

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YAPI BİLİM DALI**

**ÇİMENTO TEKNOLOJİSİNDE SÜRFİKTANLARIN KULLANIMI  
İLE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO ÜRETİMİ**

**Gökhan KAPLAN**

**Doç. Dr. A. Uğur ÖZTÜRK**



**MANİSA-2018**

## TEZ ONAYI

**Gökhan KAPLAN** tarafından hazırlanan "**Çimento Teknolojisinde Sürfaktanların Kullanımı İle Sürdürülebilir Çimento Üretimi**" adlı tez çalışması 23/03/2018 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Doç. Dr. A.Uğur ÖZTÜRK**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Celal KOZANOĞLU**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Kambiz RAMYAR**  
Ege Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Halit YAZICI**  
Dokuz Eylül Üniversitesi

**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Erkan DOĞAN**  
Manisa Celal Bayar Üniversitesi

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Gökhan KAPLAN**



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ .....	xiii
TEŞEKKÜR.....	xvi
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Klinker ve Özellikleri.....	3
2.2. Uçucu Kül ve Özellikleri.....	6
2.2.1. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri .....	7
2.2.2. Uçucu Külün Puzolanik Özellikleri .....	9
2.2.3. Çimento Hidratasyonunda Uçucu Külün Etkisi.....	10
2.2.4. Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi .....	13
2.2.5. Uçucu Külün Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi .....	14
2.2.6. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Beton Özelliklerine Etkisi .....	15
2.3. Öğütme Kolaylaştırıcılar .....	16
2.4. Sülfat Etkisi .....	31
2.4.1. Sülfat Tipleri .....	32
2.4.2. Fiziksel Sülfat Etkisi .....	34
2.4.3. Geleneksel Sülfat Saldırısı .....	38
2.4.4. Sülfat Etkisinin Önlenmesi .....	42
2.5. Asit Etkisi .....	45
2.5.1. Asit Etkisinden Korunma.....	50
2.6. Deniz Suyu Etkisi .....	54
2.7. Alkali Agrega Reaksiyonu .....	59
2.7.1. Alkali Silis Reaksiyonu.....	59
2.7.2. Alkali Karbonat Reaksiyonu .....	61
2.7.3. Alkali Agrega Reaksiyonunda Etkili Özellikler .....	62

2.7.4. Alkali Agrega Reaksiyonunun Mekanik Özelliklere Etkisi.....	67
2.8. Karbonatlaşma .....	69
2.8.1. Karbonatlaşmanın Hidratasyon Ürünlerine Etkisi .....	71
2.8.2. Beton Mikroyapısı ve Taşınım Özelliklerinin Karbonatlaşmaya Etkisi ...	72
2.8.3. Puzolanların Karbonatlaşma Üzerindeki Etkisi .....	73
2.8.4. Karbonatlaşmanın Ölçülmesi.....	75
2.8.5. Karbonatlaşma Derinliğinin Hesaplanması .....	77
2.9. Yüksek Sıcaklık Etkisi .....	78
2.9.1. Mekanik Özellikler .....	80
2.9.2. Diğer Özellikler.....	84
2.10. Taguchi Metodu.....	86
3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	89
3.1. Malzemeler .....	89
3.1.1. Klinker .....	89
3.1.2. Uçucu Kül .....	95
3.1.3. Alçıtaşı .....	95
3.1.4. Çimento Öğütme Katkıları.....	96
3.1.5. Agrega .....	97
3.2. YÖNTEM .....	97
3.2.1. Çimentoların Hazırlanması .....	97
3.2.2. Çimentoların Özelliklerinin Belirlenmesi.....	99
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE OPTİMİASYON .....	105
4.1. Çimentoların Tane Boyutu ve İnceliklerinin Belirlenmesi .....	105
4.2. Çimento Sıcaklıklarının Belirlenmesi .....	114
4.3. Çimentoların Özgül Ağırlıklarının Belirlenmesi.....	116
4.4. Çimentoların Priz Sürelerinin ve Kıvam Suyunun Değerlendirilmesi .....	118
4.5. Taze Harç Özelliklerinin Değerlendirilmesi .....	122
4.6. Uçucu Külün Puzolanik Özellikleri.....	127
4.7. Harçların Mekanik Özellikleri.....	128
4.7.1. Harçların Basınç Dayanımları.....	128
4.7.2. Harçların Eğilme Dayanımları .....	139
4.8. Çimento Harçlarının Kuruma Büzülmesi Özellikleri.....	143
4.9. Havada Bekletilen Harçların Ağırlık Kaybı Özellikleri .....	151
4.10. Harçların Sülfat Etkisi Altında Boyutsal Kararlılığı .....	160

4.10.1. Sodyum Sülfatın Boyutsal Kararlılığa Etkisi.....	160
4.10.2. Magnezyum Sülfatın Boyutsal Kararlılığa Etkisi.....	169
4.11. Harçların Birim Hacim Ağırlıkları ve Su Emme Değerleri.....	177
4.12. Çimento Maliyetleri.....	184
4.13. Optimizasyon.....	188
5. DURABİLİTE DENEYLERİ .....	193
5.1. Kompoze Çimentoların incelikleri .....	194
5.2. Kompoze Çimentoların Özgül Ağırlıkları.....	195
5.3. Kompoze Çimentoların Kıvam Suyu ve Priz Süreleri .....	196
5.4. Kompoze Çimento Harçlarının Kıvam (Taze Harç) Özellikleri .....	197
5.5. Kompoze Çimentoların Mekanik Özellikleri .....	197
5.6. Kompoze Çimento Harçlarının Kuruma Büzülmesi Özellikleri .....	201
5.7. Kompoze Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığı .....	204
5.8. Kompoze Çimento Harçlarının Asit Dayanıklılığı .....	211
5.9. Kompoze Çimento Harçlarının Deniz Suyu Dayanıklılığı.....	215
5.10. Kompoze Çimento Harçlarının Yüksek Sıcaklık Özellikleri .....	218
5.11. Kompoze Çimento Harçlarının Karbonatlaşma Özellikleri .....	224
5.12. Kompoze Çimento Harçlarının Alkali Silis Reaksiyonu Özellikleri .....	229
6. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI .....	233
6.1. Sodyum Sülfat Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri.....	234
6.2. Magnezyum Sülfat Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri .....	239
6.3. Sülfürik Asit Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri .....	244
6.4. Deniz Suyu Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri .....	249
7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	254
KAYNAKLAR.....	258
EKLER.....	283
EK-1 Sodyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarının mikroyapı özellikleri.....	284
EK-2 Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri .....	287
EK-3 Magnezyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarının mikroyapı özellikleri.....	291
EK-5 Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri.....	298

EK-6 Sülfirik asit etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarının mikroyapı özellikleri.....	301
EK-7 Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarının mikroyapı özellikleri.....	305
EK-8 Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarının mikroyapı özellikleri.....	308
ÖZGEÇMİŞ .....	312



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AAR</b>	Alkali Agrega Reaksiyonu
<b>ABD</b>	Amerika Birleşik Devletleri
<b>ACI</b>	American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
<b>ACR</b>	Alkali Karbonat Reaksiyonu
<b>AM</b>	Alümina Modülü
<b>AEEA</b>	Aminoetiletanolamin
<b>ASO</b>	Alkali Sülfat Oranı
<b>ASR</b>	Alkali Silis Reaksiyonu
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BET</b>	Brunauer-Emmett-Teller
<b>C</b>	Portland Çimentosu Klinkerinden (PÇ-2) Üretilen Optimizasyon Çimentosu
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Kalsiyum Karbonat (Kalker)
<b>CEN</b>	European Committee for Standardization (Avrupa Standartlar Komitesi)
<b>CH</b>	Kalsiyum Hidroksit (Portlandite)
<b>CM</b>	Şeker Kamışı
<b>CSA</b>	Kanada Standardı
<b>C-S-H</b>	Kalsiyum Silikat Hidrate (Tobermorite)
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Di Kalsiyum Silikat (Belit)
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Tri Kalsiyum Silikat (Alit)
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Tri Kalsiyum Alüminat (Celit)
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Tetra Kalsiyum Alüminaferrit (Ferrit)
<b>D<sub>50</sub></b>	Ortalama Tane Boyutu (PSD analizi için)
<b>DEA</b>	Dietanolamin
<b>DEF</b>	Delayed Ettringite Formation (Gecikmiş Etrenjit Oluşumu)
<b>DEG</b>	Dietilen Glikol
<b>DEIPA</b>	Dietanol İzopropanol Amin
<b>E</b>	Erken Yaş Mukavemet Arttırıcı Katkı
<b>EC</b>	EuroCode
<b>EDS</b>	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
<b>EG</b>	Etilen Glikol



<b>EN</b>	European Norm (Avrupa Standardı)
<b>FT-IR</b>	Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre
<b>GEO</b>	Gecikmiş Etrenjit Oluşumu
<b>HEDETA</b>	Hidroksietil Dietilentriamin
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Hidrojen Sülfür
<b>MgCO<sub>3</sub></b>	Magnezyum Karbonat (Dolomit)
<b>IL</b>	Endüstriyel Lignin
<b>KDF</b>	Kireç Doygunluk Faktörü
<b>K.N.</b>	Kaynama Noktası
<b>kWh/t</b>	Kilowattsaat/ton
<b>KYB</b>	Kendiliğinden Yerleşen Beton
<b>MDIPA</b>	Metil Diizopropanolamin
<b>MPa</b>	Megapaskal
<b>MS</b>	Sülfat Modülü
<b>M-S-H</b>	Magnezyum Silikat Hidrate
<b>MYBS</b>	Minimum Yanma Bölgesi Sıcaklığı
<b>N</b>	Nihai Yaş Mukavemet Arttırıcı Katkı
<b>O</b>	Petrol Kuyusu Çimentosu Klinkerinden (PK) Üretilen Optimizasyon Çimentosu
<b>Ö-1</b>	1 Numaralı Öğütme Kolaylaştırıcı Katkı
<b>Ö-2</b>	2 Numaralı Öğütme Kolaylaştırıcı Katkı
<b>P</b>	Portland Çimentosu Klinkerinden (PÇ-1) Üretilen Optimizasyon Çimentosu
<b>PCA</b>	Portland Çimentosu Birliği
<b>PCE</b>	Polikarboksilat Eter
<b>PÇ-1</b>	1 Numaralı Portland Çimentosu Klinkeri
<b>PÇ-2</b>	2 Numaralı Portland Çimentosu Klinkeri
<b>PG</b>	Poliglikol
<b>PGA</b>	Propilen Glikol Aljinat
<b>PK</b>	Petrol Kuyusu Çimentosu Klinkeri
<b>PSD</b>	Particle Size Diameter (Tane Boyutu Dağılımı)
<b>RILEM</b>	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts
<b>SA</b>	Stiren Akriik Ester
<b>s/ç</b>	Su/Çimento Oranı

<b>s/b</b>	Su/Bağlayıcı Oranı	
<b>SDÇ</b>	Sülfata Dayanıklı Çimento Klinkeri	
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscopy	
<b>SF</b>	Sıvı Faz Oranı	
<b>SİB</b>	Sülfat İndirgeyen Bakteriler	
<b>SM</b>	Silika Modülü	
<b>S/N</b>	Signal/Noise Ratio (Taguchi için Sinyal/Gürültü Oranı)	
<b>SSB</b>	Silindirle Sıkıştırılmış Beton	
<b>TEA</b>	Trietanolamin	
<b>TEP</b>	Ton Eşdeğer Petrol	
<b>TEPA</b>	Tetraetilenpentamin	
<b>TETA</b>	Trietilentetramin	
<b>TGA</b>	Termogravimetrik Analizi	
<b>TIPA</b>	Triizopropanolamin	
<b>TK</b>	Toplam Karbon Oranı	
<b>TS</b>	Türk Standardı	
<b>U.K.</b>	Birleşik Krallık	
<b>UK</b>	Uçucu Kül	
<b>WG</b>	Atık Gliserin	
<b>YBMD</b>	Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen	
<b>YF</b>	Yakılabilirlik Faktörü	
<b>YI</b>	Yakılabilirlik İndeksi	
<b>XRD</b>	X-ray Diffraction (X Işını Kırınımı)	
<b>Å</b>	Angstrom	
<b>°C</b>	Santigrat	
<b>15P600Ö</b>	%15 Uçucu Kül ve 600g/t Ö-2 Katkısı Kullanılarak Klinkerinden Üretilen Çimento	PÇ-1
<b>25C600Ö</b>	%25 Uçucu Kül ve 600g/t Ö-2 Katkısı Kullanılarak Klinkerinden Üretilen Çimento	PÇ-2
<b>15O700N</b>	%15 Uçucu Kül ve 700g/t N Katkısı Kullanılarak Klinkerinden Üretilen Çimento	PK
<b>5C700N</b>	%5 Uçucu Kül ve 700g/t N Katkısı Kullanılarak Klinkerinden Üretilen Çimento	PÇ-2

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Uçucu küllerin SEM görüntüleri.....	8
Şekil 2.2. Çimento öğütme prosesindeki bilyalı değirmen kesiti.....	24
Şekil 2.3. Sodyum sülfatı içeren yeraltı suları ile temas halindeki bir temelin kapilerite ve betonun bozulması.....	35
Şekil 2.4. Tuz kristalizasyonuna maruz kaldığında betonarme hasar .....	36
Şekil 2.5. Sodyum Sülfat/Su Sistemi İçin Çözünürlük Eğrisi.....	37
Şekil 2.6. Portlanditin jips veya sygenit ile reaksiyonu için gerekli sülfat konsantrasyonu hesaplamaları.....	41
Şekil 2.7. Uçucu kül CaO içeriğinin ve sülfat etkisinde oluşan genişlemeye etkisi ...	44
Şekil 2.8. Silis dumanı ve C sınıfı uçucu külün sülfat direnci üzerindeki etkisi.....	45
Şekil 2.9. Kanalizasyon astarında oluşan hasar .....	49
Şekil 2.10. Farklı miktarlarda uçucu kül içeren ve suda kürlenmiş numunelerin mukavemet ve ağırlık kaybı yüzdeleri .....	52
Şekil 2.11. Deniz Ortamında Betonun Bozulması .....	56
Şekil 2.12. Hidroksil iyonlarının varlığında silis minerallerinin çözünme mekanizması .....	60
Şekil 2.13. ASR genişleme mekanizması.....	61
Şekil 2.14. Sisomphone ve Franks tarafından yapılan karbonatlaşma deneyi sonuçları .....	74
Şekil 2.15. Çeşitli uçucu kül içeriğinin KYB'lerde karbonatlaşma derinliği üzerine etkisi .....	75
Şekil 2.16. Karbonatlaşma etkisinin incelenmesi a)Fenolftalein çözeltisi b)Petrografik mikroskop .....	76
Şekil 2.17. Karbonatlaşma etkisinden elde edilen kırık numunelerinin karbonatlaşma sonrası morfoloji ve hidrasyon ürünleri .....	77
Şekil 2.18. Beton termometresi.....	80
Şekil 2.19. Silis agregalı betonun (a) sıcak ve (b) soğukta olduğu durumdaki basınç dayanımı.....	81
Şekil 2.20. Betonun çekme dayanımı.....	82
Şekil 2.21. Farklı türde agrega içeren benzer karışımların elastik modülü.....	83

Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küle ait SEM görüntüleri .....	96
Şekil 4.1. Blaine incelik değeri için S/N oranları.....	106
Şekil 4.2. Öğütme süresi ve klinker tipinin Blaine incelik değeri üzerindeki etkisi	108
Şekil 4.3. Taguchi serisinde yer alan çimentoların PSD analizlerinin ve Blaine yöntemleri ile arasındaki ilişki .....	110
Şekil 4.4. PSD analizi için S/N oranları .....	111
Şekil 4.5. Öğütme süresinin PSD analizi üzerindeki etkisi.....	112
Şekil 4.6. Öğütme süresinin sıcaklık üzerindeki etkisi .....	116
Şekil 4.7. Uçucu külün özgül ağırlık üzerindeki etkisi .....	118
Şekil 4.8. Uçucu kül oranının kıvam suyu üzerindeki etkisi.....	120
Şekil 4.9. Uçucu kül ve öğütme süresinin priz başlama süresi üzerindeki etkileri ..	121
Şekil 4.10. Referans karışımların taze harç özellikleri.....	123
Şekil 4.11. Taguchi serisindeki çimento harçları ile elde edilen taze harçlar .....	124
Şekil 4.12. Taze harç özellikleri için elde edilen S/N oranları.....	125
Şekil 4.13. Uçucu kül oranının yayılma çapı üzerindeki etkisi.....	126
Şekil 4.14. Dayanım aktivite deneyi için gerçekleştirilen yayılma tablası deneyi...	127
Şekil 4.15. Referans çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımları.....	129
Şekil 4.16. Taguchi serisinde yer alan çimentoların zamana bağlı basınç dayanımları .....	131
Şekil 4.17. Taguchi serisinde yer alan çimentoların basınç dayanımlarına ait S/N oranları .....	135
Şekil 4.18. Uçucu kül oranı ve öğütme süresinin basınç dayanımı üzerindeki etkileri .....	138
Şekil 4.19. Referans çimento harçlarının zamana bağlı eğilme dayanımları .....	139
Şekil 4.20. Taguchi serisinde yer alan çimentoların zamana bağlı eğilme dayanımları .....	140
Şekil 4.21. Taguchi serisinde yer alan çimentoların eğilme dayanımlarına ait S/N oranları .....	142
Şekil 4.22. Referans çimentoların zaman bağlı büzülme değerleri.....	144
Şekil 4.23. Taguchi serisinde yer alan çimento harçlarının zamana bağlı büzülme özellikleri.....	146
Şekil 4.24. Havada bekletilen harçlarda meydana gelen büzülme özellikleri için S/N oranları .....	148
Şekil 4.25. Uçucu kül oranının büzülme (havada) üzerindeki etkisi .....	150

Şekil 4.26. Öğütme kolaylaştırıcı katkı tipinin büzülme (havada) üzerindeki etkisi	150
Şekil 4.27. Klinker tipinin büzülme (havada) üzerindeki etkisi	151
Şekil 4.28. Havada bekletilen harçların (referans çimentolar) zamana bağlı ağırlık değişimleri	152
Şekil 4.29. Havada bekletilen uçucu kül katkılı harçların zamana bağlı ağırlık değişimleri	154
Şekil 4.30. Kuruma büzülmesi-ağırlık kaybı ilişkisi	156
Şekil 4.31. Havada bekletilen harçlarda meydana gelen ağırlık kayıpları için S/N oranları	157
Şekil 4.32. Uçucu kül oranının ağırlık kaybı (havada) üzerindeki etkisi	158
Şekil 4.33. Öğütme süresinin ağırlık kaybı (havada) üzerindeki etkisi	159
Şekil 4.34. Klinker tipinin ağırlık kaybı (havada) üzerindeki etkisi	160
Şekil 4.35. Referans çimento harçlarının zamana bağlı sodyum sülfat genleşmeleri	161
Şekil 4.36. Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimentoların zamana bağlı genleşmeleri	164
Şekil 4. 37. Sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen harçların genleşmelerine ait S/N oranları	166
Şekil 4.38. Sodyum sülfatın neden olduğu genleşmeler üzerinde etkili olan parametreler	168
Şekil 4.39. Referans çimento harçlarının magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde boy değişimleri	170
Şekil 4.40. Taguchi serisinde yer alan çimentoların magnezyum sülfat içerisinde boy değişimleri	172
Şekil 4.41. Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen harçların genleşmelere ait S/N oranları	175
Şekil 4.42. Magnezyum sülfat etkisindeki harçların boy değişimini etkileyen faktörler	177
Şekil 4.43. Referans çimento harçlarının birim ağırlıkları	178
Şekil 4.44. Referans çimento harçlarının su emme değerleri	178
Şekil 4.45. Taguchi serisinde yer alan çimento harçlarının birim ağırlıkları	180
Şekil 4.46. Birim ağırlık üzerinde etkili olan parametreler	180
Şekil 4.47. Taguchi serisinde yer alan harçların 28 ve 90. günlerdeki su emme değerleri	182

Şekil 4.48. Su emme üzerinde etkili olan parametreler .....	184
Şekil 4.49. Çimento maliyetleri için S/N oranları.....	187
Şekil 4.50. Çimentoların Maliyet/Dayanım oranları.....	188
Şekil 4.51. En küçük en iyi yöntemine göre belirlenen S/N oranları.....	189
Şekil 4.52. En büyük en iyi yöntemine göre çimentoların S/N oranları .....	190
Şekil 5.1. Çimento harçlarına ait basınç dayanımları.....	198
Şekil 5.2. Çimento harçlarına ait eğilme dayanımları.....	201
Şekil 5.3. 7 gün sonunda oda koşullarında bekletilen çimento harçlarının büzülme özellikleri.....	202
Şekil 5.4. Oda koşullarında bekletilen harçların ağırlık değişimleri.....	204
Şekil 5.5. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen harçların zamana bağlı boy değişimleri.	205
Şekil 5.6. Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisine maruz harçların basınç dayanımları .....	207
Şekil 5.7. MgSO <sub>4</sub> etkisine maruz harçların zamana bağlı boy değişimleri.....	208
Şekil 5.8. MgSO <sub>4</sub> etkisine maruz harçların basınç dayanımları.....	209
Şekil 5.9. Sülfat etkisine maruz referans harçların fiziksel görünüşleri .....	211
Şekil 5.10. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisine maruz harçların zamana bağlı boyutsal değişimi.....	212
Şekil 5.11. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> etkisine maruz harçların basınç dayanımları .....	213
Şekil 5.12. 180 gün H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen harç örnekleri.....	215
Şekil 5.13. Deniz suyunda bekletilen harçların zamana bağlı boyutsal değişimi ....	216
Şekil 5.14. Deniz suyuna maruz harçların zamana bağlı basınç dayanımları .....	217
Şekil 5.15. Yüksek sıcaklık fırınına harçların yerleştirme düzeni .....	218
Şekil 5.16. Yüksek sıcaklık etkisindeki harçların mekanik özellikleri .....	219
Şekil 5.17. Yüksek sıcaklık etkisindeki harçların dinamik elastisite modülleri.....	221
Şekil 5.18. Yüksek sıcaklık etkisine maruz harçların ağırlık kayıpları.....	223
Şekil 5.19. 600 ve 900 °C'ye maruz harçların yüzey özellikleri .....	223
Şekil 5.20. Harçların karbonatlaşma büzülmeleri .....	225
Şekil 5.21. Karbonatlaşma etkisindeki harçların basınç dayanımları .....	226
Şekil 5.22. %1 fenolftalein çözeltisi sıkılmış harç örneklerindeki renk değişimleri	228
Şekil 5.23. Harç çubuklarının zamana bağlı ASR genleşmeleri .....	229
Şekil 5.24. NaOH etkisindeki harçların basınç dayanımları .....	230
Şekil 6.1. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	233
Şekil 6.2. Sodyum sülfat etkisine maruz referans çimentoların SEM görüntüleri ...	235

Şekil 6.3. Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimentoların mikroyapı özellikleri.....	238
Şekil 6.4. Magnezyum sülfat etkisine maruz referans çimentoların SEM görüntüleri .....	240
Şekil 6.5. Magnezyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimentoların mikroyapı özellikleri.....	243
Şekil 6.6. Sülfürik asit çözeltisinde bekletilen referans çimento pastalarının SEM görüntüleri.....	245
Şekil 6.7. Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkılı çimentoların mikroyapı özellikleri.....	248
Şekil 6.8. Deniz suyunda bekletilen referans çimento pastalarının SEM görüntüleri .....	250
Şekil 6.9. Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkılı çimentoların mikroyapı özellikleri.....	253

## TABLolar DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 2.1. Klinker üretiminde gerçekleşen bazı reaksiyonlar .....	3
Tablo 2.2. Karmaoksitlerin görevleri .....	4
Tablo 2.3. Öğütme kolaylaştırıcılar .....	18
Tablo 2.4. Farklı Denizlerde Ortalama Tuz Konsantrasyonu .....	57
Tablo 2.5. ASR açısından zararlı Reaktif kayaçlar, mineraller ve sentetik maddeler .....	65
Tablo 2.6. Swamy ve Al-Asali tarafından yapılan ASR çalışması .....	68
Tablo 2.7. Swamy ve Al-Asali tarafından yapılan çekme dayanımı üzerine çalışmalar .....	68
Tablo 2.8. Hidratasyon ürünlerinin karbonatlaşma sonrasındaki değişimleri.....	72
Tablo 2.9. Çimento minerallerinin ayrışma sıcaklıkları.....	84
Tablo 3.1. Klinkerlerin kimyasal özellikleri .....	90
Tablo 3.2. Kompoze çimentolara ait değişkenler.....	90
Tablo 3.3. Çimentolara ait XRF analizi ile belirlenmiş kimyasal özellikler (Element Analizi).....	160
Tablo 3.4. Çimentolara ait XRF analizi ile belirlenmiş kimyasal özellikler (Oksit Analizi).....	160
Tablo 3.5. Uçucu kül ait kimyasal özellikler.....	95
Tablo 3.6. Çimentoların üretilmesinde kullanılan kimyasal katkıların özellikleri.....	97
Tablo 3.7. Taguchi L16 serisine göre hazırlanan çimentolar .....	99
Tablo 3.8. Puzolanik Aktivite İndeksinin Belirlenmesinde Kullanılan Malzeme Miktarları.....	100
Tablo 4.1. Uçucu kül ve çimentolara ait Blaine inceliği .....	105
Tablo 4.2. Taguchi serisinde yer alan çimentoların blaine inceliğini etkileyen parametreler.....	107
Tablo 4.3. Uçucu kül ve çimentolara ait PSD analizi değerleri .....	109
Tablo 4.4. PSD analizini etkileyen parametreler .....	111
Tablo 4.5. Tane boyutu ve inceliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması .....	113
Tablo 4.6. Çimentolara ait sıcaklık değerleri .....	115



Tablo 4.7. Çimentoların sıcaklığı üzerinde etkili olan parametreler .....	115
Tablo 4.8. Uçucu kül ve çimentoların özgül ağırlıkları .....	117
Tablo 4.9. Çimentoların normal kıvam içinsu gereksinimleri ve priz süreleri .....	119
Tablo 4.10. Çimentoların kıvam suyu üzerinde etkili olan parametreler .....	119
Tablo 4.11. Priz başlangıç süresine etki eden faktörler .....	120
Tablo 4.12. Taze harçlara ait yayılma çapları .....	123
Tablo 4.13. Taze harçların yayılma çaplarına etki eden parametreler .....	126
Tablo 4.14. ASTM C 618 standardına göre elde edilen dayanım aktivite indeksleri .....	128
Tablo 4.15. Basınç dayanımı üzerinde etkili olan parametreler .....	136
Tablo 4.16. En yüksek En iyi modeline göre tahmini basınç dayanımı değerleri....	138
Tablo 4.17. Eğilme dayanımı üzerinde etkili olan parametreler .....	142
Tablo 4.18. Havada bekletilen harçların büzülmesi üzerinde etkili olan parametreler .....	149
Tablo 4.19. Havada bekletilen harçların ağırlık kaybı üzerinde etkili olan parametreler .....	158
Tablo 4.20. Sodyum sülfat genişmeleri üzerinde etkili olan parametreler .....	167
Tablo 4.21. Magnezyum sülfat etkisine maruz harçların genişme özelliklerini etkileyen parametreler .....	176
Tablo 4.22. Çimento harçlarının birim ağırlıklarına etki eden faktörler .....	179
Tablo 4.23. Çimento harçlarının su emme özelliklerine etki eden faktörler .....	183
Tablo 4.24. Çimento üretiminde kullanılan malzemelerin birim fiyatları .....	185
Tablo 4.25. Çimentoların laboratuvar ortamındaki maliyetleri.....	186
Tablo 4.26. Optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonlar .....	189
Tablo 4.27. Amaç fonksiyonlara göre optimum malzeme özellikleri.....	191
Tablo 4.28. Durabilite deneylerinde kullanılacak çimentolar .....	191
Tablo 5.1. Durabilite deneylerinde kullanılacak çimentolar .....	193
Tablo 5.2. Çimentolar için kullanılacak simgesel gösterimler .....	194
Tablo 5.3. Çimentoların incelikleri .....	195
Tablo 5.4. Çimentoların özgül ağırlıkları.....	196
Tablo 5.5. Çimentoların kıvam suyu ve priz süreleri.....	196
Tablo 5.6. Çimento harçlarının taze hal özellikleri.....	197

Tablo 6.1. Sodyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları .....	236
Tablo 6.2. Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarına ait EDS sonuçları .....	239
Tablo 6.3. Magnezyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları .....	241
Tablo 6.4. Magnezyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarına ait EDS sonuçları.....	244
Tablo 6.5. Sülfirik asit etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları .....	246
Tablo 6.6. Sülfirik asit etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarına ait EDS sonuçları .....	248
Tablo 6.7. Deniz suyu etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları .....	251
Tablo 6.8. Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarına ait EDS sonuçları .....	253

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bana her konuda yardımcı olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK başta olmak üzere, tez izleme komitesinde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Kambiz RAMYAR ve Prof. Dr. Celal KOZANOĞLU'NA teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmalarımı tamamladığım ve 2012 yılından beri çalışmakta olduğum, bilimsel çalışmalara desteğini esirgemeyen kurumum Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu MYO ve Okul Müdürü Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'A, yine birlikte çalıştığım sürece çalışmalarımnda beni destekleyen İnşaat Mühendisliği öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ'E teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım boyunca verdikleri destek dolayısıyla ÇİMSA firmasından Sayın Mustafa ÖZTÜRK ve Faruk İKİZTURAÇ, BOLU ÇİMENTO firmasından Sayın Cem TÜRKYENER, FOSROC Yapı Kimyasalları firmasından Sayın Uğur Erşen ŞENBİL, CHRYSO Yapı Kimyasalları firmasından Sayın Vedat GÜR'E, ARES ÇİMENTO firmasından Sayın Fuat KARADENİZ'E teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım sırasında bana hep destek olan ve yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL'e ve Arş. Gör. Rüya KILIÇ DEMİRCAN'a teşekkür ederim.

Sevgili nişanlım Afife Büşra UĞUR'a tez çalışması boyunca yoğun manevi desteğini benden esirgemediği için teşekkür ederim.

Bugünlerimi borçlu olduğum manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyerek her zaman yanımda olan annem Zehra KAPLAN'a ve babam Ersan KAPLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**Gökhan KAPLAN**  
**Manisa, Mart 2018**

## ÖZET

### Doktora Tezi

## Çimento Teknolojisinde Sürfaktanların Kullanımı ile Sürdürülebilir Çimento Üretimi

Gökhan KAPLAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. A. Uğur ÖZTÜRK

Sürdürülebilirlik, yaşadığımız dünyanın refahı, sürekli büyüme ve insani gelişmeler açısından oldukça önemli bir kavramdır. Beton dünyada en çok kullanılan yapı malzemelerinden birisidir. Bununla birlikte, betonun vazgeçilmez bir unsuru olan Portland çimentosunun üretimi esnasında önemli miktarda CO<sub>2</sub> salınımı yapılarak sera etkisine neden olmaktadır. Bir ton Portland çimentosu üretimi sırasında atmosfere yaklaşık bir ton CO<sub>2</sub> salınımı yapılmaktadır. Doğal kaynakların korunmasına ek olarak sera gazlarına ilişkin çevre sorunları, çimento ve beton endüstrisinin sürdürülebilir gelişiminde öncü bir rol oynamaktadır. İlerleyen yıllarda, kireçtaşı rezervlerinin azalmasıyla inşaat sektörü için yeterli miktarda Portland çimentosu üretmek daha zor olacaktır. Kireçtaşı rezervleri tükendiğinde Portland çimentosu üretimi duracak ve yeni inşaat projelerinin yanı sıra beton endüstrisi ile ilgili tüm istihdam da sonlanacaktır. Bu yüzden gelecekteki beton ve betonarme yapılar için sürdürülebilir çözümler aramak gereklidir. Çimento sektörü, sürdürülebilir kalkınma için çeşitli tedbirler alarak bunları uygulamaya başlamıştır. Bu uygulamalar arasında; gelişmiş ön ısıtma teknolojileri (yeni süspansiyon ön ısıtma teknolojisi), atık ısı kazanımı (organik rankine çevrimi ve kaline çevrimi), alternatif yakıtların kullanımı (atık yağ ve lastiklerin kullanımı vb.), oksijen yakıtı ile yanma teknolojisi kullanımı, amin ve amonyak esaslı solventler ile CO<sub>2</sub> yakalanması, endüstriyel atıkların kullanımı (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) ve öğütme kolaylaştırıcı katkı kullanımı yer almaktadır.

Bu çalışmada; farklı karmaoksit içeriğine sahip dört klinker ile farklı oranlarda uçucu kül ve çimento öğütme kolaylaştırıcıları kullanılarak laboratuvar ortamında çimentolar üretilmiştir. 1. aşamada Taguchi L16 serisi kullanılarak 16 adet uçucu kül ve öğütme kolaylaştırıcı/mukavemet arttırıcı katkılı çimento ve 4 adet referans çimento olmak üzere 20 adet çimento üretilmiştir. Uçucu kül Seyitömer Termik Santrali'nden temin edilerek klinker yerine ağırlıkça %5, 15, 25 ve 35 oranlarında kullanılmıştır. Öğütme işlemi esnasında 2 adet öğütme kolaylaştırıcı ve 2 adet mukavemet arttırıcı kimyasal katkı 500, 600, 700, 800 g/t dozajında kullanılmıştır. Çimentolar klinker, alçıtaşı ve uçucu külün birlikte öğütülmesi ile elde edilmiştir. Bu aşamada üretilen çimentolar ile hazırlanan harçlar üzerinde; taze hal özellikleri, mekanik özellikleri, boyutsal kararlık, sülfat dayanıklılığı, su emme ve maliyet gibi parametreler dikkate alınarak optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda (2. aşama) özellikleri iyileştirilmiş 4 adet uçucu kül ve öğütme kolaylaştırıcı katkılı çimento, 3 adet referans çimento olmak üzere toplam 7 adet çimento üzerinde

durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. 2. aşamada üretilen çimentolardan elde edilen harçlar üzerinde; sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-MgSO}_4$ ) ve asit etkisi, karbonatlaşma, deniz suyu etkisi, yüksek sıcaklık etkisi, alkali silis reaksiyonu etkisi gibi durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. 3. aşamada sodyum sülfat, magnezyum sülfat, sülfürik asit ve deniz suyu etkisine maruz çimento pastaları üzerinde SEM/EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çimentolardaki  $\text{C}_3\text{A}$  içeriğinin azalması ve  $\text{C}_3\text{S}$  içeriğinin artması ile öğütülebilirliğin önemli ölçüde arttığı görülmüş ve öğütme performansı açısından  $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_3\text{A}$  oranının önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Öğütülebilirliği zor olan klinkerlerde uçucu kül kullanılması çimento özelliklerine katkı sağlamaktadır. Uçucu kül içeriği arttıkça çimentoların Blaine incelik değerleri artarken ortalama tane boyutları azalmıştır. Uçucu kül katkılı çimentolarda, hem öğütülebilirlik hem de dayanım açısından  $\text{C}_3\text{S}$  içeriği yüksek klinker kullanımı daha uygun olmuştur. Erken yaş dayanımı açısından en etkili parametre uçucu kül oranı olmuştur. Uçucu kül içeriğinin artması ile erken yaş dayanımları azalmıştır. İnceliği yüksek ya da tane boyutu küçük olan çimentoların daha fazla büzülme gösterdiği ancak bu etkinin uçucu kül kullanımı ile azaldığı tespit edilmiştir. Uçucu kül katkısı, çimentolarda asit ve sülfat etkisi ile oluşan genleşmeleri azaltmıştır.  $\text{MgSO}_4$  harçlarda genleşmeden çok fiziksel bozulmaya yol açarken  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  harçlarda daha çok genleşme hasarı meydana getirmiştir. SEM/EDS analizlerinde ise sülfat ve asit etkisinde çimento pastalarında etrenjit varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca uçucu küllü çimentolarda C-S-H yapısının Ca/Si oranı azalmıştır. Deniz suyu içerisinde bekletilen çimento pastası örneklerinde de etrenjit varlığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; kompoze çimento üretiminde uçucu kül kullanılması durumunda ikame oranının %15-25 olmasının en ideal çözüm olduğu yapılan testler sonucu kanıtlanmıştır. Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların korunması ve durabilite gibi özellikler için çimento üretiminde öğütme kolaylaştırıcıların ve uçucu küllün birlikte kullanılması büyük avantajlar sağladığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** (Sürdürülebilirlik, durabilite, çimento, öğütülebilirlik, sürfaktan)

**2018, 338 sayfa**

## **ABSTRACT**

### **PhD Thesis**

## **Sustainable Cement Production With The Use Of Surfactant In Cement Technology**

**Gökhan KAPLAN**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School Of Applied and Natural Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. A. Uğur ÖZTÜRK**

Sustainability is an important concept with respect to the welfare of the world, continuous growth and development. Concrete is one of the most commonly used structural materials in the world. Nevertheless, production of Portland cement, an essential ingredient of concrete, involves significant amounts of CO<sub>2</sub> emissions which plays a part in greenhouse effect. Production of a ton of Portland cement, leads to approximately one ton CO<sub>2</sub> emission. In addition to the principle of preservation of natural resources, environmental problems related to greenhouse gases play an important role in the sustainable development of cement and concrete industry. It is expected that in the near future it will be more difficult to produce sufficient amounts of Portland cement for the construction industry as the limestone reserves in the world diminish. Portland cement production will come to a halt when the limestone reserves are diminished and the employment in concrete industry will be no more as new construction projects will be impossible to pursue. Therefore, it is necessary to seek sustainable solutions for the cement industry. For this purpose, several measures in motion aimed at sustainable development. Such as advanced preheating technologies (new suspension preheating technology), waste heat recovery (organic rankine cycle and kalina cycle), use of alternative fuels (waste oil and rubber, etc.), use of oxy-fuel combustion, CO<sub>2</sub> capture with amine- and ammonia-based solvents, use of industrial waste (fly ash, blast-furnace slag, etc.), and use of grinding aids are taken into consideration.

In this study, cement samples were produced using varying ratios of fly ash and cement grinding aids and four clinkers with different compound compositions. First phase of the study involved production of a total number of 20 cement samples, 16 fly ash and grinding aid/strength enhancer added cement samples and 4 reference cement samples, using the Taguchi L16 array. Fly ash was obtained from Seyitömer Thermal Power Plant and used as a replacement for clinker at the ratios of 5%, 15%, 25%, and 35% by weight. During the grinding process, 2 grinding aids and 2 strength enhancer chemical additives were used at the dosages of 500, 600, 700, and 800 g/t. Cements were produced by intergrinding clinker, gypsum and fly ash. In this phase, optimization of the mortar samples was performed with respect to their fresh properties, mechanical properties, dimensional stability, sulfate resistance, water absorption and cost. As a result of the optimization (the 2<sup>nd</sup> phase), a total number of 7 cement samples, 4 fly ash and grinding aid added cement samples and 3 reference

cement samples, were subjected to durability experiments. In the 2<sup>nd</sup> phase, durability tests such as sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-MgSO}_4$ ) and acid effect, carbonation, seawater effect, high temperature effect, and alkali-silica reaction effect were performed on the mortar mixtures. The 3<sup>rd</sup> phase involved SEM/EDS analyses on the cement pastes subjected to sodium sulfate, magnesium sulfate, sulfuric acid, and seawater effects. It was found that decreasing  $\text{C}_3\text{A}$  content and increasing  $\text{C}_3\text{S}$  content significantly improved grindability. Therefore,  $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_3\text{A}$  ratio was observed take an important parameter in terms of grindability of clinker. The use of fly ash in hard-to-grind clinkers had a positive effect on the cement properties. Blaine fineness value of the cement increased while average particle size decreased as the fly ash content increased. It was concluded that substitution of high  $\text{C}_3\text{S}$  content clinker with fly ash provides better grindability and high strength. Fly ash ratio was found to be the most effective parameter in terms of early strength. Increasing the fly ash content decreased early age strength. Besides, the cements with higher fineness or smaller particle size expand more, however, the effect reduced with the use of fly ash. Fly ash addition reduced the expansion of the cement due to acid and sulfate effect.  $\text{MgSO}_4$  caused physical degradation by loss of mass and strength, whereas  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  resulted in expansion of the mortar mixtures in SEM/EDS analysis, ettringite was detected in cement pastes exposed to sulfate and acid effects. Moreover, Ca/Si ratio of the C-S-H reduced in fly ash added cements. Ettringite was also detected in cement paste samples stored in seawater.

For the materials used and tests applied, it was concluded that replacement of 15wt% to 25wt% of clinker with fly ash is the ideal solution. Moreover, the combined use of grinding aid admixtures and fly ash in cement production offers great advantages in terms of sustainability, preservation of natural resources and durability.

**Keywords: (Sustainability, durability, cement, grindability, surfactant)**

**2018, 338 pages**

## 1. GİRİŞ

Enerji üretimi ve tüketimi, ekonomik ve sosyal gelişmişliğin bir ölçüğü ve aynı zamanda en temel insani gereksinimdir. Gelişen teknoloji ve artan enerji açığı bütün ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ağırlık verilmesini, yeni enerji kaynakları üzerinde daha fazla düşünülmesini ve hızlı bir şekilde alternatiflerin üretilmesini gerekli hale getirmiştir. Türkiye'nin 2013 yılındaki toplam birincil enerji arzı 120.3 milyon TEP'dir (Ton Eşdeğer Petrol). Bu arzın kaynaklara dağılımında, kömürdeki ithalatın artmasıyla, 2013 yılında ilk sırayı 37.63 milyon TEP ve toplam arzın %31.2'si payla doğalgaz almıştır [1].

2009 yılında Dünya Elektrik Üretiminin %41'i kömür, %21'i doğal gaz, %16'sı hidrolik, %13'i nükleer, %5'i petrol ve %4'ü diğer kaynaklardan karşılanmıştır. Elektrik enerjisi üretiminde termik santrallerinin payı ülkelere bağlı olarak %50 ile %95 arasında değişmektedir. Elektrik santrallerinde atılan gaz halindeki yanma atıklarının dışında, baca gazlarıyla beraber yanmamış yakıt toz ve zerrelere, kül, ağır metaller v.b, gibi yabancı maddelerle atmosfere bırakılır. Yakıtta bulunan mineral yabancı maddeler yakma tesisine göre cüruf ve kül olarak veya baca gazlarıyla birlikte sürüklenerek ortamdan uzaklaşırlar [2].

Kömürle çalışan termik santrallerde bacadan uzaklaşan ve uçucu kül olarak tanımlanan en önemli atık malzeme, yanma nedeniyle baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen (uçan) çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları elektro filtrelerde yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir [3].

Ülkemizde ve dünyada termik santrallerin atığı olan uçucu kül, depolama sorunları nedeniyle, hava ve suları kirleterek çevreye büyük zararlar vermektedir. Türkiye'deki termik santraller yılda 15 milyon tonun üzerinde uçucu kül ortaya çıkarmaktadır. Dünya genelinde ise 1998 yılına kadar yaklaşık olarak 360 milyon ton uçucu külün depolandığı bildirilmektedir [4]. Ancak, bu kadar büyük bir üretime karşın uçucu küllerin çok az bir kısmı inşaat sektöründe kullanılmaktadır.



Çimento sektörü hem ülkemizde hem de dünya genelinde enerji ve hammadde tüketimi açısından ön plana çıkan başlıca sektörlerden biridir. Çimento üretiminde enerji tüketiminin yanı sıra hammadde kullanımından da kaynaklanan karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) salınımları, bu sektörü günümüzün belki de en önemli çevre sorunu sektörlerden biri konumuna getirmiştir.

Günümüzde gerek kaynakların giderek azalması ve yaşamı tehdit eder hale gelmesi, gerekse çevre sorunlarının neden olduğu sosyal ve ekonomik riskler nedeniyle, “sürdürülebilirlik” yaklaşımı gündemin en öncelikli maddelerinden biri olmaya devam etmektedir. Sürdürülebilirlik konusu çimento sektörü için de en önemli tartışma konularından biri olup, bu sektör sürdürülebilirlik ile ilgili pek çok politika, strateji ve yöntemin değerlendirildiği, uygulandığı ve iyileştirmeye yönelik önerilerin geliştirildiği bir sektör konumundadır [5].

Çimento üretiminin tüm yaşam döngüsü çerçevesinde değerlendirildiği ve enerji başta olmak üzere kaynak tüketiminin ve çevresel etkilerin azaltılmasına yönelik pek çok çalışma yapılmaktadır. Hammaddelerin elde edilmesi aşamasından başlayarak üretim süreçlerinin yanı sıra tüketim aşamasının da tüm boyutlarıyla ele alındığı “yaşam döngüsü” açısından kaynak yönetimine bütüncül bakışın önemi enerji verimliliği açısından da daha da görünür hale gelmektedir. Her türlü kaynağın tüketimi aynı zamanda enerji tüketimi anlamına gelmektedir.

Çimento üretiminin iki ana girdisi enerji ile kireçtaşı (kalker) ve kil gibi hammaddelerdir. Kireçtaşı, kil ve diğer hammaddelerin öğütülüp homojenize edilerek döner fırnlara beslenmesi ile klinker üretimi gerçekleşmektedir. Çimento üretiminde alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik pek çok örnek bulunmaktadır. Bunların başında, termik santral atığı uçucu kül ve taban külü, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanımı gelmektedir [6].

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

### 2.1. Klinker ve Özellikleri

Çimento üretiminde kalker ve kil gibi hammaddeler klinker üretimi için kullanılmaktadır. Ayrıca bazı durumlarda boksit, demir cevheri yada silis kumuda hammadde olarak kullanılmaktadır. Hazırlanan hammaddeler daha sonra klinker üretmek için öğütülmüş olarak fırına beslenir. Klinker katkıları eklenmeden önce çimento üretiminde kullanılan ara ürünü oluşturmaktadır. Sıcaklık arttıkça, önceden kalsine edilmiş malzemelerde fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelir; Hammaddeler önce erirler ve daha sonra tekrar bir araya gelerek topaklar oluştururlar. Döner fırın içerisindeki kimyasal tepkimeler Tablo 2.1'de özetlenmiştir [7].

**Tablo 2.1.** Klinker üretiminde gerçekleşen bazı reaksiyonlar [8]–[10]

Reaksiyon	Etki	Reaksiyon Yeri	Reaksiyon	Sıcaklık (°C)
MgCO <sub>3</sub> ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma fırın	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$	550-960
CaCO <sub>3</sub> ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma fırın	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	550-960
$\beta$ -C <sub>2</sub> S oluşumu	Geçiş	Fırın	$2CaO + SiO_2 \rightarrow \beta-Ca_2SiO_4$	600 – 1.300
C <sub>4</sub> AF oluşumu	Geçiş	Fırın	$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$	1200 – 1.280
C <sub>3</sub> A oluşumu	Geçiş	Fırın	$3CaO + Al_2O_3 \rightarrow Ca_3Al_2O_6$	1200 – 1.280
C <sub>3</sub> S oluşumu	Yanma Sinterleme	Fırın	$\beta-Ca_2SiO_4 + CaO \rightarrow Ca_3SiO_5$	> 1.280
Erimiş faz oluş.	Yanma Sinterleme	Fırın	$Klinker_{katı} \rightarrow Klinker_{sıvı}$	> 1.280
Klinkerin katılaşması	Soğuma	Fırın Soğutucu	$Klinker_{sıvı} \rightarrow Klinker_{katı}$	150-200

Geleneksel Portland çimento klinkerinin ağırlıkça %95'inden fazlası CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den oluşur. Bu dört oksit, klinkerdeki ana fazları oluşturur: alit (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>), belit (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), celit (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) ve ferrit (Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Minör elementler ya ayrı fazlar (periklas, alkali sülfatlar, vb.) oluştururlar ya da iyonik olarak ana klinker

fazlarına dahil edilirler [11]. Eser elementlerin yapıcı etkisini olumlu bir şekilde kullanmak mümkündür, örneğin, florür ve sülfatın kombine ilavesi klinkerleştirme işlemi ve klinkerin özellikleri üzerine olumlu etkilere sahiptir. Çünkü bu mineraller iki tür mineralizör olarak hareket ederler [12]. Çimento karmaoksitlerinin görevleri Tablo 2.2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.2.** Karmaoksitlerin görevleri [13]

Ana bileşen	Adı	Kimyasal Formül	Özellik
C <sub>2</sub> S	Belit	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Yavaş sertleşme, yavaş dayanım kazanma ve yavaş ısı değişimi
C <sub>4</sub> AF	Ferrit	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	Yavaş sertleşme ve çimentoya gri rengini verme
C <sub>3</sub> A	Cellit	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Ani priz özelliği (alçıtaşı kullanım nedeni), hızlı sıcaklık artışı, hızlı sertleşme ancak nihai dayanımlarda azalmalar gerçekleşir; Sülfat saldırısına karşı savunmasız
C <sub>3</sub> S	Alit	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Erken/nihai mukavemet ve hızlı sertleşme

Alit (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>), kristal boyutları yaklaşık 150µm olan bir klinkerin (küttele %40-70) birikimini oluşturur. Alit genellikle, kristal şekli öhedral (açıkça tanımlanmış kristal yüzleri) veya kısmi olarak kristallenmiş (zayıf tanımlı kristal yüzleri), anhedral (kristal olmayan yüzler) arasında değişen, altı kesitli bir kristal yapıya sahiptir. Yoğunluğu 3.13-3.22 mg/m<sup>3</sup> arasındadır [14]. Alit kristal kafes içinde Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> ve Fe<sup>3+</sup> gibi iyonlar yer almaktadır. Saf trikalsiyum silikatın 7 polimorfunun sıcaklığa bağımlı olarak değiştiği bazı çalışmalar da belirtilmiştir [11,15].

Belit, çimento endüstrisinde normalde C<sub>2</sub>S olarak adlandırılır. Saf olmayan dikalsiyum silikat trigonal, ortorombik ve monoklinik tiplerinin katı-çözülmüş bir formudur. Dikalsilik silikat polimorfları alfa, alfaprime, beta ve gama formlarında olup portland çimento klinkerinin yaklaşık %10-30'unu oluşturmaktadır. Belit taneleri, idyomorf, camsı ve normal şartlarda yuvarlaktır ayrıca belirgin çok yönlü yapraküstü yapı ile ikiz kristal oluşumuna bağlı olarak yuvarlaklaştırılmıştır. Mohs ölçeğinde sertliği 4 ile 5 olarak belirlenmiştir [16].

Günümüzde sürdürülebilir çimento üretimi ve enerji verimliliği için belit çimentolarının üretimi araştırma konularının temelini oluşturmaktadır. Belit çimentolarının düşük kalsinasyon sıcaklığına sahip olması CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin azalmasını sağlamaktadır. Belit Portland çimentoları geleneksel Portland çimentosundakinden daha dayanıklı betonlar üretilmesini sağlar; Bununla birlikte, belit çimentolarını öğütmek daha zordur ve su ile reaksiyonları daha yavaştır [17].

Çimento endüstrisinde yaklaşık 1542 °C'lik bir erime noktasına sahip trikalsiyum alüminatın (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) izometrik, ortorombik, tetragonal ve monoklinik biçimleri C<sub>3</sub>A olarak adlandırılır. Trikalsiyum alüminat normalde düşük alkali veya alkali içermeyen klinkerde uniform, küçük, ksenomorfan dikdörtgen kristaller (1 ile 60 µm) içerir. C<sub>3</sub>A geleneksel klinkerde %18'e kadar bulunabilir. Mohs ölçeğinde sertliği 6 olarak belirlenmiştir [16].

Alüminyum ve demir oksit eriyikleri, klinker bünyesindeki aliti oluşturan reaksiyonları hızlandırmaktan sorumludur. Mineralleştiriciler, klinker minerallerinin relatif termodinamik kararlılığını değiştirerek akışkan olarak hareket etmesini sağlar. Akışkan faz, oksit eriyiğinin viskozitesini ve yüzey gerilimini düşürerek ilk oksit eriyiğinin oluşma sıcaklığını azaltır. Bu etki ile reaksiyonların başlaması kolaylaşır ve alitin daha düşük sıcaklıklarda oluşması sağlanır. Mineralizan etkiler sonucunda, silikatların hidrolik etkinliği katı solüsyon veya simetri etkileri ile modifiye edilmektedir [18].

Bir mineralleştirici olarak işlev görmesine ilaveten, sülfatlar düşük sıcaklıklarda (1000–1200 °C) diğer minerallerle karışmayan ayrı bir eriyik oluşturur. Bu etki, silikatların daha düşük sıcaklıklarda oluşmasını sağlar. Mineralleştirici olarak sülfat kullanmanın bir sakıncası, alit oluşumunu engelleyen belit sülfat stabilizasyonudur. Bununla birlikte sülfat ilavesi florür ile birleştirilirse bu etki ortadan kalkmaktadır [19,20].

Kalsiyum florür ve kalsiyum sülfat ile mineralize klinker esaslı çimentoların geliştirilmiş hidrolik özellikleri yapılan çalışmalarda bildirilmiştir. Reaksiyon hızı ilk

saatlerden bir güne kadar daha düşük olmakla birlikte, geleneksel portland çimentosu klinkerine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sağlamayı hızlandırır. Bu davranış, mineralize klinkerdeki yüksek alit içeriği, monoklinik ve triklinik alitten daha hidrolik olarak aktif olduğu iddia edilen ikame-stabilize rhombohedral alit ile açıklanmaktadır [12,21].

Demir oksitlerin klinker oluşum mekanizması üzerindeki etkisi ferrit, belit ve alitin katı solüsyonlarındaki miktar ve değerlerine bağlıdır. Bu bileşiklerin kararlılığı ham karışımın homojenliğine, reaksiyon fazlarının oranına, yanma sıcaklığına ve soğutma hızına bağlıdır. Ham karışımındaki  $Fe_2O_3$  miktarının arttırılması,  $C_2S$ 'in alit ve polimorfik dönüşümünün istikrarsızlaştırılması ( $\beta \rightarrow \gamma C_2S$ ) ve parçalanmasına dolayısıyla, klinker mineralinin mekanik mukavemetinde ve hidrasyon etkinliğinde kayba neden olmaktadır [22].

$Cr_2O_3$  ve  $MnO_2$  gibi mikro kirliliklerin klinker minerallerinin stabilizasyonu ve öğütülebilirli arttırılmasında kullanıldığı bildirilmiştir.  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  ve diğer mikro-kirleticilerin optimum miktarlarda bulunmasının klinker mineral kristal yüzeyleri üzerindeki mikro çatlakların stabilitesini ve sabitlenmesini önemli ölçüde etkileyebileceğini gösteren bulgular mevcuttur [22].

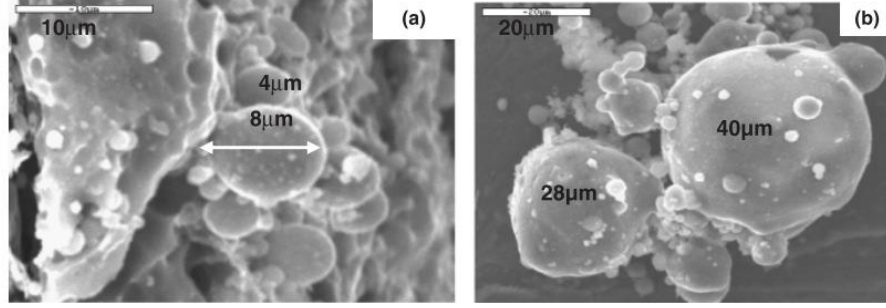
## 2.2. Uçucu Kül ve Özellikleri

Uçucu kül ağırlıklı olarak kütle betonu tasarımı için, hidrasyon ısının azaltılması, işlenebilirliğin iyileştirilmesi ve alkali-agrega reaksiyonunun engellenmesi için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, uçucu kül katkılı çimentolar, karbonatlaşmaya karşı savunmasız olma eğilimindedir. Buna ek olarak, uçucu külün kalitesi çok değişkenlik göstermektedir. Bu yüzden uçucu kül çimentosunun karakterizasyonu açıklığa kavuşturulmalı ve özellikli uçucu külün etkin kullanımı için bir malzeme tasarımı tekniği oluşturulmalıdır. Bazı ülkelerdeki standartlara göre çeşitli malzemeler serbestçe kullanılabilir ancak betonun performans gereksinimlerini karşılamak için çeşitli mineral katkılara malzeme tasarım yöntemleri oluşturulmalıdır. [23].

Literatürde uçucu küller ile ilgili birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalar sonucunda genellikle bulunan sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir: a) morfolojisi ve uçucu kül tanelerinin dağılımı, yağlama ve filler etkisi nedeniyle taze haldeki pastalar, harçlar ve betonların özelliklerini kuvvetle etkiler; b) kimyasal kompozisyon, camsı karakteri ve uçucu kül tanelerinin yüzey özellikleri, çimento hidrasyonu sırasında üretilen kalsiyum hidroksit ile puzolanik reaksiyona bağlı olarak sertleşmiş pasta, harç ve beton özelliklerini değiştirmeye özellikle katkıda bulunur [24].

### **2.2.1. Uçucu Küllerin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri**

Uçucu kül, termik santrallerde elektrik üretimi sırasında yakılan kömürün kalıntısıdır ve elektrostatik filtreler kullanarak baca gazlarından toplanır. Uçucu kül taneleri genellikle çimento kadar ince olup camsı küresel tanelerinin yanı sıra kuvarz, mullit, hematit, manyetit, karbon içerikli kömür ve soğuma sırasında oluşan diğer kristal fazların artıklarından oluşur. Uçucu kül; amorf (camsı) ve kristal fazların kombinasyonundan oluşan heterojen bir malzemedir. Uçucu kül tanelerinin çoğunluğu camsı, katı yada boşluklu (cenosfer) ve küresel şekilde bulunmaktadır. Bazen plerosferler olarak bilinen uçucu kül taneleriyle kırık içi boş küresel taneleri de gözlemlenmiştir. Camsı fazlar, tipik olarak uçucu külün toplam kütlelerinin %60 ile 90'nını oluştururken geriye kalan kısım ise çeşitli kristal fazlardan oluşmaktadır. Portland çimentosunda uçucu kül kullanımı 1930'larda Amerika'da popüler hale gelmiştir. 1937'de, R. E. Davis ve arkadaşları California Üniversitesi'nde, beton içeren uçucu kül üzerine araştırma sonuçlarını yayınladılar. Uçucu küllerin özellikleri, elektrostatik filtrelerin yapısına göre değişir. En uzaktaki elektrostatik filtre haznesinde, daha küçük tane boyutuna, daha fazla yoğunluğa, daha düşük karbon içeriğine ve daha yüksek cam içeriğine sahip olan uçucu küllerin yakalandığı belirlenmiştir [25,26]. Goñi ve Guerrero tarafından uçucu küllerden alınan SEM görüntüleri Şekil 2.1'de sunulmuştur [27].



**Şekil 2.1.** Uçucu küllerin SEM görüntüleri [27]

ASTM C 618-08 uçucu külleri kimyasal bileşimleri ve yakılan kömürün türüne göre F ve C olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Uçucu küller dört ana bileşene sahiptir. Bunlar;  $\text{SiO}_2$  (%35 ile 60),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (%10 ile 30),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (%4 ile 20) ve  $\text{CaO}$  (%1 ile 35). ASTM'ye göre, silisyum, alüminyum ve demir oksit içerikleri toplamı %70'den fazla ise uçucu kül F Sınıfına aittir. Eğer bu miktar %50'yi geçerse, uçucu kül C Sınıfıdır [28]. F Sınıfı uçucu kül normalde antrasit ya da bitümlü kömür yakarken üretilir. C Sınıfı uçucu kül ise normalde yarı-bitümlü kömür ve linyitin yakılmasından üretilir. Uçucu külün  $\text{SiO}_2$  içeriği, kömür içindeki kil ve kuvarsdan gelir ayrıca kömür içindeki demir içeren malzemeler, uçucu küldeki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriğini sağlar. Uçucu küldeki  $\text{CaO}$  ve  $\text{SO}_3$  kaynağı çoğunlukla kömür içindeki kalsiyum esaslı kalsiyum karbonatlardan ve kalsiyum sülfatlardan elde edilir [29]. Uçucu küldeki karbon içeriği doğrudan belirlenmez, ancak kızdırma kaybında ( $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) oluşan ağırlık kaybının yaklaşık olarak karbon içeriğini verdiği varsayılır [30]. Uçucu küllerin kızdırma kaybı mümkün olduğunca düşük olmalı ve standartlar tarafından genellikle karbon parçacıkları içeriği %5-6 ile sınırlandırılmıştır. Karbon içeriğinin artması betonun su, su azaltıcı ve hava sürükleyici katkı gereksinimini artırır. Bu durum betonun işlenebilirliğini, dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir [31]. Kömürünün tam yanmamasından dolayı uçucu külde karbon bulunabilir. C sınıfı uçucu küllerde %1'den daha az karbon bulunurken, bazı F Sınıfı uçucu küllerin kızdırma kaybı (LOI) testlerine dayalı olarak %20'ye varan oranlarda bulunması mümkündür [32].

### 2.2.2. Uçucu Külün Puzolanik Özellikleri

C Sınıf uçucu kül, bağlayıcı ve puzolanik özelliklere sahipken, F Sınıf uçucu külün yalnızca puzolanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Uçucu kül içeren harçlar, uçucu külün puzolanik reaksiyonundan dolayı başlangıçta çimentonun hidratasyonundan daha yavaş olduğu için erken yaşlarda daha az dayanım kazanır [33,34]. Uçucu kül içindeki silis, çimentodaki silikat fazlarının hidratasyonundan gelen kalsiyum hidroksit (portlandit) ile reaksiyona girerek, mikroyapının daha büyük bir bölümünü oluşturan ve reaksiyona girdiği portlanditten daha yüksek bağlayıcı özelliklerine sahip kalsiyum silikat hidrat üretimine imkan verir [35,36].

Uçucu külün puzolanik etkisi esas olarak kimyasal bileşime ve inceliğe bağlıdır. Uçucu kül, çoğu zaman 150 mikron ve altı boyutunda taneler içermektedir. Mehta tarafından uçucu küldeki reaktif tanelerin çapı genellikle 10 mikron ve altında olduğu bildirilmiştir [37].

Wang ve ark., uçucu kül ve kimyasal katkıli pasta karışımlarında ısı dağılımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tip I ve Tip II çimentolarında, F ve C Sınıfı uçucu külleri %20 ikame oranında kombine bir şekilde kullanmışlardır. Tip I çimentosunda su azaltıcı ve Tip II çimentosunda priz geciktirici katkı maddeleri kullanılmıştır. F Sınıfı uçucu küllerin ana-hidratasyon pikinin zamanlaması üzerinde çok az etkili olduğu fakat ilk 24 saatte salınan toplam sıcaklığın önemli ölçüde düştüğü belirlenmiştir. Isı salınım oranındaki bu azalma, daha reaktif çimentonun daha az reaktif uçucu kül ile seyreltilmesine bağlanmıştır. C sınıfı uçucu küllerin kullanılması ana hidratasyon eğrisini bir miktar geciktirmiştir. F sınıfı uçucu külde olduğu gibi toplam ısı miktarı düşmüş ve sülfat tüketimi oranı etkilenmemiştir. Uçucu kül ile Tip II çimentosu için yüksek dozajlı priz geciktirici kullanılması, hidratasyonun neredeyse tamamen durmasına neden olmuştur [38].

Jiang ve diğerleri, portland çimentosu ile %40, 55 ve 70 oranlarında F Sınıfı uçucu kül içeren pasta karışımlarının hidratasyonunu incelemiştir. Ayrıca s/ç oranını değiştirerek bazı pastalarda su azaltıcı ve aktivasyon katkı maddelerini kullanmışlardır. Karışımların 28 günlük CH içeriği uçucu kül içeriği arttıkça azalmıştır



ancak %70 uçucu kül içeren karışımının %40 ve 55 uçucu kül içeren karışımlarından daha yüksek bir CH içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, bir aktivasyon katkı maddesinin karışıma eklenmesinin uçucu külün aktivitesini artıracak da bulunmuştur [39].

Monteiro, kalsiyum hidroksit ile mineral katkıları arasındaki puzolanik reaksiyonu tanımlamak için bir difüzyon denklemi önermiştir. Tahmin modelinin parametreleri, mineral katkılarının fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır [40].

### 2.2.3. Çimento Hidratasyonunda Uçucu Külün Etkisi

Uçucu küller, çimentonun hidratasyon oranını etkiler. Kimyasal bileşimindeki büyük farklılık nedeniyle, uçucu külün hidratasyon kinetikleri üzerindeki çelişkili etkileri bildirilmiştir. F sınıfı uçucu küller genellikle hidratasyonu geciktirirken, C sınıfı uçucu küllerin etkisi daha değişkendir. Çalışmalar uçucu kül varlığında klinker fazlarının ilk birkaç gündeki hidratasyonu geliştirdiğini buna karşın çimentoların toplam ısı oluşumunun hem uzun hem de kısa vadede düştüğünü göstermiştir [41–43]. Camlar üzerinde yapılan çalışmalarda, kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) cam yüzeylerde nükleasyon eğilimi göstererek camsı yüzeylerin elyafı bir hidrat tabaka ile kaplandığını göstermiştir [44]. Bu olay ayrıca uçucu kül taneleri üzerinde de gösterilmiştir [45]. Richardson, uçucu kül içerikli çimento pastalarının hidratasyonundan üretilen C-S-H'nin yaprak/ folyo benzeri bir morfolojiye ve daha yüksek bir yüzey alanına sahip olduğunu belirlemiştir. Bu yapının cüruf ve metakaolin içeren hidrate çimentolardaki C-S-H'a benzer olduğunu ileri sürmüştür [46]. Mineral katkılı betonlarda permeabilitenin azalması C-S-H'nin morfolojisi ile açıklanmaktadır [47]. Uçucu kül içeren sistemlerde C-S-H bünyesindeki CaO/SiO<sub>2</sub> oranının normal çimento sistemlerine göre daha düşük olduğu da ileri sürülmüştür [48]. Uçucu küllerin mekanik olarak işlenmesi uçucu kül plerosferlerinin kırılarak harç ve betonun davranışını değiştirdiği için mikroyapıyı daha da geliştirdiği gözlenmiştir [49]. Daha ince uçucu kül içeren çimento pastalarının daha kaba uçucu kül içerenlerden daha yoğun bir mikroyapı sahip olduğu birçok çalışmada bildirilmiştir [50].

Cost ve Knight C sınıfı uçucu kül kullanımının yüksek sıcaklık, sülfat seviyeleri, kimyasal katkı maddeleri ve sıcak hava beton uygulamaları ile birlikte artmış alüminat seviyeleri nedeniyle betonda anormal davranışlara neden olduğunu iddia etmiştir. Sıcak havalarda reaksiyon hızını azaltmak için C sınıfı uçucu kül oranının artırılması durumunda betonda düzensiz davranışlar gözlenmiştir. Çalışmanın bir parçası olarak, uyuşmazlıkları tespit etmek için yarı adyabatik kalorimetri kullanarak birkaç tane pasta karışımının ısı oluşumu değerlendirilmiştir. Farklı sülfat oranına sahip Tip II çimentolar ve C sınıfı uçucu kül kullanarak pastalar hazırlanmıştır. Araştırma sonucunda, C sınıfı uçucu kül kullanılması durumunda, uygun sülfat dengesini bozduğundan dolayı betonda önemli sorunlara neden olduğu açıklanmıştır. Yüksek sıcaklık dereceleri ve su azaltıcılar gibi kimyasal katkıların kullanılması, uyuşmazlık ile ilgili problemleri artırabilir; bunlar karışımdaki bileşiklerin çözünürlüklerini ve reaksiyon oranlarını etkilemektedir [51].

Yapılan çalışmalarda uçucu kül reaktivitesinin su/bağlayıcı oranı ve uçucu kül ikame oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Çimento-uçucu kül karışım özelliklerinin gelişimi çimento ve uçucu külün reaksiyon dereceleri ile ilgilidir [52–54].

Wang; Uçucu küllü karışımlarda kalsiyum hidroksit içeriğini stoikometrik orandan belirlenmiştir. Çimento-uçucu kül karışımları için modifiye edilmiş hidratasyon modelini önermiştir. Önerilen modelin, yüksek hacimli uçucu kül veya düşük su/bağlayıcı oranlarına sahip betonlar için geçerli olduğu açıklanmıştır [38].

Schindler ve Folliard, çimentolu malzemeler için genel bir hidratasyon modeli formülasyonunu araştırmışlardır. Önerilen hidratasyon modeli bazı değişkenlerin etkilerini içermektedir: Bunlar çimentonun kimyasal özellikleri, çimento inceliği, mineral katkıların ikame oranı, karışım oranları ve beton özelliklerinden oluşmaktadır [55].

De Belie ve arkadaşları Avrami ve Jander tarafından geliştirilen denklemleri kullanarak uçucu küllü çimento pastalarının izotermal ısı gelişimini analiz etmişlerdir.

Ayrıca toplam su miktarı, kimyasal büzülme ve her bir reaksiyon ürününün ve reaksiyona girmemiş tanelerin hacmi, çimento-uçucu kül karışımlarının mikroyapısı hakkında bilgi vermişlerdir [56].

Yu vd. uçucu kül katkılı çimento pastalarının boşluk yapısını 3 yıla kadar incelemişlerdir. 1 yıl sonra uçucu kül katkılı çimento pastalarının gözenekliliği çok az miktarda azalmıştır. 90 gün sonra, uçucu kül daha küçük kılcal gözeneklerin oluşmasını sağlamıştır. 28 günden sonra uçucu kül katkılı çimento pastalarında kritik boşluk çapı fazla değişmemiştir. Reaksiyona giren içi boş uçucu kül taneleri reaksiyon ürünlerinin oluşumu için ekstra alan sağladığı bildirilmiştir [57].

Jel (kimyasal etki) artışı ile sonuçlanan uçucu külün puzolanik reaksiyonunun yanı sıra reaksiyona girmemiş taneler beton gözeneklerini doldurarak (fiziksel etki) mikro-agrega gibi davranmaktadır [58].

Marsh ve arkadaşlarının yaptığı araştırmalarda ise, CH tarafından sağlanan suyun puzolanik reaksiyonda yer alan tek su olmadığı tespit edilmiştir. Erken ve orta yaşlarda oluşan ürünün,  $C_3S_2H_3$  formülünde belirtilen seviyeden daha yüksek su içerdiği açıklanmıştır [59].

Berry ve diğ. erken yaşlarda uçucu kül katkılı çimento pastalarında buharlaşmayan su içeriğinin normal çimento pastalarından daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Ancak yaşla birlikte buharlaşmayan su içeriği de azalma göstermiş buda hidratasyonun ilerlediğini kanıtlamıştır [60].

Fraay, boşluk çözeltisi pH'nın uçucu külün puzolanik aktivitesi üzerindeki kuvvetli etkisini bildirmiştir. Uçucu kül cam yapısının yaklaşık 13.2 veya 13.3'lük bir pH değerinin üzerinde bozluğu görülmüştür [61]. Huang vd. pH seviyesindeki düşüşü uçucu külün puzolanik reaksiyonuna bağlamıştır [62].

Zhang vd., sadece buharlaşmayan su ve CH içeriği üzerine değil aynı zamanda boşluk çözeltisi pH'ı, reaksiyona giren uçucu külün aktivite özellikleri ve yüksek

hacimli uçucu kül çimento matrisindeki ilişkiler üzerinde de araştırmalar yapmayı önermiştir [63].

#### **2.2.4. Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi**

Uçucu kül başlangıçta nispeten daha yavaş bir hızda reaksiyon gerçekleştirirken karıştırmadan sonraki ilk birkaç gün veya hafta boyunca daha düşük basınç dayanımına neden olmaktadır. Ancak daha ileriki yaşlarda daha yüksek mukavemet göstermektedir [34,64]. C sınıfı uçucu küllerin yüksek mukavemet verme eğilimi göstermesi nedeniyle C sınıfı uçucu kül kullanıldığında ikame oranı genelde %15-40 arasında F sınıf uçucu kül kullanılan betonlarda ise ikame oranı %15-25 ile sınırlı olmalıdır. Bununla birlikte, mukavemet gelişimi ile kalsiyum içeriği arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır [65]. Uçucu külün ikame oranı hidrasyon derecesi ve puzolanik reaksiyonu etkilediği için basınç dayanımlarını doğrudan etkilemektedir. Uçucu külün inceliğinin mukavemet gelişiminde önemli rol oynadığı yaygın olarak bildirilmiştir [66].

Uçucu küllü harçların basınç dayanımını ve mikroyapısal özelliklerini geliştirmek için, eleme, manyetik ekstraksiyon, öğütme ve mekanik ayırma gibi farklı işlemler uçucu külün özelliklerini değiştirmek için kullanılabilir [67–69].

Çalışmalar, uçucu kül içeren harç ve çimento pastalarının basınç ve eğilme dayanımlarının daha yüksek sıcaklıklarda kürlenerek arttırılacağını göstermiştir [69]. Dayanım gelişiminde ortamın bağıl neminin de önemli bir parametre olduğu bulunmuştur [70].

Hwang ve ark. uçucu kül katkılı betonun basınç dayanımını kestirmek için bir tahmin denklemi bulmuşlardır. Denklemden yaş, uçucu kül içeriği, uçucu külün Blaine özgül yüzey alanı ve uçucu külün aktivitesi belirli katsayılarla dikkate alınmıştır. [53].

### 2.2.5. Uçucu Külün Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi

Betonun dayanıklılığı, çeşitli kimyasal ve fiziksel etkilerden kaynaklanan bozulma süreçlerine bağlıdır. Betonun bozulmasının en yaygın nedeni karbonatlaşma veya klorürlerden kaynaklanan çelik korozyonu, sülfat etkisi, alkali silis reaksiyonu, termal değişiklikler, diğer kimyasal etkiler ve fiziksel tuz saldırısı gibi etkenlerdir. Bu etkenler beton yapılar da çatlaklara ve kalıcı hasarlara yol açmaktadır [71].

Çoğu bozulma süreci, sıvıların veya iyonların içyapıya taşınması ile oluşmaktadır. Betonun servis ömrü ve dayanıklılığı bu nedenle geçirgenlik, su emme ve difüzyon gibi malzeme taşıma özelliklerine bağlıdır. Uçucu külün betonun dayanıklılığına olan yararı birçok çalışmada bildirilmiştir [72–77]. Uçucu külün kullanılması, gözenekliliği ve geçirgenliği azaltmakta dolayısıyla uzun vadede betonun performansını arttırmaktadır [23,78]. Ayrıca uçucu kül düşük hidrasyon ısı ve uzun vade de daha yüksek mukavemet gibi avantajlara sahiptir. Bu etkilerinden dolayı yapılar da çatlama riskini azaltır böylece yapıların ömrü daha da uzamaktadır [79]. Boşluk çözeltisinin pH değeri 12.5 ile 13.5 arasında değişir ve genellikle  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  ve  $OH^-$  gibi iyonların konsantrasyonuna bağlıdır. Uçucu külün puzolanik reaksiyonu gerçekleştiğinde ve boşluk çözeltisindeki alkaliler tüketildiğinde betonun agresif ortam için daha hassas hale geleceği ayrıca kimyasal saldırılara karşı daha savunmasız hale de geleceği unutulmamalıdır. Bununla birlikte, uçucu kül ilavesi geçirgenliği azalttığı için zararlı maddelerin betona sızma oranına bağlı olarak bozulma hızı azalacaktır [80]. Uçucu kül kullanıldığında yavaş gelişen hidrasyon ve mikroyapısal gelişim nedeniyle dayanıklılığı sağlamak için daha uzun süre kürlenmeye ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir [81]. Pastanın porozitesi ve geçirgenliği, uçucu külün tane şekli, inceliği ve ikame oranından etkilenir [82]. Uçucu kül ilavesi ile genel olarak gözeneklerin azaldığı ve daha dayanıklı bir betonun oluştuğu gözlemlenmiştir [83,84]. Gözeneklilik, uçucu kül ikame oranının belirli sınır üzerindeki artış ile artar ve incelikteki artışla birlikte azalır [50]. Çimentonun uçucu kül ile yer değiştirildikten sonra toplam gözeneklilikte bir miktar artış olmasına rağmen, geçirgenliğin küçük gözeneklerin artması nedeniyle düştüğü gözlemlenmiştir [85].

Uçucu kül katkılı betonların azaltılmış geçirgenliği ve gözenekliliğinin sülfat direncinin geliştirilmesine katkıda bulunduğu bildirilmiştir [50]. Düşük kalsiyumlu uçucu kül içeren betonların, yüksek kalsiyumlu uçucu kül içeren betonlara göre daha yüksek sülfata dirençli olduğu ve betonun sülfat direncinin, fiziksel özelliklerinden ziyade uçucu külün kimyasal özelliklerinden etkilendiğini göstermiştir [29]. Bazı çalışmalar uçucu kül katkılı betonlarının alkali silis reaksiyonuna karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir [86]. C sınıfı uçucu küllü betonların F sınıfı uçucu küllü betonlara kıyasla alkali silis reaksiyonuna karşı daha az dirençli olduğu rapor edilmiştir [87].

C sınıfı uçucu külün etkileri matristeki kalsiyum alüminatların artan seviyesinden dolayı sülfat hasarını arttırmaktadır. Erken yaşlarda daha fazla kalsiyum tüketilmesi alüminat hidrasyonunu hızlandırmaktadır. Meydana gelen kalsiyum eksikliği nedeniyle, silikat hidrasyonu gecikebilir veya tamamen durabilir. Ayrıca, sülfat eksikliği silikatların çözünürlüğünü azaltır ve bu da daha yavaş silikat hidrasyonuna neden olmaktadır [88].

#### **2.2.6. Uçucu Külün Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Beton Özelliklerine Etkisi**

Birçok araştırmacı uçucu kül inceliğinin taze veya sertleşmiş harç ve beton özellikleri üzerinde önemli etkisinin olduğunu göstermiştir [89,90]. Uçucu külün inceliği, geçirimsizlik nedeni ile harcın genişmesini azaltabilir, sülfat direncini artırabilir, harcın basınç dayanımını ve su ihtiyacını etkileyebilir [82]. İnce uçucu küllerin dayanım aktivite indeksinin kaba uçucu küllerden daha yüksek olduğu da gözlenmiştir. Daha ince uçucu küller harcın işlenebilirliğini geliştirir, çünkü küresel şeklindeki kül taneleri su ihtiyacını azaltır [91,92]. S/Ç oranının, uçucu kül ikame oranının ve ortam koşullarının uçucu kül katkılı pastaların hidrasyona etkisi üzerinde çok sayıda araştırma bulunurken, uçucu külün kimyasal kompozisyonunun beton üzerindeki etkisini inceleyen az sayıda çalışma vardır. Bununla birlikte, beton bileşenleri (agrega ve çimento içeriği vb.) ile betonun özellikleri arasında net bir korelasyon gözlenmemiştir [93].

### 2.3. Öğütme Kolaylaştırıcılar

Öğütme kolaylaştırıcı maddeleri olarak bilinen katkı maddeleri, 1930'lardan beri klinker öğütme işleminde çimento üretim oranını arttırmak için kullanılmaktadır [94,95].

Bilindiği gibi, çimento üretim prosesi hammadde hazırlama, klinker kalsinasyonu ve çimento öğütme anlamına gelen "iki öğütme ve yakma" olarak da bilinen işlemlerden oluşur. Çimento öğütme, tüm çimento üretimindeki en önemli süreçtir. Ancak belli bir dereceye kadar öğütülmekte olan çimento bünyesinde "yeniden birleşme" denilen aglomerasyon olayı gerçekleşmektedir. Çünkü çimento öğütme işlemi sırasında elektrik yükü oluşur ve çimento tane yüzeyindeki pozitif-negatif yükler birbirini çeker. Bu süreçte çimento öğütme kolaylaştırıcılar kullanılarak bu olayın oluşumu önlenmektedir. Düşük çimento inceliğinden dolayı, özgül yüzey alanının artırılması, çimento tanelerinin boyut dağılımının optimize edilmesi, öğütme enerjisinin azaltılması ve üretimi arttırması nedeniyle, çimento öğütme kolaylaştırıcıları çimento endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [96–100].

Kötü uyarlabilirlik, kararlılık ve kusurlu işlev nedeniyle, tek bileşenli çimento öğütme kolaylaştırıcıları ile öğütme sürecindeki gereklilikleri karşılamak zordur; Ayrıca makromoleküler sentetik öğütme katkı teknolojisi hala uygun olmadığı için asıl üretime uygulanamamaktadır, bu nedenle kompozit çimento öğütme kolaylaştırıcıları çimento endüstrisinin ana akımlarından birisi haline gelmiştir [101,102].

Çimento öğütme prosesinde kullanılan değirmen; çimento öğütme alanında farklı çalışma koşullarında ve tasarım özelliklerinde test edilmiştir [103,104]. Öğütme kolaylaştırıcılar uzun yıllar çimento öğütme uygulamalarında kullanılmıştır ve literatürde kullanıldıklarında enerji tasarrufu sağladıkları bildirilmiştir [105,106]. Kimyasal olarak işlev gören -OH, -NH<sub>2</sub>, -COOR, -SO<sub>3</sub>- gruplarındaki yüksek polarite, Ca-O, Al-O ve Si-O'nun kırılmış kovalent bağlarındaki elektrostatik yüzeylere adsorbe olma ve aglomerasyonu azaltma eğilimindedirler [107].

Zheng ve ark. çeşitli kireçtaşı öğütme testleri yaparak ve uygun öğütme kolaylaştırıcı ile ürünün yüzey alanının iki katına çıkabileceği sonucuna varmışlardır [108]. Choi ve diğ. karıştırmalı değirmen test çalışmalarında öğütme kolaylaştırıcıların kullanılması ile tüketilen enerjinin %37 oranında azaltılmasının mümkün olduğunu göstermişlerdir [102].

Altun vd. glikol esaslı, TEA (Tri-etanolamin) esaslı ve TIPA (Tri-izopropanolamin) esaslı 3 tip öğütme kolaylaştırıcı maddeyi kuru karıştırılmış çimento öğütme işleminde test etmiştir. TIPA esaslı öğütme kolaylaştırıcıların, operasyonel faydalar ve kalite iyileştirmeleri nedeniyle kuru karıştırılmış çimento öğütmesi için etkili yöntem olduğunu tespit etmişlerdir [109].

Test sonuçlarına göre, öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılan TEA ve TIPA, sırasıyla %14 ve %26'ya kadar öğütülebilirlik endeksini arttırmıştır. Ek olarak, kompoze çimentolarda öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılan pancar pekmezi de katkı sağlamıştır [97].

Rashwani, vd. çimento üretimi sırasında sabun üretimi endüstriyel atıklarının öğütülebilirlik etkisini incelemiştir. Sonuç olarak; çimento tanelerinin daha ince olduğunu, tane boyutu dağılımının daha ince çapa kaydırıldığını belirlemiştir [110].

Zhang vd. kızıl ötesi spektroskopisi (FT-IR) ile karakterize edilen ve Portland çimentosu üretiminde kullanılan bir polimer esaslı öğütme yardımcı maddesini (PGA) sentezlemek için su bazlı serbest radikal polimerizasyonu adı verilen kimyasal bir süreci incelemiştir. PGA çimento tanelerinin yuvarlaklığını ve inceliğin arttırmasının yanı sıra, çimentonun akışkanlığının geliştirilmesine de katkı sağlamıştır [111].

Zhang vd., kompoze çimentoya öğütme kolaylaştırıcı olarak atık gliserin (WG), endüstriyel lignin (IL) ve şeker kamışı (CM) kullanmıştır. Bu katkıları çimento ile tek başına ve kombine öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanarak performans değerlendirmesi yapmıştır. Kompoze çimento üretiminde öğütme kolaylaştırıcı maddelerinin kullanılması, hidrasyon reaksiyon derecesini hızlandırabilir ve ürün



yapısının sıklığını yada düzgünlüğünü iyileştirebilir olduğu açıklanmıştır. Araştırma sonucunda atık gliserin (WG), endüstri lignin (IL) ve şeker kamışının (CM) öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılacağı belirlenmiştir [112].

Klinker öğütülmesi sırasında, yeni kırılmış yüzeylerde yüksek reaktif pozitif ve negatif yükler oluşur. Sonuç olarak, katı tanelerin Van der Waals kuvveti ve elektrostatik çekim nedeniyle topraklanma olayı meydana gelir. Bu durum öğütme ortamında kaplamalar oluşmasına ve öğütme verimliliğinin azalmasına yol açar [113-115]. Kullanılan öğütme kolaylaştırıcılar tane yüzey durumu dönüşümü nedeniyle, yeni yükler nötrleştirilir yada çekim yüzey kuvvetleri perdelenir ve tanelerin daha düşük yüzey sertliği ile daha iyi dağılma yeteneğine yol açar [101].

Öğütme işleminde çeşitli öğütme kolaylaştırıcıları kullanılmaktadır. Avrupa'da kullanılan öğütme kolaylaştırıcılar ülkeler arasında farklılıklar göstermektedir. Tablo 2.3'de öğütme kolaylaştırıcıları ve formülleri sunulmaktadır [116].

**Tablo 2.3.** Öğütme kolaylaştırıcılar

Bileşik	Kısaltma	Formül
Dietanolamin	DEA	$\text{NH}-(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_2$
Trietanolamin	TEA	$(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3\text{N}$
Triizopropanolamin	TIPA	$[\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2]_3\text{N}$
Aminoetanolamin	AEEA	$\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)-\text{OH}$
Trietilentetramin	TETA	$\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}_2$
Tetraetilenpentamin	TEPA	$\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}_2$
Etilenglikol	EG	$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$
Dietilenglikol	DEG	$\text{HO}-(\text{CH}_2)_2-\text{O}-(\text{CH}_2)_2-\text{OH}$
Hidroksietil dietilentriamin	HEDETA	$\text{NH}_2-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{NH}-(\text{CH}_2)_2-\text{OH}$
Fenol	-	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$

Öğütme kolaylaştırıcılar arasında; Trietilentetramin (TETA), tetraetilenpentamin (TEPA) gibi alifatik aminler ve dietanolamin (DEA),

trietanolamin (TEA), tri-izopropanolamin (TIPA) gibi aminalkoller bulunmaktadır. Glikol bileşikleri, etilenglikol (EG), dietilenglikol (DEG) temsil edilmektedir. Buna ek olarak, aminoetiletanolamin (AEEA) ve hidroksietil dietilentriamin (HEDETA) gibi daha karmaşık bileşikler de vardır. Fenol ve fenol türevleri öğütme kolaylaştırıcı olarak da kullanılır [116]. Ayrıca melas, mısır şurubu, polimerik alkol karışımı gibi sanayi yan ürünleride öğütme aşamasında kullanılmaktadır [95].

Alkolaminlerin ticari formülasyonları genellikle mono, di ve trialkanolaminlerin karışımlarını içerir. Moleküldeki alkol ve aminler fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemektedir. Dietanolamin ve trietanolamin bu bileşiklerin basit üyesidir [117].

Etanolaminler birkaç endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır: tekstil endüstrisinde, gaz saflaştırma proseslerinde, zirai mücadele ilaçları için çözücü madde olarak, tarım kimyasallarının uygulanmasında dağıtıcı katkı maddesi olarak, emülsiyonlaştırıcı katkı maddesi olarak, kauçuk endüstrisinde poliüretan üretiminde katalizör olarak, korozyon inhibitörleri, pigment dağıtıcılar ve diğer kimyasal ürünler için ara ürünler olarak kullanılır. İzopropanolamin orta derecede kuvvetli bir baz oluşturmak için kullanılır [116].

Dietanolamin tehlikeli bir hava kirleticisi olarak sınıflandırılmıştır. Trietanolamin çimento endüstrisinde çeşitli nedenlerle kullanılır. TEA'nın miktarına bağlı olarak, çimento üretim sürecinde farklı davranışlar görülmektedir. Portland çimentosuna %0.02'lik TEA katkısı priz hızlandırıcı olarak işlev görür. TEA oranının %0.25 olması durumunda hafif priz geciktirici olarak işlev görür, %0.5 TEA ise kuvvetli priz geciktirici olarak işlev görürken %1 oranında çok güçlü priz hızlandırıcı görevi görmektedir [118]. Trietanolamin asetat da öğütme kolaylaştırıcıların bir türüdür [119]. TEA'nın çimento hidrasyonunda etki mekanizması tam olarak anlaşılammıştır. TEA zayıf bir bazdır ve sulu fazda çoğunlukla moleküler haldedir. TEA, yüksek alkalın ortamda  $Fe^{3+}$  gibi bazı metal iyonlarıyla kenetleme kabiliyetine sahiptir [120]. TEA,  $C_3A$ 'nın Portland çimentosunda kalsiyum sülfat ile reaksiyona girmesini hızlandırabilir, ancak TEA eklenmesi, daha yüksek bir çimento üretim

maliyetine yol açarak, harmanlanmış çimento öğütme işlemi için beklenen kadar etkili olmaz [111,121–123]. Yüksek dozda TEA kullanımı priz başlangıç süresinde kuvvetli hızlanma etkisi yaratır ve trikalsiyum alüminat hidrasyonunda etrenjit oluşumuna sebep olur [53]. 1000 ppm ile 10.000 ppm arasındaki dozajları içeren çalışmalar, TEA'nın C<sub>3</sub>A hidrasyonunu ve C<sub>3</sub>A alçıtışı sisteminde etrenjit oluşumunu hızlandırdığını, ancak C<sub>3</sub>S hidrasyonunu geciktirdiğini göstermektedir [124,125]. Bu, TEA'nın esas olarak C<sub>3</sub>A ve jipsin var olduğu çimento hidrasyonu sırasında C<sub>3</sub>A'yı etkilediği anlamına gelir. Moleküler seviyelerdeki çalışmalar, TEA'nın hidratlı çimento boşluk çözeltisinde metal iyonlarıyla (örneğin Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> ve Ca<sup>2+</sup>) etkileşime girdiğini gösterir [126–128]. TEA ile etkileşimde olan metal iyonları (Fe<sup>3+</sup> ve Al<sup>3+</sup>) muhtemelen hızlandırılmış C<sub>3</sub>A hidrasyonuna neden olur. TEA, kalsiyum iyonlarıyla (Ca<sup>2+</sup>) etkileşime giremez ancak oluşan portlandit morfolojisini değiştirir. TEA gibi amino alkollerin metal iyonlarıyla etkileşim mekanizması kompleksleşme tepkimesine dayanır. Burada amino alkoller bir elektron çifti donörü olarak işlev görür [129,130].

Aminoetiletanolamin (AEEA), etanol aminlerinin bir bozunma ürünüdür. Ticari ürün olan aminoetanolamin, normal karışımlar yerine saf bir tekil bileşik ürünü olarak da bulunabilir. Su içerisinde az çözünmektedir [131].

Etilenamin TETA ve TEPA; asfalt katkı maddeleri olarak, korozyon önleyiciler, hidrokarbon saflaştırmada, epoksi kürlenme maddeleri, sürfaktanlar, dağıtıcılar, kenetleme maddeleri, katalizörler, tekstil katkı maddeleri ve yakıt katkısı olarak kullanılırlar. TETA ve TEPA'nın ticari ürünleri genellikle alkanoaminlerin karışımlarıdır ve tek, saf bileşik olarak bulunmazlar. TEPA su içine tamamen karışabilir ancak biyolojik olarak parçalanamaz. Hidroksietil-dietilentriamin (HEDETA) ise suda çok çözünme özelliğine sahiptir [116].

Glikoller akışkanlaştırıcı ve polyester reçineleri, nemlendiriciler ve tekstil yağlarının üretimi için hammadde olarak kullanılır. Büyük miktarda etilen glikol, otomobil motor antifrizi/soğutucusu olarak tüketilir. Dietilen glikol (DEG), higroskopikliğinden dolayı doğal gaz için dehidratasyon katkısı olarak kullanılır. Buna ek olarak, alkil tipi reçinelerin üretimi için glikoller kullanılır. Glikol, iki

hidroksil grubunun farklı karbon atomlarına bağlandığı bir dihidrik alkoldür; Glikolün genel formülü  $(CH_2)_n(OH)_2$ 'dir. En önemli glikol en basit olarak etilen glikoldür (EG). Etilen glikol ve trietilen glikol (TEG) biyolojik olarak asetat, etanol ve amonyuma parçalanmaktadır [132].

Fenol öncelikle fenolik reçinelerin oluşturulmasında kullanılır. Aynı zamanda naylon, reçine ve sentetik elyafların imalinde, tortu önleyici ve dezenfektan olarak, antiseptik olarak ve tıbbi preparatlarda kullanılır. Fenol ayrıca organik maddenin doğal ayrışması sırasında oluşur. Fenol suda sınırlı bir çözünürlüğe sahiptir. Fenol ve mono-ikameli fenoller tipik olarak 9-11 aralığında bir pKa'ya sahiptir [133]. Fenol molekülü hidroksil grubundaki  $H^+$  iyonunu kaybetme eğilimindedir. Bu olayın sonucunda suda yüksek çözünme özelliğine sahip fenolat anyonu ( $C_6H_5O^-$ ) oluşur. Alifatik alkollerle karşılaştırıldığında, fenol daha yüksek asidite gösterir. Fenollerin özellikleri ve davranışı, aromatik doğasından çok etkilenir. Fenoller adı verilen bileşik grubu, benzen monohidrik, dihidrik ve polihidrik türevleri de dahil olmak üzere geniş bir yelpazedeki bileşikleri kapsar. Fenoller ve özellikle klorofenolik bileşikler çevre oldukça zarar vermektedir. Sonuç olarak, içme suyundaki fenolün güvenlik sınırı, ABD, EPA ve AB tarafından belirtilmiştir [116].

Günümüzde aşağıda verilen üç gereksinimi karşılaması gereken yeni öğütme kolaylaştırıcı maddelerin üretimi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda alternatif olarak beton üretiminde kullanılan polikarboksilat eter (PCE) esaslı katkı maddeleri kullanılmaktadır [134].

Öğütme verimliliğinin artırılması: Çimento üretiminin ön şartıdır

- Çimento mukavemetinin artırılması: Özellikle kompoze çimentolarda, mukavemet gelişimi geçerli standartlara uygun olmalıdır.
- Çimentonun su ihtiyacını (kıvam suyu) geliştirilmesi: Yeni öğütme kolaylaştırıcılar çimentoya uygun su talebini sağlamalıdır. Ayrıca, çimento- katkı uyumu arasında herhangi bir olumsuzluğa yol açmamalıdır.

PCE dünya genelinde beton üretimi esnasında su azaltıcı olarak kullanılmaktadır. Ancak bazı araştırmalar PCE'leri çimento öğütme kolaylaştırıcı olarak kullanılacağını ön görmüştür. Sonuçlar, PCE'lerin TEA'ya kıyasla eşit öğütme verimi sağlayabilmesi ve çimentonun mukavemet gelişimini iyileştirebildiğini göstermektedir [111,134–136]

Kompoze çimentoların erken yaş dayanımını arttırmak için, trietanola min (TEA), dietanol-izopropanol-amin (DEIPA), kalsiyum klorür ( $\text{CaCl}_2$ ) ve sülfatlar ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  veya jips) gibi çeşitli kimyasallar kullanılabilir [137–139]. Ancak bu katkı maddelerinin ilavesi, çimento üretim maliyetinin yükselmesine veya beton yapıların dayanıklılığını etkileyen çok sayıda zararlı iyonun ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{SO}_4^{2-}$ ) ortaya çıkmasına neden olabilir [24]. Diğer taraftan kompoze çimentoların erken yaş dayanımı, klinker veya mineral katkıların daha yüksek derecede öğütülmesi ile iyileştirilebilir [140,141].

Öğütme kolaylaştırıcılar, çimento üretiminde ve seramik, pigment vb. gibi birçok alanda yıllarca başarıyla kullanılmıştır. Temel etki enerji tüketimini azaltmak ve öğütme verimliliğini arttırmaktır. Ayrıca toz akışkanlığı ve bağlayıcının mukavemet gelişimi gibi ek özelliklerde geliştirilmektedir. Öğütme kolaylaştırıcılarda bulunan maddelerin etkin bir şekilde öğütmeye etkisi konusunda şaşırtıcı derecede doğrulanmış bilgiler mevcuttur. Bilimsel literatürde olduğu kadar endüstriyel uygulamalarda da birçok hipotez vardır. Temelde fiziksel ve kimyasal altyapıyla başlayarak, yüzlerce bileşiği ve karışımları kapsayan laboratuvar deney süreci ve yaygın bilgisayar simülasyonları, öğütme kolaylaştırıcı maddelerin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu sayede daha yeni ve verimli, özelleştirilmiş katkılar tasarlamak mümkündür [142,143].

#### **2.4. Çimento Üretimi ve Öğütme**

Betonda kullanılan çimentonun üretimi esnasında klinker için yoğun bir enerji kullanılmaktadır. Bu süreçte dünya enerjisinin yaklaşık %2'si harcanmaktadır [144]. Genellikle 1 ton çimento üretiminde 0.8 ton  $\text{CO}_2$  emisyonu olduğu belirtilmektedir

[145]. Aslında, tahminler Portland çimentosunun global CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %5-8'inden sorumlu olduğunu göstermektedir [146].

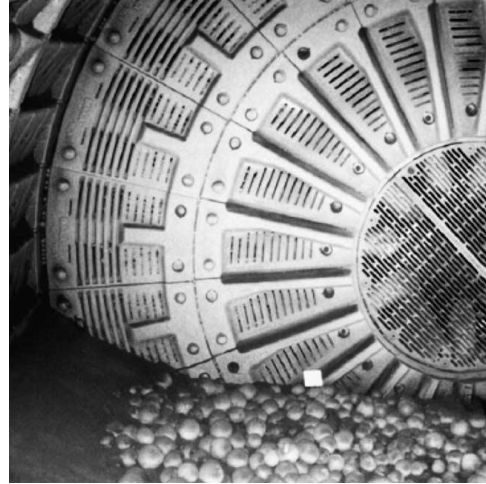
Çimento üretim süreci tipik olarak şu şekilde özetlenebilir;

- Kapalı devrede kireç taşı (ve doğru kimyasal bileşimi elde etmek için diğer hammaddeler) yaklaşık %90'ı 90µm'dan geçecek şekilde öğütülür.
- Öğütülmüş karışımın bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonla çimento üretmek için hammaddeler döner fırında yüksek sıcaklıkta pişirilir,
- Çimento klinkeri kapalı devrede tamamı 90µm'dan geçecek şekilde öğütülür.

Öğütme, çimento üretim sürecinin başında ve sonunda gerçekleşir. 1 ton çimento üretmek için yaklaşık 1.5 ton hammadde gereklidir. Üretim maliyetleri ve çevresel kaygılar, daha az enerji kullanmak dolayısıyla öğütme ve sınıflandırma için daha enerji verimli makinelerin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır [147]. Çimento üretimi için tüketilen dünya enerjisi, ABD madencilik endüstrisinde öğütme için kullanılan enerjiye benzerdir ve bu da dünya toplamının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bununla birlikte, çimento endüstrisinde, öğütme işlemi mühendislikten ziyade bir "sanat"tır ve ekipman imalatçıları sadece "bilgi"yi barındırır.

Çimento üretimi yaklaşık 830-1100 kWh/t enerji gerektiren yoğun bir endüstridir. Yakıt enerjisi bu toplam spesifik enerji tüketiminin yaklaşık %90'ını temsil eder ve elektrik enerjisinin payı yaklaşık %10'dur. Geleneksel çimento üretim sürecinde tüketilen elektrik enerjisi, ton çimento başına tipik olarak 95 ila 110 kWh'dir [148]. Bu elektrik enerjisinin yaklaşık %70'i, çimento hammaddelerinin kırılması ve öğütülmesi, klinkerin öğütülmesi gibi işlemler için kullanılır. Klinker öğütme aşaması, çimento üretiminde tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %40'ını oluşturur. Bu kadar yüksek düzeyde enerji talebi ve geleneksel bilyalı öğütme işleminin doğal olmayan enerji verimsizliği nedeniyle çimento endüstrisi, enerji tüketimini azaltabilecek yeni öğütme değirmeni tasarımları ve öğütme sistemi konfigürasyonları için sürekli araştırmalar yapmıştır [149].

Yirminci yüzyılın çoğunda klinkerden çimento üretimi için kapalı öğütme devreleri, iki bölmeli tüp değirmenler ve hava ayırıcılar kullanılır. Açık bir devrede çimento üretmek çok yaygın değildir. Çimento öğütme teknolojisindeki gelişmeler yavaştır ve bu gelişmeler de daha gelişmiş ülkelerle sınırlı kalmıştır. Çimento öğütme devresindeki beslemenin yaklaşık %95'i klinker, geri kalan kısım ise alçıtaşı ve öğütme yardımcıları içeren "katkı maddeleri" dir. Çimento kalitesi yüzey alanı veya Blaine indeksi ile ölçülür. Blaine indeksinin birimi  $m^2/kg$ 'dır ve bu indeks Blaine hava geçirgenlik testi ile belirlenir. En uygun çimento özelliklerine ulaşmak isteniliyorsa, 2150-2400  $cm^2/g$  aralığında özgül yüzey alanı ile ifade edilen tane inceliğini korumak gerekmektedir [150]. Çimento tozunun yüzey alanı çimento taneleri boyut dağılımına bağlıdır; Daha küçük taneler daha büyük yüzey alanına sahiptir. Tane boyutu dağılımı biliniyorsa, Blaine indeksi başarıyla tahmin edilebilir [151]. Tane boyutunu azaltma, iki bölmeli değirmende yapılır; Değirmenin ilk bölümü ikinci bölmeden daha kısadır. Kaba klinker, ilk bölmede öğütülür ve burada daha büyük bilyalar (80, 60, 50mm) kullanılır. İnce öğütme işlemi, daha küçük bilyaların (25mm'nin altında) kullanıldığı ikinci bölme içinde yapılır. Çimento öğütme işleminde kullanılan bilyalı değirmene ait kesit Şekil 2.2'de verilmiştir. Öğütülen malzeme öğütücü bilyaların değirmenden ayrılmasını önleyen deşarj ızgarası aracılığıyla değirmenden çıkar [147].



**Şekil 2.2.** Çimento öğütme prosesindeki bilyalı değirmen kesiti

Çimentoların inceliğini arttırmak dayanım gelişimi açısından önemli bir faktördür. Ancak çok ince çimentolar depolandığı takdirde daha kolay topaklaşma eğilimi göstermektedir. Öğütme sonucu inceliğin artması, hidrasyon ısısı üretiminin hızını artırır. Büzülme sonucunda ince çatlaklar oluşturma eğilimi artar ve bu nihai ürünlerin mekanik özelliklerinin kaybedilmesiyle kendini gösterir. Bu etkiler çoğunlukla tane boyutunun 7 µm altında olduğu takdirde ortaya çıkar. 2 µm'dan küçük taneler oldukça hızlı bir şekilde sertleşir ve bu durumda kullanılan priz geciktiriciler reaksiyonları yavaşlatamaz. Bu nedenle, klinkerin aşırı öğütülmesi enerji talebinde ve dolayısıyla çimentonun nihai fiyatında olduğu gibi diğer olumsuz özelliklerde de artışa neden olur. 0.09 mm'lik bir elekten geçen tanelerin %88-90'ından %97-100'e yükselmesiyle ortaya çıkan incelik artışı, maliyetlerin yaklaşık %50-300 oranında artmasına neden olur. Daha ince öğütme doğal olarak daha pahalıdır ve ayrıca özel katkıları olmadan yüksek incelik elde etmek kolay değildir. Portland çimentosunda, yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı 3 ile 35 µm arasında bir boyuta sahip tane dağılımı tercih edilir. Optimum çimento klinkeri öğütmenin ortak üretim göstergesi 0.09 mm'lik elekten geçen boyut dağılımının kütle fraksiyonudur. Bu dağılımın %90'dan %97'ye kadar değişmesi gerekmektedir. Bu nedenle, günümüzde 2 µm'nun altındaki taneler çok ince ve dolayısıyla yaygın yapı endüstrisi kullanımı için istenmemektedir. Bununla birlikte, üstün özelliklere sahip olan çimentolarda daha ince tanelerin kullanılması yönündeki eğilim belirgin seviyede artış göstermektedir [150].

Katı bir maddenin yüzeyinin serbest enerjisi, yetersiz yüzey bağlarının ve öğütme işlemi sırasında serbest yüzey yük yoğunluğunun artmasının bir sonucu olarak artar. Böylece, dağılan sistemin termodinamik olmayan denge durumu vurgulanır ve sonucunda serbest enerjisinin azalmasıyla dengesini yeniden kurma eğilimindedir. Başka eğilimler olmadığı takdirde, bu eğilim partiküller arasındaki veya partiküller ile diğer temas yüzeyleri arasındaki karşılıklı etkileşim nedeniyle katı sistem dağılımının artmasıyla kendiliğinden yoğunlaşır [101].

Tanelerin topaklaşması ve bunların temas yüzeylerine yapışmasına neden olan karşılıklı etkileşimler aynı zamanda tanelerin temas ara yüzeyi ile öğütme ortamındaki mikroplastik deformasyon tarafından oluşmaktadır. Aglomerasyon süreci temel olarak



klinker doğasına, çimentonun dağılma durumuna, öğütme tesisinin çalışma koşullarına, öğütme ortamının kinetik enerjisine ve dağılımına ve değirmen içindeki atmosfere bağlıdır [101].

Öğütülmüş katı kütlenin topaklaşma ve yapışma etkilerinin ortadan kaldırılması veya azaltılması; 1) öğütme ortamı boyutlarının azaltılması; 2) öğütme tesisinin kapalı devre içinde çalıştırılması; 3) sürfaktanların kullanımı olmak üzere üç ana yolla gerçekleştirilebilir [101].

Çimento sektöründe öğütme birimlerinin verimliliği çok düşüktür. Çimento partikülleri öğütme ortamını kaplayabilir, zırh kaplamasını kaplayabilir, aglomerasyon oluşturabilir ve etkisini emen küçük plakalar oluşturabilir. Öğütücü maddenin dönen bir değirmen içindeki hareketi sadece mevcut klinker tanelerini ezmele kalmaz aynı zamanda zıt kutupların elektrostatik yüzey yüklerinin oluşmasına yol açarak onların topaklaşmasına neden olur. Sonuç olarak çimentoda oluşan aglomerasyon değirmenin öğütme verimliliğini düşürür. Bu olay, sabit Blaine değerini korurken enerji tüketiminde bir artış ile karakterize edilir. Aglomerasyon derecesi aşağıdakilere bağlıdır [95]:

- Öğütülecek malzemelerin spesifik özellikleri,
- Değirmenin çalışma parametreleri,
- Öğütme ortamının etkinliği ve dağıtımı,
- Çimento tanelerinin inceliği,
- Değirmenin iç çalışma koşulları (Nem, sıcaklık, havalandırma, zırh kaplamasının durumu vb.).

Çimento endüstrisinde bilyalı değirmenin yanı sıra yüksek basınçlı öğütme merdaneleri, dikey değirmenler ve Horomill gibi farklı öğütme mekanizmalarına sahip farklı değirmen türleri kullanılmaktadır. Özellikle yüksek basınçlı öğütme merdaneleri, çimento endüstrisinde neredeyse 30 yıldır, spesifik enerji tüketimini %40'a kadar düşürme kabiliyeti nedeniyle büyük bir ilgi görmüştür. Son yıllarda

yüksek basınçlı öğütme merdaneler maden endüstrisinde de kullanılmaktadır, çünkü enerji tasarruflarına ek olarak mineral geri kazanımına neden olan bazı bileşenlerin serbestleşmesini de geliştirmektedir. Yüksek basınçlı öğütme merdanelerinde öğütme ile açığa çıkan bakır, altın, elmas ve demir gibi cevherlerin bazı türleri ile alt süreçler üzerindeki etkileri literatürde belirtilmiştir [152]. Yüksek basınçlı değirmenlerde giren enerji sıkıştırılmış yatağın içinde yerel olarak üretilen çok büyük taneler arası gerilimlerle parçalanmanın gerçekleştiği sıkıştırılmış bir partikül yatağına doğrudan aktarılır. Yüksek basınçlı değirmenler genellikle bilyalı değirmenlerde öğütülen ürün boyutundan daha kaba halde kalan taneleri azaltmak için ilk öğütme üniteleri olarak klasik bilyalı değirmen sistemlerinden önce kullanılabilir. Bu öğütme kombinasyonu, malzemeyi taşıma ünitesi (kayışlı konveyör, asansör ve hava slaytları), hidrolik sistemler ve hava sınıflandırıcıları gibi birçok ekipmanı gerektirir ve bu çok sayıda ekipman öğütme işlemini karmaşık bir yapıya sokabilir. Bununla birlikte, bir hava sınıflandırıcı ile kapalı devrede çalışan Horomill, kombine öğütme sistemlerinin operasyonel dezavantajlarının üstesinden gelmek için karşılaştırılabilir enerji verimliliği sağlarken tek aşamalı bir öğütme ünitesi olarak piyasaya sürülmüştür. Bilyeli değirmenler ile karşılaştırıldığında, dikey merdaneli değirmenler %30'a varan bir enerji tasarrufu, yatay merdaneli değirmenleri %35'e kadar ve yüksek basınçlı merdaneli değirmenler ise %50'ye varan oranda bir enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ancak bu karşılaştırma değirmenin güç tüketimini yansıtır ve hava sınıflandırıcı konveyörler ve toz filtreleri gibi yardımcı ekipmanları içermez [153,154].

Sadece incelik ve tane boyutu dağılım parametreleri çimentonun servis özelliklerini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda kimyasal, mineralojik ve mikro yapısal parametreler, özellikle mukavemet gelişimi üzerinde önemli bir role sahiptir.

Enerji tüketiminin yanı sıra öğütme sistemi, çimentonun tane boyutu dağılımı ve tane şeklinin yanı sıra, klinker fazlarının reaktivitesi ve jipsin klinker ile birlikte bulunduğu sıcaklığa bağlı dehidratasyon derecesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tüm bu faktörler sırasıyla su ihtiyacı, priz başlangıç ve bitiş süreleri ve dayanım gelişimi gibi çimento özelliklerini etkilemektedir [151,155].

Yüksek spesifik enerji talebine rağmen, hava ayırıcıları ile kapalı devrede bulunan iki komponentli bilyalı değirmenler, güvenilirliği ve çimentonun olumlu özelliklerinden dolayı geleneksel olarak çimento öğütülmesi için günümüzde en sık kullanılan yöntemdir. Bilyalı değirmenler verimsiz enerji özelliğine sahip öğütme değirmenleridir. Topların/bilyaların dönmesi sonucu sürtünmeden dolayı ısı biçiminde kayda değer enerji kaybı yaşanmaktadır. Bir bilyalı değirmenin enerji verimliliği, bilya doldurma oranı, değirmen uzunluğu/çap oranı, bilya şarjının boyut kompozisyonu, dolaşım oranı ve ürünün inceliği gibi bir takım faktörlere bağlıdır [148].

Literatür incelemesi, mevcut çimento öğütme sistemlerinin bazı enerji bazlı karşılaştırmalarının yapıldığını göstermektedir. Örneğin, Schnatz ve Knobloch, kombineli öğütme sistemi kullanmış, yüksek basınçlı merdaneli değirmen ve bilyalı değirmenler için sırasıyla 10.93 kWh/t ve 16.28 kWh/t'luk spesifik enerji tüketimlerini belirlemiştir. Elde edilen çimento 140 t/h üretim hacmine sahip olup 3970 cm<sup>2</sup>/g Blaine değerinde CEM I 42.5 tipi çimento sınıfına girmektedir [156].

Seebach vd., 192.7 t/h'lik bir verimle 3200 cm<sup>2</sup>/g Blaine inceliğindeki çimento için geleneksel bir kapalı devre bilyalı değirmen ve kapalı devre bir yüksek basınçlı merdaneli değirmen kullanmışlardır. Kombine öğütme işleminin ana ekipmanı için spesifik enerji tüketiminin 22.2 kWh/t olduğu rapor edilmiştir. Kombine öğütme işlemi çimentosu ile aynı incelikte çimentolar üretmek için yalnızca yüksek basınçlı merdaneli değirmen sistemi veya bilyalı değirmen sistemi çalıştırıldığında, yüksek basınçlı merdaneli değirmende yalnızca üretim hacmi 122.4 t/h'ye düşürülmüş ve bilyalı değirmende 72. t/h'ye düşürülmüştür. Yüksek basınçlı merdaneli değirmen 18.8 kWh/t ve bilyalı değirmen 35.7 kWh/t'lik spesifik enerji tüketimlerine sahiptir. Bununla birlikte, yukarıda bahsedilen çalışmalar, üretilen çimentoların harç özelliklerinin herhangi bir karşılaştırmasını içermemektedir [154].

Yatay merdaneli değirmen sistemlerinin enerji tüketimi hakkında rapor edilen nispeten daha az endüstriyel sonuç vardır. Torino Çimento'da yapılan uygulamaya göre yatay öğütücü ile (Horomill) farklı Blaine inceliği ve değirmen besleme bileşimlerine sahip çeşitli çimento türlerinin üretimi için incelemeler yapılmıştır.

Optimize edilmiş bir maddenin spesifik enerji tüketimi ile karşılaştırıldığında yatay merdaneli değirmenin bilyalı değirmenlere göre %35-40 arasında enerji tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir [157]. Enerji tüketimi yalnızca değirmen için 15.4-23.4 kWh/t aralığında ve öğütme tesisi için 19.2-30.3 kWh/t aralığında değişirken, üretim hacmi 19.7-30.0 t/h aralığında değişmektedir. Horomill ile üretilen çimentonun su ihtiyacı (aynı harç dayanımına sahip) bilyalı değirmen çimentosuna göre %2 daha yüksek elde edilmiştir [157].

Kompoze çimento üretiminde öğütme ayrıca önem kazanmaktadır. Çok bileşenli bir çimento için öğütme, birlikte veya ayrı tekniği ile yapılmaktadır. Bu iki teknik arasındaki ana fark birlikte öğütme yapıldığı takdirde öğütme sırasında bileşenlerin birbirleriyle etkileşimde bulunmasıdır. Bileşenler arasındaki fiziksel etkileşimler çoğunlukla öğütülebilirlikteki görece farklılığa bağlıdır. Bu etkileşimler öğütme sürecine yardımcı olabilir veya engelleyebilir ve farklı bileşenlerin boyutlarını ve öğütülmüş ürünlerin tane dağılımı büyüklüğünü etkileyebilir. Bu etkileşimlerin sonucunda, kompoze çimentoların tane büyüklüğü dağılımı (PSD), ayrı ayrı öğütülmüş çimentoların tane büyüklüğü dağılımından farklıdır [158].

Schiller ve Ellerbrock, herhangi bir bileşenin PSD'sinin diğer maddelerin öğütülebilirliğini büyük ölçüde etkilediğini bulmuşlardır. Öğütmesi daha zor olan bir bileşen daha iri fraksiyonlarda olurken öğütmesi daha kolay olan bir bileşen daha ince fraksiyonlarda konsantre hale gelmektedir. PSD, su ihtiyacı, ısı yayılımı, dayanım gelişimi ve erken yaş boyutsal kararlılık gibi taze betonun özelliklerini belirleyen reolojik ve erken yaş hidrasyon özelliklerini etkiler. Birlikte öğütmenin, özellikle yüksek incelikte ürünler üretmek için, ayrı öğütmeden daha az enerji gerektirdiği tespit edilmiştir [159–161].

Genel olarak öğütme yönteminin ve PSD'nin çimento esaslı malzemelerin erken yaş özelliklerine olan belirgin etkisine rağmen, bu konuda özellikle betonun dayanıklılık özelliklerine ilişkin sınırlı araştırmalar yapılmış ve yayınlanmıştır. Ghiasvand vd. puzolanlı çimentolarda tras kullanarak durabilite özelliklerini araştırmış ve şu sonuçları elde etmiştir; puzolanlı çimentolarda tras varlığı tane boyutu dağılımını

geliştirmiştir. Çimentoların inceliği dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Yüksek inceliğe sahip çimentoların kullanımı ekonomik açıdan faydalı olmamıştır [158].

Beton santrallerinde üretilen betonlarda, 3800 cm<sup>2</sup>/g Blaine'den sonra su/çimento oranının artmasıyla standart kaliteyi sağlamak için daha fazla çimento kullanımına ihtiyaç duyulur. Faydalı model sistemi aynı kaliteyi diğer sistemlerden daha düşük Blaine'de gerçekleştirdiği için özel projelerde ve düşük girdi kaliteli malzeme kullanımında da avantaj sağlar [162].

Klinkerin öğütülmesi yalnız mekanik bir olay olarak irdelenemez, aynı zamanda klinkerin yüzeyinde önemli rol oynayan kompleks fiziko-kimyasal bir davranış söz konusudur. Genel olarak klinkerin öğütülebilirliği Silikat Modülü ( $SM = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ ) arttıkça düşer,  $Al_2O_3$  ve  $Fe_2O_3$  miktarıyla doğru orantılıdır, alit miktarıyla lineer artar. Ayrıca öğütmeye yardımcı maddelerin de öğütmeye önemli derecede etkileri vardır [163].

Başka bir araştırmada klinkerin öğütülebilirliğinde kimyasal ve mineralojik bileşiminin önemi açıklanmıştır. SM (Silikat Modülü),  $Al_2O_3$  ve serbest CaO miktarının yükselmesiyle öğütülebilirliğin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum aynı hammaddeler ve aynı proses koşullarında geçerlidir. Metalik parçacıklar ve  $Fe_2O_3$  mikroçatlakların oluşumunu ve büyümesini sağlayarak öğütülebilirliği artırır. Duda'ya göre yüksek miktardaki  $C_3S$  (alit) öğütülebilirliği artırır, yüksek miktardaki  $C_2S$  (belit) ise azaltır. Ayrıca  $(C_3S/C_2S)$  oranı veya silikatların ara fazlara oranı,  $(C_3S+C_2S)/(C_3A+C_4AF)$ , azaldığında öğütme zorlaşır ve enerji harcaması artar. Öğütülebilirliğe kimyasal ve mineralojik bileşenlerin yanında mikroyapının da etkisi vardır. Mikroyapının oluşumunda ısıtma ve soğutma hızları ve fırın tipide etkilidir. İnce kristalli yapı, özellikle küçük kalsiyum silikat kristalleri öğütmeyi iyileştirir. İri kristaller yalnız parçalanmayı zorlaştırmaz, aynı zamanda kırılma alanlarının sayısını artırır. Böylece yüzey alanı aktivitesi artarak aglomerat oluşur ve enerji kayıpları artar [163].

Çabuk soğutulmuş klinkerin öğütülmesi daha kolaydır. Hızlı soğutulan klinkerin iyi öğütülmesi içermiş olduğu fazla mikrogözeneklerden dolayı daha kolay olur. Klinkerde belit yuvalarının büyük gözenekliliğe sahip olması öğütülebilirliğine olumlu bir katkı sağlamadığı gözlenmiştir. Hatta öğütmenin son aşamasında bile belit kümelerinin zarar görmediği görülmüştür [164,165].

Ono; öğütülebilirlik ile ilgili yaptığı bazı ön çalışmalarda, yanma koşulları, klinker mikroyapısı şöyle sıralanmıştır.

- Hidrolik modülün yüksek olması (HM)  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  daha kolay öğütülebilmesini sağlar.
- Klinker ince toz fraksiyonu alit parçaları bakımından zengindir. Kaba kısımda bulunan küçük taneli kahverengi renkli aglomerlerin çevresi belitçe zengindir.
- Yüksek yoğunluklu ve iyi yanmış klinkerin kaba öğütülebilirliği (1-2 mm) zor olup, ince öğütülebilirliği (<88 mikron) kolaydır [166].

#### **2.4. Sülfat Etkisi**

Sülfat hasarı betona en çok zarar veren hasar türlerinden birisidir. Sülfat etkisine dayanıklı beton tasarımı için birçok strateji geliştirilmiştir. Sülfat atağını hafifletmek, için daha az alüminat fazı içeren bağlayıcıların kullanılması uygun olmaktadır. Etrenejit, yalnızca alüminat mevcutsa oluşabilir, bu nedenle daha az alüminat daha az etrenjit anlamına gelmektedir. Kanada çimento endüstrisi MS (Moderate sulfate resistance) ve HS (High sulfate resistance) tipi iki çimento sınıfı üretmektedir. Bu çimentolarda alüminat ve iç sülfat miktarında çeşitli kısıtlamalar bulunmaktadır. Çimentolara getirilen bu kısıtlamalar klinkerin üretimi esnasında uygulanmaktadır. Fakat bu çimentoların priz başlangıç sürelerinin uzun olması dezavantaj olarak ön plana çıkmaktadır. Mineral katkı kullanımı sülfat direncini arttırmaktadır. Ancak metakaolin kullanımı sülfat direnci için etkili bir yöntem değildir. Çünkü metakaolin'in yaklaşık %30'u  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşmaktadır. Eğer metakaolinden sülfata dayanıklı çimento üretilecekse kullanım oranı %5'i geçmemelidir. Metakaolin katkılı betonların magnezyum sülfatta daha çok hasar

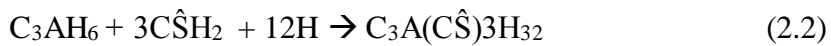
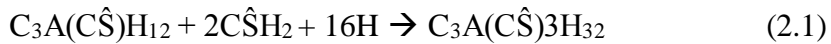
gördüğü yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. Sülfata dayanıklı beton üretmek için, s/ç oranını düşürmek oldukça etkili bir yöntem olarak bilinmektedir [167].

#### 2.4.1. Sülfat Tipleri

Çeşitli sülfat tuzlarının etkisi ile betonda kompleks bir süreç olan sülfat hasarı başlamaktadır. Beton ile etkileşime giren en yaygın sülfat tuzları şiddet etkisine göre kalsiyum, sodyum ve magnezyum sülfat olarak sıralanmaktadır. Sülfat tuzlarının her biri ayrı ayrı ele alınarak etkileri incelenmelidir. Ancak yeraltı suları ve toprak etkisine maruz betonlarda karışık sülfat tuzlarının (iki ve ikiden fazla) bulunabileceği unutulmamalıdır [168].

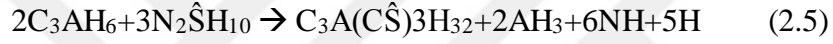
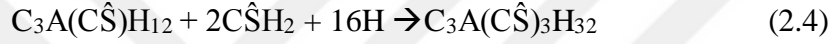
##### 2.4.1.1. Kalsiyum Sülfat

Kalsiyum sülfatın (alçıtaşı) genel olarak düşük çözünürlüğünden dolayı diğer sülfat tuzlarına göre daha az agresif etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Alçıtaşının çözünürlüğü (yaklaşık 1440 ppm) sodyum ve magnezyum sülfattan oldukça düşüktür. Alçıtaşı çözünürlüğü konusunda ve sülfat etkisi üzerinde iki farklı teori bulunmaktadır. Birinci teori, alçıtaşının düşük çözünürlüğü yeraltı sularındaki (veya toprağın boşluk suyundaki) konsantrasyonunu sınırlamaktadır. Oluşan düşük sülfat konsantrasyonu betonda oluşacak potansiyel hasarı azaltmaktadır [168]. İkinci teori, kalsiyum sülfat iyonlarının betonun yüksek alkali boşluk çözeltisi ile karşılaştıkça çözünürlüğünün artmasıdır. Ayrıca, yüksek sülfat konsantrasyonları daha sonra agresif etki olarak çimento hidratasyon ürünlerinden C-S-H yapısını olumsuz etkileyebilir [168]. Aşağıda verilen Denklem 2.1'e göre kalsiyum sülfat, monosulfoalüminat ve su ile etrenjit oluşturmak üzere reaksiyona girer. Oluşan etrenjit beton bünyesinde genleşmelere ve çatlak oluşumuna yol açar. Kalsiyum sülfat aynı zamanda, Denklem 2.2'de gösterildiği gibi etrenjit oluşturmak üzere trikalsiyum alüminat ile reaksiyona girer.



#### 2.4.1.2. Sodyum Sülfat

Sodyum sülfat bağlayıcı fazı daha çok etkilediği için kalsiyum sülfattan daha karmaşık bir saldırı etkisi oluşturmaktadır. Sodyum sülfat betonda iki farklı aşamada etki göstermektedir. İlk aşamada (Denklem 2.3) alçıtaşı oluşturmak için kalsiyum hidroksit ile (portlandit) sodyum sülfat reaksiyona girmektedir. İkinci aşamada alçıtaşı monosülfalüminat ile reaksiyona girerek (Denklem 2.4) etrenjit oluşturmaktadır. Kalsiyum hidroksit tükendikten sonra alçıtaşı oluşumu sonlanacaktır. Monosülfalüminat tükenince, sistemde fazladan alçıtaşı oluşacak ve etrenjit oluşumu kesilecektir [169]. İkinci saldırı şekli (Denklem 2.5) sodyum sülfatın trikalsiyum alüminat hidrat ile reaksiyona girerek etrenjit oluşturmasıdır.



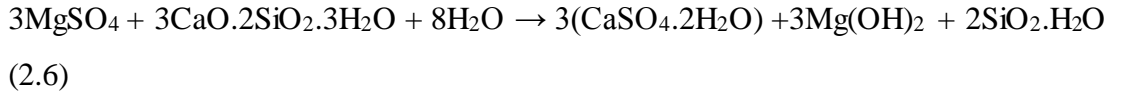
Cohen, alçıtaşı oluşumunun neden olduğu alit ( $\text{C}_3\text{S}$ ) genişmesini incelemiştir. Saf  $\text{C}_3\text{S}$  pastasında etrenjit oluşumu için herhangi bir alüminyum bileşiği bulunmamalıdır. Silis dumanlı ve çimento pastaları %5 sodyum sülfat çözeltisine yerleştirilmiştir. Sodyum sülfatta 360 gün tutulduktan sonra, silis dumansız alit macunu genişmeye başlamıştır ve X-ışını kırınım analizleri, bu genişmenin alçıtaşı oluşumundan kaynaklandığını göstermiştir. Bu bulgular, alçıtaşı oluşumunun aslında genişmeye ve tipik olarak gözlemlenen kütle kaybına yol açtığını kanıtlamıştır [170].

#### 2.4.1.3. Magnezyum Sülfat

Magnezyum sülfat etkisi diğer sülfatlara göre daha kompleksdir. Magnezyum sülfat, tüm çimento hidratasyonu ürünleriyle reaksiyona girebilir ve genel olarak en zararlı olduğu kabul edilir. Magnezyum sülfat, alçıtaşı ve magnezyum hidroksit ile reaksiyona girebilir. Ayrıca C-S-H yapısına zarar vererek yeni bir silika jel (M-S-H) oluşturmaktadır. Magnezyum sülfatın beton üzerindeki reaksiyon mekanizması Denklem 2.6'da özetlenmiştir. Magnezyum iyonları brusit  $[(\text{MgOH})_2]$ , alçıtaşı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ve serpantin ( $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5$ ) oluşmasına neden olabilir. Magnezyum hidroksit (brusit) genellikle yüzeyde olduğu için betonun korunmasını sağlayacak bir



bariyer oluşturmasının yanı sıra betonun boşluk çözeltisindeki pH seviyesinde etkilemektedir. Brusit oluşumu için yüksek miktarda kalsiyum hidroksit gerekmektedir. CH azaldığında magnezyum sülfat ortamda daha fazla kalsiyum esaslı yapıları aramaktadır. Bu durumda, kalsiyumun azalması nedeniyle magnezyum sülfat C-S-H'a etki ederek çözülmesini sağlar [170]. Denklem 2.6'da görüldüğü gibi yüksek Mg/Si oranlarında serpantin gibi magnezyum hidratlar oluşur ve bu hidratlar zayıf kristal yapıya sahip olduğu için mekanik özellikleri olumsuz etkiler [11].



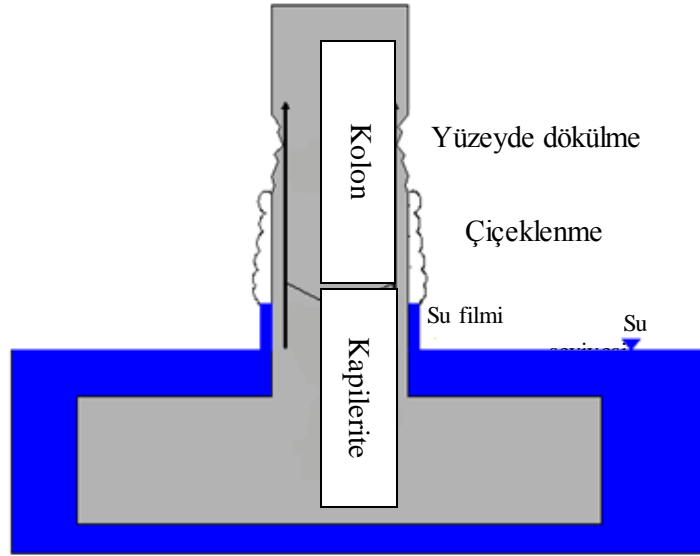
#### 2.4.2. Fiziksel Sülfat Etkisi

Yapılan çalışmalarda, kalsiyum, sodyum ve magnezyum sülfatın beton ile olan etkileşimlere bağılı olarak hidratlı çimento pastasında kimyasal değişikliklere neden olduğu belirlenmiştir. Örneğin sülfat etkileri; alçıtaşı, etrenjit oluşumuna veya C-S-H'nin dekalsifikasyonuna yol açabilir. Bununla birlikte, dışsal sülfatların tetiklediği hasar, herhangi bir kimyasal değişiklik yapılmaksızın fiziksel etkiden olabilir. Sodyum sülfat beton içerisine nüfuz ettiği takdirde betonda fiziksel tuz etkisi oluşmaktadır. Ayrıca bu esnada susuz sodyum sülfat (tenardit) ile dekahidrat sodyum sülfat (mirabilit) arasında faz değişimleri meydana gelir. Genellikle sıcaklık değişiklikleriyle tetiklenen bu faz değişiklikleri, betonda gerilmeler ve çatlamalara neden olabilecek önemli kristalleşme basınçlarına yol açar. Neville, tenarditin mirabilite dönüşmesinde, 1450-2900 psi (10-20 MPa) aralığında çevresel gerilmeler (hoop stress) oluştuğunu bildirmiştir. Bu gerilme değeri oldukça yüksektir ve kolayca betona zarar vermektedir [171].

Sülfat hasarı ile ilgili çeşitli teoriler öne sürülmüştür. Bu teorilerden birincisi katı hacim değişimi teorisidir. Bu teoriye göre, hasarın asıl nedeni tuz hacminde artıştır. Örneğin susuz sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , tenardit) sulu forma ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , mirabilit) dönüştüğünde hacim yaklaşık %314 oranında artmaktadır.

Tehlikeli tuz hidratasyon teorisi, tuz hidratasyonu esnasında betonun gözenek çeperlerine karşı oluşturulan basıncın bir sonucu olarak meydana gelen fiziksel tuz atağının bozunma mekanizması olarak tanımlanır. Bu mekanizma daha çok ıslanma ve kuruma olayları sonucunda oluşan hasar türüdür. Beton yüzeyinin nemli olmasına karşın diğer kısımlarının kuru olması yada ıslanma-kuruma çevriminin devam etmesi mekanizmanın betona zarar vermesine yol açmaktadır [172].

Thaulow ve Sahu'ya göre, tuz kristalleşme teorisi, tuzun bozulma etkisine bağlı olarak betonda oluşan hasarın gerçek mekanizmasıdır. Bu teoride tuz kristalleri, aşırı doymamış bir solüsyonda büyüyebilir ve betonun gözenek duvarlarına basınç uygulayarak çimento lu matrisi bozabilir. Tuz kristalleşmesinden kaynaklanan hasar süreci Şekil 2.3'de gösterilmiştir [173].



**Şekil 2.3.** Sodyum sülfatı içeren yeraltı suları ile temas halindeki bir temelin kapilerite ve betonun bozulması

Bir çözeltinin aşırı doymuşluğu, tuzun niteliği, çözelti besleme hızı ve buharlaşma gibi birkaç faktöre bağlıdır [174]. Örneğin, sodyum sülfat doğadaki en zararlı tuzdur çünkü tenardit sonradan çözünme ve buharlaşması yoluyla çok yüksek doymamışlık derecesine ulaşabilir [175]. Scherer'in yaptığı önceki araştırmalarda, taş numunelerinin

yüzeyinde buharlaşma oluşması sonucunda çiçeklenme ve dökülmelerin gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 2.3). Buharlaşma oranı kapiler etki ile su besleme hızından daha yüksek olduğunda, kristaller gözenekli bir beton yüzeyinin altına büyüyebilir ve böylece hasar meydana gelebilir [176]. Hasar özellikle kısmen sodyum sülfat içine batırılmış ve zamanla betonun kuruyan yüzeyinde oluşmaktadır.

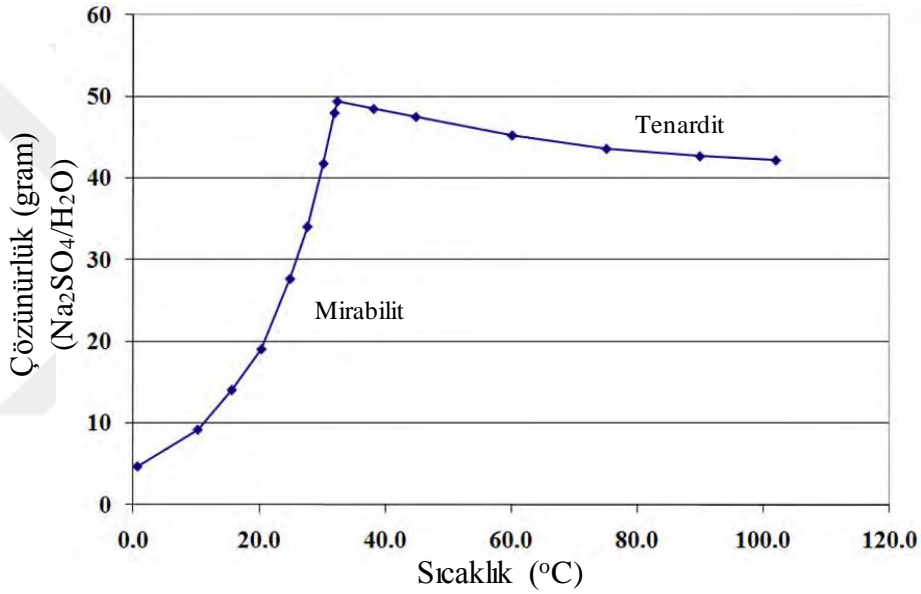
Yoshida ve ark., Japonya'da, sülfat bakımından zengin bir toprağa inşa edilmiş konut binası temellerinin bozulmasını değerlendirmek için kapsamlı bir saha çalışması gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.4 zemin seviyesinin üstünde olan betonarme elemanların hasar durumlarını göstermektedir. Hasarın inşaatın başlangıcından birkaç ay sonra başladığını ve on beş yıla kadar devam ettiği belirlenmiştir. Yoshida ve ark., mineralojik analizlerde yukarıda belirtilen zemin betonu içerisinde etrenjit ve alçıtaşı gibi mineralleri tespit etmemiştir. Ancak beton içerisinde sodyum sülfat kristalleri tespit edilmiştir [177].



**Şekil 2.4.** Tuz kristalizasyonuna maruz kalındığında betonarme hasar [177]

1990'ların başında, Folliard ve Sandberg, sodyum sülfatın beton içinde kristalleşmesini, sıcaklık değişiklikleri tarafından tetiklendiğini bu yüzden beton için fiziksel tuz veya sülfat saldırısının betona hasar veren önemli bir etki olduğunu ortaya koymuşlardır. Şekil 2.5'de sodyum sülfat için çözünürlük eğrisi verilmiştir. Şekil 2.5'de yaklaşık 33 °C'de tenardit ve mirabilit arasındaki değişim görülmektedir. Beton numuneleri 5-30 °C sıcaklık döngüsünde %30 sodyum sülfat çözeltisinde

bekletildikten sonra numunelerde önemli miktarda kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu numuneler üzerindeki X-ışını kırınımı ile etrenjit oluşumu veya kimyasal saldırıdan kaynaklanan herhangi bir zararlı ürünün oluşmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca ortam sıcaklığının düşüşüyle birlikte kristalleşmenin tetiklendiği tespit edilmiştir. 35-110 °C sıcaklık aralığında çevrim yapılan numunelerde herhangi bir ağırlık kaybı gözlenmezken bu numunelerin çoğunluğunda ağırlık artışı gözlenmiştir. Kristalleşmenin sadece sıcaklığın 33 °C'nin altına düştüğü durumlarda ve beton gözeneklerinde yüksek bir sodyum sülfat konsantrasyonu bulunduğu zaman meydana geldiği tespit edilmiştir [178].



Şekil 2.5. Sodyum sülfat/su sistemi için çözünürlük eğrisi [168]

1940'lardan beri, Portland Çimentosu Birliği (PCA), Sacramento'daki açık havada depolanan beton numunelerin uzun süreli dayanıklılığını araştırmaktadır. PCA çalışmaları, kuruluşundan bu yana çimento içeriği, çimento bileşimi, çimento türleri, mineral katkıları, s/ç ve çeşitli kaplama türleri üzerine odaklanmıştır. PCA tarafından 150 mm x 150 mm x 760 mm ölçülerinde beton kirişler döküldükten bir yıl sonra Sacramento, California'ya gönderilerek %10 sodyum sülfat ihtiva eden toprağa gömülmüştür. Kirişler yılda bir kez incelenerek 1 ile 5 arasında derecelendirilmiştir, 5 notu en kötü durumu ifade etmektedir [179].

1989'daki ilk PCA bülten raporunda, sülfat direncini etkileyen en önemli parametrenin betonun s/ç oranının olduğu bildirildi [180]. Ayrıca, çimento tipinin (örn., Tip I'e karşı Tip II'ye ve Tip V'e) düşük veya yüksek s/ç oranına sahip beton karışımları için sülfat direnci üzerinde asgari bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Uçucu kül veya yüksek fırın cürufu içeren karışımlar, bir kontrol karışımı ile karşılaştırıldığında 30 karışımdan 29'unda sülfat direnci artmıştır. Betonun epoksi ile kaplanması koruma yöntemi olarak etkili olmuş ancak epoksi kaplamanın betondan soyulma belirtileri gösterdiği için bu korumanın geçici olabileceği belirtilmiştir [180]. 2002'de, PCA tarafından ikinci bir bülten yayınlanarak beton kırıntılarındaki hasarın sadece toprak seviyesinin üstünde olduğu belirtilmiştir. Zeminin altında veya kırıntıların kapalı alanda depolandığı testlerde çok az hasarın olduğu bildirilmiştir [180]. Bu etkinin toprak altında oluşan sıcaklık değişiminin az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

### **2.4.3. Geleneksel Sülfat Saldırısı**

Sülfat etkisine maruz çimento sistemlerde, tomasit formundaki sülfat hasarı tanımlanmaya kadar, geleneksel sülfat saldırısı en yaygın bilinen bozulma türüdür. Sülfat etkisi kalsiyum ve sülfat iyonlarının  $C_3A$  ile reaksiyona girerek etrenjit oluşturduğu katyon tipine bağlıdır. Sodyum ve sülfat iyonları etrenjit oluşturmak için kalsiyum alüminat hidratlarıyla ve portlandit ile alçıtaşı oluşturmak için reaksiyona girer [171]. Geleneksel sülfat saldırısında oluşan etrenjit betonda genişlemelere yol açarak bozulmalara sebep olur. Geleneksel sülfat hasarında magnezyum iyonları portlandit ile reaksiyona girerek brusit oluşumuna yol açabilir. Brusit oluşumu sonrasında C-S-H yapısını çözümlenerek kohezif olmayan M-S-H oluşumuna sebep olabilir.

#### **2.4.3.1. Etrenjit Oluşumu**

Kalsiyum hidroksit (CH) ve su (H) varlığında monosülfat hidrat ( $C_3A \cdot C\hat{S} \cdot H_{18}$ ) ve kalsiyum alüminat hidrat ( $C_3AH_6$ ) etrenjit üretmek üzere sülfat ( $\hat{S}$ ) ile reaksiyona girmektedir [31].

Sülfat saldırılarının neden olduğu genişlemenin etrenjit reaksiyonu ile ilişkili bir mekanizmanın sonucu olduğu veya etrenjit oluşumu haricinde de alçıtaşı formasyonu gibi bir reaksiyon sonucunun olduğu bilinmektedir.

Etrenjit oluşumu ile ilişkili genişleme mekanizması halen tartışılmasına rağmen, iki özel mekanizma yayımlanmıştır. Bunlar; topokimyasal reaksiyon mekanizması ve şişme mekanizmasıdır [171]. C<sub>3</sub>A ile beton boşluk çözeltisindeki sülfat ve kalsiyum iyonları arasındaki reaksiyon katı haldeki topokimyasaldır. C<sub>3</sub>A ve jipsin çözünürlük farkından dolayı pastanın tüm hacmi içinde eşit olarak dağılımı söz konusu değildir. Mevcut ortamda alçıtaşı çözülür, Ca<sup>2+</sup> ve SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iyonları ve su etrenjit oluşumunda görev alır. Sonuç olarak, katıların hacminde oluşan artış, pastanın genel bir genişlemesine yol açarak poroziteli bir yapının oluşumuna sebep olur [181].

Şişme teorisi, çözeltide çökelen etrenjitin kristallerinin suyun adsorpsiyonu ile genişmeyi sağladığını göstermektedir [182]. Yeterli konsantrasyonda sülfat, hidroksil ve kalsiyum iyonları içeren bir ortamda küçük kolloidal etrenjit yapısının oluştuğu düşünülmektedir. Betona dışarıdan giren su zayıf kristalimsi etrenjit tarafından emilerek iç yapıda ozmotik basınç üretmektedir. Ozmotik basınç, betonun elastisite modülü yeterince yüksek değilse elemanın hacimsel genişlemesine yol açacaktır [183].

Çimento esaslı kompozitlerde etrenjit oluşabilir, ancak mutlaka genişmeye neden olmaz. Skalny ve ark. [184], etrenjitin genişleme yaratması için aşağıdaki şartların oluşması gerektiğini ifade etmiştir;

- Etrenjit oluşumu için eşik bir miktar bulunmaktadır. Bu eşik değer aşıldığında katı hacim üzerinde bir basınç oluşabilir.
- Etrenjit topokimyasal bir proseste oluşur, bu reaksiyon etrenjit kristallerinin komşu diğer katılara doğru yönlendirilmiş bir büyümesine neden olur. Kristalizasyon basıncının hangi şartlarda ve altında olduğu halen net değildir.

#### 2.4.3.2. Alçıtışı Oluşumu

Sülfat etkisi ürünlerinden alçıtışı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), çimento hidratasyonu sırasında oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ile sulu çözeltideki sülfat iyonları arasındaki reaksiyon sonucunda (Denklem 2.7) oluşabilir.

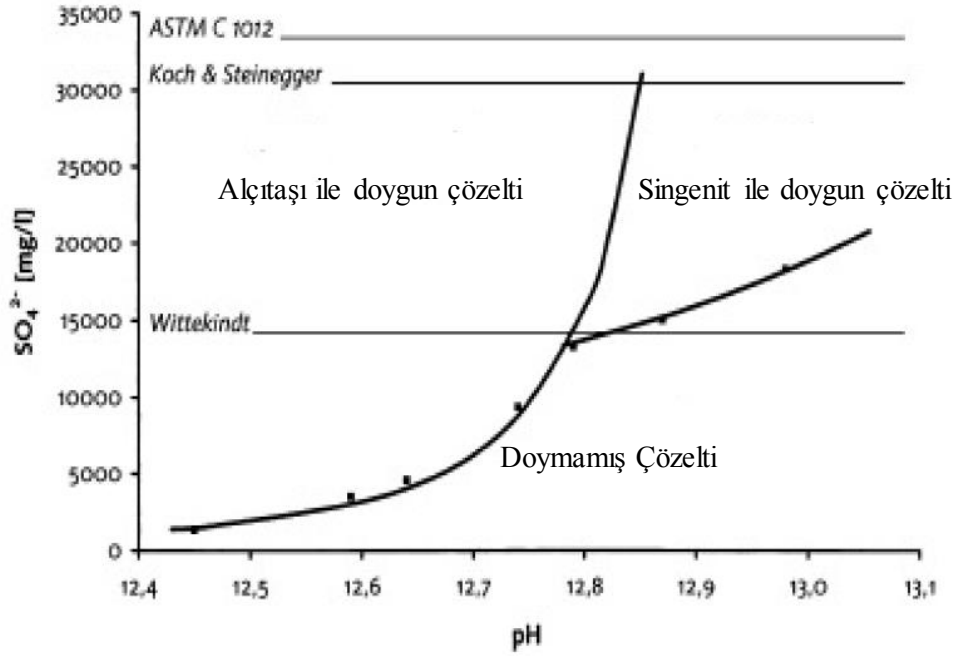


Genel olarak alçıtışı oluşumunun zararlı etkileri olduğu kabul edilse de, tam olarak mekanizma açıklanamamıştır [185]. Bazı çalışmalar, alçıtışı oluşumunun genişleme ile sonuçlandığını öne sürerken, diğer çalışmalar sülfat saldırısı ile ilişkili alçıtışı oluşumunun genişlemeye neden olup olmadığından şüphe ederler. Alçıtışı oluşumunun, bir reaksiyon çözeltisi mekanizması ile ilerlemesi halinde hacim artışına neden olmadığı düşünülmektedir. Alçıtışı uygun koşullar oluştuğunda genellikle CH kristallerinin üzerinde oluşmaktadır. Alçıtışı genellikle kılcal boşluklarda büyük hacimde oluşmaktadır. Ayrıca oluşan alçıtışı tüketilen katı CH hacminden daha büyük bir hacme sahip olmaktadır. Alçıtışı hemihidrattan oluştuğunda kristal yapısında bazı değişiklikler meydana gelmektedir. Kristal yapıda oluşan hava boşluklarının ilerleyen süreçte genişlemelere yol açtığı rapor edilmiştir [170].

Beton bünyesinde yer alan daha fazla (CH) daha fazla alçıtışı oluşmasına ve betonun daha fazla hasar görmesine yol açabilir. Başka bir deyişle, Portland çimentosunun hidratasyonu sırasında oluşan CH artışının, sülfat kaynaklarına maruz bırakılan betonda büyük miktarda alçıtışı üretilmesine neden olabileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, hidratasyon sırasında oluşan CH miktarı, çimentonun  $\text{C}_3\text{S}$  içeriğine bağlı olduğu için, modern çimentolarda  $\text{C}_3\text{S}$  içeriğinin artmasıyla beton üzerindeki sülfat saldırısının daha ciddi olacağı öne sürülmüştür [186].

Bazı araştırmacılar  $\text{C}_3\text{S}$  oranı yüksek çimentolarla yapılan numunelerin, sülfat ortamlarına maruz bırakıldığı zaman alçıtışı oluşması nedeniyle ciddi bozulmalara uğradığını belirtmişlerdir [176,182,183,185].

Sülfat iyonlarının konsantrasyonu, sülfat saldırısı sırasında jips oluşumu açısından önemlidir. Yaklaşık 33 g  $SO_4^{2-}/L$ 'ye karşılık gelen %5 sodyum sülfat çözeltilerinde alçıtaşı oluşumu literatürde tespit edilmiştir. Ayrıca 24 g  $SO_4^{2-}/L$  sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan hasarlı numunelerde de alçıtaşı varlığı belirlenmiştir [169] Bellman ve diğerleri, hesaplamalara ve deneylere dayanarak alçıtaşı oluşumu için gereken sülfat iyon konsantrasyonunu Şekil 2.6'da sunmuştur [187].



**Şekil 2.6.** Portlanditin jips veya sygenit ile reaksiyonu için gerekli sülfat konsantrasyonu [187]

Süper doymunluk ve şişme basıncının çok düşük olduğu 1.5-3 mg/L orta sülfat konsantrasyonlarında hasar için alçıtaşı oluşumunun mümkün olmadığı belirtilmiştir. Düşük konsantrasyonlu sülfatlı ortamda (1 g  $SO_4^{2-}/L$ 'den az) alçıtaşı nadiren gözlenmiştir. Ara değerlerde (1-8 g  $SO_4^{2-}/L$ ) alçıtaşı oluşmaya başlar ve yüksek konsantrasyonlarda ise (8 g  $SO_4^{2-}/L$ 'den fazla) alçıtaşı birincil ürün haline gelir [188].



#### **2.4.4. Sülfat Etkisinin Önlenmesi**

Dışsal sülfat atağı, uygun malzeme seçimi ve karışım oranları ile engellenebilir. S/Ç oranının azaltılmasıyla geçirgenliğin azaltılması, sülfata dayanıklı çimento ve mineral katkıların kullanımı sülfat etkisini azalttığı belirlenmiştir.

##### **2.4.4.1. Permeabilite**

Düşük s/ç oranı ile üretilmiş bir betonunun gözenekliliği ve permeabilitesi daha az bir mikroyapıya sahip olması nedeniyle sülfat iyonlarının girişini azaltmaktadır. S/Ç oranı 0.70 olan bir çimento pastasının s/ç oranı 0.55 olan diğer pastaya göre yaklaşık 10 kat daha fazla geçirgenlik gösterdiği görülmüştür [189]. %5 sodyum sülfata maruz bırakılan yüksek permeabiliteye sahip betonların daha fazla genleşme gösterdiği önemli bir korelasyon ile kanıtlanmıştır [190]. Al-Amouti yaptığı çalışmada sodyum sülfat için aynı etkileri tespit etmesine rağmen, magnezyum sülfat çözeltisindeki betonlarda aynı bulgular ortaya çıkmamıştır. Düşük geçirgenliği elde etmek için, sadece düşük bir s/ç (yani, 0.45'den daha düşük) oranına sahip beton üretmek yeterli değildir aynı zamanda kür işleminin yeterli yapılması gerekmektedir. Ayrıca mineral katkıların beton karışımlarına dahil edilmesi sülfat girişini azaltmada en güçlü yöntemlerden birisidir [168].

##### **2.4.4.2. Sülfata Dayanıklı Çimento**

Sülfat etkisinin olumsuz özelliklerini önlemek için çimento içindeki  $C_3A$ 'yı sınırlandırarak sülfata dayanıklı çimentolar geliştirilmiştir. Düşük  $C_3A$ 'lı çimento esas olarak oluşabilecek etrenjit miktarını azaltmada yöntem olarak tercih edilebilir. Bununla birlikte, sülfata dayanıklı çimento kullanmak kalsiyum hidroksit ve C-S-H'a olan sülfat saldırısını engellemektedir [182]. ASTM C-150, Tip V çimentonun  $C_3A$  içeriğini %5 ve Tip II çimentonun  $C_3A$  içeriğini ise maksimum olarak %8'e sınırlandırmıştır. Portland çimentosunun alüminoferrit fazındaki alüminin, sülfat saldırısına katılma riskine karşı ASTM C150, Tip V çimentodaki  $C_4AF + 2C_3A$ 'nın %25'i geçmemesi gerektiği rapor edilmiştir [191]. Tip V çimento bulunmayan bölgelerde, Tip II çimentonun uygun mineral katkılarla birlikte kullanılması Tip V çimentoya yakın sülfat direnci sağlamaktadır [191].

Gollop ve Taylor, magnezyum ve sodyum sülfat çözeltisinde 6 ay bekletilmiş portland ve sülfat dayanıklı çimentolar ile çimento pastası örneklerinde mikro yapı araştırması sonucunda analitik teknikler kullanmışlardır. Sülfata dayanıklı çimentolardan üretilen küp örneklerde aynı hasarların oluştuğu tespit edilmiştir. Her iki çimento pastasında da brusit oluşumu tespit edilmiş ancak portland çimentosundaki brusit varlığı daha yüksek seviyede belirlenmiştir [169].

#### 2.4.4.3. Mineral Katkılar

Mineral katkıların çoğu yeterli dozajlarda kullanıldığında, geçirgenliği düşürerek sülfat saldırısını önlemede oldukça etkili olabilmektedir. Ayrıca CH içeriğini düşürmesi de sülfat etkisini azaltma açısından önemli bir faktördür.

Genel olarak yüksek fırın cürufu, sülfat etkisinin kontrol altına almakta oldukça etkilidir; özellikle çimento yerine %25-50 oranında yüksek fırın cürufu kullanımı sülfat hasarını azaltmaktadır. Hooton ve Emery hazırladıkları harçlarda çimento yerine %45 ile %72 oranında yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. 3000 mg/L sodyum sülfat çözeltisinde 10 yıl bekletilen harçlarda tatmin edici sülfat direnci sağlanmıştır. Yüksek fırın cürufunun bünyesinde bulunan %1 kükürt içeriği camsı faz içerisinde sülfür olarak bulunmaktadır. Sülfürün hidratasyon sürecinde açığa çıkması yüksek fırın cürufunun dezavantajı olarak sayılan özelliklerindedir. Bu yüzden yüksek fırın cürufu sülfatlı ortamlarda kullanılırken kükürt içeriğine dikkat edilmelidir [169]. ACI 201.2R-01, sülfat saldırısını kontrol etmek için kütlece %40 ile %70 yüksek fırın cürufu kullanılmasını önermektedir [191].

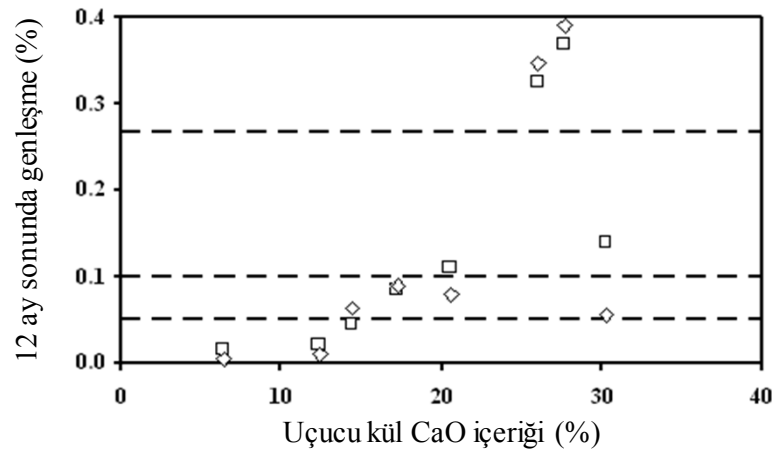
Birçok çalışmada, düşük kalsiyumlu uçucu külün, sülfata bağlı genleşme ve çatlamayı önlemede genellikle yüksek kalsiyumlu uçucu küllerden daha etkili olduğunu göstermiştir. Dunstan; Uçucu külün sülfat direncini direnç katsayısı olarak tanımladığı (R)'yi uçucu külün kalsiyum ve demir oksit içeriğine dayandırmıştır [192]. Tikalsky ayrıca çeşitli uçucu küller üzerinde çalışmış ve yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin sülfatlı ortamlarda iyi performans göstermediğini belirlemiştir [29].

F sınıf uçucu küllerin (CaO içeriği %20'den az) kütlece %25 ile %35 arasındaki oranlarda kullanıldığında sülfat direnci için uzun sürede etkili olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, bazı yüksek kireçli C sınıf uçucu küller zayıf sülfat direncine sahip betonların üretilmesine neden olur. Bazı durumlarda, C sınıfı uçucu kül içeren betonlar kontrol karışımlarından (uçucu külsüz) daha da kötü sülfat direnci göstermiştir. Shashiprakash ve Thomas bu etkinin çimento bünyesindeki yüksek  $C_3A$  içeriğinden kaynaklandığını tespit etmiştir [193].

Yüksek kireçli küllerin düşük kireçli küllerden sülfatlı ortamlarda daha az etkili olmasının nedenleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

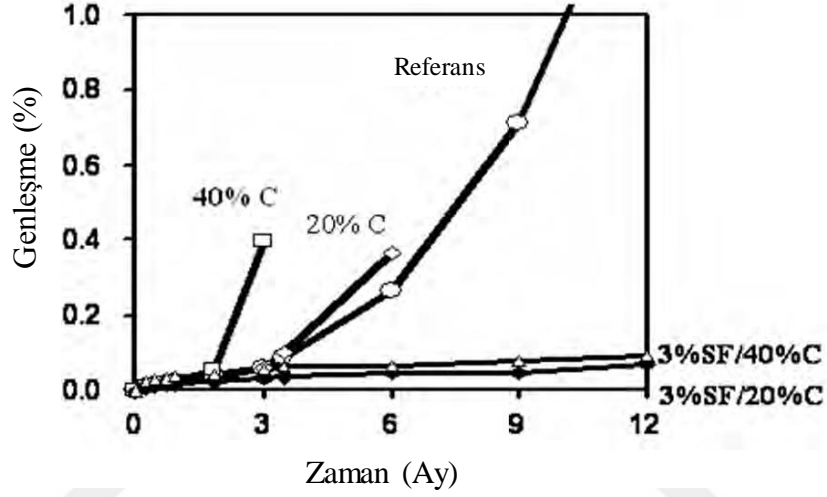
- Bazı yüksek kalsiyumlu uçucu küllerin  $C_3A$  içeriği (Bazı küllerde CH içeriği de tespit edilmiştir),
- Puzolanik özelliklerinin az olması nedeniyle az kireç tüketimi,
- Reaktif kalsiyum-alüminatların camsı fazda varlığı,
- Reaktif alümina hidrat üretimi (gehlenit vb.),

Şekil 2.7 ASTM C 1012 testinde uçucu külün CaO içeriği ile altı ayda genişmesi arasındaki korelasyonu göstermektedir.



Şekil 2.7. Uçucu kül CaO içeriğinin ve sülfat etkisinde oluşan genişmeye etkisi [193]

Shashiprakash vd., uçucu küllerin mineralojisi ve kimyasınının sülfat direncine etkisinin yanı sıra yüksek CaO içeriğine sahip külleri silis dumanı ile birlikte kullanarak önemli araştırmalar da yapmışlardır; silis dumanını %3 ve %6 arasında kullanmışlardır. Şekil 2.8 az miktarda kullanılan silis dumanının (%3) yüksek kalsiyumlu uçucu küllü betonun sülfat direnci üzerindeki etkilerini göstermektedir.



Şekil 2.8. Silis dumanı ve C sınıfı uçucu külün sülfat direnci üzerindeki etkisi [193]

Metakaolin, klor geçirgenliği, karbonatlaşma ve alkali agrega reaksiyonlarında büyük performans gösteren bir puzolandır [194]. Metakaolinli betonlarda bozulma süreci sülfat tipine göre değişiklik göstermektedir. Khatib ve Wild, sodyum sülfat etkisine dayanıklı betonun imalatı için minimum %20 oranında metakaolin gerektiğini belirtmiştir [195]. Magnezyum sülfat etkisine maruz numunelerde ise bunun tam tersi bir durum ortaya çıkmaktadır. Lee'ye göre metakaolin oranındaki artış harç ve pastalarda genleşme artışına yol açmaktadır [194].

## 2.5. Asit Etkisi

Farklı kimyasallara karşı direnç söz konusu olduğunda, betonun dayanıklılığı, üretim sürecinden (kürleme yöntemleri, bitirme vb.) ve kullanılan malzemelerden oldukça etkilenir. Yeterli araştırma ve saha çalışması yapılmadığı takdirde üretilen beton belirli çevresel koşullar için dayanıklılık parametrelerini karşılamayabilir ve

servis ömrü esnasında kalıcı hasarlar oluşabilir. Çoğu beton yapıda uzun ömür beklentileri önemli olmakla birlikte, sülfürik asit gibi çeşitli kimyasal maddelerden korozyona uğrayan atık su sistemleri dünyada önemli sayıda altyapı projeleri arasında bulunmaktadır. Sürekli olarak asidik iyonların beton içerisine sızması ciddi hasarlara neden olabilir ve bu da onarım maliyetlerini arttırır. Ayrıca bazı durumlarda bütün yapının tamamen hasar almasına neden olabilir [196].

Sülfürik asit, beton için en zararlı asitlerinden biridir. Sülfürik asit konsantrasyon ve oluşum biçimine bağlı olarak beton yapılara ciddi boyutta zarar verebilir. Sülfürik asit, topraklarda ve yeraltı sularında, demir sülfid minerallerinin pirit veya markasit şeklinde oksidasyon yoluyla üretilir [197].

Kuru beton numuneleri bir kanalizasyon borusunda hidrojen sülfata tabi tutulduğunda, üretilen hidrojen sülfür (sıvı veya gaz halinde), hidrojen sülfid fazına bağlı olarak kılcal emme veya yüzey difüzyonuyla beton gözeneklerine girer [198]. Yüksek atık su akışı sırasında oluşan ıslatma etkisi  $H_2S$ 'yi sülfürik aside oksitleyebilir ve böylece beton ile sülfürik asit etkileşimini arttırır. Normalde, kanalizasyon borusu betonunda, bakteri kolonizasyonunu sağlayan kanalizasyondaki sürekli atık su akışı nedeniyle neme doygunluk oluşmaktadır. Böylelikle asidin betona girişi esasen difüzyon yoluyla gerçekleşir. Portland çimentolu betonu için jips ve etrenjit oluşturan sülfürik asit saldırısı durumunda genleşmeler oluşur [198].

Çelik ve demir endüstrisinde, yüzey hazırlıkları için kullanılan atık asitler, atık su sistemlerine atılır ve dolayısıyla yer altı beton tesislerine yönelik zararlara neden olabilmektedir. Sülfürik asit gıda işleme tesislerinin döşeme betonlarında da bozulmaya neden olabilir [196].

Betonda en yaygın olarak bilinen sülfürik asit korozyonu, kanalizasyon borularında gerçekleşir. Bu tip korozyon, biyogenik sülfürik asit korozyonu, hidrojen sülfür ( $H_2S$ ) korozyonu ve mikrobiyal kaynaklı korozyon gibi farklı isimlerle de bilinmektedir [199].

Biyojenik sülfürik asit korozyonu genellikle beton kanalizasyon boruları, arıtma tesisleri, mazgallar, pompa istasyonları gibi yerlerde oluşur. Bu ortamlar korozif sülfürik asite oksitlenecek ve betona etki edecek H<sub>2</sub>S gazı üretimi için uygun koşulları sağlamaktadır [196].

Sülfürlü atık suları taşıyan beton kanalizasyon sistemlerinin önemli ve hızlı tahribatının 1900'lü yılların başlarında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Sülfürik asidin varlığı nedeniyle betonun asidik etkiyle hasar aldığı 1945'te fark edilmiştir. Parker, bozulan beton kanalizasyon boru örneklerinde güçlü asit oluşturucu bakteriler keşfetmiştir. Daha sonrasında bu bakteriler thiobacillus concretivorus olarak adlandırıldı [200]. Bu araştırmadan sonra araştırmacılar, kanalizasyondaki somut hasarların öncelikle kükürt oksitleyici bakterilerden kaynaklandığını anlamaya başlamıştır.

Çeşitli çalışmalara ve araştırmalara göre kanalizasyon borularındaki korozyon belirli bakterilerin faaliyetleri ile başlamaktadır. Biyojenik sülfürik asit korozyonunun gelişimi nüfusun yaşam biçimine önemli ölçüde bağlı olmasına rağmen süreç küresel ısınma aksine kamuoyunun dikkatini çekmeyen kükürt döngüsü olarak bilinmektedir [200]. Doğal olarak kükürt döngüsünü bozacak kömür, doğalgaz ve fosil yakıtların yakılması sonucunda atmosferdeki kükürt miktarı belirgin şekilde artmaktadır.

Özel durumlarda anaerobik koşullar kanalizasyonlarda bulunur; bu da anaerobik bakteriler tarafından çözülmüş sülfatın sülfid'e indirgenmesine neden olur [201]. Bu mikroorganizmalar, kanalizasyon borularının içerisindeki çamurda veya kanalizasyon suyunun içerisinde, beton boruların yüzeyini kaplayan çamur tabakasında (biyofilm) bulunabilir. Sülfat indirgeyici bakteriler tarafından üretilen H<sub>2</sub>S, kanalizasyonda sistemine salınmaktadır [202].

H<sub>2</sub>S, düşük konsantrasyonlarda bile gaz fazına kolayca dönüşebilir [200]. H<sub>2</sub>S atmosfere salındığı anda, oksijen ile reaksiyona girerek, beton yüzeyine çökerek saf kükürt üretebilir. Bu noktada, pH seviyesinin düşürülmesi, Thiobacillus bakterilerinin biyolojik kolonizasyonunun gerçekleşeceği anlamına gelmektedir. Bu bakteri türü

( $\text{pH} \leq 7$  durumunda),  $\text{H}_2\text{S}$  gazını oksijen varlığında sülfürik aside dönüştürebilir. Bu aerobik bakterilerin çeşitli türleri, beton yüzeyinde kolonize olur, pH düşer ve ölür. Daha agresif etkilere sahip bakteri türleri ise asit üretimini daha sonraki aşamalara bırakmaktadır [203].

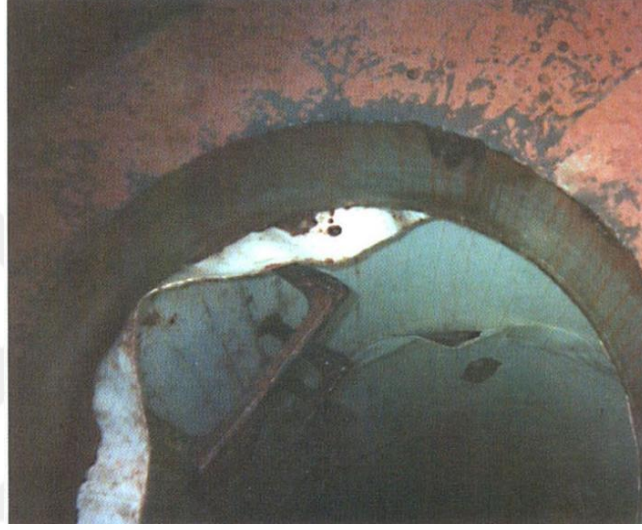
Beton kanalizasyon altyapılarının onarımı, bakımı veya değiştirilmesiyle ilgili büyük masraflardan kaçınmak için muhtelif biyojenik sülfürik asit korozyonu için farklı çözüm önerileri getirilmiştir. Büyük bir onarım gerektirmeden uzun süre sülfürik asit korozyonuna dayanabilme özelliğine sahip beton kanalizasyon sisteminin kurulması önemlidir. Bununla birlikte eski bir kanalizasyon sisteminin yenisiyle değiştirilmesi maliyet açısından alternatif bir seçenek değildir. Bu nedenle, mevcut sıhhi tesisatları daha fazla hasardan korumak veya ömrünü uzatmak için etkili yollar aramak daha gerçekçi bir yaklaşımdır [196].

Daha önce belirtildiği gibi, bakterilerin  $\text{H}_2\text{S}$  gazı üretmesi için anaerobik koşullar sağlanmalıdır. Kanalizasyona oksijen, hidrojen peroksit veya nitrat ilave ederek anaerobik koşulların önüne geçilmektedir. Bu yöntem daha önce başarılı olmuştur ancak pahalı ve kalıcı bir çözüm olarak görülmemektedir [196].

Kaplama ve astarlar gibi diğer koruma sistemleri, beton yüzeyinde Thiobacillus bakterilerinin kolonizasyonundan ve daha sonra ciddi hasarlardan korunması için kullanılabilir. Kaplamalarla ilgili sorun, maliyetli oldukları ve büyük bir beceri ile kalifiye işçilik gerektirmesidir. Bu nedenle, sülfürik asit iyonlarının sızıntı yapmasını ve daha fazla bozulmaya yol açabilecek açıkta kalan alanlardan kaçınılması gerekmektedir [196].

Astarların korozyon korumasında etkili olduğu ve geçmişte sıklıkla kullanıldığı kanıtlanmıştır, ancak kanalizasyon ve sıhhi tesisat borularındaki çap ve tasarımına bağlı olarak bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Astarlama işleminin çok iyi ve düzgün yapılması gerekmektedir aksi takdirde fayda sağlamayan bir koruma yöntemi olacaktır. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, astarlar zamanla tabakalara ayrılabilir ve onarım-güçlendirme büyük masraflara neden olabilirler.

Kimyasal ve mikrobiyolojik sülfürik asit korozyonuna karşı iyi direnç gösteren beton üretimi önemli bir çözüm olabilir. Bu amaç, özel çimentolar, kimyasal katkılar ve mineral katkı maddeleri kullanılarak uygulanabilir. Asit etkisine maruz beton numunelerinin performansları, mukavemet ve kütle kaybı, yüzey özellikleri değerlendirilerek farklı laboratuvar yöntemleri ile test edilebilir [196]. Ancak laboratuvar ortamında yapılan bazı asit etkisi testlerinin saha uygulamalarında aynı özelliği göstermediği belirlenmiştir.



**Şekil 2.9.** Kanalizasyon astarında oluşan hasar

Anti bakteriyel katkılar, biyojenik sülfürik asit korozyonuna karşı beton kanalizasyonların korunmasında çok etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bu katkılar ilk defa 1996 yılında kullanılmış ve olumlu sonuçlar sağlamıştır. Haile ve Nakhla yaptıkları çalışmada, antimikrobiyal zeolit kaplamaların *A. Thiooxidans* bakterilerinin süspansiyonda büyümesini engellediğini göstermiştir [204]. Hewayde ve diğ., *D. desulfuricans* adlı mikroorganizmaların neden olduğu korozyonu azaltmak için beton boruların bakır oksit ve gümüş oksit (antimikrobik maddeler olarak kullanılan metaller) ile kaplanmasını araştırmıştır [205].

Sanayi atıkları önemli miktarda sülfürik asit içermektedir. Örneğin, demir-çelik endüstrisinde, demir ve çelik imalatçılara satılmadan önce korozyonu gidermek



ve bazı yüzey işlemleri için hidroklorik ve sülfürik gibi asitler kullanılır. Burada oluşan atık sular betondan üretilen kanalizasyonda kısa sürede hasara yol açar. Sülfürik asit beton borularda genellikle bakteriyel reaksiyonlara yol açarak yapıya zarar vermektedir. Bu işlemin neden olduğu ve betonun bozulmasına yol açan hasar yukarıda belirtildiği gibi biyojenik sülfürik asit korozyonu olarak bilinmektedir. Bu hasar bakım-onarım açısından ele alındığında çok büyük harcamalara neden olmaktadır. Sıcak iklimler mikrobiyal büyüme için elverişli bir ortam olabilir ve bu yerlerin yer altı kanalizasyon sistemleri sıklıkla bu tür korozyona maruz kalabilir. Bununla birlikte yılın büyük bir bölümü için soğuk hava şartlarına sahip olan Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada'nın kuzey kesimlerindeki beton kanalizasyon sistemlerinde de ciddi hasar meydana geldiği belirtilmiştir.

Sülfürik asit ayrıca, kömür, petrol veya diğer endüstriyel işlemlerin yanmasının bir ürünü olan kükürt dioksit ( $SO_2$ )'in oksidasyonu ile oluşan asit yağmurunda da bulunabilir. Bu yağmur, pH'ı 3 civarında olmakla beraber bazı durumlarda beton yapılar için zararlı olabilir, ancak sülfürik asidin neden olduğu diğer bozulmalara kıyasla, beton üzerinde biraz zayıf bir etkiye sahiptir. Asit yağmurları için kaliteli beton üretmek suretiyle hasar önenebilir [196].

### **2.5.1. Asit Etkisinden Korunma**

Sülfürik asit saldırılarına karşı beton dayanıklılığı çeşitli teknikler kullanılarak iyileştirilebilir. Daha önce belirtildiği gibi sülfürik asit, yer altı suları ve endüstriyel atıklar gibi farklı yerlerde bulunabilir ve buralara temas eden beton yapılar için çok zararlı olabilir. Kuzey Amerika'nın beton kanalizasyon yapılarında en yaygın ve yıkıcı korozyon problemi olan biyojenik sülfürik asit saldırılarının olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kanalizasyon sistemindeki beton boruların bozulmasını azaltmak için thiobacillus bakterilerinin oluşumunu önlenmesi gerekmektedir. Bu etki farklı antimikrobiyal katkıları kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Betonun sülfürik asit etkisine karşı direncini arttırmak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır.

Betondaki sülfürik asit saldırılarına direnç açısından betonun dayanıklılığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için beton karışımında farklı mineral katkıları

kullanımıyla ilgili çok sayıda rapor bulunmaktadır. Farklı mineral katkı türlerinin sülfürik asit saldırılarına karşı beton performansı üzerindeki etkileri konusunda araştırmacılar ortak bir kanaata varmamıştır. Bundan sonraki bölümlerde, mineral katkıların betonun sülfürik aside karşı direncine olan etkileri ayrıntılı olarak özetlenmiştir.

Hick ve ark. silis dumanının, gözenek yapısını ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  miktarını azaltarak %1 sülfürik asit çözeltisine karşı beton direncini arttırdığını bildirmiştir. Silis dumanı içeren betonda oluşturulan C-S-H'nin düşük pH koşullarında daha kararlı olduğunu bulmuşlardır [206].

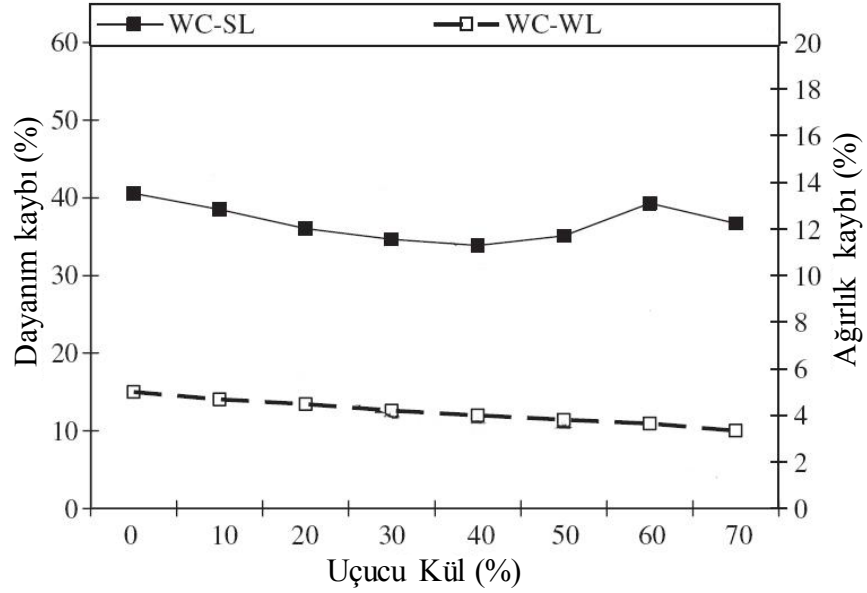
Mehta, Portland çimentosunun %15 silis dumanı ile değiştirilmesinin betonun %1 sülfürik asit çözeltisine karşı direncini artırdığını bildirmiştir. Bu çalışmada, beton numuneler bir sülfürik asit çözeltisine batırılmış ve gevşek tanelerin yüzeyden bir çelik tel fırça ile çıkarıldıktan sonra ağırlıkları her hafta ölçülmüştür [207].

Monteny ve ark. %8.6 silis dumanı ile hazırlanan karışımlarının %0.5 oranındaki sülfürik aside karşı direnç göstermediğini belirtmiştir [202].

Chang ve ark. hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren beton karışımlarının, belirli bir kür periyodundan sonra %1'lik sülfürik asit çözeltisine karşı çok iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir. Chang ve ark. %60 cüruf içeriğine sahip beton numunelerin %1 sülfürik asit çözeltisinde bekletildikten sonra tatmin edici bir gelişme göstermediğini bildirmiştir [208].

Monteny ve ark., cürufllu çimento ile yapılan beton numunelerini %0.5'lik sülfürik asit çözeltisine karşı dayanıklılık açısından normal Portland çimentosu ile yapılanlara kıyasla daha iyi davranış gösterdiğini bildirmiştir [209]. Bassuoni ve Nehdi'nin kendiliğinden yerleşen betonlarda %45 cüruf ve %5 silis dumanı kullanarak %5'lik sülfürik asit çözeltisine yerleştirmiş ve beton silindir numunelerinin diğer karışımlara kıyasla en yüksek kütle kaybına sahip olduğunu ortaya koymuştur [210].

Yapılan çalışmalara göre, uçucu kül çoğu durumda sülfürik asit saldırılarına karşı betonun direncini geliştirmektedir. Aydın ve ark., C sınıfı uçucu küllü betonları 60 gün %5'lik sülfürik asit çözeltisinde bekleterek asit direncini belirlemişlerdir. %10 ile %70 uçucu kül kullanarak üretilen betonlara (kirece doymuş su ve buhar kürü olmak üzere) iki kürleme yöntemi uygulanmıştır. Buharla kürü uygulanan silindirik beton numunelerinde %70 uçucu kül kullanımı uçucu kül bulunmayan karışımlara göre %37 mukavemet kaybına (SL) yol açmıştır. Farklı beton karışımlarının uçucu kül içeriğine bağlı olarak %5'lik sülfürik asit çözeltisine karşı beton dayanıklılığının iyileştiğini göstermişlerdir [211]. Aydın tarafından yapılan araştırmaya ait sonuçlar Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.10.** Farklı miktarlarda uçucu kül içeren ve suda kürlenmiş numunelerin mukavemet ve ağırlık kaybı [211]

Bassuoni ve Nehdi, kendiliğinden yerleşen betonları sülfürik asit çözeltisine yerleştirerek asit dayanıklılığını tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada %50 çimento, %20 çürüf, %15 kalker tozu ve %15 düşük kalsiyumlu uçucu külden oluşan dörtlü bağlayıcı en iyi sonucu vermiştir [210].

Roy ve ark., çimento yerine %7.5 ile %30 arasında düşük kalsiyumlu uçucu kül içeren harçların %1 ve %5 sülfirik asit çözeltilerinde kütle kaybı açısından iyi performansa sahip olduğunu göstermiştir [212]. Ayrıca farklı mineral katkılardan oluşan harçları %1 ve %5 sülfirik asit çözeltilerine tabi tutmuştur. Araştırmada, %7.5-22.5'lik metakaolin ile yer değiştirme seviyesine sahip harç örneklerin, referans karışımlardan ve aynı miktarda silis dumanından oluşan karışıma kıyasla daha iyi direnç gösterdiği belirlenmiştir. Bu çalışmada harçlar %95 bağıl nemde 28 gün kürlenmiş ve metakaolinli harçlar için s/ç oranları 0.36 ve 0.40 olarak önerilmiştir [212].

Hewayde ve ark., betonda kullanılan çimento miktarının sülfirik asit direncine etkisini değerlendirmiştir. Bu çalışmada, çimento içeriği 310 ile 570 kg/m<sup>3</sup> arasında değişirken beton karışımlarının s/ç oranı 0.35 olarak seçilmiştir. Beton örneklerin pH değerinin 1'den fazla olan sülfirik asit çözeltilerine maruz bırakıldıktan 13 hafta sonra ağırlıklarında önemli bir azalma olmadığı tespit edilmiştir [205].

Sülfata dayanıklı çimento ile yapılan kendiliğinden yerleşen betonların, %5 sülfirik asit çözeltilisine maruz kaldıktan sonra Portland çimentosuna benzer davranışlar gösterdiği belirlenmiştir. Bu olayın nedeni, düşük pH'lı asidik çözeltilere karşı en savunmasız olan CH ve C-S-H varlığının büyük miktarda olmasından kaynaklandığı açıklanmıştır. Bassuoni ve ark., iki çimento tipi ile hazırlanan beton karışımlarında, sülfirik asit çözeltisi ile çevrelenmiş beton yüzeyinde benzer alçıtaşı fazlarının oluştuğunu belirtmiştir [210].

Monteny ve ark., stiren akrilik ester polimer, akrilik polimer ve vinil kopolimer gibi farklı polimer türleri ile çeşitli beton karışımları hazırlanmıştır. Bu karışımlara %0.5 sülfirik asit ile hızlandırılmış test uygulamıştır. Stiren akrilik ester ve vinil kopolimerin asit dayanıklılığı açısından daha uygun olduğu gösterilmiştir [209].

Chang ve ark., yapılan çalışmada farklı agrega türlerini içeren beton karışımlarının, sülfirik asit etkisine karşı direncini belirlemiştir [208]. Çalışma sonucunda; ilk 21 gün ve sonrasında tüm karışımlarda ağırlık artışı gözlemlenmiştir.

56 günden sonra silis agregalı ve portland çimentolu karışımlarda ağırlık kaybı gerçekleşmiştir. Yazarlar erken yaşda kütle artışı ve daha sonra kütle kaybının sırasıyla sülfat iyonu reaksiyonu ve hidrojen iyonu çözünmesinden kaynaklandığını saptamıştır [208].

## 2.6. Deniz Suyu Etkisi

Standartlara uygun tasarlanmış bir betonarme yapı, agresif ortamlardada herhangi bir büyük onarım/bakım çalışması gerektirmeden tasarım ömrüne kadar hizmet etmelidir. Kaliteli, beton, içerisindeki çelik donatıya korozyona karşı mükemmel koruma sağlar. Kimyasal koruma, betonun yüksek alkalitesi ile sağlanır ve fiziksel koruma, agresif etkilerin beton içine sızmasını engellemek için geçirimsiz beton tasarımı ile sağlanır [213].

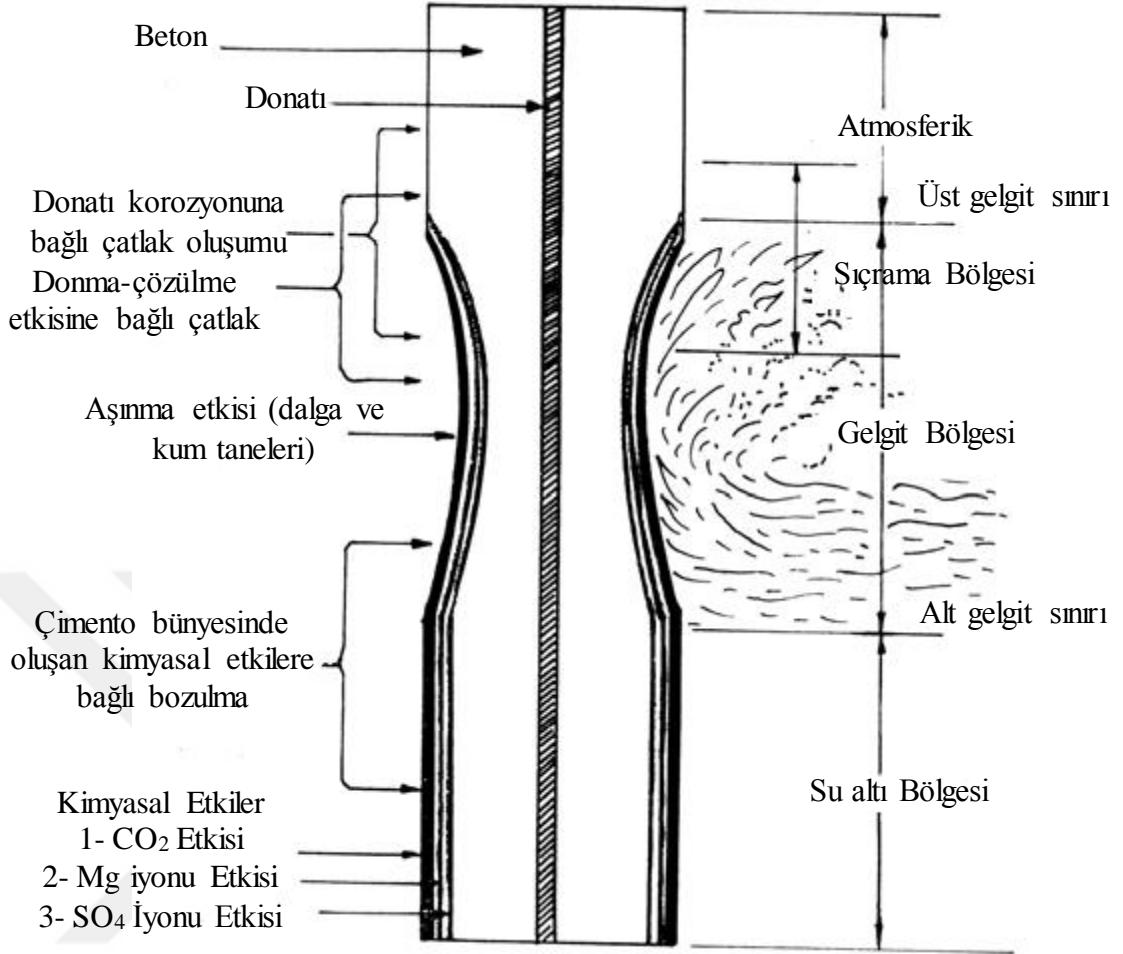
Deniz ortamı, betona etki eden deniz suyunun çevrelediği ortamı belirtmektedir. Deniz suyu; canlı madde, askıda kalmış silt, çözülmüş gazlar ve çürüten organik materyal içeren birçok tuzun bulunduğu karmaşık yapıdaki bir çözeltiye benzetilebilir. Deniz suyunun ortalama tuz konsantrasyonu jeolojik bölgeye bağlı olarak yaklaşık %3.5 iken bu oran denizden denize değişmektedir (Tablo 2.4). Fakat böyle kompleks bir kimyasal ortamda ortaya çıkan reaksiyonlar henüz tam açıklanamamıştır. Genel olarak deniz suyunun etki alanı betonun deniz suyuyla ıslandığı alanı ve rüzgarın spreyleme etkisi ile tuzlu su taşıyacağı her yeri kapsamaktadır [214]. Böyle bir ortamda bulunan beton yapılar, fiziksel ve kimyasal olarak ömür boyu süresince her zaman agresif etkilere maruz kalmaktadır. Döngüsel deniz dalgaları, yüksek ve alçak gelgitler, okyanus akıntıları, hidrostatik basınç, donma çözülme döngüleri, sıcaklık değişimleri gibi çeşitli fiziksel etkilere maruz kalan betonarme yapılar üzerinde zamanla hasarlar oluşmaktadır [215]. Deniz suyunda bol miktarda bulunan tuz iyonlarının reaksiyonu sonucunda çimento matrisinde yavaş yavaş bozulma süreci ile çelik donatıda korozyonun hasarı oluşmaya başlar [216]. Donma-çözülme, ıslanma-kuruma, aşınma ve tuzlu suyun yüzeye spreyleneceği gibi, fiziksel ve mekanik etkiler betonda büyük hasara yol açmaktadır. Tuz iyonları, yüzeyden sızarak betonun bozulmasına neden olur. Bu yüzden deniz suyu

etkisine karşı yapılacak herhangi bir betonarme yapının yapılmasından önce, klorür, sülfat ve diğer deniz tuz iyonu etkileri nedeniyle betonun bozulma riskini çok iyi araştırmak gerekir [214].

Deniz ortamına maruz kalan betonarme bir yapı, atmosferik bölge, sıçrama bölgesi, su altı bölgesi ve gelgit bölgesi gibi farklı bölgelere ayrılarak incelenmelidir. Bu bölgeler belirlenirken gelgit etkileri de dikkate alınmalıdır (Şekil 2.11).

Atmosferik bölge, sıçrama bölgesinden yukarı doğru uzanır. Bu bölge, önemli miktarlarda tuz ve gaz içeren nemli bir ortamı temsil etmektedir. Sıcaklık değişimi ve dalga hareketinden dolayı, bazı okyanuslarda donma-çözülme döngüsü meydana gelebilir. Sıçrama bölgesi, gelgit bölgesinden biraz yukarıya doğru uzanır ve tuzlu suyun spreyleme etkisinden dolayı  $O_2$  ile  $CO_2$ 'e maruz kalır. Ayrıca bu bölge, oluşan dalga hareketinin erozyon etkisinden dolayı deniz yapıları için en kritik alandır. Gelgit bölgesinde sık sık deniz suyunun ıslatma ve kurutma etkisi yaşanır ve bu bölge ikinci en yıpranan alan olarak kabul edilir. Su altında kalan bölge, düşük su seviyesi ile deniz tabanı arasında kalan bölge olarak tanımlanır. Derinlikte artan hidrostatik basınç zararlı tuz iyonlarının beton içine hızla nüfuz etmesine neden olabilir. Ayrıca bu bölgede  $O_2$  ve  $CO_2$  bulunmadığından en az hasar alan bölge olarak kabul edilir [217].

Beton yapıların çoğunda deniz suyu, sülfatlı gübre içeren topraklar, endüstriyel atıklar, asit yağmuru ve yeraltı suları gibi etkiler klorür ve sülfat saldırısına neden olabilir [218,219]. Nemli ortamlarda, klorür ve sülfat iyonları beton yapıya nüfuz eder ve kimyasal reaksiyon başlatır. Sonuç olarak, beton içerisinde fiziksel ve kimyasal değişikliklere neden olan birçok kompleks kimyasal reaksiyonlar meydana gelir [220]. Bu etkiler sonucunda, betonun iç yapısında oluşan bozulma, yüzey çatlakları betonun dökülmesi ve korozyonu şeklinde gerçekleşir [221]. Geçirgenlik, betonun dayanıklılığı için önemli bir diğer özelliktir. Standarda uymayan karışım oranları, deniz ortamında bozulmaya eğilimli geçirgen betonlara neden olmaktadır [222]. Beton içerisinde yer alan donatıya tuz saldırısı etkisinin tam olarak anlaşılması, deniz yapılarında araştırma faaliyetleri için büyük önem taşımaktadır [223].



**Şekil 2.11.** Deniz ortamında betonun bozulması [295]

Klorid iyonları sertleştirilmiş beton üzerinde çeşitli şekillerde olumsuz etkilere neden olabilir. Örneğin; Friedel's tuzu adı verilen genleşmeye yol açan bir ürünün oluşumuna neden olur. Friedel's tuzu beton içerisinde düşük yada orta genleşme yaratarak yapıya zarar verebilir. Ayrıca beton içerisine sızıntı olması durumunda kalsiyum klorürün oluşması betonun geçirgenliğinde artışa neden olmaktadır.

Mehta  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve  $\text{MgCl}_2$  reaksiyonunda oluşan  $\text{CaCl}_2$  ürününün çözülebilir zayıf bağlara sahip bir yapıya sahip olduğunu söylemiştir [217]. Hem etrenjit hem de alçı, beton gözeneklerinde kristalleştirdikten sonra değiştirdikleri bileşiklere kıyasla

%20 daha büyük bir hacme sahiptirler. Betonun iç yapısında oluşan kristalin ürünler içsel gerilmeler yaratarak beton yüzeyinde çatlamlara neden olabilir.

Deniz suyunda sodyum veya kalsiyum sülfattan ziyade magnezyum sülfat betona en çok zarar veren bileşendir [224].

Deniz suyunda bulunan tuzlar ağırlıklı olarak %78 NaCl, %10.5 MgCl<sub>2</sub>, %5 MgSO<sub>4</sub>, %3.9 CaSO<sub>4</sub>, %2.3 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, %0.3 KBr olarak bilinmektedir [217].

**Tablo 2.4.** Farklı denizlerde ortalama tuz konsantrasyonu[188]

Deniz	Tuz Konsantrasyonu (%)
Akdeniz	3.8
Baltık	0.7
Kuzey denizi ve Atlantik	3.5
Karadeniz	1.8
Ölü Deniz	5.3
Hint Denizi	3.55

Deniz ortamında, klorür iyonu ve sülfat iyonu, kalsiyum kloralüminatı (freidel tuzu) ve kalsiyum sülfalüminatı (etrenjit) oluşturarak betona etki etmektedir. Her iki ürün, beton gözeneklerinde, yerini aldıkları bileşiklere göre daha büyük bir hacim kaplarlar. Alçı reaksiyonunun oluşumu ise hacimde yaklaşık %17.7 oranında bir artışa neden olur [11].

Betonun klorür ve sülfat atağına bağlı olarak bozulması zamana bağlı bir fonksiyondur. Bu tuzlar, çeşitli hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girer ve zararlı hacim artışına yol açan bileşikler oluştururlar. Bu bileşikler de genişmeye ve nihayetinde çatlama neden olarak yapıya zarar vermektedir. Klorür ve sülfat iyonlarının iyonik yarıçapı sırasıyla 1.81 Å ve 2.30 Å'dır. Ayrıca sülfat için difüzyon katsayısı  $2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ S}^{-1}$  ve klorür için  $3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \text{ S}^{-1}$  [225]. Daha büyük difüzyon katsayısı nedeniyle, klorür iyonları sülfattan daha hızlı betona nüfuz etmektedir [225].



Deniz suyu, 1910 yılında ABD Ordu Mühendisleri tarafından Los Angeles'da inşa edilen bir evin temeli için hazırlanan beton karışımında kullanılmıştır. 25 yıl sonra yapıda yapılan incelemede temelin iyi durumda olduğu tespit edilmiştir ve büyük parçalanma yada hasarların oluşmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, Florida East Coast Demiryolundaki betonların çoğu deniz suyu ile hazırlanmış ve kullanımı esnasında beton yapılarda herhangi bir hasar oluşmamıştır. Bazı araştırmacılar tarafından yapılan incelemelerde betonda deniz suyunun karışım suyu olarak kullanılmasının dayanım açısından olumsuz bir özellik oluşturmadığı belirlenmiştir. Ayrıca beton karışımında ve küründe deniz suyu kullanımı dayanım kazanma hızını da arttırmıştır [226]. Deniz suyu için en büyük risk beton içerisinde gömülü olan donatının korozyona uğramasıdır.

Liu vd. yaptığı çalışmada, mineral katkı betonların deniz ortamına karşı dayanıklı olduğu kanıtlanmıştır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş bazaltik pomza ile ince agrega yer değiştirilerek kullanılmış ve deniz suyu etkisi sonucunda aşınma değerinden kaynaklanan basınç dayanımı kaybı azaltılmıştır [227].

Beton karışımına deniz suyu katılarak normal koşullar altında basınç dayanımı artırılmış hatta agresif ortamlara karşı daha dayanıklı betonlar elde edilmiştir. Betonda deniz suyu kullanımında karışım için aşağıda belirtilen önlemlerin alınması gereklidir [228].

Kompoze çimento yada portland çimentosu ile yüksek fırın cürufunun birlikte kullanılması,

- Korozyon inhibitörlerinin kullanılması,
- Paslanmaz çelik kullanımı yada donatıların korozyona karşı korunmasını sağlama.

Göl ve okyanus suyunun SSB'de etkilerini görmek için laboratuvar ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan göl ve okyanus sularının beton basınç dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Deniz suyu etkisinin ilk safhasında, betonun dayanımı artış eğiliminde olmakla birlikte, sonuç olarak ortaya çıkan genişmeden

önce dayanım kaybı başlamaktadır [228]. Deniz suyu ile üretilen beton, 15 °C'nin altındaki ortamda tatlı su ile üretilen betonlara kıyasla daha yüksek mukavemet göstermektedir.

Neville, yüksek korozyon riski nedeniyle deniz suyunun betonarme yapılarda karışım suyu olarak kullanılmamasını önerir [171].

Sonuç olarak karışım yada kür suyunda deniz suyu kullanılan betonların mukavemeti dökümden birkaç güne kadar artış gösterir ancak zamanla dayanım kaybı gerçekleşebilir. Deniz ortamında betonun dayanımını etkileyen faktörler şunlardır; klorür iyonlarından kaynaklanan donatı korozyonu, sülfat saldırısı ile oluşan çimento pastasındaki hasar ve betonda alkali-reaktif agrega mevcut olması halinde betonun genişerek hasara uğramasıdır.

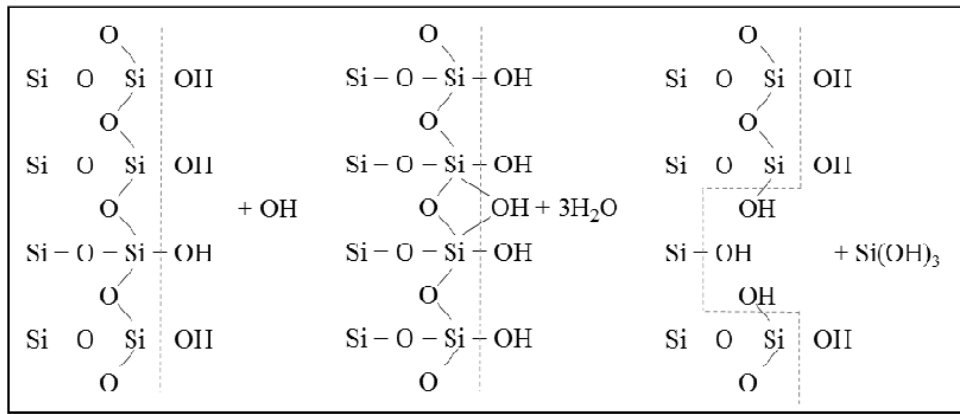
## **2.7. Alkali Agregası Reaksiyonu**

Eski zamanlarda betonun dayanıklı bir malzeme olduğu düşünülüyordu, ancak fiziksel, kimyasal, elektrokimyasal ve biyolojik bozulmaya neden olan bazı etkilere karşı dayanıksız olduğu ortaya çıkmıştır. Alkali-agrega reaksiyonu (AAR) şeklindeki kimyasal bozulmalar, yavaş gelişen ancak aşamalı bir süreç olup, betonun genişmesine ve çatlamasına yol açarak masraflı bakım müdahalelerine sebep olmaktadır. AAR, Portland çimentosundan veya harici bir kaynaktan gelen alkali hidroksitler (sodyum ve potasyum) ile bazı reaktif agregalardan kaynaklanan kimyasal reaksiyondur. Reaksiyona katılan reaktif minerallerin türüne göre iki ana AAR türü bilinmektedir: alkali silis reaksiyonu (ASR) ve alkali-karbonat reaksiyonu (ACR) [229].

### **2.7.1. Alkali Silis Reaksiyonu**

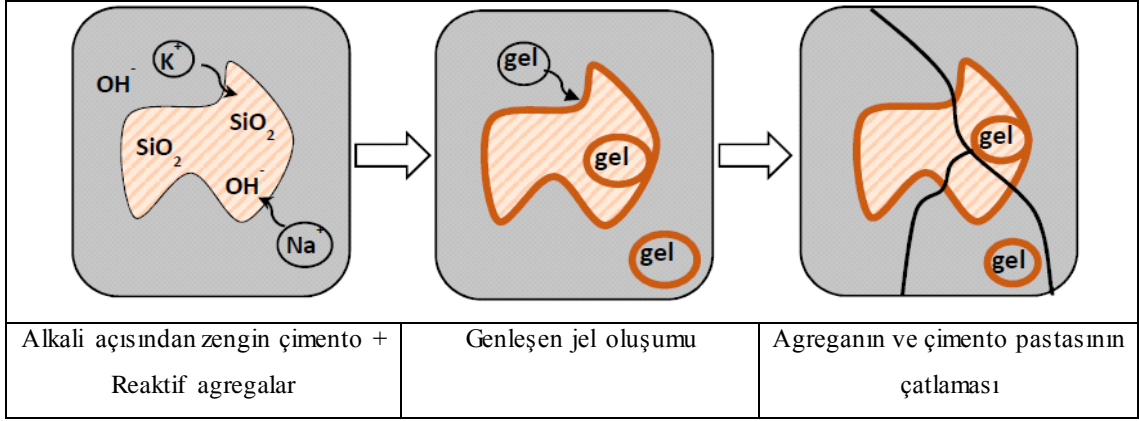
ASR'nin mekanizması başlangıçta Dent-Glasser ve Katakoo [230] tarafından tanımlanmış ve bundan sonra çeşitli araştırmacılar sorunu daha detaylı ele almıştır [231–233]. Dent-Glasser ve Katakoo'ya göre, oldukça yüksek alkali içeriğine sahip çimento pastasında silikat, alüminat veya sülfat iyonlarının bazıları Ca yerine Na veya K ile dengelenerek pastanın anormal seviyede yüksek pH artışına neden olur. Bu etki

için iki reaksiyon tanımlanmıştır: zayıf asit anyonlarının hidroliz edilmesi ve kalsiyum hidroksit yerine çözünmeyen kalsiyum tuzlarının oluşması. Her iki reaksiyonda da hidroksil iyonları (OH<sup>-</sup>) üretilmektedir. pH 7 veya daha yüksek bir ortamda sodyum veya potasyum iyonları difüzyon yoluyla kötü kristalize silika agregalarına nüfuz ederek siloksan gruplarının (Si-O-Si) kopmasına neden olabilir. Yüzeyde bulunan silanol gruplarındaki (Si-OH) nötralizasyon ve siloksan gruplarının kopmasıyla silika hidroksil iyonları çözülür. Şekil 2.12 hidroksil iyonlarının varlığında silis minerallerinin çözünme mekanizmasını göstermektedir [230].



**Şekil 2.12.** Hidroksil iyonlarının varlığında silis minerallerinin çözünme mekanizması

Reaksiyonlar bağları zayıflatır, reaktif agrega içerisinde ve etrafında çapraz bağlantılı bir polielektrolit üretirler. Kalsiyum varlığında, silika çöker, alkali, silis ve kalsiyum içeren alkali-silika jeli oluşur. Genleşme mekanizmaları açısından su emme, ozmotik basınç veya her ikisinin bir kombinasyonu etkili olmaktadır. Makroskopik genleşmeye neden olan alkali-silika jelinin şişmesi nedeniyle oluşacak basınç zamanla artış göstermektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. ASR genişleme mekanizması

### 2.7.2. Alkali Karbonat Reaksiyonu

Alkali-karbonat reaksiyonu, alkali-silika reaksiyonuna kıyasla daha az yaygındır ve bu nedenle bilimsel olarak pek fazla çalışma bulunmamaktadır. Çimento pastasında bulunan alkali hidroksitler, karbonat kayaçlarından dolomit oluşumuna etki eder ve kalsit, alkali karbonatlar ve brusit oluşmasına neden olmaktadır. ACR'ye bağlı genişleme mekanizması biraz belirsizdir. Dedolomitizasyon reaksiyonu hacmin azalmasına neden olur, ACR'den etkilenen betonun genişleme sürecini açıklamak için birkaç formülasyon (Denklemler 2.8) önerilmiştir [229].



Daha önceki araştırmalar, genişlemenin öncelikle çimento matrisinde bulunan kil minerallerinin şişmesinden kaynaklandığını belirtmiştir. Dedolomitizasyon etkisiyle kanallarının açılması sonucunda hidratlanmamış kil mineralleri nem ve alkalilere maruz kalır [234,235]. Daha yeni çalışmalar, ASR'nin ACR genişlemesine en az katkıda bulunan bir etki olduğunu ortaya koymuştur. Alkali-silika jel, alkali karbonat içeren reaktif agregalarında tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, ACR'nin geniş alkali-silika reaksiyonunun bir kombinasyonu olduğu sonucuna varılmıştır. Dolomitik agregalarda oluşan dedolomitizasyon reaksiyonu, ASR oluşmadığı sürece genişlemeye neden olmamaktadır [236,237].

### 2.7.3. Alkali Agrega Reaksiyonunda Etkili Özellikler

ASR'yi etkileyen temel parametreler bu bölümde ele alınmıştır. Sıcaklık, su, alkali içeriği, reaktif agrega türü, agrega boyutu, porozite yada gözenekliliği ve nihayetinde gerilme seviyesi ayrıntılı olarak incelenip tartışılmıştır.

#### 2.7.3.1. Sıcaklık

Sıcaklık ASR üzerinde etkili bir parametredir. Sıcaklık artışı ASR oluşumunu ve genişmeleri arttırmaktadır. Sıcaklığın genişleme üzerindeki etkisi, sabit alkali içeriğine sahip numuneler üzerinde farklı sıcaklıklarda yapılan deneyler vasıtasıyla incelenmiştir. Locher ve Sprung tarafından gerçekleştirilen testlerde, genişmenin en büyük olduğu 38 °C'lik bir pesimum değeri bulmuşlardır [238]. Bu değer üzerinde sıcaklığın artırılması, genişmenin azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, Chatterji ve Christensen tarafından harç prizmaları üzerinde sınırsız miktarda alkali ile yapılan testlerde, sıcaklığın artmasıyla birlikte toplam genişmenin azaldığını ortaya koymuşlardır [239].

Urhan'a göre sıcaklığın yükselmesinin  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin çözünürlüğünü azalttığını ve sıcaklığın 40 °C'ye aşması durumunda reaksiyonun hızının artarak, silis'in çözünürlüğünü arttırmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklar için, C-S-H'nin kristalleşme hızının silisin çözünmesinden daha önemli olduğu kabul edilmektedir. Bu durum 40°C'nin üstünde sıcaklık artışı ile genişleme hızındaki azalmayı açıklamaktadır [233].

Larive'e göre kalsiyum konsantrasyonuna göre alkali konsantrasyonunun artması durumunda, alkali iyonları çözünme sırasında silisin içine nüfuz ederek hacim artışına yol açar. Bu durumda, sıcaklığın artması kalsiyum konsantrasyonunun azalmasına ve dolayısıyla genişleme oranının artmasına neden olur [240].

#### 2.7.3.2. Su

Su, ASR'den etkilenen betonun bozulmasında önemli bir rol oynar çünkü alkali silis jeli yalnızca su emme yoluyla gelişmektedir. Larive, 38 °C'de dört farklı saklama koşullarında silindir numuneler üzerinde laboratuvar testleri gerçekleştirerek ASR gelişimindeki suyun etkisini incelemiştir. Numuneleri; su içerisinde, uygun rutubetli

ortamda, yüksek nemli ortamda (RH%95 ile %99 arasında) ve alüminyum folyo ile sararak (düşük su kaybı) saklamıştır. Testler, su alımıyla genleşmelerin arttığını ortaya koymuştur. %95 ile %99 RH'de tutulan silindirlerin maksimum genleşmesi  $2.0 \times 10^{-3}$ , alüminyum folyo ile kaplı silindirlerde ise  $1.0 \times 10^{-3}$  genleşme değerleri elde edilmiştir. Dışarıdan giren su ASR'den etkilenen betonun genleşmesini arttırmasına rağmen su girişi olmaksızın bile olası yapısal bozulmalara neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Reaktif agregaya içeren numuneler, reaktif olmayan agregaya içeren numunelerle aynı miktarda su emme göstermiştir. Bu nedenle ASR'den etkilenen betondaki su hareketi sağlam betonda gerçekleşen su hareketi ile aynıdır [240].

Milton ve Toulemonde, nem koşullarının değişmesine bağlı olarak ASR kaynaklı genleşmeyi karakterize etmek için hem silindir hem de kırış numuneleri üzerinde çalışmalar yürütmüştür. %100 bağıl nemde ve su geçirmez alüminyum folyo ile kapatılmış numuneler iki yıl boyunca su içine batırılmıştır. İki yıl boyunca su içinde muhafaza edilen numuneler daha sonra %30 bağıl neme maruz kalmıştır. Çalışma, daha sonraki su emme özelliğiyle örneklerin daha da genleşmenin oluştuğunu ortaya koydu [241].

### 2.7.3.3. Alkali İçeriği

Portland çimentosu betondaki en önemli alkali kaynağı olmasına rağmen, agregaya, mineral katkıları, özel katkıları, deniz suyu ve buz çözücü tuzlar gibi diğer malzemeler alkali miktarına katkıda bulunabilir. Alkali miktarı  $\text{Na}_2\text{O}$  eşdeğeri ile gösterilen ve  $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$ 'ya eşit alkali kütle yüzdesi cinsinden ifade edilmiştir [242].

ASTM C33 standardı potansiyel olarak reaktif agregaya içeren betonda kullanılacak çimentonun eşdeğer  $\text{Na}_2\text{O}$  oranını %0.60 ile sınırlandırmıştır. Bu limit Stanton'un yaptığı çalışmalara dayalıdır. Avrupa standartları, beton içindeki toplam alkali içeriği için  $3 \text{ kg/m}^3$ 'lük eşik değer belirlenmiştir. Kanada CSA A23.1 standardı, yapının tipine ve çevre koşullarına göre, çimento, kimyasal katkı ve suyun içerisindeki toplam alkaliler için eş değer  $\text{Na}_2\text{O}$  değerine  $1.7$  ile  $3 \text{ kg/m}^3$  arasında bir sınır belirtmektedir [229]. Bununla birlikte standartlar buz çözücü tuzların, deniz suyunun

veya agregaların alkali içeriğine olan katkısını hesaba katmamaktadır. Betonarme bir yapının çevresel koşullarının beton tipi seçiminden önce değerlendirilmesi gerektiği bilinmektedir. Bunun nedeni esas olarak, buz çözücü tuzlardan veya deniz suyundan kaynaklanan alkali girişinin nem yoluyla beton içerisine sızıntı yapmasıdır. Sibbick ve Page, U.K. standardının gerektirdiği başlangıçta  $\text{Na}_2\text{O}$  eşdeğeri  $3 \text{ kg/m}^3$  sınırının altında olan betonları  $\text{NaCl}$  solüsyonuna maruz bırakarak ASR'nin zararlı etkilerini gösterdiğini belirlemiştir. Düşük reaktiviteye sahip agregalardan ve betonun  $\text{Na}_2\text{O}$  eşdeğeri  $3\text{-}4 \text{ kg/m}^3$  olmasına rağmen  $\text{NaCl}$  çözeltisine maruz kaldığında belirgin ASR'nin oluştuğunu tespit etmişlerdir [243].

Chatterji ve ark. tarafından yürütülen çalışmada farklı alkali tuzların etkisi belirlenmiştir, potasyum tuzlarının sodyum esaslı tuzlara göre reaksiyon oranını arttırdığı tespit edilmiştir.  $\text{NaOH}$ 'nin, bir jel oluşturmadan ziyade reaktif agregayı çözme eğiliminde olduğu da tespit edilmiştir. Ancak alkali'nin  $\text{NaCl}$ 'den kaynaklandığı durumda ise tam tersi bir olayın meydana geldiği bulunmuştur [231].  $\text{NaOH}$  çözeltisine batırılmış örneklerin  $\text{NaCl}$  içinde tutulanlardan daha fazla bir genleşme oluşturduğu Duchesne and Berube tarafından belirlenmiştir. Ayrıca  $\text{NaOH}$ 'de saklanan örnekler için ilk alkali içeriğinin önemli olmadığı bildirilmiştir. Alkali içeriği az veya yüksek olan örneklerin hepsi  $\text{NaOH}$ 'de beş yıl tutulduktan sonra  $3.5 \times 10^{-3}$  genleşme değerine ulaşmıştır. Ancak,  $\text{NaCl}$ 'de saklanan numuneler için başlangıçtaki alkali miktarı nihai genleşme için önemli bir unsur olmaktadır [86].

Bérubé ve ark, agregalarla özellikle feldspat açısından zengin olanlarda zamanla önemli miktarlarda alkali açığa çıkabileceğini vurgulamıştır. 1.5 yıl boyunca  $0.7 \text{ M}$  alkalın solüsyonunda bekletilen, agregalar tarafından, serbest bırakılan alkali miktarı su veya kirece doymuş solüsyonlarda belirgin derecede artmıştır.  $1850 \text{ kg/m}^3$ 'lik bir agreganın içeriği için, serbest bırakılan alkali miktarı,  $0.1 \text{ kg/m}^3$ 'den  $12.7 \text{ kg/m}^3$   $\text{Na}_2\text{O}$  eşdeğeri arasında değişir ve ortalama  $2.2 \text{ kg/m}^3$ 'dür [244].

#### **2.7.3.4. Reaktif Agreganın Tipi**

Tablo 2.5, ACI 221 Komitesi'ne göre zararlı şekilde reaktif kayalar, mineraller ve sentetik maddelerin listesi sunulmuştur [245]. Reaktif agreganın türü reaksiyonu

etkiler, bazıları daha hızlı tepki gösterirken bazıları daha yavaş reaksiyon gösterir. Çoğu kayada bir bileşen olarak silis bulunur, ancak tüm silisli agregalar ASR jeli üretmez. Mineral kuvars reaktif değildir, oysa mineral opal reaktiftir. Bu fark mikroyapıya açısından etkilidir; Mineral opal, yüksek pH ortamında alkali saldırısına karşı zayıf ve oldukça düzensiz bir yapıya sahiptir [229].

Reaktif olarak kabul edilen silika mineralleri: opal, tridimit, kristobalit, volkanik cam, kriptokristalin kuvars ve gerinimli (strained) kuvarztır. Bu yapılar; Şeyl, kumtaşı, silisleşmiş karbonat kayaçları, çört, çakmaktaşı, kuvarsit, kuvars-arenit, gnays, argillit, granit, greywak, siltaşı, arenit, arkoz ve hornfelsde bulunur. Agregaların reaktivitesi reaktif minerallerin varlığından etkilenmektedir [246].

**Tablo 2.5.** ASR açısından zararlı Reaktif kayaçlar, mineraller ve sentetik maddeler [245]

Reaktif madde (mineral)	Kimyasal bileşim	Fiziksel karakter
Opal	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amorf
Kalsedon	$\text{SiO}_2$	Mikrokristalin ile kriptokristalin; çoğunlukla lifli yapı
Bazı kuvars formları	$\text{SiO}_2$	Mikrokristalin ile kriptokristalin, kristal yapıda fakat yoğun kırıklar mevcut.
Kristobalit	$\text{SiO}_2$	Kristal
Tridimit	$\text{SiO}_2$	Kristal
Riyolit, dasitik, latitik veya andezit cam veya kriptokristalin devitrifikasyon ürünler	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ , alkalın topraklardan daha az oranda silisli ve alkaliler.	Volkanik kayaçların yada tüflerin matrisi olarak amorf veya kristal yapıda
Sentetik silisli cam	$\text{Al}_2\text{O}_3$ ve diğer maddelerden daha az oranda silisli.	Amorf



### 2.7.3.5. Agregada Boyutu

Reaktif agregada tanelerinin boyutu, reaksiyon hızı ve betonun genişmesi açısından büyük etkiye sahiptir. Diamond ve Thaulow, 20 µm ve 30 µm arasında değişen agregada boyutlarının kaba agregalara göre daha geniş genişmeye neden olduğunu ve reaksiyon hızını arttırdığını göstermiştir. Tane boyutu 20 µm-30 µm'luk agregada içerikli harç örnekleri için genişleme süreci birkaç ay içinde sona erdiği fakat aynı agreganın daha kabası (125 µm olan) ile hazırlanan örneklerin daha uzun süreli ve aşamalı bir genişleme yarattığı belirlenmiştir [247].

Hobbs ve Gutteridge 150 mikron ile 4.8 mm arasında opalin agreganın ile tane boyutunun etkisini incelemişlerdir. Sonuçta, agregada tane boyutunun azalmasıyla genişlemenin arttığı bu etkinin, agreganın opalin içeriğinin %4 ile %6 olduğunda daha belirgin olduğu bildirilmiştir [248].

Kuroda ve ark., agregada tane boyutunun azalmasıyla birlikte genişlemenin arttığını bulmuştur. Araştırmada NaOH çözeltisi içinde tutulan örnekleri otoklav yöntemini kullanarak test edilmiştir. Tane boyutuna bakılmaksızın reaktif agreganın toplam yüzeyi ile genişleme arasında bir korelasyon olduğu sonucuna varılmıştır [249].

Jin, Shayan ve Xu, agregada olarak geri dönüştürülmüş reaktif cam içeren betonun genişmesinin camın türüne bağlı olarak belli bir boyuta öğütülmesi şartıyla önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir [250, 251].

### 2.7.3.6. Porozite

Beton matrisinde iyi dağılmış gözenekler ağı olması şartıyla ASR'nin neden olduğu genişleme oldukça azalmaktadır. Reaksiyon hızı etkilenmese de, jelin şişmesi gözeneklere doğru olmakta ve betonun genişmesi azaltılmaktadır [252]. Hava sürüklenme özelliği donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan betonlarda yararlı etkiler göstermektedir. Aynı etki ASR hasarının azaltılmasında da etkili olmaktadır. İyi dağıtılan gözenekler donma sürecinde suyun genişmesi için yer bırakarak hasarı azaltmaktadır. Benzer sonuçlar, Jensen ve ark. tarafından yürütülen deneysel

çalışmada elde edilmiştir. Harç örneklerinde %4 hava sürüklendiğinde genişlemenin %40 oranında bir azalma gösterdi belirlenmiştir [232].

Collins ve Bareham, gözenekli agregalar kullanarak ASR'nin neden olduğu genişleme ve zararın azaldığını göstermiştir. Sonuç olarak, alkali silis jelinin gözenekli agregada içinde kısmen yer alması ASR hasarını azaltmaktadır. Ancak daha önemlisi, agregalar tarafından emilen su ile alkalinin seyrelmesi nedeniyle az miktarda jel üretilmektedir [253].

#### **2.7.4. Alkali Agregada Reaksiyonunun Mekanik Özelliklere Etkisi**

Moulton ve arkadaşlarının deneysel çalışması silindirik standart numuneler için ASR'nin basınç dayanımında bir azalmaya neden olmadığını göstermiştir [254]. Giaccio ve ark., reaktif agregalı betonlarda hızla gelişen ASR durumunda betonun zamanla dayanım kazanamayacağını göstermiştir. Yüksek reaktif agregada içerikli betonlarda  $1.0 \times 10^{-3}$  doğrusal genişleme için basınç dayanımında %12 kayıp belirlenmiştir. ASR'nin yavaş gelişmesi durumunda ise basınç dayanımı olumsuz etkilenmektedir [255]. Swamy ve Al-Asali, ASR'nin opal veya erimiş silis içeren numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini test etmiştir. Her iki beton da dayanımlar başlangıçta büyük bir artış ve bunu takiben kademeli bir düşüş göstermiştir: opal içeren numuneler 10-20 gün ve erimiş silis içerenler ise 2. aydan itibaren dayanım kaybına uğramıştır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 2.6'da verilmiştir [256].

ASR sebebiyle oluşan çatlaklar nedeniyle betonun çekme mukavemeti önemli ölçüde azalmaktadır. Swamy ve Al-Asali tarafından yapılan çalışmalar, çekme mukavemetinin betonun en olumsuz etkilenen mekanik özelliği olduğunu göstermiştir. Basınç mukavemeti ile karşılaştırıldığında çekme mukavemeti erken yaşlarda bile daha hassastır. Gözle görünür çatlaklar  $0.5 \times 10^{-3}$  genişleme değerinde gözlemlenmekle birlikte, eğilme mukavemetindeki kayıplar bu noktadan önce gerçekleştiği gözlemlenebilir [256]. Swamy ve Al-Asali tarafından yapılan çekme dayanımı üzerine çalışmalar Tablo 2.7'de verilmiştir.

**Tablo 2.6.** Swamy ve Al-Asali tarafından yapılan ASR çalışması [256]

Doğrusal Genleşme ( $10^{-3}$ )	%4.5 Opal		%15 Erimiş silis	
	Zaman (Gün)	Dayanım Kaybı (%)	Zaman (Gün)	Dayanım Kaybı (%)
0.5	6	9	40	12
1	8	11	60	11
2	17	20	87	15
4	36	27	140	30
6	60	30	200	40
10	117	38	-	-
16	270	62	-	-

**Tablo 2.7.** Swamy ve Al-Asali tarafından yapılan çekme dayanımı üzerine çalışmalar

Doğrusal Genleşme ( $10^{-3}$ )	Zaman (Gün)	Çekme Dayanımı Kaybı (%)	
		Eğilme Dayanımı	Doğrudan Çekme
0.2	27	11	11
0.4	36	20	19
0.5	40	30	27
0.6	45	29	23
0.8	54	40	26
1.0	60	48	29
1.5	75	56	38
3.0	110	67	55
6.0	200	78	69

ASR'den etkilenen betonun elastisite modülünün %20 ile %70 oranında azaldığı belirlenmiştir. ASR şiddetine bağlı olarak rijitlik kaybı ve betonun genleşmesi arasında önemli bir korelasyon belirlenmiştir [254–256]. Multon ve ark., tarafından yapılan çalışmada hidratasyon süreci bir noktaya kadar ASR'nin zararlı etkisine karşı koymaktadır. Bu etki elastisite modülüne doğrudan yansımaktadır. Opal ihtiva eden numunelerin doğrusal genleşmesi 28 günde  $3.16 \times 10^{-3}$ 'ten 100 gününde  $8.83 \times 10^{-3}$ 'e, elastisite modülündeki kayıp %51'den %56'ya yükselmiştir. Bu süreçte numunelerin su emme değerleri 0.147 kg'dan 0.410 kg'a yükselmiştir. Diğer özelliklerde olduğu

gibi elastisite modülündeki kayıp, reaktif agrega türüne ve reaksiyon hızına bağlıdır [254].

## 2.8. Karbonatlaşma

Beton içerisindeki bazı malzemelerin karbonat esaslı ürünlere dönüşmesi karbonatlaşma olayı için önemli bir parametredir. Dolayısıyla, karbonatlaşma olayının ilerleme hızı, beton özelliklerine ve çevresel maruz kalma koşullarına bağlıdır. Bu etkiler zaman yasasının karekökünü bağlıdır [257]. Karbonatlaşma reaksiyonu sırasında oluşan su karbonatlaşma sürecinin kendi kendisini devam ettirmektedir. Ayrıca karbondioksitin betonun derinliğine nüfuz etmesinde çeşitli şartların oluşması gerekmektedir [197]. Karbondioksitin beton gözeneklerinde çözülmesi ile reaksiyon sonucu üretilen karbonatlar, gözenek boyutunu ve gözenekler arasındaki ara bağlantı derecesini küçültüp geçirgenliği azaltmaktadır. Buna ek olarak karbon dioksit, o noktadaki karbonatlaşabilir tüm malzemeler karbonatlaşma reaksiyonunda tükettikten sonra belirli bir noktanın ötesine geçebilir. Betonarme gözenek hacmi ve geçirgenliğin azaltılmasıyla donatısız betonda, karbonatlaşmanın hem mukavemet hem de dayanıklılık açısından yararlı etkileri vardır [171]. Bununla birlikte, betonarme yapılarda gerçekleşen karbonatlaşma, çeliğin korozyonunu başlatmada önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, betonarme yapıların dayanıklılık performansını ve ömrünü azaltmaktadır. Karbonatlaşma reaksiyonu karbonatlaşma tamamlandıktan sonra beton boşluk suyunun pH değerini 13.2'nin üstünden 8.5'in altına düşürmektedir. Bu işlem çelik seviyesine ulaştığında azaltılmış pH çeliğin pasif gama-ferrik oksit tabakasının kararsız hale gelmesine ve depasifize olmasına neden olur. Gamma ferrik oksit, alkaline ortamda çeliğin yüzeyinde oluşan  $Fe_2O_3$ 'ün ince bir film tabakasıdır [258]. Yeterli oksijen ve nem mevcutsa, beton içerisindeki çelikte korozyondan sonra kesit kaybı başlamaktadır. Böylelikle, betonarme elemanın veya yapının servis ömrü içerisinde yük taşıma kapasitesi azalacaktır.

Karbonatlaşma çelik korozyonuna ve uzun süreli dayanıklılığa ciddi şekilde zarar verebileceği gibi, betonarme bir yapının tasarım aşamasında olduğu kadar mevcut bir betonarme yapının ömrü boyunca da etkili olmaktadır. Beton yapılarda gerekli hizmet ömrü ve dayanıklılık performansını sağlamak için betonda kullanılan

bağlayıcı ve çevre etki koşulları dikkate alınmalıdır. Yapıdaki beton için karışım oranları ve pas payı derinliğinin arzu edilen servis ömrünün elde edilmesi için önemli katkısı bulunmaktadır. Benzer şekilde, mevcut beton yapıların artık servis ömrünün uzatılması için de bakım ve onarım planlarının etkili bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Betonun karbonatlaşma problemi, karbonatlaşma hızı veya derinliğinin belirlenmesi 70'lerin sonlarından beri incelenmektedir [259]. Güney Afrika'da, beton yapıların karbonatlaşmaya bağlı korozyon hasarının artan olasılıklarını takiben, 90'lı yılların başında beton karbonatlaşma problemine dikkat edilmiş ve dolayısıyla karasal iklimdeki yapıların dayanıklılık performansını ve ömrünü ölçme ihtiyacı ortaya çıkmıştır [260,261].

Betonda karbonatlaşma olayına bazı nedenlerden dolayı daha fazla dikkat edilmelidir. Bu nedenler;

- Mevcut altyapı bakım ve onarımının yüksek maliyeti,
- Yeni malzemelere göre mevcut tasarım yöntemlerinde iyileştirme gereği,
- Sanayileşme nedeniyle artan çevre kirliliği,
- Beton yapıların ömrünü uzatma ihtiyacı.

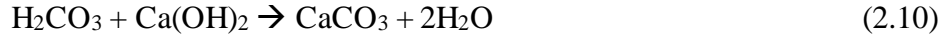
Benzer şekilde, karbonatlaşmanın beton yapıların dayanıklılık performansı ve ömrü üzerindeki etkileri üzerine yapılan araştırmaların çoğu dünyanın hemen hemen her bölgesinde yapılmıştır. Bu araştırma sonuçlarını başka bir bölgeye aktarmadaki problem, bölgeler arasındaki malzemelerinin uygulamasının çok farklı olabileceğidir. Ayrıca, karbonatlaşma ve dayanıklılık performansı arasında ilişki çevresel etki koşullarına da bağlı olmaktadır.

Betonun yapım yöntemleri, malzeme bileşenindeki değişiklikler dayanıklılığın azalmasına neden olabilir [260]. Örneğin, ekonomik kazançlar doğrultusunda hızlı tren inşaatı için çimento özelliklerinde meydana gelen değişiklikler Portland çimentosu

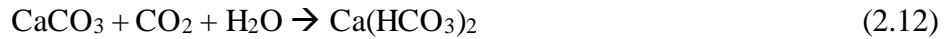
inceliğinin ve trikalsiyum silikat içeriğinin artışıma neden olmaktadır. Bu tür çimentolar beton yapımında, erken mukavemet geliştirme hızını arttırmaktadır.

### 2.8.1. Karbonatlaşmanın Hidratasyon Ürünlerine Etkisi

Genel olarak, normal betonun pH değeri 12.6'dan 13.5'e kadar değişir. Çimento bünyesindeki  $C_3S$  ve  $C_2S$  hidratasyonundan kaynaklanan CH varlığı esas olarak pH değerini arttırmaktadır [262]. Karbonatlaşma etkisi çimento pastası alkalinitesinin önemli derecede nötralizasyonuna yol açar. Karbonatlaşma,  $CO_2$  gazının betondaki gözenekler boyunca difüzyonundan ve daha sonra su varlığında hidratasyon ürünü olan özellikle CH ile reaksiyonudur. Karbonatlaşma, beton içerisindeki gözenek suyunun pH değerinin yaklaşık 8'e düşmesine neden olur ve bu etki çeliğin pasif tabakasını yok ederek korozyonun başlamasına izin verir. Karbonatlaşma, beton yüzeyinden içeriye doğru başlar ve hızı nem, çimento kimyasal bileşimi, su/bağlayıcı oranı, hidratasyon derecesi, beton geçirgenliği, sıcaklık ve  $CO_2$  konsantrasyonu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [201, 263]. Jiang ve vd. göre, difüzyon olmuş  $CO_2$  ve beton gözenekleri içindeki su CH ve C-S-H'yi çözen karbonik asit oluşturur. Karbonatlaşma reaksiyonları aşağıda (Denklem 2.9-2.11) özetlenmiştir.



CH'in neden olduğu karbonatlaşmanın 4 aşamadan oluştuğu yapılan araştırmalarda özetlenmiştir [264]. Birinci aşama, nem varlığında karbondioksit ile kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyondur. İkinci aşama (Denklem 2.12), çözünmeyen  $CaCO_3$ 'ün çözülebilir bir faza dönüşmesidir.



Üçüncü aşamada elde edilen çözünmeyen karbonatların büyük kalsit ve aragonit kristallerine yeniden kristalleştirilmesi ve dördüncü safha tam karbonatlaşma olarak tanımlanır. Beton gözeneklerinde  $CaCO_3$ 'ün kristalleşmesi nedeniyle betonun

gözenekliliği ve geçirgenlik özellikleri üzerinde tam karbonatlaşmanın önemli bir etkisi olduğu önceki bölümlerde de belirtilmiştir. Suda çözünmemiş çimento tanelerindeki başlıca bileşikler, aşağıda gösterildiği gibi CO<sub>2</sub> ile reaksiyona girmektedir. Portland çimento hidrasyon ürünlerinin karbonatlaşmadan sonra oluşan ürünleri Tablo 2.8'de verilmiştir.

**Tablo 2.8.** Hidrasyon ürünlerinin karbonatlaşma sonrasındaki değişimleri [261]

Hidrasyon Ürünleri	CH	CSH	C <sub>3</sub> A- Hidratları	C <sub>4</sub> AF- Hidratları	AFt/ AFm
Karbonatlaşma Ürünleri	C	C,CSH	C, alümina jel	C, ferrik oksit, alümina	Alçıtaşı, alümina jel

### 2.8.2. Beton Mikroyapısı ve Taşınım Özelliklerinin Karbonatlaşmaya Etkisi

pH seviyesindeki önemli bozulmaya ek olarak karbonatlaşmanın genel süreci çimento matrisinin gözeneklilik ve gözenek boyut dağılımını da değiştirebilir. Geleneksel betonda karbonatlaşma için, yarı kararlı kalsiyum karbonat Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, gözenek boyutlarındaki değişikliklerin başlıca nedenlerinden biri olarak kabul edilir ve gözenekliliğin azalmasına yol açar [265]. Bununla birlikte, Borges ve ark., yüksek dayanımlı betonlarda CO<sub>2</sub> difüzyonu sonucu ana faz olan C-S-H gözeneklilik ve geçirgenliğinin potansiyel olarak biraz artacağını iddia etmiştir [266]. Lagerblad, tarafından belirtildiği üzere, karbonatlaşma etkisi puzolan içeren karışımlarla portland çimentosu ile yapılanlardan tamamen farklı olabilir. Bu etki karbonat dönüşüm mekanizmasına ve CH üzerindeki CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> çekirdeklenme moduna bağlıdır [267].

Karbonat iyonlarının konsantrasyonu yüksekse, CH bileşiklerinin yüzeyine yada başka bir yüksek konsantrasyon fazı olan (Ca<sup>+2</sup>) ile birleşebilir. Diğer taraftan gözeneklilik düşük CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> konsantrasyonu altında değişmeyebilir. Bununla birlikte karbonatlaşma gözenekteki Ca<sup>+2</sup> ve CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> iyonlarının iletim hızına bağlıdır.

Claisse vd., karbonatlaşmanın, özellikle düşük mukavemetli betonlar için permabilite ve poroziteyi önemli derecede azalttığını iddia etmişlerdir. Ancak, toplam gözenek hacminin yalnızca biraz değiştiğini ve gözeneklerde çökelen  $\text{CaCO}_3$ 'ün bu hacmi etkilemediğini belirtmişlerdir [268].

### 2.8.3. Puzolanların Karbonatlaşma Üzerindeki Etkisi

Zdzisława ve Wioletta tarafından yürütülen KYB'de karbonatlaşma hakkında bir çalışmada, karbonatlaşmanın olumsuz etkisi çimentoyu %40 kısmen cüruflla değiştirerek yapılan KYB'lerin gözenekliliğinde kaydedildi. Karbonatlaşmadan sonra, 25 nm'den büyük kılcal gözeneklerde, su emme ve penetrasyonunda artış ve %3 NaCl solüsyonu varlığında donma-çözülme direncinde bir azalma gözlenmiştir [269].

Papadakis, çimentonun mineral katkıları ile kısmi yer değiştirilmesi karbonatlaşma süresini kısaltabileceği ve dolayısıyla çelik donatıda korozyon tehlikesinin artabileceği sonucuna varmıştır. Çimentoyu puzolanlarla yer değiştirerek, karbonatlaşabilir malzeme miktarının azaltıldığı ve bunun sonucunda karbonatlaşma oranının daha hızlı ilerlediğini iddia etmiştir. Puzolanik reaksiyon,  $\text{CO}_2$  ile reaksiyona girmek için mevcut olan CH fazını azaltmaktadır. Böylece betona aynı miktarda nüfuz eden  $\text{CO}_2$  daha fazla karbonatlaşmaya yol açabilir [270].

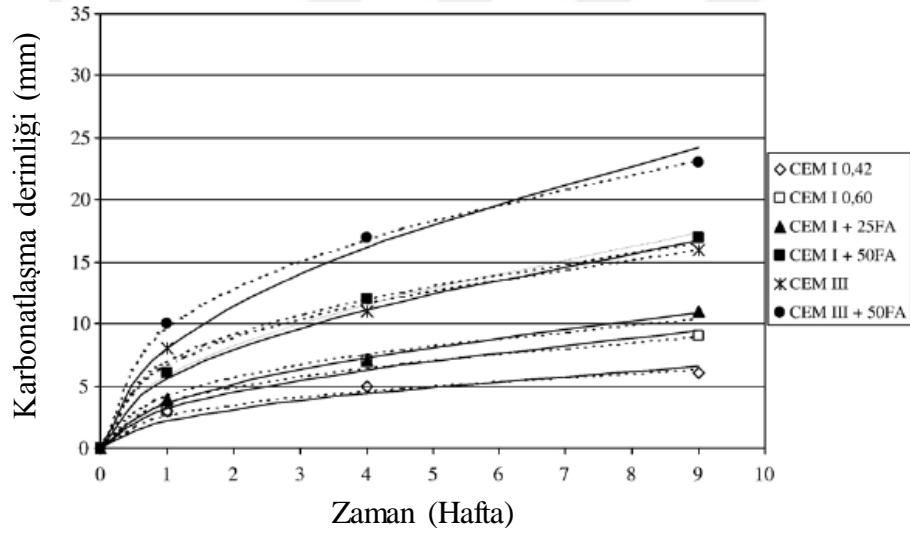
Han ve Lynsdale, %40'a kadar uçucu kül ve farklı silis dumanı yüzdeleri (%0-15) kullanarak ikili ve üçlü kompozite çimento ile yüksek dayanımlı betonların mukavemetini, geçirgenliğini ve karbonatlaşmasını incelemek için bir araştırma yapmıştır. S/Ç oranı 0.27-0.5 arasında değişmektedir. Çimentoya kısmi olarak katılan uçucu kül yüzdesinin artması ile karbonatlaşma derinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Silis dumanının kullanılması sadece çimento lu karışımlara kıyasla karbonatlaşma derinliğinde küçük bir artışa yol açmıştır. Bununla birlikte, doğal şartlar altında iki yıl sonra %40 uçucu kül katkılı beton için maksimum karbonatlaşma derinliğinin sadece 2 mm gibi makul bir değer olduğu açıklanmıştır [271].

Atiş, tarafından yapılan çalışmada yüksek oranlarda uçucu kül (%50-70) içeren betonların, hızlandırılmış karbonatlaşma testi ile karbonatlaşma özellikleri



incelenmiştir. Yazar %70 ve %50 uçucu kül katkılı betonların geleneksel betonla ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir karbonatlaşma derinliğine sahip olduğunu belirtmiştir. Buna ek olarak, süperakışkanlaştırıcının karbonatlaşma derinliğine etkisinin yüksek dayanımlı betonlar için önemsiz olduğu saptanmıştır [272].

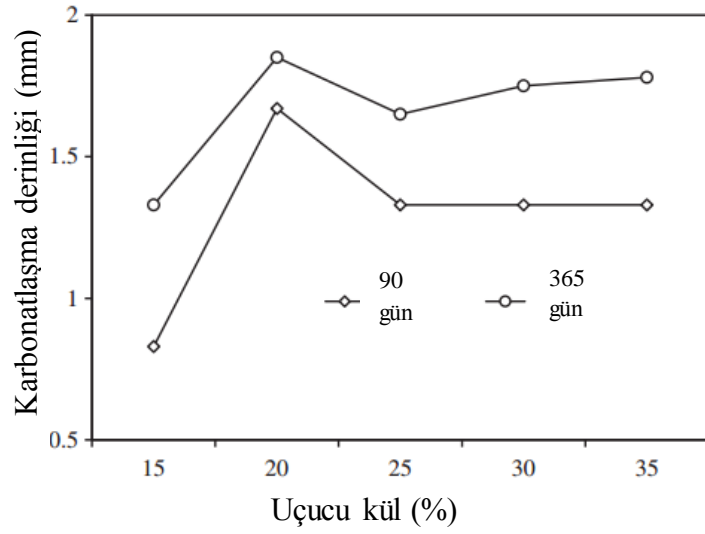
Sisomphone ve Franks, kür zamanının yüksek miktarda puzolanik malzeme (%25 ile %50 FA-uçucu kül) içeren betonlar için karbonatlaşma derinliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Yazarlar, kür süresinin (3, 7 ve 28 gün) artması karbonatlaşma derinliğini azalttığı sonucuna varmıştır. Yapılan çalışmaya ait sonuçlar Şekil 2.14'de sunulmuştur [273].



**Şekil 2.14.** Sisomphone ve Franks tarafından yapılan karbonatlaşma deneyi sonuçları [273]

Gjørve'ye göre mineral katkıları puzolanik reaksiyonundan dolayı reaktif malzemeler CH'yi tüketerek C-S-H oluşturabilirler. Sonuç olarak, karbonatlaşmadan önce bile CH miktarının azalması gözenek suyunun pH değerinde bir azalmaya yol açacaktır. Puzolanların çimento ile kısmi yer değiştirilmesi nedeniyle meydana gelen pH azalması, karbonatlaşma olayının oluşması tehlikesini artırabilir [274].

Younsi ve arkadaşları %50 uçucu kül katkısı ile yapılan betonların karbonatlaşmaya karşı düşük direnç gösterdiğini kaydetmiştir. Referans karışımlarının gözeneklilik değerlerinin %50 uçucu kül katkılı karışıma yaklaşık olarak eşit olmasına rağmen, uçucu kül katkılı karışımın referans karışıma göre daha fazla karbonatlaştığı görülmüştür. Uçucu kül içeriğinin %25 ve üzerinde olması durumunda 90 gün içinde karbonatlaşma derinliği üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Şekil 2.15'de gösterildiği gibi uzun süreli CO<sub>2</sub>'ye maruz kalma (365 gün) karbonatlaşmayı hafif derecede arttırmıştır [275].

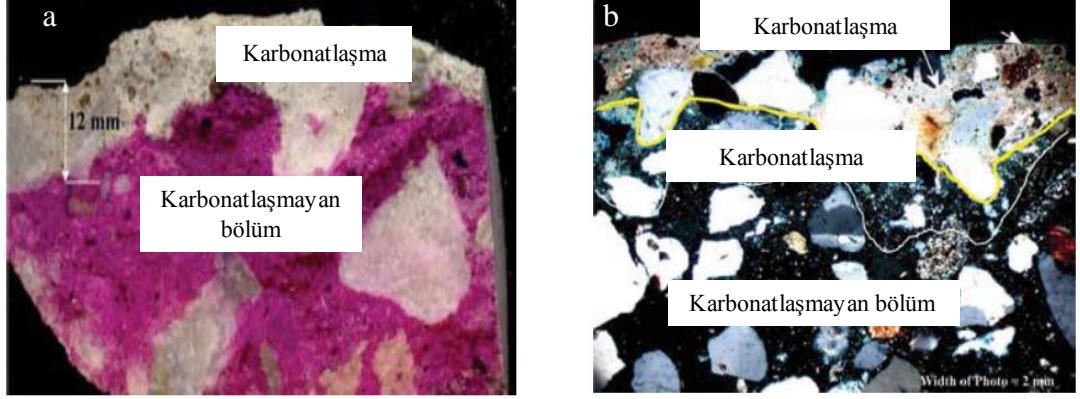


**Şekil 2.15.** Çeşitli uçucu kül içeriğinin KYB'lerde karbonatlaşma derinliği üzerine etkisi [275]

#### 2.8.4. Karbonatlaşmanın Ölçülmesi

Betonda karbonatlaşma derinliğini değerlendirmek için çeşitli ölçüm teknikleri önerilmiştir. Fenolftalein çözeltisi (pH indikatörü) geleneksel olarak karbonatlaşma derinliği ölçümleri için kullanılır. Beton kırık yüzeyine fenolftalein sprey ile püskürtülür. Karbonatlaşmamış alanların rengi pembeye dönüşürken, karbonatlaşma gerçekleşmiş alanların rengi Şekil 2.16 (a)'de gösterildiği gibi değişmez. Karbonatlaşma olayı ayrıntıları petrografik mikroskop tekniği kullanılarak da elde edilebilir. Bu teknikte iki tür numune kullanılabilir. CO<sub>2</sub>'ye maruz kalan beton yüzeyden küçük beton veya matris parçalarında incelemeler yapılmaktadır.

Petrografik mikroskop kullanılarak karbonatlaşmanın belirlenmesi için çok ince kesitler hazırlanmalıdır. Matriste karbonatlı ve karbonat içermeyen alanlar, Şekil 2.16 (b)'de gösterilen farklı mineraller nedeniyle polarize ışık altında farklı bir renk tayfi sergileyecektir [276].

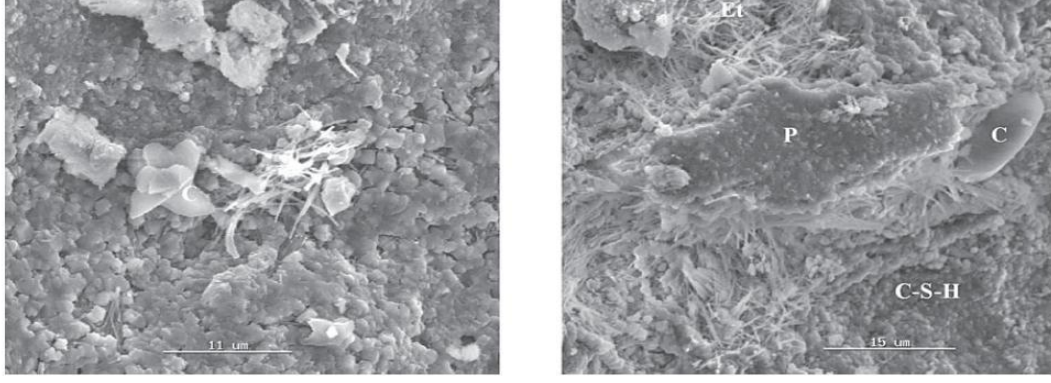


**Şekil 2.16.** Karbonatlaşma etkisinin incelenmesi a)Fenolftalein çözeltisi b)Petrografik mikroskop [276]

Karbonatlaşmış betonun somut mikroyapısal morfolojik gözlemleri ve karbonatlaşmaya bağlı olarak hidrasyon ürünlerinin kimyasal değişiklikleri için, SEM'in (Şekil 2.17) sekonder modu çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır [277].

Phenolphthalein göstergesinin doğruluğunu incelemek için Chang ve Chen karbonatlaşma olayı boyunca tipik pH dağılımını incelemek için üç farklı ileri teknik kullanmıştır:

- (TGA) yöntemi, CH ve C konsantrasyonunu belirlemek için,
- (XRD) testleri, CH ve C'nin yoğunluk dağılımını belirlemek için,
- Fourier transform infrared spektroskopisi (FTIR) test yöntemi C-O varlığını (dolaylı olarak  $\text{CaCO}_3$  varlığı) tespit etmek için [278].



**Şekil 2.17.** Karbonatlaşma etkisinden elde edilen kırık numunelerinin karbonatlaşma sonrası morfoloji ve hidrasyon ürünleri (C:Karbonat, P:Portlandit, Et:Etrenjit) [277]

### 2.8.5. Karbonatlaşma Derinliğinin Hesaplanması

Genel olarak, karbonatlaşma denklemde gösterildiği gibi difüzyona dayalı bir olay olarak (Denklemler 2.13) kabul edilmektedir [257].

$$d = Kt^{1/n} \quad (2.13)$$

Burada; d karbonatlaşma derinliği, K karbonatlaşma katsayısı, t zaman ve n eğri yudurma faktörü olarak tanımlanmaktadır.

Denklemler sadece sabit konsantrasyonlardaki CO<sub>2</sub> ve üniform biçimli pasta özellikleri için uygulanabilir ve elde edilen sonuçlar gerçek maruz kalma koşullarında elde edilemeyebilir [279]. Buna ek olarak, önemli bir miktarda yayılmış CO<sub>2</sub>, karbonatlaşma ilerlemesi sırasında çimento pastasındaki hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girer. Papadakis, çimento pastasının hidrasyon ürünleri ile reaksiyon yoluyla CO<sub>2</sub>'yi yakalama yada bağlama kabiliyetini göz önünde bulundurarak, denklemde gösterildiği gibi bir fiziko-kimyasal yaklaşımda sabit K'yi tanımlamak için daha gelişmiş bir matematiksel model (Denklemler 2.14) önermiştir [270].

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{e,CO_2} \left(\frac{CO_2}{100}\right) t}{0.33CH + 0.214 CSH}} \quad (2.14)$$

Burada;  $X_c$  karbonatlaşma derinliğini,  $D_{e,CO_2}$  karbonatlaşmış betonda  $CO_2$  yayılımı ( $m^2/s$ ),  $CO_2$  beton yüzeydeki ortam havasının karbondioksit içeriği,  $t$  zaman (s),  $CH$  tahmini kalsiyum hidroksit içeriği,  $C-S-H$  tahmini kalsiyum silikat hidrate içeriğini tanımlamaktadır.

Audenaert vd, karbonatlaşma sürecinin difüzyon niteliğinden dolayı KYB'lerde karbonatlaşma için Fick'in ilk yasasının temel alınabileceğini bildirdiler. Onlar, denklemde verildiği gibi karekök zaman ilişkisine dayanan basit bir modeli önerdiler. Bu ilişki, aşağıda verilen (Denklem 2.15) ilk Fick yasasından türetilmiştir [280]:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (2.15)$$

Burada;  $J$  simgesi  $CO_2$  akışını ( $mol/m^2.s$ ),  $D$  difüzyon katsayısı ( $m^2/sn$ ),  $C$   $CO_2$  konsantrasyonu ( $mol/m^3$ ),  $x$  ise difüzyon için konum değişkenidir (m).

Sonuç olarak; RILEM'in KYB dayanıklılığı hakkında RILEM TC205'in nihai raporu (2008) KYB'nin bazen geleneksel betona kıyasla daha büyük ve bazen daha küçük bir karbonatlaşma derinliğine sahip olduğunu iddia etti. 2008 öncesindeki deneysel çalışmalardan yola çıkarak, KYB'de bulunan  $CH$  ve  $C-S-H$ 'nin yüksek olması nedeniyle karbonatlaşma tehlikesinin azalabileceğini ve dolgu maddesinin türü, eklenme biçimi ve etkisine çimento pastasının bileşimine bağlı olduğu belirtilmiştir [276].

## 2.9. Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yangına maruz kalan betonda sıcaklığa bağlı olarak kimyasal ayrışma gerçekleşmektedir. Meydana gelen ayrışmalar ve kimyasal tepkimler Şekil 2.18'de özetlenmiştir. Yangın hakkında genel bir fikir edinmek için Bazant ve Kaplan'ın verdiği sıcaklık artışı ile betonda meydana gelen olaylarla ilgili basit açıklamalar aşağıda verilmiştir [281].

100 °C üzeri: Sertleşmiş çimento pastasından ve agregadan buharlaşabilir suyun uzaklaşmasından dolayı ağırlık kaybı söz konusudur. Yaklaşık 65-75 °C sıcaklık aralığında etrenjit ayrışır.

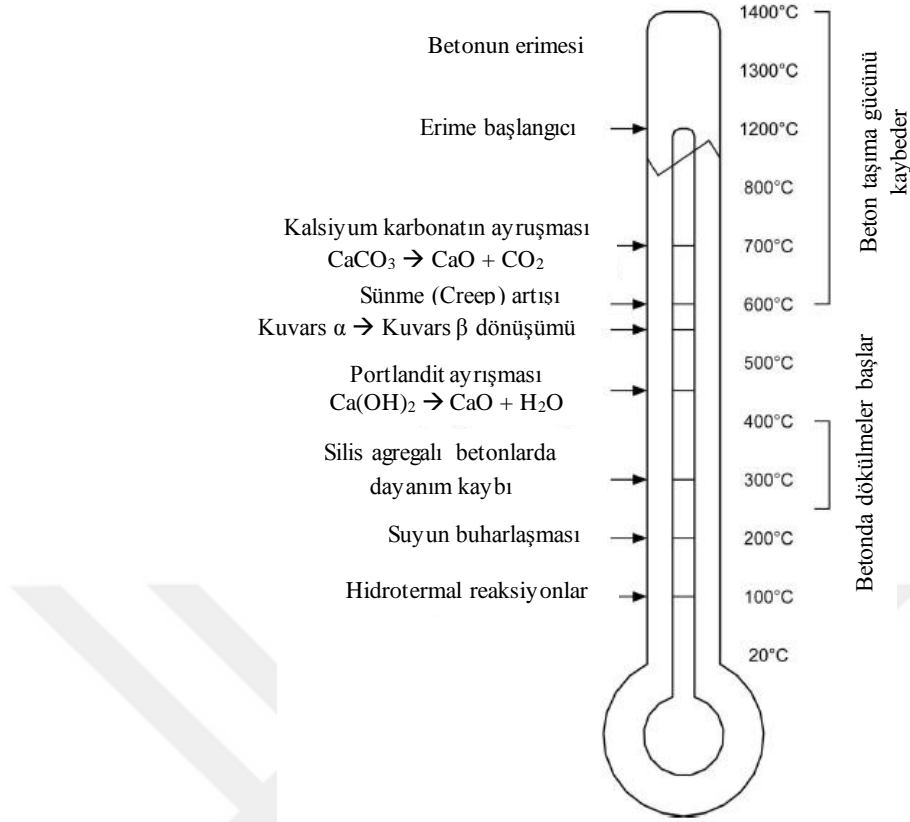
100-200 °C: Mikro gözeneklerde buhar basıncının oluşması ve suyun buharlaşması nedeniyle ağırlık kaybı devam etmektedir. Çimento jelinin dehidratasyonu yaklaşık 180 °C'de başlar.

200-500 °C: Jel gözeneklerindeki su kaybından dolayı ağırlık kaybı gerçekleşir. Ayrıca bu aşama dehidratasyonun ilk aşaması olup C-S-H jelinin parçalanması başlamaktadır. 450 °C'nin üzerinde portlandit  $\text{Ca(OH)}_2$ , kalsiyum oksit  $\text{CaO}$  ve su  $\text{H}_2\text{O}$ 'ya ayrılır.

500-700 °C: Çimento pastasındaki kalsiyum hidroksidin ayrışması ve C-S-H fazlarının parçalanması nedeniyle ağırlık kaybı oranı artmaktadır. Bunu  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  (kuvars silika) oluşumu takip eder. 700 °C'den itibaren betonda ayrışmalar yada dökülmeler başlar.

700-900 °C: Beton içerisindeki kireçtaşı agregasında kalsiyum karbonatın dekarbonasyonu yaklaşık 800 °C'de meydana gelir.

900 °C üzeri: Çimento pastası ve agreganın 1150 °C ve 1200 °C'de eridiği düşünülmektedir. Ağırlık kaybı önemsiz düzeydedir. 1270 °C'de kireçtaşı agregalı betonlarda çoğunlukla beyaz gözenekli kalsiyum oksit oluşur.



Şekil 2.18. Beton termometresi [281]

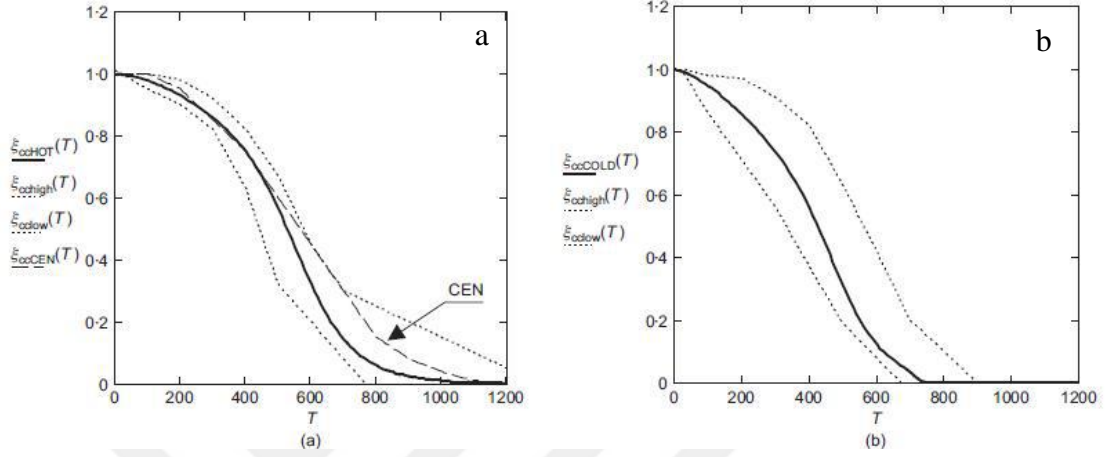
## 2.9.1. Mekanik Özellikler

### 2.9.1.1. Basınç Dayanımı

Hertz yüksek sıcaklığın basınç dayanımı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi üzerine deneysel testler ve araştırmalar yapmıştır. 300 °C'nin altında ısıtılmış betonlar havadaki nemi alarak kendisini onarabilir ancak beton bünyesinde mikro çatlaklar olduğundan mukavemet kaybının kalıcı olduğu gerçeği ifade edilmiştir [282].

Şekil 2.19, silis agregalı betonların basınç dayanımını göstermektedir.  $\epsilon_{cc}$  yüksek sıcaklık esnasındaki ortalama basınç dayanımı ile 20 °C'de ortalama basınç dayanımı arasındaki oran olarak verilmiştir. a grafiğinde grubun sınırları noktalı çizgilerle gösterilmiş ve eğrilerin ortalaması olarak tam çizilmiş bir tasarım eğrisi yapılmaktadır. Eğriler, yük uygulanmamış betonlar için geçerlidir. CEN eğrisi ENV

1992-1-2'den geçici bir eğriyi temsil eder. b eğrisi ise 12 test serisine dayalı bir karışımdan sonra kalan bir soğutma (soğutma fazi) durumu için verilmiştir. Görüldüğü üzere bağıl kalıcı dayanım  $\epsilon_{cc}$  400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar için yaklaşık 0.20 değerinden daha küçüktür [282].



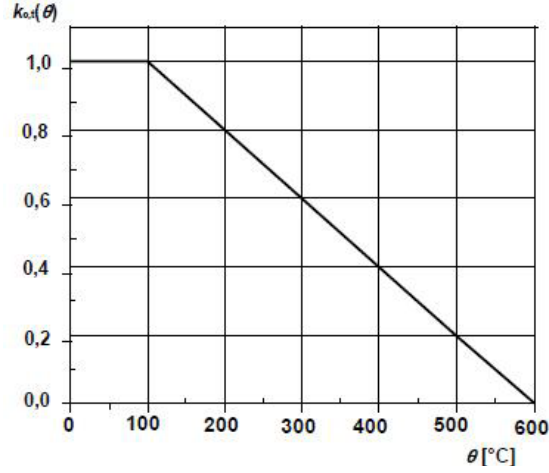
**Şekil 2.19.** Silis agregalı betonun (a) sıcak ve (b) soğukta olduğu durumdaki basınç dayanımı [282]

Yangın esnasında hidrate olmamış çimento taneleri dayanıklı dolgu maddesi görevi görerek dayanım kaybını azaltabilir. Hertz ayrıca beton yaşının taze beton dışında herhangi bir etkisi olmadığını da belirtmiştir [282].

### 2.9.1.2. Çekme Dayanımı

EC2-EN 1992-1-2'e göre betonun çekme mukavemeti normalde göz ardı edilmektedir. Şekil 2.20'den görüleceği üzere çekme mukavemeti, sıcaklık arttıkça düşer, bu azalma özellikle 100 °C'den sonra hızla gerçekleşir [283].

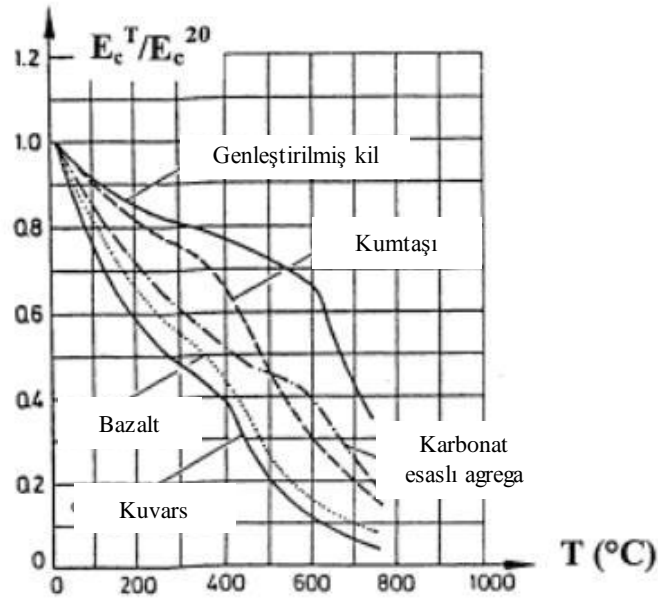




Şekil 2.20. Betonun çekme dayanımı [283]

### 2.9.1.3. Elastisite Modülü

Du Bèton, tarafından yürütülen ve değerlendirilen çalışmalar, elastisite modülünün esasen betonun basınç dayanımına bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Young modülü çimento tipi, s/ç oranı, agregata türü, termal çevrim sırasında yükleme koşulları, ısıtma sırasında ulaşılan maksimum sıcaklık gibi basınç dayanımı ile aynı faktörler tarafından etkilenir. Bununla birlikte, agregata tipi ve ısıtma işlemi sırasında yükleme koşulları elastisite modülü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Elastisite modülü basınç dayanımından daha fazla ısıya duyarlıdır çünkü beton sertliği doğrudan termal çatlaklardan etkilenir. Bazalt ve kuvars gibi silisli agregaların 500°C'deki  $E_c^T/E_c^{20}$  değerleri 0.4-0.5 arasında değişirken, hafif agregaların (genleştirilmiş kil için 0.70 – 0.75)  $E_c^T/E_c^{20}$  değerleri kalkerli agregalara yakın veya daha iyidir (Şekil 2.21) [284].



Şekil 2.21. Farklı türde agrega içeren benzer karışımların elastik modülü [284]

#### 2.9.1.4. Poisson Oranı

Poisson oranı ile ilgili olarak genellikle tek eksenli sıkıştırma yüklü bir numunedeki enine gerilmelerin ölçülmesi ile değerlendirilir. Poisson oranı elastisite modülü yada kayma modülü kullanılarak da hesaplanabilir.

Bu parametreye ilişkin şimdiye kadar az sayıda veri bulunmaktadır. Bazant ve Kaplan tarafından yapılan çalışmalarda, silisli agrega kullanılması durumunda poisson oranı, sıcaklık ile birlikte düşme eğilimi göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise belirgin farklar elde edilmemiştir [281].

Sonuç olarak yüksek sıcaklığa maruz betonun davranışı; beton türü (hafif beton yada geleneksel beton), agrega tipi, nem içeriği, çimento pastasının özellikleri, yapı elemanının şekli ve boyutları, s/ç oranı, ısıtma derecesi ve permeabilite gibi özelliklerden etkilenmektedir.

## 2.9.2. Diğer Özellikler

### 2.9.2.1. Dehidratasyon

Dehidratasyon işlemi, hidratasyon ürünlerinin ayrışması anlamına gelir. Dehidratasyon, sıcaklık mineral veya hidratın bozunma sıcaklığının üzerine çıktığında gerçekleşir. Teorik ayrışma sıcaklıkları ve çimento hidratlarının ayrışma ürünleri Tablo 2.9'da verilmiştir.

**Tablo 2.9.** Çimento minerallerinin ayrışma sıcaklıkları

Mineral/Faz	Ayrışma Sıcaklığı	Ayrışma ürünü
Portlandit (CH)	450 °C – 550 °C [285]	Kalsit [286]
	> 200 °C [286]	Kireç [287]
Etrenjit	120°C–130°C [288]	Portlandit, Kalsit [290]
	110°C (sentetik) [289]	
C-S-H jeli	150 °C [288]	Dikalsiyum silikat [291]
Kalsit	750 °C [287]	Kireç [287]

Beton numunesi oda sıcaklığından 1000 °C'ye ısıldığı takdirde Portlanditin dehidratasyonu gerçekleşmiştir. Dehidratasyon, XRD ve termal analiz kullanılarak ısıtılan yüzeyde ve ayrıca yüzeyden 50 mm derinlikte gözlenmiştir. Yüzey tabakasında portlandit, 200 °C'ye kadar kararlı kalabilmektedir. 200 °C'den sonra ayrışmaya başlar ve 700 °C sıcaklıkta portlanditin yaklaşık %80'i ayrışır. 800-1000 °C sıcaklık aralığında portlandit yok olmaktadır. Örneklerin iç kısımlarında portlanditin ayrışması daha yavaştır. 300 °C sıcaklıkta ayrışmaya başlar, ancak 900 °C sıcaklıkta hala portlandit varlığı tespit edilmiştir. XRD analizi, 100-700 °C sıcaklık aralığında portlanditin kalsit oluşturmak için ayrıştığını göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda da, kalsit ayrışmaya başlamaktadır. Bu aynı zamanda taramalı elektron mikroskopu (SEM) çalışmalarından da anlaşılmaktadır. Ortam sıcaklığında alınan SEM migrografları portlandit, C-S-H-jel ve kalsiyum alüminat kristallerini ortaya çıkarmaktadır. 200 °C'lik sıcaklık morfolojide herhangi bir değişiklik göstermemiş, ancak 300 °C'de portlandit kristallerinin deforme oldukları ve kalsite dönüştüğü

görülmüştür. Sıcaklığın daha da artması mikro çatlakların oluşmasına neden olmaktadır [286].

Etrenjitin; Castellote ve ark., 90 °C [290], Alonso ve diğerleri tarafından [287] 100 °C ve 200 °C'ye kadar ısıtılmış numunelerde tamamen kaybolduğu belirlenmiştir. 300 °C sıcaklığa maruz betonun XRD çalışmalarında etrenjit piki 20 °C ve 50 °C sıcaklıklarda görülürken, zayıf bir pik de 80 °C sıcaklıkta görülmüştür. Ayrıca 110 °C sıcaklıkta etrenjit artık görülmez. Etrenjitin ayrışmasından oluşan  $Ca^{2+}$ , portlandit ve kalsitin çökmesine katkıda bulunur [290].

Ayrıca C-S-H jeli 400 °C'de tamamen ayrılmıştır [290]. Kalsit, 450 °C sıcaklığa kadar varlığını korur ve sıcaklık arttıkça yoğunluğu da artmaktadır. 750 °C sıcaklıkta kalsit hemen hemen kaybolmuş ve bunun yerine kireç tespit edilmiştir. Bu durum, portlandit ve kalsitin kireç haline dönüşümü ile açıklanmaktadır [287].

Soğutma sırasında CaO'in ortamda su bulunduğu takdirde tekrar portlandite dönüştüğü bilinmektedir. Portland çimentosu ve düşük  $C_3A$  içerikli çimentolar (sülfata dirençli) karşılaştırılırken CaO'nun portlandite geri dönüşümü yalnızca portland çimentosunda kısmen olur. Deneylere göre, soğutma sonrasında C-S-H jeli ve etrenjit eski haline gelemmez, ancak kalsitin eski haline geldiği belirlenmiştir. Bu etki atmosferdeki  $CO_2$ 'in beton tarafından emilmesi ile açıklanmaktadır [290]. 300 °C'de ısıtıldıktan sonra su ile soğutulan çimento pastası örneklerinin orijinal gözenekliliğine geri döndüğü bulunmuştur. Gözenekliliğin ilk hale gelmesinin sebebi ayrılmış C-S-H'nin tekrar hidrasyonu veya başlangıçta susuz çimento tanelerinin hidrasyonu ile açıklanmıştır [292]. Çimento pastası örneklerinin 100 °C ve 200 °C'ye kadar ısıtıldıktan sonra 20 °C'de ve %60 bağıl nemde bekletilmesi durumunda porozitenin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca basınç dayanımında da kayıplar yaşanmıştır. Bu durum; yüksek sıcaklık sonrası hızlı soğutma ile açıklanmıştır. Ayrıca çimento pastasının "kendiliğinden iyileşme/self curing" mekanizması yapısal iyileşmeye katkıda bulunmaz [293].

### 2.9.2.2. Kuruma Büzülmesi

Gözenekli beton veya çimento pastasının nem içeriği hacim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Nem içeriği azaldığında yapının hacmi de azalır. Bu olaya kuruma büzülmesi denir. Nem içeriğinin artması nedeniyle hacmin artması şişme (negatif rötre) olarak adlandırılır. Büzülme ve şişme betonda çatlama neden olabilir ve bu nedenle yapıda hasarlar oluşabilir [294]. Betonun büzülmesi iki olayın sonucudur: kuruma ve otojen hacim değişikliği. Bu etkilerden kuruma olayı daha fazla etkili olmaktadır. Artan sıcaklık ile kuruma büzülmesinin hızı ve büyüklüğü artış göstermektedir. Çimento hidratasyonunun devam etmesi sonucu serbest su içeriği azalarak otojen bir büzülme gerçekleşir [295].

### 2.10. Taguchi Metodu

Deneysel Tasarım yöntemi İngiliz istatistikçisi A. Ronald Fisher tarafından ilk defa 1920'li yıllarda tarım ürünlerinin verimliliğini artırmak için geliştirilmiştir. Fisher çalışmasında ürün verimine katkıda bulunan gübre tespitini bu yöntem ile araştırmıştır. Verimliliği aynı seviyede olan toprağı birkaç bloğa ayırması ve ürün çeşitlerinin her birini bu bloklara rastgele yerleştirmiştir. İşte, Fisher'ın blok yöntemi ve bu bloklara rastgele yerleştirme yapması Deneysel tasarım yönteminin temelini oluşturmaktadır. Bu yöntemin ardından da faktöriyel analiz kavramı doğmuştur [296,297].

Deneysel tasarımın gelişme sürecinde W. Edwards Deming Japonya'da, kalite ve verimliliği geliştirme felsefesi ve yöntemleri üzerine konferanslar vermiştir ve bu teknikler de Japon istatistikçiler tarafından hayata geçirilmiştir. Böylece düşük maliyette ve yüksek kalitede üretim sağlayabilmek için deneysel tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Daha sonra Profesör Genichi Taguchi, hedeflenen kalitenin üretimden önce tasarım aşamasında sağlanabileceğini ifade etmiştir [297,298].

Dr. Taguchi'nin geliştirmiş olduğu kalite sistemi 1950'li yıllarda savaş sonrası Japonya'nın telefon sistemi üzerinde uygulanmış ve son derece başarılı olmuştur [299]. Deneysel Tasarım tekniklerinin ABD'de kullanılmaya başlaması, 1980'lerin ilk yıllarında Taguchi'nin Amerika'da verdiği seminerlerden sonra rastlamaktadır [300].

Taguchi yöntemi, maliyetleri en düşük seviyede tutup en az deney yapma prensibine dayanmaktadır [298]. Bu yöntem hem ürünlerin kalitesinin iyileşmesinde etkili olur, hem de kaliteye ulaşmada çok daha az deneme ile daha iyi sonuç alma imkanını vermektedir [301].

Taguchi metodu süreci etkileyen parametrelerden ve değişen seviyeleri düzenleyen ortogonal dizilerden oluşur. Faktöriyel tasarımdaki gibi tüm mümkün kombinasyonları test etmek yerine birkaç kombinasyonu test eder [302].

En basit ortogonal düzey  $2^2$  düzenidir. Bu düzende iki parametre ve bu etkenlerin iki seviyesi vardır. Yani  $2 \times 2 = 4$  deney eşleştirmesi bulunmaktadır.

Deney değerleri ve Taguchi metodundan sağlanan değerler arasındaki standart sapmayı hesaplamak için kayıp fonksiyon (üründen istenilen sonucu almama durumu, kalitesiz ürün, zarar) kullanıldı. Sinyal gürültü (S/G) oranları işte bu kayıp fonksiyondan dönüştürülür [303].

Deneyin karakteristiğine bağlı olarak çok çeşit S/G oranları mevcuttur. En yaygınları ise “Daha büyük daha iyidir”, “Nominal daha iyidir” ve “Daha küçük daha iyidir” şeklindedir [304].

“Daha büyük daha iyidir” performans karakteristiğini belirlemek için; aşağıdaki (Denklem 2.16) S/G oranı formülü ile hesaplanır;

$$SN_i = -10 \log x \left[ \frac{1}{N} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{y_u^2} \right] \quad (2.16)$$

“Daha küçük daha iyidir” performans karakteristiğini belirlemek için; (Denklem 2.17) ile S/G oranı hesaplanır;

$$SN_i = -10 \log x \left[ \sum_{u=1}^{N_i} \frac{y_u^2}{N_i} \right] \quad (2.17)$$

“Nominal daha iyidir” performans karakteristiğini belirlemek için; (Denklem 2.18) ile S/G oranı hesaplanır;

$$SN_i = -10 \log x \left[ \sum_{u=1}^{N_i} \frac{(y_u - \bar{y})^2}{N_i - 1} \right] \quad (2.18)$$

Yukarıdaki denklemlerde;

i : Deney numarasını,

u : Deneme numarasını,

$N_i$  : i Deneyi için deneme numarasını,

y : Her bir gözlem değerini,

$\bar{y}$  : Gözlem ortalama değerini ifade etmektedir.

Her deneyin sinyal gürültü oranı hesaplandıktan sonra her bir faktör ve seviye için ortalama sinyal gürültü oranı hesaplanır [398].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada; uçucu külün klinker ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen kompoze çimentoların dayanım, dayanıklılık, maliyet ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Kompoze çimentoların üretiminde öğütme kolaylaştırıcı ve mukavemet artırıcı katkıları kullanılarak öğütme verimi de ele alınmıştır. Özetle; klinker ve çimento kimyasalı tipi ile uçucu kül oranının çimento özellikleri üzerine etkisi ele alınmıştır. Bu kapsamda ilk olarak 16 farklı kompoze çimento üretilmiş ve çimentoların kimyasal, fiziksel özellikleri, dayanım, dayanıklılık ve maliyet gibi özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada seçilen bazı çimentolar üzerinde; sülfat, asit, deniz suyu, yüksek sıcaklık, karbonatlaşma ve alkali silis reaksiyonu gibi bazı durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada kimyasal etkilere maruz çimento pastaları üzerinde mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

#### 3.1. Malzemeler

##### 3.1.1. Klinker

Deneysel çalışmada, Bolu Çimento ve Çimsa Ankara fabrikalarının üretimi olan dört farklı tip klinker kullanılmıştır. Klinkerler, iki tanesi portland çimentosu klinkeri (PÇ), biri petrol kuyusu çimentosu klinkeri (PK) ve diğeri sülfata dayanıklı çimento klinkeri (SDÇ) olarak seçilmiştir. Klinkerlere ait kimyasal özellikler XRF yardımıyla belirlenmiş (Kastamonu Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Spectro marka X-ışını spektrometresi ile belirlenmiştir ) ve Tablo 3.1'de sunulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında Taguchi L16 matrisine bağlı olarak 16 uçucu kül katkılı çimento (kompoze çimento) üretilmiştir. Uçucu kül katkılı kompoze çimentolar için belirlenen değişkenler Tablo 3.2'de verilmiştir. Ayrıca kompoze çimentolar dışında 4 adet referans çimentoda üretilmiştir. Kompoze ve referans çimentolara ait element ve oksit analizleri (kimyasal özellikler) ise Tablo 3.3 ve 3.4'de verilmiştir.



**Tablo 3.1.** Klinkerlerin kimyasal özellikleri

	SDÇ Klinkeri (S)	PÇ Klinkeri-1 (P)	PK Klinkeri (O)	PÇ Klinkeri-2 (C)
CaO	66.2	66.26	66.18	65.23
SiO <sub>2</sub>	20.8	21.77	20.6	21.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.8	5.6	4.63	5.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.98	3.67	5.26	3.29
MgO	1.64	1.52	1.66	1.97
Na <sub>2</sub> O	0.24	0.27	0.24	0.3
K <sub>2</sub> O	0.42	0.37	0.43	0.12
SO <sub>3</sub>	0.35	0.26	0.37	0.3
Cl	0.028	0.0159	0.028	0.0193
Kızd. Kayb.	0.1	0.1	0.1	0.09
Toplam	99.56	99.84	99.50	98.18
S. CaO	1.8	1.99	1.5	0.7
C <sub>3</sub> S	63.73	52.59	67.07	61.61
C <sub>2</sub> S	11.58	22.75	8.49	14.43
C <sub>3</sub> A	4.29	8.64	3.37	9.33
C <sub>4</sub> AF	15.15	11.16	16.01	10.01

**Tablo 3.2.** Kompoze çimentolara ait değişkenler

	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Klinker	SDÇ Klinkeri (S)	PÇ Klinkeri-1 (P)	PK Klinkeri (O)	PÇ Klinkeri-2 (C)
Uçucu Kül (%)	5	15	25	35
Çimento Kim. Kat.	E (Mukavemet arttırıcı)	N (Mukavemet arttırıcı)	Ö1 (Öğütme Kolaylaştırıcı)	Ö2 (Öğütme Kolaylaştırıcı)
Katkı Dozajı (g/t)	500	600	700	800
Öğütme Süresi (dk)	30	45	60	75

**Tablo 3.3. Çimentolara ait XRF analizi ile belirlenmiş kimyasal özellikler (Element Analizi)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Na</b>	0.916	1.222	0.958	0.997	1.45	1.807	1.341	1.331	0.888	1.155	0.984	0.989	1.664	1.881	1.428	1.454
<b>Mg</b>	1.338	2.198	1.928	2.209	1.2	1.976	1.941	2.297	1.301	2.146	1.894	2.187	1.821	2.403	2.364	2.484
<b>Al</b>	2.681	4.649	4.575	5.332	2.895	4.891	4.991	5.941	2.636	4.811	4.498	5.362	2.982	4.522	5.231	5.73
<b>Si</b>	9.497	14.09	13.78	15.44	9.997	14.28	14.44	16.5	9.781	14.49	13.69	15.54	9.862	13.48	14.71	15.98
<b>S</b>	1.247	1.109	1.187	1.161	1.315	1.277	1.042	1.023	1.261	1.241	1.051	1.071	1.334	1.086	1.126	1.115
<b>Cl</b>	0.03749	0.02804	0.01978	0.0151	0.0033	0.00903	0.00136	0.00164	0.02757	0.01834	0.02281	0.01443	0.00769	0.00621	0.00379	0.00864
<b>K</b>	0.3745	0.5	0.6427	0.7483	0.2568	0.4219	0.6109	0.794	0.3288	0.506	0.6112	0.7565	0.5541	0.6311	0.8509	0.9178
<b>Ca</b>	42.57	34.56	33.96	29.61	44.62	34.38	32.99	27.24	44.62	33.72	34.31	29.42	42.62	34.59	30.75	27.3
<b>Fe</b>	3.576	3.066	4.832	5.174	2.825	2.553	4.248	4.927	3.782	3.295	4.834	5.332	2.812	2.741	4.273	4.841
<b>REFERANS ÇİMENTOLAR</b>																
	<b>SDÇ</b>					<b>PÇ-1</b>			<b>PK</b>			<b>PÇ-2</b>		<b>Uçucu Kül (UK)</b>		
<b>Na</b>	0.908					2.077			1.034			1.771		1.476		
<b>Mg</b>	1.099					1.231			1.056			1.428		3.656		
<b>Al</b>	1.678					2.761			1.853			1.93		9.815		
<b>Si</b>	7.677					10.79			8.626			7.88		25.01		
<b>S</b>	1.143					1.64			1.198			1.942		0.7226		
<b>Cl</b>	0.03655					0.00324			0.03347			0.00921		< 0.00020		
<b>K</b>	0.2691					0.1809			0.2692			0.4755		1.682		
<b>Ca</b>	46.29					42.98			47.35			46.17		3.728		
<b>Fe</b>	3.194					1.572			3.355			2.533		8.577		

**Tablo 3.4.** Çimentolara ait XRF analizi ile belirlenmiş kimyasal özellikler (Oksit Analizi)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
<b>CaO</b>	59.57	48.35	47.52	41.43	62.43	48.1	46.16	38.12	62.43	47.18	48.01	41.17	59.63	48.4	43.02	38.2	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20.32	30.15	29.49	33.04	21.39	30.56	30.89	35.3	20.93	31	29.28	33.25	21.1	28.85	31.47	34.18	
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.065	8.784	8.643	10.07	5.47	9.24	9.43	11.23	4.98	9.089	8.497	10.13	5.634	8.544	9.882	10.83	
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.113	4.384	6.909	7.398	4.04	3.65	6.074	7.045	5.407	4.712	6.912	7.624	4.02	3.919	6.109	6.922	
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.2256	0.3012	0.3871	0.4507	0.1547	0.25415	0.36795	0.47825	0.19805	0.30475	0.36815	0.4557	0.33375	0.3801	0.5125	0.553	
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.617	0.1648	0.1291	0.1344	0.1954	0.2436	0.1807	0.1794	0.1198	0.1556	0.1327	0.1333	0.2243	0.2535	0.1925	0.1959	
<b>MgO</b>	2.218	3.644	3.197	3.663	1.991	3.277	3.22	3.808	2.158	3.559	3.141	3.627	3.02	3.985	3.92	4.12	
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.8055	2.2585	1.9815	1.9495	2.266	2.2185	1.8005	1.776	2.1985	2.173	1.937	1.837	2.9135	2.6045	2.28	2.2665	
<b>Cl</b>	0.03749	0.02804	0.01978	0.0151	0.0033	0.00903	0.00136	0.00164	0.02757	0.01834	0.02281	0.01443	0.00769	0.00621	0.00379	0.00864	
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.2755	0.2674	0.4225	0.4682	0.2625	0.2565	0.4342	0.5134	0.2681	0.2799	0.4039	0.4704	0.316	0.3034	0.4813	0.5161	
<b>REFERANS ÇİMENTOLAR</b>																	
	<b>SDÇ</b>					<b>PÇ-1</b>					<b>PK</b>					<b>PÇ-2</b>	
<b>CaO</b>	64.77					60.14					66.26					64.60	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	16.42					23.09					18.46					16.86	
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.17					5.22					3.50					3.65	
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4.57					2.25					4.80					3.62	
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.16					0.11					0.16					0.29	
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.12					0.28					0.14					0.24	
<b>MgO</b>	1.82					2.04					1.75					2.37	
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.68					3.30					2.74					3.67	
<b>Cl</b>	0.03655					0.00324					0.03347					0.00921	
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.20					0.13					0.20					0.26	

### 3.1.2. Uçucu Kül

Çimento ların hazırlanmasında mineral katkı olarak Bursa Çimento Fabrikası'ndan elde edilen Seyitömer Termik Santraline ait uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.5'de verilmiştir.

**Tablo 3.5.** Uçucu küle ait bazı özellikler

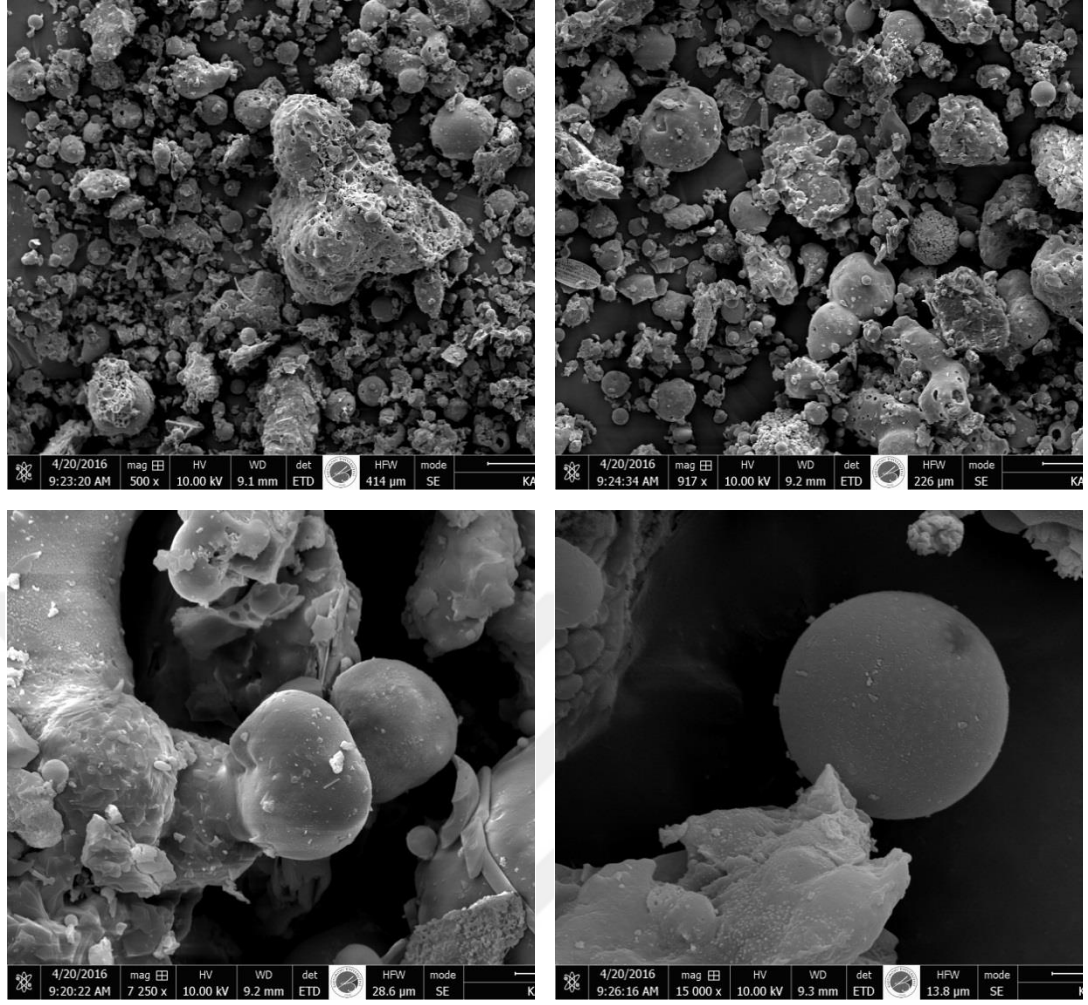
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S+A+F	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	KK	Cl	
53.89	21.12	9.11	84.12	4.10	3.66	0.55	1.89	0.77	3.10	0.0055	
Özgül ağırlık		1.97	Özgül Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> /g)					6900			

Seyitömer Uçucu küli, CaO oranının %10'nun altında olması nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı %84.12 olup ASTM C618'e göre %70'in üzerinde ve CaO'in %10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan SEM cihazı yardımı ile uçucu küle ait mikroyapı resimleri çekilmiştir. Uçucu Küle ait SEM görüntüleri (500x-15000x) Şekil 3.1'de verilmiştir. Uçucu kül bünyesinde daha çok düzensiz tane yapıları yer almaktadır. Ancak küresel yapıda taneler de uçucu kül bünyesinde bulunmaktadır.

### 3.1.3. Alçıtaşı

Çimento ların üretiminde priz süresinin kontrol edilmesi için alçıtaşı kullanılmıştır. Alçıtaşının SO<sub>3</sub> içeriği %39.59 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küle ait SEM görüntüleri

#### 3.1.4. Çimento Öğütme Katkıları

Çimento ların üretilmesi esnasında Fosroc Yapı Kimyasalları firması tarafından üretilen dört farklı kimyasal katkı kullanılmıştır. Bu katkılar, erken yaş dayanım arttırıcı (E), nihai yaş dayanım arttırıcı (N) ve iki adet öğütme kolaylaştırıcıdan (Ö1-Ö2) oluşmaktadır. Çimento ların üretilmesinde kullanılan kimyasal katkıların üreticisinden alınan özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

**Tablo 3.6.** Çimentoların üretilmesinde kullanılan kimyasal katkıların özellikleri

Katkı Türü	Katkının Görevi	Etkin madde	Ozgül A.	pH	Renk
Öğütme katkısı (Ö1)	Öğütme Kolaylaştırıcı/Enerji tasarrufu	Polietanolamin asetat	1.14	6-7	Açık Kahverengi
Öğütme katkısı (Ö2)	Öğütme Kolaylaştırıcı/Enerji tasarrufu	Glikol ile modifiye edilmiş polietanolamin asetat	1.12	6-7	Kahverengi
Dayanım arttırıcı (E)	Erken yaş mukavemet artışı	Modifiye edilmiş hidroksil aminler	1.15	10-12	Kahverengi
Dayanım arttırıcı (N)	Nihai yaş mukavemet artışı	Modifiye edilmiş hidroksil aminler	1.16	11-12	Kahverengi

### 3.1.5. Agrega

Mekanik özellikler ile sülfat, asit, deniz suyu, yüksek sıcaklık ve karbonatlaşma gibi durabilite deneylerinde TS EN 196-1 standardına uygun standart kum kullanılmıştır. Sadece alkali silis reaksiyonunun belirlenmesinde reaktif agrega olan Gediz kumu kullanılmıştır.

## 3.2. YÖNTEM

DeneySEL çalışma 4 aşamadan oluşmaktadır. 1. Aşama, referans ve Taguchi serisinde yer alan 20 adet çimentonun hazırlanmasından oluşmaktadır. Taguchi yöntemine göre L16 serisi kullanılmıştır. Bu seriye göre üretilen çimentoların özellikleri Tablo 3.7'de verilmiştir. 2. aşama, çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Ayrıca bu aşamada Taguchi optimizasyonu ile en uygun çimentolar belirlenmiştir. Sonraki aşamada seçilen çimentolar üzerinde durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Durabilite deneyleri yapılan harçlar için pastalar hazırlanarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

### 3.2.1. Çimentoların Hazırlanması

Çimentoların hazırlanmasında birlikte öğütme tekniği kullanılmıştır. Klinker, alçıtaşı ve uçucu kül bond tipi bilyalı değirmen yardımı ile öğütülmüştür. Literatürde

yer alan bilgiler ışığında uçucu külün aktifliğini attırmak için klinker ile uçucu kül birlikte öğütülmüştür. Ayrıca öğütme işlemine başlamadan önce çimento öğütme katkıları da değirmen içerisindeki karışıma eklenmiştir. Alçıtaşı içeriği tüm çimentolar için %5 olarak kullanılmıştır. Uçucu kül ise %5, 15, 25 ve 35 oranlarında kullanılmıştır. Çimento üretiminde enerji verimliliği için kullanılan öğütme katkıları ise ton başına 500, 600, 700 ve 800 gram olacak şekilde değirmene ilave edilmiştir. Değirmen içerisindeki karışımlar 30, 45, 60 ve 75 dakika olmak üzere dört farklı sürede öğütme işlemine maruz bırakılmıştır. Referans karışımlar çimento fabrikalarının beyan ettiği veriler ışığında 75 dakika süre ile öğütülmüştür. Ayrıca referans karışımlarda çimento öğütme katkıları kullanılmamıştır.

Fabrikalardan temin edilen alçıtaşı ve klinkerler ilk olarak konkasör yardımı ile ince agrega boyutuna getirilmiş ve 4 No'lu (4.75 mm) elekten elenmiştir. Konkasör tarafından kırılan ancak 4 no'lu elek üzerinde kalan klinkerler tekrar konkasöre gönderilmiştir.

Temin edilen uçucu külden nem tespit edildiği için 48 saat boyunca 105 °C'de kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma işleminden sonra uçucu kül 100 No'lu (150 µm) elekten elenmiştir.

Çimentoların hazırlanmasında kullanılan bilyeli öğütücünün dönüş hızı 70 devir/dak'dır. Değirmen, 43 adet Ø38.10 mm, 67 adet Ø29.72 mm, 10 adet Ø25.40 mm, 71 adet Ø19.05 mm, 94 adet Ø15.50 mm (toplam 285 adet) çelik bilya içermektedir. Öğütme işleminde kararlı duruma ulaşana dek sürdürülen kapalı devre kuru sürtünmeli değirmen esasına dayalı bir yöntem (standart bond öğütülebilirlik testi) izlenmiştir. Bu test, Standart Laboratuvar Tipi Bilyalı Değirmen olarak adlandırılan özel bir değirmen ile yürütülmektedir. Bu yüzden bilya sayısı ve çapı standart bond öğütülebilirlik testi dikkate alınarak belirlenmiştir.

**Tablo 3.7.** Taguchi L16 serisine göre hazırlanan çimentolar

No	Klinker Türü	Uçucu Kül (%)	Katkı Türü	Katkı Dozaj (g/t)	Öğütme Süresi (dk)
1	S	5	E	500	30
2	S	15	N	600	45
3	S	25	Ö1	700	60
4	S	35	Ö2	800	75
5	P	5	N	700	75
6	P	15	E	800	60
7	P	25	Ö2	500	45
8	P	35	Ö1	600	30
9	O	5	Ö1	800	45
10	O	15	Ö2	700	30
11	O	25	E	600	75
12	O	35	N	500	60
13	C	5	Ö2	600	60
14	C	15	Ö1	500	75
15	C	25	N	800	30
16	C	35	E	700	45
S: SDÇ Klinkeri P: PÇ Klinkeri-1 O: PK klinkeri C: PÇ Klinkeri-2			E: Erken yaş dayanım arttırıcı N: Nihai yaş dayanım arttırıcı Ö1: Öğütme kolaylaştırıcı-1 Ö2: Öğütme kolaylaştırıcı-2		

### 3.2.2. Çimentoların Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 3.2.2.1. Uçucu Külün Dayanım Aktivite İndeksi

Uçucu külün aktivite indeksi ASTM C 618 (Betonda mineral katkı olarak kullanılan kalsine edilmiş doğal puzolan yada uçucu küllerin özellikleri) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde kullanılan harç karışımlarının oranları Tablo 3.8'de sunulmuştur.



**Tablo 3.8.** Puzolanik Aktivite İndeksinin Belirlenmesinde Kullanılan Malzeme Miktarları

	Referans Karışım	Uçucu Kül Katkılı Karışım
Standart Kum/Agrega (g)	1350	1350
Çimento (g)	490.91	392.73
Uçucu Kül (g)	-	98.18
Su (ml)	237.60	257.15
s/b	0.48	0.52

### 3.2.2.2. Çimentoların İncelikleri

Çimentoların inceliklerinin belirlenmesinde Blaine metodu ve lazer tane dağılımı (PSD analizi) yöntemi kullanılmıştır. Çimentoların Blaine özgül yüzeyleri Chryso Yapı Kimyasalları'nın Gebze'de yer alan Ar-Ge Laboratuvarlarında belirlenmiştir. Çimentolara ait PSD analizleri ise Fosroc Yapı Kimyasalları'na ait AR-GE laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2.3. Çimentoların Özgül Ağırlıkları

Çimentoların özgül ağırlığının belirlenmesinde TS EN 196-3 standardında (Çimento deney metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genişleme tayini) belirtilen Le Chatelier balonu kullanılmıştır. Ayrıca özgül ağırlığın belirlenmesi sırasında terebentin kullanılmıştır.

### 3.2.2.4. Çimentoların Priz Süreleri ve Kıvam Suyu Miktarları

Çimentoların priz süreleri ve kıvamları TS EN 196-3 standardına (Çimento deney metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genişleme tayini) uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Priz süreleri otomatik vikat cihazı kullanılarak belirlenmiştir. ASTM C 191-04 (Hidrolik çimentoların priz süresinin vikat iğnesi ile standart test yöntemi) tarafından belirtilen otomatik vikat prosedürüne göre priz süresi tayini içi su dolu kap ile (oda şartlarında ve sabit sıcaklıkta) gerçekleştirilmiştir.

### **3.2.2.5. Harç Karışımlarının Kıvam (Taze Harç) Özellikleri**

Her karışım üzerinde kalıba yerleştirilmeden önce ASTM C 230 standardına (Hidrolik Çimento Testlerinde Kullanılacak Akma Tablası İçin Standart) uygun bir sarsma tablası kullanılarak kıvam deneyleri yapılmış ve yayılma çapları belirlenmiştir.

### **3.2.2.6. Çimentoların Mekanik Özellikleri**

Basınç ve eğilme dayanımının belirlenmesi için harç karışım oranları TS EN 196-1'e (Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini) uygun olarak (agrega:çimento:su 3:1:0.5) belirlenmiştir. Hazırlanan 40x40x160 mm boyutlarında numuneler üzerinde 2, 7, 28, 56, 90 ve 180 günlerde basınç ve eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her yaş için eğilme dayanımı 3, basınç dayanımı ise 6 adet numune ile belirlenmiştir.

### **3.2.2.7. Harçların Su Emme Özellikleri**

Taguchi serisinde yer alan harçların su içerisinde 28 ve 90 gün beklemenin ardından, kuru yüzey doygun birim hacim ağırlıkları, kalıp çıkışı ağırlıkları baz alınarak su emme oranları belirlenmiştir. Su emme oranı etüv kurusu ağırlığı esas alınarak hesaplanmaktadır. Ancak harçlara uygulanan 105 °C sıcaklık işlemi hidrasyon ürünlerinde değişime yol açacağı için kalıp çıkışı ağırlıkları dikkate alınarak su emme oranları belirlenmiştir.

### **3.2.2.8. Çimentoların Kuruma Büzülmesi Özellikleri**

Çimentoların kuruma büzülmesi özellikleri 4 adet 25x25x285 mm boyutlarında standart harç numuneleri üzerinde belirlenmiştir. Kalıplarından çıkarılan numunelerin ilk boyları dijital komparatör yardımı ile tespit edilmiştir. Kuruma büzülmesi için 7 gün uygulanan su küründen sonra atmosfer koşullarında (%75 bağıl nemde) bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda 4, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 90 ve 180 günlerde numunelerin boyları tekrar ölçülerek boy değişimleri belirlenmiştir.

### **3.2.2.9. Çimentoların Sülfat Dayanıklılığı Özellikleri**

Eskitme süreci için %5'lik magnezyum sülfat ve sodyum sülfat olmak üzere iki farklı ortam hazırlanmıştır. Boy değişimi ölçümü için her koşulda 4 adet

25x25x285 mm boyutlarında numune hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm numuneler ilk 56 gün normal koşullarda bekletilmiştir. Su küründen sonra numuneler magnezyum ve sodyum sülfatlı ortam koşullarında bekletilmeye başlanmıştır. Sülfatlı ortamda bekletilen numunelerin 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 90, ve 180. günlerde boyları tekrar ölçülerek genişleme oranları belirlenmiştir. Çözeltiler her 30 gün sonunda ortamdaki uzaklaştırılmış ve yeni çözelti hazırlanarak numunelerin üzerine ilave edilmiştir. Ayrıca 40x40x160 mm boyutlarındaki 56 günlük harç numuneleri 30, 90 ve 180 gün sülfat etkisine maruz bırakıldıktan sonra dayanımları belirlenmiştir. Sülfat çözeltisinde bekletilen harçların zamana bağlı boy değişimleri Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

$$\%L = \frac{L_n - L_o}{L_o} \quad (3.1)$$

Burada;

%L: Boy değişim oranı

$L_n$ : Harç çubuğunun n. gündeki boyu

$L_o$ : Çözeltiye yerleştirilmeden önceki (başlangıç) harç çubuğunun boyu

### **3.2.2.10. Çimentoların Asit Dayanıklılığı Özellikleri**

Standart harç karışımları 56 günlük su küründen sonra eskitme süreci için %3 konsantrasyona sahip sülfirik asitte ( $H_2SO_4$ ) tutulmuştur. Asit dayanıklılığı için 25x25x285 ve 40x40x160 mm boyutlarında prizma numuneler üretilmiştir. 25x25x285 mm prizma numuneler üzerinde 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 90 ve 180. günlerde boy ölçümleri yapılarak genişmeleri belirlenmiştir. 56 günlük 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numuneleri 30, 90 ve 180 gün asit etkisine maruz bırakıldıktan sonra dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Asit çözeltisinde bekletilen harç çubuklarının boy değişimi Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

### **3.2.2.11. Çimento Harçlarının Deniz Suyu Dayanıklılığı**

Deniz suyu dayanıklılığı için 25x25x285 boyutlarında harç çubukları üretilmiştir. Numunelerin boyu 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 90 ve 180. gün Kastamonu ili, İnebolu ilçesinden temin edilen deniz suyunda bekletildikten sonra ölçülmüştür.

Karadeniz'e ait deniz suyunun sülfat iyonu ( $SO_4^-$ ) 2270 mg/L olarak bulunmuştur. 56 günlük 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numuneleri 30, 90 ve 180 gün deniz suyu etkisine maruz bırakıldıktan sonra dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Deniz suyunda bekletilen harç çubuklarının boy değişimi Denklem (3.1) ile hesaplanmıştır.

#### **3.2.2.12. Çimento Harçlarının Yüksek Sıcaklık Özellikleri**

56 günlük 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numuneleri 300, 600 ve 900 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulamasından önce ve sonra ultrases geçiş hızı tespit edilerek harçların dinamik elastisite modülleri belirlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisinden sonra harçlarda oluşan ağırlık kayıpları da belirlenmiştir. Harçların yüksek sıcaklık etkisini belirlemek için laboratuvar tipi kamara fırın kullanılmıştır. Harçlar ısınma hızı  $8\pm 4^\circ C/dk$  olan fırın içerisinde 1 saat süre ile bekletilmiştir. 1 saat sonunda fırın içerisinden çıkarılan harçlar laboratuvar ortamında havada bekletilerek soğutulmuştur.

#### **3.2.2.13. Çimento Harçlarının Karbonatlaşma Özellikleri**

Karbonatlaşma deneyi için 40x40x160 ve 25x25x285 mm boyutlarında standart harç numuneleri üretilmiştir. Numuneler hazırlanırken bağlayıcı miktarının %5'i oranında amonyum karbamat ( $CH_6N_2O_2$ ) kullanılmıştır. 25x25x285 mm prizma numuneler üzerinde 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 90 ve 180. günlerde boy ölçümleri yapılarak boyutsal değişim belirlenmiştir. 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde 30, 60 ve 180 gün su küründen sonra mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyi sonucunda elde edilen kırık yüzeylere %1 fenolftalein çözeltisi sıkılarak karbonatlaşma derinliği belirlenmiştir.

#### **3.2.2.14. Çimento Harçlarının Alkali Silis Reaktivitesi**

Aktif silisin zararlı etkilerini ortaya koymak amacıyla, ASTM C 1260'e (Alkali silis reaktivitesinin belirlenmesi/harç çubuğu yöntemi) göre hızlandırılmış harç çubuğu deney metodu uygulanmıştır. Bu metod, kür şartlarını ağırlaştırarak reaksiyonu hızlandırmakta ve agregaların potansiyel reaktivitesinin 16 gün içinde tespitine olanak vermektedir. ASTM C 1260 Standardında belirtilen gradasyondaki agrega 990 g, su 206.8 g ve çimento 440 g kullanılarak harç karışımı hazırlanmıştır

80 °C 1 M NaOH çözeltilisinde 14 gün bekletilen harç çubuklarının boy değişimleri Denklem 3.2 ile bulunmuştur.

$$\%L = \frac{L_n - L_o}{L_o} \quad (3.2)$$

Burada;

%L: Boy değişim oranı

$L_n$ : Harç çubuğunun n. gündeki boyu

$L_o$ : 80 °C 1 M NaOH çözeltilisine yerleştirilmeden önceki (başlangıç) harç çubuğunun boyu

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE OPTİMİASYON

### 4.1. Çimentoların Tane Boyutu ve İnceliklerinin Belirlenmesi

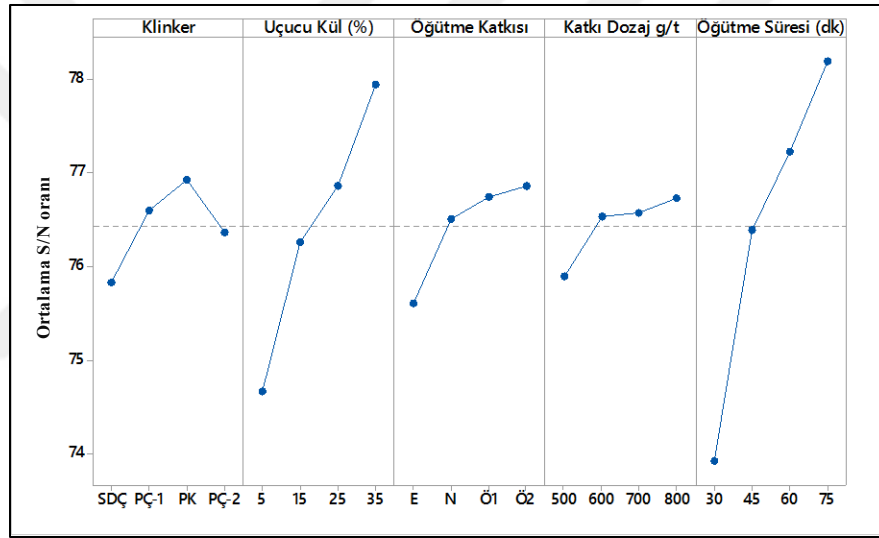
Çimentoların tane boyutu ve inceliğinin belirlenmesi için lazer tane dağılımı/PSD analizi (particle size diameter) ve Blaine yöntemleri kullanılmıştır. Uçucu kül, referans ve Taguchi serisinde yer alan çimentoların Blaine değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1.** Uçucu kül ve çimentolara ait Blaine inceliği

		Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Öğütme Süresi (dk)	Uçucu Kül (%)	
REFERANSLAR	SDÇ (S)	3050	75	-	
	PÇ-1 (P)	2940	75	-	
	PK (O)	3590	75	-	
	PÇ-2 (C)	2730	75	-	
MINERAL KATKI	Uçucu Kül	6900	-		
TAGUCHİ SERİSİ	SDÇ	1	3010	30	5
		2	5030	45	15
		3	5950	60	25
		4	7530	75	35
	PÇ	5	5550	75	5
		6	5490	60	15
		7	5590	45	25
		8	5130	30	35
	PK	9	5000	45	5
		10	4570	30	15
		11	6500	75	25
		12	6750	60	35
	PÇ-2	13	5080	60	5
		14	6075	75	15
		15	4500	30	25
		16	5740	45	35

C<sub>3</sub>S içeriği yüksek olan SDC ve PK klinkerlerinin Blaine inceliklerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. C<sub>3</sub>S içeriği %67.07 olan PK klinkerinin Blaine inceliği 3590 cm<sup>2</sup>/g olarak tespit edilmiştir. Uçucu kül içeriğinin artması Blaine incelik değerlerini arttırmaktadır. Uçucu külün yüksek Blaine değerine sahip olması da bu etkiyi arttırmaktadır.

Taguchi serisinde yer alan 16 çimento için Blaine incelik değerlerine ait S/N (sinyal/gürültü) oranları belirlenmiştir (Şekil 4.1). Blaine incelik değeri için en büyük en iyi yöntemi kullanılarak sinyal gürültü oranları (signal noise-S/N ratio) belirlenmiştir. S/N oranları en yüksek olan parametreler en iyi seviyeyi belirtmektedir.



**Şekil 4.1.** Blaine incelik değeri için S/N oranları

Şekil 4.1'de yer alan S/N oranlarına göre Blaine değerinin artırılması için PK klinkerinin %35 uçucu kül ile birlikte 75 dakika süre ile öğütülmesi daha uygun sonuçlar verecektir. Öğütme esnasında Ö2 katkısının 800 g/t dozaj ile kullanılması uygun olacaktır. Şekil 4.1'de yer alan S/N oranlarına göre belirlenen parametreler kullanıldığı takdirde Blaine incelik değeri yaklaşık 8300 cm<sup>2</sup>/g olacaktır. Ancak çimentolarda Blaine incelik değerinin artması ile basınç dayanımının (28 günlük) da artması bazı durumlarda paralellik göstermediği unutulmamalıdır. Özellikle kompoze

çimentolarda kullanılan mineral katkı oranındaki artış inceliği arttırırken basınç dayanımında aynı etki gözlenmeyebilir.

Taguchi serisinde yer alan çimentoların Blaine incelik değerlerini etkileyen parametreler Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.2.** Taguchi serisinde yer alan çimentoların Blaine inceliğini etkileyen parametreler

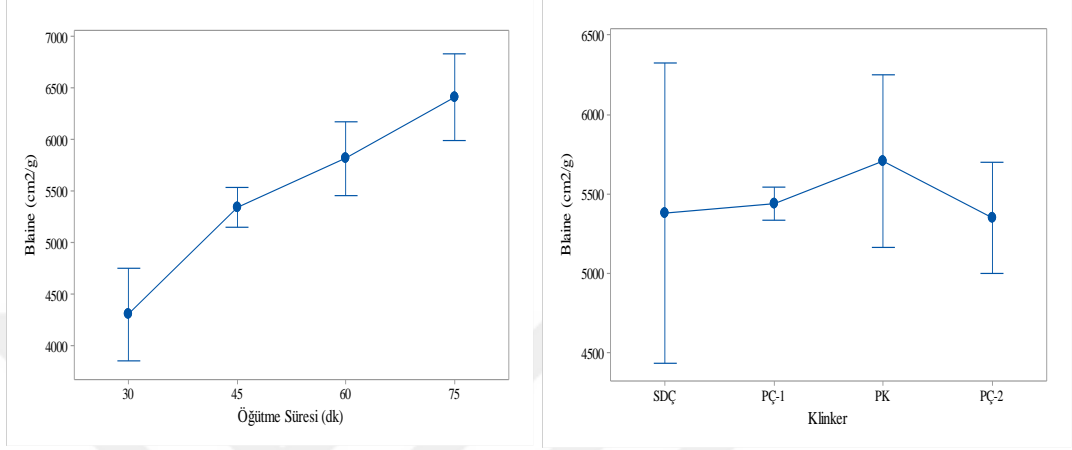
Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	671385	223795	1.70	33.96
Uçucu Kül	3	11781986	3927329	1.10	22.40
Öğütme Katkısı	3	1153822	384607	0.14	3.37
Katkı Dozajı g/t	3	343575	114525	0.04	1.00
Öğütme Süresi	3	20300526	6766842	2.32	39.27
Toplam	15	34251295			100

Çimentoların Blaine inceliği üzerinde etkili olan ana parametre öğütme süresi ve klinker tipidir. Öğütme süresinin artması ile Blaine incelik değerleri de artmaktadır. Öğütme katkısının türü ve dozajının Blaine inceliğinde çok önemli bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir. Bu bulgu kompoze çimentolar için geçerli olmaktadır çünkü uçucu kül kullanımı Blaine inceliklerini oldukça etkilemektedir. Klinker tipi olarak ise C<sub>3</sub>S içeriği yüksek PK klinkeri ön plana çıkmaktadır. Literatürde yer aldığı gibi C<sub>3</sub>S içeriğinin artması klinkerlerde öğütülebilirliği arttırmaktadır. C<sub>2</sub>S içerikleri nispeten daha yüksek olan PÇ-1 (%22.77) ve PÇ-2 (%14.43) klinkerlerinden üretilen çimentoların Blaine incelikleri daha düşük olmuştur. C<sub>3</sub>S içeriği yüksek olan (%63.73) SDC klinkerinde ise beklenen Blaine incelik değerleri elde edilememiştir. Bu olayın nedeni ise C<sub>4</sub>AF içeriğinin %15.15 olması ile açıklanabilmektedir.

Öğütme süresi ve klinker tipinin Blaine incelik değeri üzerindeki etkisi Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi öğütme süresi arttıkça Blaine incelik değerleri artmaktadır. Öğütme süresinin 75 dakika olması durumunda Blaine incelik



değeri ortalama 6500 cm<sup>2</sup>/g olmaktadır. 30 dakika süre ile yapılan öğütme işleminde Blaine incelik değeri 3000-5800 cm<sup>2</sup>/g arasında değişmektedir. Kısa öğütme sürelerinde Blaine incelik değerindeki artışın asıl nedeni uçucu külün yüksek Blaine değerine sahip olmasıdır.



**Şekil 4.2.** Öğütme süresi ve klinker tipinin Blaine incelik değeri üzerindeki etkisi

Mineral katkıli çimentolarda Blaine incelik değerlerinin yanıltıcı sonuçlar verdiği literatürde yer almaktadır. Bu yüzden Blaine yöntemine göre daha doğru sonuçlar veren PSD (particle size diameter) analiz yöntemi tercih edilmiştir.

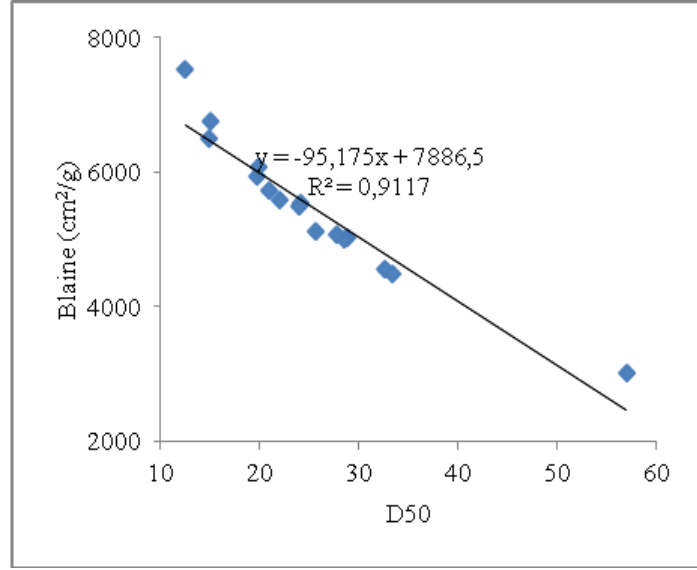
Uçucu kül, referans çimentolar ve Taguchi serisinde yer alan çimentoların PSD analizi sonuçları Tablo 4.3'de verilmiştir.

Referans çimentoların PSD analizine göre ortalama tane boyutları Tablo 4.3'de görülmektedir. C<sub>3</sub>S oranı yüksek olan PK klinkerinin ortalama tane boyutu 34.43 µ olarak belirlenmiştir. C<sub>3</sub>S oranının artması ortalama tane boyutunu azaltmaktadır. C<sub>2</sub>S oranı yüksek olan yani öğütülebilirliği zor olan klinkerler olan PÇ-1 ve PÇ-2'nin ortalama tane boyutları daha büyük değerler almıştır.

**Tablo 4.3.** Uçucu kül ve çimentolara ait PSD analizi değerleri

		Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	PSD (μ)*	Oğütme Süresi (dk)	Uçucu Kül (%)	
REFERANSLAR	SDÇ	3050	43.43	75	-	
	PÇ-1	2940	46.56	75	-	
	PK	3590	34.43	75	-	
	PÇ-2	2730	46.20	75	-	
MİNERAL KATKI	Uçucu Kül	6900	19.50	-		
TAGUCHI SERİSİ	SDÇ	1	3010	56.96	30	5
		2	5030	28.83	45	15
		3	5950	19.65	60	25
		4	7530	12.48	75	35
	PÇ-1	5	5550	24.13	75	5
		6	5490	24.01	60	15
		7	5590	21.96	45	25
		8	5130	25.66	30	35
	PK	9	5000	28.47	45	5
		10	4570	32.64	30	15
		11	6500	14.91	75	25
		12	6750	14.99	60	35
	PÇ-2	13	5080	27.74	60	5
		14	6075	19.79	75	15
		15	4500	33.3	30	25
		16	5740	20.99	45	35

\*PSD (Particle size diameter/Ortalama tane boyutu)



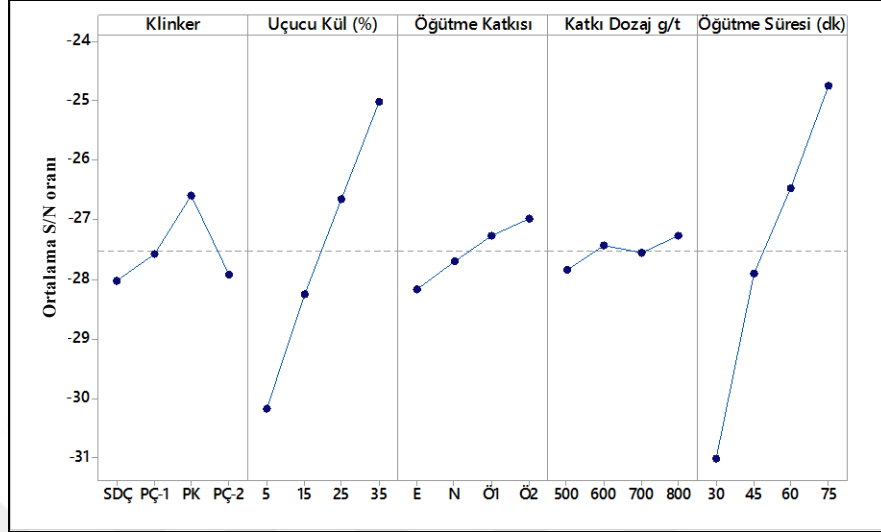
**Şekil 4.3.** Taguchi serisinde yer alan çimentoların ortalama tane boyutu (D50- $\mu$ )-Blaine inceliği ilişkisi

PSD analizinden elde edilen D50 değerleri ile Blaine inceliği değeri arasında kuvveli bir ilişki olduğu ( $R^2=0.91$ ) korelasyon analizi ile belirlenmiştir (Şekil 4.3). Taguchi serisinde yer alan çimentoların ortalama tane boyutları 12.48-56.96  $\mu$  aralığında değişmektedir. Öğütülebilirliği kolay olan SDC ve PK klinkerleri ile inceliği yüksek ve ortalama tane boyutu oldukça düşük olan çimentolar üretilmiştir. Ancak bu çimentolarda kullanılan uçucu külde bu özellikleri önemli derecede etkilemektedir. Genel olarak uçucu kül oranının ve öğütme süresinin artması ile ortalama tane boyutu azalmaktadır.

PSD analizini sonuçlarına göre belirlenen S/N oranları Şekil 4.4'de verilmiştir. Üretilen çimentolarda ortalama tane boyutunun küçük olması istendiği için en küçük en iyi modellemesi kullanılarak S/N oranları belirlenmiştir.

PSD analizine göre ortalama tane boyutunun azaltılması için S/N oranlarına göre tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu durumda, PK klinkeri %35 uçucu kül ile birlikte 75 dakika süre ile öğütülmelidir. Öğütme esnasında Ö2 katkısı 800 g/t dozajında

kullanılmalıdır. Belirtilen parametrelerin kullanılması durumunda ise ortalama tane boyutunun yaklaşık  $5.75 \mu$  olacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.4. PSD analizi için S/N oranları

Taguchi serisi için PSD analizi üzerinde etkili olan parametreler Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4. PSD analizini etkileyen parametreler

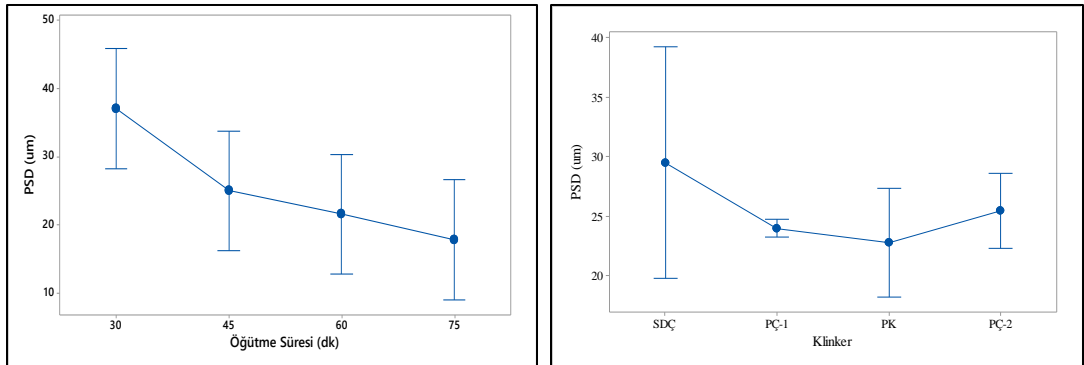
Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	103.160	34.387	1.97	31.36
Uçucu Kül	3	545.469	181.823	1.83	23.62
Öğütme Katkısı	3	85.935	28.645	0.22	5.30
Katkı Dozajı g/t	3	48.753	16.251	0.12	3.01
Öğütme Süresi	3	838.972	279.657	2.28	36.72
Toplam	15	1622.29			100

PSD analizine göre ortalama tane boyutunu etkileyen ana parametre öğütme süresi ve klinker tipidir. Ayrıca uçucu kül oranının artması ortalama tane boyutunu da

küçültmektedir. Şekil 4.5'de öğütme süresi ve klinker tipindeki değişimin ortalama tane boyutu (PSD'ye göre) üzerindeki etkisi görülmektedir.

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi öğütme süresinin artması ile ortalama tane boyutları azalmaktadır. 75 dakika süre ile yapılan öğütme sonunda çimentoların ortalama tane boyutu yaklaşık 20  $\mu$  olmaktadır. Öğütme süresinin 30 dakika olması durumunda ortalama tane boyutu yaklaşık 38  $\mu$  değerine ulaşmaktadır. Klinker tipinin PK olması ortalama tane boyutunu 18-27  $\mu$  arasında değiştirmektedir. C<sub>3</sub>S içeriği açısından benzer özelliklere sahip olan PK ve SDC klinkerlerinde ortalama tane boyutu açısından farklılıklar elde edilmiştir. SDC klinkerinden üretilen çimentoların ortalama tane boyutu 19-39  $\mu$  arasında değişmektedir. SDC klinkeri ile ortalama tane boyutunu azaltmak mümkün olmasına rağmen oldukça büyük tane boyutuna sahip çimentolarda elde edilmektedir. Bu durum Blaine inceliğinde olduğu gibi C<sub>4</sub>AF içeriği ile açıklanabilmektedir. Blaine incelikleri açısından ise C<sub>2</sub>S içeriği yüksek olan PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinden elde edilen çimentoların ortalama tane boyutları yaklaşık 25 $\mu$  olarak belirlenmiştir. C<sub>3</sub>S içeriği yüksek olan klinkerlerinde tane boyutu dağılımı daha fazla değişkenlik göstermektedir. Tane dağılımı açısından en az değişkenlik ise PÇ-1 klinkerinden üretilen çimentolarda elde edilmiştir.

Çimentoların tane boyutu ve incelik değerlerinin belirlenmesi için 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerin etki analizine göre karşılaştırılması Tablo 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Öğütme süresinin PSD analizi üzerindeki etkisi

**Tablo 4.5.** Tane boyutu ve inceliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

Parametre	Etki Analizi (%)	
	Blaine Yöntemi	PSD analizi
Klinker	33.96	31.36
Uçucu Kül	22.40	23.62
Öğütme Katkısı	3.37	5.3
Katkı Dozajı g/t	1.00	3.01
Öğütme Süresi	39.27	36.72

Tablo 4.5'e göre Blaine yöntemi ve PSD analizleri paralellik göstermektedir. Çimento tane boyutunun azaltılması yada özgül yüzey alanının artırılması için öğütme süresi ve klinker tipi oldukça önemli bir faktör olarak ön plana çıkmaktadır. Öğütme süresinin artması ile Blaine incelik değerleri artarken, ortalama tane boyutları azalmaktadır. Ayrıca Blaine yöntemi ve PSD analizine göre uçucu kül miktarının artması ile özgül yüzey alanı artmakta ve ortalama tane boyutu azalmaktadır. Bunun nedeni uçucu külün ortalama tane boyutunun  $19.5 \mu$ , blaine incelik değerinin ise  $6900 \text{ (cm}^2/\text{g)}$  olmasıdır.

Kullanılan iki yöntem için ortak olan en önemli noktalardan bir tanesi klinker tipinin incelik ve özgül yüzey alanı üzerindeki etkisidir. Klinker bünyesindeki  $C_3S$  oranının azalması öğütülebilirliği zorlaştırmaktadır. Özellikle  $C_3S$  oranı en yüksek olan PK klinkeri ile tane boyutu oldukça azaltılmıştır. Sadece klinker ve alçıtaşı kullanılarak üretilen çimentolarda öğütülebilirlik indeksi dikkate alındığında klinker tipi büyük önem arz etmektedir.

Etki analizine göre 2 yöntem içinde, tane boyutunun azaltılması ve özgül yüzey alanının artırılması için Ö1 ve Ö2 katkılarının kullanılması daha uygun olacaktır. Ö1 ve Ö2 katkılarının öğütme kolaylaştırıcı katkı olmaları ve katkıların klinker ile uyum gösterdiği görülmektedir. Kimyasal katkıların dozajları arttırıldığı takdirde ortalama tane boyutları azalmaktadır. Genel olarak Ö1 ve Ö2 katkılarının  $600\text{-}800 \text{ g/t}$  dozaj ile

kullanılması uygundur. Ancak 500 g/t dozajı çimentoların tane boyutunun azaltılmasında çok etkili olmamıştır.

Tane boyutu ve özgül yüzey alanının belirlenmesi için kullanılan 3 yöntemden PSD analizinin daha doğru ve güvenilir sonuçlar verdiği bilinmektedir. Günümüzde PSD analiz yönteminin çimento teknolojisindeki kullanım alanı her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada da PSD analizi ile belirlenen ortalama tane boyutları dikkate alınarak mekanik özellikler ve boyutsal kararlılık ile ilişkilendirilmiştir.

#### **4.2. Çimento Sıcaklıklarının Belirlenmesi**

Değirmende öğütülen çimentoların öğütme işlemi sonunda termometre yardımı ile sıcaklıkları ölçülmüştür. Çimentolara ait sıcaklıklar Tablo 4.6'da verilmiştir.  $C_3S$  oranı yüksek,  $C_3S/C_2S$  ve  $(C_3S+C_2S)/(C_3A+C_4AF)$  oranı düşük olan PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimentoların sıcaklıkları diğer klinkerler ile üretilen çimentolara göre daha yüksektir. Çimentolarda öğütülebilirliğin zorlaşması durumunda değirmenden çıkan ürünün sıcaklığı da artmaktadır. Taguchi serisinde yer alan çimentoların sıcaklığı üzerinde etkili olan parametreler ise Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7'de görüldüğü gibi çimentoların sıcaklığı üzerinde etkili olan ana parametre öğütme süresidir. Klinker tipi, uçucu kül oranı, öğütme kolaylaştırıcı katkısı türü ve dozajının sıcaklık üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak klinker tipi uçucu kül ve kimyasal katkı gibi parametrelere göre daha etkili olmaktadır. Klinkerin zor öğütülebilir olması durumunda değirmenden çıkan ürünün sıcaklığı artış göstermektedir. Bu yüzden  $C_2S$  içeriği yüksek olan PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinden elde edilen çimentoların sıcaklıkları daha fazla olmuştur. Şekil 4.6'da öğütme süresinin sıcaklık üzerindeki etkisi görülmektedir.

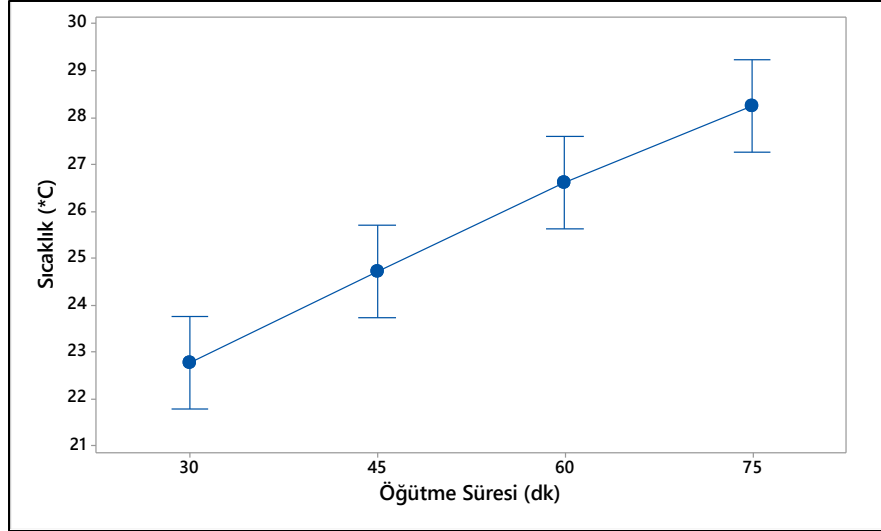
**Tablo 4.6.** Çimentolara ait sıcaklık değerleri

		Sıcaklık (°C)	Öğütme Süresi (dk)	Uçucu Kül (%)	
REFERANSLAR	SDÇ	25.6	75	-	
	PÇ-1	26.3	75	-	
	PK	25.9	75	-	
	PÇ-2	26.2	75	-	
TAGUCHI SERİSİ	SDÇ	1	23.2	30	5
		2	24.1	45	15
		3	25.6	60	25
		4	27.4	75	35
	PÇ-1	5	28.6	75	5
		6	27.1	60	15
		7	24.6	45	25
		8	22.7	30	35
	PK	9	25.9	45	5
		10	21	30	15
		11	28.4	75	25
		12	26.8	60	35
	PÇ-2	13	27	60	5
		14	28.6	75	15
		15	24.2	30	25
		16	24.3	45	35

**Tablo 4.7.** Çimentoların sıcaklığı üzerinde etkili olan parametreler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	1.94	0.65	0.06	10.51
Uçucu Kül	3	2.36	0.79	0.02	2.07
Öğütme Katkısı	3	1.99	0.66	0.02	2.59
Katkı Dozajı g/t	3	3.48	1.16	0.03	3.52
Öğütme Süresi	3	67.28	22.43	0.69	81.31
Toplam	15	77.05			100





**Şekil 4.6.** Öğütme süresinin sıcaklık üzerindeki etkisi

Şekil 4.6'da görüldüğü gibi öğütme süresinin artması ile birlikte çimentoların sıcaklıkları da artmaktadır. 30 dakika süre ile yapılan öğütme sonunda sıcaklık yaklaşık 22.8 °C iken, öğütme süresinin 75 dakika olması durumunda sıcaklık yaklaşık 28 °C olmaktadır.

### **4.3. Çimentoların Özgül Ağırlıklarının Belirlenmesi**

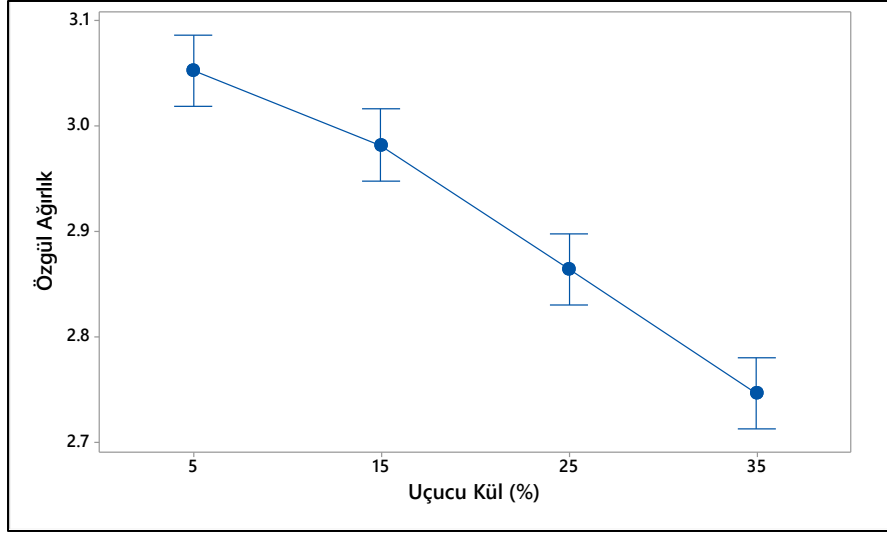
Uçucu kül, referans ve Taguchi serisinde yer alan çimentoların özgül ağırlıkları Tablo 4.8'de verilmiştir. SDC klinkerinin özgül ağırlığı 3.13, PÇ klinkerlerinin özgül ağırlıkları 3.14 ve PK klinkerinin özgül ağırlığı 3.15 olarak bulunmuştur. Uçucu külün özgül ağırlığı ise 1.97 olarak belirlenmiştir.

Taguchi serisinde yer alan çimentoların özgül ağırlıkları ise 3.05 ile 2.72 arasında değişmektedir. Uçucu kül oranının artması ile özgül ağırlıklar azalmaktadır. Uçucu kül oranının özgül ağırlık üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 4.8.** Uçucu kül ve çimentoların özgül ağırlıkları

		Özgül Ağırlık	Öğütme Süresi (dk)	Uçucu Kül (%)	
REFERANSLAR	SDÇ	3.13	75	-	
	PÇ-1	3.14	75	-	
	PK	3.15	75	-	
	PÇ-2	3.14	75	-	
MİNERAL KATKI	Uçucu Kül	1.97	-		
TAGUCHI SERİSİ	SDÇ	1	3.05	30	5
		2	2.94	45	15
		3	2.84	60	25
		4	2.73	75	35
	PÇ-1	5	3.05	75	5
		6	2.99	60	15
		7	2.86	45	25
		8	2.72	30	35
	PK	9	3.05	45	5
		10	3.00	30	15
		11	2.85	75	25
		12	2.74	60	35
	PÇ-2	13	3.08	60	5
		14	2.98	75	15
		15	2.83	30	25
		16	2.75	45	35

Uçucu külün özgül ağırlık üzerindeki etkisi Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi uçucu kül oranının artması ile özgül ağırlık değerleri azalmaktadır. Uçucu kül ikame oranının %35 olması durumunda özgül ağırlık ortalaması 2.77 olmaktadır. Çimento üretiminde uçucu kül kullanımı ile özgül ağırlık değerleri 3.10 değerinin altına düşmektedir.



**Şekil 4.7.** Uçucu külün özgül ağırlık üzerindeki etkisi

#### **4.4. Çimentoların Priz Sürelerinin ve Kıvam Suyunun Değerlendirilmesi**

Çimentoların kıvam suyu, priz başlangıç ve bitiş süreleri Tablo 4.9'de verilmiştir. Referans karışımların normal kıvam için su miktarları incelendiğinde, PÇ-2 klinkeri ile üretilen çimentonun kıvam suyu miktarı %24.75 SDC klinkeri ile üretilen çimentonun kıvam suyu miktarı ise %26.10 olarak belirlenmiştir.  $C_3A$  içeriği nispeten yüksek olan PÇ-1 ve PÇ-2 çimentolarının priz başlama süreleri diğer çimentolara göre daha kısa olmuştur.

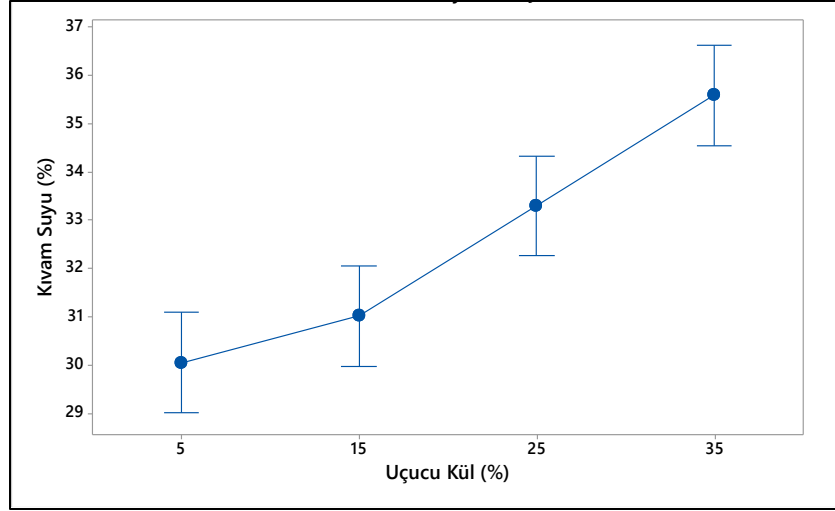
Taguchi serisinde yer alan çimentoların standart kıvam için su değerleri %28.80-36.46 arasında değişmektedir. Uçucu kül ikame oranının artması ile birlikte kıvam suyu ihtiyacı da artmaktadır. Kıvam suyu üzerinde etkili olan parametreler Tablo 4.10'da verilmiştir. Tablo 4.10'da görüldüğü çimentoların kıvam suyunu etkileyen ana parametre uçucu kül oranıdır. Uçucu kül oranının artması ile kıvam suyu miktarı da artmaktadır. Bu durumu uçucu külün boşluklu bir yapıya sahip olması da etkilemektedir.

**Tablo 4.9.** Çimentoların normal kıvam için su gereksinimleri ve priz süreleri

		Kıvam Suyu (%)	Priz Baş. (dk)	Priz Bit. (dk)	Öğütme Süresi (dk)	Uçucu Kül (%)	
REFERANSLAR		SDÇ	26.10	215	385	75	-
		PÇ-1	25.33	185	375	75	-
		PK	25.81	200	375	75	-
		PÇ-2	24.75	175	365	75	-
TAGUCHI SERİSİ	SDÇ	1	31.37	340	415	30	5
		2	31.74	330	410	45	15
		3	33.76	330	405	60	25
		4	36.46	350	435	75	35
	PÇ-1	5	29.32	280	365	75	5
		6	30.60	295	365	60	15
		7	33.00	310	400	45	25
		8	34.41	400	485	30	35
	PK	9	30.73	320	380	45	5
		10	31.28	360	440	30	15
		11	34.38	295	365	75	25
		12	36.09	350	440	60	35
	PÇ-2	13	28.80	280	375	60	5
		14	30.46	275	365	75	15
		15	32.05	375	455	30	25
		16	35.40	310	395	45	35

**Tablo 4.10.** Çimentoların kıvam suyu üzerinde etkili olan parametreler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	8.79	2.93	0.47	10.43
Uçucu Kül	3	73.38	24.46	27.09	87.13
Öğütme Katkısı	3	1.08	0.36	0.05	1.29
Katkı Dozajı g/t	3	0.35	0.12	0.02	0.41
Öğütme Süresi	3	0.62	0.21	0.03	0.73
Toplam	15	84.22			100



**Şekil 4.8.** Uçucu kül oranının kıvam suyu üzerindeki etkisi

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi uçucu kül oranının artması ile birlikte kıvam suyu ihtiyacı artmaktadır. Özellikle uçucu kül oranının %25 ve 35 olması durumunda kıvam suyu yaklaşık %30-40 oranında artmaktadır. Uçucu külün yüksek Blaine değerine sahip olması kıvam suyu artışına neden olmaktadır. Priz başlangıç süresi üzerinde etkili olan parametreler ise Tablo 4.11’de verilmiştir.

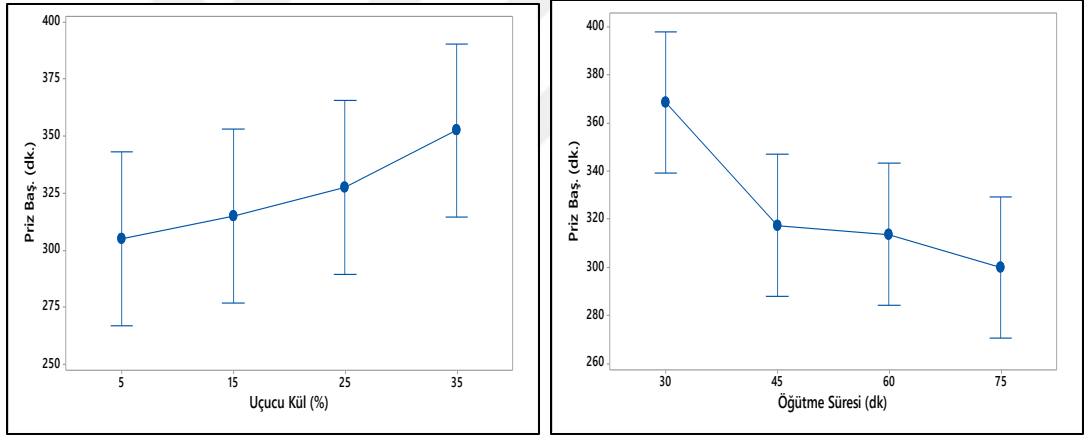
**Tablo 4.11.** Priz başlangıç süresine etki eden faktörler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	1737.5	579.17	0.44	16.82
Uçucu Kül	3	5050	1683.33	1.38	25.63
Öğütme Katkısı	3	1362.5	454.17	0.29	5.92
Katkı Dozajı g/t	3	662.5	220.83	0.14	3.36
Öğütme Süresi	3	10887.5	3629.17	4.88	49.27
Toplam	15	19700			100

Tablo 4.11’de görüldüğü priz başlangıç süresinde etkili olan ana faktör öğütme süresidir. Ancak uçucu külün de priz başlama süresi üzerinde etkisi bulunmaktadır. Öğütme süresi ve uçucu külün priz başlama süresi üzerindeki etkileri Şekil 4.9’da

verilmiştir. Şekil 4.9'da sadece etkili olan parametreler (öğütme süresi ve uçucu külün etkisi) verilmiştir. Öğütme katkısı ve dozajı priz başlangıç/bitiş sürelerinde çok etkili olmadığı için incelenmemiştir.

Uçucu kül oranının artması ile birlikte priz başlama sürelerinin arttığı Şekil 4.9'da görülmektedir. Ancak öğütme süresi priz başlama süresi üzerinde daha etkili olmaktadır. Öğütme süresinin artması ile priz başlama süreleri kısalmaktadır. Özellikle 45 dakika ve üzeri öğütme sürelerinde priz başlangıç süreleri yaklaşık 50 dakika azalmaktadır. 45 ve 60 dakika süre ile öğütülen çimentoların priz başlangıç süreleri arasında çok fark olmadığı da belirlenmiştir. Ayrıca uçucu kül oranının artması kıvam suyunu arttırmakta ve bu durumda priz başlama/bitiş sürelerini uzatmaktadır. Uçucu kül oranı arttıkça Blaine incelikleri artış göstermektedir. Blaine inceliğinin artması kıvam suyunu büyük oranda arttırmaktadır.



**Şekil 4.9.** Uçucu kül ve öğütme süresinin priz başlama süresi üzerindeki etkileri

Kıvam suyu ihtiyacına etki eden ana parametre uçucu kül oranı olarak belirlenmiştir. Yüksek özgül yüzey alanı ve oldukça düşük tane boyutuna sahip uçucu kül su ihtiyacını oldukça fazla arttırmaktadır. Priz başlama süresine etki eden ana parametre ise öğütme süresidir. Klinker tanelerinin uzun süre öğütülmesi sonucu elde edilen çimentoların tane boyutu küçülmekte ve hidrasyon daha hızlı gelişmektedir.

Ayrıca  $C_3A$  içeriği yüksek çimentoların priz başlama sürelerinin daha kısa olduğu belirlenmiştir.

#### 4.5. Taze Harç Özelliklerinin Değerlendirilmesi

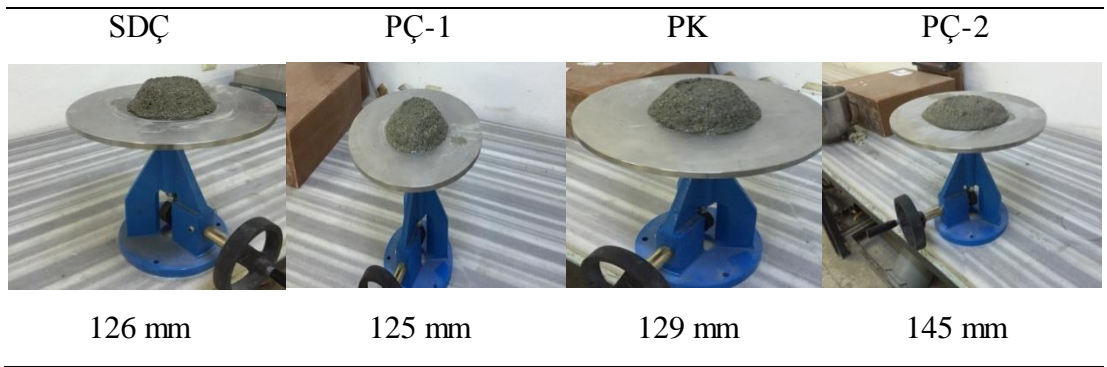
Referans ve Taguchi serisinde yer alan çimentolar ile elde edilen harçların yayılma çapları Tablo 4.12'de verilmiştir.

Referans karışımlarda PÇ-2 klinkeri ile üretilen çimento harcının yayılma çapı değeri 145 mm olarak belirlenmiştir. PÇ-2 klinkeri ile üretilen çimentonun ortalama tane boyutunun diğer çimentolara göre büyük olması ve özgül yüzey alanının daha düşük işlenebilirlik açısından olumlu katkı sağlamıştır. Ancak ortalama tane boyutu en düşük, özgül yüzey alanı en yüksek olan PK klinkeri ile üretilen çimento harcının, SDC ve PÇ-1 klinkeri ile üretilen çimento harçlarına göre daha yüksek bir yayılma çapı (129 mm) sağlamıştır. PÇ-2 klinkeri ile üretilen çimento harcında 145 mm yayılma çapı değeri elde edilmiştir. Referans karışımlara ait yayılma tablası deneyi sonuçları Şekil 4.10'da görülmektedir.

Taguchi serisinde yer alan çimento harçlarının yayılma çapları 101-143 mm arasında değişmektedir. Öğütme süresi ve uçucu kül oranının artması ile yayılma çapları azalmaktadır. Taguchi serisinde yer alan çimentolar ile elde edilen harçlar Şekil 4.11'de görülmektedir. Taze harçlar için işlenebilirlik faktörü dikkate alındığında yayılma tablası ile elde edilen sonuçların (çapların) yüksek bir değere sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden S/N oranlarının belirlenmesinde en büyük en iyi modellemesi kullanılmıştır. S/N oranları Şekil 4.12'de verilmiştir.









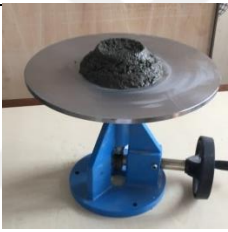
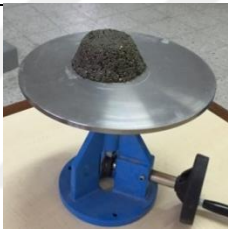






**Tablo 4.12.** Taze harçlara ait yayılma çapları

		Yayılma Çapı (mm)	Oğütme Süresi (dk)	Uçucu Kül (%)	
REFERANSLAR	SDÇ	126	75	-	
	PÇ-1	125	75	-	
	PK	129	75	-	
	PÇ-2	145	75	-	
TAGUCHİ SERİSİ	SDÇ	1	125	30	5
		2	109	45	15
		3	105	60	25
		4	102	75	35
	PÇ-1	5	122	75	5
		6	107	60	15
		7	105	45	25
		8	102	30	35
	PK	9	124	45	5
		10	116	30	15
		11	105	75	25
		12	103	60	35
	PÇ-2	13	143	60	5
		14	122	75	15
		15	110	30	25
		16	102	45	35



**Şekil 4.10.** Referans karışımların taze harç özellikleri

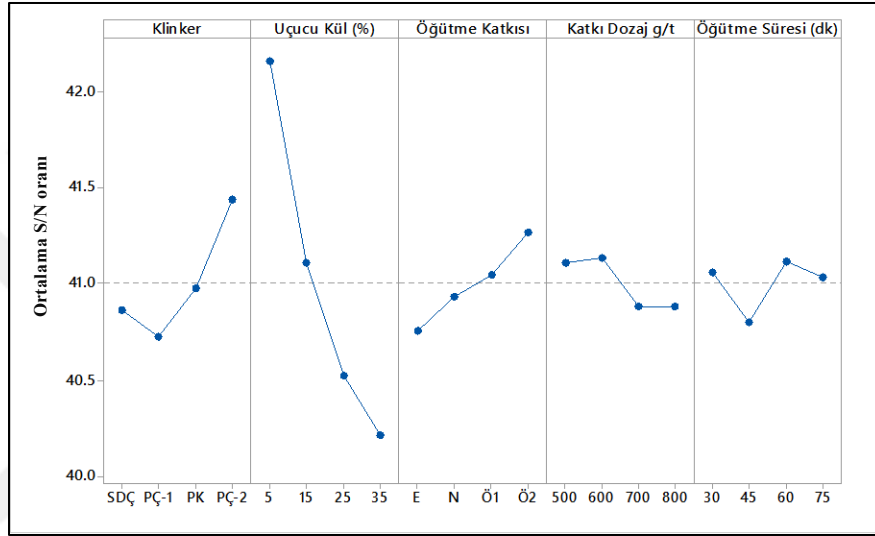


SDÇ	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
				
	125 mm	109 mm	105 mm	102 mm
PÇ-1	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
				
	122 mm	107 mm	105 mm	104 mm
PK	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
				
	124 mm	116 mm	105 mm	103 mm
PÇ-2	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>
				
	143 mm	122 mm	110 mm	102 mm

**Şekil 4.11.** Taguchi serisindeki çimento harçları ile elde edilen taze harçlar

Şekil 4.12'de S/N oranları için ortalama çizgisi 41 değerinde belirlenmiştir. Bu değer üzerinde kalan parametreler ile üretilen çimento harçlarının işlenebilirlik özellikleri

daha iyi sonuç vermektedir. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi işlenebilirlik açısından en uygun klinker tipi PÇ-2 klinkeri ile üretilen çimentolar olmaktadır. Ayrıca işlenebilirlik için uçucu kül miktarının %5-15 aralığında olması daha uygun sonuçlar sağlayacaktır. Öğütme sürecinde kullanılan kimyasal katkıların ise dozaj olarak 500-600 g/t olması daha olumlu katkı sağlayacaktır. Katkı dozajının artması ile çimentoların ortalama tane boyutu azalmakta ve bu durum işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir.



Şekil 4.12. Taze harç özellikleri için elde edilen S/N oranları

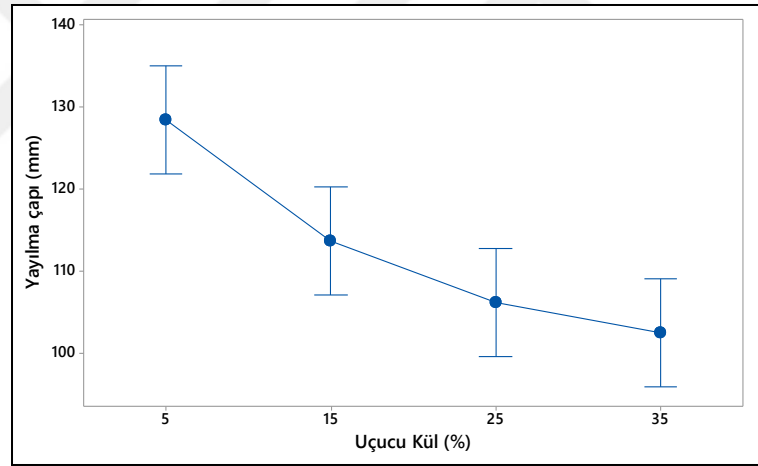
Şekil 4.12’de yer alan S/N oranları dikkate alındığında işlenebilirlik için PÇ-2 klinkeri %5 uçucu kül ile birlikte 60 dakika süre ile öğütülmelidir. Öğütme sırasında ise Ö2 katkısı 600 g/t dozaj ile uygulanmalıdır. S/N oranları sonucu elde edilen değişkenler kullanıldığı takdirde tahmini yayılma çapı yaklaşık 144 mm olacaktır. S/N oranları sonucu elde edilen karışım aslında Taguchi serisinde yer alan 13 no’lu karışımı ifade etmektedir. 13 no’lu karışımın yayılma çapı ise 143 mm olarak bulunmuştur.

Taze harçların yayılma çaplarına etki eden parametreler ise Tablo 4.13’de verilmiştir. Yayılma çapı üzerinde etkili olan ana parametre %78.22 değeri ile uçucu kül oranı olmaktadır. Klinker tipi ise diğer parametrelere (öğütme katkısı tipi ve dozajı, öğütme süresi) göre daha etkili olmuştur. Öğütülebilirliği kolay olan PK klinkerinden

elde edilen çimentoların Blaine değerleri daha yüksek olmuş ve bu durum işlenebilirliği nispeten azaltmıştır. Klinkerin öğütülebilirlik derecesi de işlenebilirlik üzerinde etkili olmaktadır.

**Tablo 4.13.** Taze harçların yayılma çaplarına etki eden parametreler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	229.50	76.50	0.51	11.32
Uçucu Kül	3	1585.50	528.50	14.36	78.22
Öğütme Katkısı	3	113.50	37.83	0.24	5.60
Katkı Dozajı g/t	3	51.00	17.00	0.10	2.52
Öğütme Süresi	3	47.50	15.833	0.10	2.34
Toplam	15	2027			100.00



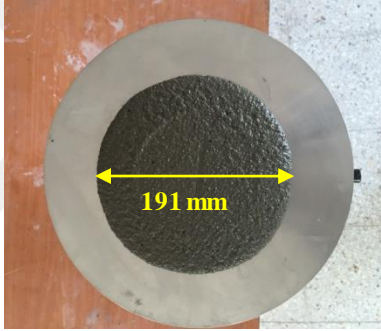
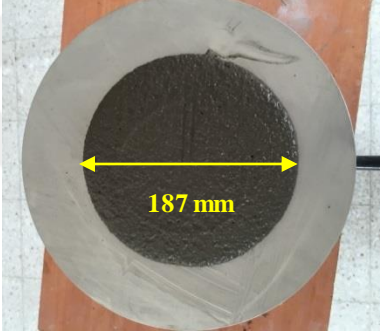
**Şekil 4.13.** Uçucu kül oranının yayılma çapı üzerindeki etkisi

Uçucu külün yayılma çapları üzerindeki etkisi Şekil 4.13'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi uçucu kül oranının artması ile birlikte yayılma çapları azalmaktadır. %5 uçucu kül kullanılması durumunda yayılma çapı ortalaması yaklaşık 130 mm olmaktadır. Ancak uçucu kül oranının %35 olması durumunda yayılma çapı yaklaşık %20 oranında azalmaktadır. Uçucu külün %35 olması durumunda yayılma çapı 105 mm ve altında bir değere sahip olmaktadır. Uçucu kül oranındaki artış çimentoların

Blaine inceliklerini arttırmakta (ortalama tane boyutunu azaltmakta) ve harçların taze hal özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca uçucu kül bünyesinde yer alan küresel olmayan taneler (düzensiz uçucu kül taneleri) işlenebilirliği olumsuz etkileyen diğer bir parametre olarak belirlenmiştir.

#### 4.6. Uçucu Külün Puzolanik Özellikleri

ASTM C 618 standardına göre dayanım aktivite deneyi gerçekleştirilmiştir. Uçucu küllü karışımın referans harç ile eşit akma (flow) değerine sahip olması gerektiği için yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. Yayılma tablası deneyi sonucu referans ve uçucu küllü karışımların yayılma çapları Şekil 4.14'de verilmiştir.

Referans Karışım	Uçucu Küllü Karışım
191 mm	187 mm
	

Şekil 4.14. Dayanım aktivite deneyi için gerçekleştirilen yayılma tablası deneyi

Referans ve uçucu kül katkılı harçlar 7 ve 28. günlerde basınç dayanımı deneyine tabi tutularak dayanım aktivite indeksi belirlenmiştir. Referans karışım ve uçucu kül katkılı harçların basınç dayanımı ve puzolanik aktivite indeksleri Tablo 4.14'de verilmiştir.

Uçucu küllü karışımın 28. günde dayanım aktivite indeksi %78.6 olarak belirlenmiş ve bu değer %75'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Uçucu kül ASTM C 618'de belirtilen  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3>\%70$  sınır değerini de sağlamaktadır.

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında uçucu külün puzolanik katkı olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

**Tablo 4.14.** ASTM C 618 standardına göre elde edilen dayanım değerleri ve aktivite indeksleri

	7 Gün	28 Gün
Referans Karışım (MPa)	45.66	63.38
Uçucu Küllü Karışım (MPa)	33.14	49.79
Dayanım Aktivite İndeksi (%)	%72.6	%78.6

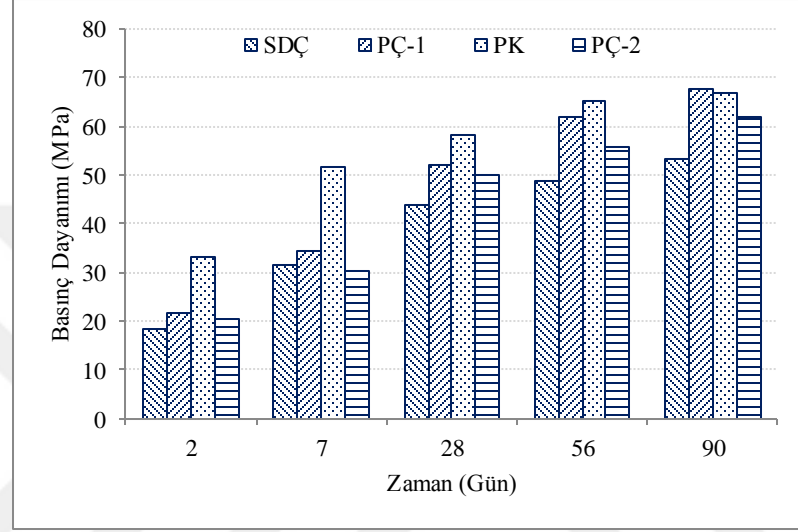
## 4.7. Harçların Mekanik Özellikleri

### 4.7.1. Harçların Basınç Dayanımları

Referans çimento harçlarına ait basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.15'de verilmiştir.

Referans çimento harçlarının 2 günlük basınç dayanımları incelendiğinde PK klinkerinin 32.98 MPa değeri ile en yüksek erken yaş dayanımına sahip olduğu görülmektedir. PK klinkerinin erken yaşta yüksek dayanım vermesinin 2 sebebi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi yüksek  $C_3S$  içeriği (%67.07), ikincisi ise yüksek  $C_3S$  içeriğine bağlı olarak yüksek inceliğidir. PK klinkerinden üretilen çimentonun özgül yüzey alanı diğeri çimentolara göre daha yüksek olduğu için (Blaine inceliği  $3590 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) erken yaş dayanımları daha yüksek olmuştur. PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimento harçlarının ise 2 günlük basınç dayanımları sırasıyla 21.77 ve 20.29 MPa olarak belirlenmiştir. PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri kimyasal özellikleri açısından birbirine yakın özellikler taşıdığı için dayanım özellikleride benzer olmuştur. SDC klinkeri ile üretilen çimento harçlarının 2 günlük basınç dayanımları 20 MPa değerinin altında kalmıştır. 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde tüm çimento harçlarının 42.5 değerini aştığı görülmektedir. PK klinkerleri ile üretilen çimento harçlarının 28 günlük basınç dayanımı değeri 58.36 MPa olarak belirlenmiştir. SDC, PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimento harçları 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %40'ını 2 gün sonunda elde etmiştir. PK

klinkerinde ise bu oran %56 olarak belirlenmiştir. 90 günlük basınç dayanımı özellikleri incelendiğinde PÇ-1 klinkeri ile üretilen çimento harçlarının, PK klinkeri ile üretilen çimento harçlarına göre daha fazla basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca PÇ-1 çimentosundaki yüksek C<sub>2</sub>S içeriği (%22.75) sürekli dayanım gelişimine katkı da bulunmuş ve 90. günde PK çimentosundan daha üstün bir özellik göstermiştir.



Şekil 4.15. Referans çimento harçlarının zamana bağlı basınç dayanımları

Taguchi serisinde yer alan çimentolar ile üretilen harçların basınç dayanımları zamana bağlı olarak Şekil 4.16'da verilmiştir.

2 günlük basınç dayanımları incelendiğinde 1 ve 8 numaralı çimentolar ile üretilen harçların oldukça düşük dayanım değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum 7, 28, 56 ve 90. günlerde de devam etmiştir. 1 numaralı çimento içerisinde %5 uçucu kül kullanılmasına rağmen öğütme süresi 30 dakika olduğu için klinker için istenilen inceliğe ulaşamamıştır. 1 numaralı çimentonun Blaine inceliği 3010 cm<sup>2</sup>/g ve ortalama tane boyutunun 56.96 µ olması basınç dayanımlarını olumsuz etkilemiştir. 8 Numaralı çimento ise %35 uçucu kül kullanılarak 30 dakika süre ile öğütülerek elde edilmiştir. 8 numaralı çimentonun ortalama tane boyutu 25.66 µ, Blaine inceliği ise 5130 cm<sup>2</sup>/g olarak belirlenmiş ancak ortalama tane boyutunun azalmasına yüksek

oranda kullanılan uçucu kül neden olmuştur. Düşük öğütme süresinde yüksek oranda uçucu kül kullanımı basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Özellikle düşük öğütme sürelerinde (30-45 dk. gibi) klinker yeterli inceliğe ulaşamadığı için basınç dayanımları azalmaktadır.

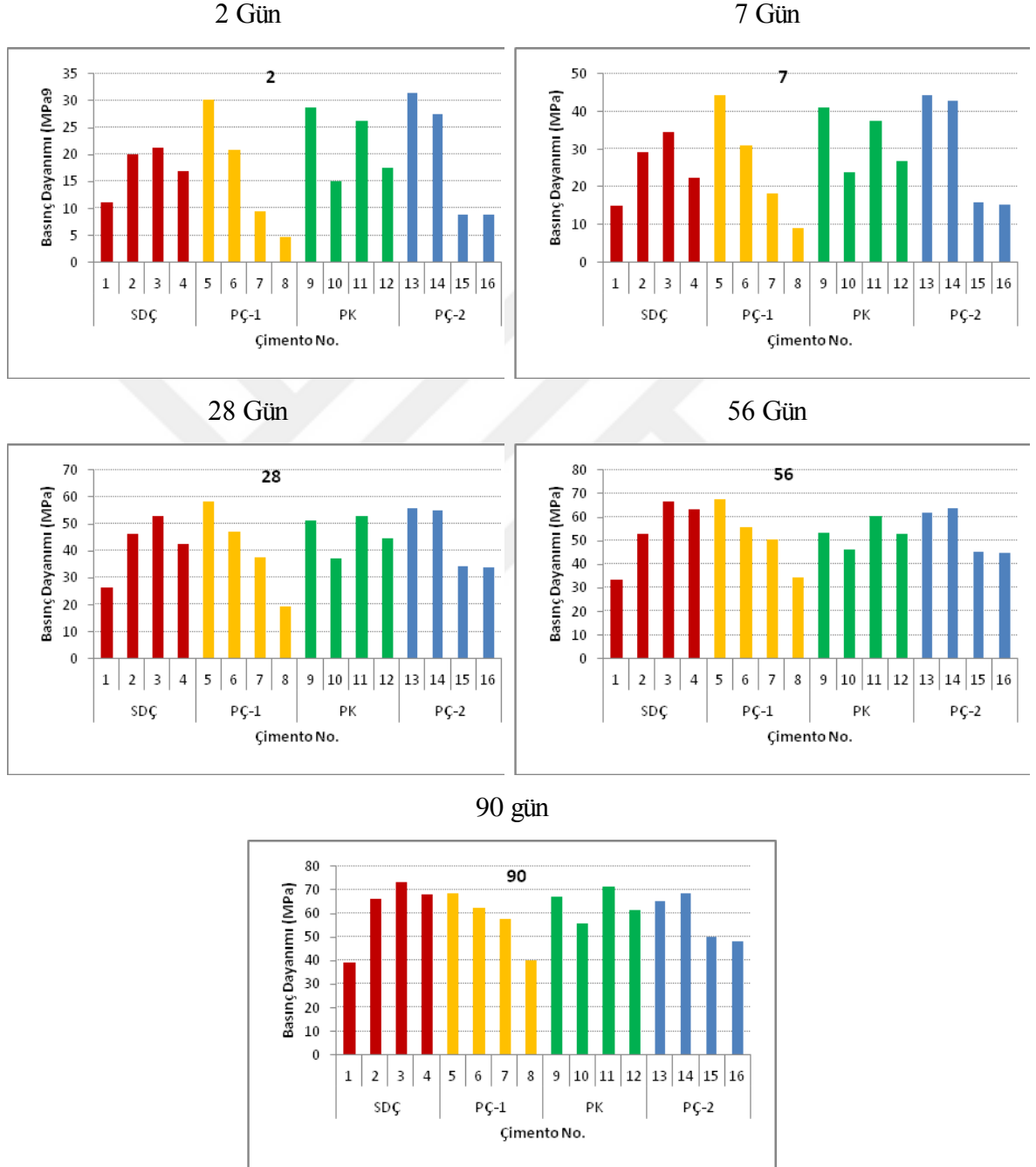
2 günlük basınç dayanımları açısından 20 MPa değeri aşıldığı takdirde TS EN 196-1 standardına göre 42.5 R tipi çimento olarak tanımlanmaktadır. Bu kriteri sağlayan çimentolar; 2, 3, 5, 6, 9, 11, 13 ve 14 numaralı çimentolardır. 2 günlük basınç dayanımları açısından 10 MPa değeri aşıldığı takdirde TS EN 196-1 standardına göre N tipi çimento olarak tanımlanmaktadır. Bu kriteri sağlayan çimentolar; 1, 4, 10 ve 12 numaralı çimentolardır. 7, 8, 15 ve 16 numaralı çimentolar 2 günlük basınç dayanımları açısından standartlarca belirlenen değerleri elde edememiştir.

SDÇ klinkeri ile üretilen referans çimentonun (75 dakika öğütme süresi ile) 2 günlük basınç dayanımı 18.53 MPa'dır. SDÇ klinkerinden üretilen 1 numaralı çimentonun 2 günlük basınç dayanımı 11.03 MPa'dır. Basınç dayanımının referans çimentodan düşük olmasının nedeni %5 uçucu kül kullanılması ve öğütme süresinin 30 dakika olmasıdır. 2 ve 3 numaralı çimentolarda ise uçucu kül oranı %15 ve 25, öğütme süresi ise 45 ve 60 dakika olmaktadır. Bu yüzden 2 ve 3 numaralı çimentoların 2 günlük basınç dayanımları 20 MPa sınırına ulaşmıştır. 4 numaralı çimentonun 2 günlük basınç dayanımı 16.81 MPa olarak belirlenmiştir. 4 numaralı çimentonun öğütme süresi 75 dakika olmasına rağmen uçucu kül oranı %35 olduğu için referans çimentoya göre daha düşük dayanım değeri elde edilmiştir.

PÇ-1 klinkeri ile üretilen referans çimentonun 2 günlük basınç dayanımı 21.78 MPa'dır. PÇ-1 klinkeri ile uçucu kül kullanılarak üretilen kompoze çimentolarda 8 numaralı çimentonun 2 günlük basınç dayanımı 4.65 MPa'dır. 8 numaralı çimentonun öğütme süresi 30 dakika ve uçucu kül oranının %35 olması basınç dayanımını oldukça düşürmüştür.

PK klinkerinden üretilen referans çimentonun 2 günlük basınç dayanımı 32.98 MPa'dır. PK klinkerinden üretilen kompoze çimentolardan 10 ve 12 numaralı

çimentoların basınç dayanımları referans çimentoya göre oldukça düşük bir değere sahiptir. 10 numaralı çimento 30 dakika öğütme süresi ile %15 uçucu kül, 12 numaralı çimento ise 60 dakika öğütme süresi ile %35 uçucu kül ile üretilmiştir. Bu yüzden yüksek uçucu kül oranı yada yetersiz öğütme süresi 2 günlük basınç dayanımlarını azaltmıştır.



Şekil 4.16. Taguchi serisinde yer alan çimentoların zamana bağlı basınç dayanımları



PÇ-2 klinkerinden üretilen referans çimentonun 2 günlük basınç dayanımı 20.29 MPa'dır. PÇ-2 klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda ise 15 ve 16 numaralı çimentoların 2 günlük basınç dayanımları 10 MPa'nın altında kalmıştır. 15 numaralı çimento 30 dakika öğütme süresi ve %25 uçucu kül, 16 numaralı çimento ise 16 numaralı çimento ise 45 dakika öğütme süresi ve %35 uçucu kül ile üretilmiştir. Diğer çimentolarda olduğu gibi 30 ve 45 dakika öğütme sürelerinde %25 ve üstü uçucu kül kullanımı basınç dayanımlarını oldukça olumsuz etkilemektedir.

7, 10, 15 ve 16 numaralı çimentolar 28 günlük basınç dayanımları açısından 32.5 MPa değerini geçmektedir. 2, 4, 6, 9 ve 12 numaralı çimentolar ise 42.5 MPa değerini geçmektedir. 3, 5, 11, 13 ve 14 numaralı çimentolar ise 52.5 MPa değerini geçmektedir.

SDÇ klinkerinden üretilen referans çimentonun 28 günlük basınç dayanımı 43.88 MPa'dır. SDÇ klinkerinden üretilen 2 ve 3 numaralı kompoze çimentolar referans çimentodan daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. 2 numaralı çimento 45 dakika öğütme süresi ve %15 uçucu kül kullanılarak üretilmiştir. Ancak 2 numaralı çimentoda N katkısı 600g/t dozaj ile kullanılmıştır. 3 numaralı çimentonun öğütme süresi 60 dakika ve uçucu kül oranı %25'dir. 3 numaralı çimento Ö1 katkısı 700 g/t dozaj ile üretilmiştir. Kullanılan kimyasak katkıları ve uçucu kül 2 ve 3 numaralı çimentoların Blain inceliklerini de arttırmıştır. 2 numaralı çimentonun Blaine inceliği 5030 cm<sup>2</sup>/g, 3 numaralı çimentonun Blaine inceliği ise 5930 cm<sup>2</sup>/g'dır. 4 numaralı çimentonun Blaine inceliği 7530 cm<sup>2</sup>/g olmasına rağmen 28 günlük basınç dayanımı 2 ve 3 numaralı çimentolara göre daha düşük olmaktadır. Bu olayın nedeni %35 uçucu kül kullanımı ile açıklanmaktadır. İnceliği yüksek uçucu külün yüksek ikame oranı Blaine inceliğini artırırken basınç dayanımında bir miktar azalmaya yol açmıştır.

PÇ-1 klinkerinden üretilen referans çimentonun 28 günlük basınç dayanımı 52.23 MPa olarak belirlenmiştir. PÇ-1 klinkeri ile uçucu kül kullanılarak üretilen kompoze çimentolarda 5 numaralı çimento referans çimentoya göre daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. 5 numaralı çimento %5 uçucu kül ile birlikte 75 dakika öğütme süresi ile elde edilmiştir. 5 numaralı çimentonun öğütülmesi esnasında N

katkısı 700 g/t dozaj ile kullanılmıştır. 28 günlük basınç dayanımı 58.25 MPa olan 5 numaralı çimentonun Blaine incelik değeri ise 5550 cm<sup>2</sup>/g'dır. Çimento üretiminde kullanılan kimyasal katkı ile birlikte %5 uçucu kül kullanımı basınç dayanımını olumlu etkilemiştir.

PK klinkerinden üretilen referans çimentonun 28 günlük basınç dayanımı 58.27 MPa'dır. PK klinkeri ile üretilen uçucu kül katkılı kompoze çimentoların hepsi (9-10-11-12) referans çimentoya göre daha düşük dayanım değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Bu olayın nedeni PK klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda 60 ve 75 dakika öğütme sürelerinde yüksek oranda uçucu kül kullanılması yada düşük oranda uçucu kül kullanılması durumunda (%5-15) öğütme süresinin yetersiz (30-45 dakika) olmasıdır. Özellikle 12 numaralı çimentonun 28 günlük basınç dayanımı referans çimentoya göre yaklaşık %25 oranında azalmaktadır. Bu olayın nedeni 60 dakika öğütme süresinde %35 uçucu kül kullanılmasıdır.

PÇ-2 klinkerinden üretilen referans çimentonun 28 günlük basınç dayanımı 49.85 MPa'dır. 13 ve 14 numaralı kompoze çimentoların 28 günlük basınç dayanımları referans çimentoya göre daha yüksek olmuştur. 13 ve 14 numaralı çimentoların öğütme süreleri sırasıyla 60 ve 75 dakika, uçucu kül oranları ise sırasıyla %5 ve 15'dir. 75 dakika öğütme süresinde %15 uçucu kül kullanımı referans çimentoadan daha üstün çimentoların elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Ancak çimentoların üretiminde kullanılan öğütme kolaylaştırıcılarda önemli katkı sağlamaktadır.

SDÇ klinkerinden üretilen referans çimentonun 90 günlük basınç dayanımı 53.13 MPa'dır. 2, 3 ve 4 numaralı kompoze çimentoların 90 günlük basınç dayanımları 65 MPa üzerindedir. Puzolanik özellik etkisiyle yüksek oranda uçucu kül kullanımı 90 günlük basınç dayanımlarını arttırmaktadır.

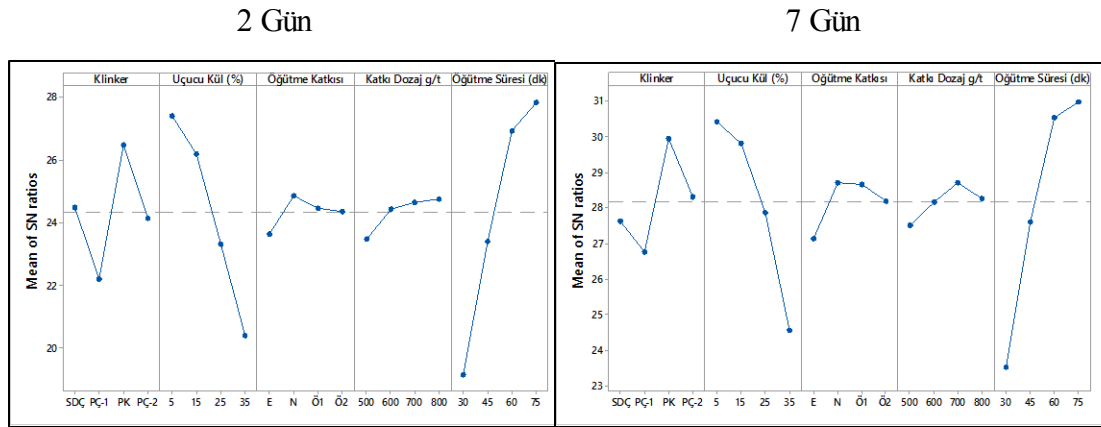
PÇ-1 klinkerinden üretilen referans çimentonun 90 günlük basınç dayanımı 67.56 MPa'dır. PÇ-1 klinkerinden üretilen 5 numaralı kompoze çimentonun 90 günlük basınç dayanımı ise 68.58 MPa'dır. 5 numaralı çimentonun öğütme süresi 75 dakika, uçucu kül oranı %5 ve Blaine incelik değeri ise 5550 cm<sup>2</sup>/g'dır.

PK klinkerinden üretilen kompoze çimentolar 28 günlük basınç dayanımları açısından referans çimentonun özelliklerinin altında kalmıştır. Ancak 90. günde 9 ve 11 numaralı kompoze çimentolar referans çimentoya göre daha yüksek basınç dayanımları göstermiştir. Özellikle 11 numaralı çimento ve referans çimento 75 dakika süre ile öğütülerek elde edilmiştir. Ancak 11 numaralı çimento %25 uçucu kül ile birlikte öğütülerek elde edilmiştir.

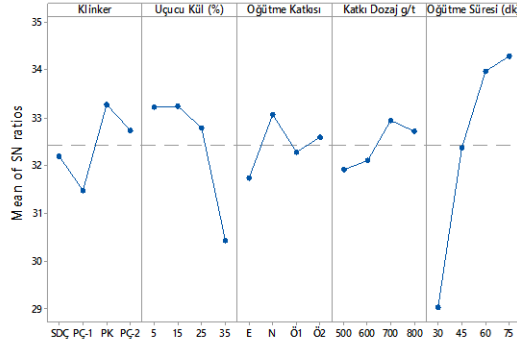
PÇ-2 klinkerinden üretilen referans çimentonun 90 günlük basınç dayanımı 61.86 MPa'dır. 28 günlük basınç dayanımlarında olduğu gibi 13 ve 14 numaralı kompoze çimentolar basınç dayanımı açısından referans çimentodan daha üstün özellikler göstermiştir.

2 günlük basınç dayanımları 10 MPa'nın altında olan 7, 8, 15 ve 16 numaralı kompoze çimentoların 90 günlük basınç dayanımları ise 40 MPa değerinin üzerinde olmuştur. Pozolanik aktivite ile uzun dönemde dayanım artışı elde edilmiştir. Yüksek oranda uçucu kül kullanımı (>%25) erken yaş dayanımını oldukça düşürmekte ancak uzun dönemde ise dayanım artışı sağlamaktadır. Bu özellik erken yaş dayanımını azaltırken hidrasyon ısısının da azalmasını sağlayacaktır.

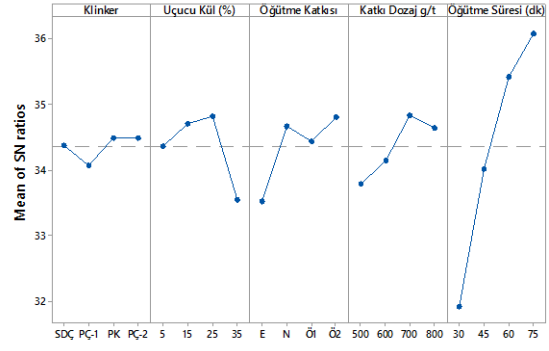
2, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımları için en büyük en iyi yöntemine göre S/N oranları belirlenmiştir. Taguchi serisinde yer alan çimentoların S/N oranları Şekil 4.17'de verilmiştir.



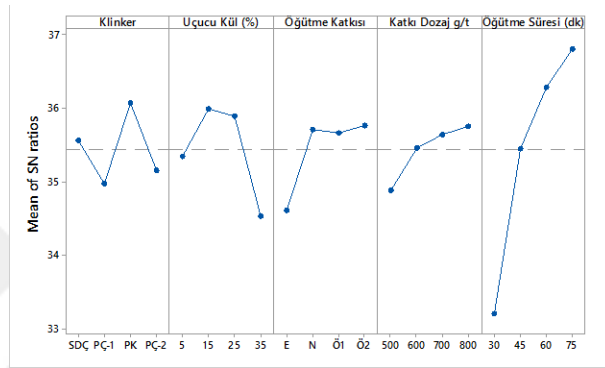
28 Gün



56 Gün



90 gün



Şekil 4.17. Taguchi serisinde yer alan çimentoların basınç dayanımlarına ait S/N oranları

Basınç dayanımı üzerinde etkili olan parametreler Tablo 4.15'de verilmiştir. S/N oranları belirlenerek elde edilen modellere ait parametrelerin kullanılması durumunda tahmini basınç dayanımları Tablo 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.15'de görüldüğü gibi 2, 7, 28 ve 90. deney günleri için basınç dayanımı üzerinde etkili olan üç faktör bulunmaktadır. Bu faktörler önem sırasına göre öğütme süresi, uçucu kül oranı ve klinker tipi olarak belirlenmiştir. Öğütme kolaylaştırıcı katkı tipi ve dozajının basınç dayanımı üzerinde çok büyük bir etki göstermediği belirlenmiştir. Kompoze çimentolar için yüksek C<sub>3</sub>S içeriği klinker tercihi önerilmektedir. Erken yaş (2 ve 7 gün) dayanımı üzerinde uçucu kül oranının artması basınç dayanımlarını azaltmaktadır. Bu yüzden erken yaş dayanımlarının azalmasında uçucu kül oranındaki artış daha çok etkili olmaktadır. Ancak nihai yaştan itibaren (28

gün ve sonrası) puzolanik aktivite etkisi ile uçucu külün olumsuz özellikleri azalmaktadır. Özellikle 90. günde puzolanik aktivite ile basınç dayanımları arasındaki (2-7 günlük basınç dayanımlarına göre) farklar azalmıştır. Erken yaşlarda uçucu kül oranındaki artış basınç dayanımlarını çok etkilerken 90. günde bu etki çok gözlenmemektedir. Ayrıca tüm deney günlerinde öğütme süresi basınç dayanımında etkili olan ana parametre olarak belirlenmiştir. Klinker özellikleri de basınç dayanımı üzerinde etkili olmaktadır. Özellikle 2-7 gün zaman aralığında önemli bir etkiye sahiptir. Ancak kür süresindeki artış ile birlikte klinker tipinin etki değeri azalmaktadır. Klinker tipinin etki değeri zamanla azalmasına rağmen 56. günden itibaren uçucu küle göre dayanım üzerinde daha fazla etkili olmaktadır. 2, 28 ve 90. günlere ait uçucu kül ve öğütme süresinin özellikleri Şekil 4.18’de verilmiştir.

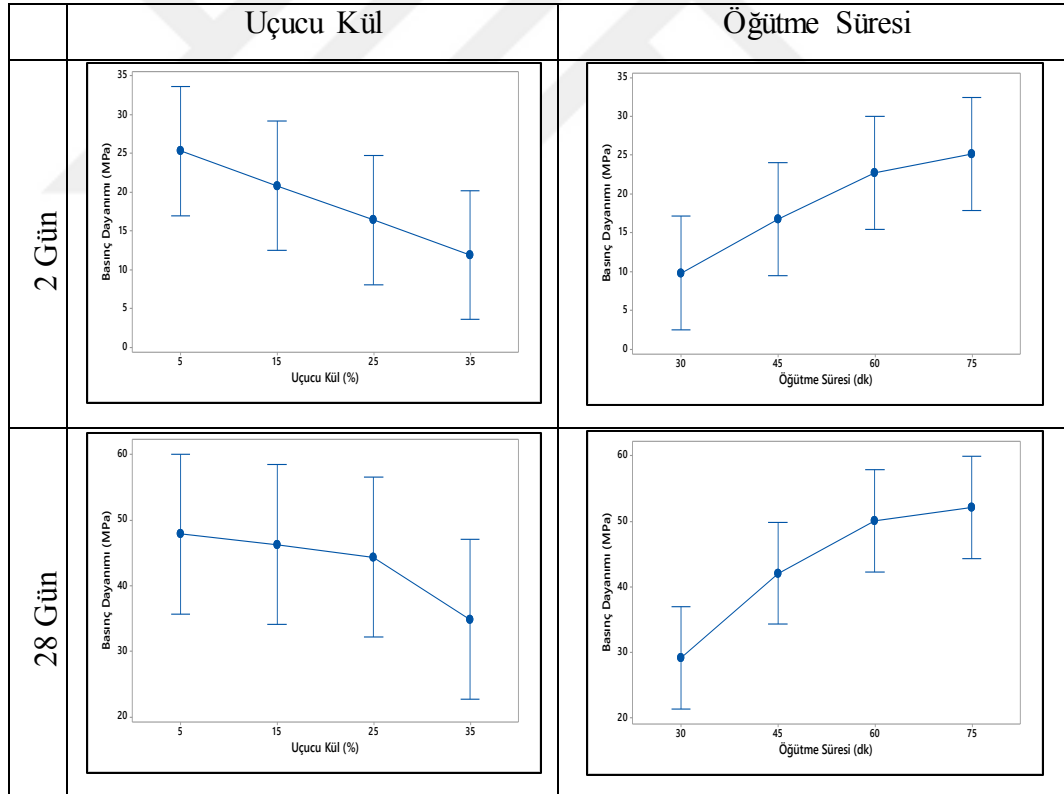
**Tablo 4.15.** Basınç dayanımı üzerinde etkili olan parametreler

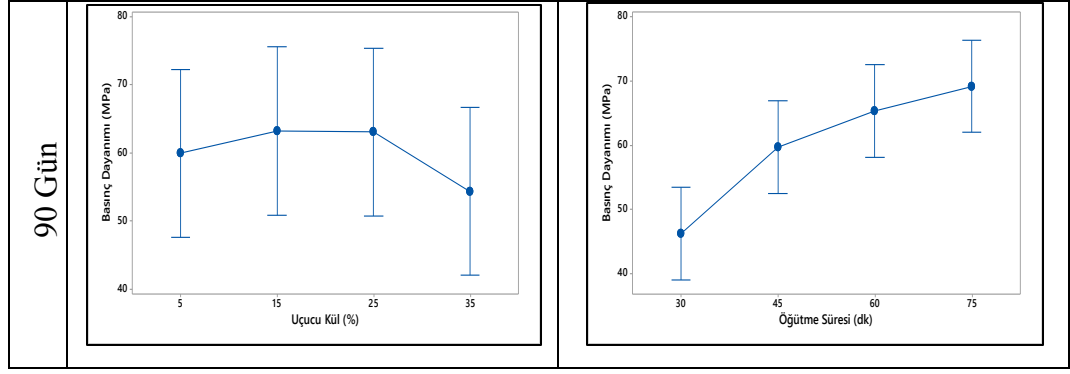
	2 Gün	7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün
Klinker	21.55	20.66	13.49	16.58	12.96
Uçucu Kül	31.30	30.26	17.34	6.98	5.78
Öğütme Katkısı	2.80	5.20	3.85	7.17	7.55
Katkı Dozajı g/t	3.35	2.14	2.39	4.86	3.82
Öğütme Süresi	41.00	41.74	62.93	64.41	69.89
Toplam				100.00	

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi 2 günlük basınç dayanımlarında uçucu kül oranının artması ile birlikte basınç dayanımları da büyük oranda azalmaktadır. 28 günlük basınç dayanımları açısından ise %5, 15 ve 25 oranlarında uçucu kül kullanımının benzer özellikler gösterdiği, %35 uçucu kül kullanımının basınç dayanımını azalttığı görülmektedir. Ancak uçucu kül oranı ile birlikte çimentoların Blaine incelik değerleri doğrudan değiştiği için basınç dayanımları da değişmektedir. 90 günlük basınç dayanımları açısından ise en uygun uçucu kül oranı puzolanik aktivite etkisi ile %15 ve 25 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.18'de uçucu kül oranındaki artış ile birlikte 28. güne kadar basınç dayanımları azalmaktadır. Ancak bu etki için klinkerin inceliği bilinmediği için kesin olarak uçucu küle bağlanması yanıltıcı sonuçlar verebilir.

Öğütme süresinin 2, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkisi incelendiğinde; öğütme süresindeki artışın basınç dayanımlarını arttırdığı belirlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında bütün uçucu kül oranları için 60 ve 75 dakika öğütme işlemi uygun olmaktadır. Ancak 45 dakika yapılan öğütme işlemlerinde uçucu kül oranının %5 ve 15 olması gerekmektedir. Öğütme süresindeki artış ile birlikte çimentoların Blaine incelikleri artmaktadır. Özellikle %5 ve %15 uçucu kül kullanılan kompoze çimentolarda öğütme süresindeki artış Blaine inceliklerini arttırmaktadır. Beklendiği gibi Blaine inceliğindeki artış ile birlikte basınç dayanımlarında da artışlar gözlenmiştir.





**Şekil 4.18.** Uçucu kül oranı ve öğütme süresinin basınç dayanımı üzerindeki etkileri

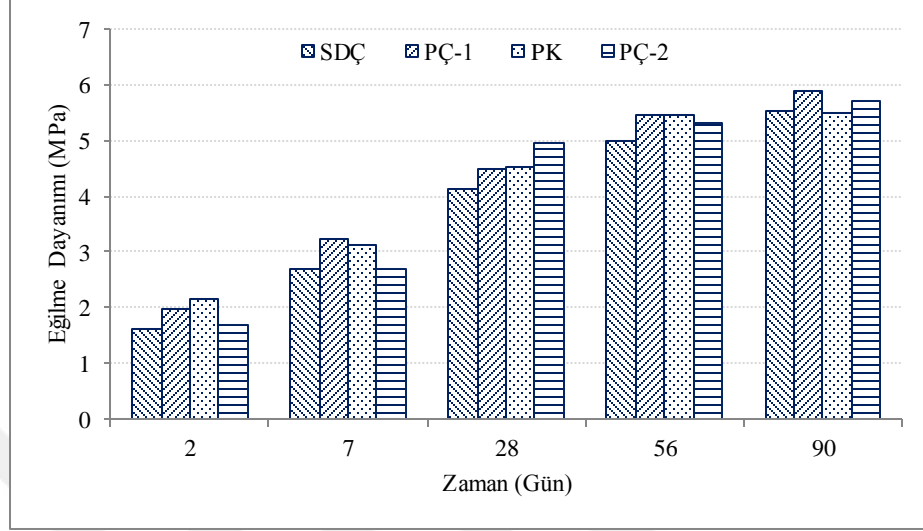
Tablo 4.16'da görüldüğü gibi PK klinkeri ile üretilen çimentoların basınç dayanımı açısından daha uygun olduğu belirlenmiştir. Erken yaşlarda (2 ve 7 gün) uçucu kül oranının %5 olması daha uygun olmaktadır. Ancak 28. günden itibaren uçucu kül oranının %15 olması daha uygun olmaktadır. Öğütme süresi tüm deney günleri için 75 dakika olarak belirlenmiştir. Öğütme kolaylaştırıcı olarak ise N, Ö1 ve Ö2 katkılarının 700-800 g/t dozaj ile uygulanması basınç dayanımlarında artışlara yol açmaktadır. 56 ve 90 günlük basınç dayanımları dikkate alındığında ise puzolanik aktivite etkisi ile daha yüksek oranda (%15-25) uçucu kül kullanımı uygun olmaktadır. Ancak erken yaş dayanımları açısından %5 ve 15 uçucu kül kullanımı daha uygundur. Kompoze çimentoların üretiminde dayanım arttırıcı katkıların da kullanıldığı ve hidrasyon sürecinin bu katkı ile geliştiği düşünülmektedir. Dayanım arttırıcı katkılarında kullanılması ile birlikte %15 ve 25 oranında uçucu kül kullanımı uygun olabilmektedir.

**Tablo 4.16.** En yüksek En iyi modeline göre tahmini basınç dayanımı değerleri

	2	7	28	56	90
Klinker	PK	PK	PK	PÇ-1	PK
Uçucu Kül (%)	5	5	15	25	15
Öğütme Katkısı	N	N	N	Ö2	Ö2
Katkı Dozajı g/t	800	700	700	700	800
Öğütme Süresi	75	75	75	75	75
Tahmini Basınç Dayanımı (MPa)	35.78	50.91	62.68	71.81	79.13

#### 4.7.2. Harçların Eğilme Dayanımları

Referans çimento harçlarına ait eğilme dayanımlarının zamana bağlı değişimi Şekil 4.19'de verilmiştir.



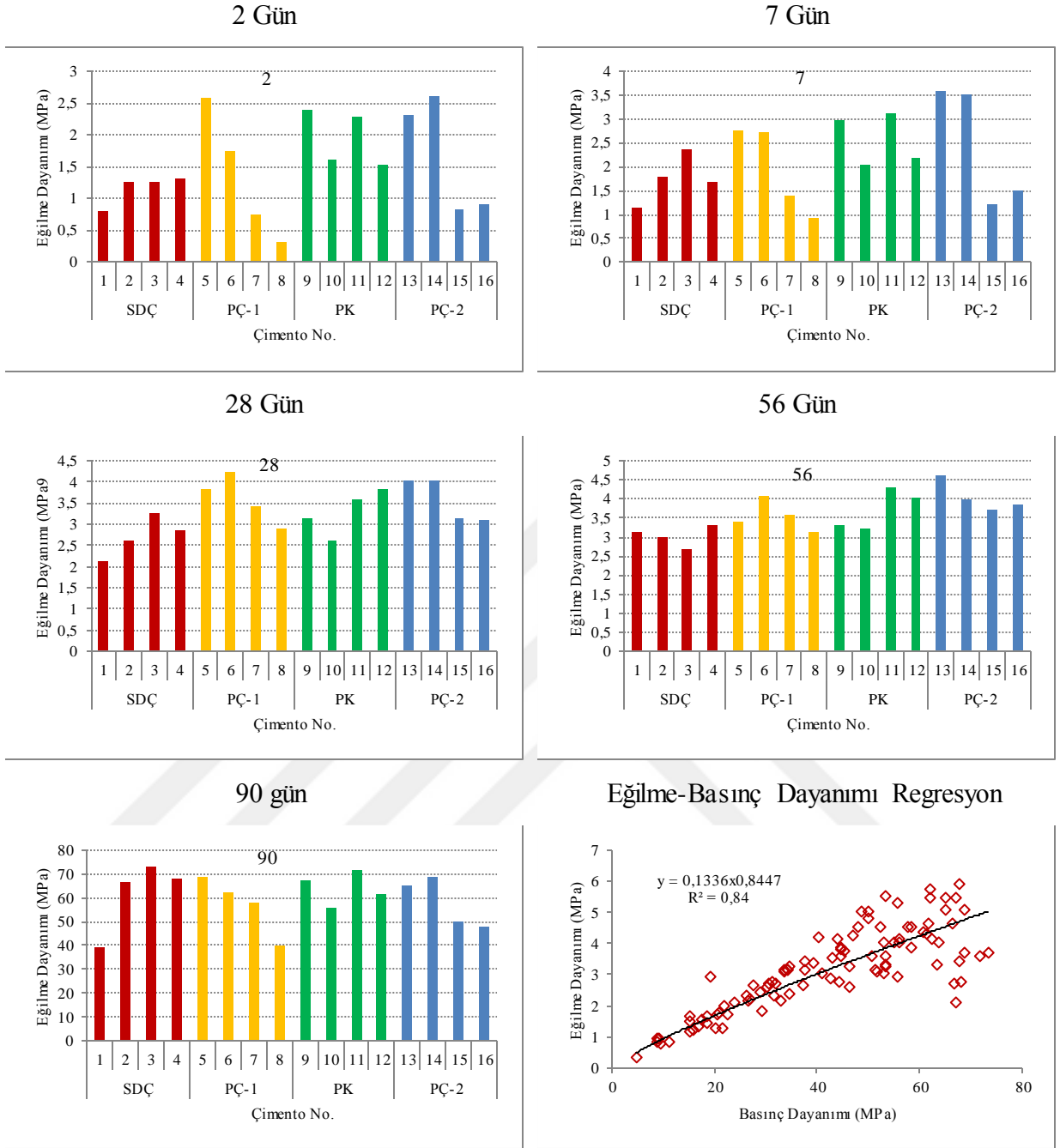
Şekil 4.19. Referans çimento harçlarının zamana bağlı eğilme dayanımları

Şekil 4.19'da görüldüğü gibi 56. güne kadar PÇ-1 ve PK klinkerleri ile üretilen çimento harçlarının benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. 90. günde ise PÇ-1 klinkerleri ile üretilen çimento harçlarının 5.88 MPa eğilme dayanımına sahip olmaktadır. 7. güne kadar SDÇ ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimento harçları benzer özellik göstermiştir. Ancak 90. günde SDÇ ve PK klinkerleri ile üretilen çimento harçları kendi arasında, PÇ-1 ve PÇ-2 ile üretilen çimento harçları ise kendi arasında benzer özellik göstermektedir.

Taguchi serisinde yer alan çimentolar ile üretilen harçların eğilme dayanımları zamana bağlı olarak Şekil 4.20'de verilmiştir.

Şekil 4.20'de görüldüğü gibi basınç dayanımları ve eğilme dayanımları arasında üstel regresyon fonksiyonuna göre  $R^2=0.84$  değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu değer basınç ve eğilme dayanımları arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermektedir.



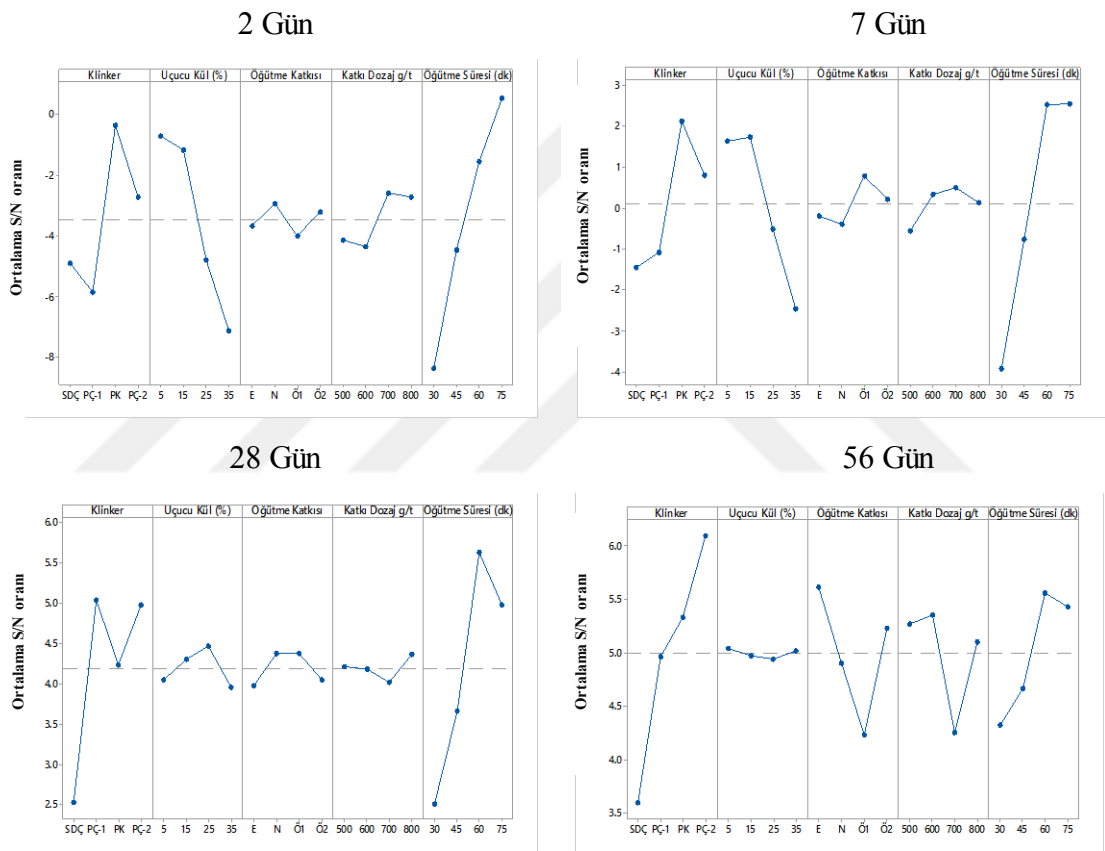


**Şekil 4.20.** Taguchi serisinde yer alan çimentoların zamana bağlı eğilme dayanımları

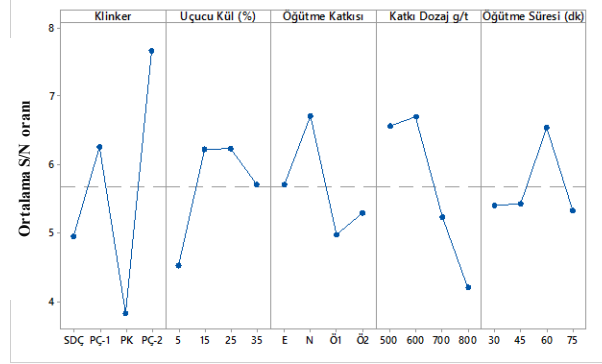
Eğilme dayanımları açısından en dikkat çekici nokta bütün deney günlerinde en düşük basınç dayanımına sahip 8 numaralı çimento ile üretilen harçlar olmuştur. 8 numaralı çimento ile üretilen harçların 2. ve 7. günlerdeki eğilme dayanımı oldukça düşük olmasına rağmen 90. günde 4.16 MPa gibi yüksek bir eğilme dayanımı değerine

ulaşmıştır. Bu olayın nedeni; yüksek oranda kullanılan uçucu külün (%35) agregahamur arasındaki arayüzeyi zamanla güçlendirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

2, 7, 28, 56 ve 90 günlük eğilme dayanımları için en büyük en iyi yöntemine göre S/N oranları belirlenmiştir. Taguchi serisinde yer alan çimentoların S/N oranları Şekil 4.21'de verilmiştir. Eğilme dayanımı üzerinde etkili olan parametreler ise Tablo 4.17'de sunulmuştur.



## 90 gün



**Şekil 4.21.** Taguchi serisinde yer alan çimentoların eğilme dayanımlarına ait S/N oranları

**Tablo 4.17.** Eğilme dayanımı üzerinde etkili olan parametreler

	2 Gün	7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün
Klinker	18.68	17.59	38.42	50.97	53.40
Uçucu Kül	32.21	25.23	1.72	0.10	9.39
Öğütme Katkısı	1.14	3.92	0.70	5.94	8.32
Katkı Dozajı g/t	0.90	1.70	0.98	12.76	23.15
Öğütme Süresi	47.07	51.56	58.17	30.23	5.75
Toplam	100.00				

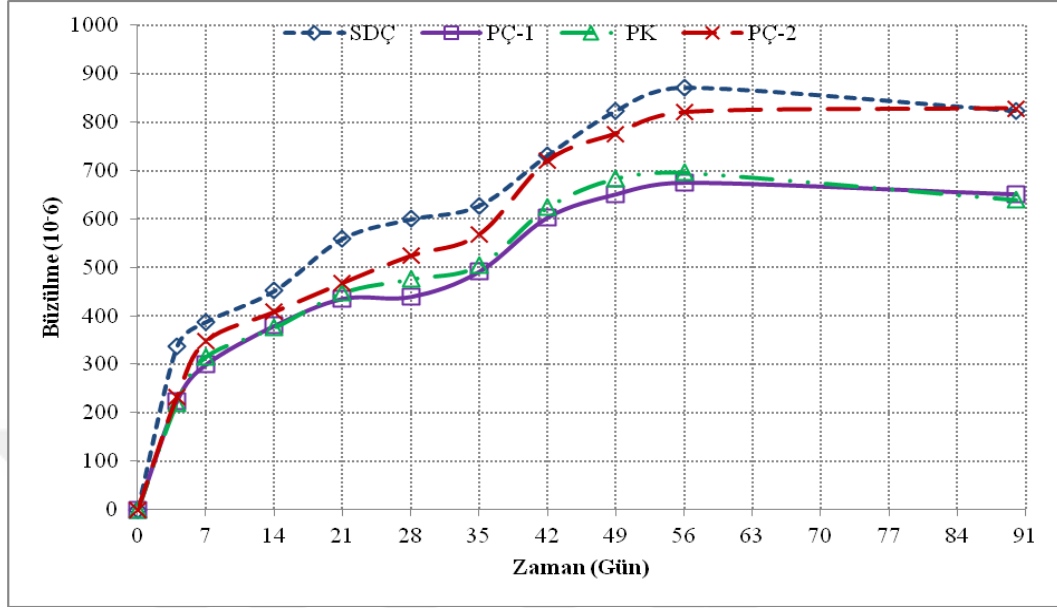
Tablo 4.17'de görüldüğü gibi eğilme dayanımını etkileyen parametreler kür zamanlarına göre farklılık göstermektedir. Kür süresinin artması ile klinker tipinin önemi de artmaktadır. Uçucu kül oranı ise kür süresinin artması ile birlikte etkinliğini kaybetmektedir. Erken yaşlarda (2-7 gün) uçucu kül oranındaki artış basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımlarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak puzolanik reaksiyonun etkisiyle 90. günde uçucu külden kaynaklanan dayanım kayıpları minimum seviyeye inmektedir. Bu yüzden uçucu külden kaynaklı dayanım kaybının etkisi zamanla azalmaktadır. Kür etkisi ile uçucu külün etkisi yaklaşık 3 kat azalırken (zamanla gelişen puzolanik reaksiyon), klinkerin önemlilik etkisi 3 kat artış göstermiştir. 2 günlük eğilme dayanımları klinker tipi açısından incelendiğinde, PK klinkeri ile üretilen harçların eğilme dayanımları ortalama 4.0 MPa değerine sahiptir.

Ancak PK klinkeri ile üretilen harçlar bu özelliklerini 28 ve 90. günlerde kaybetmektedir. 28 ve 90. günlerde ise PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri eğilme dayanımı açısından daha üstün özellikler göstermektedir. PK klinkerindeki yüksek C<sub>3</sub>S içeriği eğilme dayanımlarını erken yaşlarda daha çok arttırmaktadır. Ancak PK klinkerine göre daha fazla C<sub>2</sub>S içeren PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinden üretilen kompozite çimentoların uzun dönem dayanım artışları daha fazla olmuştur.

#### 4.8. Çimento Harçlarının Kuruma Büzülmesi Özellikleri

Referans çimento harçlarının zamana bağlı (0-90 gün) kuruma büzülmesi özellikleri Şekil 4.22'de verilmiştir. Tüm çimento harçlarında 56. güne kadar büzülme olayı gerçekleşmiştir. Ancak 56. günden itibaren harçlarda büzülme olayı genellikle sona ermiştir. PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimento harçlarında büzülme değerleri 56. günden sonra sabit bir değerde kalmıştır. SDC ve PK klinkerleri ile üretilen çimento harçlarının büzülmesi 56. günde durmakla beraber harç bünyesinde bir miktar genleşmeler başlamıştır. SDC ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimento harçlarında genellikle daha fazla büzülme meydana gelirken, PÇ-1 ve PK klinkerleri ile üretilen çimento harçlarının büzülme değerleri daha düşük değerler göstermiştir. 90. gün dikkate alındığında en fazla büzülme değerleri  $828 \times 10^{-6}$  ve  $824 \times 10^{-6}$  değerleri ile PÇ-1 ve SDC klinkerleri ile üretilen çimento harçlarında elde edilmiştir. PK klinkeri ve PÇ-1 klinkeri ile üretilen çimento harçlarının büzülme değerleri ise sırasıyla  $640 \times 10^{-6}$  ve  $652 \times 10^{-6}$  olmuştur. SDC klinkeri ile üretilen çimento harcında (referans) daha fazla büzülme olayı meydana gelirken, PÇ-1 klinkeri ile üretilen çimento harcında (referans) büzülme olayı daha az meydana gelmiştir. SDC ve PÇ-1 çimentolarının Blaine incelikleri ve bu çimentolardan üretilen harçların yayılma çapları benzer özellikler göstermektedir. PÇ-1 çimentosundan üretilen harçların daha az büzülme yapmasının nedenleri arasında sabit alçıtaşı içeriğinde daha fazla C<sub>3</sub>A (%8.64) içeriğine sahip olması, PÇ-1 çimentosunun SDC çimentosuna göre daha fazla MgO (%2.04) ve SO<sub>3</sub> (%3.30) içermesidir. MgO ve SO<sub>3</sub> bileşenleri su içerisinde bu çimentolarda daha fazla şişme olayına neden olmasından dolayı kuruma büzülmesi değerlerinin azalmasını sağlamıştır. Ayrıca PÇ-1 (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>=0.35) çimentosunun alkali eşdeğerliliğinin SDC çimentosundan (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>=0.22) daha yüksek olması C<sub>3</sub>A'nın

çözünürlüğünü hızlandırmaktadır. Bu durum SDC çimentosunun daha fazla kuruma büzülmesi yapmasına neden olmuştur.

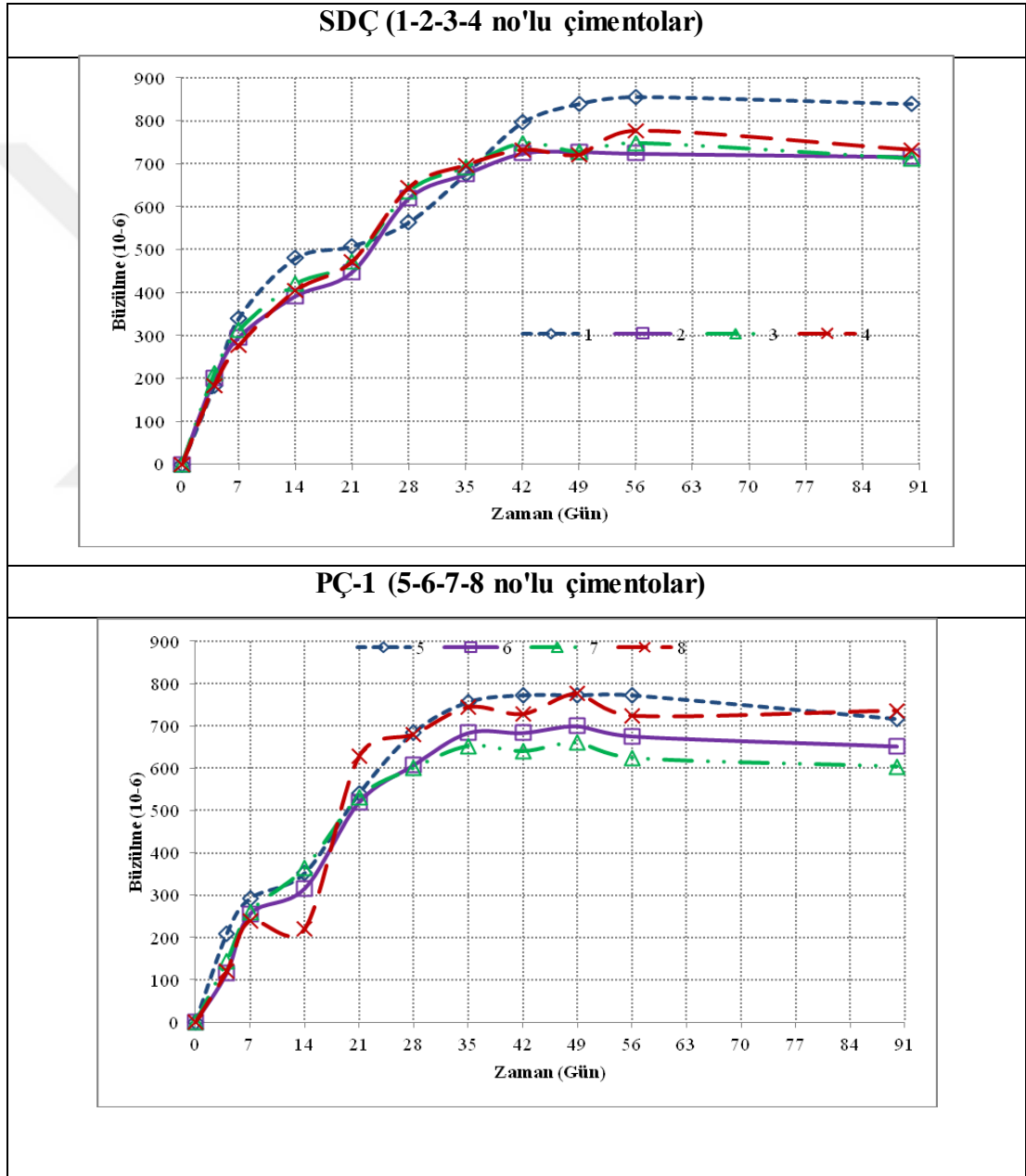


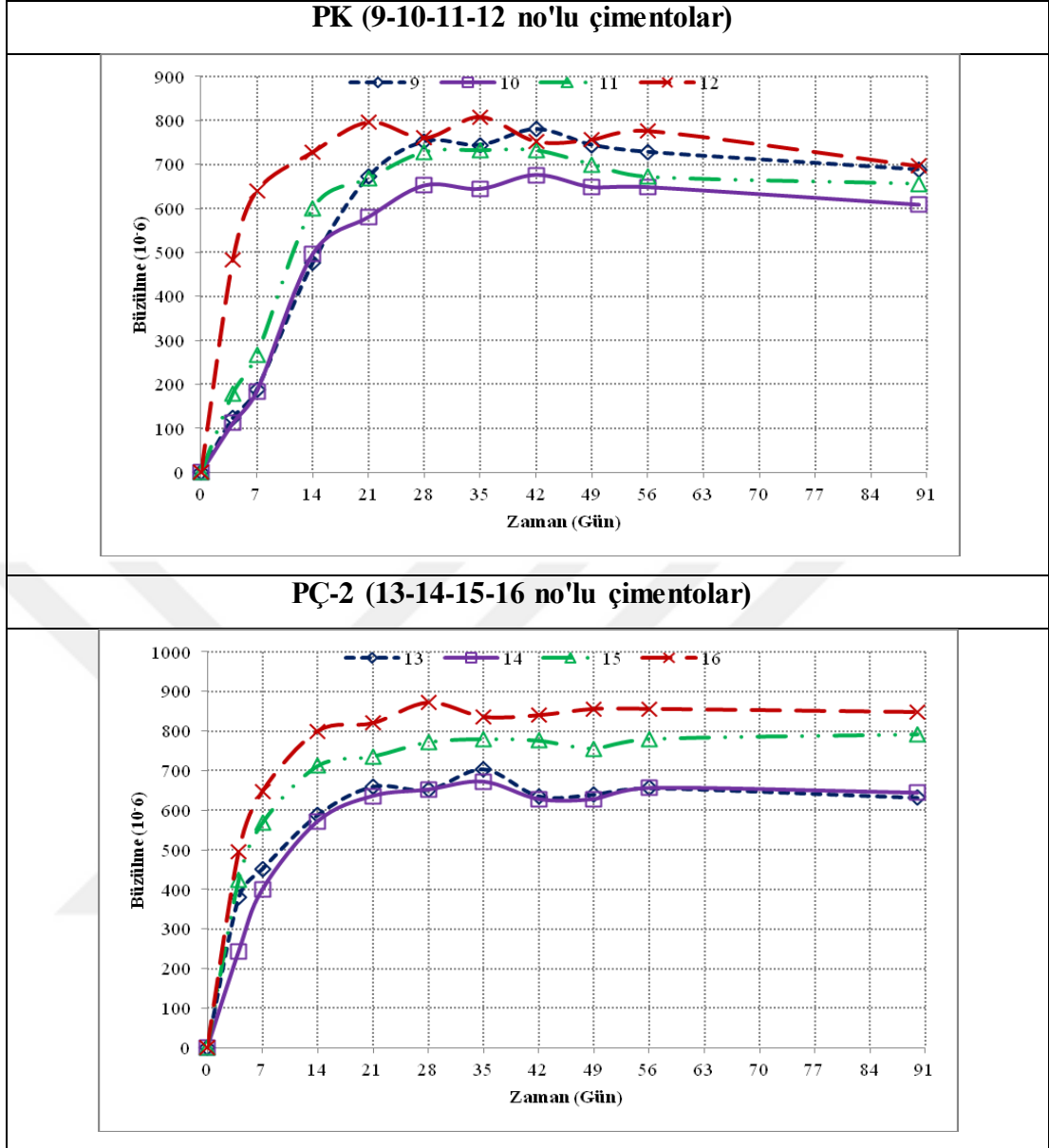
Şekil 4.22. Referans çimentoların zaman bağı büzülme değerleri

Taguchi serisinde yer alan çimentolar ile elde edilen harçların büzülme değerleri klinker tiplerine göre sınıflandırılarak Şekil 4.23'de verilmiştir.

SDC klinkeri kullanılarak üretilen çimento harçlarının içerisinde yer alan 1 no'lu çimentonun diğer çimento tiplerine göre daha fazla büzülme gösterdiği Şekil 4.23'de görülmektedir. 1 no'lu çimento %5 uçucu kül kullanılarak 30 dakika süre ile öğütülmüştür. 1 no'lu çimentonun 56. gündeki büzülme değeri  $856 \times 10^{-6}$ , 90. gündeki büzülme değeri ise  $840 \times 10^{-6}$  olarak belirlenmiştir. 2-3 ve 4 no'lu çimento harçlarının ise büzülme özellikleri birbirine oldukça yakındır. Ancak bu çimento harçları içerisinde en az büzülme gösteren 2 no'lu çimento harcı olmuştur. 56. günde  $724 \times 10^{-6}$  büzülme değerine sahip olan 2 no'lu çimento harcında %15 uçucu kül kullanılmış ve 45 dakika süre ile öğütülerek elde edilmiştir. Ortalama tane boyutu  $19.65 \mu$  ve  $12.48 \mu$  olan 3 ve 4 no'lu çimento harçlarının 56. günden sonra bünyelerinde genleşmeler başlamıştır. Harçlar kuruma büzülmesi için %75 bağıl nem içeriğine sahip ortamda

bekletilmiştir. 3 ve 4 no'lu çimentolarda kullanılan yüksek oranda uçucu külün (%25-35) 56. günden itibaren bağıl nemin etkisiyle harçlarda ihmal edilebilir seviyede genleşme oluşturduğu düşünülmektedir. Ortalama tane boyutu daha büyük olan 1 ve 2 no'lu çimento harçlarının büzülme değerleri 56. günden sonra genellikle sabit kalmaktadır. SDC klinkeri kullanılarak üretilen tüm çimento harçlarının 56. gündeki büzülme özellikleri dikkate alındığında  $700 \times 10^{-6}$  değerinin üstünde olduğu görülmektedir.





**Şekil 4.23.** Taguchi serisinde yer alan çimento harçlarının zamana bağlı büzülme özellikleri

PÇ-1 klinkeri kullanılarak üretilen çimento harçlarında 8 no'lu çimento nun diğer çimento tiplerine göre daha farklı bir özellik gösterdiği Şekil 4.23'de görülmektedir. 8 no'lu karışım %35 uçucu kül kullanılarak 30 dakika süre ile öğütme sonucu elde edilmiştir. 8 no'lu çimento diğer çimentolara göre daha fazla büzülme özelliği göstermektedir. 21. güne kadar 5, 6 ve 7 no'lu çimento harçları büzülme açısından benzer bir özellik göstermiştir. 56. günde  $624 \times 10^{-6}$  değeri ile en az büzülme

7 no'lu çimento harcında elde edilmiştir. 7 no'lu çimento %25 uçucu kül kullanılarak 45 dakika süre ile öğütme işlemine tabi tutulmuştur. 5, 6 ve 7 no'lu çimentolar ile üretilen harçların bünyesinde 56. günden sonra genleşmeler başlamıştır. 56. gün esas alındığında en fazla büzülme  $772 \times 10^{-6}$  değeri ile 5 no'lu çimento harcında, en az büzülme değeri de  $624 \times 10^{-6}$  değeri ile 7 no'lu çimento harcında elde edilmiştir. Ayrıca 56. gündeki büzülme özellikleri dikkate alındığında 6 ve 7 no'lu çimento harçlarının  $700 \times 10^{-6}$  büzülme değerlerinin altında kaldığı görülmektedir. 7 no'lu çimento ile üretilen harçlarda hamur hacmi fazla olmasına rağmen kuruma büzülmesi oldukça düşük bir değere sahip olmuştur.

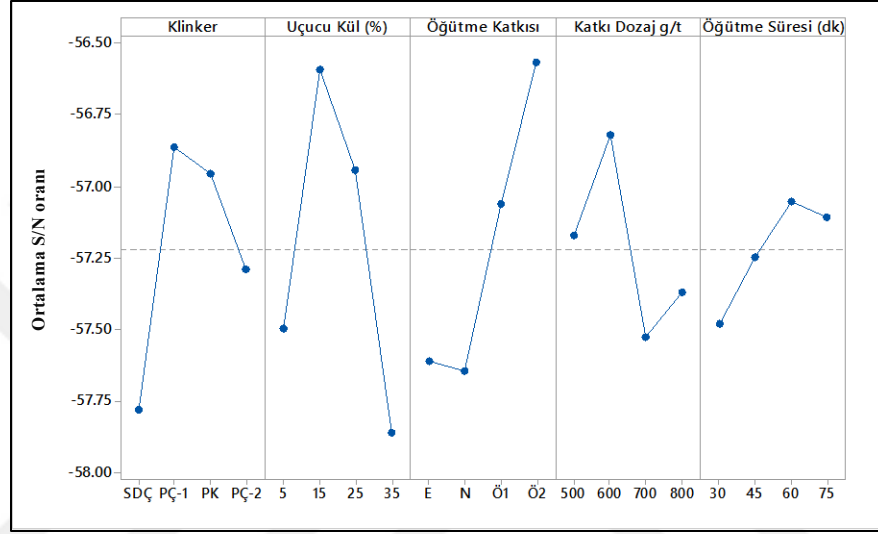
PK klinkeri ile üretilen çimentolar içerisinde yer alan 12 no'lu çimento harcının büzülme özellikleri ilk 21 günlük zaman periyotunda diğer çimentolara göre farklı olduğu Şekil 4.23'de görülmektedir. 12 no'lu çimento ile 8 no'lu çimentonun (PÇ-1 klinkeri ile üretilen) birbirine benzer özellikler gösterdiği belirlenmiştir. 8 ve 12 no'lu çimentoların ortak noktası öğütme esnasında %35 oranında uçucu kül kullanılmasıdır. Büzülme özellikleri açısından 56. gün dikkate alındığında en az büzülme  $648 \times 10^{-6}$  değeri ile 10 no'lu çimento harcı ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. 10 no'lu çimentonun ortalama tane boyutu  $32.64 \mu$  olup, %15 uçucu kül kullanılarak 30 dakika boyunca öğütme sonucu elde edilmiştir. 12 no'lu çimento kullanılarak üretilen harçlarda ise  $776 \times 10^{-6}$  değeri ile en fazla büzülme gösteren karışım olarak belirlenmiştir. 56. günden itibaren tüm harçların bünyesinde genleşmeler başlamıştır.

PÇ-2 klinkeri kullanılarak üretilen çimento harçlarında 13 ve 14 no'lu çimentoların birbirine oldukça yakın özellikler gösterdiği Şekil 4.23'de görülmektedir. 13 ve 14 no'lu çimento ile üretilen harçların büzülme özellikleri açısından 56. günde  $700 \times 10^{-6}$  değerinin altında olduğu belirlenmiştir. 56. günde  $856 \times 10^{-6}$  değeri ile en fazla büzülme 16 no'lu çimento ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. 16 no'lu çimento %35 uçucu kül ile birlikte 45 dakika öğütme işlemi sonucu elde edilmiştir.  $656 \times 10^{-6}$  değerine sahip 13 ve 14 no'lu çimento ile üretilen harçlar ise en az büzülme gösterme özelliğine sahiptirler. 13 ve 14 no'lu karışımlarda uçucu kül oranı sırasıyla %5 ve 15 olup, öğütme süresi ise 60 ve 75 dakika olarak seçilmiştir. 56. günden sonra 15 no'lu



çimento ile üretilen harçlarda büzülme olayı devam etmektedir. Ancak 13 ve 14 no'lu harçlarda 56. günden itibaren genleşmeler başlamıştır.

56. güne ait büzülme özellikleri dikkate alınarak çimento harçları üzerinde S/N oranları belirlenmiştir. S/N oranlarının belirlenmesinde en küçük-en iyi yöntemi kullanılmıştır. Analiz sonucu elde edilen S/N oranları Şekil 4.24'de verilmiştir.



**Şekil 4.24.** Havada bekletilen harçlarda meydana gelen büzülme özellikleri için S/N oranları

Şekil 4.24'de görüldüğü gibi büzülme değerlerinin azaltılması için PÇ-1 klinkerinin %15 oranında uçucu kül kullanılarak 60 dakika süre ile öğütülmesi önerilmektedir. Öğütme esnasında Ö2 katkısının 600 g/t dozaj ile kullanılması daha uygun sonuçlar sağlayacaktır. Belirtilen parametrelerin kullanılması durumunda büzülme değeri yaklaşık  $540 \times 10^{-6}$  olacağı tahmin edilmektedir.

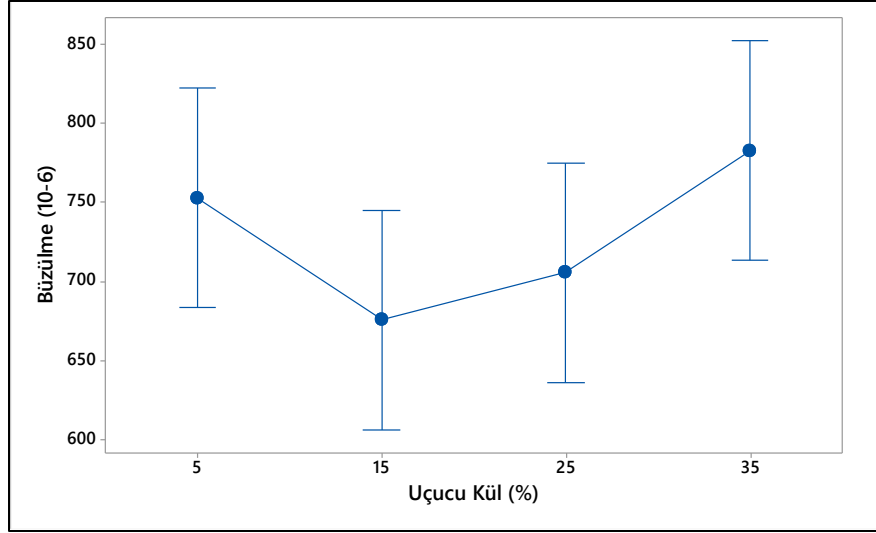
Havada bekletilen harçlarda meydana gelen büzülme üzerinde etkili olan parametreler ise Tablo 4.18'de verilmiştir.

**Tablo 4.18.** Havada bekletilen harçların büzülmesi üzerinde etkili olan parametreler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	14804	4934.67	0.97	19.52
Uçucu Kül	3	27316	9105.33	2.25	36.02
Öğütme Katkısı	3	21940	7313.33	1.63	28.93
Katkı Dozajı g/t	3	8300	2766.67	0.49	10.94
Öğütme Süresi	3	3476	1158.67	0.19	4.58
Toplam	15	75836			100

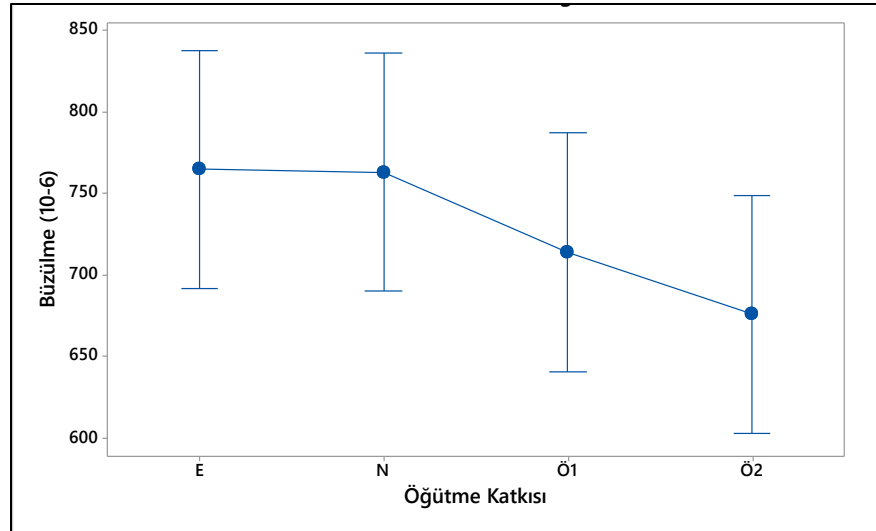
Tablo 4.18'de görüldüğü gibi harçların büzülmesinde etkili olan parametreler sırasıyla uçucu kül oranı, öğütme kolaylaştırıcı ve klinker tipi olmaktadır. Uçucu kül oranı aynı zamanda hamur hacmi olarak da dolaylı yoldan bilgi vermektedir. Çünkü uçucu kül oranında ki artış hamur hacmini arttırmaktadır. Bu yüzden hamur hacminin de kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi %36.02 ile açıklanabilir. Kimyasal katkı dozajı ve öğütme süresi ise büzülme üzerinde çok büyük bir etki göstermemektedir. Uçucu kül oranının büzülme üzerindeki etkisi Şekil 4.25'de verilmektedir.

Şekil 4.25'de görüldüğü gibi uçucu kül oranının %5 ve 35 olması durumunda büzülme değerlerinde artışlar elde edilmektedir. Kuruma büzülmesi açısından en uygun oranlar %15 ve 25 olmaktadır. Uçucu kül oranının %15 kullanılması durumunda ise büzülme değerleri  $680 \times 10^{-6}$  altına düşmektedir. Uçucu kül oranının %35 olması durumunda hamur hacmindeki büyük artış büzülme değerlerini de arttırmaktadır. Uçucu külün %15 olması en uygun oran olmaktadır. %15 oranından sonra uçucu kül kullanımı hamur hacmine bağlı olarak büzülmeyi arttırmaktadır.



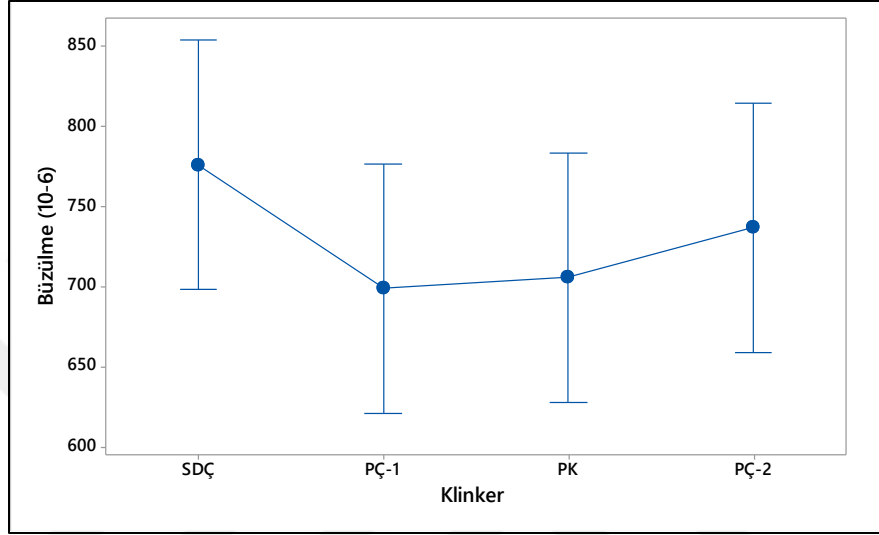
**Şekil 4.25.** Uçucu kül oranının büzülme (havada) üzerindeki etkisi

Şekil 4.26'da öğütme sürecinde kullanılan kimyasal katkı türünün büzülme üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 4.26'da görüldüğü gibi mukavemet üzerinde etkili olan öğütme katkılarının (E ve N) büzülme özellikleri üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Öğütme performansı üzerinde etkili olan Ö1 ve Ö2 katkıları ise büzülme değerlerinin azalmasını sağlamaktadır. Özellikle Ö2 katkısının kullanılması durumunda büzülme değerleri  $680 \times 10^{-6}$  altına düşmektedir.



**Şekil 4.26.** Öğütme kolaylaştırıcı katkı tipinin büzülme (havada) üzerindeki etkisi

Şekil 4.27'de klinker tipinin büzülme (havada) üzerindeki etkisini görülmektedir. SDC ve PÇ-2 klinkerleri kullanılarak üretilen çimentoların harçlardaki büzülme değerlerini arttırdığını göstermektedir. SDC klinkerinden üretilen çimentolarda karşılaşılan öğütme problemi mekanik özellikleri olumsuz etkilediği gibi büzülme davranışını da arttırmıştır.

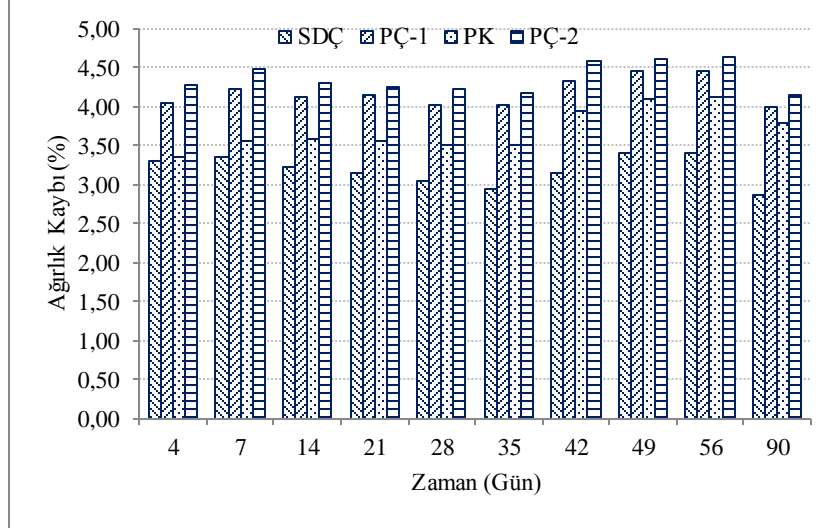


Şekil 4.27. Klinker tipinin büzülme (havada) üzerindeki etkisi

Şekil 4.27'de görüldüğü gibi PÇ-1 ve PK klinkerleri kullanılarak üretilen çimentoların büzülme davranışları daha olumlu sonuçlar vermektedir. Bu durum uçucu kül kullanılmayan referans karışımlar (klinker + alçıtaşı) için yapılan deneylerle de paralellik göstermektedir.

#### 4.9. Havada Bekletilen Harçların Ağırlık Kaybı Özellikleri

Referans çimentolar ile üretilen harçların zamana bağlı olarak ağırlık kayıpları (havada bekletme) Şekil 4.28'de verilmiştir. Harçların ağırlık kayıpları; boşluk yapısı ile suyun buharlaşabilmesi hakkında bilgi sahibi olunabilmesi için ölçülmüştür. Boşluk yapısı fazla olan harçların bünyesindeki su daha çabuk buharlaşarak büzülmeyi arttıracaktır. Bu yüzden tüm çimento harçlarında zamana bağlı olarak ağırlık kayıpları ölçülmüştür.



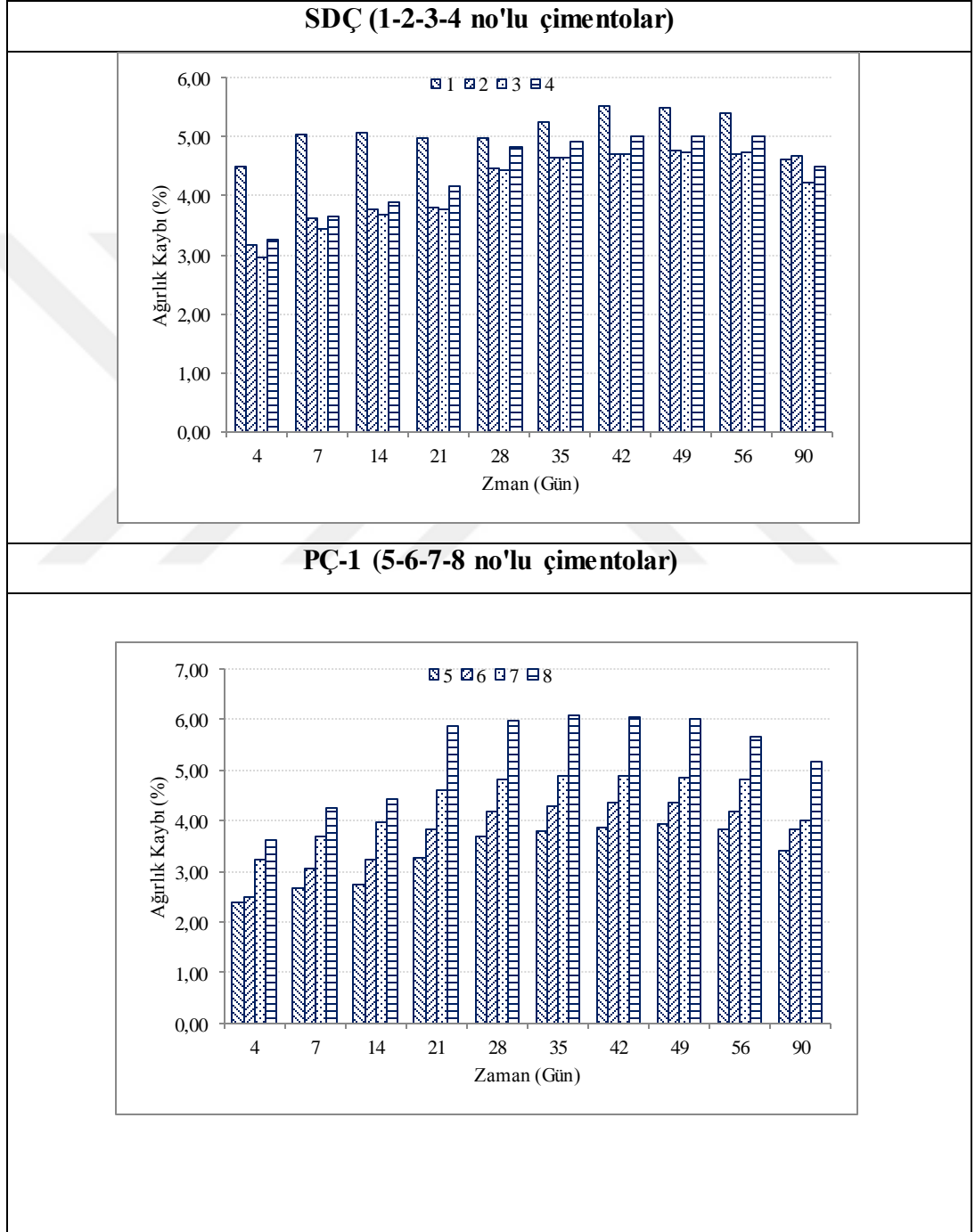
**Şekil 4.28.** Havada bekletilen harçların (referans çimentolar) zamana bağlı ağırlık değişimleri

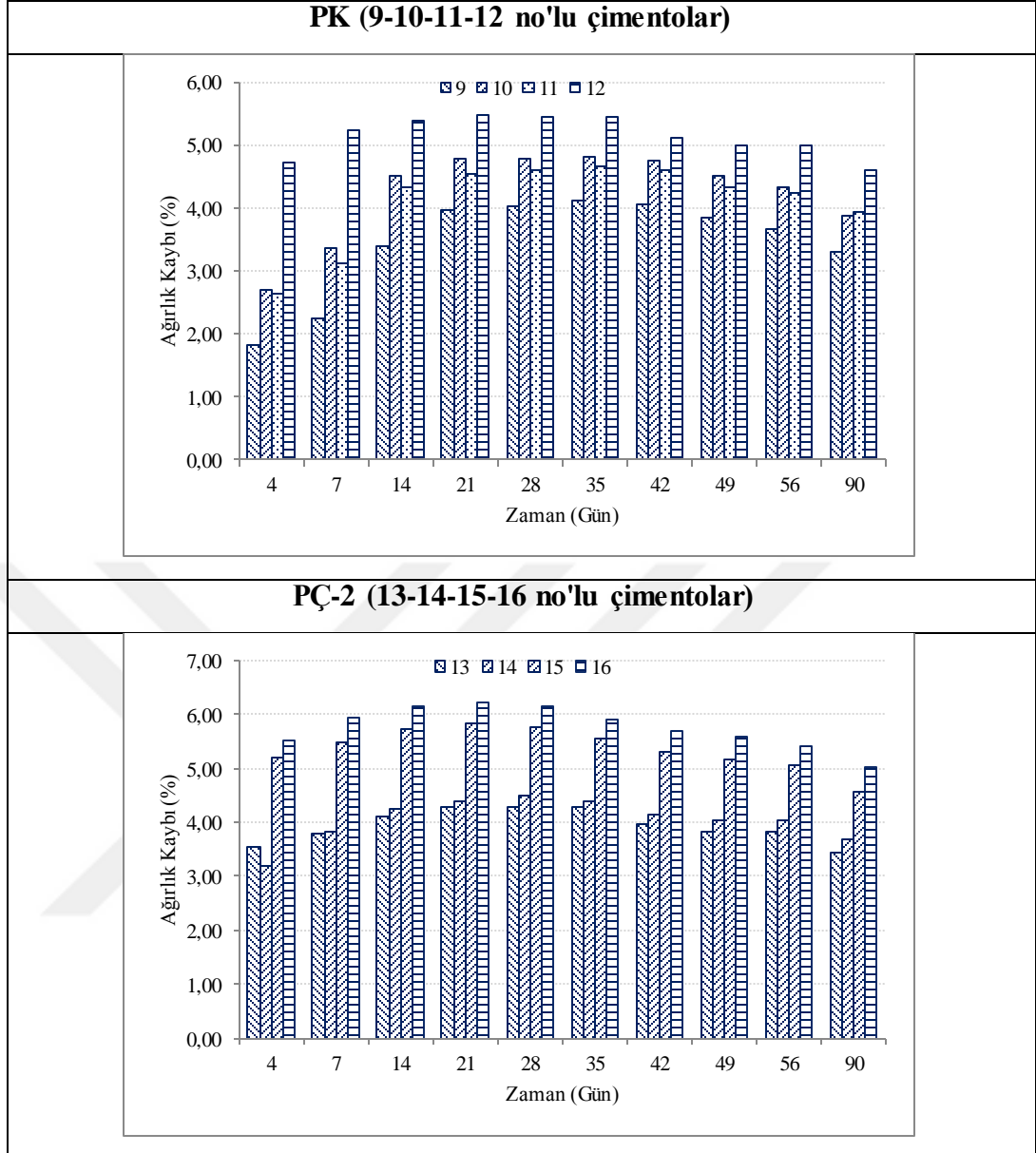
Şekil 4.28'de görüldüğü gibi en az ağırlık kaybı SDC klinkeri ile üretilen çimento harçlarında meydana gelmektedir. Tüm referans harçlarda 56. güne kadar ağırlık kaybı meydana gelirken 56. günden itibaren harçların ağırlıklarında artışlar meydana gelmiştir. Bu durum 56. günden sonra meydana gelen genleşmelere bağlı olarak oluşmaktadır. 56. günde en fazla ağırlık kaybı %4.63 değeri ile PÇ-2 klinkeri ile üretilen çimento harçlarında meydana gelmektedir. En fazla büzülme özelliği gösteren SDC klinkeri ile üretilen çimento harçlarında ise %3.39 değeri ile en az ağırlık kaybı oluşmuştur.

Taguchi serisinde yer alan çimentolar ile üretilen harçların ağırlık kayıpları klinker tiplerine göre sınıflandırılarak Şekil 4.29'da verilmiştir.

Şekil 4.29'da görüldüğü gibi SDC klinkeri ile üretilen çimento harçlarında 56. güne kadar 2 ve 3 no'lu çimentolar ile üretilen harçlar benzer özellikler göstermektedir. 2 ve 3 no'lu çimentolar ile üretilen harçların 35. gün ile 56. gün arasındaki ağırlık kayıpları yaklaşık %4.70 değerinde sabit olarak kalmıştır. Ancak 3 no'lu çimento ile üretilen harçların 56. günden itibaren harçların ağırlık kayıplarında meydana gelen artışlar oldukça azalmıştır. Bu durum harçlardaki boşluk oranının zamanla azalması

ve suyun buharlaşma hızının azalması ile açıklanmıştır. En fazla büzülme özelliğine sahip 1 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kaybı değerleri de %5.40 (56. gün) gibi yüksek bir değere sahip olmuştur. Kuruma büzülmesi özelliklerinde olduğu gibi 56. günde 1 ve 4 no'lu çimento ile üretilen harçların benzer özellikler gösterdiği (daha fazla ağırlık kaybı) belirlenmiştir.





**Şekil 4.29.** Havada bekletilen uçucu kül katkıli harçların zamana bağlı ağırlık değişimleri

Şekil 4.29'da görüldüğü gibi PÇ-1 klinkeri kullanılarak üretilen 8 no'lu çimento harcında tüm yaşlar için oldukça fazla ağırlık kaybı meydana gelmiştir. 8 no'lu çimento harcındaki ağırlık kaybı 28-49. günler arasında yaklaşık %6 değerinde sabit kalmaktadır. 49. günden itibaren ise harçların ağırlıklarındaki kayıplar azalmaya başlamıştır. 8 no'lu çimento 30 dakika süre ile %35 uçucu kül kullanılarak elde edilmiştir. 6 ve 7 no'lu çimento harçlarının 28-56. günler arasında ağırlık değişiminin

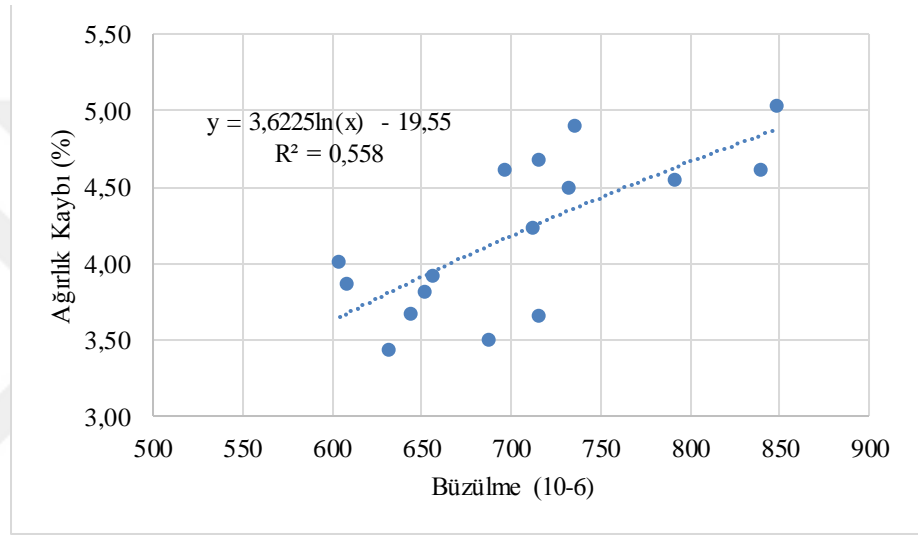
sabit olduğu görülmektedir. 56. günde en az ağırlık kaybı ise %3.83 değeri ile 5 no'lu çimento ile üretilen harçlarda elde edilmiştir. 5 no'lu çimento %5 uçucu kül ile 75 dakika öğütme işlemi sonucu elde edilmiştir. Uçucu kül oranındaki artış harçların işlenebilirliğini azaltmakta ve bu durumda harçların daha fazla boşluklu yapıya sahip olmasına neden olmaktadır. Bu yüzden uçucu kül oranı yüksek olan (özellikle %35 uçucu kül katkılı) çimentolardaki ağırlık kaybının yüksek olmasının nedeni bu şekilde açıklanmaktadır.

PK klinkeri kullanılarak üretilen çimentolardan elde edilen harçların ağırlık kayıpları Şekil 4.29'da görülmektedir. %35 uçucu kül kullanılarak üretilen 12 no'lu çimentoya ait harçlardaki ağırlık kaybının oldukça fazla olduğu görülmektedir. 12 no'lu çimentoya ait harçlardaki ağırlık kaybı 21-35. günlerde %5.45 değeri ile maksimum seviye ulaşmıştır. Ancak daha sonra harçların ağırlık kayıplarındaki artış hızı azalmaktadır. 10 ve 11 no'lu çimento ile üretilen harçların ise ağırlık kaybı açısından birbirine benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. 9 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kayıpları diğer çimento tiplerine göre daha az olmaktadır. 9 no'lu çimento ile üretilen harçların 56 ve 90. gündeki ağırlık kayıpları sırasıyla %3.66 ve 3.29 olarak belirlenmiştir.

PÇ-2 klinkeri kullanılarak üretilen 15 ve 16 no'lu çimentolardan elde edilen harçların ağırlık kayıplarının oldukça fazla olduğu Şekil 4.29'da görülmektedir. 15 ve 16 no'lu çimento ile üretilen harçların uçucu kül oranları sırasıyla %25 ve 35'dir. Ayrıca 15 ve 16 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kayıpları 28. güne kadar artış göstermiş ancak 28. günden itibaren harçların ağırlık kayıpları azalmaya başlamıştır. 90. gündeki ağırlık kayıpları incelendiğinde, 13 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kaybı %3.43, 14 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kaybı %3.67, 15 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kaybı %4.55 ve 16 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kaybı %5.03 olarak belirlenmiştir. 13, 14, 15 ve 16 no'lu çimento ile üretilen harçların ağırlık kayıpları genellikle 28. güne kadar devam etmekte ancak 28. günden itibaren yavaşlamaktadır.

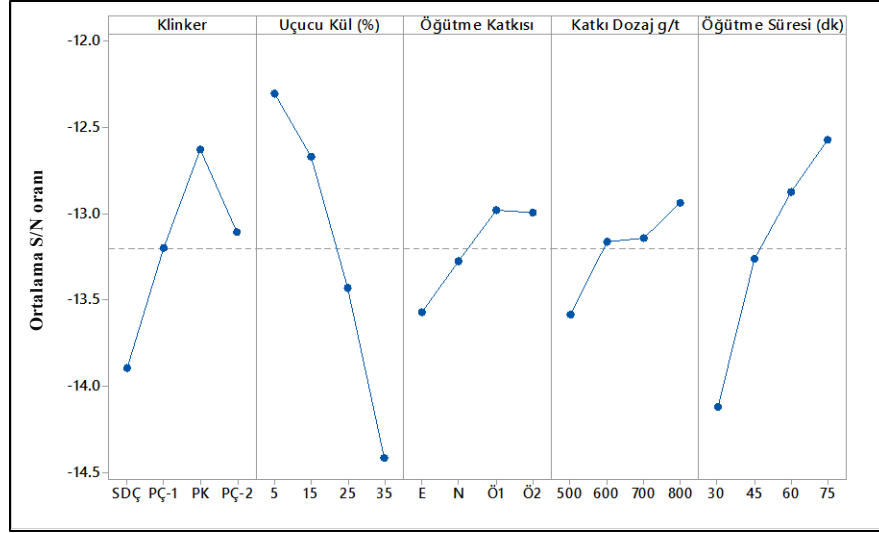


Harçların kuruma büzülmesi-ağırlık kayıpları arasındaki ilişki Şekil 4.30'da verilmiştir. Ağırlık kaybı ve kuruma büzülmesi arasında logaritmik fonksiyona göre  $R^2$  değeri yaklaşık 0.56 olarak bulunmuştur. Genellikle harçların ağırlık kaybı arttıkça daha fazla büzülme gösterdiği belirlenmiştir. Kuruma büzülmesi birçok özelliğe bağlı olduğu için (hamur hacmi, çimento özellikleri vs.) ağırlık kaybı için 0.56 değeri orta derecede bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Boşluklu yapıya sahip harçlarda suyun daha fazla/hızlı buharlaşması kuruma büzülmesi değerlerini arttıran bir faktör olabilmektedir.



**Şekil 4.30.** Kuruma büzülmesi-ağırlık kaybı ilişkisi

56. güne ait ağırlık kayıpları dikkate alınarak çimento harçlarının S/N oranları belirlenmiştir. S/N oranlarının belirlenmesinde en küçük-en iyi yöntemi kullanılmıştır. Analiz sonucu elde edilen S/N oranları Şekil 4.31'de verilmiştir.



**Şekil 4.31.** Havada bekletilen harçlarda meydana gelen ağırlık kayıpları için S/N oranları

Şekil 4.31'de görüldüğü gibi ağırlık kayıplarının azaltılması için PK klinkerinin %5 oranında uçucu kül kullanılarak 75 dakika süre ile öğütülmesi önerilmektedir. Öğütme esnasında Ö1 katkısının 800 g/t dozaj ile kullanılması daha uygun sonuçlar verecektir. Belirtilen parametrelerin kullanılması durumunda ağırlık kaybının yaklaşık %3.3 olacağı tahmin edilmektedir.

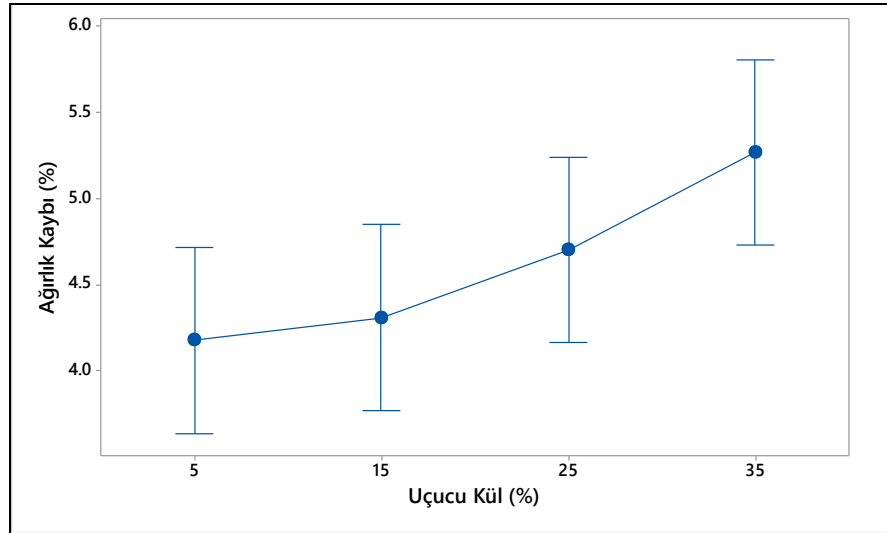
Havada bekletilen harçlarda meydana gelen ağırlık kaybı üzerinde etkili olan parametreler ise Tablo 4.19'da verilmiştir.

Tablo 4.19'da görüldüğü gibi havada bekletilen harçlarda meydana gelen ağırlık kaybının ana nedeni uçucu kül oranı olarak belirlenmiştir. Öğütme süresi ve klinker tipide ağırlık kaybı üzerinde etkili olmaktadır. Ancak öğütme kolaylaştırıcı tipi ve dozajı ağırlık kaybı üzerinde etki göstermemektedir.

**Tablo 4.19.** Havada bekletilen harçların ağırlık kaybı üzerinde etkili olan parametreler

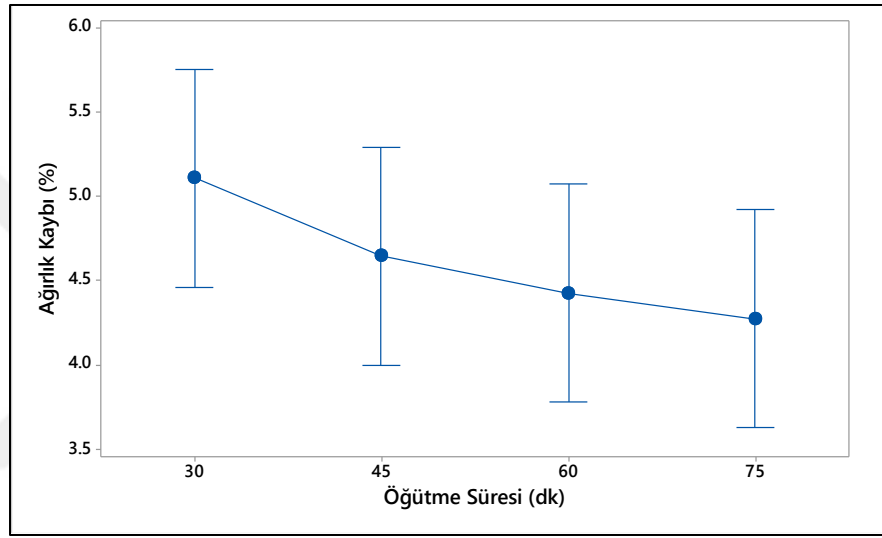
Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	0.90	0.29	0.70	14.97
Uçucu Kül	3	2.87	0.96	3.91	49.42
Öğütme Katkısı	3	0.26	0.09	0.18	4.39
Katkı Dozajı g/t	3	0.23	0.08	0.16	3.93
Öğütme Süresi	3	1.58	0.53	1.50	27.29
Toplam	15	5.81			100

Şekil 4.32'de uçucu kül oranının ağırlık kaybı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 4.32'de görüldüğü gibi uçucu kül oranının artması ile birlikte harçlarda meydana gelen ağırlık kaybıda artmaktadır. Bu olayın nedeni uçucu külün artması ile birlikte işlenebilirliğin azalması olarak düşünülmektedir. İşlenebilirliğin azalması ile boşluk oranı yüksek harçlar elde edilmiştir. Bu durum ağırlık kaybında etkili olan bir faktör olmaktadır. Boşluklu yapıya sahip harç bünyesindeki suyun buharlaşması daha kolay olduğu için yüksek oranda uçucu kül kullanımı ağırlık kaybını arttırmaktadır.



**Şekil 4.32.** Uçucu kül oranının ağırlık kaybı (havada) üzerindeki etkisi

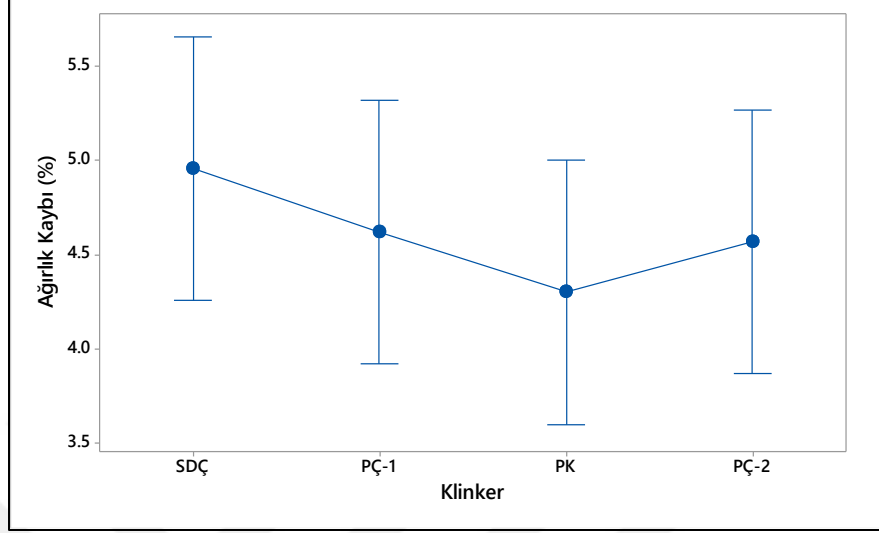
Şekil 4.33'de öğütme süresinin ağırlık kaybı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 4.33'de görüldüğü gibi öğütme süresinin artması sonucunda ağırlık kaybı azalmaktadır. Özellikle öğütme süresinin 60 dakika ve üstü olması durumunda ağırlık kaybı %4.5 değerinin altında olmaktadır. Ayrıca çimento inceliğinin artması durumunda çimentoların basınç dayanımlarında genellikle artışlar gözlenmiştir. Bu durum çimento inceliğinin artması ile kimyasal olarak bağlanan su miktarını arttırmaktadır. Kimyasal olarak bağlanan su sebebiyle de harçların ağırlık kayıplarının azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 4.33. Öğütme süresinin ağırlık kaybı (havada) üzerindeki etkisi

Şekil 4.34'de klinker tipinin ağırlık kaybı üzerindeki etkisi görülmektedir. Kuruma büzülmesinde olduğu gibi SDC ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimentolardan elde edilen harçların ağırlık kayıpları da fazla olmaktadır. Ancak PK ve PÇ-1 klinkerleri ile üretilen çimentolardan elde edilen harçların ağırlık kayıpları daha az olmaktadır. Bu süreçte klinkerlerin kimyasal özelliklerinin etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle yüksek C<sub>3</sub>S içeriğine sahip olan PK klinkerinin hidrasyon hızı daha hızlı olmaktadır. Ayrıca PK klinkeri yüksek C<sub>3</sub>S (%67.07) içeriğinden dolayı diğer klinkerlere göre daha ince çimento üretimine imkan vermektedir. Yüksek C<sub>3</sub>S içeriği ve yüksek Blaine inceliği PK klinkerinden üretilen çimentolarda daha az ağırlık kaybına neden olmuştur. PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinde ise

yüksek  $C_3A$  içeriği (>%8) hidrasyon hızını etkilediği için ağırlık kaybı üzerinde etkili olan bir parametre olarak düşünülmektedir.



Şekil 4.34. Klinker tipinin ağırlık kaybı (havada) üzerindeki etkisi

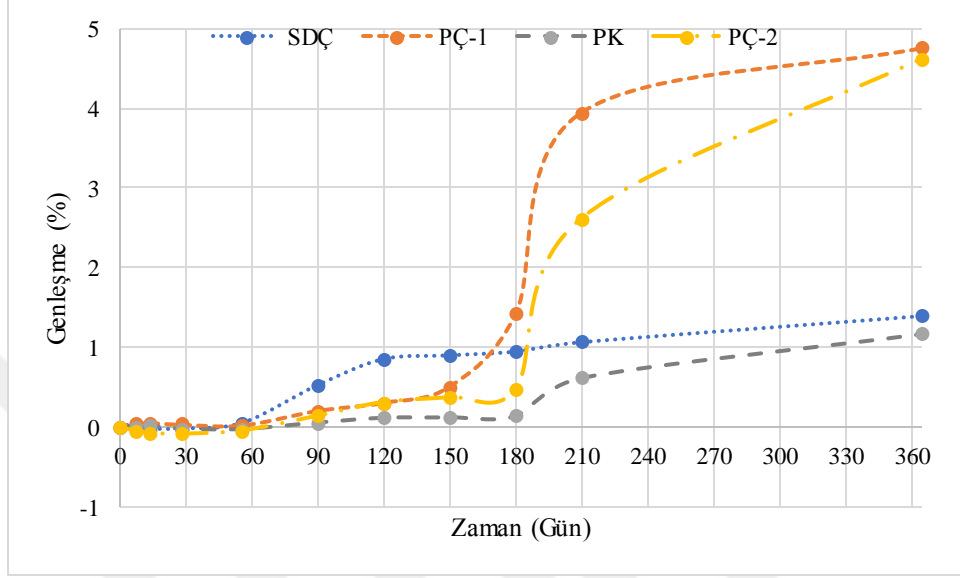
#### 4.10. Harçların Sülfat Etkisi Altında Boyutsal Kararlılığı

##### 4.10.1. Sodyum Sülfatın Boyutsal Kararlılığa Etkisi

Şekil 4.35’de referans çimento harçlarının sodyum sülfat içerisindeki zamana bağlı genleşme özellikleri verilmiştir.

Referans çimento harçlarında sodyum sülfat etkisi ile zamanla artış gösteren genleşmeler tespit edilmiştir. Özellikle  $C_3A$  oranı yüksek olan PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinden (Tablo 3.1) üretilen referans çimentoların oldukça fazla genleşme yaptığı belirlenmiştir. PÇ-1 referans çimentosu 150. günden itibaren büyük oranda genleşme gösterdiği ve 365. günde yaklaşık %4.8 değerine ulaştığı görülmektedir. PÇ-2 klinkerinden elde edilen referans çimentoda ise 180. günden sonra büyük oranda genleşmeler başlamış ve 365. günde yaklaşık %4.6 oranında genleşme meydana gelmiştir.  $C_3A$  içeriğinin azalması ile birlikte referans çimento harçlarındaki genleşmeler de azalmıştır. Özellikle  $C_3A$  içeriği %3.37 olan PK klinkerinden (Tablo 3.1) üretilen çimento harcının 365. gündeki genleşme değeri %1.2 olarak belirlenmiştir. PK klinkerinin düşük  $C_3A$  içeriği ve yüksek basınç dayanımından

dolayısı sodyum sülfat etkisinden daha az etkilenmiştir. PK çimentosunda 180. günden sonra daha fazla genleşme tespit edilirken, SDC çimentosunda 60. günden sonra daha fazla genleşmeler meydana gelmiştir. Bu durum SDC ve PK arasındaki basınç dayanımı farkından oluşmaktadır.



**Şekil 4.35.** Referans çimento harçlarının zamana bağlı sodyum sülfat genleşmeleri

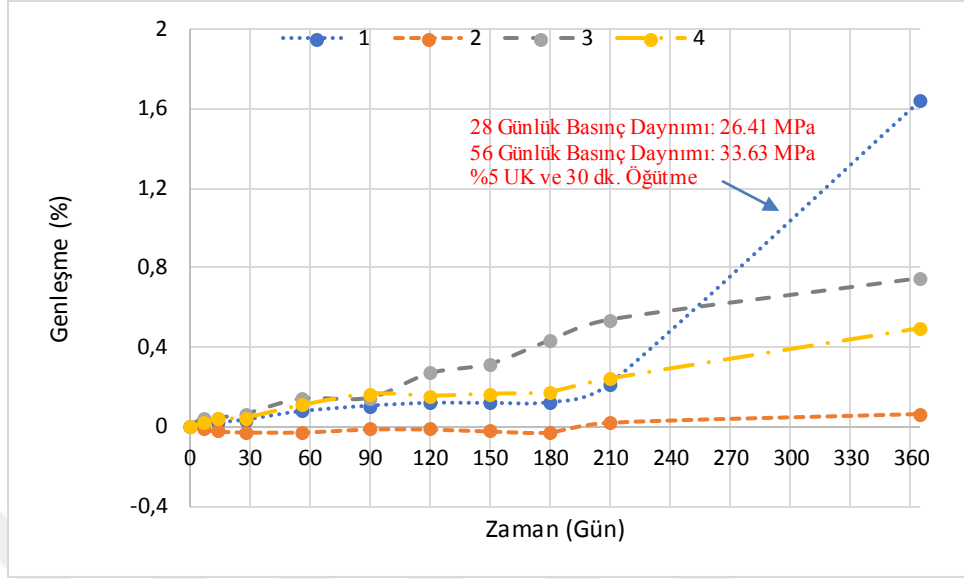
Şekil 4.36’da uçucu kül katkıli kompoze çimentoların sodyum sülfat etkisinde zamana bağlı genleşmeleri verilmiştir.

SDÇ klinkeri kullanılarak üretilen uçucu kül katkıli kompoze çimentolarda 1 no’lu çimento 365. günde referans çimentoya göre %1.6 değeri ile daha fazla genleşme yaratmıştır. Bu olayın nedeni diğer kompoze çimentolara göre daha düşük basınç dayanımından kaynaklanmaktadır. Ayrıca 30 dakika öğütme süresi klinkerin yeterince öğütülmemesine neden olmuştur. Yeterli inceliğe ulaşamayan klinkerden dolayı basınç dayanımları olumsuz etkilenmiş ve harç bünyesinde daha fazla genleşmeler meydana gelmiştir. 365 günlük sodyum sülfat etkisinde en az genleşme değeri 2 no’lu kompoze çimentoda elde edilmiştir. 2 no’lu çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 52.98 MPa değeri ile 3 ve 4 no’lu çimentolardan daha düşüktür. 2 no’lu kompoze çimento %15 uçucu kül kullanılarak 45 dakika öğütme süresi ile elde edilmiştir. 3 ve

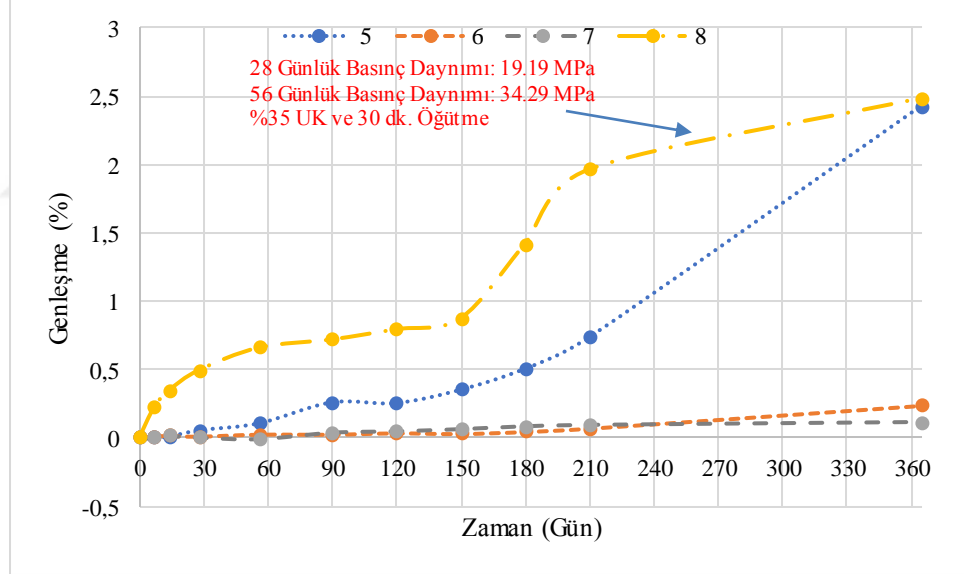
4 no'lu kompoze çimentoların 56 günlük basınç dayanımları 60 MPa üzerindedir. Ayrıca bu çimentoların üretiminde %25 ve 35 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Yüksek oranda uçucu kül ve düşük C<sub>3</sub>A içeriğine sahip SDÇ klinkeri kullanılmasına rağmen 3 ve 4 no'lu kompoze çimentolar kendi aralarındaki karşılaştırma da daha fazla genişleme değerine sahip olmuştur. Bu olayın nedeni %25 ve üzeri uçucu kül kullanımında karşılaşılan işlenebilirlik sorunu ile açıklanmıştır. İşlenebilirliği düşük olan harç karışımlarında boşluk oranı artmış (geçirimsizlik) ve bu durum sülfat dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir. SDÇ klinkeri kullanılarak üretilen kompoze çimentolarda %15 oranında uçucu kül kullanımı daha uygun olmuştur.

PÇ-1 klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda uçucu kül kullanımı sodyum sülfata bağlı genişmeleri azaltmıştır (referansa göre). PÇ-1 klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda en fazla genişleme değerleri 5 ve 8 no'lu çimentolarda elde edilmiştir. 8 no'lu çimento %35 uçucu kül kullanılarak 30 dakika öğütme süresi sonunda elde edilmiş ve 56 günlük basınç dayanımı 34.29 MPa'dır. 30 dakikalık öğütme süreci klinkerin yeterli inceliğe ulaşmasını engellemiş ve basınç dayanımını azaltmıştır. 5 no'lu çimentoda karşılaşılan problem ise yüksek C<sub>3</sub>A içeriğine sahip klinkede %5 oranında uçucu kül kullanılmasıdır. %5 oranında uçucu kül kullanılması durumunda 5 no'lu çimentonun 365. gündeki genişleme değeri referans çimentonun altında kalmıştır. %15 ve 25 oranında uçucu kül kullanılan 6 ve 7 no'lu kompoze çimentoların genişleme değerleri %0.5 değerinin altındadır. PÇ-1 klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda 30 dakikalık öğütme süresi sodyum sülfata bağlı genişmelerin artmasına yol açmıştır.

### SDÇ (1-2-3-4 no'lu çimentolar)

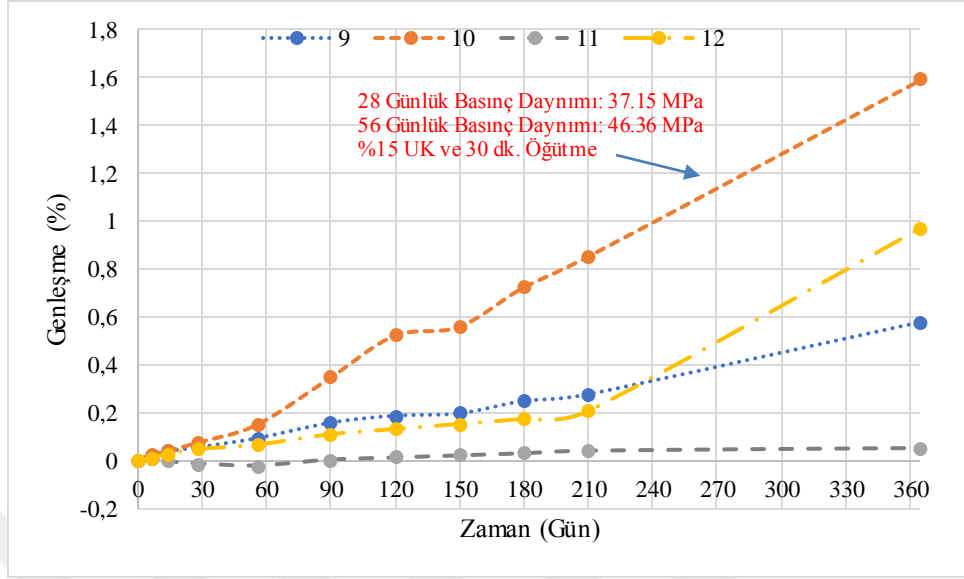


### PÇ-1 (5-6-7-8 no'lu çimentolar)

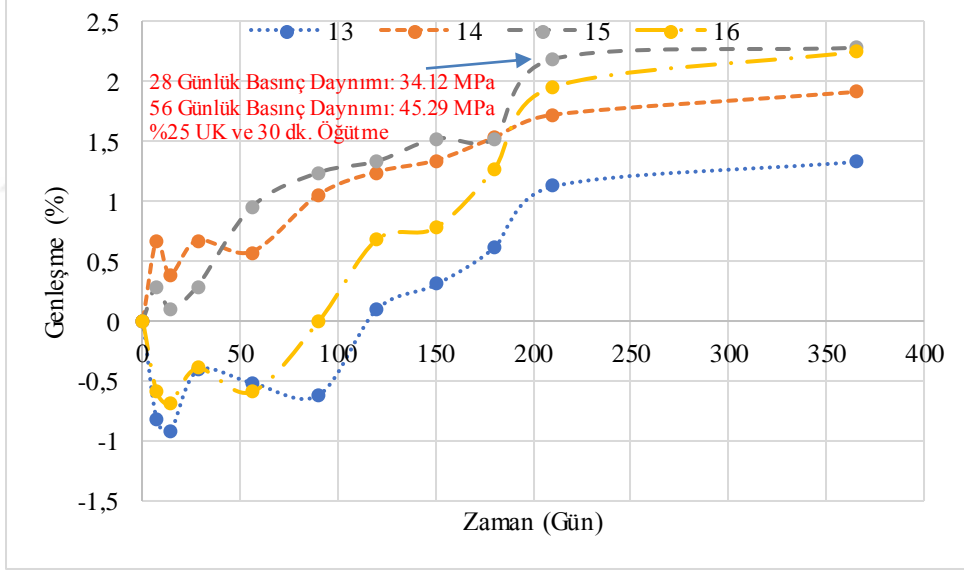




### PK (9-10-11-12 no'lu çimentolar)



### PÇ-2 (13-14-15-16 no'lu çimentolar)



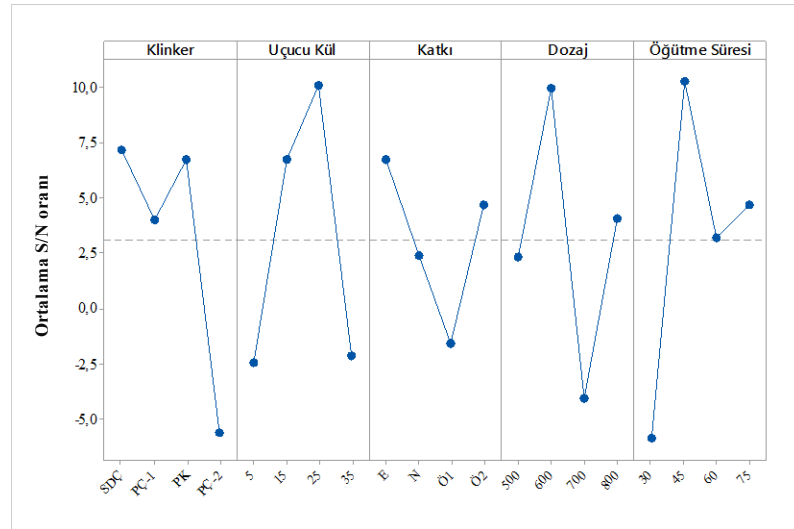
Şekil 4.36. Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkıli çimentoların zamana bağlı genleşmeleri

PK klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda en fazla genişleme değeri 10 no'lu çimentoda elde edilmiştir. PK klinkerinden üretilen referans çimentonun 365. gündeki genişleme değeri %1.2 olmasına rağmen 10 no'lu çimentonun 365. gündeki genişleme değeri ise yaklaşık %1.6 olarak belirlenmiştir. 10 no'lu çimento %15 uçucu kül kullanılarak 30 dakika öğütme süreci sonunda elde edilmiştir. Bu yüzden 10 no'lu çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 46.36 MPa olarak belirlenmiş ve bu durum harç bünyesinde genişleme değerlerini arttırmıştır. Klinkerin düşük C<sub>3</sub>A içeriğine sahip olmasına rağmen yeterli inceliğe ulaşamaması sodyum sülfat dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir. 12 no'lu kompoze çimento %35 uçucu kül kullanılarak 60 dakika öğütme süresi ile elde edilmiş ve genişleme değeri yaklaşık %1 (365 gün) olarak belirlenmiştir. PK klinkeri kullanılarak üretilen kompoze çimentolar içerisinde en az genişleme değeri %25 uçucu kül kullanılan 11 no'lu çimentoda elde edilmiştir. 11 no'lu çimento 75 dakika öğütme süresi ile elde edilmiş ve 56 günlük basınç dayanımı 60.61 MPa olarak belirlenmiştir. Klinkerin düşük C<sub>3</sub>A içeriğine sahip olmasına rağmen yeterli inceliğe ulaşamaması sülfat dayanıklılığına katkı sağlamamaktadır.

PÇ-2 klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda 15 no'lu çimento 365. gün itibariyle en fazla genişleme değerine sahip olmuştur. 15 No'lu çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 34.12 MPa olmakla beraber %25 uçucu kül kullanılarak 30 dakika öğütme süresi ile elde edilmiştir. 16 no'lu çimento genişleme özellikleri açısından 15 no'lu çimentoya benzemektedir. Ancak 16 no'lu çimentoda %35 uçucu kül kullanılması genişleme değerlerini bir miktar azaltmıştır. 15 ve 16 no'lu çimentoların 56 günlük basınç dayanımları diğer PÇ-2 kompoze çimentolarından daha düşük olduğu için (<45 MPa) daha fazla genişleme yapmıştır. 13 ve 14 No'lu çimentolarda ise 365 gün sonunda %2 değerinin altında genişleme olduğu belirlenmiştir. Bu çimentolarda kullanılan uçucu kül oranı sırasıyla %5 ve %15'dir. Ayrıca bu çimentolar sodyum sülfat çözeltilinde bir miktar büzülme yaptığı için nihai genişleme değerleride bir miktar azalmıştır. PÇ-2 klinkerinin C<sub>3</sub>A ve C<sub>3</sub>S içeriği PÇ-1 klinkerinden daha fazladır. PÇ-1 klinkerinden daha fazla Ca(OH)<sub>2</sub> açığa çıktığı için ve C<sub>3</sub>A içeriğinin daha yüksek olmasından dolayı PÇ-2 klinkerinden üretilen kompoze çimentolar daha fazla genişleme (PÇ-1'e göre) göstermiştir. Ancak PÇ-2 klinkerinden kullanılan uçucu kül katkısı genişlemelere referans çimentoya göre oldukça azaltmıştır. Bu etkinin ana

nedeni yüksek  $C_3S$  içeriğinden kaynaklanan  $Ca(OH)_2$  uçucu kül ile yaptığı puzolanik reaksiyonlardır. Ayrıca azalan  $Ca(OH)_2$  içeriği sonucu kalsiyum sülfat ve buna bağlı olarak etrenjit oluşumu da azalmaktadır. Sodyum sülfat içerisinde beklenen harçların genişmelerine ait S/N oranları Şekil 4.37’de verilmiştir.

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi sodyum sülfata bağlı genişmeleri azaltmak için en uygun klinker tipi SDC ve PK olarak belirlenmiştir. SDC ve PK klinkerlerinin düşük  $C_3A$  içeriğine sahip olması kompoze çimentoların dayanıklılığına olumlu katkı sağlamaktadır. Uçucu kül oranı olarak ise en uygun oran %15 ve %25 olarak belirlenmiştir.  $Ca(OH)_2$  bağlanması açısından en uygun oran %25 olarak belirlenmiş ancak %35 oranında uçucu kül kullanımı işlenebilirliği oldukça olumsuz etkilediği için genişmeleri arttırmıştır. %35 oranında uçucu kül kullanımı Blaine incelik değerlerini oldukça arttırmış ve işlenebilirlik kaybı sonucu geçirimsizlik artmıştır. Öğütme aşamasında E ve Ö2 katkılarının 600 g/t dozaj ile kullanılması daha uygun olmaktadır. Öğütme süresi olarak en uygun süre 45 dakika olarak belirlenmiştir. 60 ve 75 dakika öğütme süreleri Blaine inceliklerini oldukça arttırdığı için işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir. Ayrıca 30 dakika öğütme süresinde klinker yeterli inceliğe ulaşamadığı için kompoze çimentoların basınç dayanımlarını azaltmıştır.



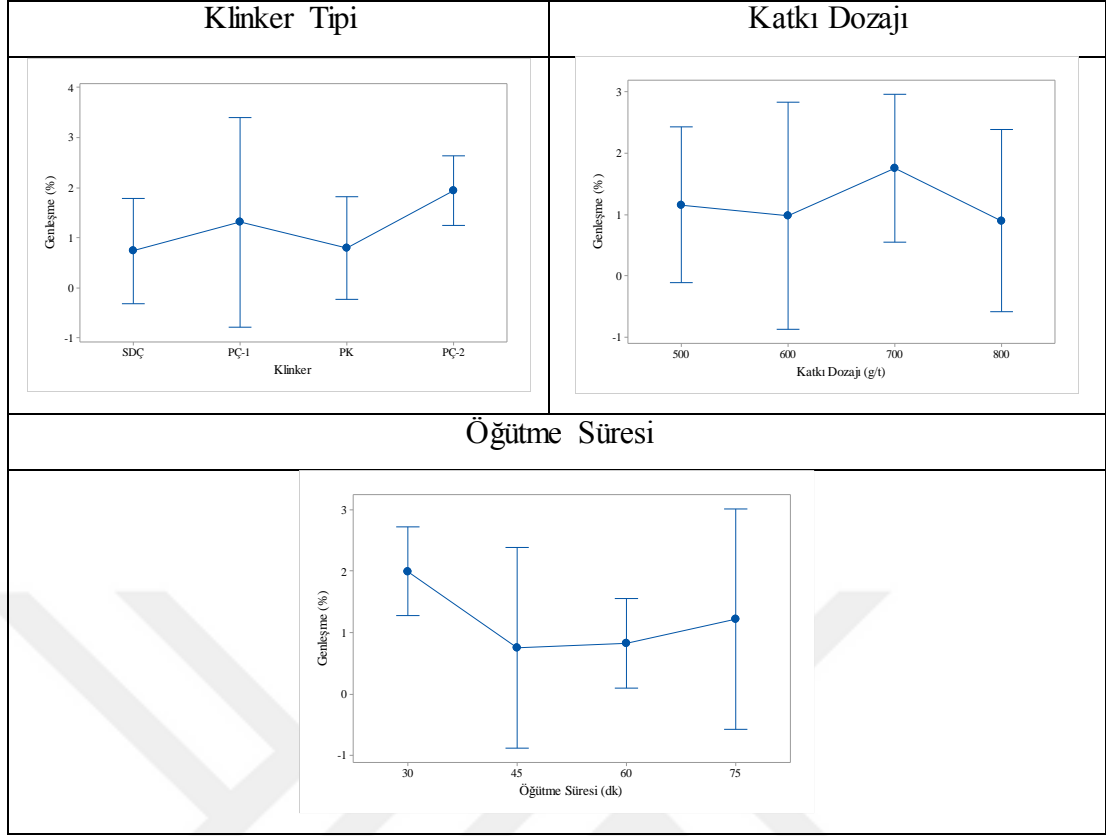
**Şekil 4.37.** Sodyum sülfat çözeltisinde beklenen harçların genişmelerine ait S/N oranları

Sodyum sülfat üzerinde etkili olan parametreler için etki analizi yapılarak Tablo 4.20'de sunulmuştur.

**Tablo 4.20.** Sodyum sülfat genleşmeleri üzerinde etkili olan parametreler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	40491.0	13497.0	1.81	33.52
Uçucu Kül	3	10779.0	3593.0	0.66	12.22
Öğütme Katkısı	3	13691.0	4563.7	0.33	6.11
Katkı Dozajı g/t	3	40491.0	13497.0	0.68	12.59
Öğütme Süresi	3	69035.0	23011.7	1.92	35.56
Toplam	15	174487			100

Tablo 4.20'de görüldüğü gibi sodyum sülfat genleşmeleri üzerinde etkili olan parametreler; öğütme süresi, katkı dozajı ve klinker tipi olarak belirlenmiştir. Öğütme süresi ve klinker tipi harçların bünyesinde oluşan genleşme üzerinde en etkili faktörlerdir. Klinkerin kimyasal bileşimi (özellikle düşük  $C_3A$ ) harçların bünyesindeki genleşmelerde etkilidir.  $C_3A$  içeriği arttıkça harçların daha fazla genleşme yaptığını göstermektedir. Öğütme süresi arttıkça genellikle harçların mekanik özellikleri artış göstermiş ve bu durumda genleşme değerlerini azaltmıştır. Ancak bazı durumlarda kullanılan yüksek oranda uçucu külden dolayı Blaine incelikleri artış göstermiş bu durum işlenebilirliği azaltmıştır. İşlenebilirlikteki azalış harçların geçirgenliğini arttırmış ve sodyum sülfata dayalı genleşmeleri arttırmıştır. Kimyasal katkı dozajı 3. Önemli bir faktör olarak ön plana çıkmıştır. Ancak katkı dozajları arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir.



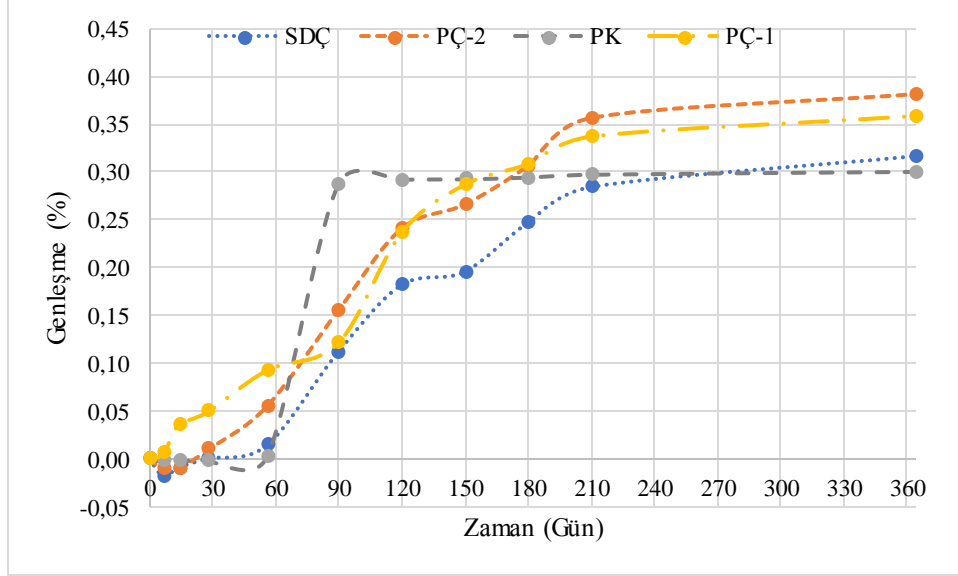
**Şekil 4.38.** Sodyum sülfatın neden olduğu genleşmeler üzerinde etkili olan parametreler

Şekil 4.38'da görüldüğü gibi PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinin sodyum sülfatın neden olduğu genleşmeleri azaltmada çok uygun olmadığı görülmektedir. SDC ve PK klinkerlerinden üretilen kompoze çimentolar düşük  $C_3A$  oranlarından dolayı sodyum sülfat etkisi için daha uygun olmaktadır. Özellikle  $C_3A$  içeriği %3.37 olan PK klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda genleşme değeri oldukça azaltılmıştır. Öğütme aşamasında kullanılan katkıları için 700g/t dozaj sodyum sülfat genleşmeleri açısından uygun olmamaktadır. Öğütme süresi açısından ise en uygun süre 45, 60 ve 75 dakika olarak belirlenmiştir. Ancak 75 dakika öğütme işlemi sonucunda harçlarda daha fazla genleşmeler oluşmaktadır. Bu olayın nedeni çimentoların inceliğinin artması ile harçlarda oluşan işlenebilirlik kaybına bağlanmıştır. Öğütme süresinin 75 dakika olması harçların dayanımını arttırmakta ancak işlenebilirliği azaltması çimentolarda geçirimsizlik problemine yol açabilmektedir. Ayrıca 30 dakika öğütme süresi klinkeri yeterli inceliğe getiremediği için çimentoların dayanımları azalmış ve

harç bünyesinde daha fazla genişmeler oluşmuştur. Uçucu kül oranının artması ile sülfat hasarının azaldığı tespit edilmiştir. PÇ tipi klinkerlerin kullanılması durumunda ise uçucu kül oranının %15 olması önerilmektedir. PÇ tipi klinkerlerde %15 oranında uçucu kül kullanımı ilk zamanlarda harç bünyesinde büzülme yaratmakta bu durum da nihai genişme değerlerini azaltmaktadır. C<sub>3</sub>A içeriği yüksek olan klinkerlerde uçucu kül kullanımı sülfata dayalı genişme oranlarını azaltmada etkili bir yöntem olmuştur.

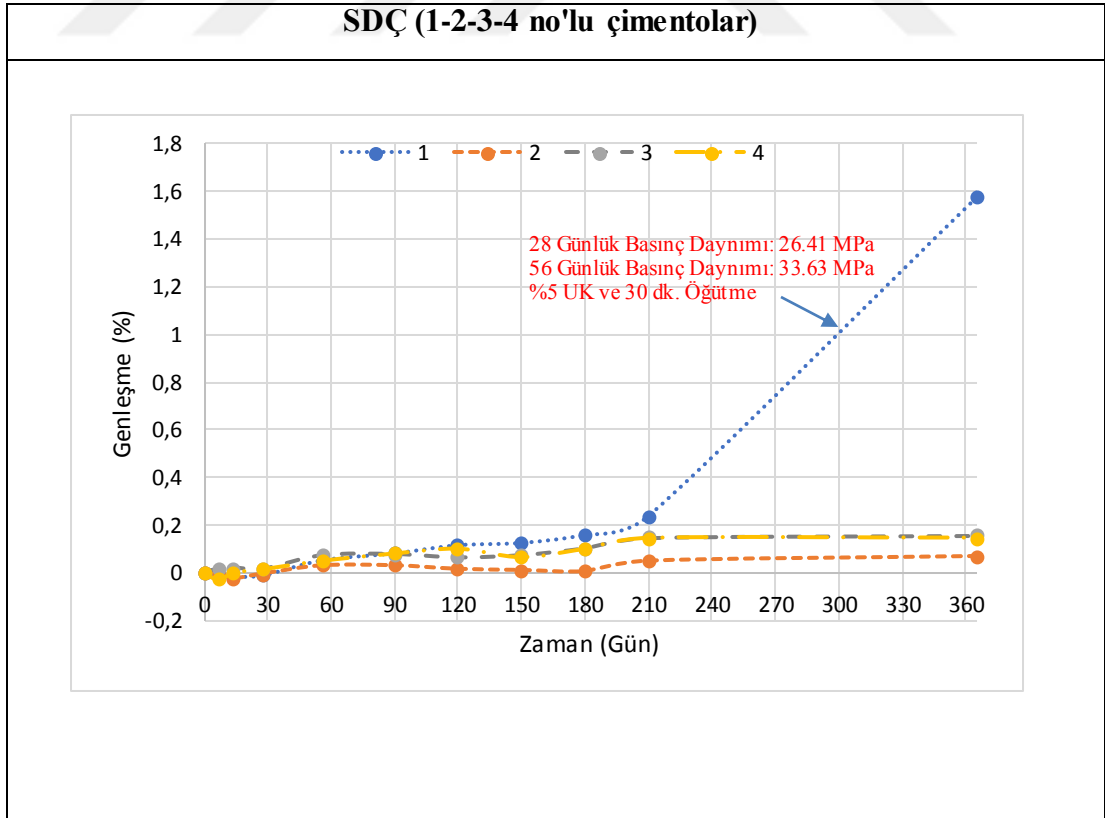
#### **4.10.2. Magnezyum Sülfatın Boyutsal Kararlılığa Etkisi**

Referans çimento harçları için magnezyum sülfat çözeltisinde meydana gelen boy değişimleri Şekil 4.39'da verilmiştir. 56 gün süren kür işleminin sonunda çimento harçları %5'lik magnezyum sülfat çözeltisi içerisine yerleştirilerek 365. güne kadar boy değişimleri belirlenmiştir. C<sub>3</sub>A içeriği düşük olan SDÇ ve PK klinkerinden (Tablo 3.1) üretilen çimento harçlarının genişme değerleri genellikle daha düşük (~%0.30) seviyede kalmıştır. SDÇ klinkerinden üretilen çimento harçlarında 210. güne kadar hızla artan bir genişme reaksiyonu oluşmuş ancak bu süre sonunda genişme hızı azalarak artış göstermiştir. PK klinkerinden üretilen çimento harçlarında ise 60 ve 90. günler arasında büyük bir genişme reaksiyonu meydana gelmiştir. 90. günden itibaren ise genişme değeri yaklaşık %0.3 oranında sabit kalarak devam etmiştir. C<sub>3</sub>A içeriğinin düşük olması çimentolarda oluşan genişme oranlarını azaltmaktadır. PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinden üretilen çimento harçları ise magnezyum sülfat etkisinde benzer özellikler göstermiştir. C<sub>3</sub>A içeriği PÇ-1'e göre daha yüksek olan PÇ-2 klinkerinden üretilen çimentolar daha fazla genişme yapmıştır. Ayrıca 28 ve 56 günlük basınç dayanımı PÇ-2'ye göre daha yüksek olan PÇ-1 klinkerinden üretilen çimento harçlarının daha az genişme yapması beklenen bir durumdur. Harçların bünyelerinde zamanla genişme reaksiyonları oluşmaktadır. Ancak genişme reaksiyonlarının hızı 210. günden itibaren yavaşlamaktadır.

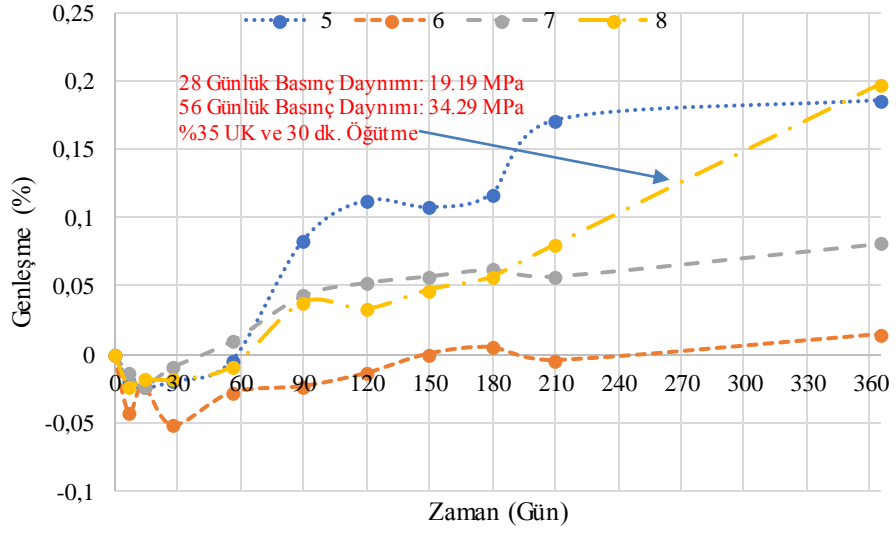


**Şekil 4.39.** Referans çimento harçlarının magnezyum sülfat çözeltisi içindeki boy değişimleri

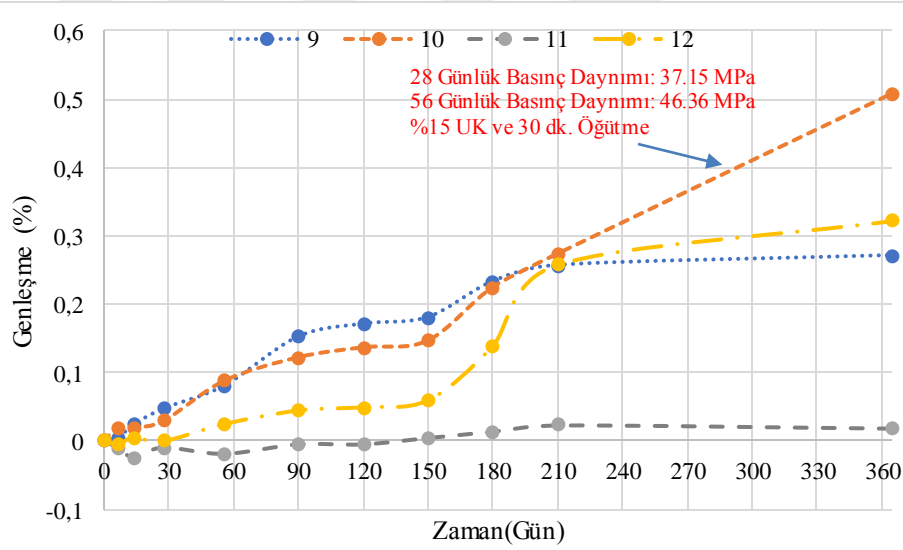
Taguchi serisinde yer alan çimentoların magnezyum sülfat içerisindeki zamana bağlı boy değişimleri Şekil 4.40'da verilmiştir.



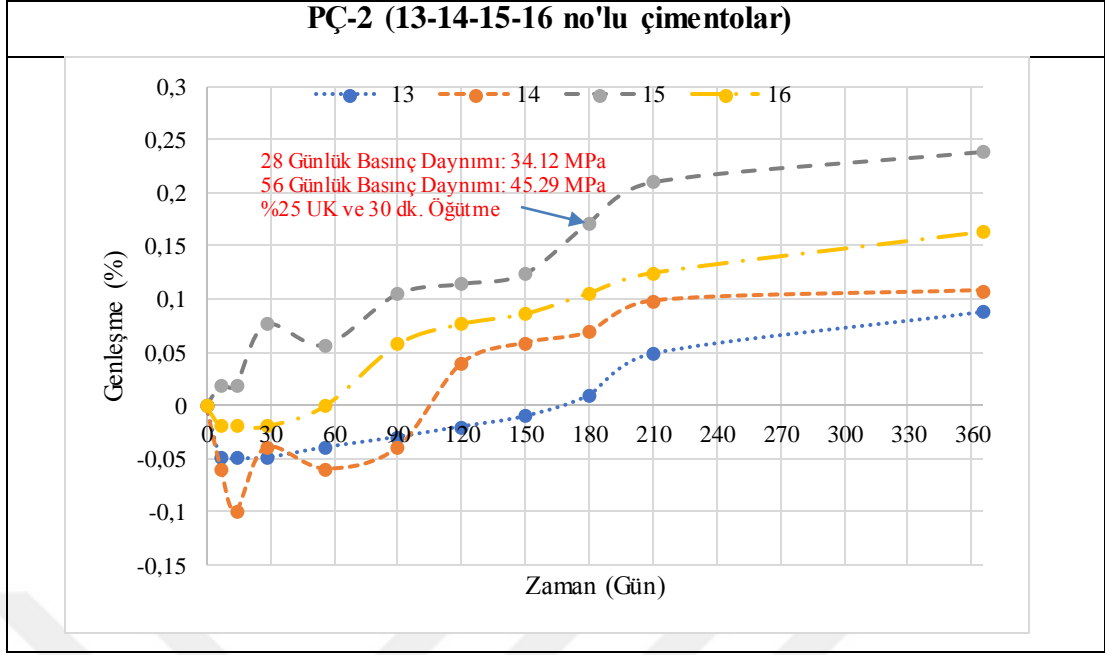
### PÇ-1 (5-6-7-8 no'lu çimentolar)



### PK (9-10-11-12 no'lu çimentolar)







**Şekil 4.40.** Taguchi serisinde yer alan çimentoların magnezyum sülfat içerisindeki boy değişimleri

Şekil 4.40'da görüldüğü gibi SDÇ klinkeri ile üretilen 1,2,3 ve 4 no'lu çimento harçlarının bünyelerinde oluşan genleşmeler verilmiştir. SDÇ klinkerinden üretilen referans harçların genleşme oranı yaklaşık %0.3'dür. Ancak SDÇ klinkerinden üretilen 1 no'lu çimento referans karışıma göre 365. günde yaklaşık 5 kat daha fazla (%1.6 oranında) genleşme yapmıştır. Bu olayın nedeni çimentonun 56 günlük basınç dayanımının oldukça düşük olmasıdır. 1 no'lu çimentonun 28 günlük basınç dayanımı 26.42 MPa, 56 günlük basınç dayanımı ise 33.63 MPa'dır. Düşük basınç dayanımına sahip çimento sınıfı olan 1 no'lu çimentoda genleşme oranları oldukça fazla olmuştur. 3 ve 4 no'lu çimentoların magnezyum sülfat içerisindeki genleşmeleri benzer özellikler göstermiştir. 3 ve 4 no'lu çimentoların genleşme oranları %0.2 değerinin altındadır. Bu çimentoların 56 günlük basınç dayanımları sırasıyla 66.52 MPa, 63.24 MPa olarak belirlenmiştir. Bu yüzden bu çimentoların enleşme değerleri daha düşük olmuştur. Ayrıca 3 no'lu çimentoda %25, 4 no'lu çimentoda ise %35 uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külün etkisiyle de genleşmeler azaltılmıştır. 2 no'lu çimentoda ise diğer çimentolara göre daha farklı bir durum söz konusu olmuştur. 2 no'lu çimentoda %15 oranında uçucu kül kullanılmış ve 45 dakika süre ile öğütme

işlemi yapılmıştır. Bu süreç sonunda üretilen çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 52.98 MPa olmuştur. 3 ve 4 no'lu çimentolara göre daha düşük basınç dayanımına sahip olmasına rağmen 2 no'lu çimento 365. günde daha az genleşme (yaklaşık %0.1) reaksiyonu gerçekleştirmiştir. Bu durum 2 no'lu çimentonun magnezyum sülfat çözeltisine koyulduğunda bir miktar büzülme yapması sonucunda gerçekleşmiştir. Çimento harcının magnezyum sülfat çözeltisine yerleştirilmesi sonucundaki ilk 14 günde büzülme meydana gelmiş ve bu durum sonrasında harç bünyesindeki genleşme oranını azaltmıştır. SDÇ klinkeri için genleşme reaksiyonları açısından %15 uçucu kül kullanımı olumlu sonuçlar göstermiştir.

PÇ-1 klinkeri ile üretilen 5 ve 8 no'lu çimento harçlarının diğer çimentolara göre daha fazla genleşme gösterdiği belirlenmiştir. 8 no'lu çimento ile üretilen harçların 365. gündeki genleşme değeri %0.2 olarak ölçülmüştür. PÇ-1 referans çimentosunun ise genleşme değeri yaklaşık %0.35'dir. 8 no'lu çimento referans çimentoya göre daha az genleşme göstermiştir. Bu olayın nedeni 8 no'lu çimentoda kullanılan %35 oranındaki uçucu külden kaynaklanmaktadır. Ancak uçucu kül katkılı çimento grupları arasında (5, 6 ve 7'ye göre) ise 8 no'lu çimentonun performansı oldukça kötüdür. Çünkü 8 no'lu çimentonun basınç dayanımı diğer çimento gruplarına göre oldukça düşüktür. 8 no'lu çimentonun 28 günlük basınç dayanımı 19.19 MPa, 56 günlük basınç dayanımı ise 34.29 MPa'dır. Basınç dayanımının düşük olması 8 no'lu çimentonun magnezyum sülfattan daha çok etkilenmesine yol açmıştır. 5 no'lu çimentonun 28 günlük basınç dayanımı 58.25 MPa, 56 günlük basınç dayanımı ise 67.58 MPa olmasına rağmen oldukça fazla genleşme göstermiştir. Bu olayın nedeni 5 no'lu çimentoda kullanılan %5 uçucu külden kaynaklanmaktadır. Kullanılan %5 oranındaki uçucu kül çimento harcında oluşan genleşme değerini referans çimentonun genleşme değerinin altına indirmeyi başarmıştır. Kullanılan uçucu külün ve basınç dayanımının referans çimentodan fazla olması genleşme değerini azaltmaktadır. 7 no'lu çimentoda %25 uçucu kül kullanımı ve 45 dakika öğütme süresi çimentonun basınç dayanımını azaltmış bu durumda da magnezyum sülfat etkisinde %0.07 oranında genleşme meydana gelmiştir. 7 no'lu çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 50.64 MPa olmakla beraber %25 oranında uçucu kül kullanımı genleşme değerlerini azaltmıştır. 6 no'lu çimentoda %15 uçucu kül kullanımı ve 60 dakika öğütme süresi

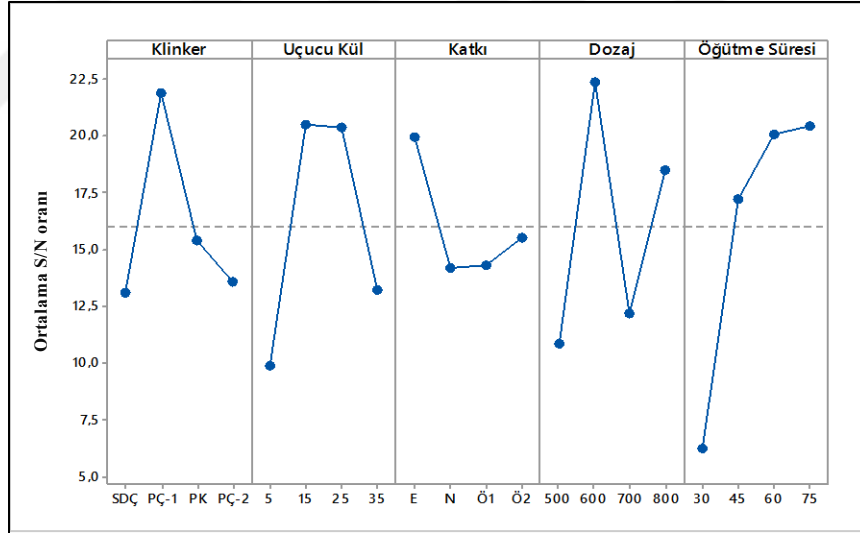
56 günlük basınç dayanımınının 55.81 MPa olmasını sağlamıştır. Ayrıca 6 no'lu çimento ile üretilen harçlarda da 2 no'lu çimentoda olduğu gibi büzülme davranışı belirlenmiş ve bu durumda genleşme değerlerinin azalmasına yol açmıştır. SDÇ klinkerinden üretilen çimentolarda olduğu gibi PÇ-1 klinkeri içinde %15 uçucu kül kullanımı daha olumlu sonuçlar sağlamıştır.

PK klinkeri ile üretilen 10 no'lu çimento harçlarının magnezyum sülfat içerisindeki boy değişimi zamanla sürekli artış göstermektedir. 9, 11 ve 12 no'lu çimentolar ile üretilen harçların boy değişimleri genellikle 210. günden itibaren yavaşlamaktadır. 10 no'lu çimentoda %15 uçucu kül kullanılmış ancak öğütme süresi 30 dakika olduğu için klinker taneleri yeterli inceliğe ulaşamamıştır. 10 no'lu çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 46.36 MPa olarak belirlenmiştir. C<sub>3</sub>A içeriği oldukça düşük olan PK klinkerinden üretilen 10 no'lu çimentonun genleşme değeri referans çimentoyu geçmektedir. Bu durumun asıl nedeni yetersiz öğütme süresi sonunda klinker tanelerinin yeterli inceliğe ulaşamamasından kaynaklanmaktadır. Çimento dayanımının azalması genleşme değerlerinde artışa yol açmıştır. PK klinkeri kullanılarak üretilen çimentolarda en yüksek basınç dayanımı 11 no'lu çimentoda elde edilmiştir. 11 no'lu çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 60.53 MPa olarak belirlenmiştir. 11 no'lu çimento %25 uçucu kül kullanılarak 75 dakika öğütme süresi ile elde edilmiştir. Öğütme süresindeki artış ve yüksek oranda uçucu kül kullanımı çimentolarda oluşan genleşme değerini %0.05 değerinin altına indirmiştir. PK klinkeri ile üretilen kompoze çimentolar içerisinde %25 uçucu kül kullanımı genleşmeleri azaltmada daha etkili olmuştur. Ancak %15 uçucu kül kullanılan kompoze çimentonun 30 dakika süre ile öğütülmesi klinker tanelerinin daha kaba kalmasına yol açmıştır. %15 uçucu kül kullanılması durumunda optimum klinker inceliği için öğütme süresi minimum 60 dakika olmalıdır.

PÇ-2 klinkeri kullanılarak üretilen kompoze çimentolarda ise en fazla genleşme değeri 15 no'lu çimentoda elde edilmiştir. 15 no'lu çimentonun 56 günlük basınç dayanımı 45.29 MPa'dır. 15 no'lu çimento %25 uçucu kül ve 30 dakika öğütme süresi ile elde edilmiştir. Çimentoların üretiminde öğütme kolaylaştırıcıların kullanılmasına rağmen 30 dakika öğütme süresi yeterli olmamıştır. 16 no'lu

çimentonun 56 günlük basınç dayanımı ise 44.56 MPa'dır. 15 no'lu çimentoya göre daha düşük basınç dayanımına sahip (ihmal edilebilir derecede) 16 no'lu çimento daha az genişleme reaksiyonu göstermiştir. Bu olayın nedeni ise 16 no'lu çimentoda kullanılan %35 uçucu külden kaynaklanmaktadır. %15 oranında uçucu kül kullanılan 14 no'lu çimentoda da diğer klinkerlerde olduğu gibi sülfat çözeltisinde büzülme davranışı gözlenmiştir.

Çimento üretiminde kullanılan %15 uçucu kül kullanımını genellikle harçlarda büzülme davranışı (özellikle ilk 14 günde) göstermektedir. Harç bünyesinde gerçekleşen büzülme davranışı harçların sonraki süreçte meydana gelen genişleme oranlarını da azaltmaktadır. Ayrıca PÇ klinkerleri için en uygun uçucu kül oranı %15 olarak belirlenmiştir. Öğütme süresinin 30 dakika olması klinker tanelerinin daha kaba kalmasına yol açmış ve bu durum genişleme değerlerini de arttırmıştır. Magnezyum sülfat içerisinde bekletilen harçlara ait elde edilen S/N oranları Şekil 4.41de verilmiştir.



**Şekil 4.41.** Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen harçların genişlemelere ait S/N oranları

S/N oranlarına göre PÇ-1 klinkerinin %15 uçucu kül ile birlikte 75 dakika boyunca öğütülmesi önerilmektedir. Öğütme esnasında E katkısı 600 g/t dozajı ile

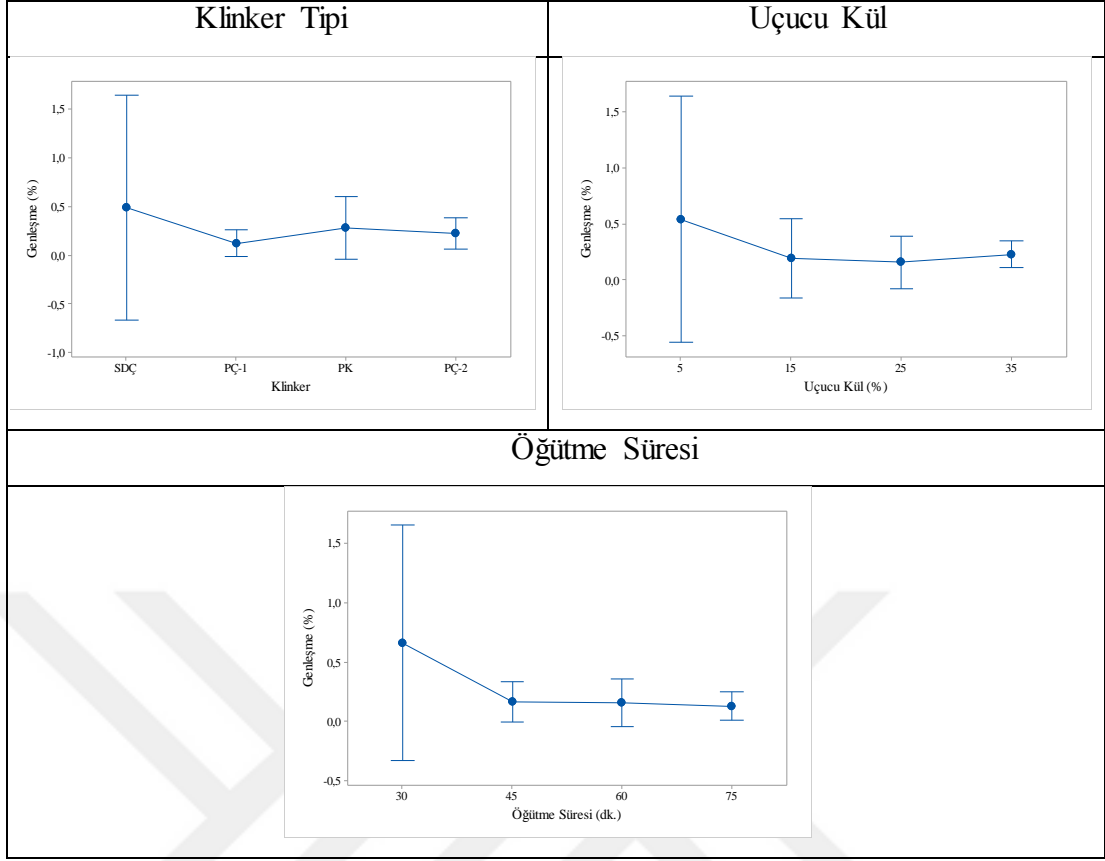
uygulanmalıdır. Elde edilen parametrelerin kullanılması durumunda 365. gündeki genleşme değeri yaklaşık %0.06 olacaktır.

Magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen harçların genleşme özelliklerini etkileyen parametreler ise Tablo 4.21'de verilmiştir. Magnezyum sülfatın neden olduğu genleşmelerin azaltılmasında öğütme süresi %35.32 oranıyla oldukça önemli bir faktör olmuştur. Öğütme süresindeki artış harçların mekanik özelliklerini geliştirmekte ve bu durumda magnezyum sülfat dayanıklılığını arttırmaktadır. Özellikle öğütme süresinin 60 ve 75 dakika olması durumunda magnezyum sülfat dayanıklılığı iyileşmektedir. Çimento üretiminde kullanılan katkı klinkerinin öğütülebilirliğini iyileştirdiği için magnezyum sülfat dayanıklılığında etkili olmaktadır. Uçucu külün %25 ve 35 oranında kullanılması da magnezyum sülfat genleşmelerini azaltmaktadır. C<sub>3</sub>A içeriği düşük olan SDC klinkerinden üretilen kompoze çimentoların magnezyum sülfattan daha çok etkilendiği gözlenmiştir. PK klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda azda olsa buna benzer özellikler gözlenmiştir. Bu durum yüksek C<sub>3</sub>S içeriğinden oluşan Ca(OH)<sub>2</sub>'den oluşmaktadır.

**Tablo 4.21.** Magnezyum sülfat etkisine maruz harçların genleşme özelliklerini etkileyen parametreler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	11247.8	3749.3	0.65	24.93
Uçucu Kül	3	7780.3	2593.4	0.92	25.88
Öğütme Katkısı	3	2331.4	777.1	0.40	6.34
Katkı Dozajı g/t	3	4923.4	1641.1	1.01	9.53
Öğütme Süresi	3	78294.2	26098.1	2.47	35.32
Toplam	15	104577			100

Magnezyum sülfat etkisine maruz bırakılan harçların boy değişimlerini etkileyen bazı parametreler Şekil 4.42'de verilmiştir.

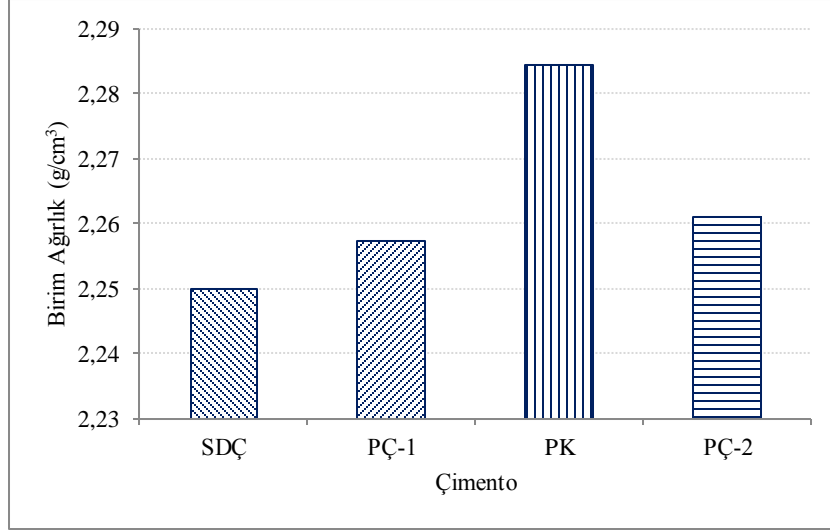


**Şekil 4.42.** Magnezyum sülfat etkisindeki harçların boy değişimini etkileyen faktörler

Şekil 4.42'de görüldüğü gibi PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri kullanılarak üretilen çimento harçlarının magnezyum sülfat etkisi ile genleşmeleri daha az olmaktadır. Uçucu kül oranının ise %15 ve üzerinde olması sülfat hasarının neden olduğu genleşmeleri azaltmaktadır. Öğütme süresinin artması ile birlikte sülfat etkisi sonucu meydana gelen genleşmeler azalmaktadır. Bu durum harçların dayanım değerlerinin artması ile sülfat hasarının azalması olarak açıklanabilir.

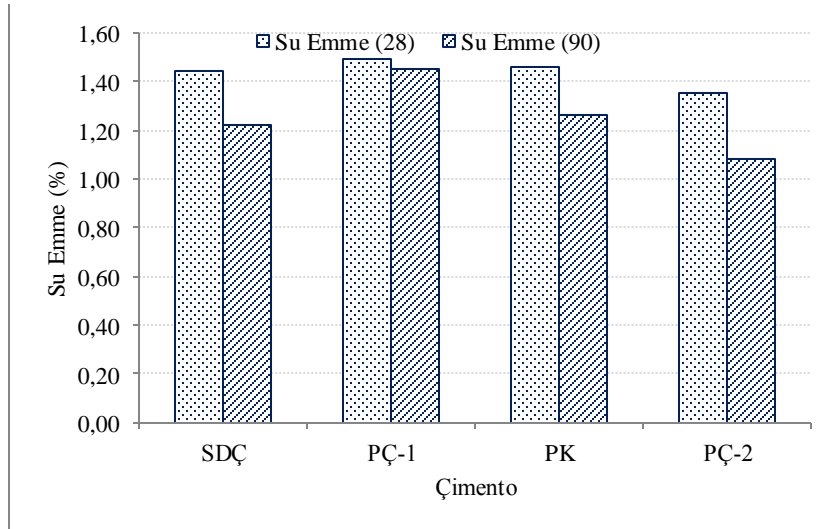
#### 4.11. Harçların Birim Hacim Ağırlıkları ve Su Emme Değerleri

Referans çimento harçları için 28. günde birim ağırlık deneyi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.43'da verilmiştir.



**Şekil 4.43.** Referans çimento harçlarının birim ağırlıkları

Birim ağırlıklar açısından SDC klinkeri ile üretilen çimento harçlarının  $2.25 \text{ g/cm}^3$  değerine sahip olurken, PK klinkeri ile üretilen çimento harçlarının ise birim ağırlıkları  $2.28 \text{ g/cm}^3$  olarak bulunmuştur. PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerleri ile üretilen çimento harçlarının benzer özellik gösterdiği ve birim ağırlıklarının yaklaşık  $2.26 \text{ g/cm}^3$  olduğu belirlenmiştir. Referans çimento harçlarının 28. ve 90. günlerdeki su emme değerleri ise Şekil 4.44'de verilmiştir.



**Şekil 4.44.** Referans çimento harçlarının su emme değerleri

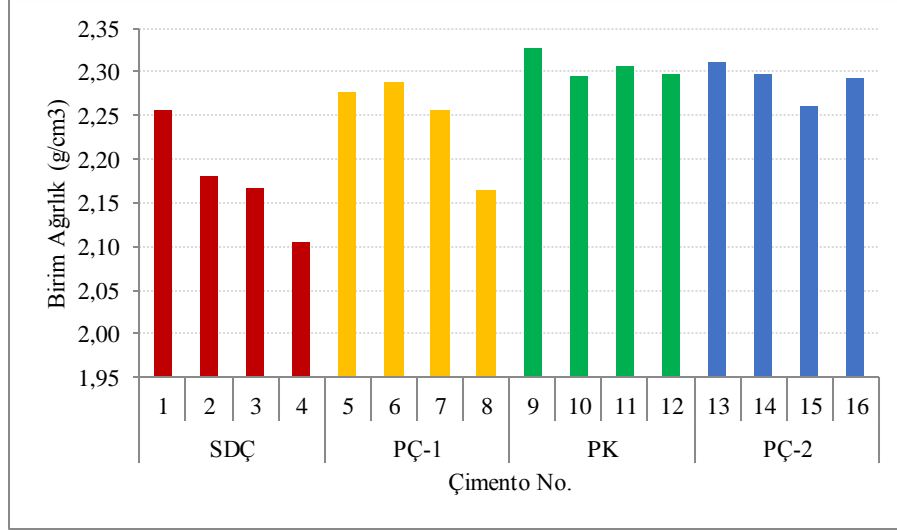
28 günlük su emme özellikleri açısından PÇ-1 klinkeri ile üretilen çimento harçlarının %1.49 değerine sahip olduğu görülmektedir. PÇ-2 klinkeri ile üretilen çimento harçlarının su emme değeri ise (28. günde) %1.35 olarak belirlenmiştir. 90. günde SDC, PÇ-1 ve PK klinkeri ile üretilen çimento harçlarının su emme değerleri yaklaşık %1.30 olarak belirlenmiştir. Kür süresindeki artış ile birlikte harçların su emme değerleri azalmıştır. İşlenebilirlik açısından PÇ-2 çimentosu diğer çimentolara göre daha üstün özellik gösterdiği için su emme değerleri de düşük olmuştur. Çünkü PÇ-2 çimentosundan üretilen harçların işlenebilirliğinin yüksek olması harç bünyesindeki boşluk oranını azaltmaktadır. Bu durum su emme değerlerini azaltmaktadır.

Taguchi serisinde yer alan çimentoların birim ağırlıkları Şekil 4.45'de verilmiştir. Şekil 4.45'de görüldüğü gibi genellikle uçucu kül oranının artması ile birlikte birim ağırlıklarda azalmaktadır. Birim ağırlık üzerinde etkili olan parametreler incelenerek Tablo 4.22'de sunulmuştur.

**Tablo 4.22.** Çimento harçlarının birim ağırlıklarına etki eden faktörler

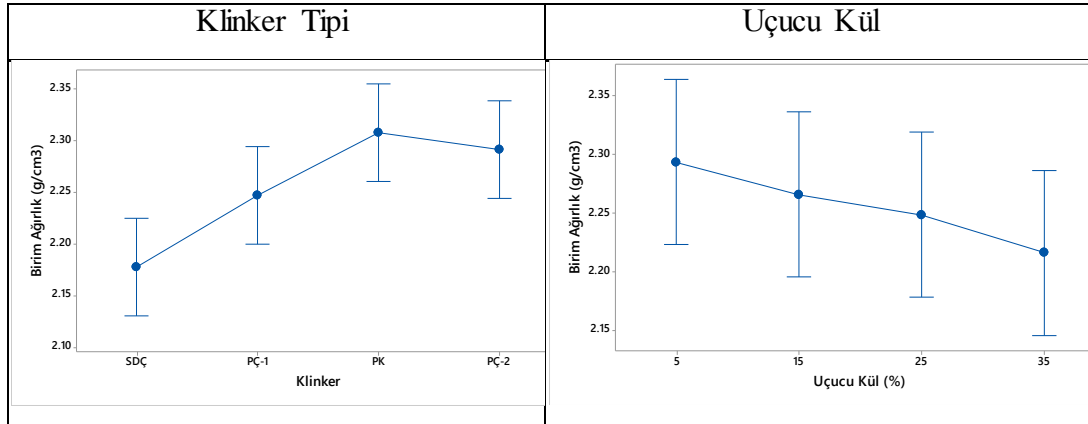
Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	0.012576	0.004192	1.00	20.00
Uçucu Kül	3	0.040257	0.013419	7.12	64.02
Öğütme Katkısı	3	0.005534	0.001845	0.39	8.80
Katkı Dozajı g/t	3	0.002967	0.000989	0.20	4.72
Öğütme Süresi	3	0.001550	0.000517	0.10	2.46
Toplam	15	0.062885			100





**Şekil 4.45.** Taguchi serisinde yer alan çimento harçlarının birim ağırlıkları

Tablo 4.22'de görüldüğü gibi birim ağırlıklar üzerinde etkili olan ana parametre uçucu kül oranı olmaktadır. Ancak klinker tipi de %20 oranında birim ağırlıkları etkilemektedir. Şekil 4.46'da klinker tipi ve uçucu kül oranının birim ağırlık üzerindeki etkileri görülmektedir. PK tipi klinker ile üretilen çimento kullanılması harçların birim ağırlıklarını arttırmaktadır. Ayrıca uçucu kül oranının artması sonucunda birim ağırlıklar da azalmaktadır.



**Şekil 4.46.** Birim ağırlık üzerinde etkili olan parametreler

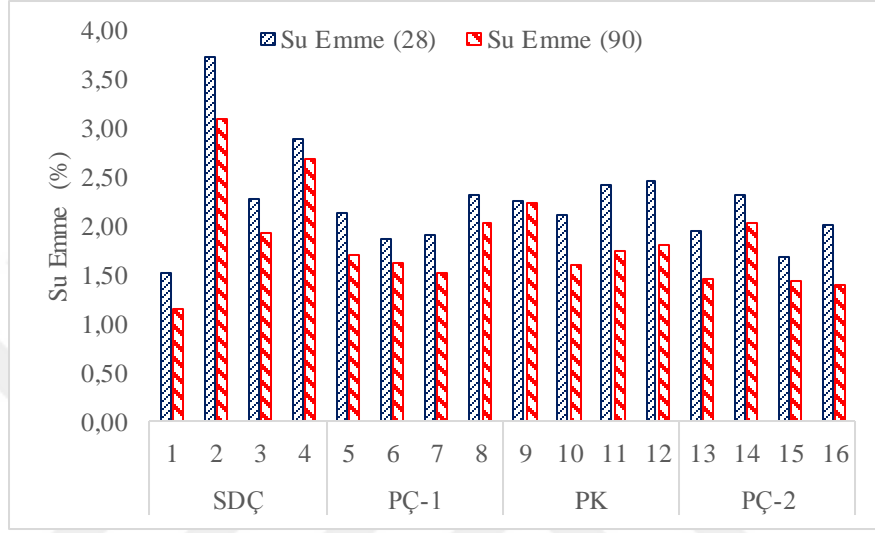
Taguchi serisinde yer alan çimentoların 28 ve 90. günlerdeki su emme değerleri Şekil 4.47'de verilmiştir.

28 ve 90 günlük su emme değerleri incelendiğinde 1 no'lu çimento harcının oldukça düşük su emme özelliğine sahip olduğu görülmektedir. 2 ve 4 no'lu çimento harçlarının ise oldukça fazla su emme özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. 2 no'lu çimento harcının 28 ve 90 günlük su emme değerleri sırasıyla %3.72 ve %3.07 olarak bulunmuştur. 4 no'lu çimento harcının ise 28 ve 90 günlük su emme değerleri sırasıyla %2.89 ve %2.67 olarak bulunmuştur. 9 no'lu çimento harcında 28 ve 90 günlük su emme değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.47'de görüldüğü gibi kür süresindeki artış ile birlikte harçların su emme değerleri azalmıştır.

1 no'lu çimentonun yayılma çapı 125 mm olması ve bünyesinde %5 oranında uçucu kül kullanılması su emme değerinin 90. günde %1.14 olmasını sağlamıştır. Kompoze çimentolar içerisindeki 13 no'lu çimentonun yayılma çapı 143 mm ile en fazla yayılma çapı değerine sahiptir. 13 no'lu çimentonun 90. günde su emme değeri ise %1.46 olarak belirlenmiştir. %5 uçucu kül içerikli kompoze çimentolardan 1 no'lu çimento 30 dakika, 13 no'lu çimento ise 60 dakika süre ile öğütülmüştür. Öğütme süresindeki artış ile Blaine inceliği 3010 cm<sup>2</sup>/g değerinden 5080 cm<sup>2</sup>/g değerine ulaşmıştır. Blaine inceliğinin artmasına rağmen yayılma çapındaki artış klinkerlerin öğütülebilirliği arasındaki farktan açıklanmaktadır. 1 no'lu çimento SDC klinkeri, 13 no'lu klinker ise PÇ-2 klinkerinden üretilmiştir. PÇ-2 klinkeri SDC klinkerine göre daha zor öğütüldüğü için klinker tanelerinin daha kaba kaldığı ve Blaine inceliğini daha çok uçucu külün öğütülmesi sonucu arttığı düşünülmektedir. Uçucu kül tanelerinin genellikle küresel olması ve klinker tanelerinin yeterli inceliğe sahip olmaması (PÇ-2'nin SDC'ye göre) yayılma çapını arttırmıştır. Benzer özellikler %5 uçucu kül katkılı 5 ve 9 no'lu kompoze çimentolarda da gözlenmiştir. 5 ve 9 no'lu kompoze çimentoların yayılma çapları sırasıyla 122 ve 124 mm olarak belirlenmiştir. 5 ve 9 no'lu kompoze çimentoların su emme değerleri sırasıyla %1.70 ve %2.23 olarak ölçülmüştür. C<sub>3</sub>S içeriği %67.07 olan PK klinkerinden üretilen 9 no'lu çimentonun öğütülebilirliği oldukça fazladır. Bu durum klinker tanelerinin kaba kalmasına yol açtığı için harçların yayılma çapını arttırmış ancak su emme değerlerini olumsuz

etkilemiştir. Kompoze çimentolarda uçucu kül kullanımı genellikle harçların su emme değerini azaltmaktadır.

Harçların su emme özelliğini (90. gün için) etkileyen parametreler Tablo 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.47. Taguchi serisinde yer alan harçların 28 ve 90. günlerdeki su emme değerleri

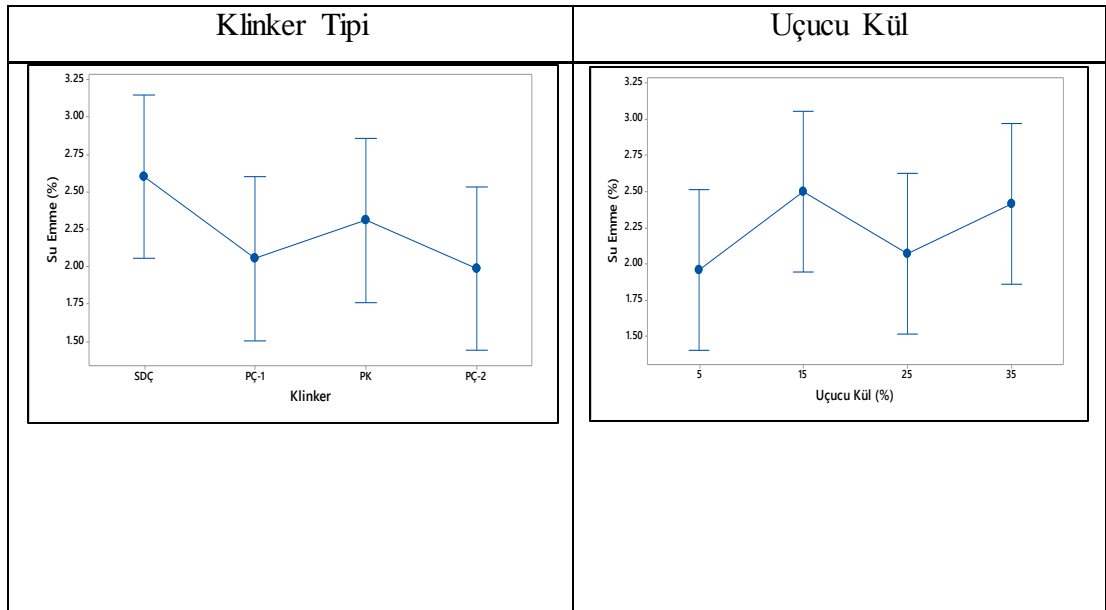
Tablo 4.23'de görüldüğü gibi bütün parametreler harçların su emme özelliklerini etkilemektedir. Ancak bu parametrelerden sadece klinker tipi, uçucu kül oranı ve öğütme süresi ele alınarak incelenmiştir.

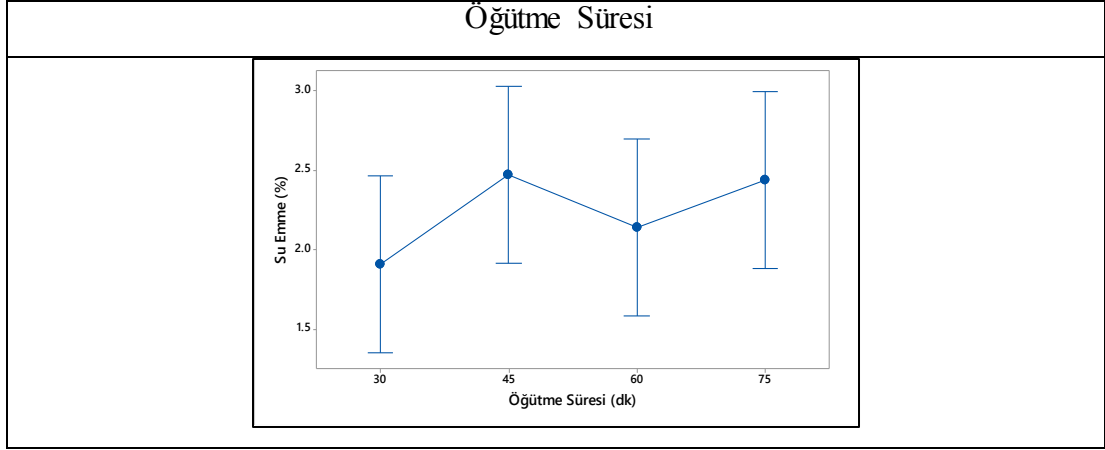
Klinker tipi, uçucu kül oranı ve öğütme süresinin su emme özellikleri üzerindeki etkisi Şekil 4.48'de verilmiştir.

**Tablo 4.23.** Çimento harçlarının su emme özelliklerine etki eden faktörler

Parametre	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	Parametre Etkisi (%)
Klinker	3	0.943785	0.314595	1.25	23.77
Uçucu Kül	3	0.832382	0.277461	1.06	20.97
Öğütme Katkısı	3	0.605066	0.201689	0.72	15.24
Katkı Dozajı g/t	3	0.737958	0.245986	0.91	18.59
Öğütme Süresi	3	0.850673	0.283558		21.43
Toplam	15	3.96986			100

Şekil 4.48'de görüldüğü gibi PÇ-1 ve PÇ-2 klinkerlerinden elde edilen çimentolardan üretilen harçların su emme değerleri daha az olmaktadır. Uçucu kül oranının %5-25 olması durumunda da harçların su emme özellikleri azalmaktadır. 30 ve 45 dakika süre ile gerçekleştirilen öğütme işlemleri harçların su emme özelliklerini azaltmaktadır. Ayrıca klinkerler arasında SDÇ ve PK klinkerlerinin öğütülebilirliği daha zor olduğu için su emme değerlerinde artışa yol açmıştır. Harçların su emme özellikleri açısından işlenebilirlik faktörünün önemli bir etken olduğu belirlenmiştir. 30 ve 45 dakika öğütme sürelerinde harçların Blaine İncelikleri düşük değerler aldığı için işlenebilirlikte artışlar gözlenmektedir. İşlenebilirlik arttığı takdirde harçlardaki geçirimsizlik de azalmaktadır. Bu durum harçların su emme değerlerini azaltmaktadır.





**Şekil 4.48.** Su emme üzerinde etkili olan parametreler

#### **4.12. Çimento Maliyetleri**

Çimentoların üretiminde kullanılan klinker, alçıtaşı, uçucu kül, kimyasal katkı ve elektrik enerjisi için birim fiyatlar Tablo 4.24'de verilmiştir. Çimentoların maliyeti laboratuvar üretimi için hesaplanmıştır.

Klinker maliyetleri ton başına belirlenmiş ve 88.66-94.38 TL arasında değişmektedir. Alçıtaşının ton maliyeti ise 54.34 TL'dir. Uçucu külün maliyeti sadece sevkiyat ücreti olarak hesaplanmıştır. Seyitömer Termik Santrali ve Kastamonu Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvar arasındaki mesafe Google Earth yardımı ile hesaplanarak 554 km olarak belirlenmiştir. Uçucu külün sevkiyatında 27.5 ton kapasiteli silobas kullanıldığı düşünülerek yakıt miktarı belirlenmiştir. 23.06.2016 tarihinde geçerli akaryakıt fiyatları dikkate alınarak motorin ücreti 3.88 TL olarak kullanılmıştır.

Elektrik enerjisi tüketimi, kWh (kilowatt saat) biriminden ölçülüp fiyatlandırılır. EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu) verilerine göre Ocak 2016 için elektrik birim fiyatı 41.17 kuruş (vergiler dahil) olarak verilmiştir. Hammaddelerin öğütülmesinde kullanılan bilyalı değirmenin güç kapasitesi (motor için) 1.2 kW'dır. Elektrik tüketimi, güç ve öğütme süresi kullanılarak belirlenmiştir.

Öğütme esnasında kullanılan kimyasal katkıların fiyatı ise kg başına belirlenmiş olmakla beraber 0.61-1.05 TL arasında değişmektedir.

**Tablo 4.24.** Çimento üretiminde kullanılan malzemelerin birim fiyatları

		Birim Fiyat (TL/T)
Klinkerler	SDÇ	91.52
	PÇ-1	87.23
	PK	94.38
	PÇ-2	88.66
Alçıtaşı		54.34
Uçucu Kül		27.36
Kimyasal Katkılar (Kg/TL)	E	0.61
	N	0.73
	Ö1	0.85
	Ö2	1.05
Elektrik Enerjisi (kW/h)		41.17

Belirlenen birim fiyatlar kullanılarak laboratuvar ortamında hazırlanmış çimentoların maliyetleri hesaplanarak (1 ton için) Tablo 4.25'de verilmiştir. Çimentoların maliyetleri için en küçük en iyi yöntemine göre S/N oranları belirlenmiştir. Elde edilen S/N oranları Şekil 4.49'da verilmiştir.

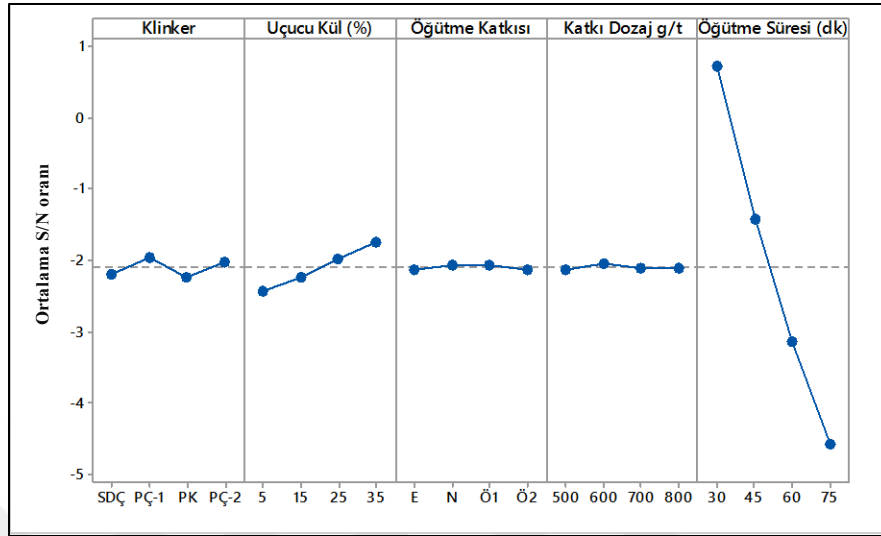
**Tablo 4.25.** Çimentoların laboratuvar ortamındaki maliyetleri

No	Klinker Türü	Uçucu Kül (%)	Kimyasal Katkı Türü	Katkı Dozaj (g/t)	Öğütme Süresi (dk)	Maliyet (TL/T)
1	SDÇ	5	E	500	30	135.8
2	SDÇ	15	N	600	45	168.0
3	SDÇ	25	Ö1	700	60	198.8
4	SDÇ	35	Ö2	800	75	231.0
5	PÇ-1	5	N	700	75	240.8
6	PÇ	15	E	800	60	201.6
7	PÇ	25	Ö2	500	45	161.0
8	PÇ-1	35	Ö1	600	30	120.4
9	PK	5	Ö1	800	45	173.6
10	PK	15	Ö2	700	30	133.0
11	PK	25	E	600	75	236.6
12	PK	35	N	500	60	196.0
13	PÇ-2	5	Ö2	600	60	205.8
14	PÇ	15	Ö1	500	75	238.0
15	PÇ	25	N	800	30	126.0
16	PÇ	35	E	700	45	156.8

Şekil 4.49'da görüldüğü gibi çimento maliyetlerinde etkili olan ana parametre öğütme süresidir. Öğütme süresinin azalması sonucunda elektrik tüketimi de azalarak maliyeti etkilemektedir. Klinker tipi, kimyasal katkı tipi ve dozajının maliyet üzerinde doğrudan bir etkisi bulunmamaktadır.

Uçucu kül oranının artması sonucunda maliyet azalmaktadır. Öğütme süresinin artması durumunda enerji tüketimi arttığı için çimento üretim maliyetleri artmaktadır. S/N oranları dikkate alındığında maliyetin azaltılması için PÇ klinkerinin %35 uçucu kül kullanılarak üretilmesi maliyetleri azaltmaktadır. Öğütme esnasında Ö1 katkısı 600 g/t dozaj ile uygulanmalıdır. Belirtilen parametrelerin kullanılması durumunda üretilen çimentonun (8 no'lu çimento) maliyeti yaklaşık 120.4 TL (1 ton için) olacaktır. Ancak bu parametrelerin kullanılması sonucu elde edilen çimentonun 28

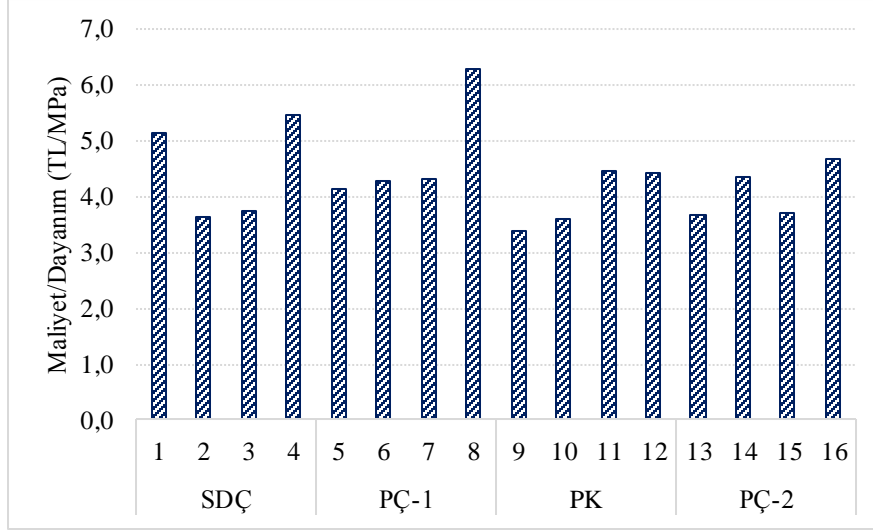
günlük basınç dayanımı 19.90 MPa olmaktadır. Öğütme süresinin 45 dakika olması durumunda ise basınç dayanımı yaklaşık 32.65 MPa olacaktır.



Şekil 4.49. Çimento maliyetleri için S/N oranları

Kompoze çimentolara ait Maliyet/Dayanım oranları Şekil 4.50'de verilmiştir. 1, 4 ve 8 no'lu çimentoların 1 MPa dayanımı 5 TL'nin üzerinde maliyete neden olmaktadır. 1 no'lu çimento %5 uçucu kül ve 30 dakika öğütme süresi ile, 4 no'lu çimento %35 uçucu kül ve 75 dakika öğütme süresi, 8 no'lu çimento %35 uçucu kül ve 30 dakika öğütme süresi ile elde edilmiştir. Öğütme süresinin yetersiz olması çimento dayanımlarını azaltmakta ve maliyet/dayanım oranları artmaktadır. Öğütme süresindeki artış çimento dayanımlarını arttırmakta ancak kullanılan enerji miktarı arttığı için maliyet/dayanım oranı yine artış göstermektedir. Maliyet/dayanım oranı açısından en uygun üretim 9 ve 10 no'lu kompoze çimentolarda elde edilmiştir. 9 no'lu çimentoda %5 uçucu kül ve 45 dakika öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. 9 no'lu çimentonun maliyet/dayanım oranı 3.4 olarak belirlenmiştir. 10 no'lu çimento %15 uçucu kül kullanılarak 45 dakika öğütme süresi ile elde edilmiştir. 9 no'lu çimento dayanım sınıflarına göre 42.5R tipi olarak tanımlanırken, 10 no'lu çimento 32.5R tipi olarak tanımlanmaktadır.





**Şekil 4.50.** Çimentoların Maliyet/Dayanım oranları

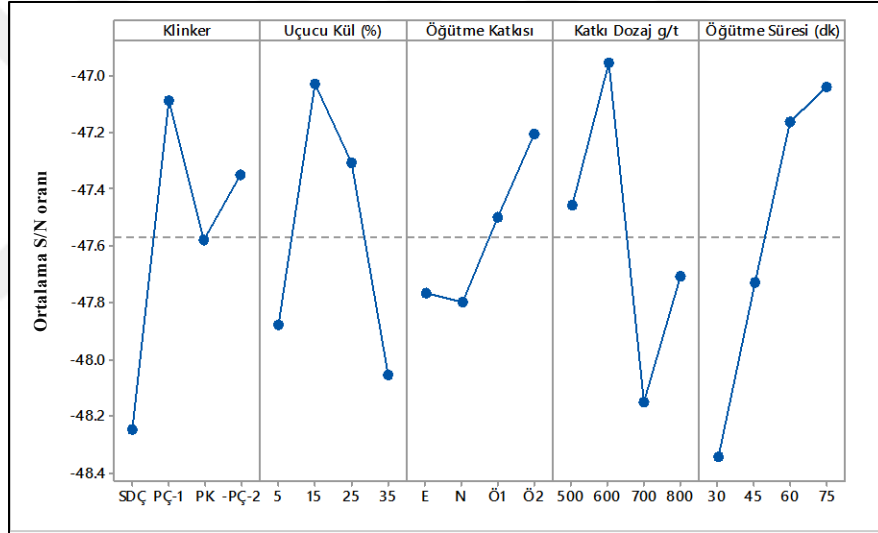
#### 4.13. Optimizasyon

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler kullanılarak Tablo 4.26'da verilen amaç fonksiyonlara göre optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon yönteminde en küçük-en iyi ve en büyük-en iyi yöntemleri kullanılmıştır. Boyutsal kararlılık, ağırlık değişimleri, su emme, toplam karbon miktarı gibi parametreler en küçük-en iyi yöntemine göre belirlenmiştir. Toplam karbon miktarı klinker üretiminde atmosfere salınan CO<sub>2</sub> emisyonu ile ilişkili bir parametredir. Çimento üretiminde kullanılan klinker miktarının azalması CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmaktadır. Uçucu kül gibi katkıların çimento üretiminde kullanılması CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmaktadır. Basınç ve eğilme dayanımı, yayılma çapı gibi parametreler için ise en büyük-en iyi yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon için kullanılan parametreler Tablo 4.26'da verilmiştir.

**Tablo 4.26.** Optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonlar

En küçük-En iyi	En büyük-En iyi
Büzülme	Yayıma Çapı
Ağırlık Değişimi	Eğilme Dayanımı (2-28-90 gün)
Genleşme (Sodyum Sülfat - Magnezyum Sülfat)	Basınç Dayanımı (2-29-90 Gün)
Toplam Karbon Miktarı (CO <sub>2</sub> Emisyonu)	
Su Emme Miktarı	
Maliyet	

En küçük - en iyi yöntemi kullanılarak elde edilen S/N oranları Şekil 4.51'de verilmiştir.

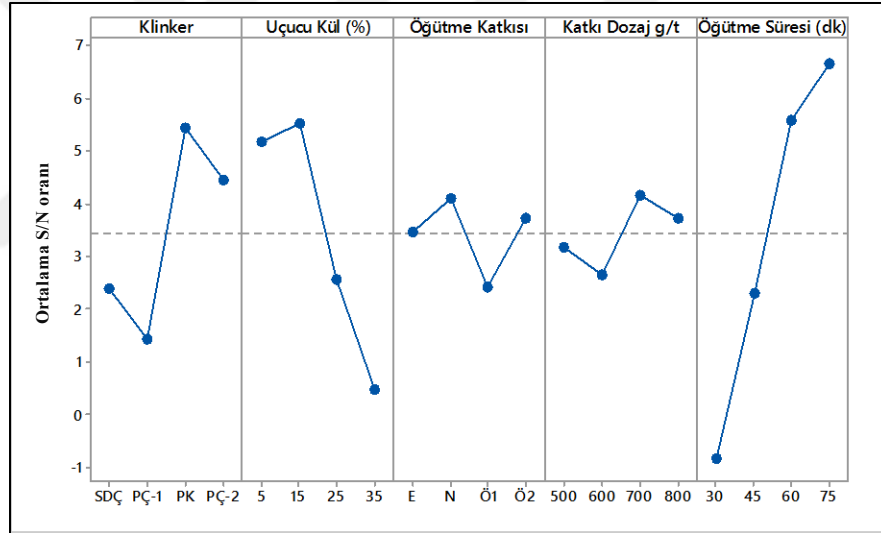


**Şekil 4.51.** En küçük en iyi yöntemine göre belirlenen S/N oranları

Şekil 4.51'de görüldüğü gibi boyutsal kararlık, ağırlık değişimleri, maliyet, su emme, karbon salınımı gibi parametrelerin minimum olması için en uygun klinker tipi PÇ-1 olarak belirlenmiştir. PÇ-1 klinkeri %15 uçucu kül kullanılarak 75 dakika süre ile öğütme işlemine tabi tutulmalıdır. Öğütme işlemi esnasında Ö2 katkısı 600 g/t dozaj ile uygulanmalıdır. Bu parametreler dikkate alındığı takdirde; büzülme davranışı, ağırlık kaybı, sülfat genleşmeleri, toplam karbon miktarı, su emme oranı ve maliyet özellikleri minimum seviyede kalacaktır.

Şekil 4.51'de S/N oranları için -47.56 değeri ortalama olarak belirlenmiştir. Bu değer üzerinde yer alan parametreler optimum özellikleri belirtmektedir. Klinker olarak PÇ-1 ve PÇ-2, uçucu kül oranı olarak %15 ve 25 belirlenmiştir. Ö1 ve Ö2 katkılarının 600 g/t dozajı ile kullanılması daha verimli olmaktadır. Ancak çimentoların üretilmesinde öğütme süresinin 60 veya 75 dakika olması daha uygun olacaktır. 30 ve 45 dakikalık öğütme süreleri ortalama değerinin (-47.57) altında olduğu için uygun değildir. Büzülme davranışı, ağırlık kaybı, sülfat genleşmeleri, toplam karbon miktarı, su emme oranı ve maliyet özellikleri için S/N ortalaması altında kalan parametreler dikkate alınmamıştır.

Tablo 4.27'de yer alan özellikler kullanılarak en büyük en iyi yöntemi ile S/N oranları belirlenmiştir. Çimentolara ait S/N oranları Şekil 4.52'de görülmektedir.



Şekil 4.52. En büyük en iyi yöntemine göre çimentoların S/N oranları

Şekil 4.52'de görüldüğü gibi PK klinkerinin %15 uçucu kül ile birlikte 75 dakika süre ile öğütülmesi daha uygun sonuçlar sağlayacaktır. Öğütme esnasında N katkısının 700 g/t dozaj ile uygulanması önerilmektedir. S/N oranı ortalaması 3.44 olarak belirlenmiştir. PK ve PÇ-2 klinkerleri ortalamanın üstünde yer almaktadır. %5 ve 15 oranında uçucu kül kullanımı daha uygun olmaktadır. Kimyasal katkı olarak ise N ve Ö1 katkılarının kullanılması önerilmektedir. Kullanılan katkıların dozajı 700-800

g/t olması daha uygun sonuçlar sağlayacaktır. Öğütme süresinin 60 veya 75 dakika olması daha uygun olmaktadır. En büyük en iyi ve en küçük en iyi yöntemlerine göre belirlenen malzeme özellikleri Tablo 4.27'de özetlenmiştir.

Optimizasyon sonucu elde edilen S/N oranları dikkate alınarak durabilite deneyleri için 4 farklı çimento belirlenmiştir. Belirlenen çimentolar Tablo 4.28'de verilmiştir. MAX grubunda yer alan çimentolar en büyük-en iyi (Maksimum eğilme ve basınç dayanımı, yayılma çapı), MİN grubunda yer alan çimentolar ise en küçük en-iyi (Minimum Büzülme davranışı, ağırlık kaybı, sülfat genleşmeleri, toplam karbon miktarı, su emme oranı ve maliyet) özelliklerini ifade etmektedir.

**Tablo 4 27.** Amaç fonksiyonlara göre optimum malzeme özellikleri

	En küçük - En iyi	En büyük - En iyi
Klinker	PÇ-1 / PÇ-2	PK / PÇ-2
Uçucu Kül Oranı (%)	15 / 25	5 / 15
Kimyasal Katkı	Ö1 / Ö2	N / Ö2
Kimyasal Katkı Dozajı (g/t)	600	700 / 800
Öğütme Süresi	60 / 75	60 / 75

**Tablo 4.28.** Durabilite deneylerinde kullanılacak çimentolar

	Klinker	Uçucu Kül (%)	Kimyasal Katkı	Katkı Dozajı (g/t)	Öğütme Süresi (dk)
MİN	PÇ-1	15	Ö2	600	75
	PÇ-2	25	Ö2	600	75
MAX	PK	15	N	700	75
	PÇ-2	5	N	700	75
Referans	PÇ-1	-	-	-	75
	PÇ-2	-	-	-	75
	PK	-	-	-	75

**Taguchi yöntemi kullanılarak üretilen çimentolar üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucu aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.**

- Çimento inceliği Blaine incelik tayini ve PSD analizi gibi iki farklı yöntem ile belirlenmiştir. Çimentoların öğütülmesi açısından düşük  $C_3A$  içeriğine sahip petrol kuyusu klinkeri ile üretilen çimentoların Blaine incelikleri yüksek ve ortalama tane boyutları daha küçük olmaktadır. Çimentolardaki  $C_3A$  içeriğinin azalması ve  $C_3S$  içeriğinin artması öğütülebilirliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu yüzden öğütme performansı açısından  $C_3S/C_3A$  oranının önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir.
- Uçucu kül içeriği arttıkça çimentoların Blaine incelik değerleri artarken ortalama tane boyutları azalmaktadır. Bu durum daha çok öğütmeden önce yüksek incelik değerine sahip uçucu külden kaynaklanmaktadır.
- Çimento tane boyutu ve incelik değerleri üzerinde etkili olan iki ana parametre uçucu kül oranı ve öğütme süresi olarak belirlenmiştir. Öğütme süresindeki artış çimento inceliklerini daha fazla arttırmaktadır. Öğütme süresinin sabit tutularak uçucu kül oranının artırılması çimento maliyetlerine olumlu katkı sağlayacaktır.
- Öğütme performansı açısından öğütme kolaylaştırıcı katkıların kullanılması mukavemet artırıcı katkılardan daha çok verim sağlamıştır. Öğütme kolaylaştırıcı katkıların özellikle 700-800 g/t dozaj ile uygulanması çimento inceliklerini arttırmaktadır.
- Öğütme süresindeki artış değirmen içerisindeki malzemelerin sıcaklığını arttırmaktadır. Bu etki öğütme kullanılan kimyasal katkıların özelliklerini etkilemektedir. Ancak laboratuvar ortamında yapılan öğütme işleminde endüstride karşılaşılan çimento sıcaklıklarına ulaşamadığı görülmüştür. Uçucu kül oranının artması ile birlikte çimento özgül ağırlıkları da azalmaktadır. Uçucu kül içeriği arttıkça çimentoların kıvam suyu miktarı ve priz başlangıç süreleri artış göstermektedir. Öğütme süresinin artması durumunda ise priz başlangıç süreleri kısalmaktadır.
- Taze harç özellikleri incelendiğinde uçucu kül oranı ana parametre olarak belirlenmiştir. Uçucu kül içeriğinin artması harçların işlenebilirliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yüksek inceliğe sahip uçucu külin tekrar öğütülmesi harçların taze

hal özelliklerini daha olumsuz etkilemektedir. Ayrıca öğütülebilirliği zor olan PÇ-2 klinkerinde üretilen çimentoların işlenebilirliği arttırdığı tespit edilmiştir. Çünkü PÇ-2 klinkerden üretilen çimentoların tane boyutu diğer çimentolara göre daha kaba kalmaktadır.

- Harçların büzülme özellikleri açısından uçucu kül için en ideal oran %15-25 olarak bulunmuştur. %5 ve %35 oranlarında uçucu kül kullanımı büzülmeyi arttırmaktadır. Öğütme kolaylaştırıcı katkıların büzülmeyi azalttığı da gözlenmiştir. PK ve PÇ-1 klinkerlerinden üretilen çimentolarda büzülme davranışı diğer çimentolara göre daha az olmuştur.
- Erken yaş dayanımı açısından en etkili parametre uçucu kül oranı olmaktadır. Uçucu kül içeriğinin artması erken yaş dayanımlarını azaltmaktadır. Ancak bu etki kür süresi ile birlikte azalmaktadır.
- Sodyum ve magnezyum sülfatın neden olduğu genleşmeler açısından klinker tipi ve öğütme süresi önemli parametreler olarak ön plana çıkmıştır. Sülfat dayanıklılığı için çimento dayanım sınıfının da önemli bir parametre olduğu gözlenmiştir. Kimyasal katkı dozajının artması ile çimento incelikleri artmakta ve burum da basınç dayanımlarına olumlu yönde etki etmektedir. Bu yüzden katkı dozajı da sülfat dayanıklılığı açısından dolaylı yoldan etki etmektedir. Uçucu kül oranı da aynı şekilde basınç dayanımını etkilediği için 2. dereceden önemli bir faktör olarak ön plana çıkmaktadır. %35 oranında uçucu kül kullanıldığı durumda CH oranının azaldığı ön görülmüş ancak bazı %35 uçucu kül katkılı çimentolarda yeterli dayanım oluşmadığı için (8 no'lu çimento) sülfattan etkilenme daha fazla olmuştur. Sülfat dayanıklılığı için %35 oranında uçucu kül kullanılan çimentolarda klinker tipi de etkili olmaktadır.
- Çimento maliyetinin ana girdisi olarak öğütme süresinin olduğu belirlenmiştir. Klinker tipi, öğütme katkısı tipi ve dozajının çimento maliyeti üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Bu yüzden yüksek öğütme sürelerinde uçucu kül gibi mineral katkıların kullanımı maliyetleri azaltmada etkili olmaktadır. Bu çalışma için gerçekleştirilen uçucu kül oranı %15-25 olarak belirlenmiştir.

## 5. DURABİLİTE DENEYLERİ

Bölüm 4.13'de yer alan amaç fonksiyonlara göre yapılan optimizasyon sonucu elde edilen S/N (signal/noise) oranları dikkate alınarak durabilite deneyleri için 4 farklı çimento belirlenmiştir. Belirlenen çimentolar Tablo 5.1'de verilmiştir. Dört uçucu kül katkılı çimento dışında üç adet referans çimento olmak üzere 7 farklı çimento ile durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 5.1.** Durabilite deneylerinde kullanılan çimentolar

	Klinker	Uçucu Kül (%)	Kimyasal Katkı	Katkı Dozajı (g/t)	Öğütme Süresi (dk)
MIN	PÇ-1	15	Ö2	600	75
	PÇ-2	25	Ö2	600	75
MAX	PK	15	N	700	75
	PÇ-2	5	N	700	75
Referans	PÇ-1	-	-	-	75
	PÇ-2	-	-	-	75
	PK	-	-	-	75

Hazırlanan çimentolarda öğütme süreleri sabit olduğu için kısaltmalarda gösterilmemiştir. Çimentoların gösteriminde ilk bölüm uçucu kül oranını ikinci bölüm ise klinker türünü göstermektedir. Üçüncü bölümde kimyasal katkı dozajı en sonda ise kimyasal katkı türü gösterilmiştir. Çimento kısaltmalarına ait örnek aşağıda verilmiştir. Ayrıca üretilen çimentoların simgesel gösterimi ise Tablo 5.2'de verilmiştir. Diğer bölümde kullanılan PÇ-1, PK ve PÇ-2 simgeleri bu bölümde değiştirilmiştir. PÇ-1 simgesi P, PK simgesi O ve PÇ-2 simgesi C olarak gösterilmiştir. Ö2 öğütme kolaylaştırıcı katkı, N ise nihai yaş dayanım artırıcı katkı olarak tanımlanmıştır.

Uçucu kül (%) → 15 P 600 Ö ← Katkı türü  
Klinker tipi – Katkı dozajı

**Tablo 5.2.** Çimentolar için kullanılacak simgesel gösterimler

Klinker	Uçucu Kül (%)	Kimyasal Katkı	Katkı Dozajı (g/t)	Kısaltma
PÇ-1 (P)	15	Ö2	600	15P600Ö
PÇ-2 (C)	25	Ö2	600	25C600Ö
PK (O)	15	N	700	15O700N
PÇ-2	5	N	700	5C700N
PÇ-1	-	-	-	P
PÇ-2	-	-	-	C
PK	-	-	-	O

Çimento harçları üzerinde durabilite deneyleri yapılmadan önce çimentoların incelik, özgül ağırlık, priz süresi ve kıvam suyu tayini deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taze çimento harçları üzerinde yayılma çapları da belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler Taguchi optimizasyonu ile elde edilen tahmini değerler ile karşılaştırılmıştır.

### 5.1. Kompoze Çimentoların İncelikleri

Çimentoların inceliklerinin belirlenmesinde Bölüm 3.2.2.2'de belirtilen lazer tane dağılımı (PSD) ve Blaine metodu olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Çimentolara ait PSD analizi ve Blaine incelikleri deneysel ve tahmini olarak Tablo 5.3'de sunulmuştur.



**Tablo 5.3. Çimentoların incelikleri**

Çimento	Blaine İnceliği (cm <sup>2</sup> /g)		Ortalama Tane boyutu (µm)	
	Deneysel	Tahmini	Deneysel	Tahmini
15P600Ö	8170	8560	14.45	17.1
25C600Ö	8545	8720	12.08	13.95
15O700N	8240	8455	14.94	16.88
5C700N	6800	6880	21.10	25.41
P	2940	-	36.20	
C	2730	-	39.50	
O	3590	-	24.43	

Tablo 5.3'de görüldüğü gibi uçucu kül oranının artması sonucunda Blaine incelik değerleri artarken ortalama tane boyutu değerleri azalmaktadır. Öğütme kolaylaştırıcı katkı dozajının 600 g/t olmasına rağmen 700 g/t mukavemet arttırıcı katkı kullanılan çimentolara yakın incelikte çimentolar elde edilmiştir. Bu durumda mukavemet arttırıcı katkı ile aynı incelikte çimento üretmek için daha fazla katkı (700g/t) kullanılması gerekmektedir.

75 dakika öğütme süresi sonucunda elde edilen C<sub>3</sub>A içeriği oldukça düşük olan petrol kuyusu çimentosu klinkeri ile üretilen çimentoların (O ve 15O700N) oldukça ince taneli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

## **5.2. Kompoze Çimentoların Özgül Ağırlıkları**

Çimentoların özgül ağırlıkları Bölüm 3.2.2.3'de belirtilen standarta göre gerçekleştirilmiştir. Çimentoların özgül ağırlıkları deneysel ve tahmini olarak Tablo 5.4'de verilmiştir. Tablo 5.4'de görüldüğü gibi uçucu kül oranı arttıkça özgül ağırlık değerleri de azalmaktadır.

**Tablo 5.4.** Çimentoların özgül ağırlıkları

Çimento	Özgül Ağırlık	
	DeneySEL	Tahmini
15P600Ö	3.01	2.99
25C600Ö	2.85	2.89
15O700N	3.01	3.02
5C700N	3.05	3.07
P	3.14	-
C	3.14	-
O	3.15	-
UK	1.97	-

### 5.3. Kompoze Çimentoların Kıvam Suyu ve Priz Süreleri

Çimentoların priz süreleri ve kıvamları Bölüm 3.2.2.4 yer alan standartlara göre gerçekleştirilmiştir. Çimentoların kıvam suyu ve priz süreleri Tablo 5.5’de sunulmuştur.

**Tablo 5.5.** Çimentoların kıvam suyu ve priz süreleri

Çimento	Priz Baş. Süresi (dk)		Priz Sonu Süresi (dk)		Kıvam suyu (%)	
	DeneySEL	Tahmini	DeneySEL	Tahmini	DeneySEL	Tahmini
15P600Ö	285	300	355	340	30.26	33.05
25C600Ö	290	300	360	355	32.4	35.66
15O700N	275	285	325	325	31.42	32.55
5C700N	275	270	340	305	28.85	29.31
P	185	-	375	-	25.33	-
C	175	-	365	-	24.75	-
O	200	-	375	-	25.81	-

Tablo 5.5’de görüldüğü gibi uçucu kül oranının artması priz başlangıç sürelerini ve kıvam suyu miktarlarını arttırmaktadır. Kıvam suyundaki artışında priz sürelerini

uzattığı belirlenmiştir Nihai yaş dayanımı üzerinde etkili olan N katkısı ile üretilen çimentoların priz sürelerinin daha kısa olduğu belirlenmiştir.

#### 5.4. Kompoze Çimento Harçlarının Kıvam (Taze Harç) Özellikleri

Harçların taze hal özellikleri Bölüm 3.2.2.5. dikkate alınarak belirlenmiştir. Harçların taze hal özellikleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

**Tablo 5.6.** Çimento harçlarının taze hal özellikleri

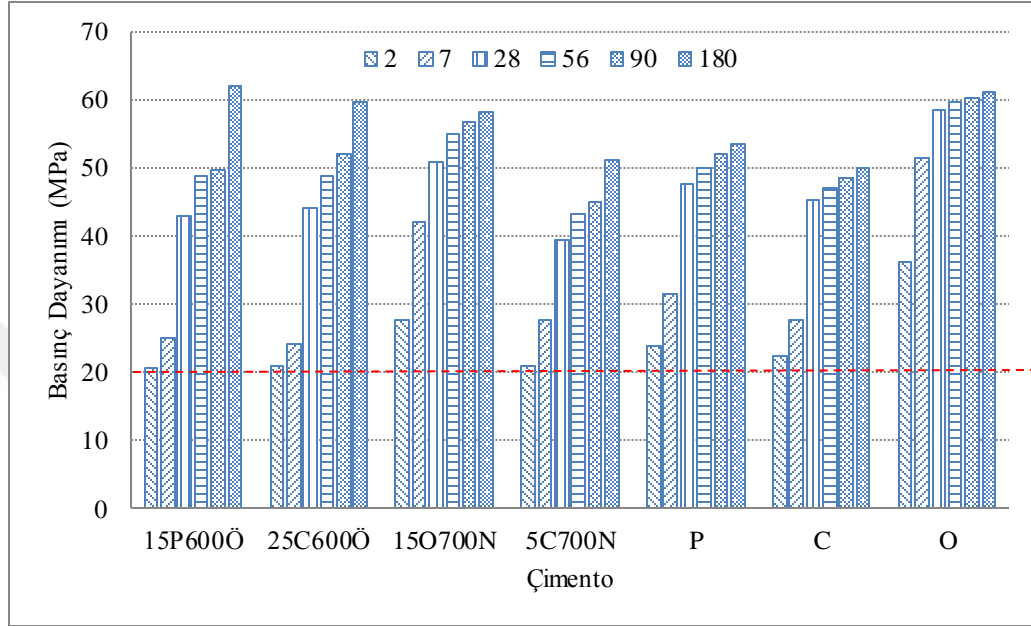
Çimento	Yayılma Çapı (mm)	
	Deney	Tahmin
15P600Ö	117	122
25C600Ö	120	125
15O700N	111	113
5C700N	132	135
P	125	
C	145	
O	129	

Uçucu kül oranının artması ile birlikte harçların taze hal özellikleri genellikle olumsuz etkilenmektedir. Uçucu külün yüksek Blaine değerine sahip olması yayılma çaplarını azaltan önemli bir faktör olmuştur. Ancak C çimentosu ile üretilen harçların yayılma çapının diğer harçlara göre %12.5 daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sebeple 25C600Ö çimentosunun uçucu kül oranı %25 olmasına rağmen 120 mm yayılma çapına sahip olmaktadır. Bu durum çimento üretiminde kullanılan klinkerden kaynaklanmaktadır.

#### 5.5. Kompoze Çimentoların Mekanik Özellikleri

Çimento harçlarının mekanik özellikleri Bölüm 3.2.2.6'de yer alan kuralara göre belirlenmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde 2, 7, 28, 56, 90 ve 180. günlerde basınç ve

eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Uçucu kül katkılı ve katkısız çimento harçlarının basınç dayanımları Şekil 5.1’de verilmiştir.



**Şekil 5.1.** Çimento harçlarına ait basınç dayanımları

Uçucu kül katkılı çimentoların 2 günlük basınç dayanımları 20 MPa değerini sağlamaktadır. O klinkerinin %15 uçucu kül ile birlikte kullanılması (15O700N) 2 günlük basınç dayanımlarını referans klinkere göre %23.8 oranında azaltmaktadır. P klinkeri ile %15 oranında uçucu kül kullanılması 2 günlük basınç dayanımını referans çimentoya göre %15.5 oranında azaltmıştır. C klinkeri diğer klinkerlere göre daha zor öğütülmesinden dolayı çimento dayanımlarını etkilemektedir. %5 oranında uçucu kül ile C klinkeri kullanılarak üretilen çimentoların 2 günlük basınç dayanımı %25 uçucu kül kullanılan çimentolara benzer özellikler göstermiştir. Öğütülmesi zor olan C klinkerindeki oranın azalması sonucu uçucu kül oranı artmakta ve uçucu külün filler etkisi ile dayanım kaybı azaltılmıştır. Referans çimentolarda ise  $C_3S$  oranı yüksek O klinkerinin 2 günlük basınç dayanımları diğer referans çimentolardan daha yüksek olmuştur. Blaine incelik değeri C

çimentosuna göre nispeten daha yüksek olan B çimentosunun 2 günlük basınç dayanımları daha yüksek olmaktadır.

7 günlük basınç dayanımları açısından 15P600Ö ve 25C600Ö çimentolarının benzer özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Referans çimentolar karşılaştırıldığında P çimentosunun 7 günlük dayanımı C çimentosuna göre %11.9 oranında daha fazladır. Kimyasal katkı türü ve dozajının aynı olmasına rağmen uçucu kül oranındaki artış 25C600Ö çimentosunun dayanım kaybını engellemiştir. Ayrıca C klinkeri ile üretilen 5C700N çimentosunda uçucu kül oranının %5 olmasından dolayı 7 günlük basınç dayanımlarını arttırmıştır. O klinkeri ile üretilen 15O700N çimentosu yüksek C<sub>3</sub>S içeriğinden dolayı basınç dayanımlarını diğer çimentolara göre oldukça arttırmaktadır.

7 günlük basınç dayanımlarında olduğu gibi 15P600Ö ve 25C600Ö çimentoları 28 günlük basınç dayanımları açısından da benzer özellikler göstermektedir. Ancak %5 uçucu kül ile üretilen 5C700N çimentosunun 28. günde diğer çimentolara göre dayanım olarak yetersiz olduğu görülmektedir. 5C700N çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı 42.5 MPa değerinin altında kalmıştır. 5C700N çimentosunda nihai yaş dayanım arttırıcı katkı kullanılmasına rağmen kimyasal katkının etkileri görülmemiştir. Burada etkili olan asıl parametre ise C klinkerinin öğütülebilirliğinin zor olmasıdır. Bu yüzden 5C700N çimentosu 42.5 R dayanım sınıfını sağlayamamıştır. Nihai yaş dayanım arttırıcı katkının etkileri 15O700N çimentosunda belirgin olarak ortaya çıkmıştır. 15O700N çimentosunun 28 günlük basınç dayanımı 7 günlük basınç dayanımına göre %21.5 oranında artış göstermiştir. O klinkeri ile üretilen çimentoların C<sub>2</sub>S içeriğinin diğer çimentolardan daha düşük olmasından dolayı kimyasal katkının bu süreçte etkisi olumlu olmuştur. Referans çimentolarda ise C<sub>3</sub>S içeriği ve Blaine incelik değeri yüksek olan O çimentosu 28 günlük basınç dayanımları açısından 52.5 MPa değerini geçmiştir.

56 günlük basınç dayanımları incelendiğinde 15P600Ö ve 25C600Ö çimentoları benzer özellik göstererek yaklaşık 50 MPa değerine ulaşmıştır. 5C700N çimentosu ise

42.5 MPa standart sınır değerini ancak 56. günde sağlamıştır. diğer deney günlerinde olduğu gibi 15O700N çimentosu uçucu kül katkılı çimentolar arasında en iyi performansı göstermiştir.

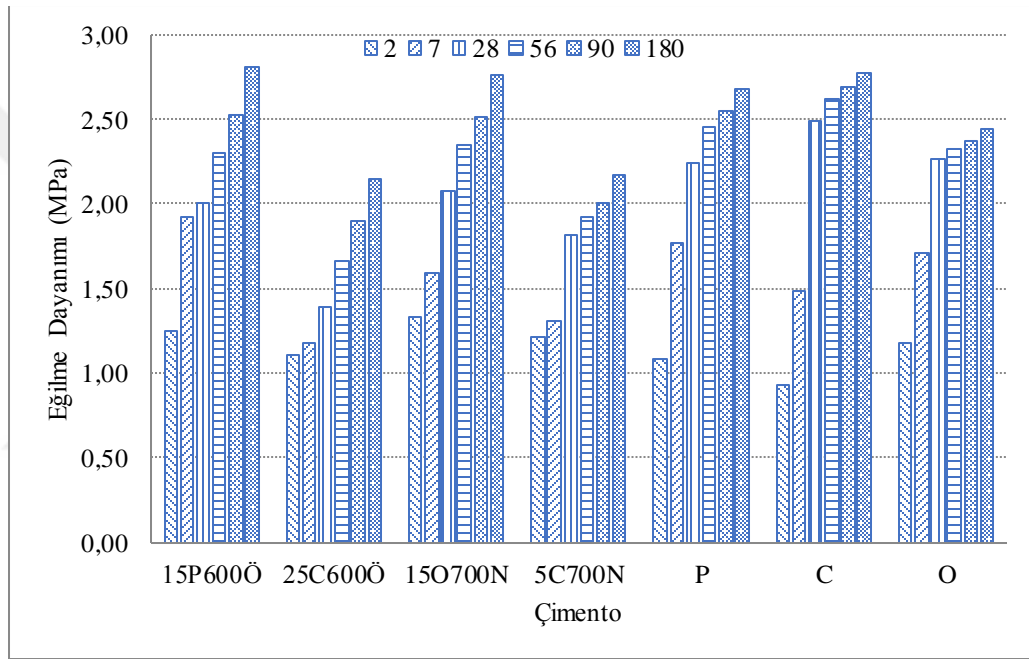
90 günlük basınç dayanımlarında uçucu kül oranının artması puzolanik aktivite etkisi nedeniyle olumlu katkı sağlamıştır. Özellikle 15P600Ö ve 25C600Ö çimentoları ile yaklaşık 50 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir. 5C700N çimentosunda ise düşük bir oranda dayanım artışı elde edilmiştir.

15P600Ö çimentosu 90. günden sonra büyük bir dayanım artışı sağlayarak 180. gününde 60 MPa üzeri bir değer elde edilmesini sağlamıştır. 25C600Ö çimentosu da puzolanik aktivite etkisi ile yaklaşık 60 MPa değerini sağlamaktadır. 15O700N çimentosu 180 günlük dayanımlar açısından yüksek bir dayanım artışı sağlamamaktadır.  $C_3S$  içeriği yüksek olan O klinkerinden elde edilen 15O700N çimentosunda açığa çıkan  $Ca(OH)_2$  daha erken yaşlarda tüketilmesinden dolayı dayanım kazanma hızı 56. günde azalmaktadır. Referans çimentolarda ise 28. günden itibaren dayanım kazanma hızı uçucu kül katkılı çimentolar kadar artış göstermemiştir.

Uçucu kül katkılı ve katkısız çimento harçlarının eğilme dayanımları Şekil 5.2'de verilmiştir.

Çimento harçlarının eğilme dayanımları basınç dayanımlarına benzer özellikler göstermektedir. Kür seresinin artması sonucunda eğilme dayanımları artmaktadır. 28 günlük eğilme dayanımı açısından uçucu kül kullanılmayan referans çimentolar daha üstün performans göstermektedir. Ancak 2 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde uçucu kül katkılı çimento harçlarında daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. 180. günde %15 oranında uçucu kül kullanılan 15P600Ö ve 15O700N çimentoları eğilme dayanımları için benzer özellikler göstermektedir. %25 uçucu kül kullanılan 25C600Ö çimento ile %5 uçucu kül kullanılan 5C700N çimentosu 180. günde eğilme dayanımları açısından benzer

özellikler göstermektedir. Yüksek oranda uçucu kül kullanılan ve Blaine incelik değeri düşük olan çimentoların eğilme dayanımları daha düşük değerlere sahip olmuştur. O klinkeri ile üretilen referans çimentosunun 180. gündeki basınç dayanımı en yüksek olmasına rağmen eğilme dayanımı açısından aynı özelliği göstermemiştir. 180. günde en düşük basınç dayanımına sahip olan C referans çimentosu eğilme dayanımı açısından ise en yüksek dayanım değerine ulaşmıştır.

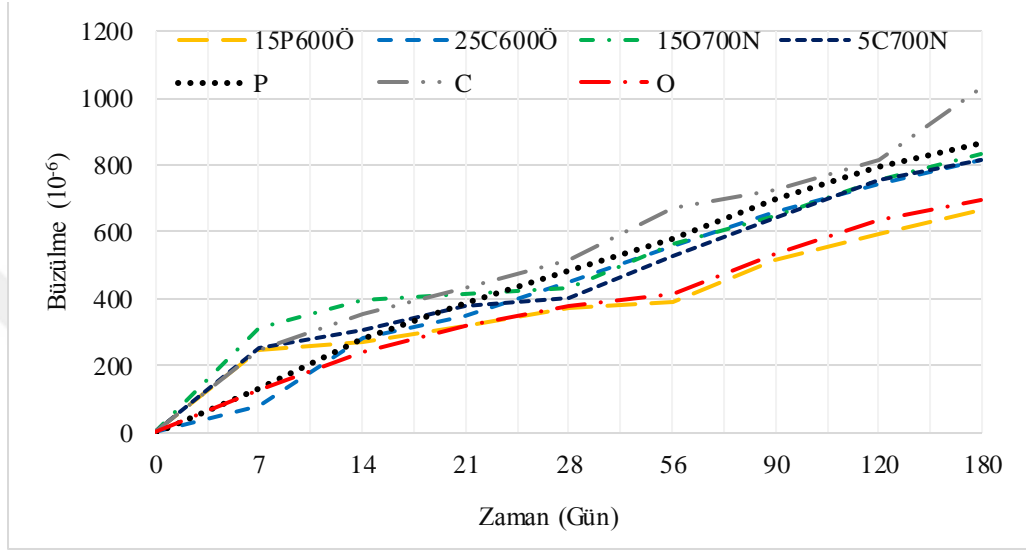


Şekil 5.2. Çimento harçlarına ait eğilme dayanımları

### 5.6. Kompoze Çimento Harçlarının Kuruma Büzülmesi Özellikleri

Çimentoların kuruma büzülmesi özellikleri Bölüm 3.2.2.8'e göre belirlenmiştir. Kuruma büzülmesi için hazırlanan numuneler 7 gün uygulanan su küründen sonra atmosfer koşullarında bekletilmektedir. Bu sürenin sonunda 4, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 90 ve 180. günlerde numunelerin boyları tekrar ölçülerek boy değişimleri belirlenmiştir. 7 gün uygulanan su küründen sonra atmosfer koşullarında bekletilen harçların boy değişimleri Şekil 5.3'de sunulmuştur.

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi harçlarda uygulanan 7 günlük su küründen sonra açık havada bekletme işlemi büzülme olayını oluşturmuştur. Tüm harçlarda büzülmenin zamanla arttığı görülmektedir.



**Şekil 5.3.** 7 gün sonunda oda koşullarında bekletilen çimento harçlarının büzülme özellikleri

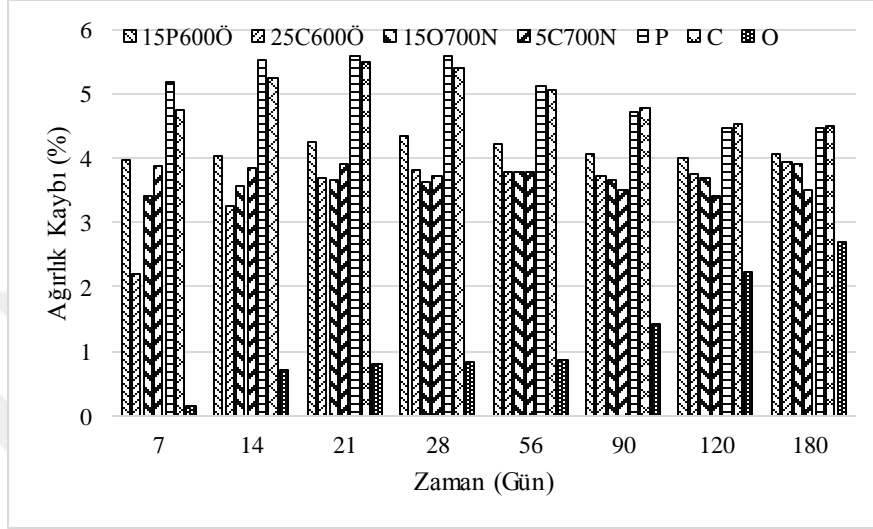
Şekil 5.3’de 25C600Ö ve 5C700N çimentoları 14. günden itibaren benzer özellikler göstermiştir. Özellikle 180. günde çimentoların büzülme değerleri yaklaşık  $800 \times 10^{-6}$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca 15O700N çimentosu da büzülme davranışı olarak 180. gün sonunda  $800 \times 10^{-6}$  değerine ulaşmıştır. 15P600Ö çimentosu diğer çimentolara göre daha az büzülme özelliği göstermiştir. 15P600Ö çimentosunun 180. gündeki büzülme değeri yaklaşık  $660 \times 10^{-6}$  olmuştur. Referans çimentolarda ise O çimentosu diğer çimento türlerine göre daha az büzülme davranışı göstermiştir. Özellikle 28. günden sonra büzülme davranışı büyük oranda artış göstermiş ve 180. günde yaklaşık  $750 \times 10^{-6}$  değerine ulaşmıştır. P ve C çimentolarının ise 180. gündeki büzülme değerleri sırasıyla  $860 \times 10^{-6}$  ve  $700 \times 10^{-6}$  olarak ölçülmüştür. Büzülme değerleri incelendiğinde referans çimentolardaki dayanım artışı harç bünyelerinde daha fazla büzülme yol açmıştır.



Uçucu kül ve kimyasal katı kullanımı büzülme değerlerini azaltmayı sağlamıştır. Büzülme değeri düşük olan O referans çimentosunun büzülme davranışı %15 uçucu kül kullanımı ile artış göstermiştir. Taguchi serisinde yer alan çimentolar üzerinde yapılan büzülme deneylerinde %5 ve 35 oranında uçucu kül kullanımı büzülmeyi arttırmaktadır. %35 oranında uçucu kül kullanımı harçların işlenebilirliğini azaltmakta ve daha boşluklu harçların oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum harç bünyesindeki suyun kolay buharlaşmasını sağlamaktadır. %5 oranında uçucu kül kullanımı ise kapiler boşlukların tam kapanmamasından dolayı suyun buharlaşmasını azaltmamaktadır. Ancak büzülme açısından %15 ve 25 oranında uçucu kül kapiler boşlukların azalmasını sağlarken harçlar içinde işlenebilirlik bakımından optimum oran olmuştur. Bu durum harçların büzülmelerini azaltmada etkili olmuştur. Diğer çimentolara göre inceliği daha düşük olan C referans çimentosunun büzülme değeri daha düşük olmuştur. Bu durum C çimentosunda hidrasyonun daha yavaş olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 5.4'de 7 günlük kür işlemi sonrasında açık havada bekletilen harçların zamana bağlı ağırlık kayıpları verilmiştir. Kür sürecinden sonra oda koşullarında bekletilen numunelerden O çimentosu diğer çimentolardan oldukça farklı bir özellik göstermiştir. O referans çimentosunun ağırlık kaybı diğer çimentolara göre daha az olmuştur. Bu olayın nedeni hidrasyonu hızlı olan O çimentosunun suyu hızlı bir şekilde hidrasyon aşamasında kullanarak yeni ürünler oluşturmasından kaynaklanmaktadır. O çimentosunun 180. günde ağırlık kaybı yaklaşık %2.5 değerinde olmuştur. C ve P referans çimentolarında ise 28. güne kadar ağırlık kaybı gerçekleşmiş daha sonrasında harçların ağırlıklarında bir miktar artış gözlenmiştir. Uçucu kül katkılı çimentolar 56. günden itibaren benzer özellikler göstermiş ve 180. gündeki ağırlık kayıpları %2.55-2.85 değerleri arasında değişmektedir. Uçucu kül kullanılması harçların ağırlık kayıplarını bir miktar azaltmıştır. Çimento üretiminde kullanılan klinker tipleri uçucu kül kullanılarak üretilen kompoze çimentolarında davranışını etkilemektedir. O referans çimentosunun daha yavaş su kaybetmesi büzülme davranışı ve ağırlık kaybını azaltmıştır. Oluşan bu etki petrol kuyusu klinkerinin yüksek  $C_3S$  içeriğinden dolayı daha hızlı hidrasyon göstermesi ile

ilişkilendirilmiştir. Hidratasyonun hızlı oluşması pasta bünyesindeki buharlaşan su miktarını azaltırken buharlaşmayan su miktarı arttırmıştır.

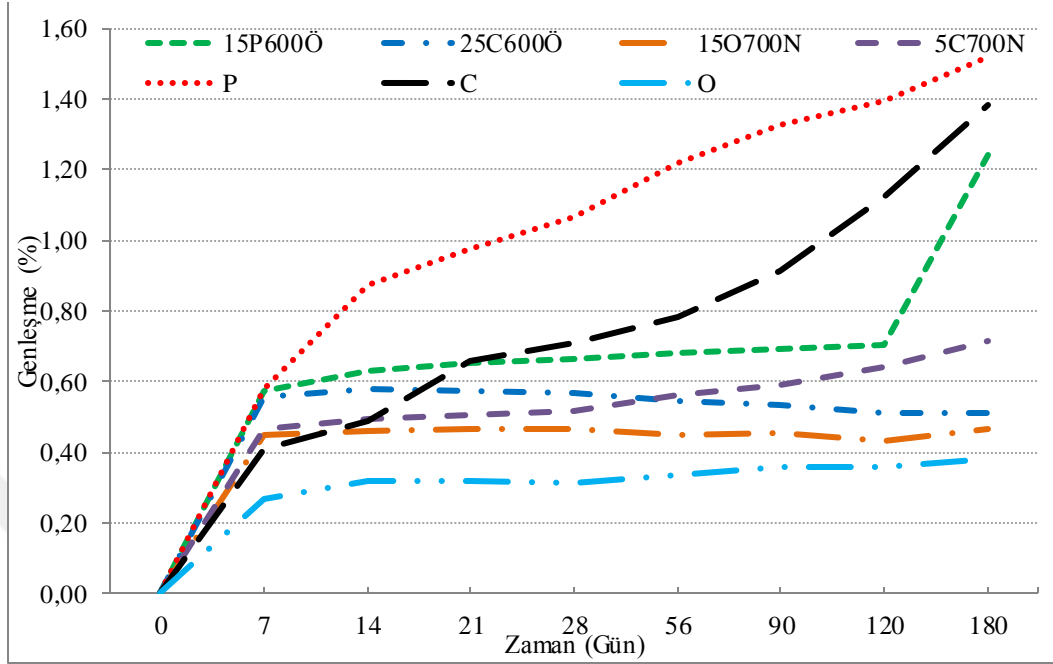


Şekil 5.4. Oda koşullarında bekletilen harçların ağırlık değişimleri

### 5.7. Kompoze Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığı

Numuneler Bölüm 3.2.2.9'da yer alan kurallara göre hazırlanmıştır. Sülfatlı ortamda bekletilen numunelerin 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 90 ve 180. günlerde boyları tekrar ölçülerek genişleme oranları belirlenmiştir. Su kuru tamamlanan 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler 30, 90 ve 180 gün sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Belirlenen deney günlerinde harçların mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

Şekil 5.5'de %5'lik Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen harçların zamana bağlı boy değişimleri verilmiştir.



**Şekil 5.5.** Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen harçların zamana bağlı boy değişimleri

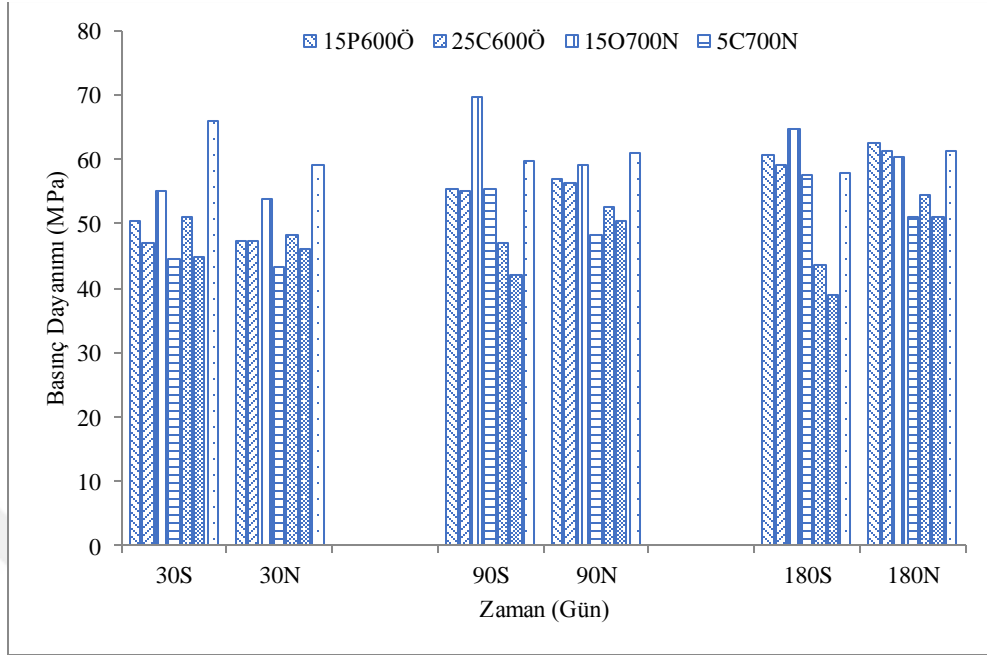
Harçların 56 günlük kür sürecinden sonra ilk boy okumaları dijital komparatör ile yapılmıştır. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içerisinde bekletilen P referans çimentosunda 180 gün sonunda %1.54 gibi oldukça yüksek bir genleşme değeri belirlenmiştir. Çimentolar içerisinde en fazla C<sub>3</sub>A içeriğine sahip olan P çimentosunun Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde oldukça fazla genleşme göstermiştir. Ayrıca P klinkeri ile %15 uçucu kül kullanılarak üretilen 15P600Ö çimentosunda da diğer kompoze çimentolara göre yüksek genleşme değerleri belirlenmiştir. 15P600Ö çimentosunda 180. günde yaklaşık %1.24 değeri ile genleşme olduğu tespit edilmiştir. Ancak P klinkerinde %15 uçucu kül kullanımı 180 günlük maksimum genleşme değerini %44.4 oranında azaltmıştır. C<sub>3</sub>A içeriği yüksek olan diğer klinkerden üretilen C referans çimentosu ve 5C700N çimentosunun da 180 günlük genleşme değerleri %1.38-0.78 arasında değişmektedir. Ancak C klinkerinde de %25 oranında uçucu kül (25C600Ö) kullanılması durumunda genleşmenin %0.51 ile kısıtlandığı görülmüştür. Yüksek C<sub>3</sub>A içeriğine sahip çimentolarda %15 ve 25 oranlarında uçucu kül kullanımı çimentolarda genleşme değerlerini azaltmıştır. C<sub>3</sub>A içeriği düşük olan

O klinkerinden elde edilen çimentoların ise 180 gün boyunca genişleme değerleri %0.38 olmuştur. O klinkerinde kullanılan %15 uçucu külün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisi ile oluşan genişlemede çok büyük bir katkısı tespit edilememiştir.  $\text{C}_3\text{A}$  içeriği yüksek olan klinkerlerde uçucu kül kullanılması durumunda sodyum sülfat genişmeleri azalmaktadır.

Şekil 5.6'da 30, 90 ve 180. gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  içerisinde bekletilen harçların basınç dayanımları verilmiştir. N harfi normal kür şartlarında (kirece doymun su) bekletilen numuneleri, S harfi ise  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisi içerisindeki numuneleri göstermektedir.

Uçucu kül katkılı çimentoların 30 gün süre ile  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde bekletilmesi basınç dayanımlarında büyük bir değişim yaratmamıştır. Ancak P ve O referans çimentolarında  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  içerisinde 30 gün süre ile bekletme süreci normal kür şartlarına göre dayanım artışı sağlamıştır. Özellikle O referans çimentosunda  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisi ile %11.9 oranında dayanım artışı elde edilmiştir.

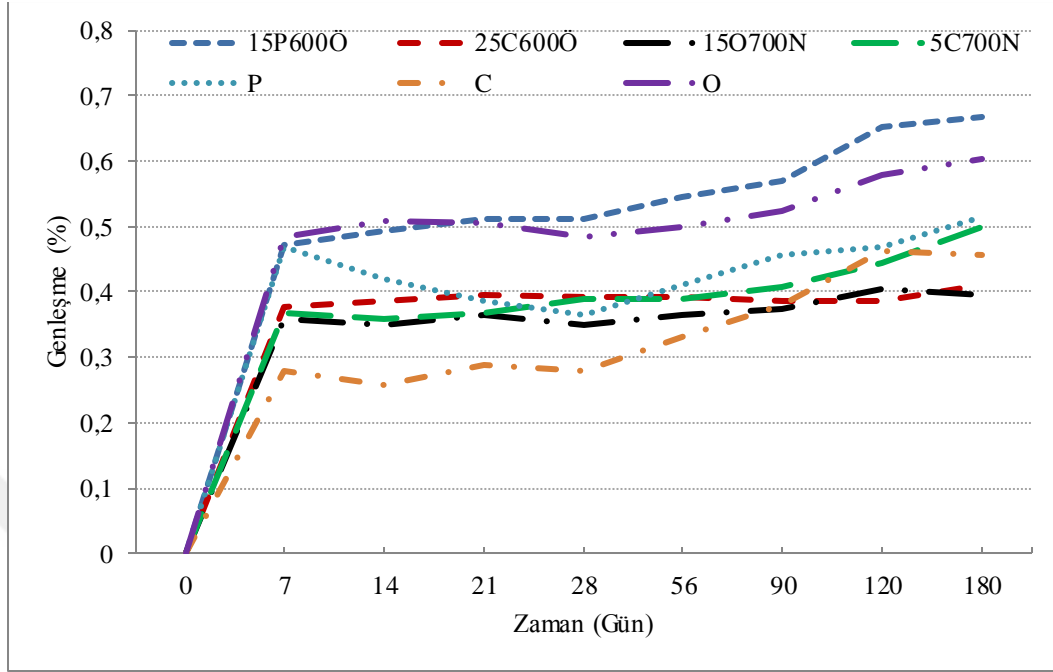
90 gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  içerisinde bekletilen harçların bazılarında dayanım kaybı başlarken bazılarında ise dayanım artışı gözlenmiştir. 15P600Ö çimentosunun 90 gün  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde bekletilmesi sonucunda %3.5 oranında dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Bu değer 25C600 çimentosunda %1.8 olarak belirlenmiştir. 15O700N ve 5C700N çimentolarında ise 90 günlük  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisi dayanım artışı sağlamıştır. Özellikle 15O700N çimentosunun normal kür şartlarına göre basınç dayanımı yaklaşık %17 oranında artmıştır. Bu değer 5C700N çimentosunda ise yaklaşık %14 olarak belirlenmiştir. 90 günlük  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisine göre uçucu kül kullanımını sayesinde dayanım kaybı oldukça azaltılmış hatta dayanım artışları elde edilmiştir. Referans çimentolarda ise özellikle P ve C çimentolarında %10-16 arasında dayanım kaybı gerçekleşmiştir. O referans çimentosunda oluşan dayanım kaybı ise ihmal edilebilir derecededir.



**Şekil 5.6.** Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz harçların basınç dayanımları

180 gün boyunca Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz harçların basınç dayanımı Şekil 5.6'da görülmektedir. 180 gün ve 90 gün Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkileri benzer özellikler göstermektedir. 5C700N ve 15O700N çimentolarında dayanım artışları gerçekleşirken 15P600Ö ve 25C600Ö çimentolarında dayanım kaybı oluşmuştur. Çimentolarda meydana gelen dayanım artışı alkali sülfat tuzlarının uçucu külü aktive etmesi ile açıklanmaktadır. Referans çimentolarda ise 180 günlük Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi dayanım kaybına yol açmıştır. Ancak O referans çimentosunda oluşan dayanım kaybı oranı %5.5 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül kullanımı sülfat direnci bakımından oldukça olumlu katkılar sağlamıştır.

Şekil 5.7'de %5'lik MgSO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen harçların zaman bağlı boy değişimleri sunulmuştur.

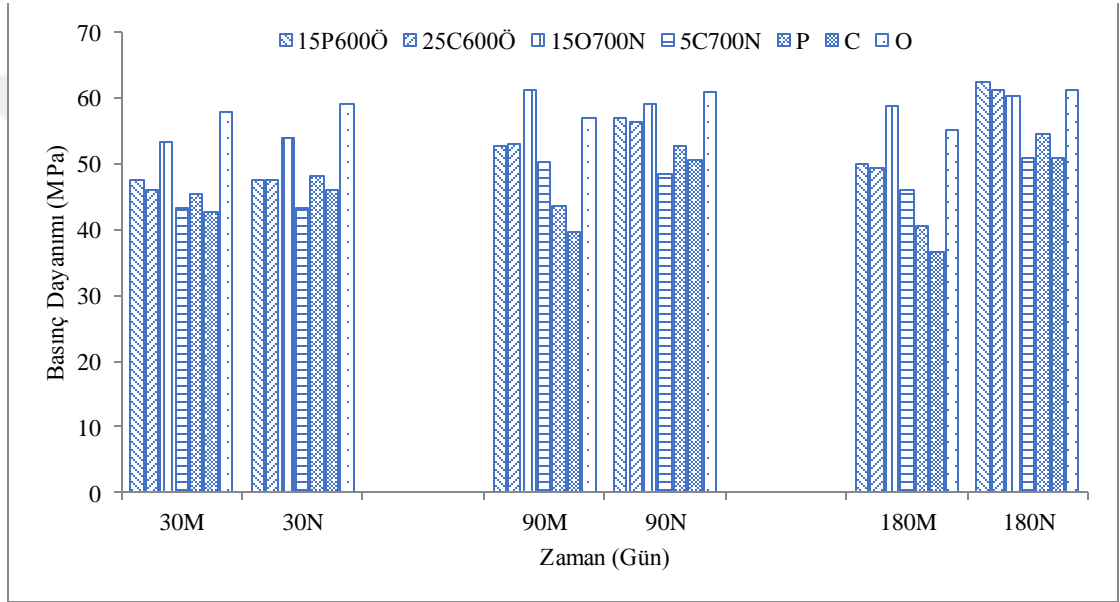


Şekil 5.7. MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz harçların zamana bağlı boy değişimleri

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi MgSO<sub>4</sub> etkisine maruz harçlarda ilk 7 günde büyük oranda bir genleşme gerçekleşmiştir. Bu süreden sonra genleşme hızı yavaşlamış ancak zamanla artış göstermiştir. Ayrıca MgSO<sub>4</sub> etkisinde bekletilen harçların Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içerisinde bekletilen harçlar kadar genleşme göstermediği belirlenmiştir. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisinde olduğu gibi MgSO<sub>4</sub> etkisinde de P klinkerinden üretilen P referans çimentosu ve 25P600Ö çimentoları en fazla genleşme gösteren numuneler olmuştur. C<sub>3</sub>A içeriği düşük olan O referans çimentosunun 180. günde %0.61 genleşme değerine sahip olduğu belirlenmiştir. C<sub>3</sub>A içeriği düşük olmasına rağmen magnezyum sülfat etkisinde yüksek genleşme değeri göstermesinin nedeni M-S-H oluşumuna bağlanmaktadır. O referans çimentosundaki C<sub>3</sub>S içeriğinin fazla olması daha fazla CH oluşumuna sebep olmakta bu durumda magnezyum sülfat dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca C<sub>3</sub>A içeriği yüksek C referans çimentosu MgSO<sub>4</sub> etkisinde beklenenden daha az genleşme özelliği göstermiştir. C klinkerinin %25 uçucu kül ile birlikte kullanılması durumunda genleşme değerleri daha da azaltılmıştır. MgSO<sub>4</sub> etkisinde en iyi performansı 15O700N çimentosu göstermiştir. O

klinkerinin yüksek  $C_3S$  içeriği CH miktarını arttırmakta ve bu durum magnezyum sülfat dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir. Uçucu külün CH ile reaksiyona girme özelliği magnezyum sülfat dayanıklılığını arttırmaktadır.

Şekil 5.8'de  $MgSO_4$  içerisinde bekletilen harçların 30, 90 ve 180. gündeki basınç dayanımları verilmiştir. M harfi  $MgSO_4$  içerisinde bekletilen harçları göstermektedir.



Şekil 5.8.  $MgSO_4$  etkisine maruz harçların basınç dayanımları

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi 30 gün  $MgSO_4$  çözeltisinde bekletme işlemi uçucu kül katkılı harçlara çok zarar vermemiştir.  $MgSO_4$  etkisinden daha çok P ve C referans çimentoları etkilenmiştir. 30 günlük  $MgSO_4$  etkisi P çimentosunda %6.3, C çimentosunda ise %7.2 oranında dayanım kaybına yol açmıştır. Bu değer O çimentosunda %3.4 olarak belirlenmiştir.

90 gün süre ile  $MgSO_4$  etkisine maruz harçlarda  $Na_2SO_4$  etkisine benzer sonuçlar gözlenmiştir. 15P600Ö ve 25C600Ö çimentolarında dayanım kaybı meydana gelirken,

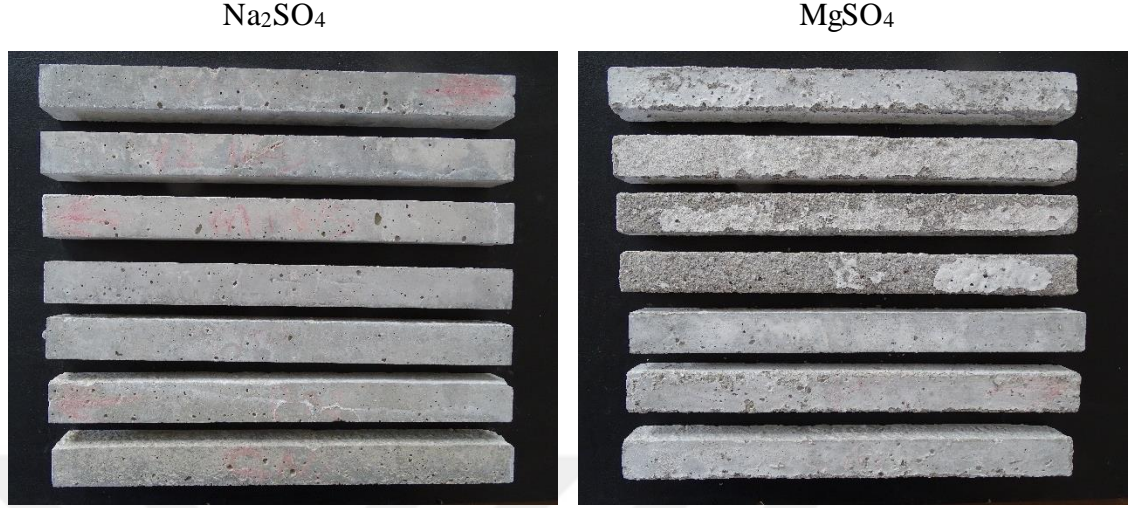
15O700N ve 5C700N çimentolarında dayanım artışı elde edilmiştir. 15P600Ö çimentosunda %7.7 oranında, 25C600Ö çimentosunda ise %5.4 oranında dayanım kaybı oluşmuştur. 15O700N çimentosunda %3.4 oranında, 5C700N çimentosunda ise %3.9 oranında dayanım artışı gözlenmiştir. 90 günlük  $MgSO_4$  etkisi daha çok referans çimentoları etkilemiştir. P ve C çimentolarında sırasıyla %17.7 ve %21.7 oranında dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Bu değer O çimentosunda ise %7.1 olarak belirlenmiştir.

180 gün boyunca  $MgSO_4$  etkisine maruz harçların basınç dayanımları azalmıştır. Dayanım kaybı oranı uçucu kül katkılı kompoze çimentolarda daha az olmaktadır. En fazla dayanım kaybı 15P600Ö çimentosunda %20.1 değeri ile ölçülmüştür.  $MgSO_4$  etkisi daha çok referans çimentoları etkilemiş ve daha fazla dayanım kaybına yol açmıştır. Özellikle C referans çimentosunda %28.5 oranında dayanım kaybı gerçekleşmiştir. O referans çimentosunda bu oran yaklaşık %10 olarak belirlenmiştir.

$Na_2SO_4$  etkisi harçların bünyesinde daha çok genleşme oluştururken,  $MgSO_4$  etkisi ise dayanım kaybına yol açmaktadır. Ancak uçucu kül kullanımı ile birlikte çimentoların sülfat dayanıklılığı geliştirilmektedir. Özellikle yüksek  $C_3A$  içeriğine sahip çimentolar için uçucu kül kullanımı çok yararlı olmaktadır.

Şekil 5.9'da  $Na_2SO_4$  ve  $MgSO_4$  içerisinde bekletilen referans çimento harçlarının fiziksel görünümleri verilmiştir (180. gün).  $MgSO_4$  etkisine maruz harçlarda gözlemsel olarak bozulma olduğu görülmektedir.





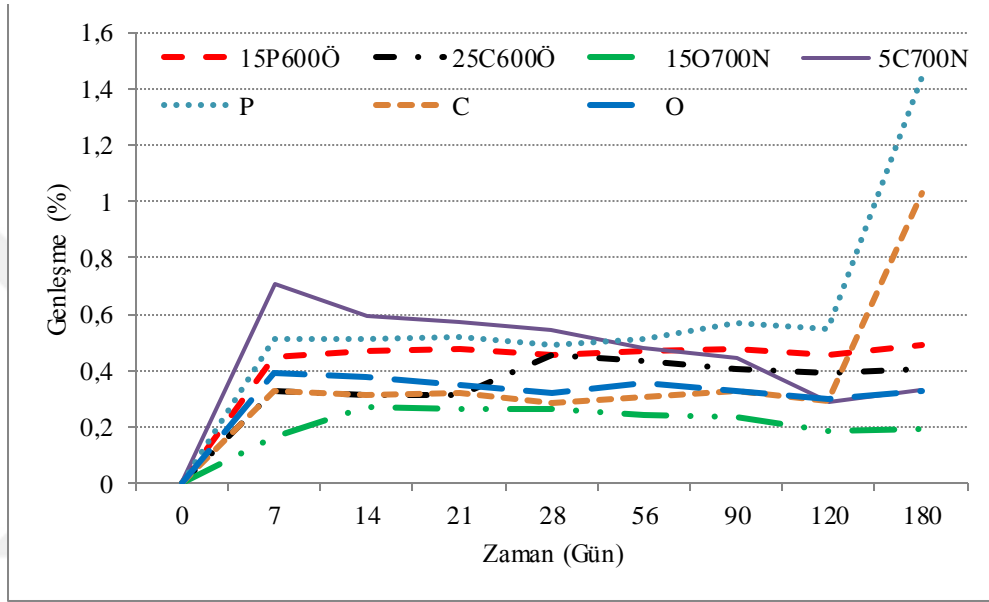
Şekil 5.9. Sülfat etkisine maruz referans harçların fiziksel görünümleri

### 5.8. Kompoze Çimento Harçlarının Asit Dayanıklılığı

Harçların asit dayanıklılığı için Bölüm 3.2.2.10'a göre belirlenmiştir. Malzeme miktarları ise Tablo 3.6'ya göre hazırlanmıştır. Şekil 5.10'da %3'lük  $H_2SO_4$  konsantrasyonuna sahip ortamda bekletilen harçların zamana bağlı genişmeleri verilmiştir.

Şekil 5.10'da P ve C referans çimentolarından üretilen harç bünyelerinde 120. günden sonra büyük oranda genişme meydana gelmiştir. Ancak bu etkinin benzeri O referans çimentosunda oluşmamıştır.  $C_3A$  içeriği yüksek olan çimentolarda bu etkinin olduğu gözlenmiştir. Uçucu kül kullanılan çimentolarda ise daha az genişme olduğu tespit edilmiştir. Özellikle 15P600Ö ve 25C600Ö çimentolarının 28. günden sonra benzer özellikler göstermiştir. O klinkerinde %15 oranında uçucu kül kullanılması durumunda harç bünyesinde meydana gelecek genişmeler azaltılmıştır. %15 oranında uçucu kül kullanımı harçların geçirimsizliğini arttırdığı gibi ortamdaki CH oranını azaltması da asit dayanıklılığı etkilemiştir. 15O700N çimentosunun %3'lük  $H_2SO_4$  etkisindeki genişme değeri %0.20'nin altında olmaktadır. 5C700N çimentosu ise diğer çimentolara göre oldukça farklı bir özellik göstermiştir. Diğer çimentolarda zamanla artan genişmeler

meydana gelmesine rağmen basınç dayanımı olarak diğer çimentolara göre düşük dayanıma sahip olan 5C700N çimentosunda 7. günden sonra zamanla artan büzülme davranışı gözlenmiştir. Asit etkisine maruz harçlarda uçucu kül katkıli çimento kullanımı genellikle olumlu katkılar sağlamaktadır.

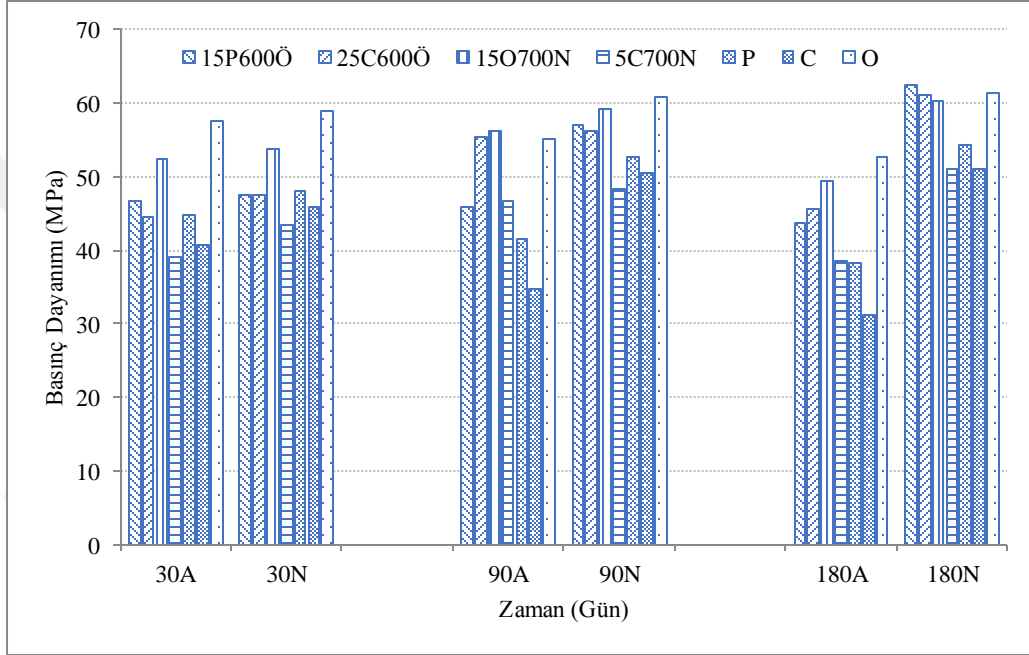


**Şekil 5.10.** H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz harçların zamana bağlı boyutsal değişimi

Şekil 5.11'de 30, 90 ve 180 gün %3'lük H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz harçların basınç dayanımı özellikleri verilmiştir. A asit ortamında bekletilen harçları, N ise normal su küründe bekletilen harçları ifade etmektedir.

Şekil 5.11'de görüldüğü gibi H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz O klinkerinden elde edilen O referans çimentosu ve 15O700N çimentosu 50 MPa üzeri dayanıma sahiptir. 30 gün boyunca H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz kalan O klinkerinden üretilen çimentolarda yaklaşık %2.5 oranında dayanım kaybı oluşmuştur. 30 gün H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz harçlarda en çok C klinkerinden üretilen çimentolar etkilenmiştir. 25C600Ö ve 5C600N çimentolarında sırasıyla %6.2 ve %9.6 oranında dayanım kaybı oluşmuştur. C referans çimentosunda ise

bu değer %11.5 olarak belirlenmiştir. C klinkerinde kullanılan uçucu kül bir miktar olumlu katkı sağlamıştır. Bu etki C klinkerinden üretilen çimentoların nispeten daha düşük dayanım göstermesi ile ilgili olmaktadır. P referans çimentosunun dayanım kaybı %7 iken P klinkerine %15 uçucu kül katılarak üretilen 15P600Ö çimentosunda bu oran %1.3 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 5.11.** H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz harçların basınç dayanımları

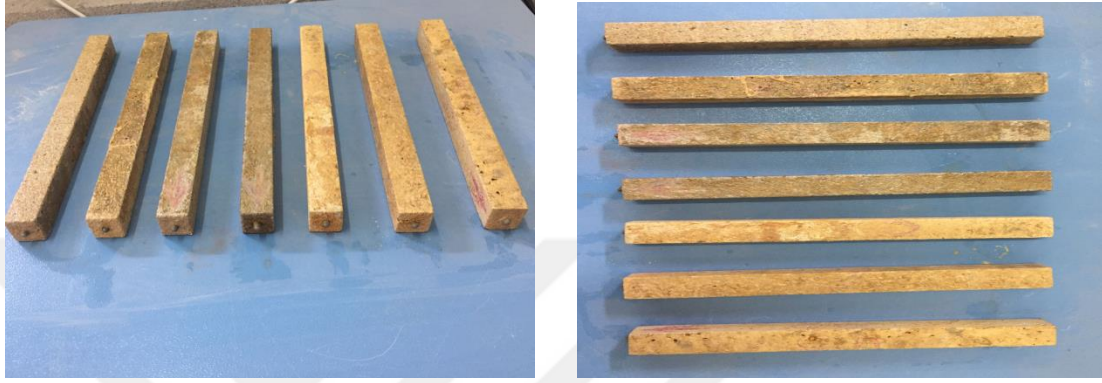
Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve MgSO<sub>4</sub> etkilerinde olduğu gibi 90 günlük H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi uçucu kül katkılı çimentoların basınç dayanımlarını arttırmıştır. Uçucu kül kullanımı harç bünyesinde CH oluşumunu azaltmakta ve geçirimsizlik sağlamaktadır. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisi uçucu kül bünyesindeki SiO<sub>2</sub>'nin çözünürlüğünü arttırdığı için puzolanik aktiviteye katkı sağlamış bu yüzden kısa dönem için dayanım artışı sağlamıştır. Ancak referans çimentolarda dayanım kaybı gerçekleşmiştir. 90. günde uçucu kül katkılı çimentolardan üretilen harçların dayanımı 30 gün H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz harçlara göre artış göstermiştir. Ancak 90 gün H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento harçlarının dayanımı

normal kür koşullarındaki harçlara göre azalma göstermiştir. 90 günlük  $H_2SO_4$  etkisi P klinkerinden üretilen P referans çimentosu ve 15P600Ö çimentoları oldukça olumsuz etkilemiştir. P referans çimentosunda yaklaşık %20 oranında, 15P600Ö çimentosunda ise %18.6 oranında dayanım kaybı oluşmuştur. C referans çimentosunda oluşan dayanım kaybı ise %31.3 olarak belirlenmiştir. O klinkerinden elde edilen çimentolarda ise dayanım kaybı nispeten daha az olmuştur. Özellikle 15O700N çimentosunun dayanım kaybı yaklaşık %5 olmuştur.

180 gün  $H_2SO_4$  etkisi harçlarda büyük oranda dayanım kaybına yol açmıştır. Özellikle C ve P klinkerinden üretilen çimentolarda dayanım kaybı daha fazla olmuştur. C referans çimentosunda 180 günlük  $H_2SO_4$  etkisi %38.1 oranında dayanım kaybı oluşturmuştur. C klinkerinde %25 uçucu kül kullanılan 25C600Ö çimentosunda ise dayanım kaybı %25.3, %5 uçucu kül kullanılan 5C700N çimentosunda dayanım kaybı %24.7 olarak belirlenmiştir. P klinkerinden üretilen referans ve 15P600Ö çimentolarındaki dayanım kaybı yaklaşık %30 oranında olmuştur. O referans çimentosunun  $H_2SO_4$  etkisinde dayanım kaybı %14.1, 15O700N çimentosundaki dayanım kaybı ise %18.1 olarak belirlenmiştir. Boyutsal değişim olarak büzülme davranışı gösteren 5C700N çimentosunun oldukça fazla dayanım kaybına uğradığı da gözlenmiştir.

$C_3A$  içeriği düşük çimentolarda uçucu kül kullanımı çok olumlu katkı sağlamamıştır. Ancak  $C_3A$  içeriği yüksek çimentolarda uçucu kül kullanımı daha verimli olmaktadır. Ancak asit etkisine maruz yapı elemanları için çimento özelliklerinden çok geçirimsiz beton üretiminin daha önemli olduğu mekanik testler sonucunda görülmüştür. Belli bir süre  $H_2SO_4$  ortamında bekletilen harçlarda dayanım artışı elde edilmiş ancak sonrasında büyük oranda dayanım kayıpları gerçekleşmiştir. Düşük oranda asit etkisi kısa vadede kompoze çimentolara olumlu katkı sağlayabilir ancak uzun süre asit etkisine maruz yapı elemanlarında hasara yol açacaktır.

Şekil 5.12'de 180 gün boyunca %3'lük H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> asit çözeltisinde bekletilen harç örneklerinin fiziki görünüşleri verilmiştir. Gözlemsel analizde harç yüzeylerinde belirgin bir hasara rastlanılmamıştır. Harç yüzeylerinde renk değişiminin olduğu gözlenmiştir.



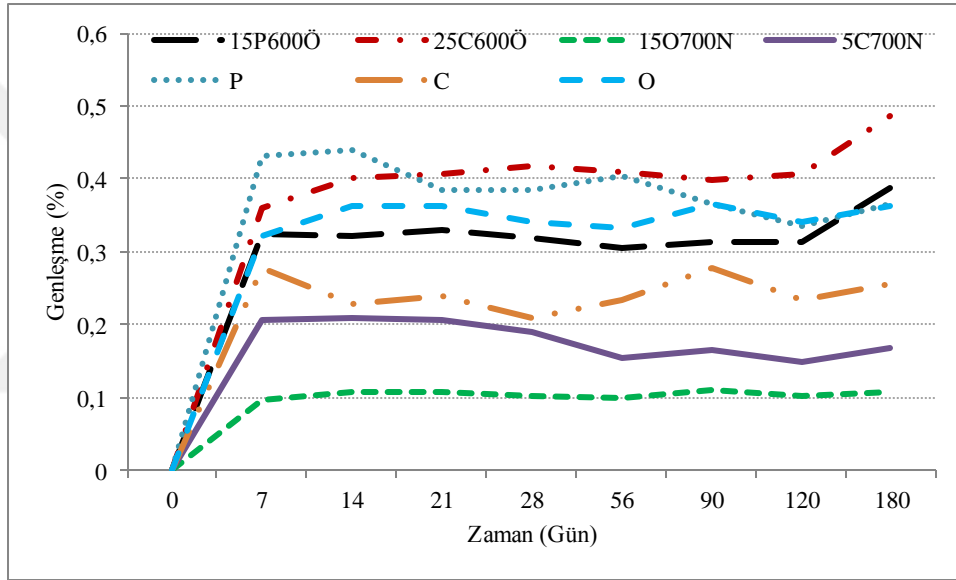
**Şekil 5.12.** 180 gün H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen harç örnekleri

### **5.9. Kompoze Çimento Harçlarının Deniz Suyu Dayanıklılığı**

Harçların deniz suyu dayanıklılığı Bölüm 3.2.2.11'de yer alan kurallara göre tespit edilmiştir. Deniz suyunda bekletilen harçların zamana bağlı boyutsal değişimi Şekil 5.13'de sunulmuştur.

Şekil 5.13'de görüldüğü gibi 25C600Ö çimentosu deniz suyunda en fazla genleşme yapan harç örneği olmuştur. O klinkerinden üretilen referans çimentonun C<sub>3</sub>A içeriği düşük olmasına rağmen genleşme özellikleri daha fazla olmuştur. O referans çimentosunun 180. gündeki genleşme değeri %0.36 olarak belirlenmiştir. O referans çimentosunda kullanılan petrol kuyusu klinkerinin C<sub>3</sub>A içeriği düşük ancak C<sub>3</sub>S içeriği oldukça yüksektir. C<sub>3</sub>S içeriğinin yüksek olması daha fazla CH oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan CH sülfat iyonları ile reaksiyona girerek ilk etap için alçıtaşı oluşturmuştur. C<sub>3</sub>A içeriğinin düşük olması etrenjit oluşum riskini azaltmıştır. Literatür özetinden de belirtildiği gibi bazı durumlarda alçıtaşı da genleşmelere yol açmaktadır. O referans çimentosunda etrenjit oluşumu az olmasına rağmen genleşmenin asıl kaynağı

alçıtışı olarak düşünülmektedir. O klinkeri içerisinde %15 uçucu kül kullanılarak üretilen 15O700N çimentosunun genleşme değeri referans çimentoya göre daha az olmuştur. Uçucu kül kullanımı ile alçıtışı oluşumu azaltılmış ve genleşme değerleri buna bağlı olarak azalmıştır. 15P600Ö çimentosu 120. güne kadar yaklaşık %0.3 genleşme değeri göstermiş ancak bu süre sonunda daha fazla genleşme göstererek %0.39 değerine ulaşmıştır. P referans çimentosu ise 56. günden itibaren deniz suyu içerisinde büzülme özelliği göstermiştir.

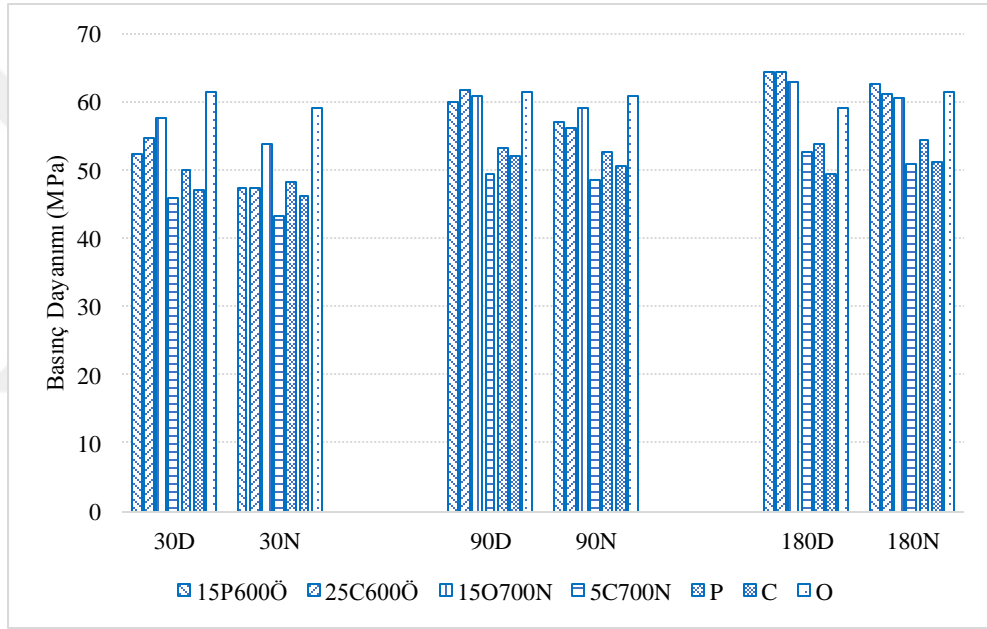


**Şekil 5.13.** Deniz suyunda bekletilen harçların zamana bağlı boyutsal değişimi

Deniz suyu içerisinde uçucu kül kullanılan bazı harçlarda genleşme özellikleri artış göstermiştir. Uçucu kül harçların işlenebilirliğini azalttığı için daha fazla boşluklu yapıya sahip harçların elde edilmesine neden olmuştur. Artan kapiler boşluk miktarından dolayı tuz kristalizasyonu sebebiyle kompoze çimentolarda daha fazla genleşme oluşmuştur. Ayrıca literatürün aksine  $C_3A$  içeriği düşük çimentolar da daha fazla genleşme oluştuğu belirlenmiştir.  $C_3A$  içeriğinin yanında  $C_3S$  içeriğine bağlı CH oluşumunda genleşmelere yol açmaktadır. Ortamda oluşan yüksek oranda CH alçıtışı oluşumuna neden olmakta ve

bunun sonucundada genleşmeler meydana gelebilmektedir. Ancak harçların genleşme değerleri dikkate alındığında sülfat etkisinde olduğu gibi büyük boyutsal değişimler gözlenmemiştir. Ayrıca harç bünyelerinde sülfat etkisinde olduğu gibi gözle görülebilen yapısal hasarlar tespit edilmemiştir.

Deniz suyunda bekletilen harçların 30, 90 ve 180. günlerdeki basınç dayanımlarına ait özellikler Şekil 5.14'de sunulmuştur.



**Şekil 5.14.** Deniz suyuna maruz harçların zamana bağlı basınç dayanımları

Şekil 5.14'de görüldüğü gibi deniz suyunda bekletilen uçucu kül katkılı çimentolardan üretilen harçların 180. güne kadar dayanımları artış göstermiştir. Harç bünyelerinde genleşme olmasına rağmen dayanım artışları gözlenmiştir. Bu durum deniz suyunun uçucu külün aktivasyonuna katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır. Genleşme yaratan hidrasyon ürünlerinin oluşmasının yanı sıra dayanım artışıda gözlenmiştir. Referans çimentolardan üretilen harçların 90. güne kadar dayanımları artış göstermiş ancak 180. günde basınç dayanımları azalmıştır. Uçucu kül oranının artması sonucunda

deniz suyunda bekletilen harçların dayanımı daha fazla artış göstermiştir. Bu durum deniz suyunun uçucu külün aktivasyonunu hızlandırması ile açıklanabilir. Özellikle 25C600Ö çimentosundan üretilen harçların basınç dayanımı normal kür koşullarına göre 30. günde yaklaşık %15 artış göstermiştir. Bu oran 180 günde ise yaklaşık %5 olarak belirlenmiştir. Çimento bünyesinde bulunan klinker fazından açığa çıkan hidratasyon ürünleri genleşme yaratmasına rağmen çimento bünyesindeki uçucu kül deniz suyu ile aktive olarak puzolanik özellikleri daha hızlı kazanmaktadır. Bu yüzden kompoze çimentolarda genleşme olmasına rağmen dayanım artışı da gözlenmektedir. Referans çimento ların uzun süre deniz suyuna maruz kalması basınç dayanımlarını olumsuz etkilemektedir. Ancak oluşan basınç dayanımı kaybı ihmal edilebilir dereceldedir.

#### **5.10. Kompoze Çimento Harçlarının Yüksek Sıcaklık Özellikleri**

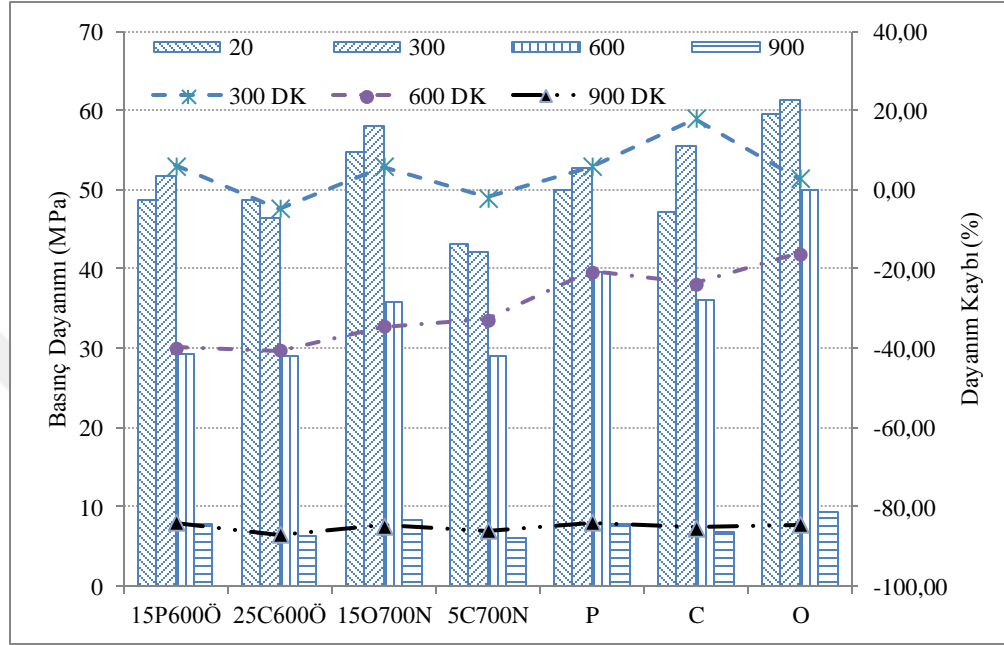
Çimento harçlarının yüksek sıcaklığa olan etkisi Bölüm 3.2.2.12'e göre tespit edilmiştir. Harçlar Şekil 5.15'de görüldüğü gibi 7'li gruplar halinde yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmiştir. Harç numuneleri hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra (300, 600 ve 900 °C'ye) 1 saat sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve daha sonrasında fırın içerisinden çıkarılarak havada soğutma yapılmıştır.



**Şekil 5.15.** Yüksek sıcaklık fırınına harçların yerleştirme düzeni



Şekil 5.16'da 300, 600 ve 900 °C'ye maruz kalmış harçların mekanik özellikleri verilmiştir.



**Şekil 5.16.** Yüksek sıcaklık etkisindeki harçların mekanik özellikleri ve dayanım kayıpları (DK)

Şekil 5.16'da 20 °C için verilen basınç dayanımları harçların 56. gününde elde edilen test sonuçlarıdır. C referans çimentosunun 300 °C'ye maruz kalmasından sonra basınç dayanımı yaklaşık olarak %17.8 artış göstermiştir. Ancak C klinkerinde uçucu kül kullanılarak üretilen 25C600Ö ve 5C700N çimentolarında 300 °C sıcaklık etkisi dayanım kaybına yol açmıştır. P ve O klinkerleri kullanılarak üretilen referans ve kompoze çimentolarda ise 300 °C sıcaklık etkisi dayanım artışı sağlamıştır.

Harçların 600 °C maruz kalması durumunda dayanım kayıpları meydana gelmiştir. 600 °C sıcaklıkta en fazla C klinkerinden üretilen 25C600Ö ve 5C700N çimentoları etkilenmiştir. 25C600Ö ve 5C700N çimentolarındaki dayanım kaybı sırasıyla %40.5 ve

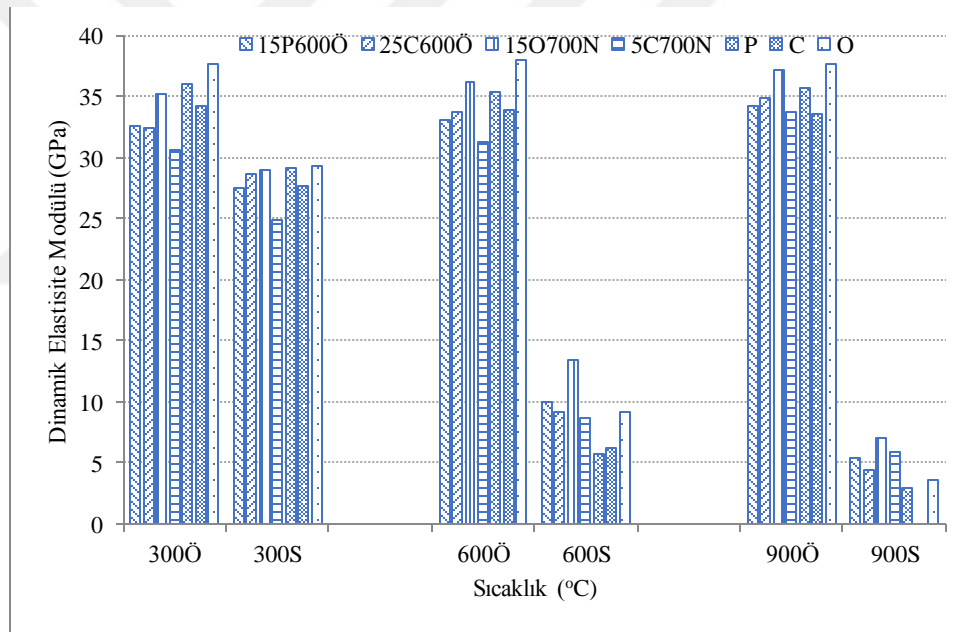
%32.7 olarak belirlenmiştir. Referans çimentoların dayanım kayıpları %16-24 arasında değişirken bu değer kompoze çimentolarda %32-40 arasında değişmektedir.

900 °C'ye maruz kalan harçların basınç dayanımlarında büyük oranlar da azalmalar tespit edilmiştir. 25C600Ö ve 5C700N çimentolarındaki dayanım kaybı sırasıyla %87.1 ve %85.9 olarak belirlenmiştir. C klinkerinden üretilen çimentoların yüksek sıcaklık etkisine daha hassas olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni; diğer çimentolara göre daha büyük tane dağılımına ve düşük Blaine inceliğinden dolayı çimentonun hidratasyon süreci diğer çimentolara göre zayıf kalmıştır. Çimentoların genelinde oluşan dayanım kaybı yaklaşık %85 olmuştur. Ancak genel itibariyle uçucu kül kullanımı çimentolarda yüksek sıcaklığa karşı dayanımı azalmıştır. Ayrıca 900 °C'ye maruz kalan harçlarda oluşan dayanım kaybının diğer bir sebebi de C-S-H yapısının ayrışmış olmasıdır.

Yüksek sıcaklığa maruz harçların dayanım özelliklerinin değişimler Şekil 5.16'da verilmiştir. 300 °C sıcaklıkta harçlarda genellikle dayanım artışları elde edilmiştir. Özellikle C çimentosundan üretilen harçlarda %17.9 oranında dayanım artışı elde edilmiştir. C çimentosunun Blaine değerinin düşük olması yada daha büyük tane boyutuna sahip olması çimentonun hidratasyonunu yavaşlatmaktadır. Uygulanan 300 °C'lik ısı işlem hidrate olmamış taneleri aktive ederek dayanım artışına neden olmuştur. Ancak C klinkerinden üretilen kompoze çimentolarda (5C700N ve 25C600Ö) ise dayanım kayıpları gerçekleşmiştir. 5C700N kompoze çimentosunda 600 ve 900°C sıcaklıklarda sırasıyla %32.8 ve 85.9 oranlarında dayanım kayıpları gerçekleşmiştir. 5C700N kompoze çimentosunun 28 günlük basınç dayanımının düşük olması yüksek sıcaklıkta diğer çimentolara göre daha fazla dayanım kaybı yaşamasına yol açmıştır. 15O700N kompoze çimentosu ise 600 ve 900°C sıcaklıklarda diğer kompoze çimentolara göre daha az dayanım kaybına uğramıştır. Bu durum 28 günlük basınç dayanımının diğer kompoze çimentolara göre daha yüksek olması ile açıklanmaktadır. Referans çimentolarda ise 900 °C sıcaklıkta dayanım kayıpları (~%85) arasında çok belirgin farklar elde edilmemiştir. Bu durum çimento karmaoksit yapısının yüksek sıcaklık üzerinde çok etkisinin olmadığını

göstermektedir. Ancak bu bulgu havada soğutma yöntemi için geçerli olmaktadır. Çünkü karmaoksit yapısına bağlı olarak ortaya çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  yüksek sıcaklık etkisi ile  $\text{CaO}$  dönüşecek ve su ile soğutmada tekrar hidrate olacaktır. Bu reaksiyon ise harç bünyesine zarar verecektir. Havada soğutma yöntemi için harçlarda geçirgenlik yada gözeneklilik daha etkili olmaktadır.

300, 600 ve 900°C sıcaklıklara maruz kalmadan önce (Ö) harçların dinamik elastisite modülleri belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra (S) harçların dinamik elastisite modülleri tekrar belirlenmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17. Yüksek sıcaklık etkisindeki harçların dinamik elastisite modülleri

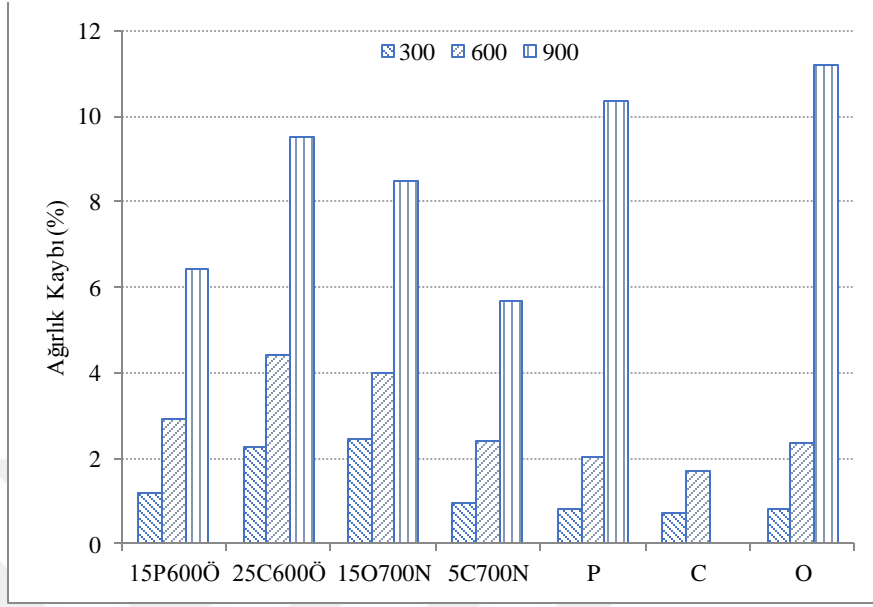
300°C sıcaklık etkisi sonucu harçların dinamik elastisite modülleri azalmıştır. Basınç dayanımı değerlerinin aksine referans çimentoların dinamik elastisite modülleri daha çok azalmıştır. Özellikle O referans çimentosunun dinamik elastisite modülü %21.3 oranında azalmıştır. 25C600Ö çimentosunun dinamik elastisite modülü ise %11.7 oranında azalmıştır. 300°C sıcaklık etkisinde referans çimentoların dinamik elastisite

modüllerinde %75-83 arasında azalmalar gerçekleşmiştir. Kompoze çimentolarda bu değer %62-72 arasında olmaktadır. 300°C sıcaklık etkisinde ise referans çimentoların dinamik elastisite modülleri yaklaşık %90, kompoze çimentolarınki ise %81-87 oranında azalmıştır. Dinamik elastisite modülleri açısından uçucu kül katkılı kompoze çimentolar daha üstün performans göstermiştir. Ancak dinamik elastisite modülünde oluşan kayıplar ele alındığında kompoze çimentolar ile referans çimentolar arasında çok büyük farkların olmadığı belirlenmiştir.

Şekil 5.18'de yüksek sıcaklık etkisine maruz harçlarda oluşan ağırlık kayıpları verilmiştir.

Sıcaklık derecesinin artması sonucunda harçların ağırlık kayıpları artış göstermektedir. 300 °C'de uçucu kül katkılı kompoze çimentolarda daha fazla ağırlık kaybı oluşmuştur. Benzer özellikler 600 °C'ye maruz harçlarda da elde edilmiştir. 900°C'de ise referans çimentolarda daha fazla ağırlık kayıpları oluşmuş ve bu değer %10-11 olarak belirlenmiştir. 900°C'ye maruz uçucu kül katkılı kompoze çimentolarda ağırlık kaybı %5-9 arasında değişmektedir. 900°C'de ağırlık kayıplarının az olmasından dolayı uçucu kül katkılı çimentoların dinamik elastisite modülleri de daha yüksek bulunmuştur. 900°C'de harç bünyesindeki kimyasal su (buharlaşamayan su) hidrasyon ürünlerinden ayrılarak mikroyapı da hidrostatik basınca yol açmaktadır. Oluşan basınç harç bünyesinde çatlakların yayılmasına yol açtığı için dayanım kaybı oluşmaktadır. Uçucu kül katkılı çimentolarda gözeneklilik azaldığı için buharlaşamayan su harç bünyesini tam olarak terk edememiş bu yüzden ağırlık kayıpları daha az olmuştur. Harç bünyesini terk edemeyen kimyasal su iç yapıda daha fazla hidrostatik basınca yol açarak dayanım kayıplarını arttırmıştır.

900°C C referans çimentosuna ait numuneler fırın içerisinde çıkarılırken büyük oranda hasara uğradığı için dinamik elastisite modülü ve ağırlık kaybı belirlenememiştir.



Şekil 5.18. Yüksek sıcaklık etkisine maruz harçların ağırlık kayıpları



Şekil 5.19. 600 ve 900 °C'ye maruz harçların yüzey özellikleri

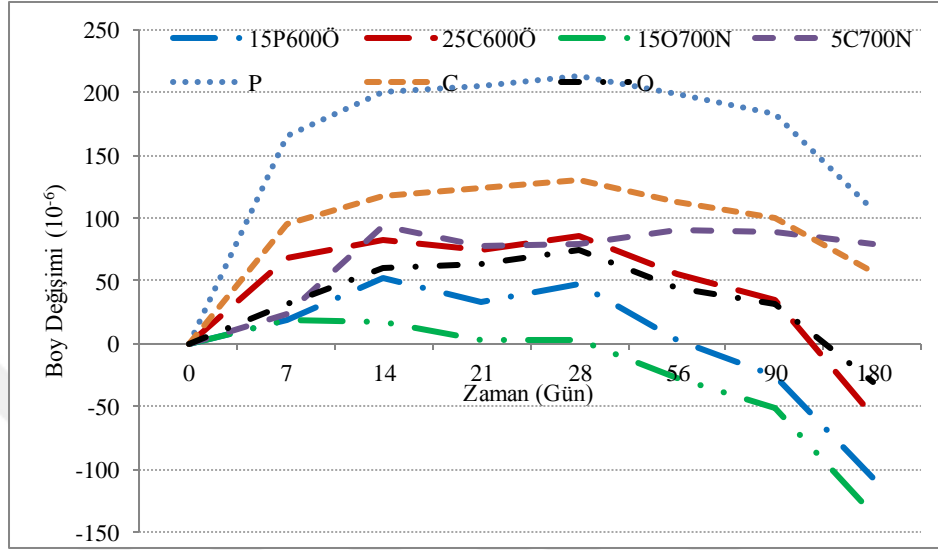
Şekil 5.19'da 600 ve 900 °C maruz harçların yüzey özellikleri verilmiştir. Şekil 5.19'da görüldüğü gibi 900 °C'ye maruz harçların havada soğutulması sonucunda yüzeyde harita çatlakları oluşmuş ancak aynı etki 600 °C'ye maruz harçlarda gözlenmemiştir. Ayrıca 900 °C'ye maruz C referans çimentosuna ait harçlar fırın içerisinde ve fırından çıkarılırken hasar almıştır.

### **5.11. Kompoze Çimento Harçlarının Karbonatlaşma Özellikleri**

Harçların karbonatlaşma özellikleri Bölüm 3.2.2.12'ye göre belirlenmiştir. Şekil 5.20'de harçların zamana bağlı karbonatlaşma büzülme verileri verilmiştir. Harçların ilk 14 günlük zaman periyodunda şişme meydana gelmiştir. Bu süreçten sonra harçların bünyesinde genellikle karbonatlaşma etkisi ile büzülme davranışları başlamıştır.

P referans çimentosunda 28. güne kadar büyük oranda şişme meydana gelmiştir. P çimentosunun 28. gündeki boy değişimi  $213 \times 10^{-6}$  olarak ölçülmüştür. Bu süreçten sonra büzülme davranışı başlamış ve 180. gündeki boy değişimi  $107 \times 10^{-6}$  olarak belirlenmiştir. P çimentosu yüksek oranda şişme yapmasından dolayı 180. gündeki karbonatlaşma etkisi ile oluşan büzülme değeri diğer çimentolara göre daha değişkenlik göstermiştir. Uçucu kül kullanılmayan C referans çimentosunda da benzer özellikler tespit edilmiştir. 28. güne kadar şişme meydana gelirken daha sonrasında büzülme davranışı belirlenmiştir. O referans çimentosu 28. güne kadar  $75 \times 10^{-6}$  değerinde şişme yapmış ancak daha sonrasında büzülme davranışı başlamış ve 180. gündeki boy değişimi  $-32 \times 10^{-6}$  olarak ölçülmüştür. Kompoze çimentolardan üretilen harçların şişme değerleri daha az olmuş ve sonrasında referans çimentolara göre daha çok büzülme göstermişlerdir. Özellikle 15O700N çimentosunun 180. günde boy değişimi  $-135 \times 10^{-6}$  olarak ölçülmüştür. 15P600Ö çimentosu da karbonatlaşma etkisi ile büyük bir büzülme davranışı göstermiş ve 180. gündeki boy değişimi  $-107 \times 10^{-6}$  olarak tespit edilmiştir. 25C600Ö çimentosu, 15O700N ve 15P600Ö çimentosuna göre daha fazla şişme yaptığı için büzülme davranışı diğer çimentolara göre fazla olmamıştır. Kompoze çimentolarda en çok farklılık 5C700N

çimentosunda elde edilmiştir. 28. günden itibaren harç çubuğundaki boy değişimi sabit bir değerde (yaklaşık  $90 \times 10^{-6}$ ) kalmıştır.

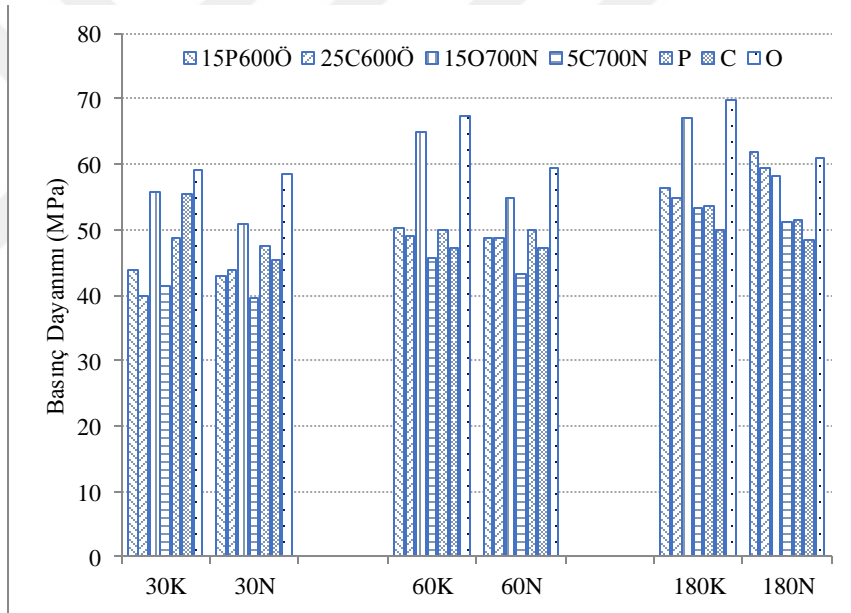


Şekil 5.20. Harçların karbonatlaşma büzülme eğrileri

Uçucu kül katkılı çimentoların daha az şişme yaptığı gözlenmiştir. Burada şişme üzerinde açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  oldukça etkili olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül katkılı çimentolarda daha az  $\text{Ca(OH)}_2$  açığa çıktığı için şişme miktarları daha az olmaktadır. Literatürde de belirtildiği gibi mineral katkıları bazı durumlarda karbonatlaşma olayını arttırmaktadır. Şekil 5.21'de %5 oranında amonyum karbamat kullanılan harçların karbonatlaşma etkisindeki basınç dayanımları verilmiştir. Amonyum karbamat içerikli harçlar K ile gösterilmiştir.

Karbonatlaşma etkisinde diğer durabilite özelliklerinden farklı olarak basınç dayanımları 30, 60 ve 180. günlerde belirlenmiştir. Şekil 5.21'de görüldüğü gibi karbonatlaşma etkisi genellikle harçların basınç dayanımlarını arttırmıştır. 30 günlük harç örneklerinde sadece 25C600Ö numunesinde karbonatlaşma etkisi ile %10.5 oranında dayanım kaybı meydana gelmiştir. 60 gün su küründe bekletilen numunelerde O

klinkerinden üretilen referans ve uçucu kül katkılı çimentoda büyük oranda dayanım artışı gerçekleşmiştir. 150700N çimentosunda karbonatlaşma etkisi ile %18.3 oranında, O referans çimentosunda ise %13 oranında dayanım artışı sağlanmıştır. 90 gün sonunda O klinkerinden üretilen çimentolarda da benzer özellikler elde edilmiştir. O referans çimentosunun karbonatlaşma etkisi ile dayanımı %15.1, 150700N çimentosunun ise %15.5 oranında dayanımı artış göstermiştir.  $C_3S$  oranı yüksek olan O klinkerinden elde edilen çimentolarda daha fazla  $Ca(OH)_2$  açığa çıkmış ve karbonatlaşma etkisinden dolayı bu çimento türlerinden daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Ayrıca 90. günde 15P600Ö ve 25C600Ö numunelerinde yaklaşık %8 dayanım kaybı meydana gelmiştir.















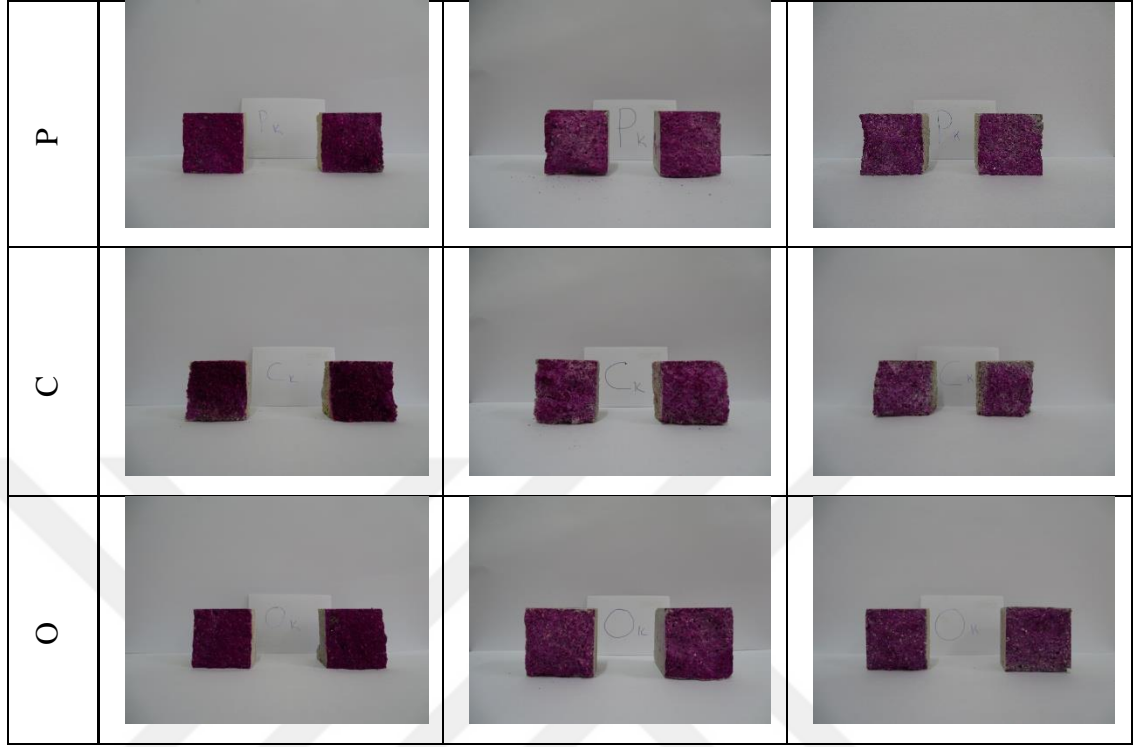
Şekil 5.21. Karbonatlaşma etkisindeki harçların basınç dayanımları

$C_3S$  oranı yüksek çimentolarda karbonatlaşma etkisi ile daha fazla dayanım artışı elde edilmiştir. Ancak karbonatlaşmanın tespiti için amonyum karbamat kullanıldığı takdirde basınç dayanımlarını karşılaştırmak çok doğru olmamaktadır. Bu yöntem sadece karbonatlaşma derinliği ve büzülme özellikleri hakkında dolaylı bilgi verebilir. Amonyum karbamatın prizi geciktirme etkisinin bulunması çimentolarda priz sürelerini etkilemiştir.



Özellikle inceliği düşük olan C referans çimentosunun amonyum karbamat etkisi ile 24 saatte priz almadığı tespit edilmiştir. C referans çimentosu 48 saat sonra kalıbdan sökülebilmştir. Amonyum tuzlarının priz süresini uzattığı yapılan bazı çalışmalarda rapor edilmiştir. Bu yüzden amonyum karbamat kullanımı sonucunda basınç dayanımı kıyaslaması çok doğru sonuçlar vermeyebilir.

Num.	30K	60K	180K
15P600Ö			
25C600Ö			
15O700N			
5C700N			



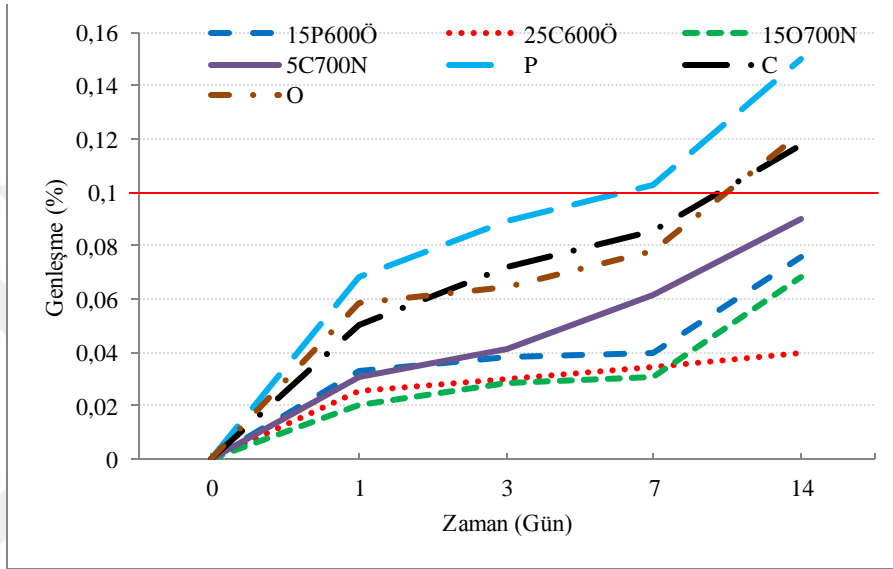
**Şekil 5.22.** %1 fenolftalein çözeltisi sıkılmış harç örneklerindeki renk değişimleri

Harçların yüzeylerine %1 fenolftalein çözeltisi sıkdıktan sonra oluşan renk değişimleri Şekil 5.22'de sunulmuştur.

Şekil 5.22'de görüldüğü gibi zamanla harçların bünyelerinde karbonatlaşmanın oluştuğu (renk değişimi ile) gözlenmektedir. 30 gün sonunda %1 fenolftalein uygulanan harç örneklerinin daha koyu bir magenta rengine sahip olduğu ancak bu rengin zamanla daha çok açıldığı tespit edilmiştir. Bu renk değişimi pH seviyesinin azaldığını göstermektedir. Ayrıca harç yüzeylerinin bazı bölgelerinde magenta renginin oluşmadığı ve bu renk değişiminin olmadığı bölgelerde karbonatlaşma oluştuğu edilmiştir.

## 5.12. Kompoze Çimento Harçlarının Alkali Silis Reaksiyonu Özellikleri

Harçların ASR özellikleri Bölüm 3.2.2.13 ve Tablo 3.7'de yer alan malzeme miktarları ile incelenmiştir. 14 gün boyunca 80 °C derece 1N NaOH çözeltisinde bekletilen harç çubuklarının zamana bağlı boy değişimleri Şekil 5.23'de verilmiştir.



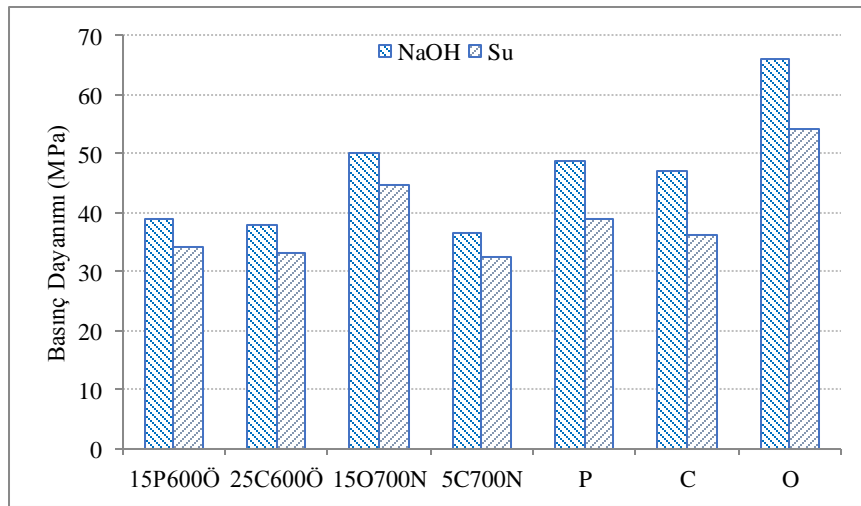
Şekil 5.23. Harç çubuklarının zamana bağlı ASR genleşmeleri

Şekil 5.23'de görüldüğü gibi 14 gün sonunda referans çimentolardan üretilen harç çubuklarının %0.10 genleşme değerini geçtiği görülmektedir. Uçucu kül kullanımı ile ASR genleşmeleri %0.10 değerinin altına düşürülmüştür. Uçucu kül katkılı çimentolar içerisinde 5C700N çimentosu ile üretilen harç çubuklarının 14. gündeki genleşme değeri %0.09 olarak ölçülmüştür. Kompoze çimento sınıflarında en fazla genleşme 5C700N numunesinde elde edilmiştir. C klinkerine katılan %25 uçucu kül sonucunda (25C600Ö) genleşme değeri ise yaklaşık %0.04 olarak belirlenmiştir. Genel olarak çimento üretiminde kullanılan uçucu kül harçlardaki ASR genleşmelerini azaltma da etkili olmuştur. Uçucu kül harç bünyesindeki CH ile reaksiyona girerek ortamın pH derecesini indirir ve silisin çözünürlüğünü azaltmaktadır. Bu reaksiyon mekanizması ASR oluşumunu azaltmaktadır. 5C700N çimentosu basınç dayanımı açısından diğer

çimentolara göre daha düşük bir dayanıma sahiptir. ASR sonucu oluşan içsel gerilmeler bu yüzden 5C700N çimentosunu daha çok etkilemiştir.

14 gün boyunca 80 °C derece 1N NaOH çözeltisinde bekletilen harçların basınç dayanımları da belirlenmiştir. Harçlara ait basınç dayanımları normal kür şartları ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 5.24'de sunulmuştur.

Şekil 5.24'de görüldüğü gibi 14 gün sonunda NaOH etkisine maruz harçların basınç dayanımları normal su kürüne göre daha yüksek çıkmıştır. Kür sıcaklığının 80 °C olması ve alkalilerin etkisi normal kür şartlarına göre dayanımda bir miktar artış sağlamıştır. 5C700N çimentosu diğer çimentolara göre daha düşük bir basınç dayanımına sahiptir. Bu çimento için kullanılan %5 uçucu kül ASR genişmelerini azaltmada yeterli olmamıştır. Basınç dayanımı düşük olan 25C600Ö çimentosunda kullanılan %25 oranındaki F sınıfı uçucu kül ASR genişmelerini büyük oranda azaltmıştır. Öğütülebilirliği zor olan klinkerlerde düşük oranda uçucu kül kullanımı ASR genişmesini azaltmamaktadır. Ancak bu tür klinkerler için uçucu kül oranının artması ASR genişmelerini azaltmaktadır.



Şekil 5.24. NaOH etkisindeki harçların basınç dayanımları

***Optimizasyon sonucu elde edilen 4 kompoze ve 3 referans çimento üzerinde gerçekleştirilen deneyler sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir;***

- C klinkerinden üretilen çimentolarda öğütülebilirlik problemi ortaya çıkmıştır. Öğütülebilirlik probleminden dolayı bu klinkerden üretilen çimentoların özellikle erken yaş dayanımları olumsuz etkilenmiştir. O klinkerinden üretilen çimentolarda ise tam tersi bir durum oluşmuş daha yüksek inceliğe ve dayanıma sahip çimentolar elde edilmiştir. Uçucu kül kullanımı daha çok 56. günden itibaren dayanımlarda artış sağlamıştır. Uçucu kül katkılı çimentolarda dayanım açısından  $C_3S$  içeriği yüksek klinker kullanımı daha uygun olmaktadır.
- İnceliği yüksek yada tane boyutu küçük olan çimentoların daha fazla büzülme gösterdiği ancak bu etkinin uçucu kül kullanımı ile azaltıldığı tespit edilmiştir. Ağırlık değişimleri incelendiğinde de büzülme esnasında uçucu kül katkılı çimento ile üretilen harçların ağırlık kayıpları azalmıştır.
- Uçucu kül katkısı çimentolarda oluşan sülfata dayalı genleşmeleri kısıtlamaktadır. Özellikle O klinkeri ile kullanılan uçucu kül katkılı çimentolarda genleşmeler oldukça azaltılmıştır. Sülfatlı ortamlara uygun olmayan klinker ile birlikte uçucu kül kullanılması durumunda sülfat dayanıklılığı arttırılmaktadır.  $MgSO_4$  genleşmeden çok harçlarda fiziksel bozulmaya yol açarken  $Na_2SO_4$  harçlarda daha çok genleşme hasarı meydana getirmektedir.
- Uçucu kül kullanımı harçlarda asit etkisine bağlı boy değişimlerini azaltmaktadır. Uçucu kül kullanımı ile birlikte harçlarda oluşan dayanım kaybı azaltılmıştır. Sülfat dayanıklılığında olduğu gibi  $C_3A$  içeriği düşük çimento kullanımı asit dayanıklılığı için daha uygun olmaktadır. Ancak bu ifade  $H_2SO_4$  etkisine maruz beton ve betonarme elemanlar için geçerlidir.  $HCl$ ,  $HNO_3$  ve  $HF$  gibi kuvvetli asitler için deneyler gerçekleştirilmelidir.
- Yüksek sıcaklık etkisine karşı uçucu kül kullanımı harçların dayanımlarına belirgin bir şekilde etki etmemiştir. Ancak uçucu kül katkılı harçlarda işlenebilirliğe bağlı olarak değişen boşluk yapısından dolayı buharlaşmayan su harç bünyesinden uzaklaşmadığı

için daha çok dayanım kaybına yol açmaktadır. 900 °C sıcaklığa maruz harçların yüzeylerinde makro çatlak ağları oluşmuştur.

- Uçucu kül katkılı çimentolardan üretilen harçlarda daha fazla karbonatlaşma rötresi meydana gelmiştir. Ancak harç bünyelerinde 180. güne kadar belirgin bir karbonatlaşma tabakası elde edilememiştir. Yüksek C<sub>3</sub>S içeriğine sahip klinkerler kullanıldığı takdirde karbonatlaşma etkisi ile harçların basınç dayanımlarının arttığı belirlenmiştir.
- ASR açısından kompoze çimentolar arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Çimento üretiminde uçucu kül kullanımı ASR genleşmelerini azaltmıştır. Standartta belirtilen %0.10 değeri (ASR riski yok) referans çimentolar tarafından aşılmıştır.
- Taguchi serisinde yer alan çimentolar içerisinde ikame oranları %5, 15, 25 ve 35 olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonlara göre en ideal oran ise %15 ve 25 seçilmiştir. Uçucu kül katkılı çimento üretiminde ikame oranının %15 ve 25 olması durumunda çimento harçlarının durabilite özelliklerinde iyileşmeler gözlenmiştir. Öğütülebilirliği zor olan klinkerlerde %5 uçucu kül kullanımı genel olarak olumlu sonuçlar sağlamıştır.

## 6. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

Optimizasyon sonucu elde edilen 7 farklı çimento üzerinde bazı durabilite çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan durabilite deneyleri arasından; sodyum sülfat, magnezyum sülfat, sülfirik asit ve deniz suyunda bekletilen çimento pastaları için mikroyapı araştırmaları yapılmıştır. Mikroyapı çalışmaları için s/ç veya s/b oranı 0.50 olan agrega içermeyen pastalar hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm pastalar ilk 56 gün kirece doymun su içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra 180 gün boyunca pastalar üzerinde sodyum sülfat, magnezyum sülfat, sülfirik asit ve deniz suyu kullanılarak eskitme süreci yapılmıştır. 180. gün sonunda harçlar 40 °C etüvde 48 saat boyunca kurutulmuş ve sonrasında aseton içerisinde bekletilmiştir.

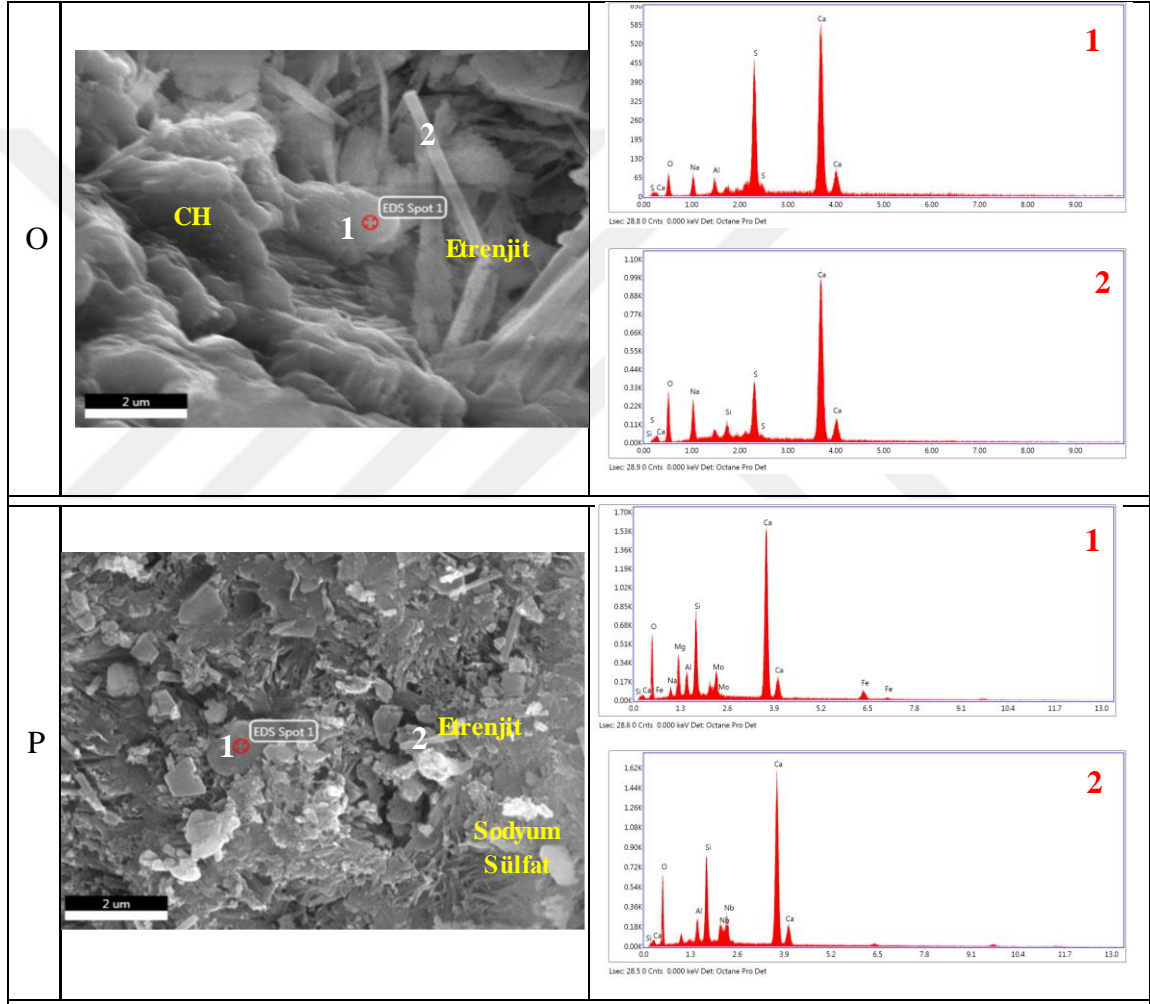
SEM görüntüleri Kastamonu Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yer alan FEI marka ve Quanta FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu ile elde edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobuna ait görüntü Şekil 6.1'de verilmiştir.



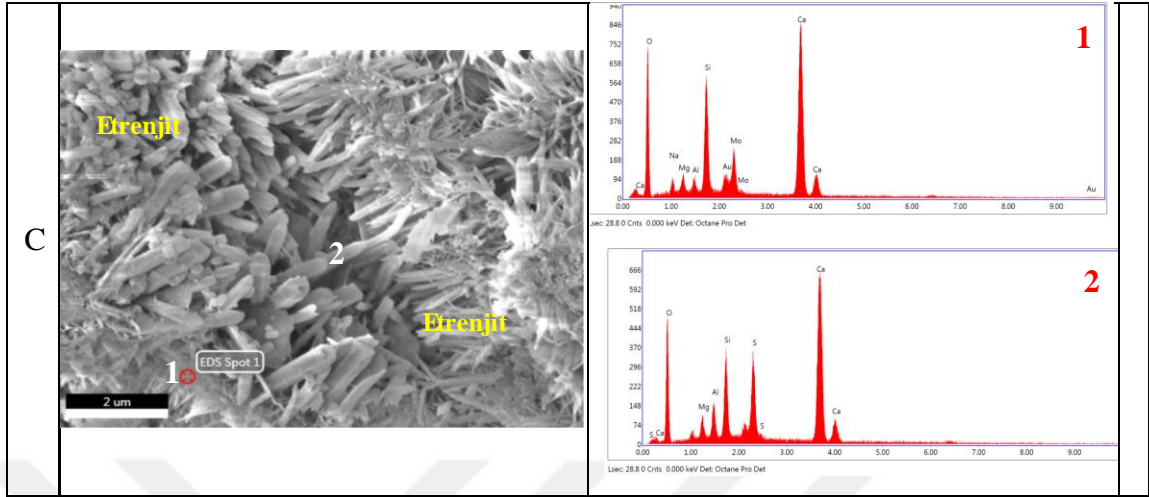
Şekil 6.1. Taramalı Elektron Mikroskobu

## 6.1. Sodyum Sülfat Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri

180 gün boyunca %5'lik sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen referans çimento pastalarına ait SEM görüntüleri Şekil 6.2'de sunulmuştur. Bu bölümde SEM görüntülerinden sadece 1 fotoğraf alınmış ve diğer fotoğraflar EK-1'de sunulmuştur. Mikroyapı incelemelerinde ayrıca 2 adet EDS analizi de yapılmıştır.







**Şekil 6.2.** Sodyum sülfat etkisine maruz referans çimentoların SEM görüntüleri

Şekil 6.2’de görüldüğü gibi O,P ve C referans çimentolarında genel olarak etrenjit yapısı görülmektedir. P referans çimentosunda oluşan etrenjit genellikle iğnemsı yapıya sahipken C referans çimentolarında ise daha çok top etrenjit yapısı oluşmuştur. C çimentosunun üretildiği klinkerdeki yüksek  $Al_2O_3$  ve  $C_3A$  içeriği top etrenjit oluşumunu etkilemiştir. O referans çimentosunda ise hem top etrenjit hem de iğnemsı etrenjit yapısı elde edilmiştir (EK-1). O referans çimentosu için kullanılan klinkerin  $C_3A$  içeriği düşük olmasına rağmen top etrenjit yapısı oluşmuştur. O klinkerinin  $Al_2O_3$  içeriği (%4.63) diğer çimentolara göre daha düşüktür. Buna rağmen top etrenjit yapısı oluşmuş ve bu yapının varlığı yüksek  $C_4AF$  (%16.16) içeriğine bağlanmıştır.

O referans çimentosunda yapılan EDS analizinde etrenjit yapısına ait Ca/S oranı 1 noktasında 4.54, 2 noktasında ise 2.23 olarak belirlenmiştir. Ayrıca 1 noktasında Na oranı %8.27, 2 noktasında ise %3.08 olarak ölçülmüştür. P referans çimentosunda yapılan EDS analizi daha çok Ca-Si esaslı bileşikler üzerinde gerçekleştirilmiştir. EDS analizinde 1. Noktadaki Ca/Si oranı 2.72 olarak belirlenmiş ve C-S-H yapısı olduğu görülmüştür. 2 noktasındaki Ca/Si oranı ise 3.96 olarak belirlenmiştir. 2. Noktasında yer alan bileşenin CH olduğu düşünülmektedir. C çimentosunda 1 noktasında C-S-H yapısı 2 noktasında ise

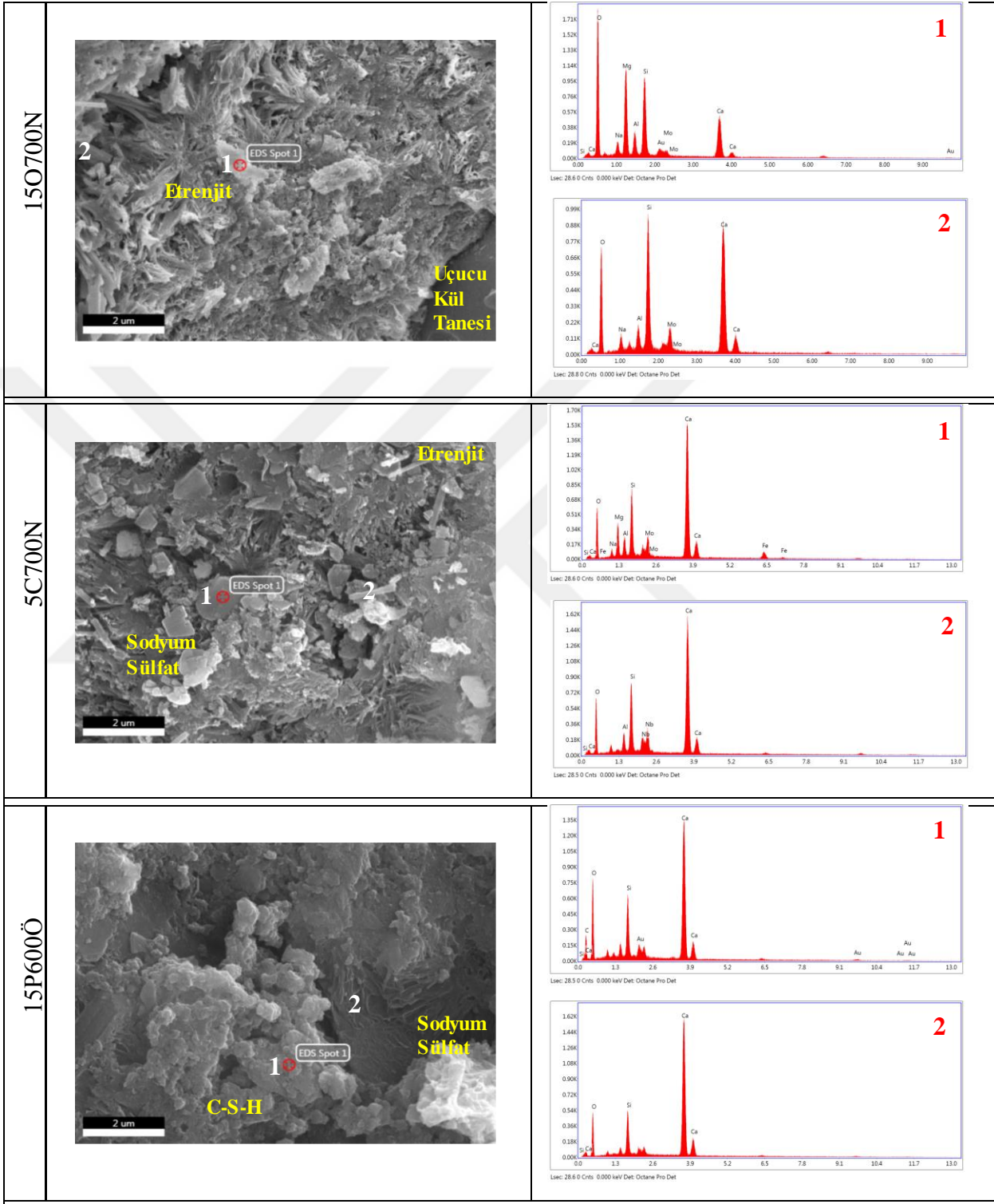
etrenjit yapısı görülmektedir. C-S-H yapısının Ca/Si oranı EDS analizi sonucunda 2.88 bulunmuştur. Etrenjit yapısında yapılan EDS analizi sonucu Ca/S oranı 3.09 olarak belirlenmiştir. Ayrıca referans çimentolarda yapılan EDS analizinde Molibden ve Niobyum gibi elementlerde zayıf pikler elde edilmiştir. Referans çimentolara ait EDS analizi sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir.

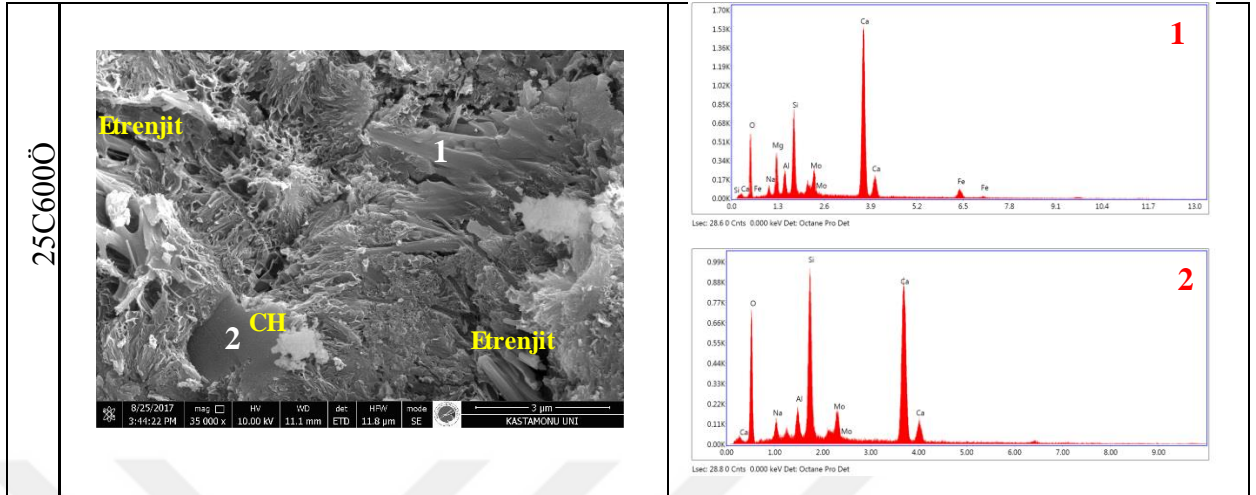
**Tablo 6.1.** Sodyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları

Çimento	Element (%)	Ca	S	Si	Al	Na	Mg	Fe	O
O	1.Nokta	35.30	7.76	1.46	-	8.27	-		47.21
	2. Nokta	46.37	20.82	-	0.93	3.08	-		28.80
P	1.Nokta	33.36	-	7.61	2.73	2.41	5.75	1.76	57.31
	2. Nokta	22.30	-	5.63	0.27	-	-	-	71.65
C	1.Nokta	21.92	-	7.61	0.95	1.87	1.49	-	63.93
	2. Nokta	23.17	7.51	4.53	2.44	-	1.56	-	59.86

Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkı çimentoların mikroyapı özellikleri Şekil 6.3’de verilmiştir. Diğer SEM görüntüleri ise EK-2’de verilmiştir.

Şekil 6.3’de görüldüğü gibi referans çimentolarda olduğu gibi belirgin etrenjit yapısına rastlanılmamıştır. 5C700N kodlu uçucu kül çimentosunda ise bazı bölgelerde etrenjit varlığı tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde (EK-2) mikroyapı bünyesinde çatlak/çatlak ağı oluşumları belirlenmiştir. Uçucu kül katkı çimentolarda etrenjit yapısından çok beyaz renkli sodyum esaslı tuz yapıları belirlenmiştir (EK-2).





**Şekil 6.3.** Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkıli çimentoların mikroyapı özellikleri

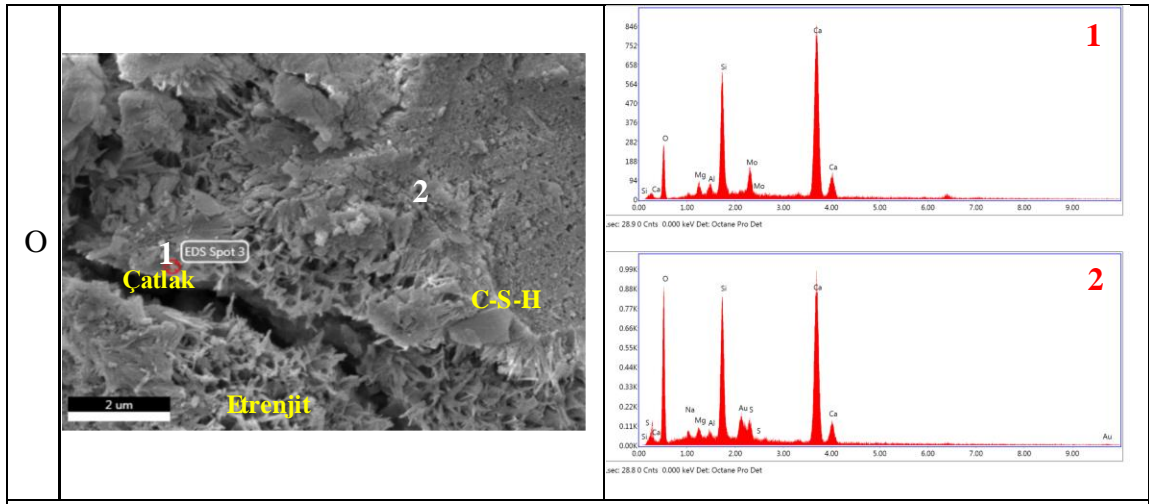
Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkıli çimentoların EDS analizlerinin sonuçları Tablo 6.2’de verilmiştir. 15O700N çimentosuna ait 1 noktasındaki EDS analizinde düşük Ca/Si oranı ve kuvvetli Mg piki belirlenmiştir. Bu yapının uçucu külden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. 2. noktasında ise Ca/Si oranı 1.89 olan C-S-H yapısı tespit edilmiştir. Klinker ile birlikte kullanılan uçucu kül çimento pastalarındaki Ca/Si oranını azaltmıştır. 5C700N çimentosundaki uçucu kül oranının %5 olması Ca/Si oranının 25C600Ö çimentosuna göre daha yüksek olmasına yol açmıştır. 15P600Ö çimento pastasında yapılan EDS analizinde 1 numaralı bölgede karbonat esaslı bir bileşik elde edilmiştir.

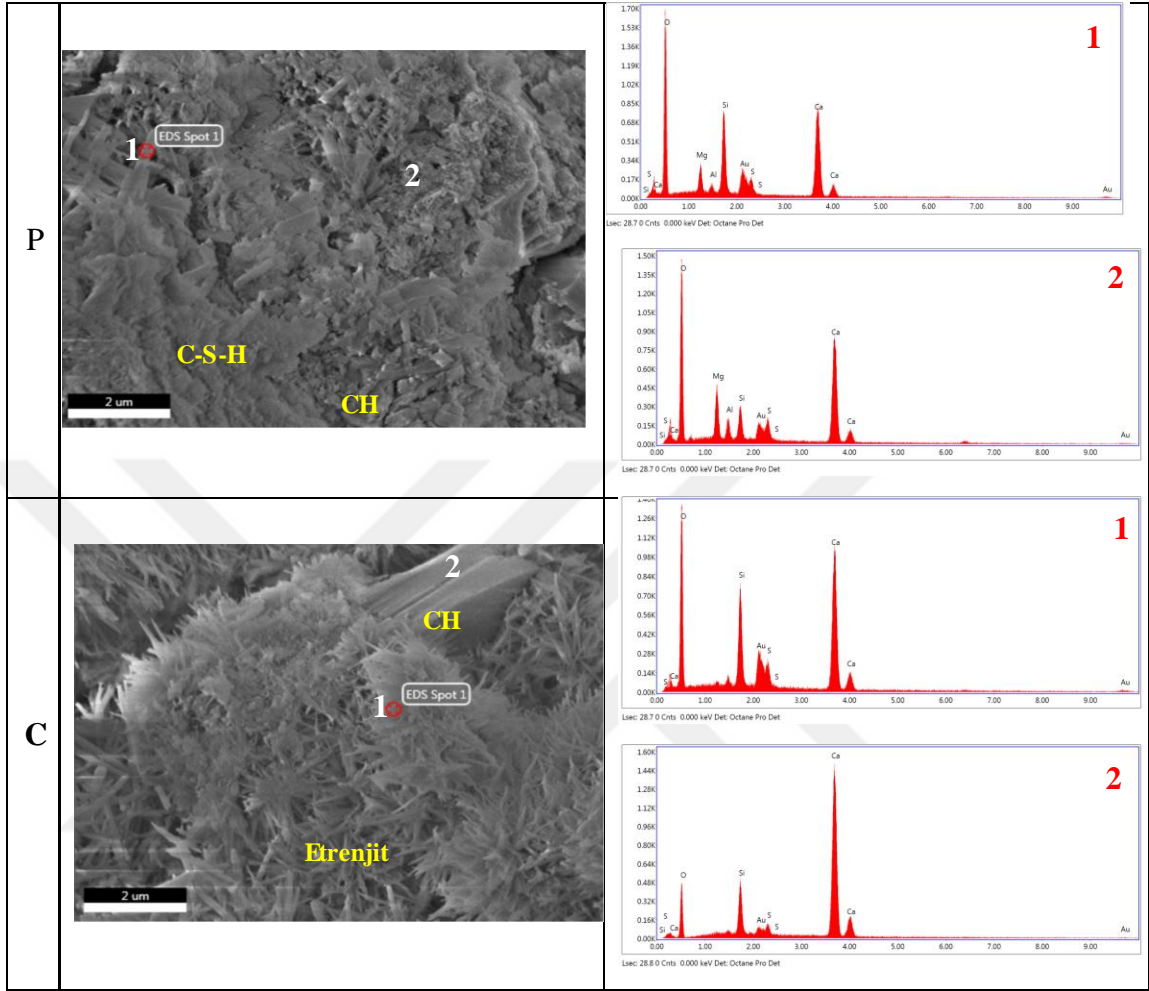
**Tablo 6.2.** Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarına ait EDS sonuçları

Çimento	Element (%)	Ca	C	Si	Al	Na	Mg	Fe	O
15O700N	1.Nokta	8.57	-	9.44	3.16	3.40	11.93	-	62.70
	2. Nokta	21.79	-	11.53	2.21	2.75	-	-	60.05
5C700N	1.Nokta	20.73	-	7.61	2.73	2.41	5.75	1.76	57.32
	2. Nokta	22.30	-	5.63	0.28	-	-	-	71.65
15P600Ö	1.Nokta	14.95	20.49	4.39	-	-	-	-	59.92
	2. Nokta	26.07	-	4.60	-	-	-	-	69.33
25C600Ö	1.Nokta	22.21	-	12.88	0.88	-	-	-	63.98
	2. Nokta	21.68	-	11.45	1.71	2.04	-	-	62.80

## 6.2. Magnezyum Sülfat Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri

180 gün boyunca %5'lik magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilen referans çimento pastalarına ait SEM görüntüleri Şekil 6.4'de sunulmuştur. Magnezyum sülfat etkisine maruz referans çimentolara ait diğer SEM görüntüleri ise EK-3'de sunulmuştur.





Şekil 6.4. Magnezyum sülfat etkisine maruz referans çimentoların SEM görüntüleri

Magnezyum sülfat etkisine maruz O referans çimentosunda düşük oranda etrenjit seviyesi tespit edilmiştir. Ancak pasta bünyesinde yoğun bir çatlak ağının olduğu görülmüştür. P referans çimentosunda ise daha belirgin etrenjit yapısı tespit edilmiştir. C referans çimentosunda ise yoğun bir etrenjit yapısı oluşmuş ve oluşan etrenjit yapısı da genellikle top şeklindedir (EK-3).

Referans çimentolara ait EDS analizleri Tablo 6.3’de sunulmuştur. O referans çimentosunda yapılan SEM analizinde C-S-H yapılarında EDS analizi yapılmış ve

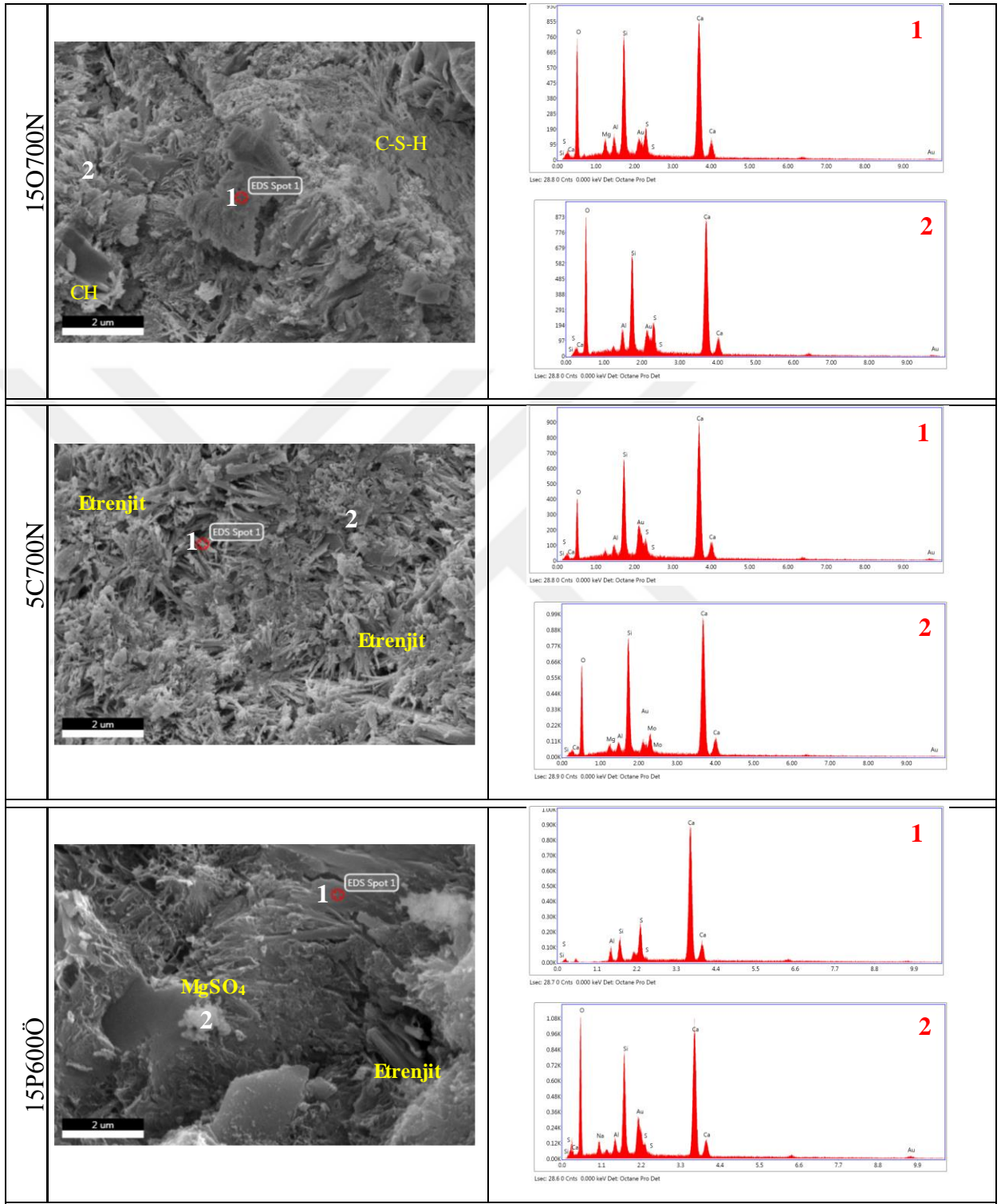
sonuçlar Tablo 6.3’de verilmiştir. O referans çimentosunun 3 numaralı bölgesinde Ca/Si oranı 2.80, 2 numaralı bölgesinde ise Ca/Si oranı 2.26 olarak belirlenmiştir. P referans çimentosunda da C-S-H yapıları görülmüştür. C referans çimentosunun 1. Bölgesinde C-S-H yapısı 2. Bölgesinde CH yapısı görülmektedir.

**Tablo 6.3.** Magnezyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları

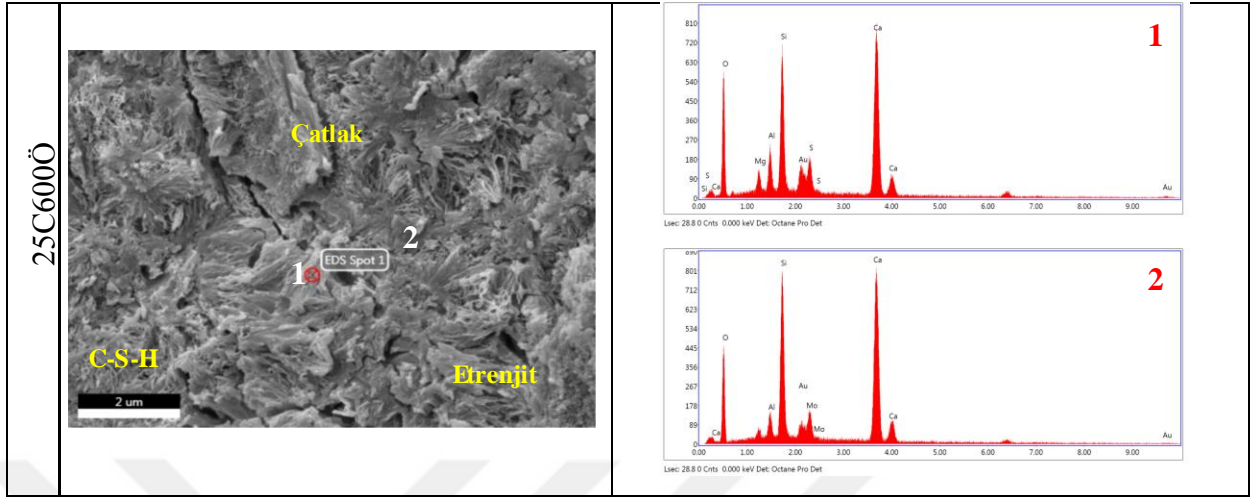
Çimento	Element (%)	Ca	S	Si	Al	Na	Mg	Fe	O
O	1.Nokta	35.17		12.58	0.92		1.01		48.44
	2. Nokta	21.56	1.60	9.55	0.52	1.52	1.00		63.70
P	1.Nokta	14.07	1.63	6.72	1.00	-	3.32	-	72.54
	2. Nokta	15.51	2.01	2.73	1.91	-	5.71	-	71.67
C	1.Nokta	18.25	2.12	6.56	-	-	-	-	72.21
	2. Nokta	37.69	1.45	5.92	-	-	-	-	54.73

Magnezyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri Şekil 6.5’de verilmiştir. Uçucu kül katkılı çimento pastalarının diğer SEM görüntüleri ise EK-4’de verilmiştir.

15O700N çimentosundan elde edilen pastaların sodyum sülfat etkisinde bekletilen pastalara benzer özellikler gösterdiği görülmektedir. 5C700N çimento pastasında ise daha yoğun bir etrenjit yapısı gözlenmiştir. 15P600Ö ve 25C600Ö çimento pastalarında ise belirgin etrenjit tabakasına rastlanılmamıştır. Magnezyum sülfat etkisinde genellikle etrenjit yapısının çok oluşmadığı ancak çok miktarda mikroçatlak olduğu da gözlenmiştir (EK-4).







**Şekil 6.5.** Magnezyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkıli çimentoların mikroyapı özellikleri

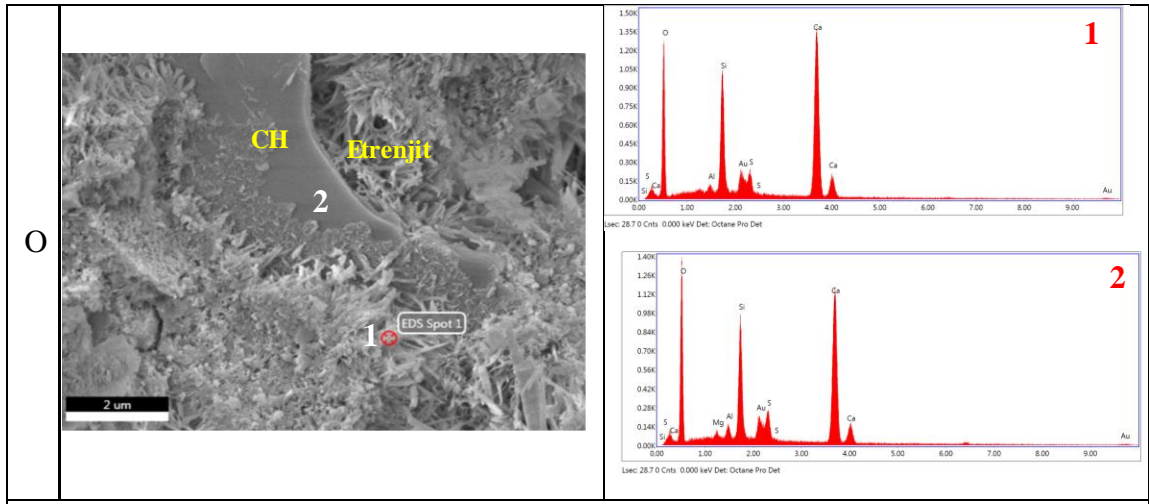
Magnezyum sülfat etkisine maruz çimento pastalarına ait EDS analizi sonuçları Tablo 6.4'de sunulmuştur. 15O700N çimentosunda yapılan SEM analizinde C-S-H yapılarında EDS gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 6.4'de verilmiştir. 15O700N çimentosunda belirlenen C-S-H jelindeki Ca/Si oranı 2.26-2.62 arasında değişmektedir. 5C700N çimentosunun C-S-H jelindeki Ca/Si oranı ise 2.22-2.65 değerleri arasındadır. 15P600Ö çimentosunun 1 numaralı bölgesinde Ca/S oranı 5.98 olan alçıtaşı varlığı 2 numaralı bölgesinde ise Ca/Si oranı 2.41 olan C-S-H yapısı gözlenmiştir. 25C600Ö çimentosunun üretiminde kullanılan yüksek orandaki uçucu kül C-S-H yapısındaki Ca/Si oranını azaltmaktadır.

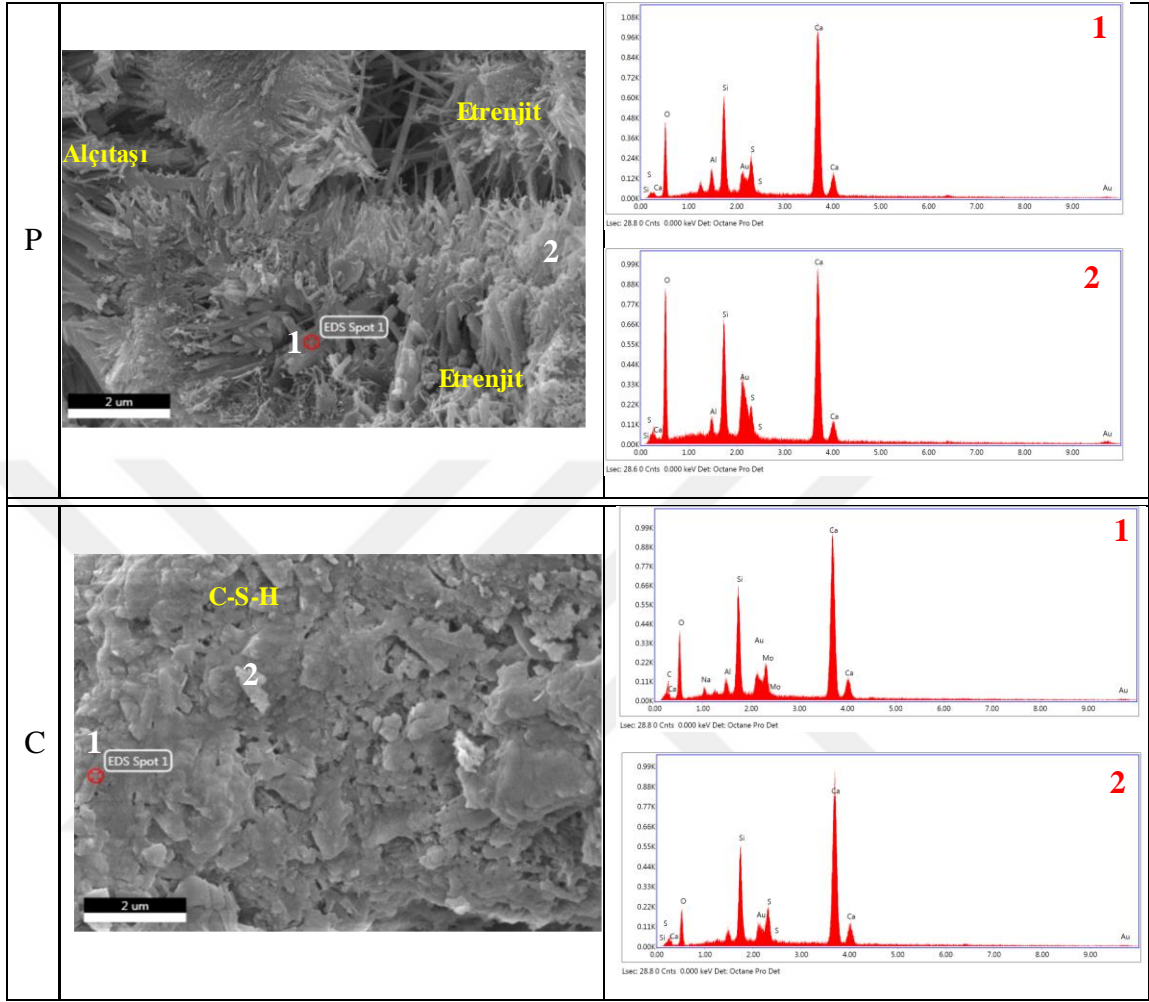
**Tablo 6.4.** Magnezyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarına ait EDS sonuçları

Çimento	Element (%)	Ca	S	Si	Al	Na	Mg	Fe	O
15O700N	1.Nokta	22.23	2.59	9.82	1.51	-	1.50	-	61.91
	2. Nokta	20.65	2.81	7.87	1.79	-	-	-	66.31
5C700N	1.Nokta	29.99	2.42	11.29	1.14	-	-	-	53.81
	2. Nokta	25.35	-	11.44	0.97	-	0.86	-	60.22
15P600Ö	1.Nokta	79.72	13.33	5.09	1.86	-	-	-	-
	2. Nokta	18.34	1.08	7.62	1.22	2.51	-	-	68.23
25C600Ö	1.Nokta	23.28	3.11	9.81	3.05	-	1.73	-	58.36
	2. Nokta	26.46	-	13.06	2.02	-	-	-	56.43

### 6.3. Sülfürik Asit Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri

180 gün boyunca %5'lik sülfürik asit çözeltisinde bekletilen referans çimento pastalarına ait SEM görüntüleri Şekil 6.6'da sunulmuştur. Pastalara ait diğer SEM görüntüleri ise EK-5'de verilmiştir.





**Şekil 6.6.** Sülfirik asit çözeltisinde bekletilen referans çimento pastalarının SEM görüntüleri

O referans çimentosundan elde edilen pastaların SEM görüntülerinde yoğun bir etrenjit tabakası görülmektedir. P referans çimentosundan elde edilen pastalarda da etrenjit yapısı elde edilmiştir. Ayrıca bazı bölgelerde alçıtaşı varlığına da rastlanılmıştır. C referans çimentosundan elde edilen pastalarda ise etrenjit yapısının yoğun şekilde ve top etrenjitlerin olduğu tespit edilmiştir (EK-5).

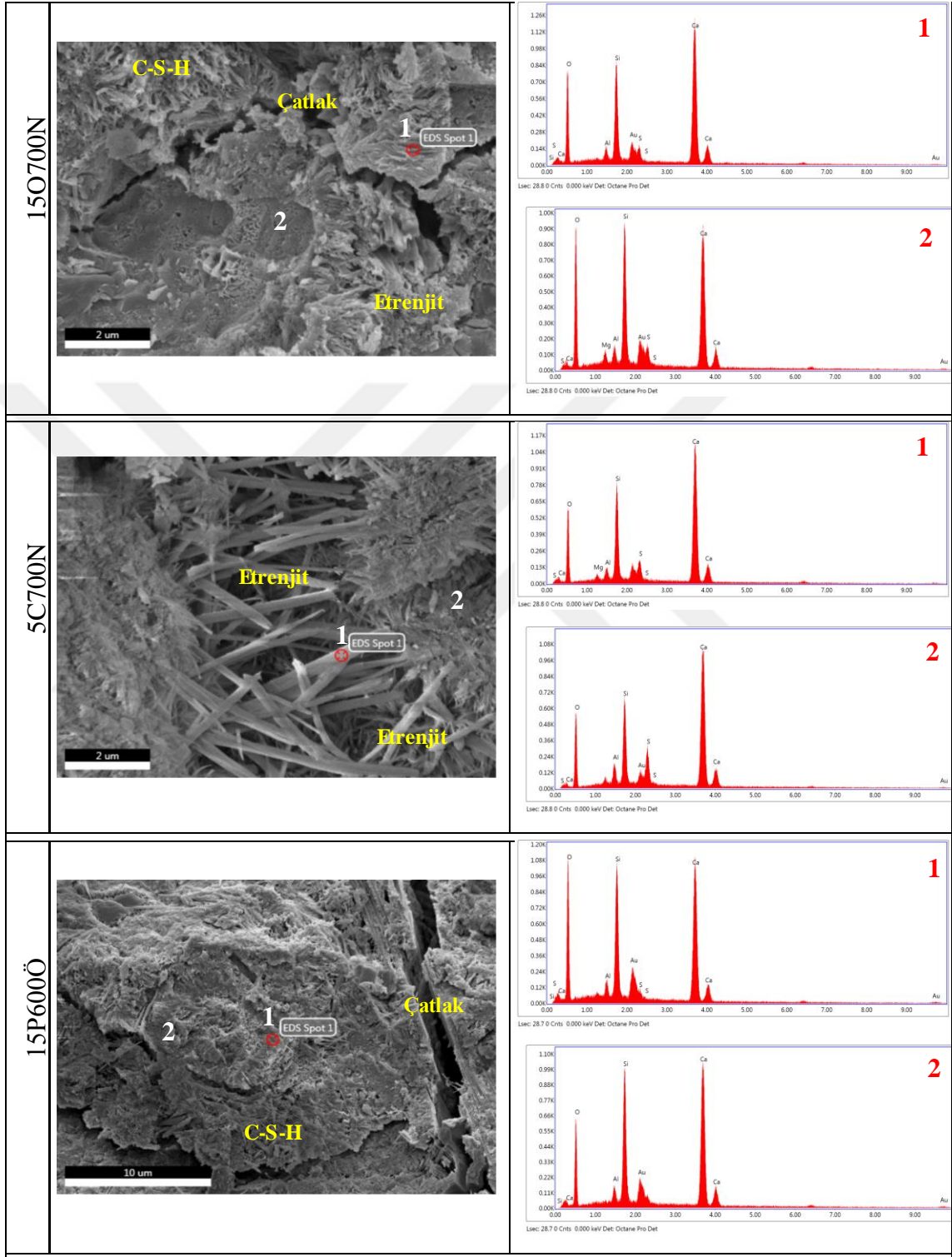
Sülfürik asite maruz referans çimentolara ait EDS analizi sonuçları Tablo 6.5’de verilmiştir. Çimento mikroyapılarında genellikle C-S-H yapıları gözlenmiştir.

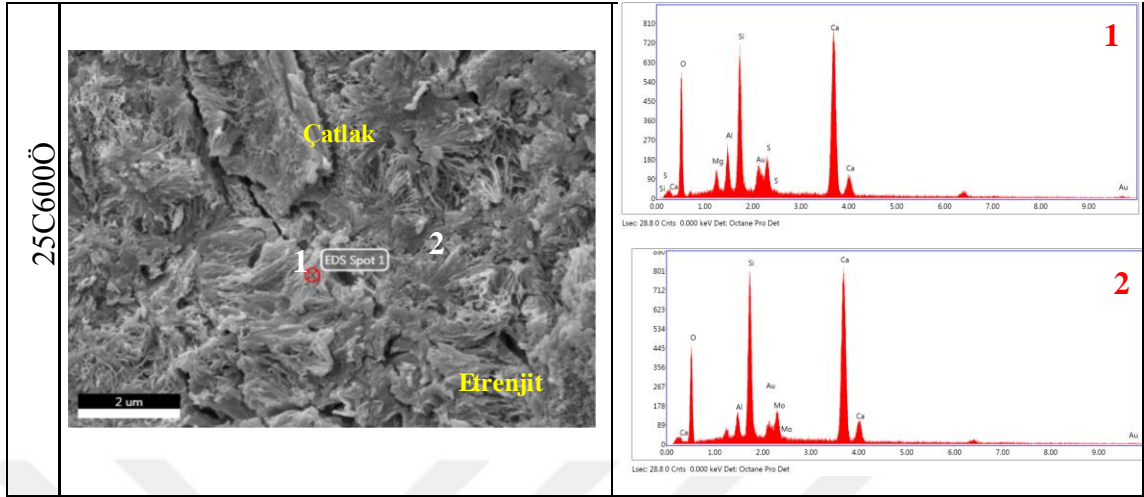
**Tablo 6.5.** Sülfürik asit etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları

Çimento	Element (%)	Ca	S	Si	Al	Na	Mg	C	O
O	1.Nokta	21.97	1.95	8.28	0.65	-	-	-	66.67
	2. Nokta	19.12	2.43	7.64	1.06	-	0.84	-	68.43
P	1.Nokta	31.13	4.15	8.85	2.05	-	-	-	53.21
	2. Nokta	21.73	2.59	7.59	1.23	-	-	-	65.38
C	1.Nokta	27.07	-	8.97	1.20	0.88	-	14.31	45.06
	2. Nokta	40.77	5.36	11.38	-	-	-	-	41.83

Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri Şekil 6.7’de verilmiştir. Uçucu kül katkılı çimento pastalarının diğer SEM görüntüleri ise EK-6’da verilmiştir.

150700N ve 25C600Ö çimento pastalarında etrenjit varlığına rastlanılmamıştır. Ancak pastaların bünyelerinde çatlakların oluştuğu görülmüştür. 5C700N ve 15P600Ö çimento pastalarında ise belirgin olarak etrenjit yapısı ve az da olsa alçıtaşının varlığı gözlenmiştir (EK-6).





**Şekil 6.7.** Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkıli çimentoların mikroyapı özellikleri

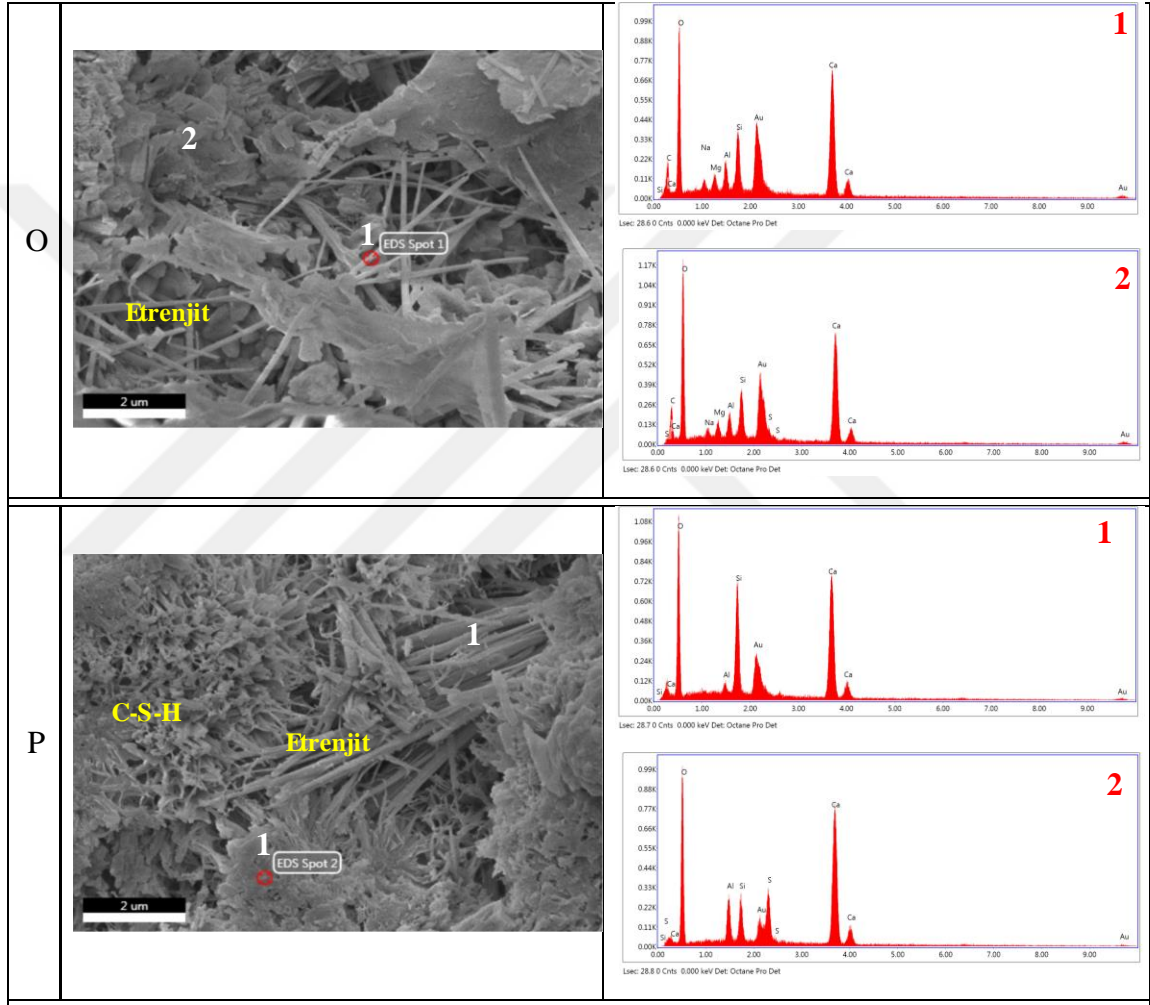
Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarına ait EDS sonuçları Tablo 6.6'da sunulmuştur. EDS analizinde etrenjit yapıları belirlenmiş ve elementsel olarak oranları verilmiştir.

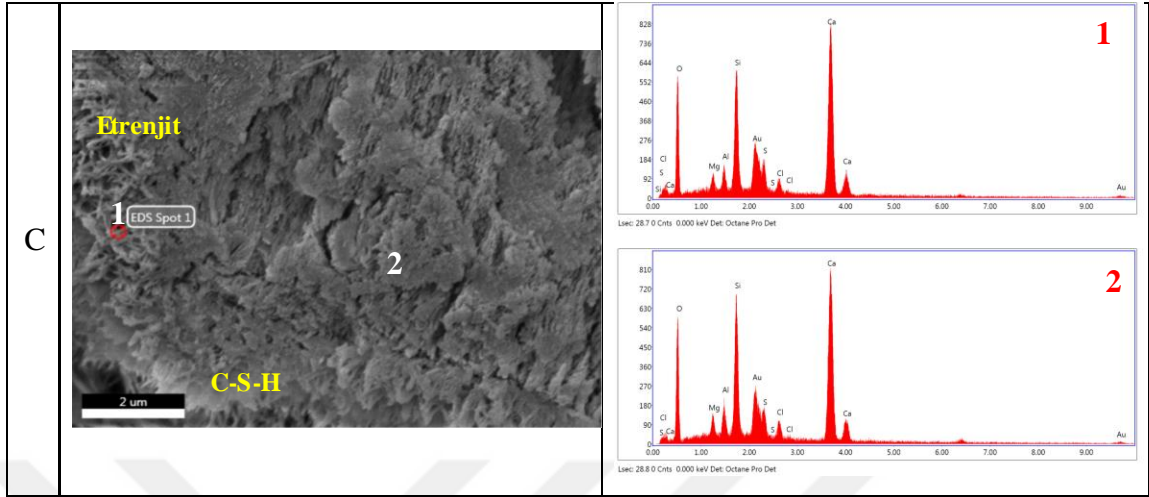
**Tablo 6.6.** Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarına ait EDS sonuçları

Çimento	Element (%)	Ca	S	Si	Al	Na	Mg	Fe	O
15O700N	1.Nokta	25.55	1.60	9.00	1.14	-	-	-	62.22
	2. Nokta	20.29	1.85	10.30	1.49		1.40		64.06
5C700N	1.Nokta	27.03	4.05	9.37	1.11		0.38		58.05
	2. Nokta	27.87	4.37	8.42	2.08	-	-	-	56.92
15P600Ö	1.Nokta	20.50	0.89	10.17	1.48	-	-	-	66.14
	2. Nokta	26.94	-	12.84	1.51	-	-	-	57.92
25C600Ö	1.Nokta	23.28	3.11	9.81	3.05		1.73		58.36
	2. Nokta	26.46		13.06	2.02				56.43

#### 6.4. Deniz Suyu Etkisine Maruz Pastaların Mikroyapı Özellikleri

180 gün boyunca deniz suyu (Karadeniz) bekletilen referans çimento pastalarına ait SEM görüntüleri Şekil 6.8’de sunulmuştur. Pastalara ait diğer SEM görüntüleri ise EK-7’de verilmiştir.





Şekil 6.8. Deniz suyunda bekletilen referans çimento pastalarının SEM görüntüleri

Şekil 6.8’de görüldüğü gibi deniz suyunda bekletilen çimento pastalarında etrenjit varlığı görülmüştür. O çimentosunun  $C_3A$  içeriğinin düşük olmasına ve literatürde yer alan deniz suyunda etrenjit oluşmamasına dair bilgiye rağmen etrenjit varlığı gözlenmiştir. Deniz suyu içerisindeki pastaların mikroyapılarında C-S-H yapıları da gözlenmiştir (EK-7).

Deniz suyuna maruz referans çimento pastalarında gerçekleştirilen EDS analizleri Tablo 6.7’de verilmiştir. Deniz suyunda bekletilen pastalarda etrenjit yapısının olduğu EDS analizi ile tespit edilmiştir. Deniz suyunda bekletilen pastalar için Cl pikleri de elde edilmiştir.

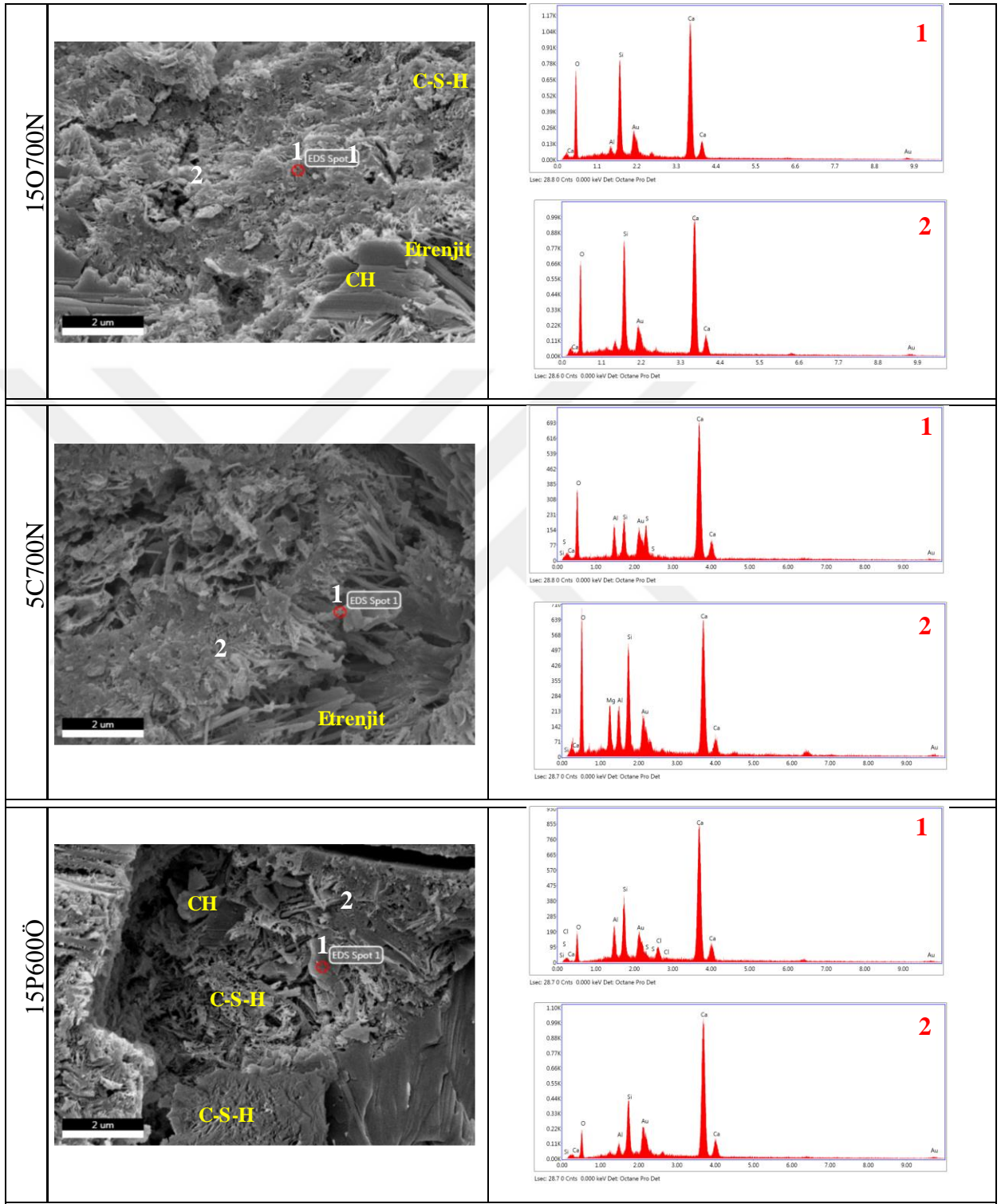


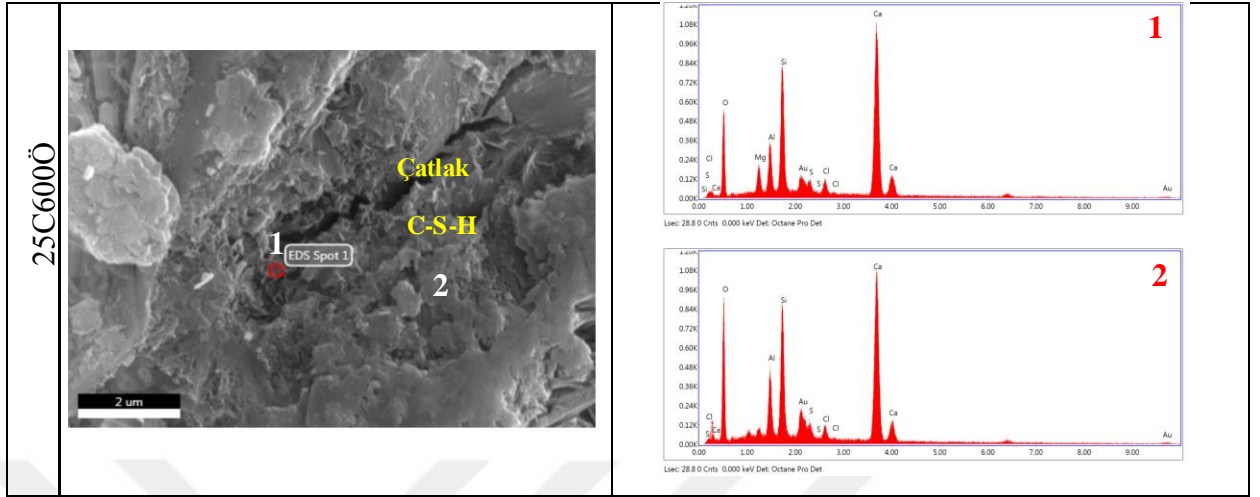
**Tablo 6.7.** Deniz suyu etkisine maruz referans çimento pastalarına ait EDS sonuçları

Çimento	Element (%)	Ca	S	Si	Al	Na	Mg	C	O
O	1.Nokta	14.19	-	3.79	2.02	2.20	1.54	17.77	56.99
	2. Nokta	13.28	0.82	4.04	2.20	2.11	1.75	8.26	43.78
P	1.Nokta	17.64		8.22	1.01	-	-	-	72.04
	2. Nokta	18.32	4.21	2.96	3.26	-	-	-	70.79
C	1.Nokta	23.90	2.73	8.89	1.66		1.49		58.74
	2. Nokta	23.12	2.56	9.79	2.09		1.56		58.09

Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri Şekil 6.9’da verilmiştir. Uçucu kül katkılı çimento pastalarının diğer SEM görüntüleri ise EK-8’de verilmiştir. Literatürde deniz suyunda etrenjitin oluşmadığı belirtilmesine rağmen SEM/EDS analizlerinde etrenjit varlığı tespit edilmiştir. Deniz suyunda bekletilen pastalarda Cl pikleride elde edilmiştir.

Deniz suyunda bekletilen uçucu kül katkılı çimento pastalarında etrenjit yapısı gözlenmemiştir. C-S-H, CH gibi yapılar gözlenmiş ve deniz suyundan sızan sodyum esaslı tuzlarında varlığı belirlenmiştir.





**Şekil 6.9.** Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento ların mikroyapı özellikleri

Deniz suyunda bekletilen uçucu kül katkıli çimento pastalarının EDS analizleri Tablo 6.8’de verilmiştir.

**Tablo 6.8.** Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkıli çimento pastalarına ait EDS sonuçları

Çimento	Element (%)	Ca	S	Si	Al	Na	Mg	Fe	O
15O700N	1.Nokta	24.40		9.61	0.98				64.16
	2. Nokta	23.73		10.22					65.24
5C700N	1.Nokta	29.21	3.91	3.85	3.00				59.10
	2. Nokta	19.58		8.11	3.31		3.94		64.16
15P600Ö	1.Nokta	42.51	1.17	9.04	4.89				38.60
	2. Nokta	45.76		9.46	1.52				41.62
25C600Ö	1.Nokta	26.91	1.26	10.71	4.15		2.45		52.77
	2. Nokta	22.07	1.32	9.16	4.61				61.06

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmanın ilk aşamasında 20 farklı özellikte çimento üretilerek taze ve sertleşmiş harç özellikleri, sülfat dayanıklılığı, büzülme, su emme ve maliyet gibi etkenler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde özellikleri iyileştirilmiş 7 adet çimento tespit edilmiş ve bu çimento örneklerinin durabilite özellikleri incelenmiştir. Durabilite deneylerinin yanında hazırlanan çimento pastalarında SEM/EDS analizleri de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme ve uygulanan deneyler ile aşağıda sunulan sonuçlar elde edilmiştir;

1. Aşamada (Taguchi deneyleri) SDÇ klinkerinin öğütmesinde karşılaşılan problemler mekanik dayanımları olumsuz etkilemiştir. Bu nedenlerden dolayı SDÇ klinkeri 1. Aşamada yapılan test sonuçlarına göre 2. Aşamada kullanılmamıştır. SDÇ klinkeri kullanılarak elde edilen çimentolarda istenilen dayanım özellikleri elde edilememiştir. Bu olayın asıl nedeni klinkerden kaynaklanan öğütme problemleridir. Klinkerin zor öğütülebilir olması çimentonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilemiştir.

Çimento inceliklerinin tespitinde Blaine yöntemi ve PSD analizi kullanılmıştır. Blaine yöntemi ve PSD analizlerine göre uçucu kül ve öğütme süresinin artması çimento inceliklerini arttırmaktadır. Uçucu kül oranının ve öğütme süresinin artması Blaine incelik değerlerini arttırırken çimento ortalama tane boyutlarını azaltmaktadır. Bu aşamada PK klinkerinin yüksek  $C_3S$  içeriğinden dolayı daha iyi öğütülebilir olduğu belirlenmiştir.  $C_3A$  oranı düşük klinker öğütme prosesine önemli katkı sağlamaktadır. Kimyasal katkı üretici firma tarafından önerilen öğütme kolaylaştırıcılar beklenen etkiyi göstermiş öğütme performansı açısından Ö2 katkısının kullanımı daha uygun bulunmuştur.

Uçucu kül oranındaki artış kıvam suyu miktarını arttırmaktadır. Aynı etki harçlar üzerinde de görülmüş uçucu kül oranındaki artış ile birlikte işlenebilirlik azalmıştır. Literatürde F sınıfı uçucu küllerin küresel tane yapısından dolayı genellikle işlenebilirliğe

olumlu katkısı olduğu belirtilmiştir. Uçucu kül için yapılan SEM analizinde küresel tanelerin yanında küresel olmayan tanelerinde olması bu olayın nedenini açıklamaktadır.

Harçların boyutsal kararlılığı açısından en uygun ikame oranı %15-25 olarak belirlenmiştir. Uçucu kül oranının %5 ve 35 olması harçların büzülme özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Çimento üretiminde kullanılan %5 uçucu külün kapiler boşlukları kapamada yetersiz kalması, %35 uçucu kül kullanıldığında ise işlenebilirliğe bağlı olarak oluşan boşluk oranındaki artış harçların büzülme/şişme davranışlarını etkilemiştir.

Çimentoların erken yaş dayanımlarında uçucu kül oranındaki artış olumsuzluğa yol açarken bu durum nihai dayanımlarında puzolanik aktivite ile ortadan kalkmaktadır. Öğütme süresindeki artış çimento inceliklerini arttırmasından (ortalama tane boyutunu azaltmasından) dolayı basınç dayanımlarını önemli derecede arttırmaktadır. Uçucu kül kullanılması durumunda  $C_3S$  oranı yüksek klinkerlerin tercih edilmesi uygun olacaktır.

1. aşamada yapılan sülfat dayanıklılığı deneylerinde çimento dayanım sınıflarının (32.5-42.5-52.5) karmaoksit yapısı kadar önemli olduğu görülmüştür. Nitekim  $C_3A$  içeriği düşük ancak basınç dayanımları da düşük olan SDC klinkerinden üretilen çimentolar sülfat etkisinden daha çok etkilenmiştir. Portland çimentosu klinkerinin %15-25 oranlarında uçucu kül ile birlikte kullanımı daha olumlu sonuçlar sağlamıştır.

Sülfirik asit, sodyum ve magnezyum sülfat dayanıklılığı açısından uçucu kül kullanımı olumlu katkılar sağlamıştır. Özellikle %15-25 oranında uçucu kül kullanımı sülfat etkisi ile meydana gelen genleşmeleri azaltmıştır.

Deniz suyunda beklenen harç örneklerinde ise uçucu kül kullanımı çok olumlu sonuçlar sağlamamıştır. Harç bünyelerinde referans çimentolara yakın genleşme değerleri elde edilmiştir. Ancak deniz suyu uçucu kül kullanılan çimento harçlarının özellikle erken yaş dayanımlarına olumlu katkı sağlamıştır.

Yüksek sıcaklık etkisinde harçların 300 °C'ye kadar basınç dayanımlarında büyük olumsuzluklar ile karşılaşılma hatta bazı çimento gruplarında dayanım artışı elde edilmiştir. 900°C'de gerçekleştirilen deneylerde ise harç bünyesinde yer alan buharlaşmayan su hidratasyon ürünlerinden ayrılarak mikroyapı da buhar basıncı oluşturmuştur. Oluşan buhar basıncı harçın bünyesinde çatlakların hızla yayılmasına yol açarak dayanım kaybı oluşturmuştur.

Karbonatlaşma deneylerinde ise literatürde yer alan sonuçların aksi bir durum ortaya çıkmıştır. Genellikle mineral katkı kullanılması karbonatlaşma oranını arttırırken bu çalışmada uçucu kül kullanımı karbonatlaşmayı azaltmıştır. Ancak bu çalışmada karbonatlaşma deneyi için hazırlanan harçlar amonyum karbamat katkılı olup su kütüne tabi tutulduğu için sonuçlar farklılık göstermiştir. Bu farklılığın ana nedeni şişme olarak belirlenmiştir. Uçucu kül katkılı çimentolarda şişme miktarı referans çimentolara göre daha az olmuştur. Bu yüzden şişme üzerinde açığa çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in oldukça etkili olduğu düşünülmektedir. Uçucu kül katkılı çimentolarda daha az  $\text{Ca(OH)}_2$  açığa çıktığı için şişme miktarları daha az olmaktadır. Bu durum sonraki süreçte karbonatlaşma rötresini de etkilemiştir.

Uçucu kül oranındaki artış harçların bünyesinde oluşan ASR genleşmelerini azaltmaktadır.

SEM/EDS analizlerine göre uçucu kül katkılı çimentoların genel olarak Ca/Si oranları daha düşük olmaktadır. Sodyum sülfat, magnezyum sülfat ve sülfürik asit etkisinde maruz harçlarda etrenjit ve alçıtaşı varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca deniz suyu etkisinde etrenjit varlığı da tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; çimento üretiminde kullanılan öğütme kolaylaştırıcılar ve mukavemet arttırıcıların dayanım ve dayanıklılık açısından önemli bir rolü bulunmaktadır. Kimyasal dayanıklılık için çimento dayanım sınıfının (32.5, 42.5, 52.5 gibi) arttırılmasında bu katkıların kullanılması durabiliteye önemli katkı sağlayacaktır.

Ayrıca maliyet hesaplamalarında öğütme süresinin çimento maliyetinde ana parametre olduğu tespit edilmiştir. Öğütme kolaylaştırıcı katkıları ile öğütme süresi azaltılarak çimento birim fiyatlarının azalması sağlanabilir.

%15-25 oranlarında uçucu kül kullanımı durumunda daha dayanıklı, daha çevreci, daha düşük maliyetli çimentolar üretilir. Çimento kimyasal katkılarının ve uçucu külün birlikte kullanımı sürdürülebilir çimento üretimine önemli katkı sağlar.

Bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme ve uygulanan deneyler ile aşağıda bazı önerilerde bulunulmuştur;

Türkiye’de büyük oranlarda açığa çıkan uçucu külün birlikte öğütme tekniği ile %15-25 oranlarında kullanılarak sektöre katkı sağlayacağı önerilmektedir. Bu sayede çevresel problemlerde azalacaktır.

Öğütme kolaylaştırıcı ve mukavemet artırıcı katkıların kompoze çimento üretiminde kullanımı önerilmektedir.

Yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi F sınıfı uçucu kül kullanımı ASR hasarını azaltmada etkili olmuştur. F sınıfı uçucu küllere ait inceliğin ASR üzerindeki etkisi daha detaylı incelenebilir.

Uçucu kül katkılı çimentolarda ayrı ayrı öğütme tekniği yada öğütme yapmadan kompoze çimento üretiminin dayanım-dayanıklılık özellikleri incelenmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. 2013 Enerji Raporu. Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Kom. 2014.
2. Aruntaş, H. Y. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 21, (2006).
3. Sümer, G. Ç. Hava Kirliliği Kontrolü: Türkiye’de Hava kirliliğini önlemeye yönelik yasal düzenlemelerin ve örgütlenmelerin incelenmesi. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Derg. 13, 37 (2014).
4. Bekir Topçu, İ., Canbaz, M. Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri. Eng.&Arch.Fac.Osmangazi Univ. XIV, (2001).
5. Kapkaç, F. Çimento çeşitleri, özellikleri, hammaddeleri ve üretim aşamaları. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni 223 (2013).
6. Aydın, F. F. Enerji tüketimi ve ekonomik büyüme. Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg. 317–340 (2010). doi:10.18070/EUIIBFD.34309
7. Ishak, S. A. & Hashim, H. Low carbon measures for cement plant - A review. J. Clean. Prod. 103, 260–274 (2015).
8. Mintus, F., Hamel, S. & Krumm, W. Wet process rotary cement kilns: Modeling and simulation. Clean Technol. Environ. Policy 8, 112–122 (2006).
9. Stadler, K. S., Poland, J. & Gallestey, E. Model predictive control of a rotary cement kiln. Control Eng. Pract. 19, 1–9 (2011).
10. Wang, S., Lu, J., Li, W., Li, J. & Hu, Z. Modeling of pulverized coal combustion in cement rotary kiln. Energy and Fuels 20, 2350–2356 (2006).
11. Taylor, H. F. W. Cement chemistry. Acad. Press 20, 335 (1990).
12. Moir, G. K. et al. Improvements in the early strength properties of portland cement [and Discussion]. Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 310, 127–138 (1983).
13. Lyons, A. in Materials for Architects and Builders (Third Edition) 48–95 (2006). doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-075066940-5/50030-7



14. Idris, M. S., Ismail, K. N., Jamaludin, S. B., Ghazali, C. M. R. & Hussin, K. Comparative characterization of clinker's microstructure at different temperature zone during cement production. *Am. J. Environ. Sci.* 4, 136–139 (2008).
15. Maki, I. & Goto, K. Factors influencing the phase constitution of alite in portland cement clinker. *Cem. Concr. Res.* 12, 301–308 (1982).
16. Ghosh, S. N., Mathur, S. V. K. & Parashar, S. A. K. NCBM-Reactive belite cement. *CRI Technology Digest (Cement Research Institute of India)* (1985).
17. De la Torre, A. G., Aranda, M. A. G., De Aza, A. H., Peña, P. & De Aza, S. Clíntiques Portland belíticos. Síntesis y análisis mineralógico. Belite Portl. clinkers. *Synth. Mineral. Anal.* 44, 185–191 (2005).
18. Moir, G. K. & Glasser, F. P. Mineralisers, modifiers and activators in the clinking process. in *9th International Congress on the Chemistry of Cement*, Vol. 1 125–152 (1992).
19. Borgholm, H. E., Herfort, D. & Rasmussen, S. A new blended cement based on mineralised clinker. *World Cem. Res. Dev.* 8, 27–33 (1995).
20. Costa, C. in *Materials for Construction and civil engineering: science, processing, and Design* 1–52 (2015). doi:10.1007/978-3-319-08236-3\_1
21. Aldous, R. T. H. The hydraulic behaviour of rhombohedral alite. *Cem. Concr. Res.* 13, 89–96 (1983).
22. Odigure, J. O. Grindability of cement clinker from raw mix containing metallic particles. *Cem. Concr. Res.* 29, 303–307 (1999).
23. Sakai, E., Miyahara, S., Ohsawa, S., Lee, S. H. & Daimon, M. Hydration of fly ash cement. *Cem. Concr. Res.* 35, 1135–1140 (2005).
24. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V. & Peris-Mora, E. Mechanical treatment of fly ashes. Part I: Physico-chemical characterization of ground fly ashes. *Cem. Concr. Res.* 25, 1469–1479 (1995).
25. Lee, S. H., Sakai, E., Daimon, M. & Bang, W. K. Characterization of fly ash directly collected from electrostatic precipitator. *Cem. Concr. Res.* 29, 1791–1797 (1999).

26. Sharma, P., Tyagi, D. Effect of blended fly ash and superplasticizer on strength of cement. *New Build. Mater. Constr. World* 16, (2011).
27. Goñi, S. & Guerrero, A. SEM/EDX characterization of the hydration products of belite cements from class C coal fly ash. *J. Am. Ceram. Soc.* 90, 3915–3922 (2007).
28. Astm. Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use. *Annu. B. ASTM Stand.* 3–6 (2010). doi:10.1520/C0618
29. Tikalsky, P. J. & Carrasquillo, R. L. Influence of fly ash on the sulfate resistance of concrete. *ACI Mater. J.* 89, 69–75 (1992).
30. Mohebbi, M., Rajabipour, F. & Scheetz, B. E. Reliability of loss on ignition (LOI) test for determining the unburned carbon content in fly ash. in *World of Coal Ash (WOCA) Conference* (2015).
31. Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. *Concrete: microstructure, properties, and materials.* Concrete 684 (2006). doi:10.1036/0071462899
32. ACI. Use of fly ash in concrete Reported by ACI Committee 232. *NCHRP Synth. Highw. Pract.* 96, 1–34 (1986).
33. Anjan K. Chatterjee. Indian fly ashes: their characteristics and potential for mechanochemical activation for enhanced usability. *J. Mater. Civ. Eng. © Asce* 23, 783–788 (2011).
34. Cyr, M., Lawrence, P. & Ringot, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cem. Concr. Res.* 36, 264–277 (2006).
35. Temiz, H. & Karakeçi, A. Y. An investigation on microstructure of cement paste containing fly ash and silica fume. *Cem. Concr. Res.* 32, 1131–1132 (2002).
36. Wang, A., Zhang, C. & Sun, W. Fly ash effects: II. The active effect of fly ash. *Cem. Concr. Res.* 34, 2057–2060 (2004).
37. Mehta, P. K. Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures. *Cem. Concr. Res.* 15, 669–674 (1985).
38. Wang, X. Y. Effect of fly ash on properties evolution of cement based materials. *Constr. Build. Mater.* 69, 32–40 (2014).

39. Jiang, L., Lin, B., Cai, Y. Studies on hydration in high-volume fly ash concrete binders. *ACI Mater. J.* 96, 703–706 (1999).
40. Saeki, T. & Monteiro, P. J. M. A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixtures. *Cem. Concr. Res.* 35, 1914–1921 (2005).
41. Langan, B. W., Weng, K. & Ward, M. A. Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement. *Cem. Concr. Res.* 32, 1045–1051 (2002).
42. Lilkov, V., Dimitrova, E. & Petrov, O. Hydration process of cement containing fly ash and silica fume: the first 24 hours. *Cem. Concr. Res.* 27, 577–588 (1997).
43. Snelson, D. G., Wild, S. & O'Farrell, M. Heat of hydration of Portland cement-metakaolin-fly ash (PC-MK-PFA) blends. *Cem. Concr. Res.* 38, 832–840 (2008).
44. Barnes, B. D., Diamond, S. & Dolch, W. L. The contact zone between portland cement paste and glass 'aggregate' surfaces. *Cem. Concr. Res.* 8, 233–243 (1978).
45. Montgomery, D. G., Hughes, D. C. & Williams, R. I. T. Fly ash in concrete - a microstructure study. *Cem. Concr. Res.* 11, 591–603 (1981).
46. Richardson, I. G. Nature of C-S-H in hardened cements. *Cem. Concr. Res.* 29, 1131–1147 (1999).
47. Ishida, T., Luan, Y., Sagawa, T. & Nawa, T. Modeling of early age behavior of blast furnace slag concrete based on micro-physical properties. *Cem. Concr. Res.* 41, 1357–1367 (2011).
48. Lothenbach, B., Scrivener, K. & Hooton, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 41, 1244–1256 (2011).
49. Frías, M. & de Rojas, M. I. S. Microstructural alterations in fly ash mortars: Study on phenomena affecting particle and pore size. *Cem. Concr. Res.* 27, 619–628 (1997).
50. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. & Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cem. Concr. Compos.* 27, 425–428 (2005).
51. Cost, T., Knight, G. Use of Thermal measurements to detect potential incompatibilities of common concrete materials. *ACI Spec. Publ.* 241, 39–58 (2007).

52. Han, S. H., Kim, J. K. & Park, Y. D. Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new apparent activation energy function. *Cem. Concr. Res.* 33, 965–971 (2003).
53. Hwang, K., Noguchi, T. & Tomosawa, F. Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete. *Cem. Concr. Res.* 34, 2269–2276 (2004).
54. Pane, I. & Hansen, W. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cem. Concr. Res.* 35, 1155–1164 (2005).
55. Schindler, A. K. & Folliard, K. J. Heat of hydration models for cementitious materials. *ACI Mater. J.* 102, 24–33 (2005).
56. Belie, N. De, Baert, G. & Schutter, G. De. Modelling of microstructure of Portland cement – fly ash binders based on calorimetric and thermogravimetric experiments. in 13th International Congress on the Chemistry of Cement. 1–7 (2011).
57. Yu, Z., Ma, J., Ye, G., van Breugel, K. & Shen, X. Effect of fly ash on the pore structure of cement paste under a curing period of 3 years. *Constr. Build. Mater.* 144, 493–501 (2017).
58. Wang, Q., Feng, J. & Yan, P. The microstructure of 4-year-old hardened cement-fly ash paste. *Constr. Build. Mater.* 29, 114–119 (2012).
59. Marsh, B. K. & Day, R. L. Pozzolanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 18, 301–310 (1988).
60. Berry, E. E., Hemmings, R. T. & Cornelius, B. J. Mechanisms of hydration reactions in high volume fly ash pastes and mortars. *Cem. Concr. Compos.* 12, 253–261 (1990).
61. Fraay, a. L. a., Bijen, J. M. & de Haan, Y. M. The reaction of fly ash in concrete a critical examination. *Cem. Concr. Res.* 19, 235–246 (1989).
62. Huang, C. H., Lin, S. K., Chang, C. S. & Chen, H. J. Mix proportions and mechanical properties of concrete containing very high-volume of Class F fly ash. *Constr. Build. Mater.* 46, 71–78 (2013).
63. Zhang, Y. M., Sun, W. & Yan, H. D. Hydration of high-volume fly ash cement pastes. *Cem. Concr. Compos.* 22, 445–452 (2000).

64. Guerrero, A., Goñi, S., Macías, A. & Luxán, M. P. Effect of the starting fly ash on the microstructure and mechanical properties of fly ash-belite cement mortars. *Cem. Concr. Res.* 30, 553–559 (2000).
65. Feng, X. & Clark, B. Evaluation of the Physical and Chemical properties of fly ash products for use in portland cement concrete. 2011 World Coal Ash Conf. Denver, Color. 1–8 (2011).
66. Çelik, Ö., Damci, E. & Pişkin, S. Characterization of fly ash and its effects on the compressive strength properties of Portland cement. *Indian J. Eng. Mater. Sci.* 15, 433–440 (2008).
67. Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Peris, E. & González-López, E. Mechanical treatments of fly ashes. Part III: Studies on strength development of ground fly ashes (GFA) — Cement mortars. *Cem. Concr. Res.* 27, 1365–1377 (1997).
68. Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Peris-Mora, E. & Amahjour, F. Mechanical treatment of fly ashes - Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures. *Cem. Concr. Res.* 30, 543–551 (2000).
69. Payá, J., Borrachero, V., Peris-Mora, E., Aliaga, A. & Monzó, J. Improvement of Portland cement/fly ash mortars strength using classified fly ashes. in *Studies in Environmental Science* 60, 563–570 (1994).
70. Shafiq, N. & Nuruddin, M. F. International journal of sustainable construction engineering technology. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology* 1, (Penerbit UTHM, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2011).
71. Tang, S. W., Yao, Y., Andrade, C. & Li, Z. J. Recent durability studies on concrete structure. *Cem. Concr. Res.* 78, 143–154 (2015).
72. Antiohos, S. K. et al. Low embodied energy cement containing untreated RHA: A strength development and durability study. *Constr. Build. Mater.* 49, 455–463 (2013).
73. Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Painter, K. E. & Malhotra, V. M. Durability of concrete incorporating high volumes of fly-ash from sources in the US. *Aci Mater. J.* 91, 3–12 (1994).

74. Bouzoubaa, N., Zhang, M. H. & Malhotra, V. M. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. *Cem. Concr. Res.* 31, 1393–1402 (2001).
75. Dittrich, S., Neubauer, J. & Goetz-Neunhoeffler, F. The influence of fly ash on the hydration of OPC within the first 44 h - A quantitative in situ XRD and heat flow calorimetry study. *Cem. Concr. Res.* 56, 129–138 (2014).
76. Sivasundaram, V. & Malhotra, V. M. High-performance high-volume fly ash concrete. *Indian Concr. J.* 78, 13–21 (2004).
77. Plowman, C. & Cabrera, J. G. The use of fly ash to improve the sulphate resistance of concrete. in *Waste Management* 16, 145–149 (1996).
78. Marsh, B. K., Day, R. L. & Bonner, D. G. Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash. *Cem. Concr. Res.* 15, 1027–1038 (1985).
79. Riding, K. A., Poole, J. L., Schindler, A. K., Juenger, M. C. G. & Folliard, K. J. Quantification of effects of fly ash type on concrete early-age cracking. *ACI Mater. J.* 105, 149–155 (2008).
80. Page, C. L., Short, N. R. & Holden, W. R. The influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel. *Cem. Concr. Res.* 16, 79–86 (1986).
81. Hughes, D. C. Sulphate resistance of OPC, OPC/fly ash and SRPC pastes: pore structure and permeability. *Cem. Concr. Res.* 15, 1003–1012 (1985).
82. Sinsiri, T., Chindaprasirt, P. & Jaturapitakkul, C. Influence of fly ash fineness and shape on the porosity and permeability of blended cement pastes. *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 17, 683–690 (2010).
83. Nath, P. & Sarker, P. Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete. in *Procedia Engineering* 14, 1149–1156 (2011).
84. Uysal, M. & Akyuncu, V. Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. *Constr. Build. Mater.* 34, 170–178 (2012).
85. Berodier, E. & Scrivener, K. Evolution of pore structure in blended systems. *Cem. Concr. Res.* 73, 25–35 (2015).

86. Duchesne, J. & Bérubé, M. A. Effect of the cement chemistry and the sample size on ASR expansion of concrete exposed to salt. *Cem. Concr. Res.* 33, 629–634 (2003).
87. Dockter, B. C. Using class c fly ash to mitigate alkali–silica reactions in concrete. in *World of Coal Ash (WOCA) Conference* (2009).
88. Roberts, L. R. & Taylor, P. C. Understanding cement-scm-admixture interaction issues. *Concr. Int.* 29, 33–41 (2007).
89. Slanička, Š. The influence of fly ash fineness on the strength of concrete. *Cem. Concr. Res.* 21, 285–296 (1991).
90. Erdoğdu, K. & Türker, P. Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars. *Cem. Concr. Res.* 28, 1217–1222 (1998).
91. Stefania Grzeszczyk and Grzegon Lipowski. Effect of content and particle size distribution of high-calcium fly ash on the rheological properties of cement pastes. *J. Chem. Inf. Model.* 53, 1689–1699 (2013).
92. Peris Mora, E., Payá, J. & Monzó, J. Influence of different sized fractions of a fly ash on workability of mortars. *Cem. Concr. Res.* 23, 917–924 (1993).
93. Wesche, K. *Fly ash in concrete: properties and performance.* (Spon, 1991).
94. Tugrul Albayrak, A., Yasar, M., Gurkaynak, M. A. & Gurgey, I. Investigation of the effects of fatty acids on the compressive strength of the concrete and the grindability of the cement. *Cem. Concr. Res.* 35, 400–404 (2005).
95. Katsioti, M., Tsakiridis, P. E., Giannatos, P., Tsibouki, Z. & Marinos, J. Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance. *Constr. Build. Mater.* 23, 1954–1959 (2009).
96. Jiang C X. Study on high performance grinding aids of cement. *J. Chinese Ceram. Soc.* 29, 507–511 (2011).
97. Gao, X., Yang, Y. & Deng, H. Utilization of beet molasses as a grinding aid in blended cements. *Constr. Build. Mater.* 25, 3782–3789 (2011).
98. Shao, H.J. Zhang, D. C. Study on high performance recombination grinding aids of cement. *Build. Mater. Shandong* 1–3 (2000).

99. Wang Y.P. Zhang T.S. Tong G.Q. Study on recombination grinding aids of cement. *Cement* 8–10 (2002).
100. Guo, Y. & Sun, S. The Effect on the Performance of Cement Grinding Aid Components. *J. Mater. Process. Des.* 1, 29–39 (2017).
101. Teoreanu, I. & Guslicov, G. Mechanisms and effects of additives from the dihydroxy-compound class on Portland cement grinding. *Cem. Concr. Res.* 29, 9–15 (1999).
102. Choi, H. et al. Effect of grinding aids on the grinding energy consumed during grinding of calcite in a stirred ball mill. *Miner. Eng.* 23, 54–57 (2010).
103. Altun, O., Benzer, H. & Enderle, U. The effects of chamber diameter and stirrer design on dry horizontal stirred mill performance. *Miner. Eng.* 69, 24–28 (2014).
104. Altun, O. Investigation of dry horizontal stirred milling applications for cement grinding circuits. (Hacettepe, 2013).
105. Toprak, N. A., Altun, O., Aydogan, N. & Benzer, H. The influences and selection of grinding chemicals in cement grinding circuits. *Constr. Build. Mater.* 68, 199–205 (2014).
106. Karim, M. R., Lai, F. C., Jamil, M. & Zain, M. F. M. Production yield, fineness and strength of cement as influenced by strength enhancing additives. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 7, 253–259 (2013).
107. Jeknavorian, A., Barry, E. & Serafin, F. Determination of grinding aids in portland cement by pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry. *Cem. Concr. Res.* 28, 1335–1345 (1998).
108. Zheng, J., Harris, C. C. & Somasundaran, P. The effect of additives on stirred media milling of limestone. *Powder Technol.* 91, 173–179 (1997).
109. Altun, O., Benzer, H., Toprak, A. & Enderle, U. Utilization of grinding aids in dry horizontal stirred milling. *Powder Technol.* 286, 610–615 (2015).
110. Rashwani, A., Alakhban, Y. & Watti, A. The effect of soapstock on the cement raw mix grindability. *Arabian Journal of Chemistry* 5, 263–270 (2012).
111. Zhang, T., Gao, J. & Hu, J. Preparation of polymer-based cement grinding aid and their performance on grindability. *Constr. Build. Mater.* 75, 163–168 (2015).



- 112.Zhang, Y., Fei, A. & Li, D. Utilization of waste glycerin, industry lignin and cane molasses as grinding aids in blended cement. *Constr. Build. Mater.* 123, 785–791 (2016).
- 113.Sohoni, S., Sridhar, R. & Mandal, G. *Powder technology.* (ScienceDirect, 1991).
- 114.Sottili, L. & Padovani, D. Einfluss von mahlhilfsmitteln in der zementindustrie, Teil 2. *ZKG Int.* 54, 146–151 (2001).
- 115.Rajendran Nair, P. B. & Paramasivam, R. Effect of grinding aids on the time-flow characteristics of the ground product from a batch ball mill. *Powder Technol.* 101, 31–42 (1999).
- 116.Ervanne, H. & Hakanen, M. Analysis of cement superplasticizers and grinding aids a literature survey. (2007).
- 117.Worsfold, P. J. & Yan, B. Determination of alkanolamines by ion-pair chromatography with chemiluminescence detection. *Anal. Chim. Acta* 246, 447–450 (1991).
- 118.Mailvaganam, N. P. et al. *Concrete Admixtures Handbook.* Concrete Admixtures Handbook (1996). doi:10.1016/B978-081551373-5.50019-2
- 119.Flatt, R. J. et al. Analysis of superplasticizers used in concrete. *Analisis* 26, M28–M35 (1998).
- 120.Yilmaz, V. T., Odabaşoğlu, M., İçbudak, H. & Ölmez, H. The degradation of cement superplasticizers in a high alkaline solution. *Cem. Concr. Res.* 23, 152–156 (1993).
- 121.Ma, S., Li, W., Zhang, S., Hu, Y. & Shen, X. Study on the hydration and microstructure of Portland cement containing diethanol-isopropanolamine. *Cem. Concr. Res.* 67, 122–130 (2015).
- 122.Han, J., Wang, K., Shi, J. & Wang, Y. Mechanism of triethanolamine on Portland cement hydration process and microstructure characteristics. *Constr. Build. Mater.* 93, 457–462 (2015).
- 123.Assaad, J. J. & Issa, C. A. Effect of clinker grinding aids on flow of cement-based materials. *Cem. Concr. Res.* 63, 1–11 (2014).

124. Ramachandran, V. S. Action of triethanolamine on the hydration of tricalcium aluminate. *Cem. Concr. Res.* 3, 41–54 (1973).
125. Ben-Dor, L. *Advances in Cement Technology*. Advances in Cement Technology (1983). doi:10.1016/B978-0-08-028670-9.50026-0
126. Perez, J.-P. et al. Why TIPA Leads to an Increase in the mechanical properties of mortars whereas tea does not. *ACI Mater. J.* 217, 583–594 (2003).
127. Gartner, E. & Myers, D. Influence of tertiary alkanolamines on portland cement hydration. *J. Am. Ceram. Soc.* 76, 1521–1530 (1993).
128. Zhang, Y. R. et al. Influence of triethanolamine on the hydration product of portlandite in cement paste and the mechanism. *Cem. Concr. Res.* 87, 64–76 (2016).
129. Gunanathan, C. & Milstein, D. Selective synthesis of primary amines directly from alcohols and ammonia. *Angew. Chemie - Int. Ed.* 47, 8661–8664 (2008).
130. Prasad, D. R. & Hoffman, M. Z. Charge-transfer complexation between methyl viologen and sacrificial electron donors EDTA, triethanolamine, and cysteine. *J. Phys. Chem.* 88, 5660–5665 (1984).
131. Choy, E. T. & Meisen, A. Gas chromatographic detection of diethanolamine and its degradation products. *J. Chromatogr. A* 187, 145–152 (1980).
132. Mrklas, O., Chu, A. & Lunn, S. Determination of ethanolamine, ethylene glycol and triethylene glycol by ion chromatography for laboratory and field biodegradation studies. *J. Environ. Monit.* 5, 336–340 (2003).
133. Janusa, M. a., Wu, X., Cartledge, F. K. & Butler, L. G. Solid-state deuterium NMR spectroscopy of d5-phenol in white portland cement: a new method for assessing solidification/stabilization. *Environ. Sci. Technol.* 27, 1426–1433 (1993).
134. Thomas Heller, Thomas Müller, D. H. Cement additives based on PCE. *ZKG Int.* 40–48 (2011).
135. Sakai, E., Ishida, A. & Ohta, A. New trends in the development of chemical admixtures in japan. *J. Adv. Concr. Technol.* 4, 211–223 (2006).

- 136.Plank, J., Sakai, E., Miao, C. W., Yu, C. & Hong, J. X. Chemical admixtures - chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and Concrete Research* 78, 81–99 (2015).
- 137.Riding, K., Silva, D. A. & Scrivener, K. Early age strength enhancement of blended cement systems by  $\text{CaCl}_2$  and diethanol-isopropanolamine. *Cem. Concr. Res.* 40, 935–946 (2010).
- 138.Qian, J., Shi, C. & Wang, Z. Activation of blended cements containing fly ash. *Cem. Concr. Res.* 31, 1121–1127 (2001).
- 139.Aimin, X. & Sarkar, S. L. Microstructural study of gypsum activated fly ash hydration in cement paste. *Cem. Concr. Res.* 21, 1137–1147 (1991).
- 140.Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C. & Sinsiri, T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Constr. Build. Mater.* 21, 1534–1541 (2007).
- 141.Lawrence, P., Cyr, M. & Ringot, E. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cem. Concr. Res.* 35, 1092–1105 (2005).
- 142.Mishra, R. K., Fernández-Carrasco, L., Flatt, R. J. & Heinz, H. A force field for tricalcium aluminate to characterize surface properties, initial hydration, and organically modified interfaces in atomic resolution. *Dalt. Trans.* 43, 10602 (2014).
- 143.Mishra, R. K., Flatt, R. J. & Heinz, H. Force field for tricalcium silicate and insight into nanoscale properties: Cleavage, initial hydration, and adsorption of organic molecules. *J. Phys. Chem. C* 117, 10417–10432 (2013).
- 144.Tanaka, T. & Kanda, Y. in *Powder Technology Handbook, Third Edition* (2006). doi:doi:10.1201/9781439831885.ch5.1
- 145.Hammervold, J., Reenaas, M. & Brattebo, H. Environmental life cycle assessment of bridges. *J. Bridg. Eng.* 18, 153–161 (2013).
- 146.Sharp, J. H., Gartner, E. M. & Macphee, D. E. Novel cement systems (sustainability). Session 2 of the Fred Glasser Cement Science Symposium. *Adv. Cem. Res.* 22, 195–202 (2010).

- 147.Jankovic, A., Valery, W. & Davis, E. Cement grinding optimisation. in *Minerals Engineering* 17, 1075–1081 (2004).
- 148.Harder, J. Outlook on the cement industry in 2010. *ZKG Int.* 58, 24–32 (2005).
- 149.Hosten, C. & Fidan, B. An industrial comparative study of cement clinker grinding systems regarding the specific energy consumption and cement properties. *Powder Technol.* 221, 183–188 (2012).
- 150.Sverak, T. S., Baker, C. G. J. & Kozdas, O. Efficiency of grinding stabilizers in cement clinker processing. *Miner. Eng.* 43–44, 52–57 (2013).
- 151.Zhang, Y. M. & Napier-Munn, T. J. Effects of particle size distribution, surface area and chemical composition on Portland cement strength. *Powder Technol.* 83, 245–252 (1995).
- 152.Celik, I. B., Oner, M. & Can, N. M. The influence of grinding technique on the liberation of clinker minerals and cement properties. *Cem. Concr. Res.* 37, 1334–1340 (2007).
- 153.Rosemann, H. & Ellerbrock, H. Grinding technology for cement production. *ZKG Int.* 51, 51–62 (1998).
- 154.Von Seebach, M. & Schneider, L. Update on finish grinding with improved energy efficiency. *IEEE Trans. Ind. Appl.* IA-23, 397–403 (1987).
- 155.Odler, I. in *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* 241–297 (2003). doi:10.1016/B978-075066256-7/50018-7
- 156.Schnatz, R. & Knobloch, O. Influence of the ball mill filling factor on the power consumption and throughput of ball mills in combined grinding plants. *ZKG Int.* 53, 438–447 (2000).
- 157.Buzzi, S. Horomill to offer grinding advances. *Int. Cem. Rev.* 42–43 (1993).
- 158.Ghiasvand, E., Ramezani pour, A. A. & Ramezani pour, A. M. Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement. *Constr. Build. Mater.* 53, 547–554 (2014).
- 159.Schiller, B. & Ellerbrock, H. The grinding and properties of cement with several main constituents. *Zement-Kalk-Gips* 45, 324–334 (1992).

- 160.Hawkins, P., Tennis, P. & Detwiler, R. The Use of limestone in Portland cement: A State-of-the-Art Review. (2003).
- 161.Kakali, G. & Tsivilis, S. The effect of intergrinding and separate grinding of cement raw mix on the burning process. *Cem. Concr. Res.* 23, 651–662 (1993).
- 162.Gür, O. Çimento öğütme sistemlerinin eşit beton mukavemetine göre karşılaştırılması ve proses optimizasyonu. *Çimento ve Bet. Dünyası* 124, 96–106 (2014).
- 163.Altun, A. & Ölmez, N. Çimento klinkerinin öğütülebilirliği ve iç yapısı üzerine karşılaştırmalı araştırmalar. *Cevher Hazırlama Derg.* 1–5 (2001).
- 164.Şafak, A. Çimento Mineralojisinin ve petrografisinin çimento teknolojisine katkısı. (Niğde , 2014).
- 165.Campbell, D. H. Microscopical examination and interpretation of portland cement and clinker. Library (1999).
- 166.Ono, Y. Microscopical observation of clinker for the estimation of burning condition, grindability, and hydraulic activity. in *Proceedings of the Third International Conference on Cement Microscopy* 198–210 (International Cement Microscopy Association, 1981).
- 167.Zeljko, M. Metakaolin effects on concrete durability. 1, (2009).
- 168.Drimalas, T., Clement, J. C., Folliard, K. J., Dhole, R. & Thomas, M. D. A. Laboratory and field evaluations of external sulfate attack in concrete. 7, 190 (2011).
- 169.Gollop, R. S. & Taylor, H. F. W. Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack III. Sulfate-resisting portland cement: Reactions with sodium and magnesium sulfate solutions. *Cem. Concr. Res.* 25, 1581–1590 (1995).
- 170.Santhanam, M., Cohen, M. D. & Olek, J. Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack. *Cem. Concr. Res.* 33, 325–332 (2003).
- 171.Neville, A. M. Properties of Concrete. *Journal of General Microbiology* Fourth, (1996).
- 172.Hime, W. G. & Mather, B. Reply to the discussion of the paper ‘Sulfate attack,’ or is it? *Cem. Concr. Res.* 30, 163–164 (2000).

173. Thaulow, N. & Sahu, S. Mechanism of concrete deterioration due to salt crystallization. in *Materials Characterization* 53, 123–127 (2004).
174. Scherer, G. W. Stress from crystallization of salt. *Cem. Concr. Res.* 34, 1613–1624 (2004).
175. Flatt, R. J. Salt damage in porous materials: How high supersaturations are generated. *J. Cryst. Growth* 242, 435–454 (2002).
176. Irassar, E. F. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - A review. *Cement and Concrete Research* 39, 241–254 (2009).
177. Yoshida, N., Matsunami, Y., Nagayama, M. & Sakai, E. Salt weathering in residential concrete foundations exposed to sulfate-bearing ground. *J. Adv. Concr. Technol.* 8, 121–134 (2010).
178. Folliard, K. & Sandberg, P. Mechanisms of concrete deterioration by sodium sulfate crystallization. *ACI Spec. Publ. SP-145*, 933–945 (1994).
179. Stark, D. in *ACI Special Publication 77; George Verbeck symposium on sulfate resistance of concrete*, American Concrete Institute 77, 21–40 (1982).
180. Stark, D. C. Performance of concrete in sulfate environments. *Portl. Cem. Assoc. Rep. RD129* 28 (2002).
181. Odler, I. & Colán-Subauste, J. Investigations on cement expansion associated with ettringite formation. *Cem. Concr. Res.* 29, 731–735 (1999).
182. Mehta, P. K. Mechanism of sulfate attack on portland cement concrete - Another look. *Cem. Concr. Res.* 13, 401–406 (1983).
183. Kurtis, K. E., Monteiro, P. J. M., Brown, J. T. & Meyer-Ilse, W. Expansive reactions in concrete observed by soft X-ray transmission microscopy. in *Materials Research Society Symposium - Proceedings* 524, 3–9 (1998).
184. Skalny, J., Marchand, J. & Odler, I. Sulfate attack on concrete. *Mod. Concr. Technol. Ser.* 32, 217 (2002).
185. Tian, B. & Cohen, M. D. Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion? *Cem. Concr. Res.* 30, 117–123 (2000).

- 186.Chindaprasirt, P., Kanchanda, P., Sathonsaowaphak, A. & Cao, H. T. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* 21, 1356–1361 (2007).
- 187.Bellmann, F., Moser, B. & Stark, J. The pozzolanic reaction of coal fly ash and its effects on the sulfate resistance of concrete. *Zkg Int.* 56, 70–77 (2003).
- 188.Biczock, I. Concrete corrosion concrete protection. *Chem. Publ.* 4, 543 (1967).
- 189.Powers, T. C. C. Structure and physical properties of hardened portland cement Paste. *J. Am. Ceram. Soc.* 41, 1–6 (1958).
- 190.Khatri, R. P., Sirivivatnanon, V. & Yang, J. L. Role of permeability in sulphate attack. *Cem. Concr. Res.* 27, 1179–1189 (1997).
- 191.Aci 201. 201.2R-08 Guide to Durable Concrete. *Concrete* 0–54 (2008).
- 192.Dunstan, M. R. H. & Joyce, R. E. High fly ash content concrete: a review and a case history. in *SP-100: Concrete Durability: Proceedings of Katharine and Bryant Mather International Symposium 100*, 1411–1444 (1987).
- 193.Thomas, M., Shehata, M. & Shashiprakash, S. The Use of Fly Ash in concrete: classification by composition. *Cem. Concr. Aggregates* 21, 105 (1999).
- 194.Lee, S. T. et al. Deterioration of portland-metakaolin cement pastes and mortars exposed to magnesium sulfate solution. *12th Int. Congr. Chem. Cem.* (2007).
- 195.Wild, S. & Khatib, J. M. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cem. Concr. Res.* 27, 137–146 (1997).
- 196.Joorabchian, S. M. Durability of concrete exposed to sulfuric acid attack. 184 (2010).
- 197.Richardson, M. G. *Fundamentals of durable reinforced concrete*. Taylor & Francis e-Library XXXIII, (2003).
- 198.Cui, L. & Cahyadi, J. H. Permeability and pore structure of OPC paste. *Cem. Concr. Res.* 31, 277–282 (2001).
- 199.Gutierrez-Padilla Ma.G.D., M. G. D., Bielefeldt, A., Ovtchinnikov, S., Hernandez, M. & Silverstein, J. Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cem. Concr. Res.* 40, 293–301 (2010).

- 200.Ehrich, S., Helard, L., Letourneux, R., Willocq, J. & Bock, E. Biogenic and chemical sulfuric acid corrosion of mortars. *J. Mater. Civ. Eng.* 11, 340–344 (1999).
- 201.Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. & Polder, R. B. Corrosion of steel in concrete. corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair (2003). doi:10.1002/3527603379
- 202.Vincke, E., Verstichel, S., Monteny, J. & Verstraete, W. A new test procedure for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Biodegradation* 10, 421–428 (1999).
- 203.Nielsen, P. H., Raunkjaer, K., Norsker, N. H., Jensen, N. A. & Hvitved-Jacobsen, T. transformation of wastewater in sewer systems - a review. in *Water Science and Technology* 25, 17–31 (1992).
- 204.Haile, T. & Nakhla, G. A Novel zeolite coating for protection of concrete sewers from biological sulfuric acid attack. *Geomicrobiol. J.* 25, 322–331 (2008).
- 205.Hewayde, E. et al. Effect of mixture design parameters and wetting-drying cycles on resistance of concrete to sulfuric acid attack. *J. Mater. Civ. Eng.* 19, 155–163 (2007).
- 206.Berke, N. S., Hicks, M. C., Malone, J. & Rieder, K. a. Concrete durability. *Concr. Int.* August, 63–68 (2005).
- 207.Mehta, P. K. Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes. *Cem. Concr. Res.* 15, 969–978 (1985).
- 208.Chang, Z. T., Song, X. J., Munn, R. & Marosszeky, M. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. *Cem. Concr. Res.* 35, 1486–1494 (2005).
- 209.Monteny, J., De Belie, N. & Taerwe, L. Resistance of different types of concrete mixtures to sulfuric acid. *Mater. Struct. Constr.* 36, 242–249 (2003).
- 210.Bassuoni, M. T. & Nehdi, M. L. Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading. *Cem. Concr. Res.* 39, 206–226 (2009).
- 211.Aydin, S. et al. Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Build. Environ.* 42, 717–721 (2007).



- 212.Roy, D. Arjunan, P. & Silsbee, M. Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. *Cem. Concr. Res.* 31, 1809–1813 (2001).
- 213.Pal, S. C., Mukherjee, A. & Pathak, S. R. Corrosion behavior of reinforcement in slag concrete. *ACI Mater. J.* 99, 521–527 (2002).
- 214.Gerwick, B. Concrete in the marine environment. *Cement, Concrete and Aggregates* 14, 69 (1992).
- 215.Stark, J. & Ludwig, H. M. Freeze-thaw and freeze-deicing salt resistance of concretes containing cement rich in granulated blast furnace slag. *ACI Mater. J.* 94, 47–55 (1997).
- 216.Petrov, N. & Tagnit-Hamou, A. Is microcracking really a precursor to delayed ettringite formation and consequent expansion? *ACI Mater. J.* 101, 442–447 (2004).
- 217.Mehta, P. K. Sulfate attack in marine environment. *Mater. Sci. Concr. Spec. Vol.*, 295–299 (1999).
- 218.Lee, S. T., Moon, H. Y., Swamy, R. N., Kim, S. S. & Kim, J. P. Sulfate attack of mortars containing recycled fine aggregates. *ACI Mater. J.* 102, 224–230 (2005).
- 219.Ghafoori, N. & Zhang, Z. Sulfate resistance of roller compacted concrete. *ACI Mater. J.* 95, 347–355 (1998).
- 220.Hodhod, O. a. A. & Salama, G. Developing an ANN model to simulate ASTM C1012-95 test considering different cement types and different pozzolanic additives. *HBRC J.* 9, 1–14 (2013).
- 221.Dehwah, H. A. F., Maslehuddin, M. & Austin, S. A. Effect of cement alkalinity on pore solution chemistry and chloride-induced reinforcement corrosion. *ACI Mater. J.* 99, 227–233 (2002).
- 222.Sujjavanich, S., Sida, V. & Suwanvitaya, P. Chloride permeability and corrosion risk of high-volume fly ash concrete with mid-range water reducer. *ACI Mater. J.* 102, 177–182 (2005).
- 223.Baweja, D., Roper, H. & Sirivivatnanon, V. Chloride-induced steel corrosion in concrete: Part 1 - Corrosion rates, corrosion activity, and attack areas. *ACI Mater. J.* 95, 207–217 (1998).

224. Baghabra Al-Amoudi, O. S. Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. *Cem. Concr. Compos.* 24, 305–316 (2002).
225. Tumidajski, P. J., Chan, G. W. & Philipose, K. E. An effective diffusivity for sulfate transport into concrete. *Cem. Concr. Res.* 25, 1159–1163 (1995).
226. Kaushik, S. K. & Islam, S. Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to a marine environment. *Cem. Concr. Compos.* 17, 177–185 (1995).
227. Liu, H. K., Tai, N. H. & Lee, W. H. Effect of seawater on compressive strength of concrete cylinders reinforced by non-adhesive wound hybrid polymer composites. *Compos. Sci. Technol.* 62, 2131–2141 (2002).
228. Mather, B. Effects of sea water on concrete. *Highw. Res. Rec.* 113, 23 (1964).
229. Jurcut, A.-C. Modelling of the effects of alkali-aggregate reaction in reinforced concrete structures (Master's thesis). 124 (2015). doi:10.12989/cac.2013.12.5.627
230. Dent Glasser, L. S. & Kataoka, N. On the role of calcium in the alkali-aggregate reaction. *Cem. Concr. Res.* 12, 321–331 (1982).
231. Chatterji, S. & Thaulow, N. Some fundamental aspects of alkali-silica reaction. in 11th International Conference On Alkali Aggregate Reaction 9 (2000).
232. Chatterji, S., Thaulow, N. & Jensen, A. D. Studies of alkali-silica reaction, part 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism. *Cem. Concr. Res.* 18, 363–366 (1988).
233. Urhan, S. Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 1: Interpretation of published results and an hypothesis concerning the mechanism. *Cem. Concr. Res.* 17, 141–152 (1987).
234. Gillott, J. E. Mechanism and kinetics of expansion in the alkali-carbonate rock reaction. *Can. J. Earth Sci.* 1, 121–145 (1964).
235. Gillott, J. E. & Swenson, E. G. Some unusual alkali-expansive aggregates. *Eng. Geol.* 7, 181–195 (1973).
236. Katayama, T. The so-called alkali-carbonate reaction (ACR) - Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR. *Cem. Concr. Res.* 40, 643–675 (2010).

237. Grattan-Bellew, P. E., Mitchell, L. D., Margeson, J. & Min, D. Is alkali-carbonate reaction just a variant of alkali-silica reaction ACR = ASR? *Cem. Concr. Res.* 40, 556–562 (2010).
238. Locher, V. F. W. et al. *Ursache und wirkungsweise der alkalireaktion* (1973).
239. Chatterji, S. & Christensen, P. Studies of alkali-silica reaction. Part 7. Modelling of expansion. *Cem. Concr. Res.* 20, 285–290 (1990).
240. Larive, C., Laplaud, A. & Coussy, O. The role of water in alkali-silica reaction. 11th ICAAR 61–69 (2000).
241. Multon, S. & Toutlemonde, F. Effect of moisture conditions and transfers on alkali silica reaction damaged structures. *Cem. Concr. Res.* 40, 924–934 (2010).
242. Diamond, S. ASR – Another look at mechanisms. in *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* 83–94 (1989).
243. Sibbick, R. G. & Page, C. L. Effects of pulverized fuel ash on alkali-silica reaction in concrete. *Constr. Build. Mater.* 9, 289–293 (1995).
244. Bérubé, M. A., Pedneault, A., Frenette, J. & Rivest, M. Laboratory assessment of potentiel for future expansion and deterioration of concrete affected by ASR. *CANMET/ACI International Workshop on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete* 270, 267–271 (1995).
245. ACI Committee 221. State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity. *Am. Concr. Inst.* 98, 1–31 (1998).
246. Hayman, S., Thomas, M., Beaman, N. & Gilks, P. Selection of an effective ASR-prevention strategy for use with a highly reactive aggregate for the reconstruction of concrete structures at Mactaquac generating station. *Cem. Concr. Res.* 40, 605–610 (2010).
247. Diamond, S. & Thaulow, N. A study of expansion due to alkali - silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. *Cem. Concr. Res.* 4, 591–607 (1974).

- 248.Hobbs, D. W. & Gutteridge, W. A. Particle size of aggregate and its influence upon the expansion caused by the alkali-silica reaction. *Mag. Concr. Res.* 31, 235–242 (1979).
- 249.Kuroda, T., Inoue, S., Yoshino, A. & Nishibayashi, S. Effects of particle size, grading and content of reactive aggregate on ASR expansion of mortars subjected to autoclave method. in *Proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete* 736–743 (2004).
- 250.Jin, W., Meyer, C. & Baxter, S. ‘Glascrete’ - Concrete with glass aggregate. *ACI Struct. J.* 97, 208–213 (2000).
- 251.Shayan, A. & Xu, A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cem. Concr. Res.* 34, 81–89 (2004).
- 252.Hobbs, D. W. Alkali-Silica Reaction In Concrete. *Struct. Eng.* 64 A, 381–383 (1986).
- 253.Collins, R. J. & Bareham, P. D. Alkali-silica reaction: Suppression of expansion using porous aggregate. *Cem. Concr. Res.* 17, 89–96 (1987).
- 254.Multon, S., Seignol, J. F. & Toutlemonde, F. Structural behavior of concrete beams affected by alkali-silica reaction. *ACI Materials Journal* 102, 67–76 (2005).
- 255.Giaccio, G., Zerbino, R., Ponce, J. M. & Batic, O. R. Mechanical behavior of concretes damaged by alkali-silica reaction. *Cem. Concr. Res.* 38, 993–1004 (2008).
- 256.Swamy, R. N. & Al-Asali, M. Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction. *Mater. J.* 85, (1989).
- 257.Bertolini, L. Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. *Struct. Infrastruct. Eng.* 4, 123–137 (2008).
- 258.Hausmann, D. Electrochemical behavior of steel in concrete. *J. Am. Concr. Inst.* 61, 171–188 (1964).
- 259.Tuutti, K. Corrosion of steel in concrete. *Swedish Cem. Concr. Res. Inst.* 469 (1982).  
doi:10.4324/9780203414606\_chapter\_2
- 260.Alexander, M. G., Ballim, Y. & Stanish, K. A framework for use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures. *Mater. Struct.* 41, 921–936 (2008).

261. Bruno, S. Modelling the carbonation of concrete using early age oxygen permeability index tests. (University of Cape Town, 2010).
262. Neville, A. M. M. & Brooks, J. J. J. Concrete Technology. Building and Environment 11, (2010).
263. Jiang, L., Lin, B. & Cai, Y. A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete. Cem. Concr. Res. 30, 699–702 (2000).
264. Stehlík, M. & Novák, J. Verification Of The Effect of concrete surface protection on the permeability of acid gases using accelerated carbonation depth test in an atmosphere of 98%CO<sub>2</sub>. Ceram. – Silikáty 55, 79–84 (2011).
265. Setzer, M., Auberg, R., Keck, H.-J., University of Essen. Institute of Building Physics and Materials Science. & FBPM. Frost resistance of concrete from nano-structure and pore solution to macroscopic behaviour and testing: Essen, Germany, 18-19 April 2002. (RILEM publications, 2002).
266. Borges, P. H. R., Costa, J. O., Milestone, N. B., Lynsdale, C. J. & Streatfield, R. E. Carbonation of CH and C–S–H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. Cem. Concr. Res. 40, 284–292 (2010).
267. Lagerblad, B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art. Cement and Concrete Research CBI 2005:2, (2005).
268. Claisse, P. A., El-Sayad, H. & Shaaban, I. G. Permeability and pore volume of carbonated concrete. ACI Mater. J. 96, 378–381 (1999).
269. Wioletta, Grzmił Zdzisława, O. The influence of carbonation of self-compacting concrete with granulated blastfurnace slag addition on its chosen properties. Cem. Wapno - Beton. 137–144 (2013).
270. Papadakis, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. Cem. Concr. Res. 30, 291–299 (2000).
271. Khan, M. I. & Lynsdale, C. J. Strength, permeability, and carbonation of high-performance concrete. Cem. Concr. Res. 32, 123–131 (2002).
272. Atiş, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. Construction and Building Materials 17, 147–152 (2003).

273. Sisomphon, K. & Franke, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. *Cem. Concr. Res.* 37, 1647–1653 (2007).
274. Gjrv, O. E. Durability design of concrete structures in severe environments. *Struct. Infrastruct. Eng.* 7, 222 (2009).
275. Younsi, A., Turcry, P., Rozire, E., Ait-Mokhtar, A. & Loukili, A. Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content. *Cem. Concr. Compos.* 33, 993–1000 (2011).
276. Mohammed, M. Multi-scale response of sustainable self-compacting concrete (SCC) to carbonation and chloride penetration. PhD thesis, Univ. Nottingham (2015).
277. Silva, C. A. R. da, Reis, R. J. P., Lameiras, F. S. & Vasconcelos, W. L. Carbonation-Related Microstructural Changes in Long-Term Durability Concrete. *Mater. Res.* 5, 287–293 (2002).
278. Chang, J. J., Yeih, W., Huang, R. & Chi, J. M. Mechanical properties of carbonated concrete. *J. Chinese Inst. Eng.* 26, 513–522 (2003).
279. Jana, D. & Erlin, B. Carbonation as an indicator of Crack age. Information on carbonation products, means for detecting carbonation, and carbonation as a concrete chronometer. *Concr. Int.* 61–64 (2007).
280. Boel, V. et al. Transport properties of self compacting concrete with limestone filler or fly ash. *Mater. Struct.* 40, 507–516 (2007).
281. Baant, Z. P. (Zdenk P. & Kaplan, M. F. (Maurice F. Concrete at high temperatures : material properties and mathematical models. (Longman, 1996).
282. Hertz, K. D. Concrete strength for fire safety design. *Mag. Concr. Res.* 57, 445–453 (2005).
283. European Committee For Standardization. Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. Eurocode 2 BS EN 1992, 97 (2004).
284. Fire design of concrete structures - structural behaviour and | fib Bulletins | fib. (2008).

285. Menéndez, E., Andrade, C. & Vega, L. Study of dehydration and rehydration processes of portlandite in mature and young cement pastes. *J. Therm. Anal. Calorim.* 110, 443–450 (2012).
286. Handoo, S.K.K., Agarwal, S.K.K. & Agarwal, S.K.K. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cem. Concr. Res.* 32, 1009–1018 (2002).
287. Alonso, C. & Fernandez, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *J. Mater. Sci.* 39, 3015–3024 (2004).
288. Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J. & Delgado, A. H. Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials. Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials (2002). doi:10.1016/B978-081551487-9.50005-0
289. Hooton, R., Scrivener, K., Damidot, D. & Famy, C. Possible mechanisms of expansion of concrete exposed to elevated temperatures during curing (Also Known as DEF) and implications for avoidance of field problems. *Cem. Concr. Aggregates* 21, 93 (1999).
290. Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X. & Campo, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cem. Concr. Res.* 34, 1633–1644 (2004).
291. Aydin, S. & Baradan, B. Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. *Cem. Concr. Res.* 37, 988–995 (2007).
292. Farage, M. C. R., Sercombe, J. & Galle, C. Rehydration and microstructure of cement paste after heating at temperatures up to 300 °C. *Cem. Concr. Res.* 33, 1047–1056 (2003).
293. Janotka, I. & Nürnbergerová, T. Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. *Nucl. Eng. Des.* 235, 2019–2032 (2005).
294. Ravina, D. & Soroka, I. Research on concrete in hot environments at the national building research institute, Haifa, Israel. *Spec. Publ.* 139, 107–130 (1993).

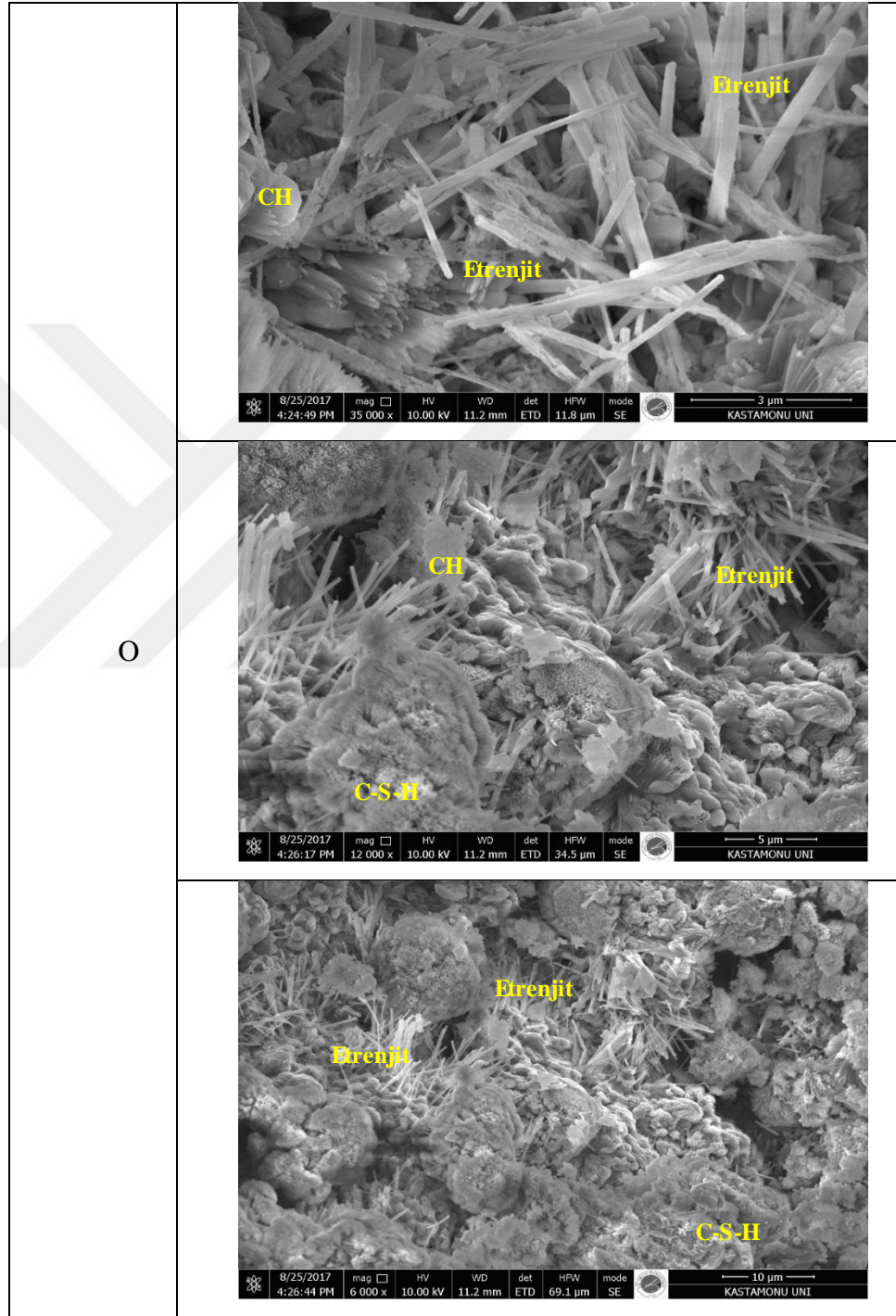
- 295.Naus, D. The Effect of elevated temperature on concrete materials and structures — a literature review. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 6283, (2005).
- 296.Montgomery, D. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, Inc 5th, (2001).
- 297.Hamzaçebi, C. Optimization of process parameters in oriented strand board manufacturing by Taguchi method. *BioResources* 11, 5987–5993 (2016).
- 298.G. Taguchi (Asian productivity organization). Introduction to quality engineering: Designing quality into products and processes. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 4, 198–198 (1986).
- 299.Peace, G. Taguchi methods: a hands-on approach. [getcited.org](http://getcited.org) (1993).
- 300.Kaya, A. Kalite geliştirmede deney tasarımı ve taguchi yöntemi. *GIDA* 30, (2015).
- 301.Ross, P. J. Taguchi techniques for quality engineering. loss fuction, Orthogonal Exp. *Param. Toler. Des.* 279 (1998). doi:10.2307/1270793
- 302.Fearn, T. Taguchi methods. *NIR News* 12, 2013 (2001).
- 303.Tosun, N. & Ozler, L. Optimisation for hot turning operations with multiple performance characteristics. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 23, 777–782 (2004).
- 304.Keskin, F. Ş. Perlit ve taban külü katkılı harç özelliklerinin taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelenmesi. (Kocaeli, 2016).

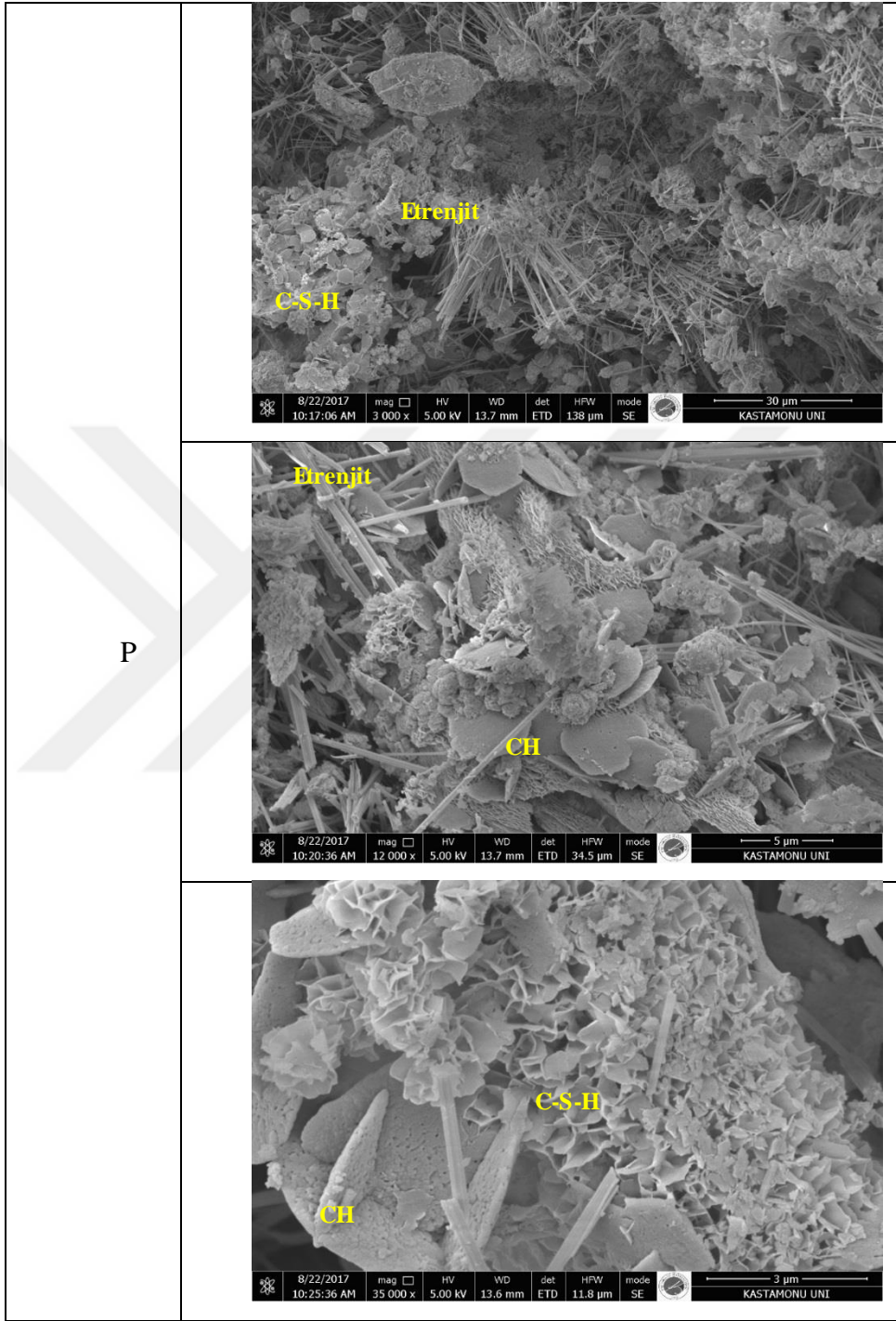


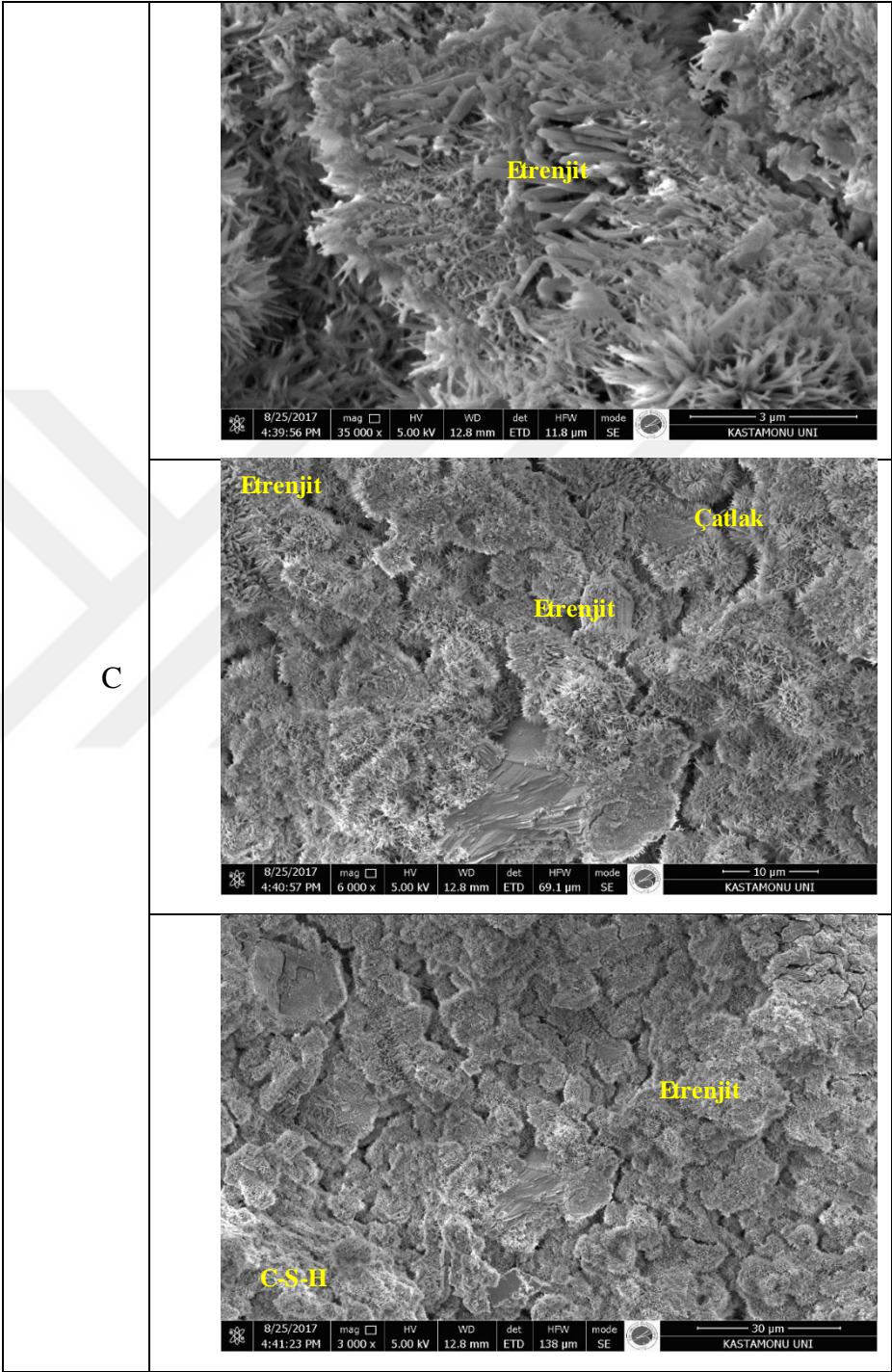


EKLER

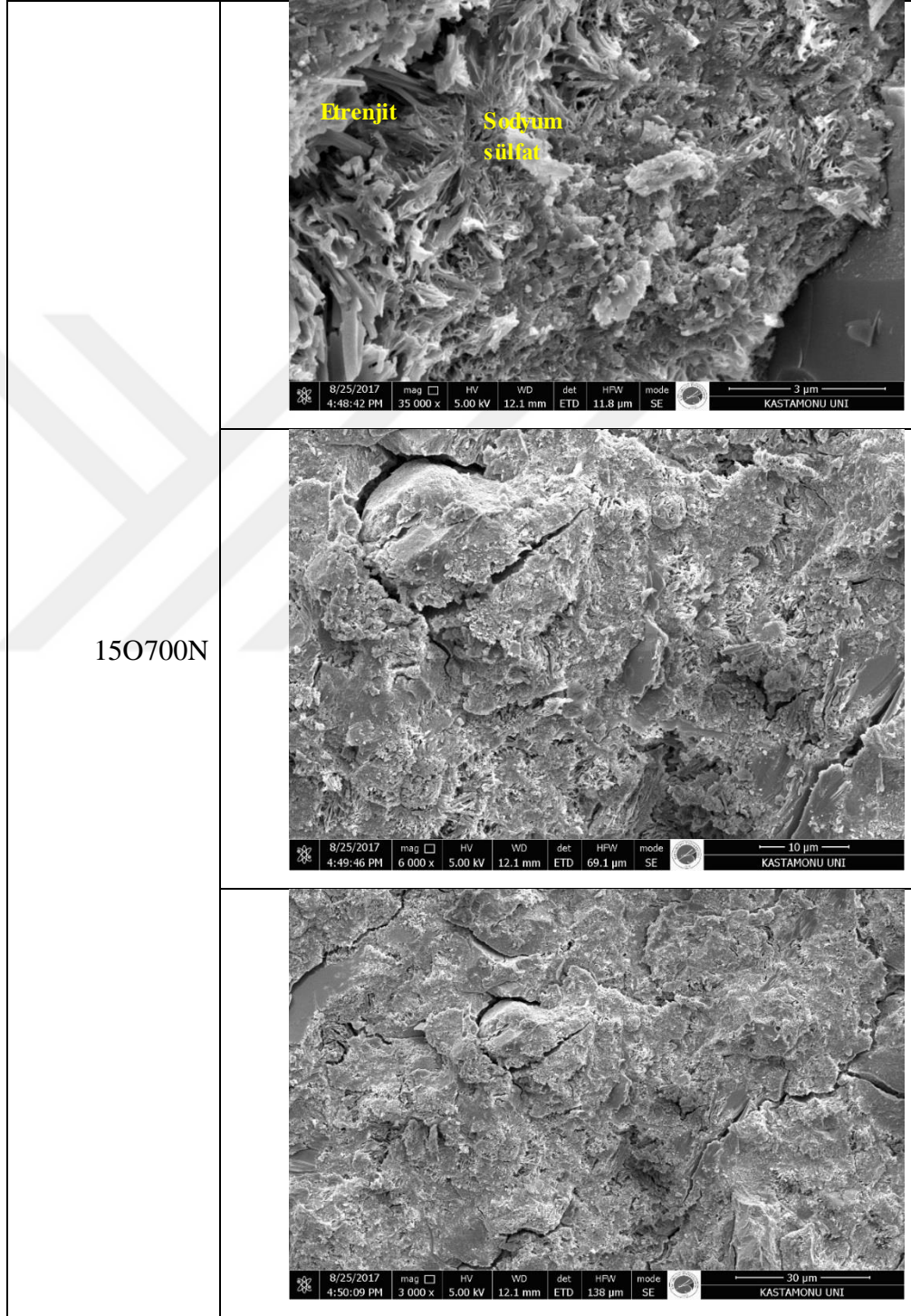
EK-1 Sodyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarının mikroyapı özellikleri

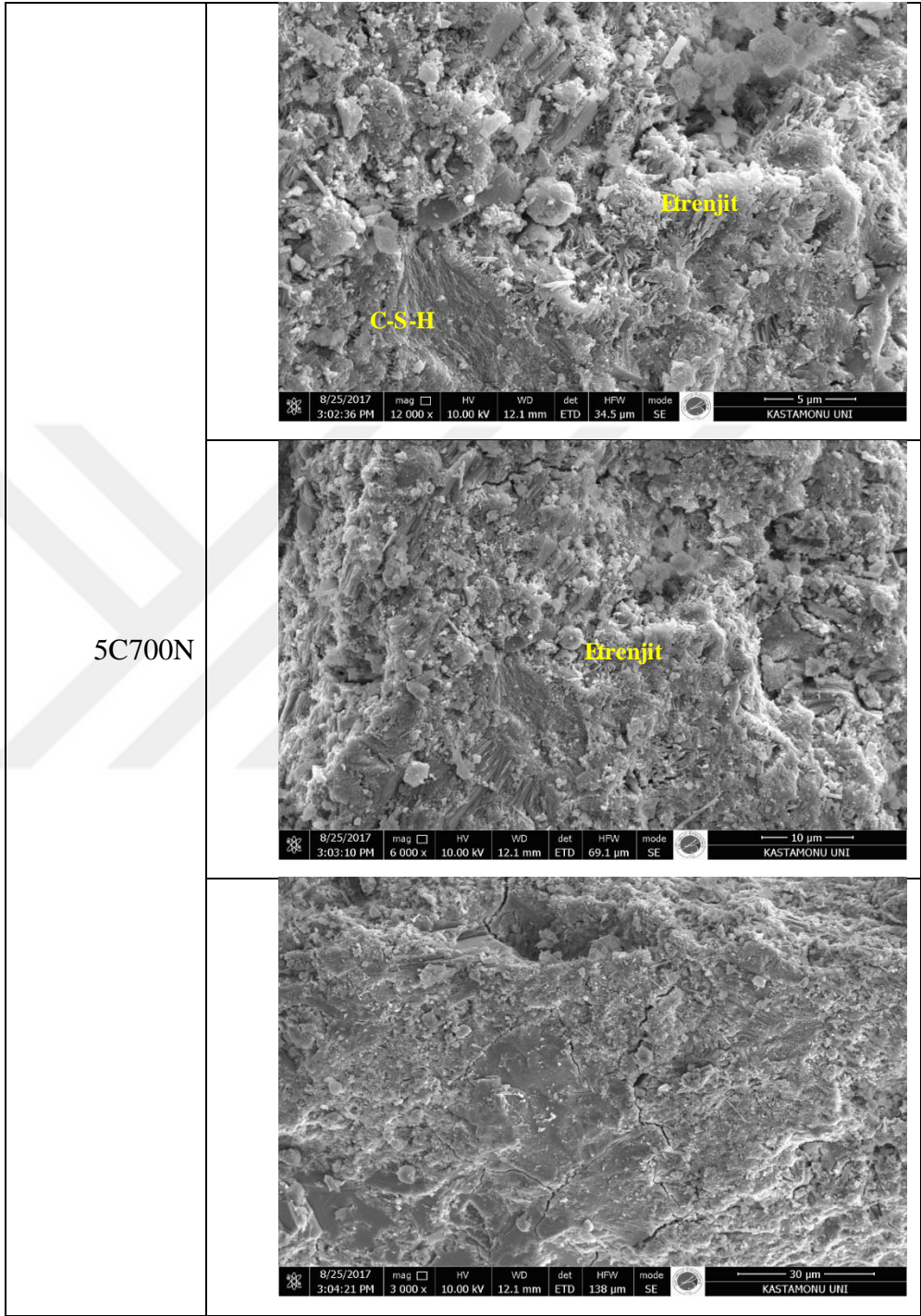




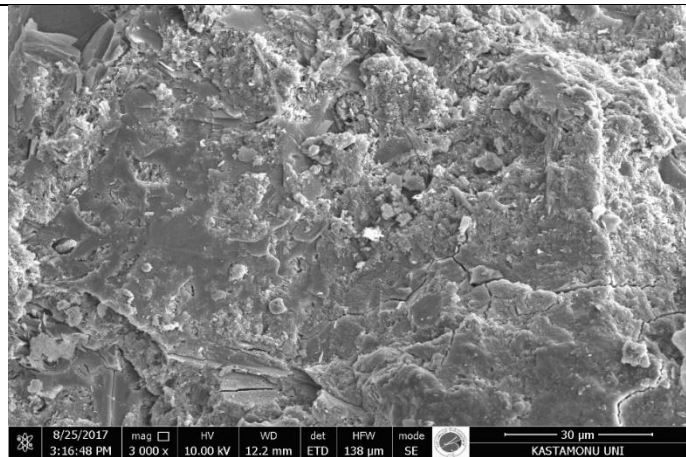
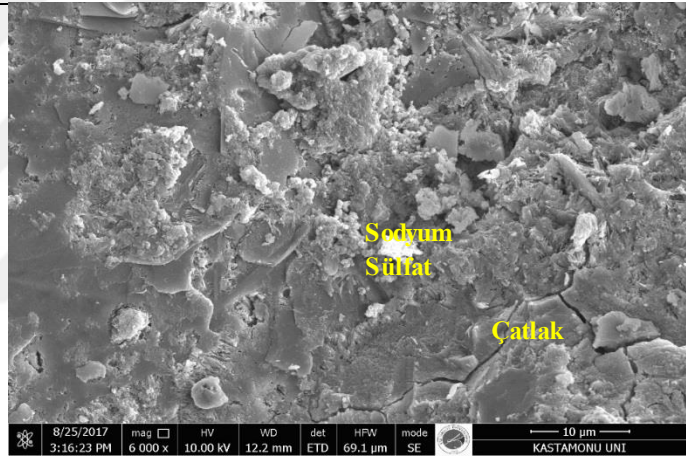
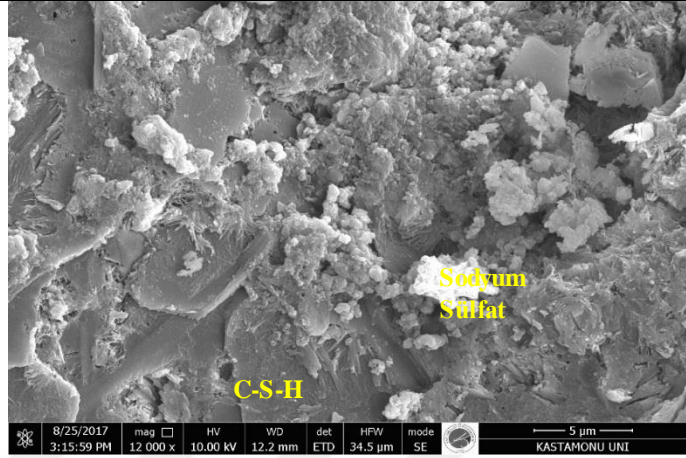


EK-2 Sodyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri

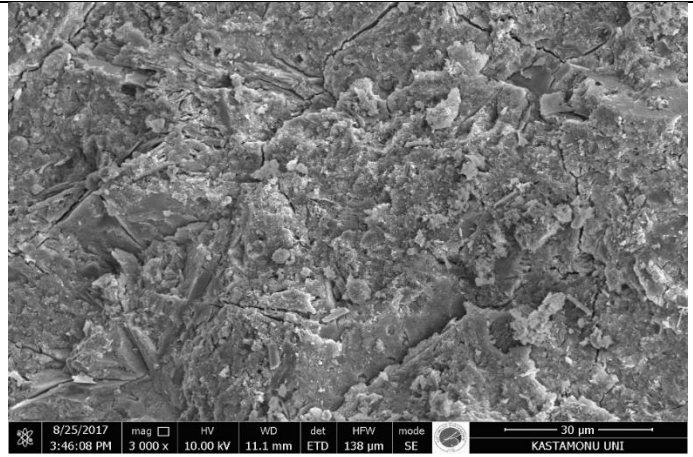
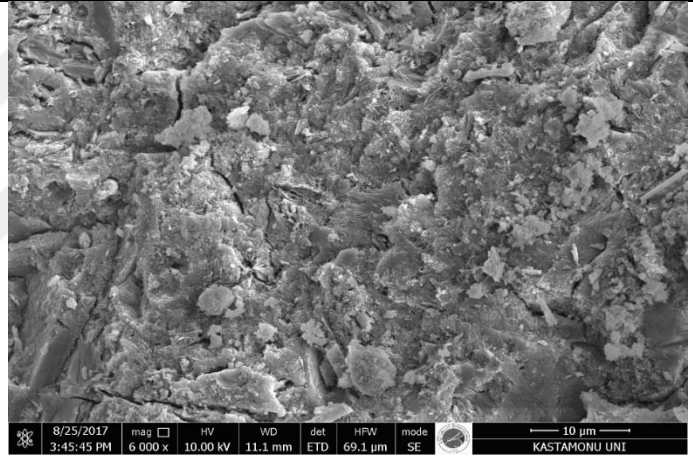
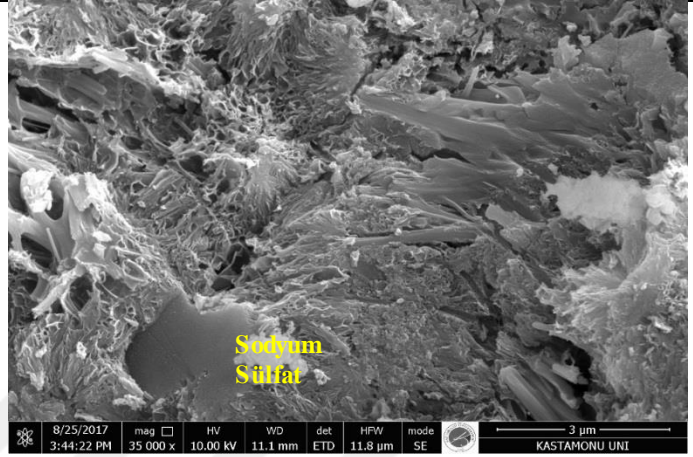




15P600Ö

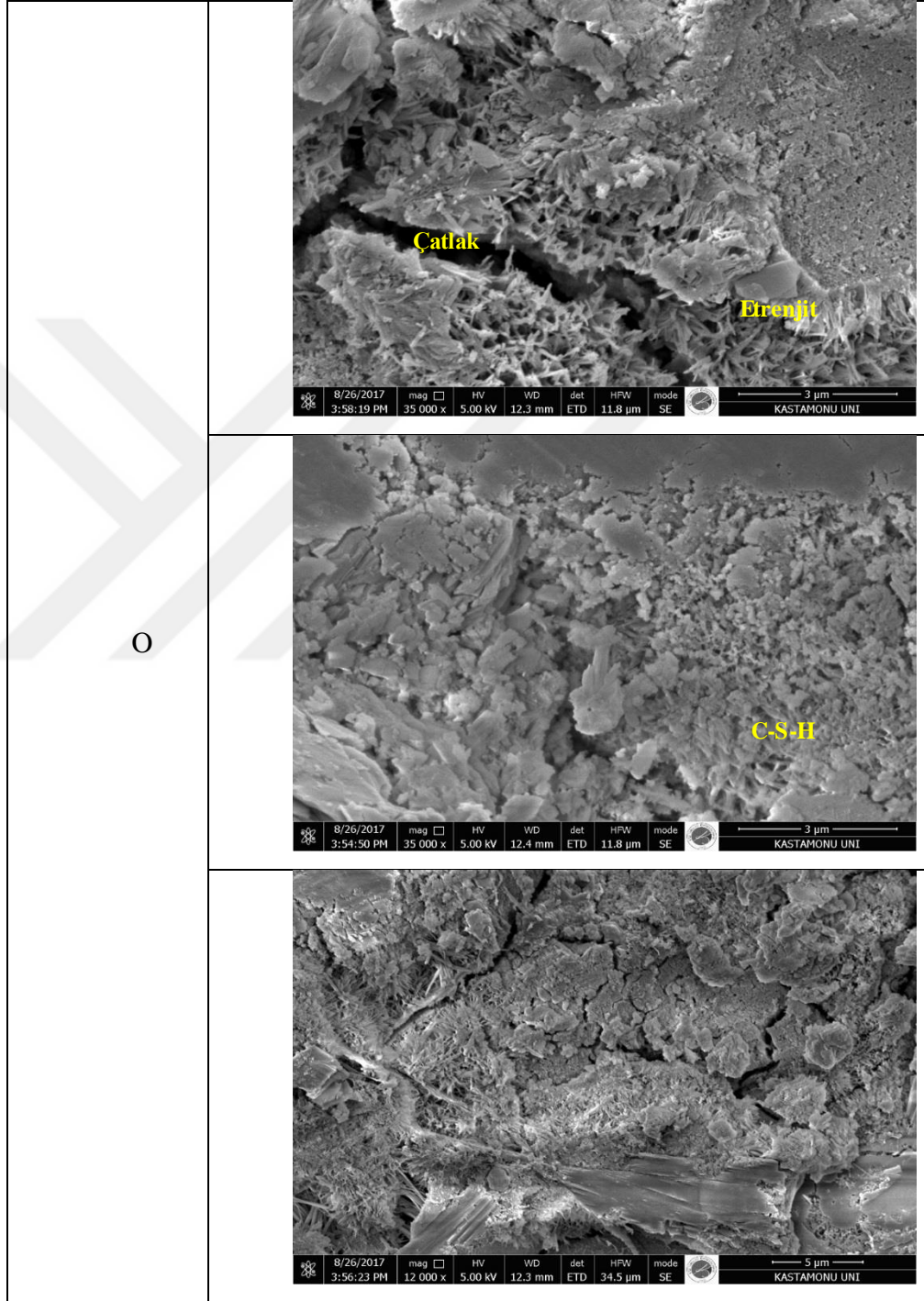


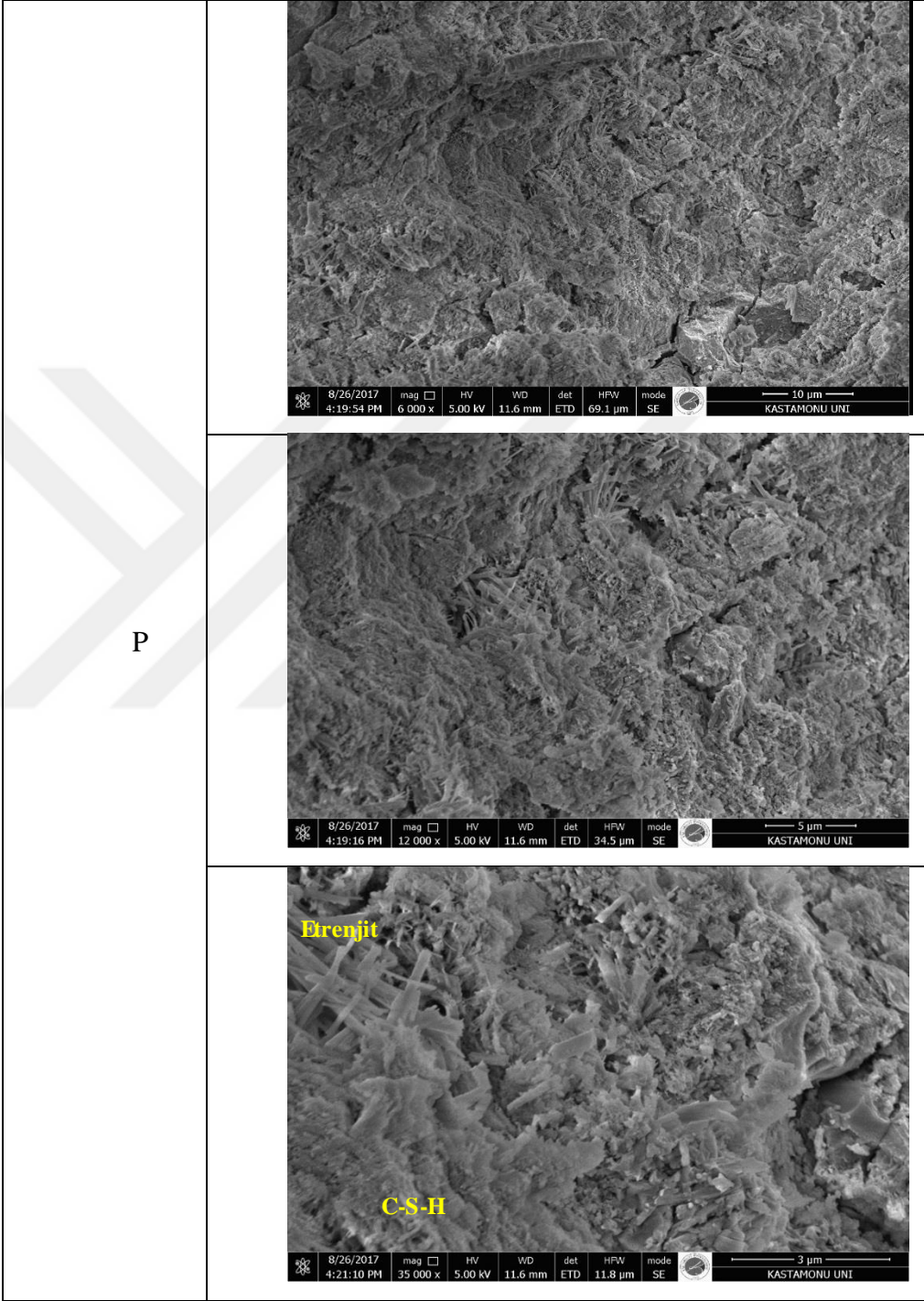
25C600Ö

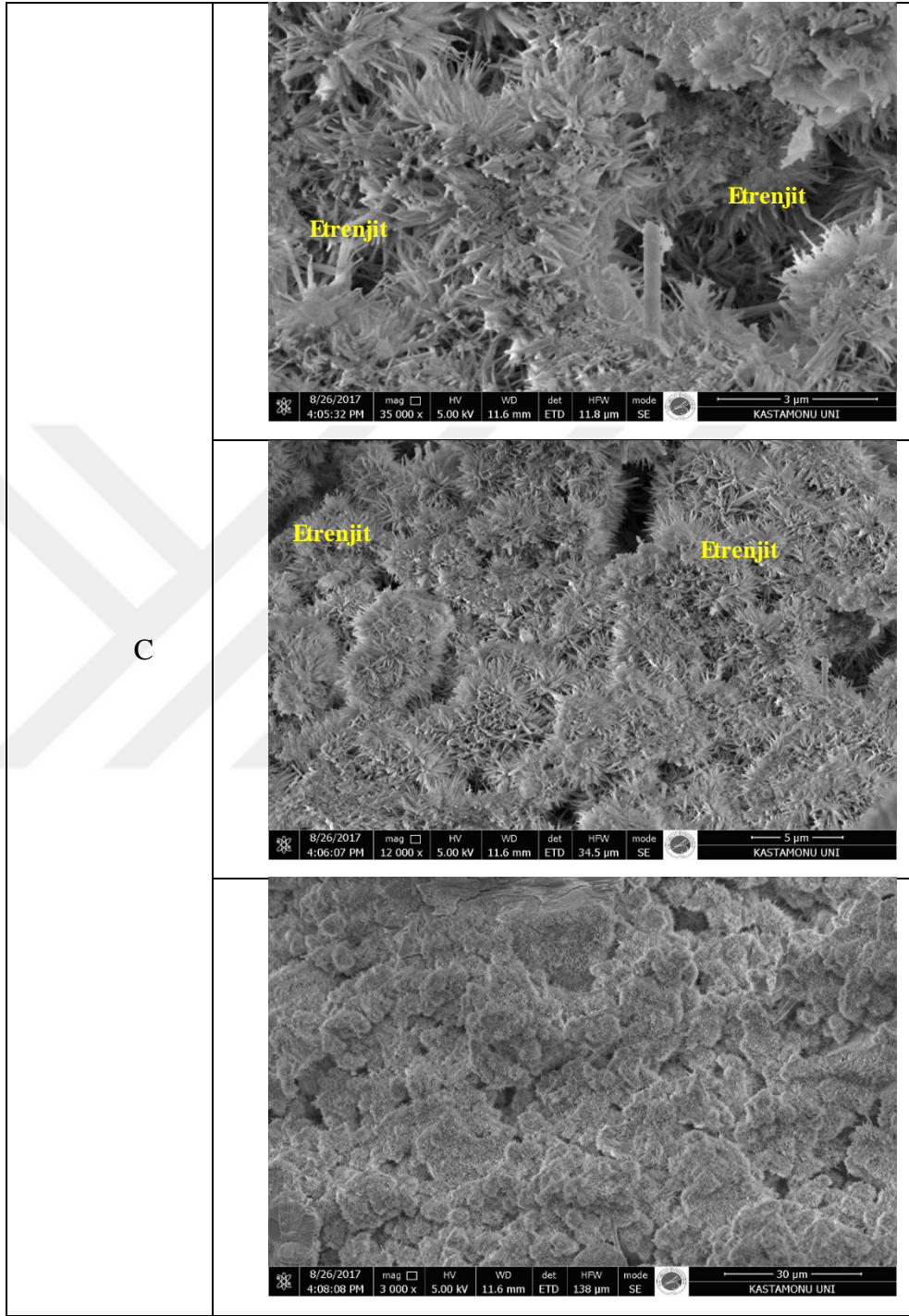




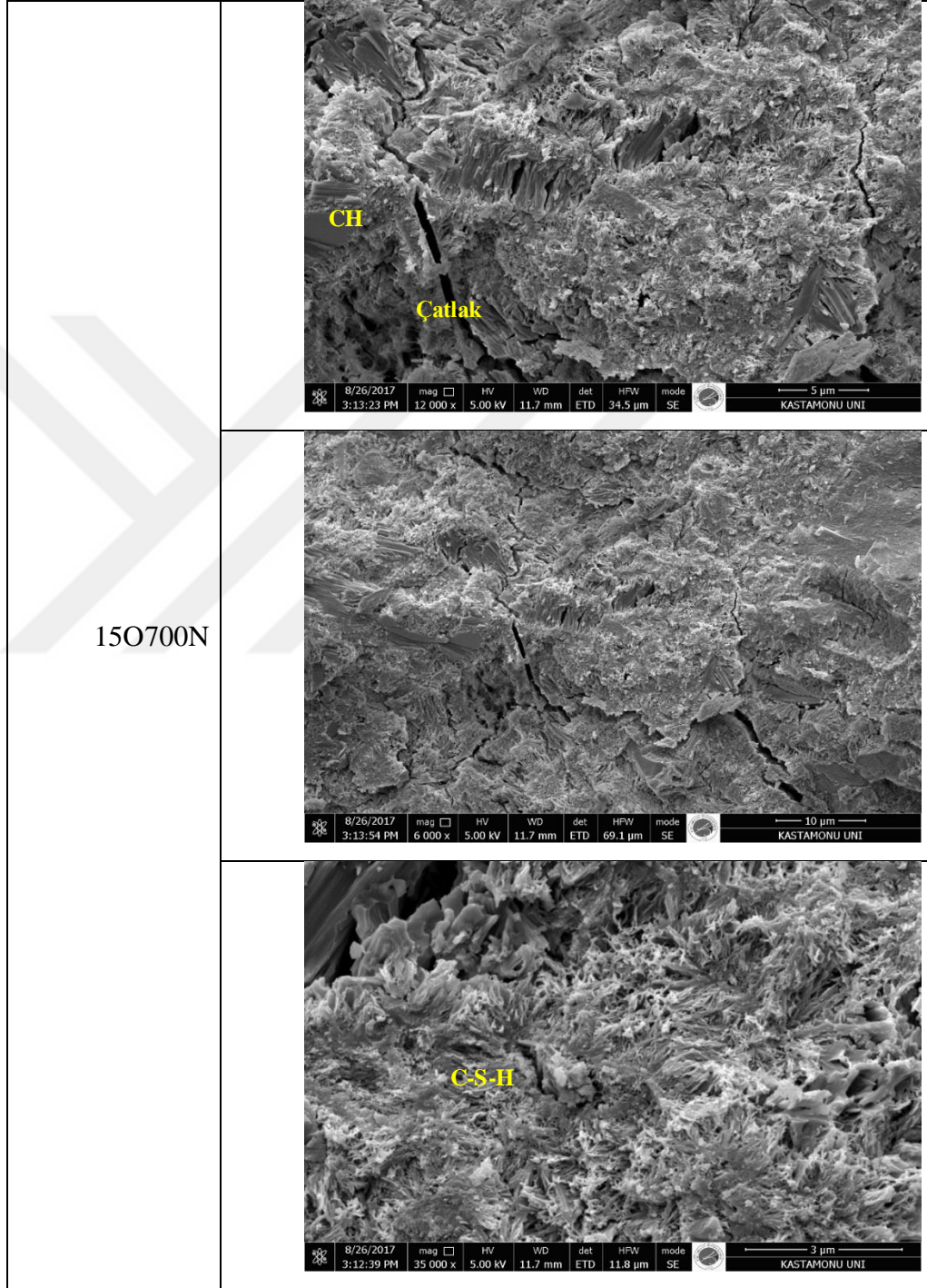
EK-3 Magnezyum sülfat etkisine maruz referans çimento pastalarının mikroyapı özellikleri

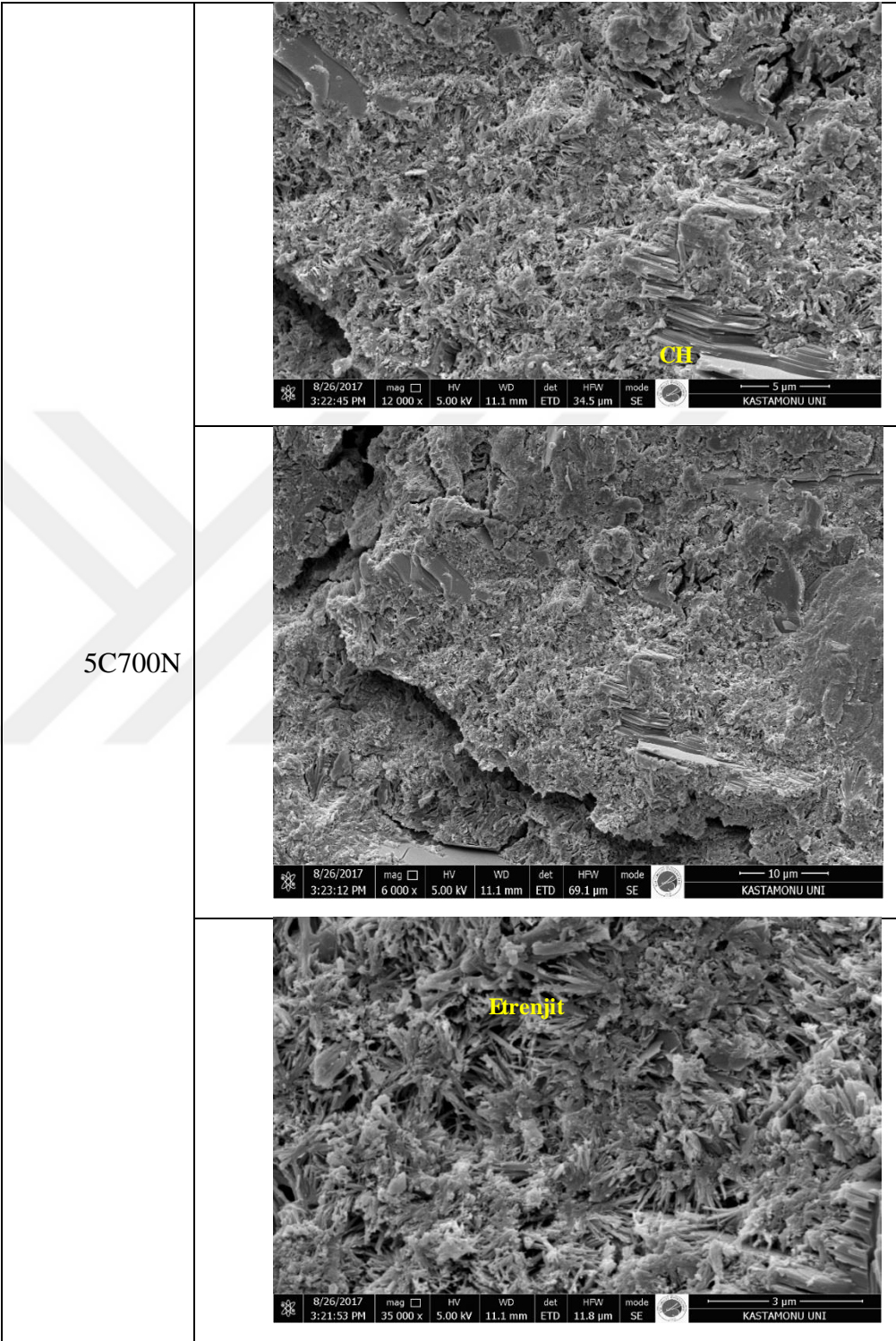




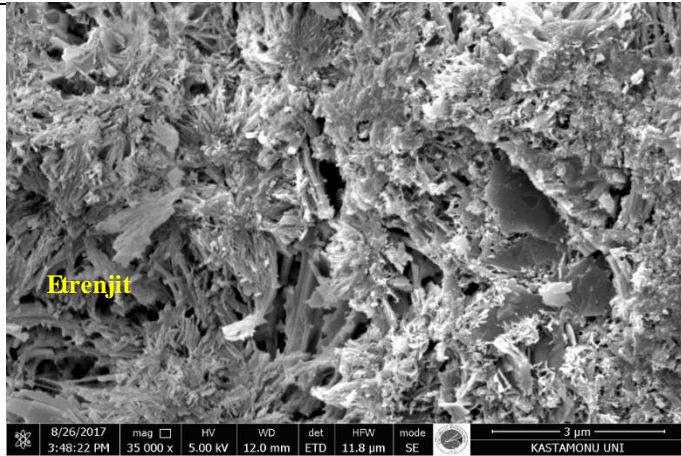
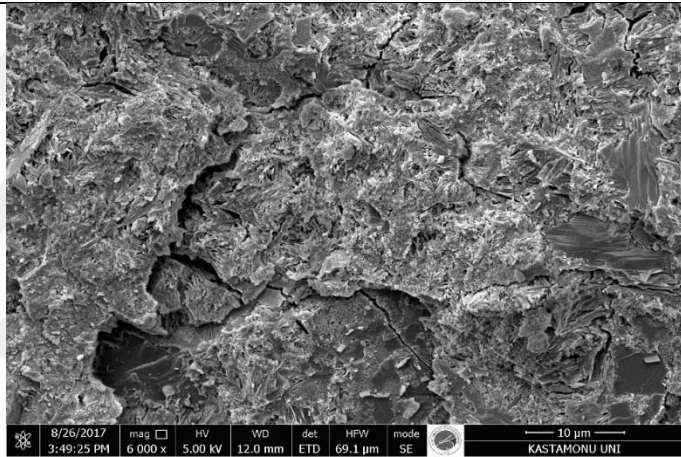
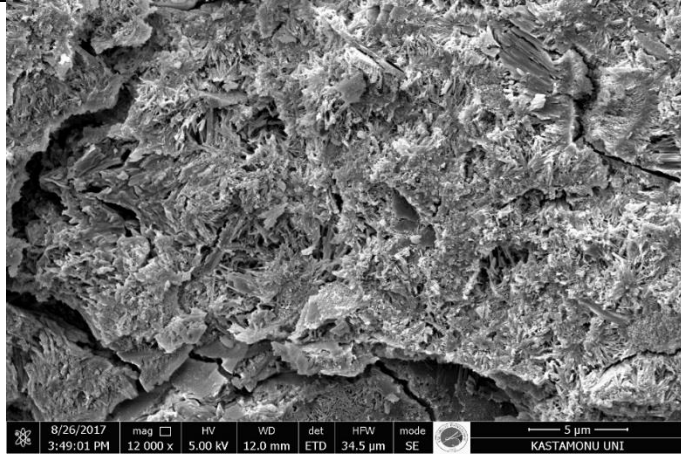


EK-4 Magnezyum sülfat etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri

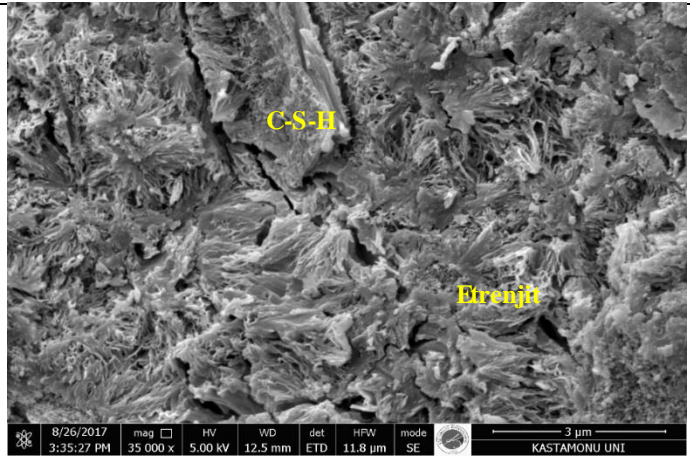
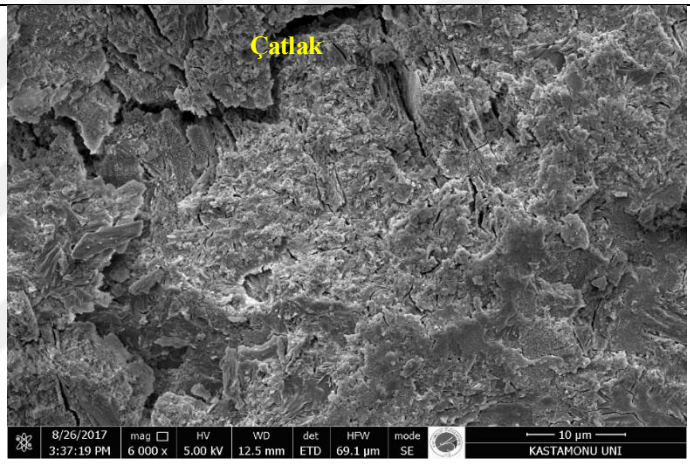
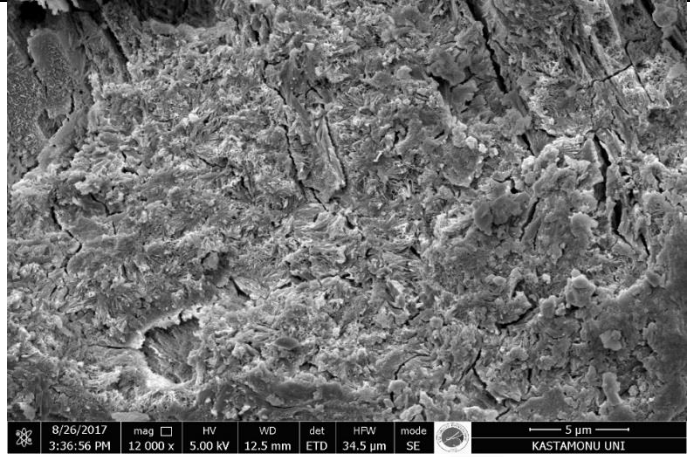




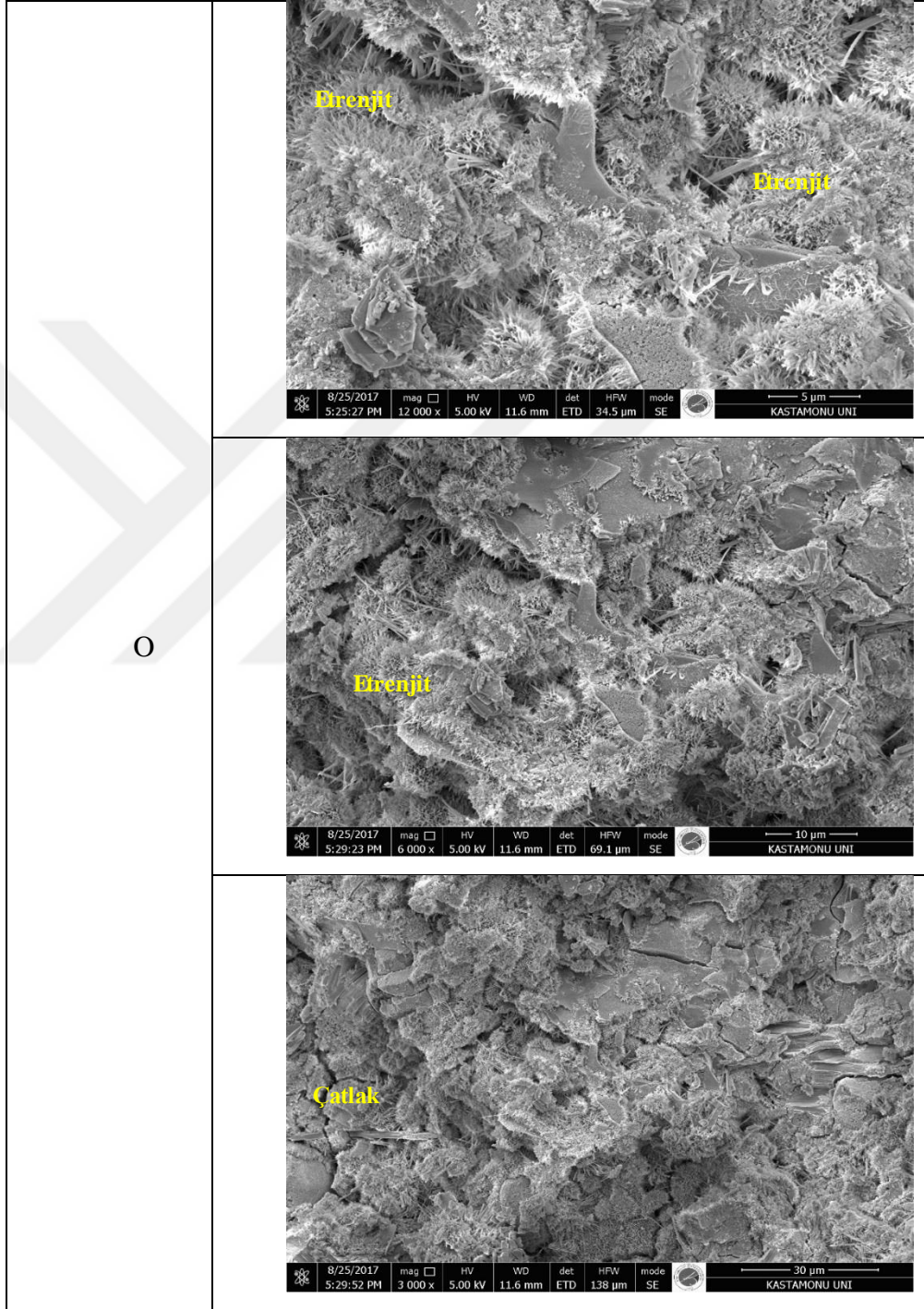
15P600Ö



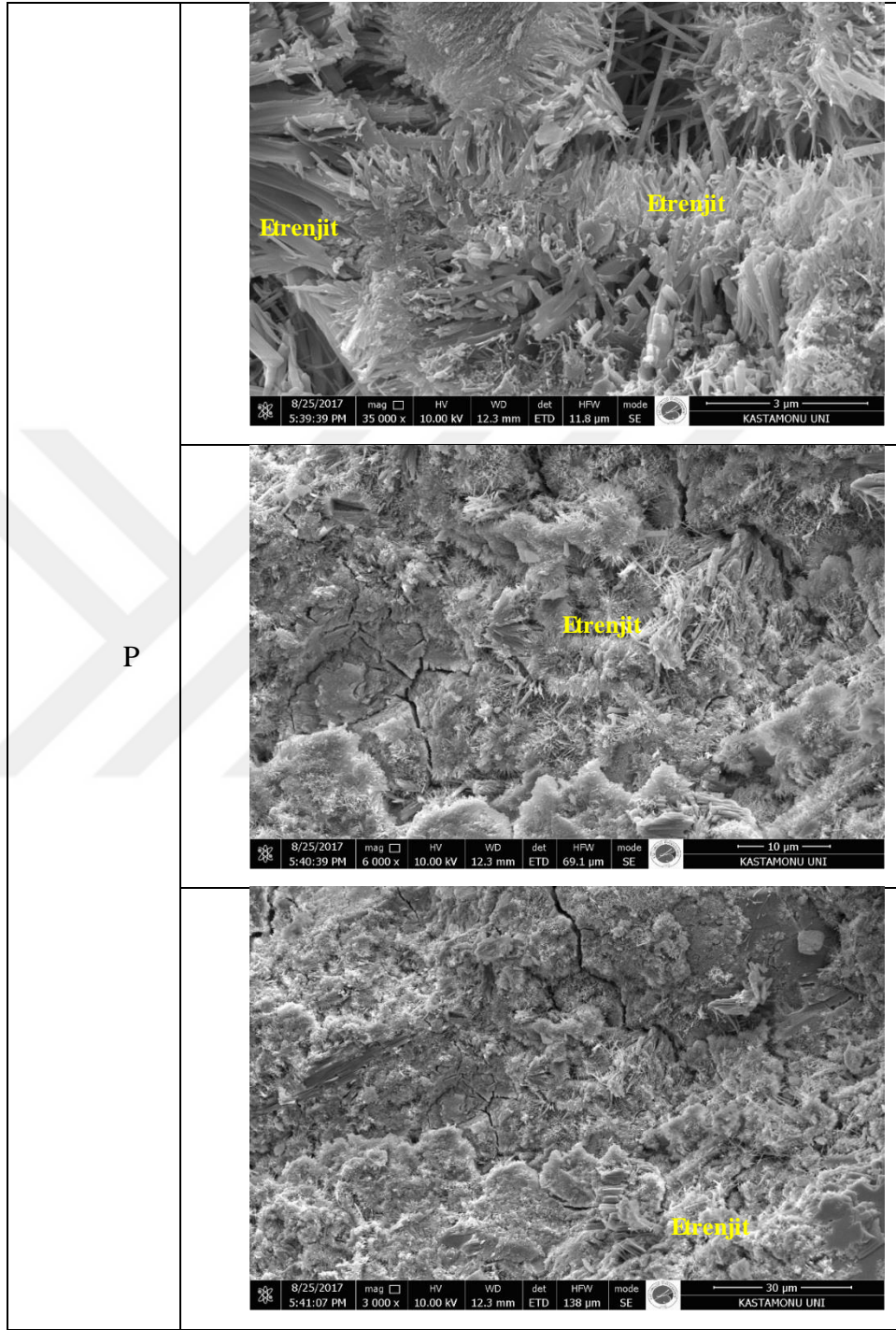
25C600Ö

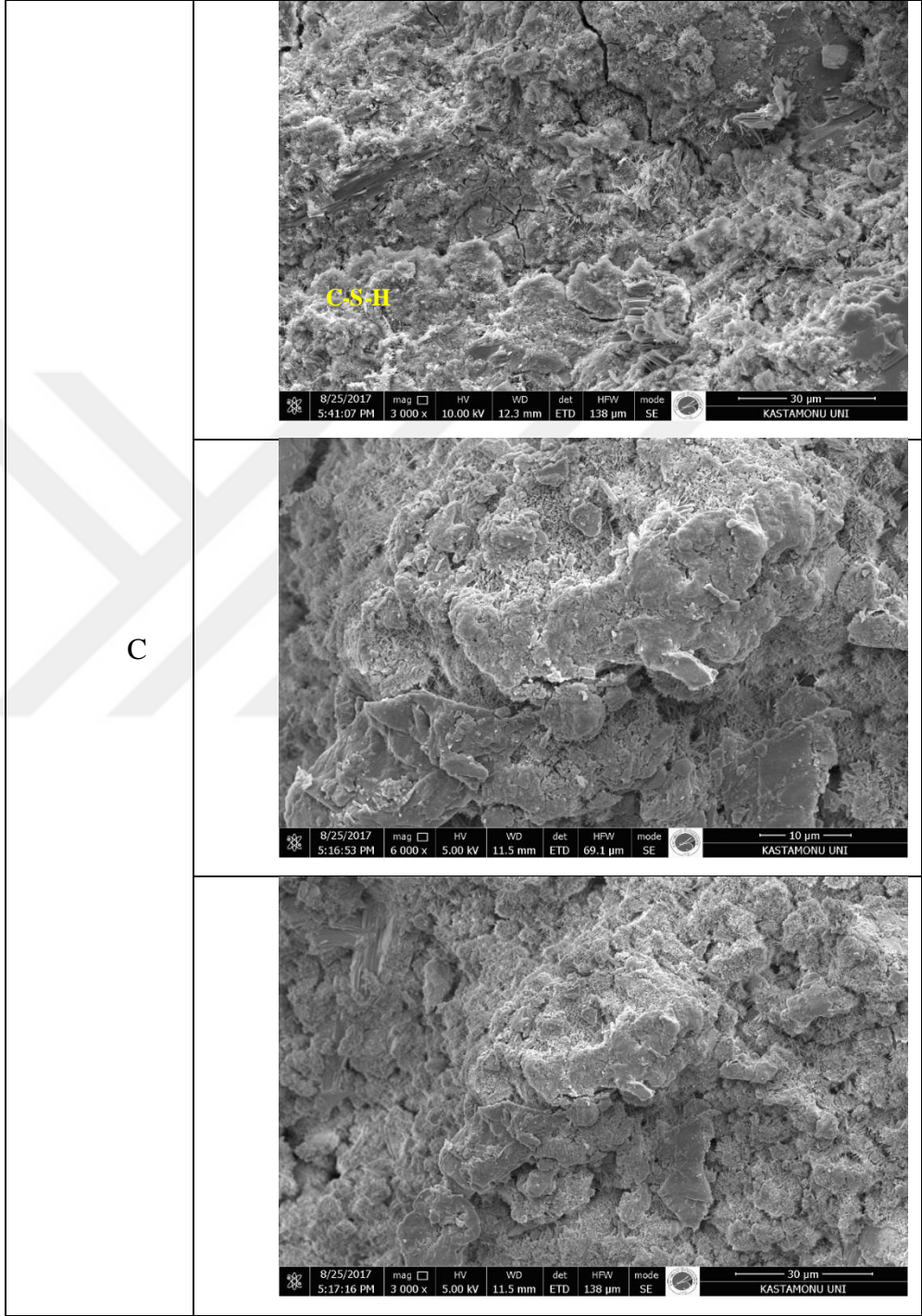


EK-5 Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri

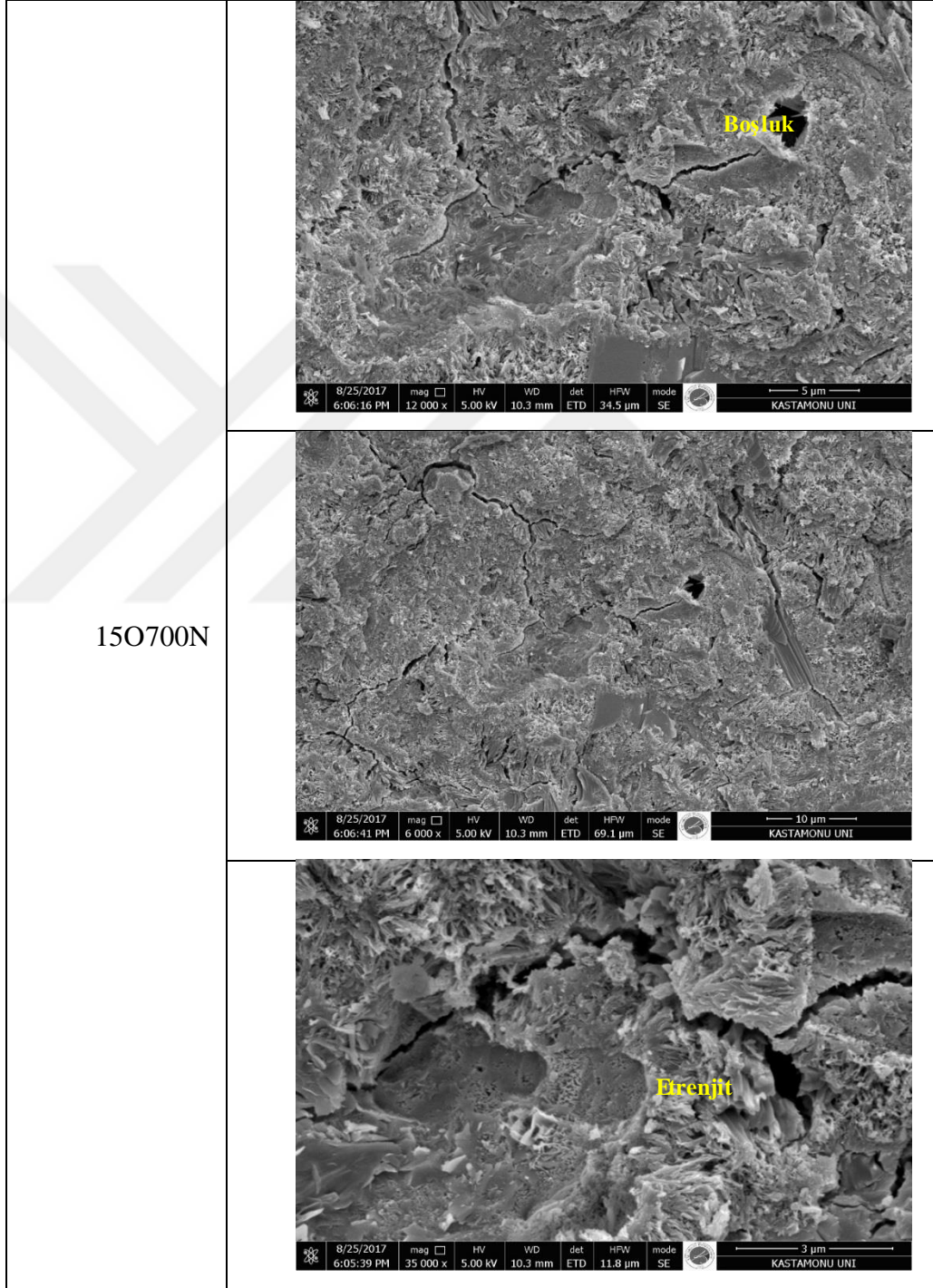




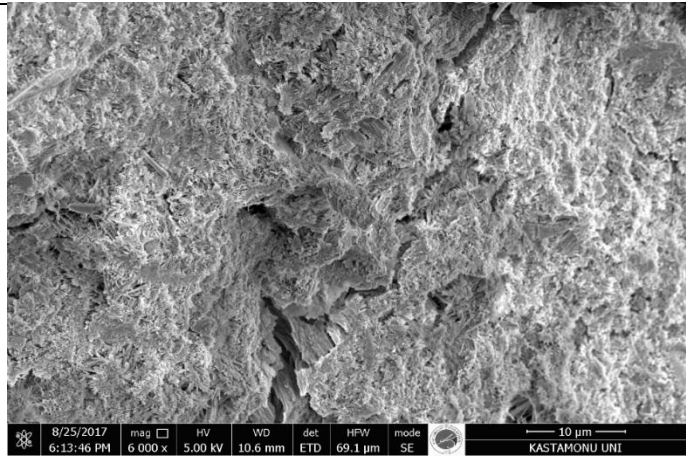
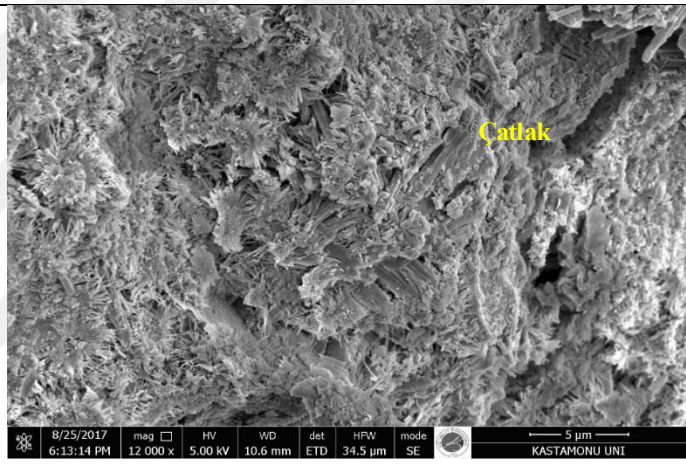
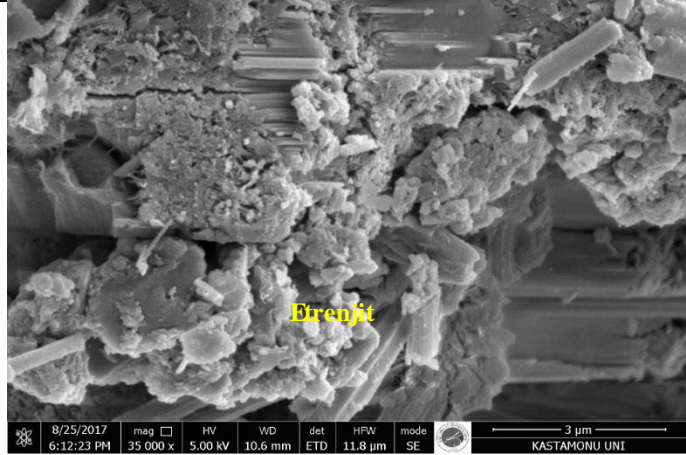




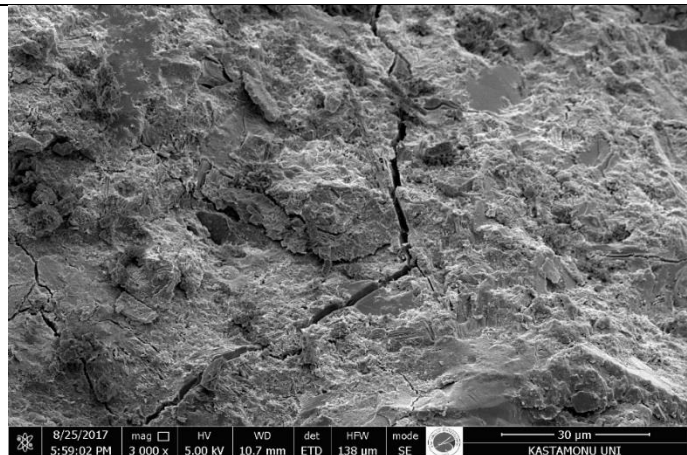
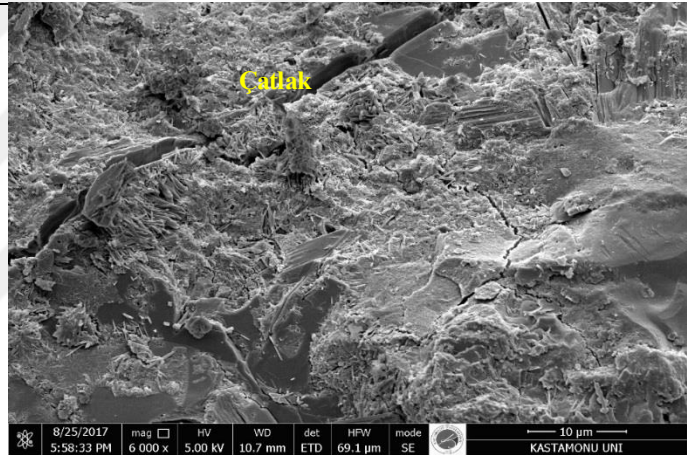
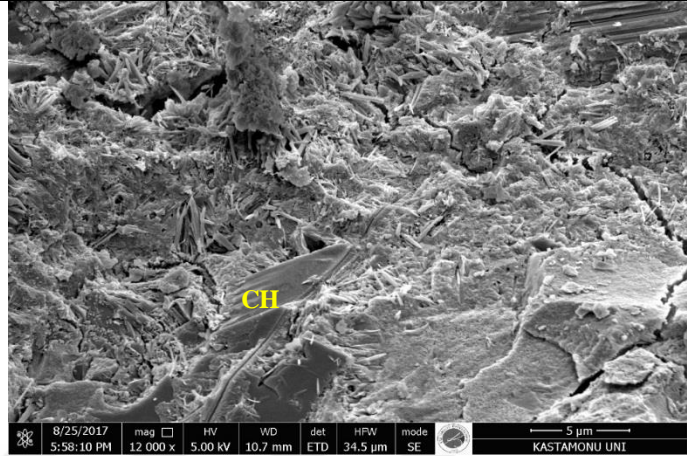
EK-6 Sülfürik asit etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri



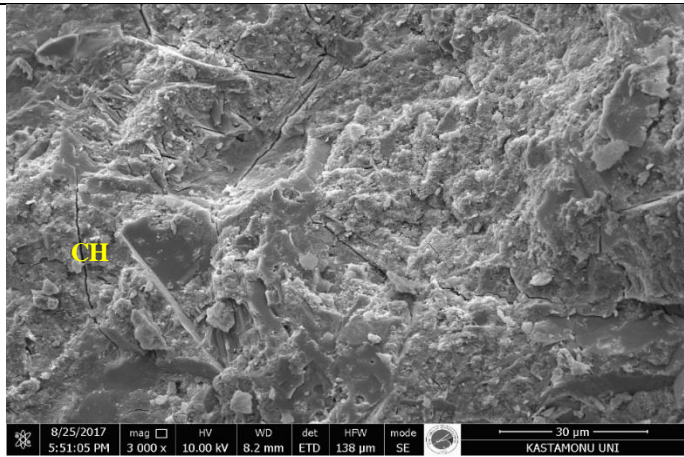
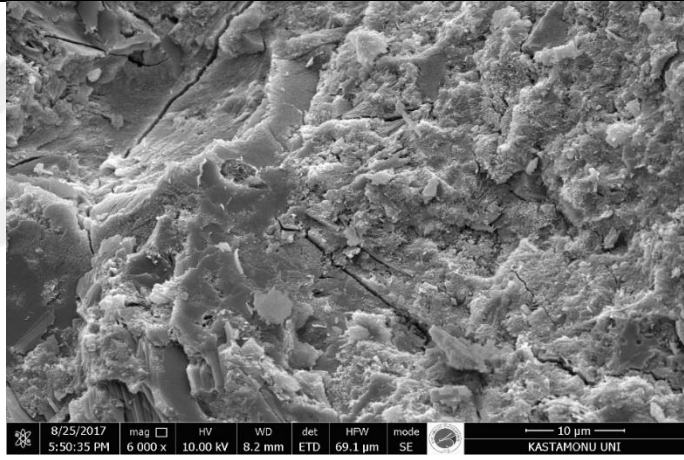
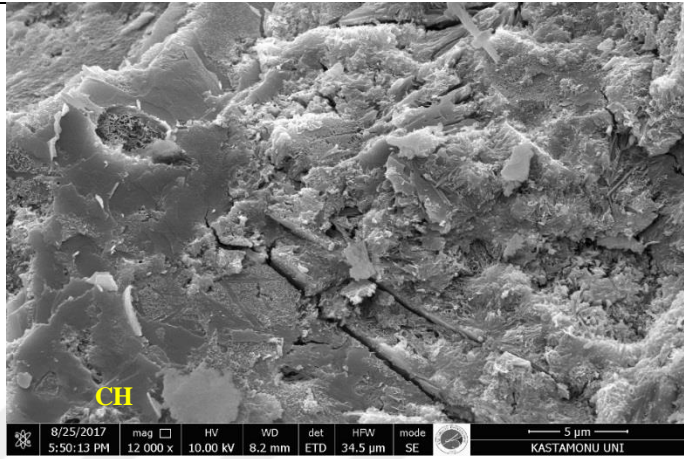
5C700N



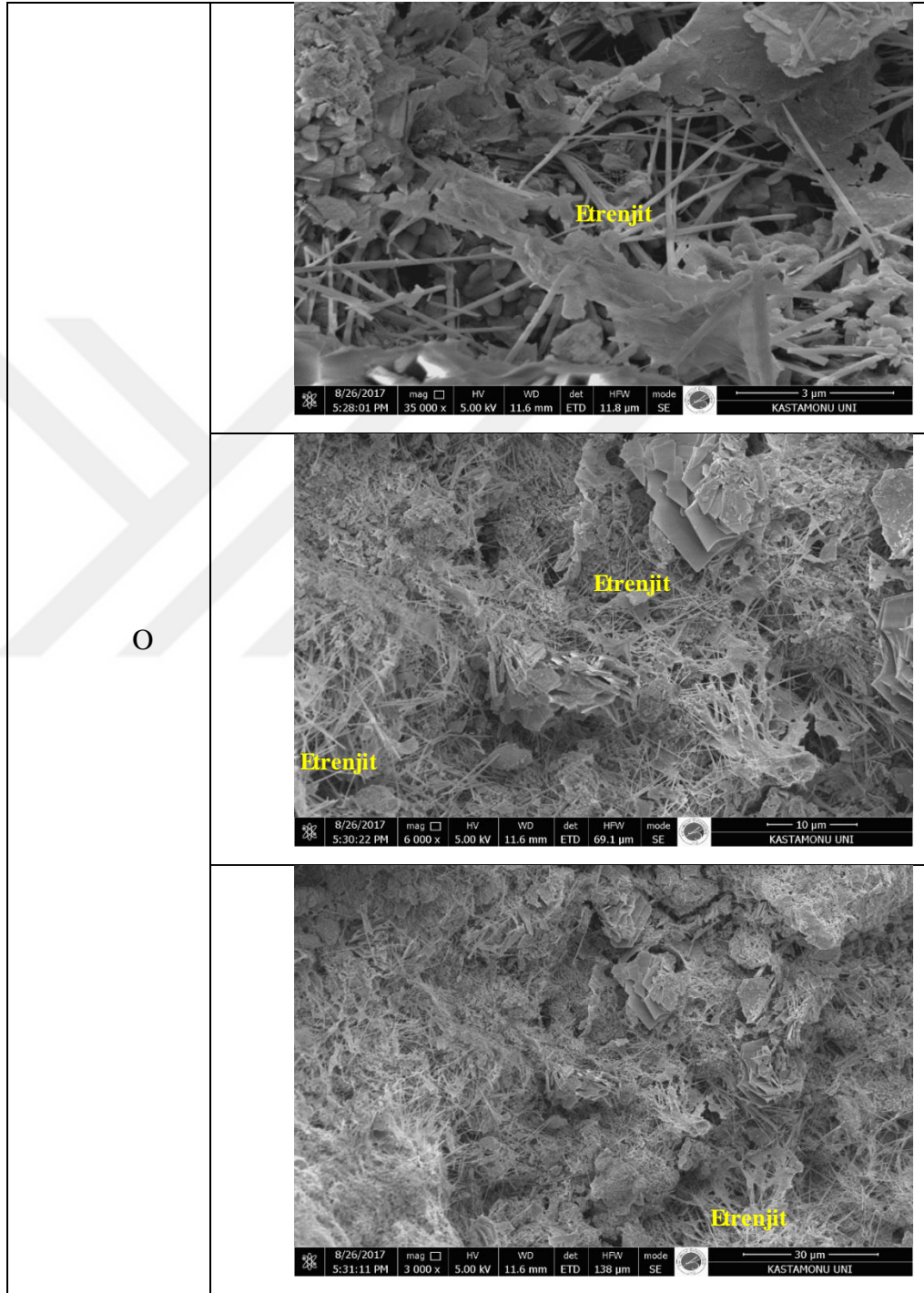
15P600Ö

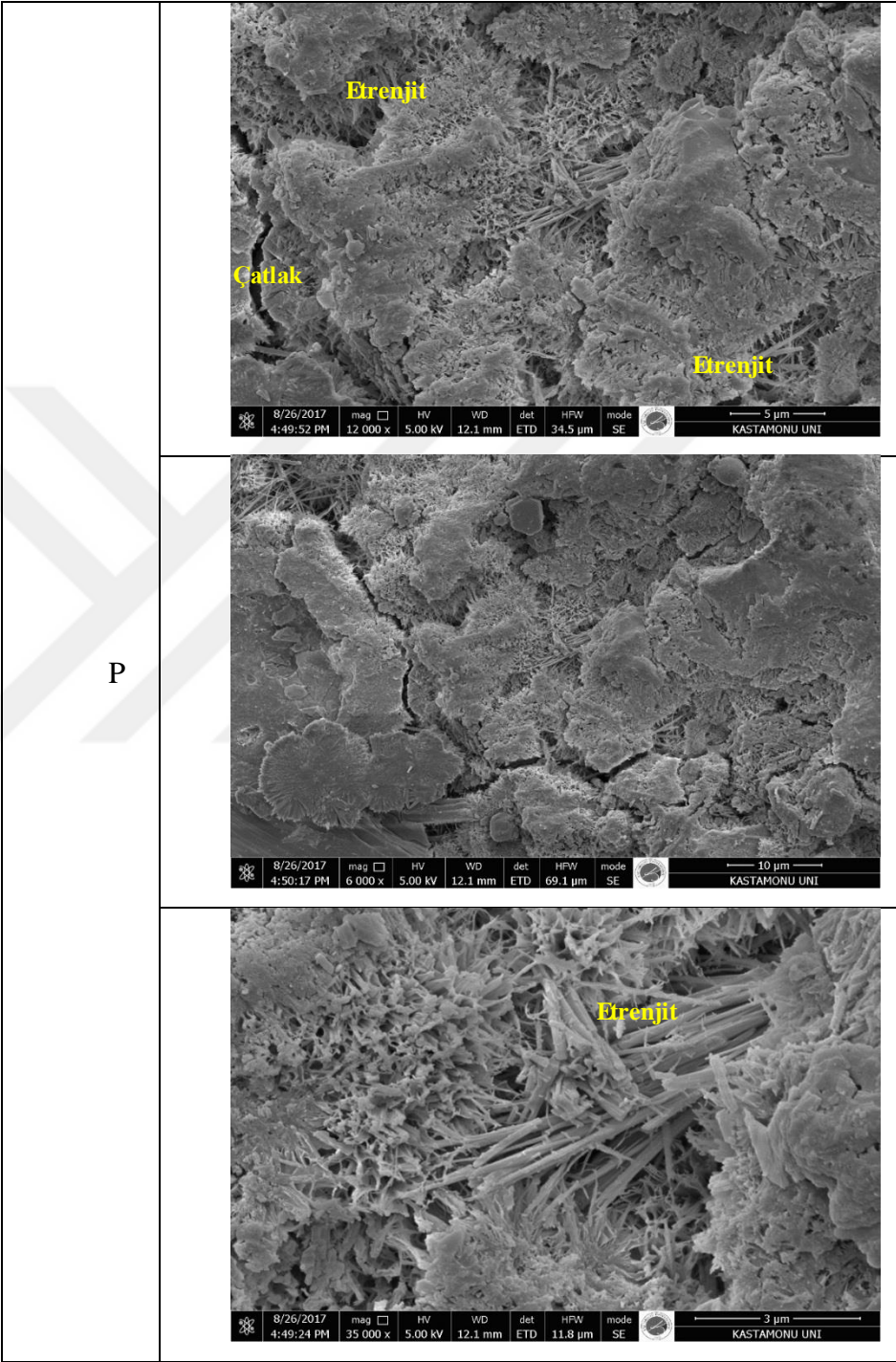


25C600Ö

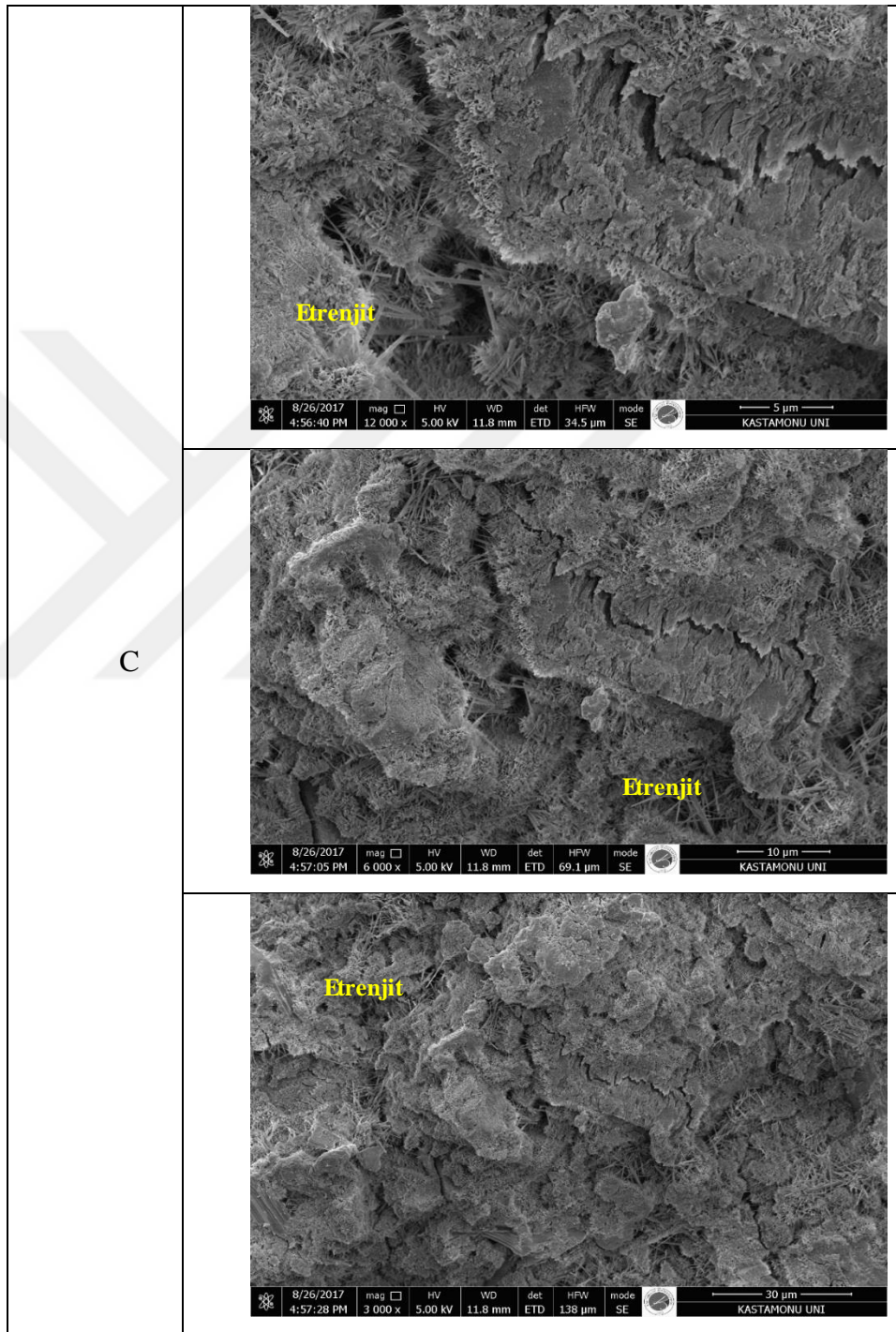


EK-7 Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri

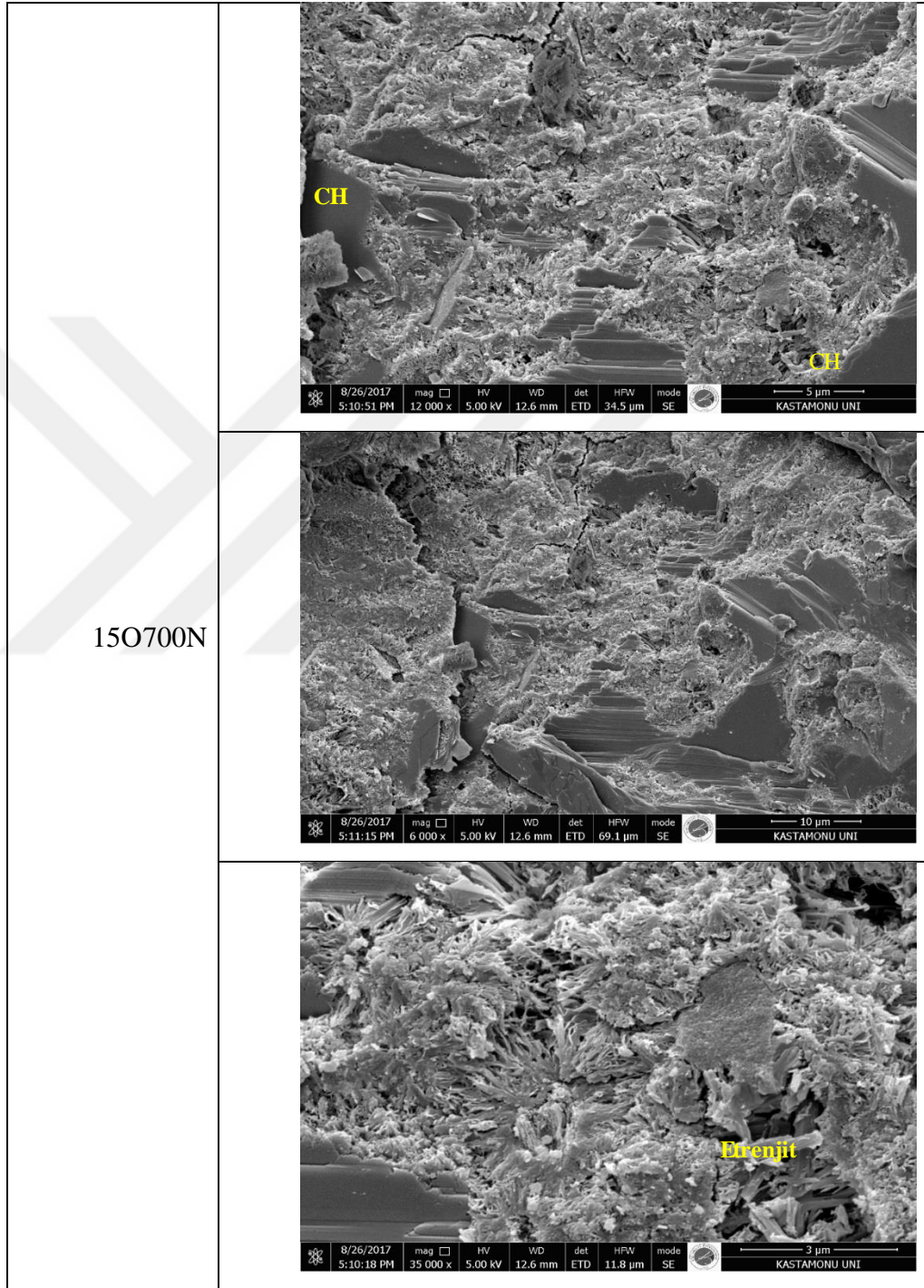




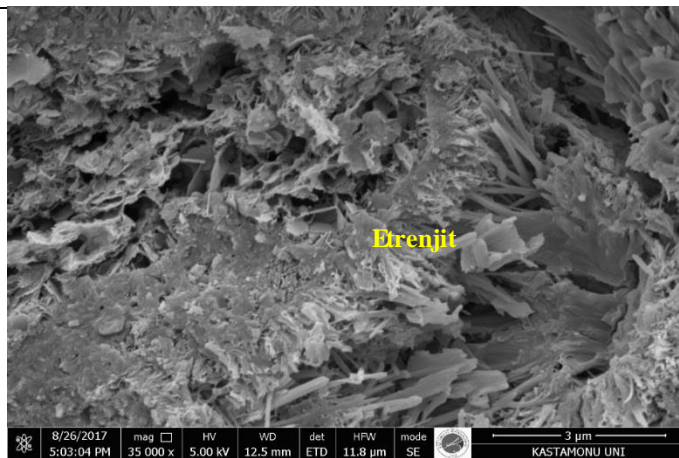
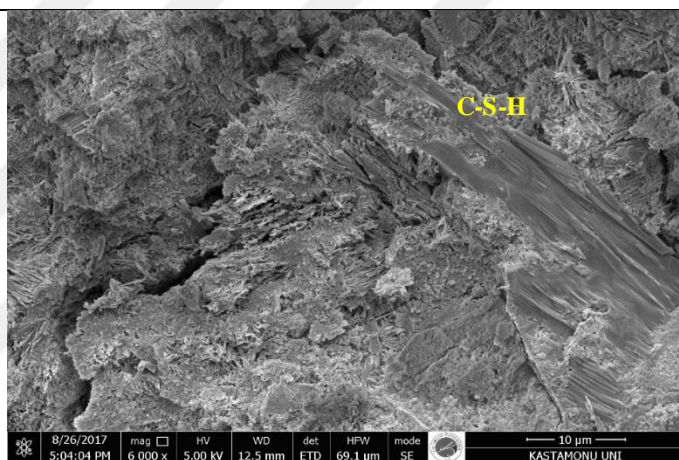
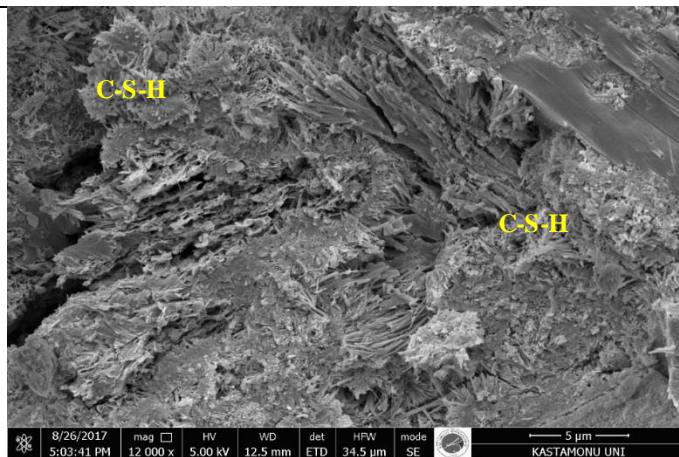




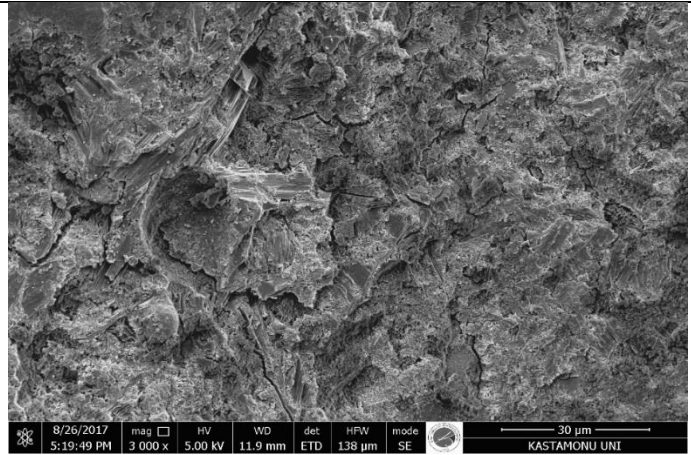
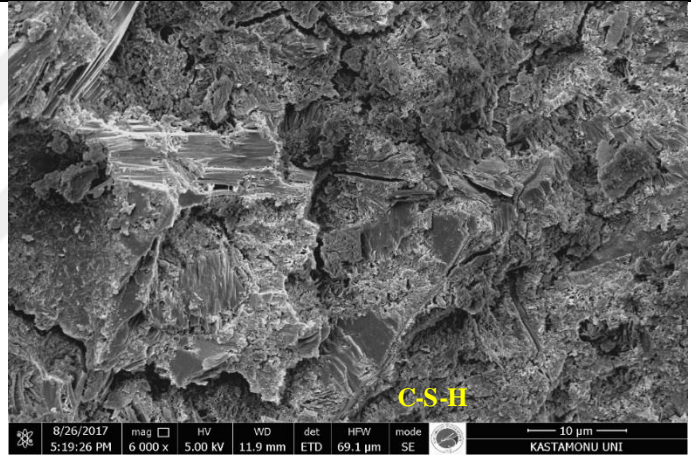
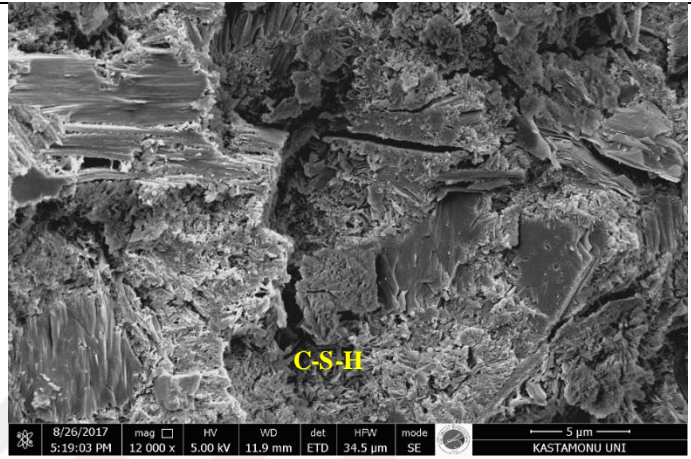
EK-8 Deniz suyu etkisine maruz uçucu kül katkılı çimento pastalarının mikroyapı özellikleri



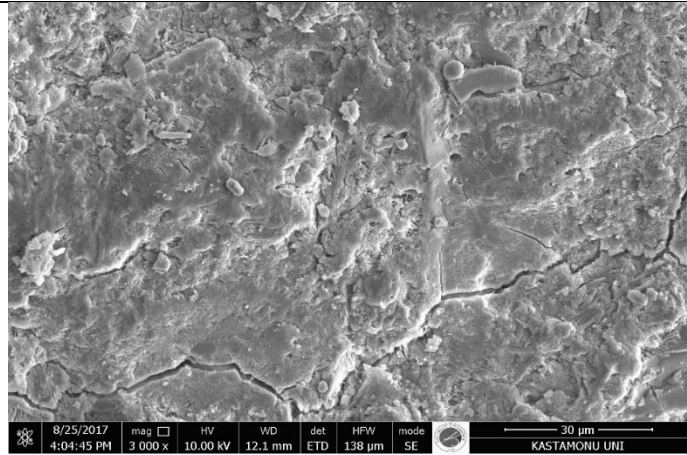
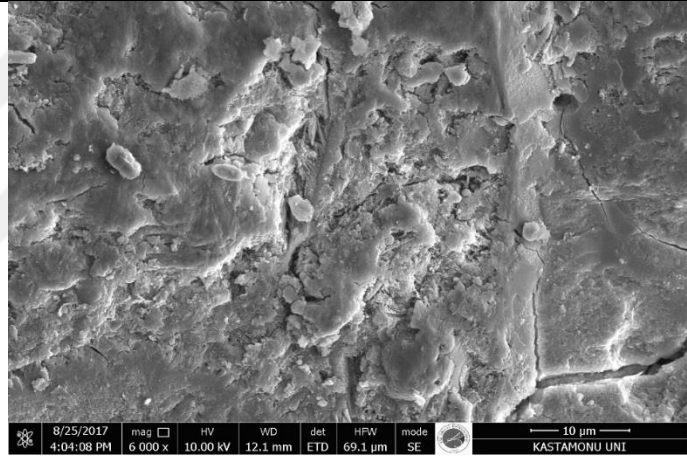
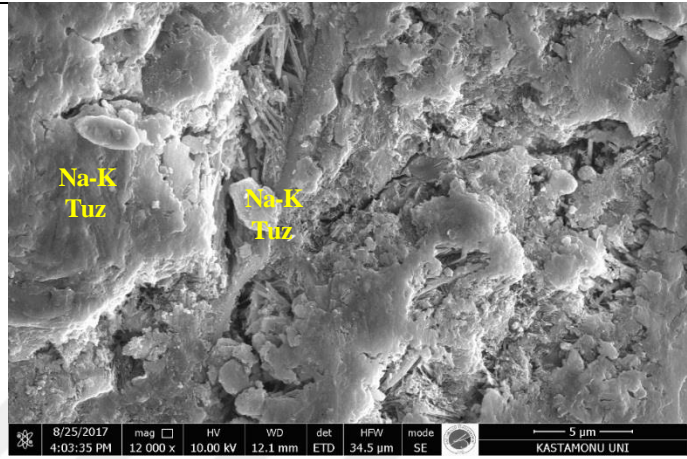
5C700N



15P600Ö



25C600Ö



## ÖZGEÇMİŞ

1. Adı,Soyadı : Gökhan KAPLAN
2. Doğum Tarihi : 13.10.1986
3. Unvanı : Öğretim Görevlisi
4. Öğrenim Durumu

Derece	Üniversite	Yıl
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi	2009
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi	2012
Doktora	Celal Bayar Üniversitesi	2012-.....

### 5. Akademik Unvanlar

2012 – ..... Öğretim Görevlisi (Kastamonu Üniversitesi – İnşaat Bölümü)

### 6. Yönetilen Yüksek Lisans ve Doktora Tezleri

6.1 Yüksek Lisans Tezleri

6.2 Doktora Tezleri

### 7. Yayınlar

7.1 Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler (SCI & SSCI & Arts and Humanities)

- Yıldızel S.A., Kaplan G., Öztürk A.U., Cost Optimization of Mortars Containing Different Pigments and Their Freeze-Thaw Resistance Properties, Advances in Materials Science and Engineering, (2015) (<http://dx.doi.org/10.1155/2016/5346213>).

- Yıldızel S.A., Doğan E., Kaplan G., Ergut A., Major Constructional Dispute Causes In Turkey, Archives of Civil Engineering, Vol. 62, No.4, 193-204 (2016).

- Öztürk A.U., Kaplan. G., A Study on Some of The Durability Properties of White Cement and Portland Cement With Various W/C Ratios, Romanian Journal of Materials, Vol. 47, No.3, 48-58 (2017).

#### 7.2 Uluslararası Diğer Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

- Kaplan G., Öztürk A.U., Yıldız S.A., Yaprak H., Dissolution properties of different types of plasticizers and investigation of their impact on mortars via variance analysis (ANOVA), Usak University Journal of Material Sciences, Vol. 3, No. 2, 208 – 225 (2014).
- Yıldız S.A., Kaplan G., Öztürk A.U., Arslan Y., Freeze-thaw resistance of light-coloured basalt fibre reinforced concrete used for concrete paving, Journal of Engineering Research and Applied Science, Vol. 3, No. 2, 252 - 259 (2014).
- Kaplan G., Yıldız S.A., Öztürk A.U., The optimization of biopolymer additive cements on the behavior of freezing and thawing cycles, European International Journal of Science and Technology, Vol. 4, No. 7, 116-126 (2015).
- Yıldız S.A., Kaplan G., Arslan Y., Yıldırım M.S., Öztürk A.U., A study on the effects of weather conditions on the worker health and performance in a construction site, Journal of Engineering Research and Applied Science, Vol. 4, No. 1, 291 - 295 (2015).
- Yıldız S.A., Kaplan G., Arslan Y., Öztürk A.U., Evrensel M., Yurdusev M.A., The importance of innovation and leadership education in civil engineering discipline, Journal of Engineering Research and Applied Science, Vol. 4, No. 2, 303 - 306 (2015).
- Yaprak H., Kaplan G., Farklı Kür Koşullarının Taban Külü Katkılı Geopolimerlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, TÜBAV Bilim, Vol. 9 No. 3, 41-51 (2016).
- Otçu N.Ü., Uzundurukan S., Kaplan G., Determination of the Plasticity Index of Soils with Fine-Grained Soils Using Methylene Blue Test, Journal of Geoscience and Environment Protection, Vol.5 No.3, 165-181 (2017)

### 7.3 Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceeding) Basılan Bildiriler

- Kaplan G., Gültekin A.B., Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkileri Açısından İncelenmesi, Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 58-63, Ankara, 26-28 Mayıs 2010.
- Gökçe H.S., Şimşek O., Andiç-Çakır Ö., Kaplan G., Effect of Silica Fume on the Strength Development of Boron Active Belite Cement, 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, CD-ROM, pn. 6, Ankara/Turkey 17-19 October 2012.
- Kaplan G., Öztürk A.U., Yaprak H. Farklı Zamanlarda Çözünen Kimyasal Katkıların Taze ve Sertleşmiş Harç Üzerindeki Etkileri, Uluslararası Katılımlı Yapılarda Kimyasal Katkılar 4. Sempozyumu ve Sergisi, Bildiri Kitabı, 279-295, Ankara/Turkey, 24-25 October 2013.
- Moraloğlu O., Öztürk A.U., Kaplan G., Yıldız S.A. Biyopolimer Katkılı Çimentoların Donma-Çözülme Etkisi Altındaki Davranışının İncelenmesi, II. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu (ISBS 2015), 110-116, Ankara/Türkiye 28-30 Mayıs 2015.
- Yaprak H., Kaplan G., Demir İ., Alkalilerle Aktive Edilmiş Taban Kültü ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Harçların Mekanik Özellikleri, II. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu (ISBS 2015), 337-342, Ankara/Türkiye 28-30 Mayıs 2015.
- Demircan R., Kaplan G., Gültekin A.B., Analysis of Restoration Mortars Used For Strengthening of Historical Buildings in the Context of Sustainability Criteria, International Conference on Sustainable Built Environment (SBE 2016), 737-746, İstanbul/Turkey 13-15 October 2016.
- Memiş S., Kaplan G., Yaprak H., Yılmazoğlu M.U., Mütevellî İ.G., Investigation Of Thermo-Mecanical Properties At Plaster Inculuded Waste Ceramics And Bricks,



The 8th Multidisciplinary Academic Conference (The 8th MAC), 12, Prague/Czech Republic 14 - 15 October 2016

•Karabult Y., Yıldız S.A., Kaplan G., A New Approach To Determination of Ready Mixed Concrete Consistency: Image Processing Method, International Symposium on Multidisciplinary Studies (ISMS 2016), 66, Belgrade/Serbia 20-23 October 2016.

7.4 Yazılan Uluslararası Kitaplar veya Kitaplarda Bölümler

7.5 Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınları Makaleler

•Yaprak H., Demir İ., Kaplan G., Cem I, Cem IIIA ve Borlu Çimento Harçları Üzerine Farklı Agresif Koşulların Etkisi, Politeknik Dergisi Cilt 17, Sayı 1, (Özel Sayı), 9-12 (2014).

•Kalinçimen G., Öztürk A.U., Kaplan G., Yıldız S.A., Seramik Atıklarının Çimento İkame Malzemesi Olarak Kullanılması ve Asit Dayanıklılığının İncelenmesi, Kastamonu Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 1, Sayı 1, 9-16 (2015).

7.6 Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

•Yıldız S.A., Yiğit M.E., Öztürk A.U., Kaplan G., Farklı Viskozite Değerlerine Sahip Püskürtme Beton Karışımlarının Geri Sıçrama Optimizasyonunun Abaqus CAE Programıyla İncelenmesi, 9. Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, 489-501, Antalya, 16-18 Nisan 2015.

•Kaplan G., Öztürk A.U., Yıldız S.A., Öğütme Kolaylaştırıcı Ve Dayanım Arttırıcı Katkıların Kalkersı Uçucu Kül Katkıları Çimentolarda Kullanımı, 10. Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, 489-501, İstanbul, 13-14 Nisan 2015.

7.7 Diğer Yayınlar

Diğer Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler

## Diğer Ulusal Dergilerde Yayımlanan Makaleler

### 8. Projeler

- KÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ (No: KÜBAP 01-2013/13), Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Katkılı Harçların Durabilite ve Mikroyapı Özellikleri, Araştırmacı, (Haziran 2013- Mart 2015).
- CBÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ (No. 2015-063), Kendi Kendini Temizleyen ve Kendiliğinden Yerleşen Renkli Mimari Betonların Maliyet Optimizasyonu, Araştırmacı, (Mayıs 2015- Mayıs 2016).
- KÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ (No: KÜBAP 05-2015/10), Alkaliler ile Aktive Edilmiş Üç Bileşenli ve Yüksek Performanslı Lifli Kompozitlerin Durabilite Özellikleri, Araştırmacı, (Ağustos 2015 - Nisan 2017).
- KÜ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ (No: KÜ-BAP05-2016/19), Karma Lifli Taşıyıcı Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Araştırmacı, (Kasım 2016 - Devam Ediyor).