



**MİKRONİZE EDİLMİŞ ZEOLİT İKAMELİ HARÇLARIN VE
BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Semih CEYLAN

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Semih CEYLAN

07/04/2021

MİKRONİZE EDİLMİŞ ZEOLİT İKAMELİ HARÇLARIN VE BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Semih CEYLAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye’de büyük rezerve sahip doğal zeolitın mikron inceliğinde öğütülerek çimento yerine ikame edilmesiyle üretilen harçların ve betonların mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Harçların hazırlanmasında CEM I 42,5 R çimento, CEN standart kumu, su, toz akışkanlaştırıcı ve çimentoya ikame olarak % 10 silis dumanı ve mikronize edilmiş %5, %10, %15, %20 zeolit kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen 5x5x5 cm boyutlu küp numuneler 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılarak 23±2°C’de kür havuzunda bekletilmiştir. Çalışmada 3, 7, 28 ve 56 günlük harç numunelerinin basınç dayanımı; 28 günlük harç numunelerinin su emme, birim hacim ağırlık, ultrasonik hız değerlerine bakılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre %15 mikronize zeolit ikame edilmesinin, %10 silis dumanı ikame edilmesine yakın değerler verdiği görülmüştür. Harçlardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda 0-4, 4-11,2, 11,2-22,4 mm boyutlarında agregalar temin edilerek 10x10x10 cm küp ve 10x20 cm silindir beton numuneler üretilmiştir. Karışımların birim hacim ağırlıkları ve hidratasyon ısıları hesaplanmış olup 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 ve 365 günlük betonların basınç ve yarmada çekme dayanımlarına bakılmıştır. Beton numunelerin 7, 28 ve 365 günlük klor - iyon geçirgenlik deneyleri; 28 günlük elastisite modülü, poison oranları; 7 ve 28 günlük karbonasyon, ultrasonik hız, kılcallık deneyleri yapılmış olup su emme ve porozite değerleri ölçülmüştür. Deneyler sonucunda zeolit ikamesi ile silis dumanına yakın geçirimsizlik değerleri elde edilmiş olup daha mukavim ve yüksek performanslı beton üretilmiştir. Mikroyapıda oluşan değişimleri gözlemlmek amacıyla 3, 7 ve 28 günlük beton numunelere SEM, XRD, F-TIR ve TGA analizleri yapılmıştır. Yapılan mikroyapı deneyleri birbirleriyle uyumlu sonuçlar vermiş olup deneyler sonucunda beton numunelerde az miktarda Ca(OH)₂ ve quartz, yoğun miktarda CaCO₃ ve C-S-H gözlemlenmiştir. Sonuç olarak mikronize zeolitın silis dumanına alternatif olarak geçirimsizlik ve yüksek performans elde edilmesinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Bilim Kodu : 91127
Anahtar Kelimeler : Puzolan, silis dumanı, zeolit, geçirimsizlik
Sayfa Adedi : 169
Danışman : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU
İkinci Danışman : Prof. Dr. Lutfullah TURANLI

INVESTIGATION OF THE ENGINEERING PROPERTIES OF MORTARS AND CONCRETES SUBSTITUTING MICRONIZED ZEOLITE

(Ph. D. Thesis)

Semih CEYLAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

Engineering characteristics of mortars and concretes prepared with substitution of micronized grinded natural zeolite instead of cement, that has great reserves in Turkey were investigated in this study. CEM I 42,5 R cement, RILEM sand, 10% substituted silica fume, 5%, 10%, 15%, 20% substituted micronized zeolite, powder superplasticizer have been used for the mortars. After a day, 5x5x5 cm cubic specimens were removed from the molds and cured at room temperatures. Compressive strength of mortar specimens were calculated on the 3rd, 7th, 28th and 56th days; water absorption, unit weight, ultrasonic pulse velocity tests were done to mortar specimens on the 28th days. Consequently it is noticed that substitution of 15% micronized zeolite gave approximate results with 10% silica fume substitution. According to the results obtained from mortars 0-4, 4-11,2, 11,2-22,4 mm aggregates were provided and 10x10x10 cm cubic, 10x20 cm cylindric concrete specimens were prepared. Unit weight, heat of hydration of the mixtures were calculated. Compressive and split tensile strength tests of the concretes were done on the 3rd, 7th, 14th, 21st, 28th, 56th, 90th and 365th days. Chloride ion permeability tests were done on the 7th, 28th and 365th days; modulus of elasticity, poisson ratio were attained on the 28th day; carbonation, ultrasonic velocity, sorptivity experiments were carried out on the 7th and 28th days, therefore water absorption and porosity values were attained. At the end of the tests more durable, high performed concrete and impermeability results close to silica fume is achieved with zeolite substitution. SEM, F-TIR, XRD, TGA analyses were performed to concrete samples on the 3rd, 7th and 28th days to observe the changes in microstructure. All microstructure experiments gave compatible results with each other and at the end of the experiments a little amount of Ca(OH)₂ and quartz; CaCO₃ and C-S-H were observed heavily on the concrete specimens. As a result, it is evaluated that micronized zeolite can be used instead of silica fume to obtain impermeability and high performance.

Science Code : 91127

KeyWords : Pozzolan, silica fume, zeolite, impermeability

Page Number : 169

Supervisor : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Co-Supervisor : Prof. Dr. Lutfullah TURANLI

TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları esnasında büyük destek olan danışman hocalarım Prof.Dr. Salih YAZICIOĞLU ve Prof.Dr. Lutfullah TURANLI'ya öncelikle teşekkür ederim. Çalışmaların ilerleyişi ile ilgili görüşleriyle katkıda bulunan hocalarım Prof.Dr. İlhami DEMİR ve Doç.Dr. Osman ŞİMŞEK'e ayrıca teşekkür ederim. Deneysel çalışmalar esnasında desteklerinden dolayı Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı sorumlusu Prof.Dr. Sinan Turhan Erdoğan'a, laboratuvar personelleri Cuma YILDIRIM ve Gülşah BİLİCİ'ye, araştırma görevlileri Kemal ARDOĞA ve Meltem TANGÜLER BAYRAMTAN'a, ODTÜ Jeoloji Mühendisliği öğretim görevlilerinden Dr. Öğr. Üyesi Fatma TOKSOY KÖKSAL'a, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç.Dr.Özge ANDİÇ ÇAKIR'a, D.S.İ. Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı Beton Laboratuvarı Şube Müdürü Aydın SAĞLIK, Hakan SOYSAL ve ilgili diğer personeline, arkadaşlarım Arda GÜLERER ve Gökhan ÖZDEMİR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Zeolit temininde destek sağlayan Rota Madencilik A.Ş.'ye, agrega temininde destek sağlayan Yiğit Beton firması Şaşmaz tesisine, ön deneysel çalışmalarda laboratuvar imkanlarıyla destek sağlayan Hasanoğlu Votorantim çimento fabrikasına da ayrıca teşekkür ederim.

Bu proje Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından 07/2018–2030 proje numarası ile desteklenmiş olup Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimine teşekkür ederim.

Son olarak her konuda destek olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Portland Çimentosu	5
2.1.1. Geleneksel Portland çimentosunun hammaddeleri.....	6
2.1.2. Portland çimentosunun ana kimyasal bileşenleri.....	6
2.1.3. Portland çimentosunun avantajları	7
2.1.4. Portland çimentosunun dezavantajları	7
2.2. Çimento Harcı	8
2.3. Beton	8
2.4. Betonda Kullanılan Mineral Katkılar	9
2.4.1. Puzolanların aktivitesine etki eden faktörler	10
2.4.2. Puzolanik aktivitenin belirlenmesi	11
2.4.3. Doğal puzolanlar.....	12
2.4.4. Doğal puzolanların dünyadaki dağılımı	16
2.4.5. Yapay puzolanlar	22
2.4.6. Diğer puzolanlar	32
2.4.7. Yeni nesil mineral katkıları	34

	Sayfa
2.5. Literatürde Zeolit ile Yapılan Bazı Deneysel Çalışmalar	43
3. MATERYAL VE METOT	53
3.1. Materyal	53
3.1.1 Çimento	53
3.1.2. Zeolit.....	55
3.1.3. Silis dumanı	57
3.1.4. Silis kumu	59
3.1.5. Agregas	60
3.1.6. Akışkanlaştırıcı.....	62
3.1.7. Su	63
3.2. Metot	63
3.2.1. Harç deneyleri.....	64
3.2.2. Beton deneyleri.....	67
3.2.3. Mikroyapı deneyleri	80
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	83
4.1. Harçlarla Yapılan Deneyler.....	83
4.1.1. Harç yayılma deneyi	83
4.1.2. Harç basınç, birim ağırlık, su emme ve ultrasonik dalga hızı deneyleri ...	84
4.2. Taze Beton Deneyleri.....	86
4.2.1. Beton slump (çökme) deneyi	86
4.2.2. Hava oranı.....	87
4.2.3. Birim hacim ağırlık.....	87
4.3. Beton Basınç Dayanımı.....	88
4.4. Beton Yarmada Çekme Dayanımı	89
4.5. Su Emme, Porozite, Toplam Nem Oranı ve Özgül Ağırlık	90
4.6. Klor-İyon Geçirgenliği Deneyi	95

	Sayfa
4.7. Elastisite Modülü Deneyi ve Poison Oranı Hesaplanması.....	97
4.8. Karbonasyon Deneyi	98
4.9. Ultrasonik Dalga Hız Deneyi	100
4.10. Kapiler Kılcallık Deneyi	101
4.11. Hidratasyon Isısı Deneyi	104
4.12. Mikroyapı Deneyleri	106
4.12.1. SEM deneyleri	106
4.12.2. EDX analizleri	111
4.12.3. XRD deneyleri	130
4.12.4. F-TIR deneyleri	137
4.12.5. TGA deneyleri	144
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	155
5.1. Sonuçlar.....	155
5.2. Öneriler	157
KAYNAKLAR	159
ÖZGEÇMİŞ	169

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Harç ve beton karışımlarında kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	53
Çizelge 3.2. Harç ve beton karışımlarında kullanılan çimentonun dayanım özellikleri .	54
Çizelge 3.3. Kullanılan zeolitın kimyasal ve fiziksel özellikleri	55
Çizelge 3.4. Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	58
Çizelge 3.5. Harç karışımlarında kullanılan silis kumunun özellikleri.....	59
Çizelge 3.6. Kullanılan agregalara ait doymuş yüzey kuru, kuru birim ağırlıklar ve su emme oranları (TS 1097-6).....	60
Çizelge 3.7. Kullanılan agregalara ait gradasyon sonuçları.....	60
Çizelge 3.8. Akışkanlaştırıcı özellikleri.....	63
Çizelge 3.9. Harç numuneleri karışım oranları.....	65
Çizelge 3.10. Agregaların sahadaki durumuna göre düzenlenen 1 m ³ beton için karışım hesabı.....	68
Çizelge 4.1. Kontrol numuneleriyle yapılan yayılma deneyi sonuçları.....	83
Çizelge 4.2. Silis dumanı ikameli numunelerle yapılan yayılma deneyi sonuçları	83
Çizelge 4.3. Zeolit ikameli numunelerle yapılan yayılma deneyi sonuçları.....	84
Çizelge 4.4. Silis dumanı ikamesiyle elde edilen harç basınç dayanım değerleri	84
Çizelge 4.5. Harç basınç dayanım değerleri	85
Çizelge 4.6. Harçlara ait 28 günlük birim ağırlık değerleri	85
Çizelge 4.7. Harçlara ait 28 günlük su emme oranları.....	86
Çizelge 4.8. Harçlara ait 28 günlük ultrasonik dalga hızları.....	86
Çizelge 4.9. Beton çökme deneyi sonuçları.....	87
Çizelge 4.10. Beton hava değerleri sonuçları	87
Çizelge 4.11. Taze beton birim hacim ağırlık değerleri.....	87
Çizelge 4.12. Beton basınç dayanım değerleri.....	88
Çizelge 4.13. Beton yarmada çekme dayanım değerleri.....	89

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.14. 7 günlük 10 cm ³ 'lük betonlara ait ağırlık durumları	91
Çizelge 4.15. 28 günlük 10 cm ³ 'lük betonlara ait ağırlık durumları	91
Çizelge 4.16. Su emme değerleri	92
Çizelge 4.17. Porozite değerleri.....	93
Çizelge 4.18. Toplam nem oranı.....	94
Çizelge 4.19. Özgül ağırlık değerleri	95
Çizelge 4.20. ASTM C 1202'ye göre klor-iyon geçirgenliği değerlendirme tablosu.....	95
Çizelge 4.21. Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçları	95
Çizelge 4.22. Elastisite modülü deney sonuçları	97
Çizelge 4.23. Poison oranı deney sonuçları	98
Çizelge 4.24. Karbonasyon deneyi sonuçları.....	99
Çizelge 4.25. Ultrasonik dalga hız deneyi sonuçları.....	100
Çizelge 4.26. Kılcallık katsayısı değerleri	102
Çizelge 4.27. Hidratasyon ısısı değerleri	104
Çizelge 4.28. Kümülatif hidratasyon ısısı değerleri.....	105

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Puzolanik reaksiyonların oluşumu.....	10
Şekil 2.2. Kuzey Amerika'daki volkanik alanlar.....	17
Şekil 2.3. Güney Amerika'daki volkanik alanlar.....	18
Şekil 2.4. Avrupa'daki volkanik alanlar.....	19
Şekil 2.5. Afrika'daki volkanik alanlar.....	20
Şekil 2.6. Asya'daki volkanik alanlar.....	21
Şekil 2.7. Avustralya'daki volkanik alanlar.....	21
Şekil 2.8. $\text{CaO}+\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ miktarına göre malzemeleri gösteren üçlü diyagram.....	22
Şekil 2.9. Termik elektrik santralinde fırında kül toplanması ve dağıtımı.....	24
Şekil 2.10. Yüksek fırın cürufu elde edilmesi.....	26
Şekil 2.11. Silis dumanı elde edilmesi.....	29
Şekil 3.1. Kullanılan hidrate olmamış çimentoya ait Rietveld analizi grafiği.....	55
Şekil 3.2. Kullanılan zeolite ait lazer tane boyu dağılımı.....	56
Şekil 3.3. Kullanılan zeolite ait XRD grafiği.....	57
Şekil 3.4. Kullanılan silis dumanına ait tane boyu dağılımı.....	58
Şekil 3.5. Kullanılan silis dumanına ait XRD grafiği.....	59
Şekil 3.6. Kullanılan 0-4 mm agregaya ait gradasyon grafiği.....	61
Şekil 3.7. Kullanılan 4-11,2 mm agregaya ait gradasyon grafiği.....	62
Şekil 3.8. Kullanılan 11,2-22,4 mm agregaya ait gradasyon grafiği.....	62
Şekil 3.9. Klor-iyon geçirgenliği deneyi düzeneği.....	76
Şekil 3.10. Kılcallık (kapiler) deneyi düzeneği.....	80
Şekil 4.1. Beton basınç dayanım değerleri.....	89
Şekil 4.2. Yarmada çekme dayanım değerleri.....	90
Şekil 4.3. Su emme değerleri.....	92
Şekil 4.4. Porozite değerleri.....	93

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Toplam nem oranı.....	94
Şekil 4.6. Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçları	96
Şekil 4.7. Elastisite modülü deney sonuçları	97
Şekil 4.8. Poison oranı deney sonuçları	98
Şekil 4.9. Karbonasyon derinlik değerleri	99
Şekil 4.10. Ultrasonik dalga hız değerleri.....	100
Şekil 4.11. 7 günlük betonlara ait kılcallık değerleri	101
Şekil 4.12. 28 günlük betonlara ait kılcallık değerleri	102
Şekil 4.13. 1.cil kılcallık katsayısı değerleri	103
Şekil 4.14. 2.cil kılcallık katsayısı değerleri	103
Şekil 4.15. Hidratasyon ısısı değerleri	104
Şekil 4.16. Kümülatif hidratasyon ısısı değerleri.....	105
Şekil 4.17. 3 günlük kontrol betonuna ait (A noktası) EDX analizi, (CH).....	112
Şekil 4.18. 3 günlük kontrol betonuna ait (B noktası) EDX analizi, (CH).....	113
Şekil 4.19. 3 günlük kontrol betonuna ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H)	113
Şekil 4.20. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CH)....	114
Şekil 4.21. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CH)	115
Şekil 4.22. 3 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CH)	116
Şekil 4.23. 3 günlük zeolit ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CaCO ₃).....	117
Şekil 4.24. 7 günlük kontrol betonuna ait (A noktası) EDX analizi, (CH).....	118
Şekil 4.25. 7 günlük kontrol betonuna ait (B noktası) EDX analizi, (CH).....	119
Şekil 4.26. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CH)....	120
Şekil 4.27. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CH)	121
Şekil 4.28. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (CH)	121
Şekil 4.29. 7 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H).....	122
Şekil 4.30. 7 günlük zeolit ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (Etrenjit)	123

Şekil	Sayfa
Şekil 4.31. 7 günlük zeolit ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H).....	123
Şekil 4.32. 28 günlük kontrol betonuna ait (A noktası) EDX analizi, (CH).....	124
Şekil 4.33. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H).....	125
Şekil 4.34. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (C-S-H).....	126
Şekil 4.35. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H).....	126
Şekil 4.36. 28 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H).....	128
Şekil 4.37. 28 günlük zeolit ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CH).....	128
Şekil 4.38. 28 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CaCO ₃).....	129
Şekil 4.39. 3 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği.....	131
Şekil 4.40. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği.....	131
Şekil 4.41. 3 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği.....	132
Şekil 4.42. 7 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği.....	132
Şekil 4.43. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği.....	133
Şekil 4.44. 7 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği.....	133
Şekil 4.45. 28 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği.....	134
Şekil 4.46. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği.....	134
Şekil 4.47. 28 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği.....	135
Şekil 4.48. 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı XRD grafiği.....	136
Şekil 4.49. 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı XRD grafiği.....	136
Şekil 4.50. 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı XRD grafiği.....	137
Şekil 4.51. 3 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi.....	138
Şekil 4.52. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi.....	139
Şekil 4.53. 3 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi.....	139
Şekil 4.54. 7 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi.....	140

Şekil	Sayfa
Şekil 4.55. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi	140
Şekil 4.56. 7 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi	141
Şekil 4.57. 28 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi	141
Şekil 4.58. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi	142
Şekil 4.59. 28 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi	142
Şekil 4.60. 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği.....	143
Şekil 4.61. 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği	143
Şekil 4.62. 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği	144
Şekil 4.63. 3 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi	145
Şekil 4.64. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi	146
Şekil 4.65. 3 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi.....	146
Şekil 4.66. 7 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi	147
Şekil 4.67. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi	148
Şekil 4.68. 7 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi.....	149
Şekil 4.69. 28 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi	149
Şekil 4.70. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi	150
Şekil 4.71. 28 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi.....	151
Şekil 4.72. 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı TGA grafiği	151
Şekil 4.73. 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı TGA grafiği	152
Şekil 4.74. 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı TGA grafiği	152

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Harç ve beton karışımlarında kullanılan hidrate olmamış çimentoya ait SEM görüntüsü	54
Resim 3.2. Harç ve beton karışımlarında kullanılan zeolite ait SEM görüntüsü	57
Resim 3.3. Harç ve beton karışımlarında kullanılan silis dumanına ait SEM görüntüsü.....	59
Resim 3.4. Harç numunelerinin hazırlanması.....	65
Resim 3.5. Hazırlanan harç numuneleri.....	66
Resim 3.6. Hazırlanan harç numunelerine yapılan yayılma deneyi.....	66
Resim 3.7. Hazırlanan harç numunelerine yapılan basınç deneyi	67
Resim 3.8. Beton karışımlarının hazırlanması	68
Resim 3.9. Hazırlanan 10x20 cm silindir beton numuneleri	69
Resim 3.10. Hazırlanan 10x10x10 cm küp beton numuneleri	69
Resim 3.11. Kür havuzunda bekletilen beton numuneleri.....	69
Resim 3.12. Hazırlanan beton numunelerine yapılan slump deneyi.....	70
Resim 3.13. Hava oranı tespiti	71
Resim 3.14. Beton silindir basınç deneyi (10x20 cm numune)	72
Resim 3.15. Beton silindir yarmada çekme deneyi.....	73
Resim 3.16. Numunelerin kesilmesi	74
Resim 3.17. 50 mm kalınlığında kesilen numuneler.....	75
Resim 3.18. Kesilen numunelerin desikatöre yerleştirilmesi.....	75
Resim 3.19. Klor-iyon geçirgenliği deneyi düzeneği	76
Resim 3.20. Numunenin elastisite modülü deneyine hazırlanması	77
Resim 3.21. Elastisite modülü deneyi.....	77
Resim 3.22. Karbonasyon tankı.....	78
Resim 3.23. Karbonasyon deneyi sonunda numuneler.....	78
Resim 4.1. 3 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü.....	106

Resim	Sayfa
Resim 4.2. 7 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü.....	107
Resim 4.3. 28 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü.....	107
Resim 4.4. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü.....	108
Resim 4.5. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü.....	108
Resim 4.6. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü.....	109
Resim 4.7. 3 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü	109
Resim 4.8. 7 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü	110
Resim 4.9. 28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü	110
Resim 4.10. 3 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü.....	112
Resim 4.11. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü.....	114
Resim 4.12. 3 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü	116
Resim 4.13. 7 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü.....	118
Resim 4.14. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü.....	120
Resim 4.15. 7 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü	122
Resim 4.16. 28 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü.....	124
Resim 4.17. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü.....	125
Resim 4.18. 28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü	127
Resim 4.19. 28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü	129

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
m^3	Metreküp
j	Joule
kN	Kilonewton
MPa	Megapaskal
γ_{dyk}	Doygun Yüzey Kuru Birim Ağırlık
γ_k	Kuru Birim Ağırlık
Kısaltmalar	Açıklamalar
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
BET	Brunauer, Emmet ve Teller metodu
CEM I	Portland Çimentosu
C_3S	Trikalsiyum Silikat
C_2S	Dikalsiyum Silikat
C_3A	Trikalsiyum Aluminat
C_4AF	Tetra Kalsiyum Alumino Ferrit
CaO	Kalsiyum Oksit
$CaCO_3$	Kalsiyum Karbonat
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
CO_2	Karbondioksit
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
CH	Kalsiyum Hidroksit
HCl	Hidroklorür
H_2SO_4	Sülfürik Asit
Fe_2O_3	Demir (III) Oksit
F-TIR	Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
LVDT	Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü

Kısaltmalar	Açıklamalar
MgSO₄	Magnezyum Sülfat
Na₂O	Sodyum Oksit
Na₂CO₃	Sodyum Karbonat
NaCl	Sodyum Klorür
NaOH	Sodyum Hidroksit
K₂O	Potasyum Oksit
K	Kontrol Harcı Veya Betonu
PK	Pirinç Kabuğu Külü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
SiO₂	Silis Oksit
SO₃	Kükürt Trioksit
SD	Silis Dumanı İkameli Harç Veya Beton
TGA	Termogravimetrik Analiz
TiO₂	Titanyum Oksit
UK	Uçucu Kül
XRD	X Işını Difraktometresi
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
Z5	%5 Zeolit İkameli Harç Veya Beton
Z10	%10 Zeolit İkameli Harç Veya Beton
Z15	%15 Zeolit İkameli Harç Veya Beton
Z20	%20 Zeolit İkameli Harç Veya Beton

1. GİRİŞ

Beton; sudan sonra dünyada en çok tüketilen malzemedir. Betonun ana hammadresi olan Portland çimentosu günümüz dünyasında çok kullanılan ve üzerinde çok fazla çalışma yapılan yapı malzemelerindendir [1]. Günümüzde Portland çimentosundan üretilen beton; yüksek dayanım, durabilite, kolay şekil alabilmesi ve ekonomiklik gibi üstün özellikleri sayesinde tercih edilmektedir. Sayılan tüm bu avantajlarına karşılık uygulama sırasında bazı kaygı verici hususlar bulunmaktadır. Betonun ana bileşeni Portland çimentosunun üretimi sırasında açığa çıkan çevresel kirlilik uzun yıllardır büyük bir problem oluşturmaktadır [2].

Şehirleşmenin artmasıyla insan eliyle oluşturulmuş yapı malzemelerinden hızlı ve ekonomik olan betonun tüketimi çok artmıştır. Yapı sektörünün gelişmesi ve doğal kaynakların yok edilmesi kaçınılmaz bir çelişki meydana getirmiştir. Büyük miktarda CO₂, çimento üretimi esnasında doğaya salınmakta olup bu salınım küresel ısınma ve iklim değişikliğini etkilemektedir [3]. Portland çimento üretiminin %3 küresel enerji kullanımı ve %9 oranında CO₂ emisyonundan sorumlu olduğu rapor edilmiştir [4]. İstatistikî çalışmalara göre Portland çimentosuna bağlı olarak toplam CO₂ emisyonunun 2025 yılında yılda 3,5 milyar ton seviyesine çıkacağı tahmin edilmiştir [5].

1 ton Portland çimentosu üretimi için kireç taşının kalsinasyonu sırasında yaklaşık 0,8-1 ton CO₂ doğaya salınmaktadır. Bu sebeple Portland çimentosu karbon ayak izini düşürmek günümüzde çok popüler olup konuyla ilgili birçok çalışma yürütülmektedir [6]. Çimento üretiminde, gerekli olan yüksek sıcaklık nedeniyle yüksek enerji harcanmakta ve gaz emisyonu açığa çıkmaktadır. Bir ton çimento ihtiyacını karşılamak için 3 giga joule enerji gerekli olup üretim sırasında küresel ısınmaya neden olan sera gazlarından biri olan CO₂ açığa çıkar. İnşaat sektörünün oluşturduğu emisyonları azaltmak için alternatif bağlayıcı malzemelerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [7].

Son yıllarda Portland çimentosunun durabilitesi, beton yapıların sürdürülebilirliği hususu da önem kazanmıştır. Bu sebeple Portland çimento tüketimini azaltmak, mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirerek çimento ve beton kompozitlerin servis sürelerini uzatmak çok önemlidir [8]. Artan nüfus ve teknolojik gelişmeler enerjiye olan ihtiyacı çok fazla arttırmış olup mevcut kaynakları en iyi koşullarda kullanma hususunda çalışmalar yapmak zorunlu hale gelmiştir [9].

Çimento üretimindeki enerji tüketimini ve çevresel etkiyi azaltmanın bir yolu da mineral katkıların çimentonun bir kısmı yerine kullanılmasıdır. Hatta %70'e kadar mineral katkı kullanımının CO₂ emisyonunu azaltarak yüksek boyutsal stabiliteye sahip, dayanıklı ve ekonomik bir beton üretimi ve daha temiz bir çevre sağladığı yapılan çalışmalarda görülmüştür [10]. Doğal puzolanlar ya da uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi endüstriyel atıklar (yapay puzolanlar) tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler olarak problemlerin çözümlerinde kullanılmışlardır [11]. Çimentoya kısmi ikameler yapılmasının CO₂ emisyonunu düşürdüğü, beton özelliklerinden ileri yaş dayanımı ve durabilitede artışlar meydana getirdiği ispatlanmıştır [12].

Silis dumanının yüksek mukavemet ve durabiliteye sahip yüksek performanslı beton üretiminde etkili bir bağlayıcı olduğu kanıtlanmıştır [13]. Ancak çok ince olması çok fazla su ihtiyacı oluşturmakta ve daha da önemlisi maliyeti artırmaktadır. Bu kapsamda silis dumanı genellikle %10 seviyesinde kullanılmaktadır. Silis dumanı kullanımı hem çimento tüketimini hem de karbon ayak izini azaltmaktadır [14].

Doğal zeolit özel bir doğal puzolan olup yakın zamanda Rusya, Almanya, Slovenya, Küba, Sırbistan ve İspanya'da birçok çimento ve beton üretim tesislerinde kullanılmıştır [15]. Zeolit en çok Çin'de çimento ve beton sektöründe yılda yaklaşık 30 milyon ton olarak kullanıldığı bildirilmiştir [16]. Son yıllarda zeolit İran'da puzolanik malzeme olarak kullanılması popüler hale gelmiştir [17].

Doğal zeolit beton özellikleri üzerine etkisi ile ilgili birçok araştırma yapılıyor olmasına rağmen, zeolit içerikli betonların dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi ile ilgili detaylı çalışmalar yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır [18]. Zeolit, mineral yapısının uygunluğu sebebiyle mineral katkı olarak kullanılabilir. Hafif ve ince olması dolayısıyla boşlukları azaltmakta ve iyi bağlayıcılık özellikleri gösterebilmektedir [19]. Zeolit yüksek silis yapısı sebebiyle puzolanik etki göstermesi kolaylaşabilmektedir [20]. Doğal zeolit katkısı içeren betonlar üzerinde yürütülen çalışmalar, sahip olduğu yüksek puzolanik aktiviteden dolayı, zeolit beton özelliklerini olumlu etkilediği ve yüksek performanslı beton için uygun olabileceği fikrini desteklemektedir [21].

Ülkemiz doğal zeolitler açısından zengin konumda bulunmaktadır. Özellikle Gördes/Manisa ve Bigadiç/Balıkesir yöreleri zeolit rezervleri açısından zengindirler. Zeolit madenciliği ülkemiz için henüz çok yenidir. Ülkemizde çıkarılan zeolit, bol

miktarda ve kaliteli olmasına rağmen, bu konuda yapılan çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Zeolitin tanıtımı, iç ve uluslararası piyasaya girmesi Türkiye zeolit üreticileri açısından önemli sorunlardır [22]. Zeolitin katkı maddesi olarak kullanılması durumunda Portland çimento maliyetlerinde önemli azalmalar meydana geleceği tahmin edilmektedir [9].

Bu çalışmanın amacı; betona bu kadar üstün özellikler sağlayan silis dumanına yakın performans değerlerini ülkemizde çok fazla bulunan klinoptilolit türü mikronize seviyede öğütülmüş zeolit ile elde etmektir. Silis dumanı; havaalanları ve nükleer tesisler gibi yüksek mukavemet ve geçirimsizlik istenen yerlerde kullanılan pahalı ve genellikle ithal edilen bir mineral katkıdır. Bu kapsamda bu pahalı ve değerli olan mineral katkıya yakın üstünlükler sağlayan bir mineral katkı malzemesi bulunmasının ülkemize teknik ve ticari olarak katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Portland Çimentosu

Portland çimentosu betonun en temel bileşenidir. Portland çimentosu suyla birleştğinde hamur oluşur ve oluşan yapı kum ve taşlarla birleşerek katılaşıp ve beton oluşur.

Çimento; kalsiyum, silikon, alüminyum, demir ve diğer bileşenlerin birçok kontrollü kimyasal kombinasyonu ile üretilir.

Çimento üretiminde kireç taşı, kabuk, kalker, kil, cüruf, silika kumu ve demir cevheri kullanılır. Bu bileşenler yüksek sıcaklıklarda kaya gibi bir malzeme oluştururlar ve ince şekilde öğütölmelerini müteakiben bilinen çimento oluşur [23].

Hidrolik çimentoların başlangıcı eski Yunan ve Roma dönemlerine uzanmaktadır. Kireç ve volkanik kül o dönem kullanılan malzemeler olup suyun varlığında yavaşça reaksiyona girerek sert yapıyı oluşturmuşlardır. Roma harçları ve betonlarının bağlayıcı malzemeleri 2000 yıldan fazla süre önce bu şekilde oluşmuş olup müteakip dönemlerde Batı Avrupa'nın inşaat işlerinde kullanılmışlardır. Günümüzde hala var olan yapılardan Roma'daki Kulezyum ve Pantheon, İstanbul'daki Ayasofya o dönem kullanılan bağlayıcı malzemelerle, kırılmış tuğla ve seramik parçalarının agrega olarak kullanılmasıyla yapılmıştır.

John Smeaton 1756 yılında hidrolik kireci geliştirmiş olup Devon/İngiltere'de bulunan Plymouth kıyılarında Eddystone deniz fenerinin yapımında kullanmıştır. Bundan sonraki gelişim 1800'li yıllarda İngiltere ve Fransa'da killi kireç taşlarının yakılmasıyla elde edilen malzemedir. Çok kısa bir süre sonra Birleşik Devletler'de doğal bir malzemenin yakılmasıyla elde edilen "çimento kayası" adı verilen bir malzeme keşfedilmiştir. Bu malzemeler o dönem için çimentoya benzer bir yapıda olup daha düşük sıcaklıklarda ısıtılmış ve kontrolsüz bir yapıya sahiptir.

Portland çimentosunun bulunması Leeds-Yorkshire/İngiltere'de tuğla ustası Joseph Aspdin'in 1824 yılında kireç taşı ve kil içeren sentetik karışım için patent almasıyla başlamıştır. Joseph Aspdin bu malzemeye İngiltere'de inşaatlarda kullanılan Portland adasında bulunan Portland taşı isimli beyazımsı gri kireç taşına olan benzerliğinden dolayı Portland çimentosu adını vermiştir. Aspdin'in ürünü daha düşük sıcaklıklarda yakıldığı

için gerçek bir Portland çimentosu olamamıştır. Gerçek anlamda Portland çimentosu Isaac Charles Johnson tarafından Güneybatı İngiltere’de 1850’li yıllarda üretilmiştir. Portland çimentosu üretimi hızlı bir şekilde diğer Avrupa ülkelerine ve Kuzey Amerika’ya yayılmıştır. 20. yüzyıl boyunca çimento üretimi tüm dünyaya yayılmıştır. 2019 yılında Çin ve Hindistan, çimento üretiminde dünya liderleri olmuşlardır. Vietnam, Birleşik Devletler ve Mısır söz konusu ülkelere sonra çimento üretiminde önde gelen ülkelerdir [24]. TCMB verilerine göre Türkiye’de 2019 yılında 57 milyon ton çimento üretilmiş olup ülkemiz çimento üretimi konusunda bulunmuş olduğumuz coğrafyada iyi bir seviyededir [25].

2.1.1. Geleneksel Portland çimentosunun hammaddeleri

Geleneksel Portland çimentosunun üretiminde kullanılan temel ham maddeler;

- Kil ve kabuk formatındaki killi ve silisli alumina,
- Kireç taşı formatındaki kalker ve kalsiyum karbonat olarak sıralanabilir.

İçerikler; 1 birim kil ve kabuğun 2 birim kalkerli kireç taşı ile karıştırılıp, kırılıp kuru veya ıslak durumda bilyeli öğütücüde öğütülmesiyle elde edilmektedir.

Kuru veya ıslak halde bulunan toz haldeki malzemeler 1400-1500°C sıcaklıkta yakılmaktadır. Fırından ilk elde edilen klinker önce soğutulur; bilyeli öğütücüden geçtikten sonra alçı eklenir ve istenen incelikte öğütülür. Geleneksel Portland çimentosunun son kullanma tarihi üretildiği tarihten itibaren 3 aydır [26].

2.1.2. Portland çimentosunun ana kimyasal bileşenleri

Portland çimentosunun ana kimyasal bileşenleri CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, SO₃, Na₂O, K₂O olup,

Kireç (CaO)	%60-67
Silika (SiO ₂)	%17-25
Alumina (Al ₂ O ₃)	%3-8
Demir oksit (Fe ₂ O ₃)	%0,5-6

Magnezya (MgO)	%0,1-4
Sülfür trioksit (SO ₃)	%1-3
Sodyum ve Potasyum (Na ₂ O-K ₂ O)	%0,5-1,3 oranlarında bulunmaktadır.

C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF çimentonun ana bileşenlerini oluşturmaktadır. Bu 4 bileşenin oranları farklı Portland çimentolarına göre değişiklik göstermektedir. C₃S, C₂S dayanımı oluşturan öğelerdir. Portland çimentosunun ilk prizini almaya başlaması C₃A ile olmaktadır. C₃S çok hızlı bir şekilde hidratasyona uğrar ve erken dayanıma daha fazla etki eder. C₂S'in dayanıma etkisi 7 günde başlar ve 1 yıla kadar devam edebilir. C₃A çok hızlı hidrate olur ve ilk 24 saat içinde dayanıma çok az bir katkısı olur [26].

2.1.3. Portland çimentosunun avantajları

Portland çimentosu;

- Kırılma ve büzölmelere karşı daha mukavemetli olup kimyasal saldırılara karşı daha direnç göstermekte,
- Priz almaya erken başlamakta,
- Daha az süre bakım istemekte olup bu özellikleriyle avantaj sağlamaktadır [26].

2.1.4. Portland çimentosunun dezavantajları

Portland çimentosu aşağıda yer alan özellikler sebebiyle dezavantajlıdır.

- Yüksek hidratasyon ısısı açığa çıkarması nedeniyle kütle betonlarında kullanılması uygun değildir.
- Daha az kohezif bir yapıda olmasından dolayı beton pompalanması biraz daha zordur.
- Geçirgenliği daha fazla olup daha düşük durabiliteye sahiptir.
- Maliyeti yüksektir [26].

2.2. Çimento Harcı

Harç; çimento, ince agrega ve sudan oluşan bir yapı malzemesidir. Karışıma suyun katılmasıyla çimento aktif hale gelir ve betondaki gibi katılaşıp dayanım kazanmaya başlar. Laboratuvar deneylerinde kum, su ve çimento kullanılarak harç numuneleri elde edilebilmektedir. Elde edilen harç numunelerine yapılan deneyler sonucu pozolanik malzemelerin pozolanik aktivitesi olup olmadığıyla ilgili bilgi edinilmektedir [27].

2.3. Beton

Betonun %60-75'lik kısmını agregalar, %10-15'ini çimento, %15-20'sini su ve %5-8'ini sürüklenmiş hava oluşturmaktadır. Agrega türü ve boyutu, nihai beton ürününün amacına göre seçilmektedir. Normal binalar için küçük çaplı kaba agregaların kullanılması yeterliyken büyük barajlar için çapı 15 cm'den daha büyük agregalar kullanılmaktadır. Agregaların temiz olması beton kalitesine etkiyen önemli unsurlardandır. Yüksek kalitede beton, düşük su çimento oranında işlenebilir seviyede betonla elde edilmektedir [23]. Beton; temellerde, perde duvarlarda, döşemelerde ve diğer yapılarda kullanılan bir yapı malzemesidir. Çok yönlü bir malzeme olup kuru karışımın suyla birleşmesiyle esnek hale gelen yapı, istenen forma ve şekle girerek priz alması sonrasında kaya kadar sert hale gelir. Birçok beton yapısında, donatı kullanılarak dayanım artırılır ve betondaki çatlakların önüne geçilmeye çalışılır. Beton; çimento, kum, çakıl ve ince agregadan oluşmaktadır. Suyun eklenmesi, çimentoyu aktif hale getirerek karışımın birbirine bağlanmasını ve katı yapının oluşmasını sağlar. Çimento tanelerinin üzerinde bezecikler oluşur ve diğer agrega tanelerinin üzerine yapışır [27].

Çok soğuk ve sıcak havalarda betonu korumak amacıyla özel yöntemler kullanılmaktadır. Beton ne kadar nemli kalırsa o kadar mukavemetli ve durabil olmaktadır. Priz alma hızı; çimentonun kompozisyonuna ve inceliğine, karışım oranlarına, nem ve sıcaklık koşullarına bağlıdır. Beton zamanla birlikte mukavemet kazanır. Çoğu hidrasyon ve dayanım kazanımı birkaç ay içinde olmakta olup hidrasyon daha düşük hızda yıllarca devam etmektedir. Ulaşım ağları, su kaynakları yapıları ve hayatın tüm alanını destekleyen güvenilir ve durabil yapılar için çimento ve betonun kullanımı gereklidir. Bileşenlerden bir tanesinin amacından sapması durumunda köprü ya da barajlarda etkisi anında

hissedilmektedir. Çimento ve beton, yatay ve dikey mimaride ve altyapı uygulamalarında olağanüstü özellikler katan ideal çözümlerdir [23].

Avrupa Hazır Beton Birliğine göre Türkiye’de 2019 yılında 67 milyon m³ beton üretilmiş olup AB ülkelerinde ise 260 milyon m³ beton üretilmiştir. Bu verilere bakıldığında ülkemizde ve Avrupa’daki yoğun çimento ve beton tüketimi açıkça görülmektedir [28].

2.4. Betonda Kullanılan Mineral Katkılar

Puzolanlar; Mısır, Yunan ve Roma’daki eski yapıların yapımında bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Minos medeniyeti (M.Ö. 3000-1500) döneminde kireç harçlarının yapımında kırık seramik ve çanakların kullanıldığı ile ilgili kanıtlar bulunmaktadır [29]. Eski mühendisler ince öğütülmüş doğal malzemelerin ve seramiklerin dayanımlı yapılar inşa edilmesinde kullanılabileceğini keşfetmişlerdir. 4500 yıllık Mısır piramitleri incelendiğinde kullanılan bağlayıcı malzemelerin günümüz koşullarında halen iyi durumda oldukları gözlemlenmiştir [30].

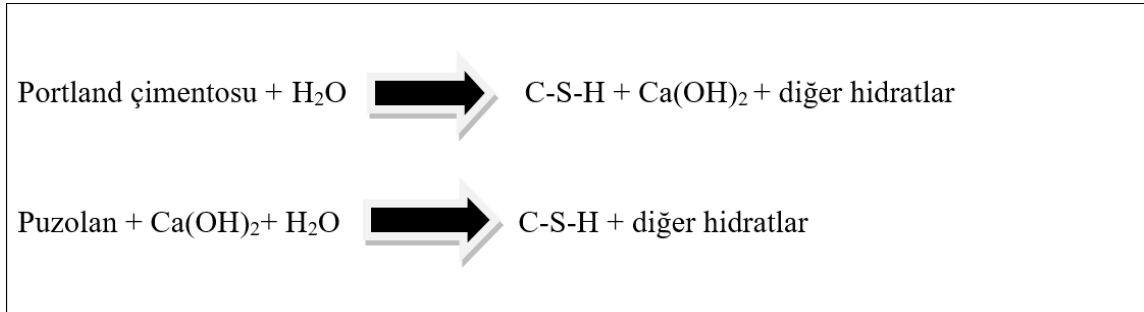
Mineral katkılar, çok ince öğütülmüş silisli malzemeler olup genellikle %10-70 arasında toplam bağlayıcı malzeme yerine kullanılmaktadır. Bu malzemelerin kullanılmaları durumunda hem enerji tasarrufu hem de bütçe tasarrufu olmaktadır. Ayrıca taze betonun işlenebilmesini kolaylaştırmakta olup betonun termal çatlaklara, alkali silika reaksiyonu genişmesi ve sülfat atağına karşı direncini artırmaktadırlar [31].

Uçucu kül, öğütülmüş granüle cüruf, silis dumanı ve doğal puzolanlar, kalsine kil, kalsine şeyl ya da metakaolin, Portland çimentosu veya katkılı çimentolarla kullanıldıklarında betona hidrolik ya da puzolanik aktivite dolayısıyla katkıda bulunmaktadırlar. Puzolan, silisli veya aluminosilisli ince malzeme olup nemli ortamda veya Portland çimento hidratasyonundan ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle birleşerek kalsiyum silikat hidratları ve diğer bağlayıcı bileşenleri oluşturmaktadır.

1970’li yıllardan itibaren Kuzey Amerika’da destekleyici bağlayıcı malzemelerin kullanılması artmıştır. Bu malzemeler arasında benzerlikler bulunmakla birlikte çoğu endüstriyel işlemlerin atık malzemeleridir. Bu malzemeler genellikle elde edilmek istenen sonuca göre Portland çimentosunun yerine bir miktar ikame edilerek kullanılmaktadır.

Geleneksel olarak uçucu kül, cüruf, kalsine kil, kalsine şeyl ve silis dumanı betonda ayrı olarak kullanılmaktadır. Günümüzde ise bu malzemelere erişimin kolay olmasına bağlı olarak bazı beton özelliklerini optimize edebilmek amacıyla bu malzemeler karıştırılarak da kullanılabilmektedir [32].

Portland çimentosunun su ile birleşiminden kalsiyum silikat hidrat jelleri, kalsiyum hidroksit ve diğer hidratlar oluşmaktadır. Puzolan içeren sistemlerde puzolanik malzeme, hidratasyon sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile birleşerek ikincil kalsiyum silikat hidrat jelleri ve diğer hidratları oluşturmaktadır. Puzolanlara ait genel reaksiyonlar Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Puzolanik reaksiyonların oluşumu [33]

2.4.1. Puzolanların aktivitesine etki eden faktörler

Puzolanların aktivitesine etki eden faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı,
- Kristal yapısı derecesi,
- Taneciklerin inceliğidir.

SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ miktarı

SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ oranı ne kadar fazla olursa o kadar puzolan aktivite yüksek olur.

ASTM C 618 & TS 25’e göre doğal puzolanlar için minimum SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ >%70 olmalıdır. Bu kapsamda;

- C tipi uçucu külde, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ > %50,
- F tipi uçucu külde, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ > %70,

- Silis dumanında, $\text{SiO}_2 = \%85-98$,
- Yüksek fırın cürufunda, $\text{SiO}_2 = \%30-40$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \%7-19$, $\text{CaO} = \%30-50$, oranlarında bulunmaktadır.

Kristal yapısı

Kimyasal reaksiyonlar için puzolanlar amorf yapıda olmalıdır. Volkanik kül, volkanik tüf, uçucu kül, silis dumanı amorf yapıdadır. Killer, yüksek oranda silis ve alumina içermekte olup kristal yapıya sahiptir ve puzolanik aktiviteye sahip değildir. Ancak $700-900^\circ\text{C}$ sıcaklıklara kadar kalsine olmasıyla kristal yapısı bozulur ve amorf yapı elde edilir. Yüksek fırın cürufu yüksek oranda silis, alumina ve kireç içermektedir. Ancak cüruf hava koşullarında soğutulursa kristal yapı kazanır ve puzolanik yapıya sahip değildir. Aniden suya konulursa taneli bir malzeme haline gelir, düzensizlik kazanır ve puzolanik özellik gösterir.

İncelik

Puzolan inceliği arttığında puzolanik aktivite de artar. Volkanik kül, pirinç kabuğu külü, uçucu kül, yoğunlaştırılmış silis dumanı ince halde bulunmaktadır. Volkanik tüf, yüksek fırın cürufu ve yanmış kil puzolan olarak kullanılmadan önce öğütülmelidir [31].

2.4.2. Puzolanik aktivitenin belirlenmesi

Puzolanik aktivitenin belirlenebilmesi için ASTM C 618 kapsamında 500 g Portland çimentosu, 1375 g kum ve 242 ml su kullanılarak kontrol karışımı hazırlanır. Bir dökümden 6 tane harç küp numune elde edilir. Test karışımı için ise 400 g Portland çimentosu+100 g puzolan+1375 g kum ve 242 ml su kullanılır ve harç numuneleri elde edilir.

Söz konusu numunelere 7 ve 28 günde basınç dayanım testi yapılır.

Dayanım aktivite indeksi = $A/B \times 100$ formülüyle hesaplanmakta olup formülde;

A = Test karışımı dayanımı,

B = Kontrol karışımı dayanımıdır.

ASTM C 618'e göre dayanım aktivite indeksi $\geq$ %75 olmalıdır [31].

Amerika Birleşik Devletleri'nin projelerinde puzolan kullanmasının en önemli sebebi puzolan kullanımının sağlamış olduğu maliyet kazanımlarıdır. Yapılan tüm projelerin olduğu yerlere yakın bölgelerde puzonlar tespit edilerek taşıma maliyetlerinden de kazanç elde edilmektedir. Örnek olarak San Francisco ve Golden Gate köprülerinin yapımında Monterey kabuğu kullanılmıştır. Ekonomik kazanımlar öncelikli olsa da puzolanların sülfatlı ortamlara ve hidrasyon ısisına karşı sağlamış oldukları kazanımlar, kullanılmalarındaki önemli sebeplerdir [30].

2.4.3. Doğal puzolanlar

Volkanik orijinli puzolanlar

Doğal puzolanlar yüzyıllar boyunca kullanılmışlardır. Puzolan terimi İtalya'nın Naples bölgesinde Pozzuoli köyü yakınlarında Vesuvius dağında volkanik kül bulunmasıyla ortaya çıkmıştır. Ancak volkanik kül ve kalsine kilin kullanılması, M.Ö. 2000 yıllarına dayanmaktadır. Birçok Roma, Yunan, Hint ve Mısır puzolanik beton yapıları hala günümüzde görülebilmekte olup ne kadar durabil oldukları böylelikle anlaşılabilmektedir. Rodos adasında bulunan Kamiros şehrindeki su depolama tanklarında volkanik kül ve kireç kullanıldığı tespit edilmiştir. M.Ö. 400-500 yıllarında yapılan bu yapıda %20 oranında bağlayıcı malzeme kullanıldığı yapılan analizlerde saptanmıştır.

Hindistan'da yapılan eski yapılarda Surkhi adında kireç ve kırık tuğlalardan oluşan puzolanik bir malzeme kullanılmıştır. 17. yüzyılda traslı ve kireçli karışımlar Hollanda'da liman ve denizde yapılan savunma yapılarında kullanılmıştır [30].

Kuzey Amerika'nın doğal puzolanlarla tanışması 20. yüzyıl başlarına dayanmaktadır. Doğal puzolanlar; kamusal alanda yapılan çalışmalar, özellikle kütle beton içeren baraj gibi yapılarda ısı kontrolü için kullanılmışlardır [32]. Doğal malzemelerin kullanılması için birtakım işlemlerden geçmesi gerekmektedir. Bu işlemler genelde kırma, öğütme, ayırma ve bazen ısıl işlemlerdir. Diatomit hariç tüm doğal puzolanlar volkanik kaya ve minerallerden oluşmaktadır [31].

Piştirilmiş kil ve şeyl

Günümüzde yaygın kullanılan doğal puzolanlar ısıtma işlemi görmekte ve öğütülmektedir. Bunlar genellikle kalsine olmuş kil ve şeyldir. Kalsine killeri diğer puzolanlar gibi beton yapımında kullanılabilirler. %15-35 arasında ikame edilebilmekte olup sülfat atağı, alkali-silis reaksiyonu ve geçirimsizliğin azaltılmasında olumlu etkileri olmaktadır. Kalsine şeyller %5-10 arası kalsiyum içerebilir bu da malzemenin kendi kendine bağlayıcılık ve hidrolik özellikler göstermesine neden olabilmektedir. Kalsine kil ve şeyller diğer puzolanların aksine genelde su ihtiyacını çok değiştirmezler ve işlenebilirliğe olumlu etkileri olmaktadır. Priz süresine ve hidrasyon ısıya çok az etkileri bulunmaktadır [32]. Hindistan'daki Bhakra baraj projesinde %10 kalsine kil ve kabuk, puzolan olarak kullanılarak $3,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ beton dökülmüştür [30].

Silisli şist

Silisli şist; sert, ince öğütülmüş sedimanter bir kaya olup SiO_2 ve quartz minerallerinden oluşmaktadır. Doğada nodül ve katmanlı tabakalar olarak bulunmaktadır. Bazı alanlarda silisli şist, puzolanik malzeme olarak yapı malzemesi ve yol düzleyicisi şeklinde kullanılmaktadır. Yol düzenlemesinde kullanılması esnasında silisli şist suyla birleştiğinde sıkı bir yapıya kavuşmaktadır [34]. Kaliforniya bölgesinde Monterey oluşumunda bulunan silisli şist ile yapılan çalışmalarda alkali-silika reaksiyonu ile ilgili olumlu gelişmeler elde edilmiştir. Silisli şist kullanılarak 1915'te Lahontan barajı ve Elephant Butte barajı inşa edilmiştir [30].

Diatomit

Diatomit; toz halinde metalik olmayan minerallerden oluşan fosilleşmiş tek hücreli bitkilerin iskeletlerine verilen isimdir. 10 000'den fazla türü olduğu tespit edilmiştir. Her birinin birbirinden farklı şekli olup boyutları 5-100 mikron arasında değişmektedir. Diatomlar öldüğünde ince kabukları çökmekte olup yüzyıllar sonunda ince tabakalar halinde fosilleşmiş silisli iskeletler oluşmaktadır. Diatomit yatakları genellikle taze su veya da tuzlu suda bulunmaktadır. 1900'lü yılların başında işlenebilmeleri için çalışmalara başlanılmış olup günümüzde farklı madencilik yöntemleriyle çıkarılıp işlenmektedirler [32].

A.B.D.'de 2015 yılında diatomit üretiminin 925 000 ton olduğu tahmin edilmekte olup bu rakam dünyadaki tüm üretimin yaklaşık %40'ından fazladır. Diatomit; binlerce yıl önce eski Mısır piramitlerinin yapımında kullanılan bağlayıcı kireç taşı agregalarında kirece katkı olarak kullanılmıştır. Diatomitin basınç ve eğilme dayanımı, donma-çözülme ve sülfat atağına karşı olumlu etkisinin olduğu yapılan birtakım deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir [35].

Diatomit hem öğütülmeden önce hem de öğütülmeden sonra puzolanik özellik göstermektedir. Puzolan olarak kullanılabilmesi için 800°C civarlarında ısıtılma tabii tutulmaları gerekmektedir [36]. En önemli fiziksel özellikleri yüksek gözeneklilik, düşük özgül ağırlık ve beyazlıktır. Diatomit taneciklerinin sertliği mohs ölçeğine göre 4,5-6 arasında olup kayaç olarak sertliği 1,5 dolayındadır ve porozitesi %80-85 arasındadır.

Diatomitin kimyasal bileşimi için kesin bir standart verilememektedir. Genellikle yapısında %70-90 arasında SiO_2 bulunmaktadır. Diatomit birçok kimyasal maddeye karşı inert, yani tepkisizdir. Diatomitin ticari değer taşıması için yapısında en az %85 SiO_2 , en çok %5 Al_2O_3 , %1,5 Fe_2O_3 , %1 CaO , %0,5 MgO , %1 alkali oksit, %6 kızdırma kaybı olmalıdır [37].

Pomza taşı

Pomza taşı puzolanı doğal, sürdürülebilir puzolan olup Romalıların binlerce yıl dayanan beton karışımları yaptığı bir malzemedir. Pomza, atık ürün olmayıp içerisinde herhangi bir zararlı malzeme içermez. Pomza doğal kalsine olmuş volkanlardan oluşur. Pomza eklemek kimyasal dayanıklılığı artırmada büyük fayda sağlamakta olup yapılan araştırmalara göre alkali-silika reaksiyonunun azaltılmasında önemli rol oynamaktadır.

Pomzanın avantajları;

- İleri yaş basınç dayanımını artırmak,
- Klor atağına karşı direnç göstermek,
- Sülfat saldırılarına karşı korumak,
- Alkali silika reaksiyonunun etkilerini azaltmak,
- Hidratasyon ısını azaltmak,
- Aşınma direncini azaltmak,

- Geçirgenliği azaltmak,
- Durabiliteyi artırmak olarak sıralanabilir.

Bazı uygulamalarda %50'ye kadar pomza ikame edildiği bildirilmiş olup doğal bir puzolan olması sebebiyle elde edilmesi esnasında doğaya en az seviyede karbon salınımı olmaktadır.

2000 yıl önce Romalı mühendisler ince öğütülmüş pomzanın kireçli çimentoya eklenmesiyle güçlü, durabil beton elde edildiğini keşfetmişlerdir. 2000 yıl sonra bile yaptıkları yapıların ayakta kalabileceklerini onlar bile hayal edemezlerdi. Bazı beton mühendisleri uçucu kül ve çok az pomza taşı kullanarak sülfatlı zeminlere dirençli beton üretmişlerdir. 20. yüzyılda kütle betonların yapımında ince öğütülmüş pomza taşı kullanılmıştır. Los Angeles kemeri (1912), Frint barajı (1942), Altus barajı (1945), Glen vadisi barajı (1964) yapımlarında pomza kullanılmıştır [38]. Monterey bölgesinden elde edilen pomzataşı ile yapılan deneysel çalışmalarda sülfat atağına karşı olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yeni Zelanda'da elde edilen pomza taşı ile yapılan kanalizasyon borularında sülfat atağına karşı başarılı sonuçlar elde edilmiştir [30].

Atık cam tozu

Çimento ve beton endüstrisi atık camların kullanımını çok desteklemektedir çünkü camın fiziksel ve kimyasal yapısı kum ve çimento gibidir. Atık camlar; pencere camları, lamba camı gibi çok farklı formlarda olabilmektedir. Camlar çok fazla miktarda silikon ve kalsiyum içerdiğinden Portland çimentosuna ikame edilerek kullanılabilir. Camların inceliği puzolan olarak kullanılabilirliğini etkilemektedir. 300 µm altında öğütülmesi durumunda puzolanik aktivite göstermeye başlamaktadır. Atık camlar çok ince öğütülerek %40 civarında Portland çimentonun yerine kullanılabilir. Bu şekilde daha mukavim, daha yoğun, daha geçirimsiz ve daha durabil betonlar elde edilebilmektedir. Öğütülmüş cam kullanılarak betonun işlenebilirliği artabilir ve gerekli olan su ve kimyasal katkı miktarı azalabilir [39]. Öğütülmüş camların puzolan olarak kullanılabilmeleri ile ilgili sahip olmaları gereken incelik ve dayanım aktivite indeksleri detaylı olarak ASTM C 1866'da belirtilmiştir [40].

2.4.4. Doğal puzolanların dünyadaki dağılımı

Dünya yüzeyinin yaklaşık %5'ini volkanik kayalar oluşturmaktadır. Bir ülkede volkanik kayaların bulunması bu kayaların puzolan olarak kullanıma uygun olduğu anlamına gelmemektedir. Bu kapsamda volkanik kayalara sahip ülkelerin bütçe ayırarak teknik araştırmalar yapması önemli hususlardandır [30].

Kuzey Amerika'daki puzolanlar

Kuzey Amerika'da bulunan puzolanlar genelde volkanik küller, diatomitler, kalsine olmuş kil ve kabuklardır. Ayrıca pirinç kabuğu külü için önemli bir potansiyel bulunmaktadır. Kanada volkanik malzemeler konusunda zengin bir ülkedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde puzolan olarak volkanik kül, kalsine kil ve kabuklar bulunmaktadır. Kaliforniya'da pomzataşı yoğun olarak bulunmaktadır. 20. yüzyılın başlarında Kaliforniya'da birçok yapıda puzolanlar kullanılmıştır. Kaliforniya doğal puzolan rezervi olarak zengin bir eyalettir. Kansas'ta volkanik kül, pomzataşı, diatomit, kalsine kil ve şeyller bulunmaktadır. Kuzeybatı Amerika volkanik kökenli puzolanların yoğun bulunduğu bir bölgedir. Oregon'da zengin pomza yatakları ve volkanik küller bulunmaktadır. Idaho, New Mexico, Nevada ve Kuzey Dakota'da pomza yoğun olarak görülmektedir.

Missisipi'nin doğusunda volkanik malzemeler bulunmamakta olup kaliteli killer bulunmaktadır. Illinois'de doğal puzolan bulunmamakta olup puzolanik aktivite özelliği gösteren killer bulunmaktadır. Kuzey Amerika'daki volkanik alanlar Şekil 2.2'de görülmektedir [30].



Şekil 2.2. Kuzey Amerika'daki volkanik alanlar [30].

Orta Amerika'da ve Karayipler'deki puzolanlar

Orta Amerika'daki puzonların büyük bir kısmı Guatemala bölgesindedir. Guatemala şehrinde volkanik kül, diatomit ve pomza yatakları bulunmaktadır. Karayipler'de West Indies'deki Dominika adalarında puzolan olarak kullanılabilecek pomza bulunmaktadır. Lesser Antilles, French Martinique, Dutch St. Eustatius adalarında da pomzaya rastlanmaktadır. Amerikan Ordusuna bağlı U.S. Corps of Engineers tarafından test edilen pomzanın güçlü puzolanik özellikleri olduğu saptanmıştır. Trinidad bölgesinde doğal yanmış puzolan ve porselen yapıları malzemeler bulunmaktadır. Küba'da da puzolan olarak kullanılabilecek yataklar bulunduğu saptanmıştır [30].

Güney Amerika'daki puzolanlar

Puzolanların en yaygın olarak kullanıldığı ülke Şili olup üretilen çimentonun %85'i Portland puzolan çimentodur. Bahse konu çimentoda puzolan olarak silisli volkanik küller kullanılmaktadır. Arjantin'de puzolan olarak kullanılabilecek volkanik kökenli bir malzeme bulunmuştur. Bolivya'nın Lapaz şehrinde deneme çalışmaları yapılan puzolanik özellikli büyük miktarda tüfler bulunmaktadır. Kolombiya ve Ekvator'da puzolanik katkı çimentolar üretilmekte olup kullanılan puzolanların büyük bir kısmı Ekvator'da

bulunmaktadır. Brezilya’da bulunan kırmızı toprağın puzolan olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Güney Amerika’daki volkanik alanlar Şekil 2.3’te görülmektedir [30].



Şekil 2.3. Güney Amerika’daki volkanik alanlar [30].

Avrupa’daki puzolanlar

Avrupa belki de en gelişmiş puzolan kullanıcısı ve araştırmacısı pozisyonundadır. İtalya ve Yunanistan’da ince öğütülmüş volkanik küller bol miktarda bulunmakta olup Almanya ve diğer ülkelerde bol miktarda tras bulunmaktadır. Yunanlılar ve Romalılar puzolanik malzemeleri çok fazla kullanmış olup kullandıkları malzemelerle birçok kez deneysel çalışmalar yapılmıştır. Rodos adasında bulunan Santorin toprağı ile birçok kez kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. İtalya’da çok çeşitli puzolanik malzemeler bulunmakta olup Sicilya ve Sardunya bölgesinde zeolit tüfler bulunmaktadır. Fransa’nın güneyinde puzolanik malzemeler çıkartılmakta olup Lyon’un 70 mil batısında Cleromont-Ferrand bölgesinde çok değerli puzolanlar bulunmaktadır. Danimarka Limmfjord adalarının batısında diatomit bulunmaktadır. Turba tozu, Finlandiya’da puzolan olarak kullanılmış olup turbanın yakılmasından elde edilen külün de çimento ve betonda kullanılabileceğı yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. Gürcistan’ın Kaspi bölgesinde vitoklastik tüfler bulunmakta olup puzolanik malzeme olarak kullanılabilmeleri ile ilgili herhangi bir bulguya rastlanmamıştır. Kırım’da bulunan tüflerin puzolan olarak kullanılabilmeleri ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Macaristan, Avusturya ve Almanya’da bulunan zeolitlerle,

İzlanda'da bulunan volkanik tüflerle, Ren ve Rumen traslarıyla deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Avrupa'daki volkanik alanlar Şekil 2.4'te görülmektedir [30].



Şekil 2.4. Avrupa'daki volkanik alanlar [30].

Afrika'daki puzolanlar

Burundi, Kamerun, Cape Verde, Etiyopya, Ruanda ve Tanzanya'da pulverize veya sıkıştırılmış halde doğal puzolanlar bulunmaktadır. Kanarya Adaları'ndaki ve Madagaskar'daki volkanik kül ve tüflerle, Mısır'daki kumtaşları ve Fas'taki riyolitik volkanik küllerle ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Kasablanka'daki Fas volkanik küleriyle %20 ikame ile yapılan çalışmalarda Portland çimentosuyla elde edilen dayanımlara yakın değerler elde edilmiştir. Orta ve Güney Afrika'da kırmızı kil bulunan ülkelerde alüminyum, demir ve silikon ana bileşenler olarak bulunmakta olup puzolan olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Gana'da boksit madenciliğinden çıkan kırmızı çamurun puzolanik malzeme olarak kullanılabilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bu malzemenin puzolan olarak kullanımı önemli olup doğaya bırakılması durumunda toprağı ve yeraltı sularını zehirleme durumu olabilecektir. Nijerya, Gabon ve Fildişi sahillerinde puzolan olarak kullanılabilecek kabuklar bulunmaktadır. Afrika'daki volkanik alanlar Şekil 2.5'te görülmektedir [30].



Şekil 2.5. Afrika'daki volkanik alanlar [30].

Asya'daki puzolanlar

Asya ülkeleri içinde en yaygın puzolan kullanılan ülke Hindistan'dır. Surkhi adında parçalanmış tuğla ve kireçten oluşan bir puzolanik malzeme, karo ve tuğla yapımında kullanılmaktadır. Volkanik kül, kaya ve kabuklar, Hindistan'da kullanılan diğer puzolanik malzemelerdir. Kalküta/Hindistan yakınlarındaki volkanik tüf yataklarından elde edilen puzolanların %15 ikame edilmesi ile elde edilen dayanım değerleri Hindistan Standart Enstitüsü'nün standartlarını sağlamaktadır. Japonya'daki araştırmaların çoğu uçucu küller üzerine olup ülkede kaliteli killer ve volkanik küller bulunmaktadır. Japonya'da bulunan Beppu beyaz kili, Higashi-Matsuyama tüfü, Furure shirasu külü, Tominaga-Masa toprağı, Kyushu pomzası ile çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca Endonezya'da büyük rezervleri olan volkanik tüfler bulunmaktadır. Asya'daki volkanik alanlar Şekil 2.6'da görülmektedir [30].



Şekil 2.6. Asya'daki volkanik alanlar [30].

Avustralya'daki puzolanlar

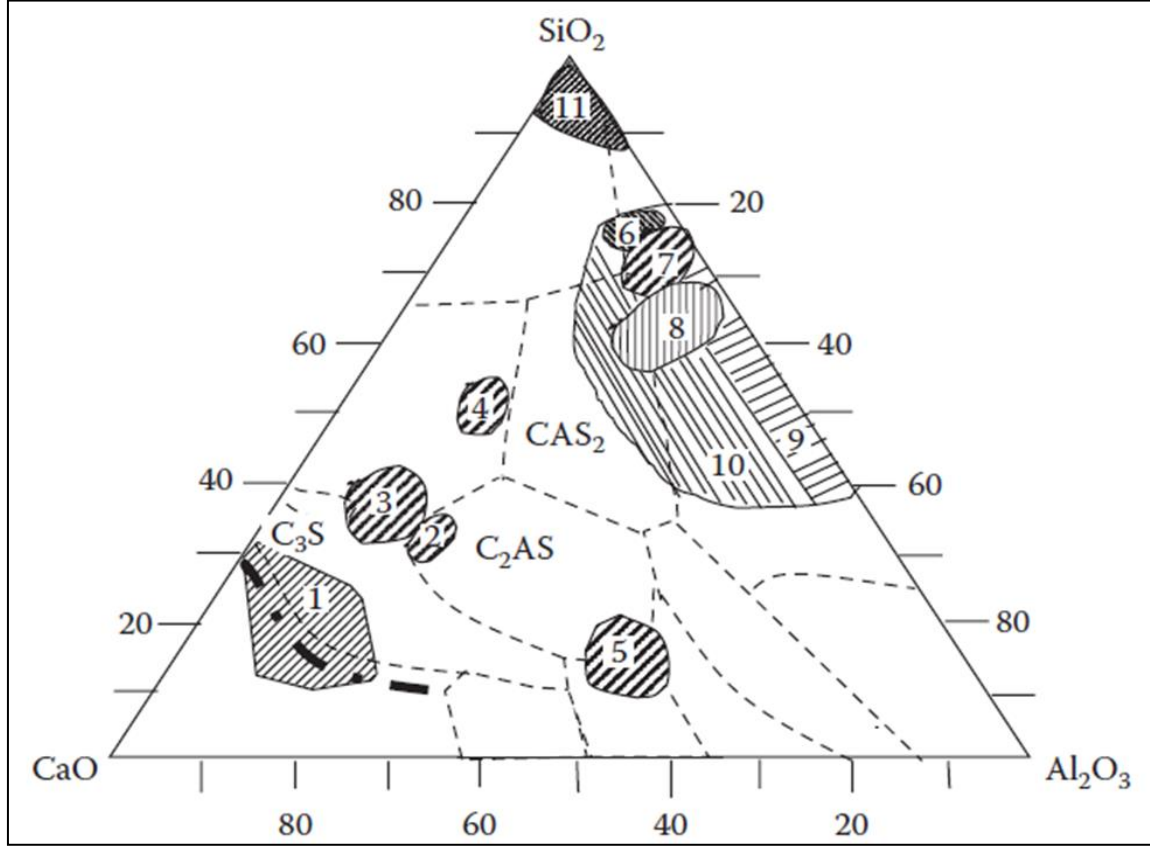
Avustralya Tully Falls'daki bazaltik tüfler, puzolanik özellikler göstermekte olup Koombooloomba barajının yapımında kullanılmıştır. Doğu Avustralya'da geniş volkanik faaliyetler olmasına rağmen bu çaplı büyük bir projede ilk defa puzolan kullanılmıştır. Kuzey Queensland, Güney Mt. Garnet'ta diatomit yatakları bulunmaktadır. Yeni Zelanda'da diatomit yatakları, Fiji adalarında pomza yatakları bulunmaktadır. Avustralya'daki volkanik alanlar Şekil 2.7'de görülmektedir [30].



Şekil 2.7. Avustralya'daki volkanik alanlar [30].

2.4.5. Yapay puzolanlar

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi yapay puzolanlar sanayileşmiş ülkelerde bulunmaktadır [30].



Şekil 2.8. CaO+SiO₂+Al₂O₃ miktarına göre malzemeleri gösteren üçlü diyagram [41].

CaO+SiO₂+Al₂O₃ miktarına göre çimento ve mineral katkıları gösteren üçlü diyagram Şekil 2.8’de görülmektedir. Bu kapsamda çizelgede yer alan numaraların karşılık geldiği malzemeler aşağıda yer almaktadır.

- 1- Portland çimentosu
- 2- Linyit cürufu
- 3- Temel cüruf
- 4- Asidik cüruf
- 5- Alumina çimentosu
- 6- Bazalt

7- Puzolanlar

8- Volkanik küller

9- Düşük kalsiyumlu uçucu kül

10- Yüksek kalsiyumlu uçucu kül

11- Silis dumanı/Pirinç kabuğu külüdür. Ayrıca Şekil 2.8’de;

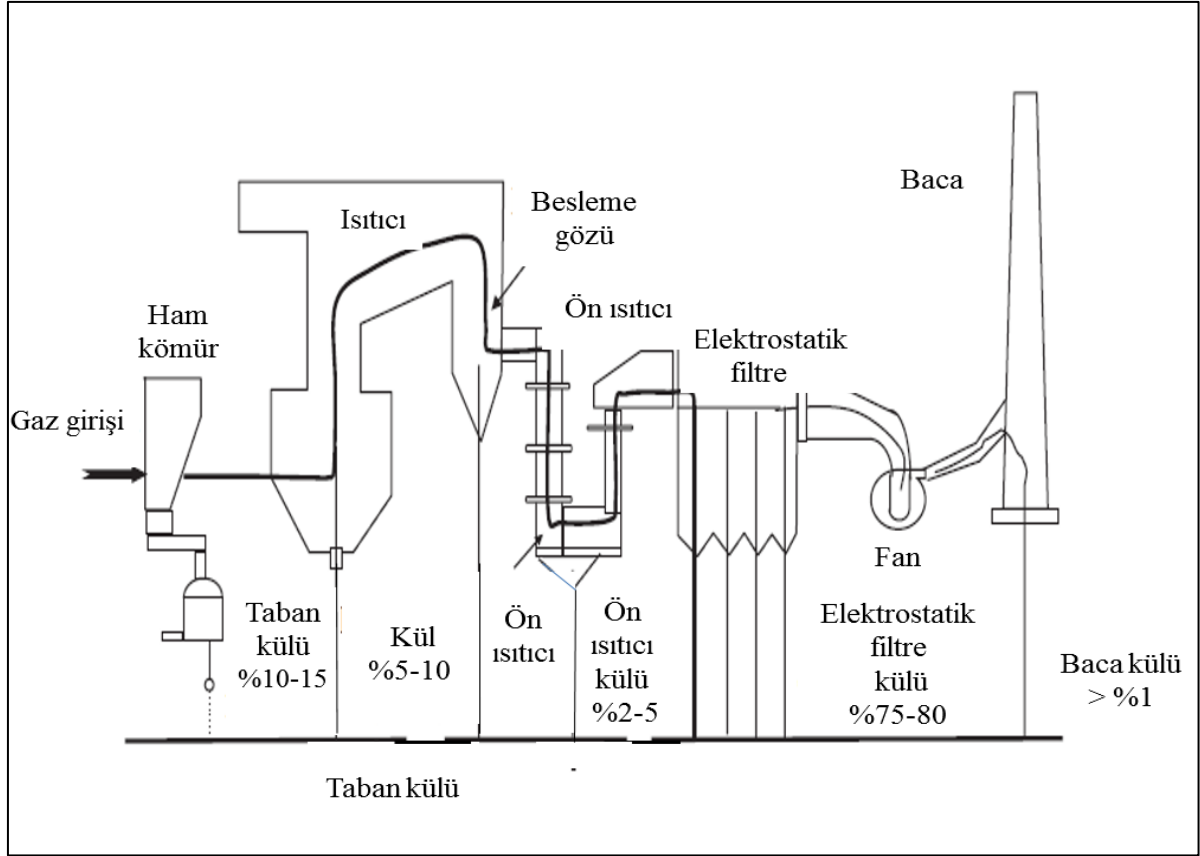
C_3S : Tri kalsiyum silikat

C_2AS : Gehlenit,

CAS_2 : Anortit, olarak adlandırılmaktadır.

Uçucu kül (UK)

Kömür, tüm dünyada enerji üretimi için kömür yakan termik santrallerin ana yakıt maddesidir. 21. yüzyılın başlarında tüm dünyada elektriğin %40’ı kömür yakılmasıyla sağlanmaktaydı. Pulverize kömürün buhar jeneratörlerini çevirmesi amacıyla termik santrallerde yakılmasıyla uçucu kül, taban külü, cüruf, desülfürizasyon alçısı gibi birçok değişik ürünler elde edilmektedir. Kömür yakımından elde edilen ürünlerin yaklaşık %70’i uçucu küldür. Termik elektrik santralinde fırında kül toplanması ve dağıtımı Şekil 2.9’da görülmektedir.



Şekil 2.9. Termik elektrik santralinde fırında kül toplanması ve dağıtımı [41].

Linyit, yarı bitümlü, bitümlü kömürler ve antrasit yakma işlemleri için kullanılabilir. Karbon, kil, şeyl, kuartz gibi safsızlıkların yakılma sürecinde oluşturduğu küllerin bazıları topaklaşarak taban külünü, geriye kalan gazların içinden mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplananlar ise uçucu külleri oluşturmaktadır. Kömürle çalışan bir termik santralde kullanılan kömürün kütlece %6-40 kadarı miktarda uçucu kül elde edilebilmektedir. 1000 MW'lık bir termik santralden yıllık yaklaşık 650 000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilebilmektedir. Uçucu kül ince öğütülmüş bir malzeme olup 0,2-200 μm boyutlarındadır. Tane boyutu, pulverize kömürün tipi ve inceliğine bağlı olarak değişebilmektedir. Uçucu külün rengi açıktan kahverengiye, griden siyaha içinde bulunan minerallere göre değişebilmektedir. Çoğu uçucu kül küresel ve içinde boşluk bulunan yapıdadır. Özgül ağırlığı 1,9 ve 2,8 arasında değişmektedir [42].

Küresel tanecikler, tanelerin sürtünmesini azaltır, betonun akış özelliklerini artırır ve su ihtiyacını azaltır. Uçucu küllerin puzolanik aktivitesi, cam miktarından daha çok inceliğinden etkilenir. 10 μm altındaki taneler 7 ve 28 gün gibi erken dayanıma etki ederler. 10-45 μm arasındaki taneler daha yavaş reaksiyona girer ve geç dayanıma etki

ederler. 45 μm üzerindeki taneler filler görevi görür. Ancak reaktivitesi yine de cam miktarından, yüzey alanından, sıcaklıktan ve tane dağılımından etkilenir. Uçucu küller dayanımı artırır, çok iyi pozolanik aktivite gösterir ve düşük su ihtiyacına neden olur [41].

Uçucu küllerin %85'inden fazlası SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO 'ten oluşmaktadır. İnce taneli olmaları ve genellikle non-kristalik yapıları dolayısıyla uçucu küller tatmin edici pozolanik özellik göstermektedirler. Kömürün cinsi, yakılma şekline göre elde edilecek uçucu külün cinsi değişebilmektedir. Uçucu küllerin pozolanik özellikleri 1910'lu yıllarda keşfedilmeye başlanmış olup 1930'lu yıllardan itibaren betonda önemli bir oranda kullanılmaktadır.

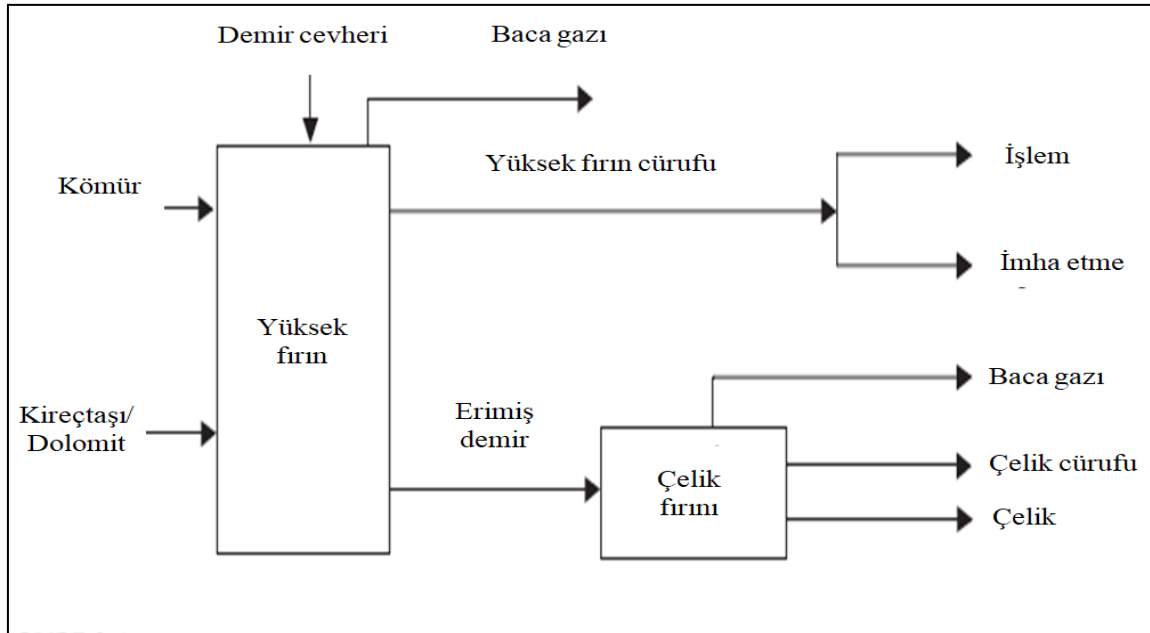
ASTM C 618'e göre F sınıfı ve C sınıfı uçucu küller, genel amaçlı betonda pozolanik katkı olarak kullanılabilir. F tipi uçucu küller düşük kalsiyumlu (%10'dan az CaO), C tipi uçucu küller yüksek kalsiyumlu (%10-30) olarak nitelendirilmektedir. Çoğu C sınıfı uçucu kül içeren karışımlar suya maruz kaldığında 45 dakikadan az bir sürede katılaşmaktadır [43].

Günümüzde Birleşik Devletlerde dökülen betonun %50'den fazlası uçucu kül içermektedir. Kullanılan miktar, uçucu külün tipine ve reaktivitesine göre değişmektedir. F tipi uçucu küller %15-25 oranında, C tipi uçucu küller %15-40 oranlarında bağlayıcı malzeme yerine kullanılmaktadır. Ancak uçucu kül, yapıların iç kısımlarında ve perdah gerektiren döşemelerde halen kullanılamamaktadır. Yüzey yapışkanlığı, geç priz alma ve erken hacim büzülme çatlakları uçucu külün, yapıların iç kısımlarında kullanımını riskli hale getirmektedir [42]. Uçucu külün reaktivitesi ve istenen beton özelliğine göre ikame oranı belirlenebilmektedir [43]. Hindistan uçucu külleri yüksek SiO_2 , Al_2O_3 ve düşük Fe_2O_3 miktarıyla öne çıkmaktadır. Amerikan uçucu külleri ise yüksek Fe_2O_3 miktarıyla öne çıkmaktadır.

Japonya standartları %5-30 oranlarında, Hindistan standartları ise %15-35 oranlarında uçucu külün çimentoya ikame edilmesine müsaade etmektedir. Genel olarak %35-40 oranlarında ikame edilmesi standartlarda yer almakta olup Kanada standartlarında %55'e kadar ikame edilebileceği yer almaktadır [41].

Yüksek fırın cürufu (YFC)

Yüksek fırın cürufunun hammadesi, demir-çelik endüstrisi atıklarından elde edilmektedir. Demir cevheri, kireç taşı ve kömür 1500°C sıcaklıkta beraber yakılmakta olup hammaddeler, dökme demir ve fırın cürufuna dönüşmektedir. Bu iki madde doğal iki yolla ayrılabilmekte olup demir fırının dibine çökerken, cüruf demirin üzerinde yayılmaktadır. Dökme cüruf, hızlı bir şekilde su ile soğutulurken camsı, kumsu öğütülmüş malzeme elde edilir. Öğütülmüş malzeme yaklaşık 45 µm altında olup 400-600 m²/kg Blaine değerine sahiptir. Cürufun özgül ağırlığı 2,85-2,95 civarındadır. Yüksek fırın cürufu elde edilmesi Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10. Yüksek fırın cürufu elde edilmesi [40].

Havada soğutulmuş cüruflar, suda soğutulmuş cüruflara göre hidrolik özellik gösterememektedirler. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ilk olarak 1853 yılında Almanya'da geliştirilmiştir. 1900'lü yılların başında betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kuzey Amerika'da beton içerisinde kullanıldığında genel olarak %30-45 oranında bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Bazı betonlarda %70'den fazla cüruf kullanılabilir. Ancak çoğu standart, cürufun ikame oranını %70'le sınırlamaktadır.

Cürufu çimento, dayanımı artırmak ve maliyetleri azaltmak için kullanılmaktadır. Cürufu çimentoyla yapılan betonlar daha az geçirgen, düşük hidratasyon ısılı olup iyi işlenebilir ve tehlikeli kimyasallara karşı daha dirençlidirler [31].

Normal şartlar altında 1 ton pik demiri 250-350 kg cürufun oluşmasına neden olur. Fırından çıkan erimiş cüruf, hızlıca soğutulduğunda ve suyla katılaştırıldığında camsı yapıya dönüşür. Çok ince öğütülmesi durumunda çimentoya ikame olarak kullanılabilir. Cürufun soğutulma hızı cürufun hidrolik aktivitesini etkilemektedir. Reaktiviteyi sağlamak için İngiliz standartları cam miktarının %67'den az olmaması gerektiğini bildirmektedir. Cüruf taneleri köşeli ve keskin şekle sahip olup buna rağmen beton çökme değerlerinde etkileri düşüktür. Çok ince öğütülmüş uçucu kül ve cürufun birlikte kullanımı betonun basınç dayanımını önemli derecede artırmaktadır [41].

Cürufu çimentoların avantajları;

- Klinker miktarının az olmasına bağlı olarak daha az C_3A bulunmakta olup bu kapsamda sülfat etkisine karşı dirençlidirler.
- Betonun geçirgenliğini azaltmaktadırlar.
- $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek C-S-H jelleri oluşturmaya olup beton içindeki toplam $Ca(OH)_2$ azalmaktadır.
- Alkali-silika reaksiyonunu azaltıcı etkisi vardır.
- Yüksek performanslı beton elde edilebilmektedir.

Cürufu çimentolar;

- Köprü, baraj ve termik santrallerde,
- Yol ve tünel gibi büyük ölçekli mühendislik projelerinde,
- Kanal ve sulama sistemlerinde,
- Tarımsal amaçla kullanılan silo vb. yapılarda,
- Kütle betonlarda,
- Deniz yapılarında, deniz duvarları ve nehir ağızlarında,
- Liman, dalgakıran ve su altı betonlarında,
- Yüksek güvenli binalarda,
- Otoyol inşaatlarında,
- Asit ve klor maruz kalacak yapılarda,

- Alkali silika reaksiyonu olabilecek yapılarda,
- Termal çatlakların önlenmesi için,
- Özellikle betonarme yapılarda bulunan demir donatının korunması için kullanılabilir.

Chicago'daki Wacker Drive ve Louisiana'daki Charenton Kanal Köprüsü projelerinde düşük geçirgenlik amacıyla cürüflu çimento kullanılmış olup 2000 coulomb'un altında klor-iyon geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. St. Louis'deki Lamber Field, Houston'daki Reliant Stadyumunda ve Cleveland'daki Key Tower projesinde yüksek dayanım elde etmek amacıyla cürüflu çimento kullanılmıştır.

Yüksek oranda cürüflu çimento kullanılması durumunda kütle betonlarda daha düşük ısı açığa çıkmaktadır. Richmond'da bulunan Pocahontas yolu ayaklarında %75 oranında, St. Louis'deki Creve Coeur Lake Memorial köprüsünde %70 oranında cürüflu çimento kullanılmıştır. Texas, El Paso'da bulunan beton kaldırımlar ve Michigan, Detroit'te bulunan Selfridge Hava Kuvvetleri üssü betonları, reaktif agreganın alkali silika reaksiyonu göstermemesi amacıyla cürüflu çimento kullanılarak dökülmüştür. Maryland'de bulunan William Preston Memorail Köprüsü ve Ohio/Columbus'da bulunan su işleme tesislerinde sülfat atağını azaltabilmek amacıyla cürüflu çimento kullanılmıştır [31].

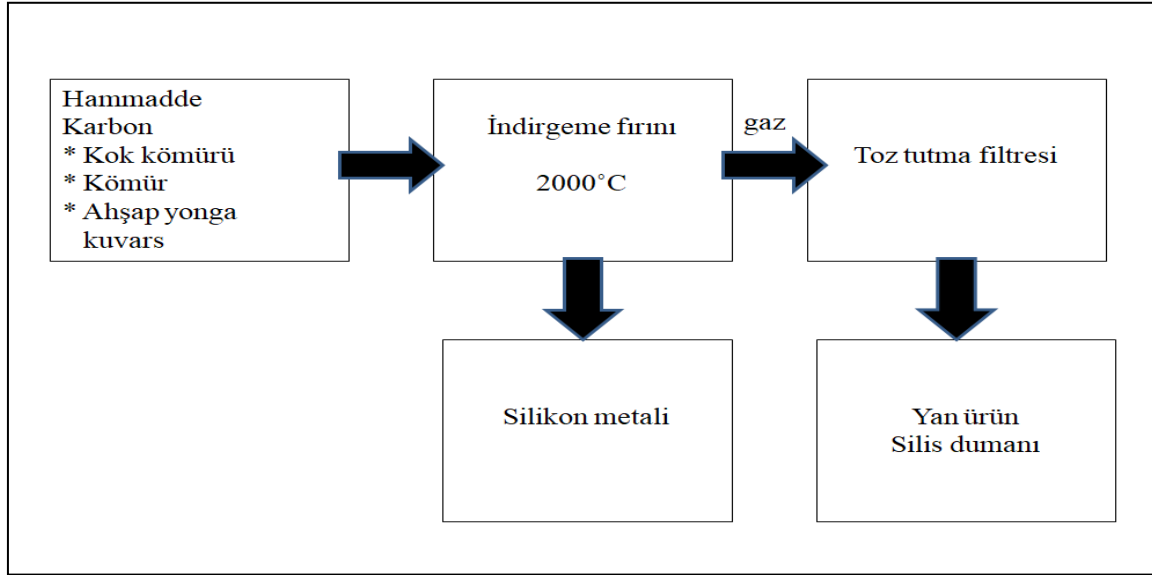
Silis dumanı

Amerikan Beton Enstitüsü silis dumanını “elektrik ark ocaklarında elemental silikon veya silikon içeren alaşım üretiminden kalan atık ürün olan çok ince non kristalize silika” olarak tanımlamaktadır. Genellikle gri renkli olup Portland çimentosu ya da uçucu küle benzemektedir [44]. Silis dumanının içeriğindeki karbon miktarı silis dumanının rengini önemli ölçüde etkilemektedir. Karbon içeriği arttıkça rengi daha koyu olmaktadır. Ayrıca silis dumanı katkılı betonların rengi geleneksel betonlara göre daha koyu olmaktadır [45].

Silis dumanı puzolanik özellik gösteren bir malzemedir. Silikon metalleri alüminyum ve çelik üretimi, bilgisayar çipi üretimi gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Bu malzemeler çok değerli olup atık ürün olan silis dumanı beton endüstrisi için çok büyük öneme sahiptir.

Silis dumanı oksitlenmiş buhar olarak 2000°C'lik fırınlardan yukarı doğru yükselir. Silis dumanı fabrikalarda doğaya salınmadan önce beton ve benzeri uygulamalarda

kullanılmak üzere yakalanmaktadır. A.B.D.'de günümüzde silis dumanının doğaya salınımına müsaade edilmemektedir. Silis dumanı çok büyük filtrelerde toplanmakta olup ya doğrudan ya da işlendikten sonra beton için kullanılmaktadır. Silis dumanı elde edilmesi Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Silis dumanı elde edilmesi [44].

Silis dumanı amorf malzeme olup %85'ten fazla SiO_2 içermektedir. Silis dumanı tanelerinin çok küçük olması dolayısıyla yüzey alanı çok fazladır. Bu sebeple su ihtiyacı fazla olup su azaltıcı katkı veya süperplastikleştirici ile beraber kullanılmaktadır [26]. Bunun yanında silis dumanı kullanıldığında beton yüzeyini düzeltmek daha zor olmaktadır [33].

Silis dumanının eklenmesi, milyonlarca küçük taneciğin beton karışımına eklenmesi anlamına gelmektedir. İnce agregaların kaba agregalar arasındaki boşlukları doldurması gibi silis dumanı çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurmaktadır. Bu olaya mikro doldurma denilmektedir. Silis dumanı kimyasal olarak reaksiyona bile girmese mikro doldurma etkisi betonun doğasında önemli gelişmeler meydana getirmektedir. Normal silis dumanı boyutu $0,5 \mu\text{m}$ iken, çimento tanesi $45 \mu\text{m}$, kum tanesi $2,36 \text{ mm}$, kaba agrega 19 mm boyutlarındadır [44].

Yoğunlaşmamış silis dumanı taşınabilir olmayıp silis dumanı üretilen yerlerin yakınlarında muhafaza edilir. Genelde grout veya tamir harçlarında kullanılır. Ortalama $0,02-0,25 \mu\text{m}$ çapında olup küresel şekle ve camı yapıya sahiptirler [41]. Yoğunlaşmış silis dumanı

20 000 m²/kg yüzey alanına sahip olup sigara dumanı 10 000 m²/kg yüzey alanına sahiptir. Silis dumanı 2,2-2,5 g/cm³ arası yoğunluğa sahip olup Portland çimentosu yoğunluğu 3-3,15 g/cm³'tür. Silis dumanı genelde %5-10 arasında ikame edilerek geçirimsizlik gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [31]. ASTM C 1240, silis dumanının en fazla %10 ikame edilebileceğini bildirmiştir [46].

Silis dumanı eklenmesiyle beton daha kohezif bir yapıya sahip olmakla birlikte daha az segregasyon ve yok denecek kadar az kuma göstermektedir. Bu özellikler dolayısıyla betonun işlenebilmesi zorlaşabilmekte olup daha durabil bir beton elde edilmektedir. Silis dumanı sertleşmiş betonun dayanım, elastisite modülü, düşük geçirgenlik, durabilite gibi mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Böylelikle yapıların aşınmaya ve sülfat saldırılarına karşı direnci artmış olmaktadır [44].

Silis dumanı betonda yüksek dayanım performansının artırılmasında çok etkilidir. Yüksek dayanımlı beton elde edebilmek için karışımda belli oranlarda silis dumanı kullanmak yaygın yöntemlerden biridir. Silis dumanlı betondaki mekanik özelliklerin gelişmesi, betondaki bu katkının tüketiminin artmasına bağlıdır. Buna ek olarak, mekanik özelliklerin dışında betonun dayanıklılığı da gelişmektedir. Bununla birlikte bazı araştırmacılar betonda silis dumanı kullanımının sakıncalarına dikkat çektiler. Bunların arasında üretim boyunca plastikliğin yitirilmesi ve kür öncesi plastik rötre eğilimi en önemli olanlarıdır [47].

Silis dumanının kullanım alanları:

- Otoyol köprüleri, deniz yapıları, limanlar,
- Kaya stabilizasyonu, tünel kazıları, köprü ve deniz yapılarındaki kolon veya kazıkların rehabilite edilmesi, olarak sıralanabilir [48].

Pirinç kabuğu külü (PK)

Pirinç kabukları, pirinç tanelerini koruyan kaba yapıları olup öğütme sırasında tanelerden ayrılırlar. Pirinç kabuğu, pirinç üreten ülkelerde bol miktarda bulunan atık malzeme olup %30-50 organik karbon içermektedir. Hâlihazırda dünyada pirinç üretiminin 700 milyon ton olduğu kabul edilmektedir. Pirinç kabuğu, pirinç ağırlığının %20'sini oluşturmakta olup %50 selüloz, %25-30 lignin, %15-20 silis ve %10-15 nemden oluşmaktadır. Pirinç kabuğunun yoğunluğu 90-150 kg/m³ civarındadır.

Pirinç kabuğu külünün kaynakları dünyada pirinç üreten bölgeler olup Çin, Hindistan ve Doğu Asya ülkeleri en ön sıralarda gelmektedir. Pirinç kabuğunun buharlaşabilen kısımları yavaşça yanma sırasında kaybolmakta olup geriye kalan temel kalıntılar silikatlardır. Külün özellikleri pirinç kabuğunun bileşenlerine, yakma sıcaklığı ve yakma süresine bağlıdır. Her 100 kg pirinç kabuğunun yanmasından yaklaşık 25 kg kül oluşmaktadır. Pirinç kabuğunun kontrollü yakılması sırasında kabuk içinde bulunan selüloz ve lignin kaybolur ve kalan kül amorf silika yapısındadır. Yüksek boşluklu yapısı dolayısıyla BET değerleri 20-270 m²/g arasında olabilmekte olup bu değer silis dumanında 18-23 m²/g arasındadır.

Pirinç kabuğu külünün kimyasal kompozisyonu büyük ölçüde yakma koşullarına bağlı olup yanma koşullarının silikanın amorf yapısının korunması için kontrol altında tutulması gerekmektedir. 700-800°C sıcaklıklarda yakılarak elde edilen kabuktan elde edilen küldür önemli oranda reaktif olmayan kristobalit ve tridimit bulunmaktadır. Puzolanik aktivite kazandırabilmek amacıyla çok ince olarak öğütülmeleri gerekmektedir. 500-700°C arası sıcaklıkta 1 saatlik yakma işleminin ardından külün ana bileşeni olan amorf silika elde edilebilmektedir. Pirinç kabuğu külünün çok fazla öğütülmemesi tavsiye edilmektedir. Çünkü pirinç kabuğu külü puzolanik aktivitesini, mikro boşluklu yapıların içsel yüzey alanından almaktadır. Öğütme işlemi sonunda taneciklerin boyutları 10-75 µm arasında değişmekte olup silis dumanıyla kıyaslandığında büyük olmaktadır. Ortalama iyi yanmış bir pirinç kabuğu külü %90 amorf silika, %5 karbon ve %5 K₂O'den oluşmaktadır [49].

Yapılan çalışmalar sonucu pirinç kabuğu külü tanelerinin ince yapılarından dolayı iri çimento tanelerinin arasına girerek agrega hamur ara yüzey bölgesini güçlendirdiği ancak pirinç kabuğu külü tanelerinin oluşturdukları büyük yüzey alanı ile su ihtiyacını arttırdığı, buna bağlı olarak da kıvamı olumsuz etkilediği gözlenmiştir [50]. Pirinç kabuğu külünün klinkerle birlikte öğütülmesi durumunda su ihtiyacının azalabileceği değerlendirilmektedir [51].

Pirinç kabuğu külü içindeki amorf silika, Ca(OH)₂ ile birleşerek C-S-H jellerini oluşturur. Böylelikle dayanım ve durabilitede artış olabilmektedir [51]. Normal beton basınç dayanımına göre, kontrollü yakma işlemi ile elde edilen pirinç kabuğu külünün diğer puzolanik malzemelere benzer olarak betonun erken yaşlarında düşük dayanım; ancak ileri yaşlarda yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir [50]. Pirinç kabuğu külünün taze betonda önemli ölçüde kummayı azalttığı gözlemlenmiş olup Portland çimento

maliyetlerinin fazla olduğu göz önünde bulundurulduğunda gelişmekte olan ülkelerde durabil beton elde edilmesi için kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Böylelikle daha düşük enerji tüketimi ve karbon emisyonlarında azalma olabilecektir [51].

2.4.6. Diğer puzolanlar

Metakaolin

Metakaolin, kaolin kilinin 500-800°C arası sıcaklıkta kalsinasyonundan elde edilen bir puzolanik malzemedir. Metakaolinin ($Al_2Si_2O_7$) üretimi için kullanılan hammadde kaolin kilidir. Kaolin geleneksel olarak porselen imalatında kullanılan ince, beyaz kil mineralidir. Kaolinit, kaolin killerine uygulanabilen mineralojik terimdir [52].

100°C üzerinde kil mineralleri emdikleri suyun çoğunu kaybederler. 500-800°C arasında kaolin dehidroksilasyon dolayısıyla su kaybeder. Bu termal aktivasyona kalsine etme denir. Kaolinden metakaolin elde edilmesi için yüksek ısıda ısıtılması gerekmekte olup hiçbir zaman yakılmamalıdır. Metakaolin, silis esaslı bir ürün olup $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonu sonucu C-S-H jelleri oluşur. Metakaolin ayrıca alumina içermekte olup CH ile reaksiyona girerek reaksiyon sonucu ilave alumina içeren C_4AH_{13} , C_2ASH_8 , C_3AH_6 oluşur. Metakaolin tanelerinin ortalama boyutu 3 µm olup ana bileşenleri SiO_2 ve Al_2O_3 'tir [53].

Metakaolin yeni bir mineral katkı maddesi olup, bir endüstriyel yan ürün olmamakla birlikte, tam olarak doğal bir malzeme de değildir. Değişken kompozisyonlardaki diğer puzolanların aksine, metakaolin istenilen partikül boyutunda, mineralojik kompozisyonda ve beyazlıkta üretilebilir.

Metakaolin, yüksek ve ultra yüksek performanslı betonların kullanıldığı donatılı köprü betonları, ısıya dayanıklı yüksek katlı yapılar, patlamalara dayanıklı askeri yapılar ve nükleer atık depoları gibi yapılarda kullanılmaktadır [7]. Ayrıca hafif beton, prekast beton, fibercement ürünleri, cam fiber betonarme, harç ve tamir malzemeleri, havuz alçıları ve estetik amaçlar için kullanılmaktadır [45]. Metakaolinin beton veya harçlarda dayanım ve durabiliteye olumlu katkısında üç mekanizmanın etkili olduğu bilinmektedir. Bunlar;

- Çimentonun hidratasyonunu hızlandırması,
- Puzolanik reaksiyon oluşturma ve
- Filler etkisi ile boşlukları tıkayarak doluluğu artırmasıdır [7].

Metakaolin betonda;

- Basınç ve eğilme dayanımını artırmakta,
- Geçirgenliği azaltmakta,
- Kimyasal saldırılara karşı direnci artırmakta,
- Durabiliteyi artırmakta,
- Alkali silika reaktivitesini azaltmakta,
- Büzülmeyle azaltmakta,
- İşlenebilirliği artırmakta,
- Çiçeklenmeyi azaltmaktadır [53].

1965 yılında Brezilya’da kaolin kili çimento yerine %50 ikame edilerek 7 milyon m³ beton dökülen 4 adet baraj inşa edilmiştir [30].

Zeolit

Zeolitin puzolanik malzeme olarak kullanımı 3000 yıl öncesine dayanmakta olup Roma ve Eski Yunan döneminde volkanik kül, tuf ve traslar kireçle birlikte harç ve betonlarda yapım amacıyla kullanılmıştır. Romalılar İtalya’nın Puzoli bölgesindeki Neopolitan sarı tuf zeolitlerini su kemeri, kamu binaları ve yol yapımında kullanmışlardır. Orta Avrupa’da katedrallerin yapımında zeolitler kullanılmıştır.

1912 yılında Monolith Portland çimento firması, Tehachapi/Kaliforniya yöresindeki zeolitik tüfleri çimento yerine %25 ikame ederek 400 km uzunluğundaki Los Angeles su kemerinin yapımında kullanmışlardır. Günümüzde birçok doğal ve sentetik zeolit minerali değişik endüstrilerde kullanılmaktadır. Çin’de yaygın çimento katkı maddesi olarak kullanılmakta olup bu amaçla yılda 30 milyon ton zeolitin tüketildiği rapor edilmiştir [54].

Volkanik malzeme olarak doğal zeolit 3 boyutlu çerçeve yapılı olup hidrate aluminosilikat olarak sınıflandırılmaktadır. Zeolit kristalleri petek yapılı olup 3×10^{-4} µm boyutlarında çok küçük boşluk ve kanallardan oluşmakta ayrıca toplam eşdeğer yüzey alanı 35-45 m²/g’dır. Zeolit su kaybetme ve kazanma husunda çok yetenekli olup kristal yapısı değişmeden katyon değişimi olabilmektedir [55].

Silis dumanı, uçucu kül ve doğal puzolanlar camsı veya amorf yapıda olup zeolit kristal yapıda olmasına rağmen puzolanik malzemeler gibi davranabilmektedir [102]. Zeolitin içinde büyük miktarda bulunan reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 , kimyasal olarak çimento hidratasyonundan oluşan kalsiyum hidroksitle birleşerek ilave C-S-H jelleri oluşturur ve mikroyapının gelişmesinde rol oynarlar [54].

Zeolit, Çin’de betonun performansını yükseltmek için mineral bağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Çimentonun bir bölümünün zeolit ile yer değiştirmesi, alkali-agrega reaksiyonunun kötü sonuçlarını engellemekte ve beton dayanımını arttırmaktadır [16].

Zeolit, katkılı betonun mekanik ve mikroyapısal özelliklerini, dayanım ve dayanıklılığını geliştirmektedir. Ayrıca zeolit, çimento pastası ve agreganın ara yüzey yapısını geliştirmektedir. Zeolitin betonun dayanımına katkısı tıpkı diğer puzolanlar gibidir. Zeolit, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile girdiği puzolanik reaksiyon sonucu betonun iç yapısını iyileştirir [56].

2.4.7. Yeni nesil mineral katkıları

Bu bölümde biraz yeni ancak daha az bilinen, kullanılabilir olduğu değerlendirilen mineral katkıları tanıtılacaktır. Ancak bu mineral katkıların kullanımı ile ilgili halen araştırmalar yapılmaktadır [41].

Mısır koçanı külü

Mısır koçanı, mısırın içindeki silindirik çekirdek yapısıdır. Tarımsal atık ürün olup beton ve çimento üretimini azaltabileceği değerlendirilmektedir [57]. 2009-2010 yılları arasında dünyada 800×10^6 ton mısır üretimi yapılmıştır. Afrika’da Sahra çölünün altı ve Birleşik Devletler, önemli sayıda tahıl üretiminin yapıldığı yerlerdir. Tahıl hasatından sonra, tarla zemininde kalmış bitki yaprakları ve saplarının yakılmasını müteakip elde edilen kül puzolanik çalışmalarda kullanılmıştır. Elde edilen külün kimyasal kompozisyonu ASTM C 618’de olması gereken $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değerini karşılamaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda yapısal betonların üretiminde mısır koçanı külünün %15’e kadar ikame edilebileceği bildirilmiştir [41].

Mısır koçanları, açık hava ortamında birkaç gün kurutulduktan sonra yakılmasını müteakip $75 \mu\text{m}$ ’luk eleklerden elenerek ince küller elde edilmektedir. Çimento yerine %5, %10, %15, %20 oranlarında ikame edilerek deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çökme,

yayılma ve basınç deneylerinde mısır koçanı külü ikame miktarının artmasıyla dayanımın ve işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür [57]. Mısır koçanı üretimi ve sonrasında elde edilen atık ürünlerin tekrar kullanılması için devletler ve kuruluşlarca programlar hazırlanması ve araştırmacılara ödenek ayırmaları gerektiği değerlendirilmektedir.

Palmiye yağı kalıntısı külü

Palmiye yağı endüstrisi Malezya, Endonezya ve Tayland'da önemli tarım endüstrilerinden birisidir. Ham palmiye yağının üretiminin yanında büyük miktarda katı atık elde edilmektedir. 1 tonluk taze palmiye ürünlerinin öğütülmesiyle 0,21 ton palmiye yağı elde edilmektedir. Palmiye yağı kalıntıları, santrallerde yakıt olarak kullanılmakta olup üretim sonucu kül açığa çıkmaktadır. Palmiye yağı üretimiyle kül miktarı artmakta olup külün kullanımı çok düşük seviyededir. Kül, katı atık olarak doğaya atılmakta ve çevreye zarar vermektedir.

Palmiye yağı kalıntısı külü süngerimsi ve boşluklu yapıdadır. Küller, köşeli ve düzensiz yapıda olup özgül ağırlıkları 2,33'tür. Elde edilen külün kimyasal kompozisyonunun, ASTM C 618'deki olması gereken $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değerini karşılayamayabileceği veya sınır değerlerde karşılayabileceği değerlendirilmektedir [41].

Palmiye yağı külünün tekrar kullanılması ekonomik ve çevreye olan etkilerinden dolayı büyük dikkat çekmektedir. Palmiye yağının 800-1000°C'lerde yakılmasıyla elde edilen kül, puzolanik aktivite gösterdiği için kullanılabilir. Yakıt fiyatlarının artması, gelecek dönemde kaynakların azalması ve gaz emisyonlarının artması alternatif yakıtlar aranmasına sebep olmuştur. Bu alternatif kaynakların teknik olarak uygulanabilir ve doğayla barışık olması önemlidir. Sebze yağları ve diğer yağların alternatif yakıt olarak kullanılması biyoyakıt olarak adlandırılmaktadır. Biyoyakıtlar biyolojik olarak parçalanabilen, zehirli olmayan ve daha az CO₂ emisyonuna sebep olan yakıtlardır.

Birleşik Devletlerde kolza tohumu ve soya fasulyesi, Asya bölgesinde ise palmiye yağı ve ısırgan otunun biyoyakıt olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Palmiye yağının sayılan ürünler içinde en ucuz ve miktar olarak en fazla olduğu bilinmektedir. Malezya, dünyanın en büyük palmiye yağı üreticisi ve ithalatçısı olup palmiye yağı endüstrisi ülke gayri safi milli gelirine önemli katkıda bulunmaktadır. Yaklaşık olarak 1 hektarlık alandaki palmiye yağı üretimi 70 tonluk biyokütle kalıntıları bırakabilmektedir. 1 kg palmiye yağının üretimi esnasında 4 kg biyokütle oluşmaktadır. Malezya'da yılda 90 milyon ton

biyokütle üretimi olmaktadır. Her palmye ağacı meyvesinden %21 palmye yağı elde edilmektedir. Malezya'da elektrik üretimi esnasında da palmye yağı kullanılmaktadır. Bu kapsamda Malezya'nın palmye yağını endüstriyel amaçlarda kullanmak için çok büyük bir potansiyeli bulunmaktadır.

Beton ve harçlarda, çok ince öğütülmesinin ardından çimentoya ikame malzemesi olarak son dönemlerde kullanılmıştır. Böyle bir malzemenin etkin olarak kullanılması, çimento üretimini azaltacağı gibi geri dönüşüm sağlayarak doğayla barışık ürünlerin elde edilmesinde büyük katkı sağlayacaktır. 8 µm altında yapılan öğütmelerden sonra elde edilen küllerle, %20-30 oranında çimento yerine ikameler yapılmış olup kontrol numunelerine oranla yüksek basınç dayanımı, klor-iyon geçirgenliği ve sülfat atağına karşı daha fazla direnç elde edilmiştir [58].

Şeker kamışı küspesi külü

Şeker kamışı tropik ülkelerin ana meyve mahsülüdür. Şeker kamışı, şeker üretiminin ana kaynağıdır. Şeker kamışı küspesi, şeker kamışından suyun çıkarılmasından sonra ortaya çıkan atıktır. Şeker kamışı küspesi külü, şeker kamışı küspesinin kontrollü yakımından elde edilen küldür. Yaklaşık olarak 1 tonluk şeker kamışı, 280 kiloluk şeker kamışı atığı ortaya çıkarmaktadır. Şeker kamışı küspesi, şeker endüstrisinin atık malzemesi olup çimentoya ikame malzemesi olarak kullanabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle Güney Asya'da yüksek değerli bir mahsül ürünü olduğu bilinmektedir. Şeker endüstrisi, şeker ve buna bağlı üretimler Pakistan ekonomisinde önemi bir rol oynamaktadır.

Şeker endüstrisinin organik atığı olan küspe, puzolanik malzeme olarak kabul edilmekte olup beton davranışlarında kullanımı ile ilgili kısmi araştırmalar yapılmıştır. Küspe atıkları, katı atık depolarına atılmakta olup çimentoya ikame malzemesi olarak kullanımı önemlidir. Dünyada şeker üretimi önemli bir seviyede olup yılda üretilen 1500 milyon tonluk şeker kamışından suyun çıkartılmasından sonra %40-45 oranlarında küspe elde edilmektedir. Bu kapsamda şeker endüstrisinden yaklaşık olarak 600 milyon ton şeker küspesinin elde edildiği tahmin edilmektedir. Çimentoya %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında ikameler yapılarak çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır [59].

Alkol üretimi esnasında da atık malzemeler elde edilmekte olup her 1 tonluk şeker kamışından yaklaşık 0,3 tonluk ıslak küspe elde edilmektedir. Kül içerisinde amorf yapıda yüksek miktarda silis bulunmakta olup yakma koşullarına bağlı olarak silisin özellikleri

değişebilmektedir. Kül, genelde yüksek özgül yüzeye sahip olup öğütme koşullarına bağlı olarak özellikleri değişmekle birlikte çimentodan daha düşük özgül ağırlığa sahiptir. Yapılan deneysel çalışmalarda %10-20 oranlarında ikame edilmesi durumunda dayanımda olumsuz bir etki görülmemiş olup düşük hidratasyon ısı ve düşük su geçirgenliği elde edilmiştir [41].

Çimento ve betonda kullanılmasıyla;

- Atık malzemelerin depolanması maliyetlerinde azalmalar,
- Ham malzemelerin korunmasıyla doğanın korunması,
- Mevcut atık depolarında yer kazanılması,
- Çimento klinkerinde ve CO₂ emisyonlarında azalma meydana gelmesi,
- Atık malzemeler hakkında ve geri dönüşümün avantajlarıyla ilgili farkındalık yaratma, sağlanacaktır [59].

Buğday samanı külü

Tahıl üretiminden elde edilen ana tarım yan ürünü olan buğday samanı atığı, çiftçilerin açık havada yakmalarından dolayı çevre kirliliği yaratmaktadır. Ancak buğday samanı atığı, kontrollü bir şekilde yakılırsa çimentoda kullanılabilecek bağlayıcı malzeme elde edilebilmektedir. Elde edilen kül, yüksek oranda silis içermekte ve çimentoya kıyasla daha ince olup olası bir bağlayıcı malzeme kaynağıdır. Harçlarla yapılan çalışmalarda %25 civarlarında çimento yerine ikame edildiğinde basınç dayanımını %20 kadar artırdığı görülmüştür. Söz konusu malzemenin durabiliteye olan etkilerini araştırmak için sodyum ve magnezyum sülfatlı ortamlarda yapılan deneylerde basınç dayanımında kontrol betonuna göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Artan durabilitenin buğday samanı külünün pozolanik ve filler etkisi sebebiyle olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca yapılan başka çalışmalarda alkali-silis reaksiyonu ve donma-çözölmeye karşı da olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir. Çimentoya %5, %10, %15, %20 olarak ikame edilen buğday samanı külü ile yapılan çalışmalarda en yüksek basınç dayanımı %10 ile, en düşük dayanım ise %20 ikamesiyle elde edilmiştir. Buğday samanı külü ikamesi, betondaki tüm boşlukları doldurması sebebiyle basınç dayanımını artırırken inceliğinden dolayı işlenebilirliğe olumsuz yönde etkisi olmuştur [59]. Yıllık buğday üretiminin 2020 yılında 841x10⁶ ton olduğu tahmin edilmektedir. Buğday, gelişmekte olan ülkelerin ana tarım

ürünlerinden birisidir. 0,7-0,75 tonluk buğday samanından 1 tonluk buğday mahsülü elde edilmektedir. Buğday samanı külü, buğday samanının kontrollü bir şekilde yakılıp öğütülmesiyle elde edilmektedir. Buğday samanı külü daha fazla yüzey alanına sahip olup ortalama tane boyutu çimentodan daha azdır ve özgül ağırlığı 1,98-2,41 arasındadır. Taneleri düzensiz olup pirinç kabuğu külüne benzemektedir. Elde edilen külün kimyasal kompozisyonu ASTM C 618'deki olması gereken $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değerini karşılamakta olup %10 puzolan olarak yapısal betonlarda kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Ancak sahip olduğu alkaliler dolayısıyla bir reaktif olmayan ve bir reaktif olan puzolanın birlikte kullanılmasıyla daha yüksek oranda ikamesinin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir [41].

Ahşap atığı külü

Enerji üretimi konusunda biyoyakıtlı santrallerin geliştirilmesi önemli çalışmalarındandır. Portekiz'de 2 adet, Birleşik Devletler'de 18 adet, Kanada'da 1 adet ve Finlandiya'da 1 adet olmak üzere ahşapın söz konusu santrallerde yakılmasıyla elde edilen küller geleneksel olarak katı atık depolarında depolanmaktadır. Yakılan ahşap dolayısıyla kütlece %0,4-1,8 arasında kül elde edilmektedir. Bu küllerin doğaya salınması durumunda insanlar için solunum problemleri, aynı zamanda katı atık depolarında bekletilen atık malzemelerin yer altı suyuyla karışması da meydana gelebilecektir.

Ahşap atığı külü çok ince, heterojen ve gözenekli yapıdadır. Yüzey alanı fazla olup özgül ağırlığı 2,48'dir. Özgül ağırlığın düşük olması, kütle betonda kullanılması halinde betonun ağırlığının azalacağını göstermektedir. Ahşap atığı külünün fiziksel özellikleri ahşap türüne göre değişiklik göstermekte olup puzolanik ve hidrolik aktivitede önemli rol oynamaktadır.

Elde edilen külün kimyasal kompozisyonu, ASTM C 618'deki olması gereken $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değerini karşılamakta olup atık depolarında bekletilen külün çimento yerine kullanılması durumunda çok iyi analizinin yapılması gerekmektedir. Yapısal betonlarda kullanılabileceği değerlendirilmekte olup yapılan çalışmalarda mekanik dayanımlarda azalma ancak durabilite özelliklerinde artma tespit edilmiştir [41].

Odun yakan santrallerde, kağıt fabrikalarında ve diğer ahşap yakan işletmelerde odun külü elde edilmektedir. Odun, yenilenebilir enerji kaynağı olmasına karşın gelecekte enerji üretiminde kullanımı artacaktır ve dolayısıyla odun külü üretimi daha fazla olacaktır. %10, %20, %30 oranlarında ikame edilerek deneysel çalışmalar yapılmış olup kontrol

numunelerine kıyasla %20 ve %30'luk ikame oranlarında basınç ve eğilme dayanımında azalmalar gözlemlenmiştir. %10 civarında çimento yerine ikame edilmesi durumunda filler etkisi göstererek kontrol numunelerine kıyasla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsamda ahşap atığı külünün saklanma maliyetlerinin azaltılmasında ve daha doğayla barışık beton elde edilmesinde rol oynayabileceği değerlendirilmektedir [61].

Kalsine edilmiş atık kâğıt çöpleri

Atık kâğıtların 750°C'lerde yakılmasıyla çöp olan kâğıt, reaktif puzolanik bir malzeme haline gelebilmektedir. Yakma koşulları bu çöplerin karakteristik özelliklerini belirlemektedir. Yakma işleminin tamamlanmasını müteakip oda sıcaklığına kadar soğutulmaktadırlar. Kâğıt çöpler belli oranlarda genelde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ içermektedirler [62].

Endüstriyel kâğıt üretimi doğayı çok fazla etkilemektedir. Kâğıt üretimi dünya çapında tüm kesilen ağaçların %35'inden sorumludur. 1 ton atık kâğıt kullanılarak 17 ağaç daha az kesilmekte ve %50 daha az kâğıt hamuru harcanmaktadır. Atık kâğıtların depolanması da doğaya zararları düşünüldüğünde dikkat edilmesi gereken konulardandır. Atık kâğıt çöpi organik malzemelerin, killi minerallerin ve kalsiyum karbonatın topaklanması şeklinde oluşur. Gri renkte olup değişik şekilde ve boyutadırlar. Özgül ağırlığı 2,67 olup atık kâğıdın kontrollü bir şekilde yakılmasıyla puzolanik özelliklere sahip kül elde edilmektedir. Yakılma derecesi ve süresi puzolanik özellikleri belirlemektedir. Genel olarak 600-750°C'lerde 2 saat süreyle yakılması durumunda iyi puzolanik özelliklere sahip malzeme elde edilmektedir. Çok yüksek sıcaklıklarda puzolanik özellik kaybolmaktadır. Öğütülmüş malzemeler %20 civarında çimento yerine ikame edilerek kullanılabilmekte olup işlenebilirlik, hidrasyon ısı ve büzümeye olan etkilerini gözlemleyebilmek için ilave çalışmalar yapılması gerekmektedir [41].

Elektrik ark ocağı tozu

Elektrik ark ocağı, karbon çeliği ve alaşımlı çelik, soğuk pik demirin üretilmesinde rol oynamaktadır. Amerikan Çevre Koruma Derneği tarafından elektrik ark ocağı tozu zararlı olarak nitelendirilmiş olup sınır değerlerin üzerinde çinko, kurşun, kadmiyum ve krom bulundurmaktadır. Söz konusu tozun yaklaşık %70'i atık depolama tesislerine gönderilmektedir. Tozun içindeki zehirli metallerin toprağı kirletmesinin önlenmesi önemli konulardandır [41].

Elektrik ark ocağı tozu, elektrik ark fırınlarında çelik üretimi esnasında ortaya çıkan zararlı endüstriyel atıktır. Çok ince yapıda olup soğutma borularıyla fırının içinden özel tasarlanmış filtrelerle toplanmaktadır. Kütlece %50 demir oksit, %21 çinko oksit bulundurmakta olup kalsiyum, magnezyum, silikon, nikel, krom, ve kurşun az miktarda bulunan diğer bileşenlerdir. Üretilen çeliğin %1'i kadar kütlece toz elde edilmektedir. 2010 yılında Mısır'da 5 firmanın toplam 5 milyon ton sıvı çeliği üretiminden 50 000 ton toz elde edilmiştir. Tehlikesiz bir atık depolama tesisi bulunamaması dolayısıyla bu tozlar hiçbir önlem alınmadan doğaya bırakılmıştır. Bu yüzden bu büyük çevre problemi dolayısıyla elektrik ark ocağı tozunun Portland çimentoda kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [63].

Elektrik ark ocağı tozu 4-4,2 özgül ağırlığa sahip olup yüzey alanı ince öğütülmesi dolayısıyla fazladır. %7,5-15 oranlarında çimento yerine ikame edildiğinde dayanım ve durabilitayı artırdığı ancak daha fazla oranlarda ikame edildiğinde dayanımda olumsuz etkileri olabildiği yapılan çalışmalarda görülmüştür. Yüksek fırın cürufuyla beraber ikame edilmesi durumunda ağır metaller bulunduran tozun daha etkili olabileceği yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir [41].

Arıtma çamuru külü

1 tonluk kurutulmuş çamurun yakılmasıyla yaklaşık 300-400 kg kül elde edilmektedir. Arıtma çamuru külü atık malzeme olması dolayısıyla tekrar kullanılması durumunda çevreye olan etkileri dikkate alınarak kullanım kararı verilmesi gerekmektedir. %40-74 oranlarında amorf yapıda olup taneleri düzensiz şekilli ve boşluklu yapıdadır. Yakma yöntemine göre tane şekli ortaya çıkmaktadır. $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ toplam değeri %59 olup zayıf puzolan olarak değerlendirilmektedir. Çinko, krom ve bakır gibi ağır metallerin de bulunması kullanım öncesi analiz yapılmasını gerektirmektedir [41].

Geri dönüştürülmüş arıtma çamuru külünün Portland çimentosunda kullanımı atık depolama yerlerinin kısıtlı olması ve çevreye olan etkileri nedeniyle dünya çapında dikkat çekmektedir. Arıtma çamuru külünün temel bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO ve P_2O_5 'tir. Bu bileşenlere teorik olarak bakıldığında iyi öğütülmesi durumunda arıtma çamuru külü iyi bir puzolanik malzeme olup çimento ve betonda kullanılabilirliği yüksektir. Atık depolama maliyetlerinin azalması elde edilecek avantajlardan olup puzolan olarak kullanılması durumunda su ihtiyacını artıracak değerlendirilmektedir.

Arıtma çamuru külü, temel olarak kum boyutunda siltli malzeme içeren taneciklere sahiptir. Suyu çekilmiş arıtma çamurunun çöp fırınında yakılmasıyla elde edilen malzeme kristal yapıda bir yan ürün olup tuğla yapımında kullanılmıştır. Elde edilen tuğlalar Çin ulusal standartlarını karşılamıştır. Harçlarda düşük dayanım ve su ihtiyacını artırmış olup puzolan olarak kullanılabilmesi için çok ince öğütülmeleri gerektiği değerlendirilmektedir [64]. İşlenebilirliği azalttığı ve priz süresini uzattığı yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Akışkanlaştırıcı kullanarak işlenebilirliğe olan olumsuz etkisi giderilebilir. %10-15 oranlarında çimento yerine ikame edilebileceği yapılan çalışmalarda görülmüştür [41].

Kentsel katı atık külü

Şehirleşme ve endüstrileşmeyle büyük miktarda kentsel katı atıklar oluşmaktadır. 2030 yılında Çin’de kentsel katı atık miktarının 4,8 milyar ton olacağı tahmin edilmektedir. Kentsel katı atığın yakılmasının uygulanabilir ve etkili bir yönetim stratejisi olduğu düşünülmektedir. Yakma işlemini müteakiben atık, hacimce %85-90, kütlece %65-80 seviyelerinde azalmaktadır. Yakma işleminin Çin’de her yıl 3 milyon ton kentsel katı atık külü oluşturduğu tahmin edilmektedir [65].

Artan kentsel katı atık yükünün çevre ve toplum sağlığı üzerinde önemli etkileri olup yanıcı gazların oluşturduğu olası patlamalar, yer altı suyunun ve toprağın zararlı organikler ve ağır metaller sebebiyle kirlenmesi dikkat edilmesi gereken hususlardır. Artan çevresel farkındalık ve katı atık deposu maliyetleri, katı atık depolarının kısıtlı olması alternatif yöntemlerin önemini göstermektedir. Yakma yöntemi, katı atığın hacimce ve kütlece azalmasına sebep olurken farklı atık yönetimi yaklaşımları gelişmiştir. Katı atık kalıntılarının fiziksel ve kimyasal özellikleri atık bileşenlerine, fırın tipine ve diğer faktörlere bağlıdır. Çoğu atık kağıt, besin ve bahçe atıklarından oluşmakta olup az miktarda tekstil, plastik, cam ve metal atıkları da bulunmaktadır. Yakım işleminden elde edilen kül; silikon, alüminyum, demir, kalsiyum, sodyum, potasyum, kalsiyum klorür ve sülfat içermektedir. Yakım işleminden sonra elde edilen külde yapılan kimyasal analizde SiO_2 , Al_2O_3 , CaO tespit edilmiştir. Kül, %2 civarında ağır metal içermekte olup kurşun, çinko, kadmiyum, krom, bakır, civa ve nikel başlıcalarıdır. Genel olarak elde edilen külün kullanılmadan önce detaylı bir analiz edilmesi gereklidir. Yapılan çalışmalar, elde edilen külün çimentoya kısmi olarak ikame edilebileceğini gösterse de etkin bir mineral katkı olarak kullanılabilmesi için çok daha kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir [41].

Araba lastiği atıkları

Son yıllarda otomobil endüstrisinin hızlı bir şekilde artması, ulaşım araçları olan arabalara ve dolaylı olarak araç lastiklerine talebi artırmıştır. Milyonlarca atık lastik, açık alanlara atılmakta olup çevresel anlamda tehlike içermektedirler. Atık lastikler, sineklerin barınması ve üremesi için de uygun bir alan oluşturmaktadır [66]. Şehirlerde artan atık lastik miktarının azaltılmasının bir yolu da bahse konu lastiklerin çimentoya ikame malzemesi olarak kullanımıdır. Her yıl kişi başı 1 adet lastiğın atık hale geldiğı çalışmalarda bildirilmiştir. Çimentoya alternatif malzeme bulunulması, çimento kıtlığı ve artan maliyetler bu tarz malzemelerin alternatif olarak kullanılmasına neden olmuştur. Ayrıca lastiklerin parçalanabilen malzemeler olmaları çevre ve toplum sağlığı için ciddi sorun oluşturmaktadır. Bu kapsamda araba lastiklerinin yakılmasıyla elde edilen kül, çimentoya ikame edilerek deneyler yapılmış olup basınç, eğilme ve çekmede yarma deneylerinde yüksek dayanımlar elde edilmiştir [67].

Hint keneviri külü

Hindistan dünyadaki en büyük Hint keneviri üreticilerindendir. Hint kenevirinin yakılmasıyla elde edilen kül, çimentoya ikame edilerek deneyler yapılmış olup basınç, eğilme ve çekmede yarma deneylerinde yüksek dayanımlar elde edilmiştir [67].

Kırmızı çamur

Boksitten alüminyum elde edilmesi esnasında ortaya çıkan kırmızı çamur ana atık malzemedir. Avustralya, Çin, Brezilya, Gine, Hindistan ve Jamaika üretim yapan başlıca ülkelerdir. 1 ton alüminyum üretiminden yaklaşık 0,3-1 ton arasında kırmızı çamur atığı elde edilmektedir. Kırmızı çamur; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , CaO ve diğer minör bileşenlerden oluşmaktadır. Kırmızı çamurun doğaya bırakılması; toprak zehirlenmesi ve yer altı suyunun kirlenmesini minimize edebilmek amacıyla sınırlandırılmıştır. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplam değeri %54 olup zayıf puzolan olarak değerlendirilmektedir. Mekanik dayanımlar kırmızı çamurun artmasıyla azalmıştır ancak %50 ikameyle hazırlanan harçlar yapısal olmayan uygulamalarda gerekli dayanım değerlerini vermiştir [68].

Lityum aluminosilikat kalıntısı

Lityum; seramik, cam, cep telefonu, araba aküleri ve tıp gibi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Avustralya, Kanada, Zimbabve, Zaire, Şili, Arjantin ve A.B.D. başlıca lityum minerallerinin görüldüğü yerlerdir. Brezilya'da yapılan deneysel çalışmalarda lityum %10, %20, %30, %40, %50, %60 oranlarında çimento yerine ikame edilmiştir. Mekanik dayanımlarda ve alkali-silika reaksiyonu kaynaklı genleşmelerde olumlu sonuçlar elde edilmiştir [69].

Hindistan cevizi kabuğu

Hindistan cevizi kabuğunun beton üretiminde ikame malzemesi olarak kullanılması ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır. Hindistan cevizi 86 ülkede yetişmekte olup her yıl toplam 54 milyar adet ürün elde edilmektedir. Hindistan 13 milyar adet yıllık üretimle en üst sırada yer almaktadır. Bu kapsamda Hindistan cevizi kabuğunun öğütülerek ikame malzemesi olarak kullanılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmaktadır [66].

2.5. Literatürde Zeolit ile Yapılan Bazı Deneysel Çalışmalar

Uzal (2007), Türkiye'de Gördes ve Bigadiç'ten temin edilen doğal zeolitlerin (klinoptilolit) puzolanik özelliklerini ve bu zeolitlerden %15, %35 ve %55 ikame edilerek hazırlanan harç ve betonların özelliklerini araştırmıştır. Zeolit kullanımı klor-iyon geçirgenliğini düşürerek geçirimsiz beton elde edilmesinde üstünlükler sağlamıştır. Gördes ve Bigadiç zeolitleri mühendislik özellikleri bakımından farklı özellikler sergilemiş olup genel olarak olumlu performans göstermişlerdir [70].

Özen (2013), klinoptilolit, mordenit ve analsim türü zeolitlerin ikame edilmesiyle hazırlanan harçların özelliklerini incelemiştir. Harçlarla yapılan basınç deneyleri sonucunda Bigadiç klinoptilolit zeolitinin 28 günlük dayanımının kontrol numunesinin dayanımından fazla olduğu tespit edilmiştir [71].

Dığış (2015), numune çeşitliliği sağlamak amacıyla, Türkiye'de faal halde bulunan üreticilerden granüler doğal zeolit numuneleri temin etmiştir. Bu numuneler ile ayrıntılı harç deneyleri gerçekleştirmiştir. Değişik oranda öğütülmüş doğal zeolit ikame ederek hazırlanmış harçlarda eğilme ve basınç dayanımı gelişimi, sülfat direnci, klor iyonu penetrasyonuna direnç, alkali-silika reaksiyonu ve su emme performansları, referans

bileşimli harçlar ile kıyaslanmıştır. Genel olarak durabilite performansında büyük ölçüde iyileşme olmuştur [72].

Yazıcıoğlu (2016), iki farklı rezervden temin edilen doğal zeolit minerallerinden klinoptilolit (Manisa/Gördes) ve analsimin (Ordu/Perşembe) katkı malzemesi olarak kullanımı için %0, %10, %30 ve %50 oranlarında ikame ederek hazırlanan 14 adet deney serisinden oluşan, harç ve beton numuneler üzerinde basınç dayanımı ile dayanıklılığa yönelik bir takım standart deneyler yapmıştır. Yapılan deneyler sonucunda katkılı çimento ve beton üretimlerinde doğal zeolitlerin ikinci değerli minerali olan analsimin inşaat endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılan klinoptilolite alternatif olabileceği ve her iki doğal zeolitin de (analsim ve klinoptilolit) katkılı çimento ve beton üretimlerinde yaklaşık %30 yer değiştirme oranına kadar puzolanik katkı malzemesi olarak kullanımının mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır [73].

Savaş (2012), %0, %10, %20 diatomit, %10, %20 zeolit, %5+5, %10+10 diatomit ve zeolit ikame ederek 7 farklı çimento hazırlamış olup beton numuneler üretmiştir. Üretilen beton örnekleri üzerinde birtakım laboratuvar, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda diatomit ve zeolit ikamesinin olumlu etkisinin olduğu tespit edilmiştir [74].

Öcal (2014), yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkılı betona etkisini araştırmıştır. Doğal zeolit %5, %10, %15, %20, %30, %40 ikame edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Doğal zeolit katkısının yüksek sıcaklıklarda beton dayanımına pozitif etki ettiği görülmüştür. Doğal zeolit miktarı arttıkça beton agregalarının yüksek sıcaklıktan etkilenme oranlarında azalma görülmüştür. Ayrıca doğal zeolit ilavesinin beton ısı iletkenlik katsayısında azalmalara neden olduğu görülmüştür [75].

Karakurt (2008), doğal zeolit ve volkanik tüfler kullanarak 60 çeşit katkılı çimento üretmiştir. Klinker yerine %10, %20, %30, %40 ve %45 oranlarında beş farklı katkının alçıtaşıyla birlikte öğütülmesiyle çimentolar elde etmiştir. Harçlar ile 2, 7, 28 ve 180. günlerde mekanik deneyler yapmıştır. Ayrıca harç ve betonlarla sülfat dayanıklılığı, alkali-silis reaktivitesi, donma-çözülme dayanıklılığı, yüksek sıcaklık ve hızlandırılmış donatı korozyonu deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonunda katkılı çimento kullanımının betonun ileri yaş dayanımlarını ve durabiliteyi olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir [76].

Güldaş (2018), betonlara antibakteriyel özellik kazandırmak amacıyla betona malzeme olarak anataz yapıda titanyum dioksit (TiO_2) tozu, zeolit, gümüş iyonları içerikli antimikrobiyal toz ve antimikrobiyal özellikli sıvıyı farklı oranlarda ilave etmiştir. Beton üzerindeki çalışmada beyaz ve gri çimento ve doğal zeolit %0, %10, %20 ikame edilerek kullanılmıştır. Deneyler sonunda renk açılması ve antibakteriyel özellik kazandırmak için TiO_2 ve zeolit kullanılabileceği belirlenmiştir [77].

Durgun (2015), %20 zeolit ve %20 diatomit ikameli beton numuneler içerisindeki nervürlü donatının, H_2SO_4 ve HCl asit içerisindeki korozyon mekanizmasını araştırmaya çalışmıştır. %20 zeolit ikameli beton numunelerindeki beton ve donatı dirençlerinin %20 diatomit ikameli ve kontrol numunesine göre daha fazla olduğu, dolayısı ile daha az korozyona uğradığı belirlenmiştir [78].

Yılmaz (2018), uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve zeolit katkılı kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirlik ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Taze ve sertleşmiş beton deneylerinde yüksek fırın cürufu ikamesiyle elde edilen kendiliğinden yerleşen betonlar maksimum performans göstermişlerdir. Uçucu küllü betonlar da testleri başarı ile geçerek reolojik özelliklere olumlu katkılar sağlamıştır. Zeolit; %30, % 40, %50 ikame edildiğinde su ihtiyacını fazlaca arttırmış ve katkının yayılma etkisini engellemiştir. Zeolit ile üretilen betonlarla taze beton testlerinde olumsuz sonuçlar elde edilmiş olup bu sebeple kendiliğinden yerleşen beton olarak nitelendirilememiş ve basınç mukavemet testlerinde de diğerlerine oranla çok düşük sonuçlar elde edilmiştir [79].

Özer (2018), geopolimer harçların reolojik davranışı üzerinde zeolit etkisini incelemiştir. Doğal zeolit ve aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) birleştirilerek geopolimer bağlayıcı madde oluşturulmuştur. CEM I 42,5 N Portland çimentosu yerine %0, %10, %25, %40, %55, %70, %85 ve %100 oranlarında doğal zeolit kullanılmıştır. Numunelerin taze haldeki viskozite değerleri viskozimetre aleti ile ölçülmüştür. Doğal zeolit oranının artması ile birlikte viskozitenin genelde arttığı tespit edilmiştir. Agrega/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımlarında artışlar tespit edilmiştir. Sodyum hidroksit (NaOH) aktivatörü ile üretilen geopolimer harçların, %10 zeolit içeren ve agrega/bağlayıcı oranı 1,75 olan örneklerinin en yüksek basınç dayanımı (78,5 MPa) gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca zeolit miktarının artması ile birlikte harçların birim hacim ağırlıklarında azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir [80].

Yıldız ve diğerleri yaptıkları çalışmada (2014) $MgSO_4$ etkisindeki yol kaplamalarında pomza ve zeolit ikameli betonun kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Zeolit ve pomza ikamesiyle hazırlanan beton numunelere yapılan deney sonucunda zeolit ve pomzanın çimento yerine ikame edilerek rijit yol malzemelerinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [81].

Kılınçarslan yaptığı çalışmada (2007) zeolit içeren betonların termomekanik özelliklerini araştırmıştır. %5, %10, %15 oranlarında zeolit ikame edilerek hazırlanan betonların basınç dayanımları ve termal iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Basınç dayanımlarında önemli bir değişme olmayıp ısı yalıtım özellikleri olumlu yönde artmıştır [82].

Yıldırım yaptığı çalışmada (2007) Manisa Gördes yöresinden temin edilen zeoliti %15 ve %30 ikame ederek hazırladığı harç numunelerini su ve $MgSO_4$ ortamında kür ederek mekanik özelliklerini ve mikroyapılarındaki oluşumlarını incelemiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda %15 zeolit ikamesi ile olumlu sonuçlar elde edilmiştir [83].

Okumuş yaptığı çalışmada (2012) %10, %20, %30 zeolit ve %8 oranında silis dumanı ikame ederek beton karışımlar hazırlamıştır. Hazırlanan karışımların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, basınçlı su geçirgenlikleri, kılcallık ve su emmeleri 28. günde test edilmiştir. Üretilen numunelerin bir kısmı ise 28. gün sonunda $450^{\circ}C$ sıcaklıkta fırında 3 saat bekletildikten sonra aynı testlere tabi tutulmuşlardır. Sonuçlar doğal zeolitin %20 oranında ikame edilerek kullanılabileceğini ortaya koymuştur. %10 ve %20 zeolit ikameli numuneler kontrol betonuna kıyasla düşük su geçirgenliği ve yüksek dayanım değeri vermişlerdir. %10 zeolit ve %8 silis dumanı ikame edilen numuneler ise 28. günde maksimum basınç dayanım değerlerini elde etmiştir. Yüksek sıcaklık, numunelerde dayanım kayıplarına ve geçirimliliğin artmasına sebep olurken, zeolit ve silis dumanının bu hasarı azaltıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir [84].

Bilim yaptığı çalışmada (2018) yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan doğal zeolit içerikli harçların eğilme ve basınç dayanımına Na_2CO_3 'ın (sodyum karbonat) etkisini araştırmıştır. %5, %10, %15, %20 oranında zeolit ikame edilerek hazırlanan harçlarla yapılan deneylerde zeolitin yüksek sıcaklıklarda ($300-600-900^{\circ}C$) normal Portland çimentosundan daha iyi performans verdiği gözlemlenmiştir. Aktivasyon için kullanılan Na_2CO_3 , yüksek sıcaklıklardaki eğilme ve basınç dayanımlarında düşüşe neden olmuştur. En iyi dayanım değerleri %10 zeolit ikamesi ile elde edilmiştir [85].

Nas yaptığı çalışmada (2015) zeolit ve metakaolinin betonun dayanıklılığı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda zeolit ve metakaolin ikamesiyle üretilen betonlar üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, aşınma, donma-çözülme ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı, hızlı klor iyon geçirimsizliği ve kılcallık deneyleri yapmıştır. Üretilen betonlarda puzolan olarak zeolit ve metakaolin çimentoyla ağırlıkça ikameli olarak kullanılmıştır. Zeolit %10, %15, %20; metakaolin %5, %10 ve %20 oranlarında ikame edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda zeolit ve metakaolinin mineral katkı olarak betonda kullanımının özellikle basınç ve eğilme dayanımları, kılcal geçirimsizlik, hızlı klor iyon geçirimsizliği ve dona dayanıklılık gibi özellikler üzerinde olumlu, aşınma ve yüksek sıcaklığa karşı olumsuz etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışma sonucu zeolit ve metakaolinin en uygun ikame oranlarının sırasıyla %10 ve %20 olduğu belirlenmiştir [86].

Ranjbar ve diğerleri (2013) yaptıkları çalışmada Semnan-İran'dan elde ettikleri zeolit ile yaptıkları kendiliğinden yerleşen betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini araştırmışlardır. Bu kapsamda zeolit %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında ikame edilerek ve farklı su/bağlayıcı oranları kullanılarak kendiliğinden yerleşen betonlar hazırlanmıştır. Taze beton özellikleri yayılma deneyi, V hunisi ve L kutusu yardımıyla araştırılmıştır. Sertleşmiş beton deneyleri kapsamında basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrasonik hız deneyleri ve su emme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar doğal zeolit ilavesiyle kendiliğinden yerleşen betonun akışkanlık ve viskozite yönünden tatmin edici performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Doğal zeolit basınç ve yarmada çekme dayanımına etkilerinin genellikle su/bağlayıcı oranıyla ilişkili olduğu görülmüştür. Bunun yanında basınç dayanımı artışının 55 cm'den daha fazla slump akışı olan karışımlarda olduğu görülmüştür. Ultrasonik hız deneyleri doğal zeolit etkisinin yüksek basınç dayanım değerlerinde ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. Kontrol karışımıyla kıyaslandığında doğal zeolit içeren kendiliğinden yerleşen betonun su emme özellikleri artan günlerle birlikte önemli derecede düşmüştür [87].

Daskıran ve diğerleri (2015) yaptıkları çalışmada iki farklı doğal zeolit alkali-silik reaksiyonu kaynaklı genleşmeleri azaltmadaki etkilerini araştırmıştır. Kullanılan doğal zeolitler farklı reaktif silika içermekte olup doğal kum ve kırma taş agregası kullanılarak ASTM C 1260 kapsamında hızlandırılmış harç denemeleri için numuneler hazırlanmıştır. Doğal zeolitlerin performansları alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan genleşmelere göre değerlendirilmiştir. Doğal zeolitler %10 ve %20 oranlarında ağırlıkça çimento yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Yüksek reaktif silika içeren zeolit, alkali silika reaksiyonu

kaynaklı genleşmelerin azalmasında daha iyi performans göstermiştir. Deney sonunda yüksek reaktif zeolitın %20 oranında ikame edilmesiyle alkali silika reaksiyonu kaynaklı genleşmeleri azaltmada etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [88].

Baldino ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmada küçük genlikli osilasyonlar kullanarak taze çimento pastasının reolojik davranışına sentetik zeolit, kireç taşı ve silis dumanının etkilerini araştırmışlardır. Diğer bileşenlere kıyasla zeolitın yapı gelişimi için daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Düşük oranlarda kullanılan sentetik zeolitlerin, mekanik özelliklere ve hamurun sıvımsı özelliğine diğer katkılardan daha fazla etkisinin olduğunu gözlemlemişlerdir [89].

Markiv ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada Sokyrntisa-Ukrayna bölgesinden temin edilen %75 SiO₂ ve %60 klinoptilolit içeren zeolitın betonun su emme, büzülme, donma-çözünme gibi mekanik ve durabilite özelliklerine etkilerini araştırmış olup olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Bu kapsamda 0-2 mm ince agrega, 2-8 mm kaba agrega, 8-16 mm kaba agrega, %10 doğal zeolit, %1,2-1,6 oranlarında süperakışkanlaştırıcı ve %4-5,1 oranlarında hava sürükleyici katkı kullanılarak doğal zeolit kullanılmayan karışımlarla kıyaslamalar yapılmıştır. Su/çimento oranı 0,5 olarak öngörülmüş olup karışımlarda CEM I 42,5 R Portland çimentosu 350 kg/m³ oranında kullanılmıştır. Çalışma sonucunda istenen yayılma değerlerini elde edebilmek amacıyla zeolitın yüksek yüzey alanı dolayısıyla yüksek dozda süperakışkanlaştırıcı ihtiyacı olduğu belirlenmiştir. Hazırlanan numunelere 1, 28, 56, 90 ve 180. günlerde deneyler yapılmıştır. 90 güne kadar doğal zeolit ikameli betonlar daha düşük basınç dayanımı sergilemiş olup, 180 gün sonunda daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda süperplastikleştirici akışkan ve hava sürükleyici katkı kullanımının su emme, büzülme ve donma çözünmeye karşı olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür [90].

Chen ve diğerleri (2018) Çin'in Henan bölgesinden temin edilen zeolitle harçlar üzerinde yaptıkları çalışmada; %5'e kadar zeolit ikamesinin yoğunluk ve akışkanlaştırıcılığı artırdığı, mekanik özelliklere olumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. CEM I 42,5 N Portland çimentosu, %5, %10, %15, %20 oranında ikame edilen ince öğütülmüş zeolit, akışkanlaştırıcılarla farklı bağlayıcı/agrega ve su/bağlayıcı oranları kullanılarak küp numuneler hazırlanmıştır. Uygun bağlayıcı/agrega oranı olarak 0,75 yerine 0,65 veya 0,55 kullanımının 60 MPa altındaki dayanımlarda çimento miktarını %10 kadar düşürebileceği görülmüştür [91].

Tydlitat ve diğerleri (2014) küttelece %40'a kadar zeolit katkılı çimentoların erken dönem hidrasyon ısı gelişimine katkısını izotermal kalorimetre cihazıyla araştırmışlardır. Nizny Hraboves/Slovakya maden bölgesinden temin edilen zeolit %74,7 SiO₂ ve %84 klinoptilolit içermekte olup, zeolitın Blaine değeri 852 m²/kg, BET değeri 30 665 m²/kg olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar katkılı bağlayıcılarda doğal zeolit bulunmasının C₃S hidrasyonunu hızlandırdığı ve C₃A hidrasyonunun ilk aşamasını kuvvetlendirdiğini göstermiştir. C₃A hidrasyonunun ikinci aşaması, artan zeolit oranıyla önem kazanmaktadır. %30'dan fazla zeolit içeren karışımlarda bu fazdaki maksimum özgül hidrasyon ısı, C₃S hidrasyonunun oluşturduğu maksimum ısıdan daha fazladır. Zeolitın artan ikame oranıyla etkisinin azaldığı gözlemlenmiş olup CEM I 42,5 R Portland çimentosu ve %10, %15, %20, %30, %40 oranlarında zeolit ikame edilerek yapılan deneylerde en uygun ikame oranının %10 olduğu sonucuna varmışlardır. %10 zeolitın sınır değer olduğu %10'dan fazla ikame edilen zeolitın bir kısmının doğrudan hidrasyona dâhil olmadığı ve filler özelliği gösterdiği şeklinde değerlendirmede bulunulmuştur [92].

Jo ve diğerleri (2012) Güney Kore'nin Kuzey Gyeongsang bölgesinden temin edilen zeolit, quartz ve alkali aktivatörlerle yapılan harçlar üzerinde çalışmalar yapmış olup yapılan deneylerde 7 gün içinde 28 günlük dayanımın %90'ına ulaşıldığını gözlemlemişlerdir. Zeolit çimentosuyla hazırlanan harçlarda 5 cm³'lük numunelerde yapılan deneylerde 7 günde 43,5 MPa dayanım değerlerine ulaşılmıştır [93].

Ahmadi ve diğerleri (2010) yaptıkları çalışmada İran'ın Semnan bölgesi madenlerinden temin edilen zeolitın betonun mekanik ve durabilite özelliklerini artırdığını gözlemlemiş olup elde edilen sonuçlar diğer mineral katkılarla yapılan betonlarla karşılaştırılmıştır. Aras baraj inşaatında kullanılmak üzere Aras nehrinden temin edilen agregalar, alkali silika reaksiyonu deneylerinde kullanılmıştır. Zeolitın ve uçucu külün %20-40 oranlarında kullanılmasının alkali-silika reaksiyonunu kontrol etmede etkili olduğu sonucuna varmışlardır [94].

Dayı ve diğerleri (2013) zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla zeolit, uçucu kül ve atık camla kompoze çimentolar üretilmiştir. Elde edilen kompoze çimentoların 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları kontrol çimentosu ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar zeolit, uçucu kül ve atık camın katkı maddesi niteliğinde çimento üretimi için uygun olacağını göstermiştir [95].

Nagrocki ve diğerkleri (2016) CEM I 42,5 R Portland çimentosu, doğal zeolit, ince ve kaba agrega kullanarak elde edilen betonların basınç dayanımı, su emme, yoğunluk, ultrasonik hız değerkleri, donma çözünmeye olan etkilerini araştırmışlardır. %10 zeolit ikame edilmesiyle beton basınç dayanımı %15 artmış olup su emme 2,3 kat azalmış, yoğunluk ve ultrasonik değerkler artmıştır. %10 zeolit ikamesiyle donma çözünmeye karşı 3,3 kat daha fazla dayanım elde edilmiştir [96].

Katebi ve diğerkleri (2018) İran'ın Semnan bölgesinden temin edilen %69,28 SiO₂ içeren zeolit ikame ederek yapılan betonda, deniz suyu klor iyonunun etkilerini araştırmışlardır. Su/çimento oranı 0,45 olarak öngörölmüş olan %10 ve %15 zeolit, %50-100 mikro-nano kabarcık suyu ikame edilerek yapılan çalışmada, %15 zeolit ve %100 mikro-nano kabarcık suyu eklenmesiyle 28 günlük betonun mekanik özelliklerinde ve durabilite özelliklerinde iyileşmeler meydana gelmiştir. %15 zeolit ikamesiyle basınç dayanımında %45'lik artış meydana gelmiş olup yarmada çekme dayanımında %78, elektriksel dirençte %254'lük bir iyileşme meydana gelmiştir. Ayrıca kontrol numunesine kıyasla klor geçirgenliği %83, su emme %49 azalmıştır. Standart ve klor koşullarında kürlleme yapılarak elde edilen beton numunelerin SEM, XRD analizleri yapılarak mikroyapıdaki değışimler gözlemlenmiştir. Klor iyonu kürlü koşullarındaki zeolit katkılı numunelerde, normal koşullarda kürlenen numunelere oranla daha az çatlak görölmüşür [97].

Kwan ve diğerkleri (2017) Çin'in Henan bölgesinden temin edilen ince zeolitleri ikame ederek farklı zeolit içerikleri, farklı su/çimento oranları ile 7 cm³'lük 30 farklı hamur karışımı elde etmişlerdir. %0, %5, %10, %15, %20 zeolit ikame edilerek ve su/çimento oranı 0,45-0,70 arasında değışerek elde edilen bu karışımlara 7, 28 ve 70 günde dayanım testleri, akışkanlık ve kohezyonluk deneyleri yapmışlardır. %20 zeolit ikamesinin erken dayanımı azalttığı ancak uzun dönem mukavemetini artırdığı gözlemlenmiştir [98].

Li ve diğerkleri (2018) Çin'in Henan bölgesinden temin edilen ince zeolitleri ikame ederek farklı zeolit içerikleri, farklı su/çimento oranları ile 7 cm³'lük 30 farklı hamur karışımı elde etmişlerdir. %0, %5, %10, %15, %20 zeolit ikame edilerek ve su/çimento oranı 0,45-0,70 arasında değışerek elde edilen bu karışımlara alternatif olarak ayrıca %10 silis dumanı da ilave ederek 7, 28 ve 70 günde dayanım testleri, akışkanlık ve kohezyonluk deneyleri yapmışlardır. Silis dumanı ilave edilen karışımlarda, ilave edilmeyen karışımlara göre uzun dönem dayanımlarda daha fazla artış meydana gelmiştir [99].

Shooshpasha ve arkadaşı (2016) İran'ın Semnan bölgesinden temin ettikleri zeoliti zemin ıslahında kullanılan çimentolanmış kum içinde kullanmışlardır. %2, %4, %6 ve %8 oranlarında zeminin kuru birim ağırlığı kadar çimento, karışımlarda kullanılmıştır. Hazar denizi kıyılarından temin edilen zeminde bulunan çimento yerine ağırlıkça % 10, %30, %50, %70, %90 oranında klinoptilolit türü zeolit ikame edilerek 38 mm çapında ve 76 mm boyunda numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin sıkıştırılmamış basınç dayanımında %30 zeolit ikame edildiğinde %20-78 arasında iyileşmeler görülmüştür. Daha fazla zeolit ikame edildiğinde basınç dayanımlarında düşüşler görülmüştür [100].

Lin ve arkadaşları (1999), su/çimento oranını 0,25 ve 0,30 alarak, zeoliti de %15, %25 oranlarında ikame ederek 7 cm³'lük hamurların 3, 7, 28, 90, 180. günde basınç dayanımlarına ve porozitelerine bakmışlardır. Düşük su/çimento oranı ile yapılan hamurlarda daha fazla dayanım elde edildiği, %15 zeolit ikamesinin poroziteyi azalttığı, %25 zeolit ikamesinin ise poroziteyi tüm günlerde arttırdığı yapılan deneylerde gözlemlenmiştir [101].



3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Deneylerde kullanılan agrega, silis kumu, mineral katkı maddesi (silis dumanı ve zeolit), çimento, su ve kimyasal katkı maddeleri hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Çimento

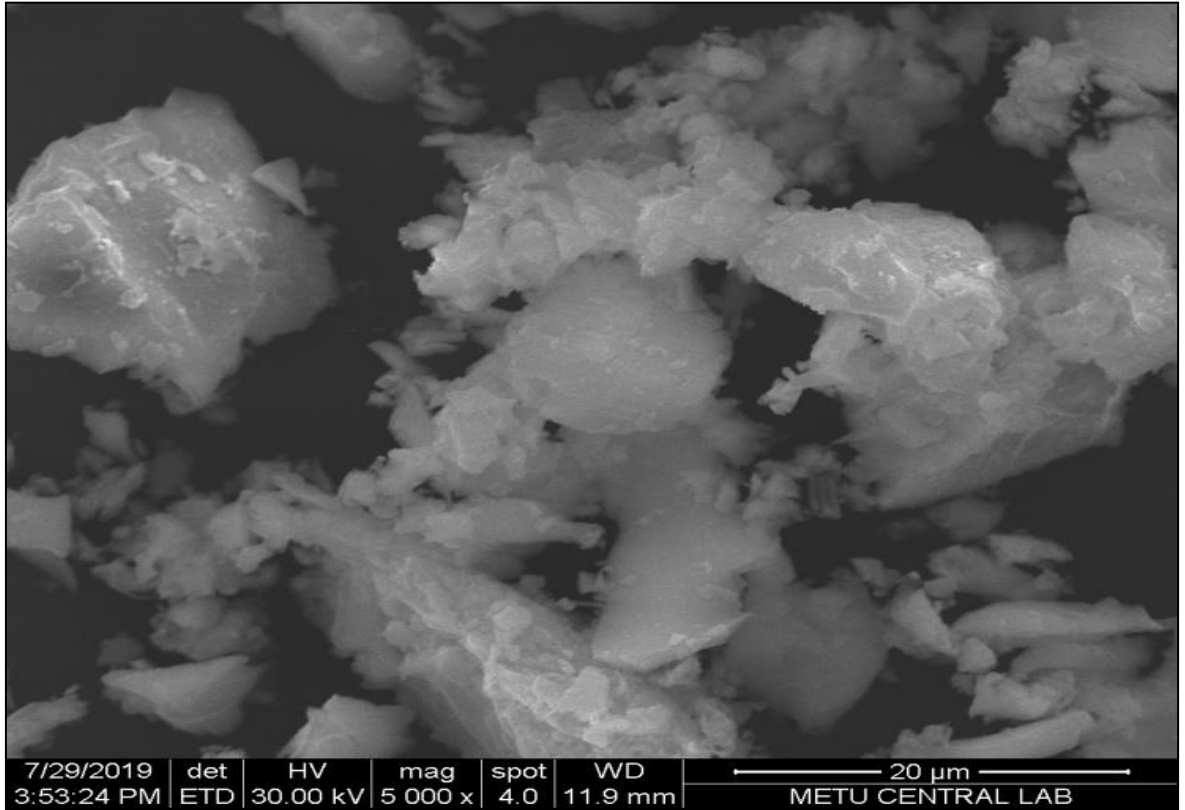
Deneylerde TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Priz başlama süresi 165 ve bitiş süresi 280 dakika olan çimentonun kimyasal ve fiziksel içeriği Çizelge 3.1'de, dayanım özellikleri ise Çizelge 3.2'de görülmektedir. Ayrıca hidrate olmamış çimentoya ait SEM görüntüsü Resim 3.1'de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Harç ve beton karışımlarında kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

İçerik	Ağırlık (%)
SiO ₂	19,39
CaO	63,24
Al ₂ O ₃	4,98
Fe ₂ O ₃	2,75
MgO	2,15
SO ₃	3,24
Na ₂ O	0,20
K ₂ O	0,7
Kızdırma Kaybı	3,70
Çözünmeyen Kalıntı	0,89
Yoğunluk (g/cm ³)	3,11
Blaine değeri (cm ² /g)	3640

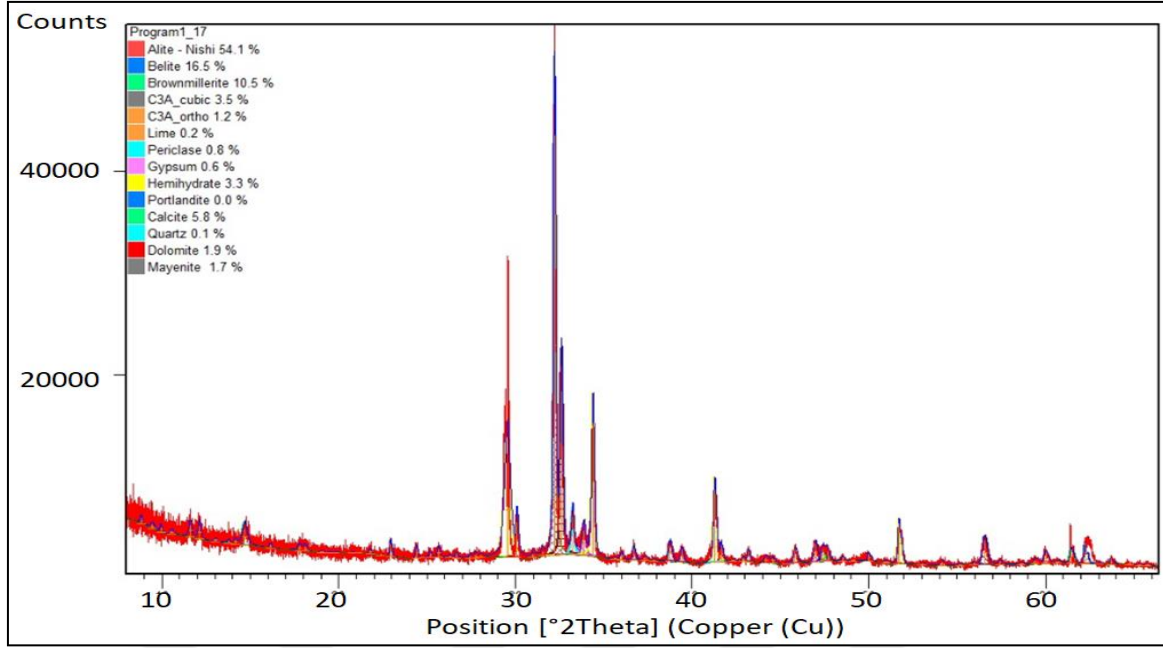
Çizelge 3.2. Harç ve beton karışımlarında kullanılan çimentonun dayanım özellikleri

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)
3	26,2
7	38,9
28	47,8



Resim 3.1. Harç ve beton karışımlarında kullanılan hidrate olmamış çimentoya ait SEM görüntüsü

Kullanılan çimentonun ana bileşenleri ve minör bileşenler D.S.İ. Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı Beton Laboratuvarında yapılan Rietveld Analizi yöntemiyle bulunmuştur. Bu kapsamda kullanılan çimentoda %54 Alite-Nishi (C_3S), %16,5 Belite (C_2S), %10,5 Brownmillerite (C_4AF), %3,5 kübik C_3A , %1,2 ortho C_3A , %0,2 kireç, %0,8 periklas, %0,6 alçı, %3,3 hemihidrat, %5,8 kalsit, %0,1 quartz, %1,9 dolomit ve %1,7 kübik mayenit bulunmuştur. Çimentoya ait Rietveld analizi grafiği Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Kullanılan hidrate olmamış çimentoya ait Rietveld analizi grafiği

3.1.2. Zeolit

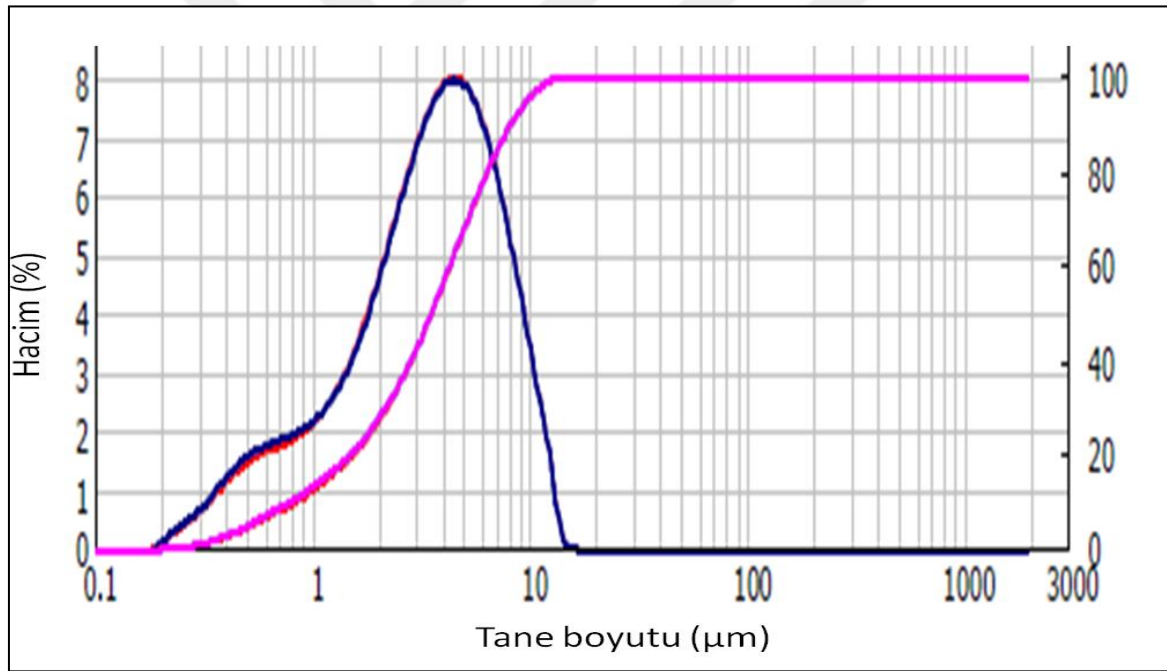
Manisa yöresinde faaliyet gösteren bir firmadan temin edilen klinoptilolit türü çok ince öğütülmüş doğal zeolit deneylerde kullanılmıştır. Deneysel çalışmalara başlanan Nisan 2018 ayında 1 kilo zeolit yaklaşık 1,5 TL+KDV civarında maliyetle temin edilmiştir. Zeolit'in kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3'te, Malvern Mastersizer 2000 aleti yardımıyla elde edilen lazer tane boyut dağılımı Şekil 3.2'de görülmekte olup mavi renkli eğri hacimsel olarak tane boyutunu, mor renkli eğri kümülatif değerleri göstermektedir. Dane çapı dağılımı $d(10)$: 0,78 μm , $d(50)$: 3,51 μm , $d(90)$: 8,162 μm 'dur. Kullanılan zeolite ait SEM görüntüsü Resim 3.2'de görülmektedir. Görüntüde gözüken karmaşık şekiller kristal yapının her doğrultuda olmasını sağlamaktadır.

Çizelge 3.3. Kullanılan zeolitin kimyasal ve fiziksel özellikleri

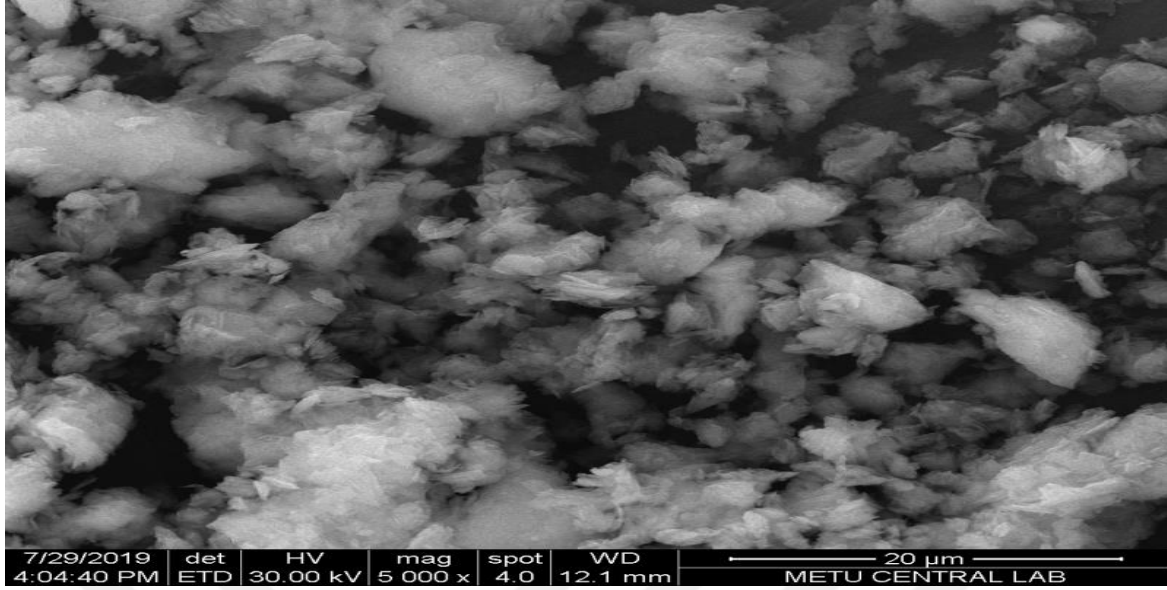
İçerik	Ağırlık (%)
SiO ₂	65-72
CaO	2,4-3,7
Al ₂ O ₃	10-12
Fe ₂ O ₃	0,7-1,9

Çizelge 3.3 (devam). Kullanılan zeolitin kimyasal ve fiziksel özellikleri

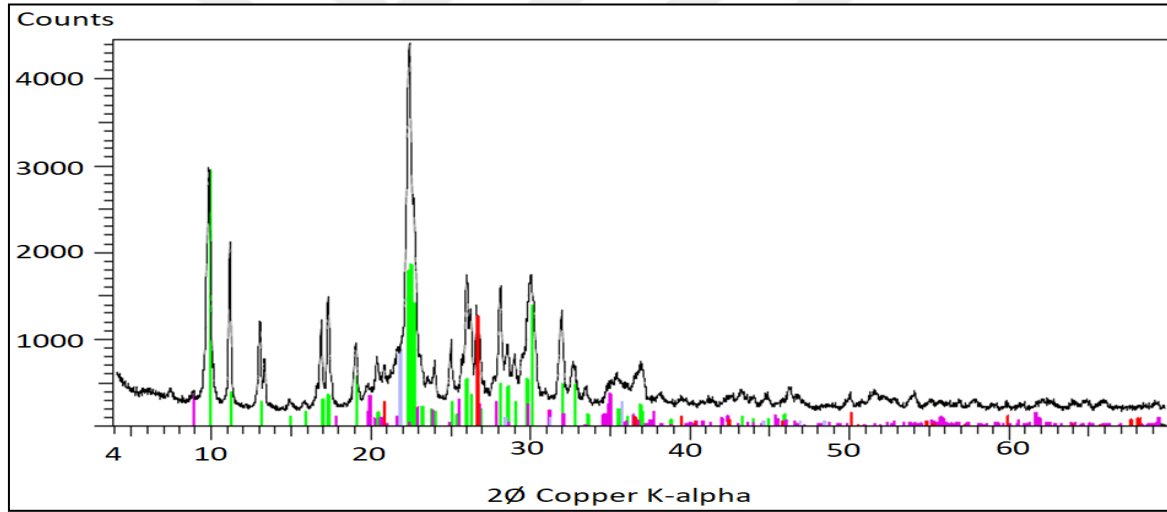
İçerik	Ağırlık (%)
MgO	0,9-1,2
SO ₃	0,22-0,46
Na ₂ O	0,1-0,5
K ₂ O	2,5-3,8
Kızdırma Kaybı	9-14
Çözünmeyen Kalıntı	-
Yoğunluk (g/cm ³)	2,3
BET değeri (cm ² /g)	458 624



Şekil 3.2. Kullanılan zeolite ait lazer tane boyu dağılımı



Resim 3.2. Harç ve beton karışımlarında kullanılan zeolite ait SEM görüntüsü



Şekil 3.3. Kullanılan zeolite ait XRD grafiği

Kullanılan zeolite ait XRD grafiği Şekil 3.3'te görülmekte olup yapılan inceleme sonucu içerisinde %86,1 klinoptilolit, %1,9 quartz, %3,6 smektit, %8,4 opal ve mika taneleri tespit edilmiştir.

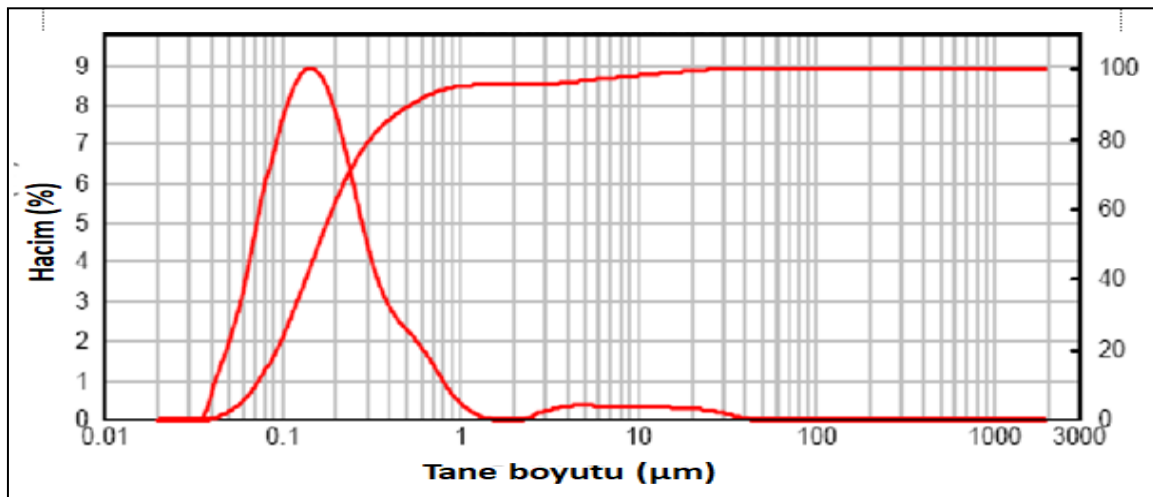
3.1.3. Silis dumanı

Çalışmada Norveç'ten ithal edilen silis dumanı kullanılmış olup kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.4'te görülmektedir. Deneysel çalışmalara başlanan Nisan 2018 ayında 1 kilo ithal silis dumanı yaklaşık 1,5 €+KDV civarında maliyetle temin edilmiştir. Kullanılan silis dumanına ait dane çapı dağılımı d(50): 0,5 µm olup Malvern Nano ZS

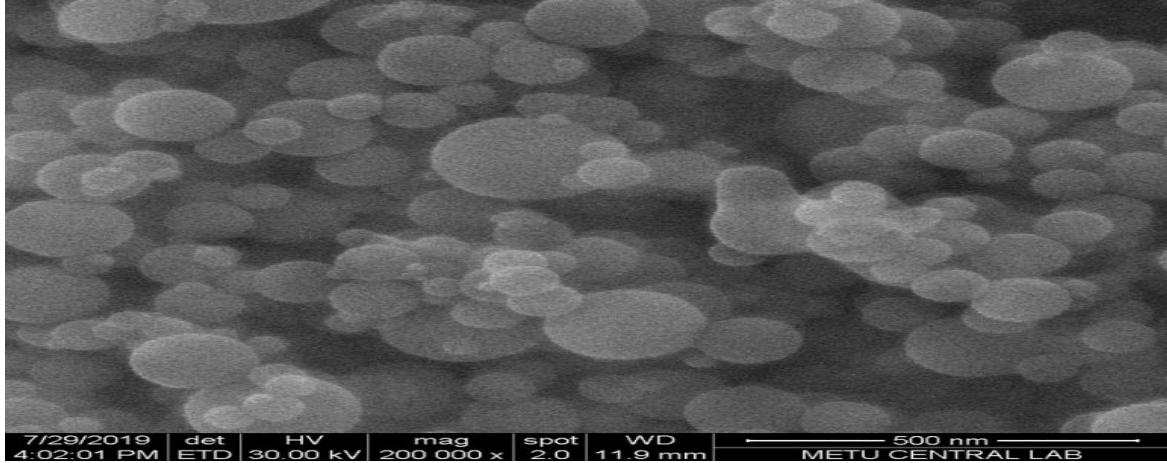
yardımıyla elde edilen tane boyu dağılımı Şekil 3.4'te görülmektedir. Soldaki eğri hacimsel olarak tane boyutunu, sağdaki eğri kümülatif değerleri göstermektedir. XRD grafiği Şekil 3.5'te, SEM görüntüsü Resim 3.3'te görülmektedir. Bahse konu görüntüde silis dumanına özgü küresel yapılar gözükmemektedir.

Çizelge 3.4. Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

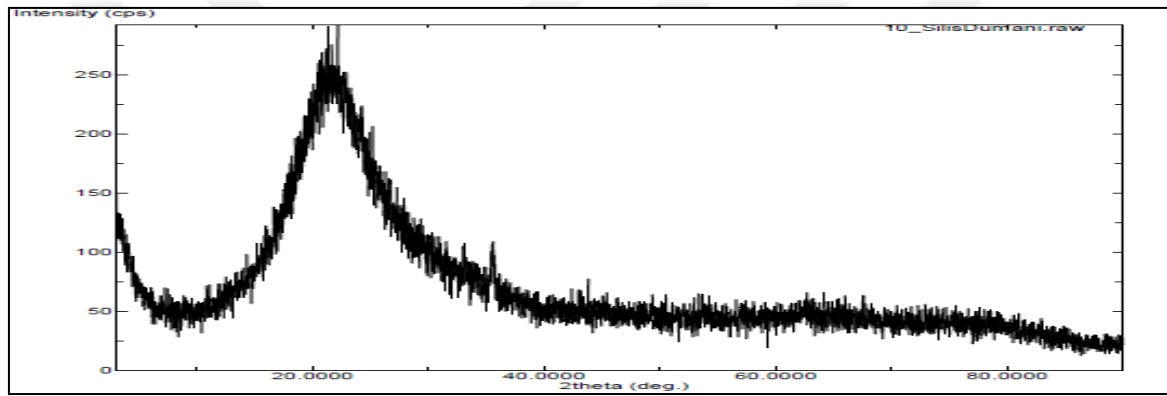
İçerik	Ağırlık (%)
SiO ₂	94
CaO	0,35
Al ₂ O ₃	0,23
Fe ₂ O ₃	0,13
MgO	0,43
SO ₃	0,83
Na ₂ O	0,6
K ₂ O	2,7
Kızdırma Kaybı	3,5
Çözünmeyen Kalıntı	-
Yoğunluk (g/cm ³)	2,4
BET değeri (cm ² /g)	331 000



Şekil 3.4. Kullanılan silis dumanına ait tane boyu dağılımı



Resim 3.3. Harç ve beton karışımlarında kullanılan silis dumanına ait SEM görüntüsü



Şekil 3.5. Kullanılan silis dumanına ait XRD grafiği

3.1.4. Silis kumu

Harç karışımlarının hazırlanması esnasında TS EN 196-1'e uygun CEN standart kumu kullanılmış olup özellikleri Çizelge 3.5'te görülmektedir.

Çizelge 3.5. Harç karışımlarında kullanılan silis kumunun özellikleri

İçerik	Ağırlık (%)
SiO ₂	99,31
CaO	0,05
Al ₂ O ₃	0,29
Fe ₂ O ₃	0,05
MgO	-
SO ₃	-

Çizelge 3.5 (devam). Harç karışımlarında kullanılan silis kumunun özellikleri

İçerik	Ağırlık (%)
Na ₂ O	-
K ₂ O	0,02
Kızdırma Kaybı	0,09

3.1.5. Agregalar

Ankara Hasanoğlu bölgesi taş ocaklarından temin edilen kalkerli kırma taş agregalar deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Karışımlarda %60 ince agregalar (0-4 mm), %20 kaba agregalar (4-11,2 mm), %20 kaba agregalar (11,2-22,4 mm) kullanılmış olup agregalar özellikleri Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de görülmektedir.

Çizelge 3.6. Kullanılan agregalara ait doygun yüzey kuru, kuru birim ağırlıklar ve su emme oranları (TS 1097-6)

Agrega	0-4 (mm)	4-11,2 (mm)	11,2-22,4 (mm)
γ_{dyk} (g/cm ³)	2,69	2,65	2,7
γ_k (g/cm ³)	2,67	2,63	2,6
Su emme (%)	0,58	0,59	0,1

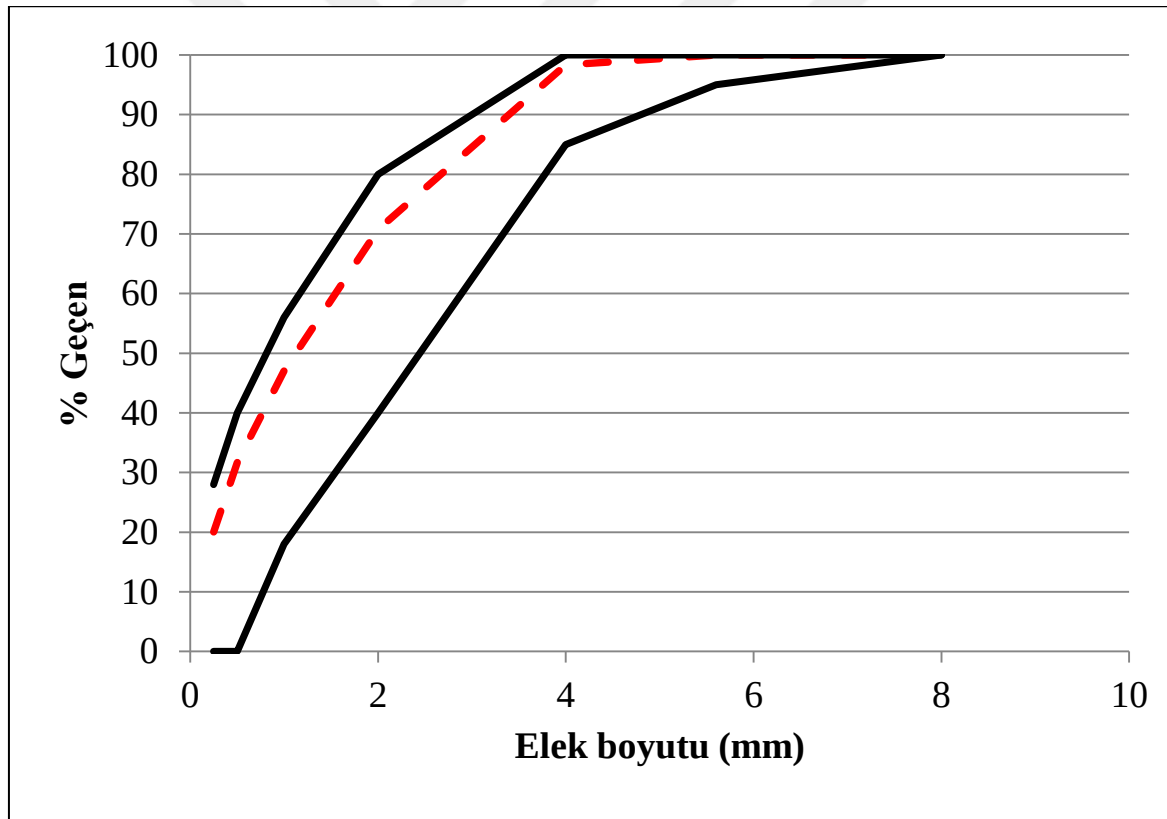
Çizelge 3.7. Kullanılan agregalara ait gradasyon sonuçları

Kümülatif Geçen, %			
Elek (mm)	0-4 (mm)	4-11,2 (mm)	11,2-22,4 (mm)
44,8	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	90,5
16	100,0	100,0	46,1
11,2	100,0	97,0	10,6
8,0	100,0	55,4	5
5,6	100,0	14,3	-
4	98,34	-	-

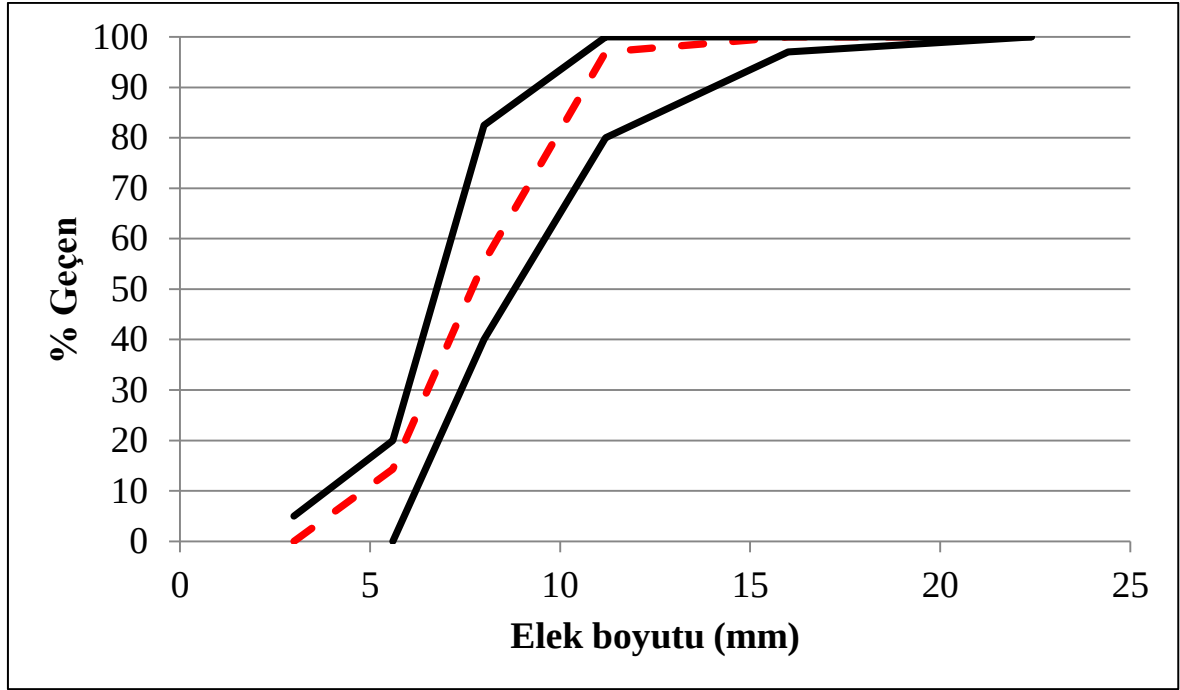
Çizelge 3.7 (devam). Kullanılan agregalara ait gradasyon sonuçları

Elek (mm)	0-4 (mm)	4-11,2 (mm)	11,2-22,4 (mm)
2	70,78	-	-
1	47,02	-	-
0,5	31,68	-	-
0,25	20,04	-	-
0,125	-	-	-

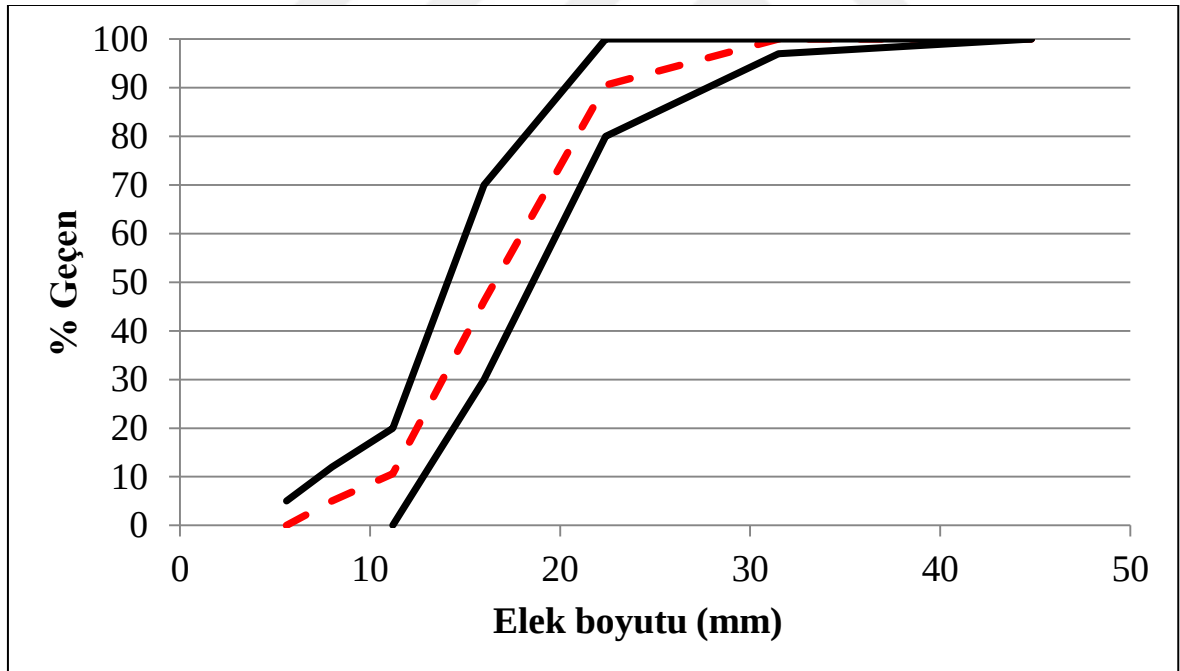
Deneysel çalışmalarda kullanılan 0-4 mm agregalara ait gradasyon grafiği Şekil 3.6'da, 4-11,2 mm agregalara ait gradasyon grafiği Şekil 3.7'de, 11,2-22,4 mm agregalara ait gradasyon grafiği Şekil 3.8'de görülmektedir. Siyah eğriler alt ve üst limitleri, kesik kırmızı çizgi agregalara ait gradasyonu göstermektedir.



Şekil 3.6. Kullanılan 0-4 mm agregaya ait gradasyon grafiği



Şekil 3.7. Kullanılan 4-11,2 mm agregaya ait gradasyon grafiği



Şekil 3.8. Kullanılan 11,2-22,4 mm agregaya ait gradasyon grafiği

3.1.6. Akışkanlaştırıcı

Mineral katkıların oluşturacağı olumsuzlukları azaltma ve kıvamı ayarlayabilmek için beton ve harç karışımlarına %1,5-2 oranında melamin sülfonat esaslı toz süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmış olup özellikleri Çizelge 3.8’de görülmektedir.

Toz akışkanlaştırıcı içindeki etken madde, sıvı akışkanlaştırıcıda bulunan etken maddeden daha fazla olduğu için malzeme miktarını azaltmak ve kaliteli şekilde su azaltımı sağlamak amacıyla deneysel çalışmalarda toz akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çalışmada toz akışkanlaştırıcı tercih edilmesinin sebepleri; sıvı akışkanlaştırıcının yarısının su olması ve hesaplarda tekrar su düzenlemesine ihtiyaç bulunulması, ayrıca toz akışkanlaştırıcı kullanımının ve taşımalarının daha kolay olmasıdır.

Çizelge 3.8. Akışkanlaştırıcı özellikleri

Özellik	Değer
Malzeme Yapısı	Melamin Sülfonat
Görünüm	Toz, Beyaz
Yoğunluk	$1,80 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ (20°C)
pH	$10 \pm 0,01$

3.1.7. Su

Karışımlarda su olarak Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Metot

Tez konusu belirlendikten sonra ilk aşamada temin edilen kaba daneli Gördes/MANİSA zeoliti 10 saat boyunca laboratuvar ortamında diskli öğütücüde öğütülmüştür. Öğütülen zeolitin yoğunluğu piknometre yardımıyla $2,2 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. Öğütülen zeolitin Blaine değeri $12\ 800 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak hesaplanmış olup Malvern Mastersizer 2000 aleti ile yapılan tane boyu dağılımı analizinde %50'sinin 9 mikronluk elekten geçtiği saptanmıştır.

45 μm elek deneyi için 1 gram öğütülmüş zeolit tartılmıştır. ASTM C 430 [103], doğrultusunda debili su altında 45 μm elek üzerine 1 gram zeolit konularak yıkama işlemi yapılmış olup müteakiben 45 μm elek 24 saat boyunca etüvde bekletilmiştir. Deney sonucunda elek üzerinde 0,19 gram zeolit saptanmıştır. Bu kapsamda malzemenin %81'i 45 μm elekten geçmiştir.

Öğütme işleminin zorluğu, az miktarda zeolitin uzun sürede öğütülmesi başka arayışlar yapılmasına neden olmuştur. Bu kapsamda Gördes/MANİSA yöresinde madencilik faaliyetleri gösteren bir firmadan mikronize seviyede öğütülmüş zeolit temin edilerek

ASTM C 311 [104] doğrultusunda 5x5x5 cm küp harç numunelerle puzolanik aktivite deneyleri yapılmıştır. Kullanılan malzemenin puzolan olarak kullanılabilmesi için ASTM C 618 [105] doğrultusunda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının %70'den fazla olması gerekmekte olup kullanılan zeolitte bu oran %80,3'tür. Aynı zamanda ne tür silis dumanı kullanılmasının uygun olabileceğini anlamak için Antalya Ferro Krom tesislerinden elde edilen silis dumanı ve ithal Norveç silis dumanı ile harç basınç deneyleri yapılmış olup sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. ASTM C 1240 [46], kapsamında maksimum ikame oranı olan %10 silis dumanı ikame edilerek yapılan deneylerde ithal Norveç silis dumanı kullanımı ile daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Zeolit ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ikame edilerek yapılan deneyler sonucu %15 zeolit ikamesinin dayanım olarak %10 silis dumanına yakın olduğu bu kapsamda ekonomik hususlarda göz önünde bulundurularak deneysel çalışmalarda %15 zeolit ikame etmenin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Khoshroo ve diğerleri (2018) de zeolit ile yapmış oldukları çalışmada en uygun ikame oranının %15 olduğu sonucuna varmışlardır [97]. Tüm deneysel çalışmalar sonucunda temin edilen zeolitin puzolanik aktivite gösterdiği sonucuna varılmıştır.

3.2.1. Harç deneyleri

ASTM C 311 [104], ASTM C 305 [107], ASTM C109 [108], doğrultusunda tüm karışımlarda 1375 gram kum, 242 ml su, 500 gram bağlayıcı ve akışkanlaştırıcı kullanılarak 5x5x5 cm küp numuneler elde edilmiştir. Karıştırma kabına önce su, ardından bağlayıcı konularak karıştırıcı 30 saniye 140 devir/dakika hızla karıştırılmıştır. Sonraki 30 saniye boyunca 140 devir/dakika hızla çalıştırılan alete kum eklenmiştir. Bir sonraki 30 saniyede 285 devir/dakika hızla karıştırmaya devam edilmiştir. Sonra karıştırıcı 90 saniye durdurulmuştur. Harç tanelerinin kaba yapışmaması için kabın etrafı spatula yardımıyla kazınmıştır. Nihai olarak 60 saniye boyunca 285 devir/dakika hızla karıştırma işlemi yapılarak harçlar 2 tabaka halinde sıkıştırılmış ve kalıplara yerleştirilmiştir. Harç numunelerinin karışım oranları Çizelge 3.9'da görülmekte olup harç numunelerinin hazırlanmasına ait görüntü Resim 3.4'te, hazırlanan harç numunelerine ait görüntü Resim 3.5'te görülmektedir. Kontrol numuneleri K ile, silis dumanı ikameli numuneler SD ile, zeolit ikameli numuneler ise Z5, Z10, Z15, Z20 şeklinde kodlanarak yazılmıştır.

Çizelge 3.9. Harç numuneleri karışım oranları

Karışım harcı	Kum (g)	Çimento (g)	Su (ml)	Zeolit (g)	Silis Dumanı (g)	Akışkanlaştırıcı (g)
K	1375	500	242	-	-	7
SD	1375	450	242	-	50	8,5
Z5	1375	475	242	25	-	9
Z10	1375	450	242	50	-	9
Z15	1375	425	242	75	-	9
Z20	1375	400	242	100	-	9



Resim 3.4. Harç numunelerinin hazırlanması



Resim 3.5. Hazırlanan harç numuneleri

Yayılma deneyi

Harçlarda aynı yayılma değerlerini elde etmek amacıyla yayılma tablasında hazırlanan her bir harç numunesi için ASTM C 1437 [109], doğrultusunda Resim 3.6’da yer alan yayılma deneyi yapılmıştır. Tablanın üzerine yüksekliği 50 mm, taban çapı 100 mm ve üst çapı 70 mm olan kesik koni şeklindeki kalıp yerleştirilmiştir. Taze harçla doldurulan kalıp düzgünce kaldırıldıktan sonra taze harç, 15 saniyede 25 kez olacak şekilde düşürülerek yayılma çapı iki farklı doğrultuda ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır.



Resim 3.6. Hazırlanan harç numunelerine yapılan yayılma deneyi

Harç basınç deneyi

Kontrol, silis dumanı ikameli ve zeolit ikameli olmak üzere karışımlara ait 3, 7, 28 ve 56 günlük kırılmalar için her gruptan en az 3 adet olmak üzere toplam 84 adet 5x5x5 cm küp numuneye BAZ MAKİNE marka test cihazlarıyla ortalama 2224 N/s yükleme hızıyla Resim 3.7’de görülmekte olan basınç deneyleri yapılmıştır.



Resim 3.7. Hazırlanan harç numunelerine yapılan basınç deneyi

Harçlarla yapılan diğer deneyler

Harçların pozolanik aktivitelerini değerlendirebilmek amacıyla zeolit ikame oranının belirlenmesi sonrasında 7 ve 28 günlük 36 adet numuneye birim hacim ağırlık, su emme ve ultrasonik hız deneyleri yapılmıştır.

3.2.2. Beton deneyleri

Harç numunelerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda 210 adet 10x20 cm silindir, 18 adet 10x10x10 cm küp beton numuneler hazırlanmıştır. Beton karışım hesabı ACI 211 [110] (Amerikan Beton Enstitüsü) karışım dizaynı esaslarına göre yapılmıştır.

Çizelge 3.10. Agregaların sahadaki durumuna göre düzenlenen 1 m³ beton için karışım hesabı

Malzeme	Kontrol (kg)	Silis Dumanı (kg)	Zeolit (kg)
Çimento	350	315	297,5
Su	165	166,5	166,5
Silis Dumanı	-	35	-
Zeolit	-	-	52,5
0-4 mm Agregası	1147	1137	1137
4-11,2 mm Agregası	383	379	379
11,2-22,4 mm Agregası	386	382	382
Akışkanlaştırıcı	4,9	5,95	6,3
TOPLAM	2436,4	2420,5	2420,8

Hesaplamalarda su/bağlayıcı oranı 0,45 olarak öngörülmüştür. Başlangıç su miktarı 157,5 kg olarak alınmış olup agregaların su emme durumları göz önüne alınarak Çizelge 3.10'daki karışım hesabı elde edilmiştir. Önce 11,2-22,4 mm boyutlarındaki kaba agregası, sonra 4-11,2 mm boyutlarındaki kaba agregası ve en son 0-4 mm boyutlarındaki ince agregası tartılarak betoniye yerleştirilmiş ve 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra bağlayıcı, akışkanlaştırıcı ve su katılarak 3 dakika boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Tüm dökümler Resim 3.8'de görülen 40 dm³ hacimli pan tipi betoniyerde yapılmıştır.



Resim 3.8. Beton karışımlarının hazırlanması



Resim 3.9. Hazırlanan 10x20 cm silindir beton numuneleri



Resim 3.10. Hazırlanan 10x10x10 cm küp beton numuneleri

Resim 3.9 ve Resim 3.10'da görülmekte olan beton numuneler kalıba yerleştirilmelerinden 24 saat sonra kalıplarından çıkartılarak Resim 3.11'de görülen kür havuzuna konulmuş olup deney gününe kadar laboratuvar koşullarında kür havuzunda bekletilmiştir.



Resim 3.11. Kür havuzunda bekletilen beton numuneleri

Slump deneyi

ASTM C 143 doğrultusunda [106] üst taban çapı 10 cm, alt taban çapı 20 cm, yüksekliği 30 cm olan metal huniye 3 tabaka halinde her tabakada 25 şişleme yapılarak taze beton doldurulmuştur. Metal tepsi içinde bulunan huni, tutma yerlerinden tutularak 5-10 saniye içinde sabit hızda düşey olarak düz bir şekilde çekilmiştir. Çekilen huni ters çevrilip yığılan betonun yanına konulmuş ve üzerine de bir ucu betonun üzerinde olacak şekilde şişleme çubuğu konulmuştur. Çubuğun alt yüzü ile betonun üst yüzünün ortalama yüksekliği arasındaki mesafe ölçülerek slump değerleri bulunmuştur. Karışımların slump değerleri Resim 3.12’de görüldüğü şekilde ölçülmüştür.



Resim 3.12. Hazırlanan beton numunelerine yapılan slump deneyi

Birim hacim ağırlık

Hacim ve darası bilinen bir kap içine taze harç şişle koyulduktan sonra tartılarak hesaplanan net ağırlığın kap hacmine oranı ile karışımlara ait birim hacim ağırlıklar ASTM C 29’a [111] göre hesaplanmıştır.

Hesaplama

$$\Delta = \frac{W}{V} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$$

formülü kullanılmıştır. Formülde;

$$\Delta = \text{Birim hacim ağırlık (g/cm}^3\text{)}$$

W = Etüv kurusu (g)

V = Numunenin hacmi (cm^3)'dir.

Hava oranı tespiti

ASTM C 231 [112] doğrultusunda Resim 3.13'te görülen hava cihazına 1 bar basınçlık hava verilerek değerler okunmuştur. Hacmi 5 litre ve çap/yükseklik oranı 0,75 olan bir kaba, hazırlanan beton 3 tabakada doldurulmuştur. Her tabaka 25 kere şişlenerek sıkıştırma işlemi yapılmış olup hava boşluğu bırakmamak için kabın dış kenarlarına tokmak ile hafifçe vurulmuştur. Kalibrasyonu yapılmış hava ölçme kapağı sıkıca kapatılarak bir vanadan diğer vanaya su çıkıncaya kadar su doldurulmuştur. Su doldurma işlemi ile beton ve kapağın arasında boşluk kalmaması sağlanmıştır. Tüm valfler kapatılarak kapalı hava hücresine, basınç gösterge ibresi başlangıç basınç çizgisine gelinceye kadar hava pompalanmıştır. Daha sonra ana hava mandalına basılıp, basınçlı hava kap içerisine bırakılarak göstergeden hava oranı okunmuştur.



Resim 3.13. Hava oranı tespiti

Silindir basınç deneyi

ASTM C 39'a [113], göre hazırlanan 10x20 cm silindir beton numunelere başlık yapılarak Resim 3.14'te görülen basınç deneyleri yapılmıştır. Her karışımdan her deney günü 3000 kN maksimum yük kapasiteli hidrolik yük kontrollü beton basınç dayanım presinde 3 kN/s yükleme hızı uygulanarak minimum 3 adet numune ile yapılan deney sonuçlarının ortalaması alınmıştır.

Hesaplama

$$fb = \frac{P}{A} (MPa)$$

formülü kullanılmıştır. Formülde;

fb = Basınç dayanımı (MPa),

P = Kırılma anındaki yük (N),

A = Yüzey alanı (mm^2)'dır.



Resim 3.14. Beton silindir basınç deneyi (10x20 cm numune)

Silindir yarmada çekme deneyi

ASTM C 496'ya [114], göre hazırlanan 10x20 cm beton numunelere Resim 3.15'te görülen yarmada çekme deneyi yapılmıştır.

Hesaplama

$$f_{\zeta} = \frac{2P}{\pi L D} (MPa)$$

formülü kullanılmıştır. Formülde;

f_{ζ} = Yarma dayanımı (MPa),

P = Kırılma anındaki yük (N),

L = Uzunluk (mm),

D = Çap (mm)'tir.



Resim 3.15. Beton silindir yarmada çekme deneyi

Su emme oranı, toplam nem oranı, özgül ağırlık ve porozite deneyi

ASTM C 642'ye [115], uygun olarak 10 cm³'lük küp numunelerin 7 ve 28. günlerde su emme oranları, toplam nem oranları, porozite değerleri hesaplanmıştır. Numuneler deneylerden 1 gün önce kür havuzundan çıkartılarak etüvde kurutulmuştur. Numunelerin doygun ıslak yüzey, doygun kuru yüzey, etüv kurusu, arşimed terazisi ile su altındaki ağırlıkları ölçülerek su emme oranları, poroziteleri, toplam nem ve özgül ağırlıkları hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda

$$Su\ emme\ oranı = \frac{B - A}{A} \times 100$$

$$Toplam\ nem\ oranı = \frac{C - A}{A} \times 100$$

$$Özgöl\ ağırlık = \frac{B}{B - D}$$

$$Porozite = Su\ emme\ oranı \times Özgöl\ ağırlık$$

formülleri kullanılmıştır. Formüllerde;

B = Doygun kuru yüzey ağırlık (g),

A = Etüv kurusu ağırlık (g),

C = Doygun ıslak yüzey ağırlık (g),

D = Arşimed terazisindeki su altındaki ağırlık (g)'tır.

Klor-iyon geçirgenliği deneyi

Klor-iyon geçirgenliği deneyleri ASTM C 1202'ye [116], uygun olarak Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme laboratuvarında 7, 28 ve 365. günlerde 10x20 cm'lik numunelerden 5 cm boyunda betonlar kesilerek yapılmış olup çalışmaya ait görüntüler Resim 3.16 ve Resim 3.17'de görülmektedir.



Resim 3.16. Numunelerin kesilmesi



Resim 3.17. 50 mm kalınlığında kesilen numuneler



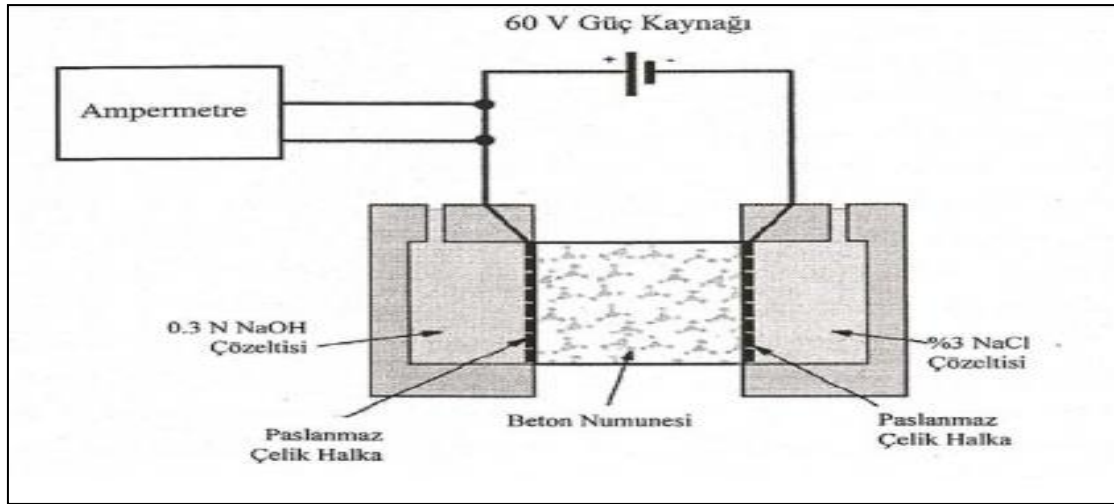
Resim 3.18. Kesilen numunelerin desikatöre yerleştirilmesi

Kesilen numuneler Resim 3.18’de görüldüğü şekilde desikatöre yerleştirildikten sonra 3 saat boyunca vakum yapılmış olup 3 saat sonunda vakum pompası çalışırken funel altındaki vana açılarak desikatöre numunelerin üzerini kaplayacak kadar kaynatılmış su doldurulmuş ve funel altındaki vana kapatılmıştır. 1 saat süreyle daha vakuma devam edilmiş olup 1 saat sonunda vakum kapatılmış ve vakum vanası açılarak desikatör içerisine hava girişine izin verilmiştir. Hava uygulamasının ardından numuneler 18 saat boyunca su dolu desikatörde bekletilmiştir.



Resim 3.19. Klor-iyon geçirgenliği deneyi düzeneği

Şekil 3.9'da görülen düzenek gereği deney numuneleri deney hücreleri arasına yerleştirilmiştir. Saf su ile hazırlanmış kütlece %3 NaCl çözelti ve saf su ile hazırlanmış 0,3 N NaOH çözelti hazırlanarak deney hücrelerine konulmuştur. Her numuneye 6 saat boyunca 60 V elektrik akımı uygulanmış olup deney görüntüsü Resim 3.19'da görülmektedir.



Şekil 3.9. Klor-iyon geçirgenliği deneyi düzeneği

Elastisite modülü ve poisson oranı hesaplanması

ASTM C469 [117] doğrultusunda 28 günlük 10x20 cm silindirik beton numunelere Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme laboratuvarında Resim 3.20 ve Resim 3.21'de görülen MTS Landmark 250 servo kontrollü deney aletiyle

elastisite modülü deneyi yapılmıştır. Deney esnasında yatay ve düşey deformasyonlar da ölçülerek numunelere ait poisson oranları hesaplanmıştır.



Resim 3.20. Numunenin elastisite modülü deneyine hazırlanması

28. günde numunelerin basınç deneyleri sonucunda elde edilen kırılma yükünün %40'ına kadar beton numuneler MTS marka deney aletiyle yüklenmiş olup yükleme sonunda oluşan deformasyonlar, numunenin her iki tarafında bulunan LVDT'ler yardımıyla kaydedilmiştir. Elde edilen yük-deformasyon grafiklerinden bulunan elastisite modülü değerlerinin ortalaması alınmıştır.



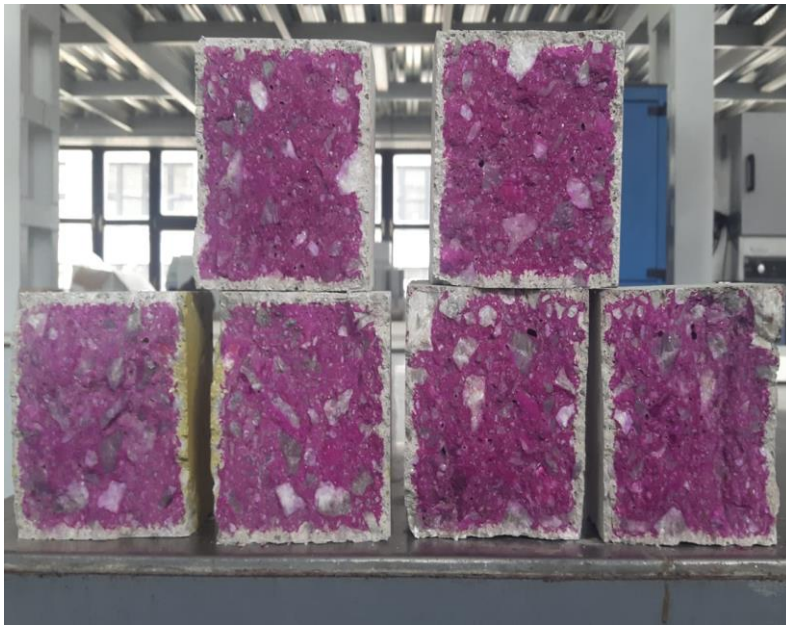
Resim 3.21. Elastisite modülü deneyi

Karbonasyon deneyi

7 ve 28 günlük beton numuneler, hızlandırılmış karbonasyon deneyi için 1 atmosferik basınçta karbonasyon tankının içine konulmuştur. Karbonatlaşma testi; betonun zenginleştirilmiş karbondioksit ortamına bırakılmasıdır [18]. Resim 3.22’de görülen CO₂ dolu tank içinde 24 saat bekletilen 10 cm³’lük beton numuneler tanktan çıkartılarak kırılmıştır. Kırılan yüzeylere %1 fenolftalin içeren çözelti püskürtülerek renk değişimi olmayan yerlerin yüzeyden uzunlukları ölçülmüş ve karbonasyon derinlikleri bulunmuştur. Deney sonrası numuneler Resim 3.23’te görülmektedir.



Resim 3.22. Karbonasyon tankı



Resim 3.23. Karbonasyon deneyi sonunda numuneler

Ultrasonik dalga hız deneyi

ASTM C 597 [118] doğrultusunda 7 ve 28. günlerde her beton karışımından her deney günü 6 adet 10 cm³'lük kuru numuneye D.S.İ. Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Daire Başkanlığı beton laboratuvarında ultrasonik hız deneyleri yapılmıştır. Küp numunelerin karşılıklı 2 yüzeyine konulan probler sayesinde sesin numune içindeki süresi ölçülerek kaydedilmiştir.

Kılcallık (kapiler) deneyi

7 ve 28. günlerde her beton karışımından her deney günü 3 adet 10 cm³'lük numuneye kılcallık deneyi yapılmıştır. Her bir karışım için hazırlanan küp numuneler ağırlıkları sabit oluncaya kadar etüvde tutulmuştur. Numunelerin suyla temas edecek yüzeylerinin yan tarafları yaklaşık 10 mm'lik bir parafin tabakasıyla kaplanmış ve bu şekilde tartılarak ilk ağırlığı kaydedilmiştir. Beton numunesi 3±1 mm derinlikte suya batacak şekilde yerleştirilerek yüzeyden su emmesi sağlanmış olup deney düzeneği Şekil 3.10'da görülmektedir. Bu şekilde kılcal su emme yoluyla kütleye numuneye geçen su miktarı belli süreler (1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144, 169, 196, 226, 259, 294, 1440 dak.) sonunda belirlenmiştir. Bu değerler bir grafikte ölçüm zamanlarının kareköküne karşılık birer noktada belirtilmiş olup bu noktalar arasından geçen en uygun doğru çizilmiştir. Bu doğrunun eğimi $\text{cm} \sqrt{\text{sn}}$ cinsinden belirlenmiş ve kılcallık katsayısı olarak kaydedilmiştir. Kapilarite katsayısının hesaplanmasında;

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

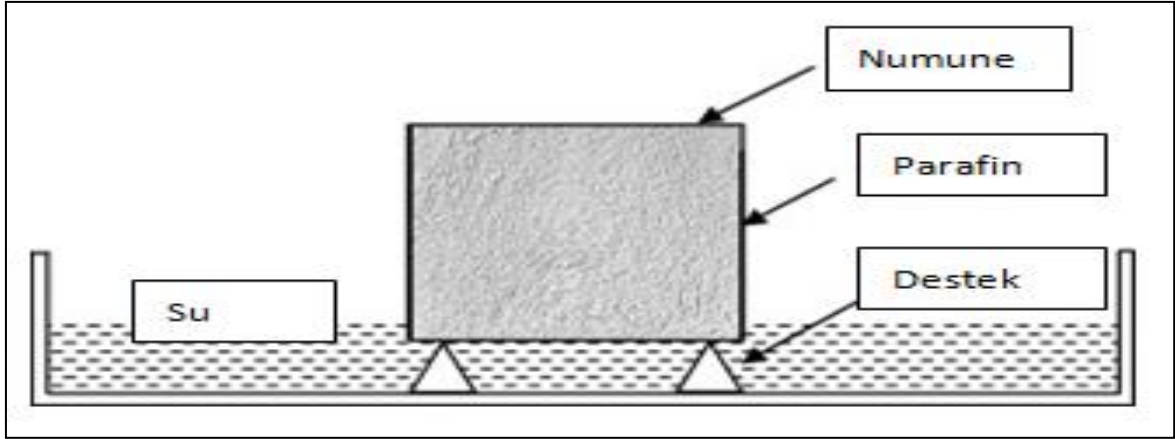
formülü kullanılmıştır [120]. Formülde;

k : Kılcallık katsayısı ($\text{cm}\sqrt{\text{sn}}$),

A : Su ile temas eden yüzey (cm^2),

t : Zaman (sn),

Q : Emilen su miktarı (cm^3)'dır.



Şekil 3.10. Kılcallık (kapiler) deneyi düzeneği

Hidratasyon ısısı deneyi

ASTM C 1702 [119] doğrultusunda kullanılan mineral katkıların hidratasyon ısısına etkisini gözlemleyebilmek amacıyla TAM AIR marka izotermal kalorimetre cihazı ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Malzeme laboratuvarında deney karışımlarına hidratasyon ısısı deneyleri yapılmıştır. İzotermal kalorimetredeki her kanalın iki ölçüm haznesi bulunmakta olup biri numune haznesi, diğeri referans haznesidir. Kalorimetre aleti 5°C'den 90°C'ye kadar $\pm 0,02^\circ\text{C}$ ısı kontrolüyle ölçüm yapmaktadır. Bu kapsamda normalleşmiş ısı akışı (N) ve kümülatif ısı değerleri (Q) 72 ve 168 saat boyunca ölçülmüştür.

3.2.3. Mikroyapı deneyleri

Mikroyapıda oluşan değişimleri incelemek maksadıyla Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında 3, 7 ve 28 günlük beton numunelerine SEM, XRD, FTIR ve TGA analizleri yapılmıştır.

SEM /XRD/F-TIR/TGA analizi

3, 7 ve 28. günde kırılan beton numunelerden parça alınmış olup hidratasyonu durdurmak amacıyla deney gününe kadar aseton içerisinde bekletilmişlerdir. Analizlerin yapılacağı gün beton parçaları aseton içerisinden çıkartılarak bahse konu deneyler yapılmıştır.

Optik mikroskopun yetersiz kaldığı büyütmelerde doğrudan başvurulacak inceleme yöntemidir. Taramalı elektron mikroskopunda numune üzerine gönderilen elektron demeti numune ile etkileşime girerek değişik sinyaller oluşturur. Bu sinyaller (ikincil elektronlar,

geri yansıyan elektronlar, x ışınları v.b.) uygun dedektörlerle toplanarak görüntü eldesinin yanında elementel bilgi de sağlanabilmektedir [121].

1,2 nm çözünürlükteki taramalı elektron mikroskobu QUANTA 400F Field Emission SEM aleti ile 3, 7 ve 28. günlerdeki beton numune parçalarının, kullanılan çimento, silis dumanı ve zeolit in görüntüleri alınmıştır. Deneyden önce görüntüsü alınacak beton parçaları daha iyi iletkenlik için altın ile kaplanarak vakumlanmıştır. 10 mm çalışma mesafesinden 1000-50 000 kez büyütme sağlanarak görüntüler elde edilmiştir. SEM deneyleri için elektron mikroskopuyla 3, 7 ve 28. günde kırılan beton numunelerinden görüntüler elde edilmiş olup elde edilen görüntüler birbiriyle kıyaslanarak yorumlanmıştır.

XRD, her bir kristalin başkasına benzemeyen atomik sıralamasına dayanarak x ışınlarını sırayla kırma prensibiyle çalışmaktadır. Her kristalin kırınım şekilleri parmak izi gibi o kristali simgeler [49].

3, 7 ve 28. günde kırılan beton numunelerinde bulunan yapıların doğru bir şekilde tespit edilebilmesi amacıyla XRD analizi yapılmış olup elde edilen veriler literatür ve bilgisayar ortamında değerlendirilerek numune içerikleri ile ilgili bilgiler elde edilmiştir.

Yapılan tüm mikro deneylerin doğruluğu ve birbiriyle uyumluluğunu görmek için 3, 7 ve 28. günde kırılan beton numunelerine F-TIR ve TGA analizleri de yapılmıştır.

F-TIR deneyinde, moleküllerdeki kimyasal bağların bütün hareketleri için gerekli olan enerji Infrared ışınların elektro manyetik enerjisinden emilir. Bu işlemler doğrultusunda ortaya çıkan IR spektrumları molekül içindeki toplulukları simgeler. Burada elde edilen ekstraksiyonlar pikler ile simgelenir. Infrared spektrumlar dalga numarası ile gösterilir. IR spektrumları, piklerin konumuna göre incelenerek hangi malzemelerin olduğu tespit edilir [49].

F-TIR analizinde elde edilen grafikler yorumlanarak belirli dalga boylarında bulunan eğrilere ve piklere göre numune içerikleri ile ilgili değerlendirmeler yapılmaya çalışılmıştır.

TGA, kontrol edilen oranlarda ısıtmalı olarak numunenin kütlesini ölçen bir tekniktir. Numunenin ağırlık değişimi, numunenin bileşimine, sıcaklığa, ısıtma hızına ve fırındaki gazın tipine bağlıdır (hava, oksijen, nitrojen, argon ya da diğer gazlar). Belirli bir

sıcaklıktaki kütledeki değişim belirli bir kimyasal bileşimin durumunu tanımlar. Ağırlık değişimi büyüklüğü, numunedeki bileşimin miktarını gösterir [49].

TGA analizinde de belirli sıcaklık aralıklarındaki kütle kayıplarına göre numune içerikleriyle ilgili sonuçlar elde edilmiştir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Harçlarla Yapılan Deneyler

4.1.1. Harç yayılma deneyi

Tüm karışımlarda aynı yayılma değerini elde edebilmek amacıyla farklı oranlarda akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Hazırlanan tüm karışımlarda 21-22 cm arasında yayılma değerlerini elde edebilmek için kullanılacak akışkan oranları belirlenerek harç ve beton dökümlerinde bahse konu oranlar kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Kontrol numuneleriyle yapılan yayılma deneyi sonuçları

Akışkanlaştırıcı (g)	Yayılma (cm)
5	19
6	20
7	21,5
8	23,5
9	24

Kontrol numuneleri ile yapılan yayılma deney sonuçları Çizelge 4.1’de görülmekte olup 7 g akışkanlaştırıcı kullanılarak 21,5 cm yayılma elde edilmiştir. 7 g akışkanlaştırıcı toplam bağlayıcı malzemenin %1,4’üne karşılık gelmektedir.

Çizelge 4.2. Silis dumanı ikameli numunelerle yapılan yayılma deneyi sonuçları

Akışkanlaştırıcı (g)	Yayılma (cm)
6	17
7	18
8	18,5
8,5	21
9	24

Silis dumanı ikameli numuneler ile yapılan yayılma deney sonuçları Çizelge 4.2’de görülmekte olup 8,5 g akışkanlaştırıcı kullanılarak 21 cm yayılma elde edilmiştir. 8,5 g akışkanlaştırıcı toplam bağlayıcı malzemenin %1,7’sine karşılık gelmektedir.

Çizelge 4.3. Zeolit ikameli numunelerle yapılan yayılma deneyi sonuçları

Akışkanlaştırıcı (g)	Yayılma (cm)
7	18
8	19
9	21,5
9,5	22
10	24

Zeolit ikameli numuneler ile yapılan yayılma deney sonuçları Çizelge 4.3’te yer almakta olup 9 g akışkanlaştırıcı kullanılarak 21,5 cm yayılma elde edilmiştir. 9 g akışkanlaştırıcı toplam bağlayıcı malzemenin %1,8’ine karşılık gelmektedir.

Uzal’ın (2007), yapmış olduğu çalışmada da farklı oranlarda doğal zeolit ikamesi ile hazırlanan harçlarda eşit miktarda su kullanılmış olup bu harçların yayılma değerinin kontrol harcına yakın olmasını sağlayacak kadar akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilave edilmiştir [70].

4.1.2. Harç basınç, birim ağırlık, su emme ve ultrasonik dalga hızı deneyleri

Ön deneyler kapsamında Antalya Ferro Krom Tesislerinden taze silis dumanı ve ASTM standartlarını sağlayan %90 üzerinde SiO₂ içeren Norveç silis dumanı temin edilmiştir. 5x5x5 cm küp numunelerle %10 silis dumanı ikamesiyle yapılan harçların basınç dayanım değerleri Çizelge 4.4’te görülmektedir.

Çizelge 4.4. Silis dumanı ikamesiyle elde edilen harç basınç dayanım değerleri

Karışım harcı	7 gün (MPa)	28 gün (MPa)
Antalya SD	39,4	54,45
Norveç SD	38,05	59,55

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yapılan harç ve beton deneylerinde Norveç silis dumanı kullanılmasına karar verilmiştir.

Yapılacak deneylerde ikame edilecek zeolit oranını belirleyebilmek amacıyla %5, %10, %15, %20 oranlarında zeolit çimento yerine ikame edilerek 5x5x5 cm harç numuneleriyle deneyler yapılmıştır. Hazırlanan harçlara ait basınç dayanım değerleri Çizelge 4.5'te görülmektedir.

Çizelge 4.5. Harç basınç dayanım değerleri

Karışım harcı	3 gün (MPa)	7 gün (MPa)	28 gün (MPa)	56 gün (MPa)
K	26,5	39,1	48,2	51,2
SD	30,4	45,3	60,2	64,1
Z5	24,6	34,7	48,5	51,6
Z10	24,7	35,2	49,1	52,2
Z15	25	37,3	55,6	58,7
Z20	24,4	36,4	54,1	57,6

Uzal'ın (2007), yapmış olduğu çalışmada %15 zeolit ikamesi ve melamin esaslı akışkanlaştırıcı kullanarak hazırlanan harçların ve kontrol harçlarının 3 ve 7 günlük basınç dayanım değerleri birbirine yakın olup 28 gün sonunda zeolit ikameli harçların basınç dayanımı, kontrol harçlarının basınç dayanım değerlerinden fazla çıkmıştır [70]. Yapılan bu çalışmada da %15 zeolit ikamesiyle benzer sonuçlar elde edilmiş olup elde edilen sonuçların literatüre uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.6. Harçlara ait 28 günlük birim ağırlık değerleri

Karışım harcı	Kuru birim ağırlığı (g/cm ³)	Doygun birim ağırlığı (g/cm ³)
K	2,23	2,28
SD	2,21	2,26
Z5	2,20	2,24
Z10	2,18	2,22
Z15	2,17	2,21
Z20	2,16	2,19

Çizelge 4.7. Harçlara ait 28 günlük su emme oranları

Karışım harcı	Su emme oranları (%)
K	3,4
SD	1
Z5	2,4
Z10	2,4
Z15	2,2
Z20	2,3

Çizelge 4.8. Harçlara ait 28 günlük ultrasonik dalga hızları

Karışım harcı	Ultrasonik dalga hızları (km/s)
K	3,30
SD	3,59
Z5	3,36
Z10	3,37
Z15	3,51
Z20	3,48

Hazırlanan harçların 28 günlük birim ağırlık değerleri Çizelge 4.6’da, 28 günlük su emme oranları Çizelge 4.7’de, 28 günlük ultrasonik dalga hızları Çizelge 4.8’de görülmektedir. Yapılan tüm deneysel çalışmalardan sonra %15 zeolit ikamesinin %10 silis dumanı ikamesine yakın değerler verdiği görülmüş olup bu kapsamda beton deneylerinin yapımında %15 zeolit ikame edilmesine karar verilmiştir.

4.2. Taze Beton Deneyleri

4.2.1. Beton slump (çökme) deneyi

Hazırlanan taze betonların slump değerleri ölçülmüş olup elde edilen veriler Çizelge 4.9’da görülmektedir.

Çizelge 4.9. Beton çökme deneyi sonuçları

Karışım betonu	Çökme (cm)
K	10
SD	9
Z15	8

4.2.2. Hava oranı

Hazırlanan taze betonların hava değerleri ölçülmüş olup Çizelge 4.10'da görülmektedir. Tüm karışımların ortalama hava oranları %1,4-1,6 bulunmuştur.

Çizelge 4.10. Beton hava değerleri sonuçları

Karışım betonu	Hava (%)
K	1,5
SD	1,6
Z15	1,4

4.2.3. Birim hacim ağırlık

Hazırlanan beton karışımlarına taze haldeyken yapılan birim hacim ağırlık deneyleri ASTM C 29 [111] doğrultusunda yapılmış olup elde edilen birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.11'de görülmektedir.

Çizelge 4.11. Taze beton birim hacim ağırlık değerleri

Karışım betonu	kg/m ³
K	2420
SD	2411
Z15	2406

Zeolit ve silis dumanı hafif malzemeler olmaları dolayısıyla birim hacim ağırlıkları kontrol numunesine göre daha düşük seviyede çıkmış olup benzer durum Uzal'ın (2007) yapmış olduğu çalışmada da görülmüştür [70].

4.3. Beton Basınç Dayanımı

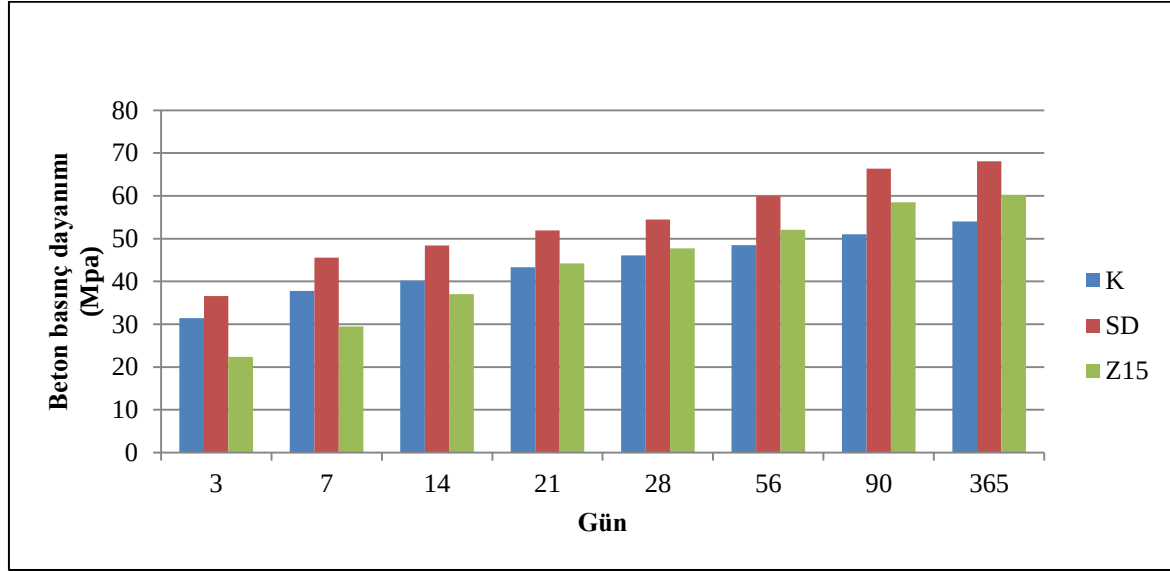
Silindir beton numunelerinin 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 ve 365 günde basınç dayanımları ölçülmüş olup dayanım değerleri Çizelge 4.12’de, grafik değerleri Şekil 4.1’de görülmektedir. Basınç dayanım deneyleri 10x20 cm silindir numuneler kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 4.12. Beton basınç dayanım değerleri

Karışım betonu	3 gün (MPa)	7 gün (MPa)	14 gün (MPa)	21 gün (MPa)	28 gün (MPa)	56 Gün (MPa)	90 gün (MPa)	365 gün (MPa)
K	31,4	37,8	40,2	43,3	46,1	48,5	51	54
SD	36,6	45,6	48,4	51,9	54,5	59,9	66,4	68,1
Z15	22,4	29,5	37	44,2	47,7	52,1	58,5	60,2

3 gün sonunda silis dumanı ikameli numune en yüksek dayanım değerini vermiş olup zeolit ikameli betonlar en düşük değeri vermiştir. 7 gün sonunda zeolit ikameli numuneler en düşük değeri vermiş olup silis dumanı ikameli betonlar en yüksek dayanım değerini vermiştir. 14 gün sonunda zeolit ikameli betonlar ve kontrol betonu dayanımları birbirine yakın değerler vermiş olup silis dumanı ikameli betonlar en yüksek değeri vermiştir. 21 gün sonunda zeolit ikameli betonlar, kontrol betonlarından yaklaşık 1 MPa daha yüksek dayanım değeri vermiş olup, en yüksek dayanımı silis dumanı ikameli betonlar vermiştir. 28 gün sonunda zeolit ikameli betonlar, kontrol ve silis dumanı ikameli betonlar arasında dayanım değerleri vermiş olup 56, 90 ve 365 günlük dayanımlarda da benzer durum görülmüştür. Artan yaş ile birlikte puzolanik aktivitelerin artmasına bağlı olarak zeolit ikameli betonlar, kontrol ve silis dumanı ikameli betonlar arasında dayanım değerleri vermiştir. 7 günlük dayanımlar 28 günlük dayanımlarla karşılaştırıldığında kontrol numuneleri %21,9’luk artış, silis dumanı ikameli numuneler %19,5’luk artış, zeolit ikameli numuneler %61,7’lik artış göstermiştir. Bu kapsamda 7 ve 28 günlük süre arasında zeolit ikameli numunelerin dayanım artış hızı en yüksektir. Zeolit ve silis dumanının ara yüz kalitesini artırarak daha yoğun jeller oluşturduğu değerlendirilmektedir. Khoshroo ve diğerlerinin (2018), yapmış oldukları çalışmada %15 zeolit ikamesiyle hazırlanan numuneler kontrol numunelerinden daha yüksek basınç değerleri vermiş bu kapsamda bu tezde yapılan çalışmanın literatürle uyumlu olduğu değerlendirilmektedir [97].

Ramezainpour ve diğerlerinin (2015), yapmış oldukları çalışmada 7 güne kadar %15 zeolit ikamesiyle hazırlanan numunelerin dayanımları kontrol numunelerinden oldukça düşük değerler vermiş olup zeolitın erken dayanıma olan etkisi daha önceki çalışmalarda ve yapılan bu tez çalışmasında da görülmüştür [18].



Şekil 4.1. Beton basınç dayanım değerleri

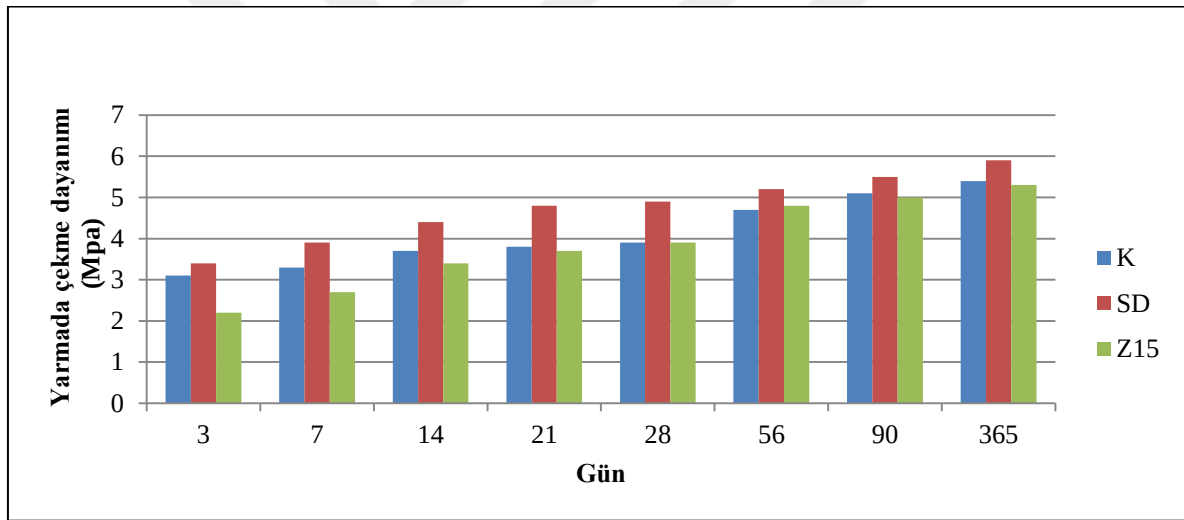
4.4. Beton Yarmada Çekme Dayanımı

Çizelge 4.13. Beton yarmada çekme dayanım değerleri

Karışım betonu	3 gün (MPa)	7 gün (MPa)	14 gün (MPa)	21 gün (MPa)	28 gün (MPa)	56 gün (MPa)	90 gün (MPa)	365 gün (MPa)
K	3,1	3,3	3,7	3,8	3,9	4,7	5,1	5,4
SD	3,4	3,9	4,4	4,8	4,9	5,2	5,5	5,9
Z15	2,2	2,7	3,4	3,7	3,9	4,8	5	5,3

ASTM C 496'ya [114], uygun olarak her karışımdan her deney günü minimum 3 adet beton numune ile yapılan deney sonuçlarının ortalaması alınmış olup dayanım değerleri Çizelge 4.13'te, grafik değerleri Şekil 4.3'te görülmektedir. 3 gün sonunda yarmada çekme dayanımında zeolit ikameli numuneler en düşük değeri vermiş olup kontrol numuneleri, silis dumanı ikameli betonlar ve zeolit ikameli betonlar arasında değer vermiştir. 7 gün sonunda kontrol betonlarında dayanım %7, silis dumanı ikameli betonlarda %15, zeolit ikameli betonlarda %20 oranlarında artmıştır. 14 gün sonunda tüm betonlarda

dayanım artışı meydana gelmiştir. 21, 28, 56, 90 ve 365 gün sonunda kontrol ve zeolit ikameli betonlar birbirine yakın dayanım değerleri vermiş olup silis dumanı ikameli betonlar en yüksek dayanımı vermiştir. 7 günlük dayanımlar 28 günlük dayanımlarla karşılaştırıldığında kontrol numunesi %18'lik artış, silis dumanı ikameli numune %25,6'lık artış, zeolit ikameli numune %44,4'lük artış göstermiştir. Bu kapsamda 7 ve 28 günlük süre arasında zeolit ikameli numunelerin dayanım artış hızı en yüksektir. Ramezainpour ve diğerlerinin (2015), yapmış oldukları çalışmada %15 zeolit ikamesiyle hazırlanan numuneler kontrol numunelerinden daha yüksek yarma dayanım değerleri vermiş olup bu tez çalışmasında da %15 zeolit ikameli numuneler, kontrol numuneleriyle yaklaşık değerler vermiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmanın önceki çalışmalara paralel sonuçlar verdiği gözlemlenmiş olup uygulanan ikame oranının ve yöntemin doğru olduğu değerlendirilmiştir [18].



Şekil 4.2. Yarmada çekme dayanım değerleri

4.5. Su Emme, Porozite, Toplam Nem Oranı ve Özgül Ağırlık

ASTM C 642'ye [115], uygun olarak 10 cm³'lük beton küp numunelerin 7 ve 28. günlerde su emme oranları, toplam nem oranları, porozite değerleri ve özgül ağırlıkları hesaplanmıştır. Numuneler deneylerden 1 gün önce kür havuzundan çıkartılarak ıslak yüzey, doygun kuru yüzey, arşimed terazisindeki ağırlıkları ve etüv kurusu ağırlıkları ölçülmüştür. 7 günlük numunelere ait ağırlık durumları Çizelge 4.14'te, 28 günlük numunelere ait ağırlık durumları Çizelge 4.15'te görülmektedir.

Çizelge 4.14. 7 günlük 10 cm³'lük betonlara ait ağırlık durumları

Numune	Kontrol betonu		Silis dumanı ikameli beton		Zeolit ikameli beton	
	Numune durumu	Ağırlık (g)	Numune durumu	Ağırlık (g)	Numune durumu	Ağırlık (g)
1	Islak yüzey	2432	Islak yüzey	2412	Islak yüzey	2406
	Doygun kuru yüzey	2428,5	Doygun kuru yüzey	2408	Doygun kuru yüzey	2402
	Arşimed terazisi	1425	Arşimed terazisi	1409	Arşimed terazisi	1391
	Etüv kurusu	2340	Etüv kurusu	2369	Etüv kurusu	2313
2	Islak yüzey	2437	Islak yüzey	2409,5	Islak yüzey	2400
	Doygun kuru yüzey	2434	Doygun kuru yüzey	2407,5	Doygun kuru yüzey	2369
	Arşimed terazisi	1428	Arşimed terazisi	1410	Arşimed terazisi	1384
	Etüv kurusu	2343	Etüv kurusu	2367	Etüv kurusu	2297
3	Islak yüzey	2388	Islak yüzey	2424,5	Islak yüzey	2374
	Doygun kuru yüzey	2384	Doygun kuru yüzey	2421,5	Doygun kuru yüzey	2369
	Arşimed terazisi	1396	Arşimed terazisi	1419	Arşimed terazisi	1377
	Etüv kurusu	2296	Etüv kurusu	2367	Etüv kurusu	2325

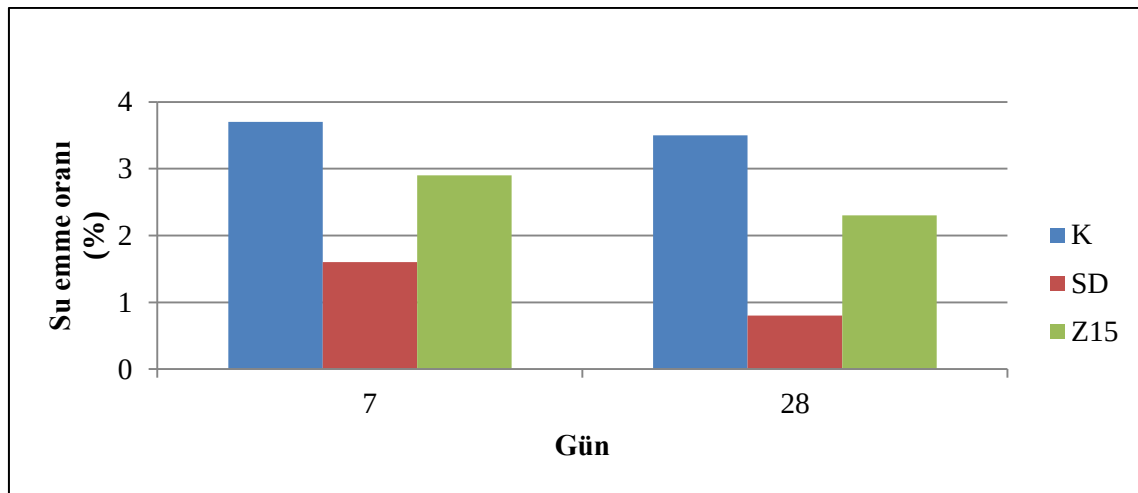
Çizelge 4.15. 28 günlük 10 cm³'lük betonlara ait ağırlık durumları

Numune	Kontrol betonu		Silis dumanı ikameli beton		Zeolit ikameli beton	
	Numune durumu	Ağırlık (g)	Numune durumu	Ağırlık (g)	Numune durumu	Ağırlık (g)
4	Islak yüzey	2396,6	Islak yüzey	2448,5	Islak yüzey	2328
	Doygun kuru yüzey	2393	Doygun kuru yüzey	2444,5	Doygun kuru yüzey	2324
	Arşimed terazisi	1400	Arşimed terazisi	1435	Arşimed terazisi	1344,5
	Etüv kurusu	2311	Etüv kurusu	2423,5	Etüv kurusu	2271,5
5	Islak yüzey	2411	Islak yüzey	2442,5	Islak yüzey	2399
	Doygun kuru yüzey	2407,5	Doygun kuru yüzey	2439	Doygun kuru yüzey	2394
	Arşimed terazisi	1406,5	Arşimed terazisi	1432,5	Arşimed terazisi	1388,5
	Etüv kurusu	2324,5	Etüv kurusu	2418,5	Etüv kurusu	2340,5
6	Islak yüzey	2426	Islak yüzey	2413,5	Islak yüzey	2365
	Doygun kuru yüzey	2423	Doygun kuru yüzey	2408	Doygun kuru yüzey	2360
	Arşimed terazisi	1415	Arşimed terazisi	1410,5	Arşimed terazisi	1367
	Etüv kurusu	2339	Etüv kurusu	2388,67	Etüv kurusu	2308

Su emme yüzde değerleri Çizelge 4.16’da, grafik değerleri ise Şekil 4.3’te görülmektedir.

Çizelge 4.16. Su emme değerleri

Karışım betonu	7 gün (%)	28 gün (%)
K	3,7	3,5
SD	1,6	0,8
Z15	2,9	2,3



Şekil 4.3. Su emme değerleri

Her karışımdan her deney günü 3 adet beton numuneye deney yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Zamana bağlı olarak kontrol numunesi su emme değerlerinde pek değişiklik gözlemlenmemiş olup silis dumanı ve zeolit ikameli numunelerde gelişen puzolanik reaksiyonlar nedeniyle boşlukların azalmasına bağlı olarak su emme oranlarında büyük azalma meydana gelmiştir. 7 günlük su emme oranları 28 günlüklerle karşılaştırıldığında kontrol numunesinde %5’lik azalma, silis dumanı ikameli betonlarda %50’lik azalma, zeolit ikameli betonlarda %20’lik azalma meydana gelmiştir.

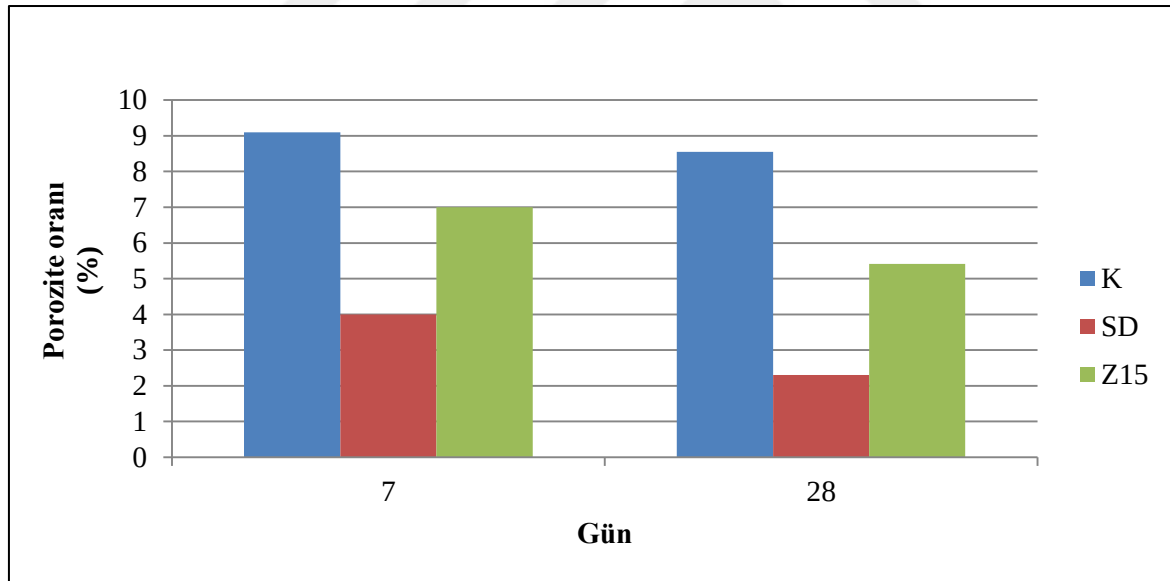
Ahmadi ve diğerleri (2010) de zeolit ile yapmış oldukları çalışmada %15 zeolit ikamesiyle kontrol numunesinden daha düşük su emme değerleri elde etmişlerdir [94]. Nagrockiene ve diğerleri (2016) de yapmış oldukları çalışmada zeolit ikamesiyle kontrol numunesinden daha düşük su emme değerleri elde etmişlerdir [96]. Khoshroo ve diğerleri (2018) de zeolit ile yapmış oldukları çalışmada %15 zeolit ikamesiyle kontrol numunesinden daha düşük

su emme değerleri elde etmişlerdir [97]. Bu kapsamda bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların literatüre uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Deney numunelerinin özgül ağırlıkları, doymun kuru yüzey ağırlığın hacime (doymun kuru yüzey ağırlıktan arşimed terazisindeki ağırlığın çıkarılmasıyla elde edilmiştir) bölünmesiyle bulunmuş olup, su emme oranlarının özgül ağırlıklarla çarpılmasıyla porozite değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.17. Porozite değerleri

Karışım betonu	7 gün (%)	28 gün (%)
K	9,1	8,5
SD	4	2,3
Z15	7	5,4



Şekil 4.4. Porozite değerleri

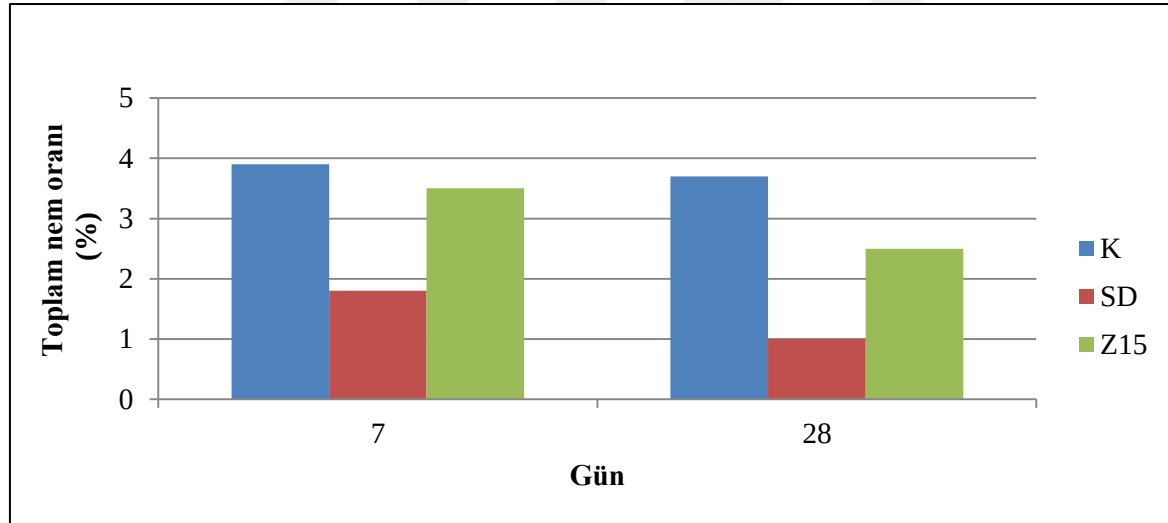
Porozite yüzde değerleri Çizelge 4.17’de, grafik değerleri Şekil 4.4’te görülmektedir. 7 günlük porozite değerleri 28 günlüklerle karşılaştırıldığında kontrol numunesinde %6,6’lık azalma, silis dumanı ikameli betonlarda %42,5’luk azalma, zeolit ikameli betonlarda %22,8’lik azalma meydana gelmiştir. Tüm numunelerde dayanım artmasıyla porozite oranları azalmıştır. Lin ve arkadaşları (1999) da yapmış oldukları çalışmada %15 zeolit ikamesiyle kontrol numunesinden daha düşük porozite değerleri elde etmiştir [101].

Ramezainpour ve diğerlerinin (2015), yapmış oldukları çalışmada 28 günün sonunda %15 zeolit ikamesiyle hazırlanan numuneler, kontrol numunelerinden oldukça düşük porozite değerleri vermiş olup zeolitın poroziteye olan etkisi daha önceki çalışmalarda ve yapılan bu tez çalışmasında da görülmüştür [18].

Deney numunelerinin sudan çıkarıldığı ağırlığından etüvdeki ağırlığın çıkarılmasıyla elde edilen değerin etüvdeki ağırlığa bölünmesiyle toplam nem oranları elde edilmiştir.

Çizelge 4.18. Toplam nem oranı

Karışım betonu	7 gün (%)	28 gün (%)
K	3,9	3,7
SD	1,8	1
Z15	3,5	2,5



Şekil 4.5. Toplam nem oranı

Toplam nem oranı yüzde değerleri Çizelge 4.18’de, grafik değerleri Şekil 4.5’te yer almaktadır. 7 günlük nem oranları 28 günlüklerle karşılaştırıldığında kontrol numunesinde %5,1’lik azalma, silis dumanı ikameli betonlarda %44,4’lük azalma, zeolit ikameli betonlarda %28,5’luk azalma meydana gelmiştir.

Su emme değerleri, porozite oranları ve toplam nem oranları değerlendirildiğinde zeolit ikameli numunelerin silis dumanı ikameli numuneler ve kontrol numuneleri arasında performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Zamana bağlı olarak pozolanik aktivitenin

artmasıyla ara yüz dolarak ve güçlenerek boşluklar azalmıştır. Zamana bağlı olarak kontrol numunesi toplam nem oranında pek değişiklik gözlemlenmemiş olup silis dumanı ve zeolit ikameli numunelerde büyük oranda azalma meydana gelmiştir.

Çizelge 4.19. Özgül ağırlık değerleri

Karışım betonu	7 gün	28 gün
K	2,42	2,4
SD	2,4	2,39
Z15	2,38	2,37

Hazırlanan beton karışımlarının özgül ağırlık değerleri Çizelge 4.19’da görülmekte olup birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir.

4.6. Klor-İyon Geçirgenliği Deneyi

ASTM C 1202’ye göre klor-iyon geçirgenliği yönünden değerlendirme tablosu Çizelge 4.20’de görülmektedir.

Çizelge 4.20. ASTM C 1202’ye göre klor-iyon geçirgenliği değerlendirme tablosu

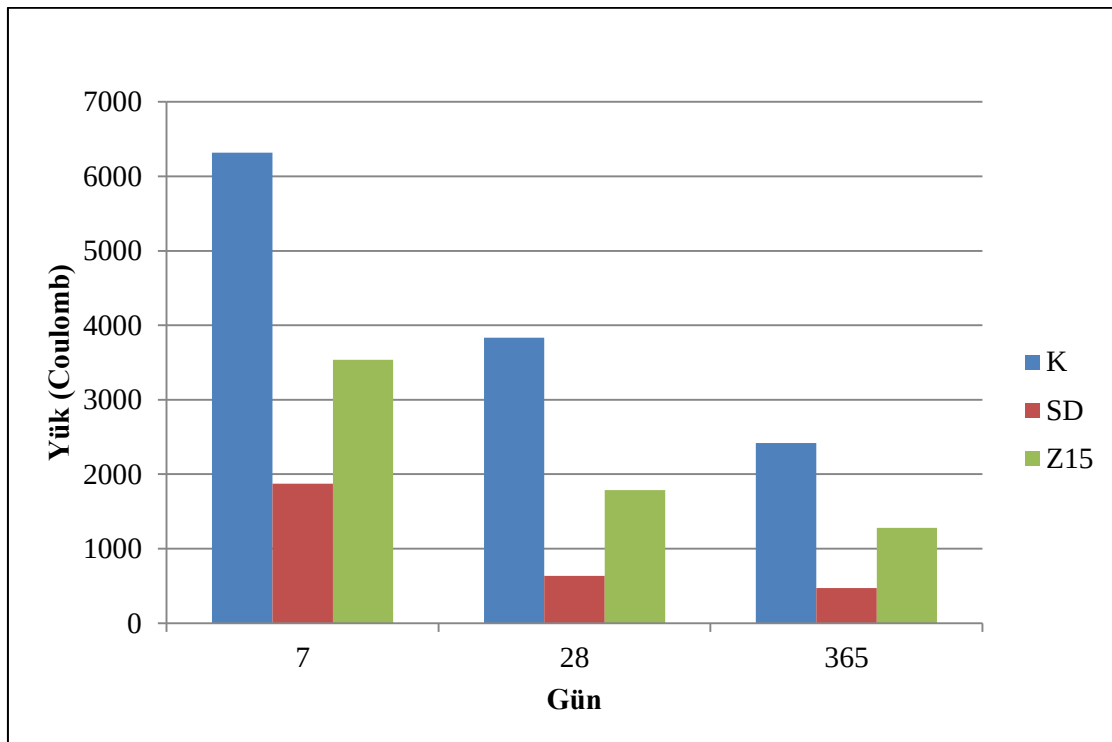
Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Değerlendirme
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Çizelge 4.21. Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçları

Karışım betonu	7 gün (coulomb)	28 gün (coulomb)	365 gün (coulomb)
K	6317	3832	2417
SD	1873	633	469
Z15	3537	1786	1278

Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçları Çizelge 4.21’de, grafik değerleri Şekil 4.6’da görülmektedir. 7 gün sonunda yapılan deneylere göre kontrol ve zeolit ikameli betonların geçirimliliği “yüksek” olup silis dumanı ikameli betonların geçirimliliği “düşük” seviyededir. 28 ve 365 gün sonunda yapılan deneylerde kontrol numunelerinin geçirimliliği “orta” seviyede, silis dumanı ikameli betonların geçirimliliği “çok düşük” seviyede, zeolit ikameli betonların geçirimliliği “düşük” seviyededir. Yapılan deneyler sonucu 28 ve 365 gün sonunda pozolanik aktivitenin artmasıyla çimento hamuru matrisinde ve çimento hamuru-agrega ara yüzeyinde boşlukların azaldığı, ara yüzün dolduğu ve güçlendiği, sonuç olarak geçirimliliğin azaldığı tespit edilmiştir. 7 günlük numunelerin geçirimliliği 28 günlük numuneler ile karşılaştırıldığında kontrol numunesinde %39,3’lük azalma, silis dumanı ikameli betonlarda %66,2’lik azalma, zeolit ikameli betonlarda %49,4’lük azalma meydana gelmiştir. 28 günlük numunelerin geçirimliliği 365 günlük numuneler ile karşılaştırıldığında kontrol numunesinde %37’lik azalma, silis dumanı ikameli betonlarda %26’lık azalma, zeolit ikameli betonlarda %28,5’luk azalma meydana gelmiştir.

Ramezainpour ve diğerlerinin (2015), yapmış oldukları çalışmada 28 günün sonunda %15 zeolit ikamesiyle hazırlanan numuneler, kontrol numunelerinden oldukça düşük geçirimsizlik değerleri vermiş olup zeolitin geçirimsizliğe olan etkisi daha önceki çalışmalarda ve yapılan bu tez çalışmasında da görülmüştür [18].



Şekil 4.6. Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçları

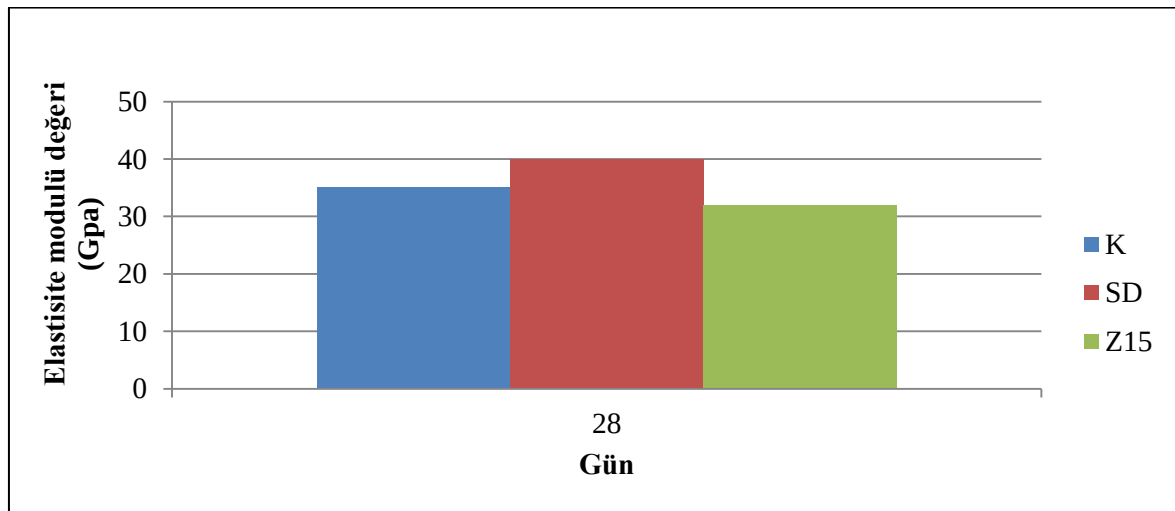
4.7. Elastisite Modülü Deneyi ve Poisson Oranı Hesaplanması

ASTM C 469 doğrultusunda 28 günlük 10x20 cm silindir numunelere MTS marka eksenel test cihazıyla elastisite modülü deneyi yapılmış olup deney sonuçları Çizelge 4.22’de, grafik değerleri Şekil 4.7’de görülmektedir. Elastisite modülü deney sonuçları beton dayanım değerleriyle orantılı sonuçlar vermiştir. Zeolitin geç puzolanik reaksiyon göstermesi dolayısıyla zeolit ikameli numuneler en düşük değeri göstermiş olup zamana bağlı olarak puzolanik reaksiyonların gelişmesiyle elastisite modülü değerlerinde artış meydana geleceği değerlendirilmektedir.

Uzal’ın (2007), yapmış olduğu çalışmada %15 zeolit ikamesiyle hazırlanan numunelerin elastisite modülü değerleri, kontrol numunesine yakın, %35 ve %55 ikame oranlarıyla hazırlanan numunelerden daha yüksek değerler vermiştir [70]. Yapılan bu çalışmada da %15 zeolit ikameli numuneler, kontrol numunelerinden daha düşük elastisite değeri vermiş olup elde edilen sonuçların literatüre uygun olduğu değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.22. Elastisite modülü deney sonuçları

Karışım betonu	28 gün (GPa)
K	35
SD	40
Z15	32



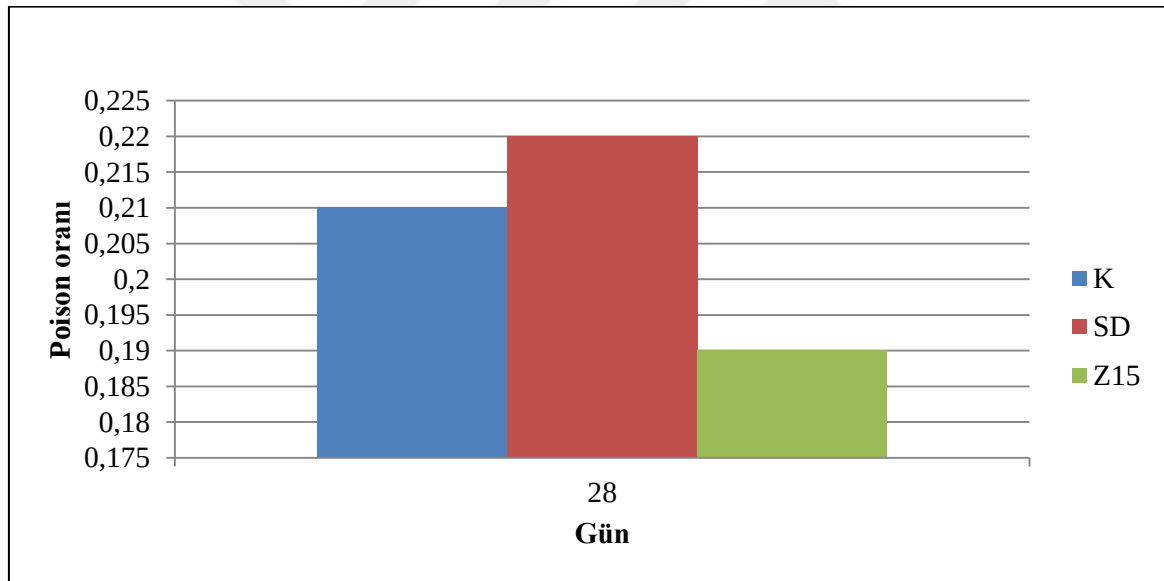
Şekil 4.7. Elastisite modülü deney sonuçları

Zeolitin kristal yapıda olmasının zeolit ikameli numunelerin elastisite modüllerinin daha düşük olmasına neden olabileceği değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.23. Poison oranı deney sonuçları

Karışım betonu	28 gün
K	0,21
SD	0,22
Z15	0,19

Poison oranı deney sonuçları Çizelge 4.23'te, grafik değerleri Şekil 4.8'de görülmektedir. Numunelerin poison oranları MTS marka eksenel test cihazıyla hesaplanmış olup birbirine yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Poison oranı deney sonuçları

4.8. Karbonasyon Deneyi

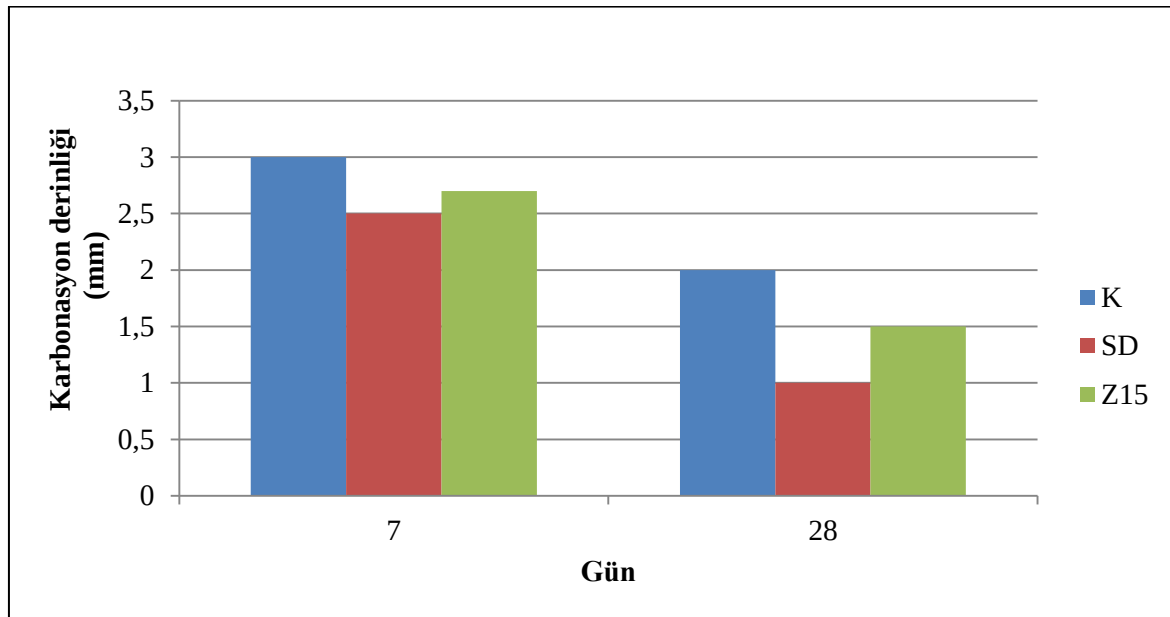
7 ve 28 günlük beton numuneler hızlandırılmış karbonasyon deneyi için karbonasyon tankının içine konulmuştur. 24 saat 1 atmosfer basınç altında CO₂ dolu tank içinde bekletilen 10 cm³'lük beton numuneler tanktan çıkartılarak kırılmıştır. Kırılan yüzeylere %1 fenolftalin içeren çözelti püskürtülerek renk değişimi olmayan yerlerin uzunlukları ölçülmüş ve karbonasyon derinlikleri bulunmuştur. Deney sonuçları Çizelge 4.24'te, grafik değerleri Şekil 4.9'da görülmektedir.

Çizelge 4.24. Karbonasyon deneyi sonuçları

Karışım betonu	7 gün (mm)	28 gün (mm)
K	3	2
SD	2,5	1
Z15	2,7	1,5

Artan kür süresi ve tamamlanan hidrasyon reaksiyonları ve gelişen boşluk yapısı karbonasyon derinliklerini azaltmıştır. Silis dumanı ikameli betonlar karbonasyon açısından en olumlu etkiyi göstermiş olup zeolit ikameli betonlar, silis dumanı ikameli betonlar ve kontrol betonları arasında bir etki göstermiştir. 7 günlük sonuçlar 28 günlüklerle karşılaştırıldığında kontrol betonlarında %33,3'lük azalma, silis dumanı ikameli betonlarda %60'luk azalma, zeolit ikameli betonlarda %44,4'lük azalma meydana gelmiştir.

Vejmelkova ve diğerleri (2015) yapmış oldukları çalışmada %10 ve %20 oranında zeolit ikame etmiş olup hazırlanan numunelerde CO₂ bulunan ortamda kontrol numunelerinden daha az derinlik oluşmuştur. Yapılan bu tez çalışmasında da zeolit ikameli numunelerde CO₂ bulunan ortamda kontrol numunelerinden daha az derinlik oluşmuştur [122].



Şekil 4.9. Karbonasyon derinlik değerleri

4.9. Ultrasonik Dalga Hız Deneyi

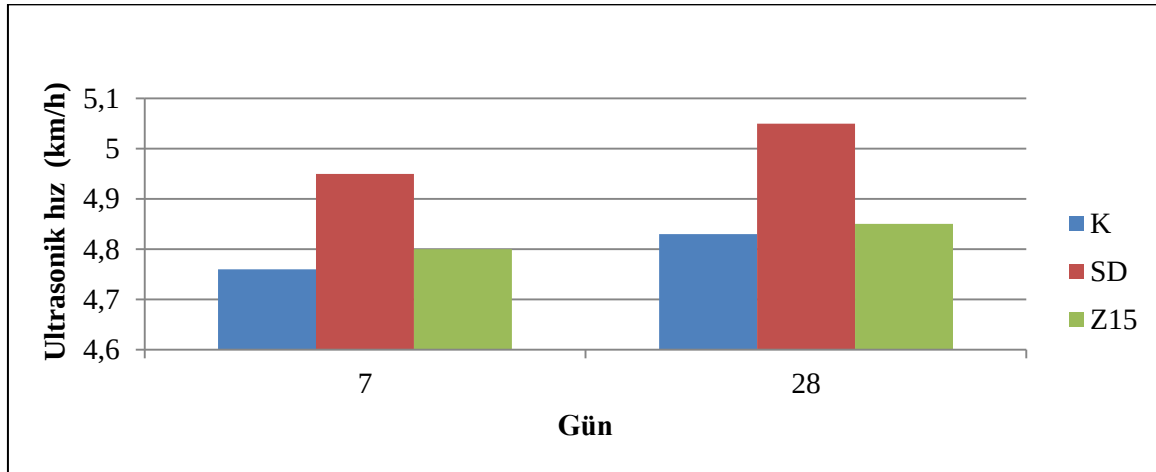
ASTM C 597 doğrultusunda 7 ve 28 gün sonunda her karışımdan her deney günü 6 adet 10 cm³'lük beton numuneye ultrasonik deneyler yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Deney sonuçları ortalaması Çizelge 4.25'te, grafik değerleri Şekil 4.10'da görülmektedir.

Çizelge 4.25. Ultrasonik dalga hız deneyi sonuçları

Karışım betonu	7 gün (km/s)	28 gün (km/s)
K	4,76	4,83
SD	4,95	5,05
Z15	4,8	4,85

Deneyler sonucunda elde edilen hız değerleri basınç dayanım değerleri ile orantılı sonuçlar vermiş olup artan zamana bağlı olarak puzolanik aktivitenin artmasıyla tüm numunelerde 7 günlük hızlara oranla 28 günlük hızlarda artma meydana gelmiştir.

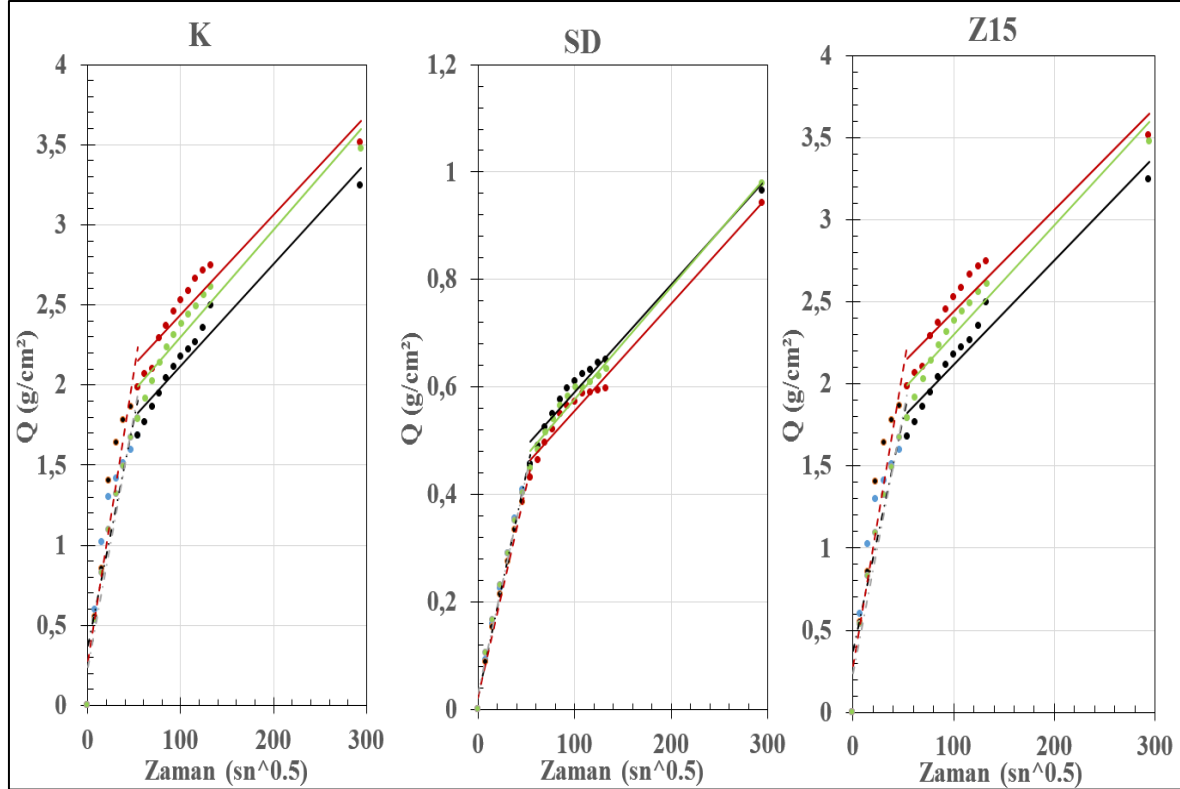
Nagrockiene ve diğerleri (2016) yapmış oldukları çalışmada zeolit ikamesiyle kontrol numunesinden daha yüksek hız değerleri elde etmiş olup bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir [96]. Khoshroo ve diğerlerinin (2018) zeolit ile yapmış oldukları çalışmada elde ettikleri hız değerleri basınç dayanım değerleri ile orantılı sonuçlar vermiş olup bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir [97].



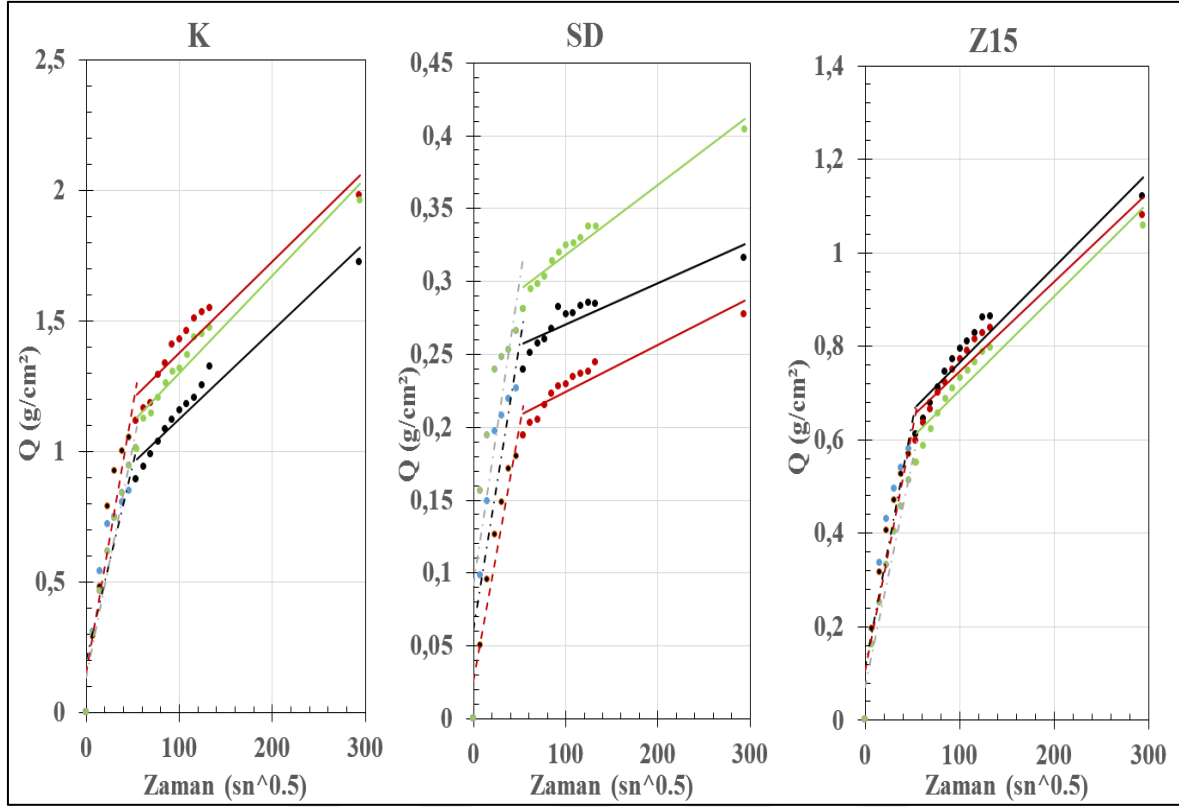
Şekil 4.10. Ultrasonik dalga hız değerleri

4.10. Kapiler Kılcallık Deneyi

7 ve 28 gün sonunda her beton karışımından her deney günü 3 adet 10 cm³'lük beton numuneye kılcallık deneyi yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Saçılma grafiğiyle hazırlanan 7 günlük betonlara ait kılcallık deneyi sonuçları Şekil 4.11'de, 28 günlük betonlara ait kılcallık deneyi sonuçları Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.11. 7 günlük betonlara ait kılcallık değerleri



Şekil 4.12. 28 günlük betonlara ait kılcallık değerleri

Nihai deney sonuçları Çizelge 4.26’da, 1.cil kılcallık katsayısı grafik değerleri Şekil 4.13’te ve 2.cil kılcallık katsayısı grafik değerleri Şekil 4.14’te görülmektedir.

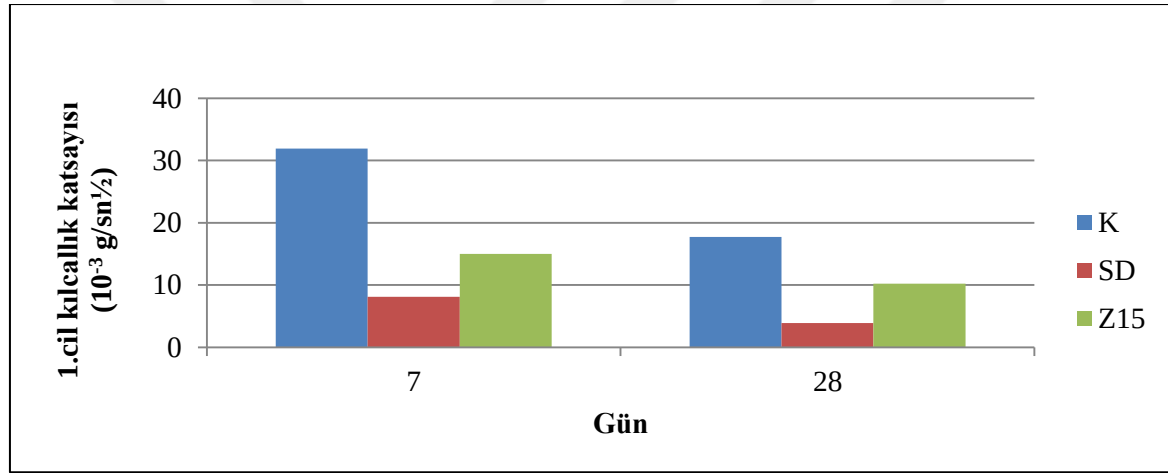
Çizelge 4.26. Kılcallık katsayısı değerleri

Karışım betonu	1.cil kılcallık katsayısı		2.cil kılcallık katsayısı	
	7 gün (10^{-3} g/sn ^{1/2})	28 gün (10^{-3} g/sn ^{1/2})	7 gün (10^{-3} g/sn ^{1/2})	28 gün (10^{-3} g/sn ^{1/2})
K	31,9	17,7	6,4	3,5
SD	8,1	3,9	2	0,4
Z15	15	10,2	3,9	2

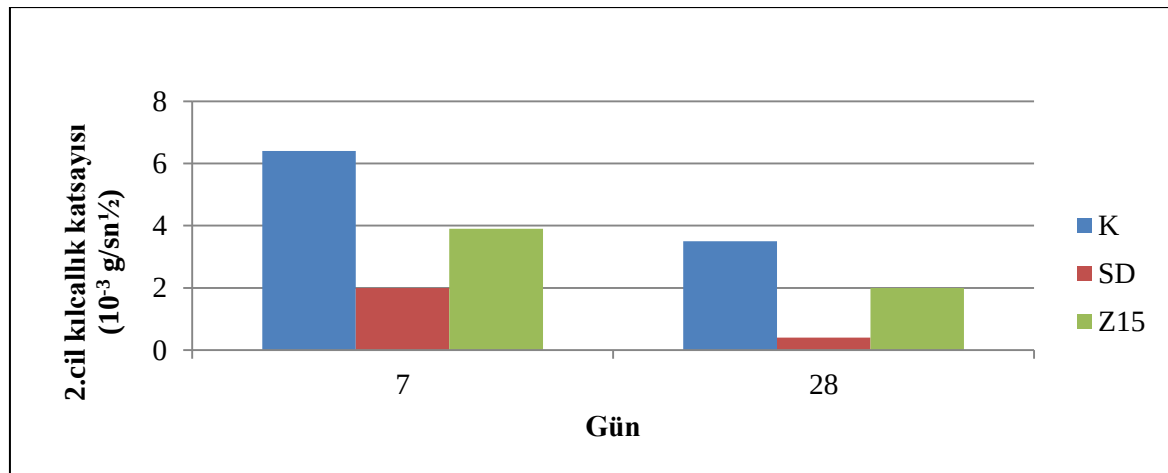
Silis dumanının beton yapısındaki boşlukları azalttığı, zeolit ikameli betonların ise kontrol ve silis dumanı ikameli betonlar arası değerler verdiği gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve zeolit çok ince olduğundan dolayı, hamur içindeki boşluklar ve agrega-çimento arasındaki ara yüz bu mineral katkıları tarafından doldurulduğundan kapiler boşluklar azalmıştır. Mineral katkıların en önemli rolü durabiliteyi, dayanıklılığı artırmak ve kapiler emme de azalma sağlamaktır. Bu kapsamda zeolit ve silis dumanı, mineral katkı fonksiyonunu

zamana bağılı olarak boşluklarda azalma meydana getirerek göstermiştir. 7 günlük sonuçlar 28 günlük sonuçlarla kıyaslandığında 1.cil katsayılarında kontrol betonunda %45'lik bir azalma, silis dumanı ikameli betonda %52'lik bir azalma, zeolit ikameli betonda %32'lik bir azalma; 2.cil katsayılarında kontrol betonunda %45'lik bir azalma, silis dumanı ikameli betonda %80'lik bir azalma, zeolit ikameli betonda %49'luk bir azalma gözlemlenmiştir. Zamana bağılı olarak gelişen pozolanik reaksiyonlar sonucu silis dumanı ve zeolit ikameli numunelerdeki boşluklarda azalma gözlemlenmiştir.

Ramezaniyanpour ve diğerlerinin (2015) %15 zeolit ikame ederek yapmış oldukları çalışmada zeolit ikamesinin kapilariteyi azalttığı tespit edilmiş olup bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir [18].



Şekil 4.13. 1.cil kılcalık katsayısı değerleri



Şekil 4.14. 2.cil kılcalık katsayısı değerleri

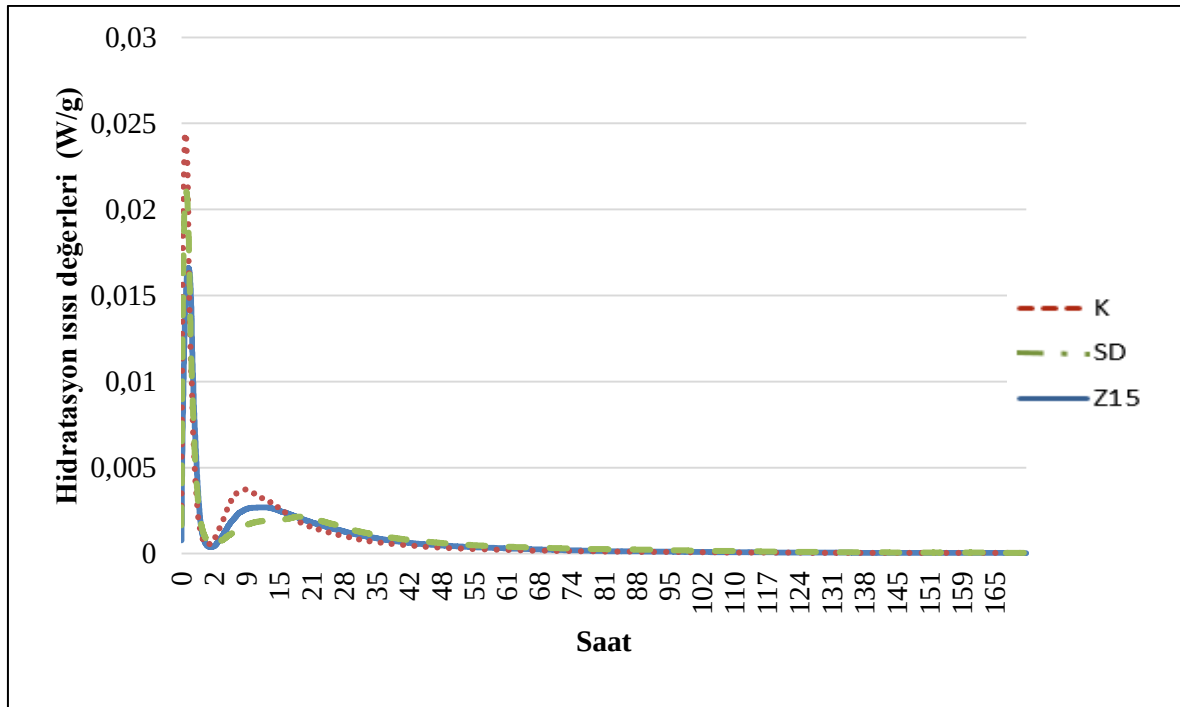
4.11. Hidratasyon Isısı Deneyi

3 ve 7 günlük deney sonuçlarına göre kullanılan mineral katkıların bir miktar hidratasyon ısısını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve zeolitin de yüzey alanının fazla olmasının hidratasyon ısısının düşmesinde etkili olduğu değerlendirilmektedir. Sonuçlar doğrultusunda kullanılan mineral katkıların, maksimum hidratasyon ısısına ulaşmak için geçen süreyi uzattıkları gözlemlenmiştir.

3 ve 7 günlük deney sonuçları Çizelge 4.27’de, kümülatif değerler Çizelge 4.28’de, grafik değerleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da görülmektedir.

Çizelge 4.27. Hidratasyon ısısı değerleri

Karışım	Maksimum ısıya ulaştığı zaman (saniye)	Maksimum ulaştığı ısı (W/g)
K	196	0,025
SD	204	0,021
Z15	442	0,017



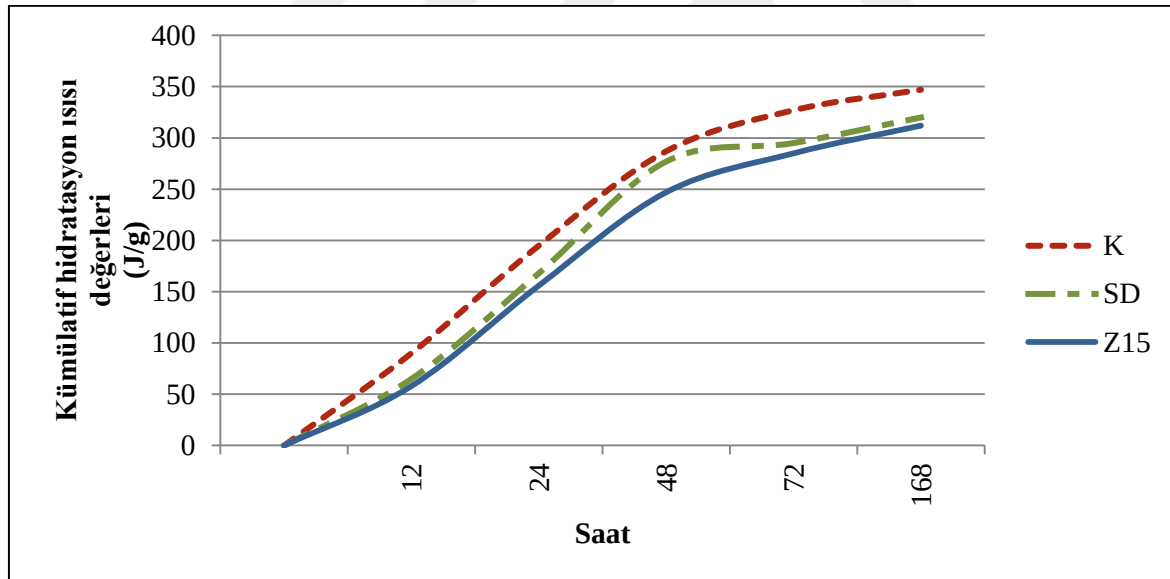
Şekil 4.15. Hidratasyon ısısı değerleri

Kontrol numunesi 9 saat sonunda, silis dumanı ikameli numune 18 saat sonunda, zeolit ikameli numune 14 saat sonunda 2.pikine (C_3A hidratasyonu) ulaşmıştır.

Çizelge 4.28. Kümülatif hidratasyon ısısı değerleri

Karışım	3 gün (J/g)	7 gün (J/g)
K	327	347
SD	295	320
Z15	285	312

Kontrol numunesi 3 ve 7 günlük süre sonunda en fazla seviyede ısı açığa çıkarmış olup silis dumanı ikameli numune ve zeolit ikameli numune, kontrol numunesinden biraz daha az ısı açığa çıkarmıştır. 3 ve 7 günlük süre arasında tüm karışımlar ısı açığa çıkarmaya devam etmiştir.



Şekil 4.16. Kümülatif hidratasyon ısısı değerleri

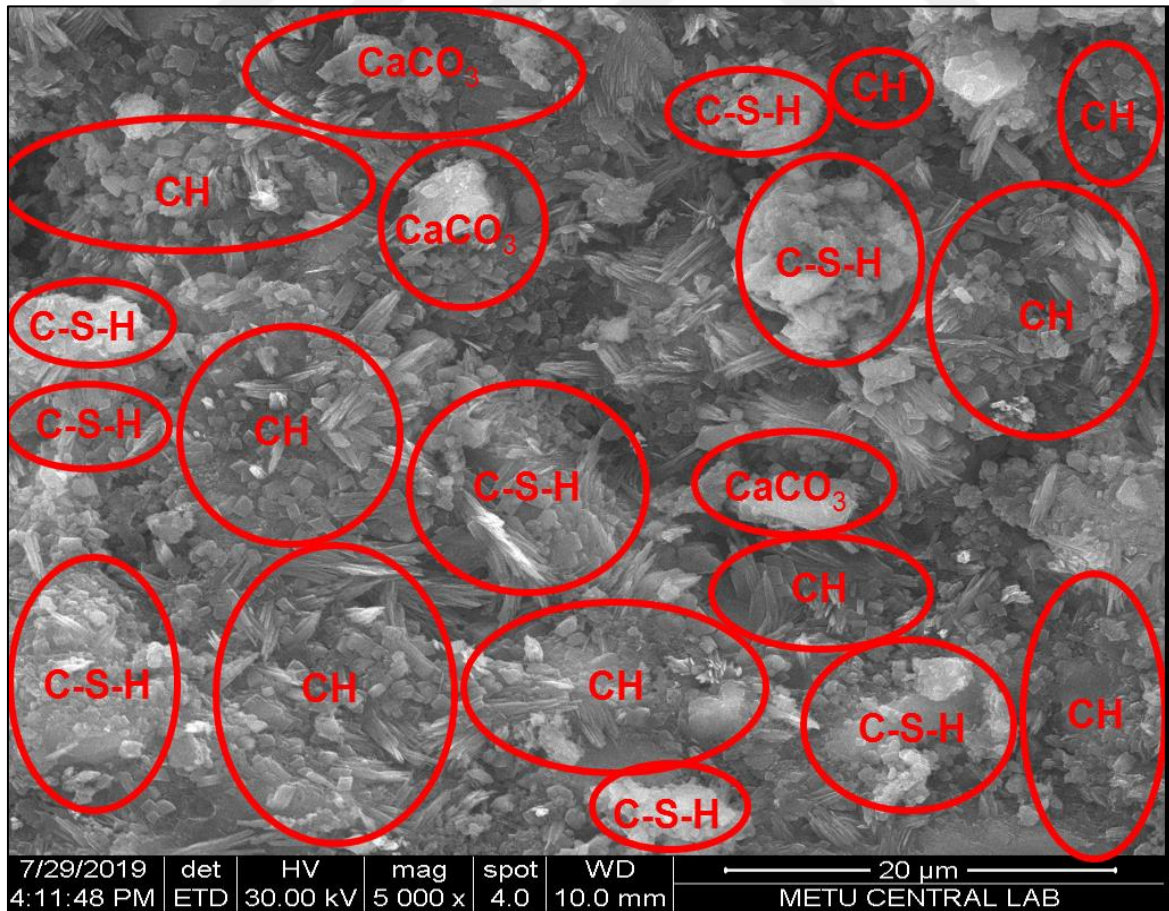
Yazıcıoğlu (2016), yapmış olduğu çalışmada zeolit ikameli numunelerin hidratasyon ısısını azalttığını gözlemlemiştir [73]. Tydlit ve diğerleri (2014) %15 zeolit ikame ederek yapmış oldukları çalışmada zeolit ikamesinin hidratasyon ısısını azalttığını tespit etmiş olup bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir [92].

4.12. Mikroyapı Deneyleri

Mikro ve mineralojik yapı incelemesi (SEM, XRD, F-TIR ve TGA) için basınç deneyi sonrası her yaştaki numunelerden bir parça alınarak, mikro yapılarındaki oluşumlar incelenmiştir. Tüm mikroyapı deneyleri için beton parçaları aseton içerisinde saklanmış olup deney yapılacağı gün aseton içerisinde çıkartılmıştır.

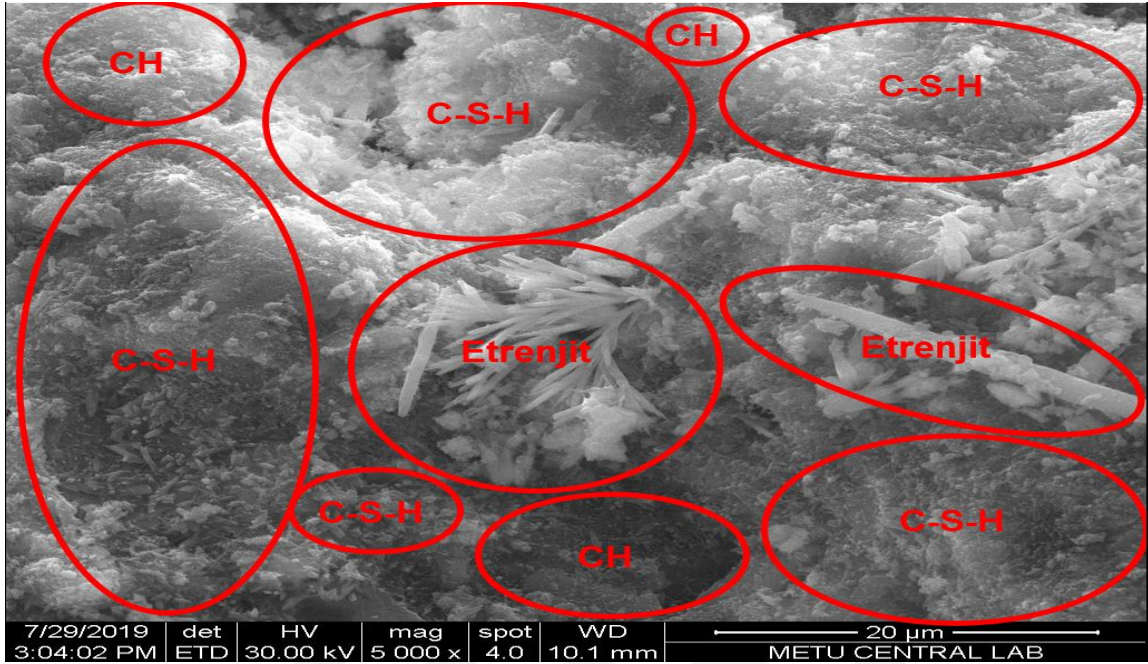
4.12.1. SEM deneyleri

3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüleri sırasıyla Resim 4.1, Resim 4.2 ve Resim 4.3'te; 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüleri sırasıyla Resim 4.4, Resim 4.5 ve Resim 4.6'da; 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüleri sırasıyla Resim 4.7, Resim 4.8 ve Resim 4.9'da görülmektedir. Zeolit ikameli betonda yoğun olarak çiçeksi, prizmatik ve yassı yapılar gözlemlenmiştir [70]. Genel olarak 3 günlük görüntülerde C-S-H jellerinin ve CH yapılarının oluşmaya başladığı görülmektedir.



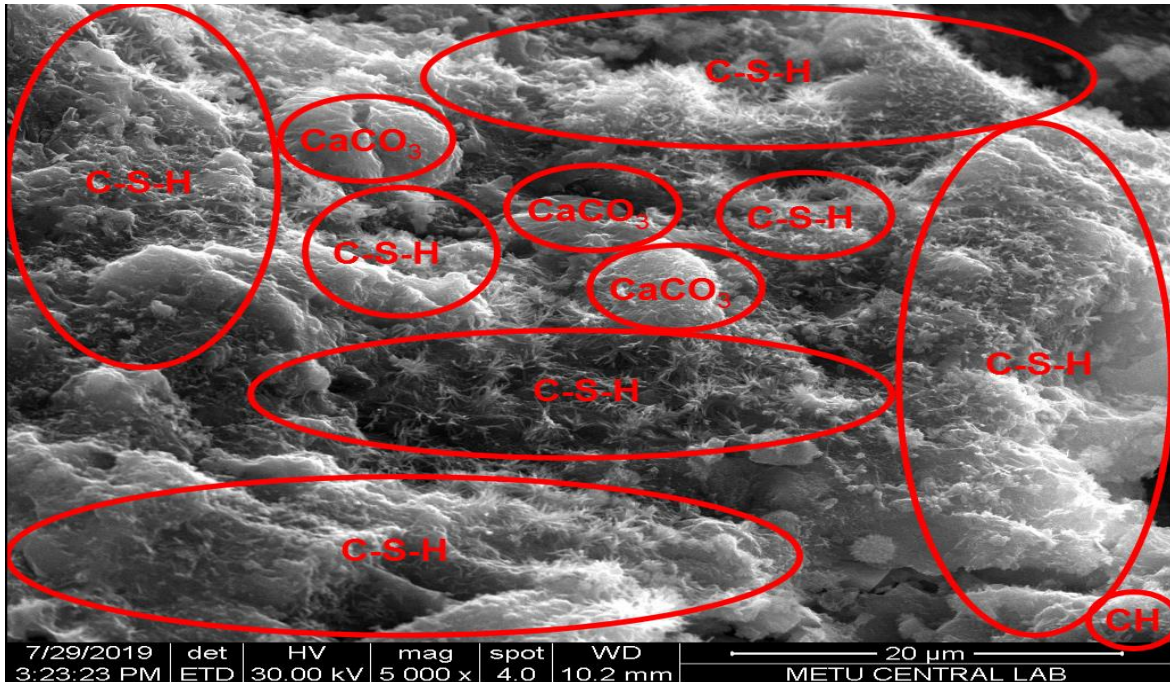
Resim 4.1. 3 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü

3 günlük kontrol betonu SEM görüntüsü incelendiğinde C-S-H yapılarının oluşmaya başladığı, yoğun olarak CH ve kısmen CaCO_3 yapıları görülmektedir.



Resim 4.2. 7 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü

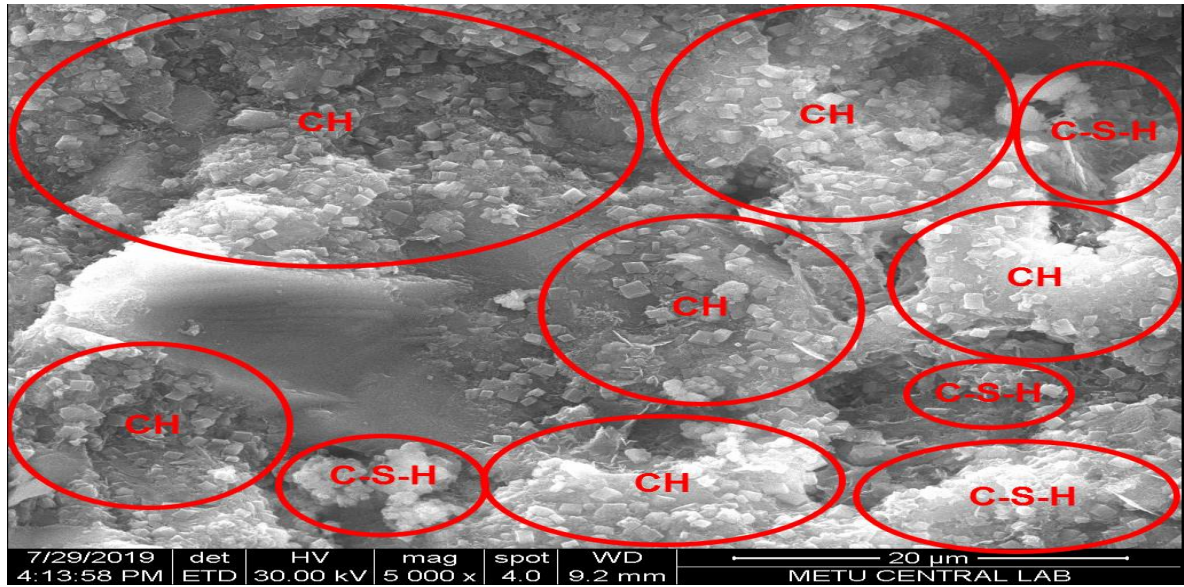
7 günlük kontrol betonu SEM görüntüsü incelendiğinde ise C-S-H yapılarının 3 güne göre arttığı, CH yapılarının 3 güne göre azalma gösterdiği ve yer yer etrenjit yapılarının oluştuğu görülmektedir.



Resim 4.3. 28 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü

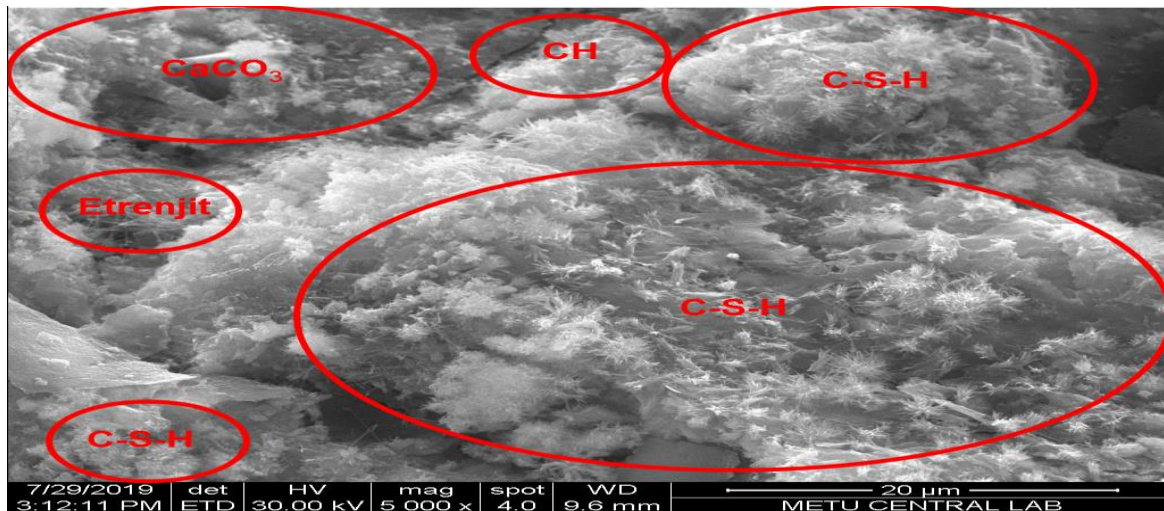
28 günlük kontrol betonu SEM görüntüsü incelendiğinde ise C-S-H yapılarının diğer günlere oranla yoğun olduğu, CH yapılarının çok az ve kısmen CaCO_3 yapılarının olduğu görülmekte olup etrenjite rastlanılmamıştır.

Jumate ve diğerleri (2012) yapmış oldukları çalışmada 3. günde genel olarak C-S-H yapılarını, 7. günde CH ve etrenjit yapılarını gözlemlemişlerdir. 28. günde ise C-S-H yapılarını yoğun olarak gözlemlemiş olup etrenjite rastlamamışlardır [124]. Bu kapsamda yapılan bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.



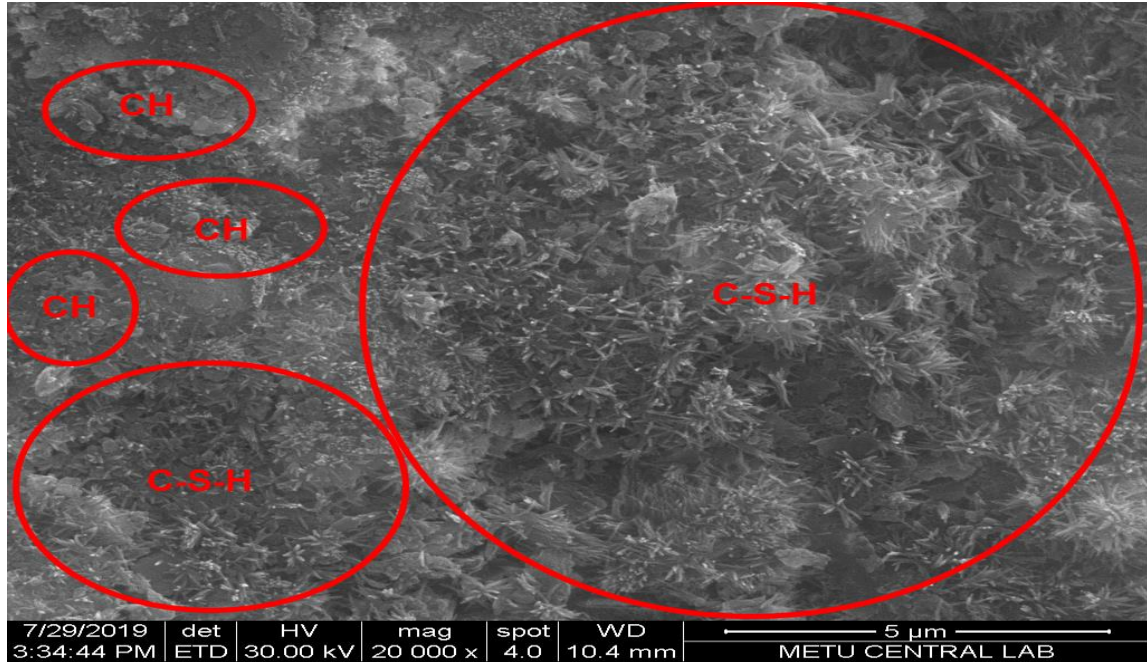
Resim 4.4. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü

3 günlük silis dumanı ikameli betonun SEM görüntüsü incelendiğinde C-S-H yapılarının oluşmaya başladığı ve reaksiyonlara bağlı CH yapılarının olduğu görülmektedir.



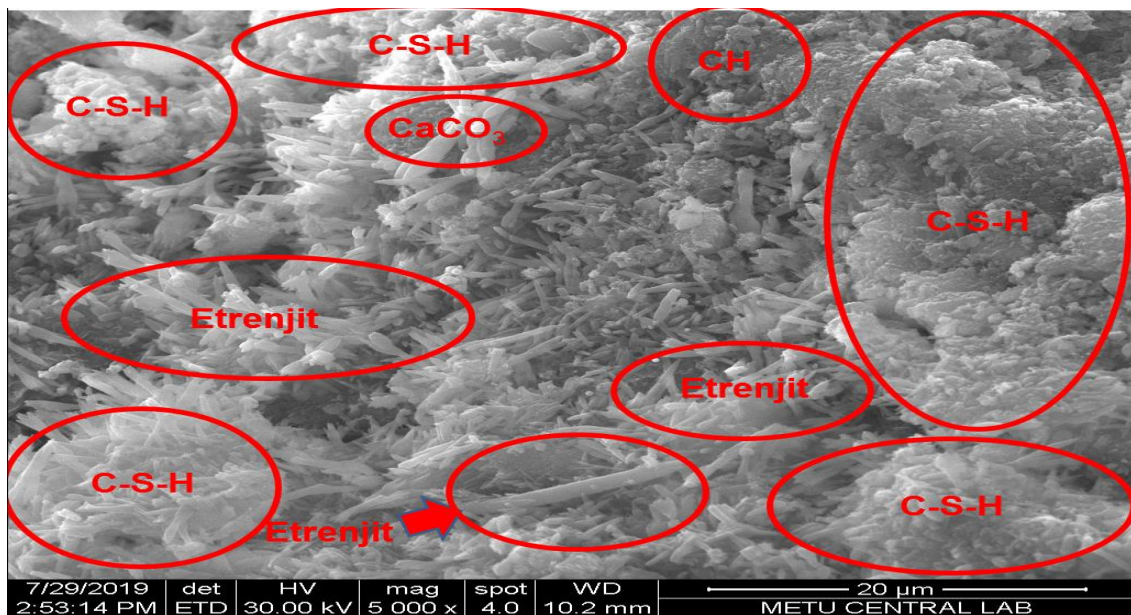
Resim 4.5. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü

7 günlük silis dumanı ikameli betonun SEM görüntüsü incelendiğinde ise C-S-H yapılarının 3 güne göre arttığı, CH yapılarının pozolanik reaksiyonlar nedeniyle 3 güne göre azalma gösterdiği ve yer yer etrenjit, CaCO_3 yapılarının oluştuğu görülmektedir.



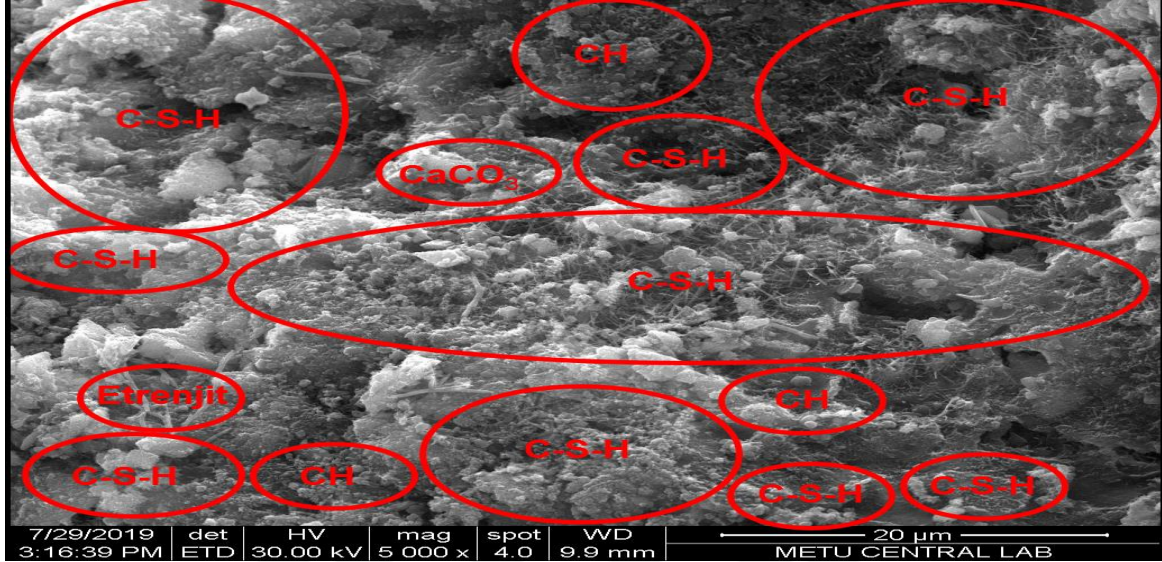
Resim 4.6. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü

28 günlük silis dumanı ikameli betonun SEM görüntüsü incelendiğinde ise; C-S-H yapıları diğer günlere oranla daha yoğun, CH ve CaCO_3 yapıları kısmen görülmüş olup etrenjite rastlanılmamıştır.



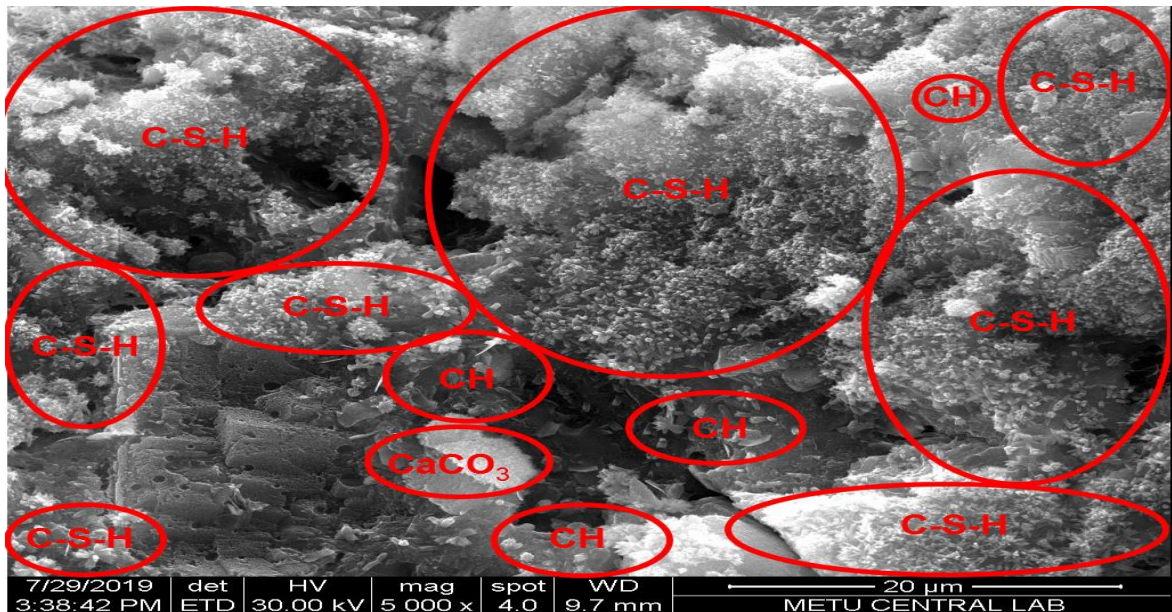
Resim 4.7. 3 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü

3 günlük zeolit ikameli betonun SEM görüntüsü incelendiğinde C-S-H yapılarının oluşmaya başladığı, reaksiyonlara bağlı CH yapılarının oluştuğu görülmekte olup kısmen etrenjit yapıları da gözlemlenmiştir.



Resim 4.8. 7 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü

7 günlük zeolit ikameli betonun SEM görüntüsü incelendiğinde; iğnemsî, petek ve bulutumsu şekilde C-S-H yapılarının yoğun olarak görüldüğü, reaksiyonlara bağlı CH yapılarının oluştuğu görülmekte olup kısmen etrenjit yapıları da gözlemlenmiştir. Lin ve diğerlerinin (2019) yapmış oldukları çalışmada da C-S-H yapıları iğnemsî ve petek şeklinde görülmüş olup etrenjit erken günlerde daha fazla görülmüştür [130].



Resim 4.9. 28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü

28 günlük zeolit ikameli betonun SEM görüntüsü incelendiğinde ise C-S-H yapıları diğer günlere oranla yoğun, CH ve CaCO_3 yapıları kısmen görülmekte olup etrenjite rastlanılmamıştır.

28 günlük görüntülerde 3 ve 7 güne oranla gelişen puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak daha fazla C-S-H gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve zeolit ikameli betonların 3 ve 7 günlük görüntülerinde puzolanik reaksiyonlar dolayısıyla CH yapıları kısmen gözlenmiş olup 28 günlük görüntülerde ise CH yapılarının bağlanmalarına bağlı olarak azaldıkları görülmüştür [18]. Artan C-S-H jelleri dolayısıyla boşlukların azalmasına bağlı olarak dayanımlarda artış meydana gelmiştir [96]. Tüm numunelerde kalker kökenli agrega yapısına bağlı olarak CaCO_3 gözlemlenmiş olup CH ve etrenjit görüntüleri de kısmen elde edilmiştir.

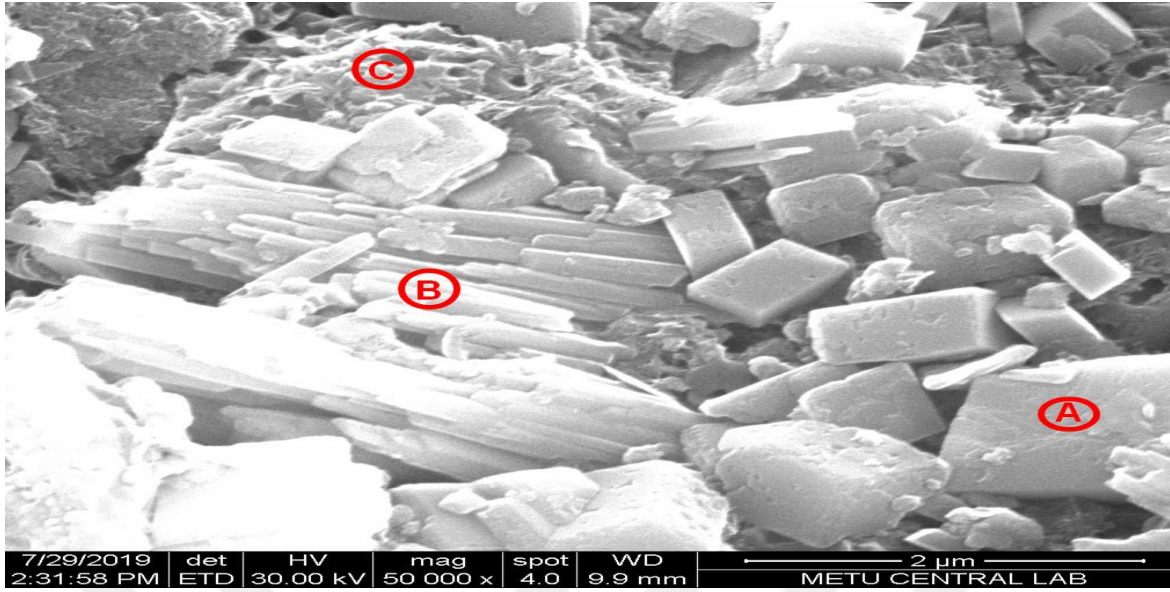
4.12.2. EDX analizleri

SEM çekimlerinde belirlenen noktalara EDX nokta analizleri yapılmıştır.

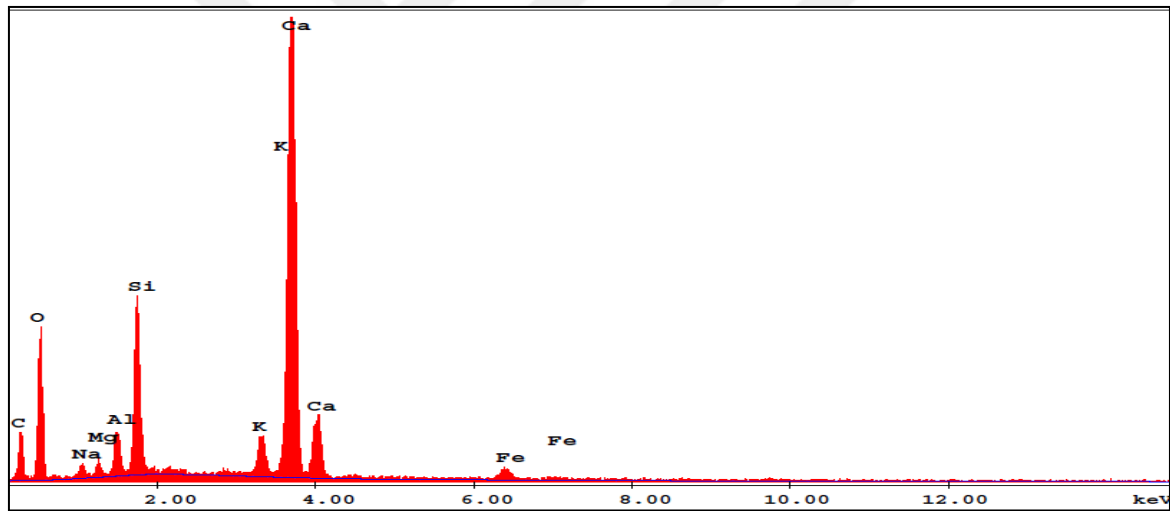
Ca+Si oranının yüksek, Al+Fe oranının düşük olması C-S-H'nin yüksek olduğunu; Ca oranının yüksek, Si ve Al+Fe oranının düşük olması CH'nin yüksek olduğunu göstermektedir [121].

3 günlük numunelere ait EDX nokta analizlerinde kükürte rastlanılmamıştır. Hidratasyon ve puzolanik reaksiyonların tam olarak gerçekleşmemesinin kükürtün görüntülenmesini engellediği değerlendirilmektedir.

3 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü Resim 4.10'da görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.17'de, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.18'de, C noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.19'da görülmektedir.



Resim 4.10. 3 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü



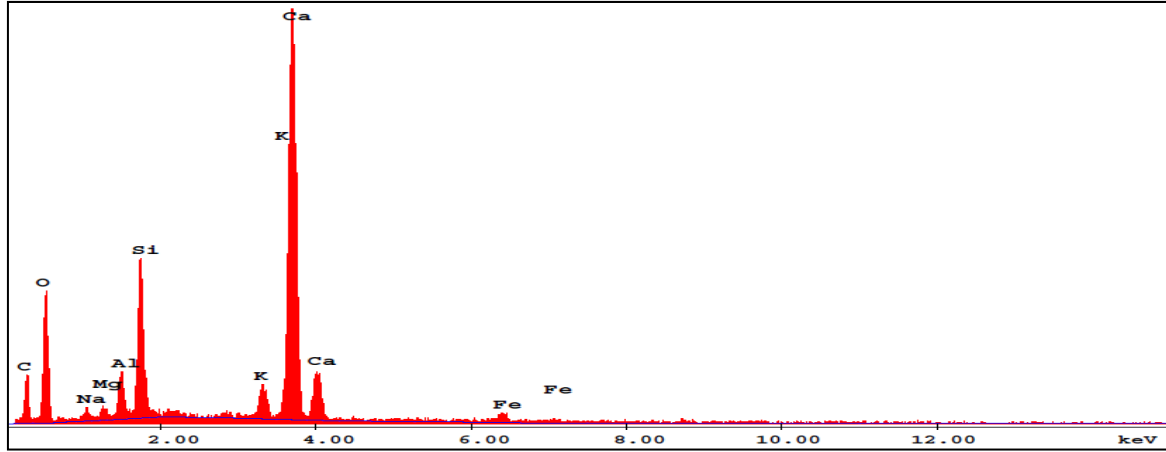
Şekil 4.17. 3 günlük kontrol betonuna ait (A noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O: 5,21; MgO: 4,98; Al₂O₃: 9; SiO₂: 25,78; K₂O:4,93; CaO:47,61; Fe₂O₃: 2,49

Atomik (%)

Na:2,14; Mg:1,2; Al: 2,8; Si:10,3; K:1,17; Ca:19; Fe: 1



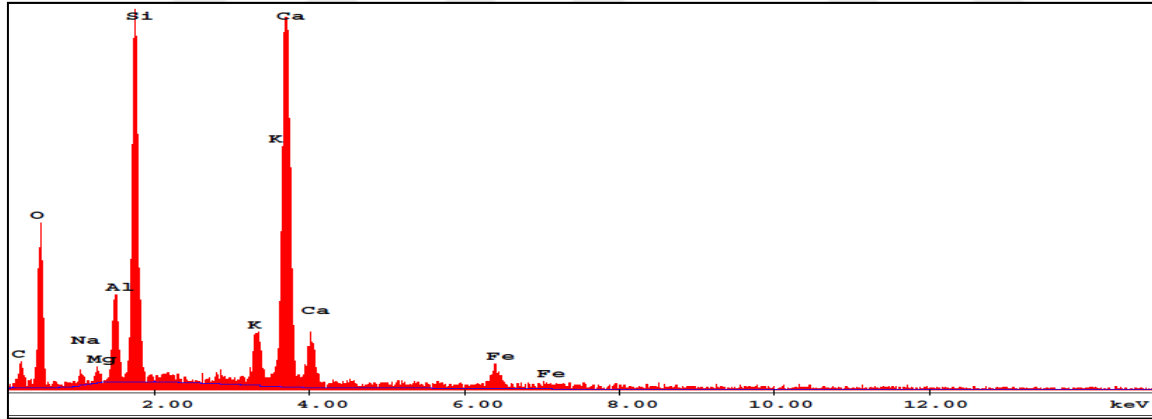
Şekil 4.18. 3 günlük kontrol betonuna ait (B noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O: 4,73; MgO:5; Al₂O₃: 9,43; SiO₂: 27,11; K₂O: 4,8; CaO:46,45; Fe₂O₃:2,1

Atomik (%)

Na:1,1; Mg:1,2; Al: 2,97; Si:10,8; K:1,12; Ca:18,5; Fe: 0,84



Şekil 4.19. 3 günlük kontrol betonuna ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H) [121]

Oksitler (%)

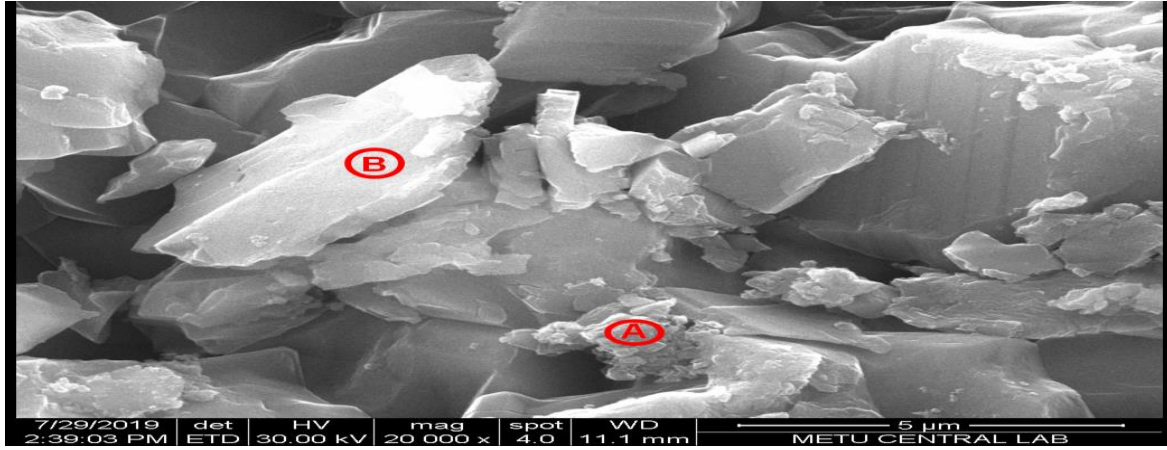
Na₂O:2; MgO:1,76; Al₂O₃: 10,51; SiO₂: 46,4; K₂O:3,6; CaO:31,7; Fe₂O₃:3,18

Atomik (%)

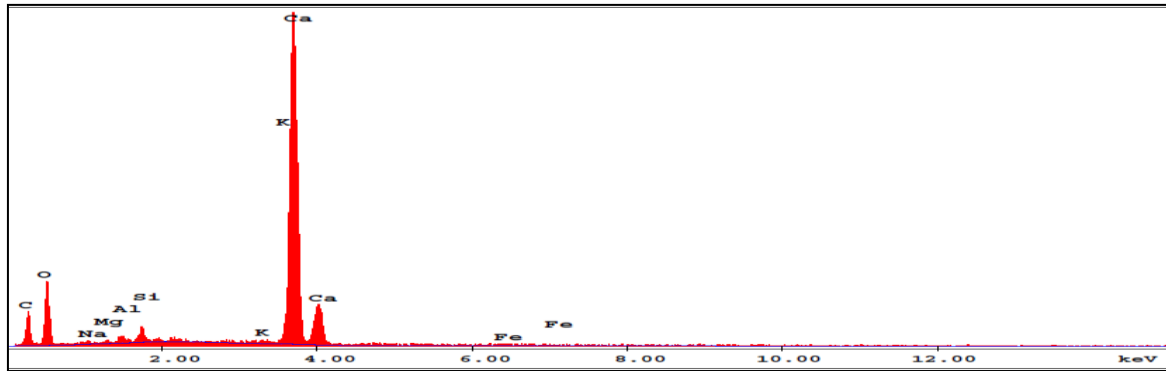
Na:0,8; Mg:0,7; Al: 4,2; Si:18,56; K:1,44; Ca:12,68; Fe:1,27

Kontrol betonuna ait 3 günlük EDX analizleri incelendiğinde A, B ve C noktalarındaki en önemli farklılıkların CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. A noktasında SiO₂/CaO oranı 0,54; B noktasında 0,58; C noktasında ise 1,46'dır. C noktasında ara yüzdeki yüksek Si iyonlarının C-S-H oranını artırdığı ve CH oranını azalttığı görülmüştür [18]. C noktasında görülen Al iyon oranının fazla olması zayıf kristalize C-S-H'nin belirgin olmasında etkili olmuştur [70,130].

3 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü Resim 4.11'de görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.20'de, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.21'de görülmektedir.



Resim 4.11. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü



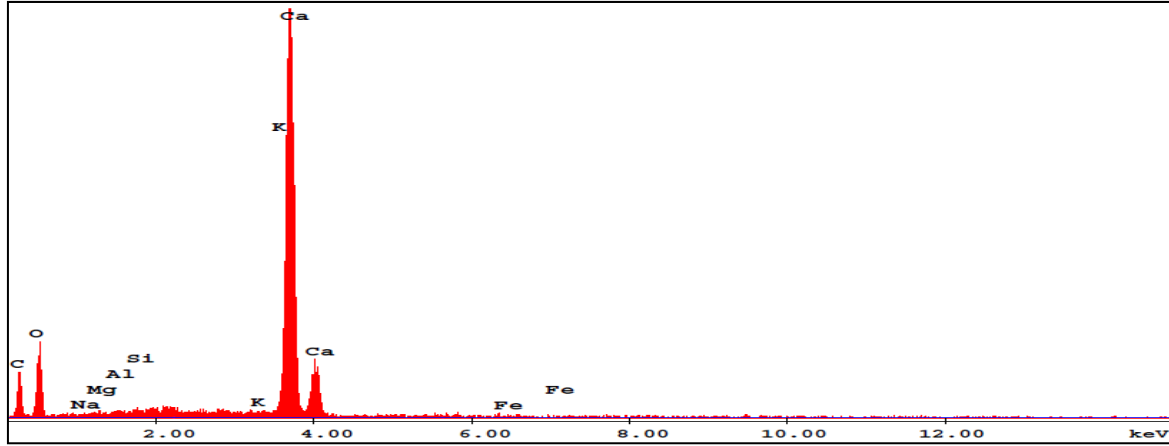
Şekil 4.20. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O: 5,28; MgO:4,55; Al₂O₃: 5,9; SiO₂:5; K₂O: 3,98; CaO:74,55; Fe₂O₃:0,8

Atomik (%)

Na:0,71; Mg:0,42; Al:1,96; Si: 2; K:0,19; Ca:29,8; Fe: 0,32



Şekil 4.21. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

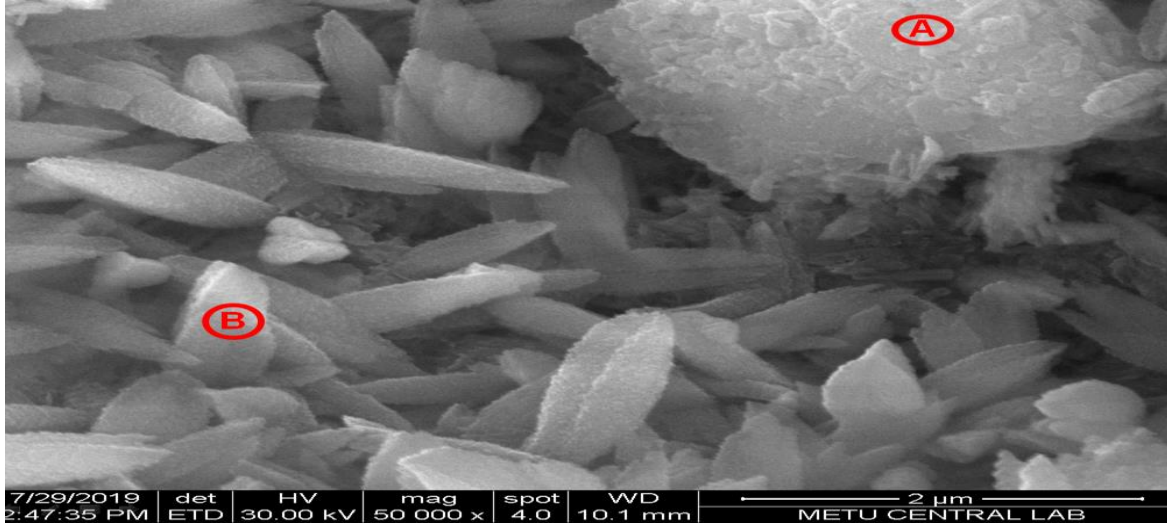
Na₂O:4,6; MgO:5,18; Al₂O₃:3,94; SiO₂:2,82; K₂O:4,69; CaO:78; Fe₂O₃: 0,79

Atomik (%)

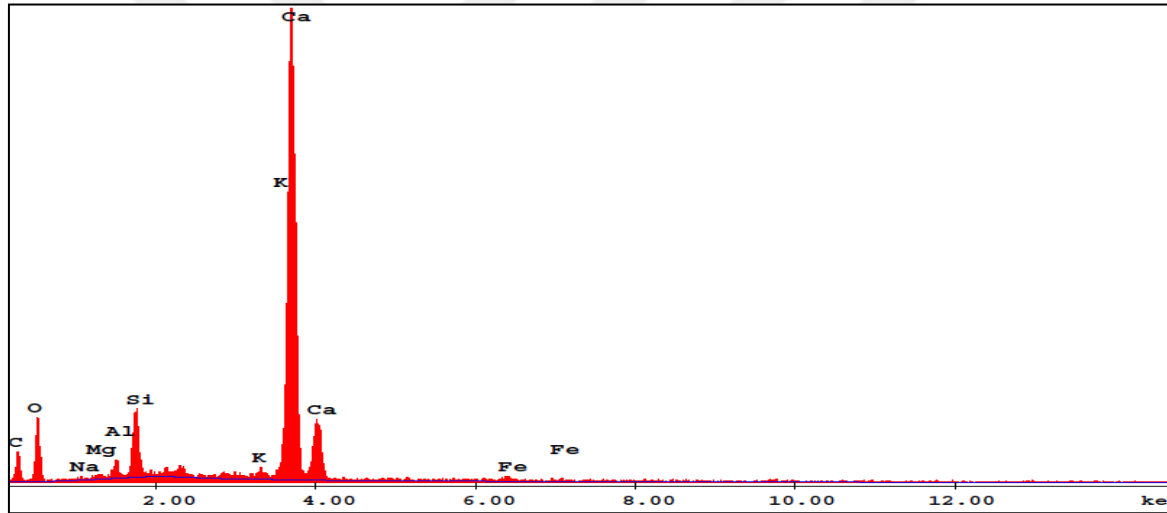
Na:0,64; Mg:0,87; Al:0,37; Si:1,12; K:0,27; Ca:3,12; Fe:0,31

Silis dumanı ikameli betona ait 3 günlük EDX analizleri incelendiğinde A ve B noktalarındaki en önemli benzerliğin CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. A noktasında SiO₂/CaO oranı 0,067; B noktasında ise 0,036'dır. Yoğun CaO oranının reaksiyonlar sonucu meydana gelen CH yapısı ile ilgili olduğu görülmüştür.

3 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü Resim 4.12'de görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.22'de, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.23'te görülmektedir.



Resim 4.12. 3 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü



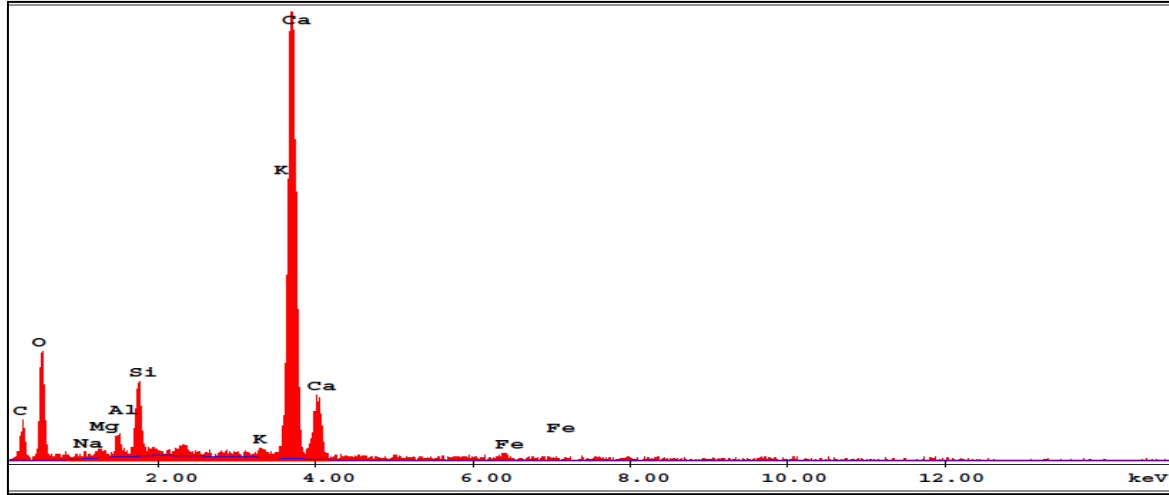
Şekil 4.22. 3 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:3,16; MgO:3,9; Al₂O₃: 4,31; SiO₂: 2,88; K₂O: 3,54; CaO:77,93; Fe₂O: 4

Atomik (%)

Na:0,26; Mg:0,56; Al:1,72; Si:1,15; K:0,41; Ca:31,17; Fe: 0,6



Şekil 4.23. 3 günlük zeolit ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CaCO_3) [121]

Oksitler (%)

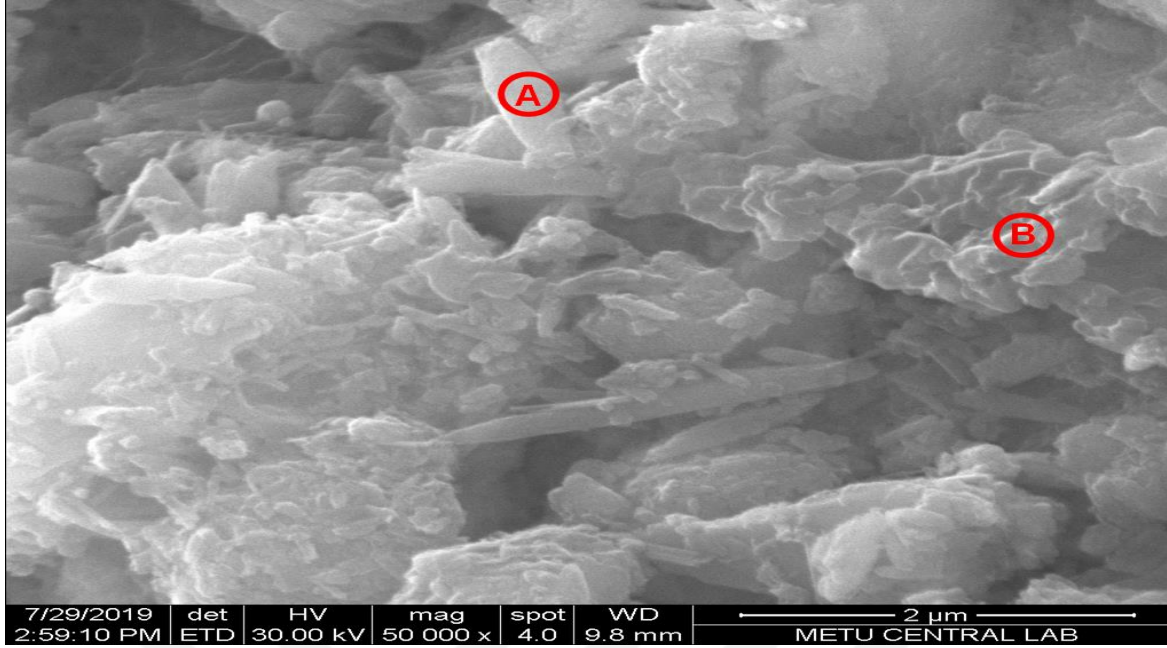
Na_2O :3,87; MgO :5,15; Al_2O_3 : 4,77; SiO_2 :15,89; K_2O : 4,87; CaO :60; Fe_2O_3 :5,43

Atomik (%)

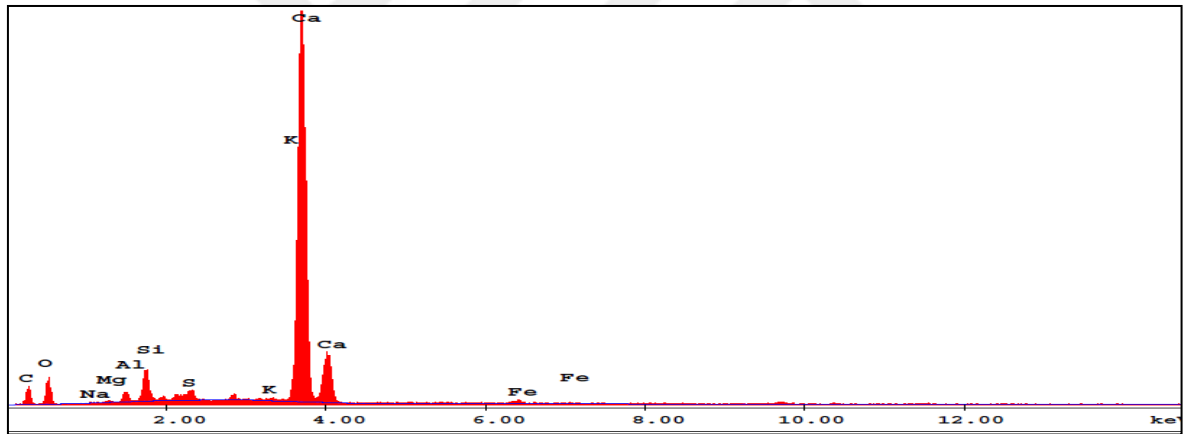
Na:0,34; Mg:0,86; Al:1,9; Si:6,35; K:0,34; Ca:24,9; Fe:0,57

Zeolit ikameli betona ait 3 günlük EDX analizleri incelendiğinde A ve B noktalarındaki en önemli farklılığın CaO ve SiO_2 kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. A noktasında SiO_2/CaO oranı 0,037; B noktasında ise 0,26'dır. Yoğun CaO oranının reaksiyonlar sonucu meydana gelen CH yapısı ile ilgili olduğu görülmüştür. B noktasındaki CaCO_3 yapısının kalker kökenli agrega kaynaklı olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca zeolitin kimyasal yapısında bulunan K ve Na iyonlarının kireç reaktivitesini ve dolayısıyla pozolanik aktiviteyi artırdığı Markiv ve diğerlerinin (2016) yapmış olduğu çalışmada da görülmüştür [90]. Şekil 4.20'de görülen oksit kompozisyonunun özellikle CaO , SiO_2 ve Al_2O_3 açısından zeolit kompozisyonunu tanımladığı görülmektedir [127].

7 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü Resim 4.13'te görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.24'te, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.25'te görülmektedir.



Resim 4.13. 7 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü



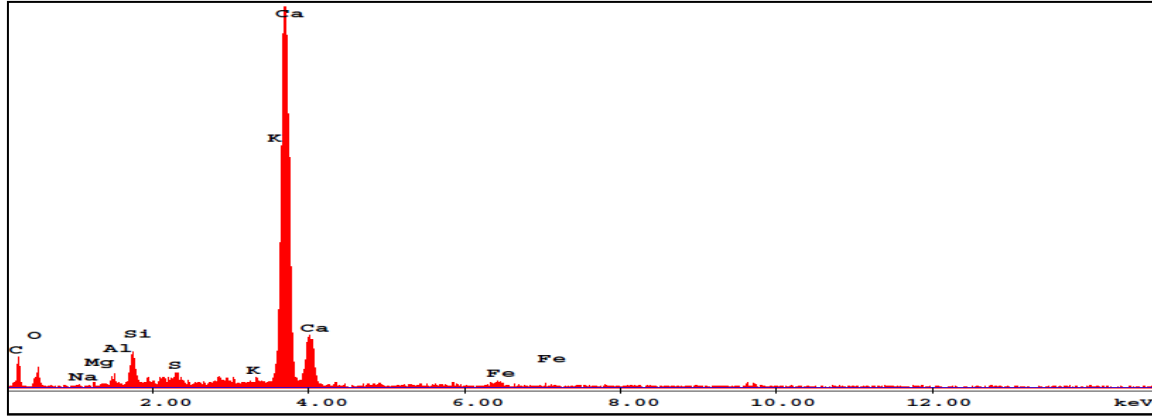
Şekil 4.24. 7 günlük kontrol betonuna ait (A noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:1,09;MgO:0,69; Al₂O₃: 3,58 ; SiO₂:10,62; SO₂:2,01; K₂O:0,29;CaO:82,61;Fe₂O₃: 0,2

Atomik (%)

Na:0,43; Mg:0,27; Al:1,43; Si: 4,24; S:0,55; K:0,11; Ca:33,6; Fe:0,08



Şekil 4.25. 7 günlük kontrol betonuna ait (B noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

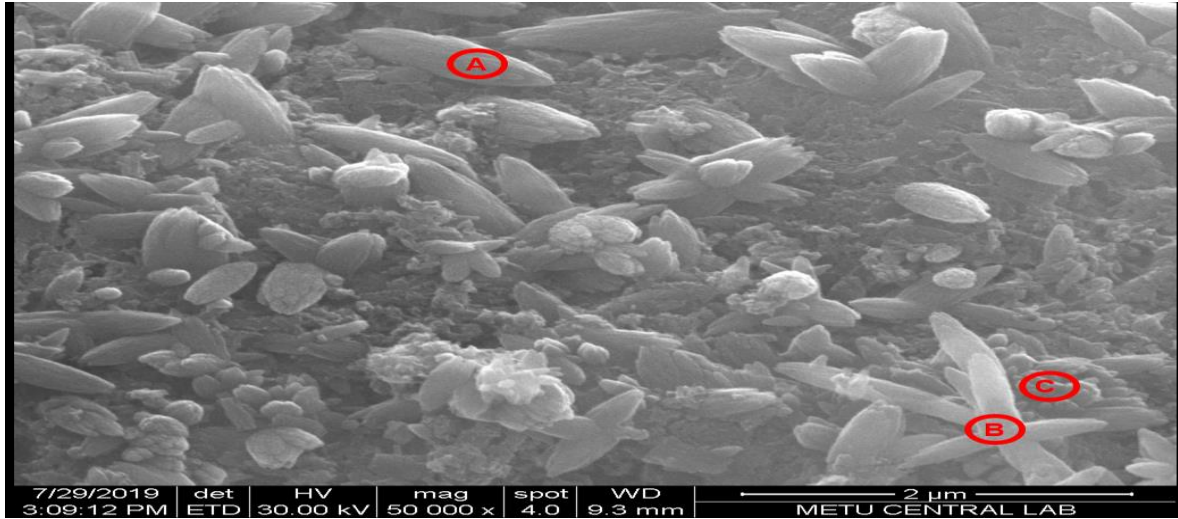
Na₂O:1,09; MgO:1,04; Al₂O₃:3,43; SiO₂:10,54; SO₂:2,51; K₂O:1,13; CaO:77,95; Fe₂O₃:2,31

Atomik (%)

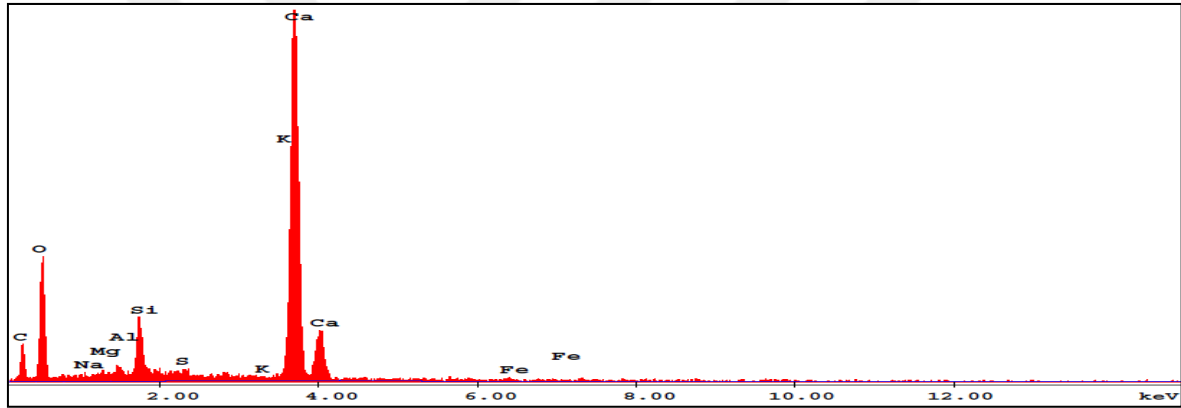
Na:0,43; Mg:0,41; Al:1,37; Si: 4,21; S:0,84; K:0,45; Ca:30,9; Fe:0,92

Kontrol betonuna ait 7 günlük EDX analizleri incelendiğinde A ve B noktalarındaki en önemli benzerliklerin CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. A noktasında SiO₂/CaO oranı 0,13; B noktasında ise 0,13'tür.

7 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü Resim 4.14'te görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.26'da, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.27'de, C noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.28'de görülmektedir.



Resim 4.14. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü



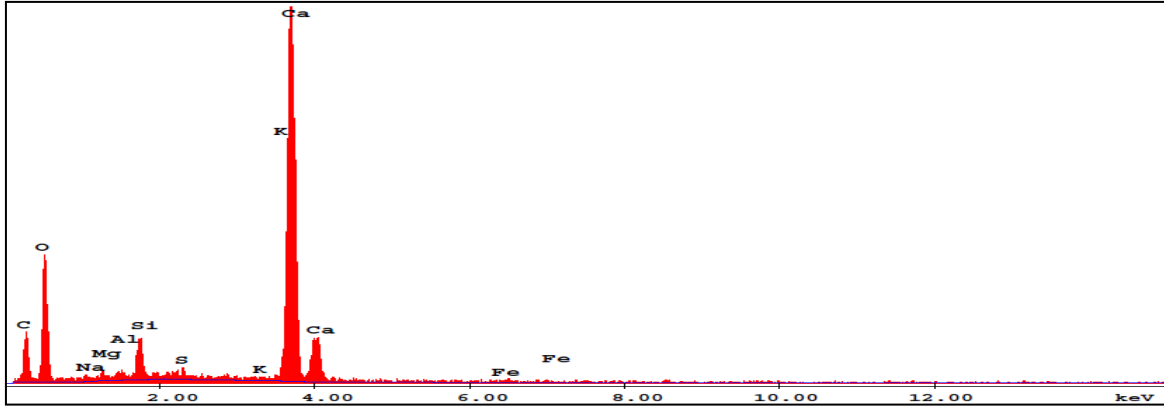
Şekil 4.26. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:6,45; MgO:7,26; Al₂O₃:4,06; SiO₂:14,78; SO₂: 1,37; K₂O:4,39; CaO:56; Fe₂O₃:5,71

Atomik (%)

Na:0,98; Mg:1,3; Al:1,62; Si: 5,91; S:0,38; K:0,15; Ca:22,04; Fe: 0,28



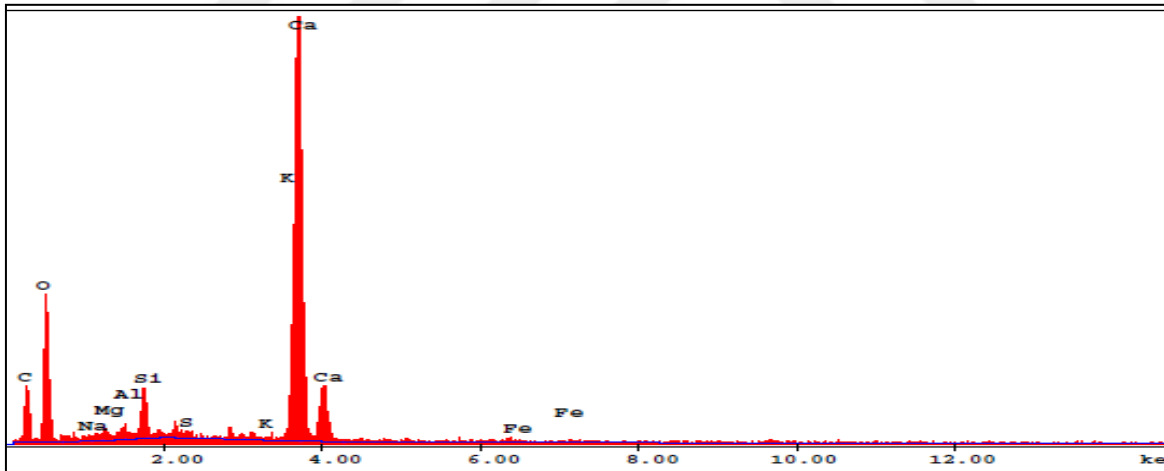
Şekil 4.27. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:4,59; MgO:5,41; Al₂O₃:5,24; SiO₂:13,4; SO₂: 4,18; K₂O:3,15; CaO:60,9; Fe₂O₃ :3,69

Atomik (%)

Na:0,71; Mg:0,52; Al: 0,65; Si: 4,1; S:0,21; K:0,14; Ca:23,2; Fe:0,27



Şekil 4.28. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:4,13; MgO:5,45; Al₂O₃:4,55; SiO₂:12,45; SO₂:0,57; K₂O:2,67; CaO:67,18; Fe₂O₃:3

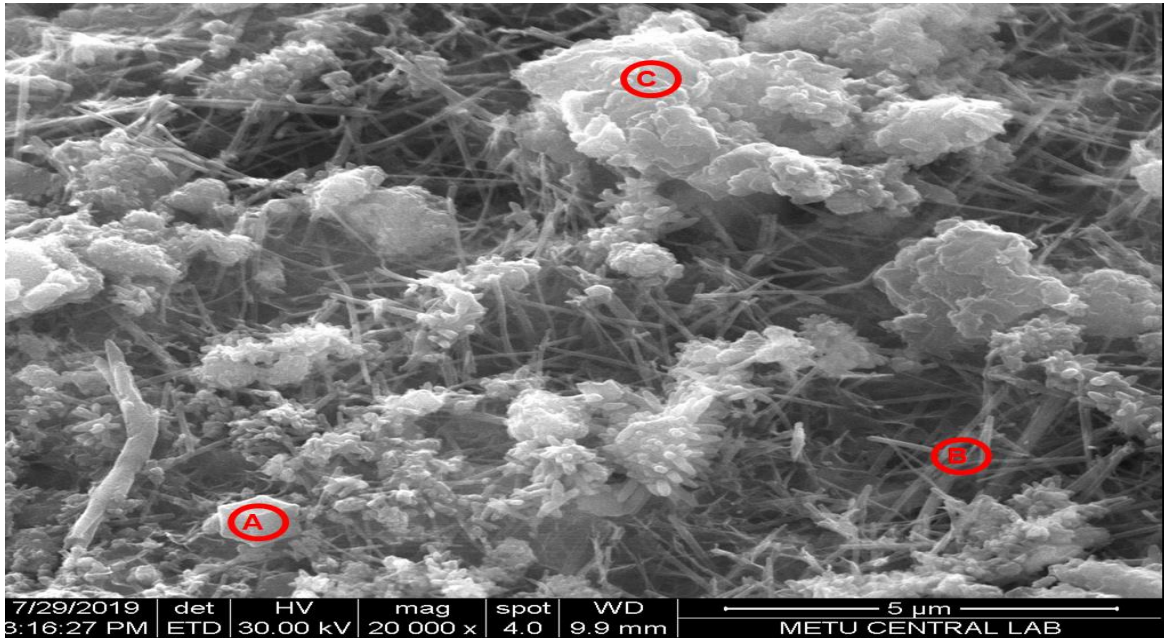
Atomik (%)

Na:0,48; Mg:1,01; Al:0,98; Si: 4; S:0,16; K:0,08; Ca:23,4; Fe:0,25

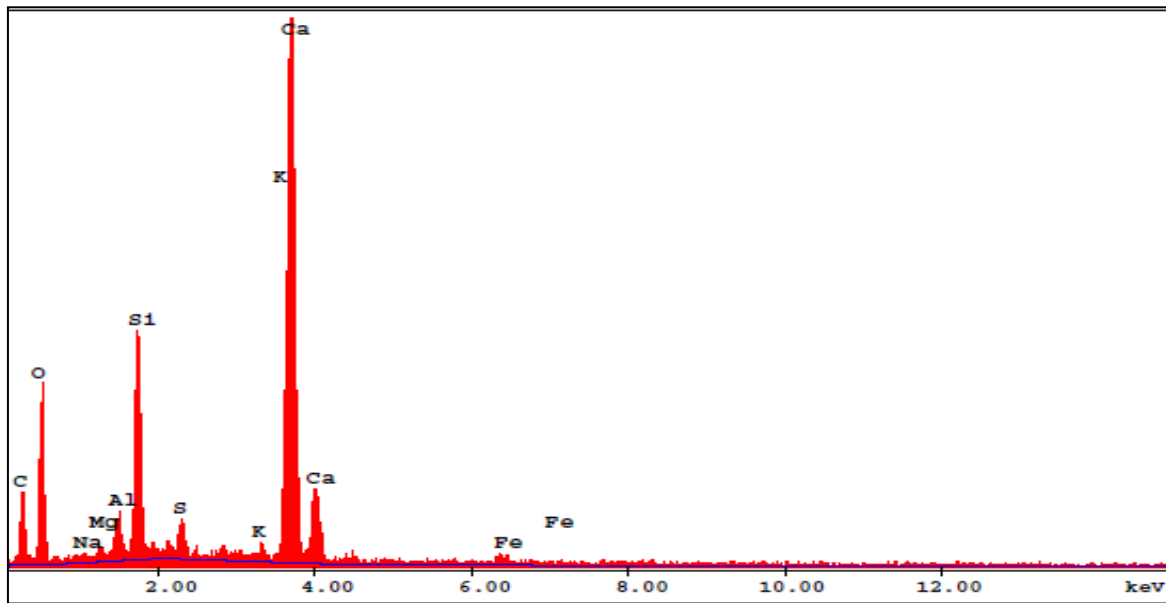
Silis dumanı ikameli betona ait 7 günlük EDX analizleri incelendiğinde A, B ve C noktalarındaki en önemli benzerliğin CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu

görülmektedir. A noktasında SiO_2/CaO oranı 0,26; B noktasında 0,22; C noktasında ise 0,18'dir. Yoğun CaO oranının reaksiyonlar sonucu meydana gelen CH yapısı ile ilgili olduğu görülmüştür.

7 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü Resim 4.15'te görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.29'da, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.30'da, C noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.31'de görülmektedir.



Resim 4.15. 7 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü



Şekil 4.29. 7 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H) [121]

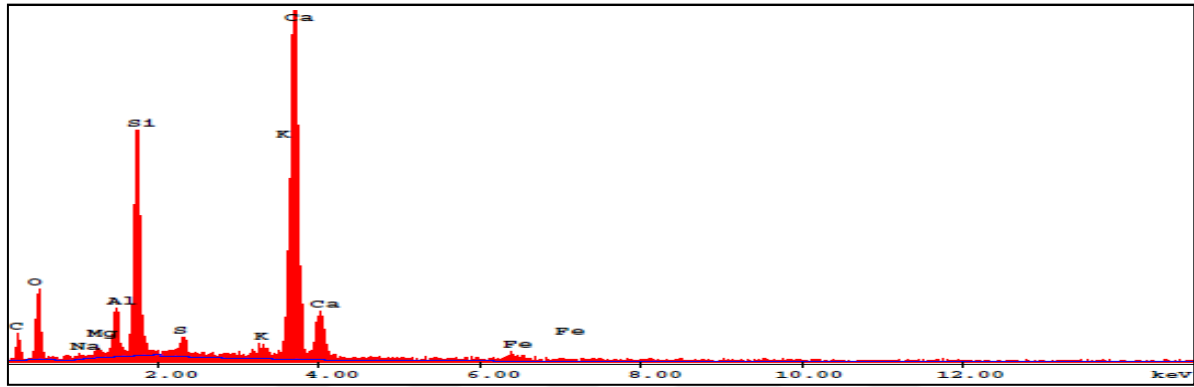
Şekil 4.29 (devam).7 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H)

Oksitler (%)

Na₂O:4,11; MgO:4,38; Al₂O₃:6,05;SiO₂:28,05;SO₂:2,29; K₂O:3,22;CaO:50,36; Fe₂O₃:1,54

Atomik (%)

Na:0,75; Mg:0,83; Al:2,42; Si:11,22; S:0,63; K:0,36; Ca:18,7; Fe:0,61



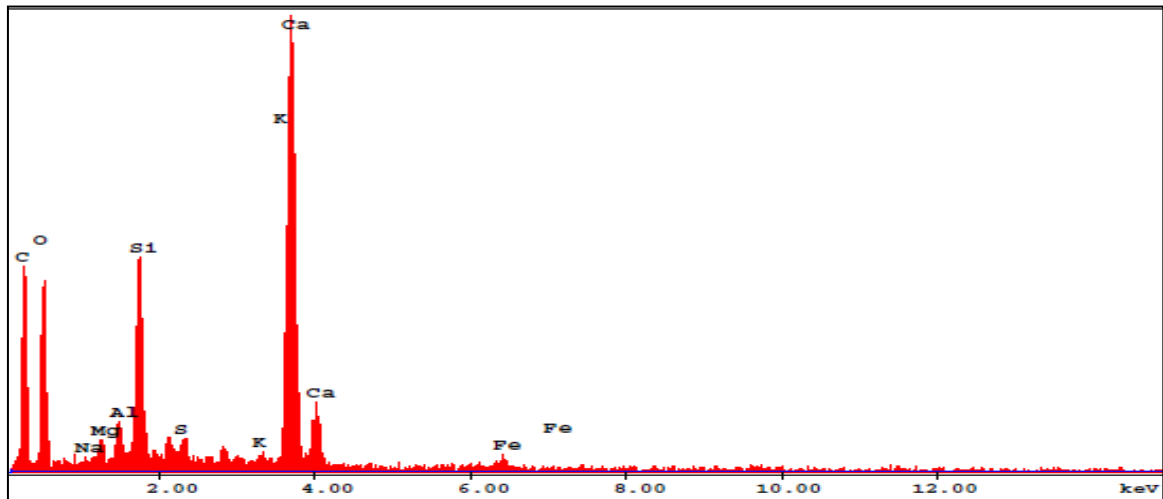
Şekil 4.30. 7 günlük zeolit ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (Etrenjit) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:2,18; MgO:2,59; Al₂O₃:8,2; SiO₂: 37,8; SO₂:2,45; K₂O:1,04; CaO:44,09; Fe₂O₃:1,65

Atomik (%)

Na:0,39; Mg:0,55; Al: 3,28; Si:15,12; S:0,75; K:0,41; Ca:17,43; Fe:0,24



Şekil 4.31. 7 günlük zeolit ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H) [121]

Şekil 4.31 (devam). 7 günlük zeolit ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H)

Oksitler (%)

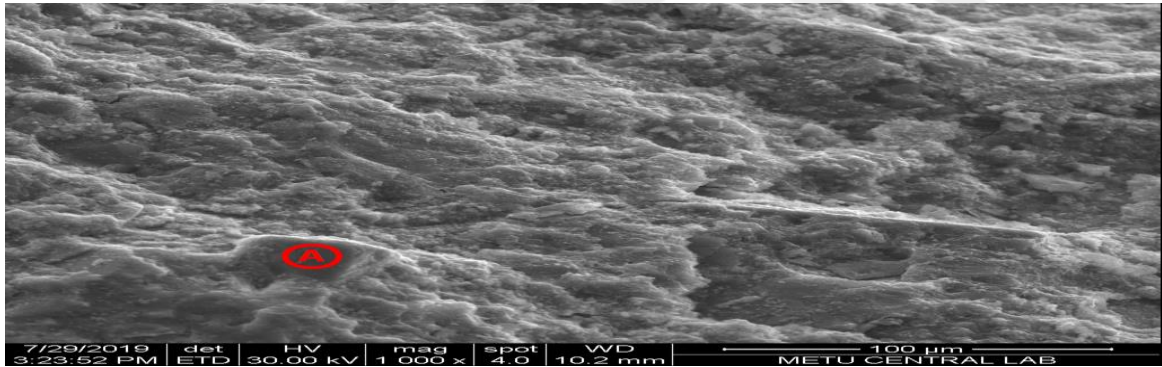
Na₂O:6,39; MgO:8,4; Al₂O₃:5,61; SiO₂:23,61;SO₂:1,417; K₂O:5,49;CaO:42,67;Fe₂O₃ :6,41

Atomik (%)

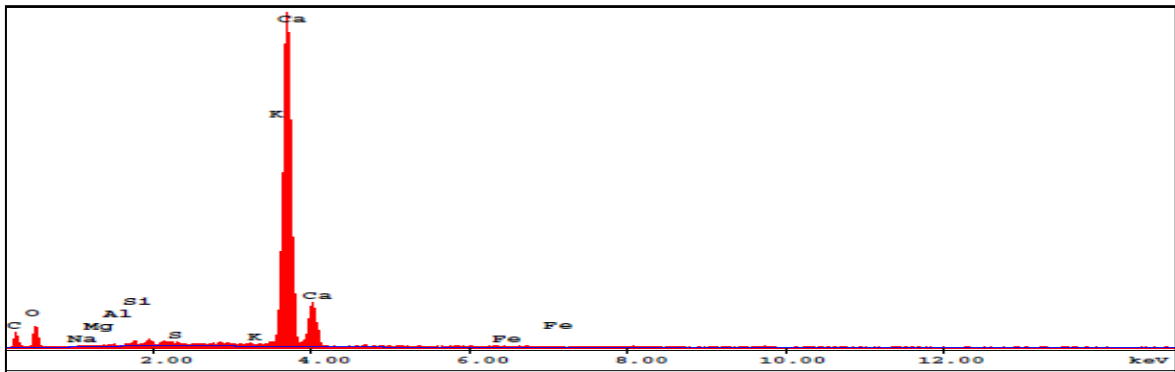
Na:0,72; Mg:1,52; Al:2,24; Si:9,44; S:0,34; K:0,36; Ca:14,5; Fe:0,73

Zeolit ikameli betona ait 7 günlük EDX analizleri incelendiğinde A, B ve C noktalarındaki en önemli benzerliğin Al₂O₃, CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. A noktasında SiO₂/CaO oranı 0,55; B noktasında 0,85; C noktasında ise 0,55'tir. A ve C noktalarında görülen Al iyon oranının fazla olması zayıf kristalize C-S-H'nin belirgin olmasında etkili olmuştur [70,130].

28 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü Resim 4.16'da görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.32'de görülmektedir.



Resim 4.16. 28 günlük kontrol betonuna ait SEM görüntüsü



Şekil 4.32. 28 günlük kontrol betonuna ait (A noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Şekil 4.32 (devam). 28 günlük kontrol betonuna ait (A noktası) EDX analizi, (CH)

Oksitler (%)

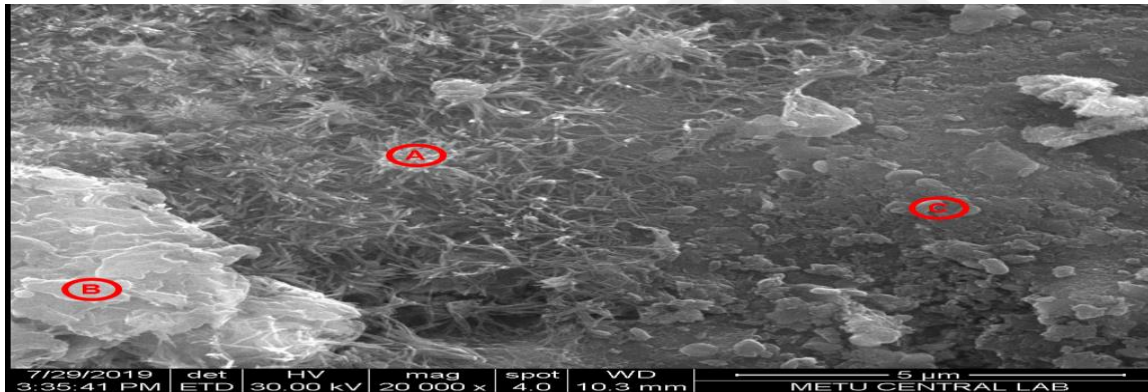
Na₂O:1,32; MgO:1,53; Al₂O₃:0,61; SiO₂:1,71; SO₂:0,62; K₂O:0,4; CaO:92,99; Fe₂O₃ :0,82

Atomik (%)

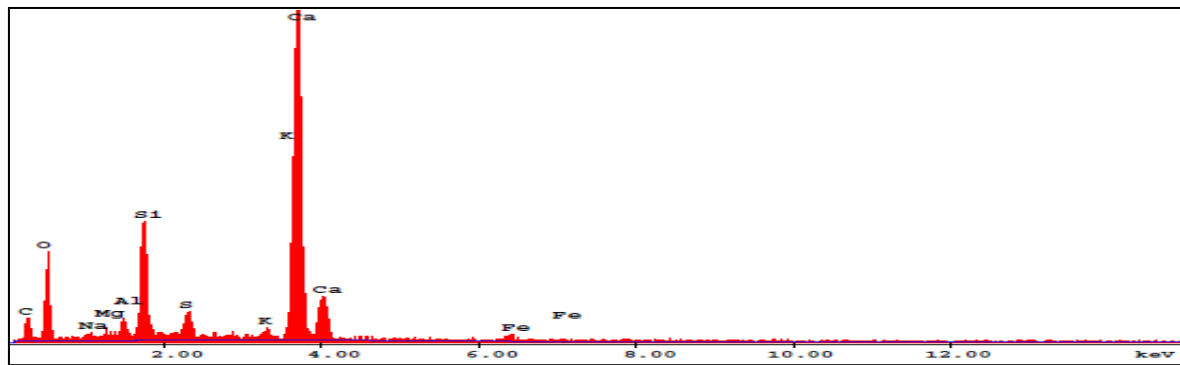
Na:0,2; Mg:0,29; Al:0,24; Si:0,68; S:0,21; K:0,16; Ca:37,1; Fe:0,32

Kontrol betonuna ait 28 günlük EDX analizleri incelendiğinde A noktasındaki SiO₂/CaO oranının 0,018 olduğu görülmüştür.

28 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü Resim 4.17’de görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.33’te, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.34’te, C noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.35’te görülmektedir.



Resim 4.17. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait SEM görüntüsü



Şekil 4.33. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H) [121]

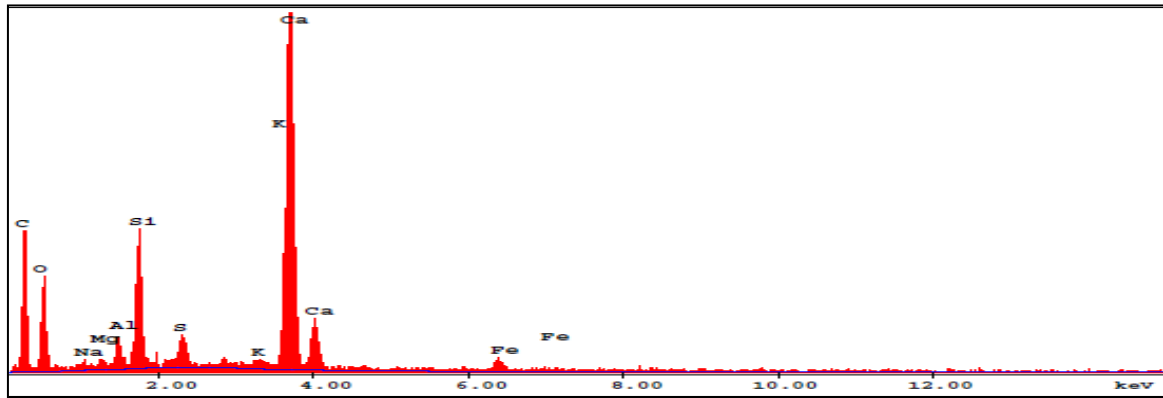
Şekil 4.33 (devam). 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H)

Oksitler (%)

Na₂O:5; MgO:4,39; Al₂O₃:4,28; SiO₂: 20,26; SO₂: 3,71; K₂O:1,51; CaO:58,97; Fe₂O₃:1,88

Atomik (%)

Na:1,08; Mg:0,84; Al:1,71; Si: 8,1; S:1,11; K:0,6; Ca:22,46; Fe:0,75



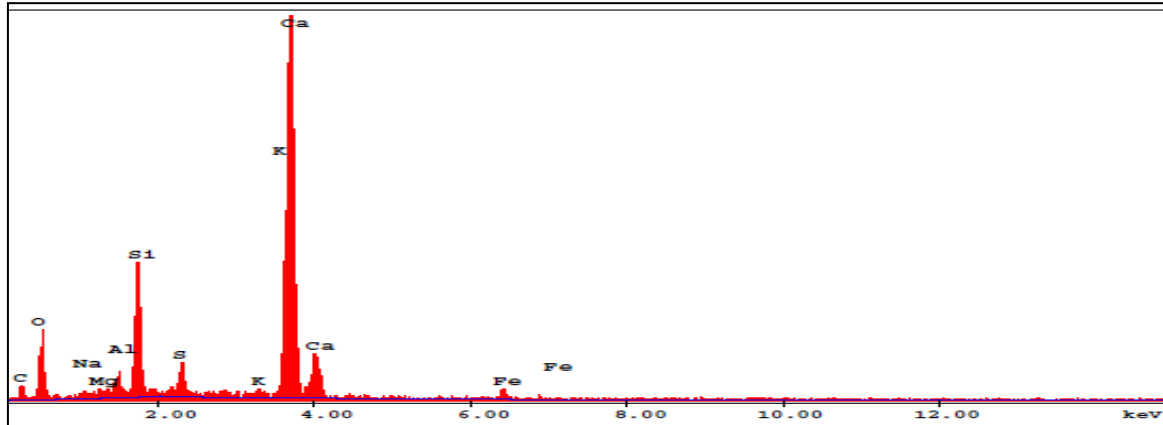
Şekil 4.34. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (C-S-H) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:6,59; MgO:6,04; Al₂O₃:4,86; SiO₂:21,9; SO₂:2,21; K₂O:5,16; CaO:51,61; Fe₂O₃:2,63

Atomik (%)

Na:0,87; Mg:0,65; Al:1,94; Si: 8,76; S:0,54; K:0,3; Ca:17,55; Fe:1,05



Şekil 4.35. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H) [121]

Şekil 4.35 (devam). 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait (C noktası) EDX analizi, (C-S-H)

Oksitler (%)

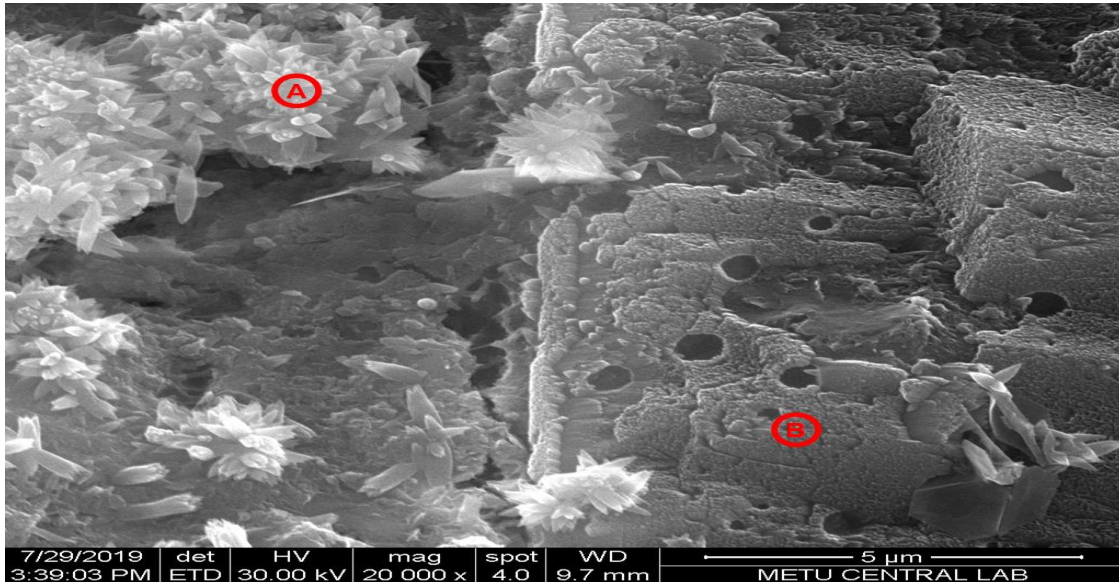
Na₂O:1,93; MgO:1,92; Al₂O₃:5,08; SiO₂:28,27; SO₂:4,07; K₂O:0,68; CaO:56,35; Fe₂O₃:1,7

Atomik (%)

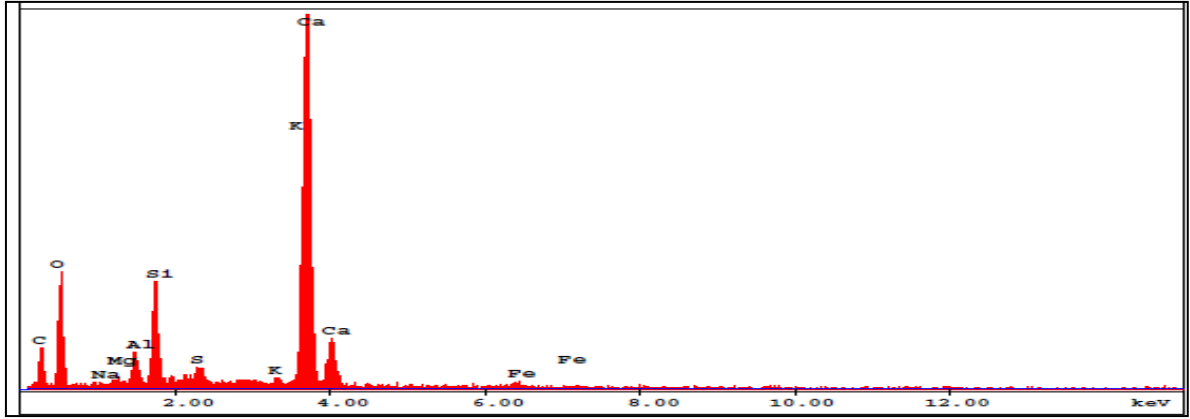
Na:0,7; Mg:0,76; Al:2,03; Si: 11,3; S:1,30; K:0,27; Ca:21,36; Fe:0,68

Silis dumanı ikameli betona ait 28 günlük EDX analizleri incelendiğinde A, B ve C noktalarındaki en önemli benzerliğin Al₂O₃, CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. A noktasında SiO₂/CaO oranı 0,34; B noktasında 0,42; C noktasında ise 0,5'tir. Tüm noktalarda görülen Al iyon oranının fazla olması zayıf kristalize C-S-H'nin belirgin olmasında etkili olmuştur [70,130]. Pozolanik reaksiyonların oluşmasına bağlı olarak C-S-H yapılarının oluştuğu gözlemlenmiştir.

28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü Resim 4.18'de görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.36'da, B noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.37'de görülmektedir.



Resim 4.18. 28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü



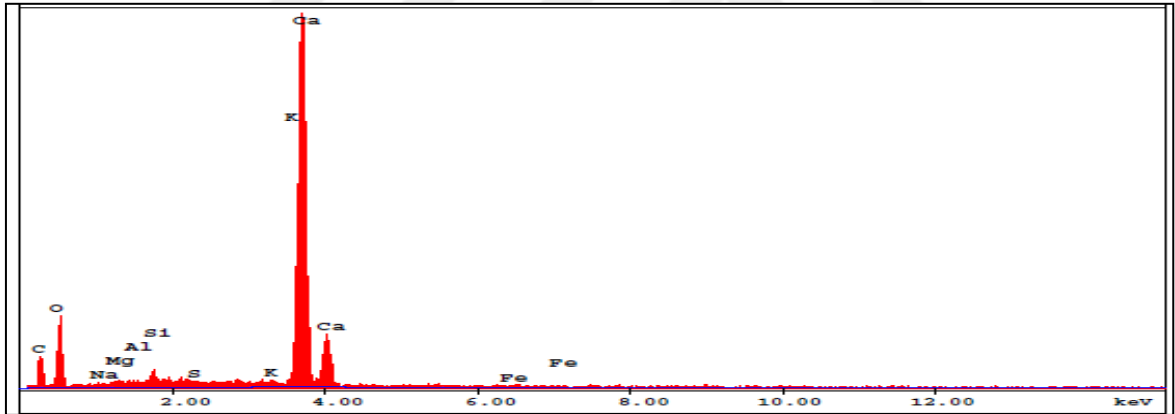
Şekil 4.36. 28 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (C-S-H) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:2,91; MgO:3,4; Al₂O₃:8,56; SiO₂: 22,75; SO₂: 3,095; K₂O:2,57; CaO:53,6; Fe₂O₃:3,08

Atomik (%)

Na:0,66; Mg:0,89; Al:2,92; Si:8,48; S:0,87; K:0,4; Ca:20,52; Fe:0,61



Şekil 4.37. 28 günlük zeolit ikameli betona ait (B noktası) EDX analizi, (CH) [121]

Oksitler (%)

Na₂O:3,87; MgO:3,82; Al₂O₃:3,65; SiO₂: 7,11; SO₂: 2,27; K₂O:2,18; CaO:74,7; Fe₂O₃:2,4

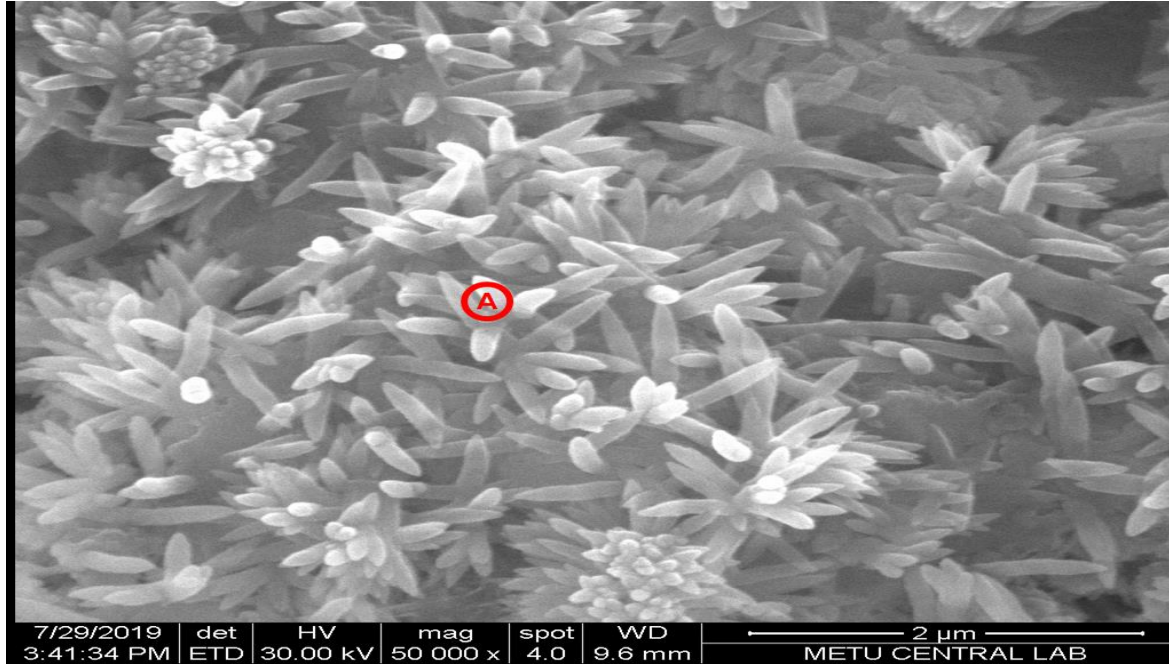
Atomik (%)

Na:0,96; Mg:0,94; Al:0,87; Si:1,92; S:0,64; K:0,28; Ca:29,3; Fe:0,37

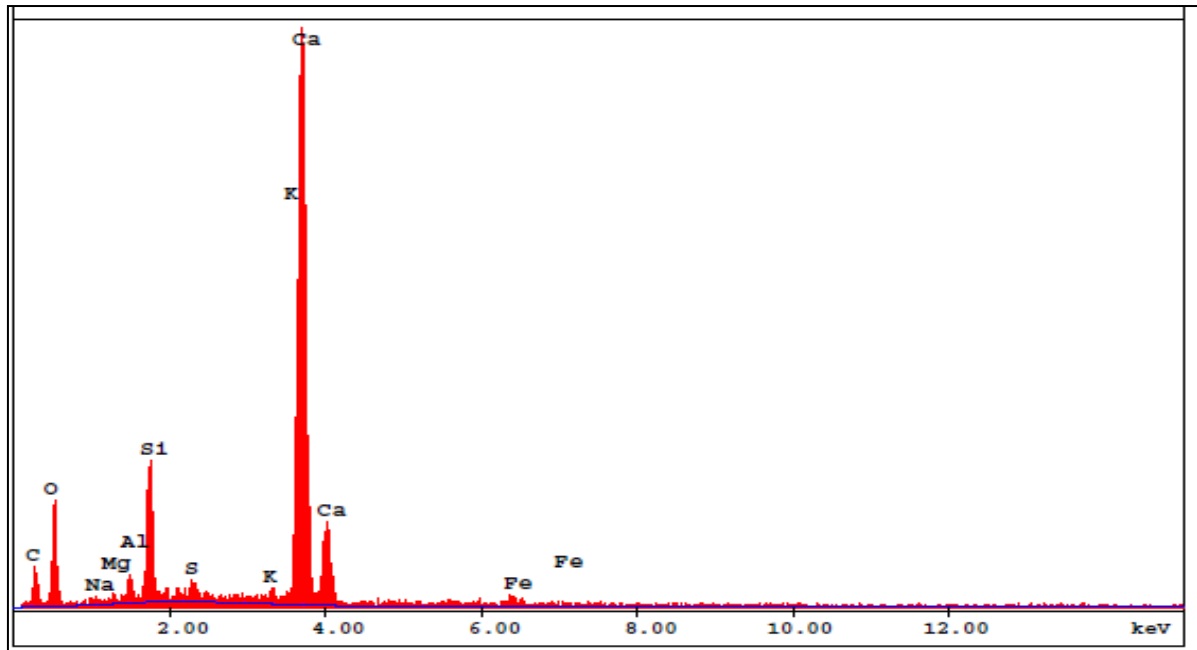
Zeolit ikameli betona ait 28 günlük EDX analizleri incelendiğinde A ve B noktalarındaki en önemli farklılığın CaO ve SiO₂ kompozisyonlarında olduğu görülmektedir. A noktasında SiO₂/CaO oranı 0,42; B noktasında ise 0,095'tir. A noktasında görülen Al

iyon oranının fazla olması zayıf kristalize C-S-H'nin belirgin olmasında etkili olmuştur [70,130]. Puzolanik reaksiyonlar sonucu C-S-H yapılarının oluştuğu kısmen CH yapılarının da bulunduğu görülmüştür.

28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü Resim 4.19'da görülmekte olup söz konusu görüntünün A noktasından alınan EDX analizi Şekil 4.38'de görülmektedir.



Resim 4.19. 28 günlük zeolit ikameli betona ait SEM görüntüsü



Şekil 4.38. 28 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CaCO_3) [121]

Şekil 4.38 (devam). 28 günlük zeolit ikameli betona ait (A noktası) EDX analizi, (CaCO_3)

Oksitler (%)

Na_2O :1,66; MgO :1,39; Al_2O_3 :4,82; SiO_2 :23,43; SO_2 :2,92; K_2O :1,24; CaO :62,27; Fe_2O_3 :2,25

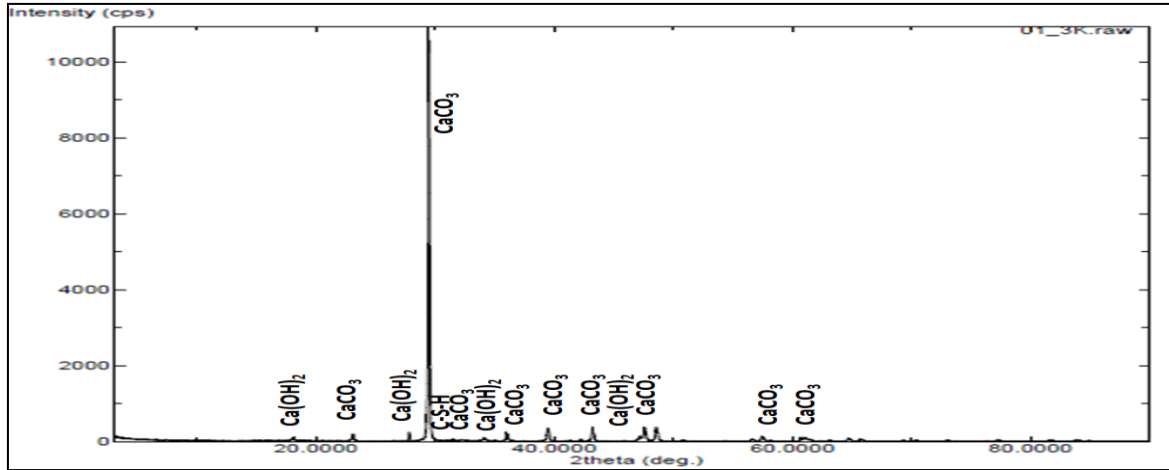
Atomik (%)

Na:0,5; Mg:0,39; Al:1,76; Si:9,2; S:1; K:0,33; Ca:24,74; Fe:0,73

Zeolit ikameli betona ait 28 günlük EDX analizi incelendiğinde A noktasındaki SiO_2/CaO oranı 0,37 olarak bulunmuştur.

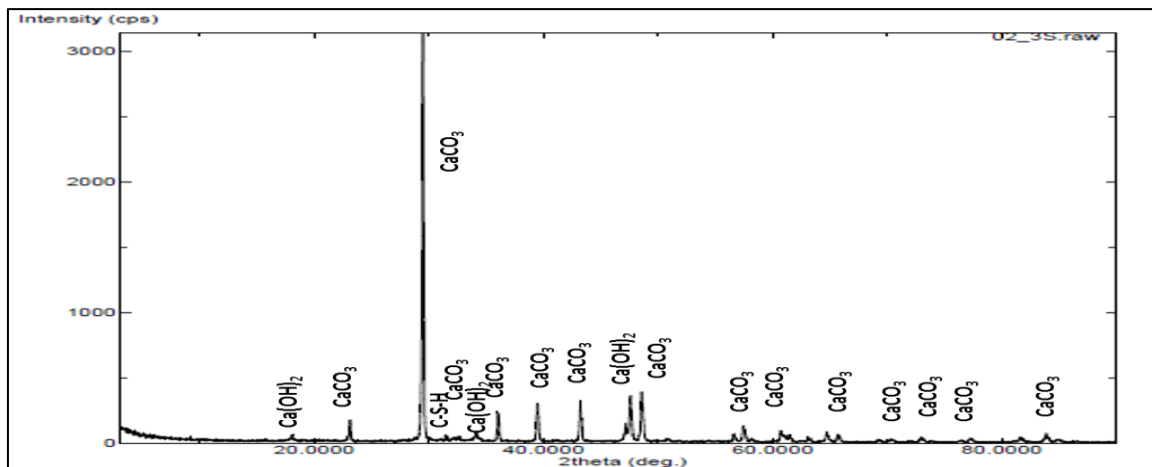
4.12.3. XRD deneyleri

ODTÜ Merkez Laboratuvarında bulunan Rigaku-Ultima-IV X-ışını kırınım cihazında $2\Theta=3-90^\circ$ ölçüm aralığında, 1 derece/dak tarama hızında 3, 7 ve 28 günlük beton numune parçalarının XRD analizi yapılmış olup 3 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği Şekil 4.39'da, 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği Şekil 4.40'ta, 3 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği Şekil 4.41'de, 7 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği Şekil 4.42'de, 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği Şekil 4.43'te, 7 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği Şekil 4.44'te, 28 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği Şekil 4.45'te, 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği Şekil 4.46'da, 28 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği Şekil 4.47'de; 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı XRD grafiği Şekil 4.48'de; 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı XRD grafiği Şekil 4.49'da; 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı XRD grafiği Şekil 4.50'de görülmektedir. Yapılan analizlerde $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , C-S-H ve quartz gözlemlenmiştir.



Şekil 4.39. 3 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği

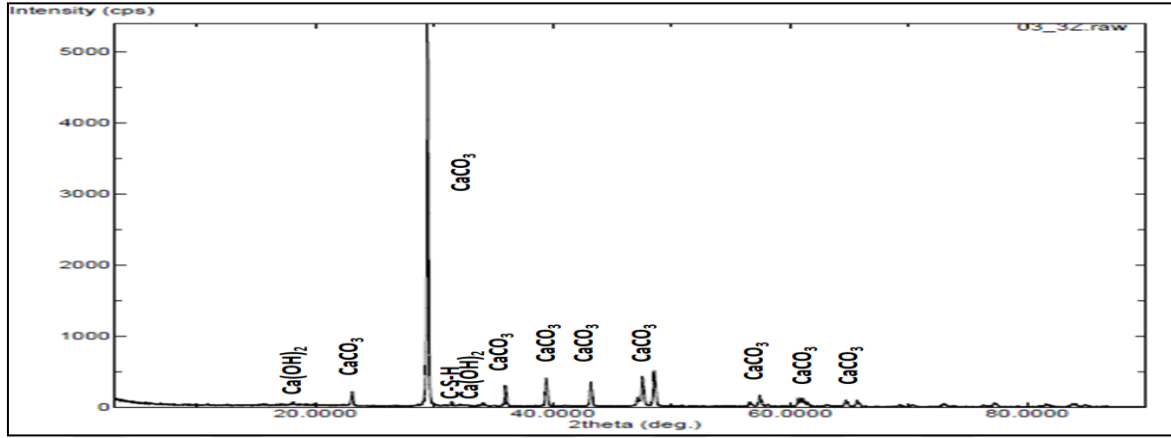
3 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği incelendiğinde yoğun olarak gözlemlenen CaCO_3 'ın kalker kökenli agregadan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. C-S-H'nin amorf ve düzensiz yapıda olması görüntülenmesini zorlaştırmaktadır. C-S-H, zayıf kristalize olmasından dolayı zayıf piklerde görülmüştür. Kalsit $2\theta = 28^\circ$ açıda güçlü pikte ve diğer açılarda zayıf piklerde, Ca(OH)_2 ise $2\theta = 18^\circ, 28,6^\circ, 34,1^\circ, 48^\circ$ açılarında zayıf piklerde görülmüştür. Lu ve diğerleri (2018) de yapmış oldukları çalışmada XRD analizlerinde C-S-H'ı zayıf piklerde, kalsiti $2\theta = 28^\circ$ açıda en güçlü pikte, Ca(OH)_2 'i ise $2\theta = 18^\circ, 28,6^\circ, 34,1^\circ, 48^\circ$ açılarında zayıf piklerde görmüşlerdir [125]. Lin ve diğerleri (2019) de yapmış oldukları çalışmada XRD analizlerinde Ca(OH)_2 'i $2\theta = 18^\circ, 28,6^\circ, 34,1^\circ, 48^\circ$ açılarında görmüşlerdir [130].



Şekil 4.40. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği

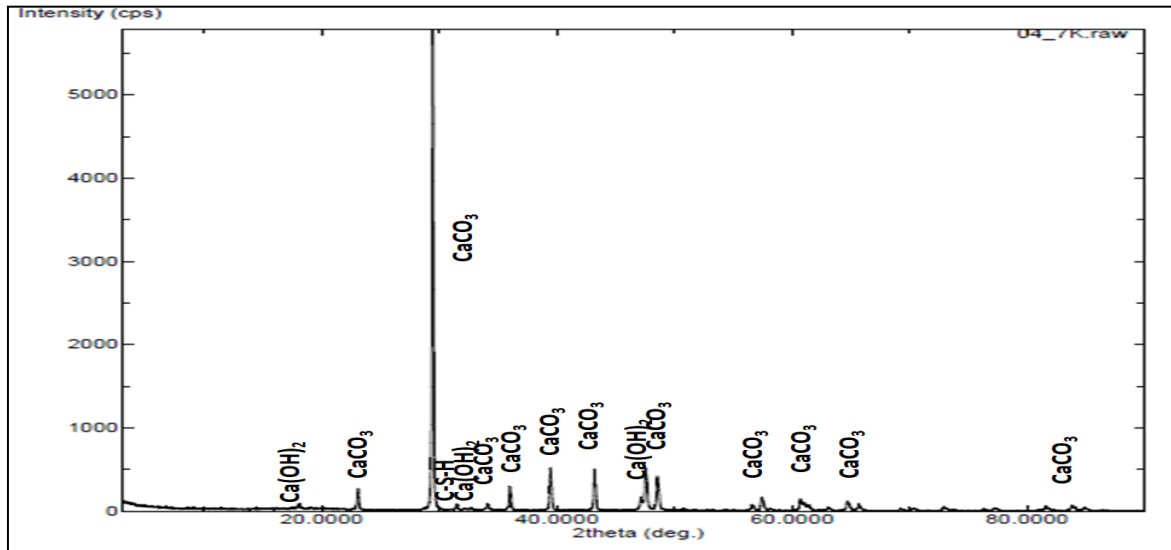
3 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği incelendiğinde CaCO_3 yüksek ve zayıf piklerde, C-S-H zayıf piklerde görülmüştür. Kalsit $2\theta = 28^\circ$ açıda güçlü pikte ve

diğer açılarda zayıf piklerde, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ise $2\theta = 18^\circ$; $28,6^\circ$; $34,1^\circ$; 48° açılarında zayıf piklerde görülmüştür.



Şekil 4.41. 3 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği

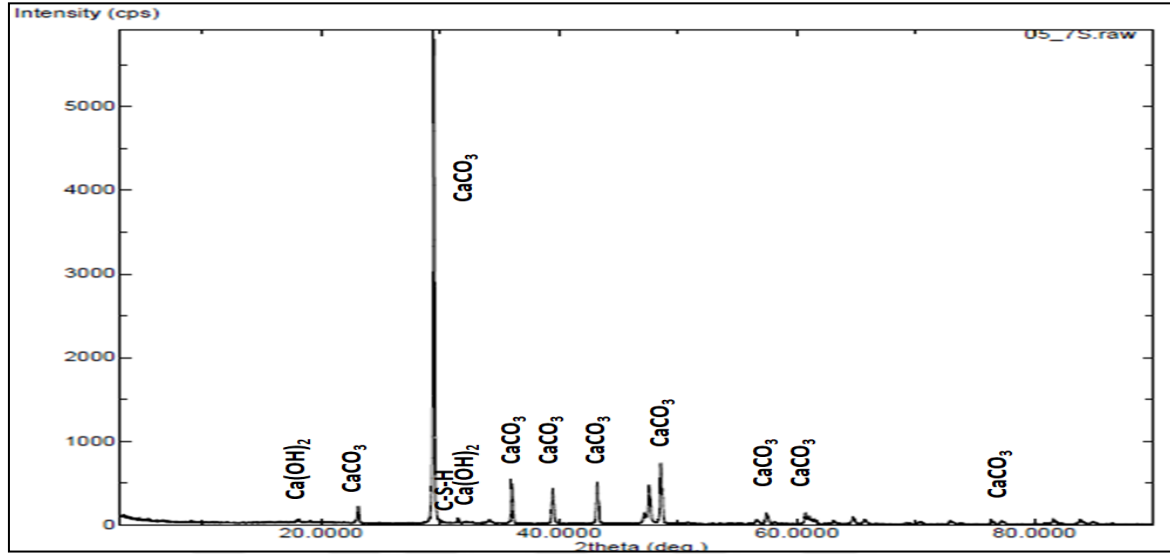
3 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği incelendiğinde CaCO_3 yüksek ve zayıf piklerde, C-S-H zayıf piklerde görülmüştür. Kalsit $2\theta = 28^\circ$ açıda en güçlü pikte ve diğer açılarda zayıf piklerde, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ise $2\theta = 18^\circ$; $34,1^\circ$ açılarında zayıf piklerde görülmüş olup $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in zayıf piklerde ve belli açılarda görülmesi tüketilmeye başladığını göstermiştir. Klinoptilolite rastlanılmamış olup bunun klinoptilolit kristallerinin pozolanik aktivite dolayısıyla çözünmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir [70].



Şekil 4.42. 7 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği

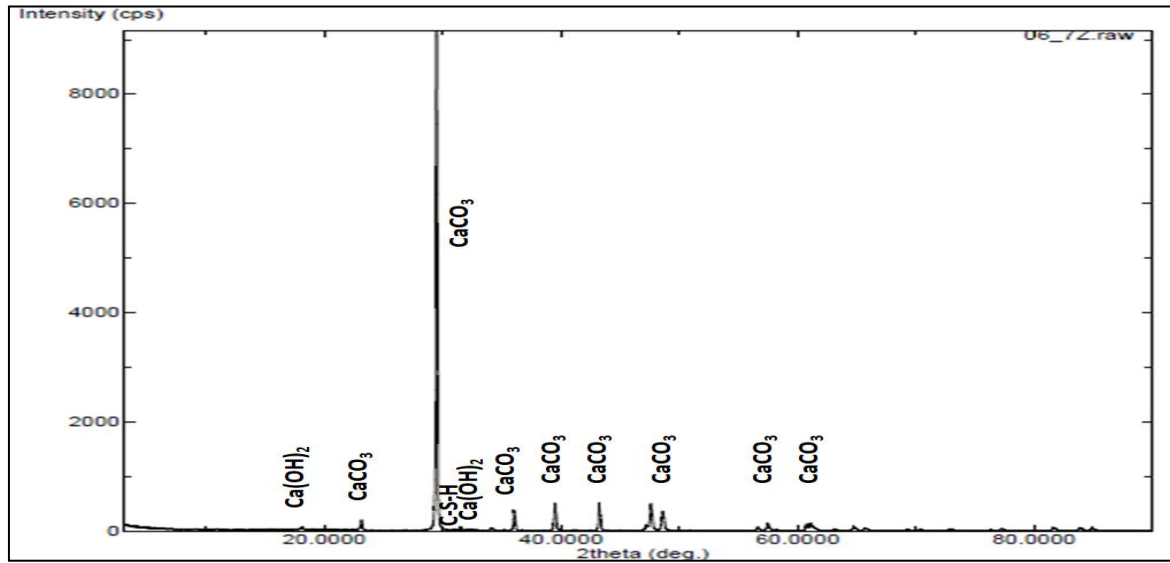
7 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği incelendiğinde CaCO_3 yüksek ve zayıf piklerde, C-S-H zayıf piklerde görülmüştür. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ise $2\theta = 18^\circ$; $34,1^\circ$; 48° açılarında

zayıf piklerde görülmüştür. C-S-H, zayıf kristalize olmasından dolayı zayıf piklerde görülmüştür.



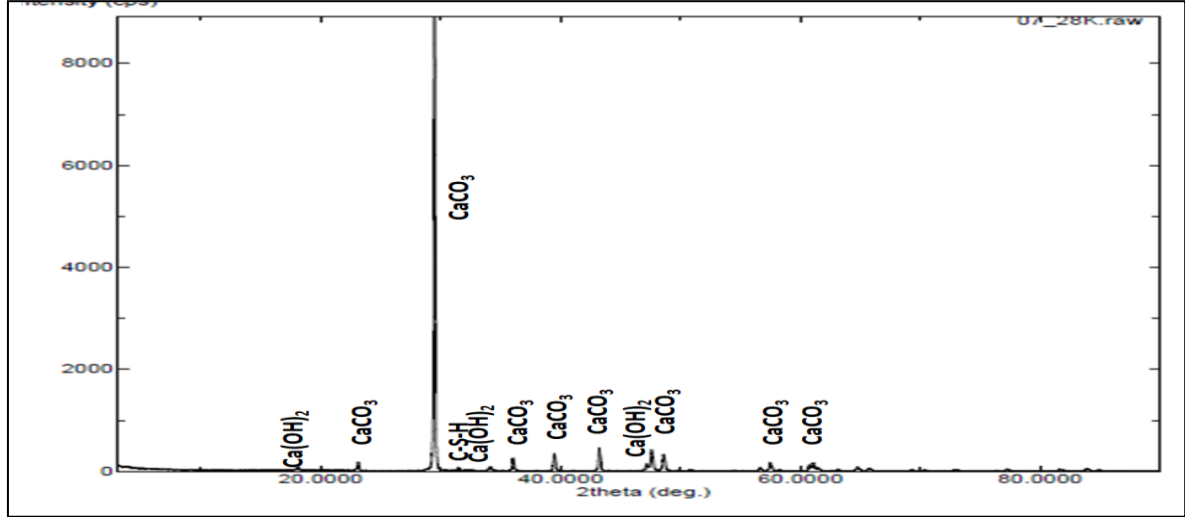
Şekil 4.43. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği

7 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği incelendiğinde kalsit en güçlü olarak $2\theta = 28^\circ$ açıda ve diğer açılarda zayıf piklerde, Ca(OH)_2 ise $2\theta = 18^\circ, 34,1^\circ$ açılarında zayıf piklerde görülmüş olup Ca(OH)_2 'in zayıf piklerde ve belli açılarda görülmesi tüketilmekte olduğunu göstermiştir. C-S-H, zayıf kristalize olmasından dolayı zayıf piklerde görülmüştür.



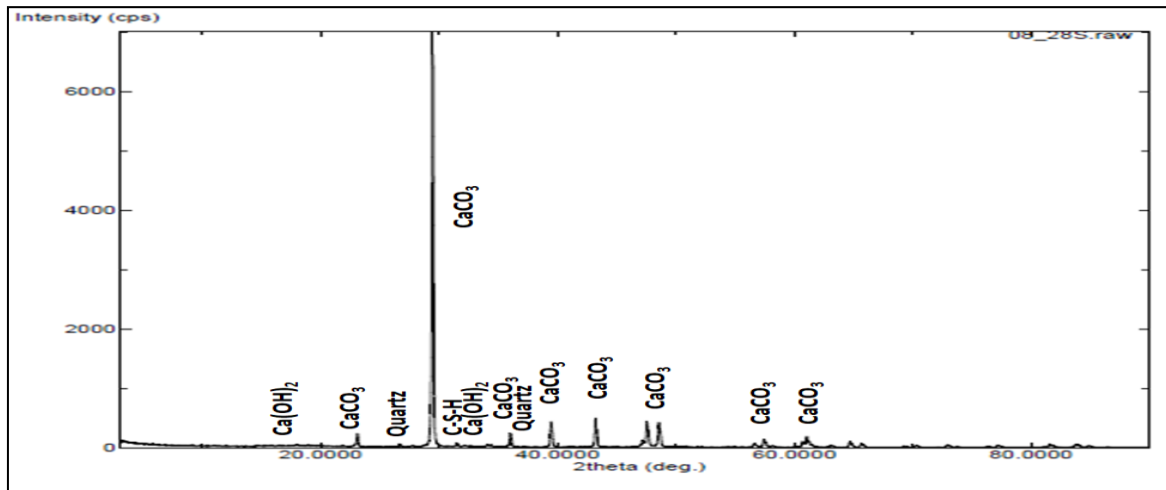
Şekil 4.44. 7 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği

7 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği incelendiğinde kalsit $2\theta = 28^\circ$ açıda güçlü pikte ve diğer açılarda zayıf piklerde, Ca(OH)_2 ise $2\theta = 18^\circ, 34,1^\circ$ açılarında zayıf piklerde görülmüş olup Ca(OH)_2 'in zayıf piklerde ve belli açılarda görülmesi tüketilmekte olduğunu göstermiştir. C-S-H, zayıf kristalize olmasından dolayı zayıf piklerde görülmüştür. Klinoptilolite rastlanılmamış olup bunun klinoptilolit kristallerinin pozolanik aktivite dolayısıyla çözünmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir [70].



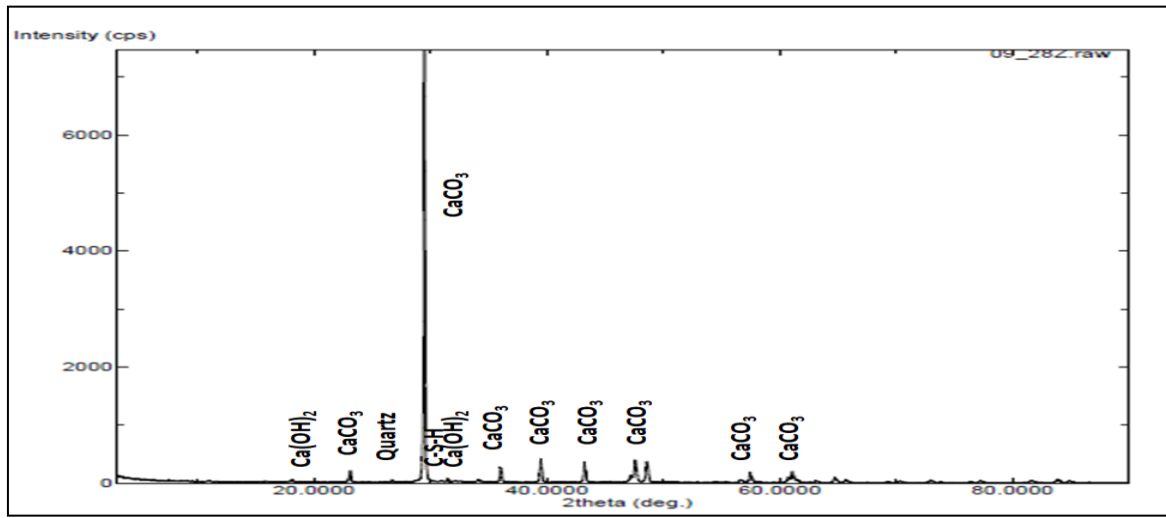
Şekil 4.45. 28 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği

28 günlük kontrol betonuna ait XRD grafiği incelendiğinde CaCO_3 yüksek ve zayıf piklerde, C-S-H zayıf piklerde görülmüştür. Ca(OH)_2 ise $2\theta = 18^\circ; 34,1^\circ; 48^\circ$ açılarında zayıf piklerde görülmüştür. C-S-H, zayıf kristalize olmasından dolayı zayıf piklerde görülmüştür.



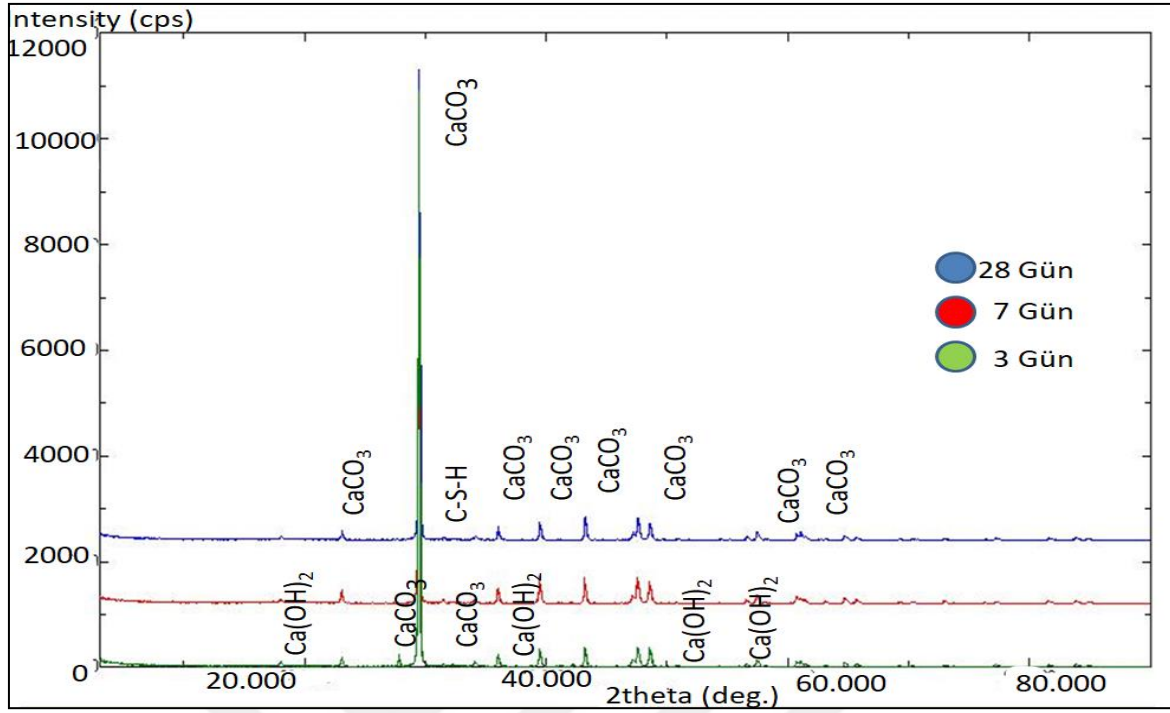
Şekil 4.46. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği

28 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafiği incelendiğinde kalsit $2\theta = 28^\circ$ açıda güçlü pikte ve diğer açılarda zayıf piklerde, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ise $2\theta = 18^\circ$; $34,1^\circ$ açılarında zayıf piklerde görülmüş olup $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in zayıf piklerde ve belli açılarda görülmesi tüketilmekte olduğunu göstermiştir. C-S-H, zayıf kristalize olmasından dolayı zayıf piklerde görülmüştür. 28 günlük silis dumanı ikameli numunelerde quartz görülmesi karışımlarda pozolanik reaksiyona girmeyen taneler bulunduğu şeklinde yorumlanmıştır [83]. Yoğun olarak gözlemlenen CaCO_3 'ın kalker kökenli agregadan kaynaklandığı ayrıca kalsit ve quartzın C-S-H'in görüntülenmesini zorlaştırdığı değerlendirilmektedir.



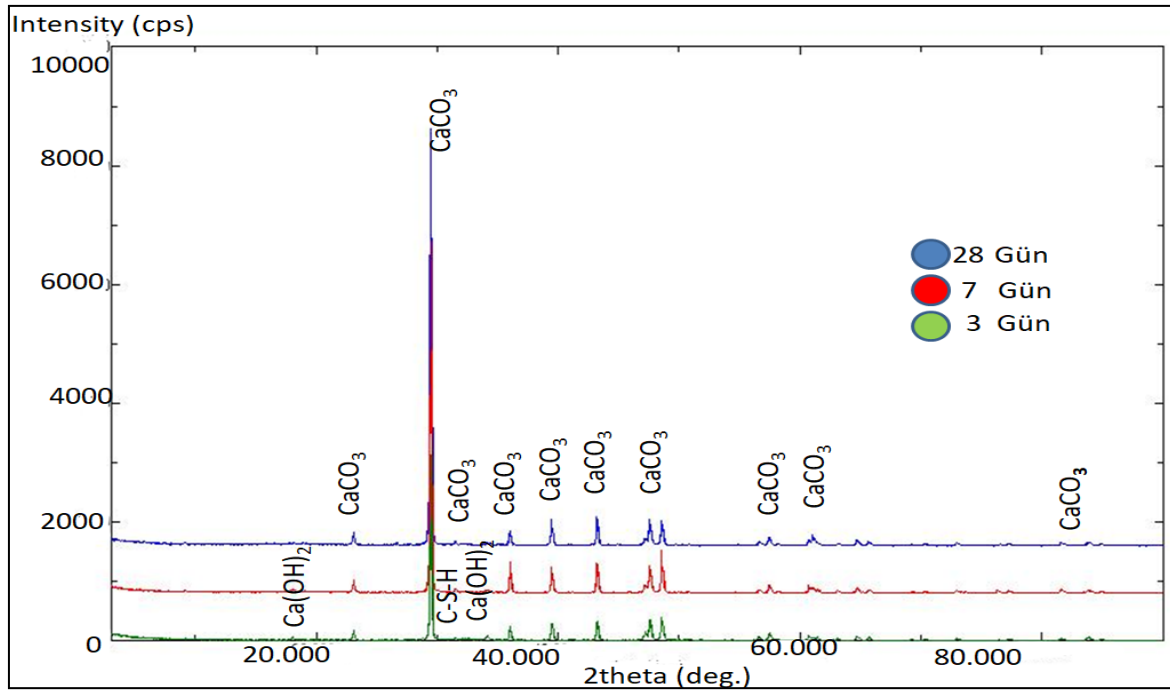
Şekil 4.47. 28 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği

28 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafiği incelendiğinde kalsit $2\theta = 28^\circ$ açıda en güçlü pikte ve diğer açılarda zayıf piklerde, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ise $2\theta = 18^\circ$, $34,1^\circ$ açılarında zayıf piklerde görülmüş olup $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in zayıf piklerde ve belli açılarda görülmesi tüketilmekte olduğunu göstermiştir. C-S-H, zayıf kristalize olmasından dolayı zayıf piklerde görülmüştür. 28 günlük zeolit ikameli numunelerde quartz görülmesi karışımlarda pozolanik reaksiyona girmeyen taneler bulunduğu şeklinde yorumlanmıştır [83]. Klinoptilolite rastlanılmamış olup bunun klinoptilolit kristallerinin pozolanik aktivite dolayısıyla çözünmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir [70]. Yoğun olarak gözlemlenen CaCO_3 'ın kalker kökenli agregadan kaynaklandığı ayrıca kalsit ve quartzın C-S-H'in görüntülenmesini zorlaştırdığı değerlendirilmektedir.



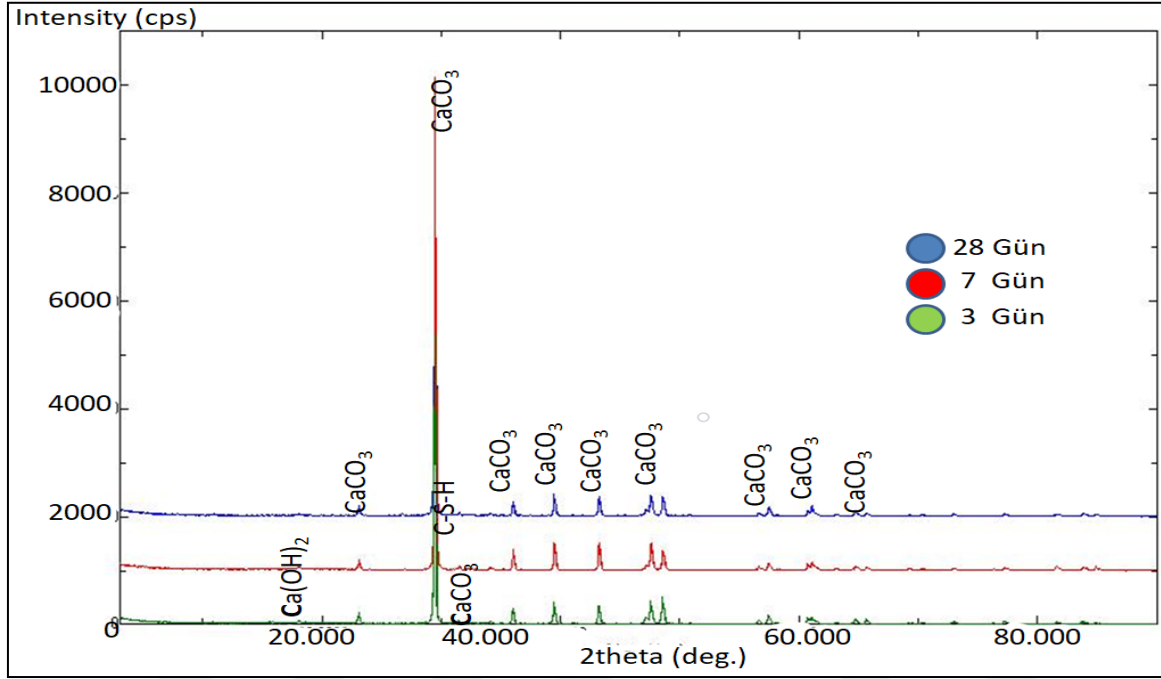
Şekil 4.48. 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı XRD grafiği

3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait XRD grafikleri incelendiğinde artan gün sayısına bağlı genel olarak piklerin şiddetlerinin arttığı, bazı piklerin kaybolduğu ya da küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bunun artan yaşla birlikte ortaya çıkan ürünlerin daha kristalize olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.49. 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı XRD grafiği

3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait XRD grafikleri incelendiğinde artan gün sayısına bağlı genel olarak piklerin şiddetlerinin arttığı, bazı piklerin kaybolduğu ya da küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bunun artan yaşla birlikte ortaya çıkan ürünlerin daha kristalize olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



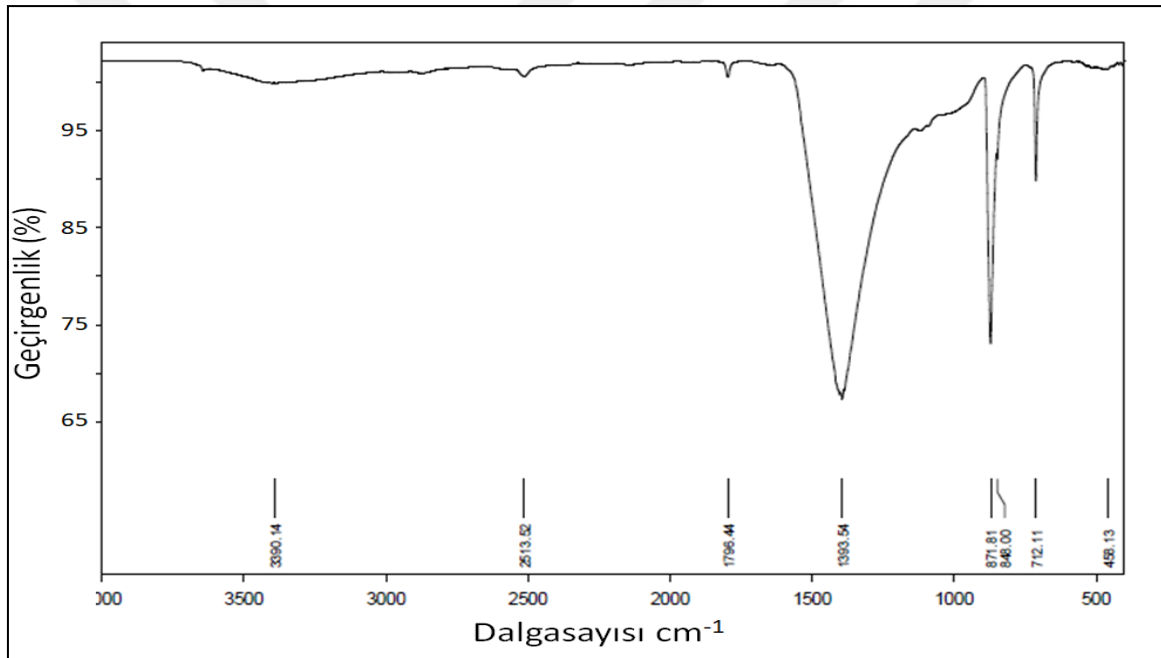
Şekil 4.50. 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı XRD grafiği

3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait XRD grafikleri incelendiğinde artan gün sayısına bağlı genel olarak piklerin şiddetlerinin arttığı, bazı piklerin kaybolduğu ya da küçüldüğü gözlemlenmiştir. Bunun artan yaşla birlikte ortaya çıkan ürünlerin daha kristalize olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Klinoptilolite rastlanılmamış olup bunun puzolanik aktivite dolayısıyla klinoptilolit kristallerinin çözünmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir [70].

4.12.4. F-TIR deneyleri

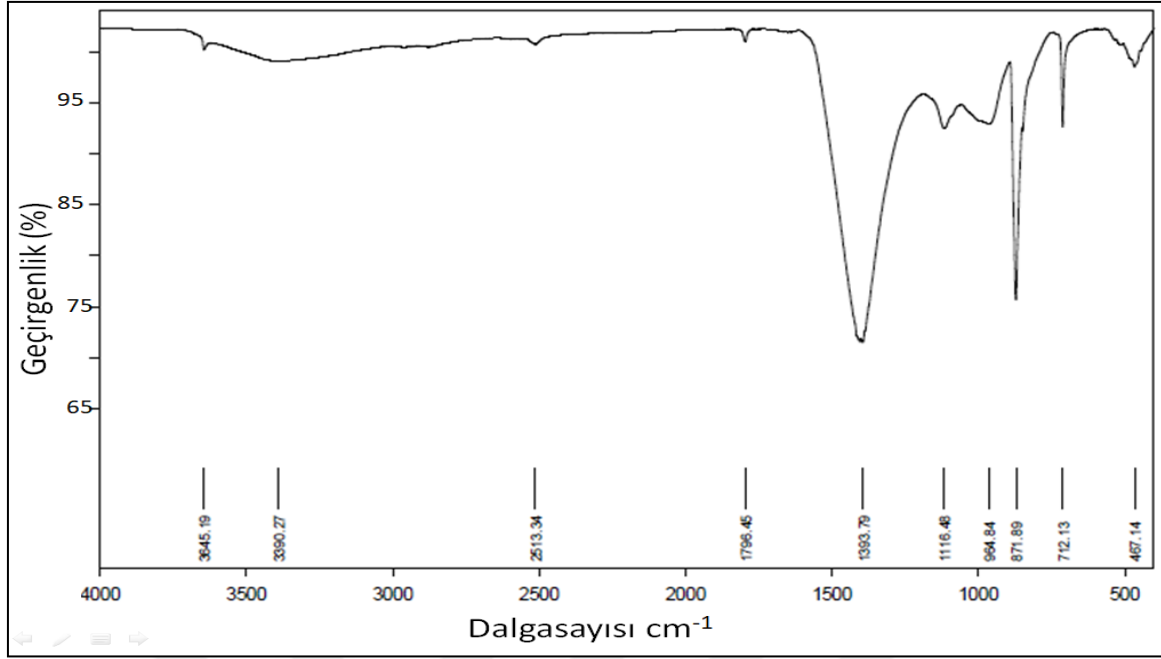
4 cm⁻¹ çözünürlüklü Perkin Elmer 400 aletiyle 3, 7 ve 28 günlük beton numune parçaları için 4000-500 cm⁻¹ dalga aralığında Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi deneyi yapılmış olup 3 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi Şekil 4.51’de, 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi Şekil 4.52’de, 3 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi Şekil 4.53’te, 7 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi Şekil 4.54’te, 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi Şekil 4.55’te, 7 günlük zeolit

ikameli betona ait F-TIR analizi Şekil 4.56'da, 28 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi Şekil 4.57'de, 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi Şekil 4.58'de, 28 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi Şekil 4.59'da; 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği Şekil 4.60'da; 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği Şekil 4.61'de; 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği Şekil 4.62'de görülmektedir. 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında C-S-H, 3646 cm^{-1} dalga boyunda Ca(OH)_2 gözlemlendiği Qin ve diğerlerinin (2019) [123]; Ylmen ve diğerlerinin (2013) [126]; Lin ve diğerlerinin (2019) de [130] çalışmalarında belirtilmiştir.



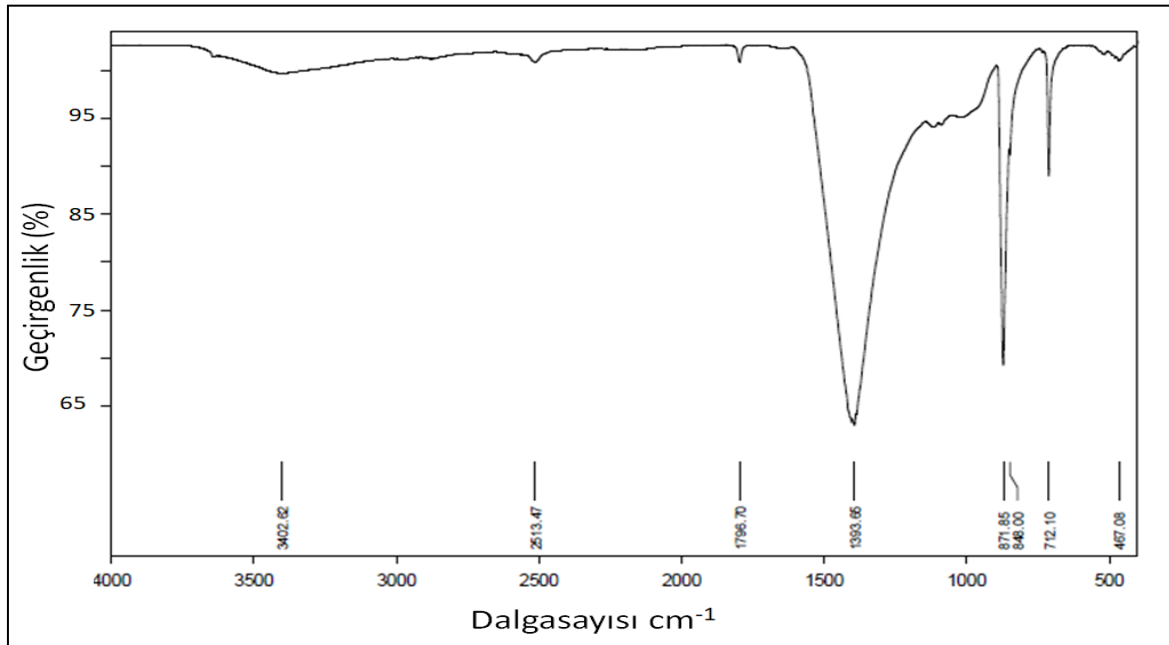
Şekil 4.51. 3 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi

3 günlük kontrol betonunda 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında C-S-H; 3646, 3390, 2513, 1796 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir [125].



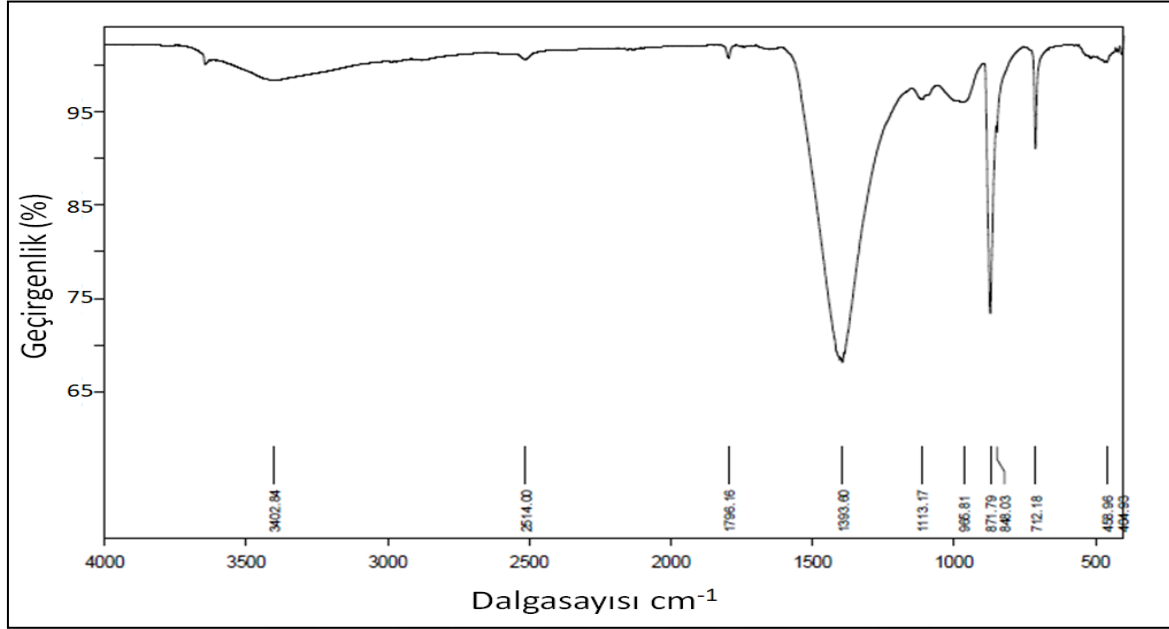
Şekil 4.52. 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi

3 günlük silis dumanı ikameli betonda 1394 , 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H; 3646 , 3390 , 2513 , 1796 cm^{-1} dalga boylarında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ gözlemlenmiştir.



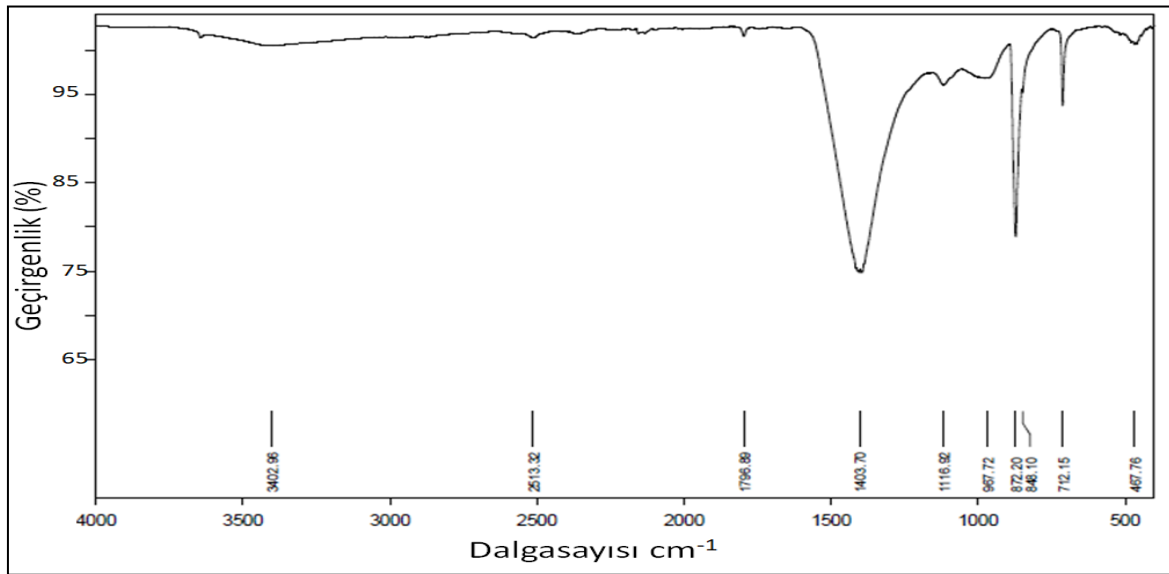
Şekil 4.53. 3 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi

3 günlük zeolit ikameli betonda 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H; 3646, 3402, 2513, 1796 cm^{-1} dalga boylarında Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir.



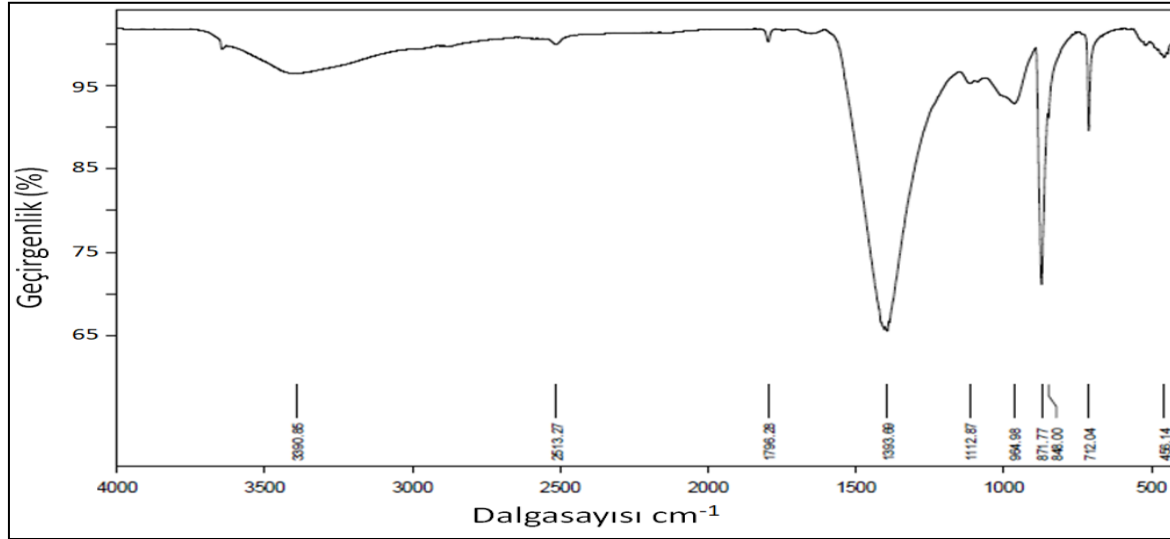
Şekil 4.54. 7 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi

7 günlük kontrol betonunda 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H; 3646, 3402, 2514, 1796 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir [125]. Gelişen hidrasyon reaksiyonları nedeniyle 3 günlük kontrol betonuna göre daha fazla Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir.



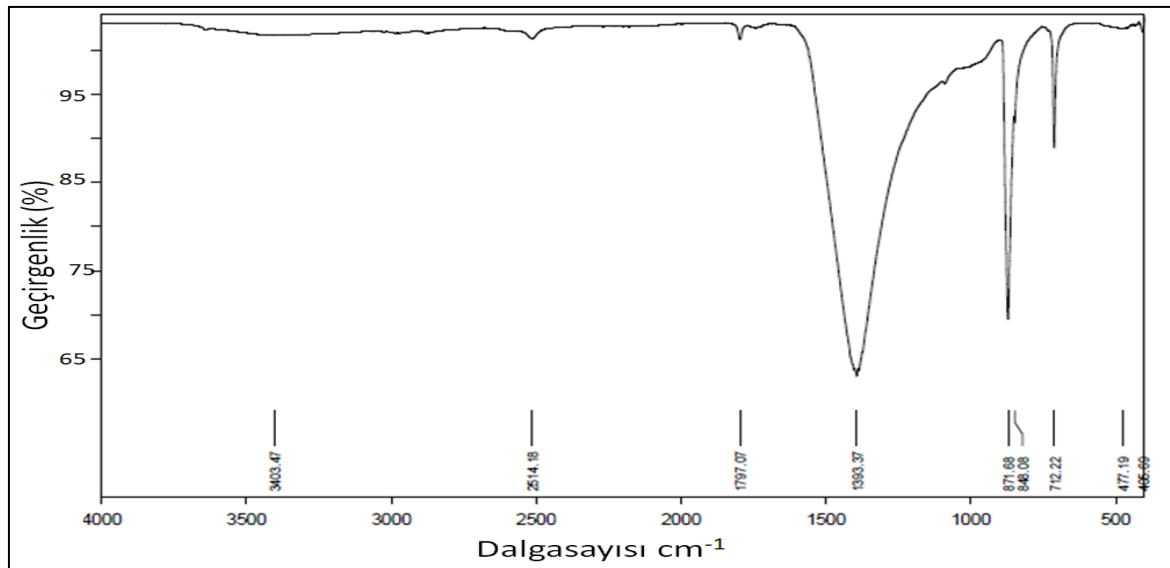
Şekil 4.55. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi

7 günlük silis dumanı ikameli betonda 1403, 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H; 3646, 3402, 2513, 1797 cm^{-1} dalga boylarında Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. Görülen Ca(OH)_2 'in pozolanik reaksiyonlar nedeniyle 3 günlük silis dumanı ikameli betondan daha az olduğu gözlemlenmiştir.



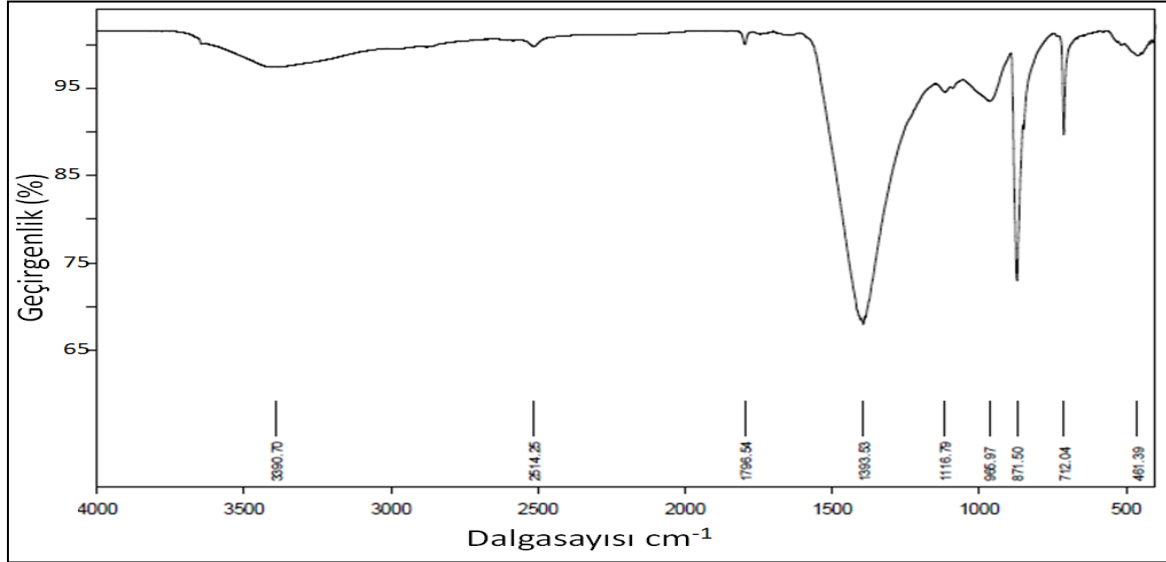
Şekil 4.56. 7 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi

7 günlük zeolit ikameli betonda 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H; 3646, 3390, 2513, 1796 cm^{-1} dalga boylarında Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. Görülen Ca(OH)_2 'in 3 günlük zeolit ikameli betondan fazla olduğu, hidrasyon reaksiyonları nedeniyle oluştuğu ve pozolanik reaksiyonlar sebebiyle tüketilmekte olduğu gözlemlenmiştir.



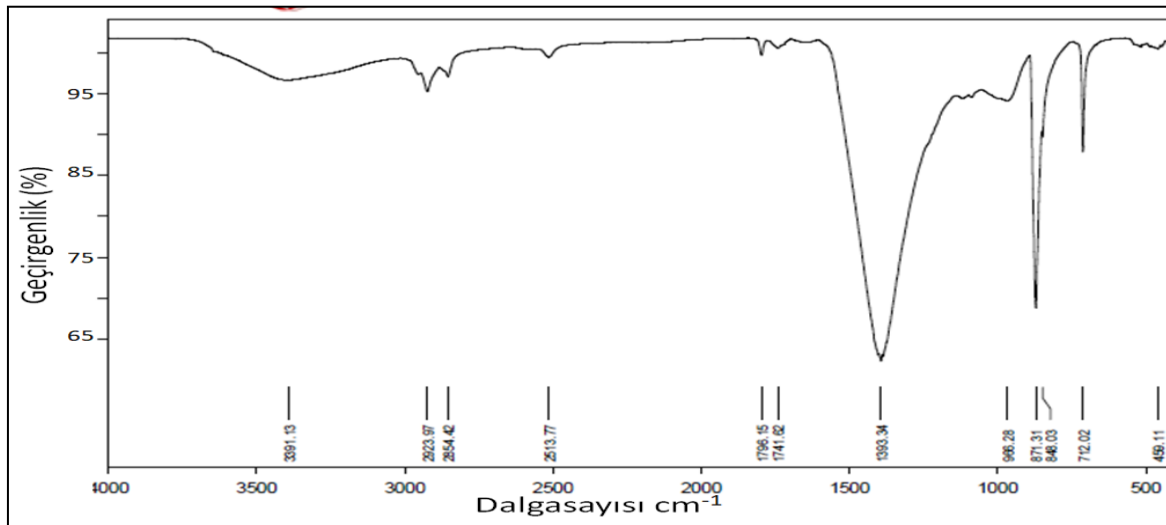
Şekil 4.57. 28 günlük kontrol betonuna ait F-TIR analizi

28 günlük kontrol betonunda 1394 , 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında güçlü olarak CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında güçlü C-S-H; 3646 , 3403 , 2514 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir.



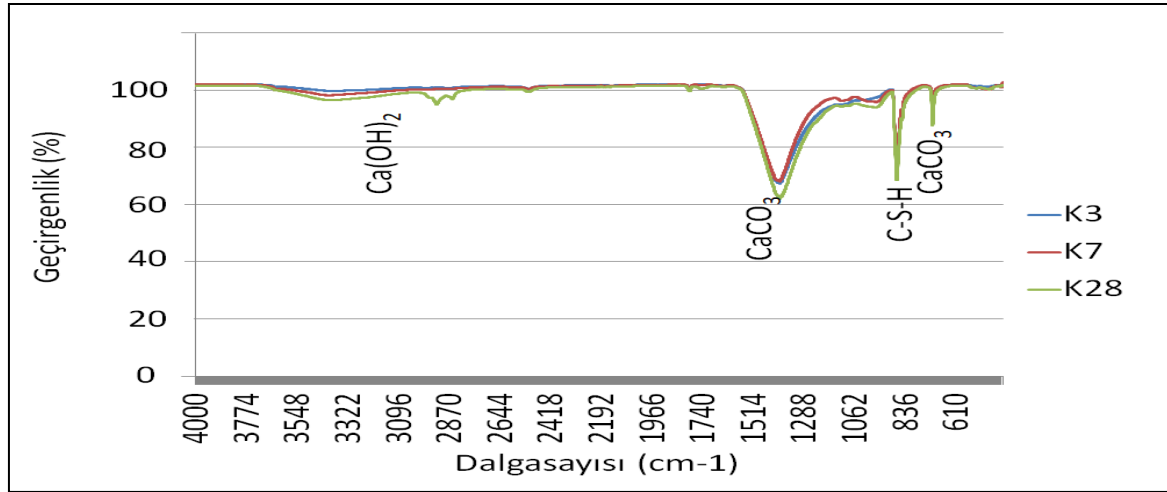
Şekil 4.58. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait F-TIR analizi

28 günlük silis dumanı ikameli betonda 1394 , 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında güçlü CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında güçlü C-S-H; 3646 , 3390 , 2514 , 1796 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. Görülen Ca(OH)_2 yapıları, pozolanik reaksiyonlar nedeniyle Ca(OH)_2 'in tüketildiğini ancak pozolanik reaksiyonların devam ettiğini göstermektedir.



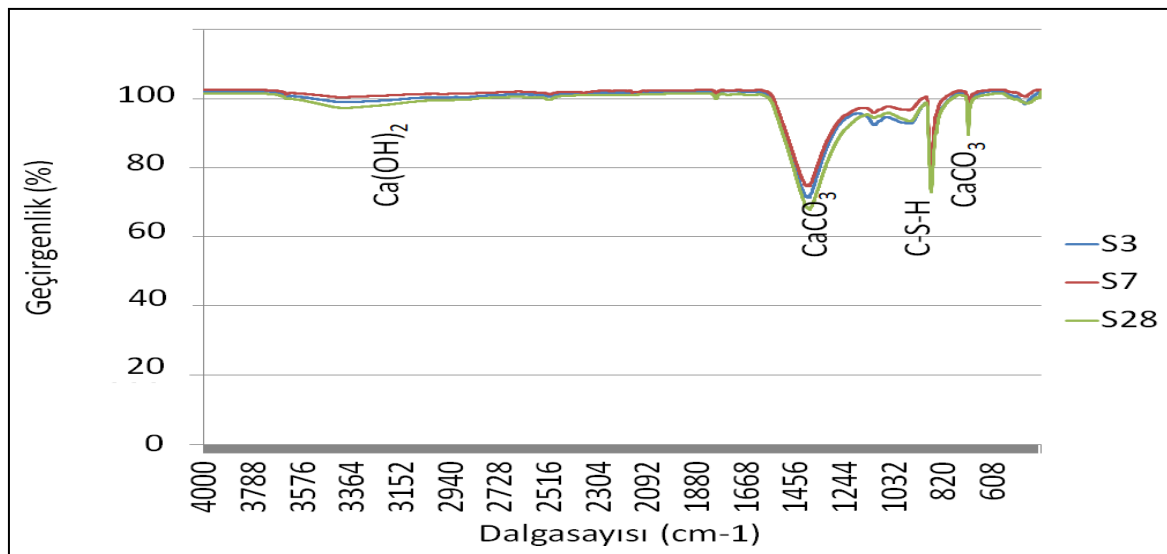
Şekil 4.59. 28 günlük zeolit ikameli betona ait F-TIR analizi

Zeolit grafiklerinde 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında güçlü CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında güçlü C-S-H; 3646, 3391, 2924, 2854, 2513, 1795 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. Görülen Ca(OH)_2 yapıları, pozolanik reaksiyonlar nedeniyle Ca(OH)_2 'in tüketildiğini ancak pozolanik reaksiyonların devam ettiğini göstermektedir.



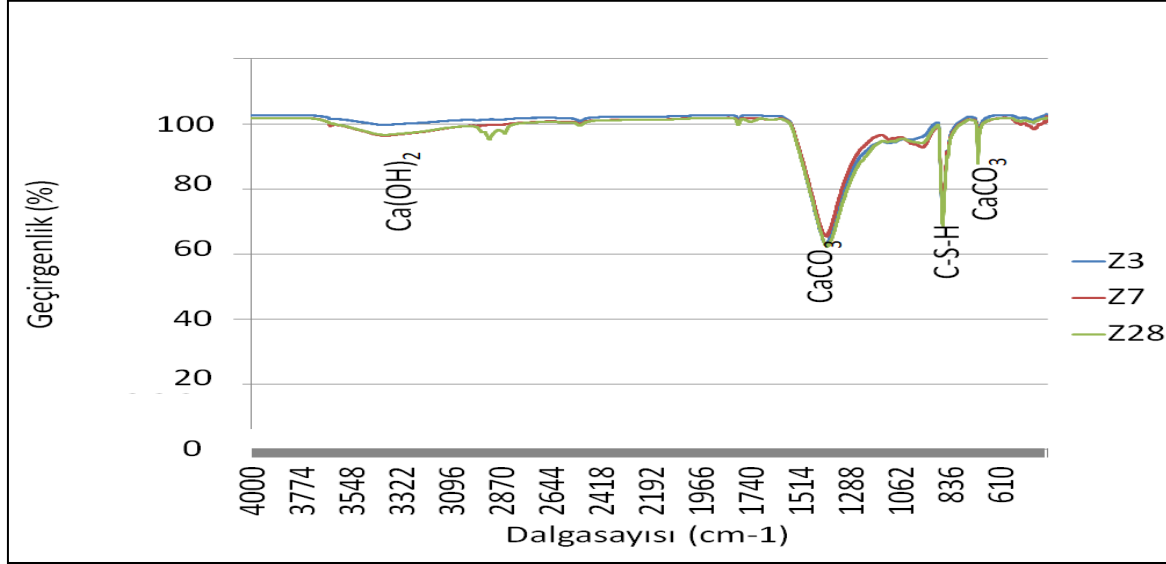
Şekil 4.60. 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği

3, 7 ve 28 günlük kontrol betonlarında 1394, 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında güçlü CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında güçlü C-S-H; 3646 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. Artan gün sayısına bağlı olarak hidrasyon ürünlerinde de artma meydana gelmiştir.



Şekil 4.61. 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği

3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betonlarda 1394 , 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında güçlü CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında güçlü C-S-H; 3646 , 2924 ve 2854 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. Artan gün sayısına bağlı olarak hidrasyon ürünlerinde de artma meydana gelmiştir.



Şekil 4.62. 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı F-TIR grafiği

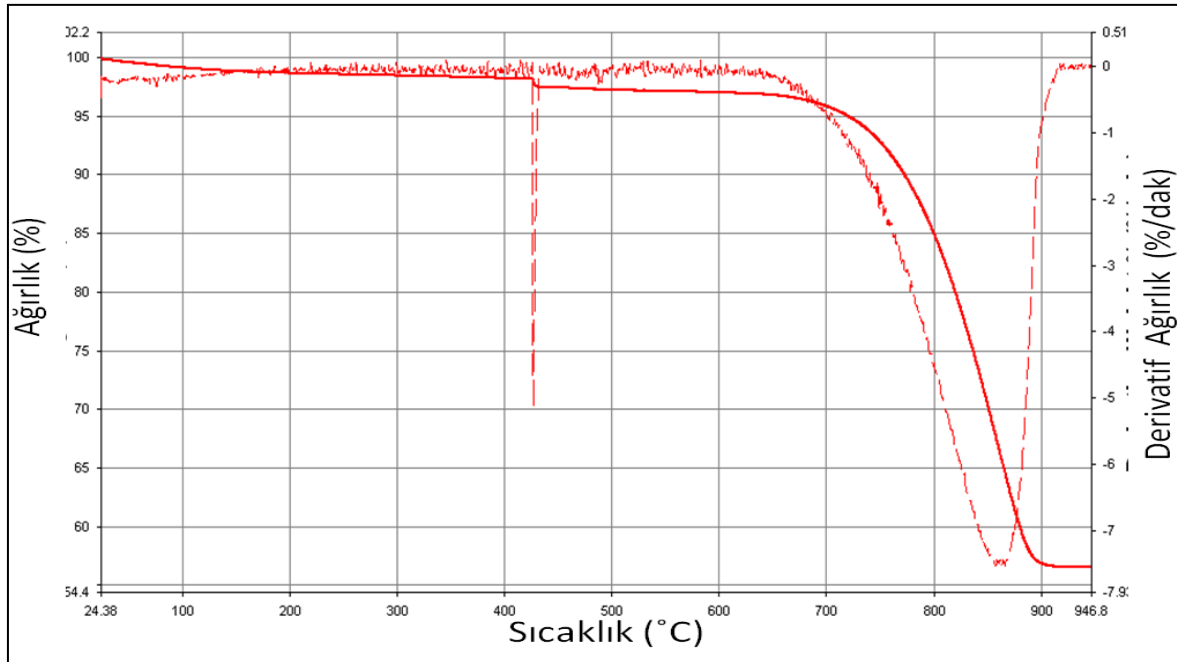
3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betonlarda 1394 , 871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında güçlü CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında güçlü C-S-H; 3646 cm^{-1} dalga boylarında zayıf Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. Artan gün sayısına bağlı olarak hidrasyon ürünlerinde de artma meydana gelmiştir. 3646 , 2924 ve 2854 cm^{-1} dalga boylarında Ca(OH)_2 gözlemlenmiş olup bunun gelişen pozolanik reaksiyonlarla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.

4.12.5. TGA deneyleri

3, 7 ve 28 günlük beton numune parçaları için Perkin Elmer Pyris 1 aletiyle azot ortamında $25-950^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında $20^\circ\text{C}/\text{dakika}$ ısıtma hızında ölçüm yapılmış olup 3 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi Şekil 4.63'te, 3 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi Şekil 4.64'te, 3 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi Şekil 4.65'te, 7 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi Şekil 4.66'da, 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi Şekil 4.67'de, 7 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi Şekil 4.68'de, 28 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi Şekil 4.69'da, 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi Şekil 4.70'de, 28 günlük zeolit ikameli betona ait

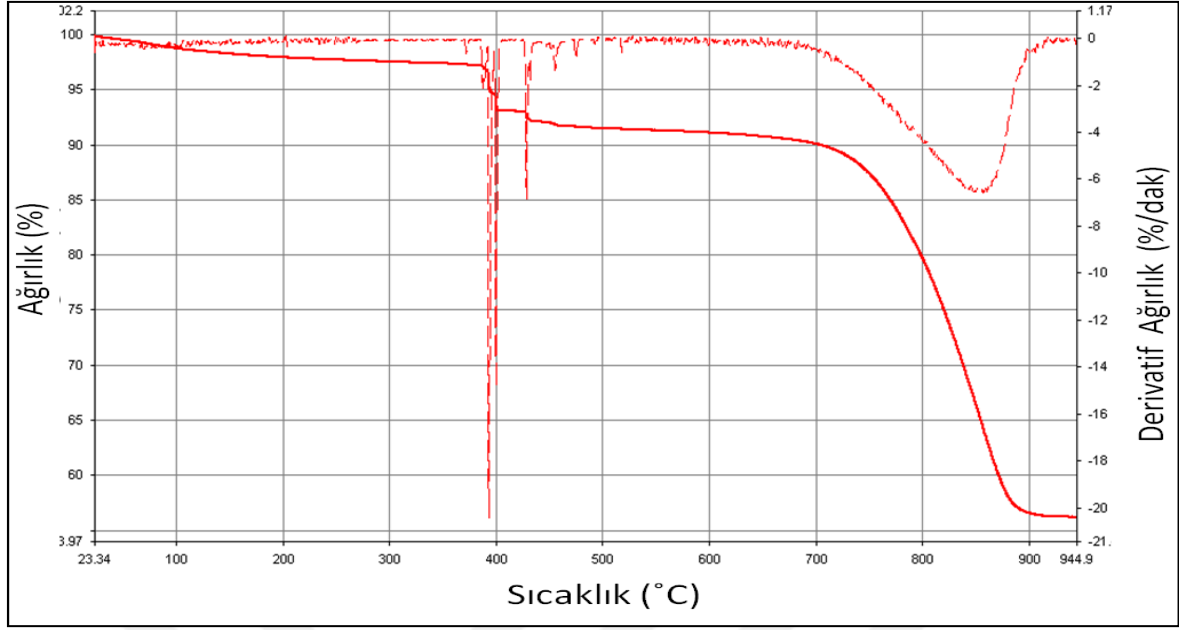
TGA analizi Şekil 4.71’de; 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı TGA analizi Şekil 4.72’de, 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı TGA analizi Şekil 4.73’te; 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı TGA analizi Şekil 4.74’te görülmektedir.

105-420°C aralığında hidrasyon ürünlerinden C-S-H’nin, 420-540°C aralığında Ca(OH)_2 ’in, 540-950°C aralığında CaCO_3 ’in parçalandığı Frias ve diğerlerinin (2008) [62], Lu ve diğerlerinin (2018) [125], Uzal ve diğerlerinin (2010) [127], Scrivener ve diğerlerinin (2013) [128], Alarcon-Ruiz ve diğerlerinin (2005) [129] çalışmalarında belirtilmiştir.



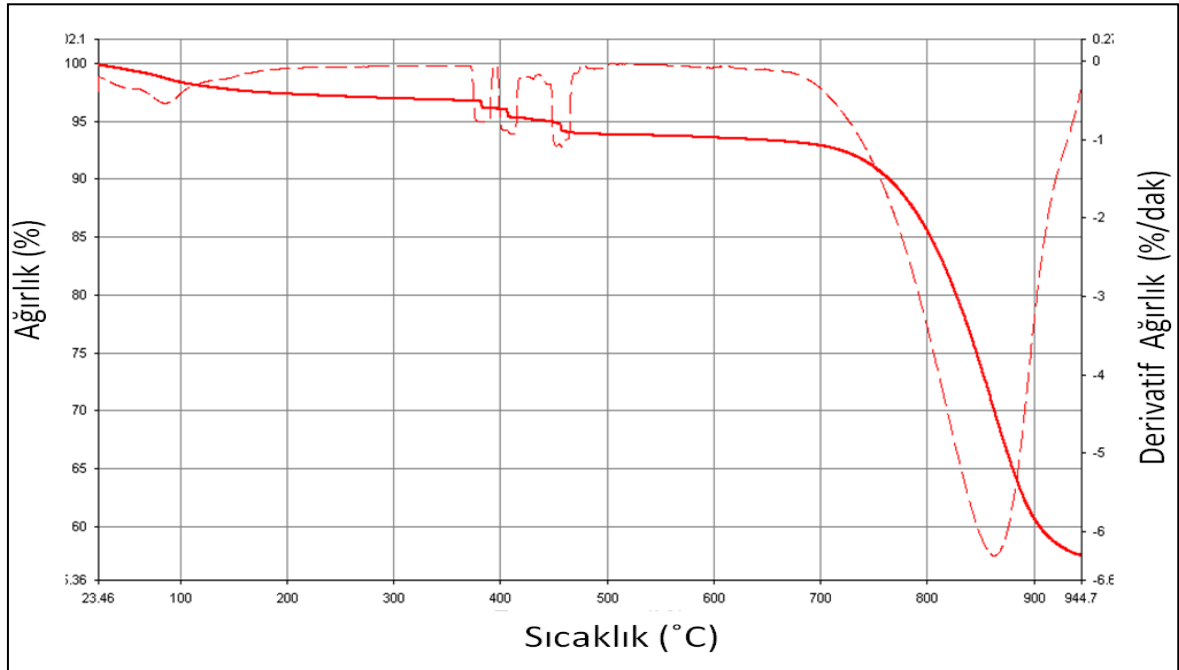
Şekil 4.63. 3 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi, %Kayıp= 43.398%

3 günlük kontrol betonunda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %2 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H’nin parçalandığı, 420-540°C aralığında %1 civarlarında kütle kaybına neden olan Ca(OH)_2 ’in parçalandığı, 540-950°C aralığında %40 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 ’in parçalandığı gözlemlenmiştir. 540°C’den sonra CaCO_3 ’ün dekarbonasyon olması nedeniyle görünen dik kütle kaybı, betonun CaCO_3 yönünden zengin olduğunu göstermektedir [125].



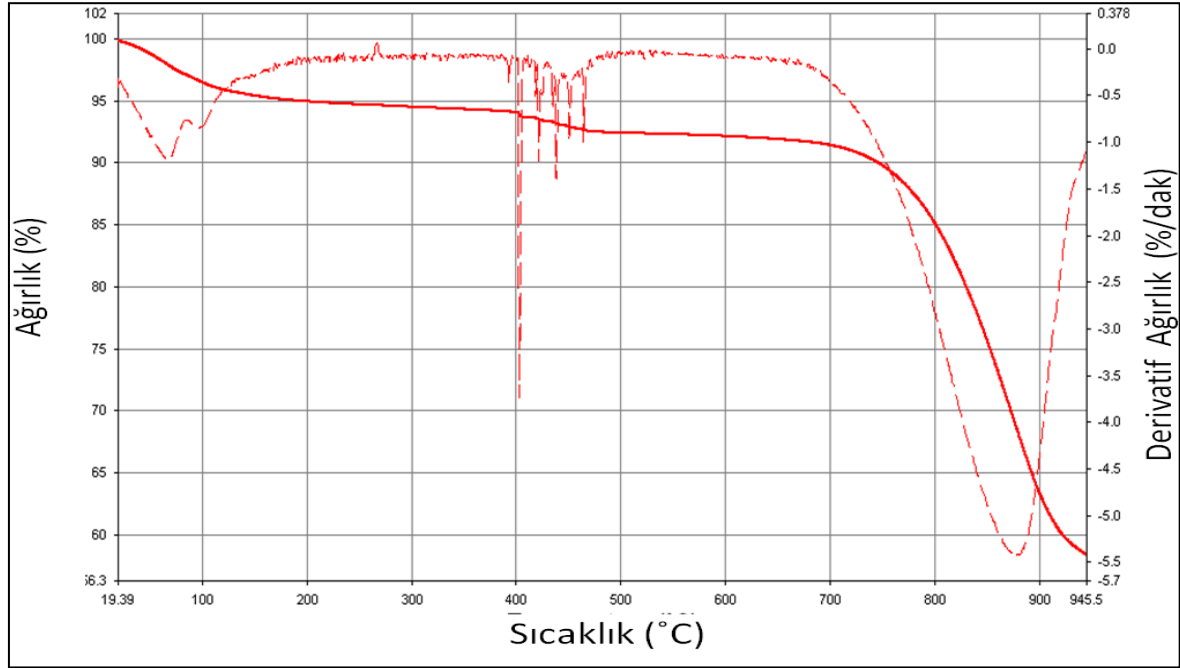
Şekil 4.64. 3 günlük silis duman ikameli betona ait TGA analizi, %Kayıp= 43.805%

3 günlük silis dumanı ikameli betonda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %5 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'in parçalandığı, 420-540°C aralığında %3 civarlarında kütle kaybına neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %35 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. C-S-H ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oranının 3 günlük kontrol betonuna kıyasla fazla olmasının gelişen reaksiyonlar sebebiyle olduğu değerlendirilmektedir.



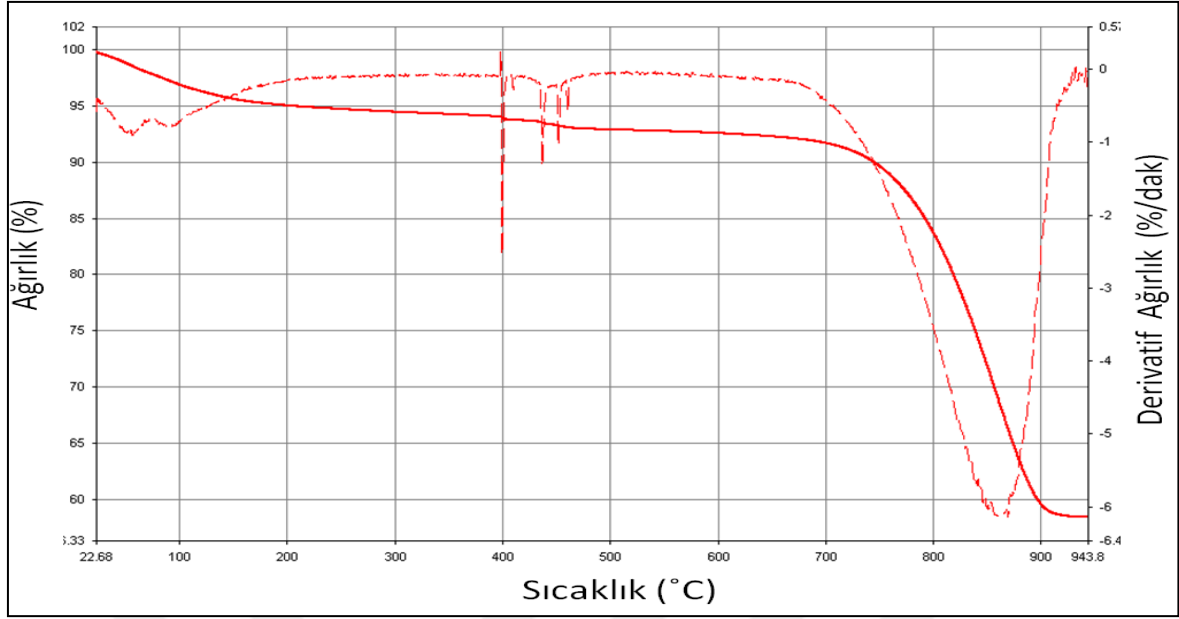
Şekil 4.65. 3 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi, %Kayıp= 42.485%

3 günlük zeolit ikameli betonda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %3 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'in parçalandığı, 420-540°C aralığında %2 civarlarında kütle kaybına neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %36 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. C-S-H ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oranının 3 günlük kontrol betonuna kıyasla fazla olmasının gelişen reaksiyonlar sebebiyle olduğu değerlendirilmektedir.



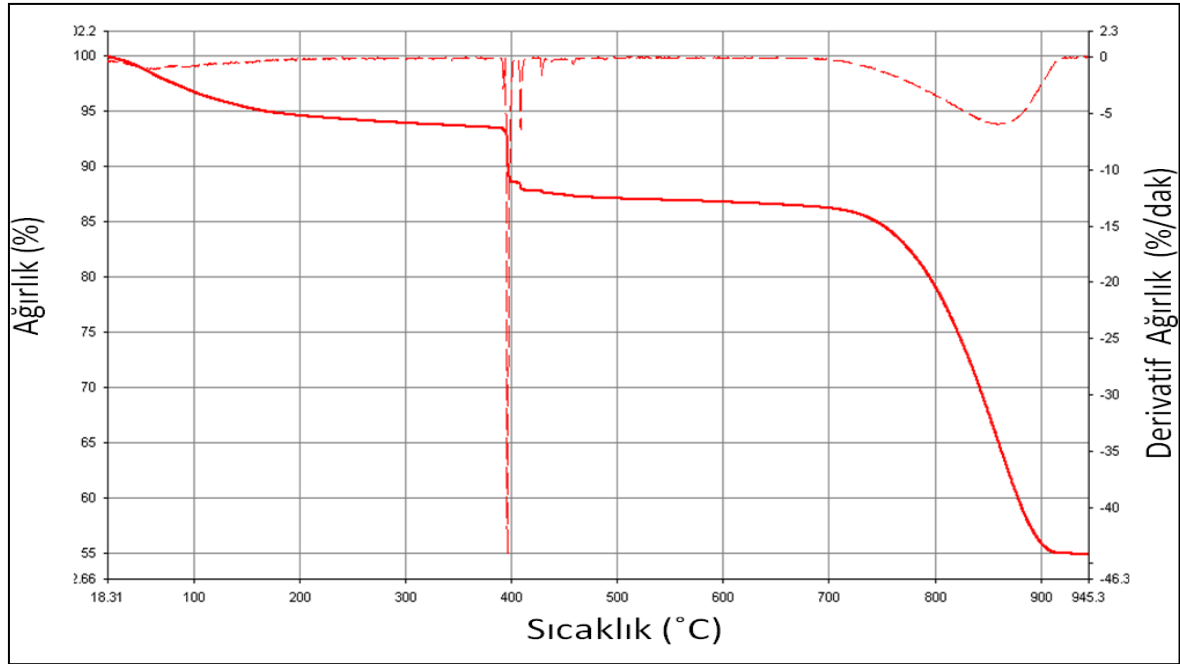
Şekil 4.66. 7 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi, %Kayıp= 41.579%

7 günlük kontrol betonunda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %4 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'in parçalandığı, 420-540°C aralığında %2 civarlarında kütle kaybına neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %36 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. C-S-H ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oranı 3 günlük kontrol betonuna kıyasla gelişen hidratasyon reaksiyonları sebebiyle fazladır.



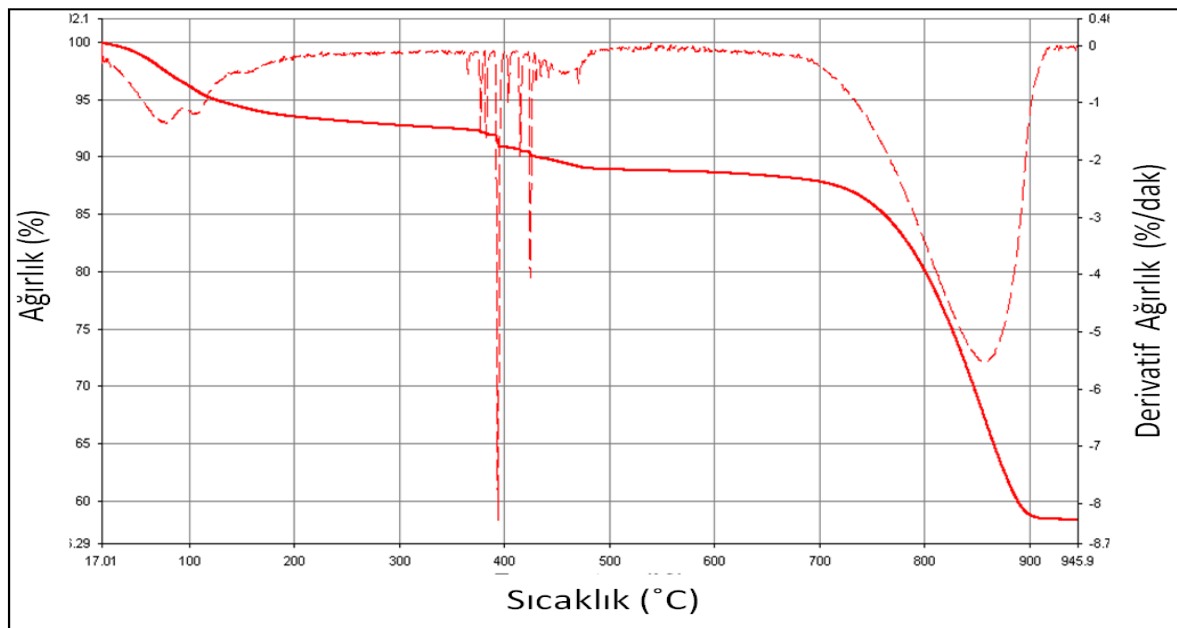
Şekil 4.67. 7 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi, %Kayıp= 41.535%

7 günlük silis dumanı ikameli betonda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %4 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'in parçalandığı, 420-540°C aralığında %2 civarlarında kütle kaybına neden olan Ca(OH)_2 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %36 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. 3 günlük silis dumanı ikameli betona kıyasla C-S-H oranının fazla ve Ca(OH)_2 oranının az olmasının puzolanik reaksiyonlar sebebiyle olduğu değerlendirilmektedir.



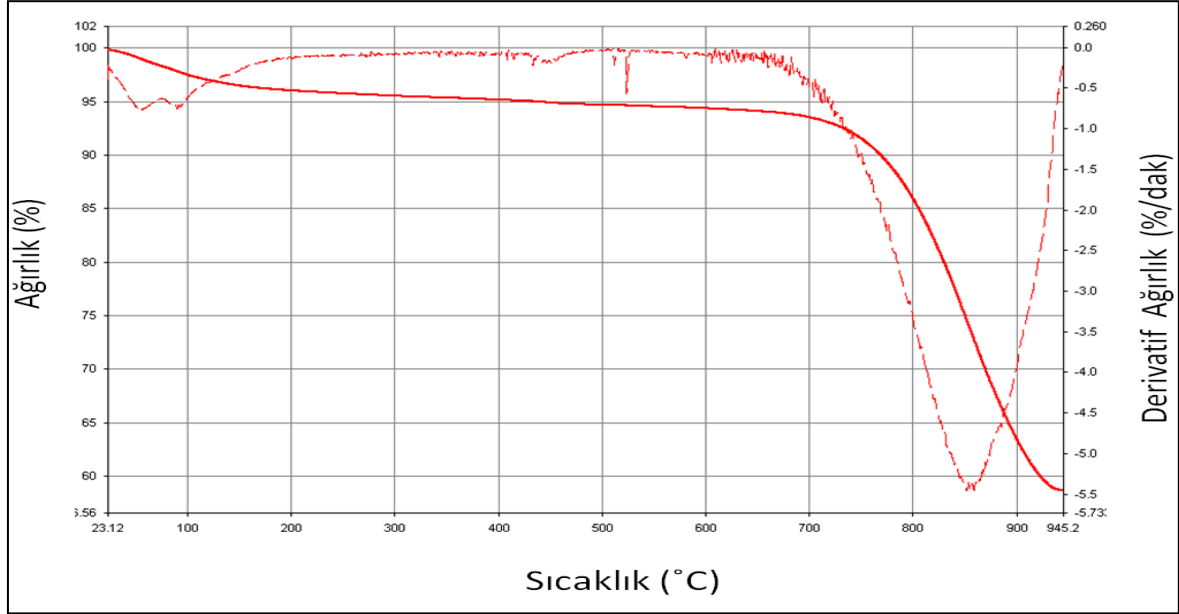
Şekil 4.68. 7 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi, %Kayıp= 45.043%

7 günlük zeolit ikameli betonda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %10 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'in parçalandığı, 420-540°C aralığında %2 civarlarında kütle kaybına neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %32 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. 3 günlük zeolit ikameli betona kıyasla C-S-H oranının fazla ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oranının az olmasının puzolanik reaksiyonlar sebebiyle olduğu değerlendirilmektedir.



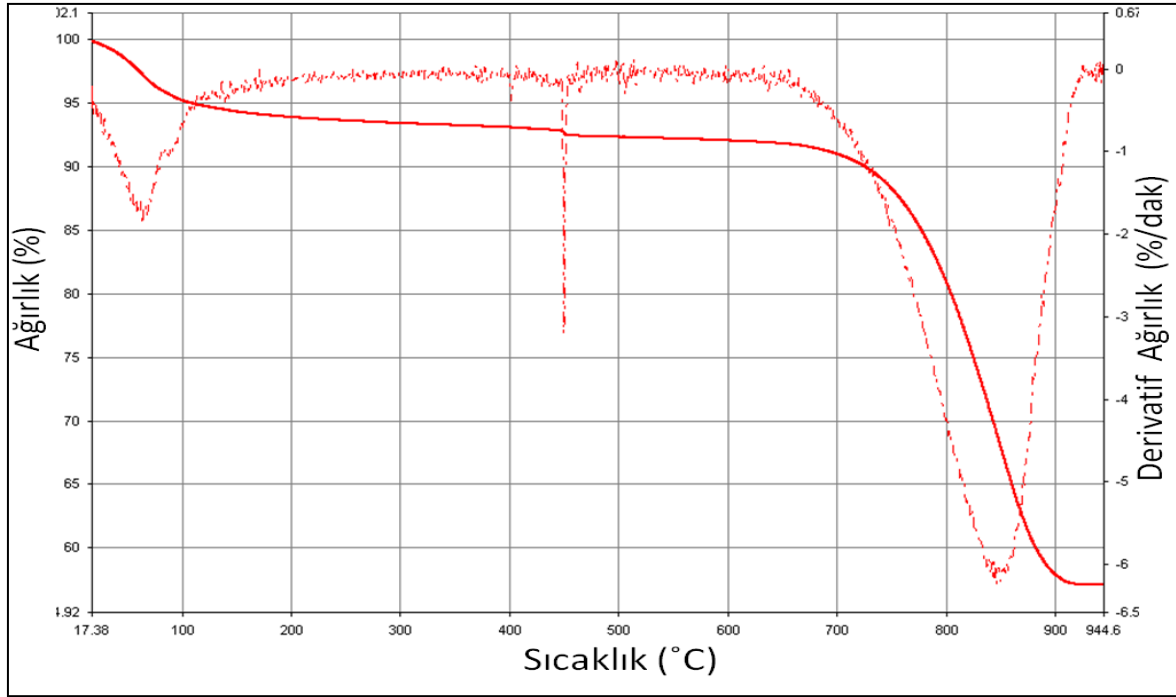
Şekil 4.69. 28 günlük kontrol betonuna ait TGA analizi, %Kayıp= 41.604%

28 günlük kontrol betonunda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %6 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'in parçalandığı, 420-540°C aralığında %2 civarlarında kütle kaybına neden olan Ca(OH)_2 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %30 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. C-S-H oranı 7 günlük kontrol betonuna kıyasla gelişen hidratasyon reaksiyonları nedeniyle fazladır.



Şekil 4.70. 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA analizi, %Kayıp= 41.338%

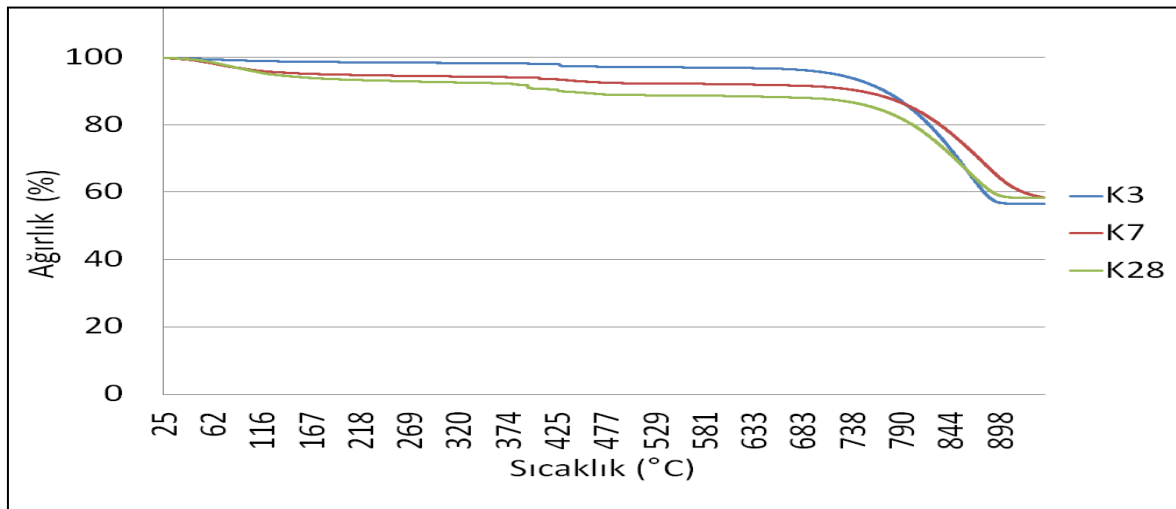
28 günlük silis dumanı ikameli betonda yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %3 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'in parçalandığı, 420-540°C aralığında %1 civarlarında kütle kaybına neden olan Ca(OH)_2 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %36 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. Gelişen puzolanik reaksiyonlar nedeniyle Ca(OH)_2 oranı 7 günlük silis dumanı ikameli betona kıyasla azalmıştır.



Şekil 4.71. 28 günlük zeolit ikameli betona ait TGA analizi, %Kayıp= 42.886%

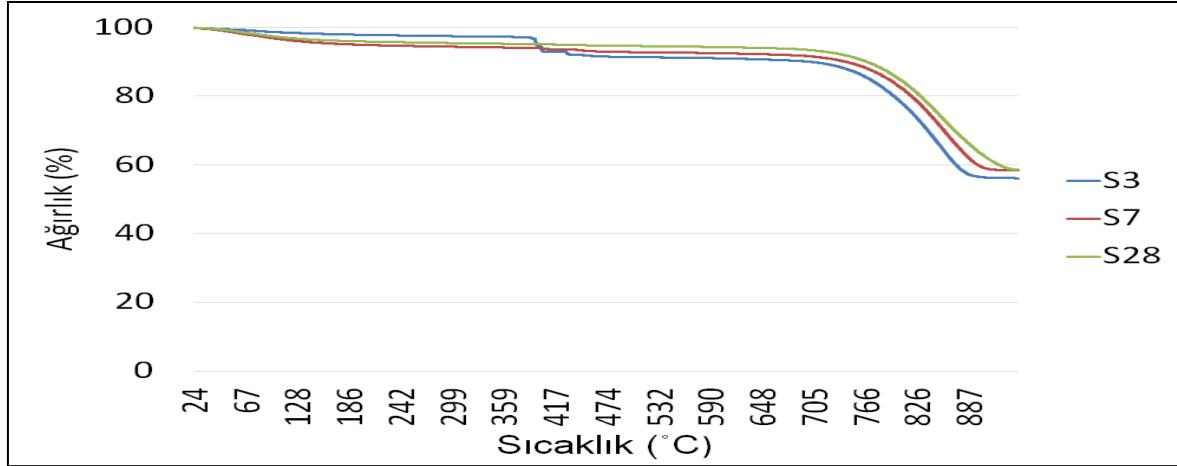
28 günlük zeolit ikameli betona yapılan TGA analizleri sonucu 105-420°C aralığında %3 civarlarında kütle kaybına neden olan C-S-H'nin parçalandığı, 420-540°C aralığında %2 civarlarında kütle kaybına neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in parçalandığı, 540-950°C aralığında %36 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün parçalandığı gözlemlenmiştir. Gelişen puzolanik reaksiyonlar nedeniyle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oranı 7 günlük zeolit ikameli betona kıyasla azalmıştır.

TGA analizleri sonucu 3, 7 ve 28 günlük grafikler birbiriyle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.



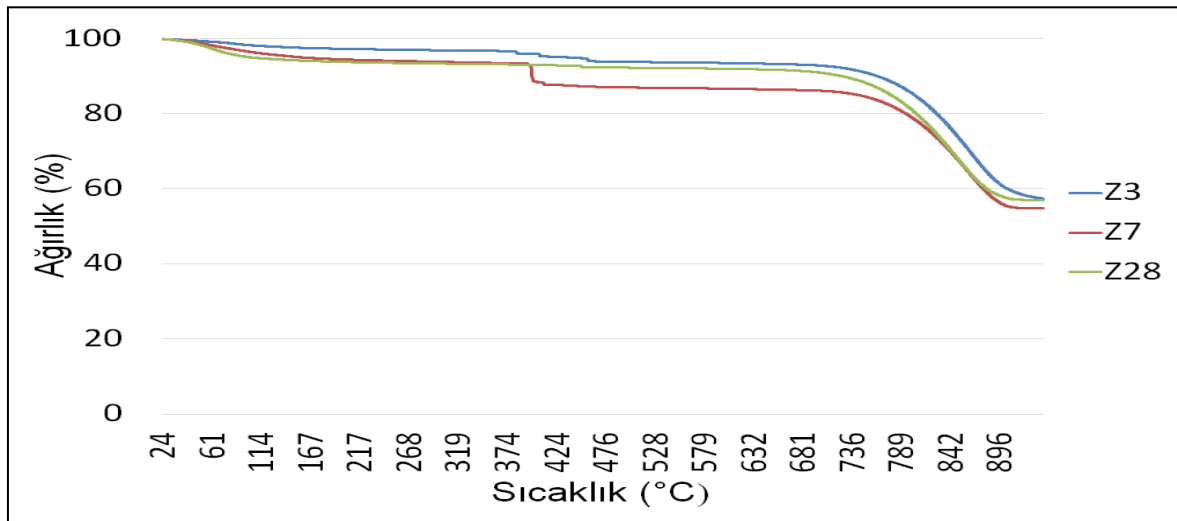
Şekil 4.72. 3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait karşılaştırmalı TGA grafiği

3, 7 ve 28 günlük kontrol betonuna ait TGA grafikleri üst üste konularak karşılaştırıldığında gelişen hidratasyon reaksiyonları sebebiyle 3 günden 28 güne doğru; 105-420°C aralığında kütle kaybına neden olan C-S-H oranının arttığı, 420-540°C aralığında kütle kaybına neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in aynı oranlarda azaldığı, 540-950°C aralığında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün daha az oranlarda azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.73. 3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait karşılaştırmalı TGA grafiği

3, 7 ve 28 günlük silis dumanı ikameli betona ait TGA grafikleri üst üste konularak karşılaştırıldığında gelişen hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlar sebebiyle 3 günden 28 güne doğru; 105-420°C aralığında kütle kaybına neden olan C-S-H oranının arttığı, 420-540°C aralığında kütle kaybına neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in azaldığı, 540-950°C aralığında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün yaklaşık olarak aynı oranlarda azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.74. 3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait karşılaştırmalı TGA grafiği

3, 7 ve 28 günlük zeolit ikameli betona ait TGA grafikleri üst üste konularak karşılaştırıldığında gelişen hidrasyon ve puzolanik reaksiyonlar sebebiyle 3 günden 28 güne doğru; 105-420°C aralığında kütle kaybına neden olan C-S-H oranının arttığı, 420-540°C aralığında kütle kaybına neden olan Ca(OH)_2 'in 7. günde 28. günden daha fazla oranda azaldığı, 540-950°C aralığında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'ün 7. günde en az oranda; 28. günde fazla, 3. günde en fazla oranlarda azaldığı gözlemlenmiştir.





5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

- 21. güne kadar zeolit ikame edilerek yapılan betonların dayanımları genel olarak düşük olup 21 gün sonunda kontrol numunesine yakın dayanım değerleri vermeye başlamıştır. İlerleyen günlerde zeolit ikame edilerek yapılan betonlar, kontrol ve silis dumanı ikameli betonlar arasında dayanım değerleri vermiştir.
- 21 güne kadar zeolit ikameli numuneler, kontrol numunesinden daha düşük çekme dayanım değerleri vermiş olup 21 gün sonunda ve ilerleyen günlerde kontrol numuneleri ile yakın çekme dayanım değerleri vermiştir.
- Erken yüksek performans ve dayanım istenen durumlarda zeolitın geç pozolanik aktivite göstermesi dolayısıyla kullanmadan önce bu hususun değerlendirilerek kullanım kararı verilmesi uygun olacaktır.
- Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçlarına göre; silis dumanı ikameli betonda 7 gün sonunda 1873 coulomb, zeolit ikameli betonda 28 gün sonunda 1786 coulomb, mineral katkı kullanılmayan kontrol numunesinde 365 gün sonunda 2417 coulomb değerleri elde edilmiştir. Silis dumanı ikameli betonda 7 gün sonunda ve zeolit ikameli betonda 28 gün sonunda elde edilen geçirimsizlik değerleri, kontrol numunesinde 365 günde elde edilenden daha düşüktür.
- Silis dumanı ve zeolit ikameli betonlarda ortaya çıkan 7, 28 ve 365 günlük geçirimsizlik sonuçlarına göre kısa, orta ve uzun vadede geçirimsizlik elde edilmesinde mineral katkı kullanımının ne kadar etkili olduğu görülmüştür.
- 28 günlük zeolit ikameli betonların basınç dayanımı, 28 günlük kontrol numunelerinden daha fazla olup elastisite modülleri daha düşük değer vermiştir. 28 gün sonrası yapılacak ölçümlerde pozolanik reaksiyonlara bağlı olarak elastisite modüllerinde artış meydana gelebilecektir.
- Toplam nem, porozite, su emme ve kılcallık oranları değerlendirildiğinde 7 günden 28 güne doğru kontrol numunelerinde düşük seviyede bir azalma meydana gelmiş olup silis dumanı ve zeolit ikameli numunelerde gelişen pozolanik reaksiyonlara bağlı olarak daha yüksek seviyede azalmalar görülmüştür.

- %15 zeolit ikame edilmesinin optimum ikame oranı olduğu değerlendirilmekte olup daha fazla ikame oranı su ve akışkanlaştırıcı ihtiyacını artıracığından maliyet etkin olmayacaktır. Ayrıca %15 zeolit oranı malzemenin taşınabilirliği de göz önünde bulundurulduğunda uygun bir değerdir.
- Mikronize zeolit ikamesi ile mukavemetli, durabil harç sıvaları elde edilebilecektir.
- Mikroyapı deneylerinde gözüken CaCO_3 kalkerli agrega dolayısıyla yoğun olarak gözlemlenmiş olup farklı tür agregalar ile yapılacak deneylerde farklı yapılar gözlemlenebilir.
- Deneylerin yapılması esnasında kullanılan ithal silis dumanı, mikronize zeolitten 5 kat daha fazla maliyetli olarak temin edilmiştir. Ekonomik hususlar göz önünde bulundurulduğunda silis dumanı yerine mikronize zeolit kullanılması daha avantajlı olabilecektir.
- SEM görüntüleri sonucunda zeolit tanelerinin plaka şeklinde olduğu ve üst üste bindiği gözlemlenmiştir.
- Elde edilen sonuçlar doğrultusunda mikronize zeolit ikamesinin yoğun karbon ortamında kullanılacak betonlarda durabilite açısından olumlu etkisi olabilecektir.
- Park alanları, nükleer yapılar, hava alanları ve donma çözünmeye maruz kalabilecek yerlerdeki betonlarda mikronize zeolit ikameli beton kullanımı geçirimsizlik elde edilmesinde olumlu sonuçlar gösterebilecektir.
- Mikroyapı deneylerinde görülen zayıf Ca(OH)_2 yapıları, puzolanik aktivitelerin oluştuğunu ve devam ettiğini göstermektedir.
- Mikronize zeolit kullanımı harç ve betonlarda su ihtiyacını arttırmakta olup kullanım öncesi ve dizayn aşamasında bu hususun dikkate alınması ve işlenebilirliğe yönelik önlemler alınması uygun olacaktır.
- 365 günlük deney sonuçlarına bakıldığında 365 gün sonunda bile puzolanik reaksiyonların devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda 365 gün sonrası yaş dayanımları ve performanslarıyla da ilgili çalışmalar yapılabilir.
- Yapılan tüm mikroyapı deneylerinde birbirleriyle uyumlu olarak beton karışımları içerisinde oluşan yapılar gözlemlenmiştir.

- Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yüksek performans ve geçirimsizlik elde edilmesi istenen durumlarda silis dumanına alternatif olarak mikronize zeolit ikame edilerek kullanılabilir.
- Silis dumanı temin edilemediği veya temin edilmesinde zorluk yaşanan durumlarda silis dumanı yerine mikronize edilmiş zeolit kullanılabilir olduğu görülmüştür.
- F-TIR analizinin hidratasyon ürünlerini görüntülemeye XRD'den daha efektif olduğu gözlemlenmiştir.
- Zeolit aktif olarak beton ve çimento sistemlerinde kullanılmasıyla doğaya daha az CO₂ salınacağından karbon emisyonlarında azalma meydana gelecek olup doğa daha az kirlenmiş olacaktır.
- Zeolit çimento yerine ikame edilerek kullanılması Portland çimento maliyetlerini azaltacaktır.
- Betona üstün özellikler sağlayan silis dumanına yakın performans değerleri ülkemizde çok fazla bulunan klinoptilolit türü mikronize seviyede öğütülmüş zeolit ile elde edilmiş olup bu tezin amacına uygun olarak sonuçlandırıldığı, ülkemize teknik ve ticari olarak katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

5.2. Öneriler

- Mikronize zeolit yurtiçi ve yurtdışı projelerde kullanılması için tanıtıcı faaliyetler yapılması, teknik şartnamelerde yer alması için girişimlerde bulunulması uygun olacaktır.
- Karşılaştırma amacıyla benzer çalışma yeni nesil akışkanlaştırıcılar kullanılarak yapılabilir.
- Farklı su/çimento oranlarıyla alkali-silika reaksiyonu, donma çözünme ve yüksek sıcaklığa direnç ile ilgili deneyler yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Farklı zeolit ikame oranlarıyla yapılan harç ve betonun durabilite özellikleri araştırılabilir.
- Zeolit, çimento ile birlikte öğütülerek benzer deneyler yapılabilir.
- Bu ve benzeri araştırma çalışmalarının üniversite ve kuruluşlarca desteklenmesinin, bütçelerinin artırılması uygun olacaktır.



KAYNAKLAR

1. Qin, L., Goo, X., and Li, Q. (2018). Upcycling carbondioxide to improve mechanical strength of Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 196, 726-738.
2. Ghrici, M., Kenai, S., and Meziane, E. (2006). Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *Materials Science*, 41(21), 6965-6972.
3. Siriruang, C., Toochinda, P., and Julnipatawong, P. (2016). CO₂ capture using fly ash from coal fired powerplant and applications of CO₂ captured fly ash as a mineral admixture for concrete. *Journal of Environmental Management*, 170, 70-78.
4. Mo, L., Panesar, and D. K. (2013). Accelerated carbonation-a potential approach to sequester CO₂ in cement paste containing slag and reactive MgO. *Cement and Concrete Composites*, 43, 69-77.
5. Shi, C., Fernandez-Jimenez, A., and Polomo, A. (2011). New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41, 750-763.
6. Rodonjanin, V., Malesav, M., and Marinkovic, S. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 1503-1511.
7. Sabir, B. B., Wild, S. and Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23, 441-454.
8. Valipour, M., Pargar, F., Shekarvhi, M., Khani, S., and Moradian, M. (2013). In site study of chloride ingresson concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment. *Construction and Building Materials*, 46, 63-70.
9. Sarıkaya, H. (2006). *Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
10. Mehta, K. P., Gjorv, O. E., and Sakai, K. (2000). *Concrete technology for sustainable development in 21st century*. London: CRC Press, 83-94.
11. Ghafoori, N., and Najimi, M. (2014). Structural grade concrete containing FBC and PCC residues. Part I: non cement concrete. *Magazine of Concrete Research*, 66, 377-386.
12. Rodriguez-Camacho, R. E., and Uribe-Afif, R. (2002). Importance of using natural pozzolans on concrete durability. *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1851-1858.
13. Zhang, Z., Zhang, B., and Yan, P. (2016). Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 105, 82-93.

14. Chen, J. J., Ng, P. L., Li, L. G., and Kwan, A. K. H. (2018). Use of superfine zeolite in conjunction with silica fume-Effects on rheology and strength of cementitious paste. *Powder Technology*, 328, 75-83.
15. Colella, C., Gennaro, M., and Aieollo, R. (2001). Use of zeolitic tuffs in the building industry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45(1), 551-587.
16. Feng, N., and Peng, G. (2005). Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. *Construction and Building Materials*, 19(8), 579-584.
17. Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., and Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 20(6), 562-569.
18. Ramezaniapour, A. A., Mousavi, R., Kalhori, M., Sobhani, J., and Najimi, M. (2015). Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes. *Construction and Building Materials*, 101, 347-358.
19. Sevim, U. K., ve Okumuş, N. (2011). Zeolit ve silika dumanı katkılı betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(2), 57-63.
20. Erdem, E., Donat, R., ve Çetişli, H. (1999). Hydration and mechanical properties of cement containing zeolite. *Cement and Concrete*, 3(18), 22-28.
21. Feng, N. Q., Li, G. Z., Zang, and X. W. (1990). High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture. *Cement and Concrete Aggregates*, 12, 61-69.
22. Esenli, F. (1993). Gördes Neojen Havzasının Asidik Tüflerinde Zeolitleşme ile Meydana Gelen Kimyasal Değişimler. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, (36), 37-44.
23. America's Cement Manufacturers. (2021). *How cement is made*. USA: Portland Cement Association.
24. World Cement Publications. (2021). *History of cement*. England: World Cement Association.
25. Internet: İstatistikler. URL: <http://www.turkcimento.org.tr/tr/istatistikler/aylik-veriler>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2021.
26. Internet: Ordinary Portland cement-constituents, properties, types and uses. URL: <https://www.theconstructor.org/concrete/ordinary-portland-cement/23181>, Son Erişim Tarihi: 31.03.2021.
27. Internet: The Difference between cement, concrete and mortar. URL: <http://www.claybrick.org/what-difference-between-cement-concrete-and-mortar>, Son Erişim Tarihi: 24.01.2021
28. Internet: Statistics. URL: <https://www.ermco.eu/new/>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2021.
29. Yılmaz, C. (2010). *Portland Çimentosu Kullanımının Horasan Harcı Özelliklerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

30. Day, R. L. (1990). Pozzolans for use in low-cost housing: State of the Art report of International Development Research Centre, Ottawa, Canada.
31. Mehta, P. K., Monteiro, and P. J. M. (2006). *Concrete microstructure, properties and materials*. USA: Mc Graw-Hill.
32. Malhotra, V. M. (1996). *Pozzolan and cementitious materials*. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers.
33. Erdoğan, T. (2003). *Beton*. Ankara: Metu Press.
34. Australasian pozzolan association publications. (2021). *Pozzolans*. Australia: Australasian Pozzolan Association.
35. Hasanzadeh, B., and Sun, Z. (2018). Impacts of diatomaceous earth on the properties of cement pastes. *Journal of Building Materials and Structures*, 5, 197-211.
36. Karahisar Gökkonca, E. (2010). *Diatomit Katkılı Harçların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Değişiminin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
37. Aruntaş, H. Y. (1996). *Diatomitin Çimentolu Sistemlerde Puzolanik Olarak Kullanılabilirliği*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
38. Internet: Concrete: Performance-Enhancing Pumice Pozzolan URL: <http://www.pumicestore.com/pumice-products/pumice-pozzolan.html>, Son Erişim Tarihi: 26.01.2021.
39. Olutoge, F.A. (2016). Effect of waste glass powder on the mechanical properties of concrete. *American Journal of Engineering Research*, 5(11), 213-220.
40. ASTM C1866. (2020). *Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
41. Bapat, J. D. (2013). *Mineral admixtures in cement and concrete*. Abingdon: CRC Press.
42. Internet: What is fly ash? URL: http://www.concreteconstruction.net/how-to/materials/what-is-fly-ash_o, Son Erişim Tarihi: 24.01.2021.
43. Tokyay, M. (2016). *Cement and mineral admixtures*. England: CRC Press.
44. Holland, T. C. (2005). *Silica Fume User's Manual*; Technical Report No. FHWA-IF-05-016, United States Silica Fume Association, Lovensville, VA.
45. Nawy, E. G. (2008). *Concrete construction engineering handbook* (Second edition). USA: Taylor and Francis Book Co.
46. ASTM C1240. (2003). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

47. Duval, R., ve Kadri, E. H. (1998). Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, *Cement and Concrete*, 4, 533-547.
48. Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete : Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 923-932.
49. Hwang, C. L., and Wu, D. S. (1989). Properties of cement paste containing rice husk ash. *American Concrete Institute*, 114, 733-765.
50. Kamal, N. L. M., Nuruddin, M. F., and Shafiq, N. (2008, 16-20 June). *The influence of burning temperatures and percentage inclusion of microwave incinerated rice husk ash (MIRHA) on normal strength concrete*. International Conference on Construction and Building Technologies, Kuala Lumpur, Malaysia, 531-538.
51. Bhupinder, S. (2018). *Waste and supplementary cementitious materials in concrete*. USA: Woodhead Publishing.
52. Nawar, A. (2018). *Metakaolin Bazlı Harçların Üretiminin İncelenmesi ve Yapılarda Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
53. Siddique, R. (2008). *Waste materials and by-products in concrete*. Germany: Springer.
54. Feng, N. ve Peng, G. (2005). Applications of natural zeolite to construction and building materials in China. *Construction of Building Materials*, 19(8), 579-584.
55. Dyer, A. (2005). Ion-exchange properties of zeolites. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 157, 141-204.
56. Öz, A. (2006). *Yüksek Fırın Cürufu ve Doğal Zeolit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Termo-mekanik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
57. Owolabi, T. A., Oladipo, I. O., and Popoola, O. O. (2015). Effect of corncob ash as partial substitute for cement in concrete. *New York Science Journal*, 8(11), 1-4.
58. Awang, H., Al-Mulali, and M. Z. (2018). *The inclusion of palm oil ash biomass waste in concrete: a literature review*. ISBS 2019 4th International Sustainable Buildings Symposium, Texas, USA, 117-132.
59. Sajjad, M. A., and Jamalluddin, N. (2017). Utilization of sugarcane bagasse ash in concrete as partial replacement of cement. *Materials Science and Engineering*, 271, 1-8.
60. Shar, I. A., Memon, A. F., Bheel, N., Shaikh, Z. H., and Dayo, A. A. (2019, 05-07 December). *Use of wheat straw ash as cement replacement material in concrete*. International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering, MUET Jamshoro, Pakistan, 1-3.
61. Ghorpade, V. G. (2012). Effect of wood waste ash on the strength characteristics of concrete. *Nature environment and pollution technology*, 11(1), 121-124.

62. Frias, M., Rojas, M. I., Rodriguez, O., Jimenez, G. R., Vigil, R. (2008). Characterisation of calcined paper sludge as an environmentally friendly source of metakaolin for manufacture of cementitious materials. *Advances in Cement Research*, 1, 23-30.
63. Hekal, E. E., Enein, A., Korashy, S. A., Megahed, G. M., and El-Sayed, T. M. (2013). Utilization of electric arc furnace dust as an admixture to Portland cement pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 114, 613-619.
64. Yusuf, R. O, and Noor, Z. Z. (2012). Use of sewage sludge ash in the production of cement and concrete. *International Journal of Global Environmental Issues*, 12, 214-228.
65. Zhang, T., and Zhao, Z. (2014). Optimal use of MSWI bottom ash in concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 173-182.
66. Shukla, P., and Singh, R. C. (2017). A review on the effect of bagasse ash and rubber tyre waste in strength of concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(12), 442-445.
67. Kumar, B. A. V., and Kumar, G. A. (2020). Experimental study on partial replacement of cement with tyre, wood and jute ash wastes in rigid pavements. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(1), 2341-2345.
68. Riberio, D. V., Labrincha, J. A., and Morelli, M. R. (2011). Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement. *Materials Research*, 14(1), 60-66.
69. Borges, P. H. R., Santos, F. A., Milikic, N., Belieny, and F., Barsante, A. C. (2016). Lithium aluminosilicate residue as raw material in the production of sustainable concrete, masonry units: a Brazilian case. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 10(3), 418-430.
70. Uzal, B. (2007). *Properties And Hydration Of Cementitious Systems Containing Low, Moderate, And High Amounts Of Natural Zeolites*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
71. Özen, S. (2013). *Pozolanik Activity of Natural Zeolites : Mineralogical, Chemical, Physical, Characterization And Examination of Hydration Product*. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
72. Dıgış, A. (2016). *Mineral Katkı Olarak Kullanılan Öğütülmüş Doğal Zeolitin Harç Özelliklerine Etkisi*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
73. Yazıcıoğlu, Ö. F. (2016). *Çimento ve Beton Endüstrisinin Sürdürülebilir Üretimlerinde Doğal Zeolit'in (Analsim) Pozolanik Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
74. Savaş, M. (2012). *Diatomit ve Zeolit İkameli Betonların Kimyasal Etkilere Karşı Davranışının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.

75. Öcal, R. (2014). *Yüksek Sıcaklığın Doğal Zeolit Katkılı Betonlar Üzerindeki Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
76. Karakurt, C. (2008). *Çimento Üretiminde Doğal Zeolit ve Volkanik Tüflerin Endüstriyel Atıklarla Birlikte Kullanılmasının Beton Performansı Üzerine Etkileri*. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
77. Gölbaş, M. (2018). *Zeolit Katkılı Çimento Esaslı Kompozitlerde Kendi Kendini Temizleme ve Antibakteriyel Özelliklerin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
78. Durgun, H. (2015). *Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatı Korozyonunun Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi Yöntemi İle İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
79. Yılmaz, İ. (2018). *Uçucu kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Zeolit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların İşlenebilirlik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
80. Özer, C. (2018). *Geopolimer Harçların Reoloji Davranışı Üzerinde Zeolit Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
81. Yıldız, K., Demirel, C. (2014). $MgSO_4$ etkisine maruz rijit yol kaplamalarında pomza ve zeolit katkılı betonun kullanılabilirliği. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 17(1), 23-29.
82. Kılınçarslan, Ş. (2007). Zeolit içeren betonların termomekanik özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3), 262-267.
83. Yıldırım, S. F. (2007). *Puzolanik Zeolit Çimentoda Katkı Uygunluğunun Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
84. Okumuş, N. (2012). *Zeolit ve Silika Dumanı Katkılı Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinde Mekanik ve Geçirimsizlik Özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
85. Bilim, C. (2018). The effect of sodium carbonate on elevated temperature resistance of cement mortars containing natural zeolite. *Turkish Journal of Engineering*, 2(1), 12-16.
86. Nas, M. (2015). *Zeolit ve Metakaolin İçeren Betonların Bazı Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
87. Ranjbar, M. M., Madandoust, R., Mousavi, Y. S., and Yosefi, S. (2013). Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 47, 806-813.

88. Daskiran, E. G., and Daskiran, M. M. (2015). Effectiveness of natural zeolite in mitigating alkali silica reaction expansions. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 9(9), 1131-1134.
89. Baldino, N., Gabriele, D., Lupi, R. F., Seta, L., and Zinno, R. (2014). Rheological behaviour of fresh cement pastes: Influence of synthetic zeolites, limestone and silica fume. *Cement and Concrete Research*, 63, 38-45.
90. Markiv, T., Sobal, K., Franus, M., and Franus, W. (2016). Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 554-562.
91. Chen, J. J., Ng, P. L., Kwan, A. K. H., and Li, L. G. (2018). Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions. *Journal of Cleaner Production*, 210, 66-76.
92. Tydlitat, V., Zakoutsky, J., Cerny, R. (2014). Early-stage hydration heat development in blended cements containing natural zeolite studied by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 582, 53-58.
93. Jo, B., Choi, J. S., Yoon, K., and Park, J. H. (2012). Material characteristics of zeolite cement mortar. *Construction and Building Materials*, 36, 1059-1065.
94. Ahmadi, B., and Shekarchi, M. (2009). Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 32, 134-141.
95. Dayı, M., Aruntaş, H. Y., Çavuş, M., ve Şimşek, O. (2013). Zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin Portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), 491-499.
96. Nagrockiene, D., and Girskas, G. (2016). Research into properties of concrete modified with natural zeolite addition. *Construction of Building Materials*, 113, 964-969.
97. Khoshroo, M., Javid, A. A. S, and Katebi, A. (2018). Effect of chloride treatment curing condition on the mechanical properties of concrete containing zeolite and micro-nano-bubble water. *Construction and Building Materials*, 177, 417-427.
98. Kwan, A. K. H., Ng, P. L., Li, L. G., and Chen, J. J. (2017). Effect of superfine zeolite on strength, flowability and cohesiveness of cementitious paste. *Cement and Concrete Composites*, 83, 101-110.
99. Li, L. G., Kwan, A. K. H., Ng, P. L., and Chen, J. J. (2018). Use of superfine zeolite in conjunction with silica fume-Effects on rheology and strength of cementitious paste. *Powder Technology*, 328, 75-83.
100. Shooshpasha, I., and Mola Abasi, H. (2016). Influence of zeolite and cement additions on mechanical behaviour of sandy soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 746-752.

101. Lin, Z. S., Kou, S. C., Lam, L., and Poon, C. S. (1999). A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction of Building Materials*, 13, 427-432.
102. Mindess, S., Young, JF., and Darwin, D. (2002). *Concrete*. USA: Prentice Hall.
103. ASTM C430. (2008). *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45 μ m Sieve*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
104. ASTM C311/C311M. (2017). *Standard Test Methods For Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
105. ASTM C618. (2012). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozolan for Use in Concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
106. ASTM C3143/C143M. (2020). *Standard Test Method For Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
107. ASTM C305. (2006). *Standard Practice For Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
108. ASTM C109/C109M. (2006). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50 mm Cube Specimens)*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
109. ASTM C1437 (2015). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
110. ACI Committee 211.1-91 (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
111. ASTM C29/C29M. (2009). *Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
112. ASTM C231/C231M. (2010). *Air Content of Freshly Mixed Concrete by The Pressure Method*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
113. ASTM C39/C39M. (2003). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
114. ASTM C496/C496M. (2004). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.

115. ASTM C642. (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
116. ASTM C1202. (2017). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
117. ASTM C469/C469M. (2010). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity And Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
118. ASTM C597. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
119. ASTM C1702. (2017). *Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
120. Tasdemir, C. (2003). Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 1637-1642.
121. Hewlett, P. (2003). *Lea's chemistry of cement and concrete* (4th edition). U.K.: Butterworth-Heinemann.
122. Vejmelkova, E., Konakova, D., Kulovana, T., Keppert, M., Zumar, J., Rovnavika, P., Kersner, Z., Sedimajer, M., and Cerny, R. (2015). Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: strength, toughness, durability and hydrothermal performance. *Cement and Concrete Composites*, 55, 259-267.
123. Qin, L., Gao, X., and Chen, T. (2019). Influence of mineral admixtures on carbonation curing of cement paste. *Construction and Building Materials*, 212, 653-662.
124. Jumate, E., and Manea, D. L. (2012). Application of x-ray diffraction and scanning electron microscopy (sem) methods to the Portland cement hydration processes. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2(15), 35-42.
125. Lu, B., Shi, C., Zhang, J., and Wang, J. (2018). Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 186, 699-708.
126. Ylmen, R., and Jaglid, U. (2013). Carbonation of Portland cement studied by diffuse reflection fourier transform infrared spectroscopy. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(2), 119-125.
127. Uzal, B., Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, M. C., and Çulfaz, A. (2010). Pozzolan activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 40, 398-404.

128. Scrivener, K. L., Zhang, X., and Galluci, E. (2013). Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (c-s-h). *Cement and Concrete Research*, 53, 185-195.
129. Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., and Ehrlacher, A. (2005). The use of thermal analysis in assesing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35, 609-613.
130. Lin, R., Wang, X., Lee, H., and Cho, H. (2019). Hydration and microstructure of cement pastes with calcined Hwangtoh clay. *Materials*, 12, 458-477.





GAZİ GELECEKTİR..