)

- c. Aktivatör içerisinde  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı olan silikat modülü ( $M_s$ )'nin artması ile mikserin karıştırma işlemi sırasında zorlandığı,  $M_s$  oranı arttıkça karışımın ani priz aldığı gözlemlenmiştir. Her iki kül sınıfı ve mevcut aktivatör karışımları ile  $M_s$  oranı 0,60 üzerinde alkali aktive edilmiş çimentosuz harç üretmek mümkün olmamıştır.



Şekil 5.3.  $M_s$  oranı 0,60'tan büyük numunelerde görülen ani priz

- d. Kür sıcaklığının artması ile birlikte F sınıfı küllerde basınç dayanımlarında artış gözlemlenmiştir.

- e. Kür süresinin artışı ile birlikte F sınıfı küllerde basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir.
- f. C sınıfı kangal külü ile yapılan ön deneme karışımlarında en fazla 12-13 Mpa basınç dayanım değerlerine ulaşılabilmektedir. Sıcaklık kürü süresi ve sıcaklık artışında dikkate değer bir dayanım artışı gözlenmemiştir.
- g. Aktivatör karışımı 24 saatten fazla kap içerisinde bekletildiği takdirde, kristalleşme ve katılaşma başlamaktadır. Bu sebeple hazırlanan aktivatör karışımı kimyasal reaksiyon sebebiyle ısı yaymaktadır. Aktivatör karışımın soğumasından sonra harç karışımı içerisinde kullanılması, harç mikseri içerisinde rahat karıştırma açısından en uygun çözüm olarak gözlenmiştir. Özellikle 12 saat bekleme süresini geçen aktivatör karışımları ile homojen bir karışım elde etmek zorlaşmakta, taze harç içerisinde topaklanma meydana gelmektedir.



Şekil 5.4. Aktivatör karışımlarında 24 saatten fazla bekleme sonucu kristalleşme

- h. Aynı cinsten, aynı oranlarda uçucu kül, kum, su ve aktivatör kullanılarak üretilen ve aynı süre ısı işleme tabi tutulan numunelerde saf su veya şebeke suyu kullanımının basınç dayanımına herhangi bir farklı etkisi gözlenmemiştir.

## 5.2. Uygun aktivatör tespiti için yapılan deneme karışımları sonuçları

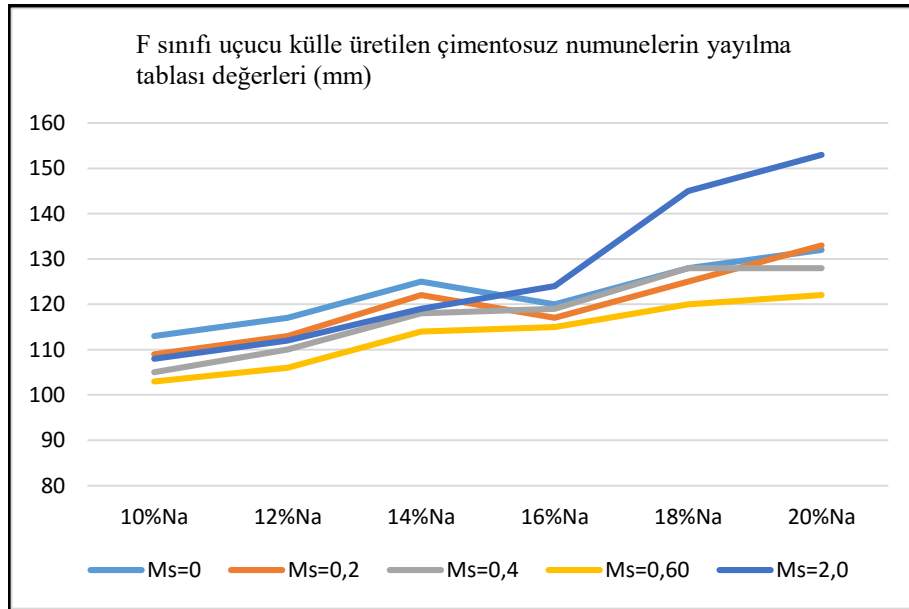
### 5.2.1. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası deneyi sonuçları

Taze harç işlenebilirliği tayini için, TS EN 1015-3'te taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile) metodu kullanılmıştır. Deney sonuçları Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri (mm)  
F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri (mm)

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	113	109	105	103	108
12	117	113	110	106	112
14	125	122	118	114	119
16	120	117	119	115	124
18	128	125	128	120	145
20	132	133	128	122	153

Numunelerin yayılma tablası değerleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin işlenebilirlik değerleri 103-153 mm arasında değişmektedir. En düşük işlenebilirlik değeri %10 Na ve Ms=0,60 olan

numune olurken, en yüksek işlenebilirlik değeri %20 Na ve  $M_s=2,0$  olan (sadece  $Na_2SiO_3$ ) içeren numunede gözlenmiştir. Belirtilen oranda  $Na_2SiO_3$  içerisindeki su miktarı, tüm numuneler için belirlenen su/bağlayıcı oranı olan %35'i geçtiği için işlenebilirlik belirgin şekilde artmıştır. Aynı oranda Na içeren  $NaOH+Na_2SiO_3$  karışımı aktivatör içeren numunelerde  $M_s$  oranı arttıkça işlenebilirlik düşmektedir. Sadece  $NaOH$  içeren ( $M_s=0$ ) ve sadece  $Na_2SiO_3$  ( $M_s=2,0$ ) numunelerde ise modül arttıkça işlenebilirlik değeri artmıştır.

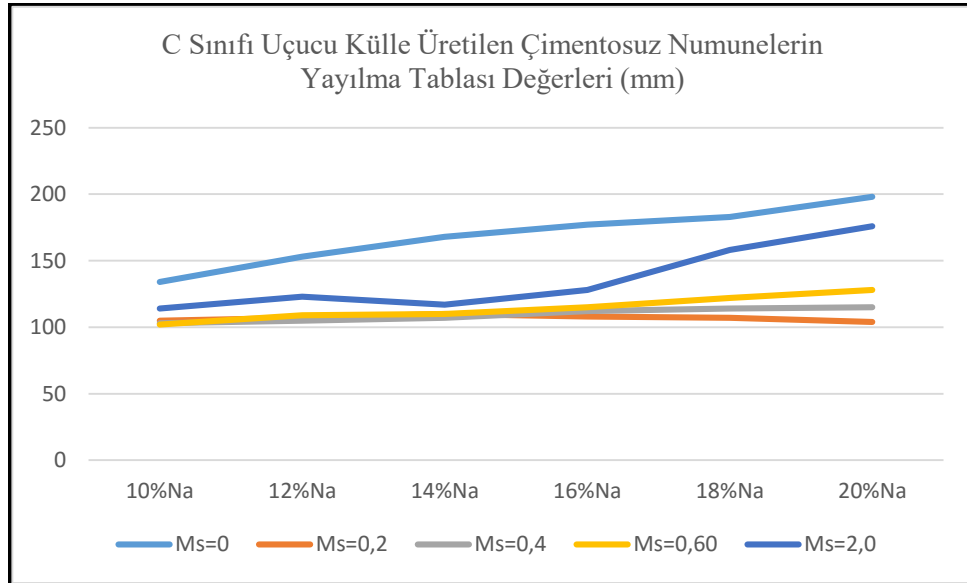
### 5.2.2. C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası deneyi sonuçları

Kangal C sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası deneyi sonuçları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. C sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası deneyi sonuçları  
C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri (mm)

%Na	$M_s=0$	$M_s=0,2$	$M_s=0,4$	$M_s=0,60$	$M_s=2,0$
10	134	105	103	102	114
12	153	107	105	109	123
14	168	110	107	110	117
16	177	108	112	115	128
18	183	107	114	122	158
20	198	104	115	128	176

Numunelerin yayılma tablası değerleri Şekil 5.6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin işlenebilirlik değerleri 102-176 mm arasında değişmektedir. En düşük işlenebilirlik değeri %10 Na ve  $M_s=0,60$  olan numune olurken, en yüksek işlenebilirlik değeri %20 Na ve  $M_s=2,0$  olan (sadece  $Na_2SiO_3$ ) içeren numunede gözlenmiştir. Aynı oranda Na içeren  $NaOH+Na_2SiO_3$  karışımı aktivatör içeren numunelerde  $M_s$  oranı arttıkça işlenebilirlik düşmektedir. Sadece  $NaOH$  içeren ( $M_s=0$ ) ve sadece  $Na_2SiO_3$  ( $M_s=2,0$ ) numunelerde ise oran arttıkça işlenebilirlik değeri artmıştır.



Şekil 5.6. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin yayılma tablası değerleri

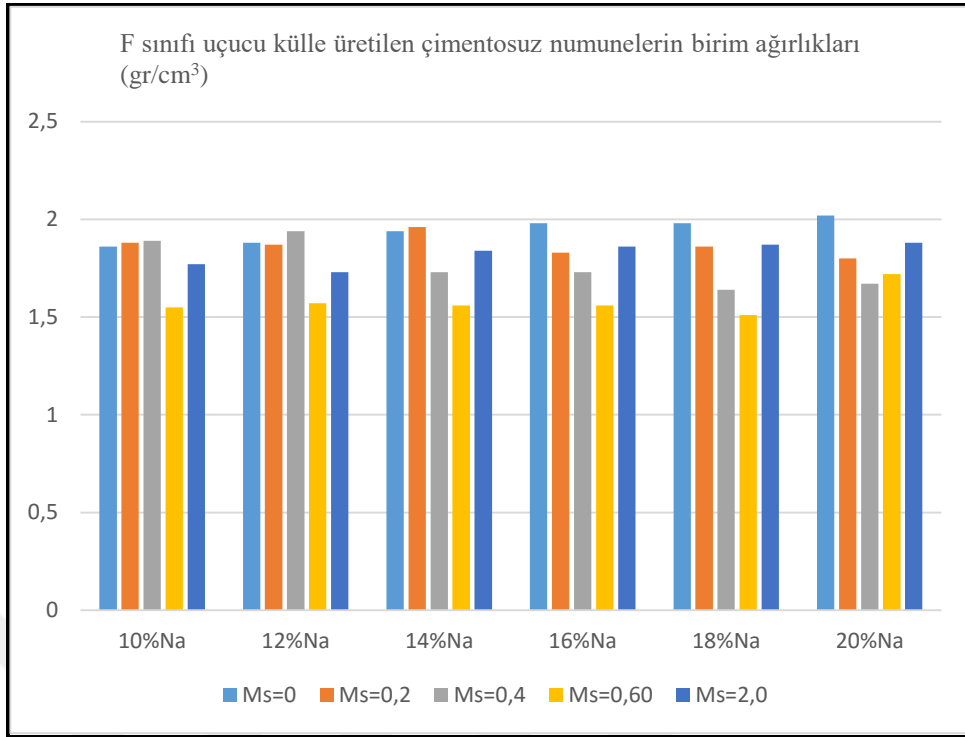
### 5.2.3. Birim ağırlık deneyi sonuçları

F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları  
F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları ( $\text{gr/cm}^3$ )

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	1,86	1,88	1,89	1,55	1,77
12	1,88	1,87	1,94	1,57	1,73
14	1,94	1,96	1,73	1,56	1,84
16	1,98	1,83	1,73	1,56	1,86
18	1,98	1,86	1,64	1,51	1,87
20	2,02	1,80	1,67	1,72	1,88

F Sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları, Şekil 5.7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.7. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları

F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerde, 1,51-2,02 gr/cm<sup>3</sup> aralığında birim ağırlık değerleri bulunmuştur. En düşük birim ağırlık değeri %18 Na ve Ms=0,60 olan numune olurken, en yüksek birim ağırlık değeri %20 Na ve Ms=0 olan (sadece NaOH) içeren numunede gözlenmiştir. Aynı oranda Na içeren NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör içeren numunelerde Ms oranı arttıkça numunelerin birim ağırlık değerleri genel olarak düşmektedir. Sadece NaOH içeren (Ms=0) ve sadece Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Ms=2,0) numunelerde ise aktivatör oranı arttıkça birim ağırlık miktarı artmıştır.

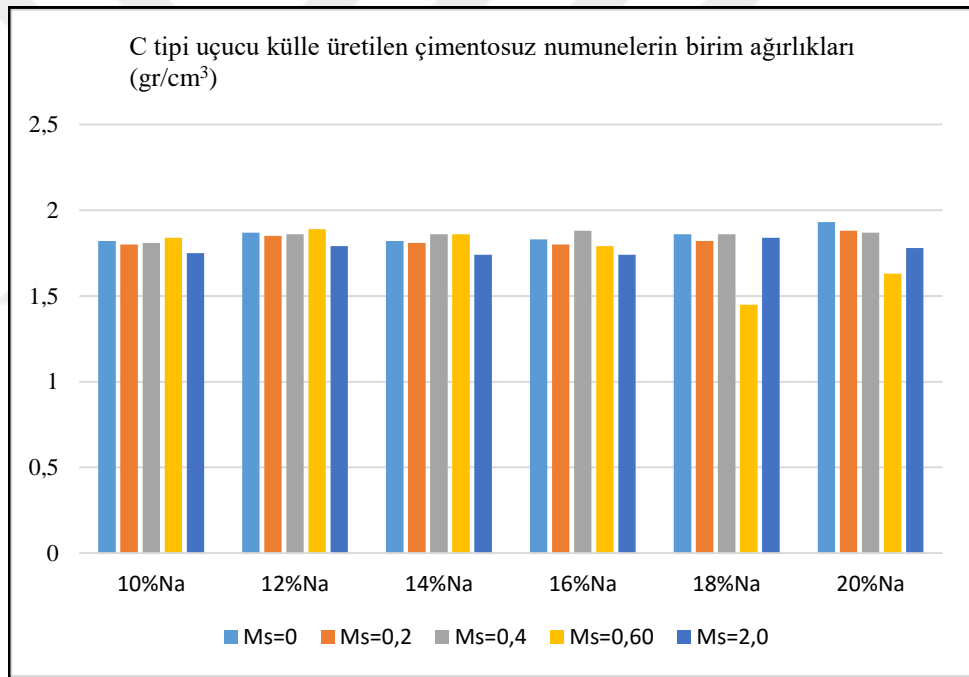
C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları 1,45-1,93 gr/cm<sup>3</sup> aralığında değişmektedir. En düşük birim ağırlık değeri %18 Na ve Ms=0,60 olan numune olurken, en yüksek birim ağırlık %20 Na ve Ms=0 olan (sadece NaOH) içeren numunede ölçülmüştür. Sadece NaOH içeren (Ms=0) ve sadece Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Ms=2,0) numunelerde ise aktivatör oranı arttıkça birim ağırlık miktarı artmıştır.

C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5 C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları  
C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları (gr/cm<sup>3</sup>)

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	1,82	1,80	1,81	1,84	1,75
12	1,87	1,85	1,86	1,89	1,79
14	1,82	1,81	1,86	1,86	1,74
16	1,83	1,80	1,88	1,79	1,74
18	1,86	1,82	1,86	1,45	1,84
20	1,93	1,88	1,87	1,63	1,78

C Sınıfı Uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları, Şekil 5.8.'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.8. C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları

C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerde, aktivatör içerisindeki sodyum miktarının artması ile birim ağırlığın artış gösterdiği gözlenmiştir. Sadece sodyum silikat kullanılarak üretilen numunelerin, NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılarak üretilen numunelere göre birim ağırlıklarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durumun Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün yapısında bulunan SiO<sub>2</sub> miktarının artışıyla, karışımın hızlı priz alma eğilimi nedeniyle kalıba tam olarak sıkışmış halde yerleştirilememesinden kaynaklandığı söylenebilir.

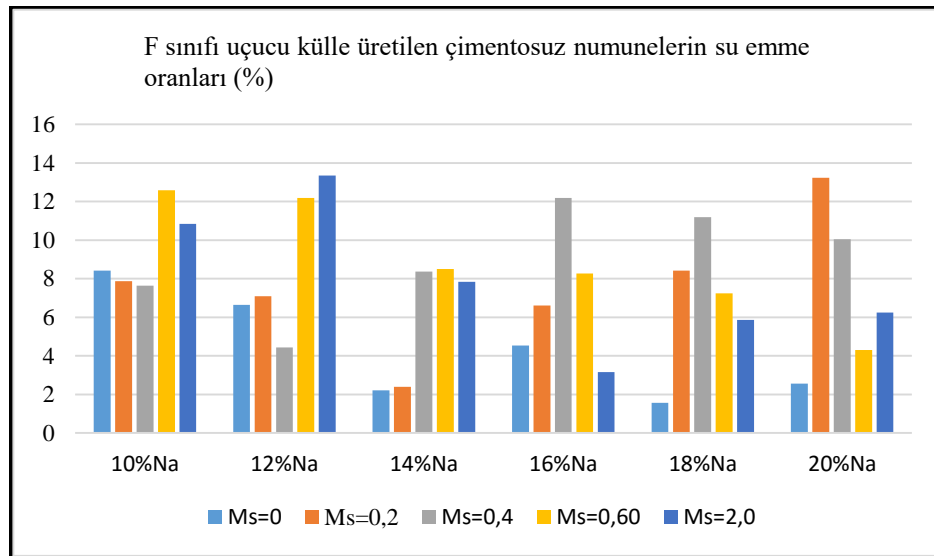
#### 5.2.4. Su emme ve boşluk oranı

F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları

F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları (%)					
%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	8,42	7,88	7,64	12,59	10,84
12	6,64	7,10	4,44	12,19	13,35
14	2,22	2,39	8,37	8,50	7,84
16	4,54	6,62	12,19	8,27	3,16
18	1,57	8,42	11,19	7,25	5,86
20	2,56	13,23	10,05	4,31	6,25

F sınıfı uçucu kütle üretilmiş çimentosuz numunelerde, su emme oranı %1,57-13,35 aralığında değişmektedir. En düşük su emme oranı %18 Na içeren Ms=0 (sadece NaOH ile üretilen) numunede gözlenirken, en yüksek su emme oranı ise Ms=2,0 olan %12 Na grubunda NaOH içermeyen numunede tespit edilmiştir. Numunelerin su emme oranları Şekil 5.9'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.9. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları

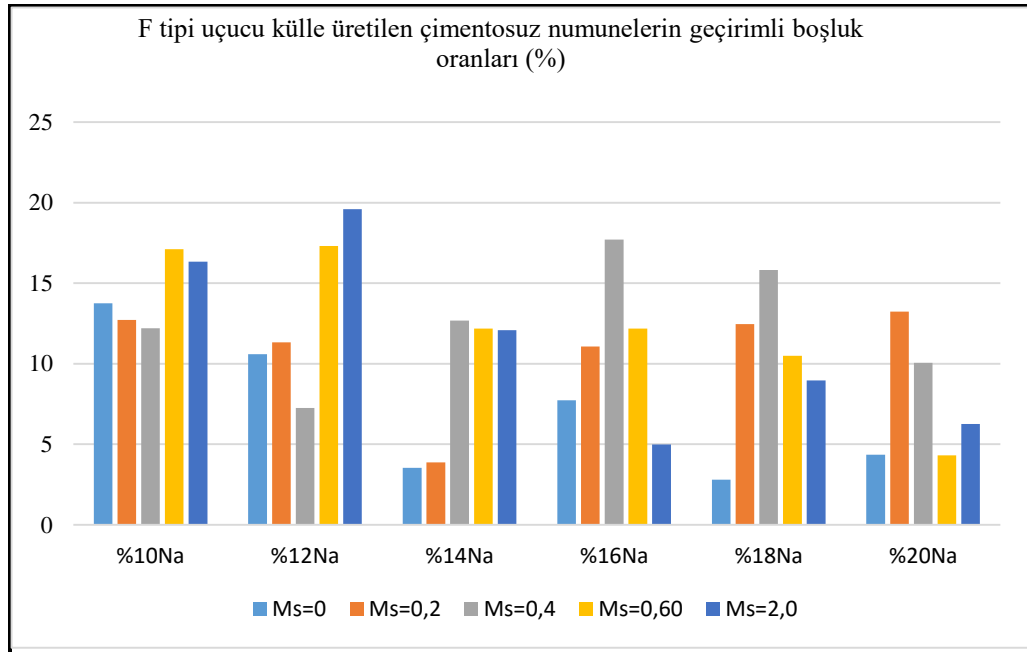


F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin geçirimli boşluk oranları Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin geçirimli boşluk oranları  
F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin geçirimli boşluk oranları (%)

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	13,75	12,71	12,21	17,12	16,33
12	10,60	11,33	7,26	17,31	19,60
14	3,53	3,88	12,67	12,19	12,09
16	7,72	11,07	17,70	12,18	4,98
18	2,80	12,46	15,82	10,49	8,97
20	4,35	13,23	10,05	4,31	6,25

Numunelerin geçirimli boşluk oranları Şekil 5.10’da grafiksel olarak gösterilmiştir. F sınıfı uçucu kütle üretilmiş çimentosuz numunelerde, geçirimli %2,80-%19,60 arasında değişmektedir. %18 Na ve Ms=0 olan sadece NaOH içeren numune en az boşluk oranı tespit edilmiştir. En yüksek boşluk oranı ise Ms=2,0 olan %12 Na grubunda, sadece  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içeren numunede tespit edilmiştir.



Şekil 5.10. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin geçirimli boşluk oranları

## 5.2.5. Mekanik deneyler

### 5.2.5.1. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme ve basınç dayanımları

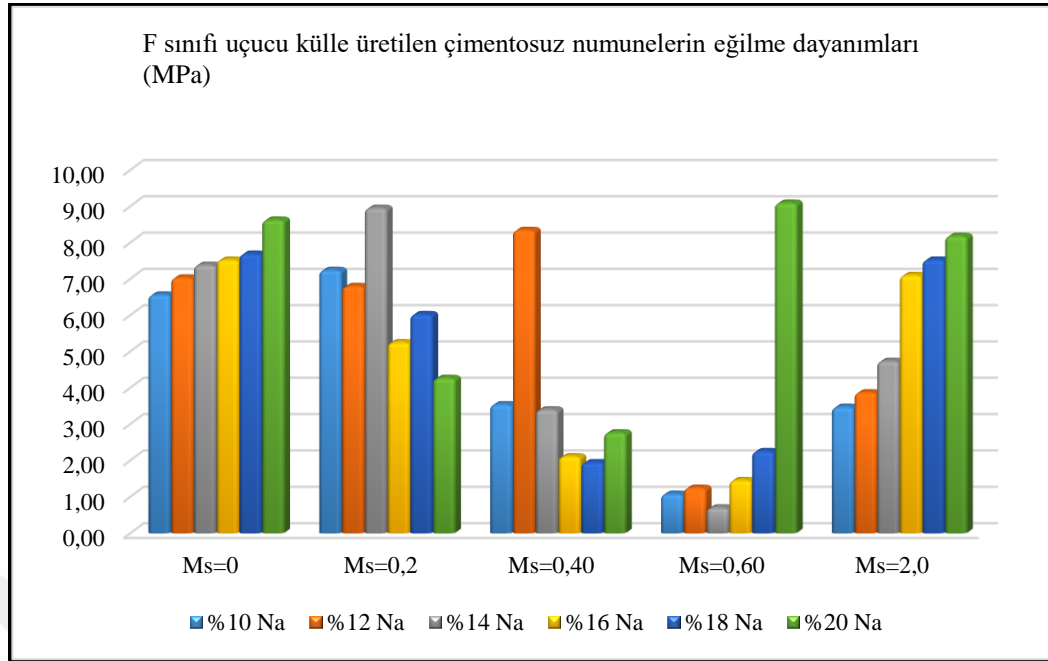
Bölüm 4.2.2.'de belirtilen karışım oranlarına göre hazırlanan, 75 °C'de 24 saat sıcaklık kürü uygulanmasının ardından 28 güne kadar oda sıcaklığında kür edilen numunelerin eğilme dayanımları Tablo 5.8'de verilmiştir.

F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları 1,24-9,09 MPa arasında değişmektedir. En düşük eğilme dayanımı %14 Na ve Ms=0,6 olan numunede 0,70 MPa olarak, en yüksek eğilme dayanımı ise %20 Na ve Ms=9,09 olarak tespit edilmiştir. Sadece NaOH (Ms=0) ve Sadece Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile üretilen numunelerin eğilme dayanımı, aktivatör oranının artması ile birlikte artış göstermektedir. Ms oranları sabit kalmak koşuluyla aktivatör içerisindeki Na oranı arttıkça eğilme dayanımı genel olarak azalmaktadır. Ayrıca Ms oranı arttıkça eğilme dayanımı azalmaktadır.

Tablo 5.8. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları  
F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları (MPa)

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,6	Ms=2,0
10	6,56	7,24	3,54	1,08	3,47
12	7,03	6,80	8,34	1,24	3,87
14	7,38	8,95	3,40	0,70	4,73
16	7,52	5,25	2,11	1,45	7,10
18	7,69	6,02	1,95	2,25	7,52
20	8,63	4,27	2,77	9,09	8,18

F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları Şekil 5.11.'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



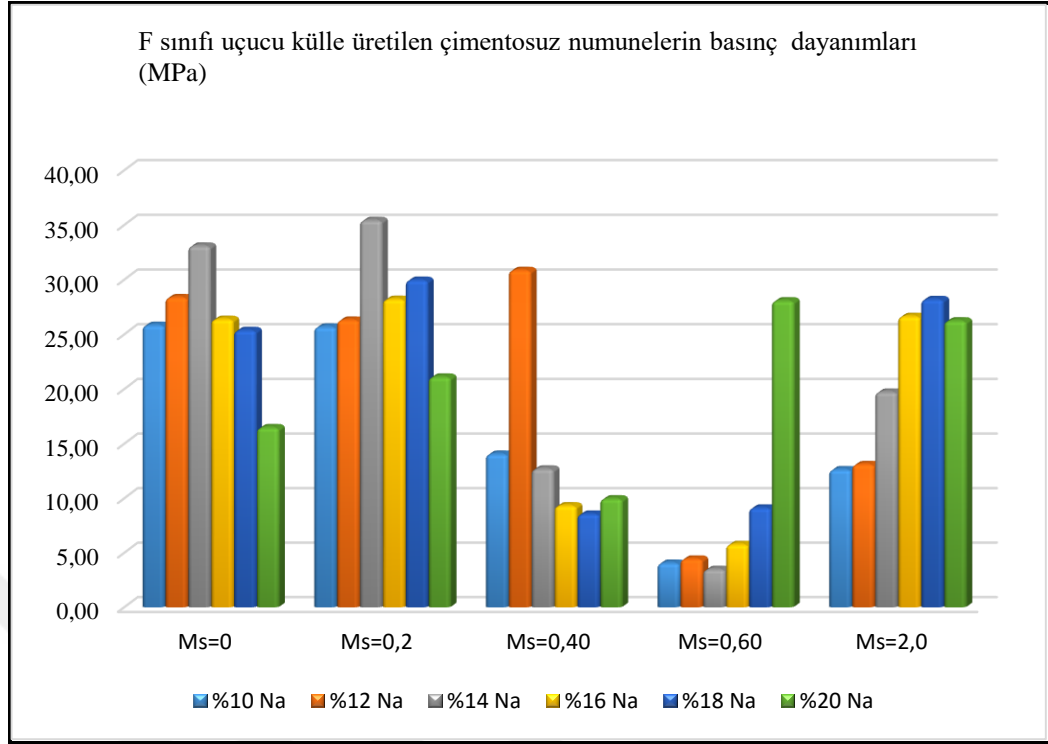
Şekil 5.11. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları

F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları  
F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları (MPa)

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	25,84	25,69	14,06	4,06	12,64
12	28,38	26,31	30,86	4,44	13,11
14	33,09	35,44	12,71	3,49	19,74
16	26,39	28,22	9,33	5,78	26,66
18	25,38	29,97	8,56	9,13	28,21
20	16,49	21,11	9,97	28,08	26,25

F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları Şekil5.12.'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.12. F sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

En uygun aktivatör oranını bulmak için F sınıfı uçucu kül kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 3,49-35,44 MPa arasında değişmektedir. En düşük basınç dayanımı %14 Na ve Ms=0,6 olan numunede 3,49 MPa olarak tespit edilmiş, en yüksek basınç dayanımı ise %14 Na ve Ms=0,2 olan numunede 35,44 MPa olarak tespit edilmiştir. NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatörle üretilen numunelerin tüm Na oranlarında Ms=0,2 oranının artması ile birlikte basınç dayanımı düşmektedir.

#### 5.2.5.2. C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin eğilme ve basınç dayanımları

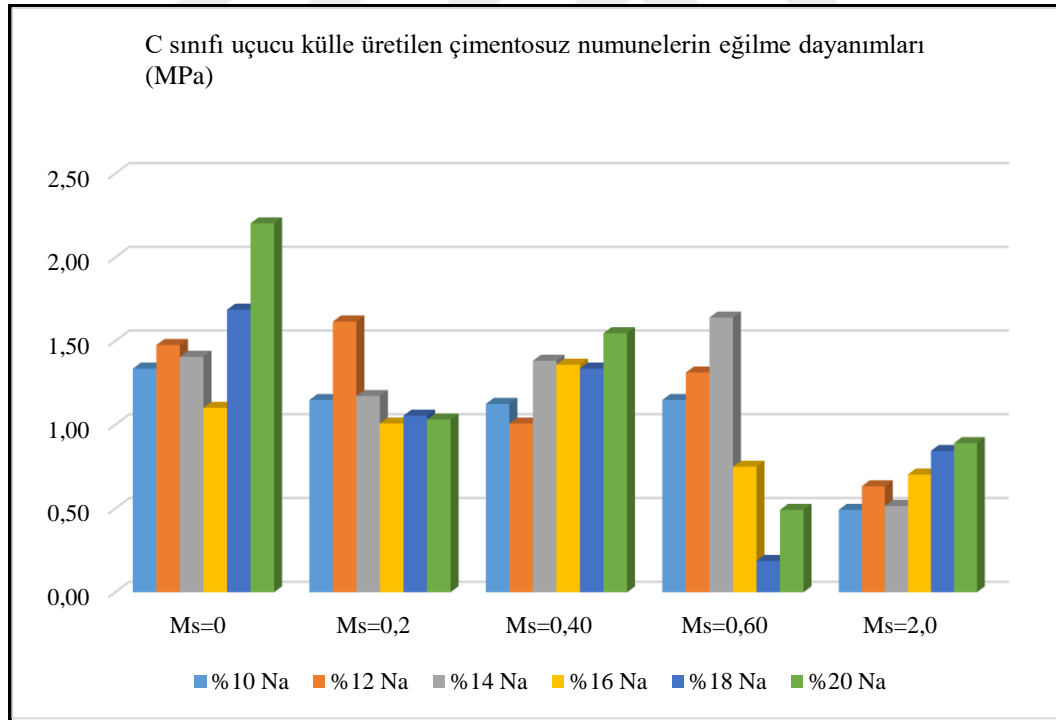
Bölüm 4.2.2’de belirtilen karışım oranlarına göre hazırlanan, 75 °C’de 24 saat sıcaklık kürü uygulanmasının ardından 28 güne kadar oda sıcaklığında kür edilen numunelerin eğilme dayanımları Tablo 5.10’da verilmiştir.

Tablo 5.10. C sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları

C sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları (MPa)					
%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	1,34	1,15	1,13	1,15	0,49
12	1,48	1,62	1,01	1,31	0,63
14	1,41	1,17	1,38	1,64	0,52
16	1,10	1,01	1,36	0,75	0,70
18	1,69	1,05	1,34	0,19	0,84
20	2,2	1,03	1,55	0,49	0,89

C sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları Şekil 5.13'de grafiksel olarak gösterilmiştir. En uygun aktivatörü tespit etmek amacıyla C sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları 0,19-2,20 MPa arasında değişmektedir.

En düşük eğilme dayanımı %18 Na ve Ms=0,6 olan aktivatör içeren numunede 0,19 MPa olarak gözlenirken, en yüksek eğilme dayanımı ise %20 Na ve Ms=0 olan numunede 2,20 MPa olarak tespit edilmiştir.



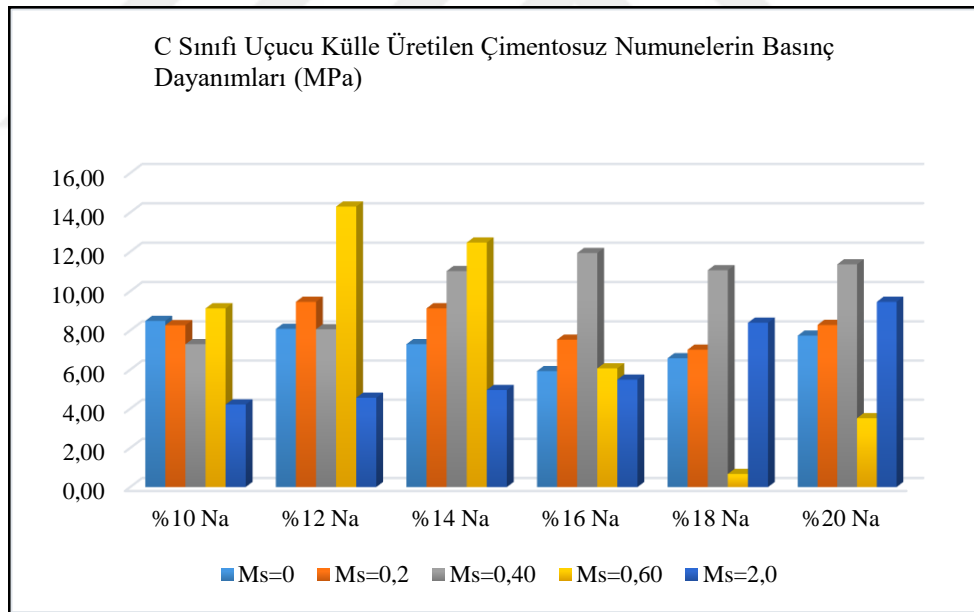
Şekil 5.13. C sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları

C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.11. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları  
C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları (MPa)

%Na	Ms=0	Ms=0,2	Ms=0,4	Ms=0,60	Ms=2,0
10	8,49	8,27	7,30	9,13	4,22
12	8,08	9,46	8,06	14,30	4,56
14	7,30	9,13	11,02	12,47	4,96
16	5,93	7,53	11,94	6,06	5,49
18	6,58	7,02	11,06	0,67	8,39
20	7,74	8,28	11,36	3,52	9,46

C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları Şekil5.14’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.14. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

En uygun aktivatörü tespit etmek amacıyla C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 0,60-14,30 MPa arasında değişmektedir. En düşük basınç dayanımı %18 Na ve Ms=0,6 olan aktivatör içeren numunede 0,60 MPa olarak gözlenirken, en yüksek basınç dayanımı ise %12 Na ve Ms=0,6 olan numunede 14,30 Mpa olarak tespit edilmiştir.

### 5.3. Karışım Geliştirme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

#### 5.3.1. F sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar

##### 5.3.1.1. Farklı kum ve su oranlarının mekanik dayanıma etkisi

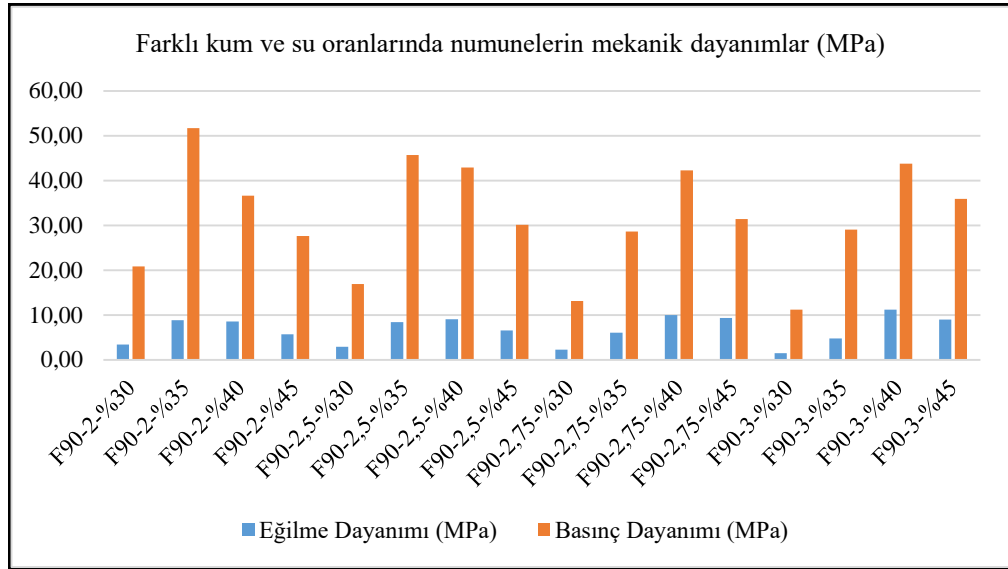
F sınıfı için en uygun aktivatör oranı olan %14 Na ve Ms=0,2 olan alkali aktivatör karışımı ile 90 °C’de 48 saat süre sıcaklık kürü uygulanarak üretilen çimentosuz numunelerin farklı su/bağlayıcı ve bağlayıcı/kum oranlarındaki mekanik dayanımları aşağıdaki Tablo 5.12’de verilmiştir.

Tablo 5.12. Uygun aktivatörle farklı kum ve su oranlarında üretilen numunelerin mekanik dayanımları

Numune	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
F90-2-%30	3,45	20,86
F90-2-%35	8,81	51,68
F90-2-%40	8,58	36,62
F90-2-%45	5,67	27,60
F90-2,5-%30	2,91	16,91
F90-2,5-%35	8,41	45,73
F90-2,5-%40	9,02	42,92
F90-2,5-%45	6,54	30,14
F90-2,75-%30	2,25	13,12
F90-2,75-%35	6,05	28,65
F90-2,75-%40	9,96	42,24
F90-2,75-%45	9,35	31,38
F90-3-%30	1,48	11,20
F90-3-%35	4,80	29,05
F90-3-%40	11,23	43,78
F90-3-%45	8,95	35,93

Kodlama Örneği: F90-2-%35 ( 90 °C’de kür edilen F tipi Uçucu Küllü kum/bağlayıcı=2, su/bağlayıcı=%35 olan çimentosuz numune)

Uygun Aktivatörle Farklı kum ve su oranlarında üretilen numunelerin mekanik dayanımları Şekil 5.15’te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Uygun Aktivatörle Farklı kum ve su oranlarında üretilen numunelerin mekanik dayanımları

Aktivatör, sıcaklık kürü derecesi ve sıcaklık kürü süresi sabit kalmak koşuluyla; kum/bağlayıcı oranının artması ile birlikte numunelerin basınç dayanımlarında azalma tespit edilmiştir.

### 5.3.1.2. Farklı sürelerde sıcaklık kürünün mekanik dayanıma etkisi

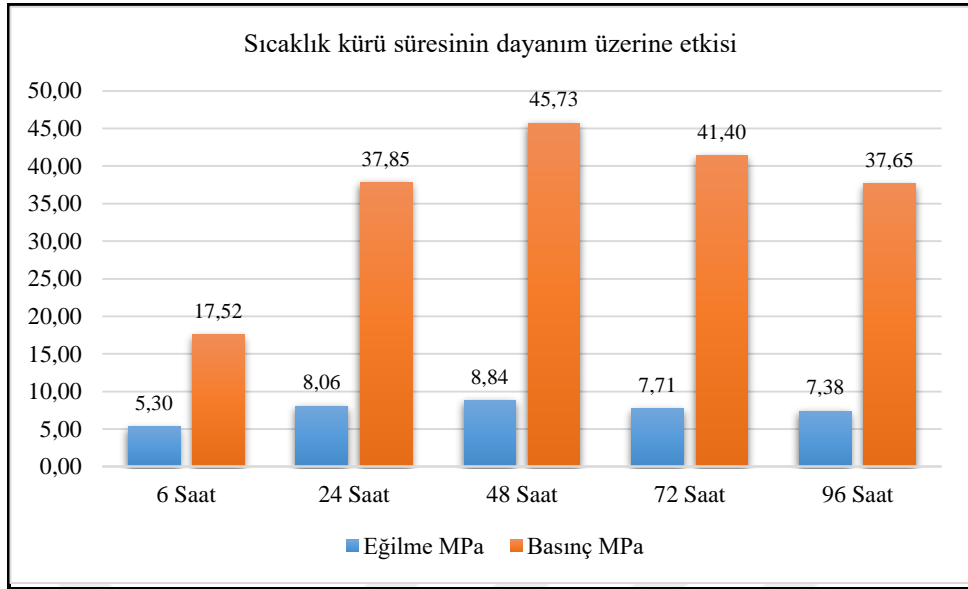
%14 Na ve Ms=0,2 olan Alkali aktivatör karışımı ile üretilen F sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerin farklı sürelerde sıcaklık kürü sonucu mekanik dayanımları Tablo 5.13'te verilmiştir.

Tablo 5.13. F sınıfı Uçucu Küllü çimentosuz numunelerin farklı sürelerde sıcaklık kürü sonucu mekanik dayanımları

Sıcaklık Kürü Süresi	Eğilme Dayanımı(Mpa)	Basınç Dayanımı(Mpa)
6 Saat	5,30	17,52
24 Saat	8,06	37,85
48 Saat	8,84	45,73
72 Saat	7,71	41,40
96 Saat	7,38	37,65

F sınıfı Uçucu Küllü çimentosuz numunelerin farklı sürelerde sıcaklık kürü sonucu mekanik dayanımları Şekil 5.16'da grafiksel olarak gösterilmiştir.





Şekil 5.16. Sıcaklık kürü süresinin dayanım üzerine etkisi

F sınıfı uçucu kül kullanılarak en uygun aktivatör oranı (%14 Na Ms=0,2) ile üretilen numunelerin 90 °C'de farklı sürelerde sıcaklık kürü uygulanmasından sonra 7. Gündeki eğilme ve basınç dayanımları incelenmiş, en uygun kür süresinin 90 °C 48 saat süren kür olduğu tespit edilmiştir. 48 saatten az veya fazla sürede ısı kürünün dayanımı artırmadığı gözlenmiştir.

### 5.3.1.3. Sıcaklık küründe su kaybını azaltmanın mekanik dayanıma etkisi

Numunelerin sıcaklık kürü sırasında su kaybını azaltmanın dayanım üzerine etkisini test etmek amacıyla, kalıba yerleştirilmiş numuneler, kalıpla birlikte hava almayacak şekilde fırın torbası ile kaplanarak etüve konulmuştur.

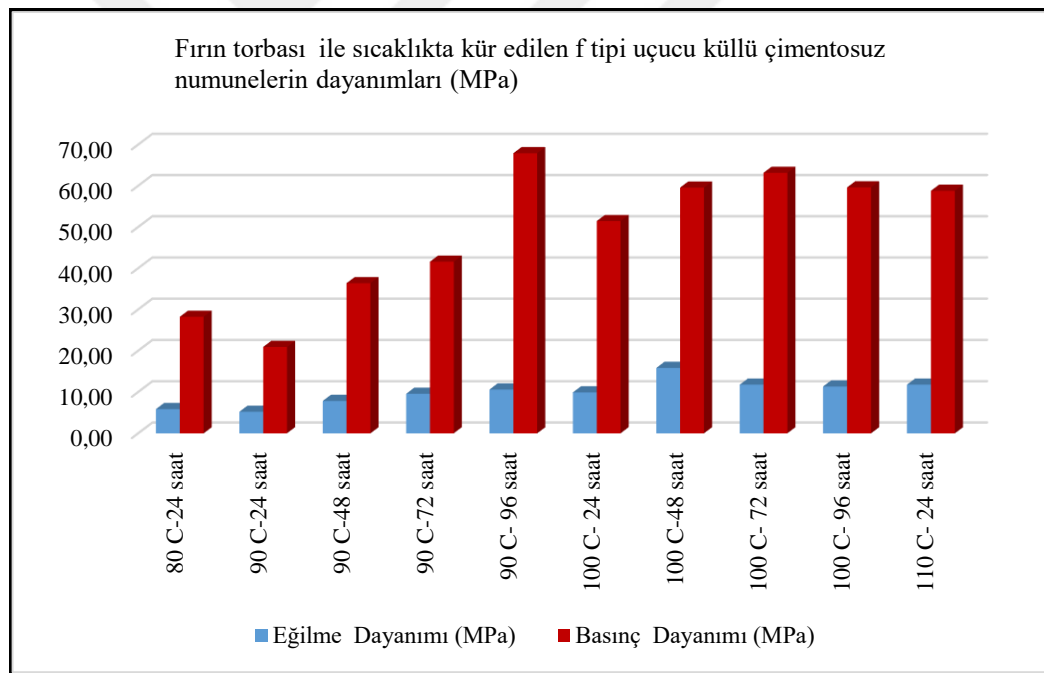
Numunelerin sıcaklık kürü sırasında hızlı su kayıplarını önlemek amacıyla yapılan yöntem, numunelerde, özellikle yüksek sıcaklıklarda eğilme basınç dayanımlarının artışına neden olmuştur. 90 °C'de 96 saat kür edilen numunelerin eğilme dayanımı 10,62 MPa, basınç dayanımı ise 67,92 MPa olarak tespit edilmiştir.

F Tipi Uçucu Külü için Uygun Aktivatör (%14 Na, Ms=0,2) İle üretilen numunelere yanmaz fırın torbası geçirilerek sıcaklık kürü uygulanması sonucu eğilme ve basınç dayanımı değerleri Tablo 5.14'te verilmiştir.

Tablo 5.14. Yanmaz fırın torbasında sıcaklık kürü uygulamasının mekanik dayanım üzerine etkisi

Sıcaklık Kürü °C-saat	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Basınç Dayanımı (Mpa)
80 C-24 saat	5,88	28,23
90 C-24 saat	5,23	20,92
90 C-48 saat	7,85	36,38
90 C-72 saat	9,59	41,58
90 C- 96 saat	10,62	67,92
100 C- 96 saat	9,91	51,44
100 C-48 saat	15,84	59,57
100 C- 72 saat	11,79	63,16
100 C- 96 saat	11,34	59,63
110 C- 24 saat	11,79	58,80

F sınıfı uçucu külü için uygun aktivatör (%14 Na, Ms=0,2) İle üretilen numunelere yanmaz fırın torbası geçirilerek sıcaklık kürü uygulanması sonucu eğilme ve basınç dayanımı değerleri Şekil 5.17’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Yanmaz Fırın torbasında sıcaklık kürü uygulamasının mekanik dayanım üzerine etkisi

#### 5.3.1.4. Silis dumanı ilavesinin mekanik dayanım üzerine etkisi

F sınıfı Tunçbilek uçucu külü içerisinde uçucu kül ağırlığının %5’i kadar silis dumanı ilave edilmiş ve F tipi için en uygun aktivatör oranı olarak kabul edilen %14 Na

Ms=0,2 olan aktivör ile üretilen harç 48 saat süre ile 100 °C'de ısı işleme maruz bırakılmıştır. 3 gün sonra eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir.

Silis dumanı ilavesinin F sınıfı uçucu küllü numunelerin dayanımları üzerine etkisi Tablo 5.16'da verilmiştir. Uygun aktivatörle üretilen numunesine %5 silis dumanı ilavesi eğilme dayanımında % 9,84, basınç dayanımında % 6,14'lük düşük bir artış sağlamıştır. Bu durumda silis dumanı ilavesinin basınç dayanımında belirgin bir artışa sebep olmadığı söylenebilir.

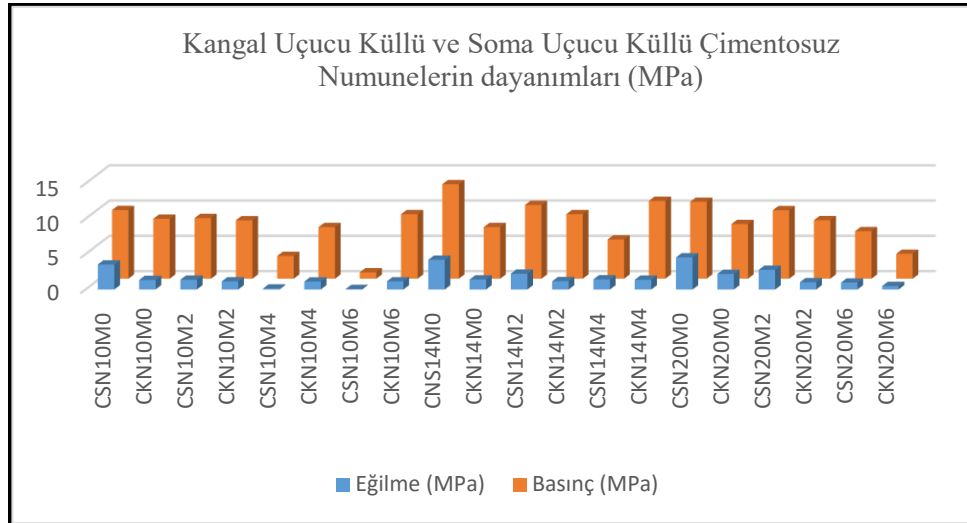
Tablo5.15. Silis dumanı ilavesini f tipi uçucu küllü numunelerin dayanımına etkisi

İşlem	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Basınç Dayanımı (Mpa)
FN14M2 numesine 100 C' de 48 saat sıcaklık kürü	6,40	39,55
FN14M2 numesine %5 Silis dumanı ilavesinden sonra 48 saat 100 c' de sıcaklık kürü	7,03	41,98

### 5.3.2. Kangal C sınıfı uçucu külü ve Soma C sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarının karşılaştırılması

Kangal C sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin dayanımları düşük çıktığı için karşılaştırma yapmak amacıyla Soma C sınıfı uçucu külü ile çimentosuz numuneler üretilmiş ve dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Numunelerin eğilme ve basınç dayanımı değerleri Tablo 5.17'de verilmiştir.

Kangal ve Soma C sınıfı uçucu külleriyle üretilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımları Şekil 5.18'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Kangal ve Soma C sınıfı uçucu küllü numunelerin meknik dayanımları

Tablo 5.16. Kangal ve Soma C sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerin mekanik dayanımları

Numune Kodu	Kırma Yaşı	su/bağlayıcı (%)	Birim Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa	Sıcaklık °C
CSN10M0	3	35	2,01	3,54	9,72	75 C
CKN10M0	3	70	1,82	1,34	8,49	75 C
CSN10M2	3	35	2,02	1,38	8,59	75 C
CKN10M2	3	70	1,80	1,15	8,27	75 C
CSN10M4	3	35	1,80	0,14	3,22	75 C
CKN10M4	3	70	1,81	1,13	7,3	75 C
CSN10M6	3	35	1,54	0,07	0,9	75 C
CKN10M6	3	70	1,84	1,15	9,13	75 C
CNS14M0	3	35	2,09	4,21	13,38	75 C
CKN14M0	3	70	1,82	1,41	7,3	75 C
CSN14M2	3	35	2,03	2,24	10,44	75 C
CKN14M2	3	70	1,82	1,17	9,13	75 C
CSN14M4	3	35	1,81	1,43	5,54	75 C
CKN14M4	3	70	1,86	1,38	11,02	75 C
CSN20M0	3	35	2,12	4,54	10,89	75 C
CKN20M0	3	70	1,93	2,2	7,74	75 C
CSN20M2	3	35	2,00	2,78	9,7	75 C
CKN20M2	3	70	1,88	1,03	8,28	75 C
CSN20M6	3	35	1,86	0,98	6,73	75 C
CKN20M6	3	70	1,63	0,49	3,52	75 C

Not: CS ( Soma Uçucu Küllü Numune), CK (Kangal Uçucu Küllü Numune)

Kangal C sınıfı uçucu küllü ile Soma C sınıfı uçucu küllü aynı aktivatör ve kum oranları kullanıldığı halde farklı su oranlarına ihtiyaç duymuştur. Kangal C sınıfı uçucu küllü ile %70 su/bağlayıcı oranında işlenebilir karışım üretilebilirken, aynı işlenebilirlik değeri Soma C sınıfı uçucu küllünde %35 Su/bağlayıcı oranında sağlanmıştır. Bölüm 4'te C sınıfı uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiğinde, Kangal C sınıfı uçucu küllünün CaO oranı %25,75, özgül yüzeyi 3320 cm<sup>2</sup>/gr ve 45 mikron üstü

elek bakiyesi %44,3 olarak analiz edilmiştir. Soma C sınıfı uçucu külünde ise CaO oranı %32,10, özgül yüzey  $2360 \text{ cm}^2/\text{gr}$  ve 45 mikron elek üstü bakiyesi ise %8,8 olarak analiz edilmiştir. Soma uçucu külünün Kangal uçucu külüne göre daha fazla CaO içermesi ve 45 mikron üstü elek bakiyesinin daha az olmasına rağmen işlenebilirlik için az suya ihtiyaç duyması, özgül yüzeyinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Kangal ve Soma C sınıfı uçucu külü ile aynı kum ve aktivatör oranlarında üretilip aynı sıcaklık derecesi ve süresinde kür edilen numunelerin dayanımları arasında belirgin farklılıklar gözlenmemiştir. Düşük dayanımın CaO miktarının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### **5.3.3. C sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin dayanımlarını geliştirmek için yapılan çalışmalar**

#### **5.3.3.1. Silis dumanı ilavesinin mekanik dayanım üzerine etkisi**

C sınıfı Kangal uçucu külü içerisine uçucu kül ağırlığının %5'i kadar silis dumanı ilave edilmiş ve C tipi için en uygun aktivatör oranı olarak kabul edilen %12 Na Ms=0,6 olan aktivör ile üretilen harç 48 saat süre ile  $100 \text{ C}$ 'de ısı işleme maruz bırakılmıştır. 3 gün sonra eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir.

Uçucu kül ilavesinin c sınıfı Kangal uçucu külü ile üretilen alkali aktive edilmiş harçların basınç dayanımı üzerine olumlu bir etkisi görülmemiştir. Silis dumanı ilavesinin C sınıfı uçucu külü numunelerin dayanımları üzerine etkisi Tablo 5.17'de gösterilmiştir.

Tablo 5.17 .Silis dumanı ilavesini c tipi uçucu küllü numunelerin dayanımına etkisi

İşlem	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Basınç Dayanımı (Mpa)
CN12M6 numesine 100 °C' de 48 saat ısıtma işlemi	1,55	12,19
CN12M6 numunesine %5 silis dumanı ilavesinden Sonra 48 saat 100 °C' de ısıtma işlemi	3,68	10,73

#### 5.4. Uygun aktivatör ile yapılan deney sonuçları

##### 5.4.1. F sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlık deneyi sonuçları

Uygun aktivatörü belirleme çalışmaları sonucunda F tipi uçucu kül için en ideal aktivatör oranını %14 Na ve  $M_s=0,2$  olan NaOH ve  $Na_2SiO_3$  karışımı olduğu belirlenmiştir. Bu aktivatör oranı ile üretilen, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C'de sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 3 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün, 90 gün, 180 gün ve 360 gün sonundaki mekanik özellikleri incelenen numunelerin, birim ağırlık sonuçları Tablo 5.19'da verilmiştir.

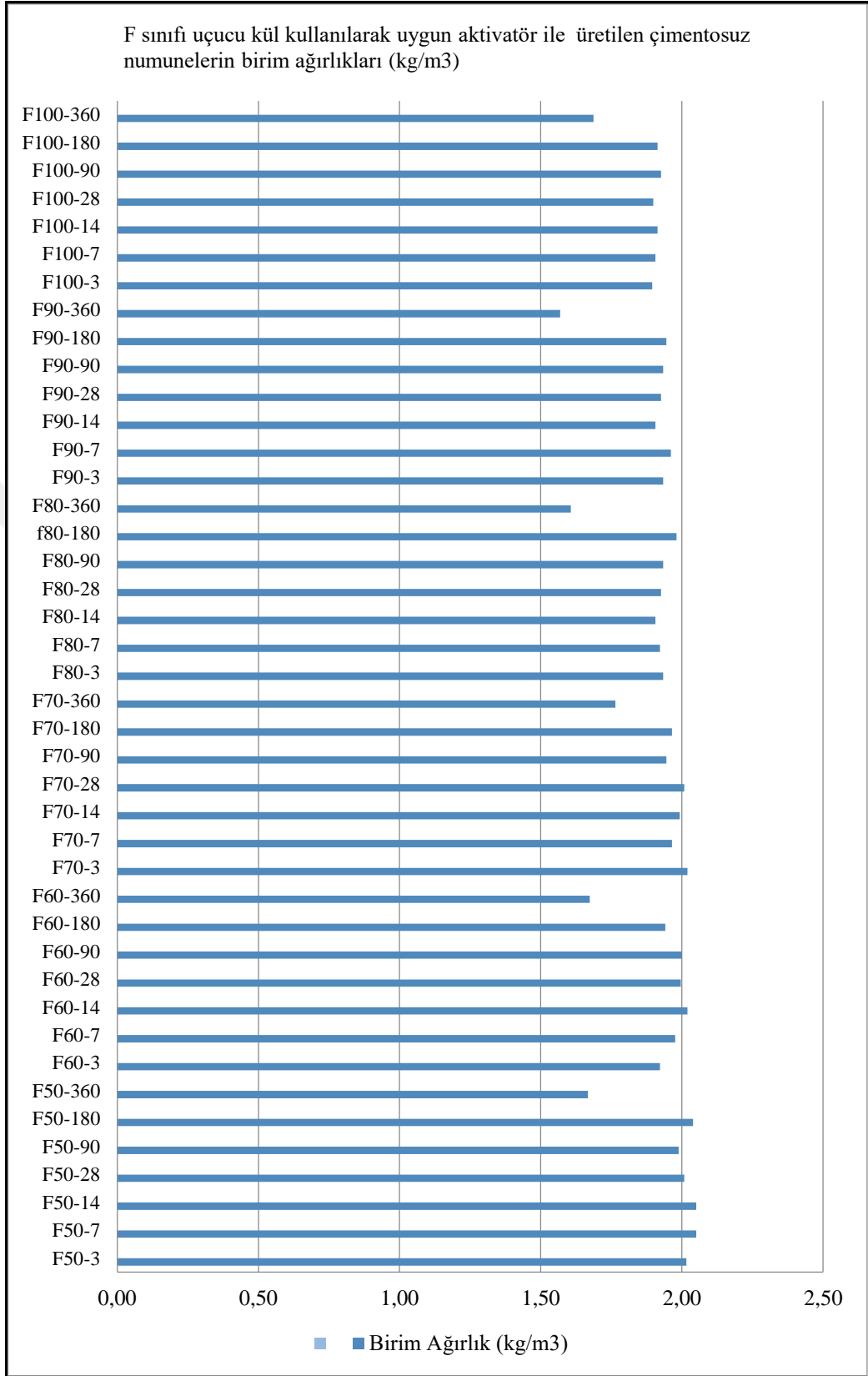
Numunelerin birim ağırlıkları  $1,57-2,05 \text{ gr/cm}^3$ , arasında değişmektedir. Aynı miktar aktivatör, kum ve kül ile üretilmesine rağmen, numunelerin birim ağırlıklarının bir miktar değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Özellikle 360 günlük numunelerin birim ağırlıklarının diğer yaşlardaki numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Numunelerde birim ağırlık miktarının ilerleyen yaşlarda azalma göstermesi, numunelerin kuruyarak bünyelerindeki suyu kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Uygun aktivatör ile üretilen numunelerin birim ağırlıkları Şekil 5.19'da grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.18. Uygun aktivatör ile üretilen f sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları

Nunume Kodu	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
F50-3	2,02
F50-7	2,05
F50-14	2,05
F50-28	2,01
F50-90	1,99
F50-180	2,04
F50-360	1,67
F60-3	1,92
F60-7	1,98
F60-14	2,02
F60-28	2,00
F60-90	2,00
F60-180	1,94
F60-360	1,67
F70-3	2,02
F70-7	1,96
F70-14	1,99
F70-28	2,01
F70-90	1,95
F70-180	1,96
F70-360	1,93
F80-3	1,93
F80-7	1,92
F80-14	1,91
F80-28	1,93
F80-90	1,93
F80-180	1,98
F80-360	1,61
F90-3	1,93
F90-7	1,96
F90-14	1,91
F90-28	1,93
F90-90	1,93
F90-180	1,95
F90-360	1,57
F100-3	1,89
F100-7	1,91
F100-14	1,91
F100-28	1,90
F100-90	1,93
F100-180	1,91
F100-360	1,60

Kodlama Örneği: F50-3 ( 50 °C’de sıcaklık kürü uygulanan ve F sınıfı uçucu küllü üretilen 3 günlük çimentosuz numune)



Şekil 5.19. F sınıfı uçucu kül kullanılarak uygun aktivatör ile üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları



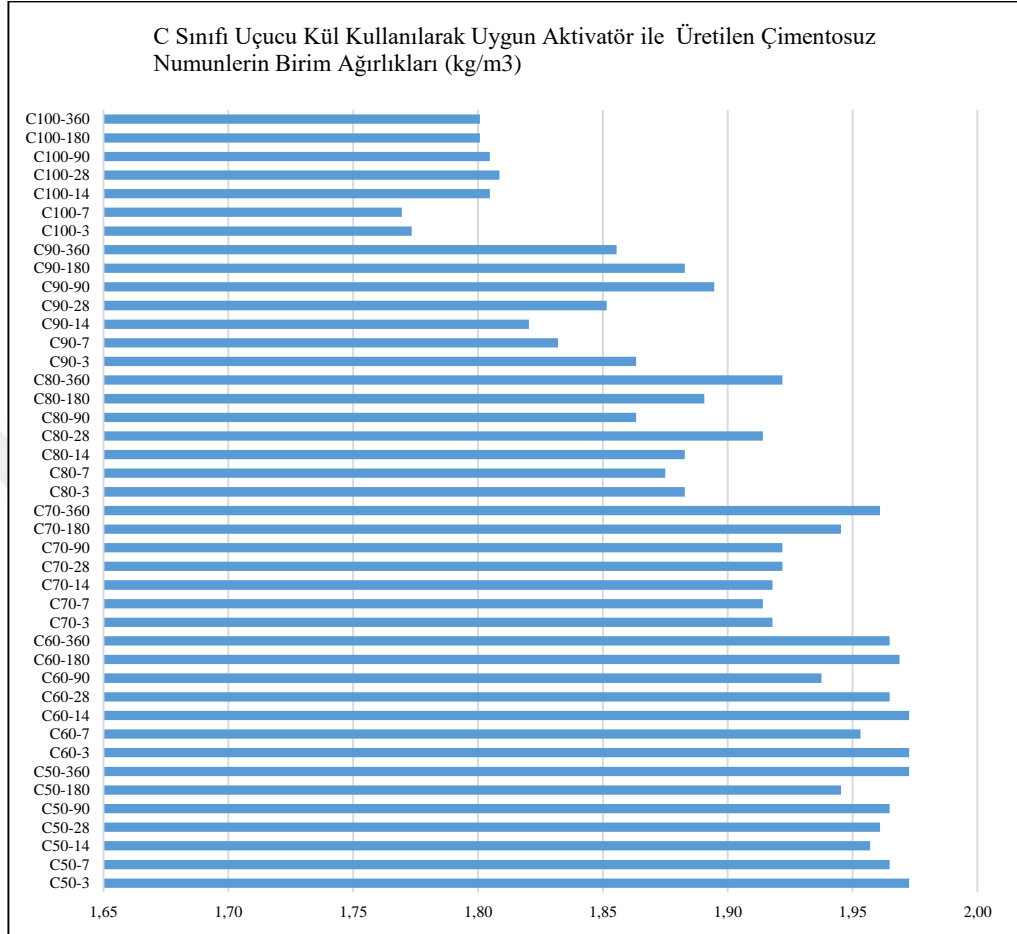
#### 5.4.2. C sınıfı uçucu kütle üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlık deneyi

C sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları 1,77-1,97 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Birim ağırlıkları Tablo 5.19'da verilmiştir.

Tablo 5.19. Uygun aktivatör ile üretilen C sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları

Nunume Kodu	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
C50-3	1,97
C50-7	1,96
C50-14	1,96
C50-28	1,96
C50-90	1,96
C50-180	1,95
C50-360	1,97
C60-3	1,97
C60-7	1,95
C60-14	1,97
C60-28	1,96
C60-90	1,94
C60-180	1,97
C60-360	1,96
C70-3	1,92
C70-7	1,91
C70-14	1,92
C70-28	1,92
C70-90	1,92
C70-180	1,95
C70-360	1,96
C80-3	1,88
C80-7	1,88
C80-14	1,88
C80-28	1,91
C80-90	1,86
C80-180	1,89
C80-360	1,92
C90-3	1,86
C90-7	1,83
C90-14	1,82
C90-28	1,85
C90-90	1,89
C90-180	1,88
C90-360	1,86
C100-3	1,77
C100-7	1,77
C100-14	1,80
C100-28	1,81
C100-90	1,80
C100-180	1,80
C100-360	1,80

Şekil 5.20’de C sınıfı uçucu kül ile üretilen numunelerin birim ağırlıkları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.20. C sınıfı uçucu kül kullanılarak uygun aktivatör ile üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları

C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin birim ağırlıkları, kür sıcaklığının artması ile azalma göstermiş olup ilerleyen yaşlarda, kendi sıcaklık grupları içerisinde de belirgin bir azalma yaşanmamıştır. Bu durum, C sınıfı uçucu külün bünyesindeki fazla miktardaki CaO’ın su tutma özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 5.4.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme ve geçirimli boşluk oranı

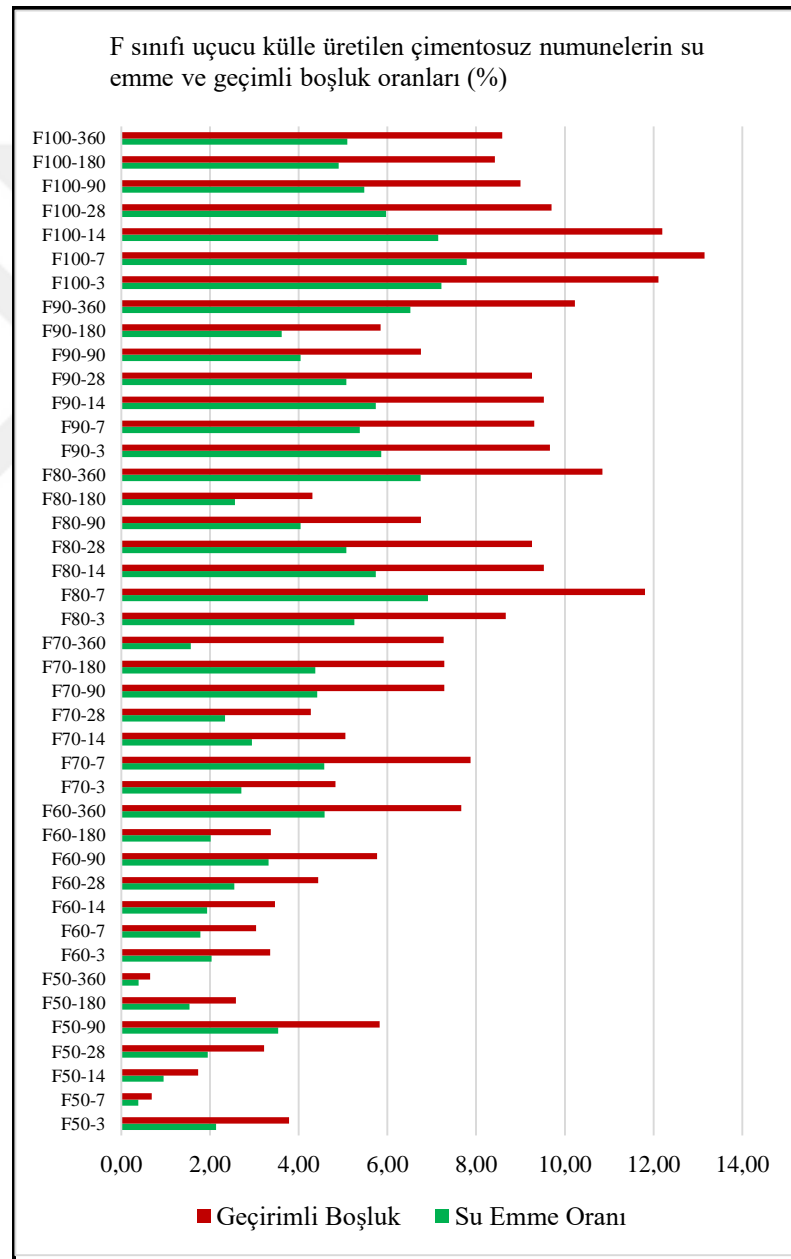
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları ve geçirimli boşluk oranları Tablo 5.20’de verilmiştir.

Tablo 5.20. F sınıfı uçucu küle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları ve geçimli boşluk oranları

Nunume Kodu	Su Emme Oranı	Geçirimli Boşluk
F50-3	2,13	3,78
F50-7	0,38	0,68
F50-14	0,95	1,73
F50-28	1,95	3,22
F50-90	3,54	5,83
F50-180	1,53	2,58
F50-360	0,39	0,65
F60-3	2,03	3,36
F60-7	1,78	3,04
F60-14	1,93	3,46
F60-28	2,54	4,44
F60-90	3,32	5,76
F60-180	2,01	3,37
F60-360	4,58	7,67
F70-3	2,71	4,83
F70-7	4,57	7,88
F70-14	2,94	5,05
F70-28	2,33	4,27
F70-90	4,42	7,28
F70-180	4,37	7,28
F70-360	1,57	7,27
F80-3	5,25	8,67
F80-7	6,91	11,81
F80-14	5,74	9,52
F80-28	5,07	9,26
F80-90	4,04	6,76
f80-180	2,56	4,30
F80-360	6,75	10,85
F90-3	5,86	9,67
F90-7	5,38	9,31
F90-14	5,74	9,52
F90-28	5,07	9,26
F90-90	4,04	6,76
F90-180	3,61	5,84
F90-360	6,52	10,22
F100-3	7,22	12,11
F100-7	7,79	13,15
F100-14	7,14	12,20
F100-28	5,97	9,70
F100-90	5,48	9,00
F100-180	4,90	8,42
F100-360	5,09	8,09

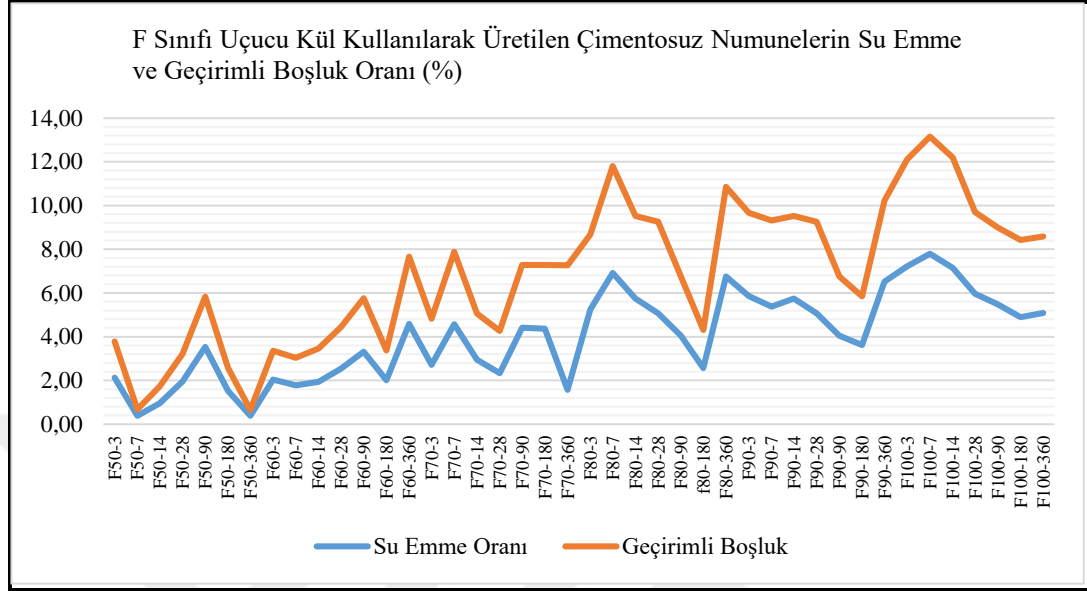
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları Şekil 5.21’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları % 0,39- % 6,91 arasında değişmekte olup, geçirimli boşluk oranları ise %0,68- %13,15 aralığında farklılıklar göstermektedir. Kür sıcaklığının artması ile numunelerin su emme oranları ve geçirimli boşluk oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum numunelerin her sıcaklık grupları için geçerlidir. Düşük sıcaklıkta kür uygulanmış numuneler, yüksek sıcaklıkta kür uygulanmış numunelere göre daha fazla su içerdiğinden su emme ve geçirimli boşluk oranları daha düşüktür.



Şekil 5.21. F Sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranları ve geçirimli boşluk oranları

F Sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranı ilişkisi Şekil 5.22’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.22.F Sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin su emme oranı ilişkisi (%)

## 5.5. Mekanik Deneyler

### 5.5.1. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları

Uygun aktivatörü belirleme çalışmaları sonucunda F sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve Ms=0,2 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> olarak belirlenmiştir. Bu aktivatör oranı ile üretilen, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C gibi değişik sıcaklıklarda sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 3 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün, 90 gün, 180 gün ve 360 gün oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. Ayrıca uygun aktivatör ile üretilen bir grup numune, sıcaklık kürü uygulanmadan oda sıcaklığında ( $\pm 20$  °C) ve yukarıda belirtilen süreler içerisinde bekletilmiştir. Numunelerin kür süreleri sonundaki eğilme dayanımları Tablo 5.21’de verilmiştir.

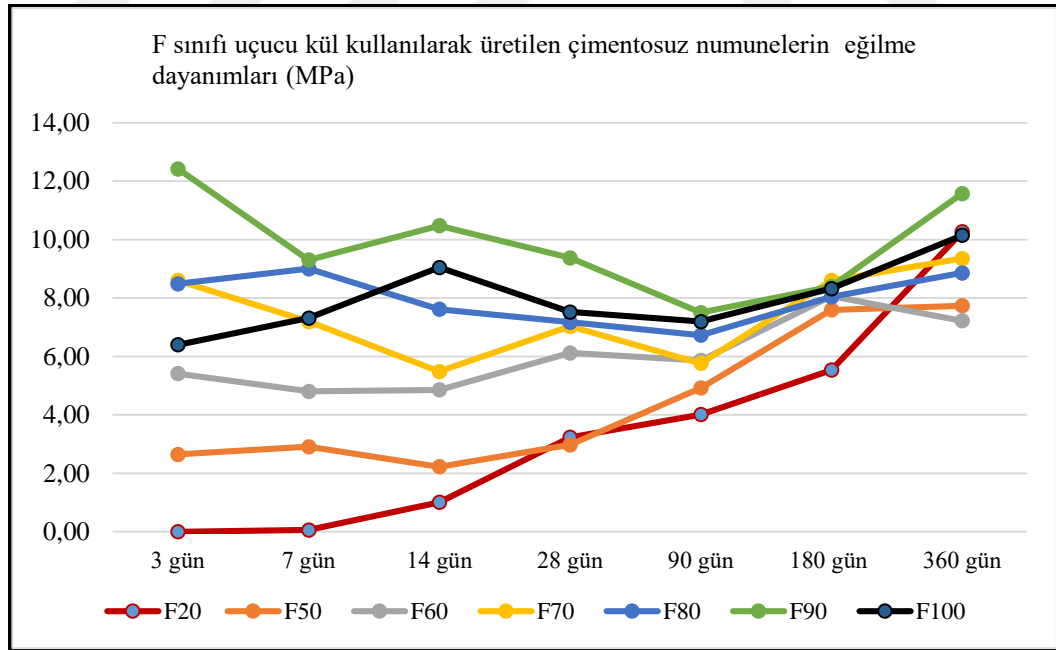
Numunelerin tüm yaş ve tüm sıcaklık guruplarında eğilme dayanımları 0,00-10,27 MPa arasında değişmektedir. En düşük eğilme dayanımı oda sıcaklığında bekletilen

3gün bekletilen F20 numunesinde 0,00 MPa olarak, en yüksek eğilme dayanımı ise 90 °C’de üretilen F90 numunesinin 3. gün sonundaki eğilme dayanımı olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5.21. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları  
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları (MPa)

Numune Yaşı	F20	F50	F60	F70	F80	F90	F100
3 gün	0,00	2,65	5,41	8,60	8,48	12,42	6,40
7 gün	0,06	2,91	4,80	7,20	9,00	9,30	7,31
14 gün	1,01	2,23	4,85	5,48	7,62	10,48	9,05
28 gün	3,23	2,98	6,12	7,03	7,17	9,38	7,52
90 gün	4,01	4,92	5,86	5,77	6,73	7,50	7,20
180 gün	5,53	7,59	8,06	8,60	8,04	8,39	8,32
360 gün	10,27	7,73	7,22	9,35	8,86	11,58	10,15

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımı Şekil5.23’te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.23. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilen numunelerin eğilme dayanımları, 3.günde 0,00-12,42 MPa arasında değişim gösterirken, 360 gün sonra 6,40-11,58 MPa

arasında değişim göstermektedir. Düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin eğilme dayanımları zamanla daha fazla artış göstermiştir. 20 °C’de kür edilen numunelerin 3 günlük eğilme dayanımları ile 90 °C’de kür edilen numunelerin eğilme dayanımları arasında 12,42 MPa bir fark gözlenirken, 360 günlük eğilme dayanımları arasındaki fark 1,31 MPa olarak tespit edilmiştir. 20 °C’de kür edilen numunelerin eğilme dayanımı 360 günde 10,27 kat artarken, 100 °C’de sıcaklık kürü uygulanmış numunelerin eğilme dayanımları % 58,5 artış göstermiştir. Düşük sıcaklıkta kür edilen numuneler, yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelere göre daha fazla eğilme dayanımı artışı göstermekle birlikte oda sıcaklığında kür edilen numuneler, her yaş grubunda su içerisine konulduklarında dağılmışlardır.

### 5.5.2. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları aşağıdaki Tablo 5.22’de verilmiştir

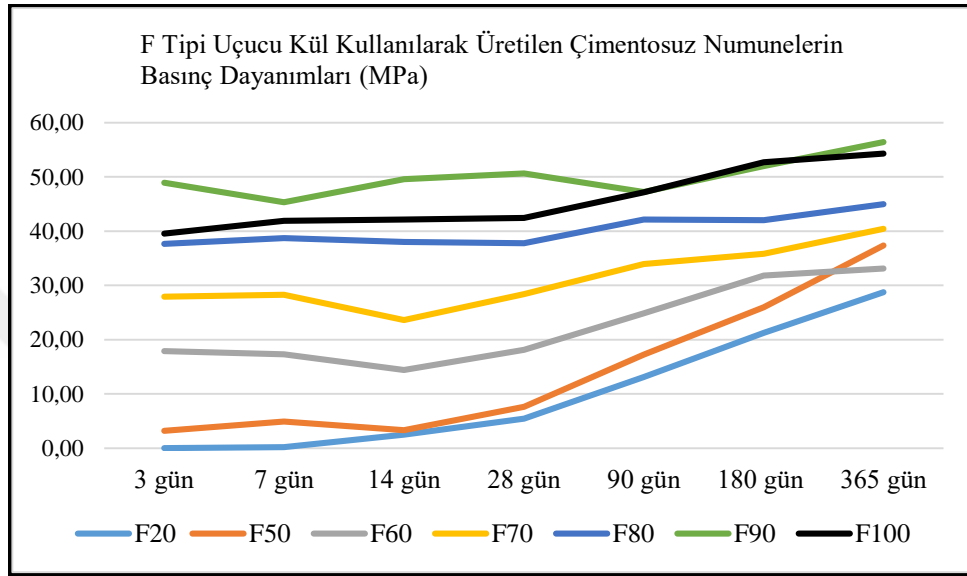
Tablo 5.22. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları (MPa)							
Numune Yaşı	F20	F50	F60	F70	F80	F90	F100
3 gün	0,00	3,21	17,88	27,91	37,64	48,96	39,55
7 gün	0,22	4,89	17,28	28,27	38,75	45,34	41,94
14 gün	2,48	3,30	14,39	23,61	38,05	49,61	42,13
28 gün	5,47	7,63	18,13	28,38	37,81	50,64	42,46
90 gün	13,14	17,25	24,88	33,93	42,18	47,21	47,18
180 gün	21,24	25,96	31,83	35,81	42,03	52,01	52,69
360 gün	28,75	37,36	33,11	40,43	44,96	56,44	54,28

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları Şekil5.24’te grafiksel olarak gösterilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilen numunelerin basınç dayanımları, 3.günde 0,00-48,96 MPa arasında değişim gösterirken, 360 gün sonra 28,75-56,44 MPa arasında değişim göstermektedir. Düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin basınç dayanımları zamanla daha fazla artış göstermiştir. 20 °C’de kür edilen numunelerin 3

günlük basınç dayanımları ile 90 °C’de kür edilen numunelerin basınç dayanımları arasında 28,75 MPa bir fark gözlenirken, 360 günlük basınç dayanımları arasındaki fark 7,48 MPa olarak tespit edilmiştir. 20 °C’de kür edilen numunelerin eğilme dayanımı 360 günde 28,75 kat artarken, 100 C’de sıcaklık kürü uygulanmış numunelerin eğilme dayanımları % 37,2 artış göstermiştir.

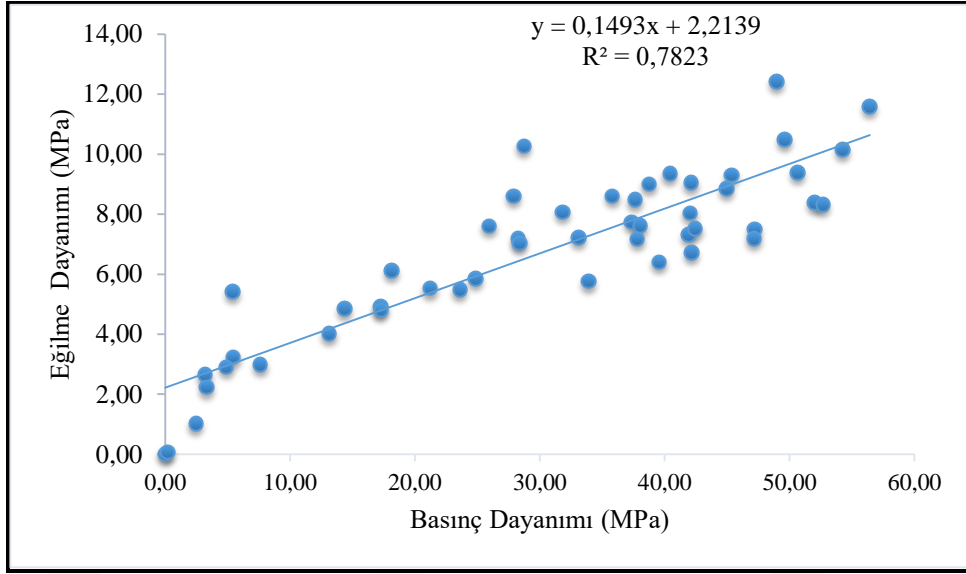


Şekil 5.24. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

### 5.5.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ilişkisi

Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişki Şekil 5.25’te verilmiştir. Yapılan korelasyon analizi sonucunda, F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasında doğrusal bir ilişki ( $R^2=0,7832$ ) olduğu söylenebilir. Hesaplanan  $R^2$  değeri y’deki değişim miktarının ne kadarlık bir kısmının regresyon doğrusu tarafından açıklanabileceğini ifade etmektedir. Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki regresyon katsayısının düşük olması numune sayısının az olmasından kaynaklanmaktadır.

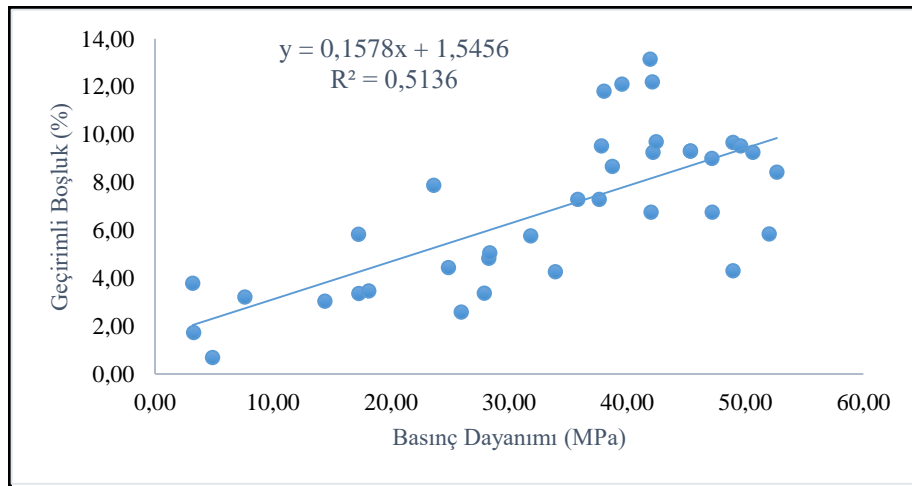




Şekil 5.25. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ilişkisi

#### 5.5.4. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile geçirimli boşluk ilişkisi

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerde basınç dayanımı ile geçirimli boşluk oranları arasındaki ilişki Şekil 5.26’da verilmiştir. Yapılan korelasyon analizi sonucunda,  $R^2 = 0,5136$  olması nedeniyle basınç dayanımı-geçirimli boşluk ilişkisinin zayıf ve doğrusal olduğu söylenebilir.



Şekil 5.26. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile geçirimli boşluk ilişkisi

### 5.5.5. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları

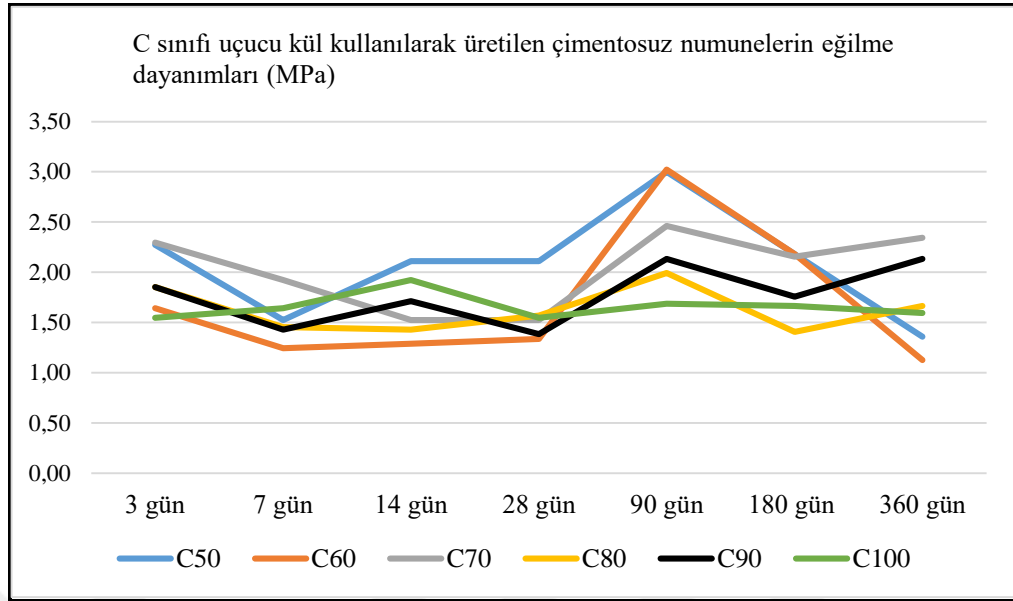
Uygun aktivatörü belirleme çalışmaları sonucunda Kangal C sınıfı uçucu külü için en uygun aktivatör %12 Na ve Ms=0,6 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> olarak belirlenmiştir. Bu aktivatör oranı ile üretilen, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C’de sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 3 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün, 90 gün, 180 gün ve 360 gün oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. Numunelerin kür süreleri sonundaki eğilme dayanımları Tablo 5.23’de verilmiştir.

Tablo 5.23. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları  
C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları (MPa)

Numune Yaşı	C50	C60	C70	C80	C90	C100
3 gün	2,27	1,64	2,30	1,85	1,85	1,55
7 gün	1,52	1,24	1,92	1,45	1,43	1,64
14 gün	2,11	1,29	1,52	1,43	1,71	1,92
28 gün	2,11	1,34	1,52	1,57	1,38	1,55
90 gün	3,00	3,02	2,46	1,99	2,13	1,69
180 gün	2,18	2,18	2,16	1,41	1,76	1,66
360 gün	1,36	1,13	2,34	1,66	2,13	1,59

Numunelerin tüm yaş ve tüm sıcaklık guruplarında eğilme dayanımları 1,13-3,02 MPa arasında değişmektedir. En düşük eğilme dayanımı, 60 C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanarak, oda sıcaklığında 360 gün bekletilen C60 numunesinde 1,13 MPa olarak, en yüksek eğilme dayanımı ise 60 °C’de üretilen C60 numunesinin 90. gün sonundaki eğilme dayanımı 3,02 MPa olarak tespit edilmiştir. C sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları, ilerleyen yaşlarda belirgin bir artış göstermemiştir. Genel olarak, 100 °C’de sıcaklık kürü uygulanan numuneler hariç olmak üzere, bütün sıcaklık guruplarında 90. gündeki eğilme dayanımlarının en yüksek değerine ulaştığı gözlenmiştir.

C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımı Şekil 5.27’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.27. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımı

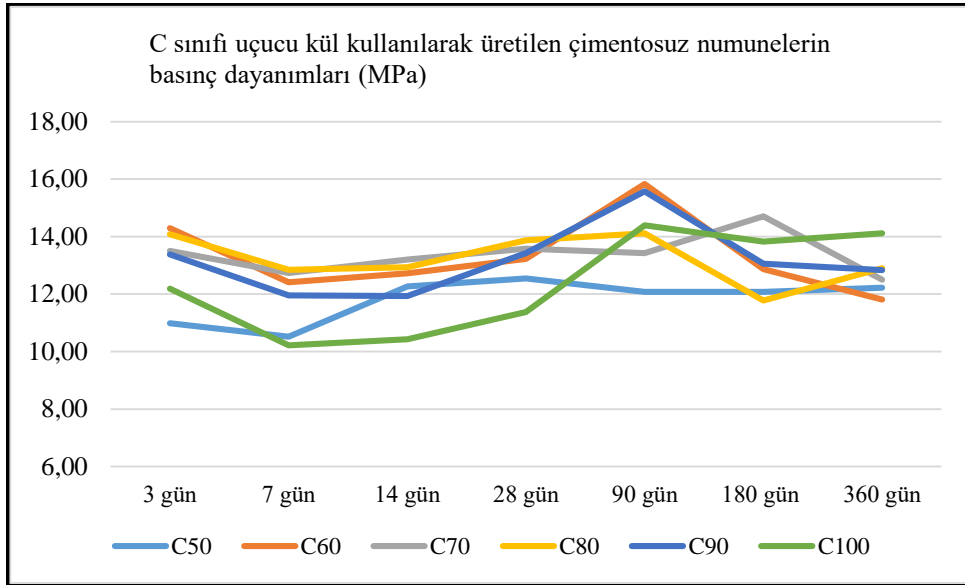
### 5.5.6. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

Numunelerin tüm yaş ve tüm sıcaklık guruplarında basınç dayanımları 10,22-15,83 MPa arasında değişmektedir. En düşük basınç dayanımı, 60 °C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanarak, oda sıcaklığında 7 gün bekletilen C100 numunesinde 10,22 MPa olarak, en yüksek basınç dayanımı ise 90 °C’de üretilen C60 numunesinin 90. gün sonundaki basınç dayanımı 15,83 MPa olarak tespit edilmiştir. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları Tablo 5.24’te verilmiştir.

Tablo 5.24. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları (MPa)						
Numune Yaşı	C50	C60	C70	C80	C90	C100
3 gün	10,98	14,29	13,50	14,08	13,38	12,19
7 gün	10,52	12,41	12,74	12,84	11,96	10,22
14 gün	12,27	12,72	13,21	12,94	11,94	10,43
28 gün	12,55	13,22	13,58	13,88	13,43	11,38
90 gün	12,08	15,83	13,43	14,11	15,58	14,39
180 gün	12,08	12,86	14,71	11,78	13,06	13,83
360 gün	12,22	11,81	12,50	12,91	12,83	14,11

C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları Şekil 5.28’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



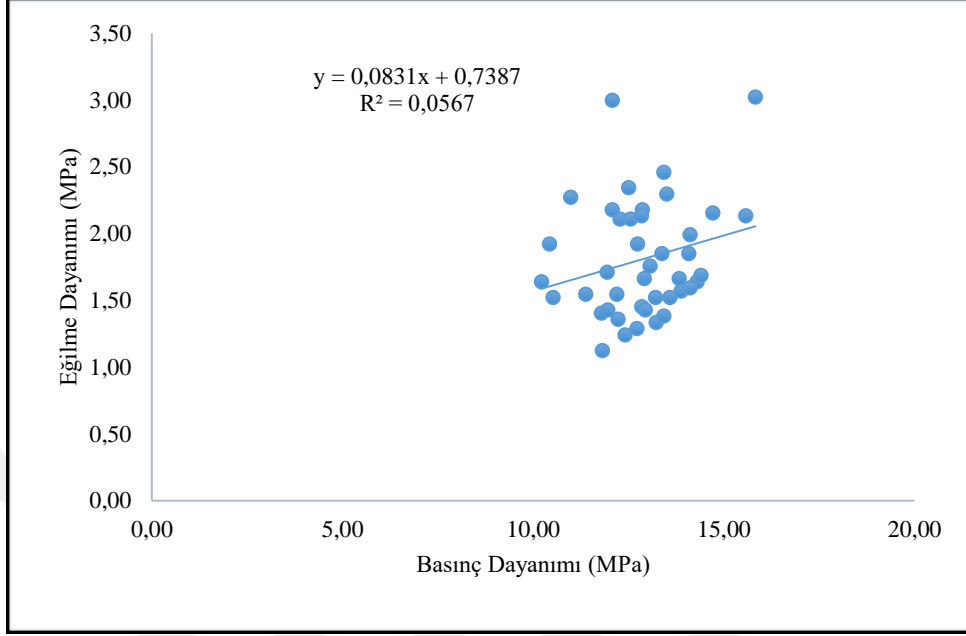
Şekil 5.28. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları

C sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımları, ilerleyen yaşlarda belirgin bir artış göstermemiştir. Genel olarak, 90 °C’de sıcaklık kürü uygulanan numuneler hariç olmak üzere, bütün sıcaklık gruplarında 90. gündeki basınç dayanımlarının en yüksek değerine ulaştığı gözlenmiştir. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin tamamının, tüm yaş gruplarında, su içerisinde dağılması, alkali aktivasyonunun kullanılan C sınıfı uçucu külü ile gerçekleşmediğini göstermektedir.

#### 5.5.7. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ilişkisi

Yapılan korelasyon analizi sonucunda, C sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasında ilişki olup olmadığı incelenmiş,  $R^2$  değerinin 0,0567 olması nedeniyle ( $R^2 < 0,70$ ) doğrusal bir ilişki olmadığı söylenebilir. Gerek erken yaşlarda, gerekse ilerleyen yaşlarda basınç ve eğilme dayanımlarında belirgin bir artma veya azalma tespit edilmemesi, basınç ve eğilme dayanımı arasında anlamlı bir ilişki oluşmamasını teyit etmektedir.

Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişkiyi gösteren grafik, Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.29. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişki

## 5.6. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

### 5.6.1. F sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları

Geleneksel betonlarda, ultrases geçiş hızı ile betonun yoğunluğu arasında bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan betonda, sesüstü dalganın betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçişi daha uzun bir süre almaktadır. Betonun içerisinde boşluk miktarı arttıkça ses üstü dalganın hızı daha az olmaktadır ( Erdoğan, 2010).

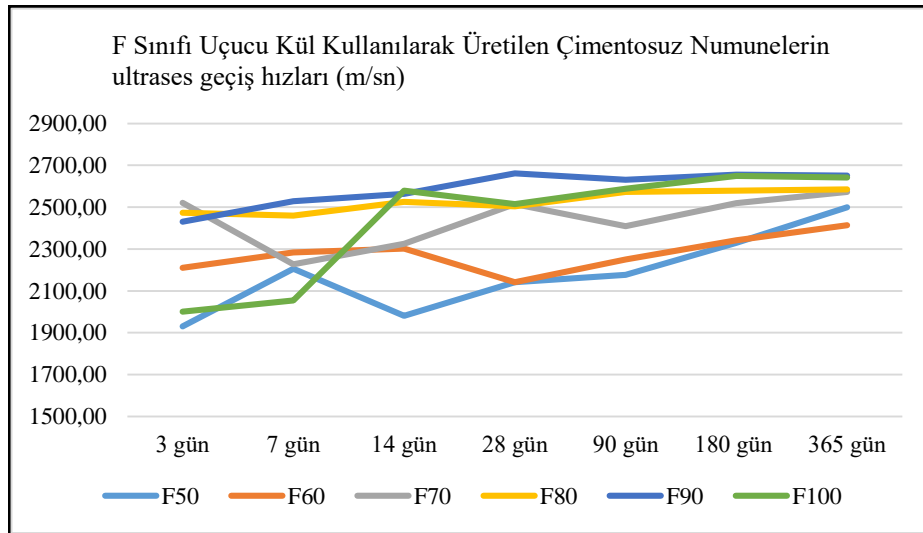
F sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör oranı %14 Na ve Ms=0,2 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile üretilen, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C ve 100 °C'de sıcaklık kürü uygulandıktan sonra, 3 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün, 90 gün, 180 gün ve 360 gün oda sıcaklığında havada kür edilen numunelerin ultrases geçiş hızları aşağıdaki Tablo 5.25'te verilmiştir.

F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin tüm sıcaklık kürü ve tüm yaş gruplarında ultrases geçiş hızları 1930,24-2661,60 m/sn arasında değişmektedir. En düşük ultrases geçiş hızı değeri 50 °C de 48 saat sıcaklık kürü uygulanıktan sonra oda sıcaklığında bekletilen numunenin 3. gün sonundaki ultrases geçiş hızı 1930,24 m/sn olarak ölçülmüştür. En yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise 90 C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulandıktan sonra ve 28 gün oda sıcaklığında bekletilen F90 numunesinde 2661,60 m/sn olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5.25. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızları  
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları (m/sn)

Numune Yaşı	F50	F60	F70	F80	F90	F100
3 gün	1930,24	2209,94	2521,16	2473,50	2430,56	2001,43
7 gün	2206,46	2283,85	2226,82	2459,16	2528,45	2054,29
14 gün	1981,04	2302,63	2324,42	2525,71	2564,10	2579,22
28 gün	2141,66	2141,66	2514,82	2504,47	2661,60	2514,82
90 gün	2175,94	2250,80	2408,81	2573,53	2631,58	2587,80
180 gün	2329,45	2342,31	2519,34	2579,69	2655,04	2650,01
360 gün	2500,00	2413,79	2573,53	2585,41	2651,52	2641,51

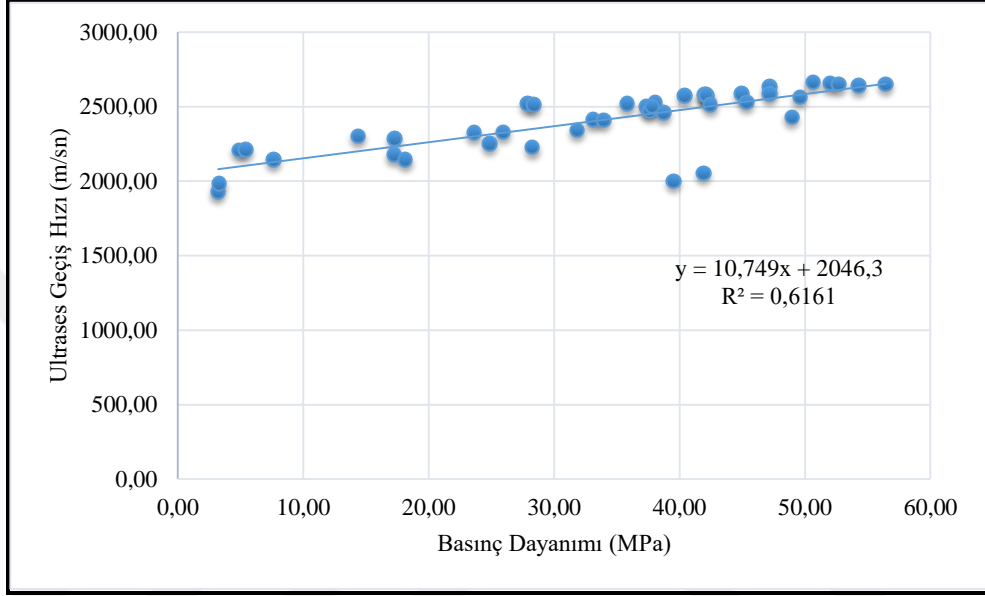
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları Şekil 5.30’da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.30. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları

### 5.6.2. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi

Numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi Şekil 5.31’de gösterilmiştir.

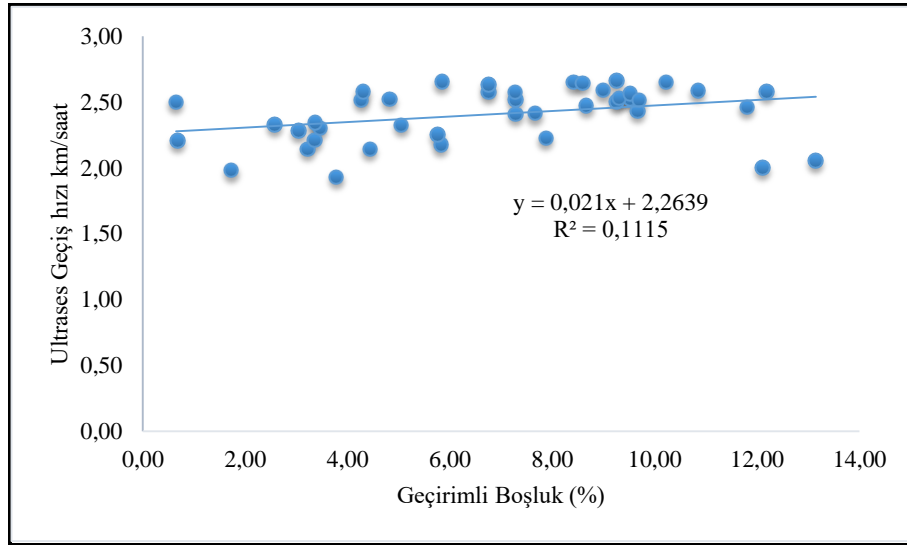


Şekil 5.31. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişki

Yapılan korelasyon analizi sonucunda, F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızları arasında doğrusal bir ilişki olduğu,  $R^2$  değerinin  $0,6161 < 0,70$  olması nedeniyle, doğrusal bir ilişkinin kuvvetli olmadığı söylenebilir.

### 5.6.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızı ile geçirimli boşluk ilişkisi

Çimento ile üretilen geleneksel betonlarda, boşluk oranının fazla olması, ultrases geçiş hızlarının düşük çıkmasına sebep olmaktadır. F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları ile boşluk oranları arasında ilişki olup olmadığını araştırma için yapılan korelasyonda,  $R^2=0,1115$  olması, ultrases geçiş hızları ile boşluk oranı arasında ilişki olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.32. F sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerde ultrases geçiş hızı ile geçirimli boşluk ilişkisi

#### 5.6.4. C sınıfı uçucu küllü üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızı deneyi sonuçları

C sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör oranı %12 Na ve  $M_s=0,6$  olan NaOH ve  $Na_2SiO_3$  karışımı aktivatör ile üretilen, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C ve 100 °C’de sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 3 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün, 90 gün, 180 gün ve 360 gün oda sıcaklığında havada kür edilen numunelerin ultrases geçiş hızları Tablo 5.26’da verilmiştir.

C sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin tüm sıcaklık kürü ve tüm yaş gruplarında ultrases geçiş hızları 1600,00-2169,53 m/sn arasında değişmektedir. En düşük ultrases geçiş hızı değeri 100 °C de 48 saat sıcaklık kürü uygulanıktan sonra oda sıcaklığında bekletilen numunenin 28. gün sonundaki ultrases geçiş hızı 1600,00 m/sn olarak ölçülmüştür. En yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise 70 °C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulandıktan sonra oda sıcaklığında bekletilen 3. gün sonunda ölçüm yapılan C70 numunesinde 2169,53 m/sn olarak tespit edilmiştir.

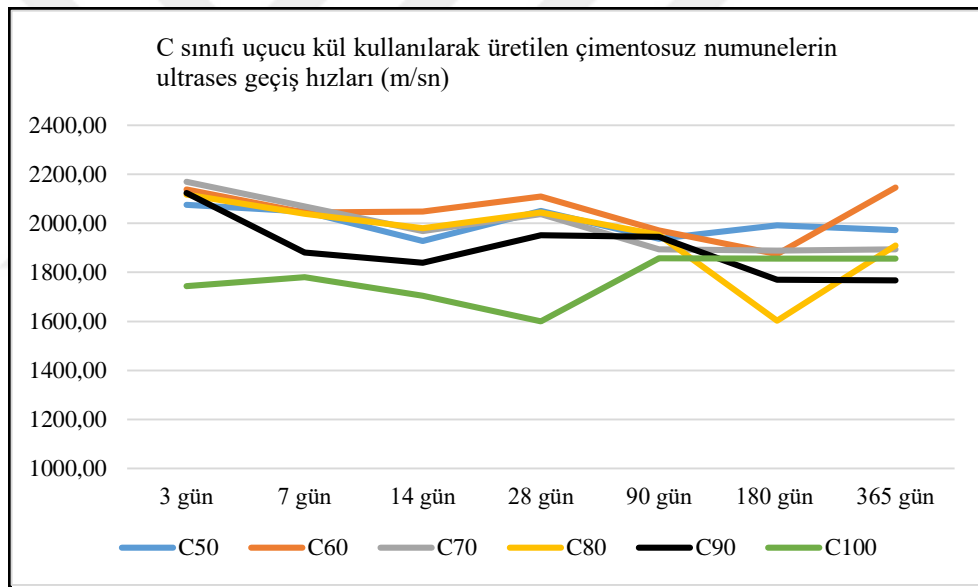
Tüm sıcaklık kürü ve tüm yaş gruplarındaki numunelerin zaman içerisinde ultrases geçiş hızlarında, kendi aralarında belirgin bir değişiklik olmadığı söylenebilir. Yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerin, düşük sıcaklıkta kür edilen numunelere göre ultrases geçiş hızlarının daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Tablo 5.26. C sınıfı uçucu küle üretilen çimentosuz numunelerin tipi ultrases geçiş hızları

Numune Yaşı	C50	C60	C70	C80	C90	C100
3 gün	2076,23	2138,38	2169,53	2117,04	2123,46	1744,11
7 gün	2048,28	2043,80	2069,48	2039,33	1880,46	1780,04
14 gün	1928,37	2048,28	1969,06	1980,20	1838,48	1704,20
28 gün	2051,28	2110,02	2037,85	2043,80	1951,22	1600,00
90 gün	1937,18	1971,00	1893,68	1953,40	1944,44	1857,50
180 gün	1991,47	1874,16	1888,57	1602,38	1769,24	1856,76
360 gün	1971,83	2146,25	1894,45	1909,96	1767,23	1855,53

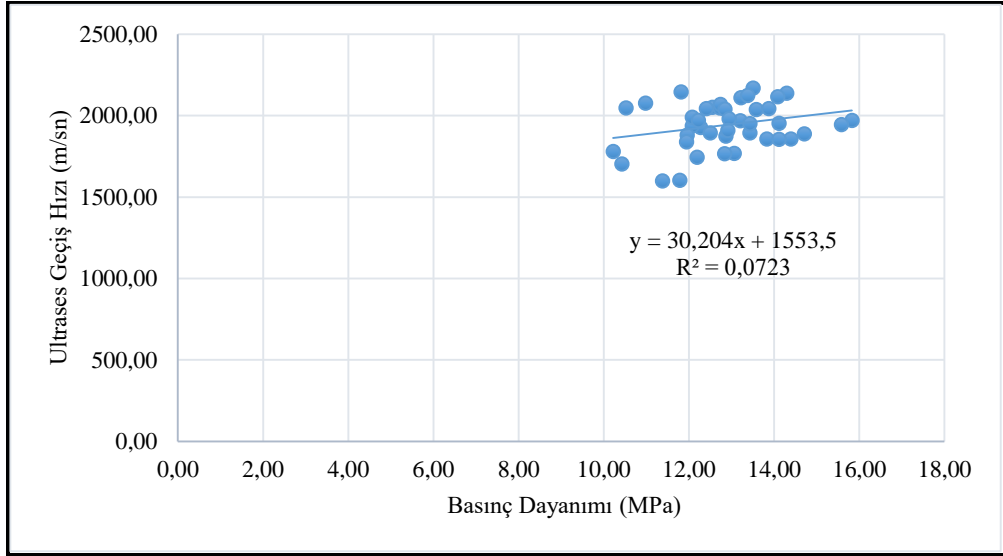
C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları Şekil5.33'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.33. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin ultrases geçiş hızları

### 5.6.5. C sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi

Numunelerin Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı ilişkisi Şekil 5.34'teki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.34. Numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında ilişki

Yapılan korelasyon analizi sonucunda, C sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızları arasında  $R^2=0,0723$  ( $<0,70$ ) olması nedeniyle gibi doğrusal bir ilişki olmadığı net olarak söylenebilir.

### 5.7. Varyans Analizi (Çoklu Regresyon)

Varyans analizi iki ya da daha fazla gruba ait ortalamalar arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı ile ilgili hipotezleri test etmek için kullanılmaktadır. İki grubun ortalamaları arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı t testi kullanılarak da incelenebilir. Eğer ikiden fazla grubun ortalamaları karşılaştırılacak ise F Testi diğer bir isimle Varyans Analizi (ANOVA, Analysis Of Variance) uygulanır. İkiden fazla grubun ortalamaları arasında anlamlı bir farklılık olup olmadığını test eden F testinin hipotezi aşağıdaki gibidir (<http://spssanalizi.com/>).

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_N$  Yani ortalamalar arasında fark yoktur.

$H_A$ : Ortalamalardan en az ikisi arasında anlamlı fark vardır.

Bu çalışmadaki hipotezler SPSS( Sosyal Bilimler İstatistik Programı ) kullanılarak test edilmiştir.

### 5.7.1. F sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları analizi

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

$H_0$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

$H_A$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları Tablo 5.27’de verilmiştir.

Tablo 5.27. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları

Tanımlamalar	Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalama için 95% güven aralığı			
					Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum
F50	6	29,3367	16,77559	6,84861	11,7318	46,9416	3,21	48,96
F60	6	28,0367	16,33750	6,66976	10,8915	45,1818	4,89	45,34
F70	6	29,8933	17,02368	6,94989	12,0281	47,7586	3,30	49,61
F80	6	33,6200	15,44709	6,30625	17,4093	49,8307	7,63	50,64
F90	6	36,8850	11,41320	4,65942	24,9076	48,8624	17,25	47,21
F100	6	40,8617	12,08273	4,93276	28,1816	53,5417	25,96	52,69
Total	36	33,1056	14,65271	2,44212	28,1478	38,0633	3,21	52,69

Varyans analizi sonuçları Tablo 5.28’de verilmiştir.

Tablo 5.28. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları varyans analizi

BASINÇ	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	749,536	5	149,907	0,665	0,653
Grup içi	6765,031	30	225,501		
Toplam	7514,567	35			

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri  $p=0,653>0,05$  bulunmuştur. Bu durumda  $H_0$  hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

### 5.7.2. F sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları analizi

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak, F tipi uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

$H_0$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

$H_A$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Tablo 5.29'da numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları verilmiştir.

Tanımlamalar		Ortalama için 95% güven aralığı						
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
F50	6	9,4050	5,23602	2,13760	3,9101	14,8999	2,65	17,88
F60	6	6,7533	2,47504	1,01043	4,1559	9,3507	2,91	9,30
F70	6	6,6183	3,01692	1,23165	3,4523	9,7844	2,23	10,48
F80	6	6,7000	2,11468	0,86332	4,4808	8,9192	2,98	9,38
F90	6	6,3300	0,98065	0,40035	5,3009	7,3591	4,92	7,50
F100	6	8,1667	0,35246	0,14389	7,7968	8,5365	7,59	8,60
Total	36	7,3289	2,85084	0,47514	6,3643	8,2935	2,23	17,88

Tablo 5.30'da varyans analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.30. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları varyans analizi

	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	43,449	5	8,690	1,082	0,390
Grup içi	241,007	30	8,034		
Toplam	284,456	35			

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri  $p=0,39 > 0,05$  bulunmuştur. Bu durumda  $H_0$  hipotezi kabul edilir; farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

### 5.7.3. C sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları analizi

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak c sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

$H_0$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

$H_A$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları Tablo 5.31’de verilmiştir.

Tablo 5.31. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları

Tanımlamalar		Ortalama için 95% güven aralığı						
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
1,00	6	13,0700	1,25952	0,51420	11,7482	14,3918	10,98	14,29
2,00	6	11,7817	1,13980	0,46532	10,5855	12,9778	10,22	12,84
3,00	6	12,2517	1,00274	0,40937	11,1994	13,3040	10,43	13,21
4,00	6	13,0067	0,91332	0,37286	12,0482	13,9651	11,38	13,88
5,00	6	14,2367	1,39174	0,56818	12,7761	15,6972	12,08	15,83
6,00	6	13,0533	1,09123	0,44549	11,9082	14,1985	11,78	14,71
Toplam	36	12,9000	1,31359	0,21893	12,4555	13,3445	10,22	15,83

Varyans analizi sonuçları Tablo 5.32’de verilmiştir.

	Kareler		Ortalama kare	F	Sig.
	Toplamı	df			
Gruplar arası	21,129	5	4,226	3,229	0,019
Grup içi	39,265	30	1,309		
Toplam	60,393	35			

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri  $p=0,019 < 0,05$  bulunmuştur. Bu durumda  $H_A$  hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda ısıtım işlemi uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

#### 5.7.4. C sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları analizi

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak C tipi uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

$H_0$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

$H_A$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları Tablo 5.33’de verilmiştir.

Tablo 5.33. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları

Tanımlamalar		Ortalama için 95% güven aralığı						
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
1,00	6	1,9100	0,31350	0,12798	1,5810	2,2390	1,55	2,30
2,00	6	1,5333	0,23010	0,09394	1,2919	1,7748	1,24	1,92
3,00	6	1,6633	0,31046	0,12675	1,3375	1,9891	1,29	2,11
4,00	6	1,5783	0,27680	0,11300	1,2879	1,8688	1,34	2,11
5,00	6	2,3817	0,54609	0,22294	1,8086	2,9548	1,69	3,02
6,00	6	1,8917	0,32902	0,13432	1,5464	2,2370	1,41	2,18
Total	36	1,8264	0,43474	0,07246	1,6793	1,9735	1,24	3,02

Tablo 5.34'te varyans analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 5.34. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları varyans analizi

	Kareler toplamı	df	Ortalama		
			Kare	F	Sig.
Gruplar arası	2,962	5	0,592	4,864	0,002
Grup içi	3,654	30	0,122		
Toplam	6,615	35			

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basıç dayanımı için anlamlılık değeri  $p=0,002 < 0,05$  bulunmuştur. Bu durumda  $H_A$  hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

#### 5.7.5. F sınıfı uçucu küllü çimentosuz numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı analizi

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak F tipi uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerde, boşluk oranının, numune yaşına göre değişim gösterip göstermediğinin araştırılması:

$H_0$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermez.

$H_A$ : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim gösterir.

Tablo 5.35. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları

Tanımlamalar								
Ortalama için 95% güven aralığı								
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
F50	6	7,0700	3,58685	1,46432	3,3058	10,8342	3,36	12,11
F60	6	7,6450	4,90300	2,00164	2,4996	12,7904	0,68	13,15
F70	6	6,9133	4,09396	1,67135	2,6170	11,2097	1,73	12,20
F80	6	6,6917	3,00765	1,22787	3,5353	9,8480	3,22	9,70
F90	6	6,8983	1,18643	0,48436	5,6533	8,1434	5,76	9,00
F100	6	5,2983	2,28340	0,93220	2,9020	7,6946	2,58	8,42
Total	36	6,7528	3,22951	0,53825	5,6601	7,8455	0,68	13,15

Tablo 5.36’da varyans analizi sonuçları verilmiştir. %95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri  $p=0,898>0,05$  bulunmuştur. Bu durumda  $H_0$  hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermez.

Tablo 5.36. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı varyans analizi

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Gruplar arası	18,377	5	3,675	0,318	0,898
Grup içi	346,665	30	11,555		
Toplam	365,041	35			

### 5.7.6. F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde, değişkenlerin basınç dayanımı üzerine etkileri

F tipi uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde su oranı, NaOH miktarı ve  $Na_2SiO_3$  miktarlarının ortalama, standart sapma değerleri Tablo 5.37’de, model özeti ise Tablo 5.38’de verilmiştir.



Tablo: 5.37. Değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri

Malzeme		
Su	Ortalama	71,321
	Örnek	30
	Std. Sapma	57,0828
	Toplam	2139,63
NaOH	Ortalama	80,5937
	Örnek	30
	Std. Sapma	47,4318
	Toplam	2417,81
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Ortalama	136,524
	Örnek	30
	Std. Sapma	97,5348
	Toplam	4095,72
Basınç Dayanımı	Ortalama	19,6463
	Örnek	30
	Std. Sapma	9,8111
	Toplam	589,39

Tablo 5.38. Model özeti

Model Özeti									
İstatistiksel değişim									
Model	R	R kare	Düzeltilmiş R Square	Tahminin standart hatası	R kare değişimi	F değişimi	df1	df2	Sig. F değişimi
1	0,495(a)	0,246	0,230	8,49283	0,246	15,836	3	146	0,000

a Belirleyiciler: (İçerik), Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaOH, Su

Malzemeler ile basınç dayanımı arasındaki varyans analizi sonuçları Tablo 5.39'da verilmiştir

Tablo 5.39. Malzemeler ile basınç dayanımının varyans analizi

Model	Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Sig.
1	Regression	3426,593	3	1142,198	0,000(a)
	Residual	10530,710	146	72,128	
	Total	13957,303	149		

a Belirleyiciler: (İçerik), Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaOH, Su,  
b Bağımlı değişken: basınç

Malzemelerin, basınç dayanımı ile ilişkisini gösteren katsayılar Tablo 5.40'ta verilmiştir.

Tablo 5.40. Malzemelerin İlişki katsayıları

Model		Standart dışı katsayılar		Standart Katsayılar		
		B	Std. hata	Beta	t	Sig.
1	(İçerik)	0,623	20,236		0,031	0,976
	Su	0,192	0,131	1,116	1,461	0,156
	NaOH	-0,038	0,041	-0,184	-0,926	0,363
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0,062	0,077	0,612	0,797	0,433

a. Bağımlı değişken: Basınç dayanımı

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre, malzemelerin basınç dayanımı üzerine etkisi için anlamlılık değeri  $p=0,000 < 0,05$  bulunmuştur. Bu durumda malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilir. Model özetindeki R değeri, su, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün basınç dayanımı üzerinde 0,495 oranında etki ettiğini göstermektedir. Numune sayısının azlığından dolayı bağımsız değişkenler olan su, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>'ün, basınç dayanımı üzerine etkisini standart katsayılı formül haline getirmek mümkün olmamaktadır.

## 5.8. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numuneler ile yapılan durabilite deneyleri

### 5.8.1 Yüksek sıcaklık etkisi deneyi

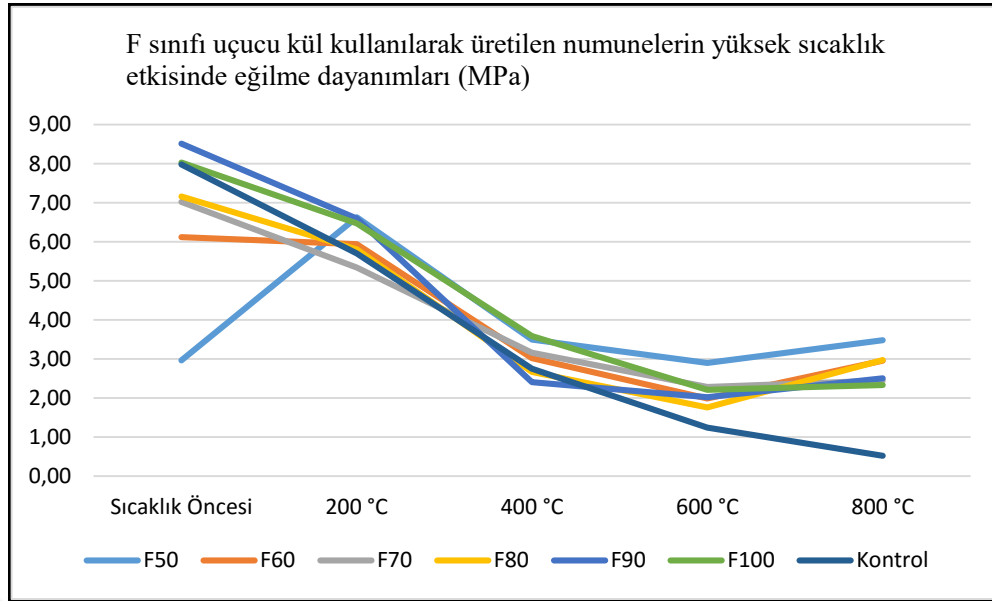
TS EN 1363-2 Yangına Dayanıklık Deneyleri standardına uygun olarak yapılan deney kapsamında F tipi uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve  $M_s=0,2$  olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile üretilen numuneler, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C'de kür uygulandıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. Kontrol amacıyla hazırlanan çimento bağlayıcılı numune ise 28 gün boyunca su küründe bekletilmiştir. Daha sonra her grup için hazırlanmış numuneler; 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de 1 saat süre boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında, eğilme dayanımları aşağıdaki Tablo 5.41'de, grafik olarak Şekil 5.33'te verilmiştir.

Tablo 5.41. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımları  
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımları (MPa)

Sıcaklık	F50	F60	F70	F80	F90	F100	Kontrol
Sıcaklık Öncesi	2,96	6,12	7,02	7,16	8,51	8,03	7,98
200 °C	6,63	5,94	5,34	5,80	6,59	6,47	5,70
400 °C	3,50	3,02	3,16	2,67	2,41	3,59	2,75
600 °C	2,90	1,99	2,28	1,76	2,02	2,21	1,24
800 °C	3,48	2,95	2,45	2,98	2,51	2,34	0,52

Numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası eğilme dayanımları incelendiğinde, sıcaklık öncesi eğilme dayanımı en düşük olan F50 numunesinin, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C' yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları diğer çimentosuz numunelerden ve kontrol numunesinden daha yüksek bir değere ulaşmıştır. Bütün numunelerin eğilme dayanımları düşerken F50 numunesinin eğilme dayanımı artmıştır. Ayrıca F sınıfı uçucu küle üretilmiş çimentosuz numunelerin tamamının 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki eğilme dayanımları kontrol numunesine kıyasla daha fazladır. Numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında, eğilme dayanımları Şekil 5.33'te grafiksel olarak gösterilmiştir.

F50 numunesi, sıcaklık öncesi 2,96 MPa eğilme dayanımına sahipken, 200 °C sıcaklık sonrası eğilme dayanımı 6,63 MPa ulaşmış, 800 °C sıcaklık sonrası ise 3,48 MPa eğilme dayanımı değerine ulaşmıştır. F100 numunesi sıcaklık öncesi 8,03 MPa eğilme dayanımına sahipken 800 °C sıcaklık sonrası %70,8 dayanım kaybederek, 2,34 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. Kontrol numunesi ise sıcaklık öncesi 7,98 MPa eğilme dayanımına sahipken, 800 °C sıcaklık sonrası %93,48 dayanım kaybederek 0,52 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. Genel olarak F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin yüksek sıcaklık karşısındaki dayanıklılıkları, kontrol numunelerine göre daha fazladır.



Şekil 5.35. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımları

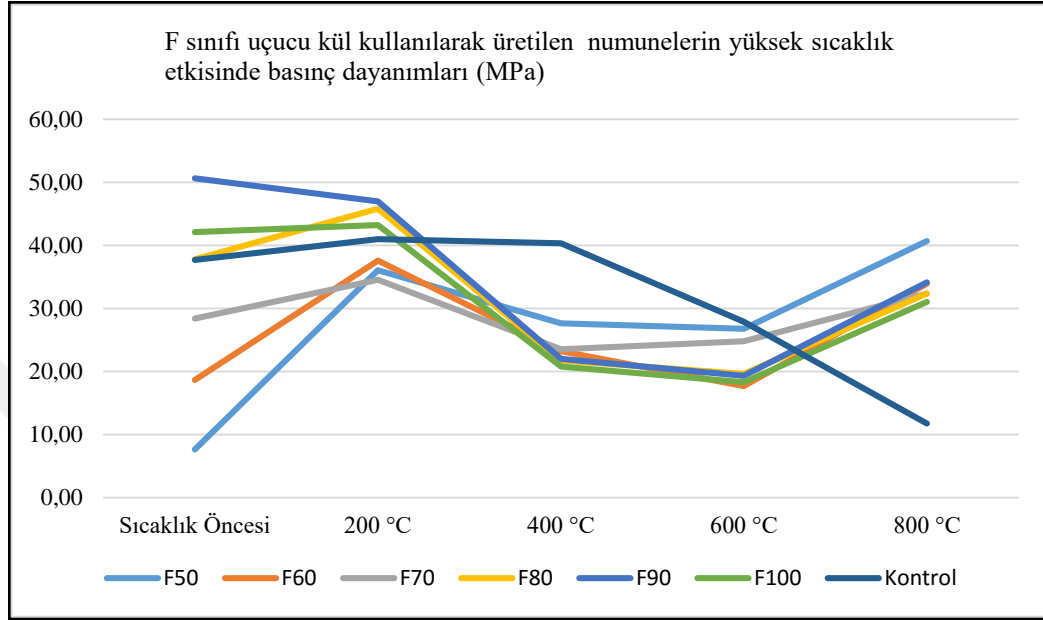
Numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında, basınç dayanımları Tablo 5.42’de listelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasındaki basınç dayanımları Şekil 5.34.’te grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.42. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımları  
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımları (Mpa)

Sıcaklık	F50	F60	F70	F80	F90	F100	Kontrol
Sıcaklık Öncesi	7,63	18,63	28,38	37,81	50,64	42,11	37,70
200 °C	36,05	37,57	34,55	45,83	47,00	43,21	40,97
400 °C	27,61	23,24	23,54	21,77	22,01	20,77	40,33
600 °C	26,77	17,67	24,81	19,61	19,29	18,30	27,86
800 °C	40,70	33,94	32,35	32,35	34,11	31,06	11,75

F sınıfı uçucu küle üretilen çimentosuz numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonundaki basınç dayanımları, çimentolu kontrol numunesinin basınç dayanımından yüksektir. 50 °C, 60 °C ve 70 °C’de kür edilerek üretilmiş çimentosuz numunelerin yüksek 800 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonra basınç dayanımları artmıştır. 800 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonra F50 numunesinin basınç dayanımı 7,63 MPa’dan 40,70 MPa’a, F60 numunesinin basınç dayanımı 18,63 MPa’dn 33,94 MPa’a, F70 numunesinin basınç dayanımı 28,38 MPa’dan 32,35 MPa ‘a artış göstermiştir. 800 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonra F90 numunesi %16,64, F100 numunesi % 26,31

basınç dayanımı kaybı gösterirken, kontrol numunesi % 68,83 dayanım kaybetmiştir. Genel olarak, F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin yüksek sıcaklık etkisindeki dayanıklılıkları, kontrol numunelerine kıyasla daha iyidir.



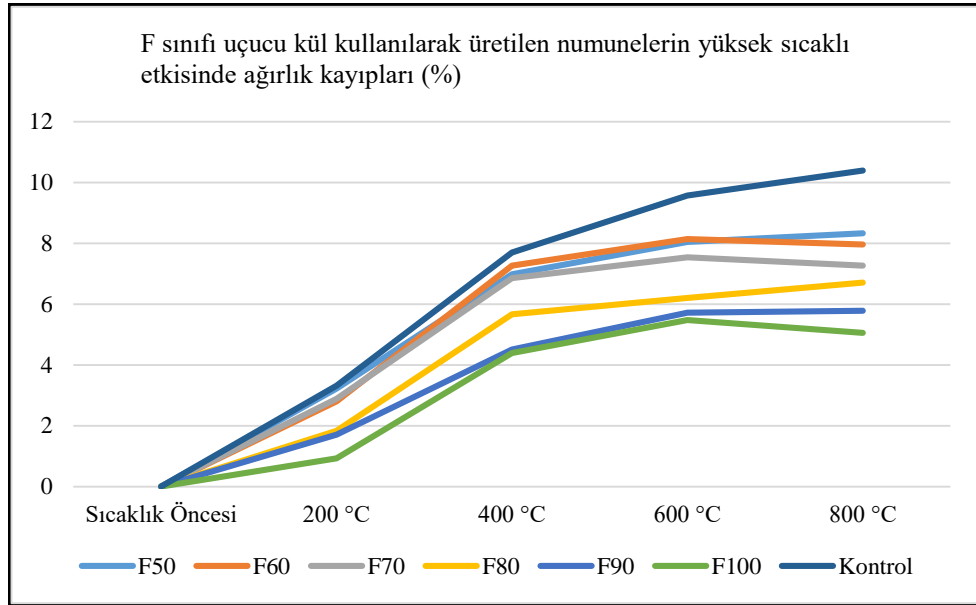
Şekil 5.36. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımları

Numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında, ağırlık kayıpları yüzdesi aşağıdaki Tablo 5.43’de verilmiştir.

Tablo 5.43. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kayıpları  
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kayıpları (%)

Sıcaklık	F50	F60	F70	F80	F90	F100	Kontrol
Sıcaklık Öncesi	0	0	0	0	0	0	0
200 °C	3,22	2,81	2,89	1,83	1,71	0,93	3,31
400 °C	6,99	7,27	6,86	5,67	4,51	4,39	7,69
600 °C	8,04	8,14	7,53	6,20	5,72	5,48	9,57
800 °C	8,32	7,96	7,26	6,71	5,78	5,05	10,39

Numunelerin sıcaklık öncesi ve sonrasında, ağırlık kayıpları Şekil 5.37.’te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.37. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ağırlık kayıpları

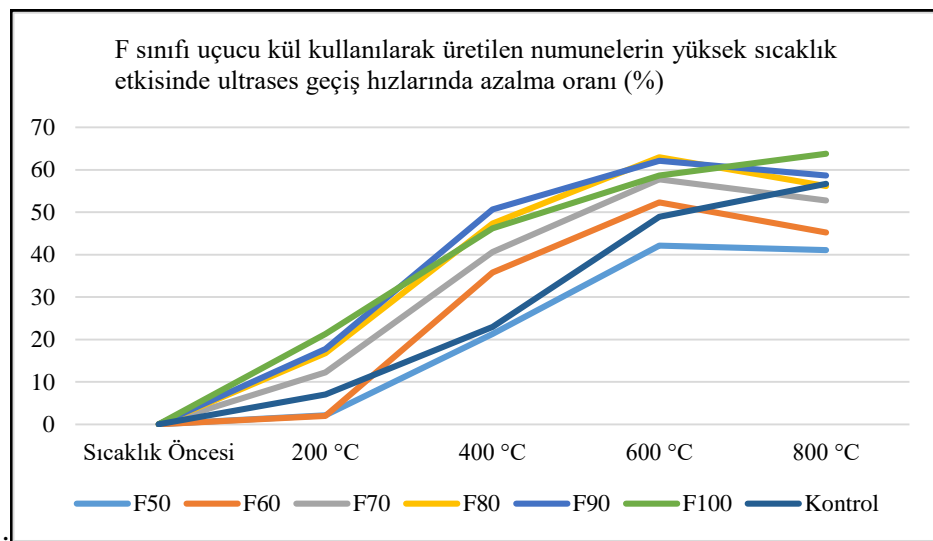
Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan çimentosuz numunelerin ağırlık kayıpları, kür sıcaklığı yüksek olan numunelerde daha az miktarda görülmektedir. Düşük sıcaklıkta kür edilerek üretilen çimentosuz numunelerin ağırlık kayıpları, yüksek sıcaklıkta kür edilerek üretilen çimentosuz numunelerin ağırlık kayıplarından daha fazladır. 50 °C’de kür edilerek üretilen numunelerin 800 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonraki ağırlık kaybı %8,32 olurken, 100 °C’de kür edilerek üretilen numunelerin 800 °C sıcaklık etkisinden sonraki ağırlık kaybı %5,05 olarak ölçülmüştür. Kontrol numunesi 800 °C sıcaklık etkisinden sonra % 10,39 ağırlık kaybına uğramıştır. Genel olarak F sınıfı uçucu külle üretilen çimentosuz numunelerin, kontrol numunesine göre ağırlık kayıpları daha azdır.

Numunelerin yüksek sıcaklık sonrasında, ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranı aşağıdaki Tablo 5.44’de verilmiştir.

Tablo 5.44. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranları

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızlarında azalma (%)							
Sıcaklık	F50	F60	F70	F80	F90	F100	Kontrol
Sıcaklık Öncesi	0	0	0	0	0	0	0
200 °C	2,13	2,01	12,21	16,77	17,76	21,30	7,05
400 °C	21,26	35,79	40,62	47,33	50,67	46,22	22,95
600 °C	42,15	52,32	57,74	62,93	62,11	58,67	48,93
800 °C	41,08	45,21	52,79	56,17	58,65	63,75	56,66

Numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında, ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranları Şekil 5.38.'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Bütün numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasında ultrases geçiş hızlarında azalma olmuştur. 50 °C, 60 °C, 70 °C de kür edilerek üretilen çimentosuz numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızlarındaki azalma, kontrol numunesine göre daha azdır. F50 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra ultrases geçiş hızındaki azalma %41,08 iken, F100 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra ultrases geçiş hızındaki azalma %63,75 olarak tespit edilmiştir. Kontrol numunesinde ise, 800 °C sıcaklık etkisinden sonra ultrases geçiş hızı %56,66 olarak belirlenmiştir. Genel olarak 90 °C'ye kadar sıcaklık kürü uygulanarak üretilmiş numunelerde yüksek sıcaklık etkisinden sonra ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranının az olması, boşluk yapısının artmadığı ve buna bağlı olarak ta yapısal bozulmaların daha az oluştuğunu ifade etmektedir.



Şekil 5.38. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık etkisinde ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranları

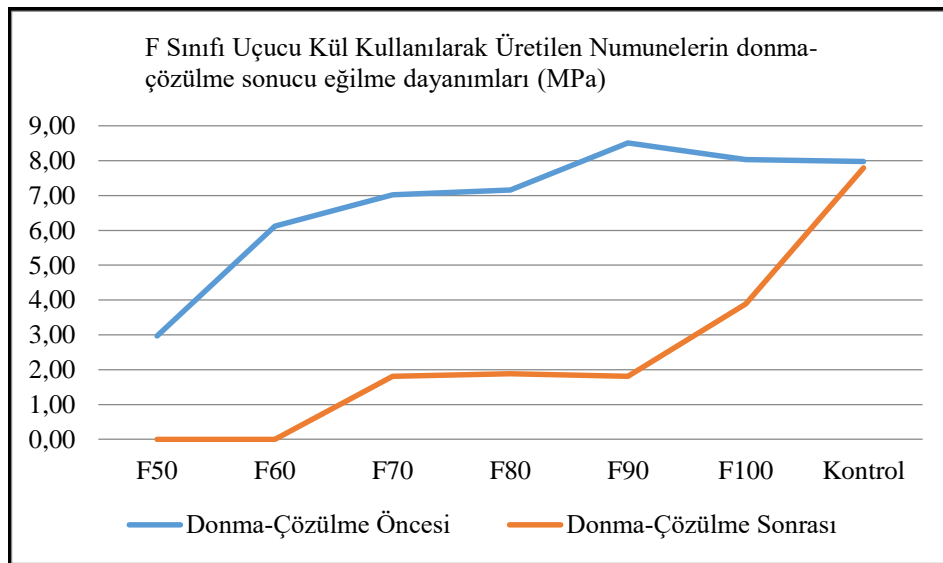
### 5.8.2. Donma-çözülme etkisi deneyi

F sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve Ms=0,2 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile üretilen numuneler, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C’de 48 saat boyunca sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. Kontrol amacıyla hazırlanan çimento bağlayıcılı numune ise 28 gün boyunca su küründe bekletilmiştir. Donma-çözülme deneyi TS EN 15177 standardına göre yapılmıştır. Numunelerin donma çözülme deneyi sonucunda eğilme dayanımları Tablo 5.45’te gösterilmiştir.

Tablo 5.45. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu eğilme dayanımları

Numune Kodu	Donma-Çözülme Öncesi (MPa)	Donma-Çözülme Sonrası (MPa)
F50	2,96	0,00
F60	6,12	0,00
F70	7,02	1,81
F80	7,16	1,88
F90	8,51	1,81
F100	8,03	3,89
Kontrol	7,98	7,80

Numunelerin donma çözülme deneyi sonucunda eğilme dayanımları Şekil 5.36’da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.39. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu eğilme dayanımları



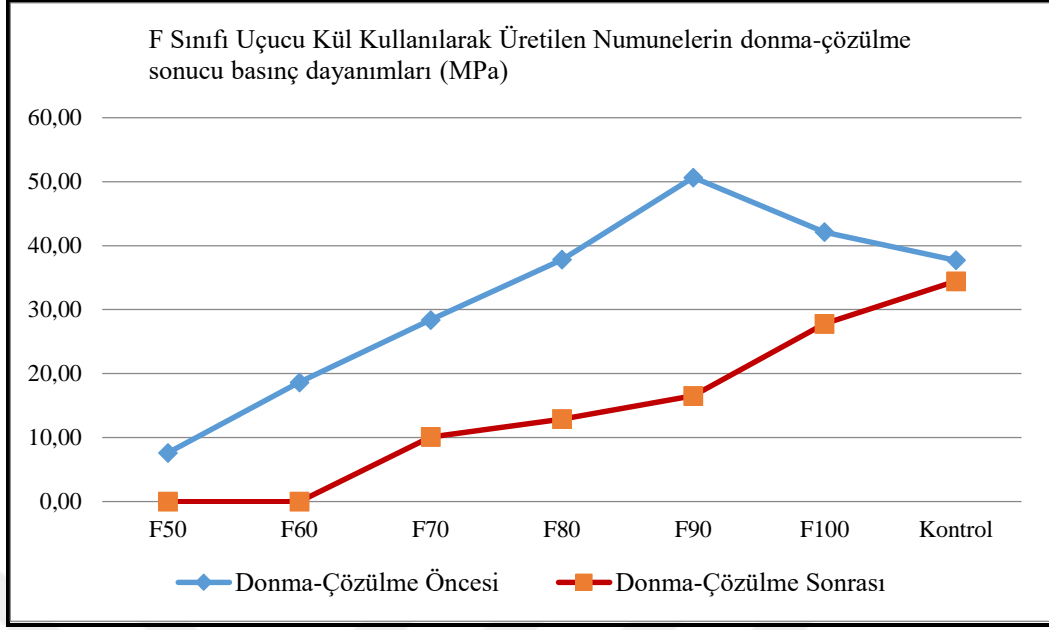
F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin tamamında, donma-çözülme etkisi sonucunda eğilme dayanımlarında belirgin azalma tespit edilmiştir. 50 °C ve 60 °C’de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen numuneler, donma-çözülme deneyi sonunda dağılıp bozulmuş, bu sebeple eğilme dayanımları test edilememiştir. Çimentosuz numunelerden, donma-çözülme deneyi sonucu eğilme dayanımı en az azalan numune F100 numunesi olup eğilme dayanımı kaybı %51,55’tir. Kontrol numunesinin eğilme dayanımı ise donma-çözülme deneyi sonunda %2,25 azalma göstermiştir. Genel olarak F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin donma-çözülme sonrası eğilme dayanımı kayıpları, kontrol numunesine kıyasla daha fazladır. Bu durum, çimentosuz numunelerin %13,15’e ulaşan büyük geçirimli boşluklarından kaynaklanmaktadır. Malzemelerin boşluk oranı arttıkça donma-çözülme karşı dayanımları düşmektedir.

Donma-çözülme etkisine maruz kalmış numunelerin basınç dayanımları Tablo 5.46’da gösterilmiştir.

Tablo 5.46. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu basınç dayanımları

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu basınç dayanımları		
Numune Kodu	Donma-Çözülme Öncesi (MPa)	Donma-Çözülme Sonrası (MPa)
F50	7,63	0
F60	18,63	0
F70	28,38	10,11
F80	37,81	12,90
F90	50,64	16,53
F100	42,11	27,78
Kontrol	37,70	34,44

Numunelerin donma çözülme deneyi sonucunda eğilme dayanımları Şekil 5.40’ta grafiksel olarak gösterilmiştir.



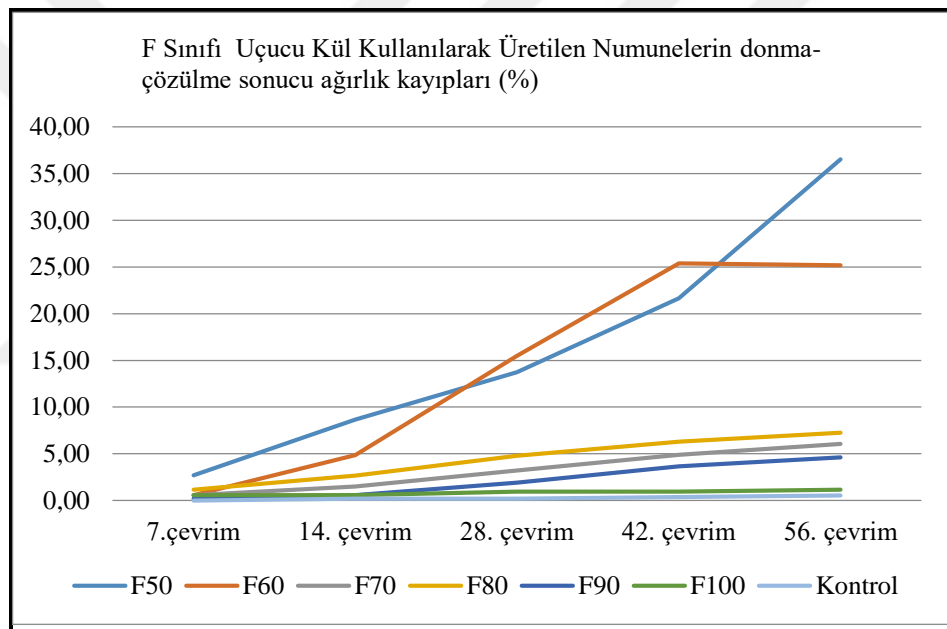
Şekil 5.40. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu basınç dayanımları

F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin tamamında, donma-çözülme etkisi sonucunda basınç dayanımlarında belirgin azalma tespit edilmiştir. 50 °C ve 60 °C’de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen numuneler, donma-çözülme deneyi sonunda dağılıp bozulmuş, bu sebeple basınç dayanımları ölçülemez. Çimentosuz numunelerden, donma-çözülme deneyi sonucu basınç dayanımı en az kayıp gösteren numune F100 numunesi olup eğilme dayanımı kaybı %34,02’dir. Kontrol numunesinin basınç dayanımı ise donma-çözülme deneyi sonunda %8,64 azalma göstermiştir. Genel olarak F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin donma-çözülme sonrası basınç dayanımı kayıpları, kontrol numunesine kıyasla daha fazladır. Bu durum, çimentosuz numunelerin %13,15’e ulaşan büyük geçirimli boşluklarından kaynaklanmaktadır. Malzemelerin boşluk oranı arttıkça donma-çözülmeye karşı dayanımları düşmektedir. Donma-çözülme etkisine maruz kalmış numunelerin, ağırlık kayıpları oranı Tablo 5.47’de gösterilmiştir.

Tablo 5.47. F sınıfı Uçucu Kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu ağırlık kayıpları oranı  
F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu ağırlık kayıpları (%)

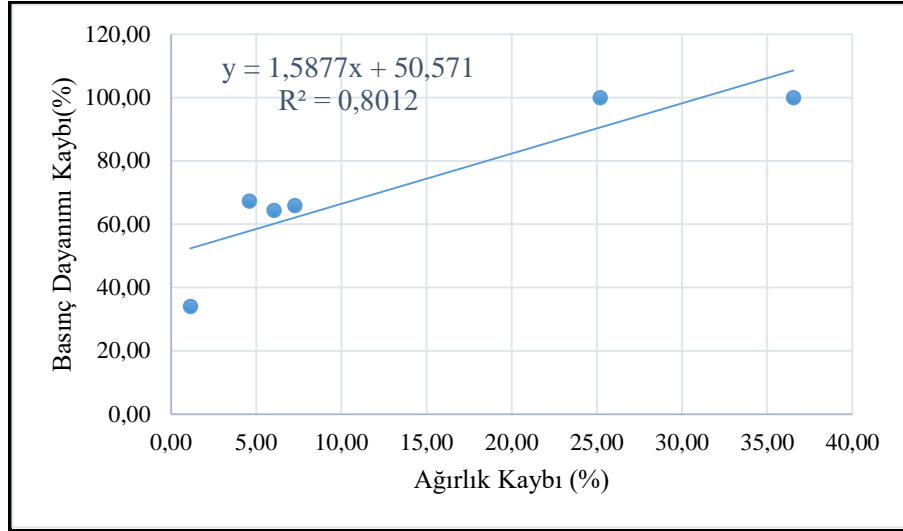
Numune Kodu	7.çevrim	14. çevrim	28. çevrim	42. çevrim	56. çevrim
F50	2,71	8,66	13,75	21,66	36,53
F60	0,56	4,85	15,49	25,37	25,19
F70	0,57	1,51	3,21	4,91	6,04
F80	1,16	2,67	4,77	6,30	7,25
F90	0,19	0,57	1,92	3,64	4,60
F100	0,57	0,57	0,95	0,95	1,14
Kontrol	0,00	0,18	0,18	0,36	0,54

Numunelerin donma çözülme deneyi sonucunda ağırlık kayıpları Şekil 5.41’de grafiksel olarak gösterilmiştir..



Şekil 5.41. F tipi uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma-çözülme sonucu ağırlık kayıpları oranı

Yüksek sıcaklıkta kür edilerek üretilen numunelerin ağırlık kayıpları, düşük sıcaklıkta kür edilerek üretilen çimentosuz numunelerden daha az olmakla birlikte, donma-çözülme sonrasında kontrol numunesi, çimentosuz numunelere göre daha az ağırlık kaybına uğramıştır. Şekil 5.42’de ağırlık kaybı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki gösterilmiştir.

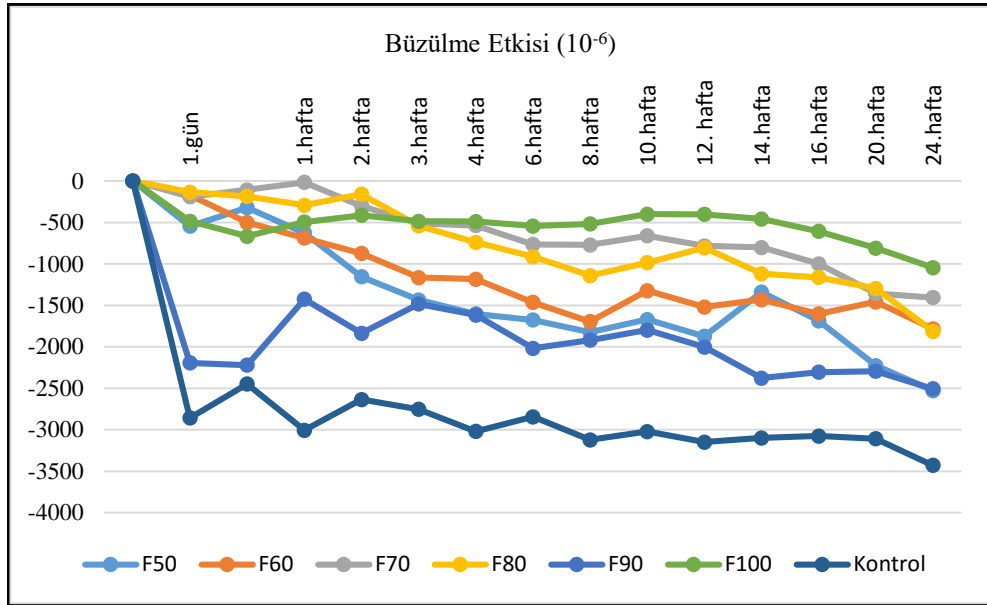


Şekil 5.42. Ağırlık kaybı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

### 5.8.3. Büzülme (rötre) etkisi deneyi

F sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve  $M_s=0,2$  olan NaOH ve  $Na_2SiO_3$  karışımı aktivatör ile üretilen numunelere, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C'de 48 saat boyunca sıcaklık kürü uygulandıktan sonra kuruma büzülmesi etkisi, numuneler üzerinde ASTM C 596 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Kurumu büzülmesi-zaman ilişkisini gösteren grafik Şekil 5.43'te gösterilmiştir.

Çimentosuz numunelerde en yüksek büzülme değeri 50 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F50 numunesi görülürken, en düşük büzülme değeri 100 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F100 numunesinde gözlenmiştir. Tüm numuneler içerisinde en yüksek büzülme değeri kontrol numunelerinde gözlenmiştir. Sıcaklık kürü uygulanarak üretilen çimentosuz numunelerin büzülme değerlerinin kontrol numunesine kıyasla daha az olduğu gözlenmiştir.



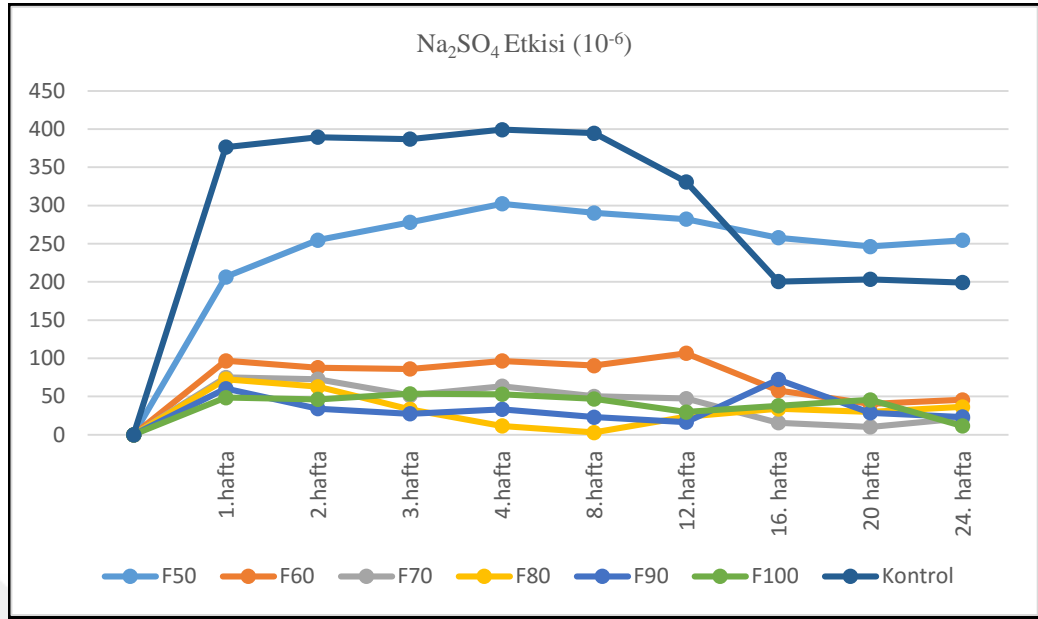
Şekil 5.43. Numunelerin kuruma büzülmesi

#### 5.8.4. Sülfat etkisi deneyi

##### 5.8.4.1. Sodyum sülfat etkisi deneyi

F sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve Ms=0,2 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile üretilen numuneler, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C'48 saat boyunca sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. Kontrol amacıyla hazırlanan çimento bağlayıcılı numune ise 28 gün boyunca su küründe bekletilmiştir. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisine konulan numunelerin ASTM C 1012 de belirtilen esaslara göre 6 ay boyunca boy değişimleri ve 1. Ay, 3. Ay ve 6. Ay sonundaki eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür.

Numunelerin boy değişim durumlarını gösteren Şekil 5.44'deki grafikte gösterilmiştir. En yüksek boy değişimi değeri 50 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F50 numunesi görülürken, en düşük boy değişimi değeri ise 100 °C ' de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F100 numunesinde gözlenmiştir. Genel olarak 60 °C ve üzerinde sıcaklık kürü uygulanarak üretilen çimentosuz numunelerin boy değişim değerlerinin kontrol numunesine kıyasla daha az olduğu gözlenmiştir.



Şekil:5.44. Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde boy değişimleri

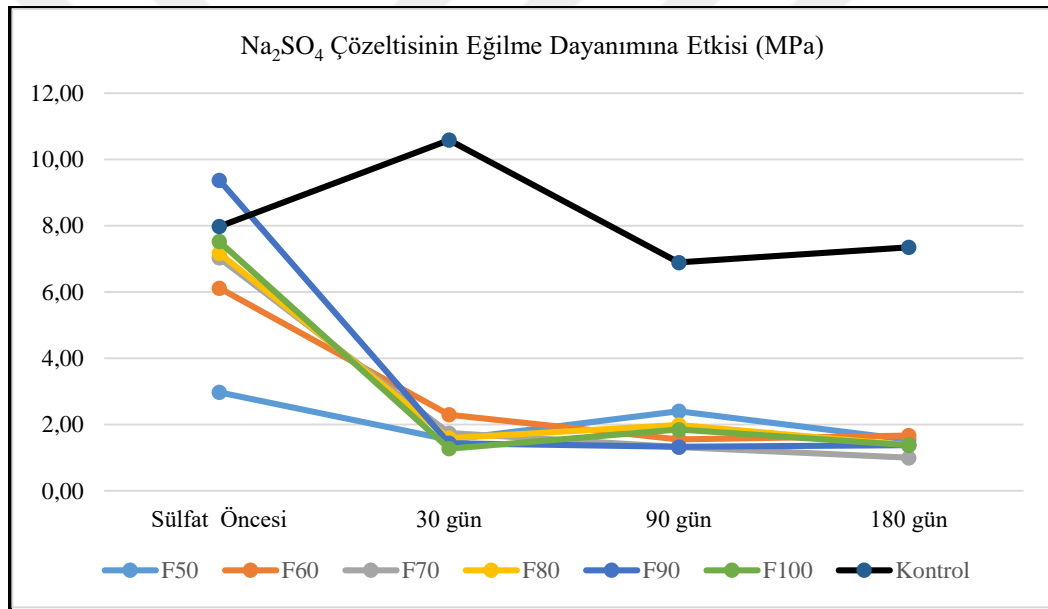
Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine konulmadan önceki eğilme dayanımları ile 30, 90, 180 gün Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi sonundaki eğilme dayanımları Tablo 5.48’de verilmiştir. F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin tamamında eğilme dayanımları belirgin şekilde azalmıştır. Kontrol numunesinin eğilme dayanımındaki azalma oranı, F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelere göre daha azdır. 50 °C’de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F50 numunesinin eğilme dayanımı 180 gün sonra %48,32 azalma gösterirken, 100 C’de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F100 numunesinin eğilme dayanımı %81,64 azalma göstermiştir. Çimentosuz numunelerde, üretim sırasındaki kür sıcaklığının artması Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi sonunda eğilme dayanımında azalmaya sebep olmuştur.

Kontrol numunesinin 180 günlük Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi sonunda eğilme dayanımı %7,89 azalma göstermiş olup, genel olarak çimentosuz numunelere göre Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine karşı daha az eğilme dayanımı kaybettikleri tespit edilmiştir.

Tablo 5.48. Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi sonundaki eğilme dayanımları

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)			
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Öncesi	30 gün	90 gün	180 gün
F50	2,98	1,54	2,41	1,54
F60	6,12	2,30	1,55	1,67
F70	7,03	1,74	1,32	1,00
F80	7,17	1,59	1,99	1,38
F90	9,38	1,44	1,33	1,38
F100	7,52	1,27	1,85	1,38
Kontrol	7,98	10,59	6,89	7,35

Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde eğilme dayanımlarının değişimini gösteren grafik Şekil 5.45'te verilmiştir.

Şekil 5.45. Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde eğilme dayanımı değişimleri

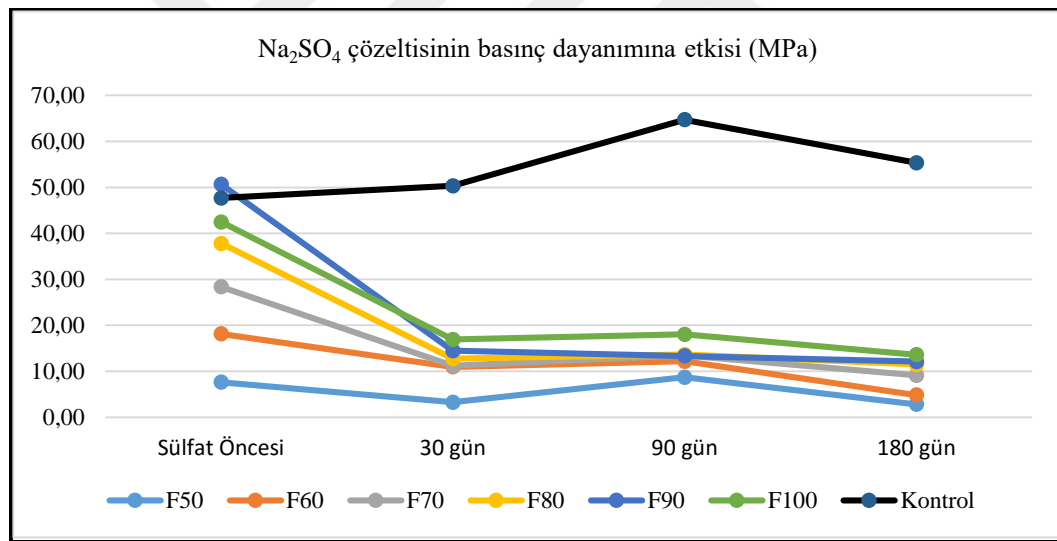
Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine konulmadan önceki eğilme dayanımları ile 30, 90, 180 gün Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi sonundaki basınç dayanımları Tablo 5.49'de verilmiştir. F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerin tamamının basınç dayanımları Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi sonucu azalma göstermiştir. Kontrol numunesinin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde basınç dayanım azalması daha azdır. F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numuneler 30 gün içerisinde belirgin basınç dayanımı azalması gösterirken, kontrol numunesinde görülen basınç kaybı azalması 90. günden itibaren başlamıştır. 50 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F50 numunesinin eğilme dayanımı 180 gün sonra

%63,30 azalma gösterirken, 100 C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F100 numunesinin eğilme dayanımı %67,94 azalma göstermiştir.

Tablo 5.49. Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi sonundaki basınç dayanımları

Numune Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)			
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Öncesi	30 gün	90 gün	180 gün
F50	7,63	3,27	8,70	2,80
F60	18,13	10,97	12,18	4,82
F70	28,38	11,19	13,44	9,10
F80	37,81	12,75	13,63	11,48
F90	50,64	14,48	13,32	12,09
F100	42,46	16,91	18,03	13,61
Kontrol	47,70	50,34	64,70	55,35

Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde basınç dayanımlarının değişimini gösteren grafik, Şekil 5.46.'da verilmiştir.



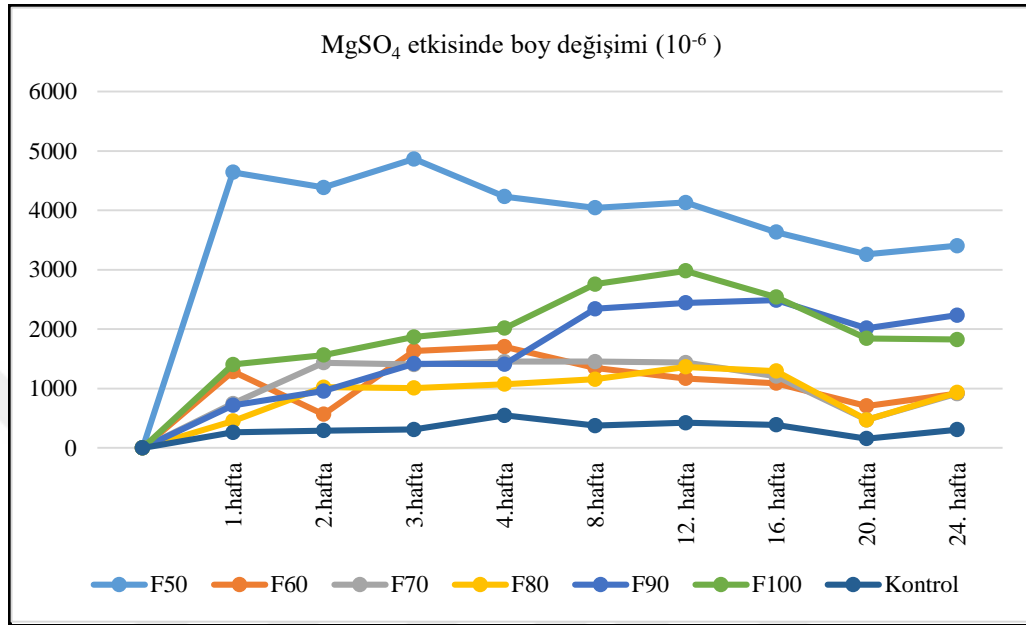
Şekil 5.46. Numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde basınç dayanımı değişimleri

#### 5.8.4.2. Magnezyum sülfat etkisi deneyi sonuçları

F sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve Ms=0,2 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile üretilen numuneler, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C'de 48 saat boyunca sıcaklık kürü uygulandıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. Kontrol amacıyla hazırlanan çimento bağlayıcılı numune ise 28 gün boyunca su küründe bekletilmiştir. MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisine konulan numunelerin,



ASTM C 1012 de belirtilen esaslara göre 6 ay boyunca boy değişimleri ve 1. Ay, 3. Ay ve 6. Ay sonundaki eğilme ve basınç dayanımları ölçülmüştür. Numunelerin boy değişim durumlarını gösteren grafik Şekil 5.47 'de verilmiştir.



Şekil 5.47. Numunelerin MgSO<sub>4</sub> etkisinde boy değişimleri

MgSO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde bekletilen numunelerin boy değişimleri incelendiğinde, 50 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen çimentosuz numunelerin en yüksek boy değişimi gösterdiği, çimentosuz numuneler içerisinde ise en az boy değişimi gösteren numunenin 80 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F80 numunesi olduğu gözlenmiştir. Kontrol numunesinin, çimentosuz numunelere kıyasla daha az boy değişimi gösterdiği tespit edilmiştir. Genel olarak 60 °C, 70 °C ve 80 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen çimentosuz numunelerin birbirlerine yakın boy değişim miktarı gösterdiği söylenebilir.

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin MgSO<sub>4</sub> etkisinde eğilme dayanımları belirgin şekilde azalma göstermiştir. 50 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F50 numunesi, 180 gün MgSO<sub>4</sub> etkisinden sonra %57,38 oranında eğilme dayanımı kaybına uğrarken, F100 numunesi %79,99 oranında eğilme dayanımı kaybetmiştir. Çimentosuz numunelerin en yüksek dayanım kayıp oranları ilk

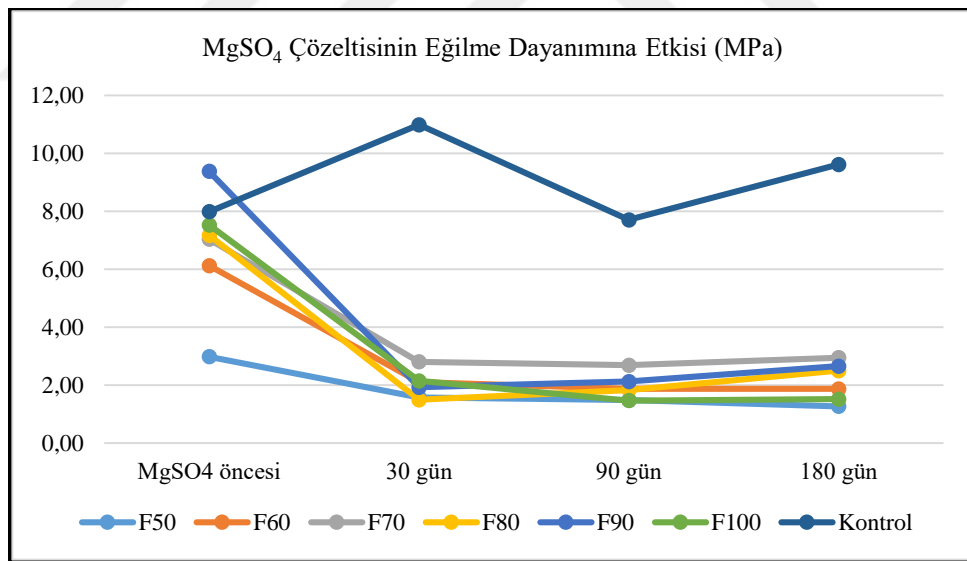
30 günlük sülfat etkisinde görülmektedir. Kontrol numunesinin  $MgSO_4$  etkisindeki eğilme dayanımı performansı, çimentosuz numunelere göre daha iyidir.

Numunelerin  $MgSO_4$  etkisinde eğilme dayanımları, Tablo 5.50’de gösterilmiştir.

Tablo 5.50. Numunelerin  $MgSO_4$  etkisi sonundaki eğilme dayanımları

Numune Kodu	Eğilme Dayanımı (MPa)			
	MgSO4 öncesi	30 gün	90 gün	180 gün
F50	2,98	1,57	1,48	1,27
F60	6,12	2,10	1,86	1,86
F70	7,03	2,80	2,68	2,94
F80	7,17	1,49	1,83	2,5
F90	9,38	1,92	2,12	2,65
F100	7,52	2,14	1,46	1,51
Kontrol	7,98	10,98	7,70	9,61

Numunelerin  $MgSO_4$  etkisinde eğilme dayanımlarının değişimini gösteren grafik Şekil 5.48’te verilmiştir.



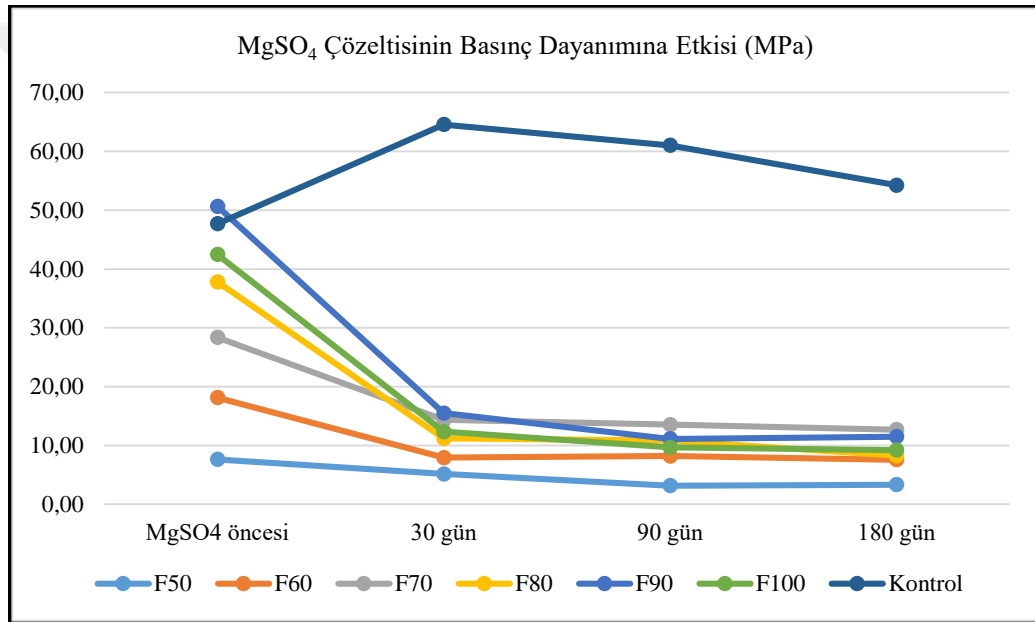
Şekil 5.48. Numunelerin  $MgSO_4$  etkisinde eğilme dayanımları değişimi

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin  $MgSO_4$  etkisinde basınç dayanımları belirgin şekilde azalma göstermiştir. Numunelerin  $MgSO_4$  etkisinde basınç dayanımları, Tablo 5.51’de gösterilmiştir.

Tablo 5.51. Numunelerin MgSO<sub>4</sub> etkisi sonundaki basınç dayanımları

Numune Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)			
	MgSO <sub>4</sub> öncesi	30 gün	90 gün	180 gün
F50	7,63	5,16	3,17	3,33
F60	18,13	7,92	8,19	7,58
F70	28,38	14,36	13,55	12,70
F80	37,81	11,19	10,84	8,27
F90	50,64	15,48	11,11	11,48
F100	42,46	12,34	9,66	9,20
Kontrol	37,70	64,56	61,02	54,25

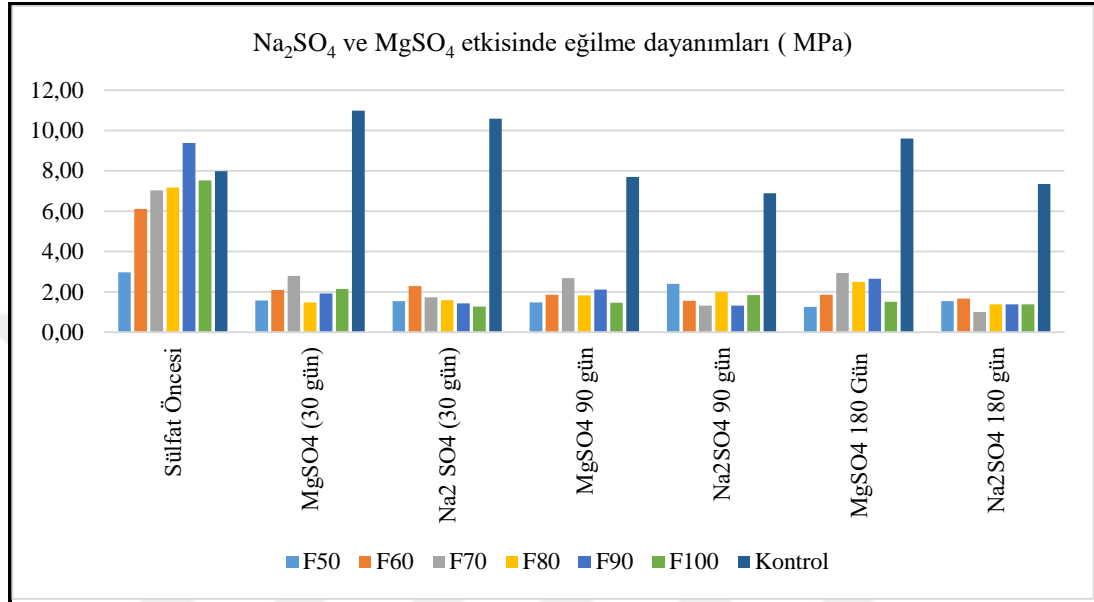
Numunelerin MgSO<sub>4</sub> etkisinde basınç dayanımlarının değişimini gösteren grafik Şekil 5.49'te verilmiştir.

Şekil 5.49. Numunelerin MgSO<sub>4</sub> etkisinde basınç dayanımları değişimi

50 °C'de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen F50 numunesi, 180 gün MgSO<sub>4</sub> etkisinden sonra %56,35 oranında basınç dayanımı kaybına uğrarken, F100 numunesi %78,33 oranında basınç dayanımı kaybetmiştir. Çimentosuz numunelerin en yüksek basınç dayanım kayıp oranları ilk 30 günlük sülfat etkisinde görülmektedir. Kontrol numunesinin MgSO<sub>4</sub> etkisindeki eğilme dayanımı performansı 30 günlük sülfat etkisinden sonra azalma göstermiştir. Kontrol numunesinin magnezyum sülfat etkisindeki basınç dayanımı çimentosuz numunelere göre daha iyi performans göstermiştir.

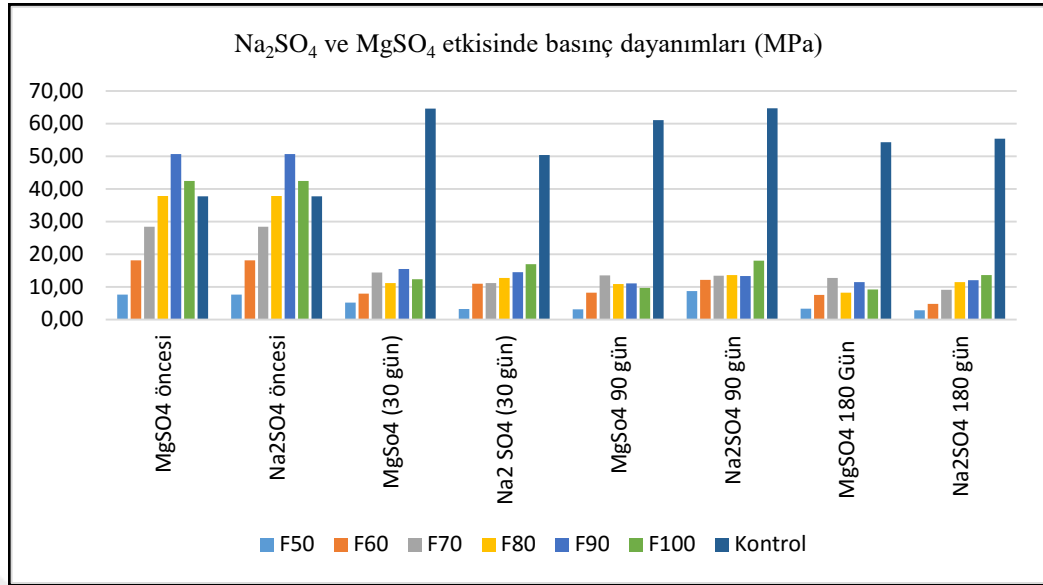
### 5.8.4.3. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub>'ün dayanıma etkisinin karşılaştırılması

Şekil 5.50'de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> numunlerinin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.50. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 5.51'de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> numunelerinin basınç dayanımlarının karşılaştırılması grafiksel olarak gösterilmiştir. F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde ve kontrol numunesinde, 180 gün sonundaki MgSO<sub>4</sub>'ün Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'e göre eğilme dayanımı üzerinde daha az olumsuz etki gösterdiği gözlenmiştir. Kontrol numunelerin sülfat etkisi altındaki eğilme dayanımları, çimentosuz numunelere göre daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 5.51.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{MgSO}_4$  numunelerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılması

### 5.8.5. Karbonatlaşma deneyi sonuçları

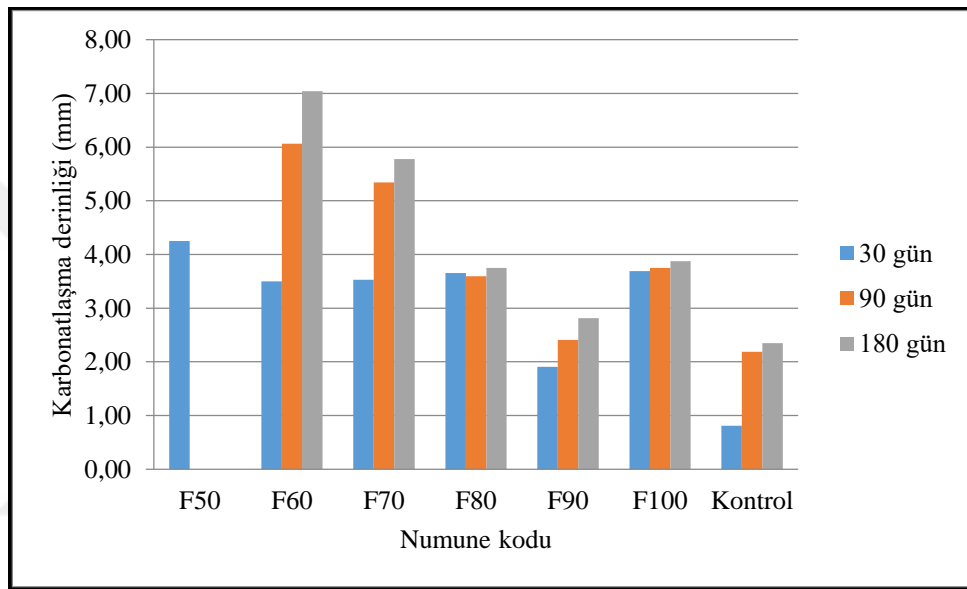
Karbonatlaşma deneyi için; F sınıfı uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve  $\text{Ms}=0,2$  olan  $\text{NaOH}$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  karışımı aktivatör ile  $71 \times 71 \times 71$  mm boyutlarında küp biçiminde üretilen numunelerin, karbonatlaşma derinlikleri Tablo 5.52’de verilmiştir.

Tablo 5.52. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin karbonatlaşma derinlikleri

F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm)			
Numune Kodu	30 gün	90 gün	180 gün
F50	4,25	0	0
F60	3,50	6,06	7,04
F70	3,53	5,34	3,78
F80	3,65	3,59	3,75
F90	1,90	2,41	2,81
F100	3,68	2,15	3,88
Kontrol	0,81	2,18	2,35

Numunelerin karbonatlaşma derinlikleri Şekil 5.52.’de grafiksel olarak gösterilmiştir.  $50^\circ\text{C}$ ’de kür edilerek üretilen çimentosuz F50 numunesi 30 günden sonra  $\text{NaHCO}_3$  çözeltisi içerisinde şişerek çatlamıştır. Bu sebeple 90 ve 180 günlük karbonatlaşma derinlikleri ölçülememiştir. En yüksek karbonatlaşma derinliği F60 numunesinde, en düşük karbonatlaşma derinliği ise kontrol numunesinde gözlenmiştir. Numunelerin üretimi sırasında uygulanan kür sıcaklığı arttıkça, karbonatlaşma derinliğinin azaldığı

gözlenmekle birlikte, çimentosuz numuneler içerisinde en düşük karbonatlaşma derinliği 90 °C’de sıcaklık kürü uygulanarak üretilen çimentosuz numunede ölçülmüştür. Kontrol numunesinin karbonatlaşma derinliği ile çimentosuz numunelerin karbonatlaşma derinlikleri karşılaştırıldığında, kontrol numunelerinin daha düşük karbonatlaşma gösterdikleri gözlenmiştir. F90 numunesinin geçirimli boşluk oranının % 8,65 olduğu dikkate alınır, karbonatlaşma derinliğinin kontrol numunesinden daha fazla olması beklenen bir durumdur.



Şekil 5.52. Numunelerin karbonatlaşma derinlikleri

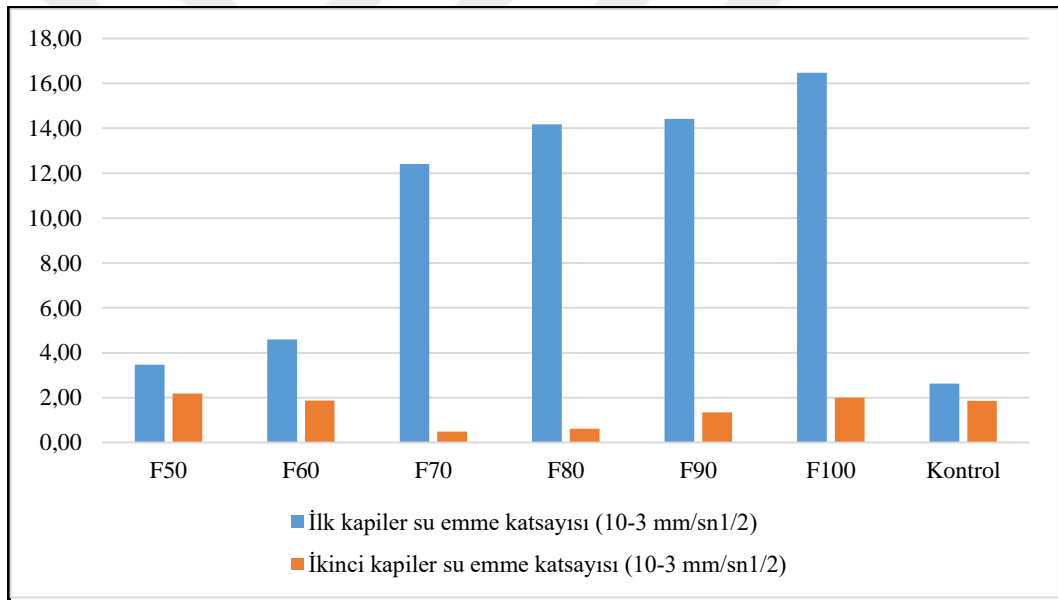
### 5.8.6. Kapiller su emme deneyi sonuçları

Kapiller su emme deneyi için; F tipi uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve Ms=0,2 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile 100±6 mm çapında, 50 ±3 mm kalınlıkta silindir biçiminde üretilen numuneler, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C, 100 °C’48 saat boyunca ısı işlem uygulandıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında havada kür edilmiştir. Kontrol amacıyla hazırlanan çimento bağlayıcılı numune ise 28 gün boyunca su küründe bekletilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde ASTM C1585 deney yöntemine göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin deney sonucunda elde edilen kapiller su emme katsayıları Tablo 5.53’de verilmiştir.

Tablo 5.53. Numunelerin kapiler su emme katsayıları  
Numunelerin kapiller su emme katsayıları ( $10^{-3} \text{ mm/sn}^{1/2}$ )

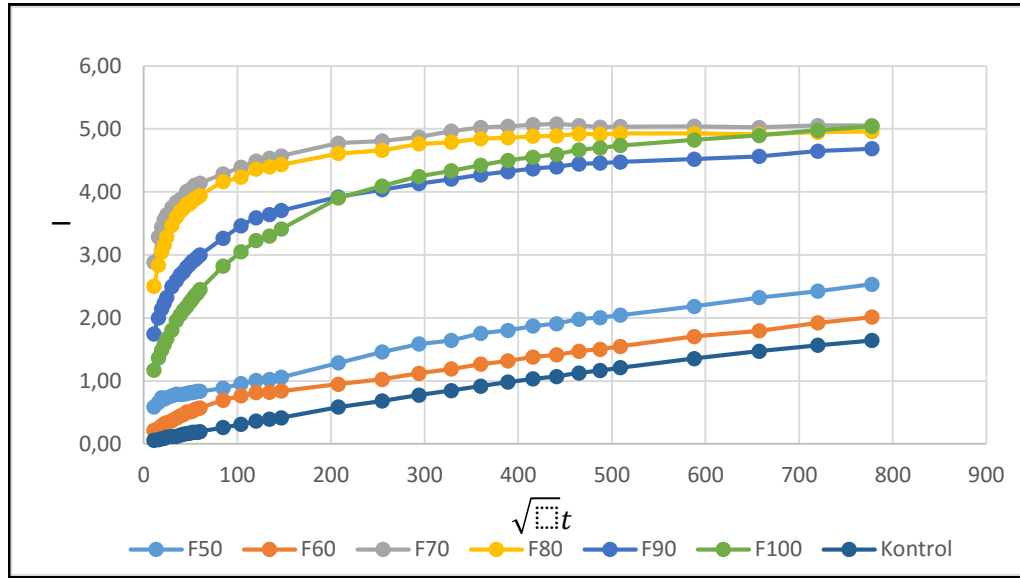
Numune Kodu	İlk kapiler su emme katsayısı	İkinci kapiler su emme katsayısı
F50	3,46	2,19
F60	4,59	1,87
F70	12,40	0,49
F80	14,18	0,61
F90	14,42	1,34
F100	16,48	2,00
Kontrol	2,62	1,85

Numunelerin deney sonucunda elde edilen kapiler su emme katsayıları Şekil 5.53'de verilmiştir.



Şekil 5.53. Numunelerin kapiler su emme katsayıları

Numunelerin zaman- kapiler su emme ilişkisini gösteren grafik Şekil 5.54'de verilmiştir.



Şekil 5.54. Kapiler su emme-zaman grafiği

Yüksek sıcaklıkta kür edilerek üretilen çimentosuz numunelerin kapiler su emme katsayıları, düşük sıcaklıkta kür edilerek üretilen numunelere göre daha fazladır. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin kapiler su emme katsayılarının kontrol numunesinden daha fazla olmasının sebebi, çimentosuz numunelerde geçirimli boşluk oranının yüksek olmasıdır.

### 5.8.7. Aşınma direnci deneyi sonuçları

Aşınma deneyi için; F tipi uçucu kül için en uygun aktivatör %14 Na ve Ms=0,2 olan NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışımı aktivatör ile 71×71×71 mm boyutlarında küp biçiminde üretilen numunelerin, kontrol numunesi ile aşınma dirençlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 5.54'de verilmiştir.

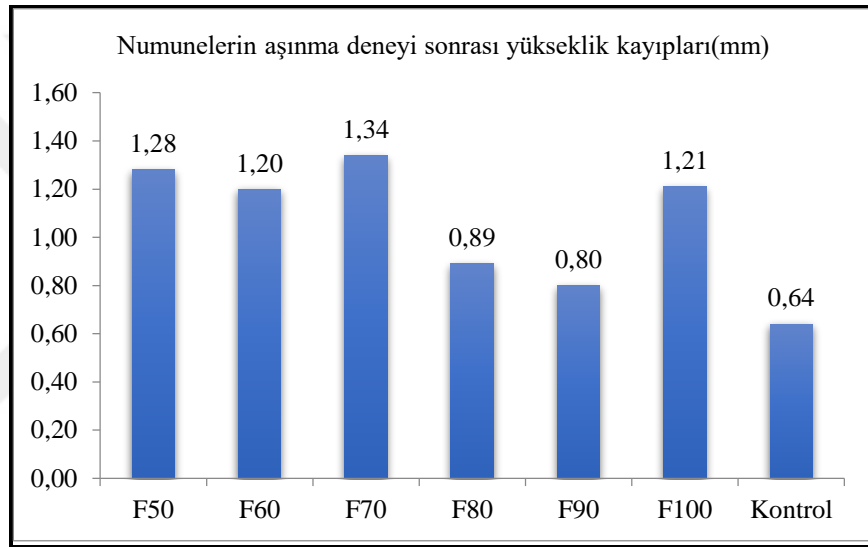
Numunelerin aşınma dirençleri incelendiğinde, F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerden en az yükseklik kaybına uğrayan, 90 °C'de sıcaklık kürü uygulanmış numune olan F90 kodlu numunedir. F90'ın aşınma deneyi sonucunda yükseklik kaybı 0,80 mm dir. Aynı şekilde ağırlık olarak ta çimentosuz numuneler içerisinde F90 numunesi 9,5 gr ağırlık kaybı ile en az ağırlık kaybeden numunedir. Bununla birlikte kontrol numunesini aşınma kaybı, çimentosuz numunelerin aşınma kaybindan daha az olduğu görülmektedir.



Tablo 5.54. Numunelerin aşınma öncesi ve sonrası ölçüm değerleri

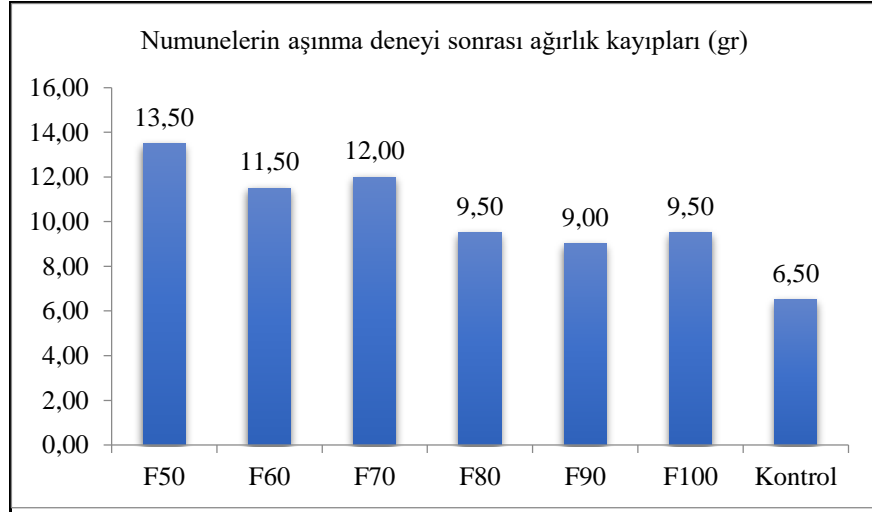
Numune	Aşınma Öncesi		Aşınma Sonrası		Yükseklik		Ağırlık	
	Yükseklik Ortalaması (mm)	Ağırlık Ortalaması (gr)	Yükseklik Ortalaması (mm)	Ağırlık Ortalaması (mm)	mm	mm (%)	Gr	gr(%)
F50	71,07	739,00	69,79	725,50	1,28	1,80	13,50	1,83
F60	71,88	743,00	70,68	731,50	1,20	1,67	11,50	1,55
F70	71,25	742,50	69,91	730,50	1,34	1,88	12,00	1,62
F80	71,32	726,50	70,43	717,00	0,89	1,25	9,50	1,31
F90	71,13	718,00	70,23	709,00	0,80	1,12	9,00	1,25
F100	71,13	704,50	69,92	695,00	1,21	1,70	9,50	1,35
Kontrol	71,13	776,00	70,49	769,50	0,64	0,90	6,50	0,84

Numunelerin yükseklik kayıpları Şekil 5.55'te verilmiştir.



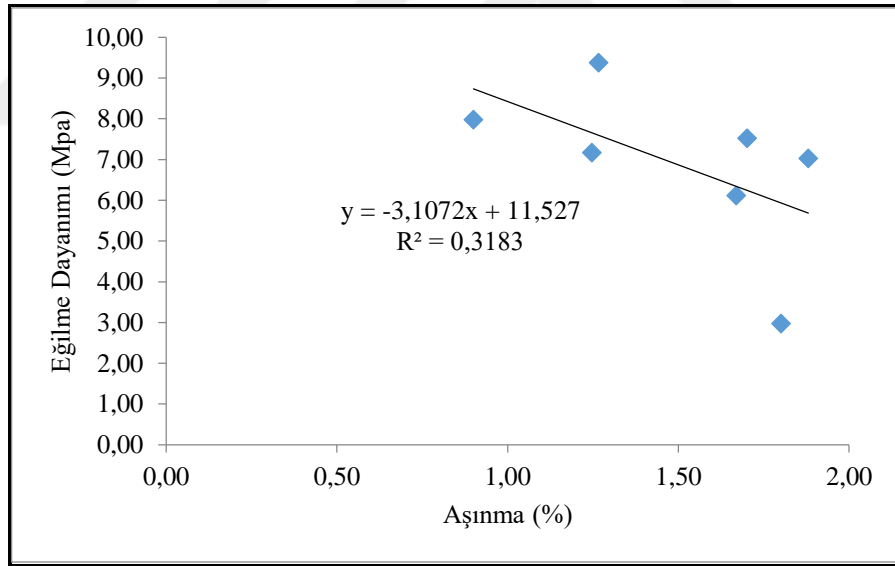
Şekil:5.55. Numunelerin aşınma sonrası yükseklik kayıpları

Aşınma deneyi sonrasında numunelerin ağırlık kayıpları Şekil 5.56'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



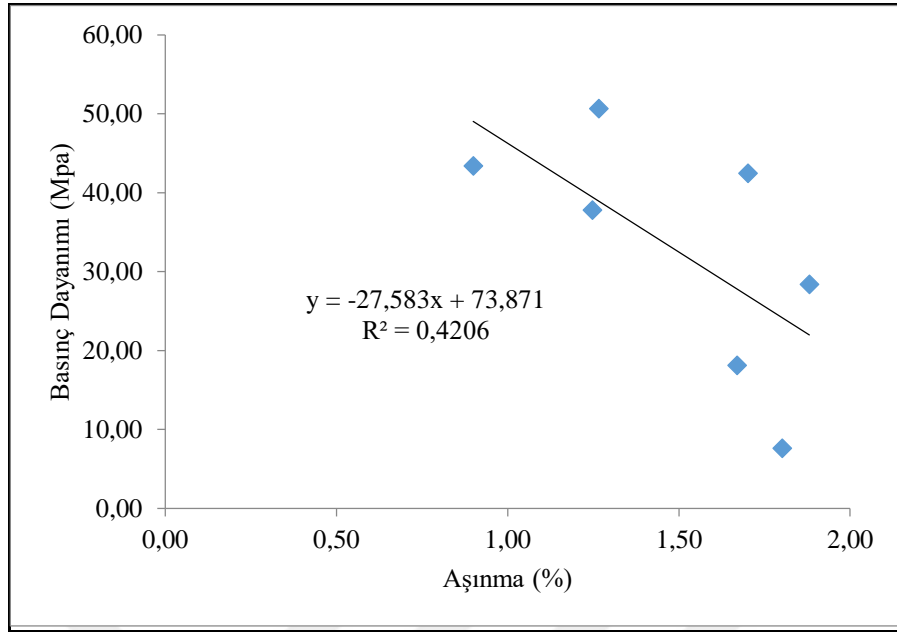
Şekil 5.56. Numunelerin aşınma sonrası ağırlık kayıpları

Şekil 5.57’de eğilme dayanımı ile aşınma arasındaki ilişki incelendiğinde, eğilme dayanımı arttıkça aşınmanın azaldığı, aşınma ile eğilme arasında negatif yönlü  $R^2=0,318$  değerinde zayıf bir ilişki olduğu söylenebilir.



Şekil 5.57. Eğilme dayanımı ile aşınma arasındaki ilişki

Şekil 5.58’de ise basınç dayanımı ile aşınma arasındaki ilişki incelendiğinde, basınç dayanımı arttıkça aşınmanın azaldığı, aşınma ile eğilme arasında negatif yönlü  $R^2=0,4206$  değerinde zayıf bir ilişki olduğu söylenebilir.



Şekil 5.58. Basınç dayanımı ile aşınma arasındaki ilişki

### 5.8.8. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi sonuçları

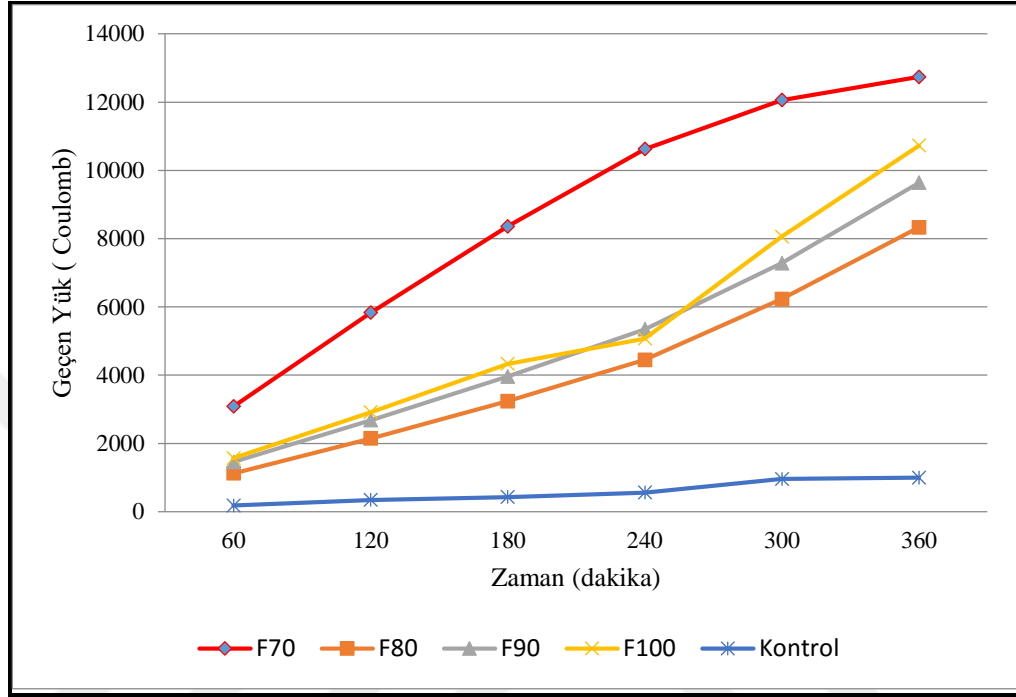
Hızlı klorür geçirgenliği deneyi Bölüm 4.3.7.8’de belirtilen esaslara göre yapılmıştır. F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numuneler ile kontrol numunesinin hızlı klorür geçirgenlikleri test edilmiştir. Şekil 5.59’da geçen yük miktarının zamanla değişimi verilmiştir. ASTM C 1202 standardına göre betonlar Tablo 5.55’te verildiği gibi beş geçirimsizlik sınıfına ayrılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numuneler aşırı geçirgen sınıfa girerken, kontrol numunesi çok düşük sınıfa girmektedir.

Tablo 5.55. Hızlı klorür geçirimsizliği sınıfları (ASTM C 1202)

Hücreden geçen yük değeri, (coulomb)	Klor geçirimsizlik sınıfı
< 100	İhmal edilebilir
100 – 1000	Çok düşük
1000 – 2000	Düşük
2000 – 4000	Orta
> 4000	Yüksek

50 °C ve 60 °C de sıcaklık kürü uygulanarak üretilmiş olan F50 ve F60 numuneleri klorür geçirgenliği deneyi sırasında zayıf dayanımları nedeniyle dağılmış olup deney sonuçları alınamamıştır. F70 numunesi hızlı klorür geçirgenliği en yüksek olan

numune olarak tespit edilmiştir. Üretim sırasında yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerin klorür geçirgenliği, düşük sıcaklıkta kür edilen numunelere göre daha az geçirgen olarak sonuç vermiştir.



Şekil 5.59. Hızlı klorür geçirgenliği deneyi yük-zaman grafiği

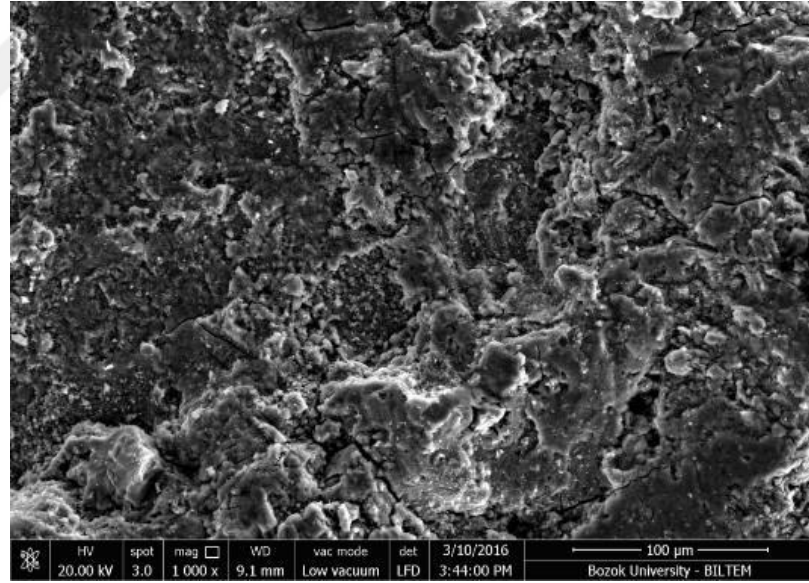
Hızlı klorür iyonu geçirgenliği deneyi, elektriksel iletkenliğin bir ölçümü olup, betonun boşluk yapısına ve boşluk çözeltilisinin kimyasına bağlıdır. Çimento yerine çeşitli bağlayıcı katkı maddelerinin ilavesi, boşluk çözeltilisinin kimyasını değiştirmesi nedeniyle geçen yük miktarını %90'dan daha fazla azaltsa da klorür iyonlarının transferini çok az etkilemektedir (Aydın, 2010). Yiğiter (2008) uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun çimento yerine ikamesi ile betonun elektriksel direncinin arttığını bildirmiştir. Bu nedenle, bağlayıcısı uçucu kül olan çimentosuz karışımından geçen yük miktarının bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımından daha az olması beklenirdi. Ancak, Shi ve arkadaşları (2006), alkali aktive edilmiş betonlarda sodyum silikat/bağlayıcı oranı arttıkça geçen yük miktarının arttığını bildirmiştir. Bu durum, geçen yük olduğunu gösterir. Alkali aktive edilmiş betonlarda boşluk çözeltilisinin kimyasının elektriksel iletkenlik veya geçen yük üzerindeki etkisinin boşluk yapısından daha fazla etkili olduğu belirtilmiştir. Uçucu kül kullanılarak üretilmiş

çimentosuz karışımından geçen yük miktarının kontrol karışımına kıyasla daha yüksek olması, daha boşluklu yapıda olmasının yanında, bu betonların boşluk çözeltisinin kimyasal yapısındaki değişim ile de önemli ölçüde bağlantılıdır. Deney sonuçlarının yukarıda anlatılan nedenlerle klorür iyonu geçirimsizliği hakkında sağlıklı bir bilgi vermediği düşünülmektedir (Aydın, 2010).

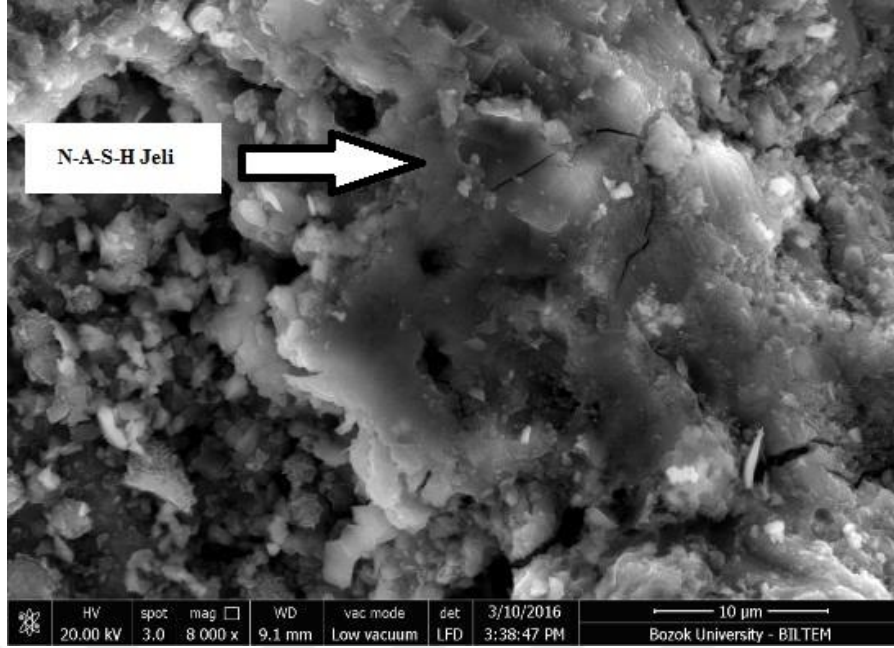
## 5.9. Numunelerin içyapı incelemeleri

### 5.9.1. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunenin iç yapı incelemesi

F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 90 °C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu FN14M2) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.60. FN14M2 Numunesinin  $\times 1000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 5.61. FN14M2 numunesinin  $\times 8000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü

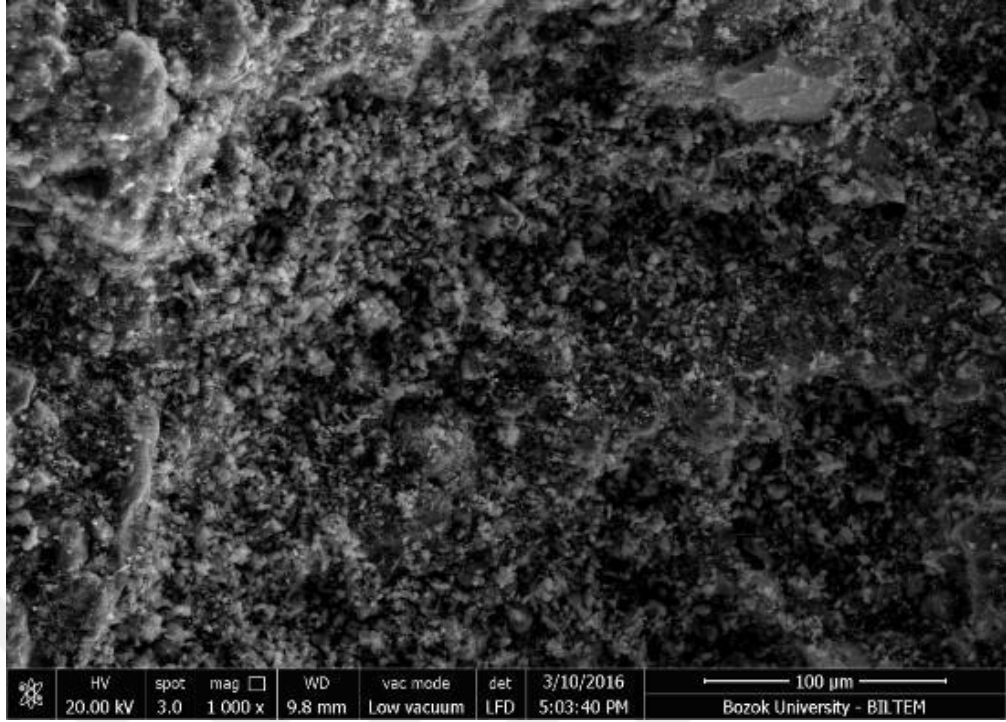
F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 90 °C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu FN14M2) XRF sonuçları Tablo 5.56’da verilmiştir.

Tablo 5.56. FN14M2 numunesinin XRF Analiz Sonuçları

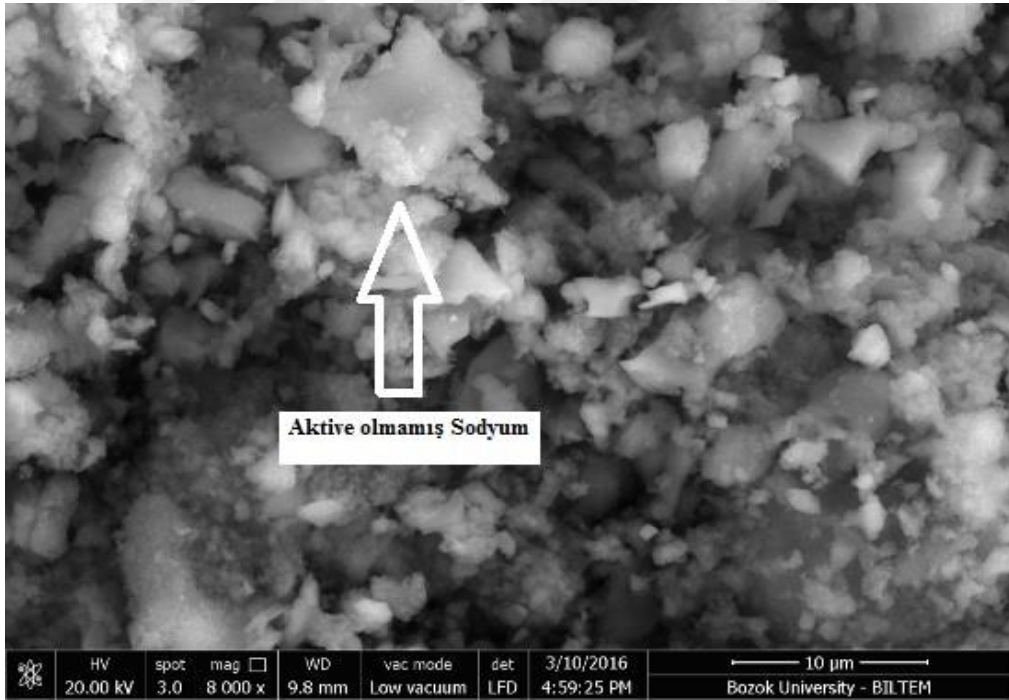
Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
SiO <sub>2</sub>	69,84000	0,23000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,86000	0,16000
Na <sub>2</sub> O	9,94000	0,15000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,98000	0,10000
K <sub>2</sub> O	1,72000	0,07000
MgO	1,52000	0,06000
CaO	0,89100	0,04400
TiO <sub>2</sub>	0,42800	0,02100
SO <sub>3</sub>	0,14700	0,00700
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11100	0,00600

### 5.9.2. C Sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunenin iç yapı incelemesi

C sınıfı uçucu kül kullanılarak %12 Na, Ms=0,6 içeren aktivatör ile 90 C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu CN14M2) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.62-5.63’te verilmiştir.



Şekil 5.62. CN12M6 numunesinin  $\times 1000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 5.63. CN12M6 numunesinin  $\times 8000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü

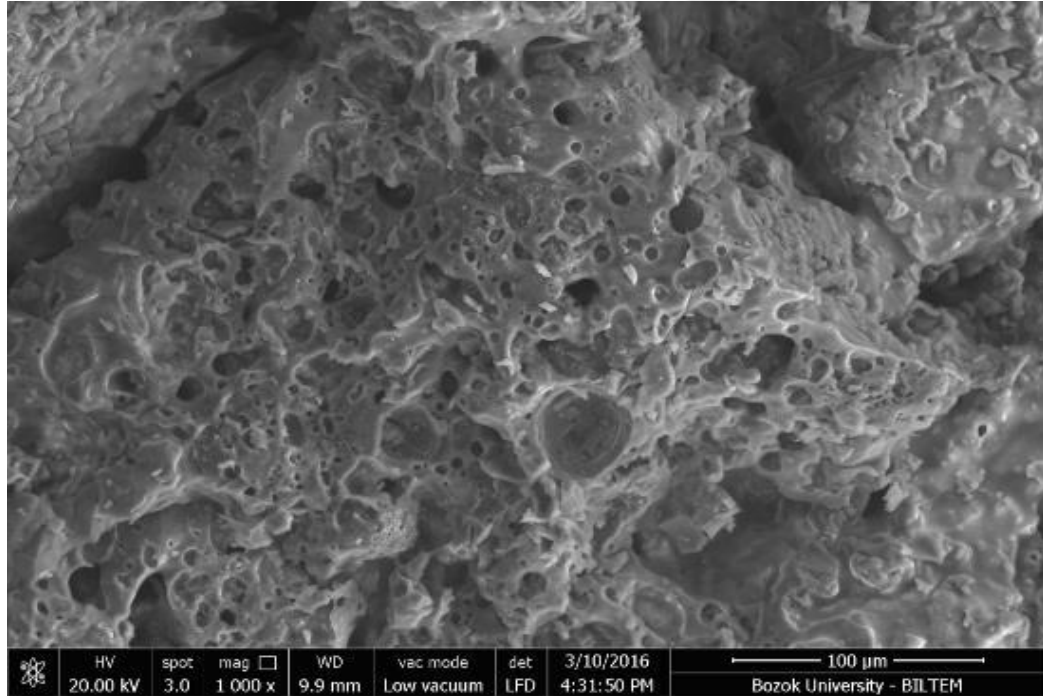
C sınıfı uçucu kül kullanılarak %12 Na,  $M_s=0,6$  içeren aktivatör ile  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu CN12M6) XRF sonuçları Tablo 5.57'de verilmiştir.

Tablo 5.57. CN12M6 numunesinin XRF analiz sonuçları

Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
SiO <sub>2</sub>	57,78000	0,25000
CaO	13,23000	0,17000
Na <sub>2</sub> O	9,01000	0,14000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,99000	0,14000
SO <sub>3</sub>	3,46000	0,09000
K <sub>2</sub> O	2,46000	0,08000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,36000	0,08000
MgO	1,71000	0,06000
TiO <sub>2</sub>	0,31200	0,01600

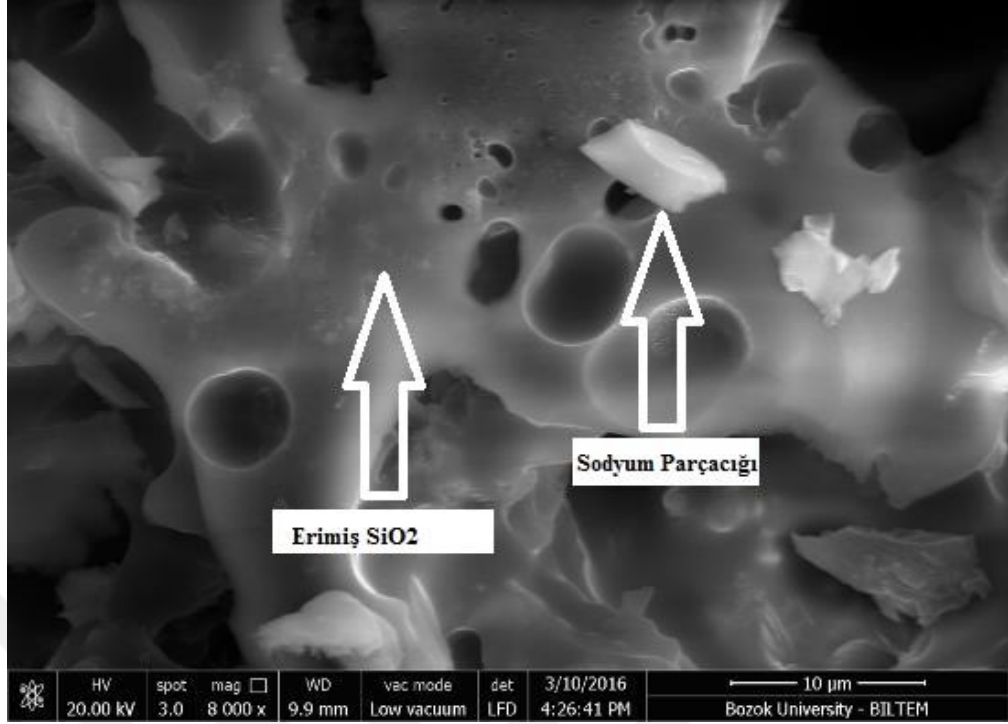
### 5.9.3. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin yüksek sıcaklık deneyi sonrası iç yapı incelemesi

F tipi uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 90 °C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu F50) 800 C’ yüksek sıcaklık etkisinden sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.64-5.65’te verilmiştir.



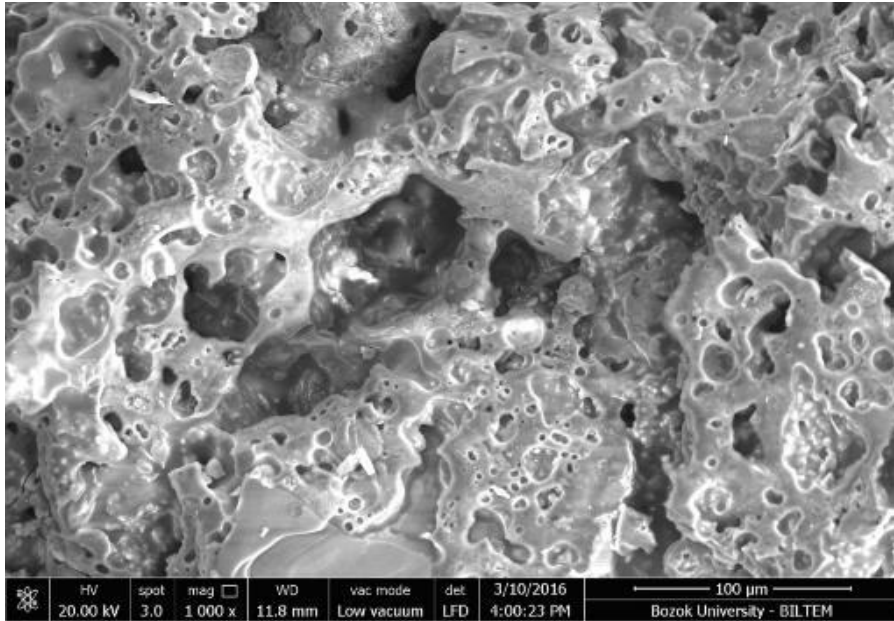
Şekil 5.64. F90-800 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra ×1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü



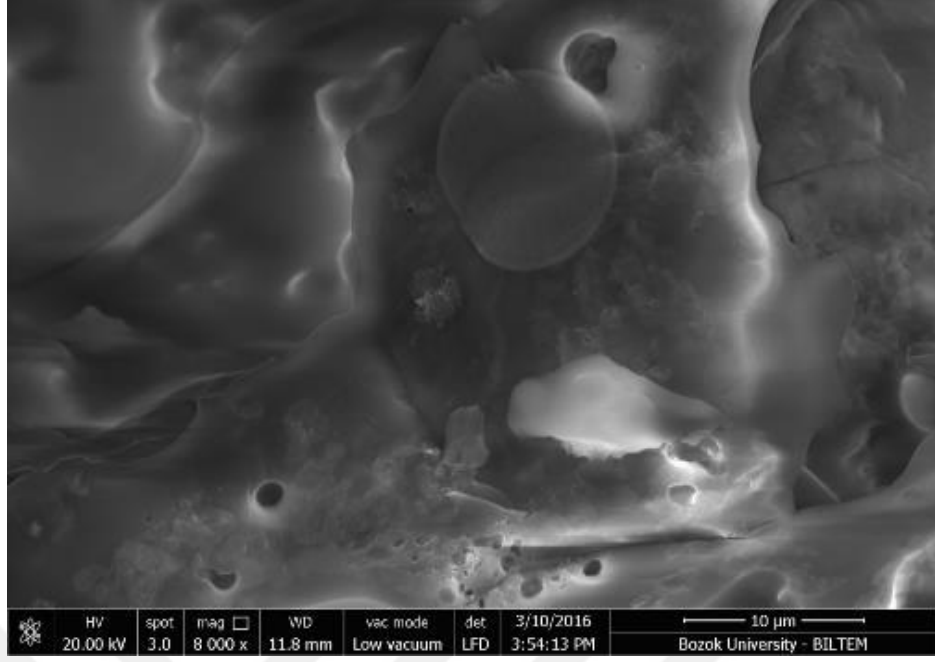


Şekil 5.65. F90-800 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra  $\times 8000$  kat büyütülmüş SEM Görüntüsü

F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na,  $M_s=0,2$  içeren aktivatör ile 50 °C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu F50) 800 °C’ yüksek sıcaklık etkisinden sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.66-5.67’de verilmiştir.

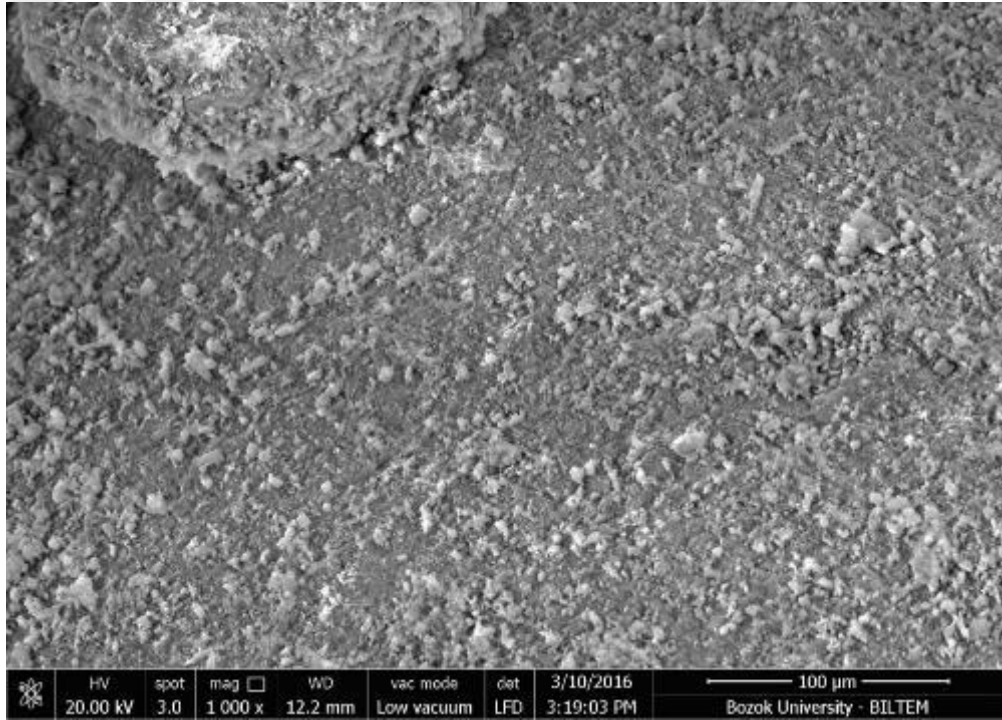


Şekil 5.66. F50-800 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra  $\times 1000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü

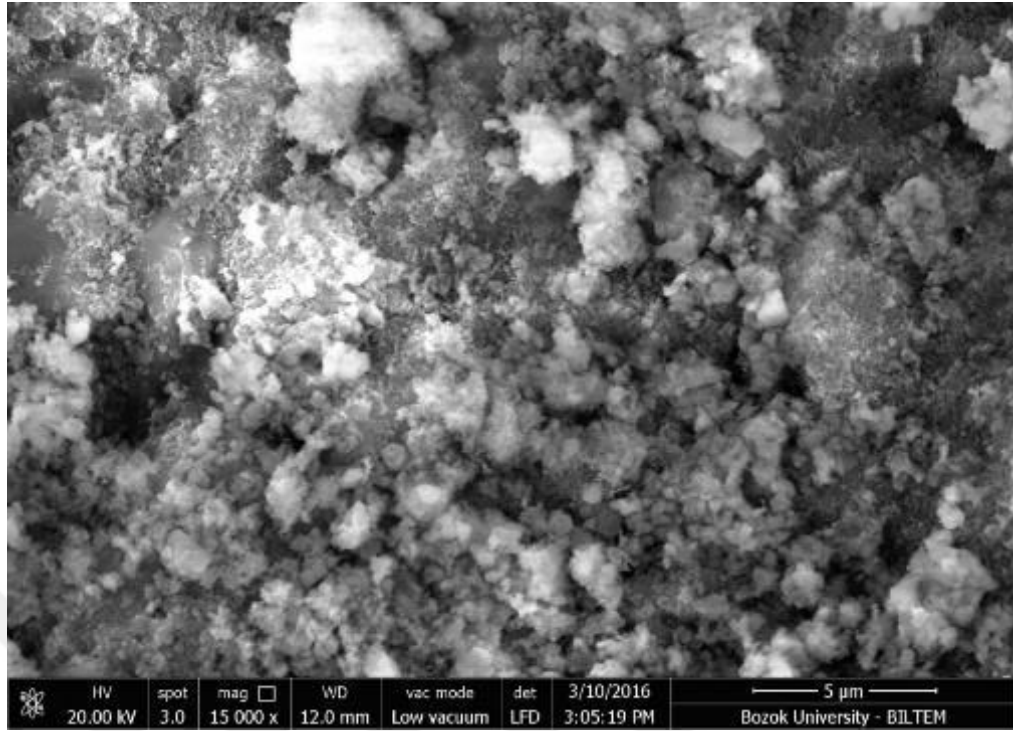


Şekil 5.67. F50-800 numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra  $\times 8000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Portland çimentosu kullanılarak üretilen kontrol numunesinin 800 °C yüksek sıcaklık deneyinden sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.68-5.69'da verilmiştir.



Şekil 5.68. Kontrol numunelerinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra  $\times 1000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 5.69. Kontrol numunesinin 800 °C sıcaklık etkisinden sonra  $\times 15000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü

F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 90 °C'de 48 sıcaklık kürü işlem uygulanmış numunenin (numune kodu F90-800) 800 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonra, XRF sonuçlarıT ablo 5.58'de verilmiştir.

Tablo5.58. F90-800 numunesinin XRF analiz sonuçları

Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
SiO <sub>2</sub>	71,53000	0,23000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,52000	0,15000
Na <sub>2</sub> O	8,98000	0,14000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,68000	0,09000
K <sub>2</sub> O	1,62000	0,06000
MgO	1,60000	0,06000
CaO	0,94700	0,04700
TiO <sub>2</sub>	0,40600	0,02000
SO <sub>3</sub>	0,13000	0,00700

F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 50 C'de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu F50-800) 800 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonra, XRF sonuçları Tablo 5.59'da verilmiştir.

Tablo 5.59. F50-800 numunesinin XRF analiz sonuçları

Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
SiO <sub>2</sub>	76,08000	0,21000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,15000	0,14000
Na <sub>2</sub> O	7,72000	0,13000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,67000	0,09000
MgO	1,43000	0,06000
K <sub>2</sub> O	0,93700	0,04700
CaO	0,79500	0,04000
TiO <sub>2</sub>	0,37400	0,01900
SO <sub>3</sub>	0,16300	0,00800

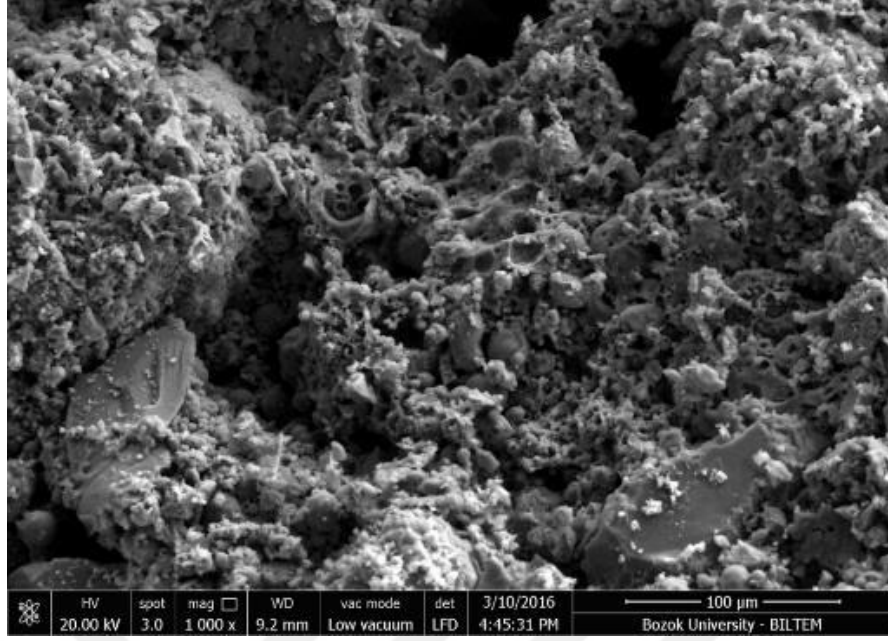
Portland çimentosu kullanılarak üretilen kontrol numunesinin 800 °C yüksek sıcaklık deneyinden sonra XRF analiz sonuçları Tablo 5.60'ta verilmiştir.

Tablo5.60. Kontrol numunesinin XRF analiz sonuçları

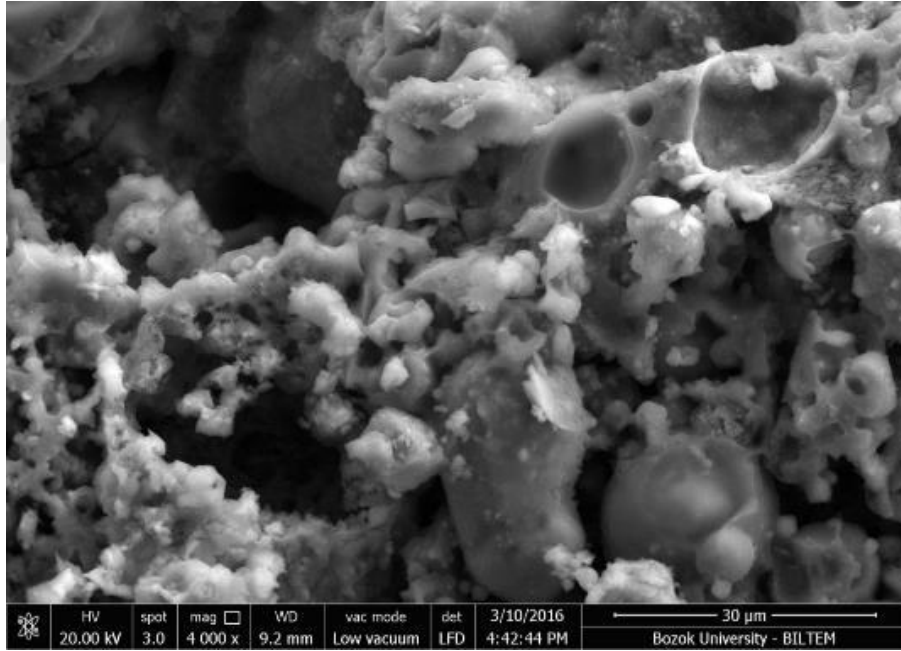
Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
SiO <sub>2</sub>	64,33000	0,24000
CaO	24,58000	0,22000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,24000	0,10000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,01000	0,07000
MgO	1,28000	0,06000
SO <sub>3</sub>	1,20000	0,05000
K <sub>2</sub> O	1,03000	0,05000
Na <sub>2</sub> O	0,53600	0,02700
TiO <sub>2</sub>	0,21500	0,01100

#### 5.9.4. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen numunelerin donma çözülme deneyi sonrası içyapı incelemesi

F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 100 °C'de 48 saat ısıtma işlemi uygulanmış numunenin (numune kodu F100) donma çözülme etkisinden sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.70-5.7'de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, numunede boşluk yapısının arttığı, içyapıda bozulma ve ayrışmaların olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.70. F100 numunesinin donma-çözülme etkisinden sonra  $\times 1000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 5.71. F100 numunesinin donma-çözülme etkisinden sonra  $\times 4000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü

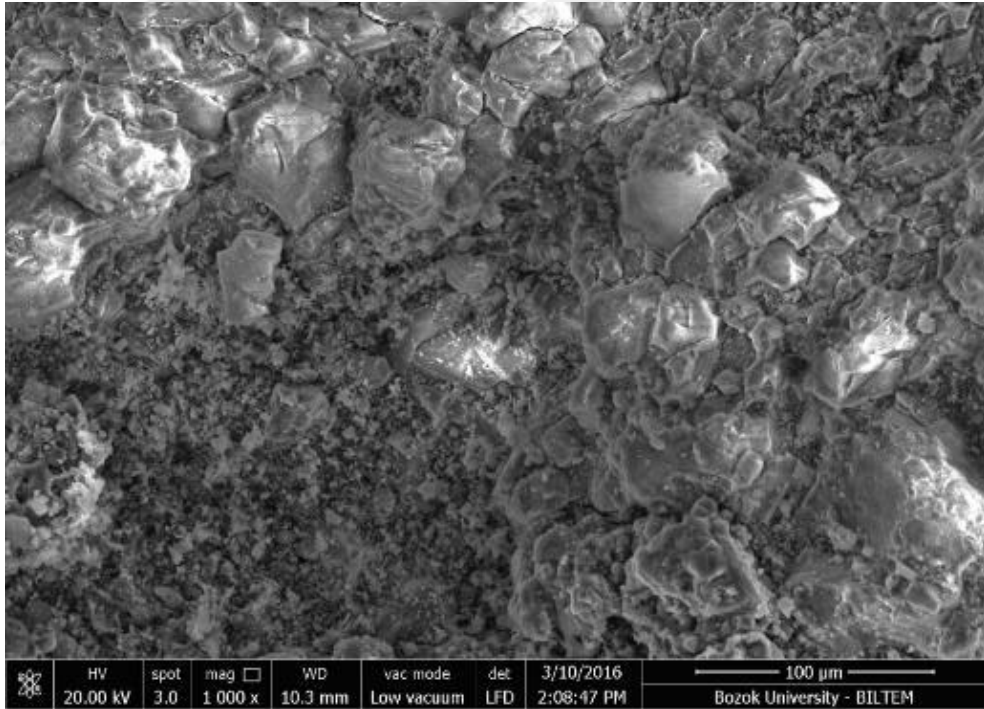
F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 100 °C’de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu F100) donma çözülme etkisinden sonra, XRF analizi sonuçları Tablo 5.61’de verilmiştir.

Tablo:5.61. F100 numunesinin donma-çözülme sonrası XRF analiz sonuçları

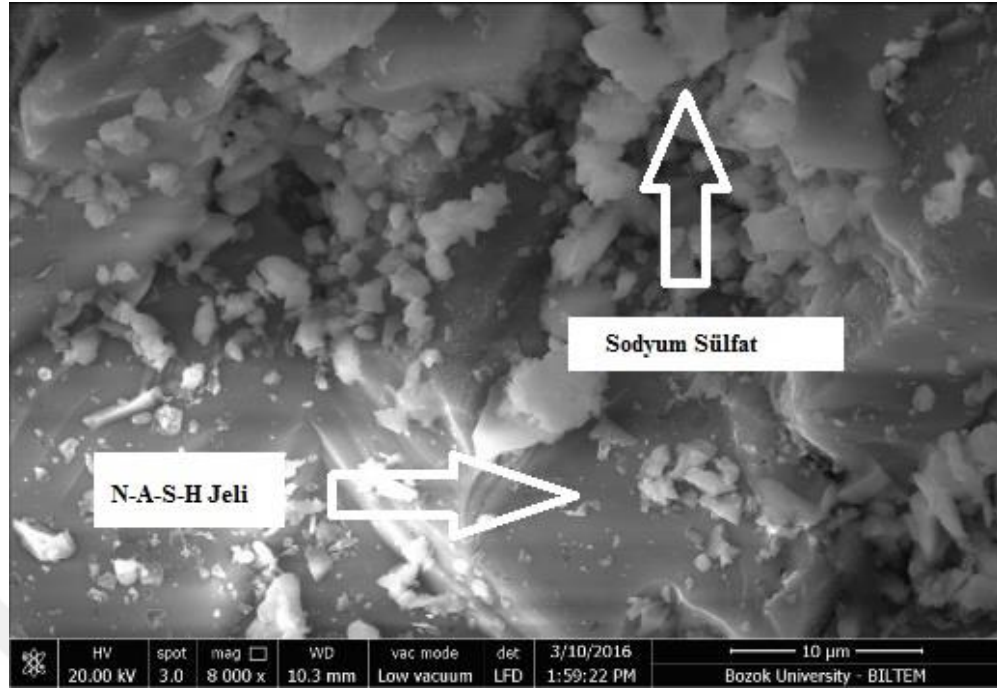
Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
SiO <sub>2</sub>	73,69000	0,22000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,67000	0,15000
Na <sub>2</sub> O	7,87000	0,13000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,81000	0,10000
K <sub>2</sub> O	1,52000	0,06000
MgO	1,44000	0,06000
CaO	0,78800	0,03900
TiO <sub>2</sub>	0,39300	0,02000

### 5.9.5. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) etkisi deneyi sonrası içyapı incelemesi

F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 90 C’de 48 saat ısıl işlem uygulanmış numunenin (numune kodu F90) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi deneyinden sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.72-5.73’te verilmiştir.



Şekil 5.72. F90 numunesinin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinden sonra ×1000 kat büyütülmüş SEM Görüntüsü



Şekil 5.73. F90 numunesinin  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisinden sonra  $\times 8000$  kat büyütülmüş SEM görüntüsü

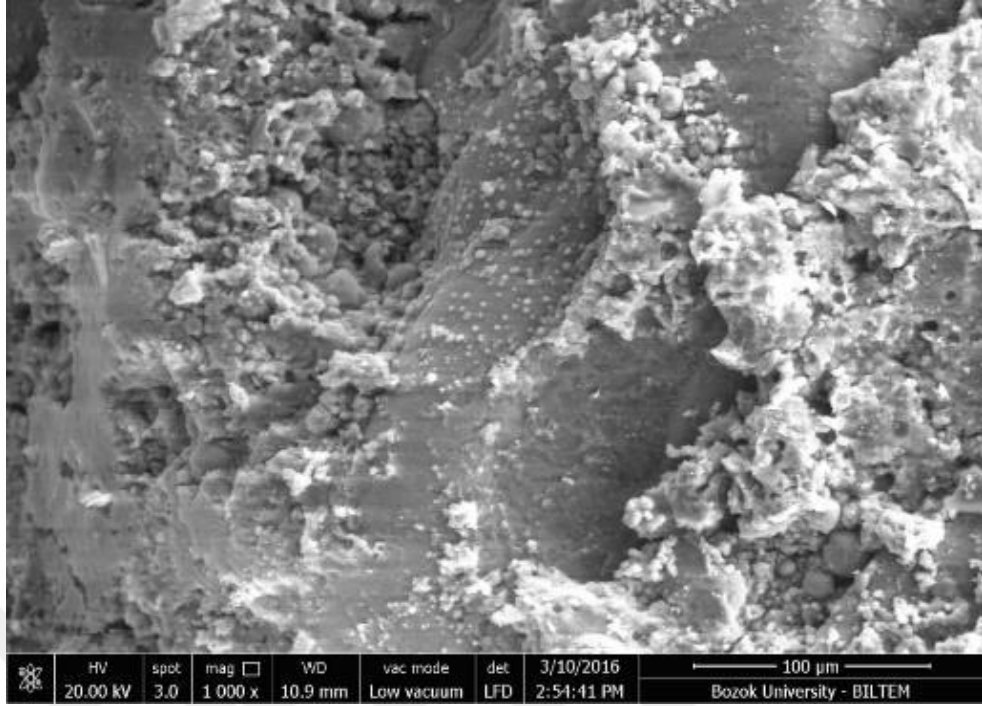
F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na,  $M_s=0,2$  içeren aktivatör ile  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 48 saat ısıtım işlemi uygulanmış numunenin (numune kodu F90)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisi deneyinden sonra, XRF analizi sonuçları Tablo 5.62'de verilmiştir.

Tablo 5.62. F90 numunesinin  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisinden sonra XRF analiz sonuçları

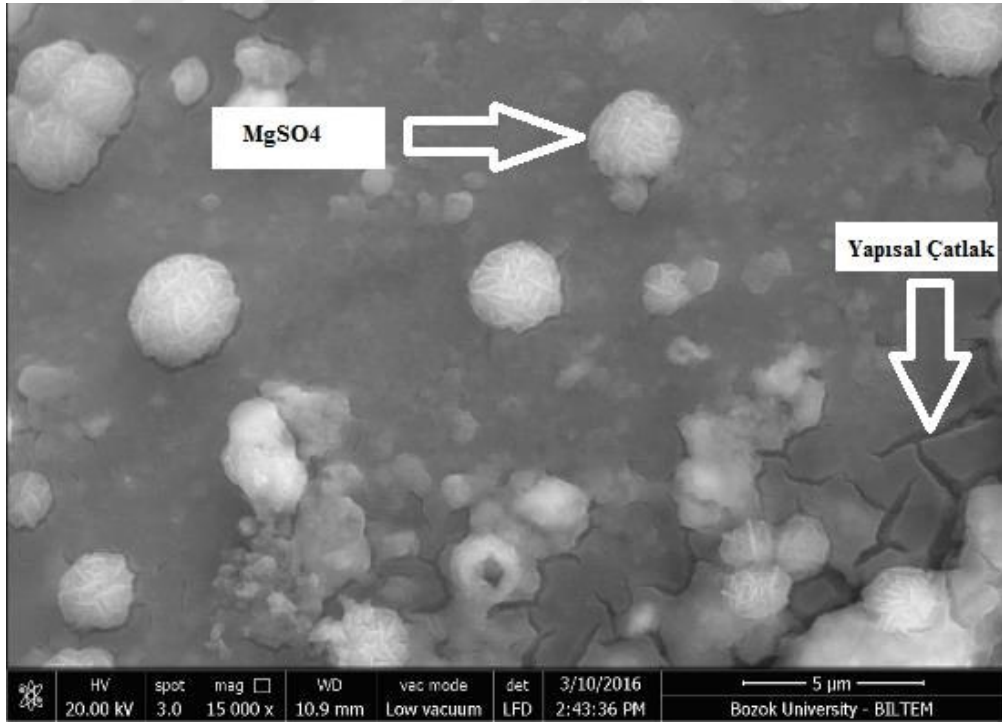
Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
$\text{SiO}_2$	72,15000	0,22000
$\text{Al}_2\text{O}_3$	10,66000	0,15000
$\text{Na}_2\text{O}$	7,05000	0,13000
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	4,75000	0,11000
$\text{MgO}$	1,65000	0,06000
$\text{K}_2\text{O}$	1,04000	0,05000
$\text{CaO}$	0,99000	0,04900
$\text{SO}_3$	0,56300	0,02800
$\text{TiO}_2$	0,50300	0,02500

### 5.9.6. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) etkisi deneyi sonrası içyapı incelemesi

F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na,  $M_s=0,2$  içeren aktivatör ile  $90\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 48 sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu F90)  $\text{MgSO}_4$  etkisi deneyinden sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.74-5.75 'te verilmiştir.



Şekil 5.74. F90 numunesinin MgSO<sub>4</sub> etkisinden sonra ×1000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü



Şekil 5.75. F90 numunesinin MgSO<sub>4</sub> etkisinden sonra ×15000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü



F sınıfı uçucu kül kullanılarak %14 Na, Ms=0,2 içeren aktivatör ile 90 C'de 48 saat sıcaklık kürü uygulanmış numunenin (numune kodu FN14M2) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi deneyinden sonra, XRF analizi sonuçları Tablo 5.63'te verilmiştir.

Tablo 5.63. F90 numunesinin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinden sonra XRF analiz sonuçları

Kompozisyon	m/m%	Standart hata %
SiO <sub>2</sub>	64,61000	0,24000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,98000	0,17000
Na <sub>2</sub> O	8,15000	0,14000
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,93000	0,11000
MgO	3,28000	0,09000
K <sub>2</sub> O	2,44000	0,08000
CaO	1,09000	0,05000
TiO <sub>2</sub>	0,53400	0,02700
SO <sub>3</sub>	0,30600	0,01500

## BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmanın ilk aşamasında, Kangal C sınıfı uçucu külü ile Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün mekanik özellikleri incelenmiştir. Bunun için öncelikle her iki farklı kül için uygun aktivatör miktarını tespit etmek amacıyla, Na %'si 10-20 aralığında ve silikat modülü ( $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ )  $M_s = 0-0,60$  aralığında çimentosuz numuneler üretilerek, 75 °C' de 48 saat süre ile sıcaklık kürü uygulanmış, daha sonra numuneler 28. güne kadar oda koşullarında bekletilmiştir. Numunelerin 28 gün sonundaki eğilme ve basınç dayanımları test edilmiş, iki ayrı kül grubu için en yüksek basınç dayanımına sahip numune içerisinde bulunan aktivatör miktarı o kül sınıfı için en uygun aktivatör olarak belirlenmiştir. Belirlenen aktivatör oranları ile F ve C sınıfı küller ile çimentosuz numuneler üretilmiştir.

Mekanik dayanım ile ilgili genel sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- a. Mekanik deneyler aşamasında, F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde 28 günde 50,64 MPa basınç dayanımı tespit edilirken, Kangal C sınıfı uçucu külü ile 28. Günde 13,88 MPa dayanım tespit edilmiştir. Ayrıca Kangal C sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numuneler su içerisine konulduğunda dağılmaktadır. Bu sebeple sağlama yapmak amacıyla Soma C sınıfı uçucu külü ile de çeşitli denemeler yapılmıştır. Soma C sınıfı uçucu külü ile üretilen çimentosuz numuneler de su içerisinde dağılmış, ayrıca 13,38 MPa basınç dayanımının üzerinde dayanımı elde edilememiştir. Bu sebeple C sınıfı uçucu küllerin sadece mekanik özellikleri incelenmiş olup, C sınıfı uçucu küller ile durabilite deneylerine devam edilmemiştir. C sınıfı uçucu kül ile üretilen numunelerin belirli bir basınç dayanımına ulaşmamaalarının sebebi, kül yapısında bulunan fazla miktardaki CaO'den (%25,75 ve üzeri) kaynaklanmaktadır.

Ayrıca aktivasyonun tam olarak gerçekleşmediği ve SEM görüntülerinde N-A-S-H jel yapının oluşmadığı gözlenmiştir. Deneyler sırasında, aynı miktarda kum, uçucu kül ve aktivatör kullanılsa bile kaynağı farklı her bir uçucu külün işlenebilirlik için farklı su/bağlayıcı oranına ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir. Kangal C sınıfı uçucu külü %25,75 CaO içermekte, özgül yüzeyi 3320 cm<sup>2</sup>/gr ve 45 mikron elek bakiyesi %44,33 tür. Soma C sınıfı uçucu külü ise %32,10 CaO içermekte, özgül yüzeyi 2360 cm<sup>2</sup>/gr ve 45 mikron elek bakiyesi %8,8 dir. Kangal C sınıfı uçucu külü, Soma C sınıfı uçucu külüne göre daha az CaO içerdiği halde, özgül yüzeyinin fazla olması nedeniyle işlenebilirlik için Soma C sınıfı uçucu külünden daha fazla suya ihtiyaç duymaktadır. Aynı şekilde Tunçbilek F sınıfı uçucu külü 1,88 CaO içerdiği, halde 45 mikron elek bakiyesi %4,9 olup özgül yüzeyi 3703 cm<sup>2</sup>/gr dır. Bu sebeple Tunçbilek F sınıfı uçucu külü ile Soma C sınıfı uçucu külü alkali aktive edilmiş çimentosuz harç üretiminde birbirine yakın su/bağlayıcı oranları kullanılmaktadır.

- b. Bu çalışmada kullanılan C sınıfı küller ile belirli bir dayanımda ve belirli durabilitede alkali aktive edilmiş çimentosuz harç elde etmek mümkün değildir. Bunun sebebi olarak, C sınıfı uçucu küllerin doğası gereği yapısında bulunan CaO ve termik santrallerdeki kömür yakma teknolojisi olduğu düşünülmektedir. Literatürde de C sınıfı uçucu kül ile üretilmiş alkali aktive edilmiş çimentosuz harçlarla ilgili kaynağın yok denecek kadar az olması bu durumu teyit etmektedir.
- c. F sınıfı uçucu kül ile üretilen alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerden oda sıcaklığında bekletilenlerin erken dayanım kazanmadığı, 28 günde 5,47 MPa basınç dayanımına ulaşabilmişken, 360 günde 28,75 MPa basınç dayanımına ulaştığı görülmüştür. F sınıfı uçucu kül ile üretilen alkali aktive edilmiş ve oda sıcaklığında bekletilen çimentosuz numuneler, tüm yaş gruplarında su içerisine konulduğunda dağılmıştır. Bu durum F sınıfı uçucu kül ile üretilen alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin mutlaka 70 °C ve üzeri sıcaklık kürüne ihtiyaç gösterdiğini teyit etmektedir.
- d. F sınıfı uçucu kül ile üretilen alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerden sıcaklık kürü sırasında su kaybını azaltmak amacıyla fırın torbası ile sarılmıştır. Numunelerin 90 °C’de 96 saat kür edildikten sonra 7 günlük basınç dayanımı

67,92 MPa'a ulaşırken, 100 °C de 48 saat ısı k¼r¼ uygulanan numunenin 7 g¼nl¼k basınç dayanımı 58,80 MPa ulaşmıştır. Otoklav k¼r¼ uygulamasının alkali aktive edilmiş harçlarda dayanımı önemli ölç¼de artıracadığ düşün¼lmektedir. Bu nedenle bu çalışmanın devamı olarak otoklav k¼r¼ uygulaması yapılarak sonuçların bu durumu teyit etmesi ortaya konulmalıdır.

Durabilite Özellikleri ile ilgili sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- a. Alkali aktive edilmiş harçların yüksek sıcaklık dirençleri, çimentolu kontrol numunelerine göre yüksektir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıkta k¼r¼ edilmiş ve düşük basınç dayanımına sahip numuneler yüksek sıcaklık etkisi sonunda, daha yüksek basınç dayanımına ulaşmaktadırlar. Bu çalışmada 50 °C'de 48 saat süreyle k¼r¼ edilen ve daha sonra 28 güne kadar oda sıcaklığında bekletilen numunenin yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımı 7,63MPa iken 800 °C yüksek sıcaklık etkisinden sonra 40,70 MPa 'a ulaşmıştır. Bu durum, numune üretimi sırasında uygulanan sıcaklık derecesinin düş¼kl¼đ¼, buna bağlı olarak numune içerisine ısı geçişinin az olması nedeniyle alkali aktivasyonu gerçekteşmemiş kimyasaldan kaynaklı olduğu söylenebilir.
- b. 50-60 °C gibi düşük sıcaklıkta alkali aktive edilmiş, uçucu kül ile üretilen çimentosuz harçların donma-çöz¼lmeye karşı dirençleri gözlenmemiştir. Tüm sıcaklık gruplarında alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin kontrol numunelerine göre donma çöz¼lme dirençlerinin zayıf olması boşluk oranlarının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
- c. Bu çalışmada üretilen alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin, çimentolu kontrol numunelerine göre daha az b¼z¼lme gösterdiği gözlenmiştir. Alkali aktive edilmiş numunelerde sıcaklık k¼r¼ndeki sıcaklık derecesinin artması b¼z¼lme değerini azaltmaktadır. Bu durum literat¼r ile tam uyum göstermektedir.
- d. Alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> etkisinde dayanım kayıpları, çimentolu kontrol numunelerine göre yüksek olmakla birlikte, alkali aktive edilmiş uçucu k¼lle üretilmiş çimentosuz numunelerin suya karşı genel bir dayanım kayıpları söz konusudur.

- e. Alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin karbonatlaşma derinlikleri, kontrol numunelerinden yüksek olup, bu durum boşluk oranlarının fazlalığı ve alkali aktivatörün içeriğindeki  $\text{Na}^+$  iyonlarından kaynaklanmaktadır.
- f. Aşınma dayanımları dikkate alındığında, yüksek dayanıma sahip alkali aktive edilmiş çimentosuz numunelerin, çimentolu kontrol numunelerinden daha fazla boşluk içermesi nedeniyle aşınma dayanımlarının düşük olduğu söylenebilir. Üretim sırasında yüksek sıcaklık kürü uygulanmış numunelerin aşınma dayanımları, düşük sıcaklık kürü uygulanan numunelerden daha iyidir. Boşluk oranlarının fazlalığından kaynaklı aynı durum kapiller su emme katsayıları için de geçerlidir.

#### Öneriler;

Türkiye’de çimento üretiminin 74,2 milyon ton, uçucu kül üretiminin ise yaklaşık 24 milyon ton, olduğu ve uçucu külün ancak %10 civarında bir oranla geridönüşüm olarak kullanıldığı dikkate alındığında, çevre açısından önemli bir sorun olduğu gerçektir. Önümüzdeki yıllarda kömüre dayalı enerji üretiminin artacağı dikkate alındığında bu atıkların depolanması yerine geridönüşümü daha da önem kazanmaktadır. Çimento sektöründeki birim maliyette %51,9 ‘luk enerji ihtiyacı ayrı bir sorun olarak devam etmektedir.

Alkali aktive edilmiş uçucu küllü çimentosuz harç ve betonların geliştirmesine katkı sağlamak amacıyla yapılmış bu çalışmanın, yeni araştırmacılara da kaynak oluşturacağı, özellikle çalışmada kullanılan küller için tespit edilmiş olan aktivatör oranlarının, küllerin geridönüşümüne katkısı açısından öncü olduğu söylenebilir.

Özellikle yüksek sıcaklık performansları değerlendirildiğinde, uçucu kül kullanılarak alkali aktive edilmiş çimentosuz harçların prefabrik sektöründe, yangına dayanıklı panel üretiminde, yüksek sıcaklık fırınlarının izolasyonunda, park, bahçe oturma grubu ve şehir mobilyaları üretiminde kullanılabilirliği düşünülebilir. Bunun yanı sıra aktivatörlerin kimya sektöründe kısıtlı ve küçük hacimlerde üretimi ve kullanımı, inşaat sektöründe yığın kullanımı açısından ekonomik görünmemektedir. Alkali

aktivatörlerin yaygın üretimi sonucu maliyeti düşürüldüğünde, uçucu küllü çimentosuz harç ve beton üretimi mümkün olabilir.



## KAYNAKLAR

- Abdullah, M.M.A.L., Hussin K., Bnhussain, M., Ismail, K.N., Ibrahim, W.M.W. 2011. Mechanism and chemical reaction of fly ash geopolymer cement- a review. Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 6(1): 35-44.
- Abdullah, M.M.A.L., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K.N., Yahya, Z., Razak, R.A. 2012. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent. Int. J. Mol. Sci., 13(6): 7186-7198.
- Activity Report 2014. Cembureau, The European Cement Association, Brussels, 1-42.
- Arrifin, M.A.M., Bhuatta, M.A.R., Hussin, M.W., Tahir, M.M., Aaziah, N. 2013. Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. Construct. Build. Mater., 43: 80-86.
- Aruntaş, H.Y. 2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., 21(1): 193-203.
- ASTM C1012, Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.
- ASTM C 1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- ASTM C1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.
- ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concretes.
- Atig, 2015. Çimento Sektör Raporu.
- Aydın, S. 2010. Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Aytekin, S. 2009. Uçucu Küllerinin Killi Zeminlerin Islahında Kullanımı. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.

- Bakri, A.M.M.A., Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, K., Razak, A.R., Zarina, Y. 2012. Microstructure study on optimization of high strength fly ash based geopolymer. *Adv. Mater. Res.*, 476-478: 2173-2180.
- Balçıkanlı, M., Özbay, E., Türker, H.T., 2015. Alkalilerle aktive edilmiş harçların çekip çıkarma ve aşınma dirençlerinin belirlenmesi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2): 87-98.
- Balcikanli, M., Ozbay, E. 2016. Optimum design of alkali activated slag concretes for the low oxygen/chloride ion permeability and thermal conductivity. *Compos. B Eng.*, 91: 243-256.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S. 2012. Beton. *Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. Yayınları*, İzmir, 978-975-441-361-8.
- Barbosa, V.F.F., Mackenzie, K.J.D., Thaumaturga, C. 2000. Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *Int. J. Inorg. Mater.*, 2: 309-317.
- Barnes, D.L., Sear, L.K.A. 2004. *Ash Utilisation from Coal-Based Power Plants*. DTI.
- Basu, M., Pande, M., Bhadoria, P.B.S., Mahapatra, S.C. 2009. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Progr. Nat. Sci.*, 19: 1173-1186.
- Bernal, S.A. 2015. Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials. *Construct. Build. Mater.*, 98: 217-226.
- Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 5: Yayılma Tablasi Deneyi, TS EN 12350-5, Nisan 2001.
- Bigozzi, M.C., Manzi, S., Natali, M.E., Rickard, W.D.A., Riessen, A. 2014. Room temperature alkali activation of fly ash: The effect of Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> ratio. *Const. Build. Mater.*, 69: 262-270.
- Bilim, C., Atiş, C.D. 2012. Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. *Construct. Build. Mater.*, 28: 708-712.
- Bilim, C., Karahan, O., Atiş, C.D., Ilkentapar, S. 2013. Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions. *Mater. Des.*, 44: 540-547.
- Blaszczynski, T., Krol, M. 2015. Usage of green concrete technology in civil engineering. *Procedia Eng.*, 122: 296-301.
- Bui, P.T., Ogawa, Y., Nakarai, K., Kawai, K. 2015. A study on pozzolanic reaction of fly ash cement paste activated by an injection of alkali solution. *Construct. Build. Mater.*, 94: 28-34.



- Chang, J. J. 2003. A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 33 (7), 1005–1011.
- Chang, J.J., Yeih, W., Chung, T.J., Huang, R. 2016. Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. *Construct. Build. Mater.*, 109: 34-40.
- Changming, L., Tingting, Z., Lijiu, W. 2014. Mechanical properties and microstructure of alkali activated Pisha sandstone geopolymer composites. *Const. Build. Mater.*, 68: 233-239.
- Chi, M., Huang, R. 2013. Binding mechanism and properties of alkali-activated fly ash/slag mortars. *Construct. Build. Mater.*, 40: 291-298.
- Chi, M., 2015. Effects of modulus ratio and dosage of alkali-activated solution on the properties and micro-structural characteristics of alkali-activated fly ash mortars. *Construct. Build. Mater.*, 99: 128-136.
- Colangelo, F., Roviello, G., Ricciotti, L., Ferone, C., Cioffi, R. 2013. Preparation and characterization of new geopolymer-epoxy resin hybrid mortars. *Materials*, 6: 2989-3006.
- Criado, M., Jimenez, F., Palomo, A. 2010. Effect of sodium sulfate on the alkali activation of fly ash. *Cement Concr. Compos.*, 32: 589-594.
- Cristelo, N., Soares, E., Rosa, I., Miranda, T., Oliveria, D.V., Silva, R.A., Chaves, A. 2013. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Const. Build. Mater.*, 48: 925-933.
- Davidovits, J. 1994. Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World Resource Rev.*, 6(2): 263-278.
- Davidovits, J. 2015. *Geopolymer Chemistry and Applications*. Institut Geopolymere, France.
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., Luo, W., Shen, C. 2015. An investigation of the microstructure and durability of a fluidized bed fly ash–metakaolin geopolymer after heat and acid exposure. *Mater. Des.*, 74: 125-137.
- Duan, P., Yan, C., Zhou, W., 2016. Influence of partial replacement of fly ash by metakaolin on mechanical properties and micro structure of fly ash geopolymer paste exposed to sulfate attack. *Ceram. Int.*, 42: 3504-3517.
- Ducman, V., Korat, L. 2016. Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as foaming agents. *Mater. Char.*, 113: 207-213.
- Elektrik Üretim A.Ş. 2014 Yıllık Rapor. Electricity Generation Co.

- Elektrik Üretim Anonim Şirketi, 2014 Elektrik Üretim Sektör Raporu. Araştırma Planlama ve Koordinasyon Dairesi Başkanlığı, 2015.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J. G ve Puertas, F. 1999. Alkali-activated slag mortars-Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1313–1321.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Puertas, F. 2002. The alkali–silica reaction in alkaliactivated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1019–1024.
- Fernandes-Jimenes, A., Palomo, A., 2004. Alkaline Activation of Fly Ashes, Manufacture of Concrete Not Containing Portland Cement. Proceedings of International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona-Spain, 1-8.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. 2005. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: effect of the activator. *Cement Concr. Compos.*, 35: 1984-1992.
- Fly Ash in Concrete. 2011. Perkins.
- Gamage, N., Liyanage, K., Setunge, S. Fragomeni, S. 2011. Overview of different types of fly ash and their use as a building and Construction material, Proceedings of the International Conference of Structural Engineering, Construction and Management Kandy, Sri Lanka.
- Gao, X., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. 2015a. Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag–fly ash blends. *Construct. Build. Mater.*, 80: 105-115.
- Gao, X., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. 2015b. Properties of alkali activated slag–fly ash blends with limestone addition. *Cement Concr. Compos.*, 59: 119-128.
- Gencil, C.D. 2011. Çimento Sektöründe Tehlikeli Atıkların Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması ve AB Uygulamaları. TÇMB 2011 Atık Yönetim Sempozyumu, Antalya.
- Girawale, M.S. 2015. Effect's of alkaline solution on geopolymer concrete. *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.*, 3(4): 848-853.
- Glukhovsky, V.D., Rostovskaja, G.S., Rumyna, G.V. 1980. High Strength Slag-Alkaline Cements. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 164-168.
- Gökhan, G., Kürklü, G. 2014. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Compos. B Eng.*, 58: 371-377.

- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S., Demir, İ. 2008. Uçucu kül bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. *Electron. J. Construct. Tech.*, 2008(2): 85-94.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M.S., Demir, İ. 2009. Uçucu kül bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler. *Electron. J. Construct. Tech.*, 5(2): 33-42.
- Görür, E.B. 2015. Alkali ile Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H. 2005. Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, 419-423.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkisi Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Heidrich, C., Feuerborn, H.J., Weir, A. 2013. Coal Combustion Products: a Global Perspective. *World of Coal Ash Conference*, Lexington, 1-17.
- Helmy, A.I.I. 2016. Intermittent curing of fly ash geopolymer mortar. *Construct. Build. Mater.*, 110: 54-64.
- Hlavacek, P., Smilauer, V., Skvara, F., Kopecky, L., Sluc, R. 2014. Inorganic foams made from alkali-activated fly ash: Mechanical, chemical and physical properties. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 35(2): 703-709.
- <http://www.betonvecimento.com>. Erişim Tarihi: 10.03.2016.
- <https://en.wikipedia.org>. Erişim Tarihi: 12.02.2016.
- <http://spssanalizi.com/uygulama/f-testi-varyans-analizi-anova>. Erişim Tarihi: 02.04.2016.
- <http://stats.oecd.org>. Erişim Tarihi: 03.03.2016.
- <https://tr.wikipedia.org>. Erişim Tarihi: 15.03.2016.
- Hung, T.D., Louda, P., Kroisova, D., Bortnovsky, O., Xiem, N.T. 2011. New Generation of Geopolymer Composite for Fire-Resistance. In: *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*, 73-92.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., Nicolas, R.S., Hamdan, S., Deventer, J.S.J. 2014. Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement Concr. Compos.*, 45: 125-135.

- Jang, G.J., Lee, N.K., Lee, H.K. 2014. Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers. *Const. Build. Mater.*, 50: 169-176.
- Jang, J.G., Lee, H.K. 2016. Effect of fly ash characteristics on delayed high-strength development of geopolymers. *Construct. Build. Mater.*, 102: 260-269.
- Jun, Y., Oh, J.E. 2014. Mechanical and microstructural dissimilarities in alkali-activation for six Class F Korean fly ashes. *Const. Build. Mater.*, 52: 396-403.
- Junaid, M.T., Kayali, O., Khennane, A., Black, J. 2015. A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes. *Construct. Build. Mater.*, 79: 301-310.
- Kantarıcı, F. 2013. Elazığ Ferrokrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Kathirvel, P., Kaliyaperumal, S.R.M. 2016. Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete. 102: 51-58.
- Komljenovic, M., Bascarić, Z., Bradic, V. 2010. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *J. Hazard. Mater.*, 181: 35-42.
- Kosmatka, S.H., Panarese, W.C. 2002. Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Natural Pozzolans. In: *Design and Control of Concrete Mixtures*, 57-72.
- Kumar, S., Kristaly, F., Mucsi, G., 2014. Geopolymerisation behaviour of size fractionated fly ash. *Adv. Powder Tech.*, 26(1): 24-30.
- 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 Concr. Compos.*, 53: 239-248.
- Lee, N.K., Lee, H.K. 2015. Reactivity and reaction products of alkali-activated, fly ash/slag paste. *Construct. Build. Mater.*, 81: 303-312.
- Lee, H., Vimonsatit, V., Chindaprasirt, P. 2016a. Mechanical and micromechanical properties of alkali activated fly-ash cement based on nano-indentation. *Construct. Build. Mater.*, 107: 95-102.
- Lee, S., Riessen, A., Chon, C.M., Kang, N.H., Jou, H.T., Kim, Y.J. 2016b. Impact of activator type on the immobilisation of lead in fly ash-based geopolymer. *J. Hazard. Mater.*, 305: 59-66.
- Leong, H.Y., Ong, D.E.L., Sanjayan, J.G., Nazari, A. 2016. The effect of different Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer. *Construct. Build. Mater.*, 106: 500-511.

- Li, Z., Pan, Z., Liu, Y., He, L., Duan, W., Collins, F., Sanjayan, J. 2014. Effects of mineral admixtures and lime on disintegration of alkali-activated slag exposed to 50 °C. *Construct. Build. Mater.*, 70: 254-261.
- Ma, Y., Ye, G. 2015. The shrinkage of alkali activated fly ash. *Cement Concr. Res.*, 68: 75-82.
- Ma, X., Zhang, Z., Wang, A. 2016. The transition of fly ash-based geopolymer gels into ordered structures and the effect on the compressive strength. *Construct. Build. Mater.*, 104: 25-33.
- Mahboob, S. 2014. Development of Low Carbon and Low Energy Geopolymer-based Cement free Construction Materials. Department of Civil engineering, Brunel University, Thesis.
- Maraş, M.M. 2013. Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Marjanovic, N., Komljenovic, M., Bascarevic, Z., Nolic, V. 2014. Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers through mechanical activation. *Const. Build. Mater.*, 57: 151-162.
- Mathur, A.K. 2007. Fly Ash for Cement Concrete Resource For High Strength and Durability of Structures at Lower Cost. NTPC Limited.
- Mineral Katkılar - Uçucu Kül, Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi, 1-21.
- Mithun, B.M., Narasimhan, M.C. 2016. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 112: 837-844.
- Monticelli, C., Criado, M., Fajardo, S., Bastidas, J.M., Abotoni, M., Balbo, A. 2014. Corrosion behaviour of a Low Ni austenitic stainless steel in carbonated chloride-polluted alkali-activated fly ash mortar. *Cement Concr. Compos.*, 55: 49-58.
- Monticelli, C., Natali, M.E., Balbo, A., Chiavari, C., Zanotto, F., Manzi, S., Bignozzi, M.C. 2016. Corrosion behavior of steel in alkali-activated fly ash mortars in the light of their microstructural, mechanical and chemical characterization. *Cement Concr. Res.*, 80: 60-68.
- Motorwala, A., Shah, V., Kammula, R., Nannapaneni, P., Raijiwala, D.B. 2013. Alkali activated fly-ash based geopolymer concrete. *Int. J. Emerg. Tech. Adv. Eng.*, 3(1): 159-166.
- Nagral, M.R., Ostwal, T., Chitawadagi, M.V. 2014. Effect of curing temperature and curing hours on the properties of geo-polymer concrete. *Int. J. Comput. Eng. Res.*, 4(9): 1-11.

- Naik, T.R., Singh, S.S. 1993. Fly Ash Generation and Utilization. In: Recent Trend in Fly Ash Utilization, 1-31.
- NaOH Sodium Hydroxide, Product File. 2011. Toxicology Laboratory & Chemical Risk Management.
- Nikolic, I., Karanovic, L., Castvan, I.J., Radmilovic, V., Mentus, S., Radmilovic, V. 2014. Improved compressive strength of alkali activated slag upon heating. *Mater. Lett.*, 133: 251-254.
- Nuaklong, P., Sata, V., Chindaprasirt, P. 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, 112: 2300-2307.
- Oh, J., Jun, Y., Jeong, Y. 2014. Mechanical and microstructural dissimilarities in alkali-activation for six Class F Korean fly ashes. *Const. Build. Mater.*, 52: 396-403.
- Onutai, S., Jiemsirilers, S., Thavorniti, P., Kobayashi, T. 2015. Aluminium hydroxide waste based geopolymer composed of fly ash for sustainable cement materials. *Construct. Build. Mater.*, 101: 298-308.
- Özodabaş, A., Yılmaz, K. 2013. Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice. *Construct. Build. Mater.*, 48: 26-34.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S., 2008. Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Const. Build. Mater.*, 22: 1315-1322.
- Palomo, A., Fernandes-Jimenes, A. 2011. Alkaline Activation, Procedure for Transforming Fly Ash Into New Materials. Part I: Applications. World of Coal Ash Conference, Denver, USA, 1-14.
- Petermann, J.C., Saeed, A., Hammons, M.I. 2010. Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review. Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division.
- Provis, J.L., Deventer, J.S.J. 2014. *Alkali Activated Materials*. Springer.
- Ramezaniapour, A.A. 2013. Fly Ash. In: *Cement Replacement Materials*. Springer, 47-156.
- Rangan, B.V. 2008. Fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC 4, Engineering Faculty, Curtin University of Technology SF:44, Perth, Australia,
- Rashad, M., Zeedan, R. 2011. The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Const. Build. Mater.*, 25: 3098-3107.

- Rashad, A.M., Sadek, D.M., Hassan, H.A. 2016. An investigation on blast-furnace slag as fine aggregate in alkaliactivated slag mortars subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 112: 1086-1096.
- 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. *Const. Build. Mater.*, 47: 409-418.
- Sarker, P.K., Kelly, S., Yao, Z. 2014. Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Mater. Des.* 63: 584-592.
- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D. 2006. *Alkali-Activated Cements and Concretes. USA and Canada: Taylor and Francis.*
- Shi, X.S., Collins, F.G., Zhao, X.L., Wang, Q.Y. 2012. Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. *J. Hazard. Mater.* 30: 237-238.
- Silva, S.V.A., Arachchi, J.N.J.K., Wijewardena, C.L., Nanayakkara, S.M.A. 2013. *Development of Fly Ash Based Geopolymer Concrete.*
- Skvara, F. 2007. Alkali Activated Material. In: *Geopolymer. International Conference Alkali Activated Materials–Research, Production and Utilization, Praha.* 661-676.
- Somna, K., Jaturapitakkula, C., Kajitvichyanukul, P., Chindaprasirt, P. 2011. NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90: 2118-2124.
- Soutsos, M., Boyle, A.P., Vinai, R., Hadjierakleous, A., Barnett, S.J. 2016. Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. *Construct. Build. Mater.*, 110: 355-368.
- Timakul, P., Rattanaprasit, W., Aungkavattana, P. 2016. Improving compressive strength of fly ash-based geopolymer composites by basalt fibers addition. *Ceram. Int.*, 42: 6288-6295.
- Tippayasam, C., Balyore, P., Thavorniti, P., Kamseu, E., Leonelli, C., Chindaprasirt, P., Chaysuwan, D. 2016. Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer. *Construct. Build. Mater.*, 104: 293-297.
- Tokyay, M., Ayturan, P. 2010. Mineral katkıların alkali ile aktive edilmesi: Bölüm 2, *Çimento ve Beton Dünyası*, 15-89, 77-91.
- Topçu, İ.B., Canbaz, M. 2001. Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 2: 11-23.
- Toprak, M.,U. 2011. Termal santral taban küllerinden alkali aktivasyon ile geopolimer üretilmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi.*

- TSE CEN/TR 15177, Betonun donma-Çözülme direncinin tayini - Yapısal iç hasar.
- TS EN 196-1:2005, Çimento deney metodları.
- TS EN 1015-11, kagir harcı - Deney metodları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini.
- TS EN 1250-4, Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini.
- TS EN 1363-2, Yangına dayanıklılık deneyleri-Bölüm 2: Alternatif ve ilave işlemler.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A. 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara.
- Türker, H.T., Balçıkanlı, M., Durmus, I.H., Ozbay, E., Erdemir, M. 2016. Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. Construct. Build. Mater., 104: 169-180.
- Uyanık, S., Topeli, M., 2012. Development Fly Ash Utilization in Turkey and Contribution of ISKEN to the Market. Eurocoalash, 1-17.
- Vargas, A.S., Molin, D.C.C.D. Masuero, A.B., Vilela, A.C.F., Castro-Gomes, J., Gutierrez, R.M. 2014. Strength development of alkali-activated fly ash produced with combined NaOH and Ca(OH)<sub>2</sub> activators. Cement Conc. Compos. 53: 341-349.
- Yakupoğlu, A. 2010. Alkalilerle aktive edilmiş cürufllu harçların özellikleri, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- Yang, L.Y., Jia, Z.J., Zhang, Y.M., Dai, J.G. 2015. Effects of nano-TiO<sub>2</sub> on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes. Cement Concr. Compos., 57: 1-7.
- Yeğınobalı, A., Ertün, T. 2009. Çimentoda Standartlar ve Mineral Katkılar, TÇMB, Ankara.
- Yiğiter, H..2008. Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı, DoktoraTezi.
- Yliniemi, J., Nugteren, H., Illikainen, M, Tiainen, M., Weststrate, R., Niinimaki, J. 2016. Lightweight aggregates produced by granulation of peat-wood fly ash with alkali activator. Int. J. Miner. Process., 149: 42-49.
- Zeybek, O., 2009. Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.



Zhang, Z.H., Zhu, H.J., Zhou C.H., Wang, H. 2016. Geopolymer from kaolin in China: An overview. *Appl. Clay. Sci.*, 119: 31-41.

Zivica, V. 2006. Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 21-25.

Zhu, H., Zuhang, Z, Zhu, Y., Tian, L. 2014. Durability of alkali-activated fly ash concrete: Chloride penetration in pastes and mortars, *Const. Build. Mater.*, 65: 51-59.

2014 Coal Combustion Product (CCP) Production and Use Survey Report. 2015. American Coal Ash Association.

2015/1 Çimento Sektör Raporu. 2015. T.C. Bilim, Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı.



## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet KAYA, 10.09.1972 yılında Yozgat'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Yozgat'ta tamamladı. 1989 yılında Yozgat Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 1993 yılında lisans eğitimini tamamlayarak mezun oldu. 1994-1996 yılları arasında yedeksubay olarak Cizre'de askerlik görevini yaptı. 1996 yılında Yozgat Belediyesi ve Yozgat İl Özel idaresine ait YBK İnşaat Temizlik ve Ticaret Ltd. Şti'nde çalışmaya başladı. 2007-2009 yılları arasında Maltepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme bölümünde ( tezsiz) yüksek lisans yaptı. 2009-2011 yılları arasında Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği bölümünde Yüksek lisansını tamamladı. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği bölümünde doktora eğitimine başladı. 2005-2016 yılları arasında Bozok Üniversitesi Mimarlık Fakültesi ve Meslek Yüksek Okulu'nda yapı malzemesi, betonarme, yapı bilgisi, şantiye tekniği, planlama ekonomisi derslerinde yarı zamanlı öğretim elemanı olarak görev aldı. Halen Yozgat Belediyesi'nde çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.