



**ÇİMENTO ESASLI SİLİS DUMANLI UÇUCU
KÜLLÜ KOMPOZİTLERİN SEM VE XRD
DESTEKLİ GÖRSEL ANALİZLERİN YAPAY
SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ**

Burhan UZBAŞ

Doktora Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Bilim Dalı

Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

2019

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ÇİMENTO ESASLI SİLİS DUMANLI UÇUCU KÜLLÜ
KOMPOZİTLERİN SEM VE XRD DESTEKLİ GÖRSEL
ANALİZLERİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ

Burhan UZBAŞ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI
Yapı Bilim Dalı

ERZURUM
2019

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ ONAY FORMU



**ÇİMENTO ESASLI SİLİS DUMANLI UÇUCU KÜLLÜ KOMPOZİTLERİN SEM VE XRD
DESTEKLİ GÖRSEL ANALİZLERİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ**

Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN danışmanlığında, Burhan UZBAŞ tarafından hazırlanan bu çalışma, 20/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak **oybirliği /oy çokluğu (5./5.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

İmza

Üye : Prof. Dr. M. Tolga YILMAZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Orhan DOĞAN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

İmza :

Üye : Doç. Dr. Merve SAĞIROĞLU

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu’nun **21.03/2019** tarih ve **..13..../10.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

ÇİMENTO ESASLI SİLİS DUMANLI UÇUCU KÜLLÜ KOMPOZİTLERİN SEM VE XRD DESTEKLİ GÖRSEL ANALİZLERİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ

Burhan UZBAŞ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Bu çalışmada, beton içerisindeki çimento yerine farklı miktarda uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve bunların ikili kombinasyonunun kullanılmasının çimento hamuru ve beton hidratasyon ürünlerine (C-S-H ve CH), betonun mekanik ve mikroyapısına etkisi araştırılmıştır. Portland çimentosu yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül, silis dumanı ve uçucu kül + silis dumanı ikame edilmiştir. Elde edilen betonların basınç dayanımı ile birlikte mikroyapıları X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, UK 7 günlük betonun basınç dayanımını olumsuz etkilerken 28 ve 90 günlük yaşlarda ise basınç dayanımını olumlu etkilediği görülmüştür. SD kullanılan betonlarda ise 7, 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Nihai basınç dayanımında, SD numunelerinden en yüksek basınç dayanımı %15 oranında SD katıldığında, UK içeren numunelerde %10 oranında UK katıldığında, SD ve UK birlikte kullanıldığı durumlarda ise %15 (%7,5 SD+%7,5 UK) oranında katıldığında elde edilmiştir.

SEM ve XRD analizinde, SD, UK ve SD+UK birlikte beton içerisinde kullanıldığında hidratasyon sonucu oluşan CH oranının yaşa ve kullanılan mineral katkı oranına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Tüm yaşlarda UK içeren numunelerde CH miktarı, katkısız numunelere göre daha az gerçekleşmiştir. SEM analizinde ise SD ve UK kullanılması boşlukları ve oluşan CH yoğunluğunu azaltırken, C-S-H oranını artırdığı gözlemlenmiştir. Kullanılan mineral katkı (SD ve UK) miktarındaki artış ile oluşan C-S-H yoğunluğundaki artış arasında doğrusal orantılı ve oluşan CH yoğunluğu arasında ise ters orantılı bir ilişki olduğu görülmüştür. Bunun sebebi SD ve UK ile portlandit (CH) arasında meydana gelen reaksiyondan dolayı oluşan Ca(OH)_2 miktarında azalmaya neden olması ve boşlukları doldurmasıdır.

Çalışmada SEM analizinden elde edilen görüntüler fotoğraf işleme programı aracılığıyla analiz edilmiştir. Analiz sonucunda hidratasyon ürünlerinin yoğunlukları elde edilerek bu yoğunlukları esas alan bir model geliştirilmesi hedeflenmiştir. SEM ve XRD analizlerinden elde edilen veriler doğrultusunda betonun basınç dayanımının teorik olarak tahmini için model önerilmiştir. Yapay sinir ağları (YSA) üzerine kurulan modelde SEM ve XRD verilerinden elde edilen CH ve C-S-H yoğunlukları, silis dumanı oranı, uçucu kül ve yaş parametreleri girdi olarak alınmış ve basınç dayanımı elde edilmiştir. Modellerden elde edilen sonuçlar deneylerden elde edilen sonuçlarla kıyılanmış ve %96,26 oranında korelasyon elde edilmiştir. Bu yöntem ile mevcut yapıda tahribat yapmadan küçük bir beton numunesinin SEM ve XRD analizi ile elde edilen sonuçlardan betonun basınç dayanımının öngörülebileceği anlaşılmıştır.

2019, 279 sayfa

Anahtar Kelimeler: Uçucu kül, silis dumanı, betonun mikro yapısı, SEM, XRD, C-S-H, CH, modelleme, renk analizi

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

MODELING OF SEM AND XRD VISUAL ANALYSIS OF CEMENT BASE SILICA FUME FLY ASH COMPOSITES WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Burhan UZBAŞ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Department of Construction

Supervisor: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

In this study, different quantities of fly ash (FA), silica fume (SF) and their binary combinations are used instead of cement in concrete and its impact on cement dough and concrete hydration products (C-S-H and CH) are investigated. Substitution of weight 5%, 10%, 15% and 20% of fly ash, silica fume and combination of fly ash and silica fume are used in cement. The compressive strength and microstructures of obtained concrete are examined by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. The present study shows that while FA has adverse impact on the compressive strength of 7-day concrete, it affects the compressive strengths of 28 and 90 day concrete, positively. For concrete which contains SF, the compressive strengths of 7, 28 and 90 day concrete are greater than the compressive strengths of control samples with the same ages of concrete. The ultimate compressive strengths are obtained by using 15% of SF, 10% of FA and 15 % of SF and FA combination (7.5% of SF, 7.5% of FA) for SF concrete, FA concrete and combination of SF and FA concrete, respectively.

SEM and XRD analyses show that when SF, FA, and combination of SF and FA are used in concrete, the ratio of CH, as a result of hydration, decreases, depending on age and the proportion of mineral additive ratio. For all ages of concrete which contain FA, the amount of CH is smaller than additive-free concrete. In the SEM analysis, while the usage of SF and FA decreases the porosity and the CH concentration, it increases the C-S-H ratio. The increase in the amount of mineral additive (SF and FA) is proportional to the increase in C-S-H concentration; however it is inversely proportional to CH concentration. A reasonable explanation for this is that the decrease in the amount of Ca(OH)_2 , which is obtained by the reaction between SF and FA and portlandit (CH), and the filled porosities.

The images obtained from the SEM analysis are analysed by the image processing tool. In this framework, the aim is to develop a model based on densities of hydration products from analysis. According to the data obtained from SEM and XRD analyses, a model is proposed for the theoretical estimation of compressive strength of concrete. In the model, which is based on artificial neural networks (ANN), the densities of CH and C-S-H obtained from SEM and XRD data, silica fume ratio, fly ash, age parameters are taken as input, and compressive strength is calculated. The model and experimental results are compared and 96,76% of correlation is found between them. The findings of this study suggest that with the results of SEM and XRD analysis of a small concrete sample without damaging the existing structure, the compressive strength of concrete can be predicted.

2019, 279 pages

Keywords: Fly ash, silica fume, concrete microstructure, SEM, XRD, C-S-H, CH, modellig, color analysis

TEŞEKKÜR

İlk olarak kendisi ile 2004 yılından beri yüksek lisans tez danışmanım olarak birlikte çalışma fırsatı bulduğum için şanslı biri olduğumu belirtmek istiyor, öğrenim hayatımın yedi yılı aşkın ve en uzun dönemini kapsayan doktora çalışmam süresince bana el uzatarak, hayatımı değiştirecek bir ufuk açan, tezimin çalışma konusunun belirlenmesinde, araştırılmasında, yol göstererek tamamlanmasına kadar kıymetli zamanını ayırarak sabırla ve büyük çabayla faydalı olabilmek için destek olan değerli hocam, bilim insanı ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN'a en samimi duygularıyla teşekkür ediyorum.

Çalışmamın başlangıcından bitimine kadar benden yardımlarını esirgemeyen, zaman ayıran ve çalışmamı destekleyen tez izleme komitesi üyesi Sayın Prof. Dr. Murat Tolga YILMAZ'a ve Sayın Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'e ayrıca teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalarında bana laboratuvar imkânlarını sağlayan, Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne ve bilgilerini aktaran Sayın Ümit ERDEM ve Sayın Hilal TOPBAŞ'a, yine bana labatuvar imkânlarını sağlayan Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü Maden Analizleri ve Teknolojisi Daire Başkanlığı'na teşekkür ediyorum.

Bu çalışmayı hazırlamam esnasında gösterdikleri sabır ve verdikleri her türlü destek için sürekli yanımda olan aileme ve ismini sayamadığım emeği geçen herkese teşekkür ediyorum.

Burhan Uzbaş

Mart, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	3
1.2. Kaynak Özetleri.....	8
2. KURAMSAL TEMELLER.....	41
2.1. Kompozit Malzemeler	43
2.1.1. Taneli kompozitler	44
2.1.2. Lifli kompozitler.....	46
2.1.3. Tabakalı kompozitler.....	53
2.2. Bağlayıcı Malzemeler.....	54
2.2.1. Çimento	54
2.2.2. Kireç	55
2.2.3. Alçı	56
2.2.4. Puzolan	56
2.2.5. Uçucu kül	58
2.2.6. Silis dumanı.....	61
2.2.7. Yüksek fırın cürufu	61
2.3. Yapı Malzemesi Olarak Beton (Tanım ve Genel Bilgiler).....	62
2.3.1. Betonlu oluşturan malzemeler.....	63
2.3.1.a. Agregası	63
2.3.1.b. Çimento	68
2.3.1.c. Beton karışım suyu	77
2.3.1.d. Beton katkı maddeleri	78
2.4. Betonun İyiliği ve İyiliği Özellikleri	78

2.4.1. Betonun içyapısı	79
2.4.2. Agregâ fazının içyapısı.....	83
2.4.3. Çimento hamurunun içyapısı.....	85
2.4.4. Ara yüzey bölgesinin içyapısı	96
2.5. Betonun İçyapısını Etkileyen Faktörler.....	100
2.5.1. Çimento tipi	101
2.5.2. Karışım ve bakım suyu.....	102
2.5.3. Su/çimento oranı.....	103
2.5.4. Agregâ gradasyonu ve cinsi	105
2.5.5. Betonun kûrû	106
2.5.6. Beton katkıları	107
2.6. Beton İçyapısını İnceleme Yöntemleri.....	108
2.6.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	109
2.6.2. X-ışını kırınım yöntemi (XRD).....	128
2.6.3. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)	132
2.6.4. Yapay sinir ağı modeli (YSA).....	134
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	139
3.1. Betonun üretimi ve karışım miktarlarının belirlenmesi	139
3.2. Deneyde kullanılan malzemeler	142
3.2.1. Çimento	142
3.2.2. Karışım suyu.....	143
3.2.3. Agregâ	143
3.2.4. Silis dumanı.....	144
3.2.5. Uçucu kül	145
3.3. Deneylerde kullanılan aletler.....	146
3.3.1. Elekler	146
3.3.2. Betoniyer	147
3.3.3. Kalıplar	147
3.3.4. Hassas terazi	148
3.3.5. Kûr tankı.....	149
3.3.6. Tek eksenli basınç deney cihazı	149
3.3.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	150

3.3.8. X-Işını kırınım cihazı (XRD)	151
3.4. Karışım tipleri ve numunelerin kodlanması	151
3.5. Yapılan deneysel çalışmalar	152
3.6. Beton karışım hesaplarının yapılması	155
3.6.1. Su / bağlayıcı oranının (s/ç) seçilmesi	156
3.7. Deney için beton numunelerin üretilmesi	156
3.7.1. Kontrol numunesinin üretilmesi	157
3.7.2. Silis dumanlı (SD) beton numunelerin üretilmesi	158
3.7.3. Uçucu küllü (UK) beton numunelerin üretilmesi	159
3.7.4. Silis dumanı ve uçucu küllü (SD+UK) beton numunelerin üretilmesi	159
3.8. Deney numunelerin karıştırılması, yerleştirilmesi ve kür edilmesi	160
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	162
4.1. Agrega deney bulguları	162
4.2. Beton çökme (slump) değer bulguları	165
4.3. Basınç dayanım bulguları	166
4.4. SEM Analiz Bulguları	169
4.4.1. SEM 7 günlük analiz bulguları	172
4.4.2. SEM 28 günlük analiz bulguları	185
4.4.3. SEM 90 günlük analiz bulguları	198
4.5. XRD analiz bulguları	215
4.5.1. XRD 7 günlük analiz bulguları	215
4.5.2. XRD 28 günlük analiz bulguları	222
4.5.3. XRD 90 günlük analiz bulguları	228
4.6. SEM ve XRD Analiz Sonuçlarının Modellenmesi	246
4.6.1. Verilerin hazırlanması	247
4.6.2. XRD analiz verileri ile dayanım elde edilmesi	251
4.6.3. SEM analiz verileri ile dayanım elde edilmesi	255
4.6.4. SEM ve XRD modellerinin karşılaştırılması	259
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	260
KAYNAKLAR	265
EKLER	273
EK 1.	273

EK 2.	274
EK 3.	277
EK 4.	278
ÖZGEÇMİŞ	280



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

GPa	Giga paskal
Mpa	Mega paskal
°C	Santigrat derece
δ_c	Çimentonun yoğunluğu (kg / m ³)
S	Karışimdaki suyun miktarı (kg)
A	Karışimdaki agreganın miktarı (kg)
δ_A	Agreganın yoğunluğu (kg / m ³)
W_{ji}	j ve i nöronları arasındaki bağlantının ağırlığı
X_i	i nöronunun çıktısını
θ_j	eşik değeri
Net	Nöronunun net girdisi
μm	Mikrometre

Kısaltmalar

ACC	Otoklavlanmış gözenekli betondaki
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEI	Geri yansıma elektron görüntüleme
BSE	Geri saçılmalı elektorn mikroskbu
C ₂ S	Dikalsiyum silikat
C ₃ A	Trikalsiyum alüminat
C ₃ A ₅	Trikalsiyum penta alüminat
C ₃ S	Trikalsiyum silikat
C ₃ S ₂	Trikalsiyum disilikat
C ₄ AF	Tetrakalsiyum alüminoforit

C ₅ A ₃	Pentakalsiyum trialüminat
CA	Renk analizi
Ca(OH) ₂ / CH	Kalsiyum hidroksit
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
CAH	Kalsiyum alüminat hidrat
CaO	Kalsiyum oksit
CBED	Yakınsak kırış elektorn kırınımı
CEM	Çimento sınıfı
CO ₂	Karbon dioksit
CS	Kalsiyum monosilikat
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
Ç	Karışımındaki çimento miktarı (kg)
DEF	Gecikmiş etrenjit oluşumu
d _{max}	Maksimum agrega boyutu
DTA	Termal analiz
FTIR	Fourier dönüşümü kızılötesi spektrofotometresi
GGBS	Granüle yüksek fırın cürufu
H	Betondaki toplam hava miktarı (m ₃)
HB	Hafif beton
HRLI	Yüksek çözünürlüklü kafes görüntülemesi
ITZ	Arayüzey geçiş bölgesi
KN	Kontrol numunesi
KSB	Kendiliğinde sıkışan beton
MIP	Civalı porozimetre
NaOH	Sodyum hidroksit
NB	Normal beton
PAM	Poliakrilamid
SA	Süper akışkanlaştırıcı
S/Ç	Su/çimento oranı
SD	Silis dumanı
SD5	%5 silis dumanı içeren numune
SD10	%10 silis dumanı içeren numune

SD15	%15 silis dumanı içeren numune
SD20	%20 silis dumanı içeren numune
SDUK5	%5 sislis dumanı ve uçucu kül içeren numune
SDUK10	%10 sislis dumanı ve uçucu kül içeren numune
SDUK15	%15 sislis dumanı ve uçucu kül içeren numune
SDUK20	%20 sislis dumanı ve uçucu kül içeren numune
SEI	Sekonder elektron görüntülerinde
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiO ₂	Silisyum dioksit
SO ₃	Kükürt trioksit
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TGA	Termal gravimetrik analiz
TS / TS EN	Türk Standardı
UK	Uçucu kül içeren numune
UK5	%5 uçucu kül içeren numune
UK10	%10 uçucu kül içeren numune
UK15	%15 uçucu kül içeren numune
UK20	%20 uçucu kül içeren numune
UPV	Ultrasonik atım hızı
W/C	Su/çimento oranı
XRD	X-Işını kırınımı
XRF	X-ışını floresansı
YFC	Yüksek fırın cürufu
YSA	Yapay sinir ağları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kompozit mazemelerin sınıflandırılması	44
Şekil 2.2. Referans granülometri eğrisi- $d_{max}=31,5$ mm	64
Şekil 2.3. Referans granülometri eğriş- $d_{max}=16$ mm	65
Şekil 2.4. Çimento anabileşenlerinin basınç dayanımına etkisi.....	75
Şekil 2.5. Beton parlatılmış yüzey kesiti	80
Şekil 2.6. Hidrate çimento hamurunun mikroyapısı	82
Şekil 2.7. Yeni dökülmüş betonda görünür terlemenin şematik gösterimi (solda),tek eksenli basınç altında test edilen betonda oluşan kusur (sağda)	84
Şekil 2.8. Monosülfat hidratın tipik altıgen kristallerinin ve iğne şeklinde etrenjit kristalinin SEM görüntüsü	86
Şekil 2.9. Portland çimento hamurundaki içyapısal gelişimin şematik gösterimi (a) başlangıç karışımı; (b) 7 günlük; (c) 28 günlük; (d) 90 günlük.....	87
Şekil 2.10. İyi hidrate olmuş portland çimentosu modeli	87
Şekil 2.11. Hidrate çimento hamurunun taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografikleri	88
Şekil 2.12. Hidrate çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit (CH)	91
Şekil 2.13. Hegzagonal kalsiyum hidroksit kristalleri	91
Şekil 2.14. Hidrate çimento hamurunda kalsiyum sülfalüminat hidrat yapıların SEM mikrografikleri	92
Şekil 2.15. Gecikmiş etrenjit oluşumu gözlenen çimento harçlarında farklı morfolojideki etrenjit oluşumları	92
Şekil 2.16. Gecikmiş etrenjit oluşumu gözlenen çimento harçlarında monosülfalüminat hidrate olmamış çimento taneleri	93
Şekil 2.17. Beton arayüzey geçiş bölgesi (a) SEM görüntüsü	97
Şekil 2.18. Beton arayüzey geçiş bölgesi şematik gösterimi	98
Şekil 2.19. Su-çimento oranı ve suda kür yaşının beton mukavemeti üzerine etkisi....	104
Şekil 2.20. Su/çimento oranı 0,55 olan betonda hidrate çimento hamuru yapısı A=CH, B=C-S-H ve C=Etrenjit	111

Şekil 2.21. Yüksek su/çimento oranlı betonda geçirgen ve boşluklu hidrate çimento hamurunu oluşturan lifsi C-S-H	112
Şekil 2.22. Düşük su/çimento oranlı (0,40) betonda yoğun hidrate çimento hamurunu. Gözenekler (A) küçük ve geçirgenlik düşüktür	112
Şekil 2.23. Artmış hamur boşluğu ve agreg a yüzeyinde CH kristalinin büyümesine yönelmesini gösteren hamur-agrega ara yüzeyi, AG=Agrega	113
Şekil 2.24. Beton hidrate çimento hamuru içinde boşluklarda gelişen etrenjit iğneler (A)	114
Şekil 2.25. Hidrate çimento hamuru içinde hidrate olmamış çimento tanesi (c)	114
Şekil 2.26. Düşük s/ç silis dumanlı betonda yoğun hidrate çimento hamuru, A=C-S-H, B=CH'ın küçük kristalleri	117
Şekil 2.27. Düşük s/ç silis dumanlı betonda hamur-agrega arayüzeyi (Arayüzde CH kristali yoktur), AGG=agrega, P=hidrate çimento hamuru.....	117
Şekil 2.28. Küre şekilli uçucu kül parçalarının SEM görüntüsü	118
Şekil 2.29. Düşük s/ç li uçucu küllü betonda yoğun hidrate çimento hamuru. Gözenekler belirgin daha küçük ve geçirgenlik son derece düşüktür	118
Şekil 2.30. Ultra ince silis dumanı parçacıklarının TEM görünümü	119
Şekil 2.31. Çözülmüş durumda bir silis dumanı parçacığı, TEM cihazı görüntüsü	120
Şekil 2.32. CaCO ₃ morfolojisi-zerre şekilli kristal	122
Şekil 2.33. CaCO ₃ morfolojisi-üst üste prizma kristaller	122
Şekil 2.34. CaCO ₃ morfolojisi-küresel kristaller	123
Şekil 2.35. CaCO ₃ morfolojisi-dogtooth kristaller	123
Şekil 2.36. Donatı korozyonu lame ürünleri	125
Şekil 2.37. Donatı korozyonundan dolayı oluşmuş narin küresel ve whiskery minareli.....	125
Şekil 2.38. Alkali-agrega reaksiyonu kristalinin yapısının görünümü	126
Şekil 2.39. Genleşme sebebi ile oluşan amorf ASR jeli	127
Şekil 2.40. Sıcaklıkla kür edilmiş betonda gecikmiş etrenjit kristalleri	128
Şekil 2.41. Yapay sinir ağının genel yapısı (Haykin 2009)	134
Şekil 2.42. Logaritmik Sigmoid fonksiyonu giriş-çıkış eğrisi (a), giriş ifadesi (b)	137
Şekil 2.43. Logaritmik Sigmoid fonksiyonu görsel ifadesi	137
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan elekler	146

Şekil 3.2. Deneyde kullanılan betoniyer	147
Şekil 3.3. Çelik kalıp.....	148
Şekil 3.4. Hassas terazi	148
Şekil 3.5. Beton kür tankı	149
Şekil 3.6. Tek eksenli basınç deney cihazı	150
Şekil 3.7. Analizde kullanılan JSM5600 SEM cihazı.....	150
Şekil 3.8. Analizde kullanılan XRD cihazı.....	151
Şekil 3.9. Beton numunelerinin hazırlanışı.....	153
Şekil 3.10. Beton basınç testi.....	154
Şekil 3.11. Su miktarı ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişki	156
Şekil 3.12. Kontrol numunesi	157
Şekil 3.13. XRD için kontrol numunesi.....	158
Şekil 3.14. SEM ve XRD için kontrol numunesi.....	158
Şekil 4.1. Granülometri eğrisi (TS 802 Standart eğriler ve deney eğrisi).....	163
Şekil 4.2. Karışım tipine göre çökme miktarları (cm)	165
Şekil 4.3. Karışım tipine göre 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (MPa).....	167
Şekil 4.4. Çalışmaya ait photoshop programı görüntüsü (a).....	170
Şekil 4.5. Çalışmaya ait photoshop programı görüntüleri (b).....	171
Şekil 4.6. KN karışımı 7 günlük SEM analizi	172
Şekil 4.7. SD5 karışımı 7 günlük SEM analizi	173
Şekil 4.8. SD10 karışımı 7 günlük SEM analizi	174
Şekil 4.9. SD15 karışımı 7 günlük SEM analizi	175
Şekil 4.10. SD20 karışımı 7 günlük SEM analizi	176
Şekil 4.11. UK5 karışımı 7 günlük SEM analizi	177
Şekil 4.12. UK10 karışımı 7 günlük SEM analizi	178
Şekil 4.13. UK15 karışımı 7 günlük SEM analizi	179
Şekil 4.14. UK20 karışımı 7 günlük SEM analizi	180
Şekil 4.15. SDUK5 karışımı 7 günlük SEM analizi	181
Şekil 4.16. SDUK10 karışımı 7 günlük SEM analizi	182
Şekil 4.17. SDUK15 karışımı 7 günlük SEM analizi	183
Şekil 4.18. SDUK20 karışımı 7 günlük SEM analizi	184
Şekil 4.19. KN karışımı 28 günlük SEM analizi	185

Şekil 4.20. SD5 karışımı 28 günlük SEM analizi	186
Şekil 4.21. SD10 karışımı 28 günlük SEM analizi	187
Şekil 4.22. SD15 karışımı 28 günlük SEM analizi	188
Şekil 4.23. SD20 karışımı 28 günlük SEM analizi	189
Şekil 4.24. UK5 karışımı 28 günlük SEM analizi	190
Şekil 4.25. UK10 karışımı 28 günlük SEM analizi	191
Şekil 4.26. UK15 karışımı 28 günlük SEM analizi	192
Şekil 4.27. UK20 karışımı 28 günlük SEM analizi	193
Şekil 4.28. SDUK5 karışımı 28 günlük SEM analizi	194
Şekil 4.29. SDUK10 karışımı 28 günlük SEM analizi	195
Şekil 4.30. SDUK15 karışımı 28 günlük SEM analizi	196
Şekil 4.31. SDUK20 karışımı 28 günlük SEM analizi	197
Şekil 4.32. KN karışımı 90 günlük SEM analizi	198
Şekil 4.33. SD5 karışımı 90 günlük SEM analizi	199
Şekil 4.34. SD10 karışımı 90 günlük SEM analizi	200
Şekil 4.35. SD15 karışımı 90 günlük SEM analizi	201
Şekil 4.36. SD20 karışımı 90 günlük SEM analizi	202
Şekil 4.37. UK5 karışımı 90 günlük SEM analizi	203
Şekil 4.38. UK10 karışımı 90 günlük SEM analizi	204
Şekil 4.39. UK15 karışımı 90 günlük SEM analizi	205
Şekil 4.40. UK20 karışımı 90 günlük SEM analizi	206
Şekil 4.41. SDUK5 karışımı 90 günlük SEM analizi	207
Şekil 4.42. SDUK10 karışımı 90 günlük SEM analizi	208
Şekil 4.43. SDUK15 karışımı 90 günlük SEM analizi	209
Şekil 4.44. SDUK20 karışımı 90 günlük SEM analizi	210
Şekil 4.45. Mineral katkıların C-S-H miktarına etkisi (SEM)	211
Şekil 4.46. Mineral katkıların CH miktarına etkisi (SEM)	213
Şekil 4.47. KN karışımı 7 günlük XRD analizi	215
Şekil 4.48. SD5 karışımı 7 günlük XRD analizi	216
Şekil 4.49. SD10 karışımı 7 günlük XRD analizi	216
Şekil 4.50. SD15 karışımı 7 günlük XRD analizi	217
Şekil 4.51. SD20 karışımı 7 günlük XRD analizi	217

Şekil 4.52. SDUK5 karışımı 7 günlük XRD analizi	218
Şekil 4.53. SDUK10 karışımı 7 günlük XRD analizi	218
Şekil 4.54. SDUK15 karışımı 7 günlük XRD analizi	219
Şekil 4.55. SDUK20 karışımı 7 günlük XRD analizi	219
Şekil 4.56. UK5 karışımı 7 günlük XRD analizi	220
Şekil 4.57. UK10 karışımı 7 günlük XRD analizi	220
Şekil 4.58. UK15 karışımı 7 günlük XRD analizi	221
Şekil 4.59. UK20 karışımı 7 günlük XRD analizi	221
Şekil 4.60. KN karışımı 28 günlük XRD analizi	222
Şekil 4.61. SD5 karışımı 28 günlük XRD analizi.....	222
Şekil 4.62. SD10 karışımı 28 günlük XRD analizi.....	223
Şekil 4.63. SD15 karışımı 28 günlük XRD analizi.....	223
Şekil 4.64. SD20 karışımı 28 günlük XRD analizi.....	224
Şekil 4.65. SDUK5 karışımı 28 günlük XRD analizi	224
Şekil 4.66. SDUK10 karışımı 28 günlük XRD analizi	225
Şekil 4.67. SDUK15 karışımı 28 günlük XRD analizi	225
Şekil 4.68. SDUK20 karışımı 28 günlük XRD analizi	226
Şekil 4.69. UK5 karışımı 28 günlük XRD analizi	226
Şekil 4.70. UK10 karışımı 28 günlük XRD analizi	227
Şekil 4.71. UK15 karışımı 28 günlük XRD analizi	227
Şekil 4.72. UK20 karışımı 28 günlük XRD analizi	228
Şekil 4.73. KN karışımı 90 günlük XRD analizi	228
Şekil 4.74. SD5 karışımı 90 günlük XRD analizi.....	229
Şekil 4.75. SD10 karışımı 90 günlük XRD analizi.....	229
Şekil 4.76. SD15 karışımı 90 günlük XRD analizi.....	230
Şekil 4.77. SD20 karışımı 90 günlük XRD analizi.....	230
Şekil 4.78. SDUK5 karışımı 90 günlük XRD analizi	231
Şekil 4.79. SDUK10 karışımı 90 günlük XRD analizi	231
Şekil 4.80. SDUK15 karışımı 90 günlük XRD analizi	232
Şekil 4.81. SDUK20 karışımı 90 günlük XRD analizi	232
Şekil 4.82. UK5 karışımı 90 günlük XRD analizi	233
Şekil 4.83. UK10 karışımı 90 günlük XRD analizi	233

Şekil 4.84. UK15 karışımı 90 günlük XRD analizi	234
Şekil 4.85. UK20 karışımı 90 günlük XRD analizi	234
Şekil 4.86. Mineral katkıların CH miktarına etkisi (XRD 7, 28 ve 90 gün).....	240
Şekil 4.87. Silis dumanı-CSH ilişkisi (7, 28 ve 90 gün)	242
Şekil 4.88. Uçucu kül-CSH ilişkisi (7, 28 ve 90 gün).....	243
Şekil 4.89. Silis dumanı-CH ilişkisi (7, 28 ve 90 gün)	244
Şekil 4.90. Uçucu kül-CH (7, 28 ve 90 gün)	245
Şekil 4.91. Analiz programı ekran görüntüsü	247
Şekil 4.92. Geliştirilen model için yapay sinir ağı diyagramı.....	248
Şekil 4.93. Geliştirilen model katmanları (XRD)	253
Şekil 4.94. Geliştirilen model katmanları (SEM)	257

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Tipik doğal puzolanın kimyasal analizi	57
Çizelge 2.2. Tipik uçucu kül analizi	60
Çizelge 2.3. Çimentonun anabileşenleri	69
Çizelge 2.4. Çimento anabileşenlerinin reaktif özellikleri.....	70
Çizelge 2.5. Hidrate olmuş çimento hamuru boşluklarının sınıflandırılması	94
Çizelge 2.6. YSA’da kullanılan bazı toplama fonksiyonları	135
Çizelge 2.7. YSA’da kullanılan çok katmanlı algılayıcı fonksiyonları	136
Çizelge 3.1. Kontrol numunesi karışım oranları	141
Çizelge 3.2. Silis dumanı içeren beton karışım miktarları.....	141
Çizelge 3.3. Uçucu kül içeren beton karışım miktarları	142
Çizelge 3.4. Silis dumanı ve uçucu kül içeren beton karışım miktarları	142
Çizelge 3.5. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri	143
Çizelge 3.6. Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	145
Çizelge 3.7. Uçucu kül fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	146
Çizelge 3.8. Deneyde kullanılan karışımlar ve karışım kodları.....	152
Çizelge 4.1. Granülometri analizi	163
Çizelge 4.2. Agregada ince madde oranı	164
Çizelge 4.3. Agregada özgül ağırlık ve su emme oranı	164
Çizelge 4.4. Karışımların 7, 28 ve 90 günlük ortalama basınç dayanımları	166
Çizelge 4.5. XRD analizi ile elde edilen 7, 28 ve 90 CH yoğunlukları	241
Çizelge 4.6. XRD analizi ile elde edilen 7, 28 ve 90 C-S-H yoğunlukları	241
Çizelge 4.7. XRD analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (7 gün)	249
Çizelge 4.8. XRD analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (28 gün)	249
Çizelge 4.9. XRD analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (90 gün)	250
Çizelge 4.10. SEM analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (7 gün).....	250
Çizelge 4.11. SEM analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (28 gün).....	251
Çizelge 4.12. SEM analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (90 gün)....	251

1. GİRİŞ

Betonun, bugünden geriye doğru gidildiğinde Antik Mısır ve Roma İmparatorluğu gibi medeniyetleri de şekillendirdiği görülmektedir. Beton altyapı, sanayi ve konut alanlarını geliştirmede vazgeçilmezdir. Beton olmasaydı yaşadığımız modern çevreyi ve zorunlu yaşam alanlarını karşılamak için insanoğlu yetersiz kalabilirdi. Betona duyulan güven göz önüne alındığında, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de sürdürülebilir gelişmede önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Bu doğrultuda, doğada bulunan hazır hammaddeden üretilen betonun dayanım, dayanıklılık ve çok yönlülüğü ile sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesinde ve yaşadığımız çevre için çözümler sunmaktadır.

Beton yeryüzünde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Bunun sebebi betonun diğer yapı malzemelerinin sahip olmadığı birçok özelliğe sahip olmasıdır. Karışım oluşturulduktan bir süre istenilen şekil verilebilmesi, yangına karşı dayanıklı olması, korozyona uğramaması, dış etkenlere karşı daha dayanıklı olması, bakım masrafinin düşük olması, yerli malzemeden ve düşük enerji maliyeti ile ve her yerde üretilebilir olması gibi birçok neden betonu popüler yapı malzemesi yapmaktadır.

Beton çelik kadar güçlü olmamasına rağmen en yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemesi olmasının üç ana nedeni bulunmaktadır. Bunlardan ilki beton suya karşı mükemmel bir dayanıklılığa sahip olmasıdır. Ahşap ve sıradan çelikten farklı olarak betonun ciddi bozulmaya uğramadan suyun hareketine dayanıklı olmasından dolayı suyu kontrol etmek, depolamak ve taşımak için yapılan yapılarda ideal bir malzemedir. Betonun yaygın bir şekilde kullanılmasının ikinci nedeni ise yapısal beton elemanlarının çeşitli şekilde ve ebatlarda oluşturulmasına imkan vermesidir. Bunun nedeni, yeni yapılmış betonun plastik kıvamda olması, malzemenin prefabrik kalıplara akmasını sağlar. Beton katılaşp sertleştikten birkaç saat sonra kalıp yeniden kullanılmak üzere sökülebilir duruma gelmektedir. Mühendisler tarafından betonun popüler olmasının üçüncü sebebi ise iş sahasında ucuz ve kolay temin edilebilen bir malzeme olmasıdır.

Yani betonu üretmek için başlıca temel bileşen olan çimento, agrega ve su nispeten ucuz olup yaygın olarak dünyanın birçok yerinde kolay bulunmaktadır (Metha *et al.* 2006).

Dünyada yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi olan betonun yukarıda bahsedilen avantajlarının yanı sıra heterojen yapısı bazı istenmeyen sonuçlar doğurmaktadır. Betonun en göze çarpan dezavantajı çok sayıda iç gerilme yoğunluğunun neden olduğu kompleks yapıya dönüşmesidir. Bazı iç mikro çatlaklar çoğunlukla taze ve sertleşmiş betonda çimento hamuru ile agrega ara yüzeyinde de herhangi bir yük ve çevresel etki olmadan görülmektedir. Ara yüzey mikro çatlaklarının matriste yayılımı ve mikro çatlakların birleşmesi sonucu büyük çatlaklar meydana gelir ve bu da betonun hasar görmesine neden olur (Aydın 2007).

Binalar, reaktörler, barajlar, deniz-üstü yapılar gibi yapılarda betonun gitgide daha da artan kullanımı sebebiyle, değişik yükleme şartları altındaki malzeme davranışını doğru bir şekilde tahmin etmek için gelişmiş malzeme modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Beton teknolojisinde yaşanmakta olan yeni gelişmeler sayesinde, performansı daha yüksek olan yeni beton türleri ortaya çıkmıştır (Babu *et al.* 2005). Mesela, yüksek dayanımlı beton, reaktif pudra betonları, yüksek performanslı hafif betonlar ve kendiliğinden yerleşen betonlar, çelik lifli beton vs. işte bu gibi sebeplerden dolayı, betonun iç yapısının çok iyi bilinmesi ihtiyacını doğurmaktadır.

Beton aşırı derecede çok fazlı kompleks heterojen bir malzemedir ve yapıların temel malzemelerinden biridir. Bununla birlikte, betonun heterojen yapısı bazı istenmeyen etkilere neden olur. Betonun heterojenliği ve özellikleri çoğunlukla hidrasyon ile ilgilidir. Hidrasyon, su ile çimento içeriği arasındaki kimyasal reaksiyon, dayanım kazanma sürecinin en önemli özelliklerinden biridir. Çimento esaslı malzemelerin mekanik özellikleri, tasarımcılar tarafından rijitlik ve eğilme değerlendirmesi için ihtiyaç duyulmakta ve yapısal uygulamalarda davranışlarının doğru bir şekilde modellenmesi için gerekli olan temel bir özelliktir (Aydın 2007).

Betonun, bütün bu belirtilen olumlu ve olumsuz yönleriyle tam olarak beklenen performansı göstermesi için, üretiminde kullanılacak olan malzemelerin özenle seçilmesi, karışım oranlarının çok iyi saptanması, malzemelerin karılma işlemi, taze betonun taşınma, yerleştirilme, sıkıştırılma işlemleri ve uygun kürün uygulanması gerekmektedir. İstenilen özellikteki betonun doğru yerde ve doğru şekilde kullanılabilmesi için özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bütün bu süreç sonunda bu parametreler betonun içyapısını (mikroyapısını) oluşturmaktadır.

Malzeme özellikleri ile içyapı arasındaki ilişki modern malzeme biliminin temelini oluşturmaktadır. Beton oldukça heterojen bir malzemedir ve karmaşık bir içyapıya sahiptir. Bu nedenle, malzeme davranışını güvenilir biçimde tahmin edebilmek için gerçekçi bir model kurmak oldukça zordur. Bununla birlikte içyapı bilgisi ile betonun her bir bileşeninin özelliği ve birbiriyle ilişkileri betonun özelliklerini kontrol etmek için kullanılabilir. Beton içyapısını oluşturan üç ana bileşen; hidrate çimento hamuru, agrega ve çimento hamuru-agrega ara yüzeyidir (Baradan vd 2012).

Beton yeryüzünde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Çok fazlı kompozit bir malzeme olan beton, genel olarak çimento esaslı bağlayıcılar kullanılarak üretilir (Uzbaş 2004). Beton makroskobik ölçekte basit, ama mikroskobik ölçekte ilginç ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Betonun karmaşık yapısından dolayı, kimyasal ve mikroskobik yapısı hakkında bilim adamlarının hala bilmediği hususlar bulunmaktadır. Bu sebeple, daha iyi ve daha uzun ömürlü yapılar yapmak için betonun özelliklerinin iyileştirilmesi alanında günümüzde de önemli bir potansiyel bulunmaktadır.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

İnşaat sektöründe çimento esaslı malzemeler (harç, beton vb.) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin performans ve özelliklerinin (basınç ve gerilme mukavemetleri, porozite, geçirgenlik, hidrasyon, karışım içeriği, vb.) ölçülmesi, izlenmesi, kalite ve bütünlüğünün değerlendirilmesi için önemlidir. Dünyanın önde gelen ülkelerinde çimento esaslı malzemeler için günümüzde kullanılan standartlar

genellikle tahribatlı yöntemlerle ilgilidir. Tahribatlı yöntemler, tiplerine bakılmaksızın, bu materyallerin üretim ve teslimatı sırasındaki kalite kriterlerinin belirlenmesinde mükemmel bir yöntemdir. Bununla birlikte, iki önemli dezavantajları vardır. Birincisi, test sonuçlarına ulaşma fazladan zaman kaybı meydana getirmekte ve ikinci olarak test örneği tahrip olduğundan, benzer test sonuçlarını sonraki yaştaki yaşlarda tekrarlama sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, kalite değerlendirmesi, karışım içeriği değerlendirmesi ve bu materyallerin iç bütünlüğünün (boşluklar, çatlaklar, bozulma, vb.) izlenmesi için birçok tahribatsız değerlendirme tekniği önerilmiş ve uygulanmaktadır (Hasar vd 2010).

Betonun, çimento esaslı, hidratlı bir çimento hamuru matrisine gömülü agrega içeren bir kompozit olarak değerlendirilmesi uygundur (Kurt vd 2016). Beton kompoziti çimentonun hidratasyonu ile dayanım kazanmaktadır. Hidratasyon olayı su ile çimento bileşenleri arasında oluşan kimyasal reaksiyon olmakla birlikte zamana bağlı olarak gelişen çimentonun en önemli özelliklerden biridir (Muller *et al.* 2015). Beton, çok safhalı, son derece karmaşık bir heterojen malzeme olduğundan somut davranışların gerçekçi tahmini beton yapıların dayanıklılığı ve uzun süre kullanılabilirliği için çok önemlidir (Aydın vd 2008). İnşaat mühendisliğinde çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerini karakterize eden genel metotlar ya laboratuvar da aynı karışım oranlarında bir numune hazırlanarak ya da yapıdan tahribatlı bir numune alınıp daha sonra laboratuvar da test edilmektedir. Laboratuvar da hazırlanan numune sahada yerinde dökülen numune ile aynı şartlarda kür edilmediği için genellikle laboratuvar da dökülen numune gerçeği yansıtmada yetersiz kalabilir. Ayrıca tahribatlı numune alınması yapıya zarar vermektedir (Hasar vd 2010).

Bu çalışmada da tahribatsız olarak atfedilebilecek bir yöntem olarak SEM ve XRD incelemelerinden elde edilen bilgiler doğrultusunda bazı beton özelliklerinin tahminine yönelik bir çalışma hedeflenmiştir. Elde edilen SEM görüntüsünden mikro yapı fotoğraf işleme tekniğiyle analiz edilerek bir model geliştirme yoluna gidilmiştir.

Beton, sertleşmiş çimento hamuru içerisine çeşitli büyüklükteki agreganın gömülmesiyle oluşan kompozit bir malzemedir (Yip 1998).

Mikroyapı-beton özellikleri arasındaki ilişki geçmişte olduğu gibi bugün de modern malzeme biliminin önde gelen araştırma alanından birisidir. Betonun davranışının doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilebilmesi için gerçekçi modellerin geliştirilmesi ancak betonun mikro yapısının (içyapısının) bilinmesi ile mümkün olacaktır. Bununla birlikte, betonu oluşturan bileşenlerin mikroyapı ve özellikleri ile bunların birbirleriyle olan ilişkilerinin bilinmesi beton özelliklerini kontrol etmek için faydalı olmaktadır.

Betonun heterojenliği ve özellikleri çoğunlukla hidrasyon ile ilgilidir. Su ile çimento bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyon olan hidrasyon, dayanım kazanma sürecinin en önemli özelliklerinden biridir. Hidrasyonun bu özelliği, hidrate çimentonun hacim değişikliğine, hidrasyon oranının, betonun dayanım kazanmasına ve zamana bağlı olarak değişmesine neden olmaktadır. Betonun dayanım kazanmasında başlıca etkilerinden biri, betonun geliştirilebilir mekanik özelliklerinin olmasıdır. Bu nedenle, betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesi tasarım açısından çok önem kazanmıştır. Bununla birlikte, ekonomik kaygılar nedeniyle, doğal kaynak kullanımına yönelik güçlü bir talep bulunmaktadır. Doğal kaynakların beton içerisine yerleştirilmesi çevresel, ekonomik ve/veya teknolojik avantajlar meydana getirmektedir (Kurt vd 2015). Bu doğrultuda değerlendirilğinde beton içine endüstriyel atıkların ve doğal puzolanların kullanılması da büyük ekonomik avantaj sağlamaktadır.

Yapıların tasarımında, betonun tasarlanan dayanımdan daha az dayanıma sahip olmaması istenmektedir. Ancak, betonun servis süresince karşılaştığı fiziksel ve kimyasal olaylar karşısında yeterli dayanıklılığı göstermesi gerekmektedir. Betonun yeterince dayanıklı olması, en az betonun dayanımı kadar hatta çoğu zaman dayanımdan daha da önemlidir. Dayanıklılığı yüksek betonların üretiminde genellikle doğal ve yapay puzolanlar kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan puzolanlar silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. bazı organik küllerdir (Binici vd 2013).

Uçucu kül puzolanik özelliği olan mineral kökenli termik santral atığı malzemedir. Uçucu kül taneleri genellikle küresel yapısı nedeni ile işlenebilme özelliğini iyileştirmesi, taze betonda terlemeyi azaltması, betonun hidrasyon ısını düşürmesi gibi betonun birçok olumlu özelliğini geliştirmektedir (Binici vd 2013).

Silis dumanı çok yüksek oranda silis içeren, genellikle camsı ve düzgün yüzeyli küresel taneciklerden oluşan endüstriyel atıktır. Silis dumanı taneleri boşlukları doldurmakta, Ca(OH)_2 kristallerini küçültmekte ve çimento ve betonun basınç dayanımının artmasını sağlamaktadır (Binici vd 2013).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, puzolanlar ikili ve üçlü karışım şeklinde kullanılarak üretilen betonların mekanik ve kimyasal özelliklerine etkileri incelenmiştir. Birden fazla mineral katkıyı birlikte kullanarak etkileri olumlu yönde üst düzeye çıkarmanın mümkün olduğu görülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanının harçların dayanıklılığını da önemli miktarda arttırdığı yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Silis dumanı, uçucu kül ve çimento karışımının beton basınç dayanımının gelişimi üzerindeki etki mekanizmalarının farklı olduğu bilinmektedir. İki mineral katkı maddesinin birbirlerinin eksikliklerini tamamlamaları yanında 7, 28 ve 90 günlük dayanımları üzerinde etkili olduğu Binici vd (2013) tarafından yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir.

Bu kapsamda, silis dumanı ve uçucu kül içeren beton kompozitinin mikro yapısını görsel olarak inceleyen çalışmalar çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Literatür taramasında, yapılan çalışmalarda betonun görsel analizi için genellikle tek parametre ve tek değişken göz önüne alınarak tek bir görüntüleme cihazı kullanıldığı görülmüştür. Bu durumda yapılan analiz tek bir parametreye bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak için, bu doktora çalışmasında birçok parametre ve farklı görüntüleme cihazı aynı anda kullanılmıştır. Böylece bir betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine ilişkin maksimum düzeyde bilgiyi mevcut yapıya en az tahribatı vererek elde etmek hedeflenmiştir. Bu yöntem tıp bilimindeki röntgen ve MR gibi cihazların kullanımının hastalığa teşhis koymaya sağladığı katkıya benzer şekilde,

beton teknolojisine bilimsel verilere dayanan bir yöntem ile katkı sağlamak amaçlanmıştır. Özellikle renk yoğunluklarından, kristal yapı vb. bilgiler görsel işleme teknikleri ile şantiyeci ve konut dostu bir model kurulması düşünülmüştür.

Bu çalışmada silis dumanı ve uçucu kül katkılı betonların bazı mekanik ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) ile tekli ve aralarında ikili kombinasyon oluşturarak, üretilen değişik beton numunelerin dayanım ve dayanıklılıkları üzerine etkileri incelenmiştir. Buna ilave olarak, bu betonlardan alınan örneklerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve x-ışını difraktometresi (XRD) ile içyapının değişik parametre ve 7, 28, 90 günlük yaşlara bağlı olarak mineralojik yapısının gelişimi araştırılmıştır.

Beton numuneler üzerinde yapılmış olan SEM ve XRD incelemeleri ile özellikle beton bünyesindeki çimentonun hidrasyon gelişim süreci gözlemlenmiştir. Betonun dayanım kazanmasında etkili olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli ve kalsiyum hidroksitin (portlandit (CH)) ve etrenjitin gelişimi görülmüştür. Silis dumanı, uçucu kül ve silis dumanı-uçucu külün birlikte değişik oranlarda çimento yerine kullanılmasıyla elde edilen numunelerin hidrasyon gelişimi referans numunesindeki (mineral katkı içermeyen) ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda hangi mineral katkı ve katkıların hangi oranlarda kullanılmasının betonun hidrasyon süreci ve hidrasyon ürünlerinin gelişimine nasıl değiştirdiği tespit edilmiştir. Mineral katkıların tekli ve ikili karışımlar halinde kullanılması mineral katkıların tek başlarına kullanılması ile ortaya çıkan eksiklikleri hangi oranda giderebildiğine bakılmıştır. Bununla birlikte ilk yaşlardaki dayanımları referans numunesi ile karşılaştırılmış, beton içyapısının ne derecede homojen olduğu, boşlukların azalıp azalmadığı ve oluşan C-S-H, CH ve etrenjit miktarındaki artış/azalış gözlemlenmiştir. Böylece SEM ve XRD çalışmaları basit görseller olmak yerine fotoğraf işleme teknikleri ile matematiksel bir ifadeye, fiziksel bir davranışa ve istatistiksel bir açıklamaya kavuşacaktır.

Ayrıca mineral katkı kullanımı ile betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelecek değişiklikler araştırılmıştır. Çeşitli karışımlarla elde edilecek beton numunelerin

taze halde iken işlenebilme için önemli bir ölçüt olan slump (çökme) değerleri, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Aynı numuneler üzerinde, SEM ve XRD cihazları kullanılarak görüntüler alınmış ve içyapı görüntüleme yoluyla incelenmiştir.

1.2. Kaynak Özetleri

Binici vd tarafından yapılan deneysel çalışmada silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) betonların durabilite özellikleri araştırılmıştır. Çimento yerine SD, YFC ve UK, ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında tekli, %10 oranında ikili ve üçlü karışım olarak kullanılmıştır. Ayrıca agrega yerine ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında YFC kullanılmıştır. Numunelerin 7, 28, 180 günlük basınç dayanımı, 28 günlük numunelerin permeabilite ve aşınma ile 60 günlük sülfat dayanımları ve SEM taramaları incelenmiştir. Yüksek fırın cürufu katkısı dayanıklılığa ve dayanıma olumlu katkı sağladığı görülmüştür. Çimento ikamesi olarak %10 oranında silis dumanı ve agrega olarak %10 oranında YFC katkılı numunelerin 28 ve 180 günlük basınç dayanımı, referans numunesine göre sırası ile %17 ve %20 oranlarında daha yüksek bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu katkısı dayanıklılığa ve dayanıma olumlu katkı sağlamıştır. Mineral katkıların ikili ve üçlü karışımlar halinde kullanılması; mineral katkıların tek başlarına kullanılması ile ortaya çıkan eksiklikleri giderilmiştir. Yani mineral katkıları birbirlerini tamamlayarak ilk yaşlardaki dayanımlarının referans numunesine yakın ve daha homojen olmasını sağlarken boşluk ve etrenjit miktarını da azalttığı tespit edilmiştir (Binici vd 2013).

Saad *et al.* tarafından yapılan çalışmada deneysel faz bileşimi ve ısı işlemden sonra silis dumanı içeren betonun mikro yapısında meydana gelen değişikliği araştırılmıştır. Araştırma, x-ışını kırınımı analizi (XRD), diferansiyel termik analiz ve tarama elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Bu araştırmanın sonucunda hidrate çimento tanelerinin, yeniden kristalleşme deformasyonu ve C-S-H fazlarının dönüşümünün ek hidratasyon meydana getirmiş olduğunu göstermiştir (Saad *et al.* 1996).

Wang *et al.* yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %25 uçucu kül ve %75 çimento içeren betonun mikroskopik yapısını incelemiştir. Tüm uçucu küllü betonların karışım yapıldıktan sonra bir günden bir yıla kadar aynı istatistiksel dayanıma sahip olduğu görülmüştür. SEM, EDX ve SEM analizleri, biyokütle uçucu kül ve kömür uçucu külün yakıt kaynakları farklı olmasına rağmen biyokütle ve kömür külü parçacıklarının pozolanik reaksiyon sonucunda betonun morfolojisi ve kimyasal bileşiminde önemli değişikliklere sebep olduğu görülmüştür (Wang *et al.* 2007).

Narmluk *et al.* yaptıkları çalışmada, değişik su/çimento oranlarında uçucu kül miktarının ve kür sıcaklığının çimentonun hidratasyon kinetiği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çimentonun hidratasyon kinetiği, içerdiği uçucu kül miktarına ve kür sıcaklığına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Bu değişimin 20-35°C arasında uçucu külün çimentonun hidratasyonunu ilk dönemlerde geciktirdiği, daha sonraki dönemlerde ise hızlandırdığı görülmüştür. Buna ilave olarak, sıcaklık 50°C olduğunda, yüksek oranda uçucu kül kullanımı çimentonun geç dönemlerdeki hidratasyonunu geciktirmiştir. Bunun sebebi, büyük hacimlerde uçucu kül kullanımı güçlü pozolanik reaksiyonu hızlandırıp ve çimentonun hidratasyonunu engellemesidir (Narmluk *et al.* 2011).

Wong *et al.* yaptıkları çalışmada, çimento harcı ve agrega arasındaki ara yüzey bölgesine uçucu külün etkisini araştırmıştır. Çalışmada %15 uçucu kül kullanımının ara yüzey bağ kuvvetini ve eğilme tokluğunu arttırdığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten %45-55 oranında uçucu kül kullanıldığında 28 güne kadar ara yüzey mukavemetinin ve eğilme tokluğunun azaldığı, 90 günden sonra ise hemen hemen tüm azalmanın iyileştiği tespit edilmiştir. Çalışmada her oranda uçucu kül kullanımının ara yüzey kırılma enerjisini arttırdığı görülmüştür. Uçucu kül genel olarak pozolanik özelliği ile ara yüzeye olumlu katkıda bulunmuştur. Yüksek oranlarda kül kullanımı ile ara yüzey bölgesindeki bağ gelişim kuvveti basınç dayanımının gelişiminin ardından düşmektedir. Fakat daha sonraki yaşlarda bu etki azalmaktadır. Yüksek oranda uçucu kül kullanımı ile büyük hacimli betonlarda ileriki yaşlarda dayanımı arttırdığı görülmüştür (Wong *et al.* 1999).

Aydın vd yaptıkları çalışmada kendiliğinden yerleşen betonun arayüzey bölgesinin yapısının SEM incelemesini yapmıştır. SEM'de incelenen arayüzey morfolojisi, mikrosilikanın farklı spesifik yüzey alanına ve ağırlık payına göre değiştiğini göstermiştir. Agreg-a-harç arayüzeyinin SEM modeli üzerine yapılan çalışmada, mikro sertlik testinin düzenli sonuçlarına benzer olduğunu göstermiştir. Mikrosilikanın aynı ağırlık oranında arayüzeyde reaksiyon ürünleri daha yüksek yüzey alanı malzemesi için daha sıkı bir yapı oluşturduğu görülmüştür (Aydın vd 2015).

Sun *et al.* yaptıkları çalışmada, polipropilen liflerin betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada agrega-çimento ara yüzey geçiş bölgesini ve kristal yapıyı gözlemlemek için taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanmışlardır. Yapılan mekanik ve fiziksel testler betonun mühendislik özelliklerini iyileştirmede polipropilen liflerin etkileri görülmüştür. Çalışmada polipropilen liflerin kullanımının mikro boşlukları azalttığı, Ca(OH)_2 kristalleşmesini engellediği görülmüştür. Özellikle, oluşan polipropilen lif köprüleri Ca(OH)_2 büyümesini engelleyen ağ oluşturarak gerilmenin yeniden dağıldığı görülmüştür. Polipropilen lifler çimento-agrega ara yüzeyindeki mikro çatlakların boyunu ve sayısını azaltmıştır. Polipropilen lifler betonun eğilme dayanımı, basınç dayanımı, aşınma dayanımı, dinamik performansını, yorulma dayanımı ve geçirgenliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Yapılan çalışmada sonuçlar, $0,9 \text{ kg/m}^3$ polipropilen lif içeriğinin kullanılan malzemeler için en uygun oran olduğu görülmüştür (Sun *et al.* 2009).

Zheng *et al.* yaptıkları deneysel çalışmada, reaktif pudra betonunun $20-900^\circ\text{C}$ sıcaklığa maruz kaldıktan sonra çelik lif ve polipropilen lif katılarak basınç özellikleri ve mikro yapısını incelemişlerdir. Çelik ve polipropilen lifleri (%2- %0,1), (%2- %0,2), (%1- %0,2) oranlarında karıştırılmıştır. Sıcaklığın, fiber içeriğinin ve boyutların basınç özelliklerine etkisi analiz edilmiştir. Farklı yüksek sıcaklığa maruz reaktif pudra betonun mikro yapısı SEM ile incelenmiştir. Çelik lifin eklenmesi yüksek sıcaklıklarda reaktif pudra betonun basınç özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Polipropilen liflerin eklenmesi düşük sıcaklarda dahi olumsuz etki yapmış, ancak yüksek sıcaklıklarda reaktif pudra betonunda daha aktif bir etki yapmıştır. Çelik lif ve

polipropilen lif eklenmesiyle ısıtılma esnasında betonda herhangi bir pullanma görülmemiştir. Basınç dayanımı ve kübik dayanım ilk olarak artmakta, daha sonra sırasıyla kritik sıcaklık 400–300°C'ye kadar dayanım azalmaktadır. Karma lifli reaktif pudra betonu normal ve yüksek dayanımlı beton ile karşılaştırıldığında yüksek sıcaklığa karşı mükemmel bir kapasiteye sahip olduğu tespit edilmiştir (Zheng *et al.* 2012).

Niu *et al.* çalışmasında, %3,5 NaCl içeren su çözeltisi altında döşeme betonlarında ve çelik lifli betonlarda donma çözülme etkisini araştırmıştır. Yüzey hasarı, ağırlık kaybı ve çelik lifli betonun yarmada çekmedeki davranışı deney yolu ile farklı sayıdaki donma-çözülme altında belirlenmiştir. Çelik lifli betonun mikro yapısı ve gözenek yapısı, cıvalı deney ve SEM ile analiz edilmiştir. Deney sonuçları çelik lifin betonun boşluk yapısını iyileştirdiği, donma çözülme döngüsünde betonun yüzey hasarını azalttığı görülmüştür. Ancak, çelik liflerin NaCl çözeltisinde, beton yüzeyindeki bozulmayı ölçmek için sınırlı kaldığı görülmüştür. Çelik lifli betonun yarmada çekme deneyine tabi tutulduğunda NaCl çözeltisinde ağırlık kaybı normal su içerisindeki kayıptan fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çelik lif içeriğinin betonun donma-çözülme arasında ilişki olduğu görülmüştür. Çelik lif içeriğinin hacimce %1,5 olduğunda donma çözülme davranışında kayda değer bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir (Niu *et al.* 2013).

Shi *et al.* geri dönüşümlü beton elde etmek için, %0, %50 ve %100 oranlarında farklı geri dönüşümlü agrega ve aktive edilmiş alkali uçucu kül kullanarak altı farklı karışım tasarlamıştır. Birbirinden farklı performans gösteren fiziksel ve mekanik özellikler araştırılmıştır. İletilen ışık altından optik mikroskopu ve taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDX) ile birleştirilerek, geri dönüşümlü agrega ve aktive edilmiş alkali uçucu kül geopolimerlerinin betonun özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. Agrega özellikleri, hamur ve ara yüzey geçiş bölgesi özellikleri karşılaştırılmış ve irdelenmiştir. Yapılan deneyler aktive edilmiş alkali uçucu küllü geopolimer normal portland çimentosu ile yer değiştirildiğinde basınç dayanımı etkili bir şekilde düzelmiştir. Hem geri dönüşümlü agrega miktarının artması, hem de geri dönüşümlü agragalı beton, hem de aktive edilmiş alkali uçucu küllü

betonun dayanımını giderek azaltmıştır. Mikroyapı analizi, bir yandan geri dönüşümlü agreganın varlığı ara yüzey geçiş bölgesinin yapısı ve agrega dayanımını azaltırken, diğer yandan geopolimer betonun içindeki aktive edilmiş uçucu külün portlandit varlığını ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve boşluğu azaltmasının yanı sıra matrisin homojenliğini arttırdığını göstermiştir. Alüminyum silikat jeli gibi değişik reaksiyon ürünleri geopolimer geri dönüşümlü betonun mikro yapısını değiştirdiği tespit edilmiştir (Shi *et al.* 2012).

Almeida *et al.* yaptıkları çalışmada, farklı miktarlarda silis dumanı ve polimer içeren harçların bağ kuvveti dayanım sonuçlarını, yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği açısından araştırmışlardır. Silis dumanı ve polimer karışımından elde edilen harç yüksek performans gerektiren komponent ve tamir için ideal ve mükemmel özelliğe sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada porselen ve harç arasındaki ara yüzey, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş, parlatılmış yüzey ve boşluk çapı ise cıvalı porozimetre (MIP) ile analiz edilmiştir (Almeida *et al.* 2006).

Demir vd. tarafından yapılan çalışmada, otoklavlanmış gözenekli betondaki (ACC) kuvars kumu kullanılması ve sepiolit ilavesinin çimento kompozitinin özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Numuneler üzerinde SEM görüntü analizi yapılmış, sepiyolit süstitüe sahip AAC'lerin mikroyapısal özellikleri değerlendirilmiştir. %10 sepiyolit içeriğine sahip AAC örneklerinin SEM gözlem sonuçlarında bağlayıcı matris esas olarak C-S-H ve portlanditten oluştuğu görülmüştür. %20 sepiyolit ilavesine sahip AAC, bağlayıcı matris ayrıca C-S-H ve portlandit kristalleri bakımından daha zengin olduğu görülmüştür (Demir vd 2015).

Sun *et al.* poliakrilamid'inin (PAM) betonun fiziko kimyasal ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediği üzerine çalışma yapmıştır. Beton ve poliakrilamid arasındaki fiziksel - kimyasal reaksiyon ve poliakrilamid (PAM) ile modifiye edilmiş betonun mikro yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM), termal analiz (DTA), termal gravimetrik analiz (TGA) ve kızılötesi spektrum analizi ile incelenmiştir. Çalışma esnasında betonun işlenebilirliği, beton ve çimento hamurunun dayanımı incelenmiştir. Ayrıca poliakrilamidin değişim mekanizması da araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar,

poliakrilamidin (PAM), betonun hidratasyonu ile oluşan Ca^{2+} ve Al^{3+} kanyonları ile iyonik bileşiklerin oluşturulmasında rol oynadığı ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in kristalleşmesini azaltarak beton boşluklarına takviye ve esnek dolgu malzemesi olarak görev yaparak betonun mühendislik özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir. Poliakrilamid (PAM) agrega ve çimento arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin özelliklerini ve mekanik test sonuçları, çimento hamurunun akıcılığı ilk olarak arttığı, daha sonra artan poliakrilamidin (PAM) içeriği ile akıcılığının azaldığını göstermiştir. Bu da betonun eğilme, aderans, dinamik darbe dayanımı, yorulma dayanımını artırmakla birlikte basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür (Sun *et al.* 2008).

Gül vd yaptıkları çalışmada, beton numunelerinin klorür içeriğini Volhard, iyonmetre, tarayıcı elektron mikroskopu (SEM) ve renk analizi (CA) yöntemlerine göre araştırmıştır. Volhard'ın metodu ile betonun klorür içeriği, numune saldırısının sonuçtaki çözeltisinde seyreltilmiş sıcak nitrik asit ile belirlenmiştir. SEM analizi ile beton numunesinin kristalografik yapısı, kimyasal bileşimi elde edilmiş ve malzemenin fiziksel özellikleri ise x-ışını difraksiyonu (XRD) teknikleri ile birlikte kullanılarak, beton numunesinin elemanları ve bileşenleri analiz edilmiştir. Ayrıca CA ile renk değiştiren piksellerin yüzdesi ve derinlik grafikleri, tahmin edilen ampirik formülasyonu kullanarak klorür penetrasyonunu gözlemlemek için kullanılabilir olduğu görülmüştür (Gül vd 2010).

Reese *et al.* tarafından yapılan bir çalışmada, eski ve yeni beton arasındaki aderans kuvveti üzerinde polikondansate ve polikarboksilat süper akışkanlaştırıcılarının etkisi, çimento agrega ara yüzey bölgesini oluşturan minerallerin SEM görüntüleri araştırılmıştır. Daha çok gözenek çözeltisine batırıldığında etkili yapışma olduğu ve geçiş bölgesi içinde çimento hidrate kristalleri olduğu görülmüştür. Polikondensatlar için, polikarboksilat sadece bileşiminde yüksek C_3A bulunan çimento ile çalışıldığında, aderans mukavemeti çimento içeriğinden bağımsız olduğu görülmüştür. Polikarboksilat süper akışkanlaştırıcısını tutan boşluk çözeltisi, kılcal emmeyi azaltmak için uygun olduğu görülmüştür (Reese *et al.* 2013).

Mohammed *et al.* yaptıkları çalışmada, fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli değişikliklere sahip olan iki çeşit dolgu maddesine sahip kendiliğinden yerleşen betonun sürdürülebilir hidratasyon karakteristiğini ve mikro yapısını araştırmışlardır. Çalışmada, farklı dolgu malzemelerinin yüksek miktarda çimento değişiminde karışımın erken yaşlardaki hidratasyon karakteristiğini ve mikro yapıyı nasıl etkilediğini göstermek hedeflenmiştir. Yüksek oranlarda yer değiştirme de bu iki dolgu malzemesinin etkisini göstermek için x-ışını kırınımı (XRD), EDX ile bağlantılı taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizi, termogravimetrik analiz ve boşluklara civa doldurma gibi çeşitli teknikler kullanılmıştır. Basınç dayanımları 50-60 MPa olan aynı su-çimento oranına sahip iki farklı tür kendiliğinden yerleşen beton üretilmiştir. Toplam bağlayıcının (450 kg/m^3) yaklaşık %33'ü kireç tozu ve uçucu kül ile değiştirilmiştir. Aynı su-bağlayıcı oranı ve yaklaşık olarak 28 günlük basınç dayanımlar aynı olmasına rağmen kireç tozu katılan kendiliğinden yerleşen beton uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betondan farklı mikro yapıya ve hidratasyon ürününe sahip olduğu görülmüştür. Sonuçlar uçucu külün kendiliğinden yerleşen beton için daha uygun olduğunu göstermiştir (Mohammed *et al.* 2013).

Rong *et al.* tarafından yapılan çalışmada, silis dumanı ve uçucu külün hidratasyon süreci ve mikro yapıya etkileri farklı karakterizasyon ile araştırılmıştır. Sonuçlar silis dumanı uçucu kül eklenerek hidratasyon işlemi başlangıçta hızlandırılabilir, buna karşın ilerleyen yaşlarda hidratasyonu yavaşlattığı görülmüştür. Silis dumanı ve uçucu kül çimento ile birlikte birleştirildiğinde su-bağlayıcı oranı 0,35'den büyük olduğunda çimento hidratasyonu önemli ölçüde değişmiştir. Sonuçta pozolanik reaksiyon sonunda Ca(OH)_2 'in tüketimi boşluk oranını %4 oranında düşürdüğü ve kür süresi arttıkça ara yüzey dayanımı artmıştır. Ayrıca ultra yüksek dayanımlı çimentolu kompozitlerin çoğu hidratasyon ürünleri hidrate olmamış çimento ve C-S-H olduğunu ortaya çıkarmıştır. Hidrate çimento partiküllerinin C-S-H tarafından çevrildiği ve ultra yüksek dayanımlı çimentolu kompozitlerin mükemmel mekanik performans ve dayanıklılığa sahip olduğu görülmüştür (Rong *et al.* 2014).

Çalışkan, içyapı incelemesi ve kimyasal analiz için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını analizi ile üç farklı silindir agrega tipi (kumtaşı, kireçtaşı ve granit) ve iki farklı harç matrisi (düz harç ve %20 silis dumanı içeren harç) arasındaki ara yüzey bölgesinde incelemeler yapmıştır. Arayüzey mukavemetinin arayüzey kalınlığına ve arayüzey bölgesinde bulunan silis dumanı miktarına bağlı olduğu ve arayüzey bölgesinde yoğun silis dumanının bulunması, göreceli arayüzey kalınlığının düşük ve daha yüksek bir arayüzey bağ kuvveti silis dumanının yoğunlaştırma rolünün bir sonucu olduğu görülmüştür. Arayüzey bağ mukavemeti, agrega cinsi ve harç matrisi ne olursa olsun agrega boyutu küçüldükçe arttığı görülmüştür (Çalışkan 2003).

Termkhajornkit *et al.* uçucu kül içeren çimento hamurunun basınç dayanımı üzerine su kürünün etkisini hidrasyon derecesinin nicel verileri aracılığıyla açıklayan bir çalışma yapmıştır. Uçucu küllü çimento hamurunun hidrasyonu Rietveld ve seçici çözünme (selective dissolution) aracılığıyla tespit edilmiştir. Çalışmada, belitin hidrasyon derecesinin uçucu külden ve alitin ise su kürü şartlarından etkilendiği görülmüştür. Uçucu külde dışarıdan herhangi bir su kaynağı olmadan hidrasyona devam etmiştir. Uçucu küllü çimentolu betonun kür koşullarına bağlılığı, uçucu külün hidrasyon derecesinden dolayı değil özellikle belit çimentosunun hidrasyon derecesinden kaynaklandığı görülmüştür. Su-bağlayıcı oranı yeterince düşük olduğunda uçucu külün az hidrasyonu ve çimentonun hidrasyonu başlangıçta gerekli basınç dayanımı için yeterli olduğu görülmüştür (Termkhajornkit *et al.* 2005).

Al-Salami *et al.* yaptıkları çalışmada, sol-jel (sol-gel) metodu ile hazırlanan nano silikanın puzolanik aktivitesini ve sertleşmiş çimentonun mekanik, fiziksel, yapısal özelliklerini geliştirmek için uygulama çalışmalarını yapmıştır. Nano silika, %10, %20, %30, %50 oranında su kullanılarak kalsiyum hidroksit oranı 0,35 olacak şekilde kalsiyum hidroksit ile karıştırılmış ve yedi gün boyunca %100 bağıl nemde tutulmuştur. Yedi günlük kür sonrasında reaksiyon mekanizması (differential scanning calorimeter) (DSC), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve x-ışını kırınım (XRD) cihazları ile incelenmiştir. Çalışmada nano silikanın, kalsiyum hidroksiti tükettiği ve kalsiyum

silikat hidrat ürettiği görülmüştür. Nano silika oranının artmasına bağlı olarak CH tüketim oranının arttığı görülmüştür. Aynı nano silika büyük reaktivite ile karakterize edilmiş ve beton ve çimentonun özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabilecek iyi bir puzzolanik malzeme olduğu tespit edilmiştir. Çimentonun yerine %0,5, %01, %1,5, %2, %2,5 oranlarında nano silika kullanılarak değişik çimento karışımları oluşturulmuştur. Hazırlanan nanosilikalı çimento karışımların, 28 günlük kür sonrasında basınç dayanımı, kılcal su emmesi ve mikro yapısı çalışılmıştır. Basınç dayanımındaki yaklaşık %21 bir gelişme %2 oranında nano silika kullanımı ile elde edilmiştir. Kılcal su emme nano silika miktarının artması ile azalmıştır. %2 nano silika kullanımında azalma %18,29 olmuştur. Nano silika karışumlu çimentonun mikro yapısı daha az mikro boşluklu, daha kompakt ve oldukça yoğun olduğu görülmüştür (Al-Salami *et al.* 2013).

Nemati tarafından mevcut uygulanmış yükler altında betonda bulunan mikro çatlakların gelişmesini engelleyen özel bir deneysel metot geliştirilmiştir. Bu metot erimiş metal alaşımın çatlak içerisine enjekte edilmesini boşaltmadan önce katılaşmasını içermektedir. Çalışmada beton numunelerin en kesitlerini görüntülemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu görüntüler daha sonra, basınç gerilmesi kaynaklı mikro çatlakların ve mikro çatlak davranışının ve mikro çatlağın gelişimi üzerine etkisini araştırmak için kullanılabileceği görülmüştür (Nemati 1997).

Beton üretiminde endüstriyel katı atıkların kullanılması kapsamında, Naik *et al.* yaptıkları çalışmada petrol ürününe batırılmış beton için uçucu kül ve silis dumanı kullanımını araştırmıştır. Yapılan çalışmada silis dumanı ve uçucu kül kullanımının petrol ürününe batırılmış betonun su emme, mukavemet özellikleri, kılcal geçirimsizlik, kimyasal bileşimi XRD ile ve morfolojik yapısı ise SEM ile incelenmiştir. Beton ile petrol arasında kapsamlı bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu durum beton tanklarda petrol ürünlerinin depolandığı durumlarda açıkça görülmektedir. Naik *et al.* yaptıkları çalışmada, silis dumanı ve uçucu kül gibi puzzolanların beton karışımında kullanılması bütün bu olumsuz etkilerin önüne geçilmeyi hedeflemiştir. Yapılan çalışma sonucunda petrol ile temas eden betonun yapısal morfolojik yapısının doğru olarak görülebilmesi

için mutlaka SEM ve XRD gibi gelişmiş cihazların kullanılması gerektiği görülmüştür (Naik *et al.* 2013).

Haq *et al.* yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve taban külü (bottom ash) kullanarak geopolimer harç ve beton geliştirmek ve bunlardan kaynaklanan özellikleri karşılaştırarak sonuçları ortaya koymuştur. Harçlar, aktivasyon çözeltisi olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kül ile karıştırılarak üretilmiştir. Kür ve kurumadan sonra geopolimer numunelerin hacim yoğunluğu, görünür yoğunluk ve porozitesi değerlendirilmiştir. Geopolimer numunelerin mikro yapısı, faz bileşimi ve termal davranışı SEM, XRD, TGA-DTA ile analiz edilmiştir. FTIR analizi taban küllü geopolimerin davranışını büyük ölçüde ortaya koymaktadır. Mekanik analiz, uçucu küllü geopolimer 61,4 MPa basınç dayanımı ve 2,9 GPa elastisite modülüne sahipken, taban külünden yapılmış geopolimer 55,2 MPa basınç dayanımı ve 2,8 GPa elastisite modülüne sahip olduğunu göstermiştir. Mekanik analiz taban külünün neredeyse uçucu kül kadar geopolimer yapımında kullanılabileceğini göstermiştir (Haq *et al.* 2014).

Tokyay yaptığı çalışmada, betonda kullanılan üç önemli mineral katkı olan uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının üretimi, özellikleri ve betondaki işlevlerini araştırmış ve bu mineral katkıları içeren betonların taze ve sertleşmiş haldeki davranışları ve dayanıklılık özellikleri açıklamıştır. Geçirgenlik açısından, her iki mineral katkı da gerek fiziksel gerekse kimyasal bakımlardan betonun geçirgenliğini azaltıcı özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bir yandan küçük mineral katkı taneciklerinin kılcal boşlukları tıkayıcı etkisi diğer yandan da puzolanik tepkime sonucunda Ca(OH)_2 'yi kullanarak daha fazla C-S-H oluşturmaları nedeniyle gözeneklerin dolması betonun kılcal gözenekliliğinin azalmasına yol açtığı görülmüştür (Tokyay 2013).

Abdullah vd geopolimer sistem kullanarak köpük (foam) betonu üretebilmenin olasılığı üzerine bir araştırma çalışması yapmıştır. Çalışmada C sınıfı uçucu kül, aktivasyon çözeltisi (sodyum silikat ve NaOH karışımı) ve köpük ile karıştırılmış ve hafif köpük beton üretmek için hazırlanan geopolimer karışımına eklenmiştir. NaOH solüsyonu,

damıtılmış su ile seyreltilmiş NaOH ile karıştırılmıştır. Kür işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin 1, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları test edilmiştir. Su emme, boşluk oranı, kimyasal bileşim, mikroyapı, XRD ve FTIR analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, sırasıyla 1, 7 ve 28 günlük (11,03 MPa, 17,59 MPa ve 18,19 MPa) 60°C kür edilmiş numuneler tüm testler için maksimum basınç dayanımı elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca 60°C kür edilmiş numunelerin, 28 gün sonraki su emme ve boşluk oranı sırasıyla %6,78 ve %1,22 oranında azalmıştır. SEM analizi, 60°C kür edilmiş numunelerin oda sıcaklığında kür edilmiş numunelerden daha yoğun bir matrise sahip olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, 60°C kür geopolimerizasyon oranını artırması ve daha yoğun bir matris oluşturmastır. Ancak oda sıcaklığında kür için, yüzeydeki mikro çatlaklar basınç dayanımını düşürmüş, su emme ve boşluk oranını artırdığı görülmüştür (Abdullah vd 2012).

Li *et al.* su-uçucu kül oranı 0,30'dan 0,35'e kadar olan C sınıfı uçucu kül ile üretilmiş olan geopolimer hamur ve harcın işlenebilirliği, basınç dayanımı ve mikro yapısını incelemiştir. Akışkanlık, hamurda 131-136 mm harçta ise 145-173 mm aralığında olmuştur. EN yüksek basınç, 70°C'de 24 saat süre ile kür edilmiş hamurda 58 MPa, harçta 95 MPa olmuştur. XRD analizinde reaksiyona girmemiş kuvars ve bazı reaksiyona ürünleri gözlenmiştir. SEM analizleri, reaksiyona girmiş ürün olduğunu ve hamur ve harç içerisinde reaksiyona girmemiş ürün olduğu yüksek dayanım ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir (Li *et al.* 2013).

Liu *et al.* uçucu kül içeren betonların yüzey tabakalarının gözenek yapısı ve geçirgenlik özellikleri üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Farklı dozajlarda uçucu külün (sırasıyla toplam çimento ağırlığının %15 ve %30) çimento ile yer değiştirilmesi ile üretilmiş beton incelenmiştir. Çalışmada uçucu kül içermeyen betonlar referans numunesi olarak alınmıştır. Laboratuvar testleri, klorür taşıma, görünür su geçirgenliği ve gözenek yapısı dahil olmak üzere beton yüzey tabakası özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. Çalışmalar uçucu kül eklenmesi erken yaşlardaki testlerde beton yüzey tabakasında klor girişini desteklemiş fakat belirli oranlarda uçucu külün çok az etkiye sahip olacağını göstermiştir. Klorür daldırma işlemi ile ister uçucu kül olsun ister

olmasının yüzeydeki klorür yoğunluğunun değişmediği görülmüştür. Buna ilave olarak, beton yüzey alanındaki su geçirgenliği hem uçucu kül içeriğine hem de klorüre maruz kalma süresine bağlı olduğu düşünülmektedir. Gözenek yapısı civalı porozimetre (MIP) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile karakterize edilmiştir. Damıtılmış su ile temas eden betonun gözenek yapısının modifikasyonu, uçucu külün puzolanik reaksiyonu ve kalsiyum süzdürme etkisi (leaching effect) ile belirlenmiştir. Puzolanik reaksiyon 180 günlük daldırma sürecinde etkili olurken, kalsiyum süzdürme etkisi 270 günden sonra daha etkili hale gelmiştir (Liu *et al.* 2014).

Türk *et al.* farklı oranlarda silis dumanı içeren kendiliğinden yerleşen betonunun mühendislik özellikleri araştırmak için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, dört farklı oranda (%5, 10, 15 ve 20) silis dumanı (SD) içeren 4 tip kendiliğinden sıkışan beton (KSB) karışımı hazırlanmıştır. SD, KSB karışımlarında çimento yerine mineral katkı olarak kullanılmıştır. Sonuçta, bütün SD içeren KSB karışım numunelerine ait erken yaş basınç ve çekme dayanımı değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, 28 ve 130 günlük kür süreleri için %15 SD içeren KSB karışım numunelerine ait basınç ve çekme dayanımları en yüksek iken, %10 SD içeren KSB karışımına ait numunelerin ise ultrases hızı değerleri en yüksek çıkmıştır. Diğer taraftan, 28 günden sonra özellikle %20 SD içeren kendiliğinden sıkışan beton karışım numunelerine ait basınç ve çekme dayanımı ve rölatif ultrases hızı değerlerindeki artış oldukça azalmıştır. Böylece, çalışmada, kendiliğinden sıkışan beton karışımlarında çimento yerine fazla miktarda SD (>%15) kullanılmasının, silis dumanlı betonlarda da sıklıkla karşılaşılan otojen rötreten dolayı beton özelliklerini genelde olumsuz etkilediği sonucu görülmüştür (Türk vd 2008).

Nadaf *et al.* uçucu külün temel karakteristiklerini analiz etmek için deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışmada uçucu külün plastik olmayan silt boyutlu bir malzeme olduğu görülmüştür. X ışını floresans (XRF) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) sırasıyla uçucu külün kimyasal bileşimi, yüzey topografyasını belirlemek için kullanılmıştır. XRF analizleri uçucu külün daha az çimento içerdiğini göstermiş ve bu sebeple F olarak sınıflandırılmıştır. SEM analizleri, uçucu kül partiküllerinin düzgün yüzeyli ve küresel

şekilli olduğunu göstermiştir. Uçucu külün minerolojik özellikleri de XRF cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Uçucu kül içindeki mineraller çoğunlukla kuvars (maksimum) ve mullite olarak bulunduğu görülmüştür (Nadaf *et al.* 2013).

Şimşek vd silis dumanının çelik lifli betonun eğilme dayanımına etkisini araştırmak için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, çelik lifli betonlarda %0, 2,5, 5 ve 10 oranlarında silis dumanı (SD), çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Numuneler, C30 sınıfında, su/çimento oranı, 0,60 olacak şekilde seçilmiş ve masa tipi vibratörle sıkıştırılarak üretilmişlerdir. 100x100x500 mm boyutlarında üretilen prizma numuneler üzerinde, orta noktasından yüklemeli eğilme deneyi yapılmıştır. Sonuç olarak, çelik lifli betonlara %10 SD katılması, lifli betona göre eğilme dayanımında, 28 günde %23,5, 90 günde %30,8 ve 120 günde de %18,3'lük bir artış sağlamıştır. SD katkılı lifsiz betonların, eğilme dayanımlarında en yüksek değere %2,5 SD oranında ulaşılmış, %5 ve 10 oranlarında ise azalma görülmüştür (Şimşek vd 2005).

Arioz *et al.* yaptıkları çalışmada geopolimerizasyon için uçucu kül kullanılmıştır. Geopolimer hamuru, 6 saat, 15 saat ve 24 saat süreyle 120°C kür edilmiştir. Numunelerin özelliklerini incelemek için XRD ve SEM teknikleri kullanılmıştır. Analiz sonucu olarak, bu sentez koşulları ile geopolimerik yapı elde edilmiştir. Bunun yapı malzemesi gibi uygulamalar için arzu edildiği takdirde, daha yüksek molarite ile daha yüksek basınç dayanımı elde edilebilir olduğu görülmüştür. Ayrıca basınç dayanımını artırmak için bazı dolgular katılabilir olduğu tespit edilmiştir. Test sonuçları, basınç dayanımının artışı kür süresinin artışı ile arttığını göstermiştir (Arioz *et al.* 2013).

Behfarnia *et al.* değişik yüzdelerde TiO_2 ve ZnO içeren normal betonunun gaz geçirgenliğini, normal betonun basınç dayanımını araştırmış ve sonuçları normal beton ile karşılaştırmıştır. XRD ve SEM numunelerini de içeren birçok test türü kullanılmıştır. 28 günlük kür sonrasında TiO_2 partikülleri basınç dayanımını azaltmış ve betonun geçirgenliğini düşürmüştür. Ayrıca, çimento miktarının %4 üne kadar eklenen TiO_2 betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebileceği görülmektedir. ZnO nanopartiküller, ZnO miktarını artırır, hidratasyon sürecini durdurur ve harç oluşumunu

engellemiştir. XRD diyagramları, Zn(OH)_2 'nin amorf tabakası C_3S fazının hidrasyon sürecine katılmasını engellemesinin bir sonucu olduğunu göstermiştir. Bunun yanı sıra beton karışımı içindeki ZnO partiküllerinin yüzdesinin artışı ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür (Behfarnia *et al.* 2013).

Demirel vd betonda mineral katkı olarak kullanılan silis dumanının karbon fiber takviyeli hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırmıştır. Bu amaçla, silis dumanı, CEMI 42,5 portland çimento, Elazığ yöresi bazik karakterli pomza agregası ve karbon fiber ile hafif beton numuneler üretilmiştir. Çalışma için, silis dumansız hafif beton, silis dumansız karbon fiberli hafif beton, silis dumanlı hafif beton ve silis dumanlı fiberli hafif beton olmak üzere dört seri numune hazırlanmıştır. Gereken serilere, çimento ağırlığının %10'u kadar silis dumanı; yine çimento ağırlığının %0,5'i kadar da karbon fiber ilave edilmiştir. Karışımlar hazırlanırken, sabit slump değerinde çalışılmış ve çökme sınıfı S3 olarak alınmıştır. Kür süresini tamamlayan küp numunelere, önce tahribatsız deney yöntemi olan ultrases geçiş hızı deneyi, daha sonra basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Prizma numunelere ise eğilmede çekme deneyi yapılmış ve hem karbon fiberin hem de silis dumanının hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Karbon fiber ilavesi, mineral katkısız serilerde eğilmede çekme dayanımını %21,91 arttırırken; silis dumanı katkılı serilerde ise %32,07 arttırmıştır. Silis dumanı açısından incelendiğinde ise, silis dumanı ilavesinin fiberli serilerde basınç dayanımını %31,12 arttırırken eğilmede çekme dayanımını %23,14 arttırdığı görülmüştür. Sonuçta, fiberli serilerde, silis dumanı ilavesiyle eğilmede çekme dayanımında meydana gelen yüzde artışın, basınç dayanımında meydana gelen yüzde artıştan daha az olduğu belirlenmiştir (Demirel vd 2007).

Ukraineczyk *et al.* 30 yıllık bir hidroelektrik santralininim boru hatlarındaki beton üzerinde XRD ve termogravimetrik analiz (TGA / DTA) ile analizleri yapılmıştır. Çalışmada, sertleşmiş çimento hamurunun bozulmasının belirlenmesine yönelik beton analizleri amaçlanmıştır. Sertleşmiş çimento hamurunun birkaç mm kalınlığındaki yüzeyinden alınan numuneler üzerinde çatlak, segregasyon ve soğuk derz tespiti için

kullanılmıştır. Örnekler üzerindeki XRD analizleri, TGA sonuçları küçük miktarlarda belirtilen hidratlar, küçük etrenjit miktarı, kalsiyum karboalüminat hidrat ve Friedel tuzu ve bir tamamlanmış portlandit artığı olduğunu göstermiştir. Beton katmanı içinde kusursuzca alınan numuneler, betonun beklenen hidratasyon miktarını göstermiştir (Ukraineczyk *et al.* 2006).

Demir, aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi araştırmak için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada çimento yerine aynı oranlarda silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) ikameli betonun basınç ve yarmada çekme dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Puzolanik katkı olarak %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında SD ve UK çimento ile ağırlıkça yer değiştirilmiştir. Hazırlanan 7, 28 ve 90 günlük beton örneklerine basınç ve yarmada çekme deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SD katkılı betonların her yaşta referans ve UK ikameli betonlara göre daha iyi basınç ve yarmada çekme dayanıma sahip oldukları görülmüştür. En iyi basınç ve yarmada çekme dayanımı ise her yaşta %20 SD ikameli betonlarda görülmüştür (Demir 2009).

Atiş vd çimento katkısı olarak silis dumanı kullanımının beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi araştırmıştır. Çalışmada dört farklı su-çimento oranı (0,3-0,4-0,5- 0,6), üç farklı çimento dozajı (350, 400, 450 kg/m³) ve üç farklı silis dumanı ikame oranıyla (%10, %15, %20), kontrol betonu dahil olmak üzere toplam 48 farklı beton üretilmiştir. Çeşitli miktarlarda hiperakışkanlaştırıcı betonların işlenebilirliğini belli bir düzeyde tutmak üzere kullanılmıştır. Elde edilen betonların 3 ve 28 günlük küp numune basınç dayanımları sunulmuş ve tartışılmıştır. Sonuçların incelenmesinden, ilk üç günde silis dumanının basınç dayanımını arttırmada fazla etkili olmadığı anlaşılmış olup, 28 günde ise silis dumanının dayanımda %50 mertebelerine varan artışlar sağladığı görülmüştür. Su-çimento oranının optimum bir değerinde silis dumanının en yüksek artışı sağladığı görülmüştür. Yüksek su-çimento oranlarında silis dumanının düşük su-çimento oranlarına göre daha az etkili olduğu tespit edilmiştir. Silis dumanı ikame oranının da bir optimum değeri olduğu, bunun üzerindeki ikame oranları için dayanımda görülen artışın durduğu anlaşılmıştır. Silis dumanı, hiper akışkanlaştırıcı ve düşük su-çimento

oranının kombinasyonu 100 MPa mertebesinde yüksek basınç dayanımı elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür (Atış vd 2003).

Subaşı vd hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılan uçucu kül katkı miktarının beton işlenebilirliğine ve sertleşme sürelerine olan etkisini belirlemek için bir araştırma yapmıştır. Bu amaçla karışım içerisinde %5, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ikamesi yapılan beton karışımları hazırlanmıştır. Beton işlenebilirliği slump ve ve-be deneyleri ile belirlenmiştir. Hazırlanan her bir karışım için penetrasyon direnci yöntemiyle beton priz süresi tayini deneyi ile betonun 0,5 MPa, 1 MPa ve 3 MPa'lık direnç gösterdiği süreler hesaplanmıştır. Ayrıca hazırlanan karışımlardan elde edilen betonların 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Beton üretiminde; beton bileşen miktarları, dozaj ve çökme değeri sabit seçilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak beton işlenebilirliğinin önemli ölçüde değiştiği, basınç dayanım değerlerinin uçucu kül ikame miktarı artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Ayrıca karışımlarda kullanılan uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak beton sertleşme sürelerinin de değiştiği tespit edilmiştir (Subaşı vd 2014).

Murahari *et al.* farklı oranlarda polipropilen lif ve C sınıfı uçucu kül içeren betonun dayanım özelliklerini araştırmıştır. Çalışmadaki karışımlarında hacimce 0,15-0,20-0,25 ve 0,30 oranlarında polipropilen lif içeren betonda %30, %40 ve %50 gibi farklı oranlarda uçucu kül kullanılmıştır. Değişik hacim oranlarında uçucu kül ve polipropilen lif içeren karışımlar karşılaştırılmıştır. Beton basınç dayanımı için en uygun karışım oranının tespiti için numuneler analiz edilmiştir. Kademeli olarak 0,15 ve 0,30 oranında polipropilen lif eklenmesi betonun basınç dayanımını artırmıştır. Kademeli olarak 0,15 ve 0,30 oranında polipropilen lif eklenmesi betonun yarmada çekme dayanımını artırmıştır. Betonun eğilme dayanımı lif eklenmesiyle yavaş yavaş arttığı görülmüştür (Murahari *et al.* 2013).

Topçu vd silis dumanlı betonların arayüzeylerinin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, endüstriyel atık olan silis dumanı (SD) ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak PKÇ/B 32,5/R ve KÇ 32,5 cinsi iki farklı çimento ile üretilen betonların

yapılan deneylerle mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırdığı görülmüştür. Bu artışın mikro yapıda meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak mikro yapı fotoğrafları çekilip, kimyasal analizleri yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda mikro yapı fotoğrafları ve kimyasal analizler incelendiğinde; SD betonda mikro düzeyde doluluk sağladığı, CH bağlayarak C-S-H'ları oluşturması nedeni ile iri agregaların etrafında düzenli bir harç yapısının oluşması, ara yüzeylerde aderansın sağlanması gibi mikro yapıda olumlu etkileri görülmüştür (Topçu vd 2002).

Fologbade çeşitli çimento kombinasyonlu betonun geçirgenlik direncini araştırmak için çalışma yapmıştır. Çalışmada, CEM –I çimento ile yapılan, eşit su-çimento oranına ve dayanıma sahip ve uçucu kül ve silis dumanı içeren bazı ikili ve üçlü kombinasyonlu betonun geçirgenliği incelenmiştir. Aynı su-çimento oranında, uçucu kül içeren ikili çimentolu beton CEM-I'den daha yüksek geçirgenliğe sahiptir, geçirgenlik uçucu kül artarken artmış ve kür süresi arttıkça azalmıştır. Silis dumanlı ikili ve üçlü betonlar CEM-I'den daha düşük geçirgenliğe sahip ve uçucu küllü ikili çimentolu beton erken ve ileriki yaşlardaki geçirgenliği silis dumanı miktarının artması ile azalmıştır. Eşdeğer dayanımlarda çimento kompozisyonlu beton CEM-I'den daha düşük geçirgenliğe sahip ve çimentoya eklenen içeriğin artmasıyla azaldığı tespit edilmiştir (Fologbade 2002).

Çelik vd uçucu külün portland çimentosunun basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri, minerolojik karışımı, parçacık boyutlarının dağılımı ve bunların basınç dayanımına etkisi FTIR, XRD, Mastersizer ve SEM aracılığıyla tespit etmiştir. Uçucu kül karakterizasyonu ile uçucu küllü harcın basınç dayanımları arasında bir örtüşme olduğu görülmüştür. Sonuçlar, klinker içerisinde %15 oranında uçucu kül içeren numunelerin 90 günlük basınç dayanım değeri arttığı, portland çimentosu içerisinde bulunan uçucu kül partiküllerinin boyutu küçüldükçe basınç dayanımı arttığı görülmüştür. Uçucu küllü harcın basınç dayanımını geliştirmek için uçucu külün inceliği kimyasal bileşiminden daha önemlidir ve daha yüksek basınç

dayanımı elde etmek için ince uçucu kül kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Çelik vd 2008).

Elena *et al.* SEM ve XRD ile portland çimentosunun hidratasyon sürecini araştırmak için çalışmalar yapmıştır. Hidratasyon sürecinde meydana gelen bileşikler SEM ve XRD vasıtasıyla incelenmiştir. XRD ile kalsiyum alüminat ilk günden sonra tespit edilemediği halde, alite, belit ve brownmillerite 28 gün sonra korunmuştur. Tobermorit, etrenjit ve portlandit olmak üzere üç ana hidratlı bileşikler tespit edilmiştir. SEM ile 3 gün sonra en bol fazın tobermorit olduğu görülmüştür, aynı zamanda portlandit ve etrenjit de görülmüştür. 7 gün sonra tobermorit jeller ve portlandit jeller mevcut etrenjitten daha yüksek bir değerde olduğu, 28 gün sonra etrenjiti tanımak zorsa da, tobermorite daha sıkı ve sürekli bir kitle oluşturmuş, hidrate olmamış belite tanecikleri bulmuştur. Zaman içerisinde hidratasyon süreci boyunca tobermorit ve portlandit faz arasındaki değerler azalmıştır. 28 gün sonra tobermorit miktarı çok arttıkça iki faz arasındaki fark da artmıştır. SEM ve XRD yöntemlerinin ikisi de çimentonun hidratasyon sürecinde ilk önce tobermorit daha sonra portlandit ve etrenjitin görüldüğünü ortaya koymuştur. SEM kullanmanın avantajı çatlak gibi diğer görüntüleri ortaya koyarken, XRD kullanmanın avantajı ise yukarda bahsedilen hidratasyon bileşiklerini göstermesi olduğu kanaatine varılmıştır (Elena *et al.* 2012).

Vidivelli *et al.* uçucu külün kısmen çimento ile yer değiştirmesi ile elde edilen betonu SEM ile incelemiştir. Çimento yerine değişen yüzdelerde (%10, %20, %30 ve %40) uçucu kül malzemesi kullanımı ile elde edilen geleneksel beton incelenmiştir. Basınç dayanımı, küp ve silindir çekme dayanımı, eğilme dayanımı testleri dört farklı karışım için 28, 45, 60, 90 ve 180 günlük yaşlarda gerçekleştirilmiştir. Çimento yerine uçucu kül kullanılmasının mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmış ve geleneksel çimentolu beton ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda çimento yerine %20 oranında uçucu kül kullanılabileceğini görülmüştür (Vidivelli *et al.* 2010).

Chindaprasirt *et al.* sertleşmiş çimento hamurunun mikro yapısı ve boşluk boyutu üzerine uçucu külün incelik etkisini araştırmıştır. İki tür uçucu kül CEM-I portland

çimentosu yerine kullanılmıştır. Test sonuçları, sertleşmiş çimento hamurunun boşluk boyutu uçucu külün inceliği ve miktarından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Normal uçucu kül sertleşmiş çimento hamurunun boşluk boyutunu düşürmüştür, buna ilaveten kullanılan ince uçucu külün (sınıflandırılmış) boşluk boyutunu daha da düşürdüğü görülmüştür. XRD analizlerinde, ince uçucu külün (sınıflandırılmış) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yoğunluğunu azaltmada normal uçucu küle göre daha etkili olduğu görülmüştür. SEM sonuçları ince uçucu kül içeren sertleşmiş çimento hamurunun kaba uçucu kül içeren daha yoğun bir yapı ürettiğini ortaya koymuştur (Chindaprasirt *et al.* 2007).

Sümer vd yaptığı çalışmada endüstriyel bir atık malzeme olan silis dumanının saha betonunda kullanımının beton özellikleri üzerine etkileri incelenmiş ve silis dumanının beton üzerindeki olumsuz etkilerini iyileştirmek için polipropilen lif katılarak beton özellikleri üzerindeki etkileri araştırmıştır. Silis dumanının ince olması nedeniyle yapılan deneylerde de görüldüğü gibi su ihtiyacı aynı çökme değeri için artmıştır. Çok ince madde olan silis dumanı betonun en küçük boşluklarını doldurmakta ve betonu iyileştirmektedir. Ancak silis dumanı betonlarda fazla su nedeniyle kusmanın fazla olması ve sıcak havalarda buharlaşma hızının çok olması yüzeysel çekme gerilmeleri nedeniyle çatlamalara neden olmaktadır. %10 silis dumanı katkılı betonlara %0,1- %0,5 ve %1 oranlarında polipropilen lif katılmış ve su ihtiyacı aynı çökme değeri için arttığı görülmüştür. Farklı dozlarda ve değişik katkı içeriklerinde hazırlanan numunelerde kontrol karışımına kıyasla, karışım suyu %2 ile %20 arasında arttığı tespit edilmiştir. Silis dumanı aşırı ince malzeme olmasından dolayı su ihtiyacını artırdığından silis dumanlı betonların işlenebilmesi azaldığı görülmüştür. Betona katılan silis dumanı oranı çimento ağırlığının %5'inden daha yukarılara çıktıkça, beton daha yapışkan olmakta, yüzey düzeltme işlemlerinde kullanılan malzemelere yapışarak güçlük çıkarmaktadır. Polipropilen lif kullanımı da işlenebilirliği azalttığı görülmüştür. Bu nedenle yapılan deneylere işlenebilirliği arttırmak için süper akışkanlaştırıcı katılmıştır. Silis dumanı ve polipropilen lif kullanımı katkı içeriğine bağlı olarak şahit numunelerine nazaran basınç dayanımında %23 ile %44 arasında artış sağlamıştır. %10 silis dumanına %0,1 ve %0,5 oranında katılan polipropilen lifler basınç dayanımını arttırmış fakat %1 polipropilen lif

oranında artan lif hacimleri ile beton basınç dayanımını azaltma eğiliminde olduğu görülmüştür (Sümer vd 2013).

Sancak vd yaptığı çalışmada, bims agregası ile üretilen taşıyıcı hafif beton (HB) ve normal yoğunluklu agrega ile üretilen normal betonların (NB) karşılaştırmalı olarak yüksek ısıya (20°C, 100°C, 400°C, 800°C, 1000°C) maruz kaldıktan sonraki ağırlık kaybı ve kalan basınç dayanımları araştırılmıştır. Silis dumanı (SD), mineral katkı olarak %0, %5 ve %10 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Kalan altı tip beton, SD'lı karışımlara, çimento ağırlığının %2'si oranında süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı eklenerek elde edilmiştir. HB'ların birim ağırlıkları, NB'lara göre %23 daha düşüktür. HB'lardan %2 SA katkılı olanlar; ilk dayanımlarının %38'ini koruyabilmişlerdir. NB ve HB'lar, 20°C, 100°C ve 400°C sıcaklıklara maruz bırakıldıklarında, NB'ların daha dayanıklı oldukları görülmüştür. 800°C ve üstündeki sıcaklıklarda, SD kullanım oranına bağlı olarak basınç dayanımı kaybı arttığı tespit edilmiştir (Sancak vd 2005).

Jacobsen *et al.* hızlı donma çözölmeye maruz kalmış ve daha sonra su içerisinde tutulan betonun mikro çatlak ve kendini iyileştirme mekanizmasını SEM kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada su/bağlayıcı oranı 0,40 ve silis dumanı %0, %5 içeren beton numuneler kullanılmıştır. Hasar, rezonans frekansı ve basınç mukavemet kaybı olarak ölçülmüştür. Numuneler dona maruz kaldıktan sonra üç ay süresince su içerisinde saklanmıştır. Bu süre boyunca rezonans frekansı büyük oranda düzelirken, basınç direnci daha düşük iyileşme göstermiştir. Çatlak yüzeylerin sekonder elektron görüntülerinde (SEI) ana hidratasyon ürünü olarak C-S-H, iyileşmeden sonra çeşitli yerlerde çatlaklardan geçerken, donma/çözülmeden sonra doğrudan görülmemiştir. Geri yansımali elektron görüntüleri (BSEI) donma çözölme testinden kaynaklanan çatlakların 1-10 µm genişliğinde olduğunu göstermiştir. Çatlakların hamurdan geçerek büyük agregaların yüzeylerinden ilerlediği görülmüştür. Geri yansımali elektron görüntülerinde (BSEI) 300-1000 kat büyütme sonunda iyileşmenin 5 µm den küçük çatlakların yaklaşması olarak görülmüştür. BSEI modunda, SEI moduna göre yeniden

hidratasyon ürünlerinin daha az, çatlakların ise daha fazla olduğu görülmüştür (Jacobsen *et al.* 1995).

Talero, Fratini testi katı fazında etrenjitin yarı nicel analizi çalışmasını XRD ile yapmıştır. Çalışmada değişik oranlarda C_3A içeren çimentolar, 5 farklı puzzolan ve 5 farklı karışım oranı kullanılmıştır. Bu karışımlar %7 ve %21 oranlarında SO_3 verecek şekilde alçı ile karıştırılmıştır. Aynı analiz ve çalışmalar her bir karışıma ilave $Ca(OH)_2$ ve alçı ilavesiyle birlikte yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, puzzolandan etrenjit oluşumu oranı, normal portland çimentosundan elde edilen etrenjit oluşum hızından belirgin derecede yüksek olduğu ve etrenjit oluşumunun topokimyasal mekanizması reaktif alümin (Al_2O_3) dahil tüm gerekli malzemeler varlığında geliştiğini göstermiştir (Talero 1996).

Diamond *et al.* sıvı azotta hızlı dondurulmuş ve ardından epoksi emprenye edilerek hazırlanan taze karıştırılmış erken yaş harç numuneleri ve geleneksel olarak hazırlanmış erken yaş harçların tamamlayıcı örnekleri ile ilgili SEM incelemeleri yapmıştır. İncelemelerde özellikle birkaç mikrometre kalınlığındaki tamamen su dolu tabakaların kum tanesi yüzeylerinin birçoğuna bitişik olarak bulunduğu görülmüştür. Birkaç saat sonra, bu katmanlarda seyrek kalsiyum hidroksit kristalleri (ve daha sonra C-S-H) bulunduğu, ancak bu katmanların en az 12 saat süreyle bu bölgede tanınabilir özellik olarak kaldığı görülmüştür. Bu katmanların hem hızlı dondurulmuş hem de geleneksel olarak hazırlanmış numunelerde aynı şekilde görülmüştür. Taze karışım harçlarında bulunan bir başka özellik de az miktarda paketlenmiş çimento partiküllerinin toplanması ile oluşmuş yerel alanların varlığı tespit edilmiştir (Diamond *et al.* 2008).

Yang *et al.* etrenjit varlığında tomasitin düşük oranlarda varlığını tespit etmek için ve sülfata maruz kalmış betonun yapısını ve sülfat saldırısında tomasitin mekanizmasını anlamak için bir yöntem üzerinde çalışmıştır. Beton numunede büyük oranda tomasitin belirlenmesinde optik mikroskopu ve XRD kullanılmasını önermiştir. Bununla birlikte optik mikroskopunun sınırlı kaldığını belirtmiştir. Etrenjit bol miktarda dolduğunda, tomasitin XRD ile tespiti etrenjit ile tomasit pik noktalarını benzerliğinden dolayı zor

olduğu görülmüştür. Etrenjitin az miktardaki tomasit piklerinin kaplamasının neden olması bunun sebebidir. Çalışmada etrenjit ve tomasit bandları içeren numuneler BSEI ile önce düşük sonra yüksek vakum altında incelenmiştir. İnceleme öncesi numuneler önce 50°C'ye kadar kurumuş ve sonra reçine emdirilerek parlatılmıştır. Yüksek vakum altında etrenjit ve tomasit bandları çoğunlukla gri tonlamalı ve çatlaklı olarak görülmüştür, eğer XRD cihazı olmasa idi bunun gözle görülmesi çok zor ve imkansızdır. Düşük vakum altında etrenjitin görüntüsü benzer olmasına rağmen tomasitin görüntüsü farklı olduğu ve tomasitin yapısal suyunu kaybetmesi için daha yüksek bir vakum gerektirmesinden dolayı olduğunun göstergesidir. Bu sebeple düşük vakumlu SEM analizinin etrenjit ve tomasitin belirlenmesinde kullanılacağını belirtmiştir (Yang *et al.* 2000).

Handoo *et al.* kimyasal, mineralojik ve fiziksel performans özellikleri bilinen, sıradan Portland çimentosundan hazırlanan beton küpler 100 °C'lik artışlarla 1000 °C'ye kadar farklı sıcaklık rejimlerine maruz bırakılarak, yüksek sıcaklıkların betonun hidratlı fazlarında meydana gelen mineralojik değişiklikler üzerindeki etkisini belirlemek için x-ışını kırınımı (XRD) ve DTA / TGA kullanılarak incelemiştir. Betonun fiziksel durumunda meydana gelen değişiklikler ultrasonik atım hızı (UPV) ölçülüp, sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımı bozulması incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskop (SEM) çalışmaları, yüksek sıcaklıklara maruz betonun bozulmasına karşılık gelen morfolojik değişiklikler gösterdiği tespit edilmiştir (Handoo *et al.* 2002).

Temiz vd yaptığı çalışmada mineral karışım olarak yüksek kalsiyumlu silis dumanı ve silis dumanı kullanmıştır. Bu katkıların çimento hamurunun mikro yapısına etkisini XRD ve SEM kullanarak araştırmıştır. Yüksek kalsiyumlu silis dumanı ve silis dumanı çimento hamurunda meydana gelen portlandit ile reaksiyona girerek C-S-H jelinin yeni bir formunu oluşturduğunu görmüştür (Temiz vd 2002).

Lee *et al.* yaptıkları çalışmada uçucu küllü ve üç çeşitli aktivatörlerin Na₂SO₄ K₂SO₄ ve trietonalamin içeren çimento harçlarının erken yaşlarda dayanımı hızlandırmadaki etkisini araştırmıştır. Termal graviti analizinin kullanılmasıyla, aktivatörlerin Ca(OH)₂

ürünlerinin miktarını azalttığı veya sürdürmediği, aynı zamanda erken yaşlarda etrenjit üretimini artırdığı görülmüştür. X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskopisi ve cıvalı porozimetresi, aktifleştiricileri içeren uçucu küllü çimento harçlarının erken kürlenme safhalarında büyük miktarda etrenjit oluştuğunu ve gözenek boyutunun 0,01 ila 5 μm arasında değişen bir azalmaya neden olduğunu doğrulamıştır. Araştırma sonuçları, küçük miktarlarda etkinleştiricilerin ilavesinin uçucu küllü betonunun erken yaş basınç dayanımını arttırmak için uygulanabilir bir çözüm olduğu varsayımını desteklediği görülmüştür (Lee *et al.* 2003).

Gao *et al.* tarafından yapılan çalışmada granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) içeren beton içerisindeki hidrat morfolojisi ve agrega-çimento hamuru ara yüzey geçiş bölgesi (ITZ) XRD, SEM ve mikrosertlik ölçümleri kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, GGBS'nin ITZ'deki CH kristallerinin niceliğini ve yönlendirme düzenini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. CH kristal boyutu, GGBS ilavesi nedeniyle daha da küçük olduğu ve agrega ile çimento hamuru arasındaki zayıf ITZ, GGBS'nin pozolanik reaksiyonunun bir sonucu olarak güçlendiği tespit edilmiştir. Yukarıdaki iyileştirmeler, GGBS parçacık boyutlarının azaltılmasıyla çok daha önemli hale geldiği görülmüştür (Gao *et al.* 2005).

Girao *et al.* yaptıkları çalışmada 55°C'de hidratlanmış beyaz portland çimentosunun suda ve alkali ile aktifleştirilmiş hamurunda bulunan C-S-H karakterize edilmiştir. C-S-H'da alüminosilikat anyonların ortalama uzunluğu her iki sistemde de benzer ve yaşla birlikte arttığı görülmüştür. İç çarpım C-S-H genelde ince bir skala, homojen morfolojiye sahiptir olduğu görülmüştür. SEM ile C-S-H'nin kimyasal bileşimini belirlemek mümkün olmadığından TEM-EDX kullanımı gerekli olmuştur. Alkali ile aktive edilen harç içerisinde oluşan C-S-H, su ile oluşturulana kıyasla daha düşük bir ortalama $\text{Ca} / (\text{Al} + \text{Si})$ oranına sahipti ve bu da daha büyük miktarda kalsiyum hidroksit ile dengelenmiştir. KOH ile harekete geçirilen harcın içindeki potasyum Si^{+4} için Al^{+3} ikamesini dengeleyen ya da C-S-H yük dengeleyici sülfat iyonlarına adsorbe edilen C-S-H yapı yükü içinde mevcut olduğu görülmüştür (Girao *et al.* 2007).

Lilkov *et al.* uçucu kül, silis dumanı ya da her ikisinin bir kombinasyonu olan Pozzolit ile karıştırılan çimentoların erken hidrasyon (24 saat kadar) ile ilgili çalışmaların sonuçları araştırmıştır. Pozzolit'in aktif rolü DTA, XRD ve IRS analizleri ile ortaya konulmuştur. Katkı maddesinin etkisi artan hidrasyon toplam ürünleri miktarında artış ve portland içeriklerinin azalması şeklinde gözlenmiştir (Lilkov *et al.* 1997).

Tasong *et al.* yaptığı çalışmada agreganın jeokimyasal özelliklerinin agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzey geçiş bölgesinin dayanımı ve mikroyapısının gelişimine etkisini araştırmıştır. Bilinen kimyasal özelliklere sahip üç yaygın beton agregası (kuvarsit, bazalt ve kireçtaşı) ITZ'lerindeki mineral fazlar ve mikroyapı, bir enerji dağılımlı x-ışını analizörü ve x-ışını kırınımı ile taramalı elektron mikroskopisi kullanılarak analiz etmiştir. İncelenen üç farklı agrega arasındaki ITZ'de mikroyapı ve mineral fazlarındaki farklılıkların bulunduğu gözlemlenmiştir. Kireç taşının özellikle kimyasal etkileşim sonucu olarak ITZ bölgesinde boşluklu bir yapı oluşturduğu görülmüştür (Tasong *et al.* 1999).

Nochaiya *et al.* uçucu kül-silis dumanı içeren portland çimento sistemlerinin normal tutarlılığı, sertleşme zamanı, işlenebilirliği ve basınç dayanımı sonuçları incelemiştir. Sonuçlar, normal tutarlılık için su ihtiyacının silis dumanı içeriği arttıkça arttığını, başlangıçtaki priz süresinde bir azalmanın olduğunu göstermiştir. Çökme döneminde ölçülen işlenebilirlik oranının silis dumanı içeriği ile azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, çökme değerlerinde düşüşe rağmen, portland çimento esaslı kül-silika dumanı betonunun işlenebilirliği çoğu durumda portland çimento kontrol betonunkinden daha yüksek olmuştur. Ayrıca, silis dumanının kül ile birlikte kullanılması, erken yaşlarda (28 gün öncesi) beton basınç dayanımı %145'e kadar, silis dumanı ağırlıkça %10'da kullanıldığında elde edilen en yüksek mukavemet derecesini arttırdığı tespit edilmiştir. SEM görüntüleri, silis dumanı ile uçucu külün kullanılmasının çok daha yoğun bir mikroyapıya yol açtığını göstermekte ve bu şekilde sıkıştırma mukavemetinde bir artışa neden olduğu görülmüştür (Nochaiya *et al.* 2010).

Scrinever yaptığı çalışmada, hidratlı çimento hamurunun genel mikroyapısal özellikleri araştırmıştır. Çimento içerisindeki alüminat fazı miktarı (C_3A) nispeten küçük olmasına rağmen, çimento hamuru mikroyapısal özelliklerinin çoğunun belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını gözlemlenmiştir. Çimento hamurunun çok heterojen yapısına rağmen, mikroyapı ve özellik arasındaki ilişkiler anlaşılması için nicel ölçümler alabilmek önemlidir. BSE görüntülerinin nicelleştirilmesi olanakları açıklanmaktadır. Betondaki hamur ve agregalar arasındaki arayüz özellikle değişkenlik göstermektedir, ancak bu bölgeye neden olan çimento tanelerinin paketlenmesi sürecini anlamaya yardımcı olan ortalama özelliklerin ölçülebileceği ve BSE görüntülerinin beton dayanımı üzerinde çalışmaya ilişkin bir potansiyel olduğunu görülmüştür (Scrinever 2004).

Narayanan *et al.* çimento esaslı, dolgu malzemesi olarak kum ve uçucu kül kullanılan otoklavlanmış gazbeton (AAC) ve otoklavlanmamış gaz beton yapısının araştırması üzerine bir çalışma yapmıştır. Basınç dayanımı ve kuruma büzülmesindeki değişikliklerin nedenleri mikroyapıda meydana gelen değişiklikler referans alınarak açıklanmıştır. Bileşim analizi XRD kullanılarak gerçekleştirilmiş ve uçucu külün otoklava kötü yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Normal betonda harç-agrega ara yüzeye göre aeratite edilmiş beton içinde yapılan harç-boşluk arayüzü ara yüzey geçiş bölgesinin varlığı görülmüştür (Narayanan *et al.* 2000).

Igarashi *et al.* çimento hamuru ve harç içindeki mikroyapının oluşumu SEM-BSE görüntü analizi ile nicel olarak analiz edilmesi için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada karışımlara su/bağlayıcı oranı ve mineral katkı ilavesinin hidrate olmamış çimento taneleri ve boşluk yapısına etkisi araştırılmıştır. Analizlerle elde edilen her fazın oranları, Powers modeli üzerinde hesaplanan oranlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalardan, görüntü analizi ile elde edilen hidrate olmamış çimento ve gözeneklerin hacim oranlarının, Powers modelinden tahmin edilenlerle çelişmediği bulunmuştur. Düşük su/çimento oranlı ve puzzolanik reaksiyona giren hamurların daha az kılcal boşluk gösterdiği görülmüştür. Ayrıca ileriki yaşlarda daha büyük boşlukların kaldığı görülmüştür. Powers ve Brownyard denklemindeki jel-boşluk oranı, görüntü analizi ile belirlenen faz unsurlarından hesaplanmıştır. Mineral karışımı olmayan harçlar

için, görüntü analizi ile elde edilen jel/boşluk oranı, mukavemete bağlı olabileceği öngörülmüştür (Igarashi *et al.* 2004).

Bentz *et al.* yaptığı çalışmada mikroyapı analizinde kullanılan görüntü toplama ve işleme tekniklerinin yanı sıra, alan kesirleri, yüzey kesirleri ve iki noktalı korelasyon işlevleri gibi 2 boyutlu mikroyapıların karakterize edilmesi için kullanılabilecek istatistikleri araştırmıştır. Çalışmada farklı kaynaklardan elde edilen uçucu kül görüntüleri ve öğütme inceliğinin bir fonksiyonu olarak çimento mikroyapısını araştıran iki uygulama yapılmıştır. Elde edilen görüntüler mikro yapının ve çimento hidratasyonun üç boyutlu bilgisayar modelinde gerek duyulan sayısal karakterleri sağladığı görülmüştür (Bentz *et al.* 1999).

Sahu *et al.* sertleşmiş betonda taramalı elektron mikroskopu ile geri yansıma elektron görüntüleme (BEI) kullanılarak su-çimento oranının (w/c) belirlenmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Yöntem, epoksi ile emdirilmiş ve yüzeyde parlatılmış beton kesitlere dayanmaktadır. Kurutulmuş bir beton numunesinin emdirilmesi sırasında epoksi, kılcal gözenekleri, çatlakları ve boşluklar doldurur. BEI'de epoksi emdirilmiş gözenekler koyu renkte görünürken, kalsiyum silikat hidrat, susuz çimento tozu ve agrega gibi diğer fazlar daha parlak fazlar gibi görünmüştür. Görüntü analiz programını kullanarak ve gri tonlamanın uygun bir eşik değerini ayarlayarak, betonun kılcal gözenekliliği nicelleştirilebilmiştir. Parlaklık, kontrast ve çalışma mesafesi gibi standart bir enstrüman parametresi seti kullanılarak, bilinmeyen bir beton numunesi için tekrarlanabilir niceliksel veriler elde edildiği ve bu doğrultuda kılcal gözeneklilik ile ilişkili olan su-çimento oranı ölçülebilir. Çalışmada sinyal üretimi, parlaklık, kontrast, numune hazırlama ve genel metodoloji tartışılmış ve bu yöntemi kullanarak ölçülen veriler Nordtest NT Build 361-1999'a göre optik floresan mikroskobu kullanılarak üretilen verilerle karşılaştırılmıştır. Sertleşmiş betonun su-çimento oranı, taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve görüntü analizi yazılımı ile saptanabilir. Yöntem, su/çimento oranları bilinen laboratuvar numuneleri için test edilmiştir ve iyi doğrusal korelasyon göstermiştir. S/Ç oranları, standart beton mikroskopisi Nordtest yöntemi (NT Build 361-1999) kullanılarak aynı numuneler üzerinde elde edilen sonuçlarla çok iyi

korelasyon göstermiş ve bununla birlikte, son derece yüksek su-çimento oranları için 1'i aştığı görülmüştür (Sahu *et al.* 2004).

Corr *et al.* düşük sıcaklıkta tarama elektron mikroskobunun (SEM) Portland çimentosunun malzeme bilimlerine uygulanmasını üzerine bir çalışma yapmıştır. Düşük sıcaklıkta tarama elektron mikroskobu detaylarının yanı sıra bir dizi numune hazırlama tekniği de çalışılmıştır. Çalışmada hava boşluklarında buz morfolojisi, erken hidratasyon esnasında hava boşluklarının oluşması ve portland çimentosundaki hidratasyonun ilerlemesi üzerinde durulmuş ve çalışmada, düşük sıcaklıkta tarama elektron mikroskopisinin Portland çimento araştırmasında etkili bir araç olabileceği görülmüştür (Corr *et al.* 2004).

Jiminez *et al.* SiO_2 ve Al_2O_3 bakımından zengin çeşitli doğal ve endüstriyel atık ürün malzemeleri, hafif sıcaklık koşullarında daha dolu bir hamur elde etmek için kullanmıştır. Çalışmada aktif madde olarak kül oluştuğunda hızlı sertleşme ve hızlı dayanım gelişimi gözlenmiştir. Arsenik içeren alkali ile aktive edilmiş uçucu kül matrisleri, argon frezeli kesitlerin enerji dağılımlı x-ışını analizi ile geçirimli elektron mikroskopisi kombinasyonu ile incelenmiştir. Az miktarda arsenik, hidratasyon ürünü matrisi içine dahil edilmiş, ancak görünüşte uçucu külünün hidratasyonundan türetilmiş demir ile ilişkilendirilmiş ve arseniğin ilave Fe_2O_3 ile ilişkisi olmadığı görülmüştür (Jiminez *et al.* 2004).

Kjellsen *et al.* su/çimento oranı 0,40 olan trikalsiyum silikat (C_3S), alit ve Portland çimentosunun hamurunun 24 saat ve 1 aylık hidratasyon zamanlarında mikroyapıları, üzerine bir çalışma yapmıştır. Yüksek çözünürlüklü geri saçılmış (backscattered) elektron görüntüleri elde etmek için bir alan emisyon SEM (FE-SEM) cihazı kullanılmıştır. Karşılaştırma, C_3S ve alit arasında mikroyapısal farklılıklar bulunmadığını ortaya koymuş, ancak C_3S ve Portland çimento hamurları arasında mikroyapıda önemli derecede farklı faktörler olduğu görülmüştür. C_3S hamurunun mikroyapısı portland çimentosununkinden daha basit ve birkaç karakteristik özellik ile tarif edilebilir olduğu ve reaksiyon ürünlerinin dağılımı, iki sistemde büyük ölçüde

etkilenmiş olduğu gözlemlenmiştir. Çukur kabuklar portland çimento hamurunun belirgin bir özelliği olmasına rağmen, bunların oluşumu C_3S ve alit macunlarında daha sınırlı kaldığı ve bu boşlukların C_3S ve alit hamurundaki yaklaşık 5 μm 'den daha küçük tanelerle sınırlandırıldığı ve boşluklu boş kabuklar ortak bir özellik olmadığı görülmüştür (Kjellsen *et al.* 2004).

Bingöl vd silis dumanı ve uçucu külün betonun sülfat direncine etkisini incelemiştir. Bu amaçla üretilen betonda %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ve %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül, çimento ile değiştirilmiştir. Hazırlanan numunelerde üretilen betondan 28, 90 ve 180 günlük kürlenme sürelerinin ardından basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve birim ağırlık testleri yapılmıştır. Kontrol örnekleri sülfat saldırısı altındaki örneklerle karşılaştırılmış, hem basınç hem de eğilme dayanımları için en iyi sülfat direnci, %10 uçucu kül ve %5 silis dumanı içeren betonlardan elde etmişlerdir. Numunelerin içyapısı ise SEM görüntüleri ve kontrol grubundaki EDS ve XRD ölçümleri ve % 10 oranında mineral içerenler ile incelemiştir (Bingöl vd 2018).

Garcia *et al.* düzgün ve harmanlanmış içerisinde %60 toz haline getirilmiş granüle yüksek fırın cürufu ya da %30 toz haline getirilmiş yakıt külü veya %22 volkanik kül katılmış portland çimentosunun hamurlarını 10 ila 60°C arasındaki sıcaklıklarda bir yıl boyunca tutarak bir çalışma yapmıştır. Hidratasyon ürünleri, x-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı spektroskopi ile karakterize edilmiştir. Hamurları gözenekliliği artan kür sıcaklığı ile artmıştır. Çalışmada ilave malzemelerin varlığında C-S-H kompozisyonu yüksek Si ve Al muhtevasına kaymış buna karşılık Ca düştüğü görülmüştür (Garcia *et al.* 2004).

Thaulow *et al.* beton demiryolu girişlerinde gözlenen alkali silika jel ve etrenjiti SEM-EDX ve x-ışını kırınımı kullanarak analiz etmiştir. Agregada parçacıkları içindeki çatlaklardaki kristalleşmiş jelin Si ve Ca içeriği ve çatlakların ağzındaki ve hava boşluklarındaki berrak jel analizleri, kristalize jel ile yüksek Si ve düşük Ca cinsinden bileşimsel bir fark ortaya koymuştur. Si içeriği azalır ve Ca jelde agregada parçacıklarından uzaklaştığı ve jel bileşimleri, literatürde yayınlanan aralıkta olduğu

görülmüştür. Etrenjit bileşimi etrenjit için stoikiometrik değere yakın, ancak sülfürde biraz daha düşüktür. X-ışını kırınım analizlerinde etrenjit kristal olarak tanımlanabileceği görülmüştür (Thaulow *et al.* 1996).

Scrivener *et al.* XRD-Rietveld analiz tekniğinin geliştirilmesi için tipik portland çimentosunun hidratasyonu için pilot bir çalışma yapmıştır. XRD- Rietveld analizinden elde edilen sonuçları doğrulamak için aynı malzemelerin geri yansımali elektron görüntüleri (BSE / IA) ve termogravimetrik analiz (TGA) analizi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Buna ilave olarak ölçümlerin iç tutarlılığı, oluşan hidrat miktarlarının XRD tahminlerini, reaksiyona giren susuz materyallerin miktarlarının XRD tahminlerinden oluşturması beklenen miktarlarla karşılaştırarak incelemiştir. XRD / Rietveld analizinin, hidratasyon sırasında çimento hamurunun fazlarının kantitatif çalışması için çok umut verici bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Scrivener *et al.* 2004).

Deschner *et al.* iki farklı düşük kalsiyumlu uçucu külün %50 oranında normal portland çimentosu hamurunun hidratasyonuna etkisini 550 günlük hidratasyonu süresince araştırmıştır. Sonuçlar "katkı maddesi etkisi" ve puzolanik reaksiyon arasında ayırım yapmaya olanak tanıyan, ağırlıkça %50 inört kuartz tozu içeren referans normal portland çimentosu hamuru ile karşılaştırılmıştır. 2 güne kadar uçucu kül reaksiyonuna ilişkin herhangi bir kanıt ölçülmemiştir ve hidrasyon üzerindeki etkisi çoğunlukla "dolgu etkisi" ile ilgilidir. 7 gün sonra pozzolanik reaksiyonun etkisi portlandit tüketimi, gözenek solüsyonu kimyasının değişimi, muhtemelen su bakımından zengin bir iç hidratasyon ürünü oluşumu ve C-S-H bileşiminin katkısız normal portland çimentosu C-S-H'ına kıyasla daha yüksek Al / Si oranına sahip olduğu görülmüştür. 28 günlük hidratasyon sonrasında gelişen puzolanik reaksiyona bağlı olarak ilave dayanım olduğu görülmüştür (Deschner *et al.* 2012).

Guo *et al.* C sınıfı uçucu kül ve sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltisinden hazırlanan karışık alkali aktivatör ile hazırlanmış jeopolimerler inceleyen bir çalışma yapmıştır. Aktivatör SiO_2 / Na_2O 'ın molar oranı 1,5 iken, bu aktiveleştiricinin Na_2O ile

CFA'nın kütle oranı tarafından değerlendirildiği gibi uygun içeriği %10 olduğunda yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımı 73°C 8 saat, daha sonra ise 23°C'de 28 gün kür sonucunda 63,4 MPa olarak belirlenmiştir. Ana jeopolimer jel ve C-S-H jel, XRD ve SEM-EDS'da gözlemlendiği gibi kalan reaksiyona girmeyen bazı CFA kürelerinin bir arada olduğu görülmüştür. Ayrıca XRD modelinde zeolit varlığı da gözlenmiştir (Guo *et al.* 2010).

Sahu *et al.* etrenjit ve alçı ile birlikte tomasitin varlığını saptamak için bir ön çalışmada sıvı kristal ayarlanabilir filtre (LCTF) teknolojisiyle Widefield Raman kimyasal görüntüleme tekniğini kullanılmıştır. Raman kimyasal görüntüleme tekniğinde, moleküler tabanlı kontrastlı görüntüler sağlamak için optik mikroskopi ve dijital görüntüleme ile Raman spektroskopisini birlikte kullanılabileceği tespit edilmiştir. Çalışmada bu mineraller bir araya getirildiğinde, Raman kimyasal görüntüleme, moleküler kompozisyonunu ve numunedeki mekansal dağılımı belirlemek için mükemmel bir yol olduğu görülmüştür (Sahu *et al.* 2002).

Diamond SEM ile sertleştirilmiş çimento hamurunun ve bu hamurun mikroyapısının altında yatan iç mimarinin, SEM'in erişebileceği boyut ölçeklerinde görüntüleme yapmıştır. Bu çalışma çimento hamurunun ve betonun mikro yapısına SEM ile incelemek için bir ilk girişimi temsil etmektedir (Diamond 2004).

Scriner hidratlı çimento hamurunun genel mikroyapısal özellikleri araştıran bir çalışma yapmıştır. Çimento hamurunun çok heterojen yapısına rağmen, mikroyapı ve özellikler arasındaki ilişkilerin anlaşılması gerekiyorsa, niceliksel önlemler alabilmek önemlidir. Çalışmada BSE görüntülerinin nicelleştirilmesi olanakları açıklanmıştır. Betondaki hamur ve agregalar arasındaki arayüz özellikle değişkenlik göstermektedir, ancak bu bölgeye neden olan çimento tanelerinin paketlenmesi sürecini anlamaya yardımcı olan ortalama özellikler ölçülebilmektedir. Son olarak, BSE görüntülerinin beton dayanımı üzerinde çalışma potansiyeline ilişkin örneklerle açıklanabileceği görülmüştür (Scriner 2004).

Mobasher *et al.* sülfat maruziyetine bağlı çatlak modellerinin oluşumu ve bileşimin değişimini görmek için çeşitli numunelerin mikroyapıları SEM ile incelemiştir. Sülfat penetrasyonunu, reaksiyonunu, hasar gelişimini ve genişlemesini tahmin etmek için bozunmaya yol açan bir difüzyon-reaksiyon çözümü geliştirmek için çimento kimyası, beton fizik ve mekaniği kullanan basitleştirilmiş bir model sunulmuştur (Mobasher *et al.* 2007).

Stutzman *et al.* mineral katkıların betonun özelliklerine etkisini daha iyi açıklayabilmek için, farklı kazanlarda yakılan kömürden elde edilen uçucu küllerin SEM ve XRD analizleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Çimento yerine kütlece %25 uçucu kül içeren harçların mikroyapı görüntüleri, daha ince kül fraksiyonlarıyla birlikte paketleme yoğunluğunu arttırdığı görülmüştür. 60 günlük suda priz aldıktan sonra harca reaksiyona girmemiş uçucu kül ve kalsiyum hidroksit varlığı bunun ise puzolanik reaksiyonun tamamlanmadığının bir sonucu olduğu görülmüştür. Bu yaşta külün kompozisyonundan ziyade partiküllerin boyutunun daha önemli olduğu görülmüştür (Stutzman *et al.* 1995).

Hasdemir vd kuvars minerali ile birlikte Na-feldispat, K-feldispat, mika ve kil minerallerinden kaolinit, illit ve montmorillonit minerallerinin ince agrega içinde olması durumunda, üretilen harçların basınç dayanımlarına etkisini araştırmıştır. Hazırlanan numunelerde, standart kum numunesi referans alınmış ve daha sonra ağırlıkça %5-10-20 oranında Na-feldispat, K-feldispat, mika ve %1-2-4 oranında kaolinit, illit, montmorillonit kil mineralleri ilave edilmiştir. Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde feldispat, mika ve kil minerallerinin etkilerini görmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemelerden çimento ile kum taneleri arasındaki aderansın iyi geliştiği, illit kullanılan harçtaki boşluk olduğu, montmorillonit su aldığı ve şişmesi ve daha sonra kurumması sonucunda büzülme çatlakları ve yine büzülme etkisiyle çimento-agrega sınırındaki ayrılmalara neden olduğu görülmüştür. Buna ilave olarak mika minerali ilave edilerek hazırlanmış harç örneğindeki tane ve çimento arasındaki aderansın iyi gelişmediği gözlemlenmiştir (Hasdemir vd).

Goni *et al.* iki tip uçucu kül belit çimentosu ve bunların hidratasyon ürünlerinin mikroskopik karakterizasyonunu, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji-dağılımlı x-ışını mikroanalizi ve x-ışını kırınım analizi ile araştırmıştır. Hazırlanan numuneler 180 günlük sürede 21°C’de suda kür edilmiştir. Sonuçlar, alüminyum-tobermorite yakın olası bir bileşime sahip C-S-H jeline ve diğer küçük elemanlara alüminyumun (Al) önemli ölçüde katıldığını göstermiştir (Goni *et al.* 2007).

Naik *et al.* petrol ürünlerinin nüfuz ettiği betonda uçucu kül ve silis dumanlarının kullanımı üzerine bir çalışma yapmıştır. Petrol ürünlerine maruz betonda uçucu kül ve silis dumanı kullanımının, su emme, mukavemet özellikleri, kimyasal özellikleri, morfolojik özelliklerine etkisi XRD ve SEM kullanılarak araştırılmıştır (Naik *et al.* 2013).

Tohumcu vd yaptıkları çalışmada çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ve %25, %40 ve %55 oranlarında uçucu külü mineral katkı maddesi olarak kullanılarak kendiliğinden yerleşen beton üretmişlerdir. Üretilen taze beton özellikleri ile sertleşmiş betonların 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımlarında artış olurken, uçucu kül katkılı beton numunelerde ise dayanımın azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 88 MPa değeri ile %15 silis dumanı kullanılarak üretilen betonlardan elde edildiğini belirlemişlerdir (Tohumcu vd 2013).

Topçu vd çimento yerine %5, 10, 15 oranlarında silis dumanı (SD) ile süperakışkanlaştırıcı ve PKÇ/B 32,5/R ve KÇ 32,5 cinsi iki farklı çimento kullanarak betonlar üretmiştir. Bu betonlar üzerinde su emme ve donma-çözülme deneyleri yapılarak su emme oranları, donma-çözülme deneyi sonundaki ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Donma çözülme etkisinde kalmış beton numuneleri ile standart kür koşullarında bekleyen beton numunelerinin SEM ile mikro yapı fotoğrafları çekilerek donma çözülme sonrası mikro yapıda meydana gelen değişimler incelenmiş ve kimyasal analizleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda SD katkılı betonların su emme oranlarının kontrol betonlarına göre PKÇ/B 32,5/R çimentosu ile üretilen betonlarda %2, KÇ 32,5

ile üretilen betonlarda %13 daha az olduğu görülmüştür. Çekilen mikro yapı fotoğrafları ise SD katkılı betonlarda mikro çatlakların donma-çözülme etkisi ile daha da büyüdüğü görülmüştür (Topçu vd 2004).

Thomas *et al.* portland çimentosunun üçlü karışımları ve silis dumanı içeren betonun dayanıklılığı üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmada ASR'ye bağlı olarak genişlemeye kontrol etmek için %60 kadar uçucu kül gerekliliği görülmüştür. Bununla birlikte daha düşük oranlarda ve yüksek CaO uçucu küllerin (%20-30) kombinasyonları, ASR ile ilgili genleşmeyi azaltmada çok etkili ve aynı zamanda yüksek sülfat direnci kazandırdığı görülmüştür. Üçlü çimento karışımları klorür iyonlarının nüfusuna karşı büyük bir direnç göstermiş ve bu betonların yayılma özelliklerinin yaşla birlikte azalma gösterdiği görülmüştür (Thomas et al 1999).

Dorum vd yaptığı çalışmada uçucu kül içeren hidrate olmuş çimento hamuru hidratasyon ürünleri olan portlandit, kalsiyum silikat hidrat ve etrenjit ile birlikte hidrate olmamış klinker mineralleri aynı anda bulunduğunu gözlemlemiştir. Uçucu kül içeren hamurun, içermeyen hamura göre tüm hidratasyon günlerinde farklı oranlarda CH oluşturduğu ve tüm yaşlarda uçucu kül içeren hamurun CH miktarının, içermeyen hamura göre daha az olduğu görülmüştür. Bu durum hamurdaki hidratasyon gelişiminin farklı oranlarda gerçekleştiğini göstermektedir (Dorum vd 2010).

2. KURAMSAL TEMELLER

Beton, doğada tek başına var olmayan, ancak çimento, su ve agrega gibi katkı malzemelerinin belli oranlarda ve belli şartlarda karıştırılmasıyla oluşan başlangıçla akıcı ve zamanla sertleşerek dayanım kazanan yapay ve gevrek bir malzemedir. Çok fazlı kompozit bir malzeme olan beton, genel olarak çimento esaslı bağlayıcılar kullanılarak üretilir (Aydın 2004).

Betonun en göze çarpan dezavantajı, çok sayıda iç stres yığılmasına neden olan son derece kompleks yapının olmasıdır. Bazı iç mikro çatlaklar çoğunlukla taze veya sertleştirilmiş durumdaki betonda da meydana gelmektedir. Bu tür mikro çatlaklar, herhangi bir yük ve çevresel etki olmadan önce betondaki çimento hamuru-agrega arayüzlerinde oluşmaktadır. Dış ortamdan gelen yapısal yükler ve çevre koşulları altında çekme gerilmelerinin yoğunlaşması agrega çimento ara yüzeyinde meydana gelir ve buda mikro çatlakların büyümesine neden olur. Ara yüzey mikro çatlaklarının matrise dönüşmesi ve mikro çatlakların nihai olarak birleşmesi büyük çatlaklara neden olur ve betonun göçmesine neden olur (Aydın 2007).

Beton, sertleşmiş çimento hamuru içerisine çeşitli büyüklükteki agreganın gömülmesiyle oluşan kompozit bir malzemedir (Yip 1998).

Basınç dayanımı yüksek malzemelerinin bulunması uygulamadaki problemlerin çözümünde yeterli olmamış ve tek başına kullanılmaları hep sınırlı kalmıştır. Çünkü büyük açıklıkların geçilmesi sırasında eğilmeden dolayı bir takım çekme kuvvetleri oluşmakta ve çekme dayanımı yüksek malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır, işte bu tür yapılarda beton tek başına yetersiz kalmaktadır. Bu tür problemlerin çözümünde belki de akla ilk gelen çözüm, taşın kullanılmasına benzer bir biçimde yapı sistemine, kesitlerde yalnız basınç oluşturacak bir şekil vermektir. Ancak, bu tür yapı sistemleri geometrik yapısı gereği birçok durumda beklenen fonksiyonu karşılamayabilir. Akla gelen ikinci çözüm ise, çekme gerilmelerinin betonun içine yerleştirilen, çekme dayanımı ve

sünekliği yüksek yeni bir malzeme tarafından karşılanmasıdır. Bu ikinci çözüm mühendislik açısından çok daha uygun olan bir çözüm metodudur. Bu çözümün uygulanmasında, betonun basınç dayanımı ve çeliğin çekme dayanımından faydalanabilmek için bu iki malzemenin beraber çalışması gerekmektedir. Daha açık bir ifade ile basınç dayanımı yüksek olan malzemenin, çekme dayanımı yüksek olan malzemeyi sarması gerekmektedir. Donatı, etrafındaki beton kütleyle o şekilde kenetlenmelidir ki, donatı ve çevresindeki beton aynı deformasyonu yapmalıdır. Beton ve çeliğin birlikte çalışmasını sağlayan bu olay, "kenetlenme" veya "aderans" olarak adlandırılır. Betonarmenin temellerini oluşturan bu olay, çimento esaslı malzeme yani bağlayıcı aracılığı ile sağlanmaktadır. Bundan dolayı çimento esaslı malzemeler bizim için vazgeçilmezdir (Uzbaş 2008).

Modern beton teknolojisinde, çeşitli yollarla beton endüstrisinin ekonomisi üzerinde büyük etkisi olan mineral katkı maddelerinin ilavesi bilimsel açıdan büyük önem taşır. Çimento karışımlarının beton içine ilave edilebilen katkı maddeleri, çimento dozajının %5'ini aşmadan, belirli özellikleri iyileştirmek ya da özel karakteristikleri elde etmek için kullanılan sıvı ya da katı, organik ya da inorganik maddeler olarak tanımlanmaktadır. Diğer mineral katkı maddeleri farklı kimyasal ve mineralojik bileşimlere ve farklı parçacık özelliklerine sahip olduklarından betonun özelliklerini de içeren farklı özelliklere sahip olabilirler (Aydın vd 2007).

Betonun, tam olarak beklenen performansı göstermesi için betonun üretiminde kullanılacak olan malzemelerin özenle seçilmesi, karışım oranlarının çok iyi saptanması, malzemelerin karılma işlemi, taze betonun taşınma, yerleştirilme, sıkıştırılma işlemleri ve uygun kürün uygulanması gerekmektedir. İstenilen özellikteki betonun doğru yerde ve doğru şekilde kullanılabilmesi için özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bütün bu süreç sonunda bu parametreler beton kompozitinin içyapısını oluşturmaktadır.

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme farklı özellikleri olan iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilerek, malzemelerin olumsuzluklarını gidererek, iyi özellikleri ile yapay olarak üretilen malzemelerdir. Farklı özellikteki malzemelerin daha üstün özellikte bir malzeme oluşturmak için bir araya getirilmeleri geçmişte olduğu gibi günümüzde de yapılmaktadır. İnsanlığın ilk zamanlarında çamur tuğlalar samanla güçlendirilerek yaşam olanı yapmak için, günümüzde ise modern binaların ve yapıların yapımı için çimentonun çelik çubuklarla güçlendirilmesi için kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Kompozit malzeme üretiminde genel olarak bazı özelliklerin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerin arasında, mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma direnci, korozyon direnci, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklığa dayanıklılık, ısı iletkenliği veya ısıl direnç, elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç, akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu, rijitlik, ağırlık, görünüm gelmektedir (Chung 2010).

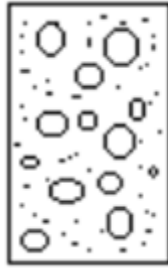
Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenlerin, oranları, dağılımları, morfolojileri, kristallik derecesi, kristalografik dokularının yanı sıra, yapı ve bileşenler arasındaki arayüzün bileşimi ayarlanarak çeşitli özellikler için uygun olarak tasarlanabilir. Bu güçlü şekillendirilebilme özelliğinden dolayı, kompozit malzemeler havacılık, otomobil, elektronik, inşaat, biyomedikal enerji ve diğer sektörlerde ilişkin teknolojilerin ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmaktadır.

Kompozit malzemede genelde dört koşul aranmaktadır: 1) İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması, 2) Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzlerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması, 3) Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması ve 4) Bileşenlerinin hiçbirinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, dolayısıyla bu amaçla üretilmiş olmasıdır (Ersoy 2001).

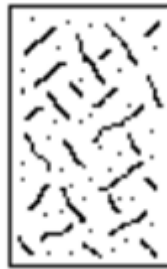
Kompozit malzemenin kullanım alanlarından biride inşaat mühendisliği alanıdır. İnşaat sektöründe kullanılan en önemli kompozit malzemelerin başında beton kompoziti gelmektedir. Beton kompoziti, bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun, agrega denilen kum çakıl malzemesinin su ile karıştırılarak gerektiğinde diğer katkı maddelerinin ilave edilmesiyle elde edilmektedir (Chung 2010).

Kompozit malzeme genel olarak bir matris malzemesi ve matris malzemesinin içerisinde dağılmış olan bir takviye malzemesinden oluşmaktadır. Bu doğrultuda pekiştirilme durumuna göre kompozitler, taneli kompozitler, lifli kompozitler ve tabakalı kompozitler olmak üzere üç başlık altında sınıflandırılabilir (Onaran 2009).

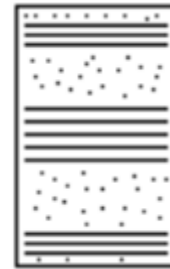
Taneli kompozit



Lifli kompozit



Tabakalı kompozit



Şekil 2.1. Kompozit mazemelerin sınıflandırılması

2.1.1. Taneli kompozitler

Kompozit malzemenin önemli bir grubunu “Taneli Kompozit Malzeme” oluşturmaktadır. “Tanelerle Donatılı Kompozit Malzeme” diye de adlandırılan bu kompozit malzeme türü, özellikle yapı alanında ayrı bir öneme sahiptir. Günümüzde, başta yapı sektörü olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılan ve vazgeçilmez bir öneme sahip olan beton ve özel türleri, taneli kompozitlerin çok önemli bir grubunu oluşturmaktadır. Hatta geniş anlamıyla beton malzeme adı, taneli kompozitleri tanımlamaktadır denilebilir (Ersoy 2001).

Taneli kompozit malzeme, çeşitli kaynaklardan elde edilen parçaların, bunları bağlayıcı nitelikteki bir malzeme içinde dağılmış olarak yer aldıkları malzeme grubudur. Burada taneler dağılı fazı, bağlayıcı ise matris malzemesini oluşturmaktadır. Bağlayıcı fazı oluşturan matris malzemesi için “Sürekli Faz” ifadesi de kullanılmaktadır (Ersoy 2001).

Taneli kompozitler, yukarıda belirtildiği gibi, çeşitli tanelerin bir bağlayıcı ile bağlanarak bir arada tutulduğu bir aglomere niteliğindedir. Bu oluşum içinde, genellikle sert taneler, sünek bir matris malzemesi bağlanarak bir araya getirilmekte ve malzeme üretilmektedir. Bu tür malzemeye örnek olarak, çimento ve agrega ile yapılmış çeşitli özelliklere sahip betonlar, polimer bağlayıcı ile agrega karışımları, kırmataş ile asfalt karışımları, doğal hafif agrega ile alçı hamura karışımları gibi malzemeler verilebilir (Ersoy 2001).

Tanelerle donatılmış olan kompozit malzemede, kullanılan tane çapı genelde 1 μm 'den daha büyüktür ve genellikle milimetre ile anılır. Taneciklerle güçlendirilmiş olan kompozitlerde ise tanecik boyutu çok daha küçük olup, 0,01-0,1 μm arasında değişmektedir. Bu gruba giren kompozit malzemede, dağılı fazın hacim oranı, toplam hacme göre genelde %25 ve üstünde değerler almaktadır (Ersoy 2001).

Taneli kompozitlerde asıl yük taşıyıcı kısım fazdır, dağılı taneler ise dolaylı olarak dayanımın artmasına katkıda bulunur. Tanelerle donatılı kompozitlerde matris malzemesi genelde yardımcı yük taşıyıcı niteliğindedir ve dağılık fazı oluşturan taneler matrisin şekil değiştirmesini engellerler (Ersoy 2001).

Yukarıda da belirtildiği gibi, taneli kompozitlerin ana maddeleri çok çeşitli kaynaklardan elde edilen, karışım üretiminde kullanılabilecek niteliklere sahip olan parçacıklar ve bağlayıcılardır. Ayrıca, üretilmesi hedeflenen kompozitin özelliklerinin kontrol edilebilmesi amacıyla, karışımlarda zaman zaman katkı maddeleri de kullanılabilmektedir. Taneli kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzeme, taneler, bağlayıcı ve katkı maddeleri olarak başlıca üç grupta ele alınabilir. Bağlayıcı fazı oluşturan matrisin içinde taneler dağılı olarak yer alırlar. Karışımlara, gerektiğinde

amaçlanan özellikleri kazandırabilmek için özel katkı maddeleri de katılmaktadır. Taneli kompozitlerin üretiminde kullanılan “taneli malzeme”, karışımın yapısı içinde homojen dağılı olarak yer aldığı varsayılan “dağılı fazı” oluşturmaktadır. Taneli malzemeyi meydana getiren tanelerin ortalama boyutları birbirine yakın olabileceği gibi, genellikle karşılaşıldığı sürece, taneler farklı büyüklüklerde de olabilmektedir. Bir bağlayıcı ile bir araya getirilerek, bütünü oluşturan bu malzemelere agrega adı verilmektedir (Ersoy 2001).

2.1.2. Lifli kompozitler

Liflerle donatılı kompozitler, kompozit malzemelerin önemli bir grubunu oluşturmaktadır. Bilindiği gibi, her malzeme çeşitli olumlu ve olumsuz özelliklere bir arada sahiptir. Tasarımcı ve üretici, amaçlarına uygun malzemeyi seçerken, bilinçli ya da bilinçsiz olarak birbirlerine seçenek oluşturan malzemeler arasında, nitelikleri her yönüyle değerlendirerek, içinde bulunulan koşullar altında en uygun olan malzemeyi seçmeyi hedeflemektedir (Ersoy 2001).

Değişik malzemelerin liflerle donatılarak çeşitli özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmaların teorik yönüyle ele alınışının epeyce yeni olmasına karşın ilk uygulamaların çok eskilere dayandığı bilinmektedir. Kerpiç malzemenin bitkisel elyaf ve samanla karıştırılarak yapılması, alçı hamurunda yine bitkisel lifler ile at kuyruğu ve yeleği gibi hayvansal liflerin, kılların kullanılması, asbest lifleri gibi inorganik malzeme kullanarak çimento bağlayıcılı malzemelerin donatılması herkesçe bilinen örneklerden birkaçıdır. Malzemenin liflerle donatılması, öncelikle mekanik dayanımları daha iyi olan kompozit malzeme üretmeye yöneliktir. Malzemeler, özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderebilmesi amacıyla lifler, teller, çubuklar veya değişik yapıda örgü malzemeye donatılmaktadır (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozit malzeme de, en basit haliyle iki fazlı bir kompozit olarak ele alınabilir. Kompozitin sürekli fazını, lifleri bir arada tutan ve kompozit içindeki hacim

oranının yüksekliği nedeniyle kompozitin ana bileşeni olarak da düşünebileceğimiz matris malzemesi oluşturmaktadır. Bu matris içinde donatı olarak kullanılan malzeme ikinci bir fazdır. Donatının etkinliği, donatı malzemesinin E-modülünün matrisin E-modülünden çok daha yüksek olmasına bağlıdır. Matrisin ve lif fazının E-modülü değerlerinin birbirine yakın olması halinde, lif fazı taşımaya yeterince katılamamakta ve dolayısıyla kompozit amaçlanan özelliklere sahip olamamaktadır (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozitlerde lifin taşımaya katılabilmesi için matris üzerindeki mekanik etkinin life iletilmesi gerekir. Burada lifle matris arasında herhangi bir kimyasal bağ yoktur ve iletim kayma kuvvetiyle olacaktır. Dolayısıyla lifle matris arasında, meydana gelebilecek kayma gerilmelerine dayanabilecek düzeyde bir aderansın bulunması gerekmektedir. Ayrıca, fazlar arasında kimyasal etkileşimin olmaması ve yine fazların ısı genişmesi değerlerinin kompozitin yapısını bozacak düzeyde farklılık taşımaması da öngörülmektedir (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozitlerde özellikle çekme, eğilme, çarpma dayanımlarında önemli artışlar olmaktadır. Dolayısıyla bu tip kompozit malzemede sözü edilen çekme, eğilme gibi gerilmelerin birim ağırlığa oranı diğer malzemelere göre çok daha yüksektir. Buna bağlı olarak daha başka özelliklerde de iyileşmeler görülmektedir (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozitler, fazların hacim oranları ve dağılımı açısından taneli kompozitlerden önemli farklılıklar gösterirler. Taneli kompozitlerde sürekli fazı oluşturan matris içerisinde parçalı malzeme dağılı faz olarak yer alır ve genellikle kompozitin yapısı içerisinde bu dağılı faz önemli yer tutar. Taneli kompozitlere göre bir diğer fark, bağlanan fazın matris içindeki boyutu ve konumuyla ilgilidir. Taneli malzemede dağılı faz, üç boyutu birbirine yakın parçalar şeklindedir. Boyutları, çeşitli nedenlerle üstten sınırlanmaktadır. Örneğin, genelde binalarda betonarmede kullanılan en büyük tane 31,5 mm'lik elekten geçen gruptur. Buna karşılık, liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde kullanılan liflerin boyları çok farklı olabilmektedir. Kompozite belirli boyda lifler kullanılabildiği gibi gereksinime ve koşullara bağlı olarak

donatım, kompoziti tümüyle kateden sürekli liflerle yapılabilmektedir. Dolayısıyla lif boyu çok farklı olabilmektedir (Ersoy 2001).

Tel, lif, kıl ve benzeri, bir boyutu diğer boyutlarına oranla çok fazla olan malzemenin hacim içindeki konumu, liflerle donatılı kompozitlere has bir özellik olan “lif yönü” ile ilgili bir diğer kriteri oluşturmaktadır. Lif yönü, kompozitin dayanımı ve liflerin taşımaya katkısı açısından önemli bir faktördür, dolayısıyla yönlendirilmiş lif donatılı kompozitler, değişik yönlerden farklı özellikler gösterirler. Liflerin matris içinde rastgele, gelişigüzel dağılı olmaları halinde, malzeme izotrop kabul edilir. Bu durumda kompozitin özellikleri yöne bağlı olarak değişmez (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozit malzeme, matrisin ve lif fazının özelliklerine bağlı olarak sünek matrisli ve kırılman lifli kompozitler, kırılman matrisli ve sünek lifli kompozitler şeklinde iki ana başlık altında ele alınır.

Sünek matrisli ve kırılman lifli kompozitlerde, malzemenin matris fazını epoksi, polyester, fenolik reçine, melamin reçinesi gibi organik maddeler oluşturur. Bu kompozitlerde, matris malzemesine oranla daha kırılman özellikler taşıyan cam ve seramik esaslı lifler, asbest lifleri, yüksek dayanımlı çelik teller kullanılır. Donatıda kullanılan lifin hacim oranı diğer gruba göre daha yüksek olup, %20-80 arasında değişmektedir. Bu tip sünek matrisli ve kırılman lifli kompozitlere örnek olarak, ülkemizde de yaygın üretimi ve malzeme dilimizde uzun yıllar, kısmen de hatalı biçimde, sadece donatıyı belirterek “Fiberglas” adıyla anılmıştır. Günümüzde “Cam Takviyeli Plastik” CTP adı yaygınlaşmıştır (Ersoy 2001).

Çimento, alçı gibi inorganik bağlayıcılar kullanılarak üretilen kompozitler, genel olarak kırılman matrisli ve sünek lifli sistemleri oluşturmaktadırlar. Bu tür kompozitlerde çeşitli organik veya inorganik esaslı lifler kullanılmakla birlikte, özellikle metal ve cam liflerinin kullanımı yaygındır. Kırılman matrisli bu kompozitlerde, kullanılan donatının hacim oranı, öncede belirttiğimiz gibi, sünek matrisli kompozitlerdeki lif oranlarının

çok altında kalmaktadır. Bazı özel uygulamalar dışında cam, metal ve bitkisel esaslı lifler için bu oran %0,5-5,0 arasında değişmektedir (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozitleri, genel bir değerlendirmeye, iki fazlı kompozit malzeme olarak kabul edebiliriz. Aslında bu tür kompozitlerin birçoğu iki den çok malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Örneğin, çelik tellerle donatılı beton, çimento, su, agrega ve çelik teller kullanılarak üretilir. Üretimde, gereksinime göre çeşitli katkı maddeleri, farklı agrega türleri kullanılabilir. Bu açıdan bakılacak olursa, kompozit, çimento hamuru ve agregadan oluşan “taneli kompozit malzeme” niteliğindeki bir matris ve çelik tel donatı fazından oluşmaktadır. Dolayısıyla kompozitin özellikleri, gerçekte sürekli fazı oluşturan çimento hamuru, taneli malzeme ve lifli malzemenin özellik ve miktarlarına bağlı olarak etkilenmektedir. Bu yapı aynı bakış açısıyla daha da ayrıntılı olarak ele alınabilir. Ancak, gerek kompozitin özelliklerini ifade edebilecek basitleştirilmiş modellerin kurulabilmesi, gerekse gerçekte bir bütün olarak matris özelliklerinin tanınması nedeniyle malzeme iki fazlı olarak ele alınmaktadır (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozitlerde matris, lifleri sararak bir arada tutan, yükleri aktaran, donatıyı dış etkilere koruyan sürekli fazı oluşturmaktadır. Matris malzemesi, bu işlevlerinin yanı sıra, kompozit bünyesindeki gerilmelerin bir kısmını karşılayarak taşımaya yardımcı olmakta ve liflerde meydana gelen çatlama ve kopmaları tolere ederek kompozitin tokluğunu artırmaktadır. Ancak yük taşımaya ikinci malzeme olarak katılma durumu basınç halinde değişmekte ve kompozitin basınç mukavemeti büyük ölçüde matrisin mukavemetine bağlı olmaktadır. Liflerle donatılı kompozitlerde matris malzemesi olarak metaller ve polimerler ile harç ve beton gibi seramik malzeme kullanılmaktadır (Ersoy 2001).

Metal Matris Malzemeleri: Kompozit üretiminde metal matris malzemesi olarak, bakır, alüminyum, titan, nikel, gümüş gibi metaller başta gelmektedir. Matris malzemesi ergimiş halde, moleküler yapıda, levha veya ince tabaka (folyo) şeklinde olabilmekte ve kullanılan üretim teknolojisine bağlı olarak dökme, karıştırma, presleme, elektroliz

yoluyla kaplama, haddeleme yöntemleriyle liflerle birleştirilmektedir. Bu birleştirme ve kompoziti oluşturma işleminde en önemli nokta, donaltmada kullanılacak olan yüksek dayanımlı lif, tel ve kılların (whisker) zedelenmemesi, tahrip olmaması, dolayısıyla özelliklerinin bozulmamasının sağlanmasıdır (Ersoy 2001).

Polimer Matris Malzemeleri: Malzeme olarak polimerler içyapılarına göre, termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır (Ersoy 2001).

Termoplastikler, düz veya dallı zincirlerden yapılmış maddelerdir. Zayıf, bir yapıya sahip olup (ikinci dereceden) Van der Waals bağlarıyla bağlanarak oluşmuşlardır. Yanal bağların zayıflığı nedeniyle, bu gruba giren malzemeler yükselen sıcaklık karşısında yumuşamaktadır. Sıcaklık azalınca malzemede yeniden sertleşme görülür. Sıcaklık etkisine bağlı olan bu yumuşama sertleşme özelliği, malzemenin yapısının buharlaşmayla bozulmadığı sürece devam etmektedir. Akrilikler, fluorokarbon esaslı plastikler, poliamidler ve PVC gibi vinil esaslı plastikler bu gruba girmektedir (Ersoy 2001).

Termosetler; Fenolik reçineler, polyester, silikon, alkid ve epoksi reçineler gibi malzeme bu gruba girmektedir. Polyester reçineler, cam takviyeli plastiklerin üretiminde en çok kullanılan matris malzemelerindendir. Bunlar, doymuş polyesterler ve doymamış polyesterler olarak iki grupta toplanırlar (Ersoy 2001).

Matris malzemesi olarak harç ve betonlar: Liflerle donatılı kompozitlerin üretiminde kullanılan önemli bir matris malzemesi grubunu da inorganik bağlayıcılarla hazırlanan harçlar ve betonlar oluşturmaktadır. Bu tür matris malzemesinin üretiminde kullanılan bağlayıcılar genelde çimento ve alçı olup, bu kompozitlerin kullanımı özellikle inşaat alanında yaygındır. Ayrıca yine bu alanda, doğrudan çimento ve alçı hamurlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı da görülmektedir (Ersoy 2001).

Alçı ve çimento hamurlarında, harçlarında ve betonlarında donatı olarak en çok kullanılan malzemeler çelik teller, cam lifi, polipropilen gibi polimer elyaf ve asbest

lifleridir. Bu matris malzemeleriyle birlikte genellikle süreksiz donatı oluşturan belirli boyda lifler kullanılmakta ve bunlar kompozit içinde gelişigüzel dağılı olacak şekilde katılmaktadır. Liflerle donatılı harç ve betonların üretiminde genelde üç temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar ön karıştırma, püskürtme ve fitil veya örgü elyaf kullanma yöntemleridir. Ön karışım yapılması halinde, kompozit içinde lifler serbest ve üç boyutta olmak üzere gelişigüzel dağılmaktadır. Püskürtme yönteminde ise matrise püskürtülen lifler, kesitte düzlemde dağılı olarak yer almaktadır. Fitil ve örgü lif kullanılması halinde ise donatı bir yönde ve sürekli olmaktadır (Ersoy 2001).

Çimento Bağlayıcı Matris Malzemesi: Çimento bağlayıcılı kullanılarak üretilen liflerle donatılı kompozitler, çimento hamurunda agrega bulunup bulunmamasına ve agrega varsa bunun boyutlarına bağlı olarak, çimento hamuru, harç ve beton adlarıyla üç grupta toplanmaktadır (Ersoy 2001).

Çimento Hamuru Matrisi: Çimento hamurunun matris olarak kullanıldığı başlıca malzeme çimento asbest kompozitleridir. Bu malzeme, doğrudan doğruya, çimento hamurunun değişik yöntemlerle asbest lifleriyle donatılmasıyla elde edilmektedir (Ersoy 2001).

Bilindiği gibi, çimento hamuru tek başına kullanılabilir niteliğe sahip olmayan, ancak harç ve beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan bir malzemedir. Taneli çimento kompozitlerine benzer şekilde, liflerle donatılı çimentoda da çimento hamuru bağlayıcı nitelikteki sürekli fazı oluşturmaktadır (Ersoy 2001).

Çimento ve lif kompozitlerinin uzun yıllardan beri üretilen en önemli türü olan çimento asbest kompozitler, ana maddeler olarak çimento, su ve asbest liflerinden üretilmektedir. Çimento matris içindeki asbest lifleri, üretimin özelliğine göre, ağırlıkça %9 ile %30 oranları arasında kullanılmaktadır (Ersoy 2001).

Çimento matrisli lif donatılı kompozitler, özellikle de çimentoyla mükemmel uyum sağlayan asbest lifli kompozitler, atmosfer koşullarına ve korozyona dayanıklı, zamanla

bozulmayan çürümeyen yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerdir. Kompozitin çekme dayanımı; lif oranı malzemenin yoğunluğu ve yüklemenin yönü gibi faktörlere bağlı olarak 10 MPa ile 25 MPa arasında, eğilme dayanımı da 30 MPa ile 60 MPa arasında değişmektedir (Ersoy 2001).

Çimento matris içinde asbest liflerine alternatif olabilecek donatı malzemelerinin özellikleri, bu malzemenin özelliklerine erişememektedir. Yaklaşık 1 μm çapındaki asbest lifleri, ortalama 10-20 μm çapındaki cam liflerinden çok daha incedir. Bunlar çimentoyla daha iyi bağlanmaktadır ve sonuçta daha etkili bir donatı malzemesi niteliğindedir. Aynı şekilde taş yünü ve asbest liflerine göre daha kalın bir donatı malzemesi niteliğindedir. Ağaç lifleri, torf gibi bitkisel lifler ise çimento hamuru içinde donatı olarak hem inorganik esaslı bu malzemenin özelliklerine uygun düşmemekte, hem de asitlere ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı kompozitler üretmeye olanak vermemektedir. Çimento hamurunun donatılmasında, çok kısıtlı da olsa, asbest liflerini de içeren, farklı kaynaklardan elde edilen liflerin karışımları da kullanılmıştır (Ersoy 2001).

Çimento Harcı ve Betonları: Çimento bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonlar da değişik niteliklere sahip liflerle donatılmaktadır. Harçlar ve beton, çimento bağlayıcılı ve çeşitli agregalar kullanılarak üretilen kompozit malzemelerdir. Genelde çimento hamurunun hacim kararsızlığı nedeniyle, asbest lifli çimento hamurları dışındaki tüm çimento ürünleri agrega katılarak üretilmektedir (Ersoy 2001).

Taneli kompozit malzeme diye adlandırılan bu malzemenin değişik özelliklere sahip lifler ve tellerle donatılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini hedef alan birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara halen de devam edilmektedir. Liflerle donatılı harçlar ve betonların özelliklerinin araştırılmasında genelde kompoziti oluşturan bağlayıcı malzeme taneli malzeme ve lifli malzeme gibi çeşitli fazlar tek tek dikkate alınmazlar. Dolayısıyla malzeme “çok fazlı kompozit malzeme” olarak değil matris olarak bağlayıcı harç fazı ve dağılı donatı fazı olarak da lif fazından oluşan “iki fazlı kompozit malzeme” olarak ele alınmaktadır (Ersoy 2001).

Liflerle donatılı kompozitler, daha önce de belirttiğimiz gibi, matris ve donatı fazının özelliklerine bağlı olarak sünek matris ve kırılğan lifli sistemler iki başlık altında toplanmaktadır. Örneğin çimento gibi inorganik bağlayıcılar kullanılan kompozitler kırılğan matris ve sünek lifli sisteme girmektedir. Çimento hamurunun kırılma birim uzamasının, donatı olarak kullanılan liflerin birçoğundan daha düşük olması bu sonucu doğurmaktadır (Ersoy 2001).

2.1.3. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler, değişik özelliklere sahip birden çok malzemenin bir yapıştırıcıyla birleştirilmesiyle oluştururlar. Bu tür kompozitler “Lamine Kompozit Malzeme” diye adlandırılmaktadır (Ersoy 2001).

Tabakalı kompozitler genelde levha malzeme niteliğindedir. Lamine kirişler veya direkler gibi elemanlar, parçaların üst üste yapıştırılması yoluyla laminat tekniğiyle üretilmektedir. Ancak bu malzemeler, son derece sınırlı bir grubu oluşturmaktadır. Üretimin büyük bir kısmı, boyutlarından biri diğer ikisine oranla daha küçük olan levha şeklindedir. Bu levhalar değişik nitelik gösteren tabakaların birleşmesiyle meydana gelirler (Ersoy 2001).

Çeşitli tabakaların birbirlerine yapıştırılmaları şeklindeki üretimin bir sonucu olarak tabakalı kompozit malzemeler yapısal nitelikleri bakımından diğer kompozit malzeme türlerinden farklılık göstermektedir (Ersoy 2001).

Tabakalı kompozit malzemeler çeşitli yönlerden farklılıklar gösteren tabakaların bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Bu farklılık, mukavemet, ısı iletimi, gözeneklilik, ağırlık, yüzey sertliği, suya ve diğer dış etkenlere karşı direnç gösterme gibi çok çeşitli yönlerden olabilmektedir (Ersoy 2001).

Tabakalı kompozitler en az iki tabakadan oluşur. Ancak dayanım ve mekanik özelliklerin önem taşıdığı ve kompozitin tabakalarının düzlemindeki birbirine dik iki ayrı doğrultuda birbirine yakın özelliklerin beklendiği hallerde, malzemenin hedeflenen bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi, aynı tür malzemedan de yapılabilmektedir (Ersoy 2001).

2.2. Bağlayıcı Malzemeler

Bağlayıcı malzemeleri genel olarak çeşitli taneli malzemeleri bağlayarak bir kütle meydana getiren ve bu özelliğini uzun süre koruyan malzemeler diye tanımlamak mümkündür. Bağlayıcı malzemeler, asfalt, bitüm gibi inorganik maddeler, çimento, kireç gibi inorganik kalsiyum esaslı bağlayıcılar, puzzolanlar ve sentetik reçineler gibi malzemeler olabilmektedir (Ersoy 2001).

Bağlayıcı malzemelerin özelliklerine göre bağlayıcılık kazanmaları farklı yollardan olmaktadır. Yapı alanında kullanılan bağlayıcıların katılaşması daha değişik şekillerde olmaktadır. Alçı, kireç, çimento gibi bağlayıcılara yapılarında kalsiyum bulunmaları nedeni ile kalsiyum esaslı bağlayıcılar olarak adlandırılmaktadır. Ancak bunlar katılaşma nicelikleri açısından farklılıklar göstermektedir (Ersoy 2001).

Aşağıda yapı alanında önem taşıyan başta çimento olmak üzere sık kullanılan bağlayıcılar kısaca anlatılacaktır.

2.2.1. Çimento

Betonun en önemli hammaddesi çimentodur. Kabaca, hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren maddelere çimento denilmektedir (Yalçın vd 2006). Çimento genel anlamda, belirli oranlarda karıştırılan kil, Fe_2O_3 ve kalker (CaCO_3) karışımının çeşitli sıcaklık seviyelerinde ($1200-1400^\circ\text{C}$) pişirilmesi sonucunda elde edilen, hava ve suda katılaşma

özelliği gösteren gri ve beyaz renkli inorganik esaslı bir bağlayıcıdır (Ersoy 2001). Başka bir ifade ile killi ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400-1500°C sıcaklıkla pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir (Yalçın vd 2006).

Klinker üretimi için gerekli olan başlıca hammaddeler kalsiyum oksit ve silisyum dioksittir. Kalkerden klinker için gerekli olan kalsiyum oksit, kilden silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksit gereksinimleri karşılanır. Klinker üretiminde kullanılan hammadde karışımlarında CaCO_3 içeriğinin genellikle %75-79 arasında kalmasına ve bunun sabit tutulması gerekir. Çünkü CaCO_3 içeriğindeki küçük bir değişiklik klinkerdeki dikalsiyum silikat (C_2S) ile trikalsiyum silikat (C_3S) yüzdelerinin değişmesine ve sonunda çimentonun mukavemetinin önemli ölçüde sapmasına yol açar (Yalçın vd 2006).

2.2.2. Kireç

Kireç, kireç taşının çeşitli sıcaklıklarda pişirilmesi sonucunda elde edilen, su ile karıştırıldığında cinsinde göre hava ve suda katılma özelliği gösteren, beyaz renkli inorganik esaslı bir bağlayıcıdır. Kireç içindeki kil miktarına bağlı olarak yalnız havada katılma özelliği gösteren hava kireci ve hem havada hem de suda katılma özelliği gösteren su kireci olarak iki şekilde olabilmektedir. Yapı kireçleri hava kireci olup, kireç sözcüğü yaygın anlamıyla hava kirecini ifade etmektedir (Ersoy 2001).

Kirecin üretilerek yapıda kullanacak duruma gelmesi iki aşamada olmaktadır. İlk olarak doğal kireç taşının pişirilmesi ile kalsiyum oksit haline geçmesi ve daha sonra kalsiyum oksidin suyla birlikte kalsiyum hidroksiti oluşturmaktadır. Bu oluşumda, CaO , sönmemiş kireç ve CaOH sönmüş kireç diye adlandırılmaktadır Bağlayıcı olarak kireç düşük dayanımlı bir matris oluşturur. Çimentonun icadına kadar bağlayıcı olarak yapı alanında çok fazla kullanılmıştır (Ersoy 2001).

2.2.3. Alçı

Alçı, çimento ve kireçte bağlayıcı olarak kullanılan inorganik bir malzemedir. Kalsiyum esaslı bir malzeme olan alçının hammaddesi doğada yaygın olarak bulunan doğal alçı taşı (jips) oluşturmaktadır (Ersoy 2001).

Alçıtaşı ile ilgili TS-370'te, bileşiminde en az %70 oranında $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ bulunan doğal kristalize taş olarak tanımlanır. Yapı alçıları alçı taşının uygun sıcaklıklarda kısmen dehidratasyona uğratılmasıyla elde edilmektedir (Ersoy 2001).

Alçının fiziksel ve dayanımla ilgili özellikleri üzerinde, alçının tane çapı ve pişirme koşulları da etkilidir. Ayrıca, alçı hamur ve harçlarının karışımında kullanılan su miktarı özellikler üzerinde önemli rol oynar. Kullanılan suyun, alçı miktarın ağırlıkça oranı şeklinde tanımlana su/bağlayıcı oranı artmasıyla malzeme daha boşluklu bir yapı kazanmaktadır. Dolayısıyla tüm özellikler bu değişen yapının göre değişmektedir. Alçının dayanımı üzerinde ıslanmada etkilidir. Asitlerden etkilenmeyen, suda az oran çözünen özelliği olan alçı malzeme asit karakterdedir (pH6) ve demire korozif etkisi olur. Boşluğu yapıları nedeni ile ısıl geçirgenlikleri düşüktür. Çimentonun aksine alçı su ile karıştırıldığında tek başına alçı hamuru olarak kullanılabilme özelliğine sahiptir ve matris malzemesi olarak alçı harçlarıyla birlikte alçı hamurlarıyla kullanılmaktadır (Ersoy 2001).

2.2.4. Puzolan

Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumlarda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir (Erdoğan 2003).

Puzolanik malzemeler genel olarak silisli ya da siliko-alüminyum veya bunların kombinasyonunda oluşmaktadır. Puzolanlar doğada hazır olan doğal puzolanlar ve endüstriyel atık sonucunda endüstriyel puzolanlar olarak bulunabilirler (Somerville 2004).

Puzolanik malzemeler tek başlarına su ile temas ettiklerinde serleşmezler, ancak ince öğütülüp su ile temas ettiğinde normal ortam sıcaklığında çözünen Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek dayanım kazandıran kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşiklerini oluştururlar. Bu bileşikler hidrolik çimentoların sertleşmesine benzemektedir. Puzolanlar esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 içermelidir geri kalan kısımda ise Fe_2O_3 ve diğer oksitler bulunmaktadır. Reaktif CaO içeriği önemli olmakla beraber reaktif SiO_2 içeriği kütlece %25'den az olmamalıdır. Puzolanik malzemeler kullanılırken doğru bir şekilde hazırlanması, yani üretim ve dağıtım durumuna bağlı olarak homojenize edilmiş, kurutulmuş ve iyi öğütülmüş olmalıdır (Somerville 2004).

Çizelge 2.1. Tipik doğal puzolanın kimyasal analizi

Kimyasal Bileşimi	Değişim Aralığı (%)
Silis	50-75
Alümin	10-20
Demir oksit	3-9
Kireç	2-9
Magnezyum	1-6
Sodyum oksit	1-3
Potasyum oksit	2-7

Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda silis+alümin+demir oksit içermesi gerekmektedir. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar aynen portlan çimentosunun hidratasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açar (Erdoğan 2003).

Doğal puzolanlar genellikle uygun kimyasal ve mineralojik bileşime sahip volkanik kökenli ya da tortul kayalardan oluşmaktadır. Bu puzolanların aktivitesi fiziksel şekillerine ve içerdikleri cam ve zeolit miktarına bağlıdır. Yüksek oranda kil minerali içeren puzolanların aktiviteleri önemli ölçüde düşmektedir (Somerville 2004).

Endüstriyel puzolanlar termal olarak işlem görmüş ve aktive edilmiş killer ve şeyler olup, kuşun, bakır, çinko ve ferro alaşımlar endüstrisindeki diğer ürünlerin hava ile soğutulmasından elde edilen cüruflardır. Endüstriyel puzolanlar çimentonun su ihtiyacını önemli ölçüde artırmadığından, betonun herhangi bir şekilde bozulmaya karşı direncini azaltmaz ve donatının korozyonunu artırmaz. Doğal puzolanlarda olduğu gibi reaktif silika ve cam içermesi arzu edilir (Somerville 2004).

2.2.5. Uçucu kül

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte enerji tüketimi de gittikçe artmaktadır. Enerji üretiminde kullanılan termik santrallerden açığa çıkan uçucu kül, çevreye zarar vermekle birlikte, toplanarak depolanıp bertaraf edilmesi ekonomik olmamaktadır (Topçu 2016). Hem çevresel hem de ekonomik sebeplerden dolayı çimento yerine doğal bağlayıcıların kullanılması hep araştırılmıştır. Bu doğrultuda düşük maliyetli ve kolay erişilebilir malzemelerin betonda kullanılması uygulaması son yıllarda geniş bir çalışma alanı oluşturmuştur (Oğuz vd 2003). Uçucu külde saha tecrübesinin artması ve çevre dostu yapı malzemeler için artan talebe bağlı olarak, beton sektörü üzerinden uçucu kül tüketimi gün geçtikçe artmaktadır (Çelik vd 2014)

Elektrik enerjisi üretmek için termik santrallerde yakıt olarak kullanılan pulverize kömürün yanmasıyla büyük oranda çok ince, bir miktar da nispeten biraz daha iri boyutta kül tanecikleri meydana gelir. Bu çok ince küller yakıt gazlarıyla bacadan çıkmakta, nispeten ağı olan iri küller ise taban külü olarak ocağın tabanında kalmaktadır. Bacadan çıkan küller uçucu kül olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan 2003).

Portland çimentosunun kullanımını en aza indirerek CO₂ salınımı azaltmak için son zamanlarda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Betonda çimento yerine uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi malzemelerinin kullanılması çimento tüketimini azaltmak için çimento endüstrisi tarafından ciddiyle ele alınmaktadır (Ranjbar vd 2014). Beton üretiminde çimentoya ilave olarak uçucu kül kullanılması, CO₂ emisyonunun azaltılması, çimento üretimi için gerekli enerjinin azaltılması, atık madde miktarının azaltılması ve doğal hammaddelerin korunması gibi birtakım amaçlar için faydalıdır (Jozic *et al.* 2006).

Uçucu kül doğası gereği siliko-alüminyum veya siliko-kalsiyumlu olmaktadır. Geçmişte puzolanik özelliği olabileceği gibi buna ek olarak hidrolik özellik de gösterebilirler. Uçucu küllerin tutuşma kaybı, kütle yüzdesinin %5'den fazla olmaması gerekir (Somerville 2004).

Puzolanın bileşimi ağırlıklı olarak SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oksitler içerir. Bu oksitler genellikle puzolanik aktiviteye neden olan amorf formunda bulunurlar. Uçucu kül ve Ca(OH)₂ parçası olan camsı yapıdan gelen Al ve Si oksitleri arasındaki reaksiyon sonucunda suda daha az çözünen kalsiyum alüminat hidratlı (CAH) ve kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) oluştururlar (Seslija *et al.* 2016). Uçucu kül portland çimentosu ve su ile karıştırıldığında, normal çimento hidratasyonu ile oluşan ürünlere benzer ürünler oluşur, ancak daha az geçirgen ve daha yoğun mikroyapı meydana getirir (Nath *et al.* 2011).

Uçucu küllerin uygun kullanımı ile betonda yeterli hatta daha üstün teknik performans elde edilebilmektedir. Uçucu kül içeren betonlar genellikle işlenebilirliği daha yüksek, hidratasyon ısıları daha düşük betonlardır. Bu betonların erken yaşlardaki basınç dayanımları uçucu kül içermeyen betonlara kıyasla daha düşük olmasına karşın ileriki yaşlardaki dayanımları neredeyse aynı hatta bazen daha yüksek seviyelere çıkabilmektedir. Bu tip betonların çevresel etmenler sebebiyle oluşabilecek bozulmalara karşıda daha dayanıklı betonlar olduğu bilinmektedir (Tangüler vd 2015). Uçucu kül, betonda mukavemeti arttırmak, geçirgenliği azaltmak ve hidratasyon ısını azaltarak

teknik avantaj sağlamak için tamamlayıcı bir çimento malzemesi olarak kullanılır (Kruse *et al.* 2012).

Çizelge 2.2. Tipik uçucu kül analizi

Kimyasal Bileşimi	Silisli Uçucu Kül (%)	Silisli Uçucu Kül (%)
Silis	47-54	18-25
Alümin	28-35	12-15
Demir oksit	4-12	6-8
Kireç	1-4	43-49
Magnezyum	1-2,5	2-3
Sülfat (SO ₃ gibi)	0-1	5-9
K ₂ O	1-6	5
Na ₂ O	0,2-2	
Yanma kaybı	2,5-14	2-4

ASTM C618 standardına göre antrasit veya bitümlü kömür yakarken üretilen F sınıfı uçucu küllerde normal olarak var olan silika, alümin ve ferrit oksit toplamda minimum %70 olması istenir. Ayrıca SO₃ içeriğinin %5, nem içeriğinin %3 ve tutuşmasında %6'nın altında olması gerekir (Somerville 2004).

Uçucu küllerde çok yüksek oranda yer alan oksitler, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₃O₃'dür. Bunların yanı sıra bir miktar CaO, MgO, C ve Na₂O'da bulunabilmektedir. Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1-150 µm arasında değişiklik gösterebilmektedir. Normal olarak, 2,1-2,7 gr/cm³ yoğunlukta olup, renkleri açık griden koyu griye uzanan tonlardadır (Erdoğan 2003).

Normal linyit ve alt bitümlü kömürden üretilen uçucu kül ise C sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. Bu durumda oksitlerin toplamı minimum F sınıfı uçucu küldeki gibi, diğer şartlar ise minimum %50 oranında olması gerekir (Somerville 2004).

2.2.6. Silis dumanı

Silis dumanı, yüksek oranda amorf silis içeren çok ince küresel parçacıklardan oluşan malzemedir. Silis dumanı, silisyum ve ferrosilikon alaşımların üretiminde elektrik arkı fırınlarında kömür içeren yüksek saflıkta kuvartzın ayrıştırılmasından elde edilir (Somerville 2004). Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımlarının üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızla hızla soğutulularak yoğunlaştırılması sonucu elde edilen ve %85-%98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip ince parçacıklardan oluşan malzeme silis dumanı olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan 2003).

Çimento içerisindeki silis dumanı oranı kütleye göre %5 i aşması (yani temel bir bileşen oluşturursa) yalnızca şu şartlarda kullanılmalıdır: Amorf silika (SiO_2) oranının kütlenin %85'ine büyük, yanma kaybının kütlenin %4'ünden küçük, özgül yüzey alanının ise $15 \text{ m}^2/\text{gr}$ 'dan büyük olması gerekir (Somerville 2004).

Silis dumanının çok ince tanelerden oluşmuş olması, taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta ve su ihtiyacını artırmaktadır. Bu sebeple yüksek dayanım beton için katkı maddesi olarak silis dumanı kullanıldığı zaman su azaltıcı katkı da kullanılmalıdır (Erdoğan 2003).

2.2.7. Yüksek fırın cürufu

Demir elde edebilmek için, demir cevherinin yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda, kok kömürü yakılarak çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılarak oksijen ve yabancı maddelerden arındırırken bu fırınlarda kalker taşı da ısıtılmaktadır. Sıcaklığın etkisi ile kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit ve karbon dioksit gazları oluşturarak fırını terk etmektedir. Geriye eriyik durumda olan CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , MnO , S gibi yabancı maddeler kalmaktadır. Fırınlarda demirin üstünde biriken bu yabancı maddeler dışarı çıkarılarak yüksek fırın cürufu elde edilmektedir (Erdoğan 2003).

2.3. Yapı Malzemesi Olarak Beton (Tanım ve Genel Bilgiler)

Beton, doğada tek başına var olmayan, ancak çimento, su ve agrega gibi katkı malzemelerinin belli oranlarda ve belli şartlarda karıştırılmasıyla oluşan başlangıçla akıcı ve zamanla sertleşerek dayanım kazanan yapay ve gevrek bir malzemedir. Çok fazlı kompozit bir malzeme olan beton, genel olarak çimento esaslı bağlayıcılar kullanılarak üretilir (Aydın 2004).

İnşaat mühendisliği alanında taneli kompozit dendiğinde ilk akla gelen malzeme olan beton, çok farklı alanlardaki değişik gereksinimlere cevap veren nitelikteki uygulamalarıyla çağımızın en önemli yapı malzemelerinden biridir. Değişik özelliklere sahip beton farklı türleriyle, günümüzde yapı alanında vazgeçilmez bir malzeme niteliği taşımaktadır (Ersoy 2001).

Betonun çok değişik yapılarda çok değişik amaçlarla kullanılan önemli ve popüler bir yapı malzemesi olmasının nedenleri, bu malzemenin sahip olduğu üstün özelliklerden ileri gelmektedir. Betonu diğer yapı malzemelerinden daha elverişli kılan betonun avantajları olarak adlandırmak mümkündür (Erdoğan 2003).

Betonun avantajları; taze betonu plastik özelliği nedeni ile istenilen şekil ve boyutlarda beton elmanlar ve yapıdaki yerinde üretildiği gibi, bir fabrika da önceden üretilebilir olmasıdır. Beton dökümün yöntemlerinde çeşitlilik ve kolaylık bulunmaktadır. Ayrıca sertleşmiş beton oldukça yüksek basınç mukavemetine sahip olmakla beraber sertleşmiş beton hizmet gördüğü süre boyunca çevrede oluşan yıpratıcı etkenlere karşı diğer yapı malzemelerinin çoğundan daha dayanıklıdır, bu sebeple bakım işleri ve masraf gerektirmemektedir. Bunlara ilave olarak, çelik donatılarla çok iyi aderans gösteren, diğer yapı malzemelerine göre daha ekonomik ve estetik amaçla kullanılmaya uygun özellikte bir malzeme olması betonun diğer avantajlarıdır (Erdoğan 2003).

Yukarıda bahsedilen avantajların yanı sıra betonun diğer yapı malzemelerine göre bazı eksik yanları da bulunmaktadır, bu eksiklikler betonun dezavantajı olarak

adlandırılabilir. Betonun en büyük dezavantajı çekme dayanımı düşüktür ve gevrek olmasıdır. Ayrıca beton çevreden maruz kalabileceği ıslanma-kuruma veya sıcaklık değişiklikleri karşısında bir miktar hacim değişikliği, birçok yapı malzemesi gibi, sabit yükler altında zamanla kalıcı deformasyon gösterebilmektedir. Geçirimli yapıya sahip olması içerisine sızacak su ve zararlı maddeler betonun dayanıklılığı azaltmaktadır. Betonu bu dezavantajının bilinmesi ve bu eksikliklerin giderilmesi için tedbirlerin alınması gerekir (Erdoğan 2003).

2.3.1. Betonu oluşturan malzemeler

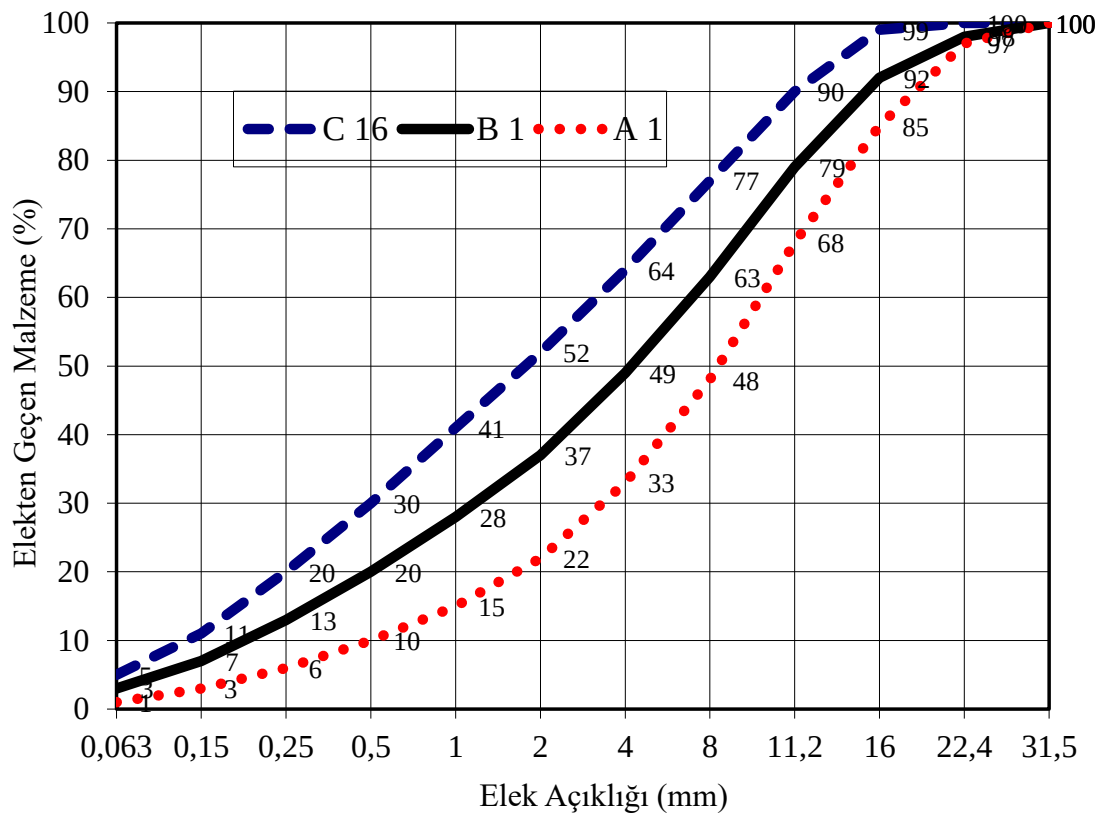
Beton çimento, ince agrega, kaba agrega, su ve gerektiğinde çeşitli kimyasal ve/veya mineral katkıları içeren kompozit malzemedir. İyi bir betonda tüm ince agrega tanelerinin çimento hamuruyla; tüm kaba agrega tanelerinin de harçla bütünüyle kaplanmış olması gerekir. Bu sistem içindeki bağlayıcı malzeme olan çimentonun suyla reaksiyonu (hidratasyon) sonucunda beton dayanım kazanır (Özkul vd 2004).

2.3.1.a. Agrega

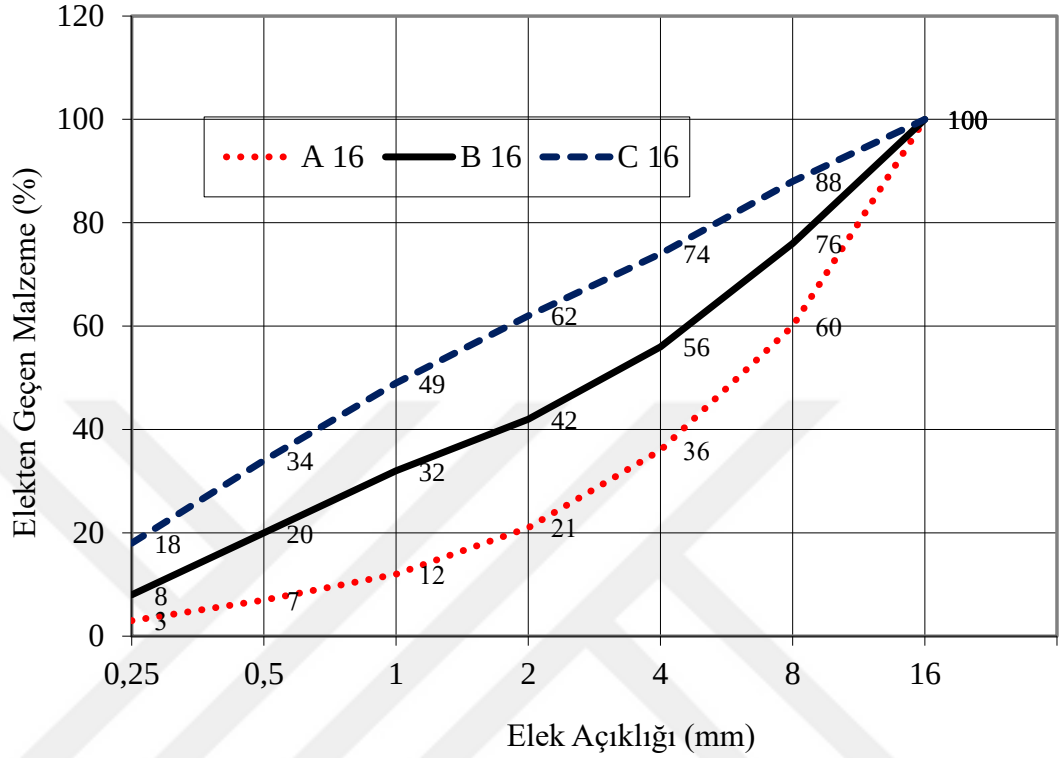
Çimento esaslı malzemelerin üretiminde %50-75 oranında agrega kullanılır. Bu oranda agrega kullanımı beton üretim giderini düşürse de teknik açıdan zamana bağlı olarak meydana gelebilecek olan hacim değişimini engelleyerek buna bağlı olarak beklenen çatlakları azaltması ve istenen dayanımı sağlamada etkin rol alması daha önemlidir. Genel olarak beton üretiminde kullanılan agregaların gradasyonu, en büyük dane boyutu, özgül ağırlığı, şekli, yüzey dokusu, ısısal özellikleri, elastiklik modülü vb. birçok özelliği göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Genel olarak agregalar yeryüzündeki kayalarından üretilir ve yer kabuğunu meydana getiren kayaların oluşumu ve değişimleri petrografinin, bu kayaların içindeki mineral ve madenleri mineralojinin, tabakalaşması statigrafinin ve sınıflandırılması ise sedimentolojinin araştırma konusudur. Nükleer enerji santralleri gibi büyük ve önemli yapıların projelendirilmesi ve stabilite hesaplarının yapılmasında betonun büyük bir

kısmını temsil eden agreganın fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, ani veya zamana bağlı deformasyonlarının dikkate alınması gerekir. Dolayısıyla, agregayı oluşturan kayaçların jeolojik, kimyasal, fiziksel, mekanik, elastik ve teknolojik özellikleri araştırılmalıdır. Ayrıca beton üretimi ile doğrudan ilgisi bulunmayan herhangi bir endüstri kolunda yan ürün veya atık malzeme olarak ortaya çıkan malzemelerden üretilen yapay agregalar da göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.2. Referans granülometri eğrisi- $d_{max}=31,5$ mm



Şekil 2.3. Referans granülometri eğrişi- $d_{max}=16$ mm

Agregaların beton içerisinde dağılımı ve gradasyonu betonun uniformluluğunun sağlanabilmesi açısından önem arz eder (Aydın 2004).

Agreganın fiziksel özellikleri: İyi nitelikteki bir agrega temiz, sert ve sağlam olmalı, bunların yanında suyun etkisi ile yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentoların bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korumasını tehlikeye düşürmemelidir (Özkul vd 2004).

Genel olarak agregaların fiziksel özellikleri göz önüne alındığında agreganın nemi, birim ağırlığı, özgül ağırlığı, kompaktitesi, granülometrisi (tane dağılımı) ve incelik modülü ilk olarak akla gelmektedir.

Birim ağırlık agreganın taneler arasındaki boşluklar da dahil birim hacminin ağırlığıdır. Agregaların özgül ağırlığı gerçek birim hacmine karşılık gelen ağırlığı olarak tanımlanır. Agregaların özgül ağırlığı beton karışım hesaplarının yapılması için gerekli olup, genel olarak 2,2 ila 2,7 kg/dm³ arasında değişmektedir (Güner vd 2000).

Kompasite, bir agreganın birim ağırlığı ve özgül ağırlığının bilinmesiyle yani özgül ağırlığın birim ağırlığa oranı olarak tanımlanmaktadır (Özkul vd 2004). Kompasitenin düşük olması porozitenin yüksek olması anlamına gelir. Porozitenin yüksek olması ise, agreganın donmaya ve çevre etkilerine dayanıklılığını azaltır. Agregaların %12'den az su emmesi normal kabul edilir. Boşluklu malzemelerin donmaya karşı dayanıklı olması için doyma derecelerinin %80'den küçük olması gereklidir (Güner vd 2000).

İncelik modülü, bir agreganın granülometrik bileşimi hakkında bilgi veren tek bir sayıdır. İncelik modülü, her bir eleğe karşı gelen % ordinatların, 100'den farklarının toplanması ve bu toplamın 100'e bölünmesiyle elde edilir. Agregataneleri küçüldükçe incelik modülü azalır, taneler irileştikçe incelik modülü artar. Aynı incelik modülüne sahip agregaların granülometri eğrileri farklı olabilir veya diğer bir ifade ile farklı granülometri eğrilerine sahip agregaların incelik modülleri aynı kalabilir. Bu nedenle herhangi bir agreganın granülometrisi hakkında kesin bilgi isteniyorsa, agreganın granülometri eğrisi bilinmelidir (Özkul vd 2004).

Beton içerisinde miktar olarak çok bulunan ve betonun dayanımı üzerinde en etkili malzeme agregalardır. Bu sebeple agregaların dağılımı yani granülometrisinin bilinmesi çok önemlidir.

Agrega yığnında bulunan tanelerin oranlarının belirlenmesine granülometri denir. Yüksek mukavemetli beton üretebilmek için agregat boyutları çok önemlidir. Bunun için granülometrik bileşim bulunmalıdır. Bulunan değerlere göre en az boşluklu beton için hangi agregadan hangi oranda alınacağı belirlenir. Yığın içindeki agregada değişik büyüklükte taneler vardır. Biz granülometri yoluyla bu tanelerin yığın içindeki oranlarını belirleriz. Agregatanelerinin oranları betonun özelliklerine önemli ölçüde

etkiler. Bu yüzden granülometriyi tespit eder ve standartlarla karşılaştırırız, şayet uygun değil ise granülometriyi uygun hale getiririz (Güner vd 2000).

Agregaların mekanik özellikleri: Agreganın mekanik özellikleri olarak betona etki eden başlıca özellikler, agreganın aşınma dayanıklılığı, basınç dayanımı, tokluğu ve sertliğidir. Agreganın elastisite modülü ve poisson oranı da mekanik özellikler arasında yer almaktadır. Agregaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi her zaman ve her türdeki beton için gerekli olmamaktadır. Ancak, özel amaçla kullanılacak beton yapımında veya aşınmaya maruz kalacak yerlerde kullanılacak betonlardaki agreganın mekanik özellikleri önem kazanmaktadır (Erdoğan 2003).

Yüksek dayanımlı beton elde etmek için mekanik dayanımı belirli değerlere ulaşan agregalara gereksinim vardır. Bu nedenle agregaların tane dayanımlarını da belirlemek gerekir (Özkul vd 2004). Türk Standartların'a göre agreganın basınç dayanımı 1000 kgf/cm²'den az veya agreganın aşınma dayanımında kuşku duyuluyor ise, betonda kullanılacak agreganın aşınma dayanıklılığı deneyleri araştırılmalıdır. Agreganın aşınma dayanıklılığı TS 3694 ve ASTM C131 standardına göre yapılmaktadır. Her iki standartta "Bilyalı Tambur Deney Yöntemi" diğer adıyla "Los Angeles Aşınma Deneyi" yöntemini kullanmaktadır. TS 3694'e göre aşınmaya dayanıklı agregalarda, bilyalı tamburun 100 ve 500 devir döndürülmesi sonucu ortaya çıkacak aşınma miktarı, sırasıyla %10 ve %50'den fazla olmamalıdır. Betonda kullanılan agregaların basınç dayanımı ortalama olarak 1500-2000 kgf/cm² olmaktadır. Nehir yataklarından elde edilen agregaların genellikle basınç dayanımı yüksek olmaktadır. Agregaların elastisite modülü ve poisson oranları betonun deformasyon özelliklerini etkilemektedir. Normal ağırlıklı agregalarda poisson oranı 0,15-0,34 arasında değişmektedir (Erdoğan 2003). Ayrıca, soğuk iklimlerde üretilen betonun donma etkisiyle yüzeyinin soyulmaması ve bir bütün olarak betonun parçalanmaması istenir. Betonun dona dayanıklılığında agrega önemli rol oynar. Bu nedenle donma etkisinde kalacak betonlarda kullanılacak agreganın da dona dayanıklı olması istenir. Agreganın dona dayanıklılığı esas olarak TS 706 EN 12620, TS EN 1367-2'de belirtilen dona dayanıklılık deneyleri ile belirlenir (Özkul vd 2004).

Agregada zararlı maddeler: Zararlı maddeler, betonun prizine veya sertleşmesine zarar veren, betonun dayanımını azaltan parçalanmasına neden olan veya betonun içindeki donatının korozyonuna karşı korunmasını tehlikeye düşüren maddeler olarak tanımlanır (Özkul vd 2004).

Beton agregaları içinde bulunacak organik maddeler betonun prizini ve sertleşmesini geciktirerek dayanımın düşmesine neden olabilir. Agregada içerisinde betona zarar verecek organik madde olup olmadığı TS 3673 ve TS 3820 standartlarında verilen yöntemlerle tespit edilmektedir. Boyutu 0,063 mm'den az olan kil ve silt gibi ince maddelerin agregada içerisinde fazla olması betonlarda su ihtiyacını artırmaktadır. Ayrıca agregada yüzeyinde bir tabaka oluşturarak agregada çimento hamuru arasındaki aderansı azaltmaktadır (Erdoğan 2003). Agregalarda kömür ve linyit taneleri, odun parçaları, ayrılmış şist gibi mineral kökenli hafif maddelerin belirli bir miktarın üzerinde olması betonun dayanımı çok düşürmekle birlikte dona maruz kaldığında kolay parçalanabilmektedir. Hafif maddelerin hacim sabitliği olmadığından yüzeye yakın yerlerde şişip beton yüzeyine patlatarak, betonun dayanıklılığı ve durabilitesini önemli şekilde etkiler (Özkul vd 2004).

Bazı agregalar içerisinde bulunan aktif mineral bileşenler ile betona genellikle çimentonda gelen sodyum ve potasyum alkalileri arasında alkali-silika reaksiyonları meydana gelmektedir (Özkul vd 2004). Alkalilerle agregada arasında yer alan reaksiyonlar bazen beton yapımından aylar, hatta yıllar sonra oluşmaktadır. Bu jellerin oluşmasıyla, sertleşmiş betonda çatlamlar, kırılmalar olmaktadır (Erdoğan 2003).

2.3.1.b. Çimento

Temel hammadde olarak kullanılan CaCO_3 içeriği yüksek kireç taşı türleri ve kil ile daha az oranda boksit, demiroksit gibi diğer mineraller uygun oranlarda karıştırıldıktan sonra pişirme denilen kimyasal tepkimelere hazırlık olarak ince öğütülür ve iyice karıştırılır. Kuru ya da yaş ortamda hazırlanan bu karışım yüksek sıcaklıklarda pişirilerek, tepkimelere sokulur, elde edilen ara ürüne klinker denir. Klinkerin alçı taşı

ile birlikte öğütülerek, çimento olarak adlandırılan ve hidrolik bağlayıcı özelliği olan, yapı malzemesi üretilir (Kuleli 2010).

Çimento dünyada en çok kullanılan insan yapısı malzemelerden birisidir. Çimentodan yapılan yapı malzemesi beton dünyada adam başına sudan sonra en çok tüketilen temel bir malzemedir. Ortalama çimento tüketimi, dünyada 2007 yılında 420 kg/kişi/yıl iken Türkiye de 2007 yılında 601, 2009 da ise 585 kg/kişi/yıl olmuştur (Kuleli 2010).

Çimento denilince ilk akla gelen portland çimentosudur. Son yıllarda doğal ve yapay birçok puzolanik madde değişik oranlarda klinkere katılarak, portland çimentosuna göre değişik özellikler taşıyan çimentolar üretilmiştir (Yalçın vd 2006).

Portland çimentosu esas olarak, killi ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve 1400-1500°C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir (Yalçın vd 2006). Hammadde karışımının döner fırınlarda pişirilmesi sonucu ortaya çıkan ve klinker yapısı dolayısı ile çimentonun yapısını oluşturan ana bileşenler aşağıda gösterilmiştir (Erdoğan 2003).

Çizelge 2.3. Çimentonun anabileşenleri

Anabileşen	Kimyasal sembolü	Çimento kimyasına göre sembolü
Dikalsiyum silikat	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiyum silikat	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Trikalsiyum aluminat	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiyum aluminoferrit	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Çimento ve suyun birleştiği andan itibaren bu iki malzeme arasında hidratasyon olarak adlandırılan kimyasal reaksiyon başlamakta ve devam etmektedir. Önceleri, yumuşak ve plastik durumda olan çimento hamuru, zaman ilerledikçe daha az plastik duruma

gelmekte ve katılışıp sertleşmektedir. Çimento hamurunun katılma göstererek şekil verilemez bir duruma gelmesine priz alma denilmektedir. Bu safhadan sonraki duruma sertleşmiş çimento hamuru denilmektedir. Çimento hamuru, beton karışımı içerisinde yer alan agrega tanelerinin yüzeyini kaplamakta, aralarındaki boşlukları doldurmakta ve taneleri bağlayarak bu kompozit malzemenin tek bir malzeme gibi davranmasını sağlamaktadır. Ana bileşenlerin su ile reaksiyonu sonucu oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcılık özeliğine etkisi farklı olmaktadır (Erdoğan 2003).

Çizelge 2.4. Çimento anabileşenlerinin reaktif özellikleri

	Ana bileşen			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon ısısı	Orta	Az	Çok yüksek	Orta
İlk günlerde dayanıma katkısı	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Sonunda dayanıma katkısı	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Portland Çimentosunun Karmaşık Bileşenleri: X-ışınları kırılımı analizleri (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi içyapıyı inceleyen yöntemler, portland tipi çimentolarda aşağıda belirtilen beş fazın kesinlikle bulunduğunu göstermiştir. Bunlar; alite (C₃S), belite (C₂S), felite (C₂S), C₃A ve celit (C₄AF) fazlarıdır (Baradan vd 2012).

Silisin (SiO₂), kireçle (CaO) birleşmesi sonunda aşağıda kimyasal formülleri ve kısa gösterimleri verilen dört tür kalsiyum silikat meydana gelir (Baradan vd 2012).

<u>Formülü</u>	<u>Kısa Gösterimi</u>	<u>Açıklaması</u>
CaO.SiO ₂	CS	Kalsiyum monosilikat (veya silikat)
3CaO.2SiO ₂	C ₃ S ₂	Trikalsiyum disilikat
2CaO.SiO ₂	C ₂ S	Dikalsiyum silikat
3CaO.SiO ₂	C ₃ S	Trikalsiyum silikat

Kalsiyum monosilikat kireçle silisi belirli bir sıcaklık derecesinde laboratuvarda ergitmek suretiyle elde edilir. C_3S_2 yuvarlak taneler halinde olup, bu cisimde priz yapmadığından bağlayıcılık açısından önemli değildir. C_2S çimentonun yavaş sertleşip, bir haftadan sonra dayanım kazanmasını sağlar. C_3S silikatının en önemli özelliği çimentonun prizini çabuklaştırması ve hızlı dayanım kazandırmasıdır (Baradan vd 2012).

Çimento fırınında yüksek sıcaklığında etkisiyle alüminin kireçle birleşmesi sonucunda aşağıda formülleri ve kısa gösterimleri verilen dört tür kalsiyum alüminat oluşur (Baradan vd 2012).

<u>Formülü</u>	<u>Kısa Gösterimi</u>	<u>Açıklaması</u>
$5Al_2O_3.3CaO$	C_3A_5	Trikalsiyum penta alüminat
$CaO.Al_2O_3$	CA	Kalsiyum alüminat
$5CaO.3Al_2O_3$	C_5A_3	Pentakalsiyum trialüminat
$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	Trikalsiyum alüminat

CA su ile hızlı bir reaksiyon yaparak katılaşır ve kısa zamanda yüksek bir dayanım kazanır. C_5A_3 su ile priz yapma özelliğine sahiptir. C_3A 'nın su ile reaksiyon yapma yeteneği çok yüksektir. C_3A su ile çok hızlı ve şiddetli reaksiyon yapar ve çok ısınır. C_3A 'nın çimentoda fazla miktarda bulunması prizin çok erken başlamasına neden olabilir. Çimentonun hızlı prizini engellemek için fırından çıkan klinkere ağırlığının %3-6 arası alçıtaşı ilave edilmektedir. Böylece C_3A , su ve alçı ayrı bir reaksiyona girerek iğne gibi uzun, hegzagonal kristal yapılı genleşen tipte $C_6AS_3H_{30-32}$ (Etrenjit ve sülfalüminatların) oluşmasına yol açar. C_3A 'nın çimentoya sağladığı olumlu bir etki Cl iyonlarını bağlama yeteneğine sahip olmasıdır. C_3A değeri düşük olan çimentolar özellikle sülfatlı zeminler için uygundur (Baradan vd 2012).

Diğer Karmaşık Bileşimler: XRD analizi, optik veya taramalı elektron mikroskobu ile inceleme, kimyasal ve termik analiz yöntemleri uygulanarak yapılan çalışmalarda,

Fe_2O_3 'ün, Al_2O_3 ve CaO ile birleşmesi sonunda aşağıda formülleri ve kısa gösterişleri verilen iki karmaşık bileşiğin oluştuğu anlaşılmıştır (Baradan vd 2012).

<u>Formülü</u>	<u>Kısa Gösterimi</u>	<u>Açıklaması</u>
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Tetrakalsiyum alüminoforit
$6\text{CaO}.2\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$	

C_4AF çimento fırınında klinkerleşme sıcaklığını düşürdüğünden yararlıdır. İlkel maddeler arasında çok az miktarda Na_2O ve K_2O alkali oksitleride bulunur. İlkel maddeler arasında bulunan MgO pişirme esnasında başka maddelerle birleşmez (Baradan vd 2012).

Portland Çimentosunun Hidratasyonu ve Hidratasyon Ürünlerinin Özellikleri:

Kalsiyum silikatlar çimentonun esas iskeletini oluşturur. Hidratasyon sonunda C_3S ve C_2S benzer ürünler oluşturur. Bu ürünler C-S-H ve sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)'dir. Jel sözcüğü, koloidal katı malzeme topluluğunu ifade etmektedir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ise portlandit olarak adlandırılır (Baradan vd 2012).

Çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran C-S-H moleküler büyüklükte olup, çimento taneciklerinden yaklaşık 1000 kat daha küçüktür. C-S-H'nin oluşması ile bu parçacıkların arasındaki Van Der Waals kuvvetleri bağlayıcı özellik yaratmaktadır. C-S-H jelleri, zayıf kristalli (amorfa yakın) koloidal parçacıklardan oluşur.

Çimentonun veya bir bağlayıcı maddenin dayanım kazanması şu üç olayın birbirini izlemesi sonucunda meydana gelir. Bu olaylar, çimentoyu oluşturan maddelerin su ile yaptığı kimyasal reaksiyon sonucu oluşan hidratasyon, priz ve priz sonrası dayanım kazanma şeklinde gerçekleşen mekanik bir olaydır (Baradan vd 2012).

Hidratasyon Olayı: Hidratasyon olayı zamanın bir fonksiyonu olarak gelişir. Hidratasyon kinetiğinin hızını etkileyen faktörler dayanım kazanma hızını da etkiler.

Hidratasyon, su ile çimento içerikleri arasındaki kimyasal reaksiyon, zaman bağımlılığının en önemli özelliklerinden biridir (Aydın vd 2007).

Karmaşık bileşenlerin su ile yaptıkları reaksiyon sonucu meydana gelen hidrate bileşenlerde su dört şekilde bulunur. Boşluklarında yer alan serbest su, cisimlerin yüzeyi tarafından Van Der Waals kuvvetleri ile tutulan adsorpsiyon suyudur. Ayrıca, cismin yapısında yer almakla beraber, cisim ile su arasında kimyasal bakımdan bir birleşme olmadan suyun cisimden ayrılmasıyla cismin fiziksel yapısı tamamen bozulan hidratasyon ve kristalleşme suyudur. Ayrıca oluşum suyu, cisim içinde molekül halinde (yani H₂O) olarak bulunmamaktadır. Birçok durumda bu oluşma suyunun ayrılması ile cismin yapısı tamamen değişir (Baradan vd 2012).

Hidratasyon kinetiği genellikle üç şekilde izlenebilir. Çimentonun su ile karşılaşmasından sonra, geçen belirli bir süre sonunda, çimentodaki C₃S miktarı ne kadar az ise hidratasyon o kadar ilerlemiş demektir. Diğer bir yöntem oluşan kireç miktarının saptanmasıdır. Bu miktarın fazla olması hidratasyon olayının ilerlediğini gösterir. Hidratasyon ısısı hidratasyon devam ettiği sürece artar. Hidratasyon tamamlanınca bu artış sona erer (Baradan vd 2012).

Kalsiyum Silikatların Hidratasyonu: Trikalsiyum silikatın (C₃S) hidratasyonu aşağıda verilen denklemle gerçekleşmektedir.



Sönmüş kirecin oluşması iki bakımdan önemlidir. Ca(OH)₂'in meydana gelmesi, betonların kimyasal dayanıklılığı veya betonun zararlı ortamlara karşı dayanıklılığının azalmasının başlıca nedenidir. Serbest kirecin varlığının diğer sakıncası bu maddenin mekanik dayanımının düşük olmasıdır. Bundan dolayı Ca(OH)₂ aynı zamanda çimentonun büyük bir mekanik dayanım kazanmasına engel olur (Baradan vd 2012).

Dikalsiyum silikatın (C_2S) reaksiyonu ise;



Bunlardan birincisi C_3S 'in hidratasyonunda daha fazla miktarda kireç meydana gelmektedir. İkinci farkı ise C_3S 'in reaksiyonu için daha fazla miktarda suya ihtiyaç olmasıdır. Denklemlerden görünmeyen üçüncü fark ise C_3S 'in çok daha hızlı reaksiyon yapmasıdır (Baradan vd 2012).

Trikalsiyum Alüminatın Hidratasyonu: Çimentonun özellikle kimyasal etkilere dayanıklılığını yönlendiren karma bileşen C_3A 'dır. C_3A sertleştikten sonra oldukça zayıf dayanımlı bir hidrat oluşur. Priz ilk başlayan öge olan C_3A hızla priz yapıp yüksek hidratasyon ısısı açığa çıkarır. C_3A 'nın hızlı prizi denetim altına alınmazsa, çimento tümüyle katılaşır ve silikatların oluşmasına olanak kalmaz. C_3A 'nın priz hızı üretim aşamasında klinkere katılan alçı taşı ile yavaşlatır (Baradan vd 2012).

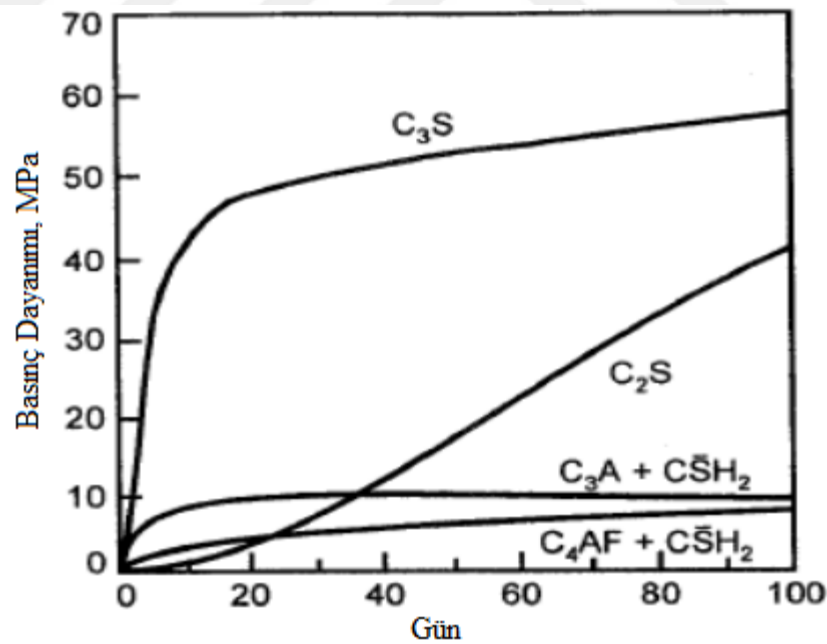
$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$ formülü ile bilinen etrenjit kristallerini boyu, SO_3 'ün fazla miktarda olması halinde 10^6A mertebesinde, SO_3 normal miktarda bulunduğu takdirde 10^4A kadardır. SO_3 bulunmaması veya çok az bulunması durumunda; C_3A 'nın hidratasyonunda etrenjit meydana gelmeyip C_4AH_{13} (veya $4CaO.Al_2O_3.13H_2O$) formülüne sahip bir kalsiyum alüminat hidrate oluşur (Baradan vd 2012).

Hekzagonal yassı plakalar halinde bulunan bu eleman zamanla kararlı durum olan $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ 'ya dönüşür.

Çimentoya alçı taşı katılmadığı zaman C_3A hızlı bir şekilde hidratasyon yaparak, daha ilk dakikalarda küçük plakalar şeklinde kristalleri meydana getirmek suretiyle priz yapar. Büyük bir ısınin açığa çıkmasıyla oluşan bu olaya çimento hamurunun erken prizi kısmında da değinileceği gibi “ani priz” denilir. Alçı taşı miktarının fazla olması halinde, bu miktar alüminatların ilk reaksiyonlarına karışır ve bu suretle normal priz

yerine bir katılaşma olur. Bu durum “yalancı priz” olarak adlandırılır. Sülfat miktarının artması kalsiyum silikatların hidratasyon reaksiyonunu hızlandırmaktadır (Baradan vd 2012).

Çimento hamurunun kazanabileceği nihai dayanım, C_3S ve C_2S gibi kalsiyum silikatlı anabileşenlerin hidratasyonu sonucunda oluşmaktadır. Ancak, C_2S 'nin çimento hamurunun dayanımına ilk günlerdeki katkısı az, sonradan daha çoktur. C_3A 'nın çimento hamurunun dayanımına katkısı hem ilk günler hemde son günlerde için düşük olarak belirtilmiştir. Aslında, C_3A 'nın ilk birkaç saat içerisinde dayanıma sağladığı katkı oldukça yüksektir. Ama ilk zamanlar olarak ilk bir-iki hafta göz önüne alınacak olursa, C_3A 'nın bağlayıcılık değerinin düşük olduğu belirtilmektedir. Çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin su ile reaksiyonu sonucu elde edilen dayanım artışı Şekil 2.4'de görülmektedir (Erdoğan 2003).



Şekil 2.4. Çimento anabileşenlerinin basınç dayanımına etkisi

Hidrate çimento hamurunun boşluk çözeltisindeki alümin (Al_2O_3) ve sülfat (SO_3) dengesi priz sürecini etkilemektedir. Çözeltide alüminat ve sülfat iyonları az bulunduğunda, çimento hamuru yaklaşık 45 dakika işlenebilir durumdadır. Yüksek

oranda C_3A içeren, ancak normal geciktirme için gereğinden daha az sülfat içeren hamurda, kısa sürede aşırı miktarda monosülfat ve C-A-H oluşur. Bu durumda çimento hamuru, su eklendikten sonra 45 dakikadan daha kısa bir sürede katılaşır. Bu olay hızlı priz olarak adlandırılır. Portland çimentosu klinkerinin öğütülmesi sırasında gereğinden az veya hiç alçı taşı bulunmaması durumunda, çimentoya su eklenmesinin ardından C_3A 'nın hızlı hidratasyonu ve hekzagonal yapılı C-A-H'nin çok miktarda oluşmaya başlaması hamurda ani priz olayını meydana getirir. C_3A 'nın reaktivitesi düşük ise çözeltideki alüminat iyonu konsantrasyonu düşer fakat kalsiyum ve sülfat iyonu konsantrasyonu yüksek olur. Bu durum alçı kristallerinin hızlı oluşumu ile kıvamın azalmasına yol açar. Aşırı bir ısı çıkarmayan bu olay yalancı priz olarak adlandırılır (Baradan vd 2012).

Tetrakalsiyum Alüminoferritin (C_4AF) Hidratasyonu: Hidratasyon reaksiyonu sonunda alçı miktarının belli bir değerin altında olmaması halinde sülfoferritler elde edilir. Bu bileşikler sülfalüminatlara alüminyum oksit yerine Fe_2O_3 in girmesiyle elde edilir. Alçı taşı az miktarda bulunursa $(3CaO.Fe_2O_3.H_2O)$, $(CaO.Fe_2O_3.H_2O)$ ve $3CaO.Al_2O_3.H_2O$ gibi hidratasyon ürünlerinin meydana gelme olasılığı da vardır.

Çimentonun Karma Bileşenlerinin Dayanıma Etkisi: Çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran C-S-H moleküler büyüklükte olup, çimento taneciklerinden yaklaşık 1000 defa daha küçüktür. Bu parçacıklar arasındaki çekim kuvveti bağlayıcılık özelliğini yaratmaktadır. Karma oksitlerden C_3S daha hızla reaksiyona girer ve çabuk hidratlaşıp, ısı açığa çıkarır. C_2S de ise bunlar tam tersinedir. Ayrıca C_3S 'in hidratasyonundan oluşan ağırlıkça $Ca(OH)_2$ miktarı, C_2S 'nin reaksiyonundan çıkanın iki katından biraz daha fazladır (Baradan vd 2012).

Şekil 2.4'den de görüldüğü gibi karma oksitlerin zamana bağlı dayanım artışlarında iki değişik sonuç söz konusudur. Birincisi 1934'te Bogue-Lerch tarafından yapılmış olup, karma oksitlerin 10 günlük dayanımları arasında $C_3S > C_2S > C_4AF > C_3A$ ilişkisi bir yıllık değerlerde ise, $C_3S = C_2S > C_4AF > C_3A$ ilişkisi vardır. İkincisi ise 1992'de Beaudoin-Ramachandran tarafından yapılmış olup karma oksitlerin on günlük

dayanımları arasında $C_4AF > C_3S > C_2S > C_3A$ ilişkisi 1 yıllık değerlerde ise, $C_3S > C_2S > C_4AF > C_3A$ ilişkisi vardır (Baradan vd 2012).

Hidratasyonunu tamamlamış, boşluklar dışındaki çimento hamuru hacminin; %58'i C-S-H'nin, %27'si $Ca(OH)_2$ 'den meydana gelmektedir. Kimyasal etkilere dayanıklı çimento seçiminde ilgili bölümde açıklanacak nedenlerle C_3S ve C_3A 'nın mümkün olduğunca az olmasına dikkat etmek gerekir (Baradan vd 2012).

2.3.1.c. Beton karışım suyu

Bilindiği gibi çimento ve agreganın yanı sıra betonu oluşturan diğer temel malzeme sudur. Bu malzemelerin karılmasında kullanılan suyun iki önemli görevi bulunmaktadır. Öncelikle çimento ile birleşerek hidratasyonun oluşmasını sağlamak ve agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak işlenebilmeyi sağlamaktır (Erdoğan 2003).

Beton karışım sularının genel olarak içilebilir özellikte olması istenir. Uygun olmayan bir suyun kullanılması betonun kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Karışım suyunda bulunabilecek safsızlıklar priz süresini, rötreyi dayanıklılığı da olumsuz etkileyebilir, betonda çiçeklenmeye neden olabilir (Özkul vd 2004).

Çimentonun hidratasyonu için gerekli olan su miktarı yaklaşık çimento ağırlığının %25'i civarındadır. Genellikle betonda kullanılan karışım suyu işlenebilme için bunun üzerindedir. Betonda kullanılacak karışım suyu, beton dayanım ve dayanıklılığı olumsuz etkilemesini engellemek için işlenebilme için gereken en az miktarda olmalıdır.

Beton içindeki yer alan su ile çimento arasındaki reaksiyonların engellenmemesi için taze beton içerisindeki karışım suyunun buharlaşarak azalmasının önün geçmek gerekir. Bu sebeple taze beton ilk bir-iki hafta beton yüzeyi sulanarak ıslak tutulmaya çalışılır. Kullanılan bu ise kür suyu olarak adlandırılır. Ayrıca beton yapımında kullanılan

agregaların yüzeyindeki zararlı yabancı maddelerin su ile yıkanarak uzaklaştırılması gerekir. Yıkama işleminde kullanılan suya ise beton yıkama suyu denir (Erdoğan 2003).

2.3.1.d. Beton katkı maddeleri

Katkılar, çimento, agrega ve suyun dışında, betonun taze veya sertleşmiş haldeki özelliklerini istenen şekilde değiştirmek üzere, karıştırma işleminden hemen önce veya karıştırma işlemi sırasında betona katılan malzemelerin genel adıdır. Katkılar, kimyasal katkılar, hava katkıları ve mineral katkılar olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunların dışında özel beton üretiminde kullanılan bazı katkılar da mevcuttur. Katkı çeşitlerinin çok olmasının arkasında yatan gerçek, betonun hemen hemen tüm özelliklerinin değişik ölçeklerde bu katkılar tarafından değiştirilebilmesidir (Özkul vd 2004).

Kimyasal katkılar, karışım suyunu azaltan katkılar, taze betonun priz almasını geciktiren katkılar ve priz almasını hızlandıran katkılar olarak çeşitlendirilebilir. Hava sürükleyici katkılar beton çimento hamurunun içerisinde birbiri ile bağlantısı olmayan çok küçük ve kararlı hava kabarcıkları oluşturan katkı maddeleridir. Hava sürükleyici katkı maddeleri, betonun dona karşı dayanıklılığını artırmak amacı ile kullanılmaktadır. Ayrıca silis dumanı, uçucu kül gibi ince taneli mineral katkı maddeleri betonun işlenebilmesini, dayanımını, dayanıklılığını ve ekonomikliğini artırmak için kullanılmaktadır (Erdoğan 2003).

2.4. Betonun İçyapısı ve İçyapı Özellikleri

Mikroyapı (içyapı)-malzeme özellikleri arasındaki ilişki modern malzeme biliminin temelidir. Beton oldukça heterojen ve karışık bir içi yapıya sahiptir. Bu sebeple, malzemenin davranışından mikroyapıyı güvenilir şekilde tahmin etmek için gerçekçi modeller geliştirmek oldukça zordur. Bununla birlikte betonu oluşturan her bir malzemenin özellik ve içyapısının ve birbirleriyle olan ilişkisinin bilinmesi, beton özelliklerinin kontrolünde kullanma açısından önemlidir (Mehta *et al.* 2006).

Kütle oluşturan malzemelerin tür, miktar, ebat, şekil ve fazların dağılımı mikroyapıyı teşkil eder. Malzemenin mikro yapısındaki büyük ana elemanlar malzemenin en kesitinde kolayca görülmesine karşın daha küçük elemanlar genellikle mikroskop yardımıyla görülebilmektedir. Makroyapıda en kesitteki elemanlar insan gözüyle görülürken, mikroyapıdaki elemanlar makroyapının belli oranda büyütülmesi ile görülebilmektedir. Modern elektron mikroskopları 10^5 kat büyütme yapabilme kapasitesine sahiptir. Bu sebeple geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) uygulamaları malzemelerin mikroyapısını inceleme imkânı vermektedir (Mehta *et al.* 2006).

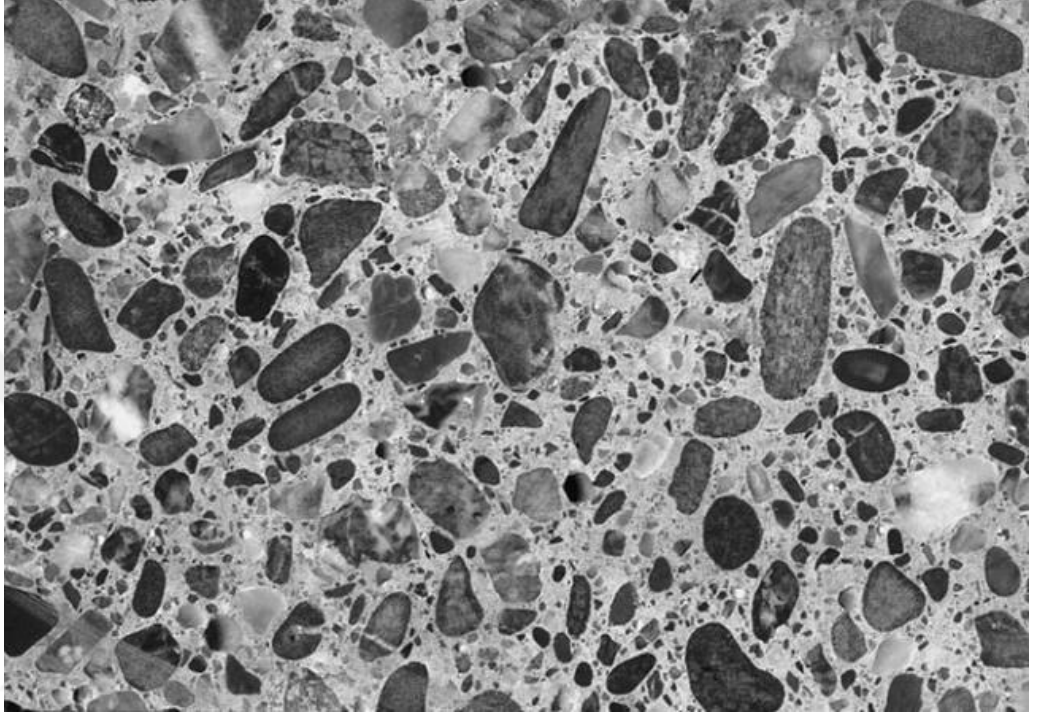
Malzeme bilimindeki gelişmeler esas olarak, malzeme özelliklerinin içyapı özelliklerine bağlı olduğunun farkına varılması sonucu gerçekleşmiştir. Diğer bir deyişle, malzeme özellikleri, malzemenin içyapısında değişiklik yapılması ile modifiye edilebilir. Bununla birlikte beton en fazla kullanılan kompozit bir yapı malzemesi olup ve içyapısı heterojen ve oldukça karmaşıktır. Betonda içyapı ve diğer özellikler arasındaki ilişki küçük örnekler üzerinde çalışılması nedeniyle tamamıyla ortaya konulamamıştır. Ancak içyapının temel elemanlarının anlaşılması, betonun en önemli mühendislik özelliklerini (dayanım, elastisite, büzülme, sünme, çatlaklar ve durabilite) etkileyen faktörlerin araştırılması aşamasında faydalıdır (Baradan vd 2012).

Modern görüntü analiz yöntemleri kullanılarak, her bir bileşenin oranını yaklaşık olarak saptamak olasıdır. Son yıllarda, bilgisayarlar özellikle bağlı olarak bütün içyapının nicel tarifini sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. İçyapı zamana bağlı olarak üç boyutlu gelişir. Değişik yöntemlerle fazların yapıları, özellikleri ve birbirleri arasındaki ilişkileri belirlenir (Baradan vd 2012).

2.4.1. Betonun içyapısı

Makro yapı, bir maddenin, yardıma ihtiyacı olmayan insan gözü tarafından görünür olan brüt yapısıdır. Şekil 2.5'den anlaşılabacağı üzere makroskobik düzeyde, beton çeşitli

ebatlarda rastgele dağılmış agrega ve agregaları çevreleyen çimento hamuru matrisinden oluşan iki fazlı bir malzeme olarak düşünülebilir (Mehta *et al.* 2006).



Şekil 2.5. Beton parlatılmış yüzey kesiti

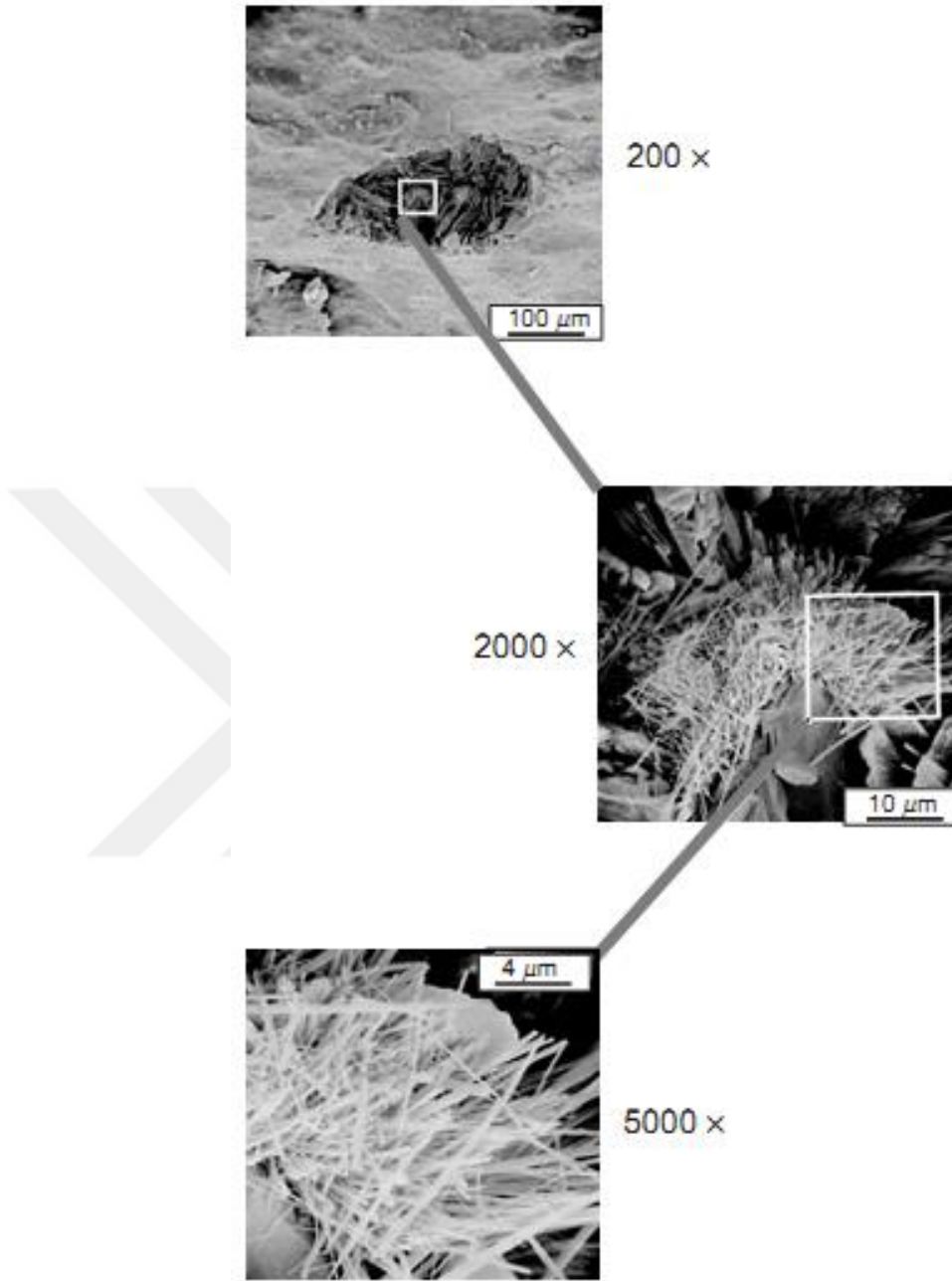
Aynı miktarda çimento içeren ancak farklı miktarda su içeren çeşitli beton numuneleri çeşitli zaman aralıklarında incelendiğinde, genel olarak, hidratlı çimento hamurundaki kılcal boşlukların hacminin su-çimentonu oranının azalmasıyla ve hidrasyon yaşının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Kusursuz mikroskopik seviyede, beton mikroyapısının karmaşıklığı görülmektedir. Mikroyapının iki fazının birbirine göre homojen olarak dağılmadığı veya kendilerinin homojen oldukları görülmektedir. Örneğin, bazı bölgelerde hidratlı çimento hamuru kütlesi agrega kadar yoğundur ve diğerlerin de oldukça gözenekli olduğu Şekil 2.5’de görülmektedir (Mehta *et al.* 2006).

Mikroskopik seviyede, beton mikroyapısının karmaşıklığı görülmektedir. Mikroyapının iki fazının birbirine göre homojen olarak dağılmadığı ve kendilerinin homojen oldukları görülmektedir. Örneğin, bazı bölgelerde hidratlı çimento hamuru kütlesi agrega kadar

yoğundur ve diğerlerin de oldukça gözenekli olduğu Şekil 2.5’de görülmektedir (Mehta *et al.* 2006).

Aynı miktarda çimento içeren ancak farklı miktarda su içeren çeşitli beton numuneleri çeşitli zaman aralıklarında incelendiğinde, genel olarak, hidratlı çimento hamurundaki kılcal boşlukların hacminin su-çimentonu oranının azalmasıyla ve hidratasyon yaşının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Kusursuz olarak hidratlanmış bir çimento hamuru için, katıların ve boşlukların tek başına homojen dağılımı, maddenin davranışını modellerken göz ardı edilebilir. Bununla birlikte, mikroyapısal çalışmalar bunun betonda bulunan hidratlı çimento hamuru için yapılamadığını göstermiştir. Agrega varlığında, büyük agregalar parçacıklarının civarındaki hidratlı çimento hamurunun mikroyapısı, genellikle sistemdeki sadece çimento hamuru veya harçlardakinden çok farklıdır. Aslında, yalnızca gerilme altındaki davranışın birçok yönü, çimento hamuru-agrega arayüzünün, beton mikroyapısının üçüncü fazı olarak açıklanabilir (Mehta *et al.* 2006).

Şekil 2.6’da düşük büyütme (200 kat) bir elektron mikroskobu görüntüsünde hidrate çimento hamurunun yapısında bazı bölgelerin yoğun, diğer bölgelerin boşluklu olduğu görülmektedir (Mehta *et al.* 2006). Boşluklu alanda, daha yüksek büyütme kullanarak hidrate fazları görmek mümkündür. Örneğin, kalsiyum hidroksit masif kristalleri, etrenjitin uzun ve ince iğneleri ve kalsiyum silikat hidratenin küçük lifli kristalleri 2000 ve 5000 kat büyütmede görülebilir (Baradan vd 2012).



Şekil 2.6. Hidrate çimento hamurunun mikroyapısı

Beton mikroyapısının kendine özgü özellikleri şu şekilde özetlenebilir: Birincisi, iri agrega parçacıklarının yanındaki küçük bir bölgeyi temsil eden ara yüzey geçiş bölgesidir. İnce bir kabuk halinde, tipik olarak geniş agrega etrafında 10 ila 50 μm kalınlığında olan ara yüzey geçiş bölgesi, genellikle betonun iki ana bileşenden, yani agrega ve toplu hidrate çimento hamurundan daha zayıf olduğundan dolayı, betonun

mekanik davranışı boyutundan daha fazla etkilenir. İkincisi, üç evreden her biri kendi içinde birçok safhadır. Örneğin, her bir agreg a parçacığı, mikro çatlak ve boşluklara ek olarak çeşitli mineraller içerebilir. Benzer şekilde, hem hidrate çimento hamuru hem de ara yüzey geçiş bölgesi, genellikle farklı türde ve miktarda katı faz, gözenek ve mikro çatlakların heterojen bir dağılım içerir. Üçüncü olarak, diğer mühendislik malzemelerinden farklı olarak, beton mikroyapısı malzemenin kendine özgü bir özelliği değildir, çünkü mikro yapının iki bileşeni, yani hidrate çimento hamuru ve ara yüz geçiş bölgesi, zaman, çevresel nem ve sıcaklık ile değişmektedir.

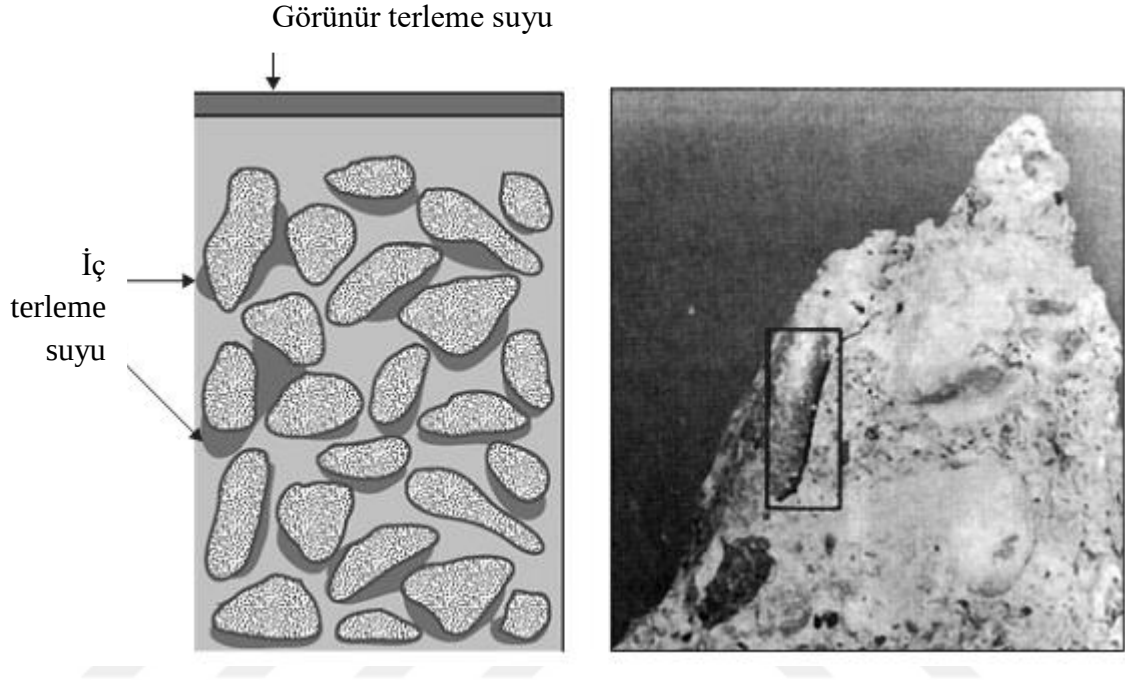
Betonun mikroyapısının oldukça heterojen ve dinamik yapısı, mühendislik malzemelerinin davranışını öngörmek için genellikle yararlı olan teorik mikroyapı-özellik ilişki modellerinin betonda pek pratik bir kullanımı olmadığının temel nedenidir. Bu sebeple, betonun üç fazının her birinin mikro yapısının önemli özellikleri hakkında geniş bir bilgi birikimi, kompozit beton malzemesinin özelliklerini anlamak ve kontrol etmek için gereklidir.

2.4.2. Agreg a fazının içyapısı

Agreg a fazı ağırlıklı olarak, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini etkiler. Betonun bu özellikleri, büyük ölçüde agreganın yoğunluğuna ve dayanımına bağlıdır. Bazı durumlarda, agreganın mineralojik veya kimyasal kompozisyonu fiziksel özelliklerinden daha önemli olabilmektedir. Örneğin reaktif silis içeren agregalar alkali silika reaksiyonunun oluşumuna ve betonun hasar görmesine neden olur. Bununla birlikte, agregaların fiziksel özellikleri, örneğin poroziteyle birlikte, iri agreganın biçimi ve yüzey dokusu betonun özelliklerini etkilemektedir. Genellikle, doğal taşlar yuvarlak ve pürüzsüz yüzeye sahiptir. Kırma taşlar kaya ve seçilen kırıcı tipine bağlı olarak köşeli ve pürüzlü bir yüzeye sahiptir (Baradan vd 2012).

Gözenekliliğe ek olarak, kaba agreg a şekli ve dokusu betonun özelliklerini de etkiler. Betonun diğer iki fazından daha güçlü olan agreg a fazı, pomza gibi bazı çok gözenekli ve zayıf agregalar dışında, normal beton dayanımında genellikle doğrudan etkiye

sahiptir. Bununla birlikte, kaba agrega boyutu ve şekli dolaylı bir şekilde betonun dayanımını etkileyebilir (Mehta *et al.* 2006).



Şekil 2.7. Yeni dökülmüş betonda görünür terlemenin şematik gösterimi (solda), tek eksenli basınç altında test edilen betonda oluşan kusur (sağda)

Şekil 2.7’den görüleceği gibi, betonda agrega büyüklüğü arttıkça ve parçacıklarda uzamış ve yassı parçacık oranları arttıkça, su tabakalarının agrega yüzeyinin yanında birikmesi eğiliminde de artış olacak ve böylece ara yüzey geçiş bölgesi zayıflayacaktır.

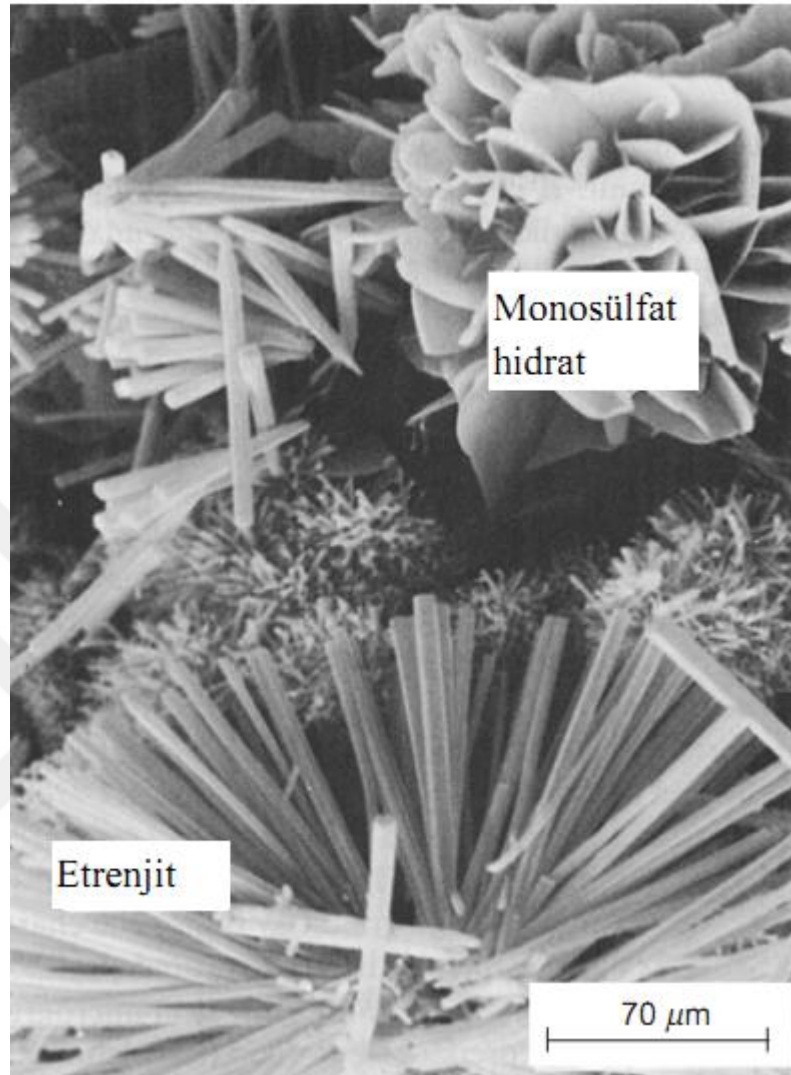
Betonun diğer iki fazından daha güçlü olan agrega fazının genellikle, normal betonun (çok poroz veya zayıf agrega içermeyen) dayanımı üzerinde doğrudan bir etkisi yoktur. Bununla birlikte agreganın biçimi ve boyutu betonun dayanımı dolaylı biçimde etkilemektedir. Betonda büyük boyutlu agregaların ve ince-uzun, yassı agregaların bulunması, agregaların yüzeylerinde su filmlerinin tutulması eğilimini artıracaktır. Bu olay terleme olarak da bilinir (Baradan vd 2012).

2.4.3. Çimento hamurunun içyapısı

Susuz portland çimentosu tipik olarak 1 ila 50 μm aralığında parçacıklardan oluşan gri bir tozdur. Az miktarda kalsiyum sülfat ile klinkerin toz haline getirilmesi ile üretilir. Klinker, kalsiyum oksit ile silis, alüminyum oksit ve demir oksit arasında yüksek sıcaklık reaksiyonları ile üretilen çeşitli bileşiklerin heterojen bir karışımıdır. Klinker bileşiklerinin ana kimyasal bileşimi yaklaşık olarak C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF 'ye karşılık gelir. Sıradan portland çimentosunda, bunların miktarları genellikle 45 ila 60, 15 ve 30, 6 ve 12 ve 6 ila 8 arasında değişir (Mehta *et al.* 2006).

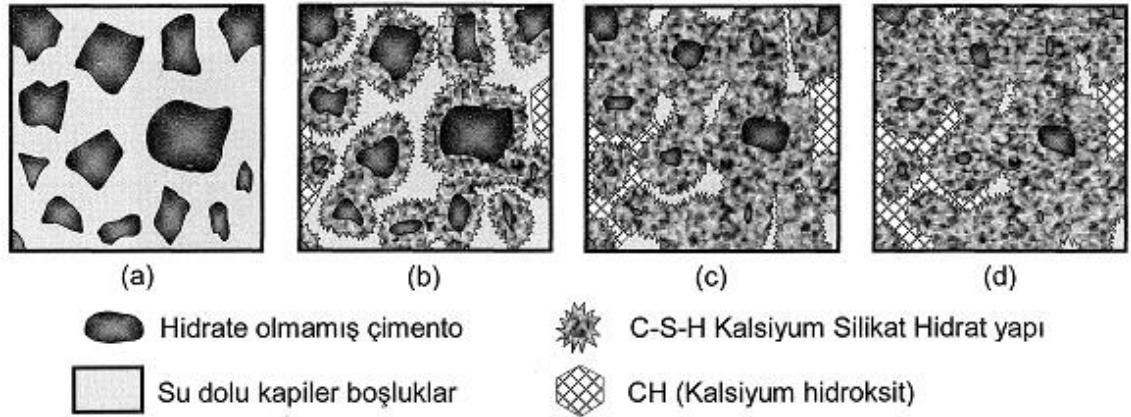
Portland çimentosu su içinde dağıldığında, kalsiyum sülfat ve kalsiyum bileşenleri çözeltiye geçmeye başlar ve sıvı faz hızla çeşitli iyon türlerine doymun hale gelir. Çimento hidrasyonunun ilk dakikalarında; kalsiyum, sülfat, alüminat ve hidroksil iyonlarının etkileşimi sonucu, ilk olarak iğne şekilli kalsiyumtrisülfoalüminat-hidrat (eterenjit) oluşur. Birkaç saat sonra, büyük prizmatik kalsiyum hidroksit kristalleri ve çok küçük lifsi kalsiyum silikat hidrat kristalleri, daha önce su ve çözünen çimento partikülleri ile dolu olan boş yerleri doldurmaya başlar. Birkaç gün sonra, Portland çimentosunun alümina/sülfat oranına bağlı olarak, etrenjit kararsız hale gelebilir ve monosülfoalüminat hidrat (hegzagonal plaka morfolojisine sahiptir) oluşturmak üzere ayrışır (Baradan vd 2012).

Bir kalsiyum alüminat çözeltisinin kalsiyum sülfat çözeltisi ile karıştırılmasıyla hazırlanan fazların tipik morfolojisini gösteren bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü Şekil 2.8'de gösterilmektedir (Mehta *et al.* 2006).



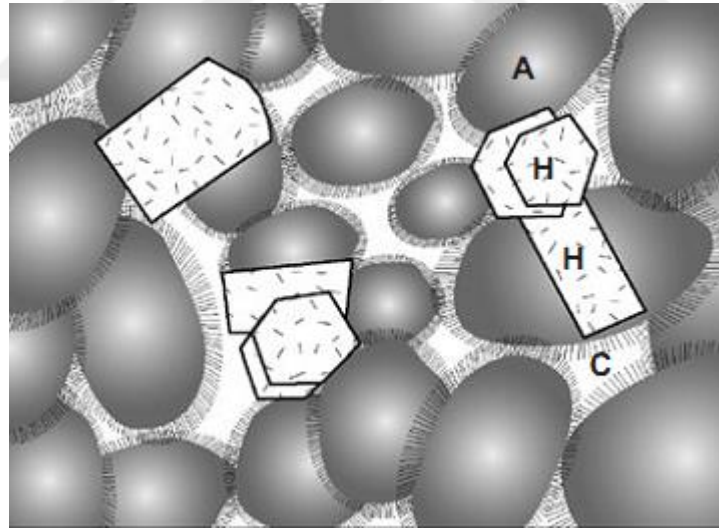
Şekil 2.8. Monosülfat hidratın tipik altıgen kristallerinin ve iğne şeklinde etrenjit kristalinin SEM görüntüsü

Aşağıda şematik olarak verilen içyapısal gelişimin açıklanması SEM gözlemlerine dayanır. Şekil 2.9'da hidratasyon sürerken iç yapı oluşumlarını göstermektedir. Bu; sıvı haldeki hamurda (Şekil 2.9a'da) çimento tanelerini, sürekli bir matris oluşturan ve Şekil 2.9b-d'de gösterildiği gibi geri kalan çimento taneciklerini bağlayan katı hidratasyon ürünleri ile ayıran, suyun yer değişimini içerir. Hidratasyon ürünleri, orijinal çimento bileşenlerinden daha büyük hacim kaplar (Baradan vd 2012).



Şekil 2.9. Portland çimento hamurundaki içyapısal gelişimin şematik gösterimi (a) başlangıç karışımı; (b) 7 günlük; (c) 28 günlük; (d) 90 günlük

İyi hidrate olmuş portland çimento macununun mikroyapısında mevcut olan fazlar şematik olarak Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Mehta *et al.* 2006).

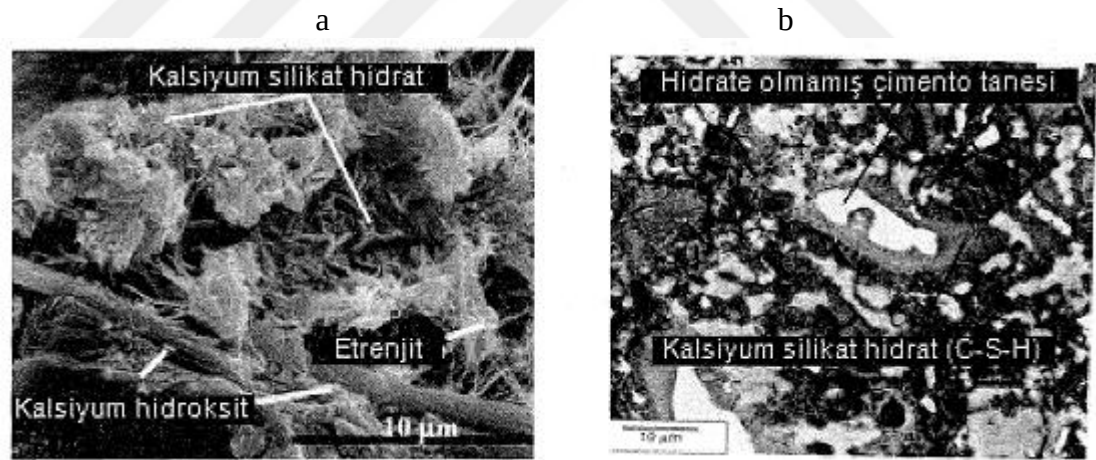


Şekil 2.10. İyi hidrate olmuş portland çimentosu modeli

Modeldeki “A” bir araya toplanmış C-S-H partiküllerini, “H” $CH = C_4AH_{19} = C_4ASH_{18}$ gibi altıgen kristal ürünlerini ve “C” ise başlangıçta su ile dolaşan boşlukların çimentonun hidratasyon ürünleri ile tamamlanamaması durumunda ortaya çıkan kılcal boşlukları veya boşlukları temsil etmektedir (Mehta *et al.* 2006).

Hidrate çimento hamurunun içyapı modelinden, fazların morfolojik olarak üniform olmadıkları ve üniform dağılmadıkları görülmektedir. Katı fazlarda, içyapısal heterojenliğin dayanım ve ilgili mekanik özelliklerde ciddi etkileri olmaktadır. Çünkü bu özellikler ortalama içyapısal özellikler ile değil, içyapısal sınırlar ile kontrol edilmektedir. Bu nedenle içyapının kimyasal değişimler (çimentonun suyla buluşmasından sonra oluşan reaksiyonlar) ile gelişimiyle birlikte sertleşmiş çimento hamurunun içyapısını da etkileyen taze çimento hamurunun reolojik özelliklerine dikkat edilmelidir (Baradan vd 2012).

Şekil 2.11'de erken ve geç yaşlardaki hidrate olmuş çimento hamurunun içyapıları gösterilmektedir. Şekil 2.11a'da çimento hamuru bileşenlerinin morfolojilerini gösteren kırık yüzey fotoğrafıdır. Şekil 2.11b'de hamurun karmaşık içyapısının gösteren parlak kesit fotoğrafıdır.



Şekil 2.11. Hidrate çimento hamurunun taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografikleri

(a) kırık yüzeyde, su dolu boşluklarda gelişen etrenjit, tabakalı CH kristalleri ve şekilsiz morfolojideki C-S-H (b) parlak yüzeyde açık gri CH, siyah kapiler boşluklar ve açık renkli hidrate olmamış çimento etrafında daha koyu renkte C-S-H

Kalsiyum Silikat Hidrat (C-S-H): Kalsiyum silikat hidrat fazı, tamamıyla hidrate olmuş Portland çimentosu hamurunun katılar hacminin %50-60'ını oluşturur. Bu nedenle hamur özelliklerini belirleyen en önemli fazdır. C-S-H teriminin tire ile birleştirilmesinin nedeni kalsiyum silikat hidrate yapının kesin olarak tanımlanmış bir bileşim olmasından kaynaklanmaktadır. C/S oranı 1,5 ile 2 arasında değişmektedir, ayrıca yapısındaki su miktarı da değişkendir. C-S-H'nin morfolojik yapısı, zayıf kristalin liflerden ağsı bir yapıya değişkenlik göstermektedir. Kolloidal boyutları ve küme oluşturma eğilimi nedeniyle C-S-H kristalleri sadece elektron mikroskopunun bulunması ile gözlenebilmiştir (Baradan vd 2012).

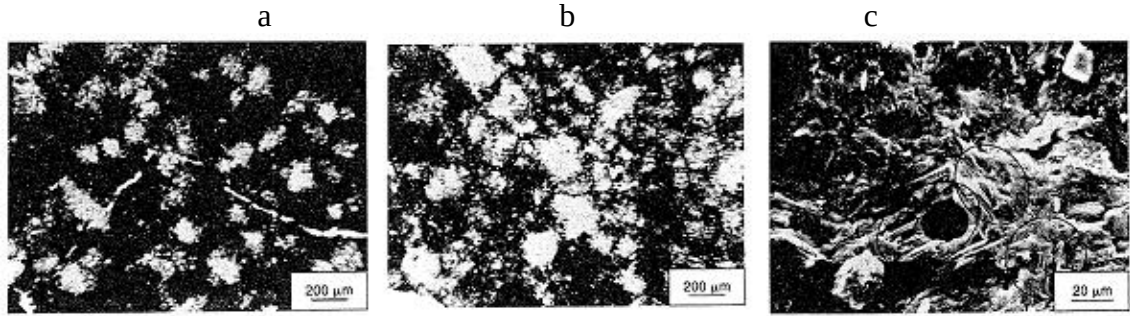
Erken yaşlardaki hidratasyon süresince, C-S-H çimento tanesinin yüzeyinden düşük yoğunluklu ince tabakalar oluşturarak içe doğru su dolu boşluklara doğru gelişir. Dıştaki C-S-H ürünü erken ürün olarak adlandırılır, daha yüksek bir mikropoziteye sahiptir (Şekil 2.12a). Hidratasyonun ikinci aşamasında, C-S-H hidrate olmuş çimento partiküllerinin çevresinde daha yoğun bir tabaka halinde oluşur, geç oluşan C-S-H veya iç ürün olarak adlandırılır. Bu tabakalar daha sonraki hidratasyon boyunca difüzyon bariyerleri oluşturur ve zamanla kalınlaşır. Hidratasyon ürünleri orijinal partiküllerin şeklini alır ve hidrate olmamış geri kalan kısımların çevresini sardığı (Şekil 2.12b) görülür. Daha geç oluşan bu C-S-H ürünü daha yoğundur, daha az safsızlığa sahiptir ve kuruma sırasındaki fiziksel değişimlere daha dayanıklıdır. C-S-H'nin geç yaştaki ürününün oranı hidratasyon süresince artar. Düşük s/ç oranında daha çok miktarda oluşur literatürde kalsiyum silikat hidrate yapı C-S-H jeli olarak da geçmektedir. C-S-H'nin iç kristal yapısı da çözünmemiş olduğu için, önceleri, doğal tobermorit jeli denmektedir (Baradan vd 2012).

C-S-H'nin kesin yapısı bilinmemekle birlikte, C-S-H yapısının özelliklerini açıklamak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından birçok model önerilmiştir. Powers-Brunauer modeline göre, C-S-H çok yüksek yüzey alanına ve tabakalı bir yapıya sahiptir. Ölçüm metoduna bağlı olarak yüzey alanlarının 100 ile 700 m²/kg arasında değiştiği ifade edilmektedir. C-S-H'nin dayanımı Van der Waals kuvvetleri ile ilişkilendirilmektedir. Jel boşluklarının boyutunun veya katıdan katıya mesafenin 18Å olduğu belirtilmektedir.

Feldman-Sereda modelinde, C-S-H yapısı, düzensiz ve bükülmüş sıralı tabakalardan oluşan bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Bu tabakalar farklı boyutlarda ve şekillerde (5-25A) arayüzey boşlukları oluşturacak şekilde rastgele dizildiği belirtilmiştir (Mehta *et al.* 2006).

Kalsiyum Hidroksit (CH): Portlandit olarak da adlandırılan kalsiyum hidroksit kristalleri hidrate çimento hamurunda katıların hacimlerinin yüzde 20-25'ini oluşturmaktadır. C-S-H'nin tersine, kalsiyum hidroksit, yapısı tam olarak bilinen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'ye sahip bir bileşiktir. Ayrı bir altıgen prizma morfolojisi ile büyük kristaller oluşturma eğilimi gösterir. Morfoloji genelde tanımlanamayanlardan geniş plakaların yığınlarına kadar değişir ve mevcut boşluk, hidratasyon sıcaklığı ve sistemde mevcut olan yabancı maddeden etkilenir. C-S-H ile karşılaştırıldığında, çok düşük yüzey alanına sahip olması nedeniyle dayanıma katkısı sınırlıdır ve hidratasyon ürünleri arasında, çözünen en zayıf bileşendir (Mehta *et al.* 2006).

C_3S 'in hidratasyonu boyunca kapiler boşluklarda oluşan kristallerin boyutları ve oluşumu; optik mikroskop yardımı ile kolayca incelenir (Şekil 2.12a ve 2.12b). CH kristalinin karakteristik dar çizgili görünüşü hamur içinde kristal kırılmalarının bir sonucudur. Başka bir CH kristali tarafından engelleninceye kadar büyüme devam eder ve karşılaşma sonucu başka bir doğrultuda büyümeyi sürdürür. Şekil 2.12c'den görülebileceği gibi, hidrate olmamış çimento partikülleri ile karşılaştığı zaman, hidrate olmamış çimento partikülleri etrafını sarar. Genellikle bir kalsiyum hidroksit kristali; hamurda kristalin kapladığı efektif alanı arttıran çimento partikülünü tam olarak içine alır. Daha da önemlisi, gelişen kalsiyum hidroksit saf kristallerden oldukça farklı olarak davranabilir. Şekil 2.13'de ise bir elektron mikroskobu görüntüsünde hidrate çimento hamurunda boşluk içinde oluşan tipik hegzagonal kalsiyum hidroksit kristalleri görülmektedir (Baradan vd 2012).



Şekil 2.12. Hidrate çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit (CH)

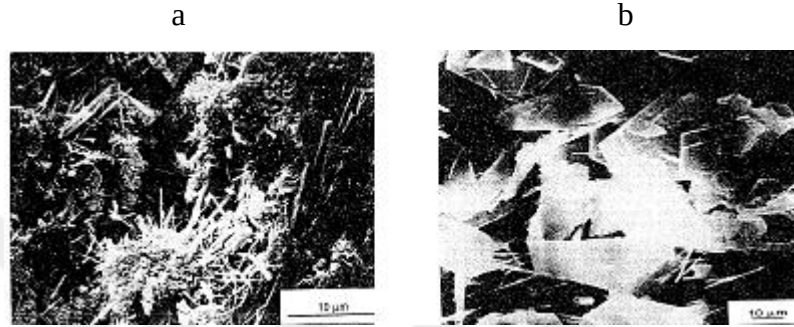
(a) 7 günlük (optik mikroskop) (b) 15 günlük (optik mikroskop), (c) 64 günlük (SEM) büyük CH kristalleri



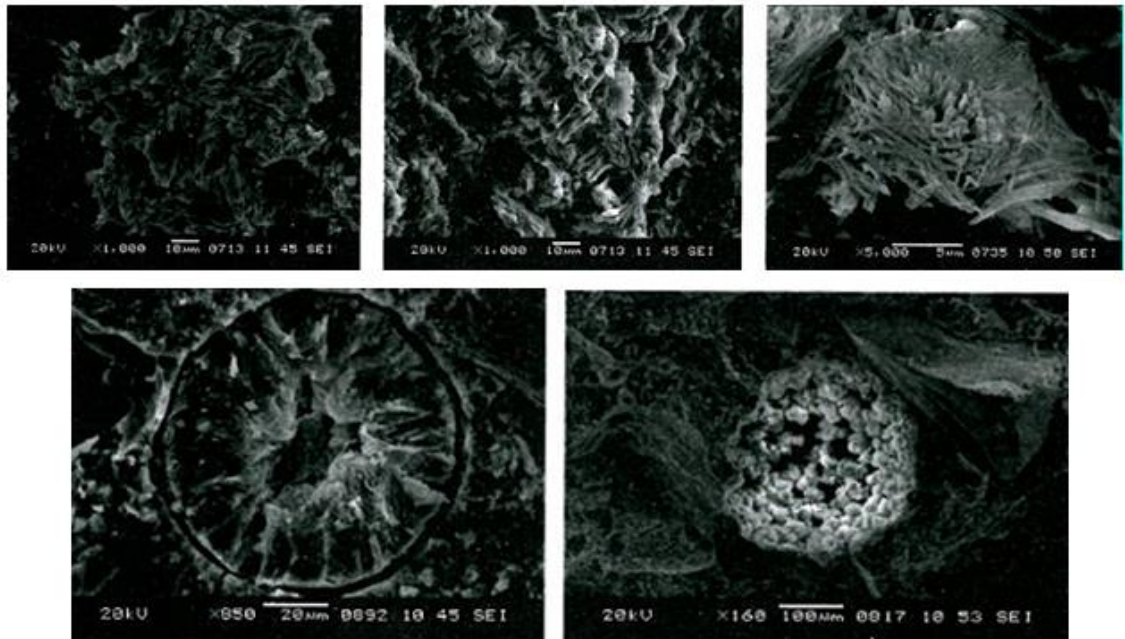
Şekil 2.13. Hegzagonal kalsiyum hidroksit kristalleri

Kalsiyum Sülföalmüminat Hidrat: Kalsiyum sülföalüminat hidratlar, hidrate hamurda katı hacmin %15-20'sini kaplamaktadır. Bu nedenle, içyapı-özellik ilişkisinde ikincil rol oynamaktadır. Hidratasyonun erken aşamalarından itibaren sistemde bulunur. Çözelti fazının sülfat/alümina iyonik oranı genellikle iğnemsiz prizmatik kristallerden oluşan trisülfathidrat oluşumuna olanak sağlamaktadır. Normal portland çimentosu hamurunda, etrenjit hegzagonal plaka formunda kristallerden oluşan monosülfö-alüminat hidrat yapıya dönüşür. Monosülfö-alüminat hidrat yapının varlığı, Portland çimentosu betonunu sülfat saldırılarına karşı zayıf hale getirmektedir. Hem etrenjit hem de monosülfö-alüminat, kristal yapıdaki alüminyum iyonlarının yerine geçebilen az miktarda demir içermektedir (Mehta *et al.* 2006).

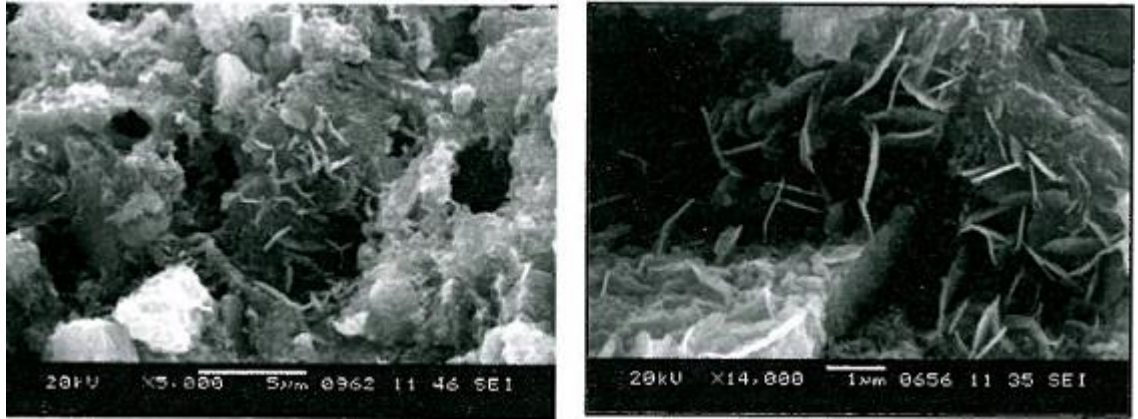
Etrenjit oldukça erken yaştaki hamurların SEM analizlerinde çimento partikülleri arasında (Şekil 2.14) kapiler boşluklara doğru iğneler şeklinde büyüyen yapılar olarak saptanır. Daha geç yaşlarda gecikmiş etrenjit oluşumu nedeniyle oluşan etrenjit yapıları ise Şekil 2.15’de görülmektedir (Baradan vd 2012).



Şekil 2.14. Hidrate çimento hamurunda kalsiyum sülfoalüminat hidrat yapıların SEM mikrografikleri
(a) etrenjit (b) monosülfoalüminat



Şekil 2.15. Gecikmiş etrenjit oluşumu gözlenen çimento harçlarında farklı morfolojideki etrenjit oluşumları



Şekil 2.16. Gecikmiş etrenjit oluşumu gözlenen çimento harçlarında monosülfoalüminat hidrate olmamış çimento taneleri

Hidrate Olmamış Çimento Taneleri: Çimentonun parçacık boyut dağılımına ve hidrasyon derecesine bağlı olarak, hidrate çimento hamuru içyapısında bir miktar hidrate olmamış çimento tanesi bulunabilir. Günümüzde üretilen portland çimentosu partikülleri eski tip çimentolara kıyasla daha ince olup, genellikle 1-50 μm boyutlarındadır. Hidratasyon sürecinin gelişimiyle birlikte, partiküller küçülmeye başlar. Partiküller arasındaki kısıtlı boşluk nedeniyle, hidrasyon ürünleri hidrate olan çimento tanesinin yakınlarında kristalize olma eğilimindedir. Bu, taneler etrafında bir tabaka oluşumu şeklinde görünmektedir. Daha sonraki aşamalarda, uygun yerin az olması nedeniyle çimento tanelerinin hidratasyonu sonucu, orijinal çimento tanelerine benzeyen, oldukça yoğun hidratasyon ürünleri oluşur (Baradan vd 2012).

Hidrate Çimento Hamurundaki Boşluklar: Katı hacme ilave olarak, hidrate çimento hamuru, özelliklerini önemli ölçüde etkileyen, çeşitli tiplerde boşluklar içermektedir (Mehta *et al.* 2006). Dolayısıyla, porozite içyapının bir diğer büyük bileşenidir. Hidratasyon boyunca kapiler porozitede azalma vardır, fakat boşluk boyutu dağılımı da önemlidir. Ancak, boşluk boyutlarının ölçme ve sınıflandırılması deneysel zorluklar nedeniyle karışıktır (Baradan vd 2012).

Boşluk boyutlarının ölçümü ve sınıflandırılmasında iki temel problem vardır. Bunlardan ilki ölçümleri yapmak amacıyla çimento hamuru kurutulmaktadır. Ancak, kuruma

çimento hamurunun boşluk yapısını değiştirir. İkincisi ise boşluğun geometrisidir. SEM analizi sırasında düzensiz şekillenmiş ağ formunda olduğu görülen boşluğun geometrisini belirlemek oldukça zordur Çizelge 2.5’de çimento hamurundaki porozitenin sınıflandırılması verilmiştir. Boşluk boyutlarının 10 μm ’dan 0,0005 μm ’den daha küçük çapa kadar olan çok büyük bir aralıkta olduğu görülebilir. Kapiler boşluklar kısmi hidrate olmuş çimento partikülleri arasında bulunan su dolu boşluklardan geriye kalanlardır. Jel boşlukları ise C-S-H’nin asli bir parçası gibi sayılır. SEM analizlerinde görülen kapiler porozitedir, jel porozitesi SEM analizi ile saptanamaz ve C-S-H tarafından kaplanan hacim içinde yer alır (Baradan vd 2012).

Çizelge 2.5. Hidrate olmuş çimento hamuru boşluklarının sınıflandırılması

İsim	Çap	Tanımlama
Kapiler Boşluklar	10000-50 nm (10-0,05 μm)	Geniş kapiler (Makro) boşluklar
	50-10 nm (0,05-0,01 μm)	Orta kapiler (Geniş Mezo) boşluklar
Jel Boşlukları	10-2,5 nm (0,01-0,025 μm)	Küçük izole olmuş Mezo boşluklar
	2,5-0,5 nm (0,025-0,0005 μm)	Mikroboşluklar
	$\leq 0,5$ nm	C-S-H tabakaları Arasındaki boşluklar

Powers C-S-H yapısının tabakalarının arasındaki genişliği 18Å ve katı C-S-H da %28 porozite bulunduğunu belirlemiştir. Bununla birlikte Feldman ve Sereda bu boşluğun 5-25Å aralığında olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu boşluk boyutları hidrate çimento hamurunun geçirimsizliği veya dayanımı üzerinde ters bir etkiye sebep olmayacak kadar küçüktür. Bu küçük boşluklarındaki bulunan su hidrojen bağı ile tutulmaktadır. Bu su moleküllerinin uzaklaşması bazı koşullar altında kuruma büzülme ve sünmeye neden olabilir (Mehta *et al.* 2006).

Kapiler boşluklar, hidrate çimento hamurunda katı bileşenler ile doldurulmamış boşlukları temsil etmektedir. Tipik çimento-su karışımının toplam hacmi hidrasyon süreci boyunca temel olarak değişmez. Hidrasyon ürünlerinin ortalama yoğunluğu hidrate olmamış Portland çimentosunun yoğunluğundan oldukça düşüktür. 1 cm^3 çimento için hidrasyon tamamlandığında hidrasyon ürünlerinin işgal edeceği yaklaşık 2 cm^3 yere ihtiyaç vardır. Bu nedenle çimento hidrasyonu su ve çimentonun kapladığı hacimden daha fazla hacme sahip hidrasyon ürünleri tarafından kapiler boşluklar oluşturur. Kapiler boşluklar düzensiz şekildedirler, hava boşlukları ise küreseldir. Beton karışımı sırasında çimento hamurunda bir miktar hava hapsolür. Amaca yönelik olarak, bazen betona katkı eklenmesi suretiyle küçük hava boşluklarının sürüklenmesi sağlanır. Hapsolmüş hava boşlukları 3 mm'ye kadar büyük boyutlara ulaşabilir. Sürüklenmiş hava boşlukları genellikle 50-200 μm civarındadır. Hidrate çimento hamurundaki, hem hapsolmüş hemde sürüklenmiş hava boşlukları kapiler boşluklardan daha büyük boyutlardadır, bu nedenle dayanımı olumsuz yönde etkileyebilirler (Baradan vd 2012).

İyi hidrate olmuş çimento hamurunda, düşük su-çimento oranında kapiler boşluklar 10 μm 'den 50 μm 'ye kadar değişmektedir. Yüksek su-çimento oranına sahip çimento hamurunda hidrasyonun erken yaşlarında kapiler boşluklar 3 μm 'den 5 μm 'ye kadar değişebilmektedir. Hidrate çimento hamurunun karakteristik değerlendirmesinde boşluk ebatlarının dağılımı toplam kapiler boşluğundan daha önemli bir kriterdir. Literatürde, 50 μm 'den daha büyük kapiler boşluklar makro boşluklar, 50 μm 'den daha küçük, büzölme ve sünmede önemli rol oynayan boşluklar ise mikro boşluk olarak adlandırılır. (Mehta *et al.* 2006).

Ayrıca çimento hamuru içerisinde hava boşlukları da bulunmaktadır. Kılcal boşluklar düzensiz şekilde, hava boşlukları genellikle küresel olmaktadır. Az miktarda hava genellikle beton karıştırma işlemi sırasında çimento hamurunda sıkışır. Sıkışan hava boşlukları 3 mm kadar büyük olabilmektedir. Sürüklenen hava boşlukları genellikle 50 ile 200 μm aralığındadır. Bu nedenle, hidratlı çimento hamurunda bulunan hapsolmüş

ve sürüklenmiş hava boşlukları kılcal boşluklardan çok daha büyüktür ve mukavemeti olumsuz bir şekilde etkilemektedir (Mehta *et al.* 2006).

2.4.4. Ara yüzey bölgesinin içyapısı

Beton; agregâ, çimento hamuru ile bu iki bileşenin ara yüzeyinden oluşan 3 fazlı heterojen bir malzemedir. Agregâ-çimento hamuru arayüzeyi, betonda en zayıf halka olarak bilinir ve betonun kırılması bu zayıf yüzeye oldukça duyarlıdır. Agregâ-hamur ara yüzeylerinde çatlakların oluşması, betonun elastik olmayan davranışında önemli rol oynar. Mikro çatlakların iri agregâ ve onu çevreleyen harçta başladığı ve çatlak olayının ara yüzeyi içerdiği çalışmalar; betonun bu bölgesinin önemine işaret eder (Baradan vd 2012).

Arayüzey deneyleri yakın geçmişe kadar, tek bir agregâ tanesi ve çimento hamuru arasında yapılmaktaydı. Ancak, bu tip deneylerin sonuçları; diğer iri agregâ tanelerinin hatta ince agregânın karışımının etkilerini içermeyerek yanlış sonuçlara neden olabilir. Bununla birlikte; çimento hamuru tarafından kaplanmış bir tek tanenin incelenmesi, çimento hamurunun içyapısını etkileyen karıştırma sürecini içermez (Baradan vd 2012).

Deneyisel zorluklardan dolayı, beton içerisindeki ara geçiş bölgesi hakkında bilgi azdır. Bununla birlikte, Maso tarafından verilen tariflere dayanarak, mikroyapısal özelliklerinin bir kısmı, beton yerine yerleştirildikten itibaren zaman içinde gelişim sırasını izleyerek elde edilebilir (Mehta *et al.* 2006).

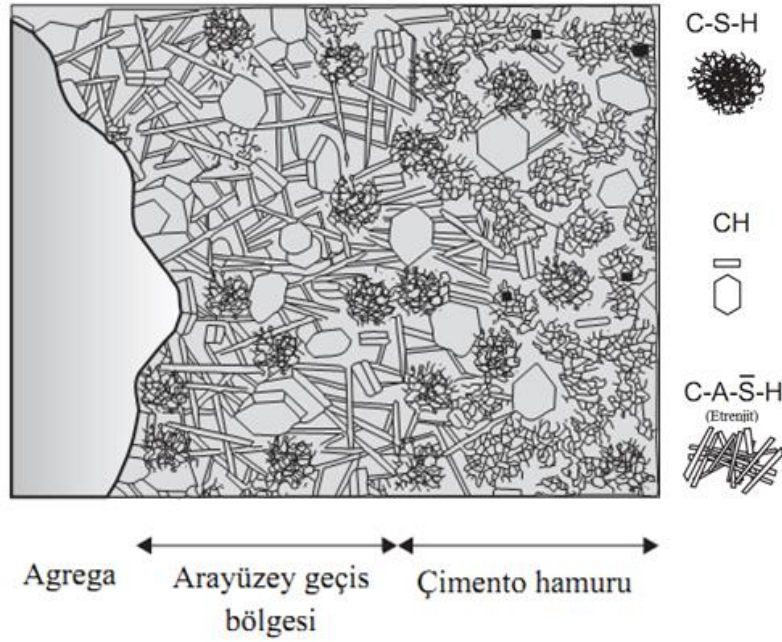
Birincisi, yeni sıkıştırılmış betonda, büyük agregâ parçacıklarının etrafında su filimleri oluşur. Daha sonra, kütle macununda olduğu gibi, kalsiyum sülfat ve kalsiyum alüminat bileşiklerinin çözülmesiyle üretilen kalsiyum, sülfat, hidroksil ve alüminat iyonları etrenjit ve kalsiyum hidroksit oluşturmak üzere birleştirilir. Yüksek su-çimento oranı nedeniyle, kaba agregâ civarında bulunan bu kristal halindeki ürünler nispeten daha büyük kristallerden oluşur ve bu nedenle dökme çimento macunu veya harç matrisinden daha gözenekli bir çerçeve oluştururlar. Son olarak, hidrasyon ilerlemesi ile zayıf

kristalin C-S-H ve etrenjit ve kalsiyum hidroksitten daha küçük kristaller, geniş etrenjit ve kalsiyum hidroksit kristallerinin yarattığı çerçeve arasındaki boş alanı doldurmaya başlar. Bu, ara yüz geçiş bölgesinin yoğunluğunu ve dolayısıyla mukavemetini arttırmaya yardımcı olur (Mehta *et al.* 2006).

Betondaki arayüzey geçiş bölgesinin taramalı elektron mikroskobu ve şematik olarak aşağıda gösterilmiştir (Mehta *et al.* 2006).



Şekil 2.17. Beton arayüzey geçiş bölgesi (a) SEM görüntüsü



Şekil 2.18. Beton arayüzey geçiş bölgesi şematik gösterimi

Erken yaşlarda, özellikle önemli bir iç terleme meydana geldiğinde, geçiş bölgesindeki boşlukların hacmi ve boyutu, dökme çimento hamuru veya harçten daha büyüktür. Kalsiyum hidroksit ve etrenjit gibi kristalin bileşiklerin boyutu ve yoğunluğu ara yüzey geçiş bölgesinde daha fazladır. Bu etkiler geçiş bölgesinin dökme çimento hamuruna kıyasla daha düşük mukavemeti oluşturmaktadır.

Arayüzey geçiş bölgesinin, betonun özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığı ve içyapının oldukça önemli bir parçası olduğu kabul edilir. Bazı durumlarda, baskın faktör olabilir. Örneğin, yüksek çekme dayanımı elde edilebilmesi için hamur ile agrega arasındaki aderans dayanımını belirleyen arayüzey geçiş bölgesinin azaltılması ya da iyileştirilmesi gerekir. Arayüzey geçiş bölgesinin kendisi oldukça dar olmasına rağmen, çimento hamurunun oldukça geniş bir oranını kaplar. Tipik bir betonda, agrega taneleri arasında ortalama boşluk 75 ile 100 μm arasındadır. Arayüzey geçiş bölgesinin yaklaşık 40 μm kalınlık kabulü ile çimento matrisinin %20 ila %40'ını kaplar (Baradan vd 2012).

Arayüzey alanının içyapıya etkisi şu şekilde açıklanır: Agreganın yüzeyi; arkasında yaklaşık aynı kalınlıkta C-S-H tabakası bulunan 0,5 μm kalınlığında kristalize $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tabakasıyla kaplıdır. Büyük $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin varlığı arayüzeydeki porozitenin diğer bölgelerden daha yüksek olduğunu işaret eder. Günümüzde arayüzey geçiş bölgesinin dayanımı yada daha önemlisi, agrega taneleri ve arayüzey geçiş bölgesinin arasındaki bağ dayanımının ölçülebileceği standart deney metotları yoktur (Baradan vd 2012).

Hidrate çimento hamurunun olduğu gibi, hidrasyon ürünleri ve agrega arasındaki yapışma Van der Waals çekim kuvvetlerinden kaynaklanır. Bu nedenle, herhangi bir noktada ara yüzey bölgesinin mukavemeti mevcut boşluk hacmi ve büyüklüğüne bağlıdır. Bu arayüz geçiş bölgesi boşluklarındaki yeni ürünlerin, çimento hamuru bileşenleri ile agrega arasında, silisli agregalar durumunda kalsiyum silikat hidratların oluşması veya kireç taşında olduğu gibi karboalüminat hidratların oluşması sonucu yavaş kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu etkileşimler ara yüz geçiş bölgesinde kalsiyum hidroksit yoğunluğunu düşürme eğiliminde olduğundan dayanıma katkıda bulunurlar (Mehta *et al.* 2006).

Büyük miktardaki kılcal boşluklara ve kalsiyum hidroksit kristallerine ek olarak, ara yüzey geçiş bölgesinin bozulmasına neden olan başlıca faktör mikro çatlakların varlığıdır. Mikro çatlak miktarı, agrega ebadı ve gradasyonu, çimento içeriği, su-çimento oranı, taze beton sıkılık derecesi, kür koşulları, çevre nemi ve beton ısı geçmişi gibi sayısız parametreye bağlıdır. Aynı koşullar altında agrega boyutu ne kadar büyük olursa su tabakası o kadar kalın olur. Bu koşullar altında oluşan ara yüz geçiş bölgesi agrega ve hidrate çimento hamuru arasındaki farklı hareketlerden kaynaklanan çekme gerilmelerine maruz kaldığında çatlama oluşmaktadır. Bu tür farklı hareketler genellikle kuruma veya betonun soğutması üzerine ortaya çıkar. Başka bir deyişle, beton bir yapı yüklenmeden önce bile ara yüz geçiş bölgesinde mikro çatlaklara sahip olabilir. Açıkçası, kısa süreli çarpma yükleri, kuruma rötresi ve yüksek gerilme seviyelerinde sürekli yükler, mikro çatlakların boyut ve sayısını arttırma etkili olmaktadır (Mehta *et al.* 2006).

Genel olarak zincirin en zayıf halkası olan arayüz geçiş bölgesi, betonda mukavemeti sınırlayan faz olarak kabul edilir. Ara yüzey geçiş bölgesinin varlığı, betonun iki ana bileşenden birinin gücünden çok daha düşük bir gerilme seviyesinde dayanımını kaybetmesine neden olmaktadır. Ara yüzey geçiş bölgesinde zaten mevcut olan çatlakları uzatmak için çok yüksek enerji seviyeleri gerekmez, hatta nihai gücün yüzde 50'sinde bile çatlak ilerlemesi olmaktadır. Bu, beton komponentlerinin (yani, agrega ve hidratlı çimento macunu veya harç) tek eksenli sıkıştırma testinde kırılmaya kadar genellikle elastik kaldıklarını, buna karşılık betonun esnek olmayan davranış sergilediğini göstermektedir. Bu olay, betonu oluşturan malzemeler (agrega ve hidrate çimento hamuru veya harç) tek eksenli basınç testinde kırılmaya kadar genellikle elastik kaldıklarını, buna karşılık betonun esnek olmayan davranış sergilediğini göstermektedir. Yüzey geçiş bölgesinin mikroyapısı, özellikle boşlukların ve mikro çatlakların hacmi, beton sertliği veya elastik modülü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kompozit malzemelerde, arayüz geçiş bölgesi harç ve kaba agrega arasında bir köprü görevi görmektedir (Mehta *et al.* 2006).

2.5. Betonun içyapısını etkileyen faktörler

Betonlarda aranan en önemli özellik yüksek bir mekanik mukavemet ve bunun yanında fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklılıktır. Mukavemet betonun diğer bütün özelliklerini az çok belirleyen bir parametre olarak kullanılır. Bu nedenle betonlar standartlarda basınç mukavemetleri esas alınarak sınıflandırılır. Yapılan araştırmalar, betonun basınç mukavemetinin yüksek olduğu oranda diğer (çekme, eğilme ve aşınma) mekanik mukavemetlerinin de yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durumda, basınç mukavemeti yüksek bir beton elde edildiğinde, bir ölçüde diğer mekanik mukavemetleri de yüksek bir beton elde edildiği kabul edilebilir. Pratikte basınç mukavemeti beton kalitesinin belirleyen ölçü olarak kullanılır (Yalçın vd 2006).

Gerek taze beton gerekse sertleşmiş betonun tüm özelliklerini beton karışımının oluşmasında kullanılan çimentonun, agreganın, suyun ve katkı maddelerinin özellikleri ve karışım içerisindeki yer almış oldukları oranlar tarafından etkilenmektedir.

Sertleşmiş beton, taze betonun katılaşmasından sonraki safhadaki durumu olarak tanımlandığı için, sertleşmiş betondan beklenen performans, büyük ölçüde taze betonun özelliklerine bağlı olmaktadır (Erdoğan 2003).

Serleşmiş betonun özelliklerini çok büyük ölçüde etkileyen başka faktörlerde bulunmaktadır. Bunlar, taze betonun uygun tarzda taşınması, yerine yerleştirilmesi, sıkıştırılması, yüzeyinin düzgünleştirilmesi ve hidrasyonunun sağlıklı şekilde yer alabilmesi için kür edilmesi işlemidir. Sertleşmiş betondan beklenen özelliklerin elde edilebilmesi için bu işlemlerin uygun tarzda yerine getirilmiş olmaları gerekmektedir (Erdoğan 2003).

Betonun kendinden beklenen performansı, hedeflenen süre içerisinde gösterebilmesi için öncelikle betonun doğru bir şekilde üretilmesi gerekmektedir. Betonun, taze ve sertleşmiş haldeki iken hedeflenen dayanım ve dayanıklılığı göstermesi için dikkate alınması gereken bazı temel parametreler mevcuttur.

Betonun dayanımı ile içyapı arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır. Dolayısı ile betonun mukavemetini etkileyen ana unsurlar aynı zamanda betonun içyapısını da etkilemektedir. Betonun mukavemetini ve içyapısını etkileyen ve büyük önem taşıyan bu parametreler ve etkilerinin kısaca ele alınması faydalı olacaktır.

2.5.1. Çimento tipi

Beton mukavemeti, kullanılan çimento cinsine büyük ölçüde bağlıdır. Betonun içinde bulunacağı duruma göre en uygun çimento cinsinin kullanılması gerekir. Puzolan katkılı çimentolarla yapılmış betonların, puzolanların beton içindeki serbest kireci bağlaması nedeniyle daha boşluksuz oldukları bilinmektedir. Bu tip çimentolar hidrasyon ısısının düşük olması gereken kütle betonlarında da tercih edilir. Erken kalıp alma, soğukta betonlama vb. erken mukavemet kazanılması istenilen özel yapılarda da yüksek mukavemetli çimento kullanılması beton dayanıklılığın artmasını sağlar (Yalçın vd 2006).

Çimento cinci yanında çimento miktarı da beton kalitesinin doğrudan etkiler. Çimento dozajının hem mukavemet artırıcı hem de boşluk yüzdesini azaltıcı yönde etkisi vardır. Ancak yaklaşık olarak 400 kg/m^3 den sonra beton dozajının artırılması halinde artık rötre nedeni ile çeşitli sorunlar ortaya çıkar. Diğer yandan ekonomik nedenlerle çimento dozajı istenildiği kadar artırılmaz. Çimento dozajının yüksek oluşu yalnız beton mekanik mukavemetini artırmakla kalmayıp, beton yapıyı daha homojen hale getirir ve böylece kapilerite yoluyla meydana gelen geçirimsizliği de azaltır (Yalçın vd 2006).

Çimentonun asıl görevi, betonun iskeletini oluşturan kum ve çakıl tanelerini birbirine bağlamak suretiyle beton bünyesinde aderans ve kohezyonu sağlayarak betona mekanik mukavemet kazandırmaktır. Diğer koşullar aynı kalmak suretiyle, çimento dozajı artırılarak beton basınç mukavemetinde artış sağlanabilir. Çekme ve eğilme mukavemetleri ise çimento dozajının belli bir değerine kadar çimento dozajı ile birlikte beraber artmakta, bu değerden itibaren dozaj artırıldığı halde bu mukavemetlerde herhangi bir artış gözlenmemektedir (Yalçın vd 2006).

Beton geçirimsizliği esas olarak çimento tarafından sağlanır. Çimento agregaya yapışarak bunları sıkıca bağlar ve suyun beton içine girmesini engeller. Bu nedenle mekanik mukavemetin sağlanması için gerekli olmasa bile, salt geçirimsizliği sağlayabilmek için çimento dozajının belli bir değerden aşağıda düşmemesi gerekir. Diğer taraftan rötre, çimento dozajı ile artış gösterdiğinden, dozaj belli bir değeri de geçmemelidir (Yalçın vd 2006).

2.5.2. Karışım ve bakım suyu

Suyun betonla ilişkisi üretim, bakım aşamaları ve servis ömrü boyunca sürekli değişkenlik göstermektedir.

Beton üretiminde karışım suyunun iki görevi vardır. Suyun ilk görevi, hidrasyon adı verilen kimyasal reaksiyonu başlatmak ve sürdürmektir. Suyun betonda az veya çok

kullanımı, hidrasyon ürünlerinin oluşum miktarlarını ve beton bünyesindeki boşluk yapısını belirleyerek betonun dayanım ve dayanıklılığını etkiler (Baradan vd 2012).

Öte yandan kimyasal reaksiyon için gerekli olan su miktarı betonu işlenebilirliği için yetersizdir. Bu nedenle karışım suyu olarak kullanılan su hemen hemen her zaman hidrasyon için gerekli olan sudan fazla olmaktadır. Plastik haldeki beton bünyesinde gereğinden fazla su barındırıyorsa ayrışma ve terleme riski ortaya çıkar. Ters durumda ise yerleştirme ve perdahlama işlemlerinde sıkıntı yaşanabilir. Bu yüzden her beton karışımı için en uygun su ihtiyacı, işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık parametreleri dikkate alınarak tespit edilir (Baradan vd 2012).

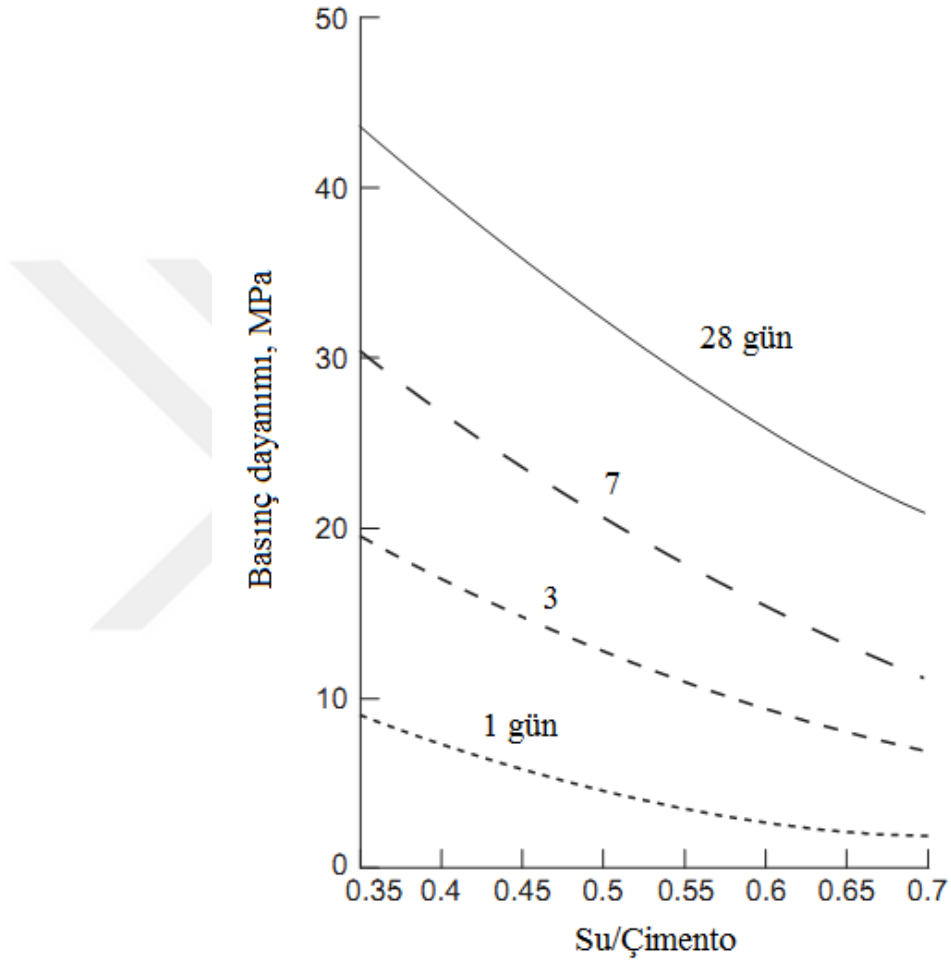
Çimento hamurunun ve taze betonun hazırlanmasında kullanılan suyun kalitesi çimento ile su arasındaki hidrasyon reaksiyonlarının oluşmasını, gelişme hızını ve buna bağlı olarak priz süresini etkileyen önemli bir faktördür. Kullanılan suyun içinde bazı tuzların bulunması halinde sertleşmiş beton yüzeyinde çiçeklenme adı verilen beyaz lekeler meydana gelmekte, estetik görünüm bozulmakta ve betonun geçirimsizliğinde artış meydana gelmektedir. Bu sebeple deniz suyu donatılı ve ön gerilmeli betonarme yapılarda donatı korozyonu riskini artıracığından betonarme yapılarda kullanımından kaçınılmalıdır. Ayrıca karışım suyunda fazla miktarda bulunan kil ve silt çimento-agrega ve beton-donatı arasındaki bölgede birikerek bu elemanlar arasındaki aderansı zayıflatır (Baradan vd 2012).

2.5.3. Su/çimento oranı

Duff Abrams, 1918'de Illinois Üniversitesi Lewis Enstitüsünde kapsamlı testlerin sonucunda su-çimento oranı ile beton mukavemeti arasında bir ilişki olduğunu bulmuştur. Popüler olarak Abrams'ın su-çimento oranı kuralı olarak bilinen bu ters ilişkisi aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Mehta *et al.* 2006).

$$f_c = \frac{k_1}{2k_{2w/c}} \quad (2.1)$$

Burada, w/c beton karışımında su-çimento oranını, k_1 , k_2 ise ampirik sabitlerdir. Belli bir su küründe yaşa bağlı olarak su-çimento oranı ve mukavemet arasındaki ilişkiyi gösteren tipik grafik aşağıdaki Şekil 2.19'da gösterilmektedir (Mehta *et al.* 2006).



Şekil 2.19. Su-çimento oranı ve suda kür yaşının beton mukavemeti üzerine etkisi

Çimento hidrasyon reaksiyonu için teorik su/çimento oranı %23-24 civarındadır. Pratikte betonu işlenebilir bir kıvamda tutabilmek için su/çimento oranı bu değerden daha büyük olarak seçilir. Beton içine zorunlu olarak karıştırılmış olan bu fazla su, daha sonra buharlaşıp beton bünyesini terk eder. Böylece beton içinde boşluklar oluşur ve beton mukavemeti düşer (Yalçın vd 2006).

Su/çimento oranının yüksek olması, taze betonun kalıp içinde yeterli ölçüde sıkışmasını önleyerek kompasitenin düşmesine neden olur. Bu durum betonun porozitesi üzerinde olumsuz etki yaparak beton permeabilitesinin artmasına neden olur. Kuşkusuz beton içerisinde gereğinden az su katılmış olmasının da sakıncaları vardır. Bu durumda betonun kalıp içine üniform bir şekilde yerleştirilmesi güçleşir. Ancak bu sakınca beton karışımı içine akışkanlığı artırıcı katkı maddeleri katılarak giderilmeye çalışılır. Betonların fiziksel ve mekanik mukavemetlerini artırmak için su/çimento oranlarının mümkün olduğunca küçük tutulması gerekir. Beton yapımında gereğinden fazla su kullanmak beton mukavemeti üzerinde en az eksik çimento kullanmak kadar olumsuz etki yapar. Bu durum, tartısız su katılan ve slump kontrolü bile yapılmadan hazırlanan betonların mukavemet düşüklüğünün en önemli nedenini oluşturur (Yalçın vd 2006).

2.5.4. Agrega gradasyonu ve cinsi

Beton teknolojisinde, su-çimento oranı ile mukavemet arasındaki ilişkide aşırı vurgu yapılması bazı problemlere neden olmuştur. Örneğin, agreganın beton mukavemeti üzerine etkisi genel olarak göz ardı edilmektedir. Agrega mukavemeti, normal mukavemetli betonda genellikle bir faktör olmadığı doğru kabul edilebilir, çünkü hafif agregalar hariç, agregatik partikül matris ve beton içindeki ara yüz geçiş bölgesinden birkaç kat daha güçlüdür. Diğer bir deyişle, çoğu doğal agregalar ile agreganın dayanımı az kullanılır çünkü kusurlar diğer iki faz tarafından belirlenir (Mehta *et al.* 2006).

Bununla birlikte, beton dayanımını etkilediği bilinen boyut, şekil, yüzey dokusu, gradasyon (tane dağılımı) ve mineraloji gibi özellikler beton mukavemetini çeşitli derecelerde etkilmektedir. Sıklıkla agregalar özelliklerinin beton dayanımına etkisi, su-çimento oranındaki bir değişime kadar gözlemlenebilir. Ancak, yayınlanan kaynaklarda bunun her zaman geçerli olmadığı yönünde yeterli kanıt bulunmaktadır. Ayrıca, teorik değerlendirmelerden, su-çimento oranından bağımsız olarak agregalar parçacıklarının boyutu, şekli, yüzey dokusu ve mineralojisi ara yüz geçiş bölgesinin özelliklerine etki edeceğinden beton dayanımını da etkilemesi beklenebilir (Mehta *et al.* 2006).

Beton üretiminde ince agregâ (kum) ve kaba agregâ (çakıl) olmak üzere iki tip agregânın karışımı kullanılır. Agregalarda aranan birinci özellik, agregâ içinde kil toprakları, organik maddeler, klorür ve sülfat tuzları gibi zararlı bileşenlerin bulunmamasıdır. Bunun yanında beton içinde kullanılan agregaların, cinsi, biçimi ve granülometrik özelliklere de beton mukavemeti üzerinde etki yapar. Yalnız agregâ granülometrik eğrisi değil, maksimum tane çapı da beton mukavemetini etkiler. Bu etki birbiri ile çelişen iki farklı sonuç doğurur. Aynı çimento dozajı ve aynı kıvamda hazırlanan betonlarda maksimum tane çapının artırılması su/çimento oranını azaltıcı yönde etkiler. Böylece beton mukavemetinde artış beklenir. Buna karşılık agregâ maksimum çapındaki artış beton içindeki boşlukların artmasına neden olur ve bu durum beton mukavemetini olumsuz etkiler. Nitekim aynı çimento dozajında ve kıvamda hazırlanmış olan beton karışımlarının mukavemeti maksimum agregâ tane çapı arttıkça önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Yalçın vd 2006).

Agregaların mineralojik bileşimindeki farklılıkların beton dayanımını da etkilediği bilinmektedir. Çalışmalar, aynı karışım oranları ile bir kalkerli agregânın silisli bir agregânın yerine kullanılmasının mukavemet artışına neden olabileceğini göstermiştir (Mehta *et al.* 2006).

Beton içinde kullanılan kumun incelik modülünün yüksek olması da beton mukavemetini etkiler. İncelik modülü artırılarak daha az çimento kullanılarak aynı mukavemet değeri elde edilebilir (Yalçın vd 2006).

2.5.5. Betonun kürü

Beton kürlenmesi terimi, bir beton karışımın kalıba yerleştirilmesinden hemen sonra çimento hidratasyonunu için gerekli olan koşulları, yani zaman, sıcaklık ve nem koşullarının birleşimini kapsamaktadır (Mehta *et al.* 2006).

Normal sıcaklık koşullarında, portland çimentosunun oluşturan bileşiklerinden bir kısmı, su ilave edildiği andan itibaren hidrate olmaya başlar ancak hidratasyon ürünleri

hidrate olmamış çimento tanelerinin kapladığında örtü sebebi ile hidrasyon reaksiyonları önemli ölçüde yavaşlar. Bunun nedeni, hidrasyonun doygunluk koşullarında yeterli olduğunda ilerleyebilmesidir. Kılcal boşluklarda bulunan su buhar basıncı doygunluk neminin yüzde 80'in altına düştüğünde neredeyse hidrasyon durur. Bu nedenle zaman ve nem, su difüzyonuyla kontrol edilen hidrasyon sürecinde önemli faktörlerdir. Ayrıca, tüm kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi, sıcaklık da hidrasyon reaksiyonları üzerinde hızlandırıcı bir etkiye sahiptir (Mehta *et al.* 2006).

Kür işleminin amacı, betonda başlangıçta su ile dolu olan taze beton çimento hamuru boşluklarının mümkün olduğunca hidrasyon ürünleri ile dolmasını sağlamaktır. Bu durum betonun suya doygun veya doyguna mümkün olduğunca yakın tutulması ile gerçekleşmektedir. Bu sebeple, betonun dayanımı ve dayanıklılığı sadece doğru ve yeterli süre kür edildiğinde tam olarak gelişir (Baradan vd 2012).

2.5.6. Beton katkıları

Mineral katkıların kullanımı sertleşmiş çimento hamurunun yapısının modifikasyonuna yol açar ve özellikle arayüzey bölgesinde değişikliklere sebep olur. Normal dayanımlı betonlar için uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları dayanımda küçük etkiler ile çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılabilir. Bu durumda genellikle uzun dönemli dayanım artarken başlangıç dayanımı ve dayanım kazanma hızı azalabilir (Baradan vd 2012).

Erken yaşlarda uçucu kül ikamesi basınç dayanımı değerlerini azaltmaktadır. Zaman ilerledikçe gelişen pozolanik reaksiyonlar ile uçucu külün kullanımı dayanıma katkı sağlamıştır. 90 gün kür süresinden sonra çimento yerine %60 uçucu kül kullanımı ile bile uçucu kül içermeyen kontrol betonunun basınç dayanımı yakalanmıştır. Silis dumanı C_3S ve C_2S den kaynaklanan kalsiyum hidroksiti bağlamanın yanında çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurarak çatlakların başlayacağı kusur boyutlarını azaltır. Silis dumanının sözü edilen pozolanik ve filler etkisi dayanımı artırır, katkısız

yapılan betonlar ile kıyaslandığında ara yüzey bölgesinin porozitesini ve kalınlığını büyük oranda azaltır (Baradan vd 2012).

Kimyasal katkıların betonun su/çimento oranı veya porozitesine olan etkisi dışında betonun dayanımı üzerinde doğrudan etkisi bulunmamaktadır. Kimyasal katkıları diğer bir etkisini, gerek çimentonun hidratasyonunu hızlandırarak gerekse yavaşlatarak dayanım kazanma hızında gösterirler.

2.6. Beton İçyapısını İnceleme Yöntemleri

Beton, çimento, ince-kaba agrega, ve su gibi maddelerin karıştırılması ile oluşan ve sertleşerek dayanım kazanan kompozit bir malzemedir. Birçok beton, çimento-agrega-su birlikte hava sürükleyici gibi kimyasal katkılara ek olarak uçucu kül, elyaflar, cüruf gibi mineral katkıları ve diğer bazı malzemeleri de içermektedir.

Betonun, fiziksel, kimyasal ve durabilite özellikleri, karışımın miktarına ve türüne, sıcaklığa, boşluk yapısına ve dağılımına, yüzey alanına ve ara yüzey özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Sonuç olarak çimentolu kompozitlerde gelişen süreçlerin iyi anlaşılması için farklı teknik ve yöntemlerin uygulanması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik teknikler beton araştırma ve uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntemler, hammadde karakterizasyonu, kalite kontrol, ürünlerin kantitatif tahmini, performans tahmini, hızlandırmış test yöntemlerini geliştirme, ürünler arasındaki fiziksel, kimyasal ve mekanik etkileşimleri anlama ve yeni malzeme geliştirme gibi önemli bilgileri sağlar. Pekçok durumda, tek bir teknik gerekli olan bütün bilgiyi sağlayamaz, bu yüzden uygulamalarda çeşitli teknikler gerekli hale gelir (Ramachandran *et al.* 2000).

Betonun temel mikroyapı ifadesi, çimento ve agregaya su ilave edildiği betonda mikro düzeyde gelişen yapı anlaşılır. Bunun nasıl geliştiğini veya betonun bazı özelliklerinin

nasıl iyileştirileceğini anlamak için sertleşmiş betonun temel mikro yapısı hakkında kapsamlı bir farkındalık gerektirir. Betonun mekanik özellikleri daha çok kendi içsel mikroyapsına bağlıdır.

Betonun içyapısı yüksek çözünürlükteki mikroskop ile incelendiğinde, hidrate olmuş çimento hamuru, agrega ve agrega-çimento arasındaki arayüzey geçiş bölgesinden oluştuğu bilinmektedir.

2.6.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

X-ışını mikroanalizi ve dijital görüntü analizi yapmak için donatılmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazını kullanarak bir örneği incelediğimizde üç temel aktiviteyi gerçekleştirebiliriz. Bunlar, SEM görüntüsünü kullanarak numuneye bakabiliriz, x-ışını mikroanalizini kullanarak analiz yapabiliriz ve dijital görüntü analizini kullanarak ölçüm yapabiliriz (Winter 2012).

Çoğu SEM, SEM bölmesinde (SEM chamber) yüksek vakumda çalışır. Bazı SEM, düşük basınçlı bölmedeki hava ile çalışır, bunlar genellikle çevresel SEM veya ESEM olarak bilinirler. ESEM kullanmanın iki avantajı vardır. Birincisi, ESEM bölmesinin içindeki hava, numune yüzeyini şarj edinmekten engeller. İkincisi ise, ESEM bölmesindeki düşük basıncın ıslak numunelerin incelenmesine izin vermesidir (Winter 2012).

Normal bir SEM cihazı iletken numuneler gerektirir. Bazı numuneler (örn. demir) iyi iletkenler ve ilave iyileştirme gerektirmezler. Eğer numune iletken değil ise, negatif yük hızlı bir şekilde elektron ışınını itici bir yüzey oluşturur. Bu durum, ya kötü görüntü alınmasına sebep olur ya da görüntü alınmasını engeller. Çimento ve betonu da içeren iletken olmayan numunelerde bunu engellemek için, numunenin yüzeyine ince bir iletken tabaka uygulaması yapılır. Bu iletken tabaka karbon, altın ya da altın ve paladyum karışımı olabilir (Winter 2012).

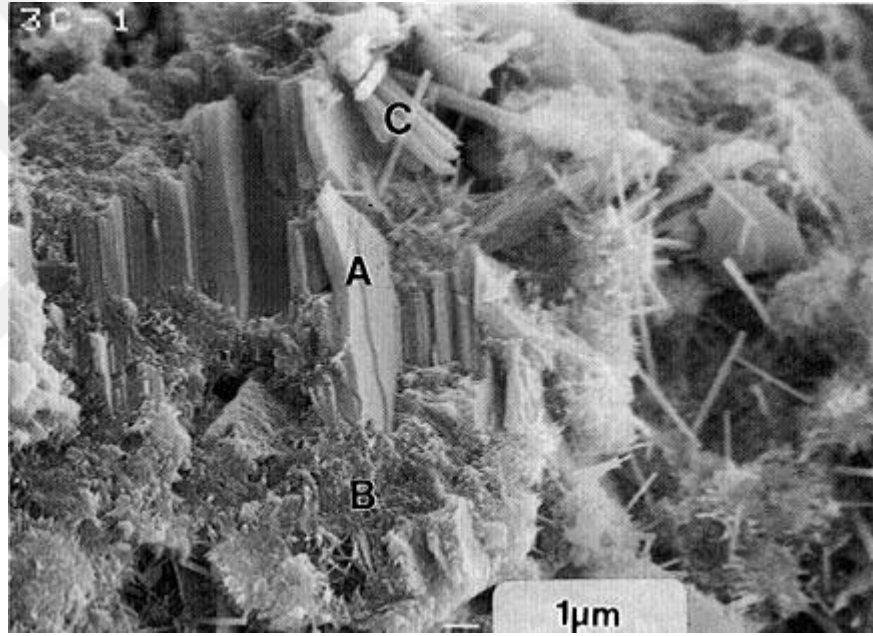
ESEM’de incelenen numune çevresinde yükü dağıtan hava bulunduğundan kaplanması gerekmez. Bunun anlamı, örneğin bir beton parçasının kırılma yüzeyi bölmeye yerleştirebilir ve iletken bir tabaka uygulamasına gerek kalmadan direkt olarak incelenebilir olmasıdır. Kaplama SEM görüntüsündeki ince detayları gizleyebilir ve numunenin EDX spektrumlarını etkileyebilir olmasından dolayı bu faydalıdır (Winter 2012).

Çimento esaslı numunelerin özellikle erken yaşlardaki kırılma yüzeyinin morfolojini çalışma gibi bazı özel uygulamalarda ESEM kullanılmasının avantajları vardır. ESEM cihazı SEM ile kıyaslandığında, daha kompleks ve yüksek derecede uzmanlık ve kullanım becerisi gerektirdiği görülür. Sertleşmiş beton araştırmacıları özellikle parlatılmış kesitlerin incelenmesinde normal SEM kullanırlar (Winter 2012).

Taramalı elektron mikroskopisi (SEM), malzemelerin hem topografik hem de içerik analizini sağlayan bir tekniktir. Birçok SEM, elektron demeti uyarımı sırasında numuneden çıkan x-ışınlarını tespit eden bir enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile donatılmıştır. SEM ve EDS kullanımı betonun herhangi bir standart test prosedürüne girmez ve bu nedenle bu teknik inceleme aracı olarak kullanılmak üzere nispeten yenidir. SEM'in karakteristik özellikleri, doku yüzeylerinin üç boyutlu bir görünümüyle sonuçlanan gelişmiş çözünürlük, yüksek büyütme ve geniş alan derecesidir ve çimento ve betonda birçok uygulamaya sahiptir.

Ayrıca bu teknikle çimentoya ve agrega su ilave edildiğinde temel mikroyapının anlaşılması, betonun mekanik özelliklerini, gözeneklerin nihai dağılımını, hidrate çimento hamurunun gözenekliliğini, mümkün olan değişik puzolanik malzemelerin reaksiyon kinetiğini iyileştirmek için mikro düzeyde önemlidir. Bu teknik aynı zamanda görüntü bozulmasının nedenini, kapsamını ve mekanizmasını bilmemize yardımcı olur. Mikroskopinin performansı, mikroskopun çözünürlüğüne ve gözlenen fazları arka plandan ayırmak için yeterli kontrasta sahip bir görüntü sunma yeteneğine bağlıdır (Sarkar vd 2001).

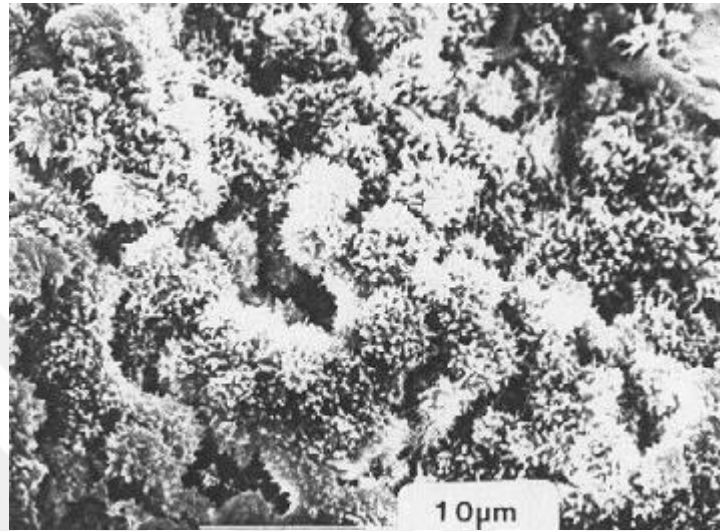
Hidrate çimento hamurun SEM analizi: Su/çimento oranı 0,50-0,55 arasında değişen normal betonda hidrate olmuş çimento hamuru; a) hidrate çimento hamurunun katı hacminin %55-60'ını oluşturan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), b) hidrate çimento hamurunun katı hacminin %20-25'ini oluşturan kalsiyum hidroksit (CH), c) Geriye kalan kısmı ise kalsiyum sülfaloüminat hidrat (etrenjit), hidrate olmamış çimento hamuru, hamur boşlukları oluşturmaktadır (Şekil 2.20). Hidrate olmamış çimento hamurunun miktarı, çimento inceliği, su/çimento oranı, çimento hidratasyonunun derecesine bağlı olarak değişmektedir (Ramachandran *et al.* 2000).



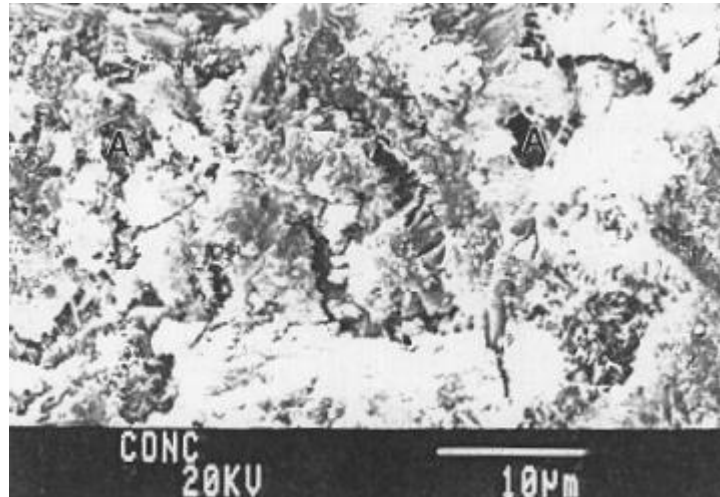
Şekil 2.20. Su/çimento oranı 0,55 olan betonda hidrate çimento hamuru yapısı A=CH, B=C-S-H ve C=Etrenjit

C-S-H Fazı: C-S-H fazı, betonun en önemli özelliği olan mukavemete katkıda bulunduğu ve nihai ürün olan betona bağlayıcılık özelliği kazandırdığından dolayı çok önemli bir bileşendir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), C-S-H fazının bileşimini ve morfolojisini karakterize etmede son derece faydalı olmuştur. Beton içerisindeki C-S-H fazı, normal sıcaklıklarda üretilmiş betonlarda jel yapısı ile ifade edilirken, yüksek sıcaklıklarda az kiristalden kristale değişebilmektedir. SEM altında, normal sıcaklıkta C-S-H'nin morfolojisi basit lifli modelden düzensiz tanelerden örülü

bir ağ yapısını oluşturduğu görülmektedir (Şekil 2.21 ve 2.22). C-S-H fazının mikroanalizi, Ca/Si oranı, su/çimento oranına ya da betonda bulunan mineral katkı maddelerinin varlığına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir (Ramachandran *et al.* 2000).



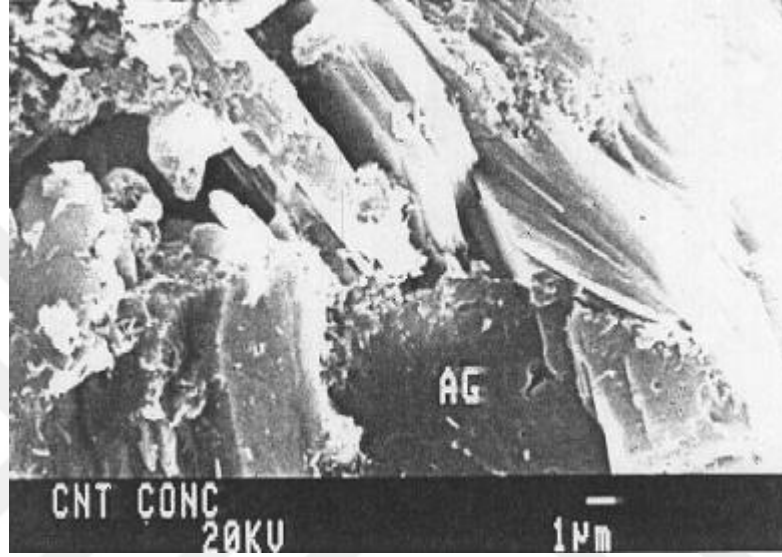
Şekil 2.21. Yüksek su/çimento oranlı betonda geçirgen ve boşluklu hidrate çimento hamurunu oluşturan lifsi C-S-H



Şekil 2.22. Düşük su/çimento oranlı (0,40) betonda yoğun hidrate çimento hamurunu. Gözenekler (A) küçük ve geçirgenlik düşüktür

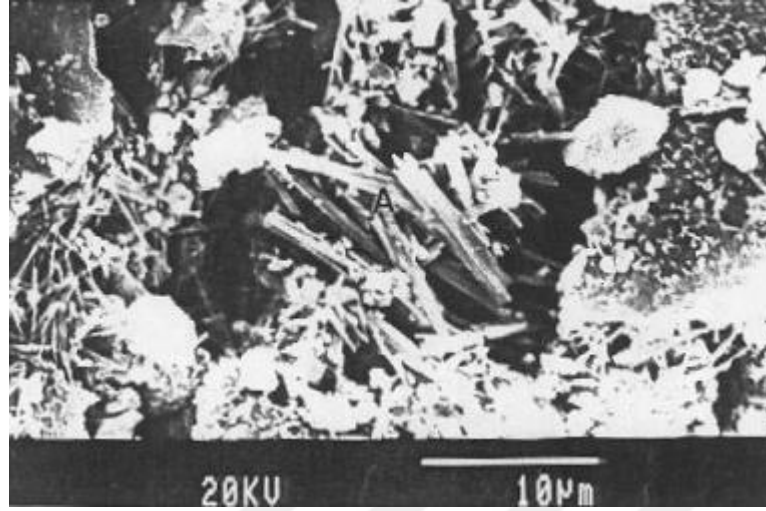
Kalsiyum hidroksit (CH) kristalleri: CH kristalleri, büyükten başlayarak levhamsı kristaller genellikle onlarca farklı altıgen prizma morfolojisi ile büyük ince uzun

kristaller, ince yaygın kristaller, bloklu kütlelerden ince ince yaygın kristallere kadar çok farklı şekil ve boyutlarda görünmektedir. Kalsiyum hidroksit kristalleri hamur-agrega arayüzey boyunca tercih edilen C-kristalografik eksenine paralel bir arayüzey geliştirme eğilimindedir (Şekil 2.23) (Ramachandran *et al.* 2000).



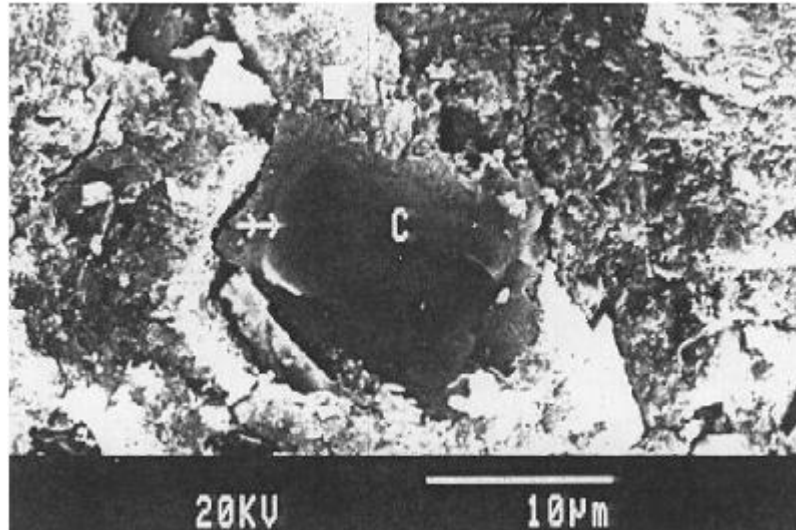
Şekil 2.23. Artmış hamur boşluğu ve agregası yüzeyinde CH kristalinin büyümesine yönelmesini gösteren hamur-agrega ara yüzeyi, AG=Agrega

Kalsiyum sülfoalüminat hidrat fazı (Etrenjit): SEM, betonda kalsiyum sülfoalüminat hidrat (etrenjit) ve monosülfatın iki farklı morfoloji tanımlar. Genellikle etrenjit, erken hidratasyon süresinde boşluklarda iğne gibi kristal şekli alır (Şekil 2.24). Bunların daha sonra şekillenmesi durumunda boşluklardaki suyu emerek genişlemesi sonucunda dağılmalara neden olduğu bilinmektedir. Monosülfat, altıgen düz kristal gibi görünür (Ramachandran *et al.* 2000).



Şekil 2.24. Beton hidrate çimento hamuru içinde boşluklarda gelişen etrenjit iğneler (A)

Hidrate olmamış çimento parçaları: Bunlar, karakteristik parlaklıkları ve ikincil elektron modundaki (Şekil 2.25) morfolojilerinden dolayı BSE görüntülerinde çok kolay tespit edilebilirler. Su/çimento oranının lokal olarak istenmeyen değişimi sonucunda heterojen ve gözenekli bir yapı meydana getirir. SEM, hidrate çimento hamurunun gözeneklerinin nihai dağılımını incelemeye son derece yararlı olabilir (Ramachandran *et al.* 2000).



Şekil 2.25. Hidrate çimento hamuru içinde hidrate olmamış çimento tanesi (c)

Hidrate çimento hamuru boşluğu: Hidrate çimento hamuru iki tür boşluk içerir. Birinci boşluk, hidrate olmamış çimento hamuru taneleri arasındaki boşluklar olarak temsil edilen fakat bu boşluk aynı zamanda hidrate C-S-H jeli arasındaki boşluklarda görülebilmektedir. Bu boşluklar SEM görüntüsünde açıkça görünür. İkinci boşluk türü C-S-H jelinin içerisindeki jel boşluklarıdır. Bu boşluklar SEM ile çözülmek için çok küçüktür.

Agrega SEM analizi: Petrografi minerolojik bileşiklerin şekil, boyut, yüzey dokusu ve potansiyel alkali reaktivitesinin belirlenmesi hala vazgeçilmez bir araç olmasına rağmen, SEM genellikle agregadaki zararlı bileşenlerin doğası ve kimyasal bileşimini belirlemek için, agreganın çimento ile zararlı reaksiyon ürünlerini belirlemek için ve agreganın boşluk yapısı ve boşlukların birbirleri ile bağlantısı hakkında bilgi elde etmek için faydalı bir görev görür (Ramachandran *et al.* 2000).

Agraga-çimento hamuru arayüzeyi SEM analizi: Çimento hamuru ile agregadaki arayüzeyin betonda zayıf mikroyapı bileşeni olduğu iddia edilmektedir. Betonun mikroyapısı üzerine önemli SEM uygulamaları arayüzey geçiş bölgesi içinde yapılmıştır. Mikromorfolojik araştırmalar agregada yüzeyinde ince bir hidratasyon ürününün varlığını göstermiştir. Barnes *et al.* bu tabaka kalsiyum hidroksit kristallerini içeren dubleks filmi, agregada yüzeyine dik doğrultuda C-S-H oluşan bir tabaka tarafından çevrelenmiş olarak tespit edilmiştir. Bu bölgede gözlenen önemli yapısal özellikler; hidrate olmamış çimento parçacıklarının olmaması, etrenjit yoğunluğunun artmış, çimento hamurundan daha yüksek gözeneklilik olması ve büyük levhamsı CH kristallerinin olmasıdır. Bu bölgedeki tamamlanmış çimento hidratasyonu, arayüzeydeki s/ç oranının diğer yerlerden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Betonun dayanım ve dayanıklılığı büyük ölçüde çimento-agrega arayüzey tarafından belirlenir. Arayüzey bölgesi boyunca CH miktarını azaltarak bir iyileşme elde etmenin yolu betonda s/ç oranını azaltmaktır. SEM incelemeleri ile s/ç oranını azaltmanın arayüzey bağlamada artışa etkisi kolayca görülebilir. Hamurdaki boş alanlarda CH varlığı, doğrudan boşluk varlığına ve yüksek su içeriğine bağlıdır, bu yüzden s/ç oranını azaltma CH kristalizasyonunda artışa bağlıdır. Diğer alternatif, silis dumanı, uçucu kül gibi mineral

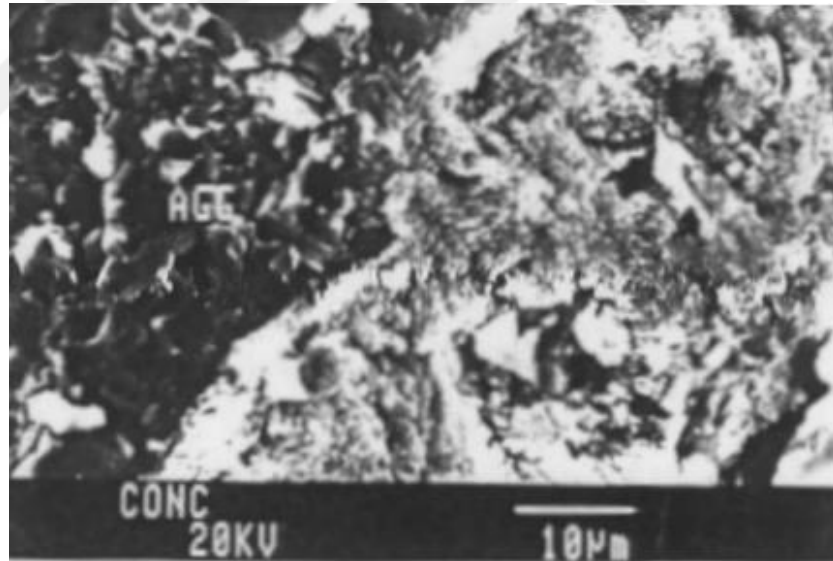
katkılar katarak puzolanik reaksiyon ile CH tüketimi agrega-hamur arayüzeyindeki iyileşmeye yardımcı olur (Ramachandran *et al.* 2000).

Beton katkıları: Eski çağlardan bu yana ve geleneksel olarak betondaki kimyasal ve mineral katkıların amacı taze beton, serleşmiş beton veya her iki durumdaki betonun özelliklerini geliştirmektir. Bu katkıların birlikte kullanıldığı yeni nesil betonlar ise yüksek performanslı betonlar olarak adlandırılır. Silis dumanı, uçucu kül gibi puzolanik ve cüruf gibi çimento esaslı bu katkılar betonun temel mikro yapısını değiştirir. Karışımların rolünü anlamamızı sağlar, SEM kullanarak derinlemesine mikroyapı araştırması hidrasyon süresinin bir fonksiyonu ve nihai ürünün şartlarına bağlıdır (Ramachandran *et al.* 2000).

Mineral katkıların SEM analizi: Mineral katkılar betonun mikroyapısında iki önemli değişiklik meydana getirir. İlk olarak, katkı katıldığında yoğun, yüksek geçirimsiz (Şekil 2.26) ve bu bölgede oluşan CH kristallerinin belirgin bir şekilde daha düşük bir miktarı ile güçlü bir hamur-agrega arayüzeyi oluşturur (Şekil 2.27). Oluşan beton dışarıdan gelen agresif kimyasalların geçirimsizliğine karşı daha fazla direnç kazanır. Ana hidrasyon ürünü C-S-H'nin mikronalizi, düşük Ca/Si oranında üretilmiş normal bir betondaki C-S-H'a yakın içeriksel bir benzerlik gösterir. İkinci olarak, CH kristallerinin hacim ve boyutu daha düşüktür. Matris yoğunlaşması, hamur-agrega arayüzü, artan geçirimsizlik, azalmış boşluk yapısı gibi bütün bu değişimler SEM altında tespit edilebilir (Ramachandran *et al.* 2000).



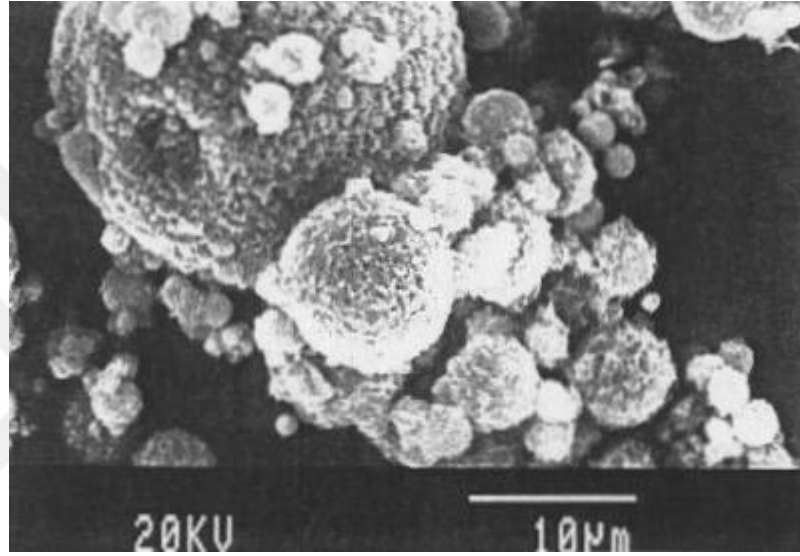
Şekil 2.26. Düşük s/ç silis dumanlı betonda yoğun hidrate çimento hamuru, A=C-S-H, B=CH'in küçük kristalleri



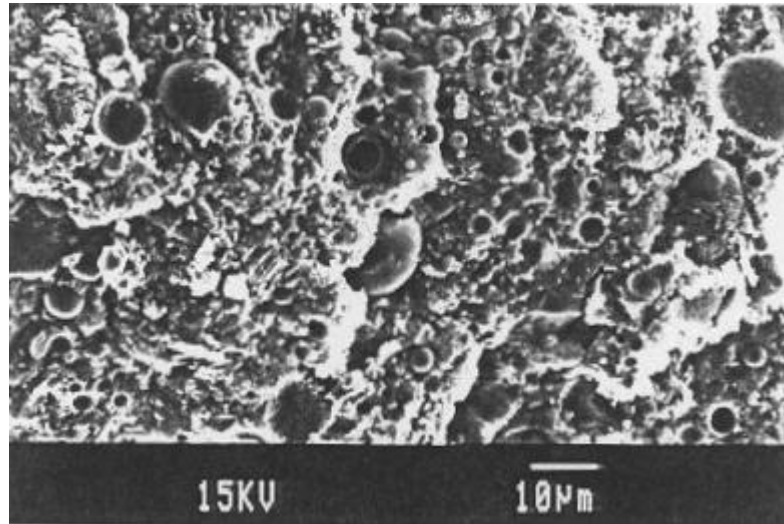
Şekil 2.27. Düşük s/ç silis dumanlı betonda hamur-agrega arayüzeyi (Arayüzde CH kristali yoktur), AGG=agrega, P=hidrate çimento hamuru

Betonda uçucu külün SEM analizi: Uçucu kül genellikle camsı içi boş küreler şeklinde, bazen içi dolu küçük küreler şeklinde bulunabilir (Şekil 2.28). Genellikle düşük kalsiyumlu uçucu külün (F sınıfı) yüzeyi muadili olan yüksek kalsiyumlu uçucu külün (C sınıfı) yüzeyinden daha temiz görünür. Parçacık yüzeyindeki alkali-sülfatların depositileri uçucu külün hidratasyon ürünü olarak sadece EDX analizi ile belirlenebilir,

yüksek oranda alüminyumlu uçucu kül hidratasyonu hariç, portland çimentosunun normal hidratasyonundan üretilmiş C-S-H'a çok benzerdir. Sonuç olarak, C-S-H sonuçları gibi benzer jellerdeki azalma, uçucu küllü betonda daha ince gözenek yapısına sahip yoğun hamur üretilir ve kılcal gözenek oranında bir azalmaya yol açar (Şekil 2.29) (Ramachandran *et al.* 2000).

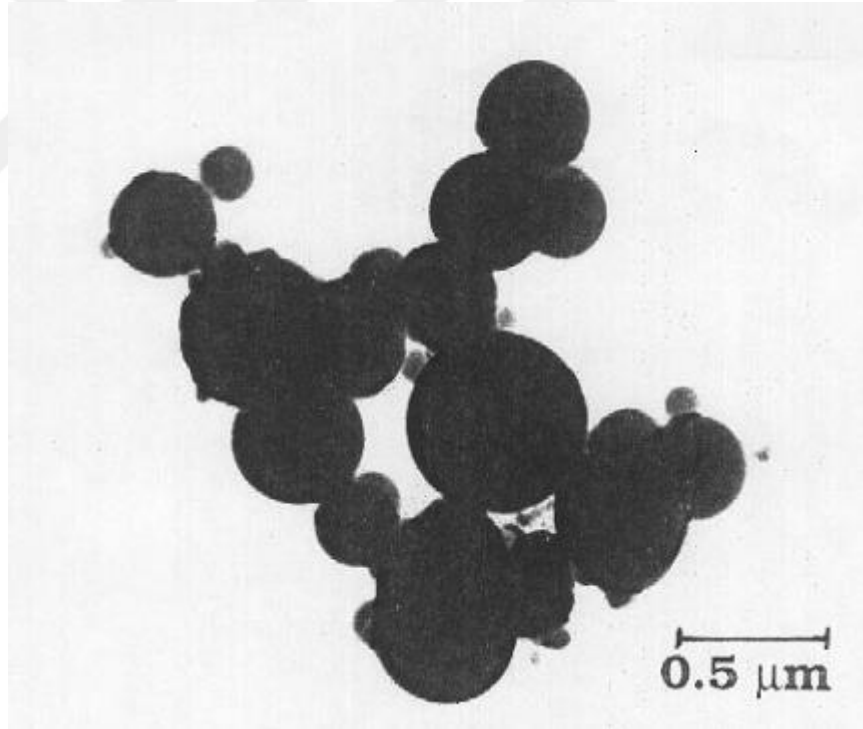


Şekil 2.28. Küre şekilli uçucu kül parçalarının SEM görüntüsü

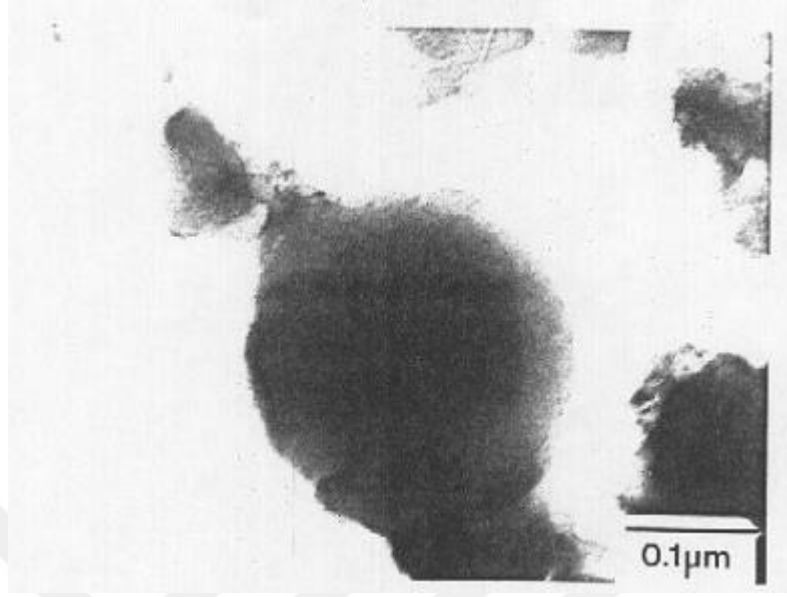


Şekil 2.29. Düşük s/ç li uçucu küllü betonda yoğun hidrate çimento hamuru. Gözenekler belirgin daha küçük ve geçirgenlik son derece düşüktür

Betonda silis dumanının SEM analizi: Şekil 2.30'da gösterilen ultra ince silis dumanı ($0,1 \mu\text{m}$), neredeyse uçucu kül veya portland çimentosu tanelerden daha ince olmaktadır, bu da silis dumanını optik mikroskop altında belirlemeyi imkansız yapar. Bu bağlamda, TEM silis dumanının hidrasyonunu çalışmada hala yüksek çözünürlükte güce sahip olsa da SEM daha iyi bir araç olarak kanıtlar (Şekil 2.30). Betondaki silis dumanı, ister çimento yerine kullanılsın, ister ek olarak katılsın, hızlı bir şekilde CH üretim miktarını azaltır ve boşlukların dolmasına yardımcı olur. Silis dumanının pozolanik reaksiyondan dolayı ek C-S-H oluşur. Genel mikro yapı normal betondan daha kompakt ve daha yoğun bir hale gelir. Silis dumanlı betonun sayısız çalışma agrega-hamur bölgesinde önemli iyileştirmeler olduğunu, silis dumanlı betonun erken dayanımından doğrudan ilgili olduğu gösterir (Ramachandran *et al.* 2000).



Şekil 2.30. Ultra ince silis dumanı parçacıklarının TEM görünümü



Şekil 2.31. Çözünmüş durumda bir silis dumanı parçacığı, TEM cihazı görüntüsü

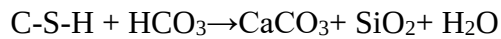
Betonun bozulmasının SEM analizi: Betonun mikroyapı ve durabilite ilişkisi, beton teknolojisinin betonun bozulmasını belirlemek için mühendislik deneylerine dayalı olarak devam etmesinden dolayı oldukça sınırlı kalmıştır. Bu yöntemlerin, betonun sağlamlığını araştırmak için geçerli araçlar olarak kalacaktır, ancak betonda farklı iç ve dış etkilere göre bozulmanın sebebi ve kapsamını belirlemeden dolayı SEM çok verimli olarak kullanılmaktadır.

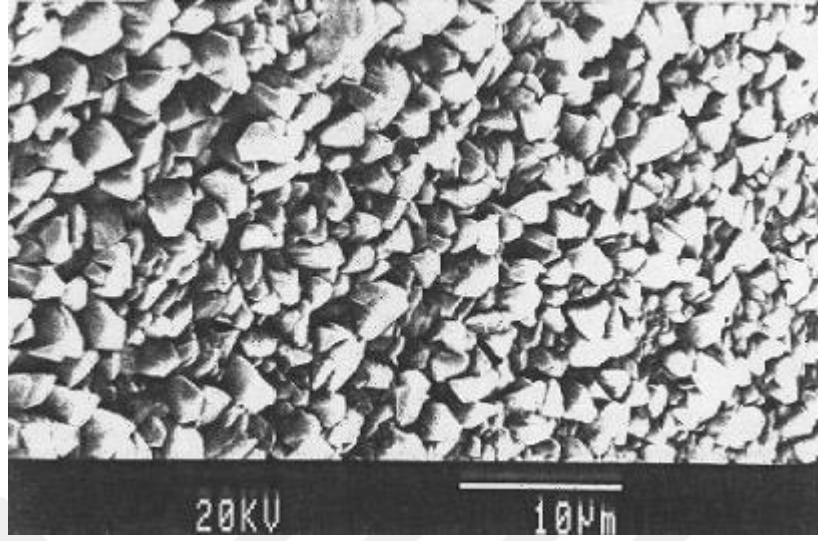
Kimyasal saldırı türleri çiçeklenme, karbonatlaşması, sülfat saldırısı ve donatı korozyonunu içeren dış etkenler ve kimyasal bozulma olarak sınıflandırılan alkali-agrega reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumunu içeren iç etkenleri kapsamaktadır. Donma çözülme, tuz sızması, yangın hasarı ve yapısal yüklemelerden ve termal şoktan dolayı oluşan çatlak genellikle fiziksel bozulmalar olarak tanımlanır. Deniz ortamında bulunan beton hem kimyasal hem de fiziksel bozulmalara maruz kalır.

Çiçeklenme: Çiçeklenme terimi genel olarak yapı malzemelerinin maruz kalan yüzeyi üzerinde tuz kristalleşmesini ifade eder. İç kısımdan tuz yüklü çözelti kuru dış yüzeye yükselir daha sonra buharlaşarak tuzu yüzeyde bırakır. Gözenek özellikleri, bu tür

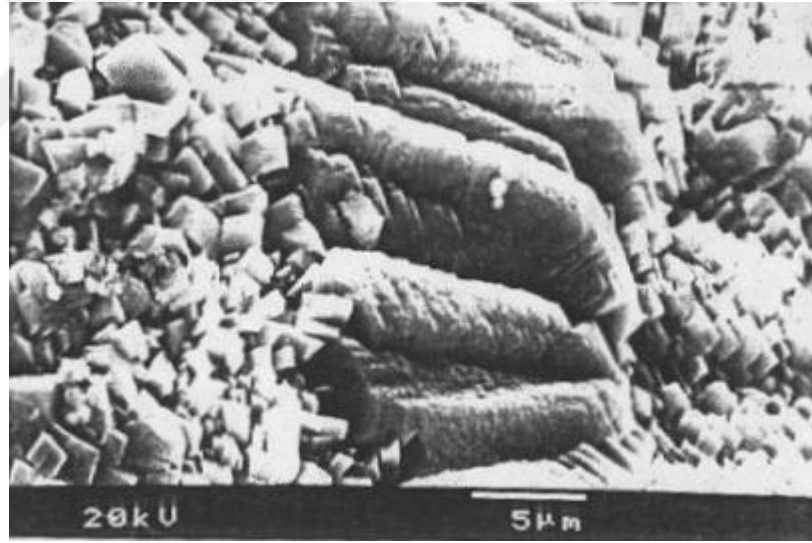
çözeltilerin geçişi belirler ve çiçeklenme açıkçası sadece tuzun varlığı değil aynı zamanda nem varlığı ile ilgilidir. Mevsimsel değişimler, kurudan nemli atmosferik koşullara ve tam tersi süresi daha da uzatır. En yaygın meydana gelen tuzlar, gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), thenardite (Na_2SO_4), mirabelite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), hydroglauberite ($\text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve apthitalite ($(\text{NaK})_2\text{SO}_4$) gibi sülfatların farklı türleridir. Çiçeklenme mekanizması, çözeltinin doygunluk seviyesi ve bu tuzların erime kapasitesi ile ilgili olduğu görülmektedir. Her durumda, basınç farkından tuz kristallenmesi ortaya çıkmasından dolayı parçalanma olur. Termodinamik denge koşulları altında kristallerin doymuş tuz çözeltisi büyümesi nedeniyle basınç artar. Hacim değişikliği, sonunda çökelen kristallerin gözenek duvarına karşı basınç uygulaması ile ilgilidir.

Karbonasyon: Çok yaygın bir reaksiyon olan karbonasyon, betonun kalsiyum içeren bileşenleri arasındaki katyon değişimi ve nemli havada bulunan CO_2 arasında katyon değişimidir. Aslında CO_2 saldırısı muhtemelen en sık görünen saldırı türüdür. Karbonasyon, çimento su ile karıştırıldığında atmosferdeki çözülmüş CO_2 ile hemen başlayabilir, ancak iyi kür edilmiş beton üstünde sadece ince karbonatlaşmış tabak gösterebilir. Bu gizli katman üzerinde, çözünmeyen kristallerin oluşumu etkili bir şekilde gözenekleri tıkar ve geçirgenliği azaltır ve dışarıdan gelen agresif kimyasal maddelere karşı koruyucu sınır sağlar. Kötü kür edilmiş yüksek s/ç oranlı betonda karbonasyon derinliği bol prizmatik ya da frambooid CaCO_3 kristalleri (Şekil 2.32-2.35 farklı morfoloji için) ile önemli derinliklere kadar ilerleyebilir. Beton aşırı çözülmüş CO_2 ye maruz kaldığında boşluklu bir yapı gelişir bu da SEM altında görülebilir, CO_2 sadece CH kristallerini kalsite dönüştürmez, C-S-H yumuşaması da sonraki bir safhada oluşur (Ramachandran *et al.* 2000).

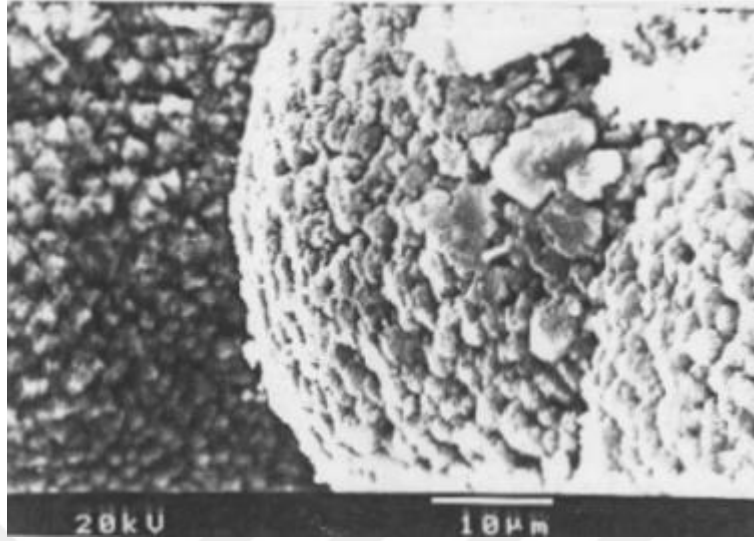




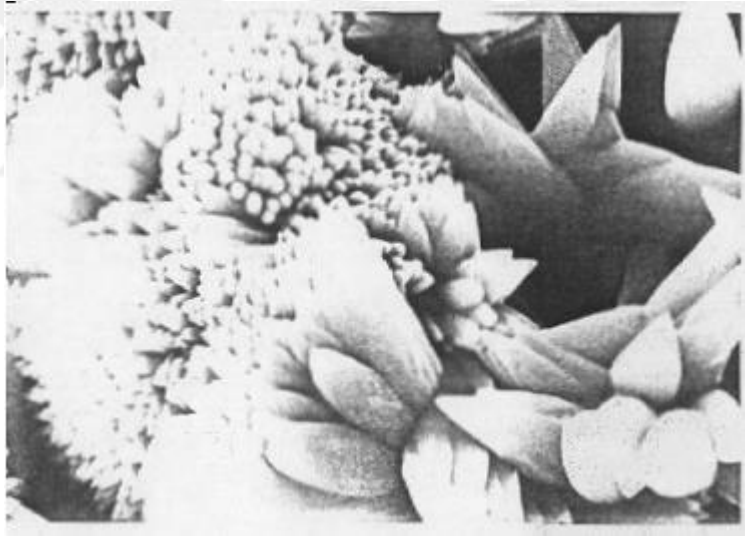
Şekil 2.32. CaCO_3 morfolojisi-zerre şekilli kristal



Şekil 2.33. CaCO_3 morfolojisi-üst üste prizma kristaller



Şekil 2.34. CaCO_3 morfolojisi-küresel kristaller

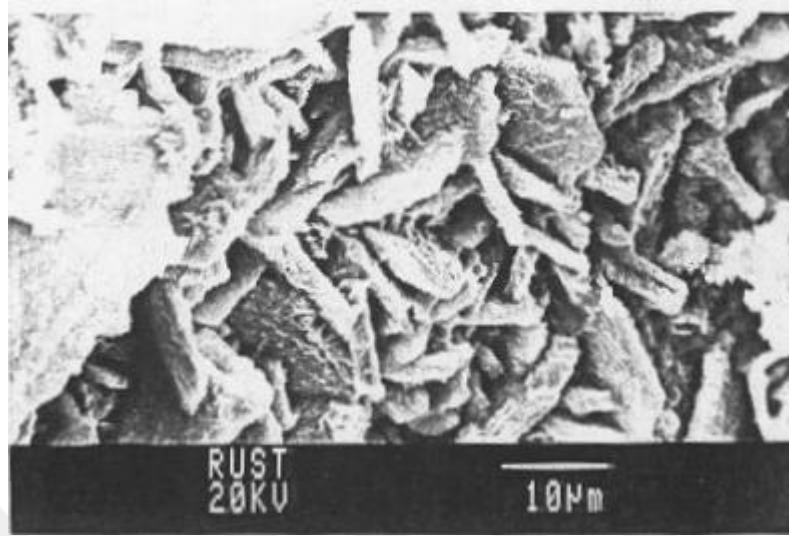


Şekil 2.35. CaCO_3 morfolojisi-dogtooth kristaller

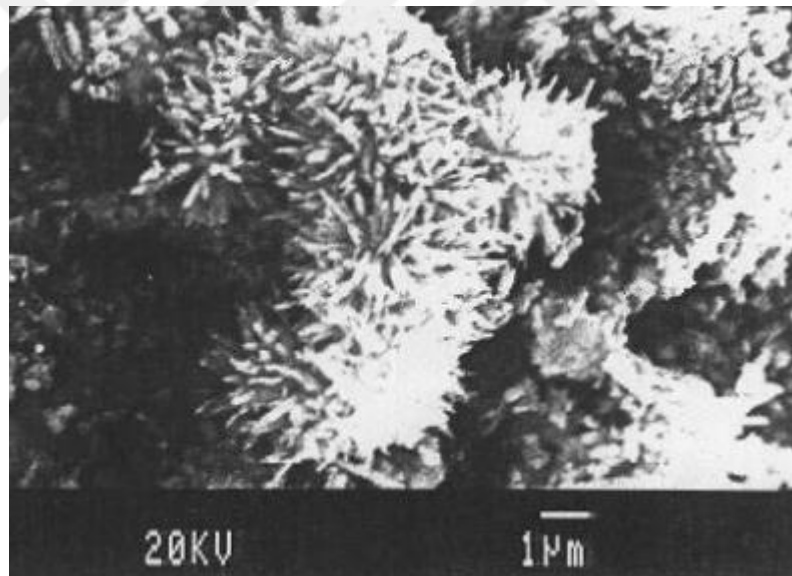
Sülfat saldırısı: Toprakta ve yeraltı sularında bulunan sodyum, magnezyum ve kalsiyum sülfatları hemen hemen bütün hidrate çimento fazları ile reaksiyona girebilir, CH'dan başlayarak kalsiyum alüminat hidrata ve sonunda ileri aşamada C-S-H jeline saldırır. Reaksiyon ürünleri, genellikle alçı ikincil etrenjit ve sodyum ve magnezyum hidroksitlerdir. Bu mineral fazların oluşumu, hacimde önemli artışa neden olur, sonunda betonda çatlak ve yıkıcı genleşmeye sebep olabilir.

Tomasit (thaumasite) olarak bilinen mineral, kalsiyum silikosülfat karbonat minerali etrenjitin iğneli yapısına çok benzerdir. Kendi kendi oluşabilmesine rağmen, Tomasitin oluşumunda etrenjitin karbonasyonu aynı sonuçlanır bu ikincil etrenjitten daha tehlikelidir, çünkü C-S-H fazını etkiler. Sonuç olarak, genleşme ve çatlamaya yanında yumuşama ve çimento hamurunun nihai dağılımı olduğu bilinmektedir. Tomasit, bununla birlikte, sadece düşük sıcaklıkta, sülfat ve karbonat iyonlarının olduğu yerde sürekli nem varlığında kristalize olur. Tomasit etrenjit iğneli yapısına çok benzer ve karakteristik Ca, Si, C ve S pikleri EDX analizi ile belirlenebilir (Şekil 6a.b) (Ramachandran *et al.* 2000).

Donatı korozyonu: Nispeten yüksek geçirgenlik ve emme, klor iyonlarının donatılı betona nüfus etmesi sonucu, betonun pH'ını düşüren çimento hamurunun yoğun karbonasyonu, donatı çevresinde bulunan ortamda sabit olan koruyucu demir oksit filmini yok eder. Bu donatının korozyonuna neden olur, korozyon ürünleri hacim genişlemesine neden olur ve donatıdan olayı betonda oluşan genişleme betonun çatlamasına neden olur. Donatı korozyonu üzerine mikroyapısal birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, donatı hamur arayüzeyi üzerine yapılan SEM çalışmaları reaksiyon ürünlerinin bir dizi demir oksit ve oksiklorid komplekslerden oluştuğunu ortaya koymuştur. Buna ek olarak, pul pul dökülmüş katmanlı kristaller (Şekil 2.36) genişleme yerine hassas, küresel ve whiskery minarelerinden sorumlu olduğu görülmektedir (Şekil 2.37) (Ramachandran *et al.* 2000).



Şekil 2.36. Donatı korozyonu lame ürünleri



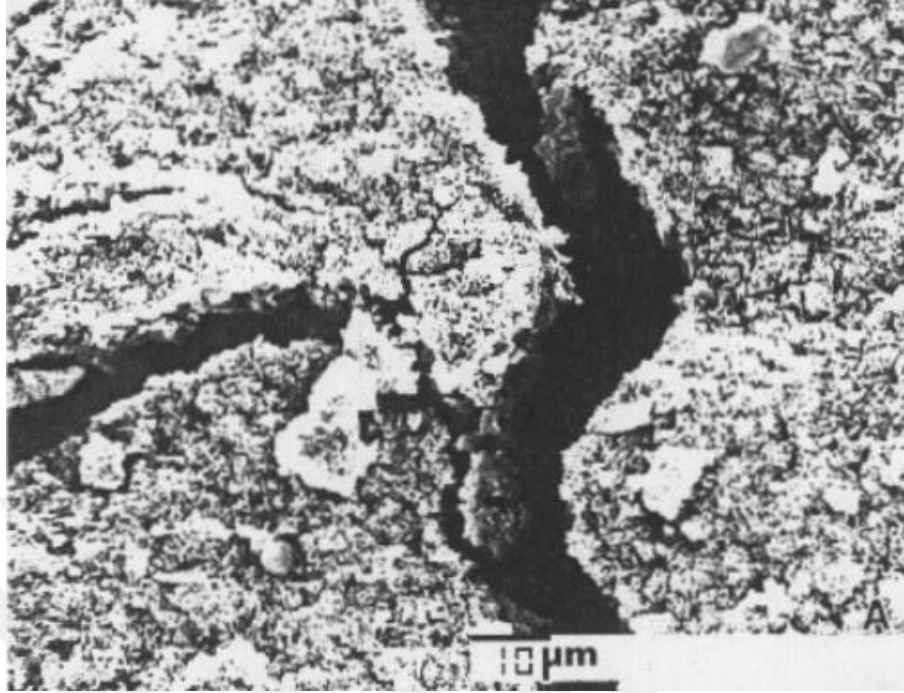
Şekil 2.37. Donatı korozyonundan dolayı oluşmuş narin küresel ve whiskery minareli

İç etkenlerden dolayı kimyasal bozulma: Alkali-agrega reaksiyonu (ASR): Reaktif agregalar, yüksek alkali ve hidroksil iyonlarının varlığında farklı birleşimlerin jellerini salgılar. Jel tarafından nemin emilmesi genişlemeye neden olur buda alkali-agrega reaksiyonu tarafından etkilenen betonda ilk olarak çatlak meydana getirir. SEM sadece şekilsiz ve kristalimsi (Şekil 2.38 ve Şekil 2.39) olabilen reaksiyon jelinin oldukça büyütülmüş görüntüsünü sağlamaz, aynı zamanda bileşimi de makul doğrulukta

belirlenebilir. Aslında, institü numunelerinin EDX analizi ile anlık mikroanalitik yeteneği, alkali-agrega reaksiyonun hakkında bilgimizi ilerletmede önemli bir atılım olmuştur (Ramachandran *et al.* 2000).



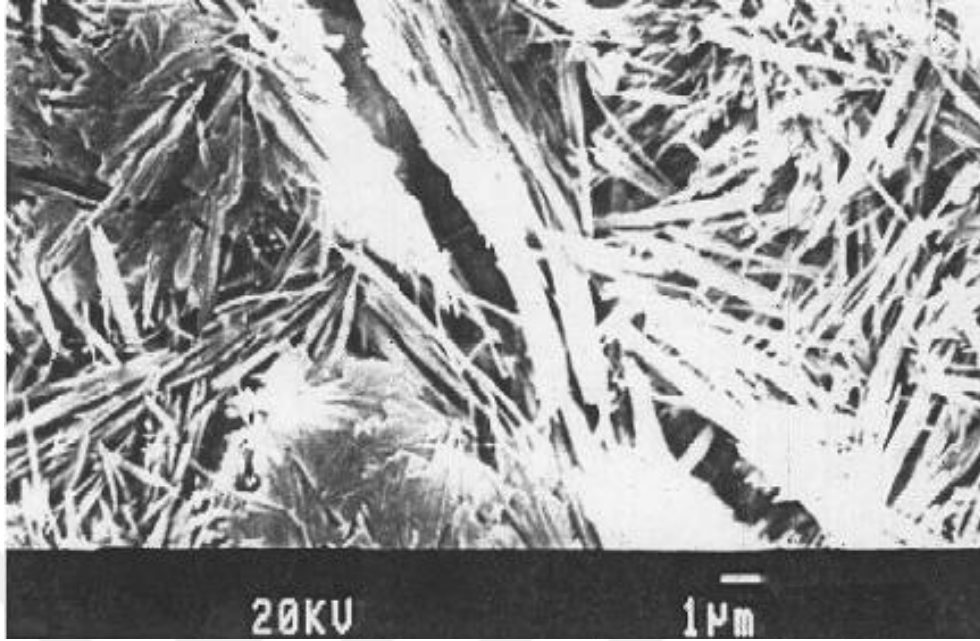
Şekil 2.38. Alkali-agrega reaksiyonu kristalinin yapısının görünümü



Şekil 2.39. Genleşme sebebi ile oluşan amorf ASR jeli

Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF): Su ve topraktan gelen sülfat iyonları tarafından betona dış etkenlerin saldırısının aksine, betonun özellikleri, çimentonun doğasından, ikincil olarak, genişleyen jips ve etrenjit, iç sülfat iyonlarından başka türde bir saldırı oluşabilir. Dış kaynaklı sülfat saldırısına çok benzerdir, etrenjitin (Şekil 2.40) oluşumu genleşmeye ve çatlamaya neden olur (Ramachandran *et al.* 2000). İlk etrenjit, klinker içindeki jips ve alkali sülfatın çimento içindeki C_3A ile reaksiyonu tarafından çimentonun hidratasyonun ilk aşamalarında oluşur, yüksek sıcaklıkta tekrar parçalanabilir C-S-H jelinde yerleşik kalıp daha sonra yüksek bağıl nemde etrenjit iğneleri olarak tekrar görünebilir, bu proses gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) olarak bilinir.

Yeterli nem, yetersiz hava boşluğu, çimentodaki yüksek sülfat içeriği ve betonun yüksek geçirgenliği etrenjitle ilgili sıkıntıları artırdığı bilinmektedir. Prekast beton elemanların bozulmasının büyük bir kısmının mikroyapısal değerlendirilmesi, hidrate çimento hamurundaki çatlakların ve agrega-hamur arayüzeyi boyunca gecikmiş etrenjit iğnelerinin olduğu bir eğilim ortaya koymuştur.



Şekil 2.40. Sıcaklıkla kür edilmiş betonda gecikmiş etrenjit kristalleri

Normal betonun SEM incelenmesinden elde edilen, betonun temel içyapısını önceden bilme betonun uzun vadeli performansı ve mekanik davranışını anlamak için gereklidir. SEM yüksek çözünürlüğü sayesinde miktoyapıdaki ultra ince fazların detaylı olarak belirlenmesinde optik mikroskobundan daha açık görüntü elde edilmesini sağlar.

2.6.2. X-ışını kırınım yöntemi (XRD)

Bileşik veya faz bileşiminin oksitten hesaplanması teorik yöntemle veya deneysel yöntemle yapılır. XRD, bir kaç yıl boyunca mineral konsantrasyonlarının belirlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır ve 1958'den beri, çimento bileşimini belirlemek için XRD analizini kullanmak için birkaç girişim yapılmıştır.

Kompozit bir birleşik olan beton doğasından dolayı çimentonun büyük oranda kullanıldığı, betonun normal olarak gerçekleşenden daha kompleks bir karaktere sahip olduğu bilinmektedir. Çimento-agrega arayüzeyinde çimento hamurundan mikroyapısal olarak farklılıklar gözlenmiştir. Betonun, farklı saldırgan ortamlara maruz kalması sonucunda yeni bileşiklerin oluşması, betonun doğal bozulmasındaki karakteristik

örnekler (patterns), betonun servis, durabilite ve ilgili ürünlerin araştırılmasında XRD kullanılması zorunlu hale gelmiştir (Ramachandran *et al.* 2000).

X-ışını kırınımı (XRD) betonun içerisinde bulunan olan kalsiyum hidroksit (portlandit) ve etrenjit gibi kristal fazları belirlemek için kullanılır. Bu teknik aynı zamanda, etrenjitin analizi gibi çimentonun erken hidratasyon reaksiyonlarını tespit etmek için de kullanılır. Beton içinde mevcut çimento fazlarının tanımlanması, betonun zayıf kırılma tepe noktası ile sonuçlanan hidratasyon fazının amorf olmasından dolayı karmaşıktır. Buna ilave olarak agregada olan minerallerin pikleri betonun XRD ile analizine engel olabilmektedir. Geçmişte çimentonun sayısal (kantitatif) faz analizinin doğruluğu üzerine XRD kullanımında bazı kısıtlamalar olmasına rağmen, modern bilgisayarlı difraktometrelerin kullanımı ile analiz kolay ve hızlı olmaktadır. Buna ek olarak, XRD analizi pozolanik malzemelerdeki cam içeriğinin ölçülmesi, hidratasyonun derecesi çimento cürufunun dayanımını tahmin etmek gibi birçok uygulamaya sahiptir.

XRD çimento içerisinde bulunan kristal fazların doğrudan belirlenmesinde faydalı bir tekniktir. Ancak, zayıf dağılımlı ani oluşumlar meydana getiren ve kalsiyum hidroksitin dağılımlı ani oluşumları tarafından etki altına alınma eğilimi olan kalsiyum silikat hidratların zayıf kristalli yapıları sebebiyle; beton ve harçların oluşumları sırasında, çimentonun girdiği safhaları tanımlamak çok daha karmaşıktır. Buna ek olarak, agregada içinde bulunan minerallerden oluşan piklerde etkileyebilir. Fazın tespiti için pratik sınırlar yüzeyin şekline ve kristalografisine bağlıdır. Kuvars tespiti için mümkün olduğunca %0,1'den az, bununla birlikte çoğu çimento hidratasyonu için tespit için %5 den çok olmayı gerektirir. XRD analizi kaba kılavuz olarak, eğer %2 den az ise fazın tespitinde zorluklara sahip olabilir (John *et al.* 1998).

Çimentonun hidratasyonu için yapılan araştırma çalışmalarında XRD sinkrotron enerji dağıtıcı XRD teknikleri ile daha da genişlemiştir. Bu güçlü yöntem, etrenjitin analizi, kalsiyum alüminat hidratların hızlı dönüşümü ve erken reaksiyon zamanlarını gerçek zamanlı olarak araştırmayı sağlar. XRD yöntemi, uçucu kül ve cüruf içinde bulunan

cam içinde kullanılır. Çeşitli çalışmalar, beton basınç dayanımı için cüruf içeriğini önemini göstermek için yapılmıştır.

C-S-H miktarı, portland çimento hamurunda, kontakta kaybolma veya reaksiyona girmemiş çimento ve kalsiyum hidroksitin kantitatif x-ışını analizi gibi standart dolaylı teknikler kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir. C-S-H, hem amorf doğal hem de belirsiz bileşimi nedeniyle doğrudan ölçmek çok zordur. CH ve mineral katkı maddesi arasındaki pozolanik reaksiyon, dolaylı tekniklerle ayırt etmede başarısız olan C-S-H'yi üretir; çünkü pozolanik reaksiyon C-S-H üretir ve bilinmeyen miktarlarda kalsiyum tüketir. Buna ek olarak, mineral katkılı C-S-H'nin Ca / Si oranı saf çimento hamurunda daha düşük olmaktadır (Olson *et al.* 2001).

Roode *et al.* (1987) betondaki performanslarını tahmin etmek için yüksek fırın cüruflarında ve uçucu küllerdeki cam içeriğini ölçmek için doğru bir prosedür geliştirmiştir. Araştırmada kuvars, mullit, manyetit ve hematit kristalin fazların kütle yüzdeleri hesaplamak için kullanılan yöntem QXRD kullanımı da dahildir, ve cam içeriği farkı hesaplanır. Bununla birlikte, olası hata kaynakları, kristal fazın ilk kimlik standart eğrilerinin hazırlanması ve tercihen birkaç bağlı olduğundan, bu cam içeriği tayin QXRD yaklaşım en doğru değerler verir olup sonuçlar ikna edici değildir. Bununla birlikte, QXRD yöntemi, uçucu kül, farklı kaynaklardan gelen numuneler arasında görülen kimyasal ve mineralojik bileşimlerinde varyasyonlara tabi olmayan belirli kaynaklardan cüruf ve diğer atık malzemenin cam içeriğinin rutin belirlenmesi için faydalıdır.

XRD, reaksiyona girmemiş fazları ölçüm yoluyla hidrasyonun derecesini bulmayı sağlayan direk bir yöntemdir. Öte yandan, hidrasyon derecesinin dolaylı olarak tayini, hidrasyon ısısı, kimyasal birleşim suyu, basınç dayanımı ve kimyasal büzülme olarak tanımlanan doymuş numunenin özgül hacim değişimi gibi bazı özellikleri ölçülerek yapılabilmektedir. Bununla birlikte, ürünün özelliği ile QXRD ile doğrudan tespit edilen gerçek hidrasyon derecesi arasında kurulmuş korelasyon genellikle dolaylı yöntemlere ihtiyaç duymaktadır (Parotte *et al.* 1990).

Çimento agrega arayüzeyi: Agrega çimento hamuru arayüzeyi on yıllardır beton teknolojistleri tarafından kapsamlı çalışma konusu olmasına rağmen, son zamanlarda yapılan bir araştırma, geleneksel beton karışımından elde edilen arayüzey karakteristiklerini ve buna karşın karışıma modifiye sistem yoluyla iki kademedeki su eklenmesi ile elde edilen beton karışımını karşılaştırılmıştır. Her iki beton karışım yöntemi ile hazırlanmasında, iki teknik için XRD ile kolayca ikisi arasındaki farklılıkları ortaya, standart yüzeyler elde etmek için cam lamalar (glass slides) yalancı agrega olarak kullanıldı. İki tarafında çimento hamuru ile cam plaklar karışımdan kaldırıldı, inceleme için gerekli yaşa kadar kalacağı tanka taşınmadan önce yirmi dört saat kalmak üzere hava sızdırmaz plastik tanka konulmuştur. Cam plaklar elmas testere ile küçük parçalara (2 cm^2) kesilmiştir. Düz birleşen yüzeyler bu küçük numunelerden taşınmış ve XRD analizi için alüminyum tutucular ($1,5 \text{ cm}$) üzerine yerleştirilmiştir. Hidratasyon ürünleri, her iki yüzey için, cam diğer yüzey için belirlenmiştir. Tespitler 1 ve 28 gün yapılmış, tekrarlanan ölçümler yapılarak ve kantitatif faz analizleri de denenmiştir.

Alkali-silika reaksiyonu: Beton içerisinde reaktif agrega varlığı, alkali silika reaksiyonundan dolayı bozulmaya yol açtığı oldukça iyi bilinmektedir. ASR oluşumuna neden olan faktörlerin anlamak için birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, sonuçta betonun genleşmesi ve silika çözünmesinin tamamlanmasına katkıda bulunan faktörleri tanıma eksikliğinden dolayı bunların tahmini hala kesin değildir. pH ortamı 12-14 olduğunda ASR olasılığının mantıklı bir tahmini, kristal deformasyonu, tane boyutu, agrega tane sınırı yapısı, sıvı varlığını göz önüne almanın katkı sağladığı bilinmektedir. Silikanın iç kristallik yansımalarının oluşumu XRD tekniği ile silikanın kristallik indeksini belirlemek için yapılan bir çalışma ile ortaya konulmuştur.

Sülfat mineralleri: Beton ve harç içinde en önemli sülfat minerali etrenjit, tomasit (thaumasite)'tir.

Klinker, çimento, hidrate hamur, harç ve beton mikroyapısı nanometreden santi metreye kadar değişen çok bileşenli heterojen sistemlerdir. Bu sistemlerin karakterizasyonu,

üretim ve uygulama hedef sonuçları için vazgeçilmezdir. Ayrıca, servis performansının, çimento harç hamurunun çatlak analizi ve betonun değerlendirilmesi doğru karakterizasyona bağlıdır. Çeşitli kütle ve mikroskopik karakterizasyon teknikleri, x-ışını kırınımı daha evrensel ve güvenilir olduğu ortaya çıkmıştır. Bu teknik, böyle çok bileşenli sistemlerde fazın basit nitel belirlenmesinden kapsamlı faz analizi, fazın kristalliğinin belirlenmesi, reaksiyon ürünlerini kapsayacak şekilde genişlemiştir.

Özet olarak, x-ışını kırınımı, beton içinde bulunan kristal fazları bulmak için kullanılan direkt bir metottur. Bu yöntem, portland çimentosunun performansını tahmin etmek için çimentonun ve klinkerin her bir fazın aşamasını değerlendirmek için kullanılır. Cüruf çimentosu ve uçucu küldeki cam içeriğinin tespitinde kullanılır. Çimentonun hidrasyon derecesinin tespitinde kullanılır. Portland cüruf çimentonun hızlı dayanımının tespitinde kullanılır. Çimentonun nicel analizinde bilgisayar kullanımı geçmişteki analiz ile karşılaştırıldığında daha hızlı ve kolay olmaktadır.

2.6.3. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)

Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleme ve kırınım tekniklerini birlikte kullanarak malzemelerin mikroyapısal incelemesini ve kristal yapılarının belirlenmesini birlikte sağlayabilen çok özel bir malzeme karakterizasyon cihazıdır. Bir başka deyişle, nanometre mertebesinde çok küçük ve ince alanlardan, milyon katı büyütmelemlerde malzemenin kristalagrofik ve morfolojik bilgilerine aynı anda ulaşılmasını olanaklı kılan bir tekniktir.

TEM'in yüksek ayırma gücü, aynı anda kırınım ve görüntü bilgilerinin alınabilmesi gibi üstünlüklerine rağmen, bu tekniğin de belli sınırlamaları vardır. Üç boyutlu bir numuneden alınan iki boyutlu ve kırınım kökenli görüntülerin yorumlanması uzmanlık gerektirir. Özellikle biyolojik ve polimerik malzemelerde öne çıkan ışın hasarı (beamdamage) etkisi numune özelliklerinin değişmesine yol açabilmektedir. En büyük kısıtlama ise numune hazırlamada ortaya çıkar. Elektron mikroskobunda incelenecek numune kesinlikle katı malzeme olmak zorundadır ve 3mm çapında, 100 mm'den daha

ince ve elektron geçirgenliğine sahip (bir kaç mm) bir disk olarak hazırlanma zorunluluğu sorun yaratabilir. Dolayısıyla elektron geçirgenliğine uygun olarak hazırlanamamış numuneden bir görüntü kontrastı elde etmek mümkün olamamaktadır. TEM’de görüntü ve kırınım bilgisini elde etmenin temel prensibi, ortasında çok küçük bir delik bulunan numuneye paralel bir elektron demeti göndermek ve numuneden doğrudan geçen kırınımına uğramamış ışınları (TB) ve numunenin belirli düzlemlerinden Bragg şartlarına uygun açılarda kırınımına uğramış (DB) ışınları numunenin altında toplama esasına dayanır. Sırasıyla sadece geçen ışın demetini ve kırınımına uğramış ışınlardan birini kullanarak yapılan görüntüleme teknikleri olan aydınlık alan ve karanlık alan görüntüleri numunelerdeki mikron altı boyutlardaki oluşumların incelenmesinde, var olan ikinci fazların ayırt edilmesinde en çok kullanılan yöntemlerdir.

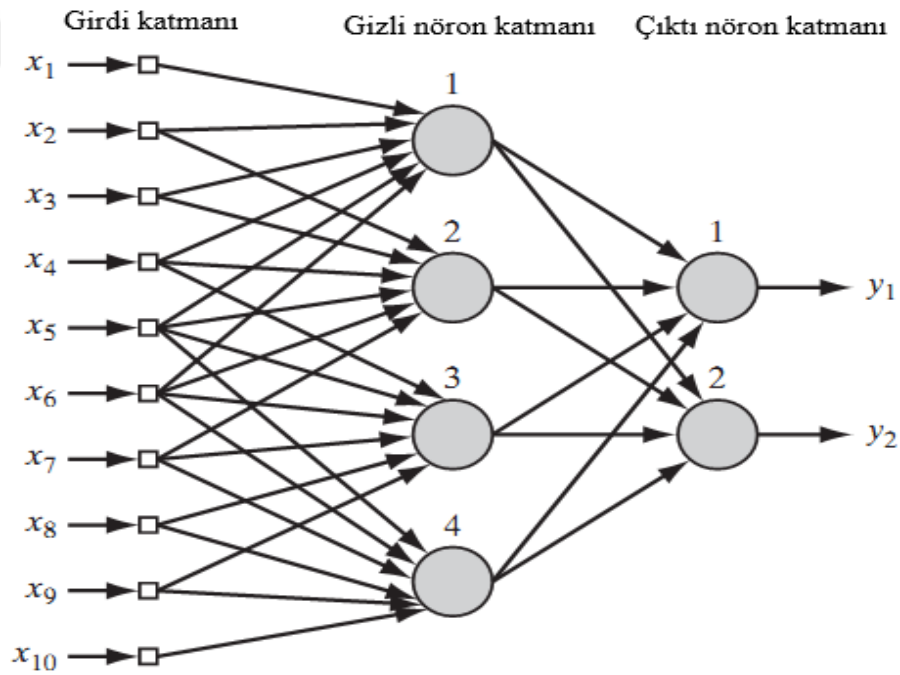
Yüksek çözünürlüklü kafes görüntülemesi (HRLI) kristal numunelerdeki atomik düzlemlerin izdüşümlerini görüntülemede kullanılan daha ileri bir tekniktir. Malzemelerin kristal yapılarının belirlenmesinde ise seçilmiş alan kırınım yöntemi kullanılır. Yüksek açılı huzme kırınımı (CBED) ise malzemelerin tam kristalografik analizinde (nokta ve uzay guruplarının belirlenmesi) kullanılabilen çok gelişkin bir başka kırınım tekniğidir. Yüksek açılı açılal karanlık alan (HAADF) dedektörüne sahip taramalı-geçirimli elektron mikroskobu (STEM) HAABF ve HAADF görüntülerinin elde edilmesinde kullanılır. STEM görüntülerinde taramalı elektron mikroskobuna benzer bir mantıkla numuneyi tarayan bir ışıdan alınan sinyallerle görüntü elde edilmesi biraz zaman almakla birlikte, mercek hatalarından arındırılmış görüntüler elde edilmesiyle önemli bir avantaj olarak görülebilir.

Enerji saçılım spektroskopisi (EDS) ve elektron enerji kaybı spektroskopisi (EELS) modern elektron mikroskoplarda analitik karakterizasyon için vazgeçilmez donanımlardır. Bu donanımlar elektron demetinin numuneye etkileşimi sonunda açığa çıkan, sırasıyla, karakteristik x ışınlarını ve inelastik olarak numuneye etkileşmiş olan elektronların enerji kaybı dağılımlarını kullanarak element analizi amacıyla kullanılırlar. Enerji filtrelemeli görüntüleme (EFTEM) ise elastik ve inelastik olarak saçılmış

elektronlardan oluşmuş görüntülerdeki bu iki farklı saçılma unsurlarını birbirinden ayırarak görüntü kontrastının iyileşmesini sağlar.

2.6.4. Yapay sinir ağları modeli (YSA)

Genel olarak yapay ağları sinir hücrelerin birbirine bağlanması ile oluşur. İleri beslemeli bir ağda genel manada giriş, gizli ve çıkış katmanı bulunur. Giriş katmanı; verilerin ağa tanıtıldığı ve ağa girildiği katmandır. Veriler işlenmeden bir sonraki gizli katmana aktarılır. Gizli katman; giriş katmanındaki veriyi uygun fonksiyonla işleyerek bir sonraki katmana ulaştırmakla görevlidir ve bu katman sayısı istenirse arttırılabilir. Çıkış katmanı; gizli katmandan alınan veri ağın kullandığı fonksiyonda işlenerek çıktıyı oluşturur. Çıkış katmanındaki yapay sinir hücre sayısı ağa girişteki veri kümesinin çıkış sayısı kadardır (Kılıç 2015).



Şekil 2.41. Yapay sinir ağının genel yapısı (Haykin 2009)

Girdi katmanında dışardan gelen veriler toplanarak ara katmana iletilir. Gelen veriler çekirdeğe ulaşmadan önce taşındıkları bağlantının ağırlıkları ile çarpılır ve çekirdeğe

iletilir. Bu yolla girdilerin sonuç üzerindeki etkisi ayarlanabilmektedir. Girdilerin ağırlık değerleri pozitif, negatif veya sıfır olabilir. Ağırlığı sıfır olan etkilerin sonuç üzerinde etkisi bulunmamaktadır. Bir ağırlığın değerinin büyük olması, o girdinin önemli olması, küçük olması ise daha az önemli olmasını ifade etmektedir. Girdi katmanından gelen verilerin işlendiği katman ise ara katmandır ve bir ağ içerisinde birden fazla ara katman olabilir (Yayık 2013).

Yapay sinir hücresine ağırlıklarla çarpılarak gelen girdileri toplayarak o hücrenin net girdisini hesaplayan fonksiyon ise birleştirme fonksiyonu olarak tanımlanır. Bazı durumlarda gelen girdilerin değeri dikkate alınırken bazı durumlarda ise gelen girdilerin sayısı daha önemli olmaktadır. Bir problem için en uygun toplama fonksiyonu belirlenirken geliştirilmiş bir yöntem yoktur, deneme yanılma yoluyla toplama fonksiyonu belirlenebilir. Bazen her hücrenin toplama fonksiyonunun aynı olması gerekmez. Aşağıda bazı toplama fonksiyonları verilmiştir (Çayıroğlu 2015).

Çizelge 2.6. YSA’da kullanılan bazı toplama fonksiyonları (Çayıroğlu 2015)

Toplam $\text{Net} = \sum_i^n x_i * w_{ij}$	Ağırlık değerleri girdiler ile çarpılır ve bulunan değerler birbirleriyle toplanarak Net girdi hesaplanır.
Çarpım $\text{NET} = \prod_i^n x_i * w_{ij}$	Ağırlık değerleri girdiler ile çarpılır ve daha sonra bulunan değerler birbirleriyle çarpılarak Net Girdi Hesaplanır.
Minimum $\text{Net} = \text{Min}(x_i * w_{ij})$	n adet girdi içinden ağırlıklar girdilerle çarpıldıktan sonra içlerinden en küçüğü Net girdi olarak kabul edilir.
Maksimum $\text{Net} = \text{Max}(x_i * w_{ij})$	n adet girdi içinden ağırlıklar girdilerle çarpıldıktan sonra içlerinden en büyüğü Net girdi olarak kabul edilir.
Çoğunluk $\text{NET} = \sum_i^n \text{Sgn}(x_i * w_{ij})$	n adet girdi içinden girdilerle ağırlıklar çarpıldıktan sonra pozitif ile negatif olanların sayısı bulunur. Büyük olan sayı hücrenin net girdisi olarak kabul edilir.
Kümülatif Toplam $\text{Net} = \text{Net}(\text{eski}) + \sum_i^n x_i * w_{ij}$	Hücreye gelen bilgiler ağırlıklı olarak toplanır. Daha önce hücreye gelen bilgilere yeni hesaplanan girdi değerleri eklenerek hücrenin net girdisi hesaplanır.

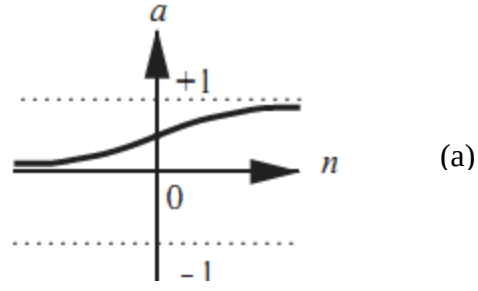
Yapay sinir ağında hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu girdiye karşılık üreteceği sonucu belirleyen fonksiyon aktivasyon fonksiyonu olarak tanımlanır. Aktivasyon fonksiyonu genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyon seçilir ve bu da yapay sinir ağlarına “doğrusal olmama” özelliği verir. Aktivasyon fonksiyonu seçilirken göz önüne alınacak en önemli parametre fonksiyonun türevinin kolay hesaplanabilir olmasıdır. Günümüzde en çok kullanılan “çok katmanlı algılayıcı” modelinde genel olarak aktivasyon fonksiyonu olarak “Sigmoid fonksiyonu” kullanılmaktadır (Çayıroğlu 2015).

Çizelge 2.7. YSA’da kullanılan çok katmanlı algılayıcı fonksiyonları (Hagan vd.)

Aktivasyon Fonksiyonu	Matematiksel Gösterimi	Grafiksel Gösterimi
Lineer Fonksiyon	$F(\text{NET}) = \text{NET}$	
Step Fonksiyonu	$F(\text{NET}) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \text{NET} \geq 0 \\ 0 & \text{eğer } \text{NET} < 0 \end{cases}$	
Sigmoid Fonksiyonu	$F(\text{NET}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{NET}}}$	
Hiperbolik Tanjant Fonksiyonu	$F(\text{NET}) = \frac{e^{\text{NET}} - e^{-\text{NET}}}{e^{\text{NET}} + e^{-\text{NET}}}$	
Eşik Değer Fonksiyonu	$F(\text{NET}) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } \text{NET} \leq 0 \\ \text{NET} & \text{eğer } 0 < \text{NET} < 1 \\ 1 & \text{eğer } \text{NET} \geq 1 \end{cases}$	

Yukarıda verilen aktivasyon fonksiyonundan çıkan değer yapay sinir ağı hücresinin çıktı değeridir. Çalışmada kullanılan program sigmoid fonksiyonu üzerinden hesaplama yapmaktadır.

Logsig fonksiyonu olarak da adlandırılan Sigmoid aktivasyon fonksiyonunun giriş-çıkış ifadesi ve fonksiyonun girişe göre değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Fonksiyonun dinamik değişim aralığı [0-1] aralığıdır ve fonksiyon bu aralıkta lineer olmayan bir davranış sergiler (Altun vd 2014).



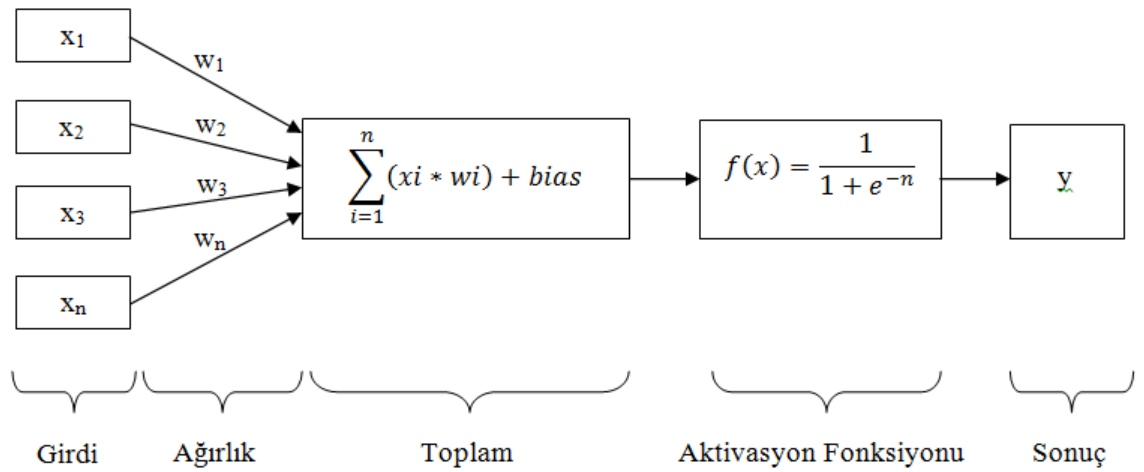
$$a = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (b)$$

Şekil 2.42. Logaritmik Sigmoid fonksiyonu giriş-çıkış eğrisi (a), giriş ifadesi (b)

Yapay sinir ağları doğrusal olmayan bir yapıya sahip oldukları için gerçek problemlere daha doğru ve gerçeğe yakın çözümler üretebilmektedir. Bu doğrultuda yapay sinir ağlarında hücrelerin matematiksel modeli aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$v = \sum_{i=0}^n w_i * x_i \text{ veya } \sum_{i=0}^n w_i * x_i + b, y = \varphi(v)$$

Burada; W; hücrenin ağırlıklar matrisini, x; hücrenin giriş vektörünü, v; hücrenin net girişini, y; hücre çıkışını ve $\varphi(v)$; hücrenin aktivasyon fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 2.43. Logaritmik Sigmoid fonksiyonu görsel ifadesi

Denklemden, x giriş vektörünün bileşenlerinin dış (geri beslemesiz) girişler olması durumunda hücrenin doğrusal olmayan statik bir işlevi gerçekleştireceği görülmektedir.



3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, çalışmada yapılacak deney metodları, kullanılacak agrega özellikleri, üretilen beton karışımlarının hazırlanmasında kullanılan metotlar ile yapılan deneysel çalışmalarda referans alınacak olan yöntemler anlatılmıştır.

3.1. Betonun üretimi ve karışım miktarlarının belirlenmesi

Karışım hesapları yapılırken TS 802'den yararlanılmıştır. Deney karışımlarında bağlayıcı (çimento) dozajı sabit olup, hava hacmi %2 olarak kabul edilmiştir. Bu değerler 1 m³'den çıkarılarak toplam agrega hacmi bulunmuştur. Elde edilen agrega hacmi tane sınıflarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$\frac{C}{\delta_C} + S + \frac{A}{\delta_A} + H = 1m^3 \quad (3.1)$$

Burada;

C : Karışımındaki çimento miktarı (kg)

δ_C : Çimentonun yoğunluğu (kg / m³)

S : Karışımındaki suyun miktarı (kg)

A : Karışımındaki agreganın miktarı (kg)

δ_A : Agreganın yoğunluğu (kg / m³)

H : Betondaki toplam hava miktarı (m³)

Bu bağıntıda çimento miktarı yaklaşık beton karışım suyu ve hava miktarları tablosunda belirlenen yaklaşık karışım suyu miktarının “su/çimento oranı ile 28 günlük beton basınç dayanımı arasındaki ilişki” adlı tabloda belirtilen S/C oranına bölünmesi ile elde edilmiştir.

$$\zeta = \frac{S}{S/\zeta} (kg) \quad (3.2)$$

Çimentonun yoğunluğu, δ_c , çimento deney raporundan alınmıştır.

Taze betondaki hava miktarı yaklaşık beton karışım suyu ve hava miktarları tablosundan hava hacmi %2 olarak kabul edilmiştir.

$$V_A = \frac{A}{\delta_A} = 1 - \frac{\zeta}{\delta_c} - V_s - H \quad (3.3)$$

Karışımındaki agrega miktarı ise, hacim olarak, yukarıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

TS 802 C30/37 beton sınıfına göre hazırlan kontrol numunesi, silis dumanlı, uçucu küllü ve silis dumanı + uçucu küllü betonlara ait karışımı oranları göre Çizelge 3.1, Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4 verilmiştir. Bu karışım oranları esas alınarak tek tip kontrol numunesi (KN) üretilmiştir.

Literatür ışığında SD, UK ve SD+UK karışımlarda her bir grubun katkı miktarları %5, 10, 15 ve 20 olacak şekilde çimento yerine ikame edilmiş, SD ve UK'ün aynı anda kullanıldığı gruplarda ise SD ve UK miktarları eşit olacak şekilde karışım tasarımları yapılmıştır. Böylece kontrol grubu numuneleri dışında 4 grup SD, 4 grup UK ve 4 grup SD+UK ikameli toplamda 12 grup katkılı beton tasarlanmıştır.

Bu karışım tipleri göz önüne alındığı zaman çalışmada kontrol numunesi de dahil olmak üzere toplam 13 farklı tip beton üretilmiştir. Beton karışımlarında su/bağlayıcı oranı sabit olarak alınmıştır. Deneylerde karışım ve bakım suyu olarak içme suyu kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan ve deneme numuneleri için kullanılan beton karışım oranları Çizelge 3.1’de verilmektedir. Su/bağlayıcı oranı 0,60 olup, gerekli diğer bilgiler çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kontrol numunesi karışım oranları

Numune Karışımı (1 m ³)		Kontrol Numunesi
Su/Bağlayıcı		0,60
Çimento (kg)		350,00
Su (kg)		210,00
Agrega (kg)	0-2 mm	689,00
	2-4 mm	350,00
	4-8 mm	280,00
	8-16 mm	420,00
Uçucu kül (kg)		0,00
Silis dumanı (kg)		0,00

Çizelge 3.2. Silis dumanı içeren beton karışım miktarları

Numune Karışımı (1 m ³)		%5 SD	%10 SD	%15 SD	%20 SD
Su/Bağlayıcı		0,60	0,60	0,60	0,60
Çimento (kg)		332,5	315,00	297,50	280,00
Su (kg)		210,00	210,00	210,00	210,00
Agrega (kg)	0-2 mm	682,00	676,00	670,00	664,00
	2-4 mm	350,00	350,00	350,00	350,00
	4-8 mm	280,00	280,00	280,00	280,00
	8-16 mm	420,00	420,00	420,00	420,00
Uçucu kül (kg)		0,00	0,00	0,00	0,00
Silis dumanı (kg)		17,50	35,00	52,50	70,00

Çizelge 3.3. Uçucu kül içeren beton karışım miktarları

Numune Karışımı (1 m ³)		%5 UK	%10 UK	%15 UK	%20 UK
Su/Bağlayıcı		0,60	0,60	0,60	0,60
Çimento (kg)		332,5	315,00	297,50	280,00
Su (kg)		210,00	210,00	210,00	210,00
Agrega (kg)	0-2 mm	671,00	674,00	666,00	659,00
	2-4 mm	350,00	350,00	350,00	341,00
	4-8 mm	280,00	280,00	280,00	291,00
	8-16 mm	420,00	420,00	420,00	360,00
Uçucu kül (kg)		17,50	35,00	52,50	70,00
Silis dumanı (kg)		0,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 3.4. Silis dumanı ve uçucu kül içeren beton karışım miktarları

Numune Karışımı (1 m ³)		%5 SDUK	%10 SDUK	%15 SDUK	%20 SDUK
Su/Bağlayıcı		0,60	0,60	0,60	0,60
Çimento (kg)		332,5	315,00	297,50	280,00
Su (kg)		210,00	210,00	210,00	210,00
Agrega (kg)	0-2 mm	681,00	675,00	668,00	661,00
	2-4 mm	350,00	350,00	341,00	341,00
	4-8 mm	280,00	280,00	291,00	291,00
	8-16 mm	420,00	420,00	360,00	360,00
Uçucu kül (kg)		8,75	17,50	26,25	35,00
Silis dumanı (kg)		8,75	17,50	26,25	35,00

3.2. Deneyde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada kullanılan çimento, silis dumanı, uçucu kül ve agrega hakkında bilgi gerekli bilgiler verilmektedir.

3.2.1. Çimento

Bu çalışmada, Votarantim Çimento Hasanoğlan Fabrikasının 2016 yılında üretmiş olduğu Portland çimentosu (CEMI 42,5) kullanılmıştır. Bu çimentonun yine aynı fabrikada yaptırılan fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Oksit	%
SiO ₂	19.43
Al ₂ O ₃	5.31
Fe ₂ O ₃	3.79
CaO	64.39
MgO	2.25
K ₂ O	0.90
Na ₂ O	0.09
SO ₃	2.47
Yanma Kaybı	1.07
Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık kg/cm ³	3.14
Özgül yüzey cm ² /gr	3260
200 µ Elek üzerinde alan %	0.2
90 µ Elek üzerinde kalan %	1.8

3.2.2. Karışım suyu

Deneylerde kullanılan karışım suyu TS EN 1008 standardına uygun olarak içme suyu seçilmiştir.

3.2.3. Agregalar

Çalışma kapsamındaki deneylerde kullanılacak olan agregalar için deney numunesi hazırlama ve granülometri deneyleri sırasıyla TS-707 ve TS-3530 EN-933-1'e göre yapılmıştır. Bu agregaların özgül ağırlıkları, su emme ve nem oranları ise TS EN 1097-6 ya göre hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Agrega granülometrisinin betonun bütün özellikleri üzerinde büyük etkisi olduğundan, bu çalışmada tek tip granülometri kullanılmıştır.

Betonu oluşturan agregaların tane dağılımı en büyük tane büyüklüğüne bağlı olarak TS 802’de belirtilen ideal bölgeye düşecek şekilde seçilmiştir. Bu araştırma da kullanılan agregalar elek açıklığı 2, 4, 8 ve 16 mm olan eleklerden elenmiştir. Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm’dir. İnce agreganın için 0–2 ve 2–4, iri agreganın için ise 4–8 ve 8–16 mm’lik tane sınıfları oluşturulmuştur. İri agreganın %24’ü 8–16 mm, %13’ü ise 4–8 mm arasındaki agregalardan alınmıştır. İnce agreganın %20’i 2–4 mm, %40’ı ise 0–2 mm arasında olacak şekilde granülometri ayarlanmıştır. Agregaların granülometri analizi Çizelge 4.1’de, granülometri eğrisi ise Şekil 4.1’de verilmektedir.

3.2.4. Silis dumanı

Deneyde kullanılan silis dumanı (SD) Mısır’da ferrokrom tesislerinde üretilen ve Türkiye’de satışının yapıldığı Aryum Makine Kimya firmasından alınmıştır. Bu çalışmada söz konusu tesisten sağlanan silis dumanı kullanılmıştır. Beton karışımlarında bağlayıcı madde (çimento) ağırlığının %5, %10, %15 ve %20’si kadar SD katılmıştır. Kullanılan SD’nin özgül ağırlığı 2,20 kg/cm³’tür. Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Oksit	%
SiO ₂	93,65
Al ₂ O ₃	0,28
Fe ₂ O ₃	0,58
CaO	0,28
MgO	0,25
K ₂ O	0,87
Na ₂ O	-
SO ₃	0,38
Yanma Kaybı	-
Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık	2,2
Özgül yüzey cm ² /gr	20.000
200 µ Elek üzerinde alan %	-
90 µ Elek üzerinde kalan %	-

3.2.5. Uçucu kül

Deneyde kullanılan uçucu kül Ares Çimento fabrikasının Seyitömer tesislerinde üretmiş olduğu külden temin edilmiştir. Beton karışımlarında bağlayıcı madde (çimento) ağırlığının %5, %10, %15 ve %20'si kadar uçucu kül ikame edilmiştir. Uçucu külün kimyasal bileşimi olarak SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ toplamı %87,7 olup TS 639'da öngörülen uçucu kül koşullarını sağlamaktadır. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Uçucu kül fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Oksit	%
SiO ₂	56,8
Al ₂ O ₃	24,1
Fe ₂ O ₃	6,8
CaO	1,4
MgO	2,4
K ₂ O	-
Na ₂ O	-
SO ₃	2,9
Yanma Kaybı	0,80
Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık kg/cm ³	2,06
Özgül yüzey cm ² /gr	3800
200 µ Elek üzerinde alan %	-
90 µ Elek üzerinde kalan %	-

3.3. Deneylerde kullanılan aletler

3.3.1. Elekler

Deneylerde TS 1227 ISO 3310-1 (1996)'ye uygun toplama kabı, 2 mm ile TS 1226 ISO 3310-2 (1996)'ye uygun 4 mm, 8 mm ve 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır (Şekil 3.1).

**Şekil 3.1.** Deneyde kullanılan elekler

3.3.2. Betoniyer

Deneysel çalışmalarda beton numunelerin üretimi için 135° açı yapacak kadar manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betoniyer kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Deneyde kullanılan betoniyer

3.3.3. Kalıplar

Beton numunelerin üretiminde TS ve EN 12390-1 standartlarına uygun 15x15x15 cm boyutlarında çelik küp kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Çelik kalıp

3.3.4. Hassas terazi

Çalışmalarda ACS-Z30 marka elektronik hassas terazi kullanılmıştır. Terazi 30 kg kapasiteli, 1 gr hassasiyetli, 0-40°C sıcaklıkta ve %85 nemli ortamda çalışabilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Hassas terazi

3.3.5. Kür tankı

Çalışmada üretilen beton numunelerin kür edilmesi için tasarlanmış ve çelik malzemeden kür tankı kullanılmıştır. Kür tankı, su sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutmak için termostat kontrollü ısıtıcı, sirkülasyon pompası ve alt ızgaradan oluşmaktadır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Beton kür tankı

3.3.6. Tek eksenli basınç deney cihazı

Deneyisel çalışmada üretilen beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının belirlenmesi için tek eksenli basınç deney cihazı kullanılmıştır. Deneyde kullanılan cihaz, 15cmx15cmx15cm ve 20cmx20cmx20cm ölçülerinde küp ve 15cmx30cm ölçülerinde silindirik beton numunelerinin basınç dayanımını belirleme özelliğine sahiptir. Cihazın kapasitesi 200 ton (2000 kN) olup, cihazda basınç emniyet valfi bulunmaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Tek eksenli basınç deney cihazı

3.3.7. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Çalışma kapsamında üretilen numunelere ait SEM analiz incelemelerinde Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Merkezinde bulunan JSM5600 30kV'luk taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 3.7).

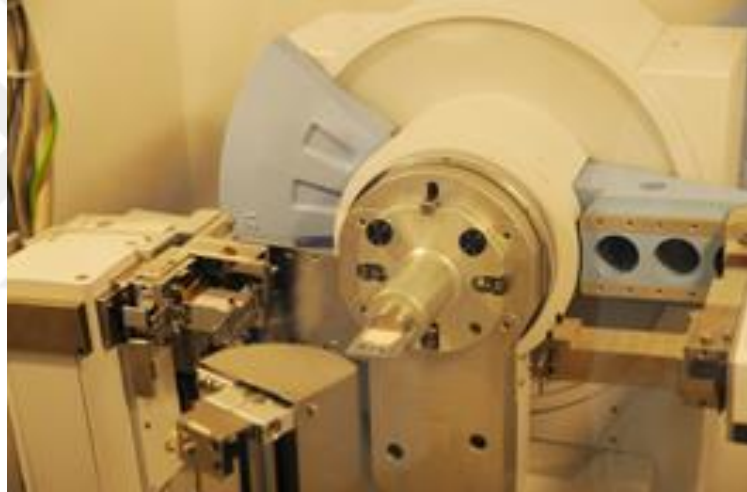


Şekil 3.7. Analizde kullanılan JSM5600 SEM cihazı

Çalışma kapsamında numunelerin görüntü analizinde kullanılan SEM cihazı çözünürlük: 3,5 nm, probe akımı: 10-12-10-6 A, hızlanan gerilim: 0,5-30 kV, örnek boyutu: 125 mm, dedektörler ise SE, EDX özelliklerine sahiptir.

3.3.8. X-Işını kırınım cihazı (XRD)

Çalışma kapsamında yapılan XRD analizlerinde MTA Genel Müdürlüğü Mineraloji-Petrografi Araştırmaları Birimi'nde bulunan Cu X-Işın Tüplü Panalytical X'Pert Powder marka model cihazlar kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Analizde kullanılan XRD cihazı

3.4. Karışım tipleri ve numunelerin kodlanması

Deneyisel çalışmalarda üretilecek olan farklı karışım tiplerinin tez içerisinde kullanımı kolaylaştırmak ve anlaşılır bir şekilde ifade etmek için Çizelge 3.8'de verilmiş olan numune kodlaması yapılmıştır.

Çizelge 3.8. Deneyde kullanılan karışımlar ve karışım kodları

Grup No	Numune Karışım Tipi	Numune Kodlama
1	Kontrol numunesi	KN
2	Uçucu kül %5	UK5
3	Uçucu kül %10	UK10
4	Uçucu kül %15	UK15
5	Uçucu kül %20	UK20
6	Silis dumanı %5	SD5
7	Silis dumanı %10	SD10
8	Silis dumanı %15	SD15
9	Silis dumanı %20	SD20
10	Silis dumanı %2,5+ Uçucu kül 2,5	SDUK5
11	Silis dumanı %5+ Uçucu kül %5	SDUK10
12	Silis dumanı %7,5+ Uçucu kül %7,5	SDUK15
13	Silis dumanı %10+ Uçucu kül %10	SDUK20

3.5. Yapılan deneysel çalışmalar

Bu doktora çalışmasında, çimento esaslı kompozitlerin görsel analizi araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan numunelerde çimento ve çimento yerine değişik oranlarda silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve uçucu kül + silis dumanı (UK+SD) birlikte ikame edilmiştir. Bu şekilde elde edilecek beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük yaşlardaki çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Çalışma için hazırlanan deney numuneleri, EN 12350–1, EN 12390–1, EN 12390–2 veya EN 12504-1'e uygun küp numuneler olarak hazırlanmıştır. Deney numunelerinin boyutları EN 12390-1'de verilen boyut toleranslarına uygun olarak düzenlenmiştir.



Şekil 3.9. Beton numunelerinin hazırlanışı

Laboratuvarda dökümü yapılan numuneler üzerine beton yaş iken hangi numuneye ait olduğuna dair etiket yapıştırılmıştır. Karışım tipine göre dökülen beton numuneleri bir gün bekletildikten sonra ertesi gün kür havuzuna konulmuştur. Kür havuzundaki numuneler 21–25°C suyun içerisinde 7, 28 ve 90 gün bekletilerek ilgili deneylere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.10. Beton basınç testi

Yapılan doktora çalışmasının amacına uygun olarak, Çizelge 3.8’de verilen karışımlar hazırlanmış ve bu hazırlanan karışımlar doğrultusunda ilgili deneyler yapılmıştır.

Tasarımı yapılan 13 grup beton numuneleri 7, 28 ve 90 basınç dayanım testleri için 3’er adet numune hazırlanarak deney yapılmıştır. Yapılan çalışmada 13 farklı karışım tipi oluşturulmuş ve 3 farklı yaşta inceleme gerçekleştirilmiştir. Her bir yaş için 39 adet olmak üzere toplam 117 adet numune üzerinde basınç testi yapılmıştır. XRD analizleri toplam 117 numune üzerinde çalışılmıştır. SEM analizleri için 7, 28 ve 90 günlük yaşlarında 117 adet numune için toplam 1041 adet görsel analiz gerçekleştirilmiştir. Tez içerisine konulan sonuçlar en yüksek basınç dayanımın elde edildiği numunelere ait SEM ve XRD analizlerine aittir. Bütün işlemler SEM, XRD ve mekanik testler dikkate alındığında 1158 numune üzerinde çalışılmıştır.

SEM ve XRD analizleri için basınç dayanımına tabi tutulan numunelerden yeteri büyüklükte (maksimum 1 cm) örnekler alınarak gerekli deneysel incelemeler yapılmıştır.

3.6. Beton karışım hesaplarının yapılması

Modern beton karışım oranlarının temeli 1900’lerde kullanılmaya başlanan hacim oranları olarak 1 oran çimento, 2 oran ince dolgu, 4 oran kalın dolgu yöntemidir.

Bir beton karışım hesabı yapabilmek için gerekli ön bilgiler; agreganın elek analizi, agregaların, çimentoların ve kullanılacak ise mineral katkıların özgül ağırlıkları ve agregaların birim ağırlığıdır. Bu gerekli bilgiler laboratuvarında belirlendikten sonra beton karışım hesabı yapılabilir.

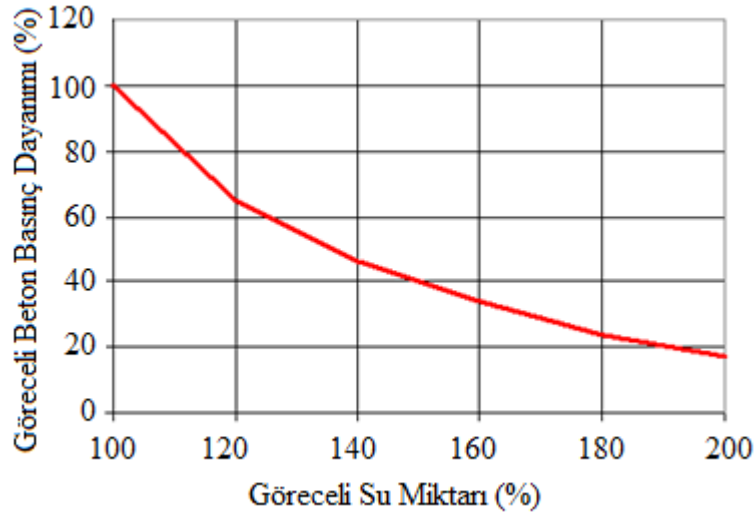
Betondan aranan özelliklerin elde edilebilmesi için bileşime giren kum, çakıl, çimento, su ve gerektiğinde diğer katkı maddelerinin amaca uygun olarak ayarlanmış olması gerekir. Betonda aranan en önemli özellik genellikle basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı diğer birçok özeliği etkilediğinden karışım seçiminde en önemli faktör olarak görülür. Belirli bir basınç dayanımı sağlayacak karışım seçilirken, karışımın ekonomik ve kullanılacağı yere göre işlenebilmesi kolay bir kıvamda olması gerekir (Ersoy 1995).

Genel olarak bakıldığında, en ekonomik beton, gerekli su/çimento oranında ve istenilen işlenebilirlikte olup agrega/çimento oranı en yüksek olan betondur. Taze betonun yerleştirilebilirliği, kıvamı (çökme) ve işlenebilirliği ile tanımlanabilir (Özkul vd 2004).

Betonu oluşturan malzemelerin oranlanması, daha yaygın adıyla beton karışım hesabı, birbirine bağlı iki ana aşamadan oluşur. Bunlar, uygun bileşenlerin (çimento, agrega, su ve katkılar) seçilmesi ve uygun işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılıkta ve mümkün olan en ekonomik betonu elde edilebilmesi için bu bileşenlerin göreceli oranlarının hesaplanması. Söz konusu oranların belirlenmesi kullanılan malzemelerin niteliklerine ve betonun kullanım yeri ve koşullarına bağlıdır (Özkul vd 2004).

Bu çalışmada yapılan karışım hesapları TS-802 verilmiş olan açıklamalar doğrultusunda yapılmıştır.

3.6.1. Su / bağlayıcı oranının (s/ç) seçilmesi



Şekil 3.11. Su miktarı ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişki

Su/çimento (bağlayıcı) oranı, yukarıdaki tablodan üretilecek olan betonun basınç dayanımı göz önüne alınarak seçilmiştir. Ancak üretilen kontrol numularının yeterince işlenebilme özelliği olmadığı görülmüştür. Yeterli işlenebilmenin elde edilmesi için $s/\ç=0,60$ olarak seçilmiştir.

3.7. Deney için beton numunelerin üretilmesi

Beton karışımları, yatay eksenli 60 lt hacimli betoniyer içinde hazırlanmıştır. Üretilen taze betonlar üzerinde çökme ve birim ağırlık deneyleri sırasıyla TS EN 12350–2 ve TS 2941’e göre yapılmıştır. Deney numunesi olarak 15x15x15 cm’lik küp numuneler kullanılmıştır. Her farklı beton deney grubu için 3’ü 7 günlük, 3’ü 28 günlük ve 3’ü 90 günlük basınç ve SEM, XRD’de incelenmek üzere toplam 117 adet numune dökülmüştür. Numuneler 7, 28 ve 90 gün boyunca, su içerisinde $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’lik standart kür ortamında muhafaza edilmiş ve belirtilen süreler sonunda TS EN 12390–3’e göre basınç deneyine tabi tutulmuş ve SEM, XRD’de incelemeler yapılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde 1036 SEM görüntü analizi yapılmıştır.

XRD incelenmesi için hidrate edilmiş kontrol numunesi (KN), silis dumanlı (SD5, SD10, SD15 ve SD20), uçucu küllü (UK5, UK10, UK15 ve UK20) ve silis dumanı + uçucu küllü (SDUK5, SDUK10, SDUK15 ve SDUK20) agregasız numuneler üretilmiştir. Hidratasyon gelişim sürecinin ve çimento hamuru faz gelişimlerinin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda XRD ile analiz edilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde 117 XRD analizi gerçekleştirilmiştir.

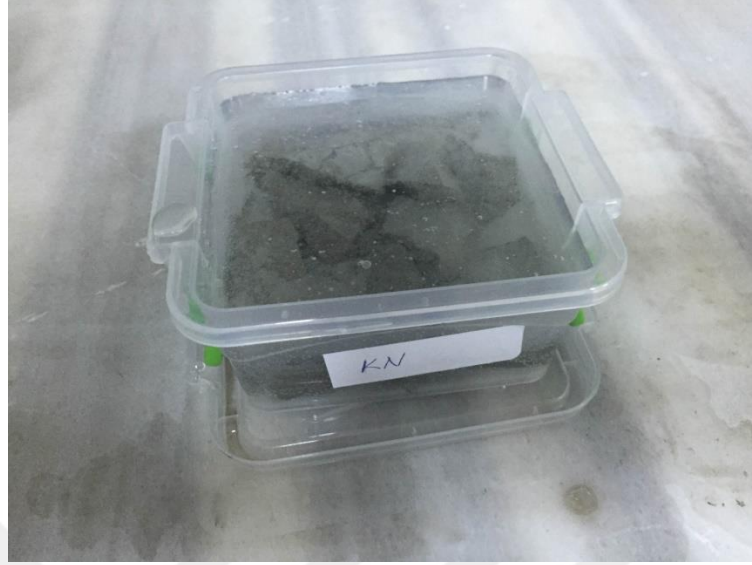
3.7.1. Kontrol numunesinin üretilmesi

Çalışmada mineral katkıların etkisinin araştırılabilmesi için kontrol numunesi (%0 katkı) üretilmiştir. Deney numunesi olarak 15x15x15 cm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Kontrol numunesi deney grubu için 3'ü 7 günlük, 3'ü 28 günlük ve 3'ü 90 günlük basınç deneyi, SEM ve XRD'de incelenmek üzere toplam 27 adet kontrol numunesi üretilmiş, 65 SEM görüntü analizi ve 27 XRD analizi yapılmıştır.



Şekil 3.12. Kontrol numunesi

Hidratasyon gelişim sürecinin ve çimento hamuru faz gelişimlerinin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda XRD ile incelenmesi için kontrol numunesi (KN) üretilmiştir.



Şekil 3.13. XRD için kontrol numunesi



Şekil 3.14. SEM ve XRD için kontrol numunesi

3.7.2. Silis dumanlı (SD) beton numunelerin üretilmesi

Çalışmada silis dumanının etkisinin araştırılabilmesi için çimento ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranında SD katılarak numuneler üretilmiştir. Deney numunesi olarak 15x15x15 cm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Kontrol numunesi deney grubu için 3'ü

7 günlük, 3'ü 28 günlük ve 3'ü 90 günlük basınç deneyi ve SEM'de incelenmek üzere toplam 36 adet numune dökülmüştür.

XRD incelenmesi için hidrate edilmiş silis dumanlı (SD5, SD10, SD15 ve SD20) agregasız numuneler üretilmiştir. Hidratasyon gelişim sürecinin ve çimento hamuru faz gelişimlerinin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda XRD ile analiz edilmiştir. SEM ve XRD'de incelenmek üzere toplam 36 adet numune üretilmiş, 336 SEM görüntü analizi ve 36 XRD analizi yapılmıştır.

3.7.3. Uçucu küllü (UK) beton numunelerin üretilmesi

Çalışmada uçucu kül etkisinin araştırılabilmesi için çimento ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranında UK katılarak numuneler üretilmiştir. Deney numunesi olarak 15x15x15 cm'lik küp numuneler kullanılmıştır. Kontrol numunesi deney grubu için 3'ü 7 günlük, 3'ü 28 günlük ve 3'ü 90 günlük basınç deneyi ve SEM'de incelenmek üzere toplam 36 adet numune dökülmüştür.

XRD incelenmesi için hidrate edilmiş uçucu küllü (UK5, UK10, UK15 ve UK20) agregasız numuneler üretilmiştir. Hidratasyon gelişim sürecinin ve çimento hamuru faz gelişimlerinin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda XRD ile analiz edilmiştir. SEM ve XRD'de incelenmek üzere toplam 36 adet numune üretilmiş, 336 SEM görüntü analizi ve 36 XRD analizi yapılmıştır.

3.7.4. Silis dumanı ve uçucu küllü (SD+UK) beton numunelerin üretilmesi

Çalışmada silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanımının etkisinin araştırılabilmesi için çimento ağırlığının %5 (%2,5 SD+%2,5 UK), %10 (%5 SD+%5 UK), %15 (%7,5 SD+%7,5 UK) ve %20 (%10 SD+%10 UK) oranında SD+UK katılarak numuneler üretilmiştir. Deney numunesi olarak 15x15x15 cm'lik küp numuneler kullanılmıştır.

Kontrol numunesi deney grubu için 3'ü 7 günlük, 3'ü 28 günlük ve 3'ü 90 günlük basınç deneyi ve SEM'de incelenmek üzere toplam 36 adet numune dökülmüştür.

XRD incelenmesi için hidrate edilmiş silis dumanı + uçucu küllü (SDUK5, SDUK10, SDUK15 ve SDUK20) agregasız numuneler üretilmiştir. Hidratasyon gelişim sürecinin ve çimento hamuru faz gelişimlerinin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda XRD ile analiz edilmiştir. SEM ve XRD'de incelenmek üzere toplam 36 adet numune üretilmiş, 299 SEM görüntü analizi ve 36 XRD analizi yapılmıştır.

3.8. Deney numunelerin karıştırılması, yerleştirilmesi ve kür edilmesi

Çizelge 3.1, Çizelge 3.2, Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'de belirtilen karışım hesapları kullanılarak üretilen numunelerin miktarlarına göre belirlenen malzeme miktarları, ağırlık olarak alınıp, 1 gr hassasiyetli terazide tartılmıştır. Karışımlar hazırlanırken laboratuvar tipi bir betoniyer kullanılmıştır. Betoniyerde karıştırma işlemi 5 dakika olarak ve ASTM C 192'ye göre yapılmıştır. Beton karışımları gerçekleştirilmeden önce basınç dayanımı için kullanılacak 15x15x15 cm'lik küp kalıplar hassas bir şekilde temizlenmiş, kalıp yağı ile yağlanmıştır. Betoniyere her seferde bir gruptaki malzeme konulmuş olup, karıştırma sonunda elde edilen karışım kalıplara dökülmüştür. Yerleştirme esnasında her 1/3 kısımda 25 kez şişleme yapılmıştır. Yerleştirmenin daha sağlıklı olması için sıkıştırma işleminden sonra her kalıp tokmaklanmıştır. Basınç dayanımı numuneleri laboratuvar ortamında açık yüzeyleri naylon örtü ile kaplı olarak 24 saat bekletilmiştir. Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilen numuneler, kalıplar söküldükten sonra, kirece doymuş, sıcaklığı $22\pm1^{\circ}\text{C}$ olan kür havuzuna konulmuştur. Her grubun numuneleri deney gününden bir gün önce kür havuzundan çıkarılarak, bir gün laboratuvarda bekletildikten sonra, sertleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuşlardır.

Basınç deneyine tabi tutulan numunelerden alınan örnekler SEM incelemelerine tabi tutulmak üzere reaksiyonların durdurulması için 105°C 'de etüv içine konularak 24 saat süre ile bekletilmiştir. İncelenecek olan numunelerin hava ile teması kesilerek vakumlu poşet ve saklama kabına konularak muhafaza edilmiştir.

Agregasız numunelerden alınan örnekler XRD incelemelerine tabi tutulmak üzere reaksiyonların durdurulması için 105 °C’de etüv içine konularak 24 saat süre ile bekletilmiştir. İncelenecek olan numunelerin hava ile teması kesilerek vakumlu poşet ve saklama kabına konularak muhafaza edilmiş ve analizin yapılacağı MTA laboratuvarına götürülmüştür.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde agrega, hamur, harç ve beton deneylerinden elde edilen sonuçlar ile birlikte SEM ve XRD analizleri verilmiştir. Sonuçlar çizelge ve şekiller ile desteklenerek daha da anlaşılır hale getirilmiş ve elde edilen sonuçlar, grafikler ve teknik literatür bilgileri yardımıyla kontrol numuneleri ve karışım parametreleri arasında karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

4.1. Agregada deney bulguları

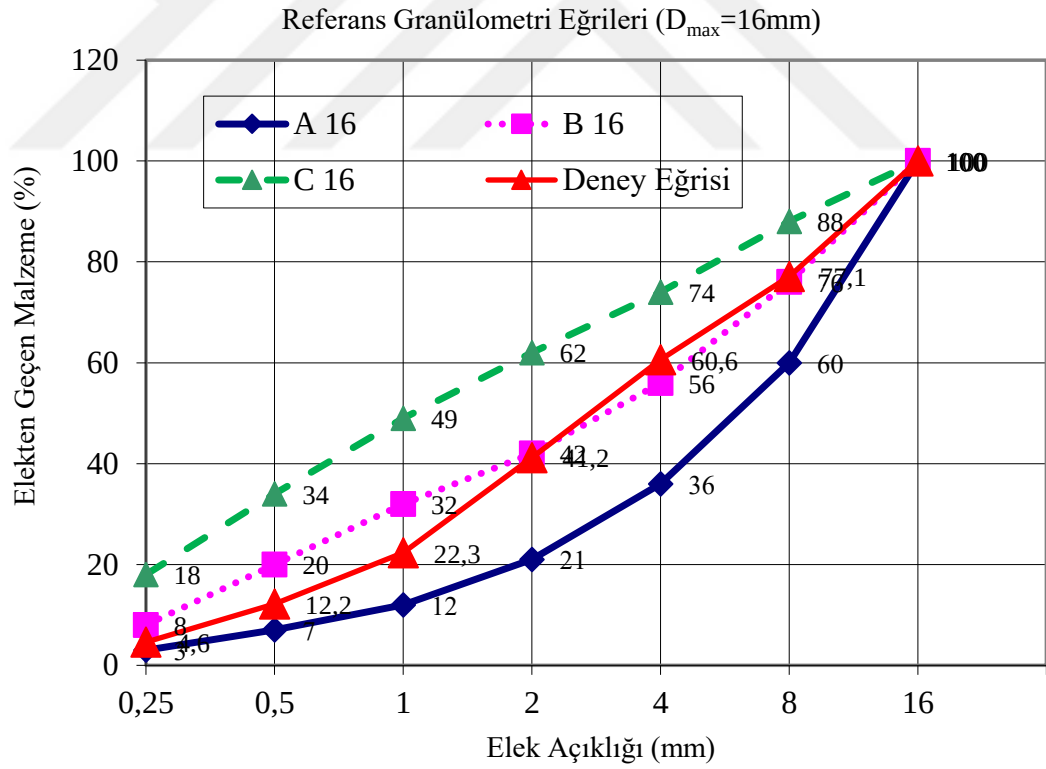
Deneylerde kullanmak için laboratuvara getirilen ocak agregası için agrega deneyleri yapmak üzere numune alınmasında TS 706 EN 12620+A1 (2009)'da belirtilen dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) metodu kullanılmıştır.

Agrega granülometrisi basınç dayanımı ve diğer analizler için TS 802-e göre ayarlanmış granülometri olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm'dir. 4 mm ile 16 mm tane sınırları arası iri, 4 mm'nin altındaki agrega ince olarak seçilmiştir. İri agreganın %24'i 8-16 mm, %16'si de 4-8 mm arasındaki agregalardan alınmıştır. İnce agreganın %20'i 2-4 mm, %40'u ise 0-2 mm arasında olacak şekilde granülometri düzeltilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan granülometri için elek analizi sonuçları Çizelge 4.1'de ve granülometri eğrisi Şekil 4.1'de (TS 802) verilmiştir.

Tüm agrega sınıflarının ince madde oranları tayin edilmiş olup, sonuçlar kullanılabilir sınırlar içerisinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1).

Çizelge 4.1. Granülometri analizi

Elek no	Elek Üstünde Kalan (gr)	Elek Üstünde Kalan Yığılımlı (gr)	Elek Üstünde Kalan (%)	Elekten Geçen (%)
16	0	0,00	0,00	100,00
8	565	565,00	22,89	77,11
4	406	971,00	39,34	60,66
2	480	1451,00	58,79	41,21
1	465	1916,00	77,63	22,37
0,5	250,5	2166,50	87,78	12,22
0,25	187,5	2354,00	95,38	4,62
0,125	89	2443,00	98,99	1,01
0,063	23	2466,00	99,92	0,08
Tepsi	2	2468,00	100,00	0,00



Şekil 4.1. Granülometri eğrisi (TS 802 Standart eğriler ve deney eğrisi)

Çalışmada kullanılan tüm agrega sınıfları için çok ince malzeme miktarı tayini TS 706 EN12620 ve TS3530 EN933-1'e uygun olarak yapılmıştır. TS 706 EN 12620+A1 (2009)'de çok ince malzeme muhtevası 0,063 mm göz açıklıklı elekten geçen agrega tane sınıfı olarak tanımlanmaktadır. EN 933-1'e uygun olarak tayin edilmiş olan çok ince malzemenin muhtevasının sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Değerlerin de %4'den küçük olması sebebiyle agregadaki ince malzemenin zararsız kabul edilebileceği belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Agrega ince madde oranı

Agrega Grubu	0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
İnce Madde Oranı (%)	0,25	0,03	0,001	0,0013

Agregada organik madde tayini TS EN1744-1'e göre yapılmış olup, yapılan deneyde %3 lük NaOH çözeltisi içinde bekletilen numunede renk değişimi gözlenmiştir. 24 saat süreyle çözelti içerisinde agrega bekletildikten sonra sıvı berrak ve renksiz gözlemlendiğinden agregada zararlı organik madde olmadığı belirlenmiştir. Kullanılan agregalar için özgül ağırlık deneyleri TS EN 1097-6'a göre yapılmış olup deney sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir. Yapılan bu deneyde doymun kuru yüzey özgül ağırlık ve 24 saatlik su emme oranları tayini iri ve ince agrega için ayrı ayrı yapılmıştır. Agregaların doğal (tabii) nemleri tespit edilmiş olup, beton karışım hesabında kullanılan agregalar doymun yüzey kuru duruma getirilerek kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Agrega özgül ağırlık ve su emme oranı

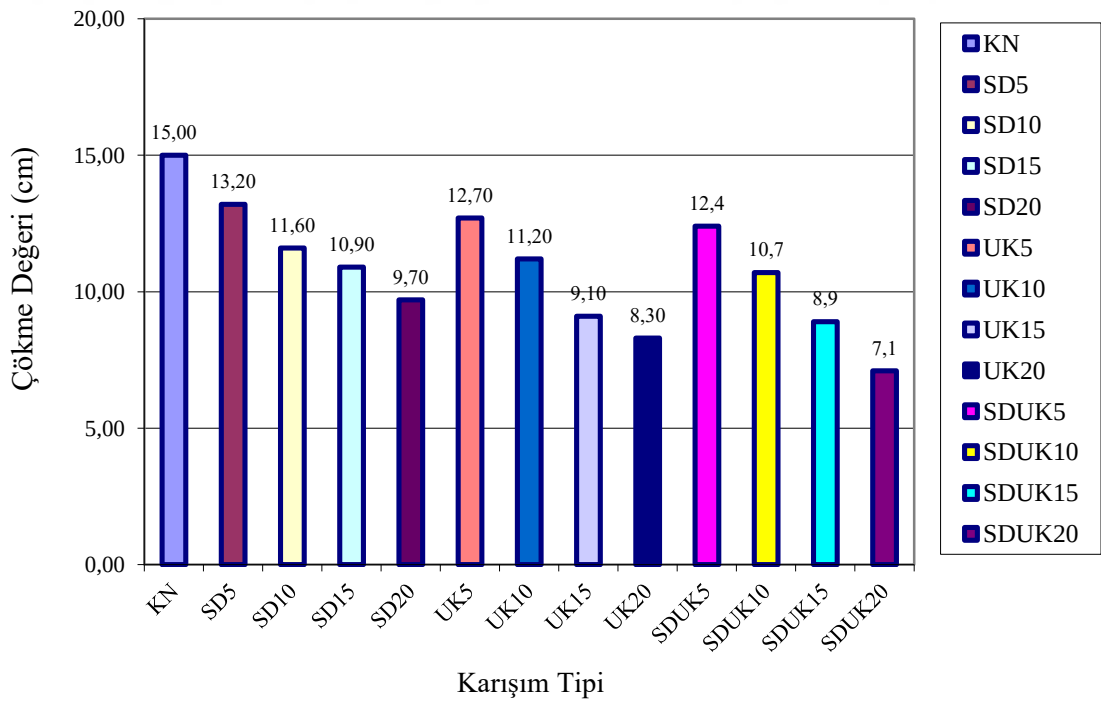
	Agrega Grubu			
	0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
Doymun kuru yüzey ağırlık (gr/cm ³)	2,51	2,55	2,61	2,63
Su emme oranı (%)	2,20	1,80	1,70	1,79
Tabii nem (%)	1,05	1,2	0,89	0,95

Yukarıdaki agregâ karışım oranları göz önüne alındığında deneyde kullanılacak olan agregânın ortama kuru üzey birim ağırlığı 2,56 gr/cm³ olmaktadır.

4.2. Beton çökme (slump) değeri bulguları

Kontrol numunesi ve kullanılan mineral katkı tipine göre beton karışım anından hemen sonra çökme deneyi gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir.

Yapılan taze beton deneylerinde beton çökme değeri (slamp) SD ikame oranı arttıkça düşmüştür. Benzer durum UK ikameli betonlarda da görülmüştür. Beton karışımındaki SD ve UK oranı arttıkça işlenebilmede bir miktar düşme olduğu gözlenmektedir. Bu durum, üretilen bütün betonlarda s/b oranının sabit alınması ve UK özgül ağırlığının çimentodan az olması nedeniyle karışıma hacimce daha fazla SD ve UK girmesi dolayısıyla beton su ihtiyacının artması ile açıklanabilir (Demir 2009).



Şekil 4.2. Karışım tipine göre çökme miktarları (cm)

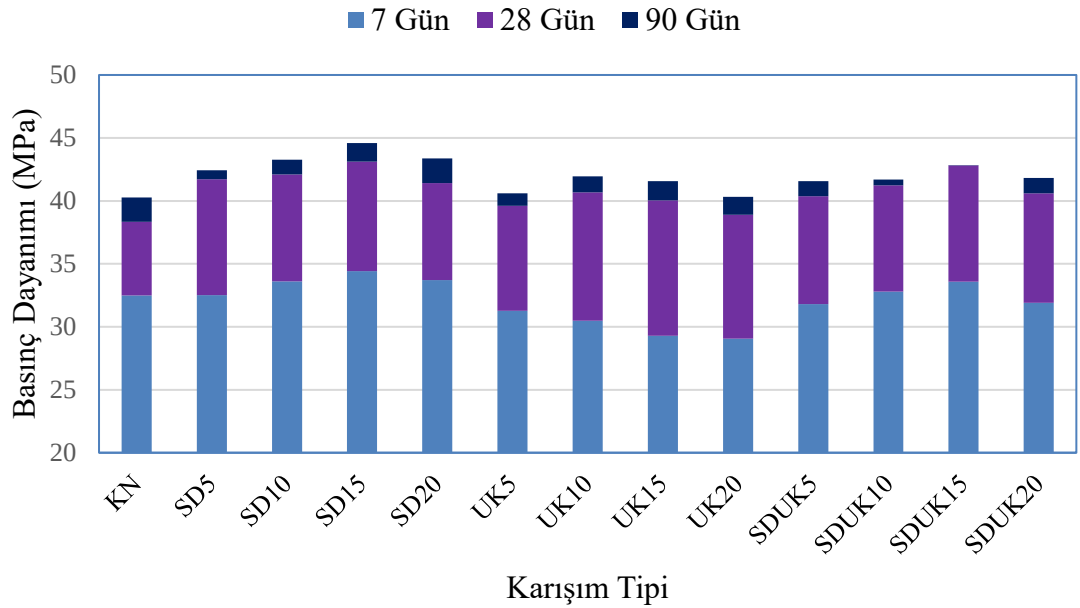
4.3. Basınç dayanım bulguları

7, 28 ve 90 günlük kirece doymun suda kür süresinden sonra her karışımdan 3'er adet numune alınarak basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Karışımlara ait numunelerinin ortalama 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değeri Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Karışımların 7, 28 ve 90 günlük ortalama basınç dayanımları

Grup No	Beton Tipi	Basınç Dayanımı MPa (7 gün)	Basınç Dayanımı MPa (28 gün)	Basınç Dayanımı MPa (90 gün)
1	KN	32,49	38,34	40,28
2	SD5	32,52	41,71	42,43
3	SD10	33,62	42,10	43,28
4	SD15	34,42	43,13	44,59
5	SD20	33,70	41,41	43,37
6	UK5	31,28	39,62	40,59
7	UK10	30,48	40,69	41,95
8	UK15	29,28	40,05	41,56
9	UK20	29,07	38,91	40,33
10	SDUK5	31,80	40,36	41,56
11	SDUK10	32,80	41,24	41,69
12	SDUK15	33,58	42,82	42,84
13	SDUK20	31,90	40,60	41,83

Üretilen beton numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, betonların yaşı arttıkça dayanımlarda da artış görülmektedir (Demir 2009). Elde edilen sonuçlar daha önce yapılan çalışmalar ile örtüşmektedir.



Şekil 4.3. Karışım tipine göre 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları (MPa)

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3’de görüldüğü gibi 7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde SD katkılı betonların ortalama basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla % 3,31, SDUK katkılı betonların ortalama basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla % 0,09 daha yüksek dayanım verirken, UK katkılı betonların ortalama basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla % 7,58 daha düşük basınç dayanımı vermiştir. 7 günlük yaşta en yüksek basınç dayanımını 34,42 N/mm²’lik dayanım ile SD15 (%15 SD ikameli beton) beton numunesi vermiştir. En düşük basınç dayanımlarını ise 29,07 N/mm² değeri ile UK20 betonu vermiştir. Erken yaşlarda SD oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı, UK içeren betonlarda ise UK oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. SDUK15 karışımının ise kontrol numunesine yakın basınç değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Betonların 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde SD katkılı betonların ortalama basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla % 9,77, UK katkılı betonlar kontrol numunesine kıyasla % 3,85, SDUK katkılı betonların ortalama basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla % 7,60 daha yüksek basınç dayanımı vermiştir. Bu grupta en yüksek basınç dayanımını 43,13 N/mm²’lik dayanım ile SD15 beton numunesi

vermiştir. En düşük basınç dayanımlarını ise 38,34 N/mm² değeri ile KN betonu vermiştir. 7 günlük yaşa paralel olarak, SD oranı arttıkça basınç dayanımlarının arttığı, UK'lı betonlarda ise %15 oranına kadar basınç artarken %20 oranında ise tam tersine basınç dayanımlarının azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.4'den görüleceği gibi 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde SD katkılı betonların ortalama basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla % 7,79, UK katkılı betonlar kontrol numunesine kıyasla % 2,05, SDUK katkılı betonların ortalama basınç dayanımı kontrol numunesine kıyasla % 4,22 daha yüksek basınç dayanımı vermiştir. 90 günlük yaşta en yüksek dayanım 44,59 N/mm²'lik dayanım ile SD15 beton numnesinden elde edilmiştir. Diğer yaşlardaki betonlarda olduğu gibi SD oranı arttıkça basınç dayanımı artmakta, UK oranı %10'na kadar basınç dayanımında artış, %10'den sonra ise basınç dayanımında düşme olduğu görülmektedir. UK içeren betonlarda en yüksek dayanım 41,95 N/mm²'lik dayanım ile UK10 betonundan elde edilmiştir. Silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanılmasından elde edilen betonlarda ise SD'li betonlarda olduğu gibi 42,82 N/mm²'lik dayanım ile %15 silis dumanı ve uçucu kül içeren (%7,5SD+%7,5UK) SDUK15 betonundan elde edilmiştir.

SD katkılı betonların basınç dayanımı UK katkılı betonlara kıyasla 7 günlük yaşta %1,12, 28 ve 90 günlük yaşta %1,06 daha yüksek dayanım elde edilmiştir. SD katkılı betonların basınç dayanımı SDUK katkılı betonlara kıyasla 7 ve 90 günlük yaşta %1,03 ve 28 günlük yaşta % 1,02 daha yüksek dayanım elde edilmiştir. UK katkılı betonların basınç dayanımı SDUK katkılı betonlara kıyasla 7 günlük yaşta % 7,66, 28 günlük yaşta %3,48 ve 90 günlük yaşta % 2,08 daha düşük dayanım elde edilmiştir.

Genel olarak 7, 28 ve 90 günlük yaşlardaki basınç dayanımları incelendiğinde silis dumanının betonun basınç dayanımını her yaşta arttırdığı ve çimento yerine %15 oranında silis dumanı kullanıldığında maksimum basınç dayanımı elde edildiği görülmektedir. Uçucu külün çimento yerine kullanıldığı durumda, 7 günlük yaşta betonun dayanımını düşürdüğü, 28 ve 90 günlük yaşarda ise %10 oranına kadar dayanımı arttırdığı, ancak %10 oranından sonra ise dayanımı düşürdüğü tespit

edilmiştir. 7 günlük yaşta en yüksek dayanım UK5 betonundan elde edilirken 28 ve 90 günlük yaşlarda ise UK10 karışımından elde edilmiştir. Silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanılması durumunda ise silis dumanı içeren betonlara benzer bir etki görülmüştür ve her yaşta en yüksek dayanım %15 (%7,5SD+%7,5UK) oranından silis dumanı ve uçucu kül içeren SDUK15 betonundan elde edilmiştir.

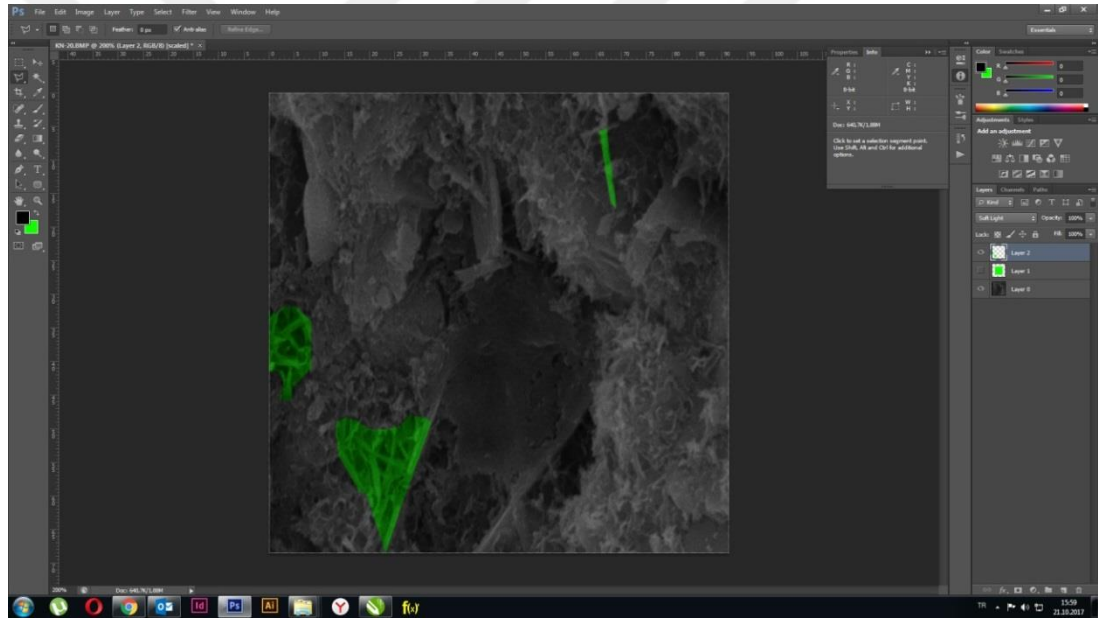
Yapılan çalışmalarda uçucu külden kaynaklanan dayanım kaybını engellemek için uçucu kül ile birlikte çimento içerisine belli oranda aktive edilmiş karbonun eklenmesinin olumlu sonuç verdiği görülmüştür. Bu doğrultuda Zheng *et al.* tarafından yapılan çalışmada uçucu kül çimento harcı içerisine aktive edilmiş karbon eklenmesinin basınç direncini artırdığını, aktif karbon içeriği arttıkça mukavemet artışını arttırdığını; karışımlarda %20 uçucu kül + %4 aktif karbon içeren karışımların 28 günde en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür (Zheng *et al.* 2007). Chindaprasirt ve Rukzon 90 günlük katkısız betona kıyasla uçucu kül içeren betonun daha iyi bir performans sergilediğini tespit etmiştir. Memon *et al.* mineral katkı maddelerinin ve kimyasal katkıların betonda basınç direnci, gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımı üzerine etkilerini olumlu etki yaptığını gözlemlemiştir (Ikram vd 2016).

4.4. SEM Analiz Bulguları

Taramalı elektron mikroskobunun (SEM) X-ışını mikroanalizi ile kullanımı, klinker ve çimentoların onu oluşturan fazları, yüzey alanları ve hacim fazların kimyasal yapısını ölçmeyi sağlar. SEM ile hidrolik çimentoları doğrudan görüntüleme, toplu ve yüzey faz kompozisyonlarının daha eksiksiz bir görüntüsünü verir. SEM görüntüleri ile elde edilen kütle yüzdeleri QXRD dayalı yüzdeleri ile iyi bir uyum içindedir ve Bogue hesaplamaları ile tahmin edilenlerden önemli ölçüde farklı olabilir. İnce taneli fazlar (alçı, trikalsiyumalüminat ve ferrit) Alit ve Belit gibi iri taneli fazlara göre birim kütle başına daha yüksek yüzey alanları göstermektedir. Bu tür veriler, çimento malzeme özellikleri ve performans özellikleri arasında daha iyi ilişkiler geliştirmek için uygulanmaktadır (Stutzman 2004).

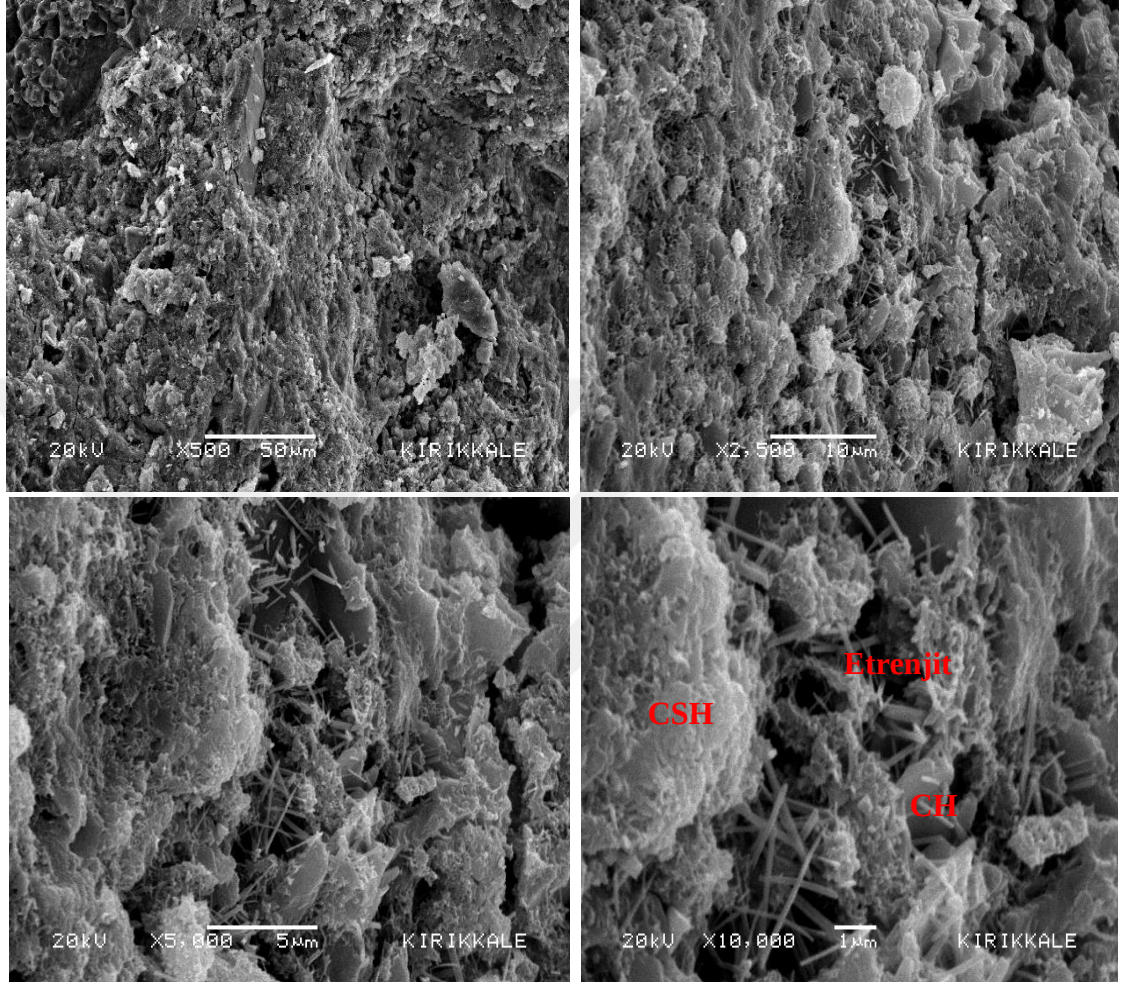
Yapılan çalışmada elde edilen numunelerin SEM incelemeleri Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Elektron Mikroskobu Labortuvarında yapılmıştır. Farklı numlerin 7, 28 ve 90 günlük yaşlarında toplam 1036 adet SEM görüntüsü çekilmiş ve incelenmiştir.

Elde edilen SEM görüntüleri linsanlı Photoshop Programına sahip bir reklam şirketi bilgisayarında açılarak fazların (CH, C-S-H ve Etrenjit) sahip olduğu farklı renklerin piksel değerlerinden faydalanılarak değişim yüzdeleri hesaplanmıştır. Söz konusu yapılan çalışmaya ait örnek ekran görüntüsü aşağıdaki şekilde görülmektedir.



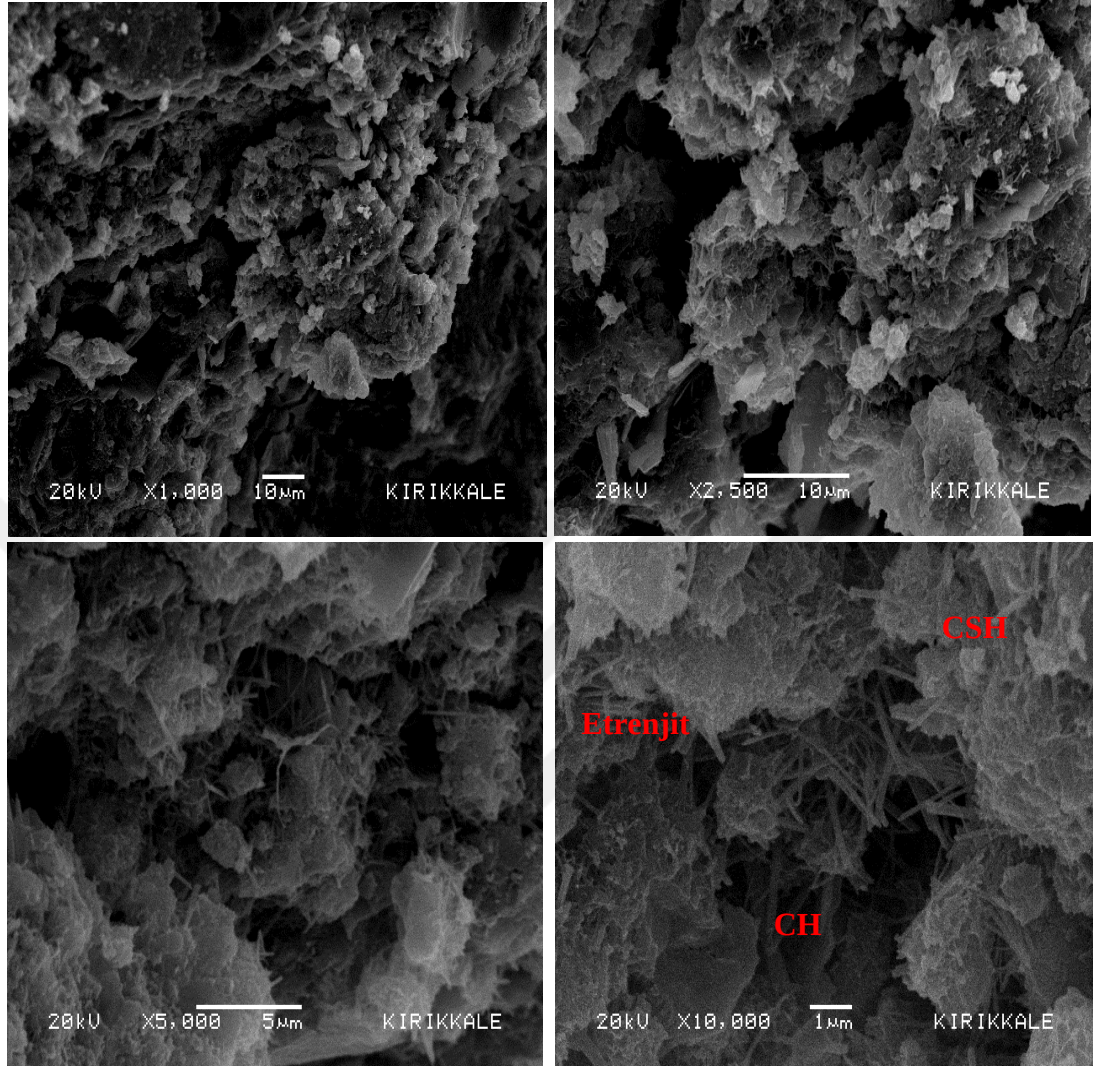
Şekil 4.4. Çalışmaya ait photoshop programı görüntüsü (a)

4.4.1. SEM 7 günlük analiz bulguları



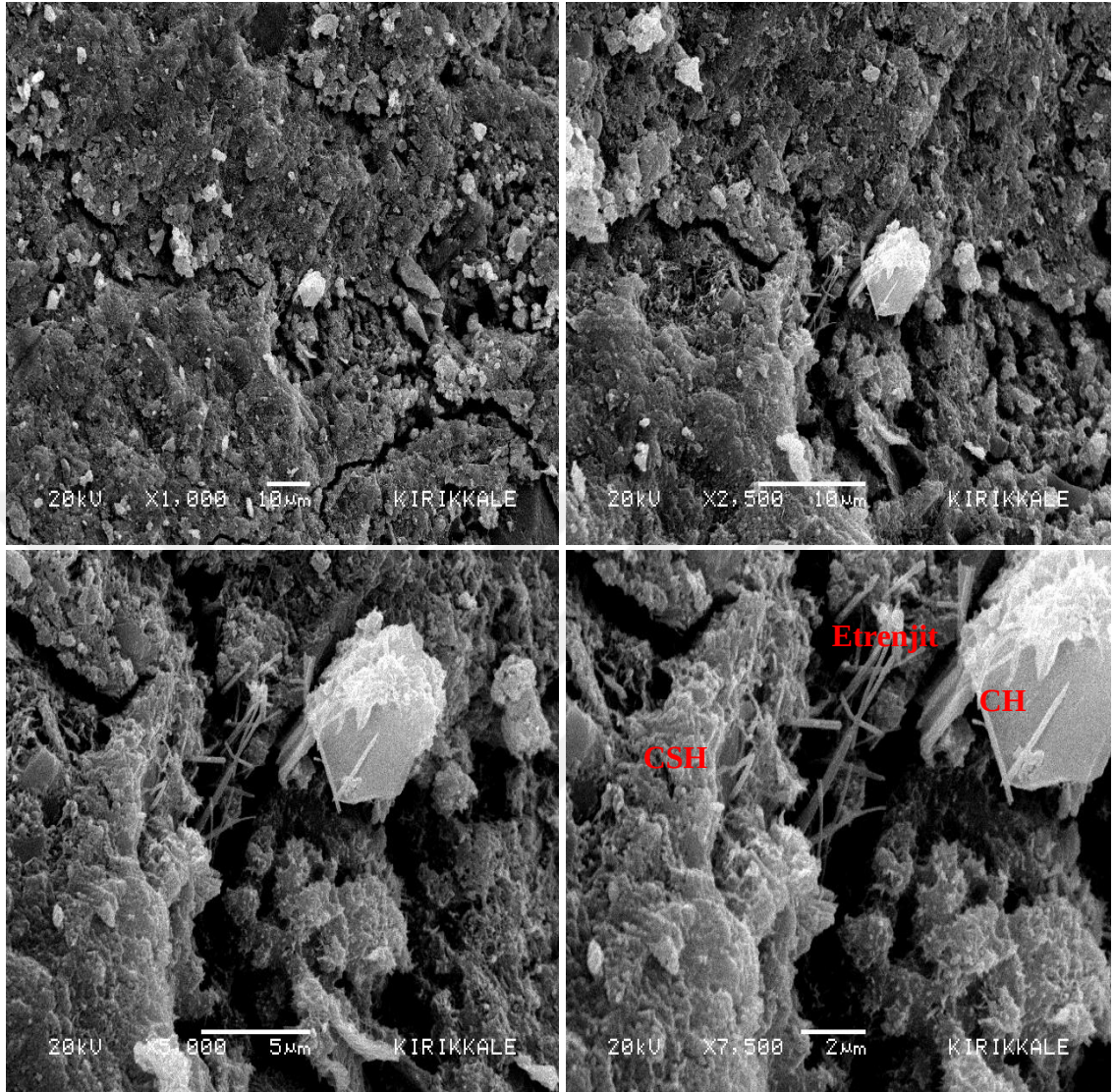
Şekil 4.6. KN karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.6’da KN numunesinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Kontrol numunesinin 7 günlük yaştaki SEM incelenmesinde farklı oranlarda büyütülmüş şekillerde görüldüğü gibi yoğun miktarda CH, C-S-H yapıları gözlenmiştir. Ayrıca yer yer etrenjit yapısının varlığına rastlanmıştır. Analiz sonucunda fazlar arasında boşlukların olduğu görülmektedir.



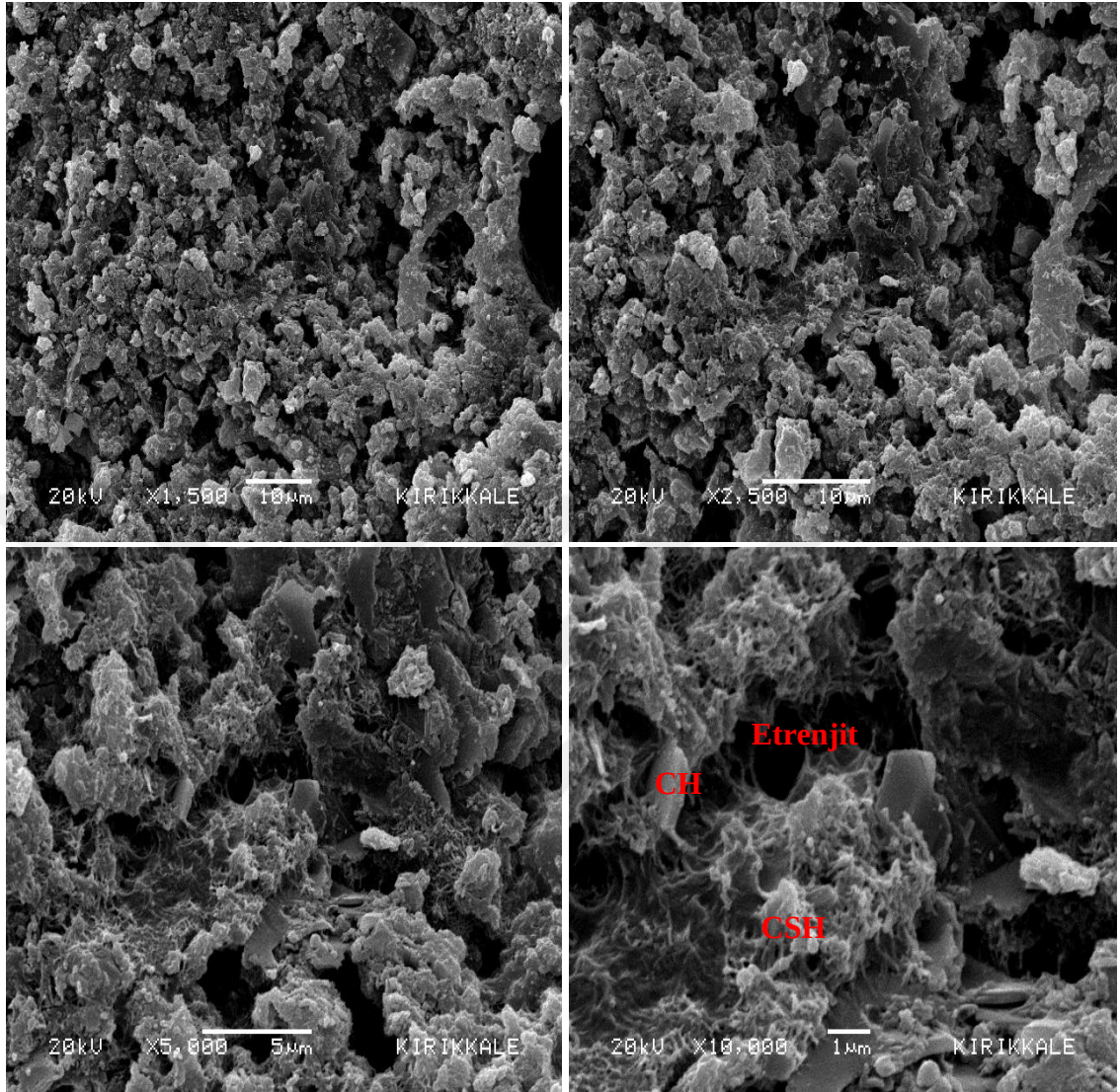
Şekil 4.7. SD5 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.7’de SD5 numunesinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde CH, C-S-H ve etrenjit yapılarının varlığı görülmektedir. SD5 numunesi KN numunesi ile kıyaslandığında, fazlar arasındaki boşlukların daha az olduğu ve KN numunesine benzer şekilde 7 günlük yaşta CH ve etrenjitin varlığı görülmektedir.



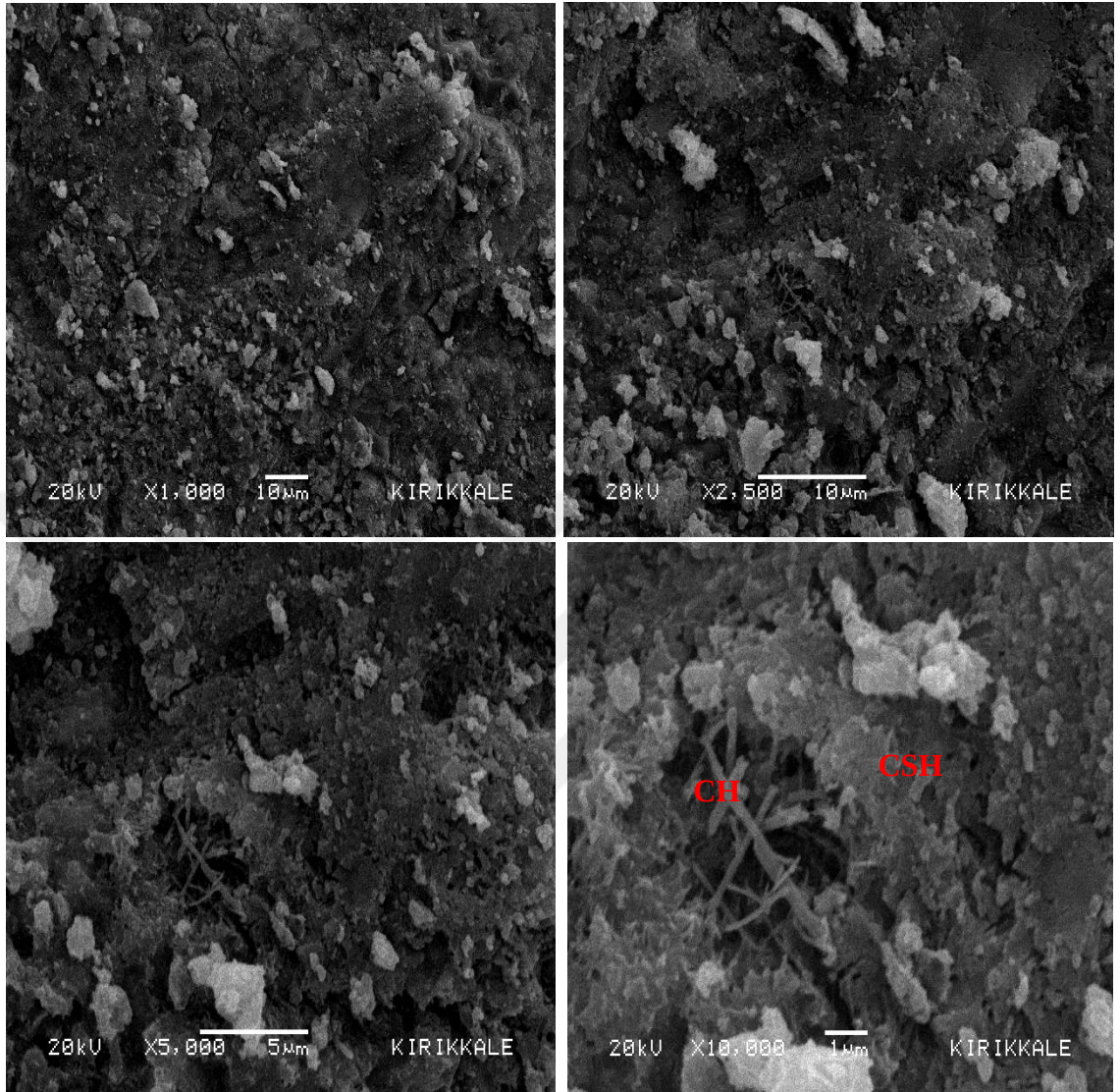
Şekil 4.8. SD10 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.8’de SD10 numunesinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde CH, C-S-H ve etrenjit yapılarının varlığı görülmektedir. CH ve etrenjit miktarının azaldığı ve C-S-H yapısının arttığı gözlemlenmiştir. Fazlar arasındaki boşlukların daha az olduğu tespit edilmiştir. C-S-H yapısı ilk başta iğnemsî biçimdeyken zamanla düzensiz taneli ve ağ yapısına dönüşmüştür. Kalsiyum hidroksit kristalleri ise altıgen yapılı ve prizma biçiminde oluşmuştur.



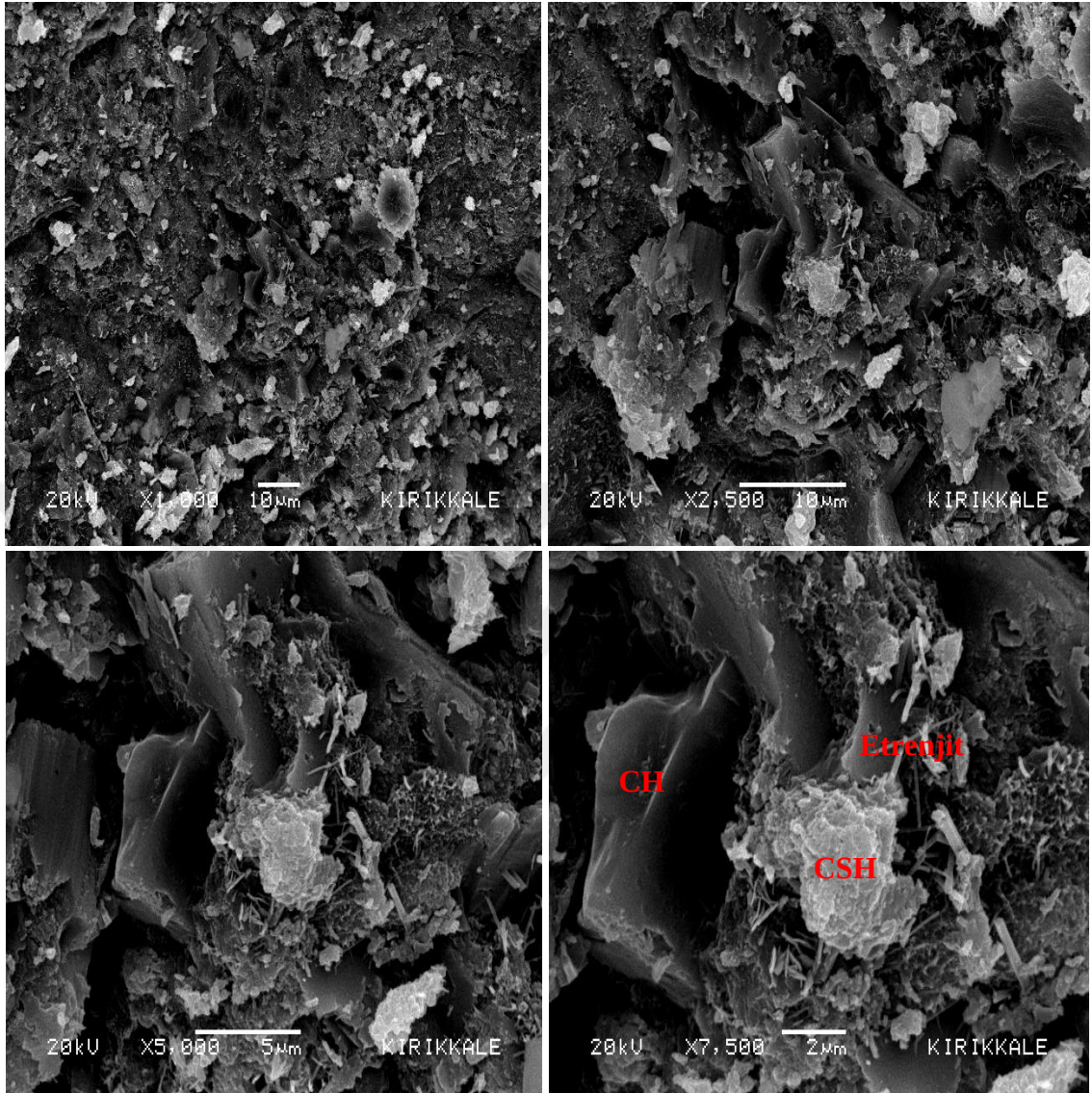
Şekil 4.9. SD15 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.9’da SD15 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde az miktarda CH ve yoğun bir şekilde C-S-H yapısının varlığı görülmektedir. C-S-H yapısı kesit içerisinde yüzeyi kaplarken, CH miktarı azalmıştır. Yapılar arasındaki boşlukların yok denecek kadar azaldığı tespit edilmiştir. C-S-H yapısının yoğunluğu artarak pamuksu ağ yapısına dönüşmüştür. Kalsiyum hidroksit kristalleri ise C-S-H arasına gizlenmiş olarak yer yer ortaya çıkmaktadır. SD oranının artması ile CH yoğunluğu ve boşluklar azalmış ve C-S-H ise belirgin oranda artmıştır.



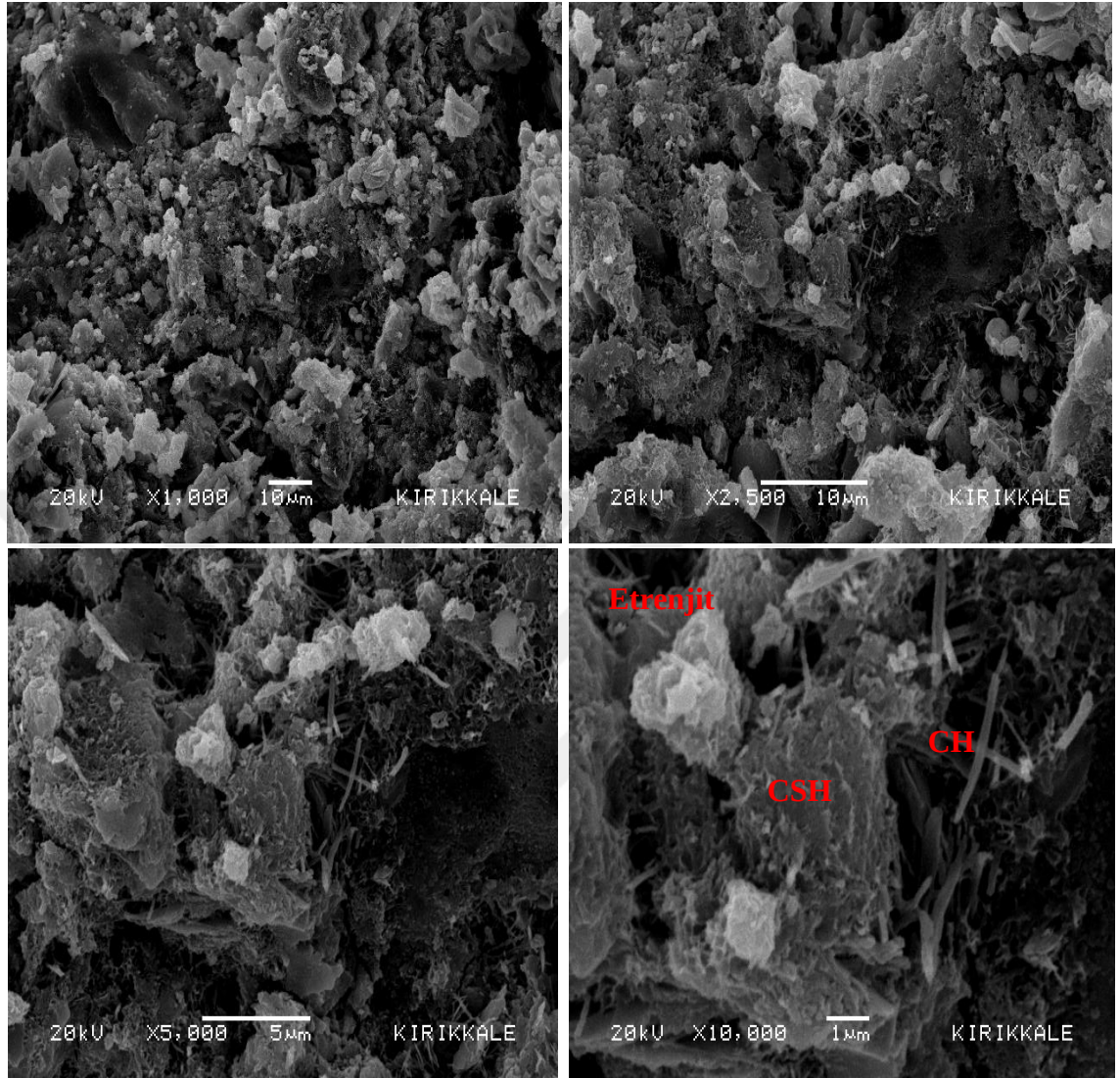
Şekil 4.10. SD20 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.10'da SD20 numunesinin SEM analizi verilmiştir. Analizler incelendiğinde CH miktranın azaldığı ve C-S-H miktarının artışı görülmektedir. C-S-H miktarı kesit alanını büyük oranda kaplarken, CH miktarı azalmıştır. Yapılar arasındaki boşlukların yok denecek kadar azaldığı tespit edilmiştir. C-S-H yapısı yoğunluğu artarak pamuksu ağ yapısına dönüşmüştür. Kalsiyum hidroksit kristalleri ise C-S-H arasına gizlenmiş olarak ortaya çıkmaktadır. SD15 numunesinde olduğu gibi SD oranının artması ile CH yoğunluğu ve boşluklar azalmış ve C-S-H ise belirgin oranda artmıştır.



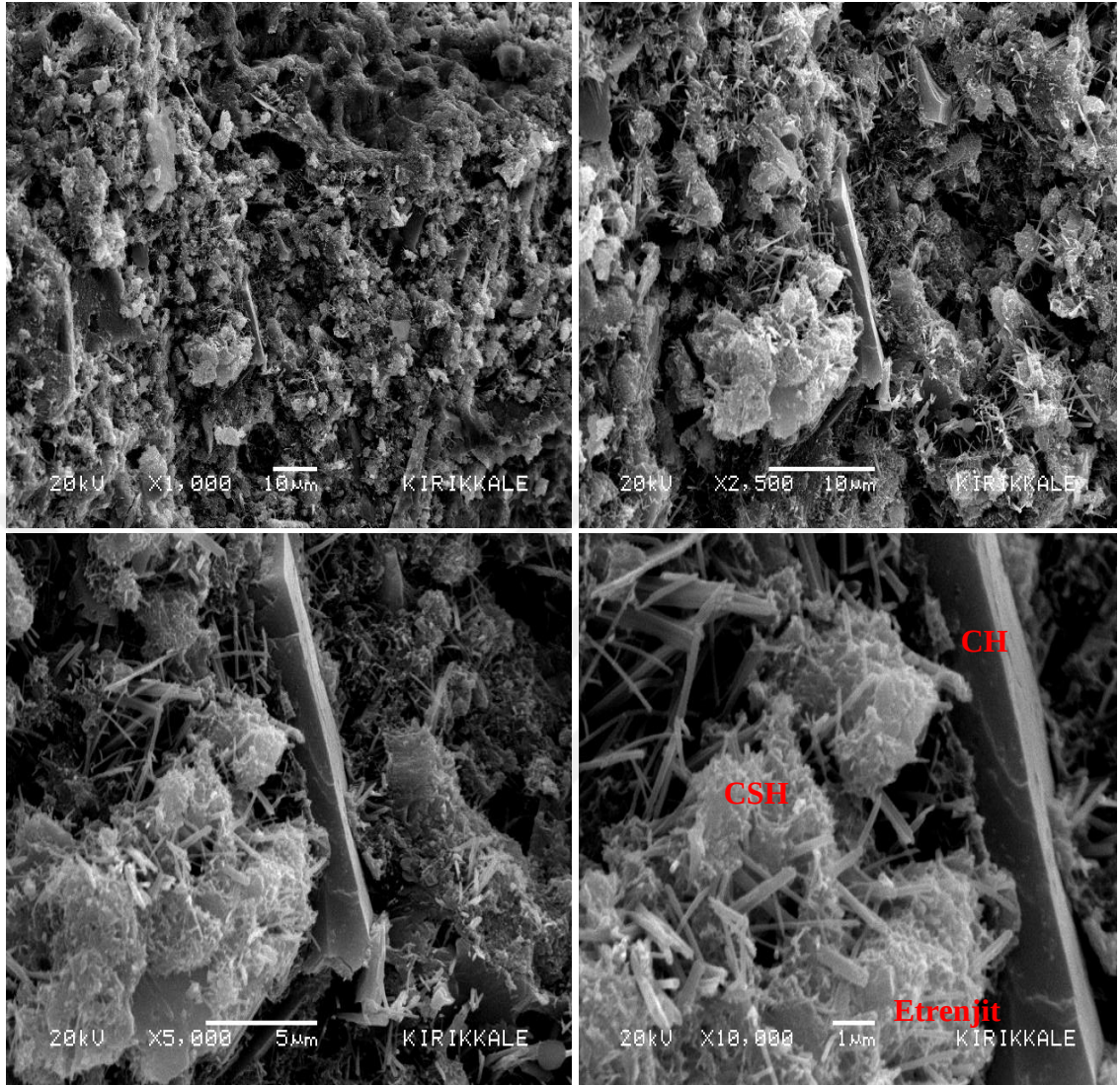
Şekil 4.11. UK5 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.11’de UK5 numunesinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde CH, C-S-H ve az miktarda etrenjit yapılarının varlığı görülmektedir. CH yapısının fazlalığı ve etrenjit miktarının azaldığı dikkati çekmiştir. Fazlar arasındaki yer yer boşlukların olduğu tespit edilmiştir. C-S-H yapısının belli bölgelerde toplandığı ve CH kristallerini örttüğü anlaşılmıştır.



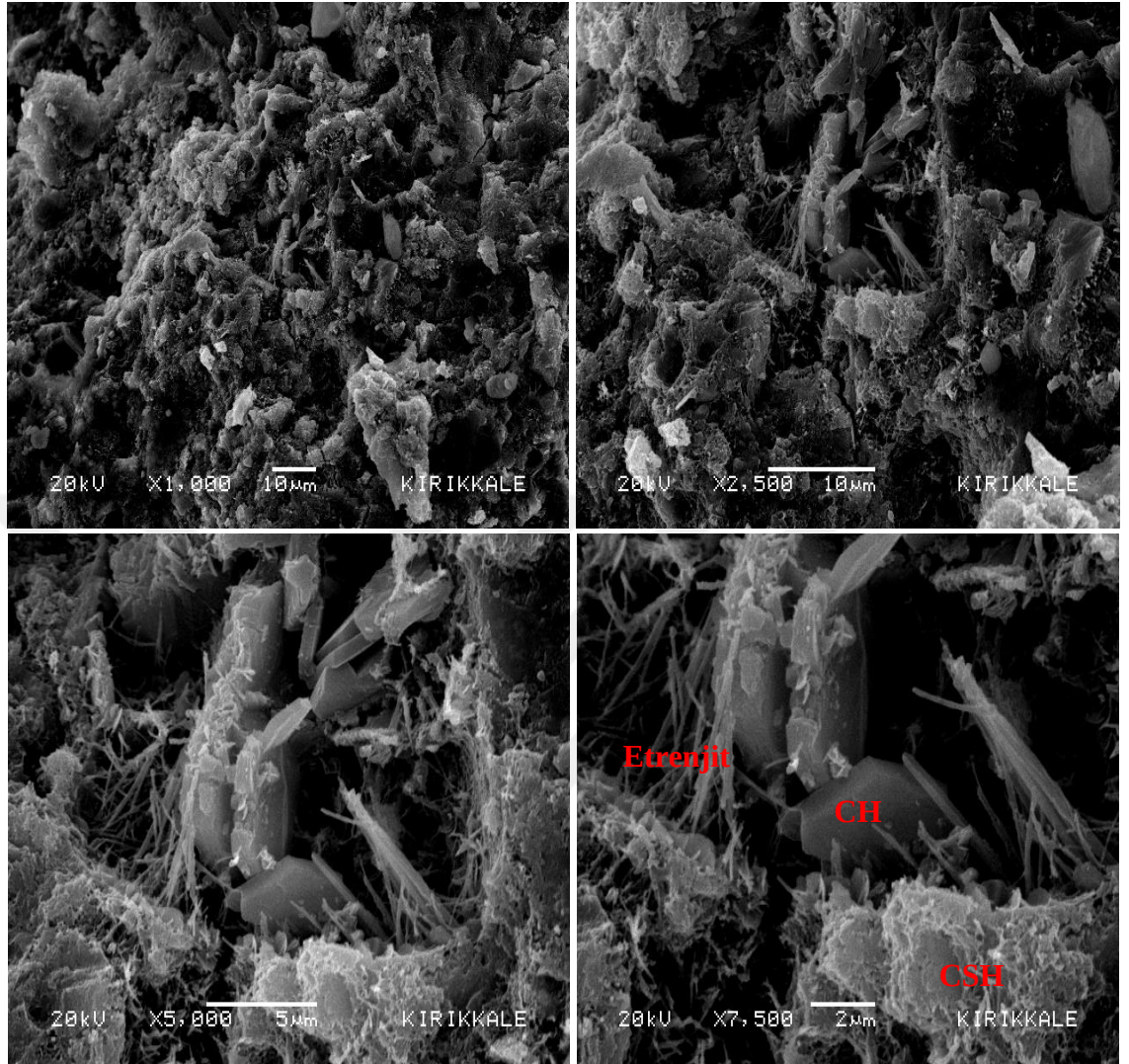
Şekil 4.12. UK10 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.12’de UK10 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde C-S-H içine gömülmüş olarak CH varlığı ve yoğun şekilde C-S-H ve etrenjit yapıları görülmektedir. UK5 numunesine göre CH ve etrenjit miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Fazlar arasındaki yer yer boşlukların olduğu tespit ve C-S-H yapısının genel olarak yüzeye yayıldığı CH kristallerini örttüğü görülmüştür.



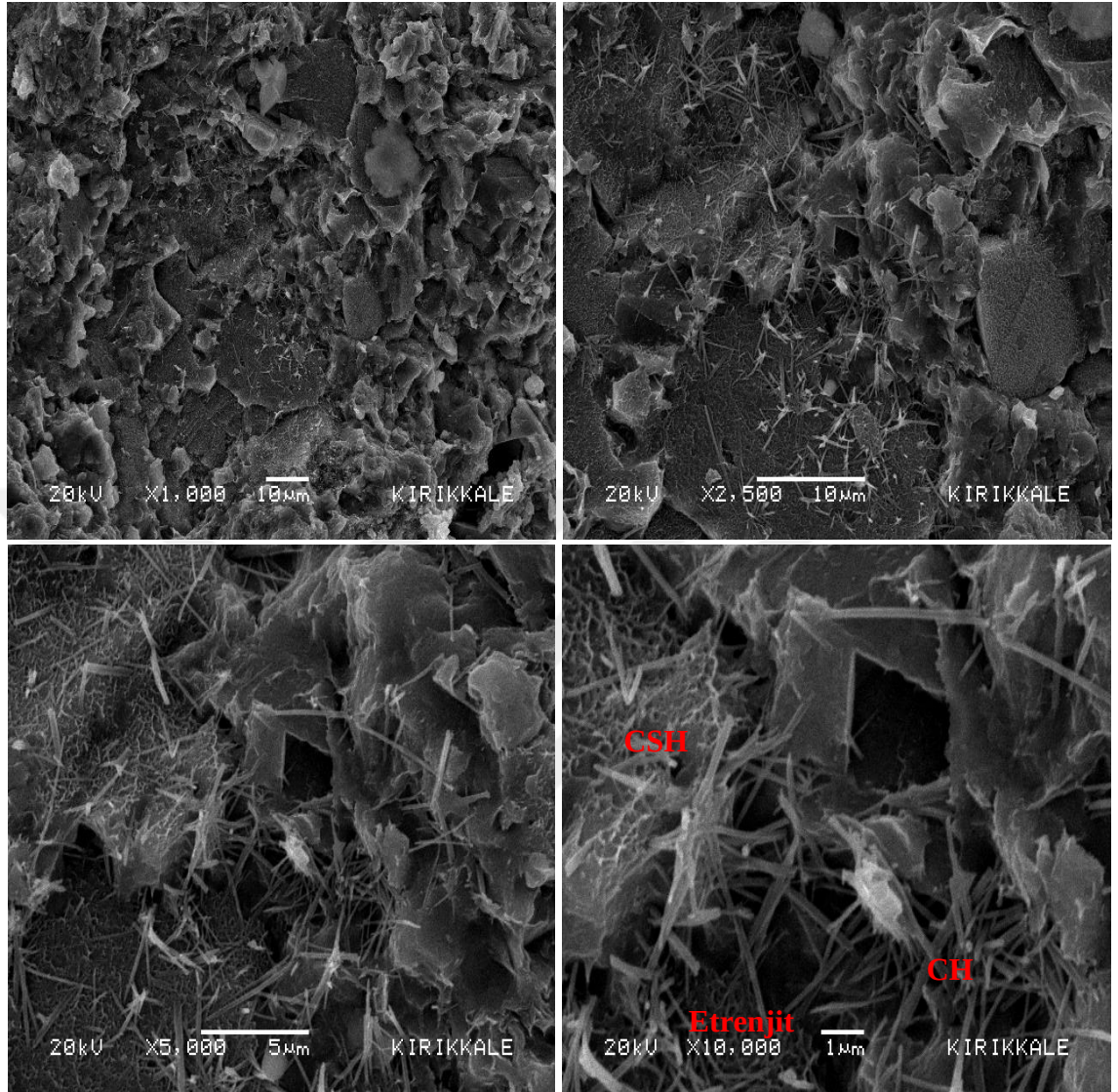
Şekil 4.13. UK15 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.13’de UK15 numunesinin SEM analizi verilmiştir. Analiz sonuçlarında inceleme yapılan kesite bakıldığında belli bölgede toplanmış C-S-H yapısı ve bunun içine gömülmüş olarak artan oranda CH varlığı ve etrenjit yapıları görülmektedir. CH yapısı kesit boyunca uzanmış ve C-S-H yapısının üstüne çıkarak kendini belirgin olarak göstermiştir. UK10 numunesine göre C-S-H miktarının azaldığı, CH oranında ve fazlar arasındaki boşlukların ise arttığı tespit edilmiştir.



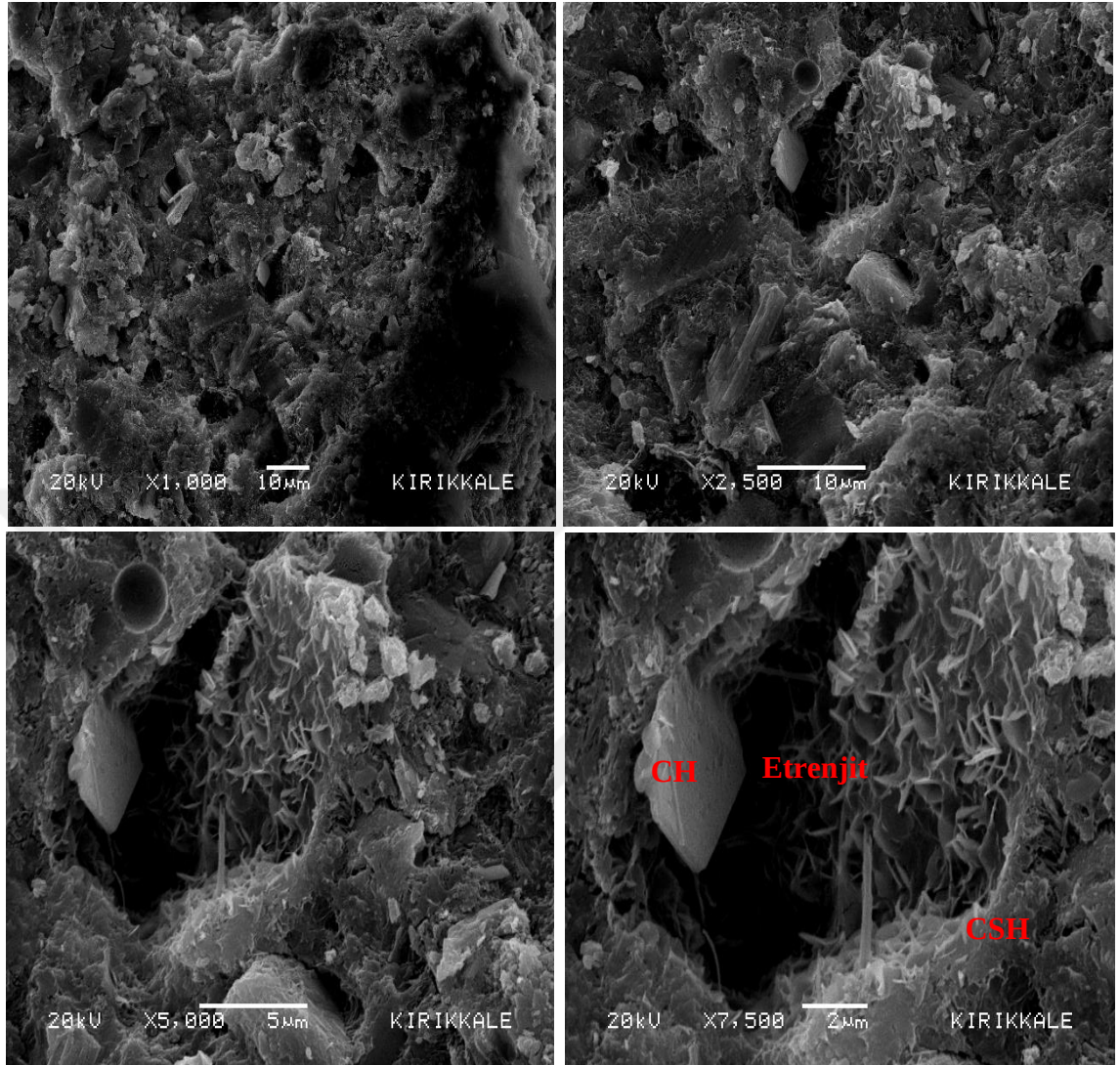
Şekil 4.14. UK20 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.14’de UK20 numunesinin SEM analizi verilmiştir. Analiz sonuçlarında inceleme yapılan kesite bakıldığında belli bölgede toplanmış C-S-H yapısı ve bunun içine gömülmüş olarak artan miktarda belli alanda yoğunlaşmış CH varlığı görülmektedir. UK10 numunesine göre C-S-H miktarının azaldığı, CH oranında ve fazlar arasındaki boşlukların ise arttığı tespit edilmiştir. UK20 numunesinde oluşan yapı UK15 numunesine benzer şekilde olmuştur.



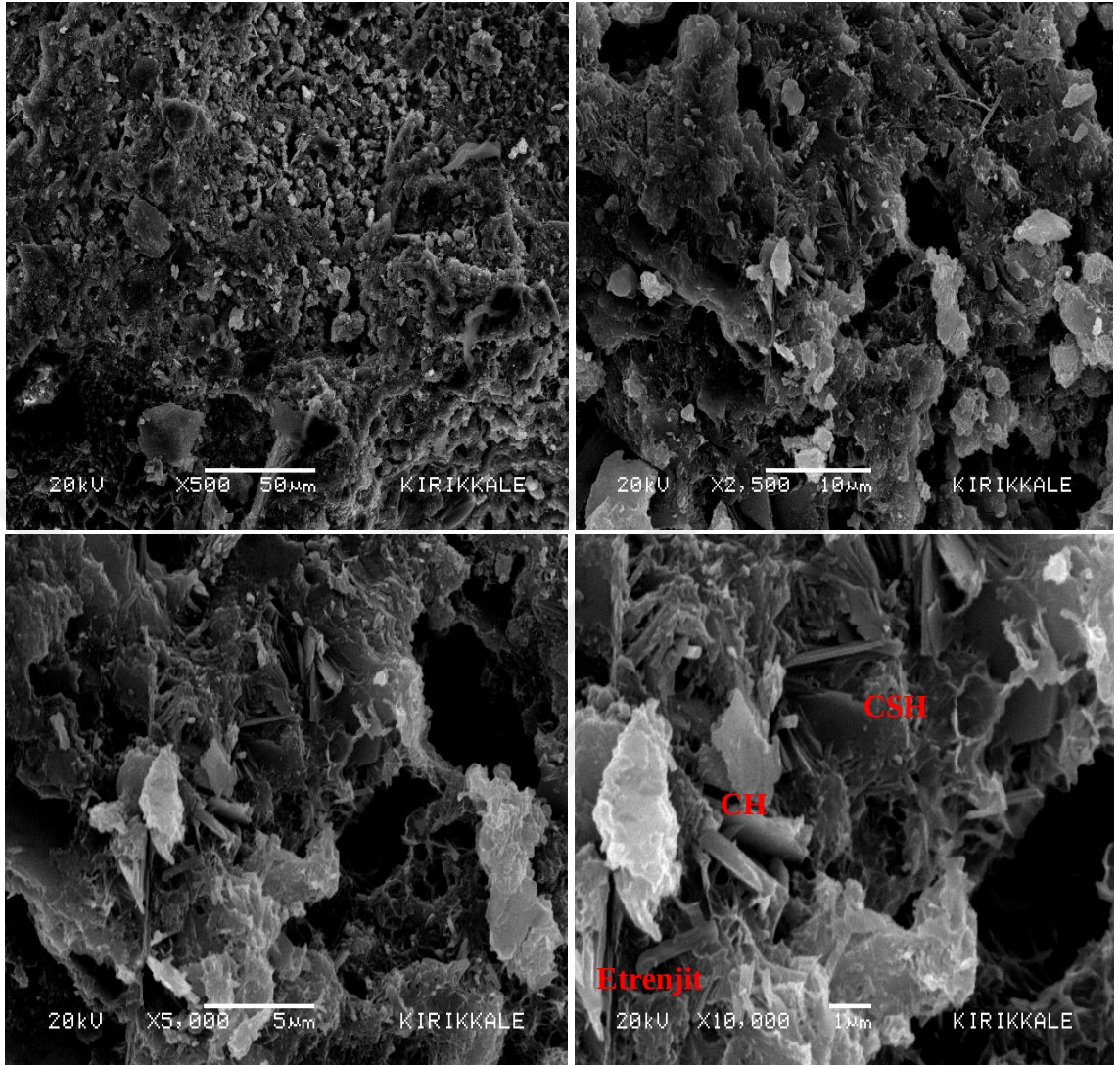
Şekil 4.15. SDUK5 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.15’de SDUK5 numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntünün incelenmesinde yüzeye yayılmış olarak C-S-H yapısı ve bunun içine dağılmış olarak belli alanda yoğunlaşmış CH varlığı görülmektedir. Kesit içerisinde etrenjit varlığı da görülmüştür. Söz konusu numune kesitine bakıldığında aynı yaştaki kontrol ve silis dumanlı beton numunelerine göre CH miktarı ve etrenjit artmış, C-S-H ise azalmıştır.



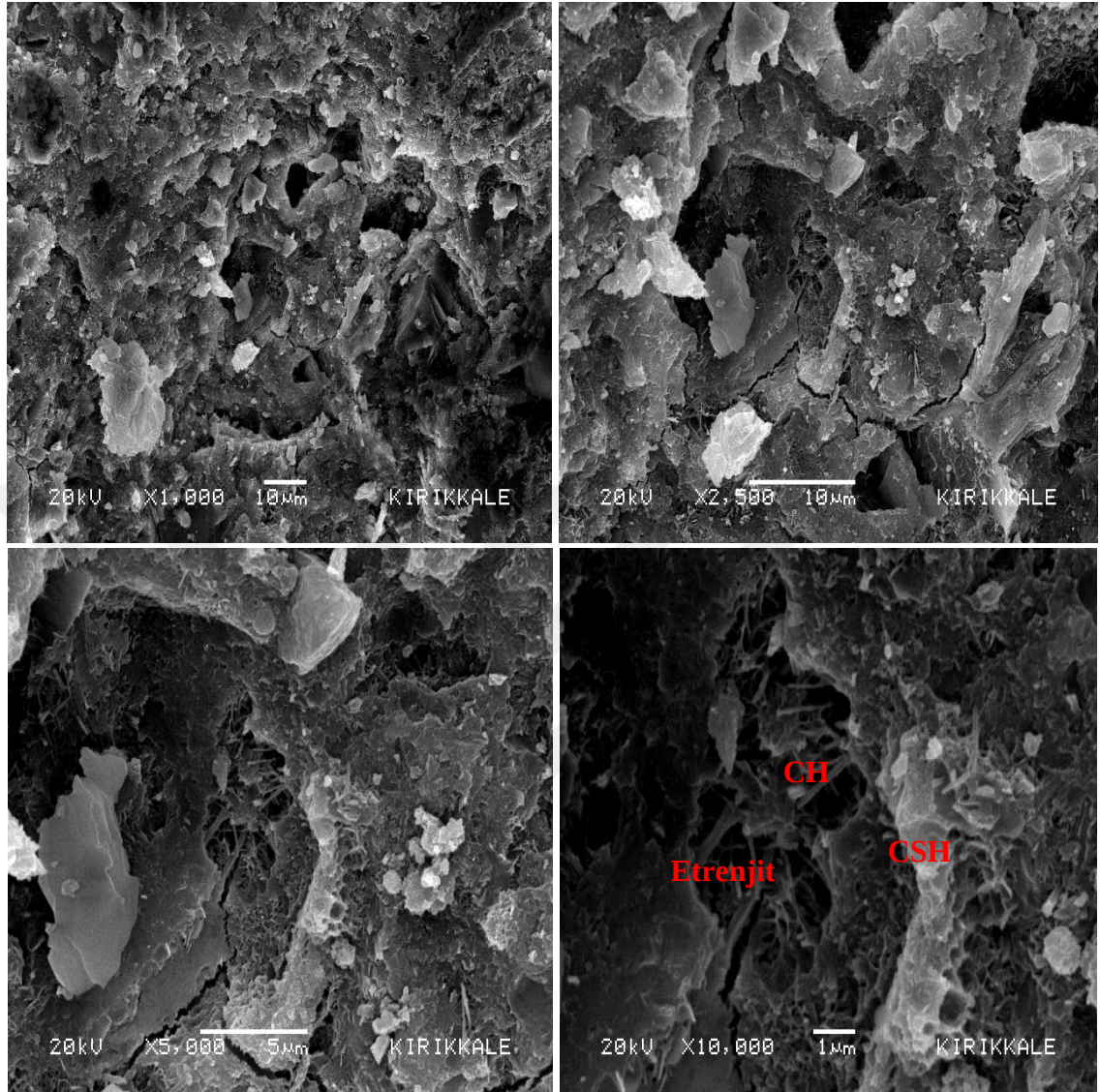
Şekil 4.16. SDUK10 karışımı 7 günlük SEM analizi

Şekil 4.16’da SDUK10 numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntünün incelenmesinde yüzeyin çoğunluğunu kaplamış C-S-H yapısı ve bunun içine belli noktada yoğunlaşmış plak şeklinde CH varlığı görülmektedir. Buna ilave olarak kesit içerisinde boşluk varlığı da görülmüştür. SDUK5 numunesi ile kıyaslandığında CH miktarı azalmış, C-S-H ise artmıştır.



Şekil 4.17. SDUK15 karışımı 7 günlük SEM analizi

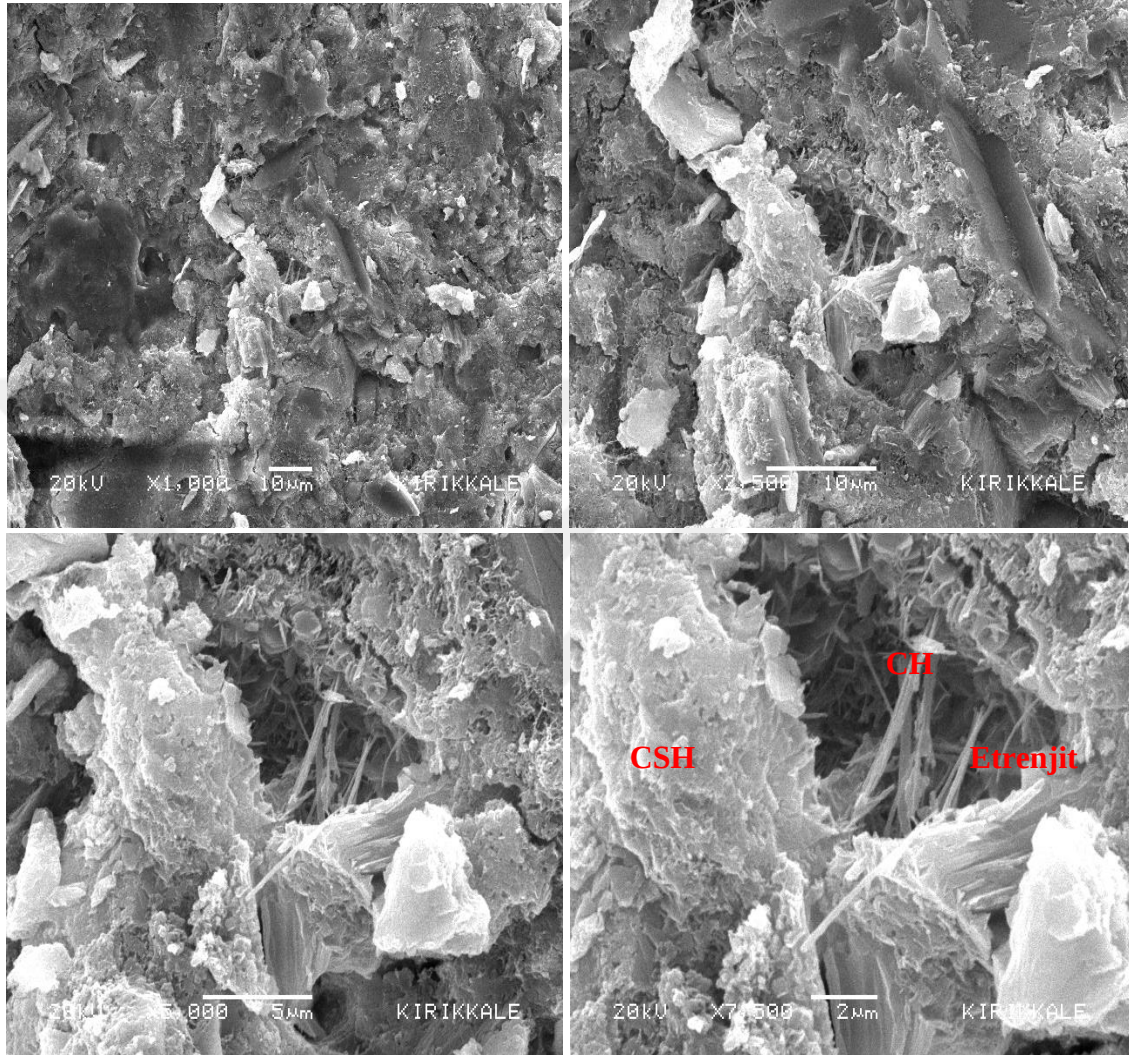
Şekil 4.17’de SDUK15 numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntünün incelenmesinde yüzeyin çoğunluğunu kaplamış C-S-H yapısı ve bunun içine belli noktada yoğunlaşmış CH varlığı görülmektedir. Buna ilave olarak kesit içerisinde boşluk varlığı da görülmüştür. SDUK10 numunesi ile kıyaslandığında CH miktarında artma olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.18. SDUK20 karışımı 7 günlük SEM analizi

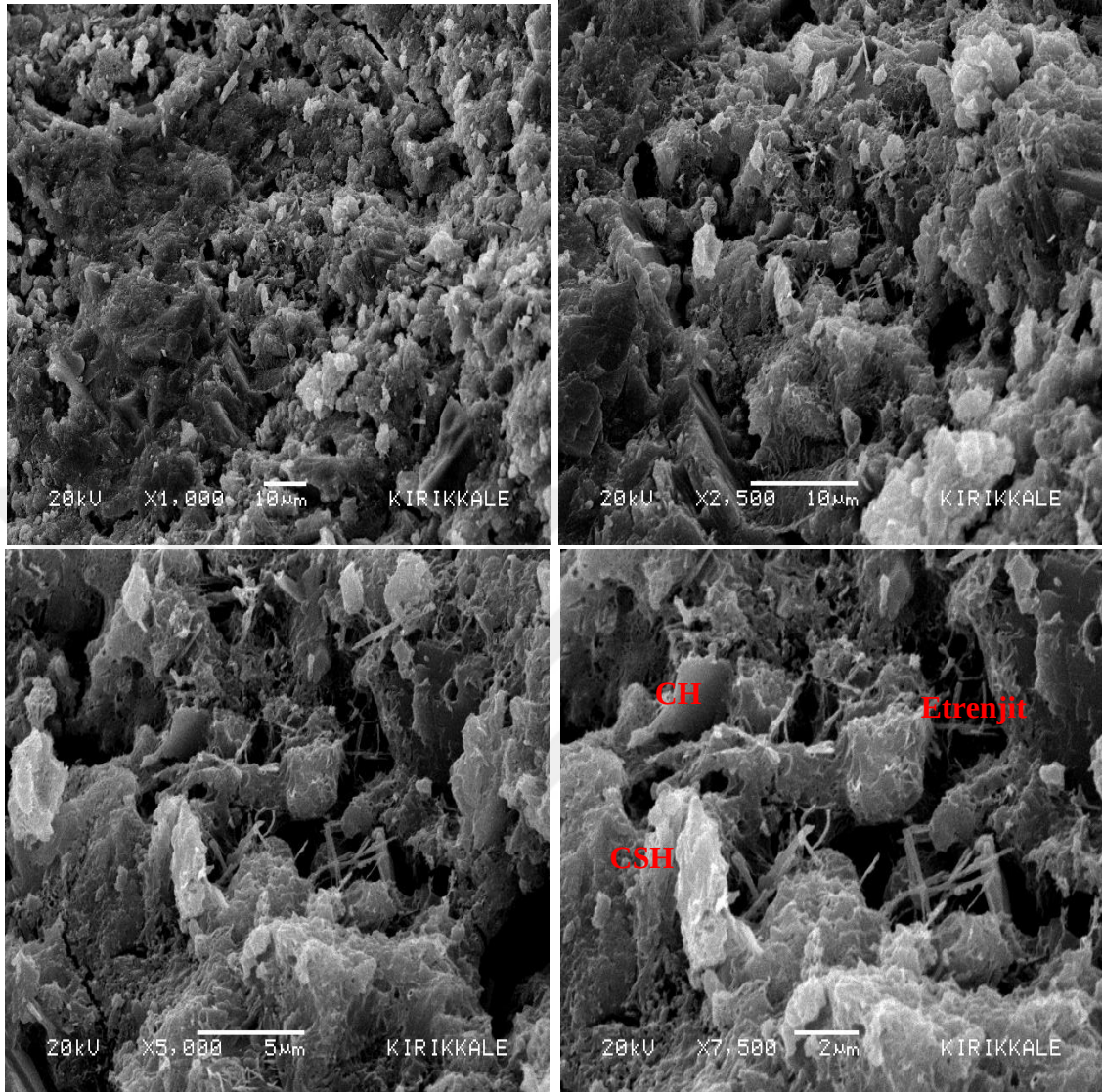
Şekil 4.17’de SDUK20 numunesinin SEM analizi verilmiştir. Analizin incelenmesinde yüzeyi yoğun olarak kaplamış C-S-H yapısı ve bunun içine az miktarda plak halinde CH varlığı görülmektedir. Ayrıca kesit içerisinde boşluk varlığı da tespit edilmiştir. Buna ilave olarak diğer SD+UK içeren numuneler ile kıyaslandığında SDUK20 numunesinde CH miktarında azalma olduğu belirlenmiştir.

4.4.2. SEM 28 günlük analiz bulguları



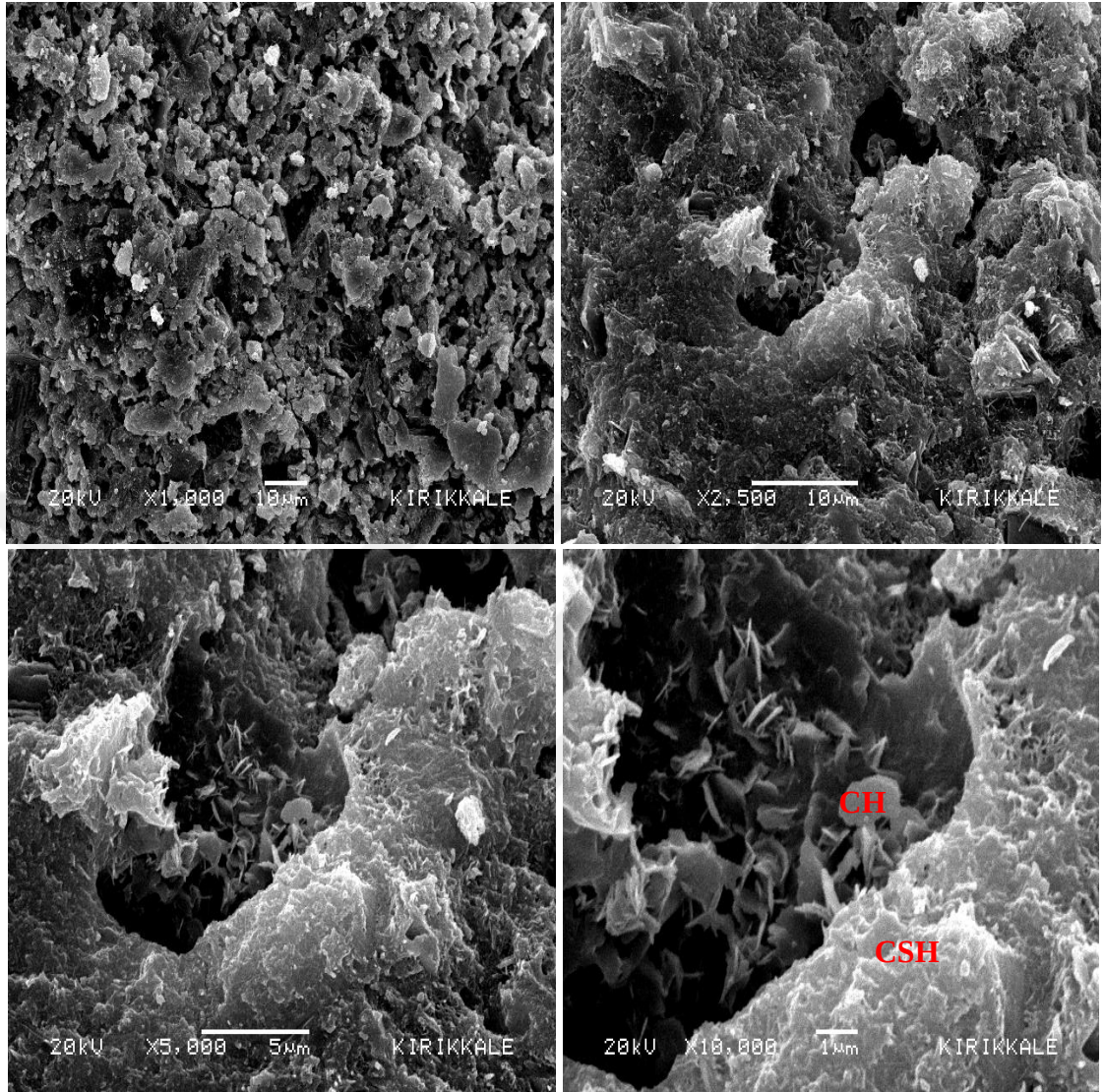
Şekil 4.19. KN karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.19’da KN numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. Kontrol numunesinin 28 günlük yaştaki SEM incelenmesinde görüldüğü gibi yoğun miktarda C-S-H ve daha az miktarda CH yapıları gözlenmiştir. Kontrol numunesinin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, boşluklar, etrenjit ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır. Bu CH, C_3S ile reaksiyona girerek C-S-H oluşumunu artırmasının bir sonucudur.



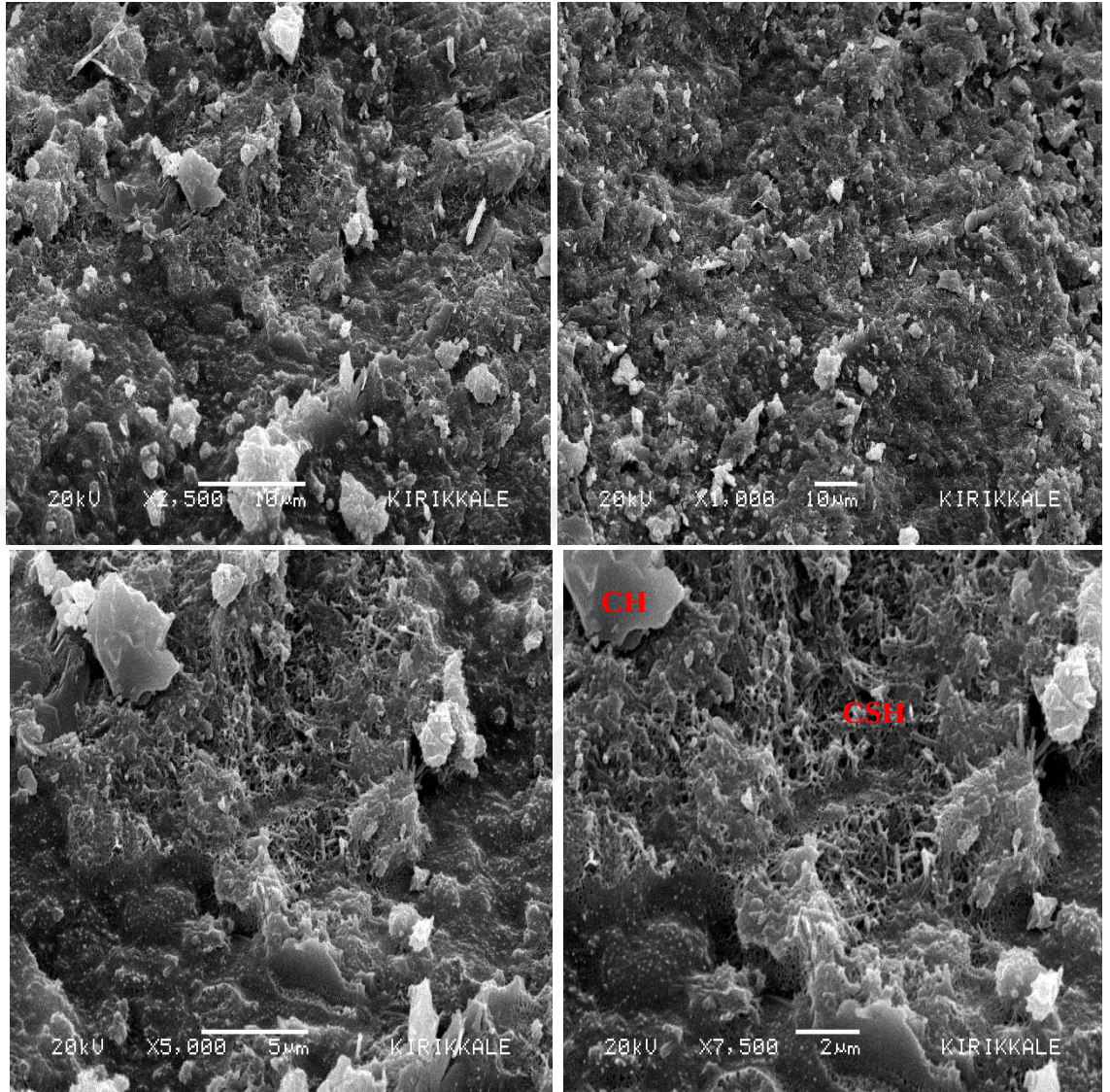
Şekil 4.20. SD5 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.20’de SD5 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SD5 numunesinin SEM incelenmesinde görüldüğü gibi büyük miktarda C-S-H ve daha az miktarda CH yapıları gözlenmiştir. Etrenjit ise yok denecek kadar azalmıştır. Aynı oranda silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır. Buda reaksiyonun ilerlemesine bağlı olarak oluşan C-S-H miktarının artmasından kaynaklanmıştır.



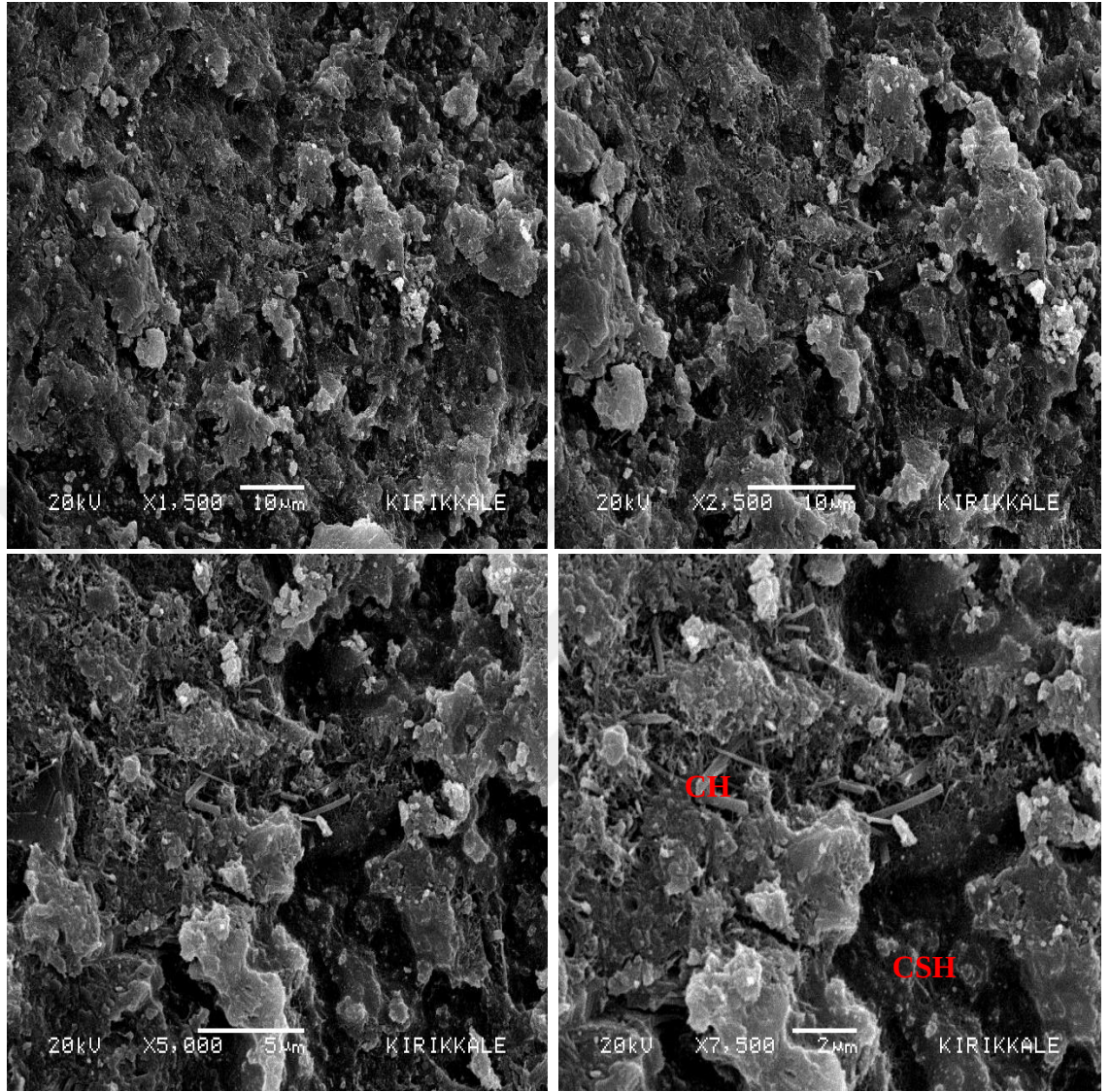
Şekil 4.21. SD10 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.21’de SD10 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SD10 numunesinin SEM incelenmesinde görüldüğü gibi büyük miktarda C-S-H ve daha az miktarda CH yapıları gözlenmiştir. Aynı oranda silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır. Bu da reaksiyonun ilerlemesine bağlı olarak oluşan C-S-H miktarının artmasından kaynaklanmıştır.



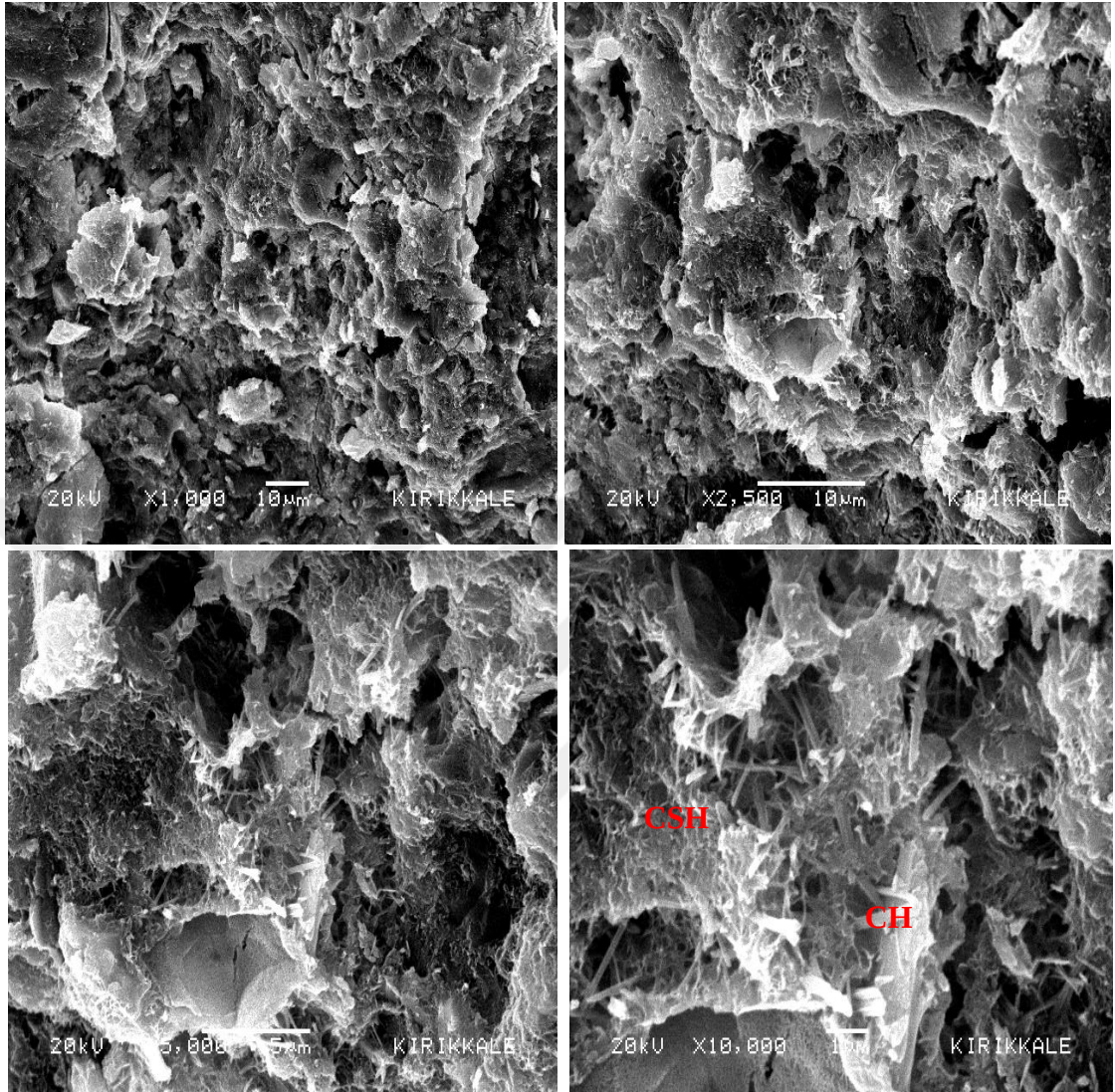
Şekil 4.22. SD15 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.22’de SD15 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM incelenmesinde görüldüğü gibi tüm yüzey C-S-H ile doldurulmuş ve iki noktada plak halinde CH gözlenmiştir. Buda CH kristallerinin çimento ve agrega arayüzeyinin bağlayıcılık özelliğinin artırmasından dolayıdır. Aynı oranda silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır.



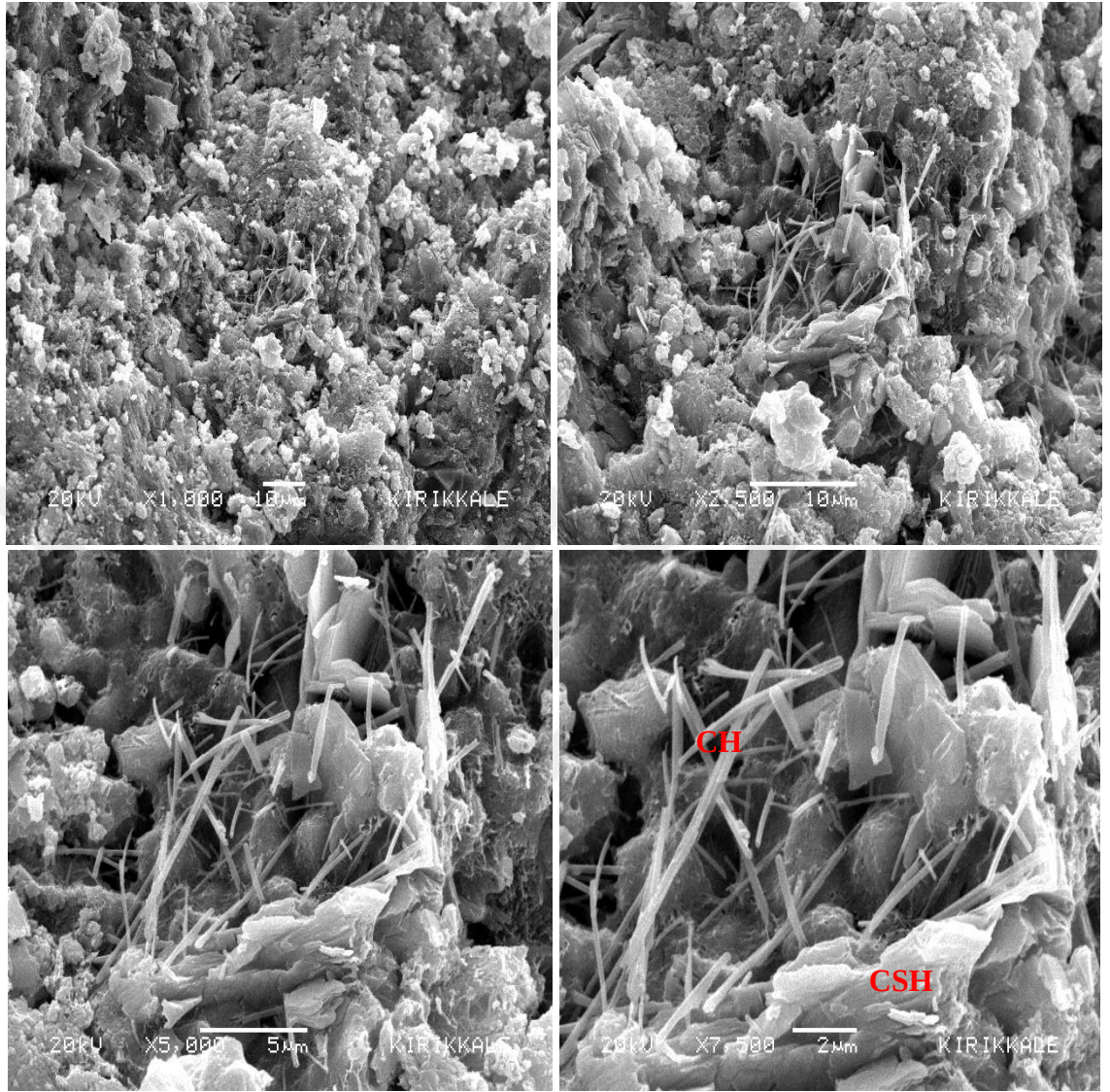
Şekil 4.23. SD20 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.23’de SD20 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM incelenmesinde görüldüğü gibi tüm yüzey C-S-H ile doldurulmuş ve iki noktada plak halinde CH gözlenmiştir. Buda CH kristallerinin çimento ve agrega arayüzeyinin bağlayıcılık özelliğinin artırmasından dolayıdır. Aynı oranda silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır.



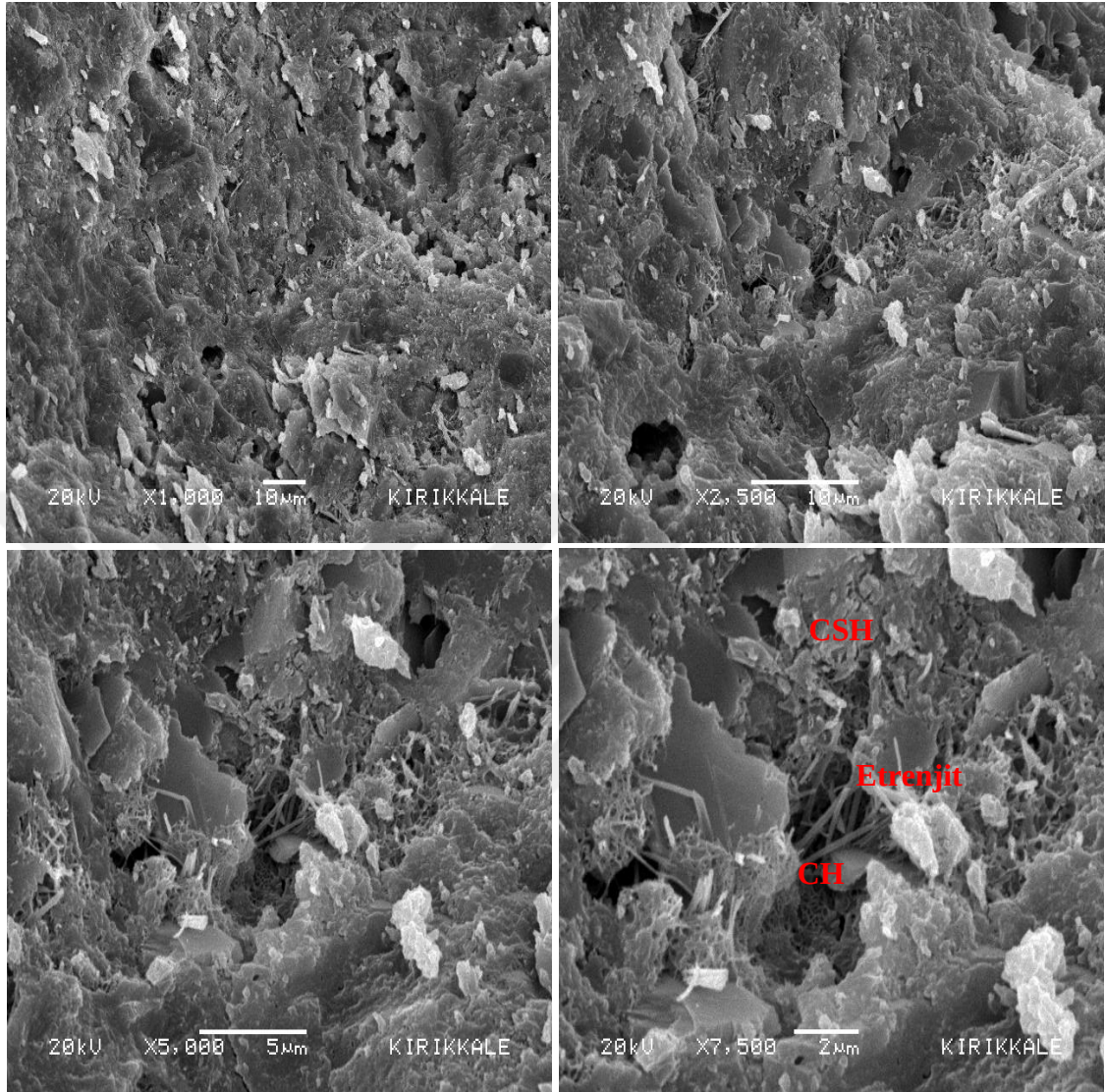
Şekil 4.24. UK5 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.24’de UK5 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM incelenmesinde yüzeye yayılmış C-S-H ve C-S-H içerisinde gömülü yer yer CH gözlenmiştir. Aynı oranda uçucu kül içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, boşluklar, etrenjit ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır.



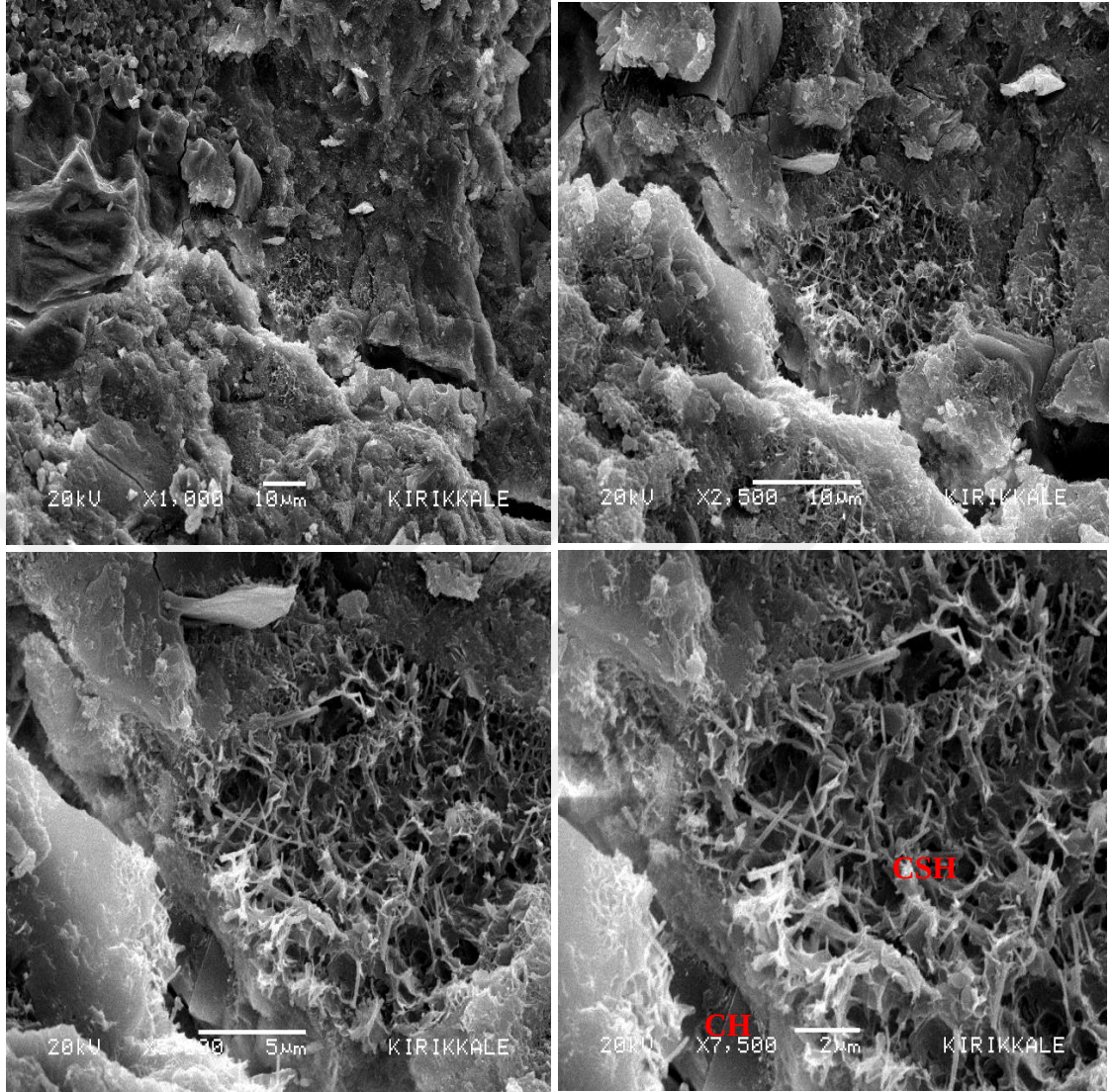
Şekil 4.25. UK10 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.25’de UK10 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM incelenmesinde genel olarak yüzeye yayılmış C-S-H ve bir bölgede toplanmış CH gözlenmiştir. Tespit edilen CH’lar hegzagonal çubuk ve plaka şekilde görülmektedir. Aynı oranda uçucu kül içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, kesit içindeki boşluklar, etrenjit ve CH miktarı azalmıştır.



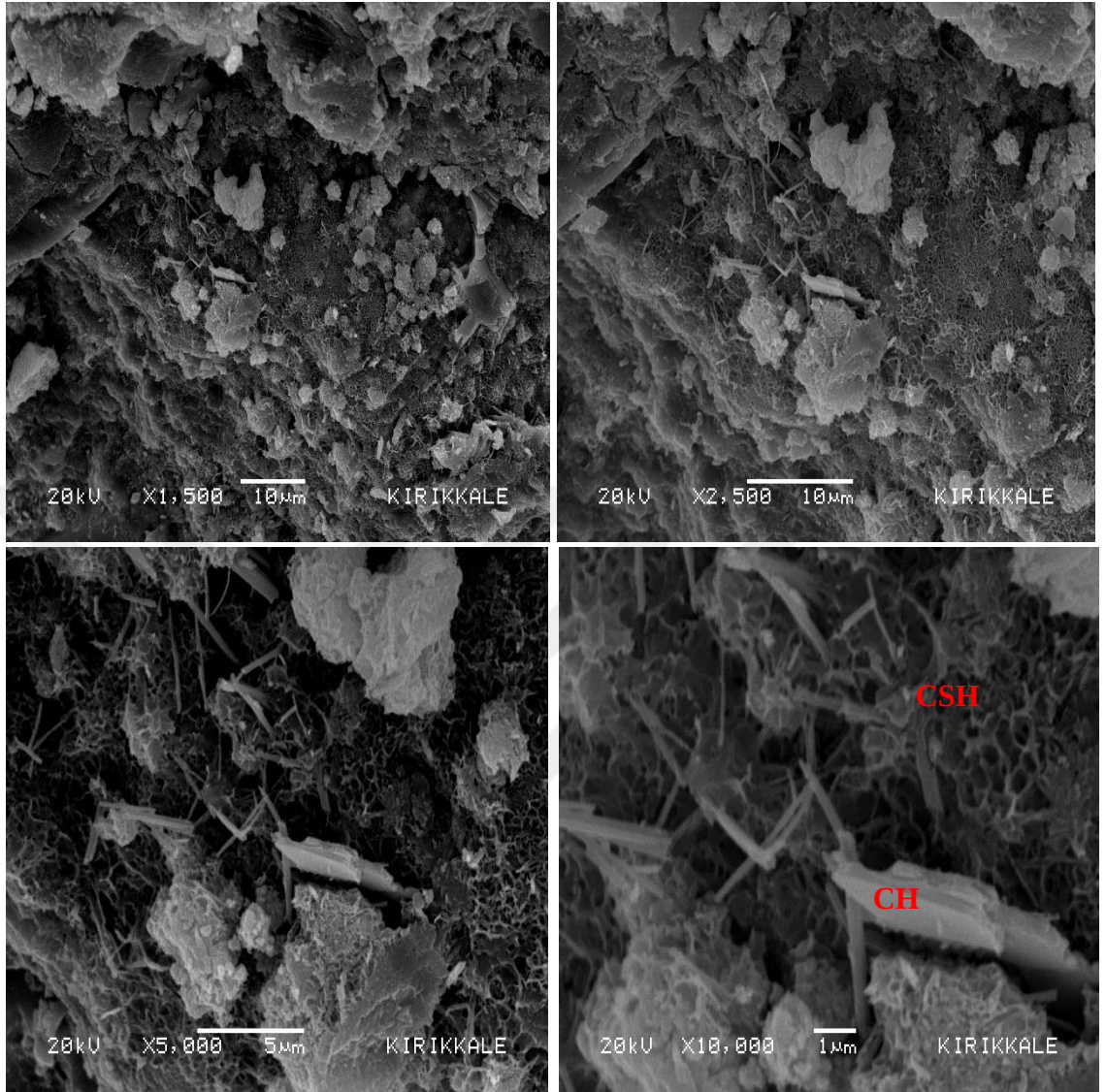
Şekil 4.26. UK15 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.26’da UK15 numunesinin SEM analizleri verilmiştir. SEM incelenmesinde yoğun şekilde C-S-H ve plakalar halinde CH gözlenmiştir. İncelenen yüzey içerisinde boşluklar da görülmüştür. Aynı oranda uçucu kül içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, kesitteki boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır.



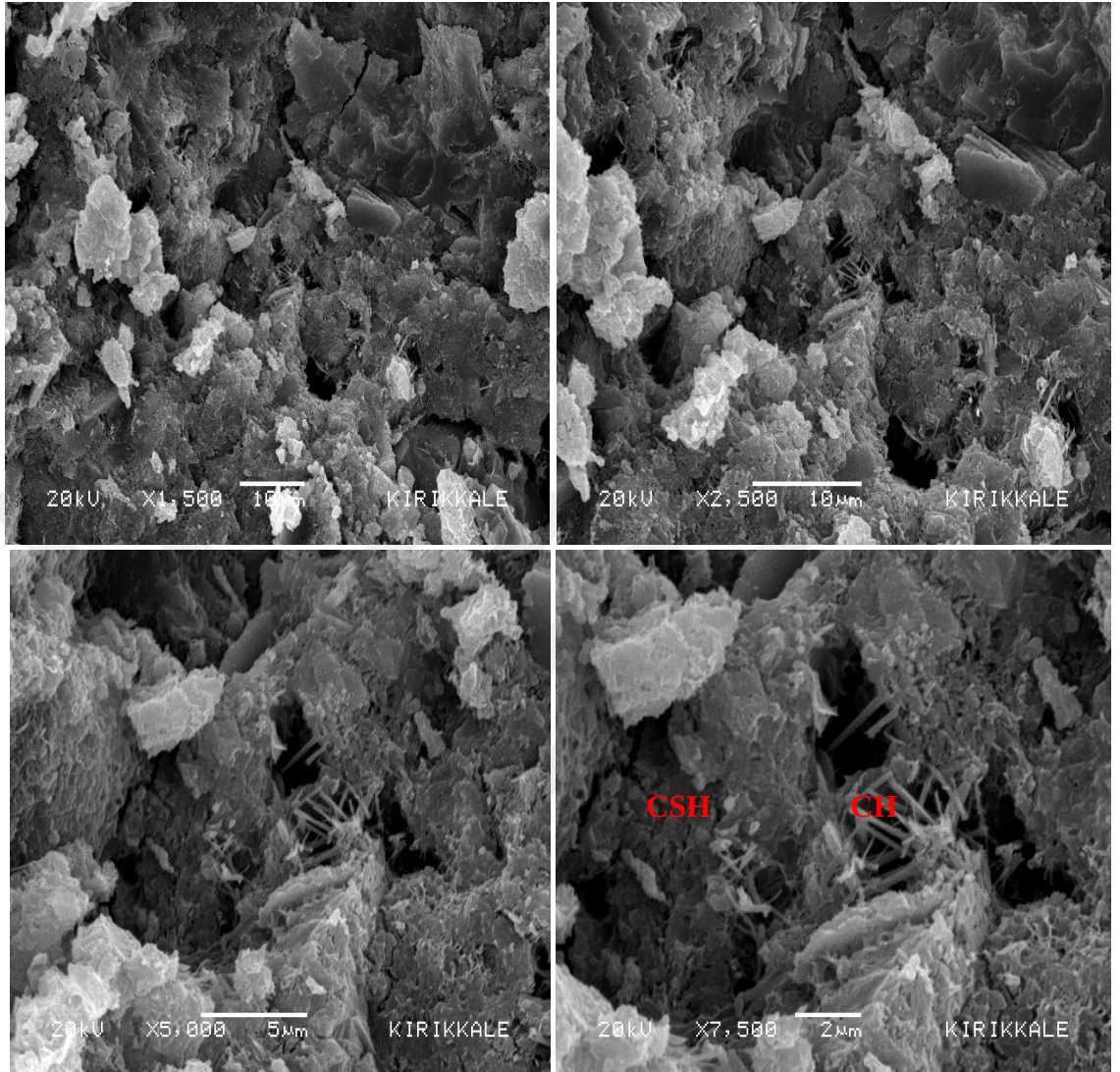
Şekil 4.27. UK20 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.27’de UK20 numunesinin SEM analizleri verilmiştir. SEM incelenmesinde yoğun şekilde C-S-H ve çubuklar halinde CH gözlenmiştir. Aynı oranda uçucu kül içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında plakalar halinde bulunan CH yapıları kaybolmuş ve boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H oranı ise artmıştır.



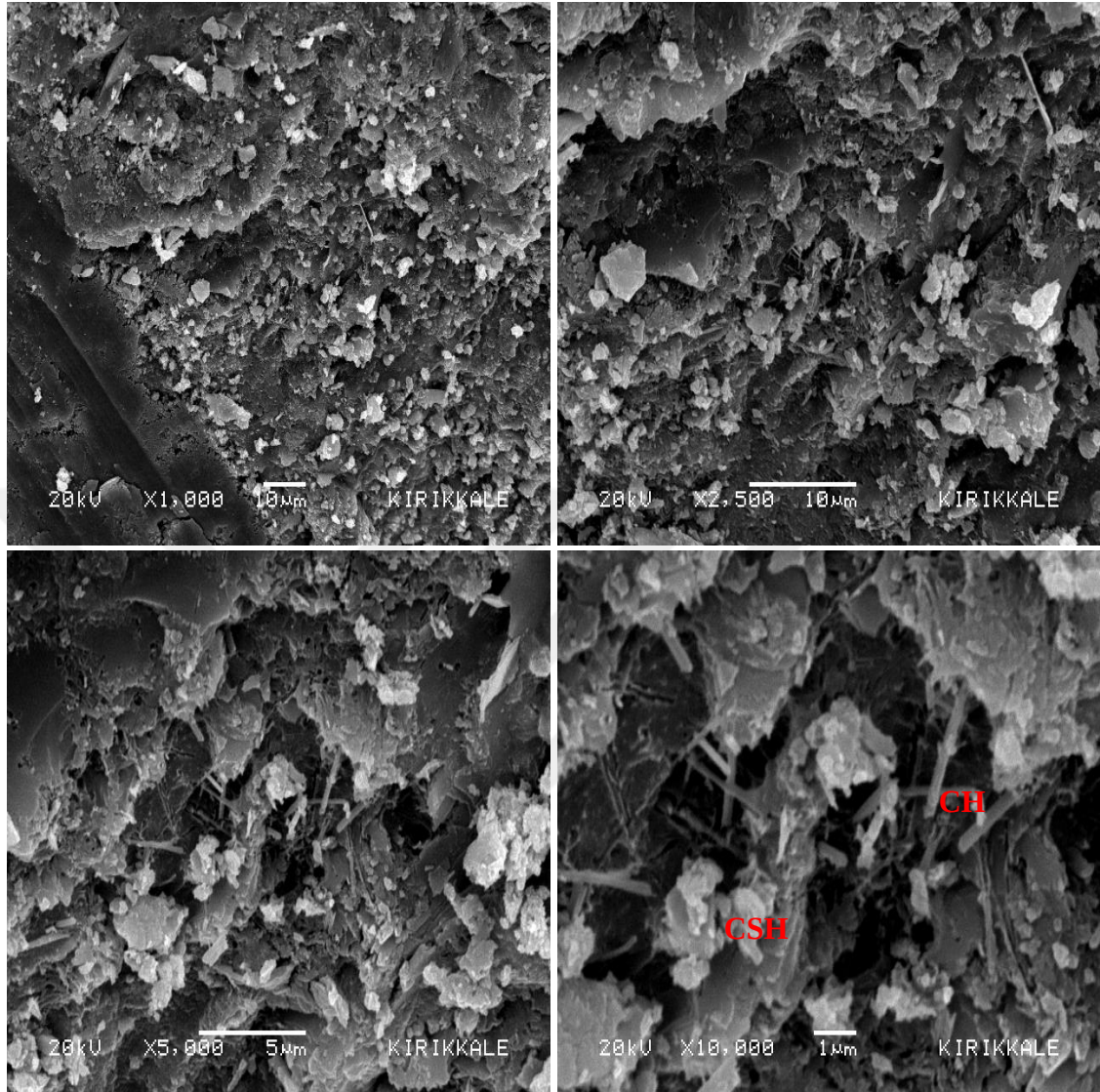
Şekil 4.28. SDUK5 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.28’de SDUK5 numunesinin SEM analizleri verilmiştir. SEM incelenmesinde yoğun şekilde C-S-H ve çubuklar ve plaklar halinde CH’lar gözlenmiştir. Ayrıca çok az miktarda etrenjit görülmüştür. Aynı oranda uçucu kül ve silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında kesitteki boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H oranı ise artmıştır.



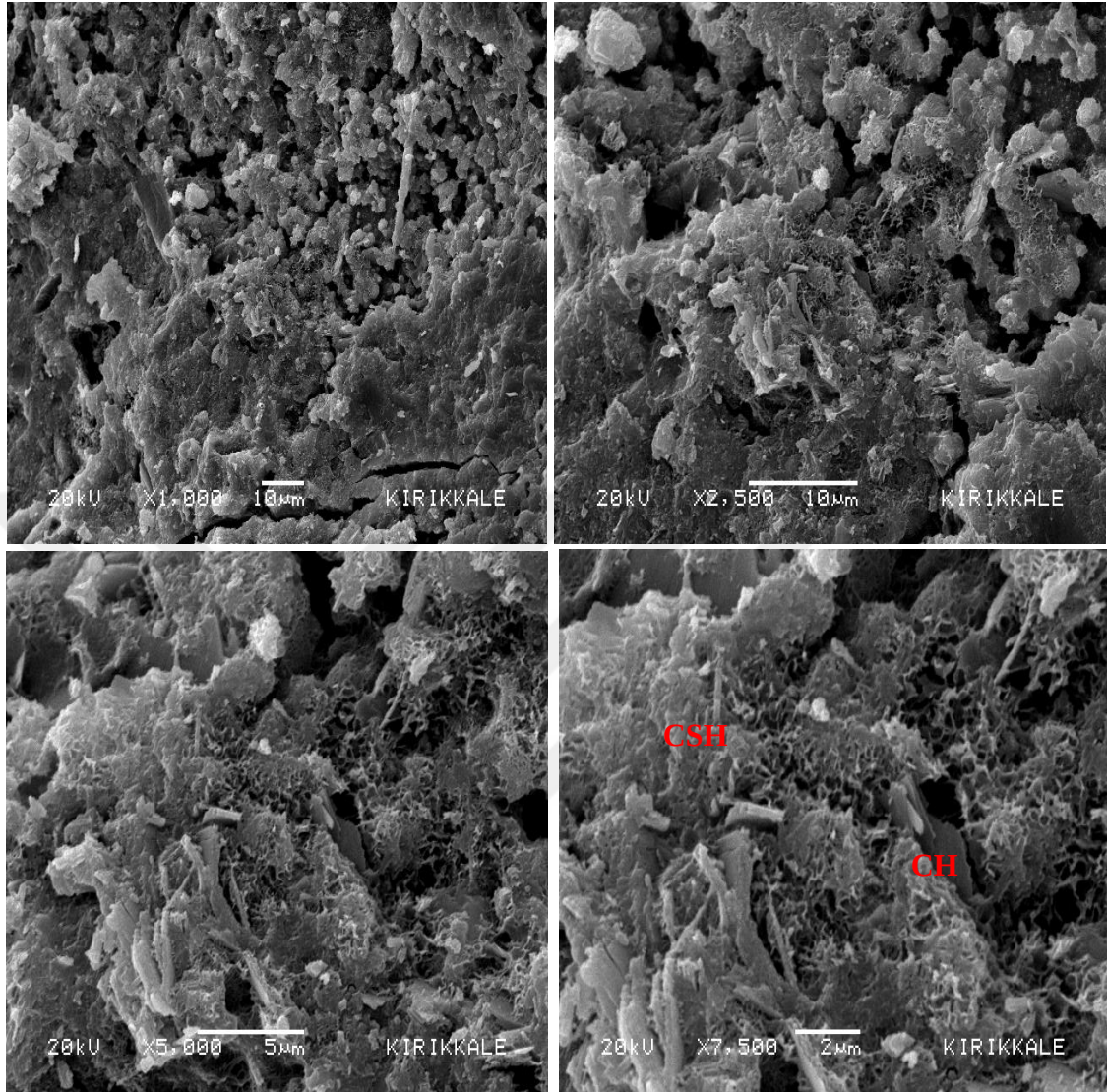
Şekil 4.29. SDUK10 karışımı 28 günlük SEM analizi

Şekil 4.29'da SDUK10 numunesinin SEM analizleri verilmiştir. SEM incelemesinde yoğun şekilde C-S-H ve plaklar halinde CH'lar gözlenmiştir. CH yapısının çevresinde bulunan geniş boşluklar büyük oranda azalmıştır. Aynı oranda uçucu kül ve silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında kesitteki boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H oranı ise artmıştır.



Şekil 4.30. SDUK15 karışımı 28 günlük SEM analizi

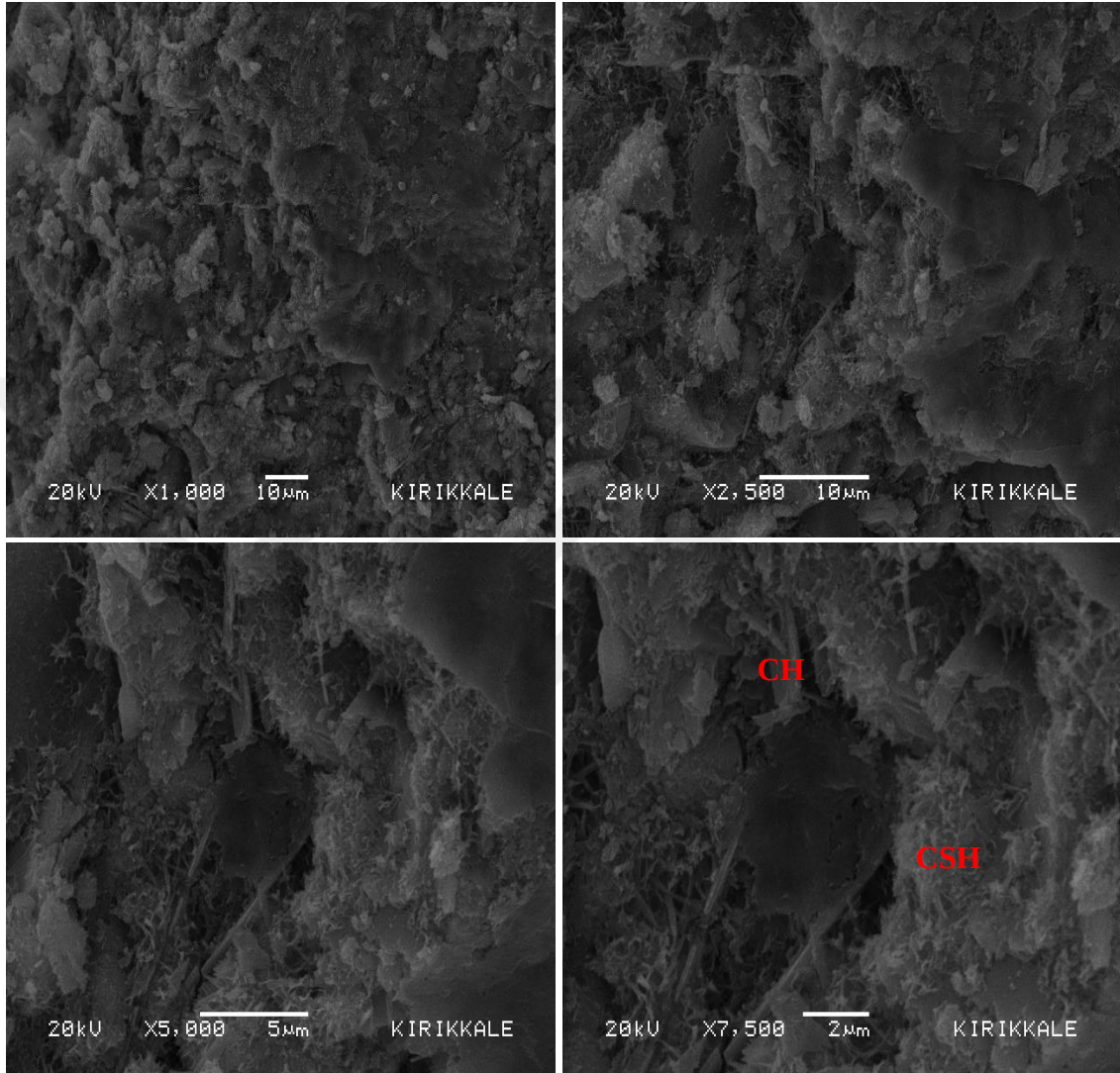
Şekil 4.30'da SDUK15 numunesinin SEM analizleri verilmiştir. SEM incelemesinde yoğun şekilde C-S-H ve plaklar halinde CH'lar gözlenmiştir. Plaklar halinde bulunan CH yapısı azalarak çubuklar haline dönüşmüş ve CH büyük oranda azalmıştır. Aynı oranda uçucu kül ve silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H oranı ise artmıştır.



Şekil 4.31. SDUK20 karışımı 28 günlük SEM analizi

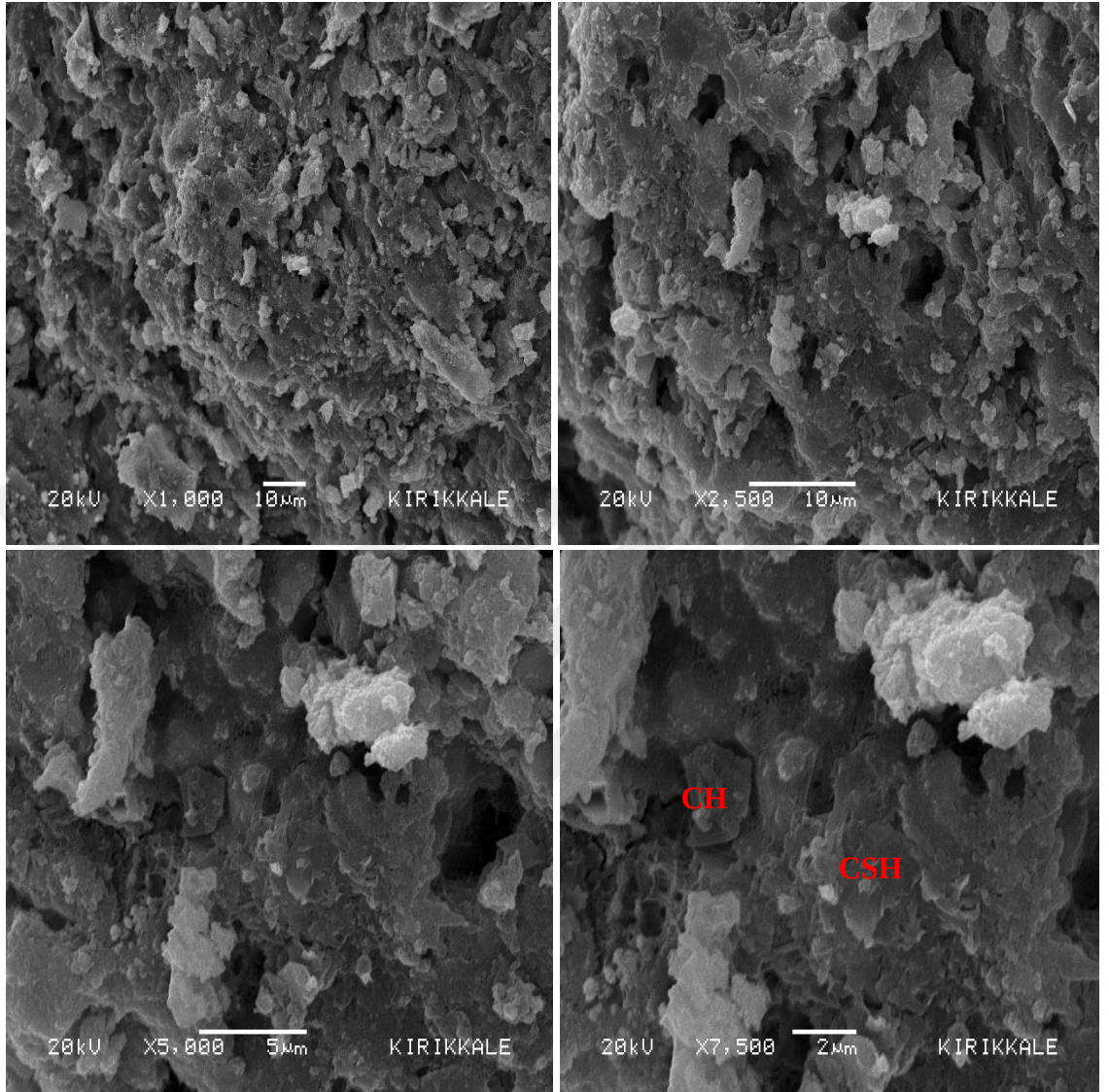
Şekil 4.31’de SDUK20 numunesinin SEM analizleri verilmiştir. SEM incelenmesinde kesite yayılmış C-S-H ve ince plaklar halinde CH’lar gözlenmiştir. Aynı oranda uçucu kül ve silis dumanı içeren numunenin 7 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H oranı ise artmıştır.

4.4.3. SEM 90 günlük analiz bulguları



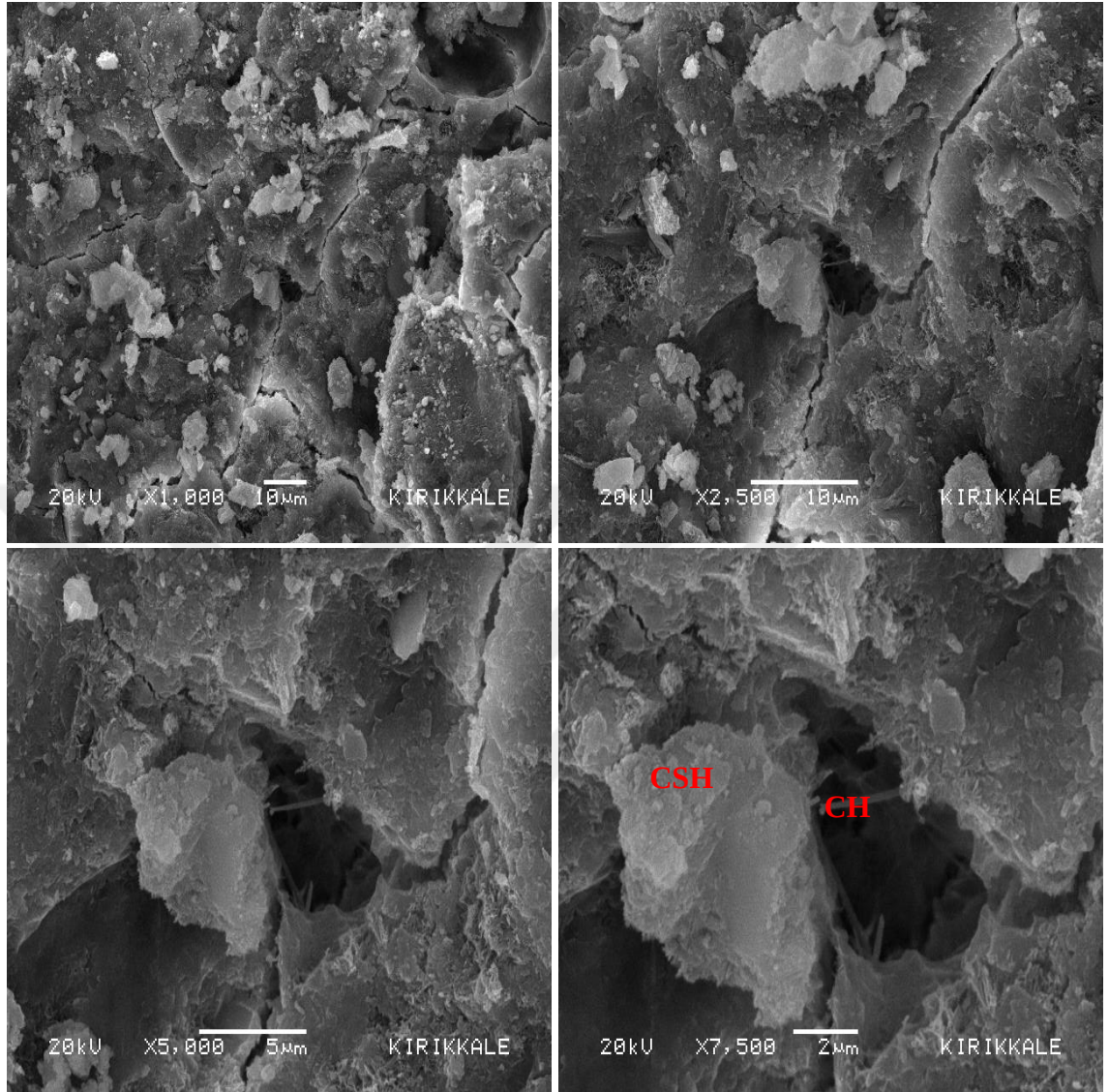
Şekil 4.32. KN karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.32’de KN numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. Kontrol numunesinin 90 günlük yaştaki SEM incelenmesinde C-S-H yapısının tüm yüzeyi doldurduğu görülmektedir. Çok az oranda CH yapıları gözlenmiştir. Kontrol numunesinin 7 ve 28 günlük yaştaki numunesi ile kıyaslandığında, boşluklar ve CH miktarı azalmış, C-S-H miktarı ise artmıştır.



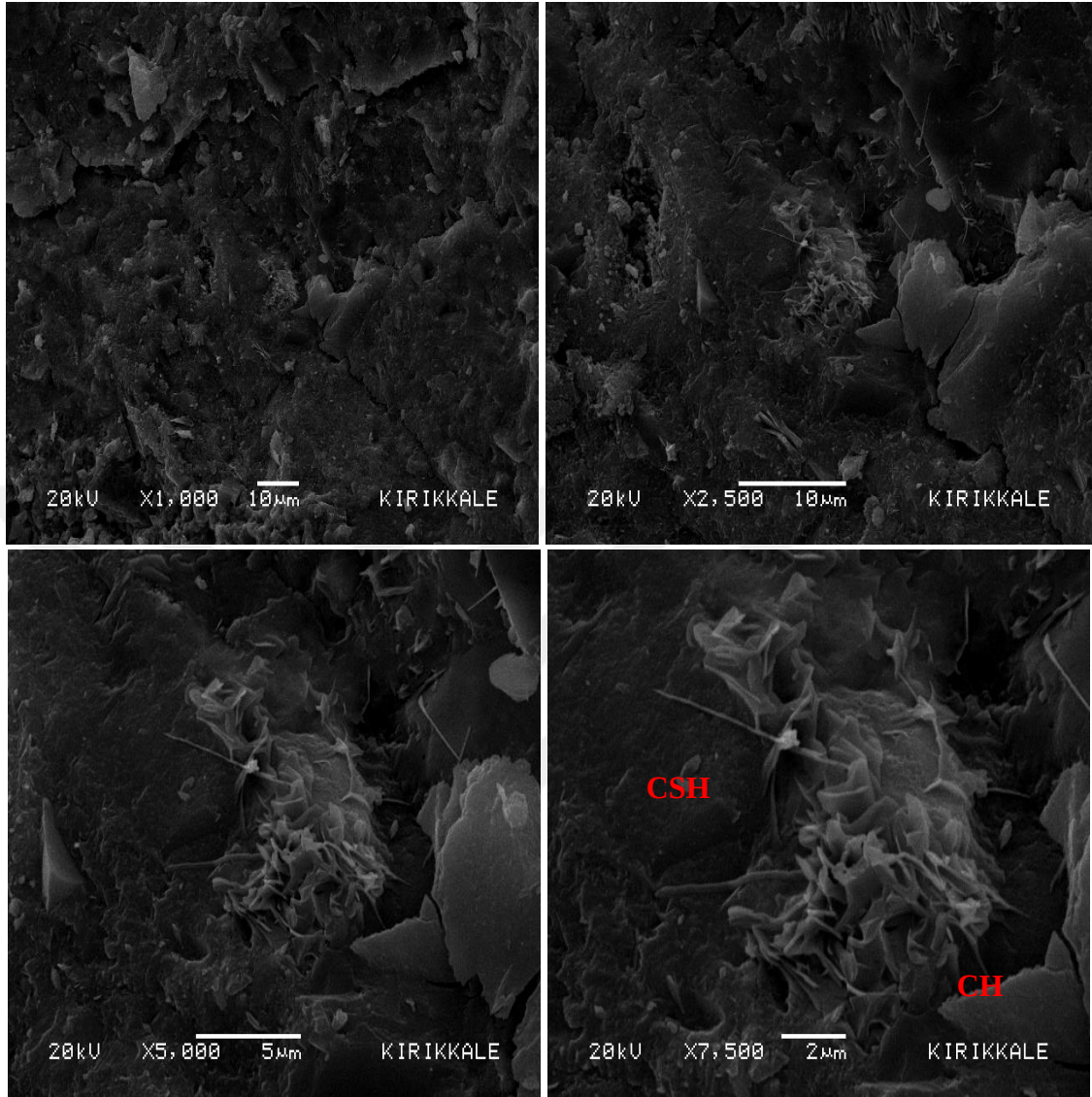
Şekil 4.33. SD5 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.33’de SD5 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelenmesinde C-S-H oluşumunun tamamlandığı boşlukların dolduğu ve çok az CH varlığı görülmektedir. Kontrol numunesine kıyasla C-S-H daha yoğun olarak kesite homojen yayılmıştır.



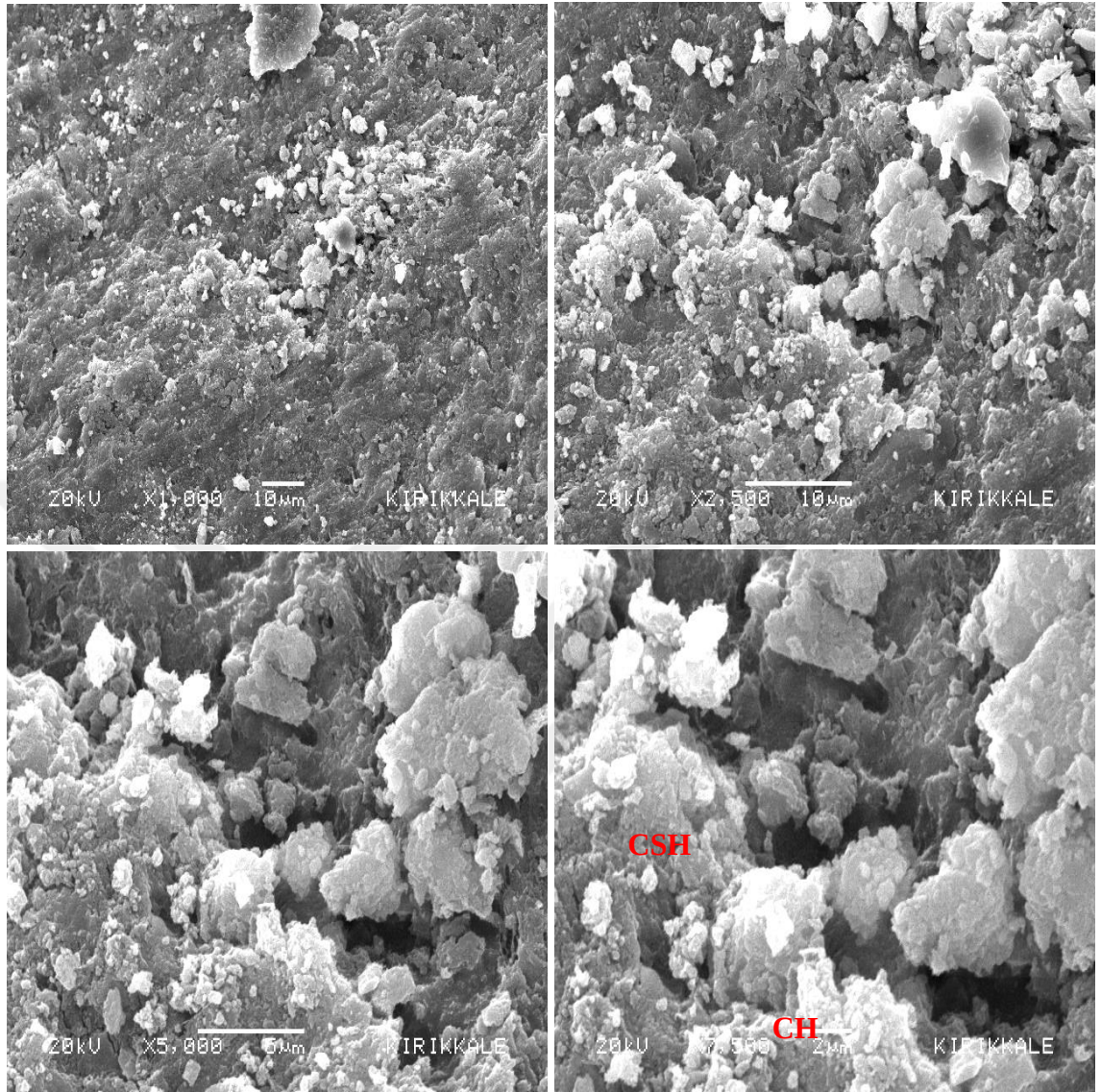
Şekil 4.34. SD10 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.34’de SD10 numunesinin SEM analizi verilmiştir. SEM incelenmesinde C-S-H oluşumunun giderek arttığı, CH oranının ise azaldığı görülmüştür. Kontrol numunesine kıyasla daha fazla C-S-H oluştuğu ve CH tüketiminin arttığı görülmüştür.



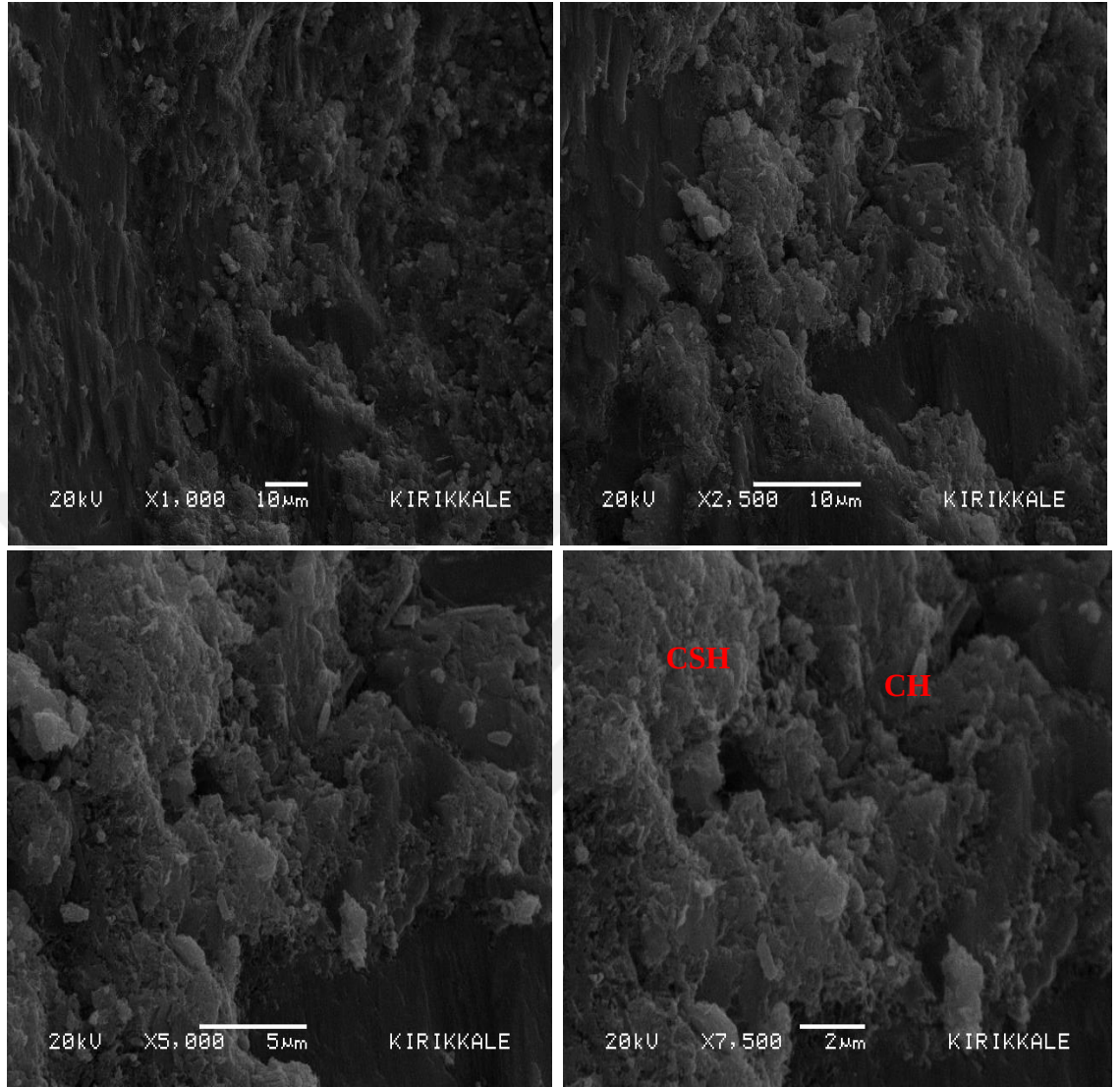
Şekil 4.35. SD15 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.35’de SD15 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. CH, C-S-H jelleri ve etrenjit yapısı görülmektedir. SD15 numunesi kontrol numunesi ile kıyaslandığında, fazlar arasındaki boşlukların daha fazla olduğu ve 90 günlük yaşta CH varlığı tespit edilmiştir.



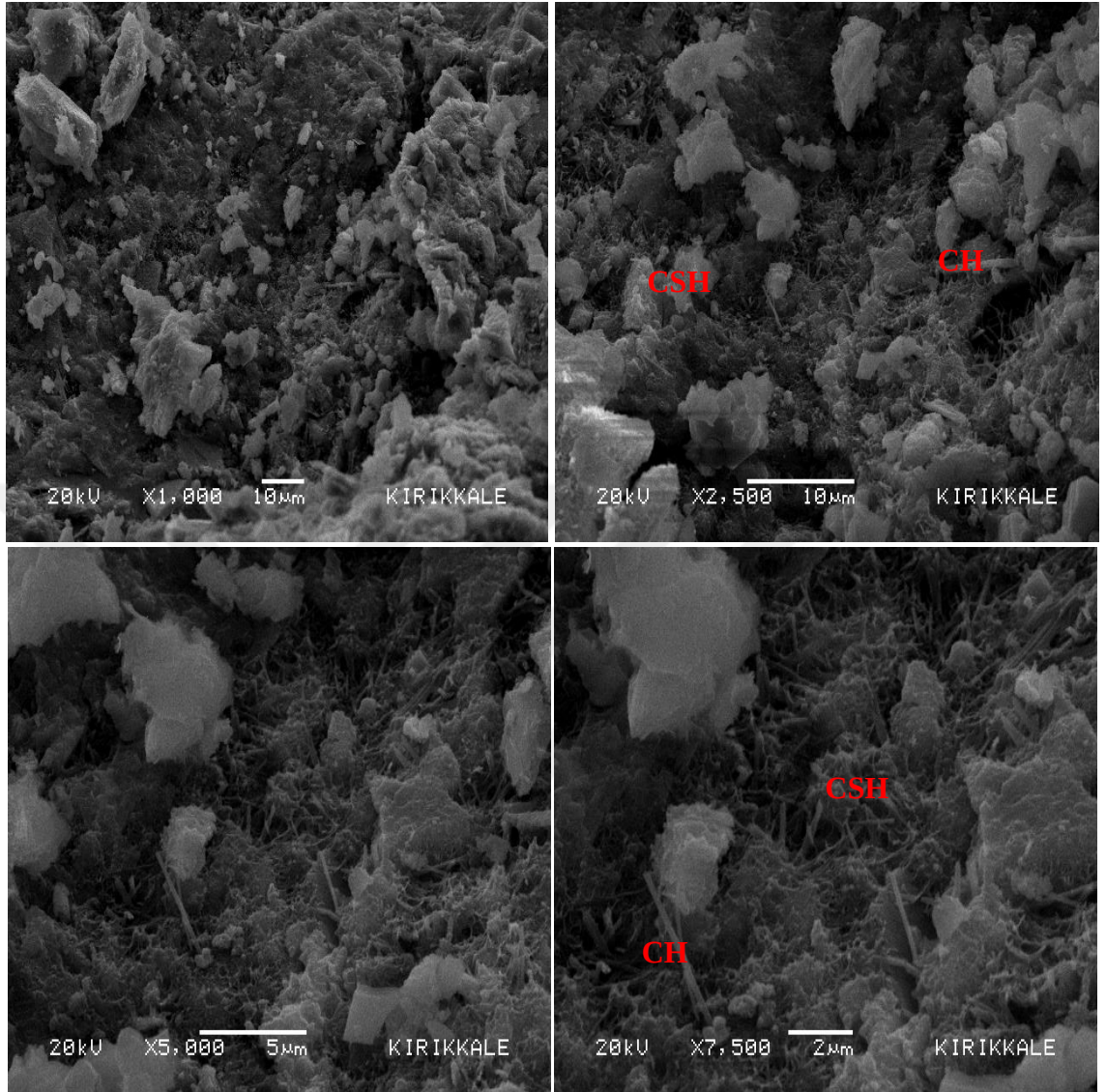
Şekil 4.36. SD20 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.36’da SD20 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelemesinde C-S-H oluşumunun tamamlandığı boşlukların dolduğu görülmekle birlikte CH varlığına raslanmamıştır. Kontrol numunesine kıyasla C-S-H daha yoğun olarak kesite homojen yayılmıştır.



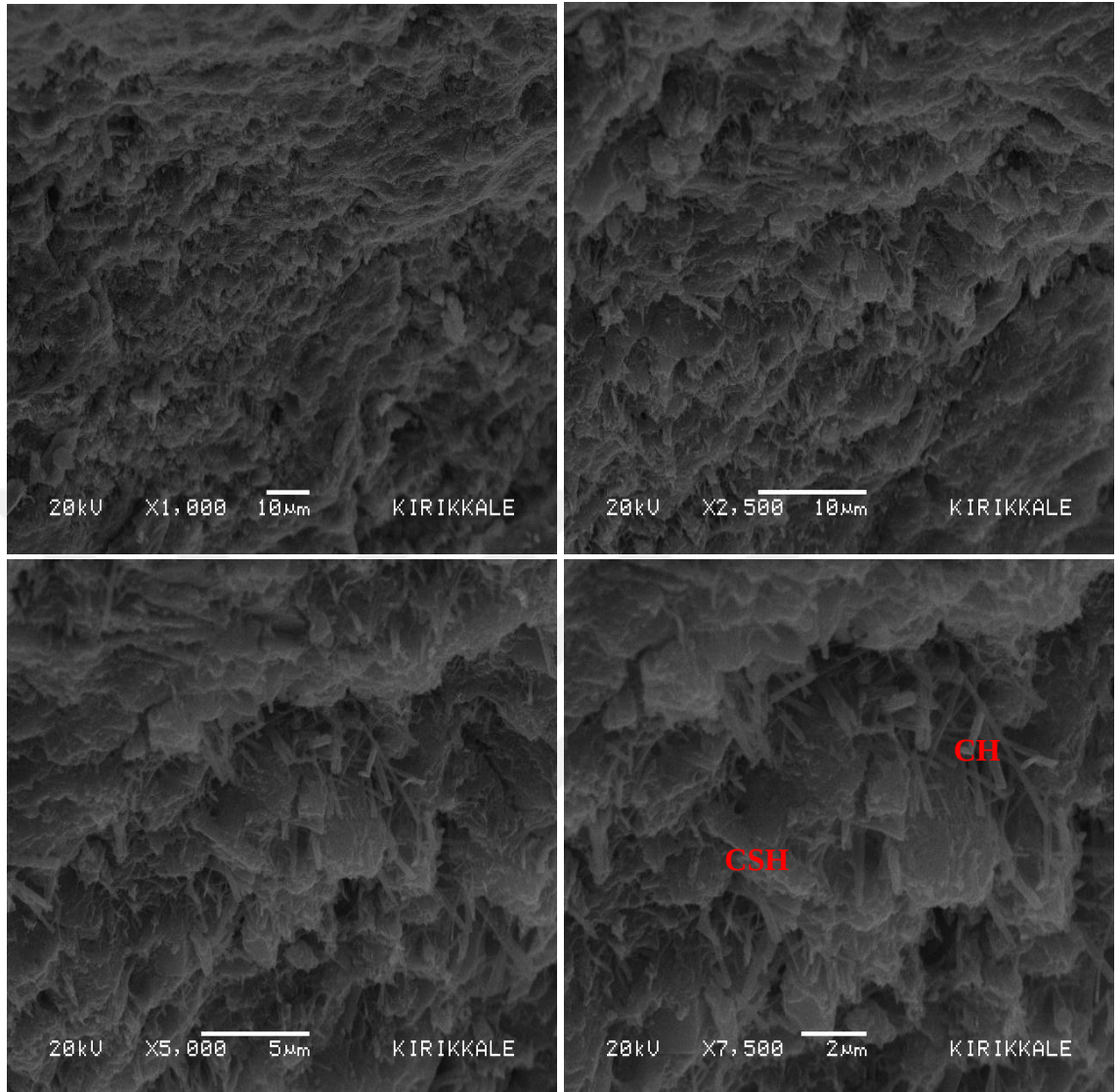
Şekil 4.37. UK5 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.37’de UK5 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelenmesinde aynı numunenin önceki yaşlarına göre C-S-H yoğunluğu artmıştır, CH miktarı ise azalmıştır.



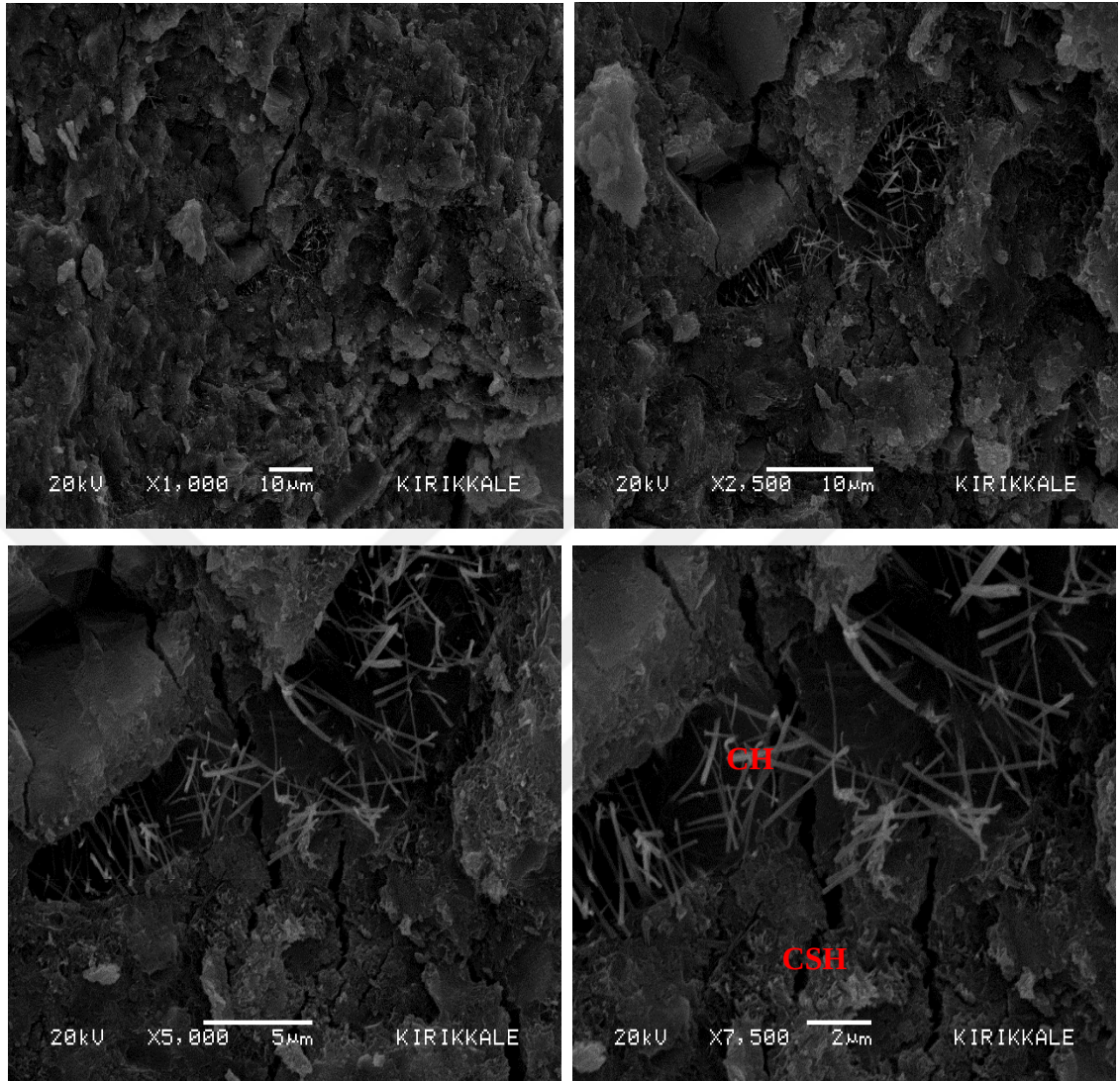
Şekil 4.38. UK10 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.38’de UK10 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelenmesinde aynı numunenin önceki yaşlarına göre C-S-H yoğunluğu artmıştır, CH miktarı ise azalmıştır. CH yapısı C-S-H içine gömülmüş plaklar şeklinde görülmektedir.



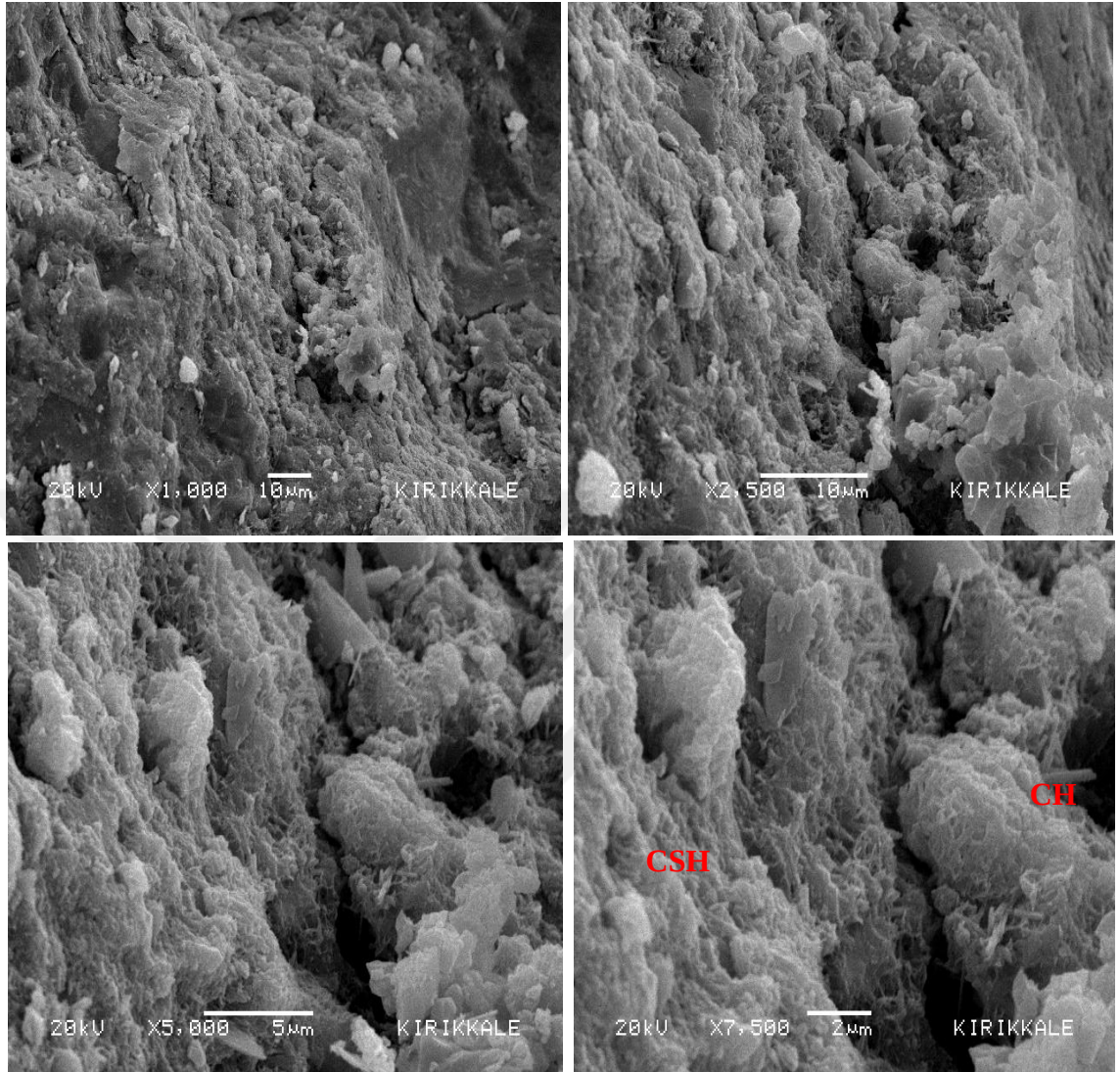
Şekil 4.39. UK15 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.39’da UK15 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelemesinde C-S-H yapısı yüzeyi doldurken yer yer hegzagonal CH yapısı görülmektedir.



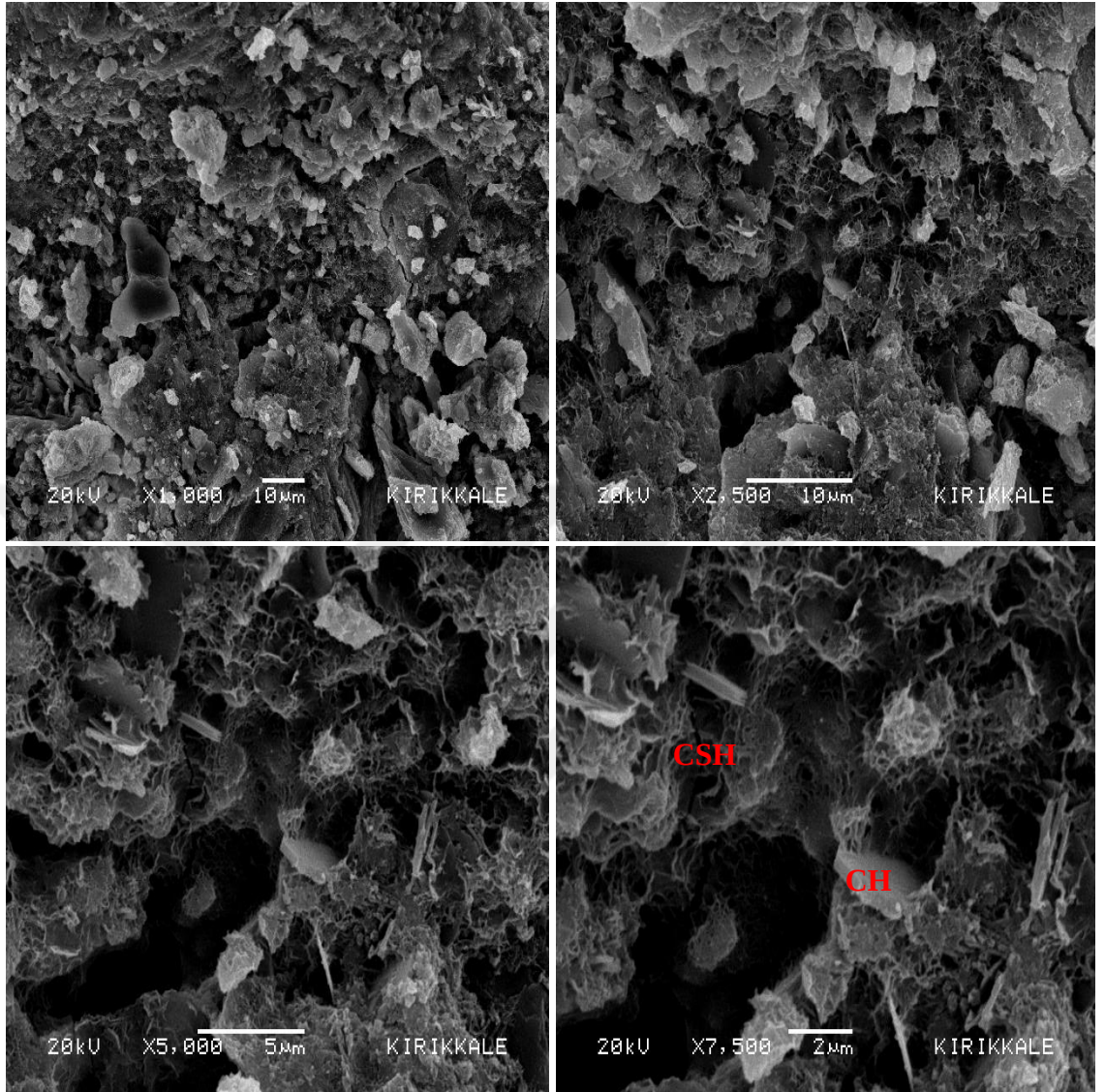
Şekil 4.40. UK20 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.40’da UK20 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelenmesinde C-S-H yapısı yüzeyi dolduruyen yer yer hegzagonal çubuklar halinde CH yapısı görülmektedir. CH yapısının belli bölgede toplanmış olması o bölgedeki hisratasyonun tam olarak gerçekleşmemesinin bir sonucudur.



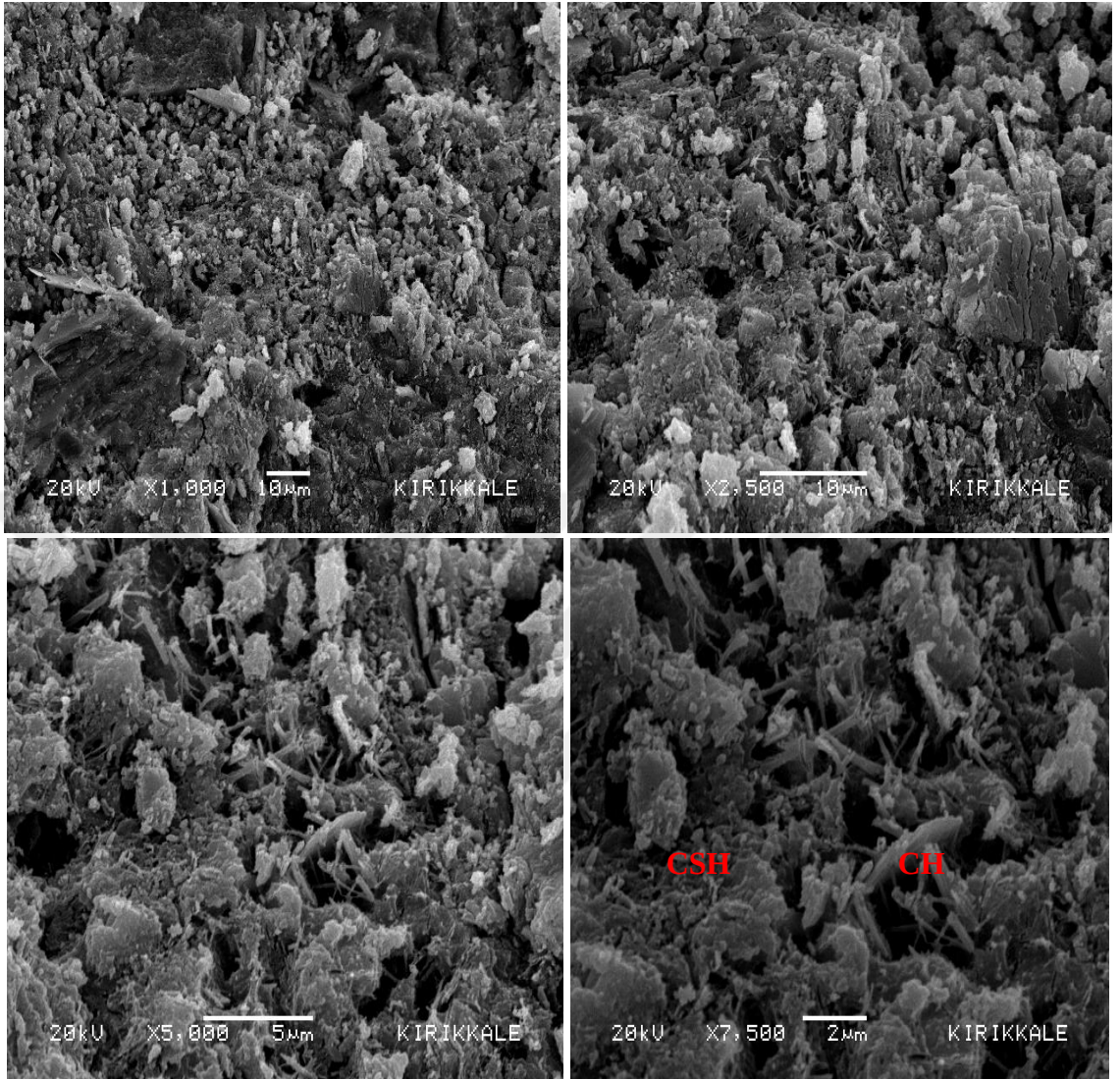
Şekil 4.41. SDUK5 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.41’de SDUK5 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelemesinde C-S-H yapısı yüzeyi doldurken yer yer hegzagonal çubuklar ve ince plaklar halinde CH yapısı görülmektedir.



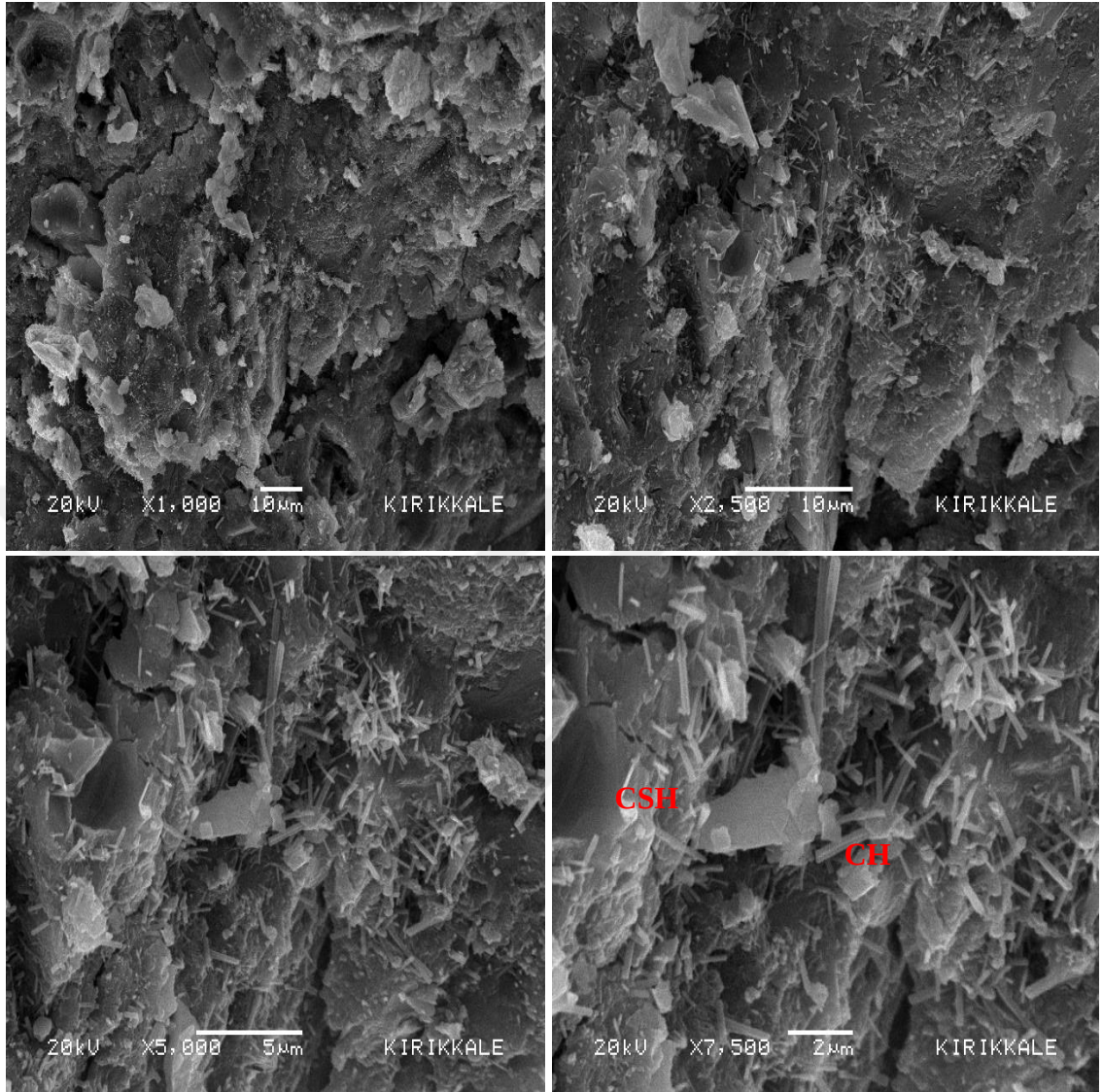
Şekil 4.42. SDUK10 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.42’de SDUK10 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelemesinde C-S-H yapısı yüzeyi doldurken yer yer hegzagonal çubuklar ve ince plaklar halinde CH yapısı görülmektedir. Ayrıca incelenen noktada yapılar arasında boşluklar dikkat çekmektedir.



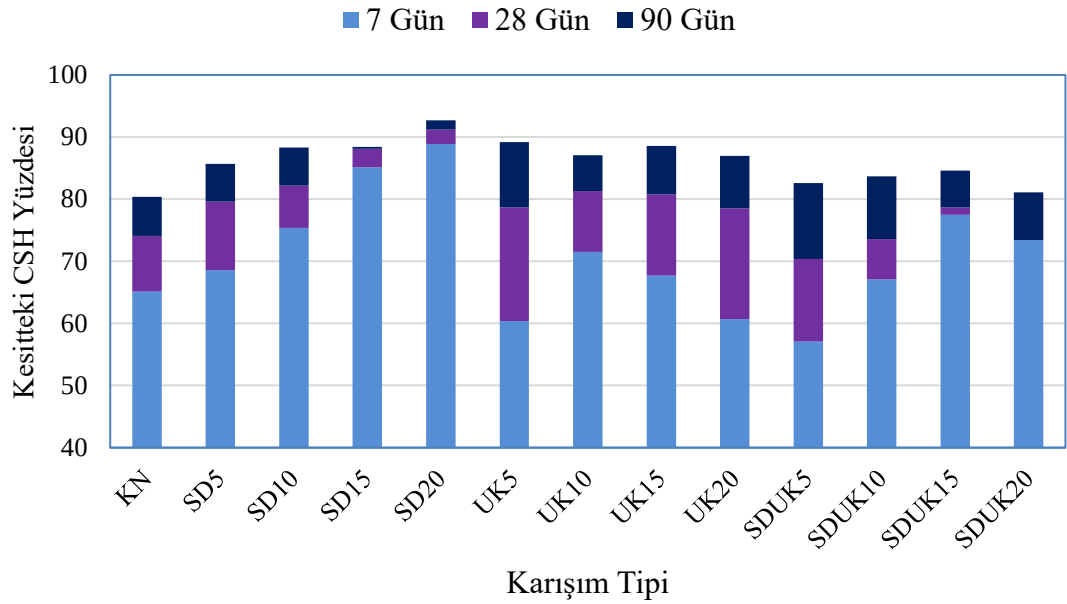
Şekil 4.43. SDUK15 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.43’de SDUK15 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelenmesinde C-S-H yapısı yüzeyi doldurken belli bir noktada toplanmış hegzagonal çubuklar ve ince plaklar halinde CH yapısı görülmektedir.



Şekil 4.44. SDUK20 karışımı 90 günlük SEM analizi

Şekil 4.44’de SDUK20 numunesinin SEM görüntüleri verilmiştir. 90 günlük yaştaki SEM incelemesinde C-S-H yapısı yüzeyi doldurken belli bir noktada toplanmış hegzagonal çubuklar ve ince plaklar halinde CH yapısı görülmektedir.



Şekil 4.45. Mineral katkıların C-S-H miktarına etkisi (SEM)

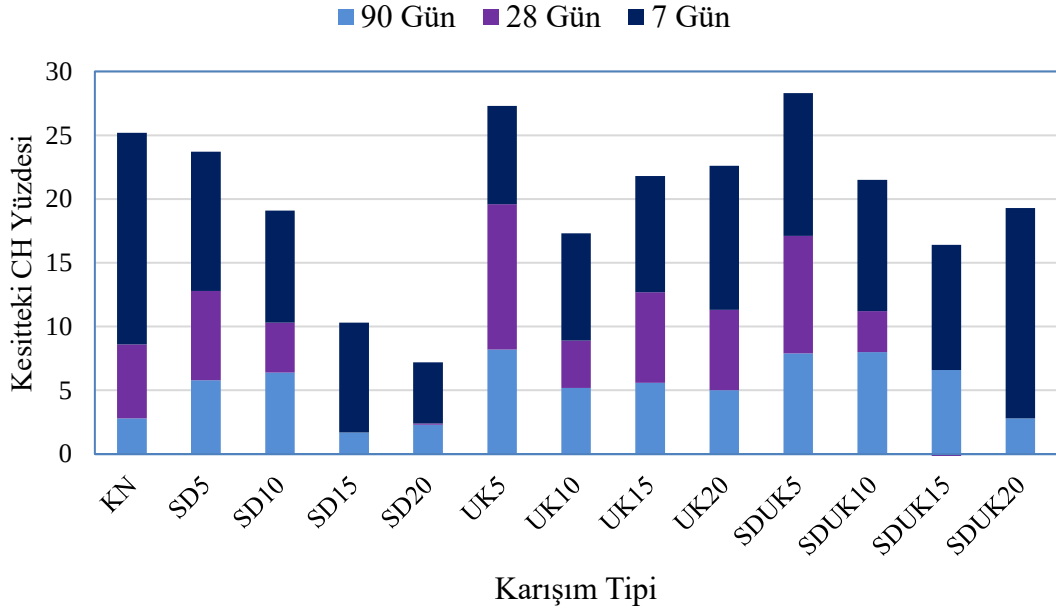
Şekil 4.6 – Şekil 4.18’de verilmiş olan 7 günlük SEM analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan C-S-H miktarının kontrol numunesine kıyasla arttığı ve kullanılan SD miktarı ile oluşan C-S-H arasında doğrusal bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir. %5 SD kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %5,4 artış, %10 SD kullanıldığında %15,8 artış, %15 SD kullanıldığında %30,7 ve %20 SD kullanıldığında %36,5 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Çimento yerine kullanılan UK miktarı ile oluşan C-S-H oranı arasında 7 günlük yaşta doğrusal bir ilişki olmadığı görülmüştür. %5 UK kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %7,2 ve %20 UK kullanıldığında ise %6,7 azalma olurken, %10 UK kullanıldığında oluşan C-S-H’da %9,8 ve %15 UK kullanıldığında ise %3,99 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Kullanılan UK oranı çok az olduğunda ve çok fazla olduğunda 7 günlük yaşta oluşan C-S-H miktarının azaldığı görülmüştür ve bu durum basınç dayanım değerleri ile örtüşmektedir. Çimento yerine SD ve UK’lün birlikte %5 kullanılması C-S-H oranında %12,2 azalma olurken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan C-S-H oranında %3, %15 kullanıldığında %19 ve %20 kullanıldığında ise %12,7 oranında bir artış meydana gelmiştir.

Şekil 4.19 – Şekil 4.31’de verilmiş olan 28 günlük SEM analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan C-S-H miktarının arttığı ve kullanılan SD miktarı ile oluşan C-S-H arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. %5 SD kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %7,2 artış, %10 SD kullanıldığında %10,9 artış, %15 SD kullanıldığında %18,8 ve %20 SD kullanıldığında %23 oranında bir artış olduğu görülmüştür. %5 UK kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %6,2 artış, %10 SD kullanıldığında %9,7 artış, %15 SD kullanıldığında %9 ve %20 SD kullanıldığında %5,9 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Çimento yerine SD ve UK’nün birlikte %5 kullanılması C-S-H’da %0,4 artış, %10 oranında SD+UK kullanıldığında %2, %15 SD+UK kullanıldığında %6,2 ve %20 SD+UK kullanıldığında ise %1 oranında bir artış meydana gelmiştir. UK içeren numunler 7 günlük yaşa göre iyi sonuç vermiş, bu da basınç dayanımından elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir.

Şekil 4.32 – Şekil 4.44’de verilmiş olan 90 günlük SEM analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan C-S-H miktarının arttığı ve kullanılan SD miktarı ile oluşan C-S-H arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. %5 SD kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %6,5 artış, %10 SD kullanıldığında %9,8 artış, %15 SD kullanıldığında %9,9 ve %20 SD kullanıldığında %15,3 oranında bir artış olduğu görülmüştür. %5 UK kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %10,9 artış, %10 SD kullanıldığında %8,3 artış, %15 SD kullanıldığında %10,2 ve %20 SD kullanıldığında %8,2 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Çimento yerine SD ve UK’nün birlikte %5 kullanılması C-S-H’da %2,8 artış, %10 oranında SD+UK kullanıldığında %4,1, %15 SD+UK kullanıldığında %5,2 ve %20 SD+UK kullanıldığında ise %1,5 oranında bir artış meydana gelmiştir.

SD katkılı numuneler UK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %16 daha fazla C-S-H, 28 günlük yaşta %8 ve 90 günlük yaşta ise %1 oranında daha fazla C-S-H meydana gelmiştir. SD katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %11 daha fazla C-S-H, 28 günlük yaşta %13 ve 90 günlük yaşta ise %6 oranında daha fazla C-S-H oluşmuştur. UK katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere

kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %5 daha az C-S-H oluşurken, 28 günlük yaşta %5 ve 90 günlük yaşta ise %6 oranında daha fazla C-S-H meydana gelmiştir.



Şekil 4.46. Mineral katkıların CH miktarına etkisi (SEM)

Şekil 4.6 – Şekil 4.18’de verilmiş olan 7 günlük SEM analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan CH miktarının kontrol numunesine kıyasla azaldığı ve kullanılan SD miktarı ile oluşan CH arasında ters orantılı bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir. %5 SD kullanımına karşılık oluşan CH’da %5,9 azalma, %10 SD kullanıldığında %24,2 artış, %15 SD kullanıldığında %59,1 ve %20 SD kullanıldığında %71,4 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine kullanılan UK miktarı ile oluşan CH oranı arasında 7 günlük yaşta doğrusal bir ilişki olmadığı görülmüştür. %5 UK kullanımına karşılık oluşan CH’da %8,3 artış meydana gelirken, %10 UK kullanıldığında ise %31,3 azalma, %15 UK kullanıldığında oluşan CH’da %13,4 ve %20 UK kullanıldığında ise %10,3 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Kullanılan UK oranı çok az olduğunda 7 günlük yaşta oluşan CH miktarının arttığı görülmüştür ve bu durum basınç dayanım değerleri ile örtüşmektedir. Çimento yerine SD ve UK’ün birlikte %5 kullanılması CH oranında %12,3 artış olurken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan CH oranında %14,6,

%15 kullanıldığında %40 ve %20 kullanıldığında ise %23,4 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.19 – Şekil 4.31’de verilmiş olan 28 günlük SEM analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan CH miktarının azaldığı ve kullanılan SD miktarı ile oluşan CH arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. %5 SD kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %13,9 azalma, %10 SD kullanıldığında %21,6 artış, %15 SD kullanıldığında %46,9 ve %20 SD kullanıldığında %63,4 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine %5 UK kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %18 azalma meydana gelirken, %10 UK kullanıldığında ise %29,9 azalma, %15 UK kullanıldığında oluşan CH’da %24,2 ve %20 UK kullanıldığında ise %15,9 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine SD ve UK’lün birlikte %5 kullanılması CH oranında %1,5 azalma olurken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan CH oranında %5,6, %15 kullanıldığında %15,4 ve %20 kullanıldığında ise %0,5 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

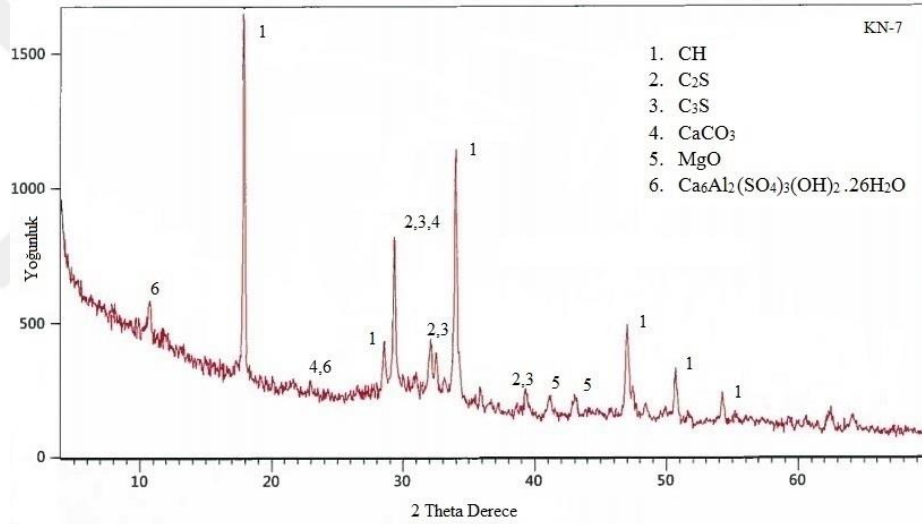
Şekil 4.32 – Şekil 4.44’de verilmiş olan 90 günlük SEM analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan CH miktarının azaldığı ve kullanılan SD miktarı ile oluşan CH arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. %5 SD kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %34,3 azalma, %10 SD kullanıldığında %46,9, %15 SD kullanıldığında %48,1 ve %20 SD kullanıldığında %71 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine %5 UK kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %53,6 azalma meydana gelirken, %10 UK kullanıldığında ise %49,4 azalma, %15 UK kullanıldığında oluşan CH’da %45,1 ve %20 UK kullanıldığında ise %31,9 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine SD ve UK’lün birlikte %5 kullanılması CH oranında %32,5 azalma olurken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan CH oranında %37,9, %15 kullanıldığında %40,9 ve %20 kullanıldığında ise %12,6 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

SD katkılı numuneler UK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %29 daha az CH, 28 günlük yaşta %14 ve 90 günlük yaşta ise %5 oranında daha az CH meydana

gelmiştir. SD katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %24 daha az CH, 28 günlük yaşta %25 ve 90 günlük yaşta ise %19 oranında daha az CH oluşmuştur. UK katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %5 daha fazla CH oluşurken, 28 günlük yaşta %17 ve 90 günlük yaşta ise %14 oranında daha az CH meydana gelmiştir.

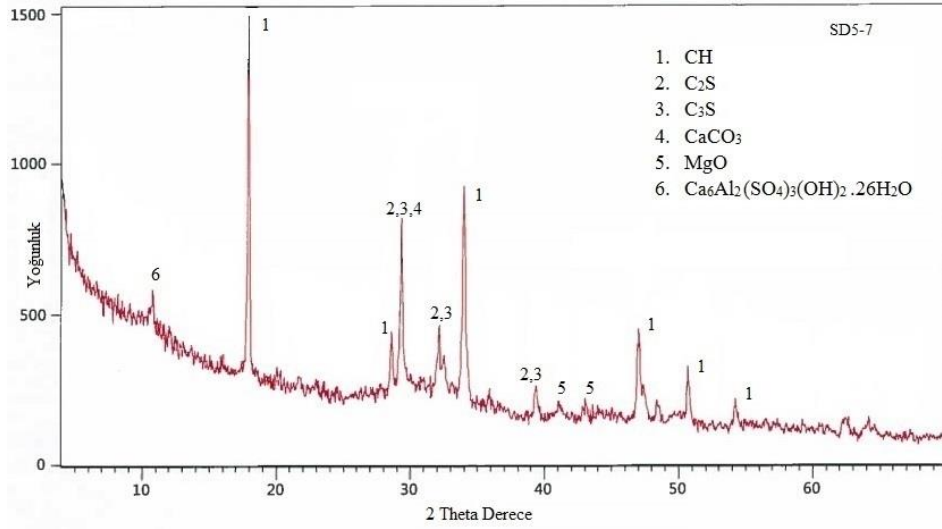
4.5. XRD analiz bulguları

4.5.1. XRD 7 günlük analiz bulguları



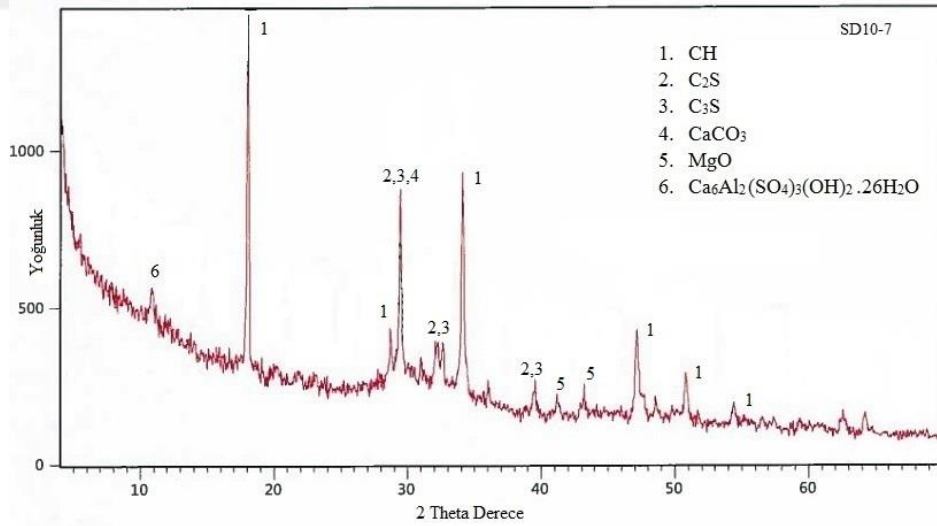
Şekil 4.47. KN karışımı 7 günlük XRD analizi

KN 7 günlük XRD analizinde, CH'in kontrol numunesinde hakim yapı görülmüştür. Analizde etrenjit, CSH'ı oluşturan bileşenlerin varlığında dikkat çekmektedir.



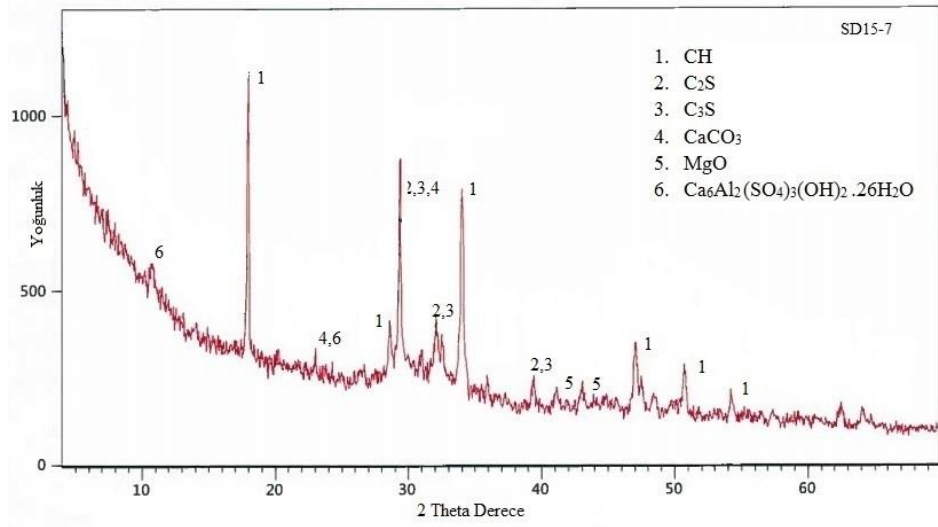
Şekil 4.48. SD5 karışımı 7 günlük XRD analizi

SD5 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %9,7 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %1,1 artış olduğu görülmüştür.



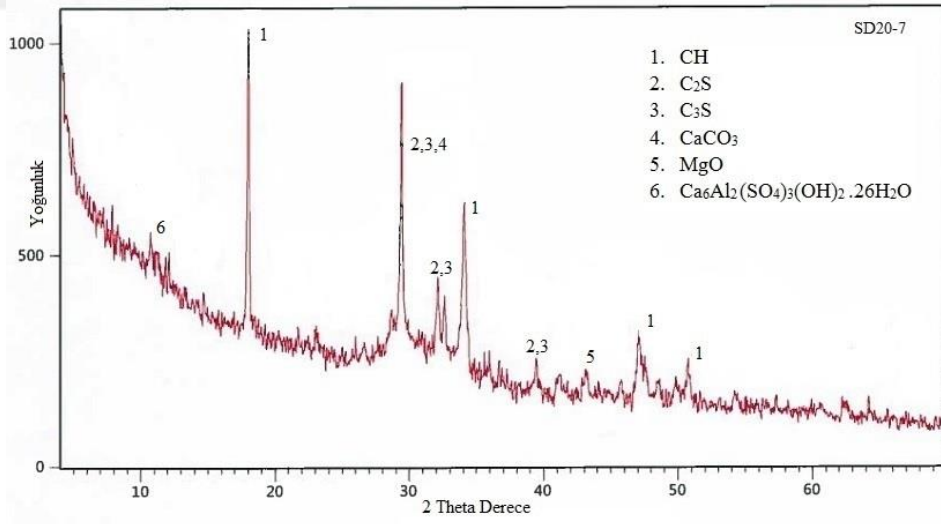
Şekil 4.49. SD10 karışımı 7 günlük XRD analizi

SD10 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %13 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %7,8 artış olduğu görülmüştür.



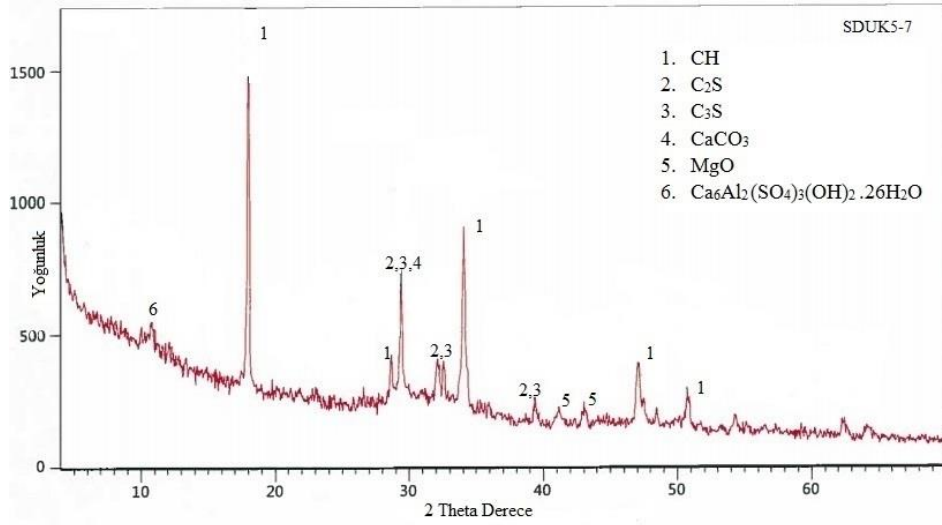
Şekil 4.50. SD15 karışımı 7 günlük XRD analizi

SD15 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %31,6 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %9,4 artış olduğu görülmüştür.



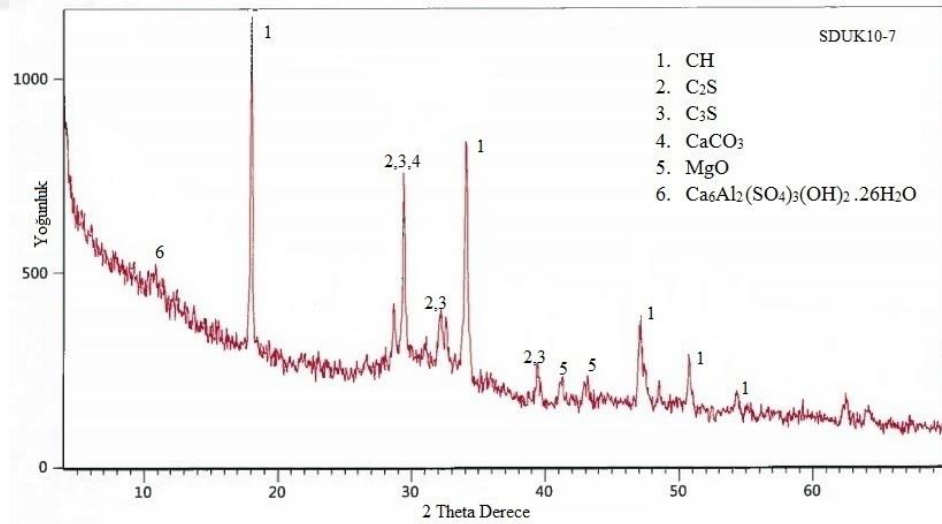
Şekil 4.51. SD20 karışımı 7 günlük XRD analizi

SD20 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %37,1 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %12 artış olduğu görülmüştür.



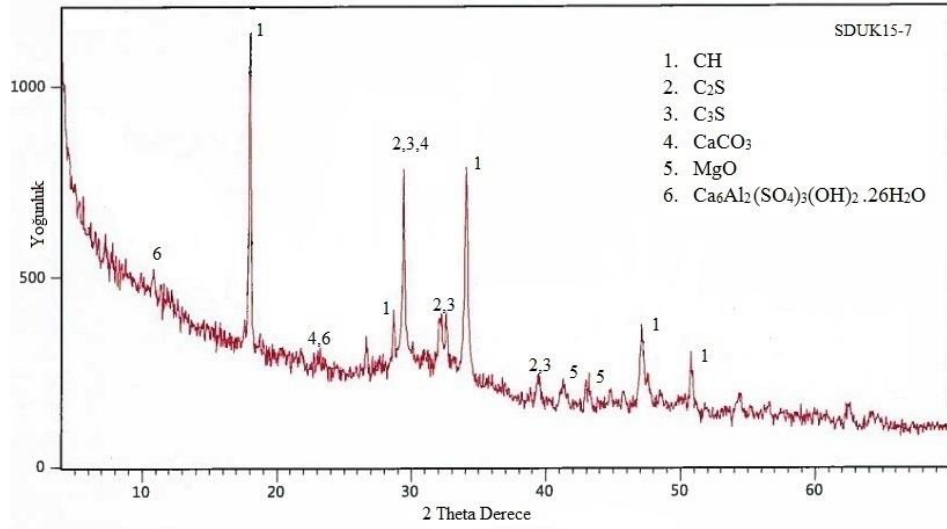
Şekil 4.52. SDUK5 karışımı 7 günlük XRD analizi

SDUK5 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %11,2 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %8,7 azalma olduğu görülmüştür.



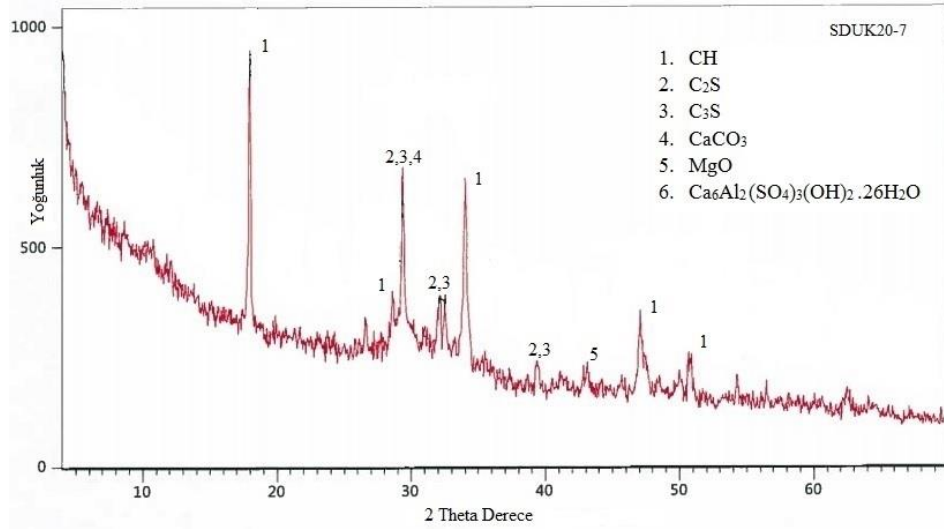
Şekil 4.53. SDUK10 karışımı 7 günlük XRD analizi

SDUK10 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %29,8 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %7,2 azalma olduğu görülmüştür.



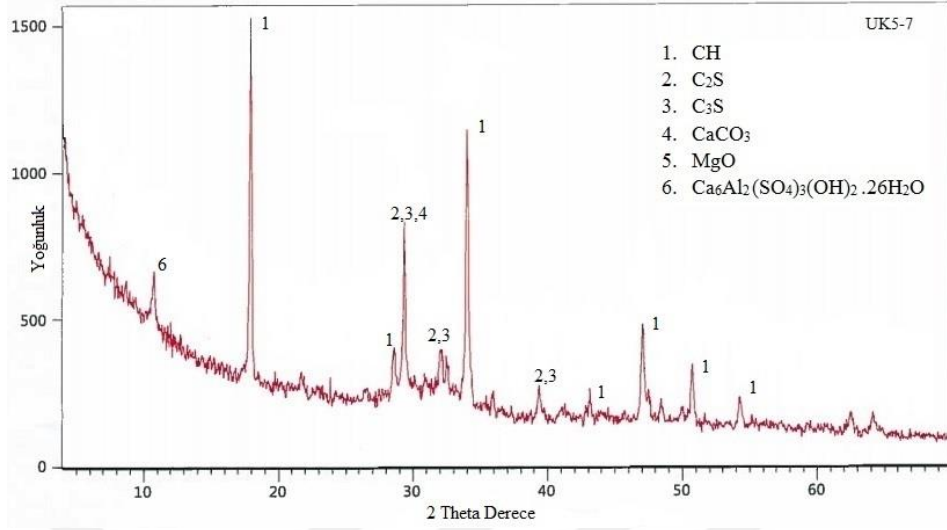
Şekil 4.54. SDUK15 karışımı 7 günlük XRD analizi

SDUK15 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %30,8 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %3,1 azalma olduğu görülmüştür.



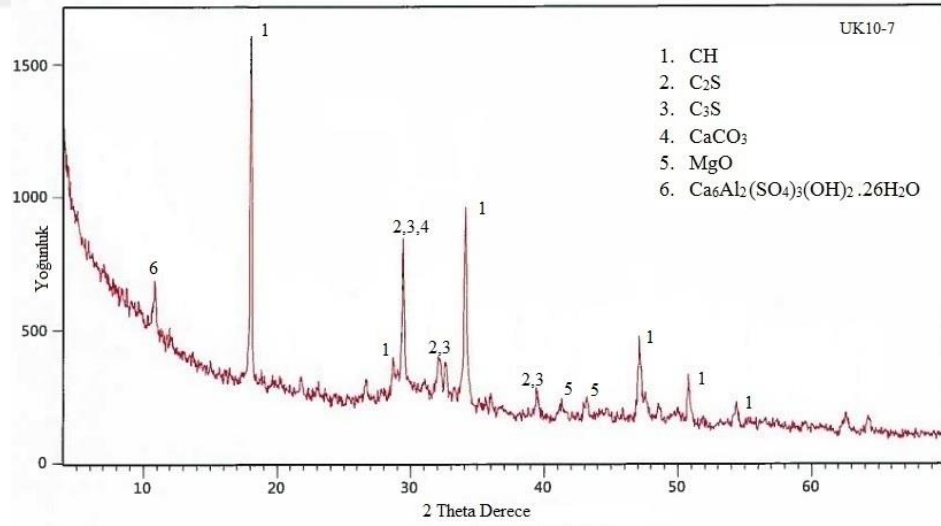
Şekil 4.55. SDUK20 karışımı 7 günlük XRD analizi

SDUK20 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %42,2 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %1,2 azalma olduğu görülmüştür.



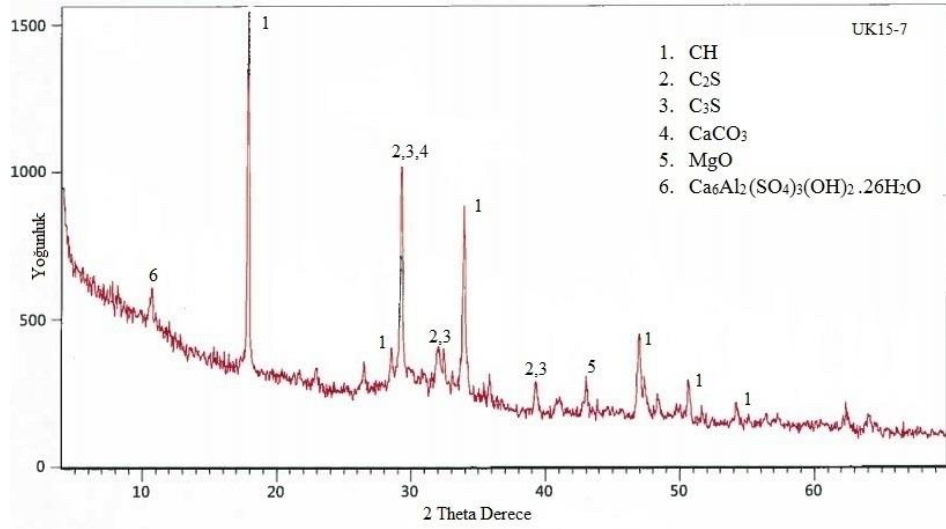
Şekil 4.56. UK5 karışımı 7 günlük XRD analizi

UK5 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %7,9 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %1,8 artış olduğu görülmüştür.



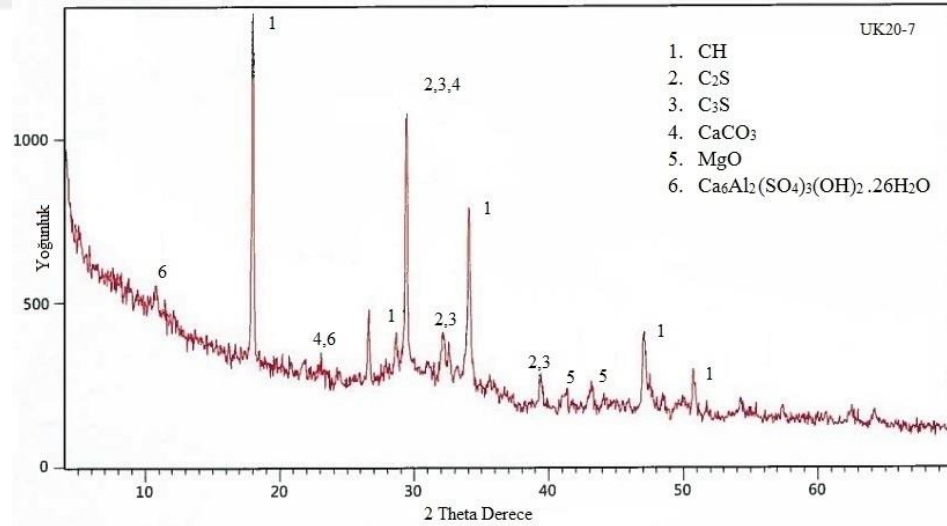
Şekil 4.57. UK10 karışımı 7 günlük XRD analizi

UK10 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %3,7 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %3,8 artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.58. UK15 karışımı 7 günlük XRD analizi

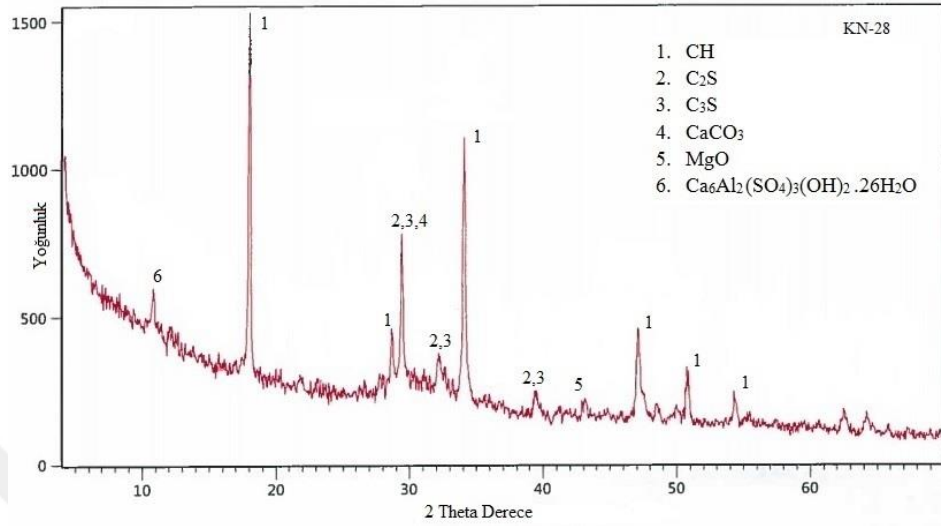
UK15 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %6,7 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %3 artış olduğu görülmüştür.



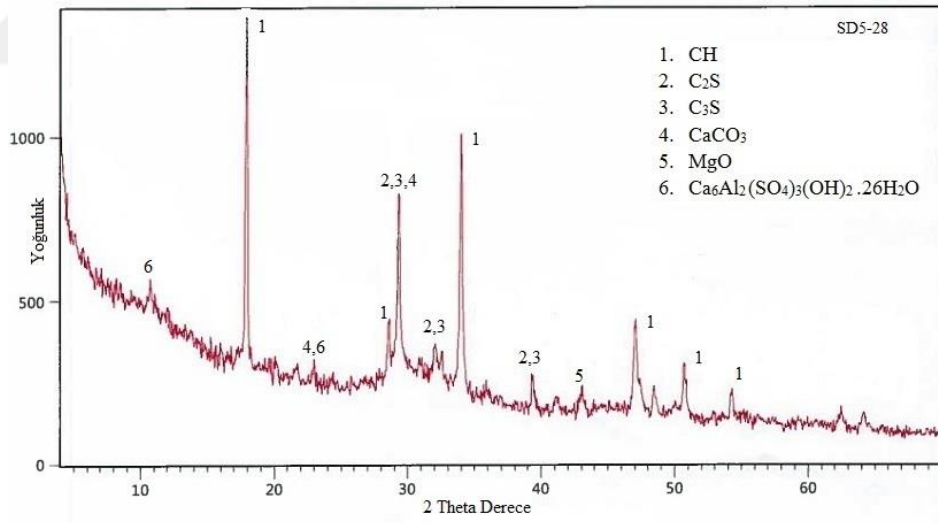
Şekil 4.59. UK20 karışımı 7 günlük XRD analizi

UK20 7 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %16,2 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %1,8 artış olduğu görülmüştür.

4.5.2. XRD 28 günlük analiz bulguları

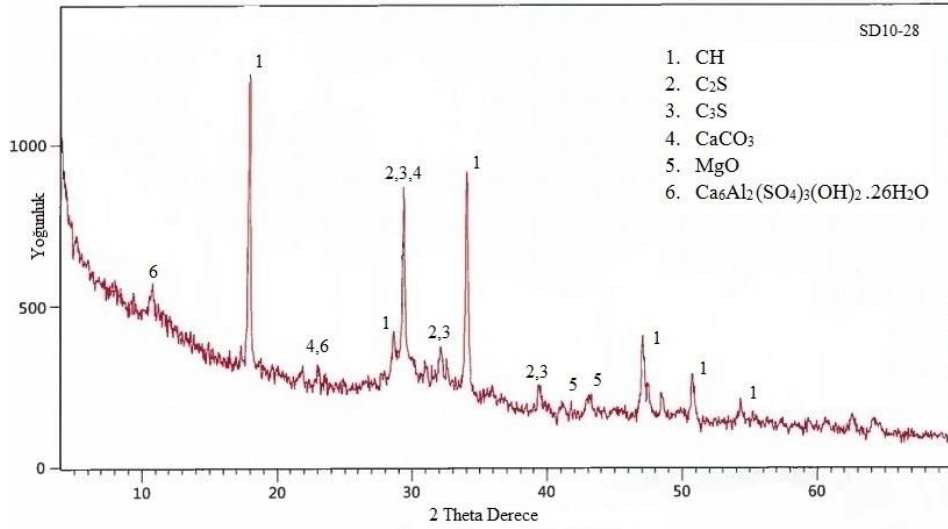


Şekil 4.60. KN karışımı 28 günlük XRD analizi



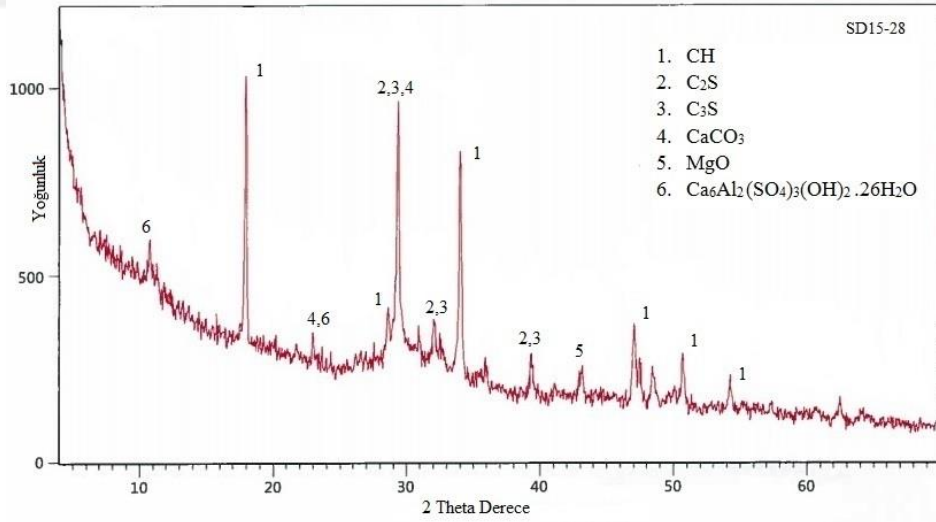
Şekil 4.61. SD5 karışımı 28 günlük XRD analizi

KN 28 günlük XRD analizinde, 7 günlük kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %6,8 azaldığı görülmektedir. SD5 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %11 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %4 artış olduğu görülmüştür.



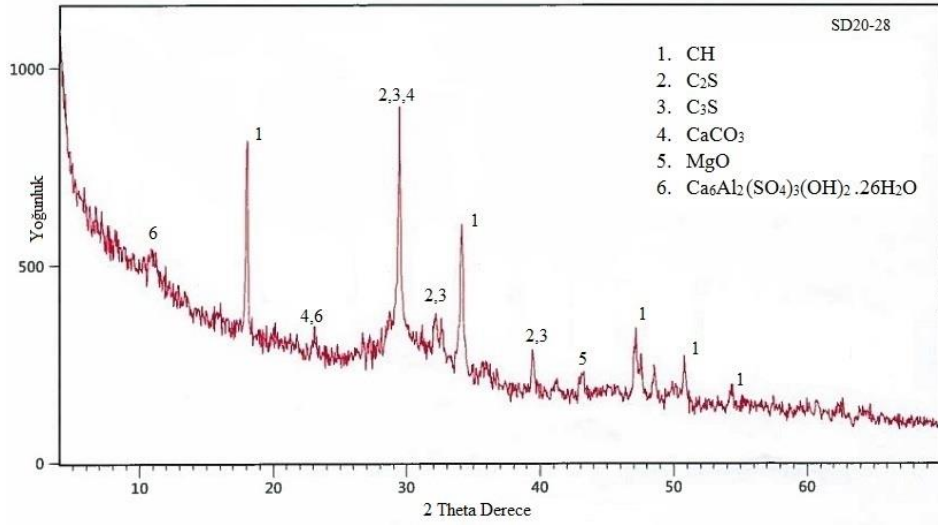
Şekil 4.62. SD10 karışımı 28 günlük XRD analizi

SD10 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %20,9 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %9,9 artış olduğu görülmüştür.



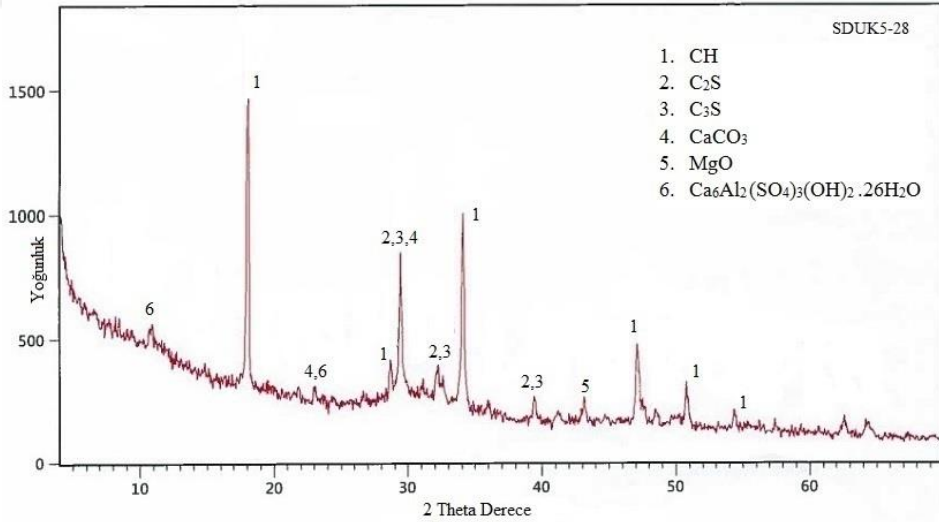
Şekil 4.63. SD15 karışımı 28 günlük XRD analizi

SD15 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %32,5 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %21,7 artış olduğu görülmüştür.



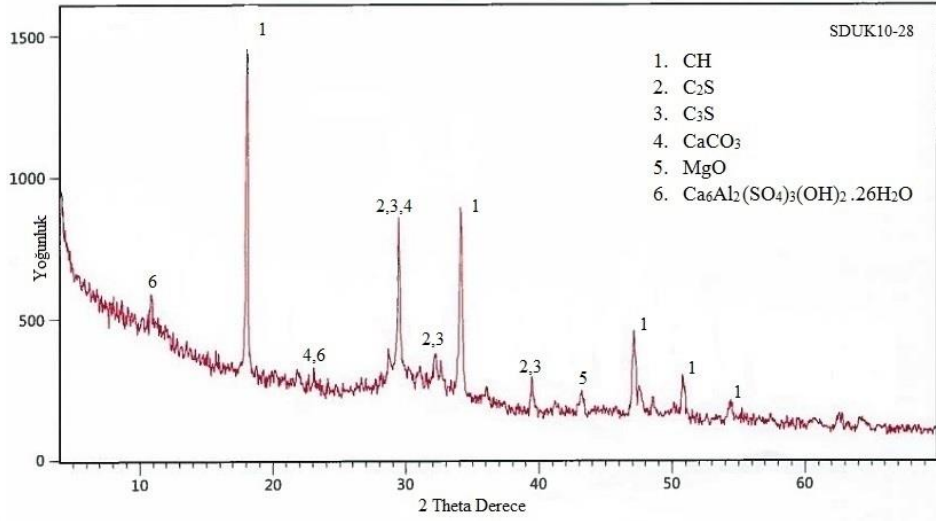
Şekil 4.64. SD20 karışımı 28 günlük XRD analizi

SD20 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %46,8 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %22,4 artış olduğu görülmüştür.



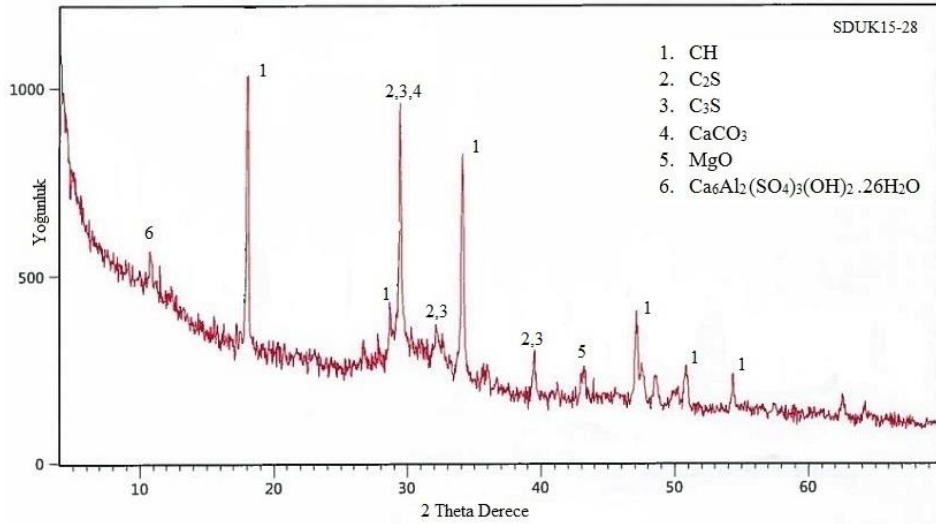
Şekil 4.65. SDUK5 karışımı 28 günlük XRD analizi

SDUK5 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %4,6 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %7,5 artış olduğu görülmüştür.



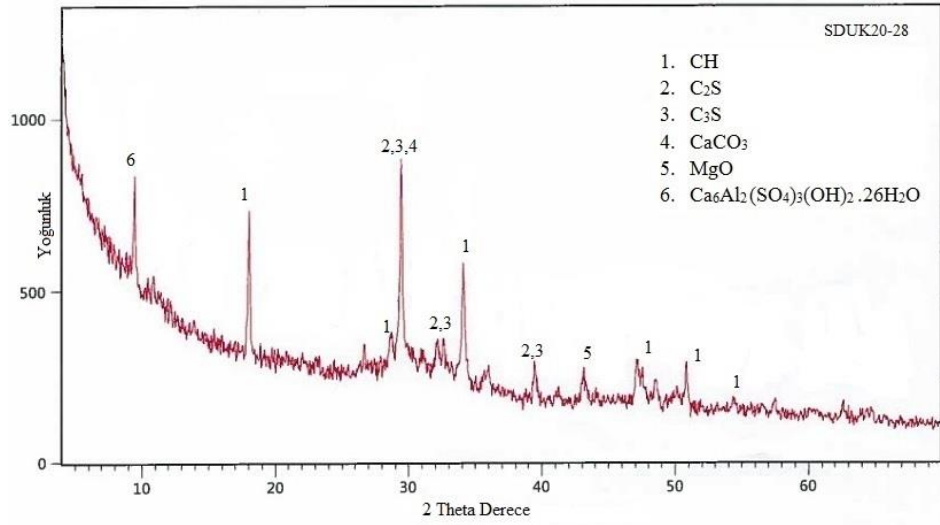
Şekil 4.66. SDUK10 karışımı 28 günlük XRD analizi

SDUK10 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %5,3 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %8,5 artış olduğu görülmüştür.



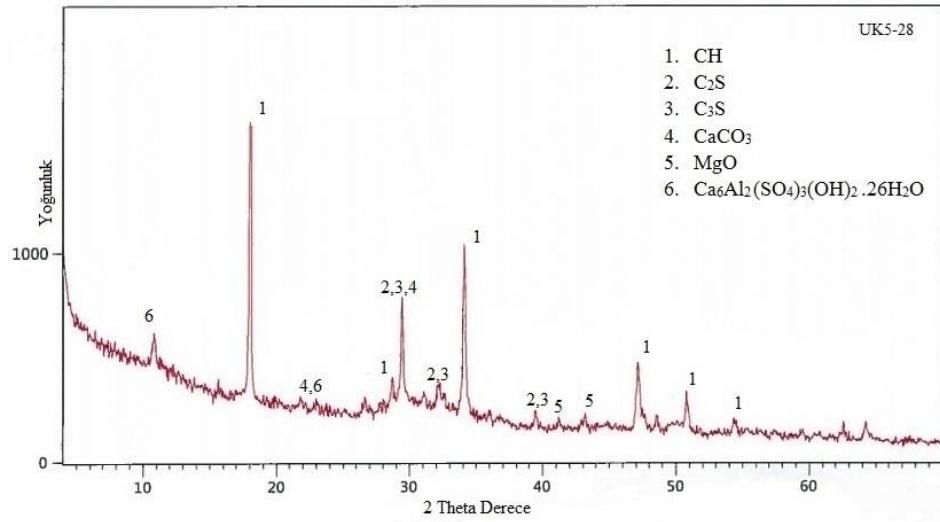
Şekil 4.67. SDUK15 karışımı 28 günlük XRD analizi

SDUK15 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %32,8 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %21,2 artış olduğu görülmüştür.



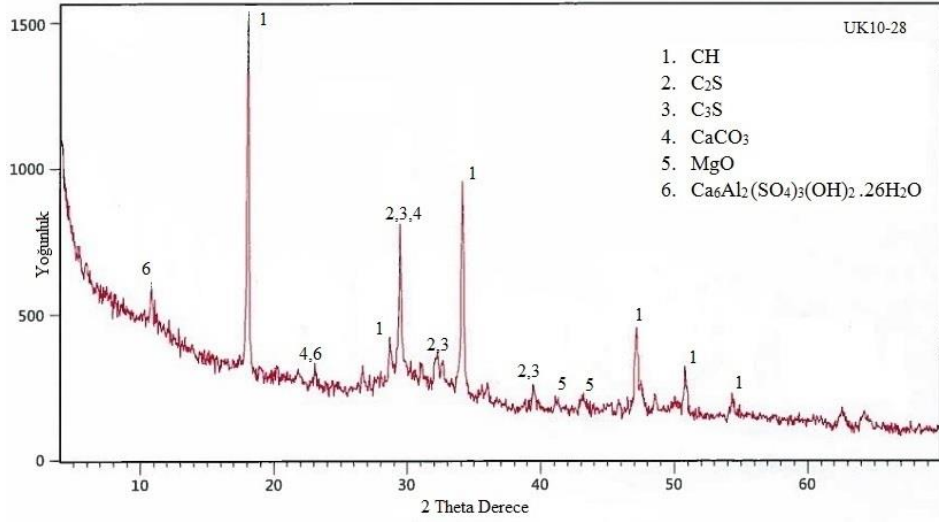
Şekil 4.68. SDUK20 karışımı 28 günlük XRD analizi

SDUK20 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %50,6 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %11,8 artış olduğu görülmüştür.



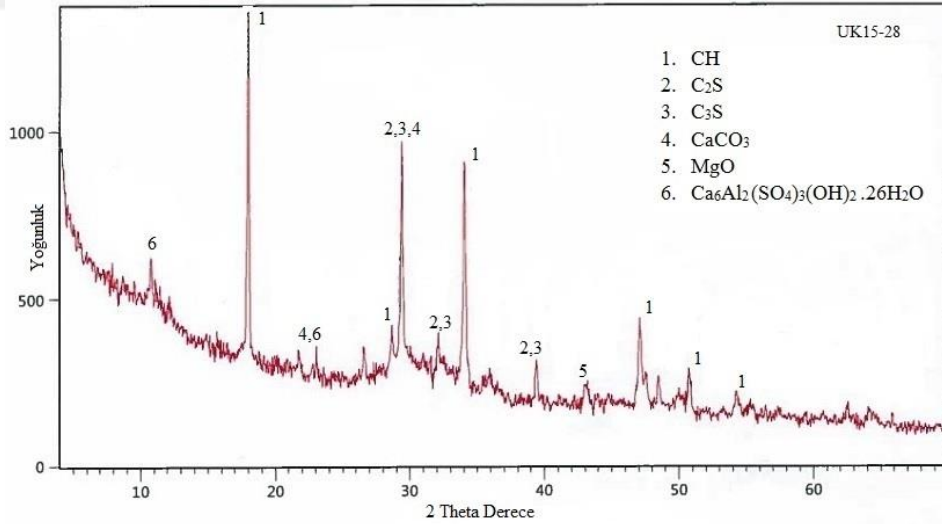
Şekil 4.69. UK5 karışımı 28 günlük XRD analizi

UK5 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %4,6 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise önemli bir değişim olmadığı görülmüştür.



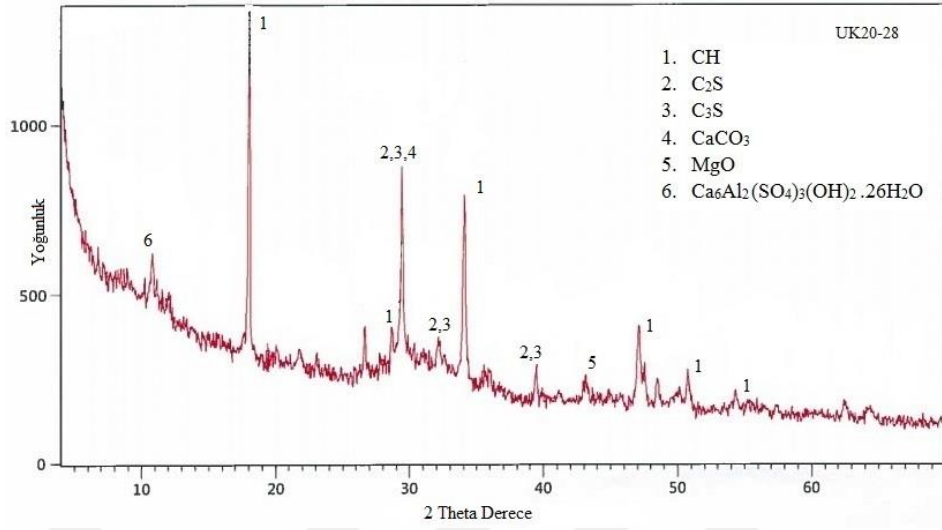
Şekil 4.70. UK10 karışımı 28 günlük XRD analizi

UK10 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunda önemli bir değişiklik olmazken CSH yoğunluğunda ise %2,5 artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.71. UK15 karışımı 28 günlük XRD analizi

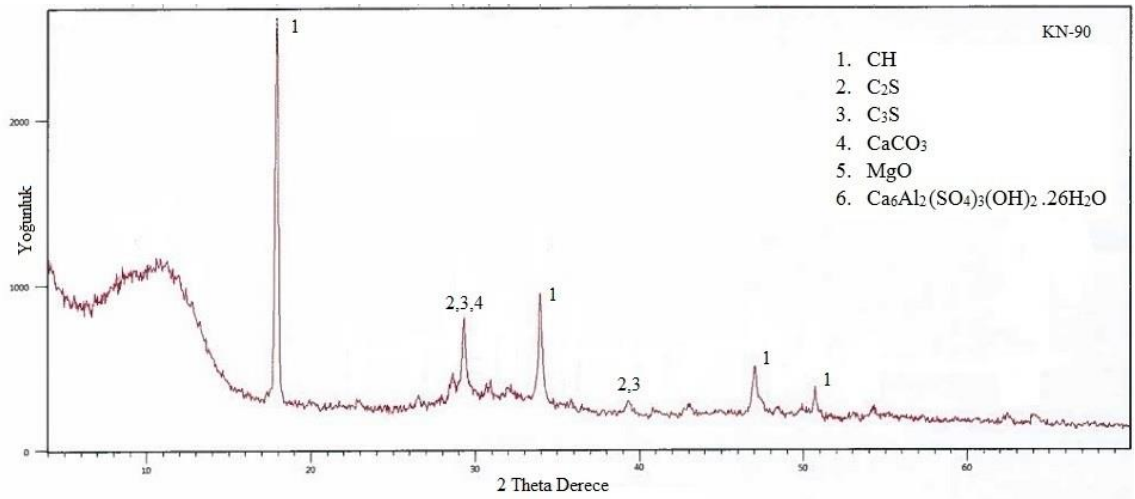
UK15 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %11,6 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %2,5 artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.72. UK20 karışımı 28 günlük XRD analizi

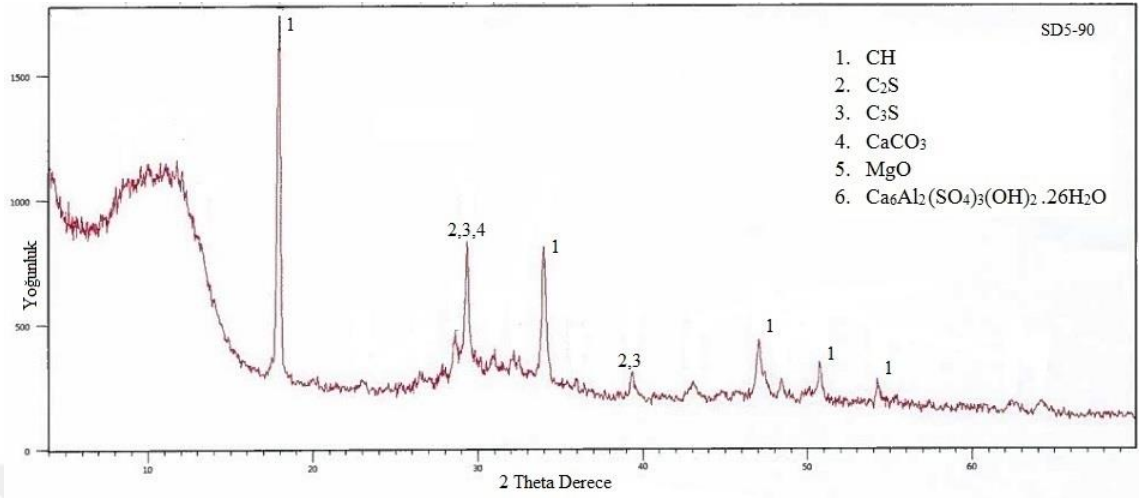
UK20 28 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %13,1 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %10,7 artış olduğu görülmüştür.

4.5.3. XRD 90 günlük analiz bulguları



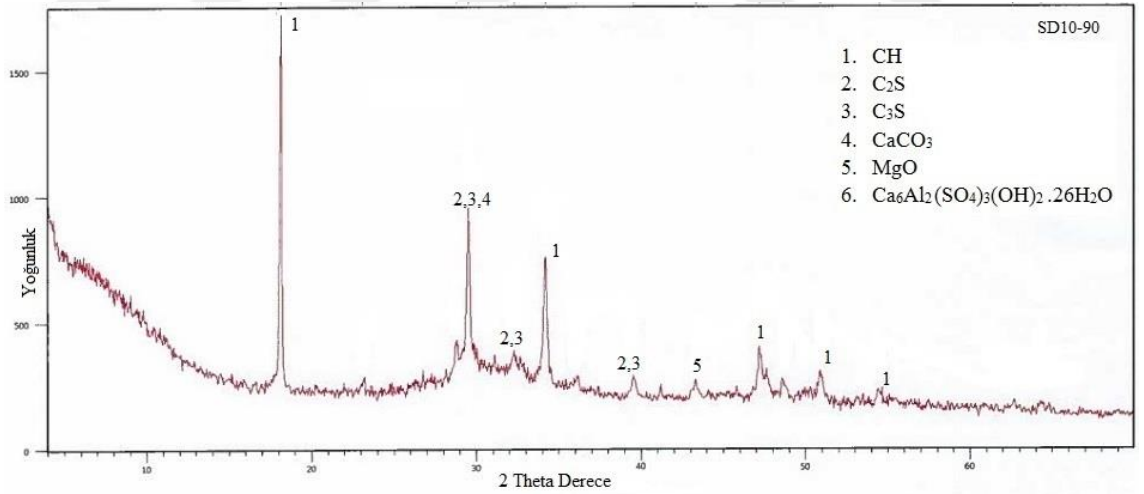
Şekil 4.73. KN karışımı 90 günlük XRD analizi

KN 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %13,1 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %10,7 artış olduğu görülmüştür.



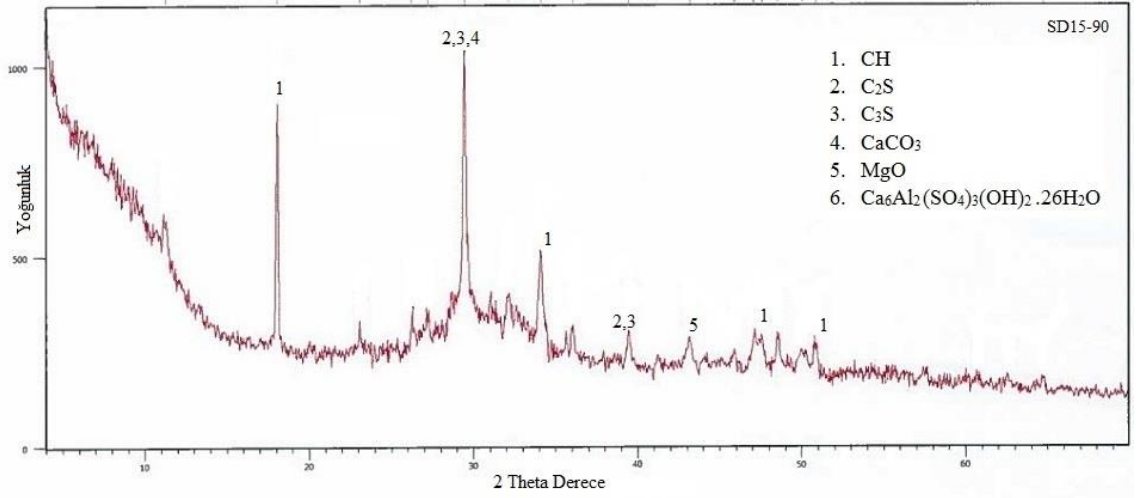
Şekil 4.74. SD5 karışımı 90 günlük XRD analizi

SD5 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %33,4 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %2 artış olduğu görülmüştür.



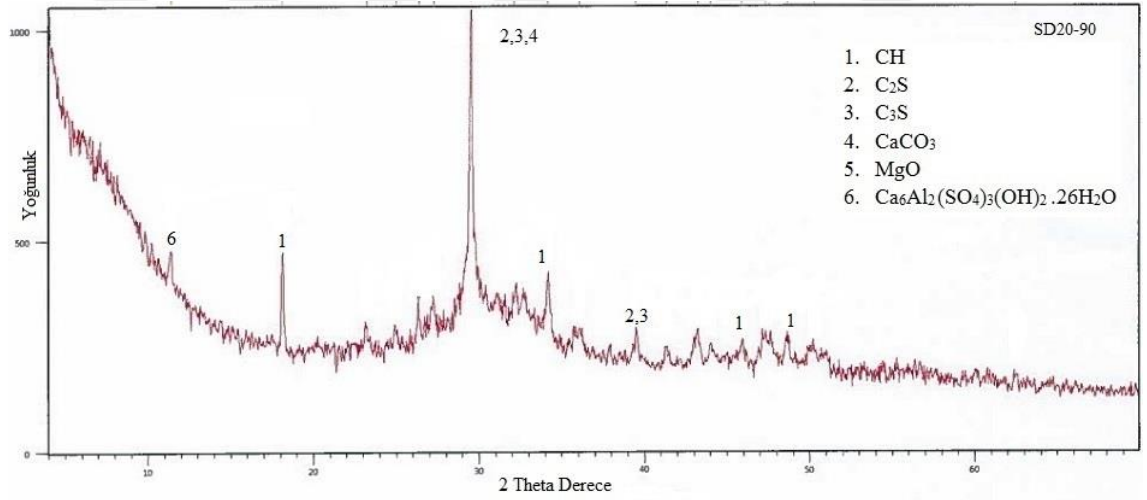
Şekil 4.75. SD10 karışımı 90 günlük XRD analizi

SD10 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %34,2 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %17,8 artış olduğu görülmüştür.



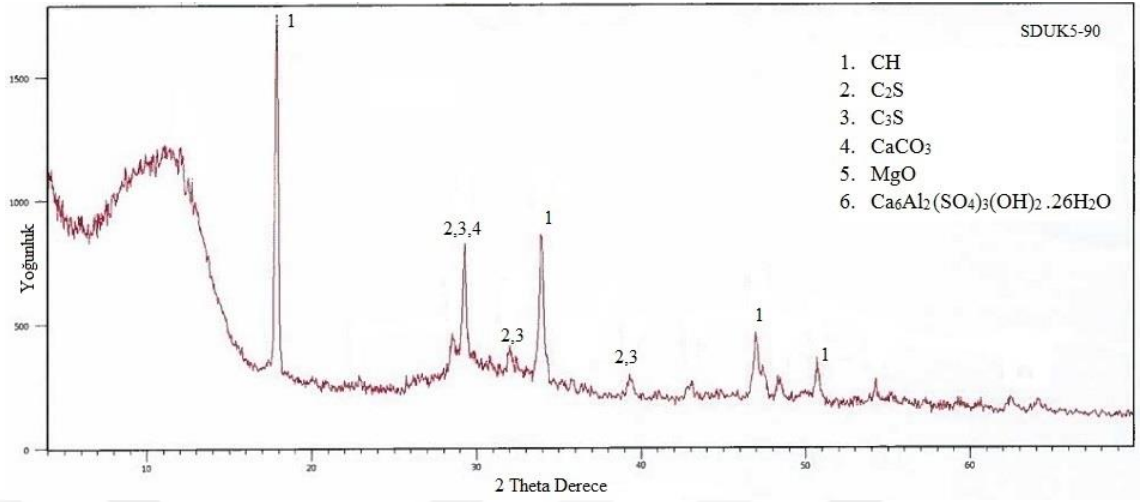
Şekil 4.76. SD15 karışımı 90 günlük XRD analizi

SD15 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %65,4 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %27,2 artış olduğu görülmüştür.



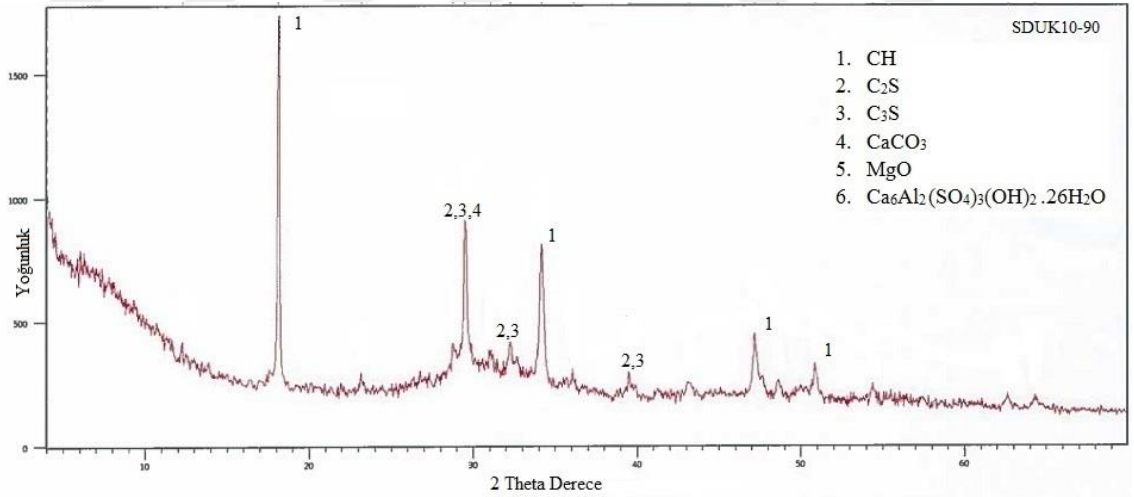
Şekil 4.77. SD20 karışımı 90 günlük XRD analizi

SD20 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %81,9 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %27,6 artış olduğu görülmüştür.



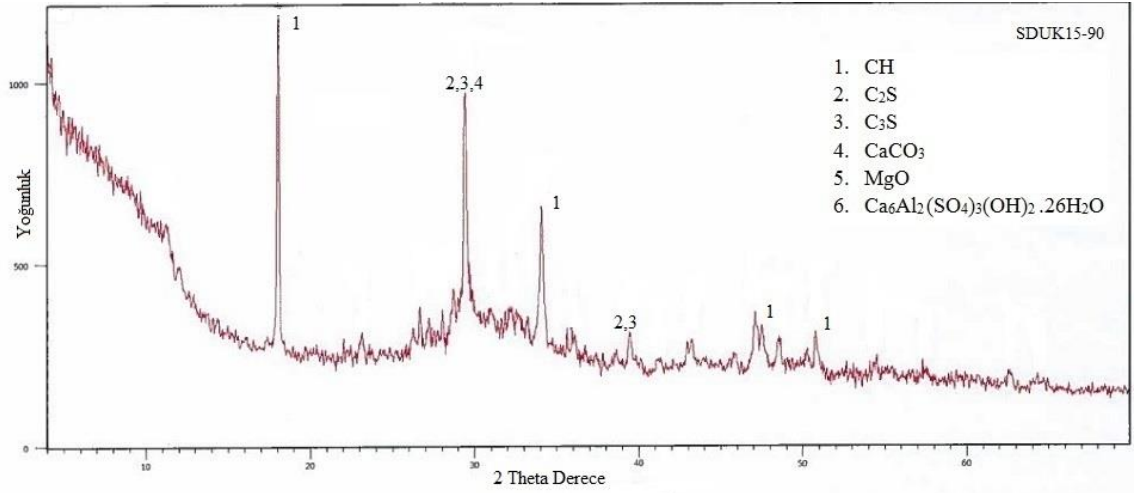
Şekil 4.78. SDUK5 karışımı 90 günlük XRD analizi

SDUK5 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %33,2 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %2 artış olduğu görülmüştür.



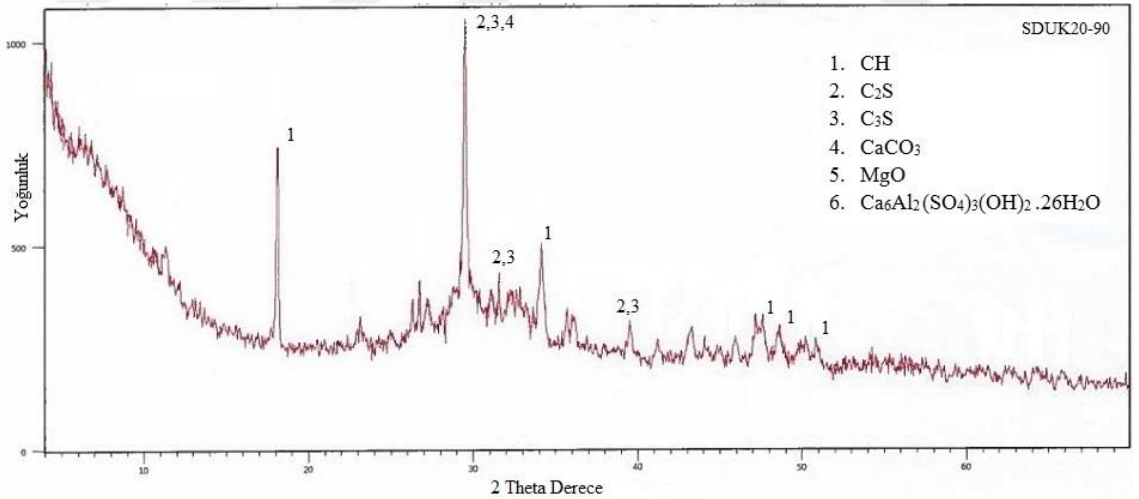
Şekil 4.79. SDUK10 karışımı 90 günlük XRD analizi

SDUK10 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %33,8 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %11,9 artış olduğu görülmüştür.



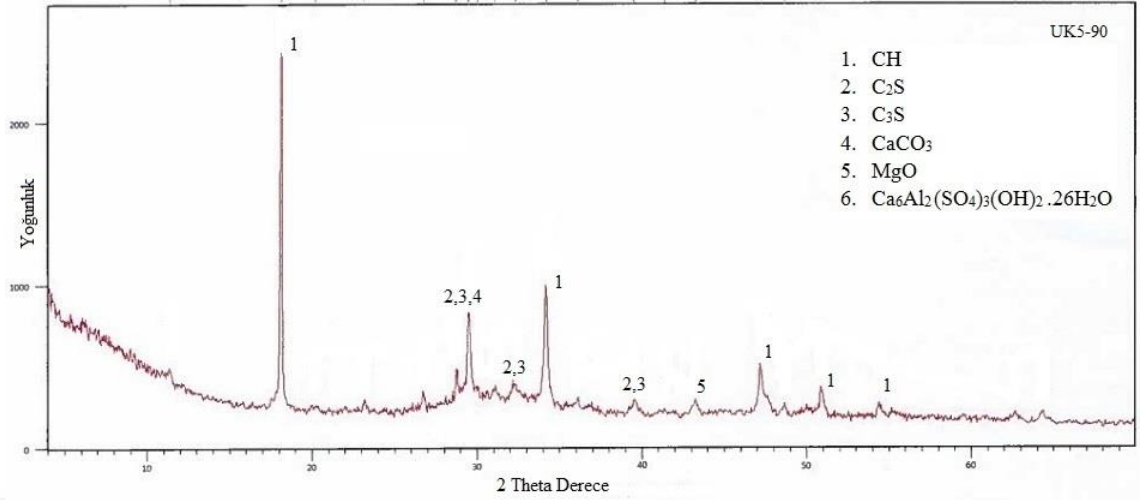
Şekil 4.80. SDUK15 karışımı 90 günlük XRD analizi

SDUK15 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %55,6 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %18,4 artış olduğu görülmüştür.



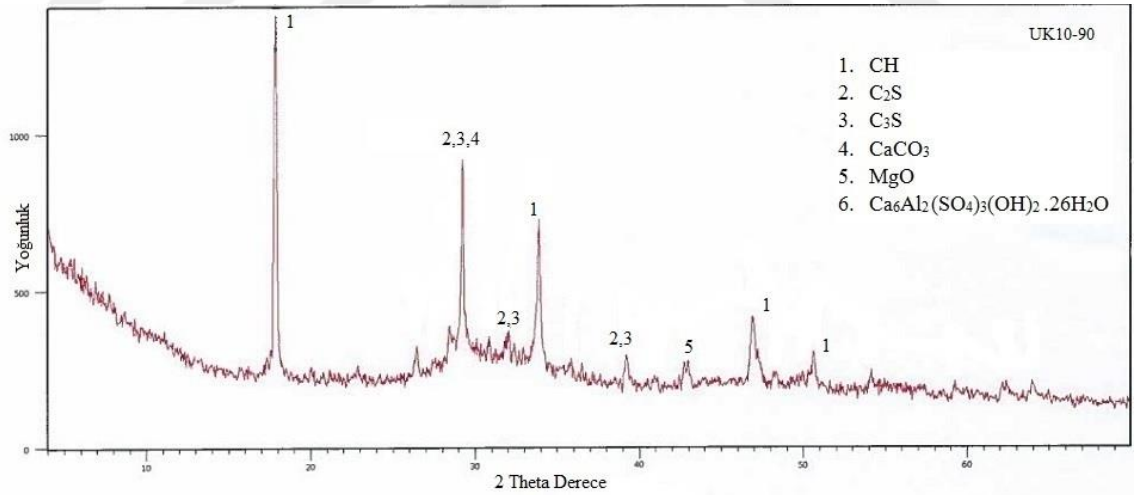
Şekil 4.81. SDUK20 karışımı 90 günlük XRD analizi

SDUK20 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %71,5 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %29,3 artış olduğu görülmüştür.



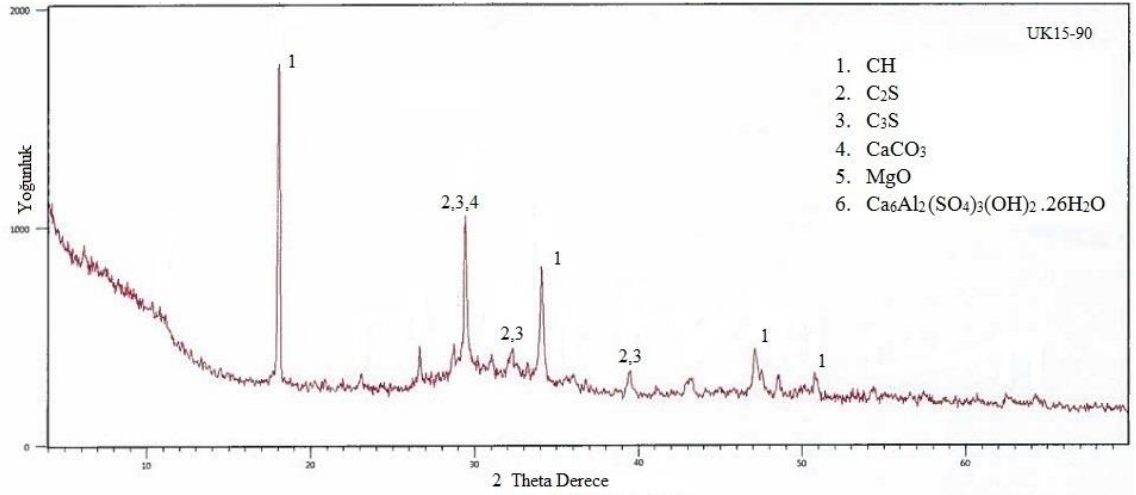
Şekil 4.82. UK5 karışımı 90 günlük XRD analizi

UK5 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %6,8 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %3,5 artış olduğu görülmüştür.



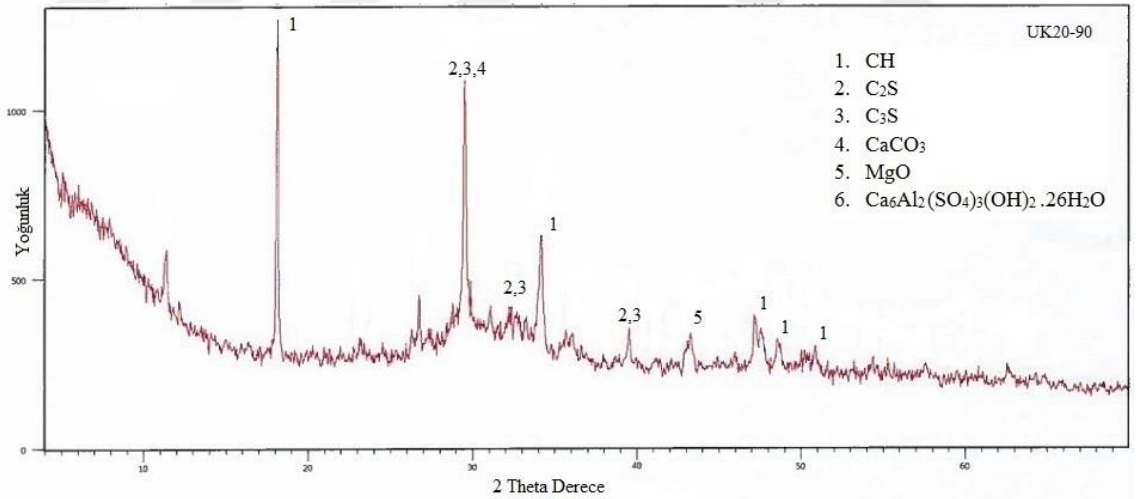
Şekil 4.83. UK10 karışımı 90 günlük XRD analizi

UK10 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %47,6 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %15,9 artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.84. UK15 karışımı 90 günlük XRD analizi

UK15 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %33,8 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %29,8 artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.85. UK20 karışımı 90 günlük XRD analizi

UK20 90 günlük XRD analizinde, kontrol numunesine kıyasla CH yoğunluğunun %51,7 azaldığı ve CSH yoğunluğunda ise %33,1 artış olduğu görülmüştür.

Hidrate olmuş çimento hamuru hidratasyon ürünleri olan portlandit (CH), kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve etrenjit ile birlikte hidrate olmamış klinker minerallerini (C_3S ve C_2S) içermektedir. Uçucu kül içeren çimento hamuru, herhangi bir katkı içermeyen çimento hamuruna göre tüm hidratasyon yaşlarında farklı oranlarda CH oluşturmuştur. Ayrıca tüm yaşlarda uçucu kül hamurundaki CH miktarının, portland çimentosu hamuruna göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum bütün hamurlardaki hidratasyon gelişiminin farklı oranlarda gerçekleştiğini göstermektedir.

X-ışını kırınım analizi katkısız ve mineral katkılı hidratlı çimento numuneleri üzerinde 7, 28 ve 90 günlerde gerçekleştirilmiştir. XRD analizinde, alitin numunedeki çoğunluğu temsil ettiğini, bir kısmının hidratlandığını ve hidratlı kalsiyum silikatın üretildiğini görülmüştür. Tüm hidratasyon safhalarında etrenjit ve portlanditin bulunduğu görülür. Hidrosilikatlar ve hidroalüminatlar (tobermorit, portlandit ve etrenjit) mevcut iken, hidratasyon süreci esnasında mineralojik bileşenlerde meydana gelen değişiklikler de fark edilmiştir. Yedi gün sonra, difraktogramın en yüksek tepeleri alite ve tobermorite jeline karşılık gelir. Zaman geçtikçe, hidratasyon süreci, tobermorit ve portlandit fazları arasındaki değerlerin 7-28 gün arasında azaldığını gösterir. Uçucu kül numunelerindeki portlandit yüzdesi, çimento yerine uçucu küllerin değiştirilmesiyle birlikte azalmıştır.

Şekil 4.47 – Şekil 4.59’da verilmiş olan 7 günlük XRD analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine SD ve UK kullanılması ile oluşan CH miktarının kontrol numunesine kıyasla azaldığı görülmüştür. %5 SD kullanımına karşılık oluşan CH’da %9,7 azalma, %10 SD kullanıldığında %13 artış, %15 SD kullanıldığında %31,6 ve %20 SD kullanıldığında %37,1 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine kullanılan UK miktarı ile oluşan CH oranı arasında 7 günlük yaşta doğrusal lineer bir ilişki bulunmamaktadır. %5 UK kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %7,9 azalma meydana gelirken, %10 UK kullanıldığında ise %3,7 azalma, %15 UK kullanıldığında oluşan CH’da %6,7 ve %20 UK kullanıldığında ise %16,2 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine SD ve UK’lün birlikte %5 kullanılması CH oranında %11,2 azalma meydana gelirken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan CH

oranında %29,8, %15 kullanıldığında %30,8 ve %20 kullanıldığında ise %42,2 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.60 – Şekil 4.72’de verilmiş olan 28 günlük XRD analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine SD ve UK kullanılması ile oluşan CH miktarının 7 günlük yaşta olduğu gibi kontrol numunesine kıyasla azaldığı görülmüştür. %5 SD kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %11,2 azalma, %10 SD kullanıldığında %20,9 artış, %15 SD kullanıldığında %32,5 ve %20 SD kullanıldığında %46,8 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine %5 UK kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %4,6 artış meydana gelirken, %10 UK kullanıldığında ise kontrol numunesine yakın CH oluşmuştur. %15 UK kullanıldığında oluşan CH’da %11,6 ve %20 UK kullanıldığında ise %13,1 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine SD ve UK’nün birlikte %5 kullanılması CH oranında %4,6 azalma olurken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan CH oranında %5,3, %15 kullanıldığında %32,8 ve %20 kullanıldığında ise %50,6 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.73 – Şekil 4.85’de verilmiş olan 90 günlük XRD analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine SD ve UK kullanılması ile oluşan CH miktarının kontrol numunesine kıyasla azaldığı görülmüştür. %5 SD kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %33,4 azalma, %10 SD kullanıldığında %34,2 azalma, %15 SD kullanıldığında %65,4 ve %20 SD kullanıldığında %81,9 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine %5 UK kullanımına karşılık oluşan CH ‘da %6,8 azalma meydana gelirken, %10 UK kullanıldığında ise %47,4 azalma, %15 UK kullanıldığında oluşan CH’da %33,8 ve %20 UK kullanıldığında ise %51,7 oranında bir azalma olduğu görülmüştür. Çimento yerine SD ve UK’nün birlikte %5 kullanılması CH oranında %33,2 azalma olurken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan CH oranında %33,8, %15 kullanıldığında %55,6 ve %20 kullanıldığında ise %71,5 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

SD katkılı numuneler UK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %16 daha az CH, 28 günlük yaşta %15 ve 90 günlük yaşta ise %21 oranında daha az CH meydana gelmiştir. SD katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta

ortalama %6 daha fazla CH, 28 günlük yaşta %4 ve 90 günlük yaşta ise %5 oranında daha az CH oluşmuştur. UK katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %20 daha fazla CH oluşurken, 28 günlük yaşta %11 ve 90 günlük yaşta ise %14 oranında daha az CH meydana gelmiştir.

Şekil 4.47 – Şekil 4.59’da verilmiş olan 7 günlük XRD analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan C-S-H miktarının kontrol numunesine kıyasla arttığı görülmüştür. %5 SD kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %1,1 artış, %10 SD kullanıldığında %7,8 artış, %15 SD kullanıldığında %9,45 ve %20 SD kullanıldığında %12 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Çimento yerine kullanılan UK miktarı ile oluşan C-S-H oranı arasında 7 günlük yaşta doğrusal bir ilişki olmadığı görülmüştür. %5 UK kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %1,8 ve %10 UK kullanıldığında ise %3,8 artma meydana gelirken, %15 UK kullanıldığında oluşan C-S-H’da %3 ve %15 UK kullanıldığında ise %1,8 oranında bir artış olduğu görülmüştür. Çimento yerine SD ve UK’nün birlikte %5 kullanılması C-S-H oranında %7,8 azalma olurken, %10 oranında SD+UK kullanıldığında oluşan C-S-H oranında %7,2, %15 kullanıldığında %3,1 ve %20 kullanıldığında ise %1,2 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

Şekil 4.60 – Şekil 4.72’de verilmiş olan 28 günlük XRD analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine mineral katkıların kullanılması ile oluşan C-S-H miktarının arttığı görülmektedir. %5 SD kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %4 artış, %10 SD kullanıldığında %9,9 artış, %15 SD kullanıldığında %21,7 ve %20 SD kullanıldığında %22,4 oranında bir artış olduğu görülmüştür. %5 UK kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %6,2 azalma olurken, %10 SD kullanıldığında %2,5 artış, %15 SD kullanıldığında %22,6 ve %20 SD kullanıldığında %10,7 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Çimento yerine SD ve UK’nün birlikte %5 kullanılması C-S-H’da %7,5 artış, %10 oranında SD+UK kullanıldığında %8,5, %15 SD+UK kullanıldığında %21,2 ve %20 SD+UK kullanıldığında ise %11,8 oranında bir artış meydana gelmiştir. SDUK içeren numunler 7 günlük yaşa göre iyi sonuç vermiştir.

Şekil 4.73 – Şekil 4.85’de verilmiş olan 90 günlük XRD analiz sonuçları incelendiğinde çimento yerine SD ve UK kullanılması ile oluşan C-S-H miktarının bütün karışımlarda doğrusal olarak arttığı görülmüştür. %5 SD kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %2 artış, %10 SD kullanıldığında %17,8 artış, %15 SD kullanıldığında %27,2 ve %20 SD kullanıldığında %27,6 oranında bir artış olduğu görülmüştür. %5 UK kullanımına karşılık oluşan C-S-H’da %3,5 artış, %10 SD kullanıldığında %15,9 artış, %15 SD kullanıldığında %29,8 ve %20 SD kullanıldığında %33,1 oranında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Çimento yerine SD ve UK’lün birlikte %5 kullanılması C-S-H’da %2 artış, %10 oranında SD+UK kullanıldığında %11,9, %15 SD+UK kullanıldığında %18,4 ve %20 SD+UK kullanıldığında ise %29,3 oranında bir artış meydana gelmiştir.

SD katkılı numuneler UK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %5 daha fazla C-S-H, 28 günlük yaşta %6 ve 90 günlük yaşta ise %2 oranında daha fazla C-S-H meydana gelmiştir. SD katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %12 daha fazla C-S-H, 28 günlük yaşta %6 ve 90 günlük yaşta ise %3 oranında daha fazla C-S-H oluşmuştur. UK katkılı numuneler SDUK katkılı numunelere kıyasla 7 günlük yaşta ortalama %7 daha fazla C-S-H oluşurken, 28 günlük yaşta %4 daha az ve 90 günlük yaşta ise %5 oranında daha fazla C-S-H meydana gelmiştir.

C-S-H miktarı, portland çimento hamurunda, yanma kaybı veya reaksiyona girmemiş çimento ve kalsiyum hidroksitin kantitatif x-ışını analizi gibi standart dolaylı teknikler kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir. C-S-H, hem amorf yapısı hem de belirsiz bileşimi nedeniyle doğrudan ölçmek çok zordur. CH ve mineral katkı maddesi arasındaki pozolanik reaksiyon, dolaylı teknikler ile ayırt etmede başarısız olan C-S-H’yi üretir ve bilinmeyen miktarlarda kalsiyum tüketir. Buna ek olarak, mineral katkılı C-S-H’nin Ca / Si oranı saf çimento macunundan daha düşük olmaktadır (Olson and Jennings 2001).

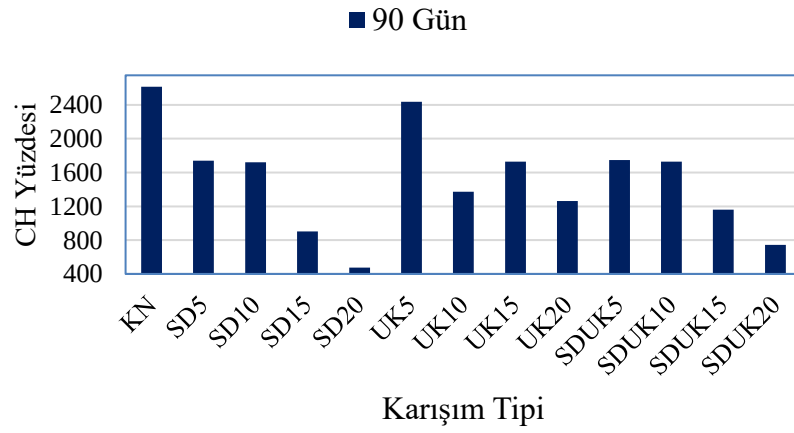
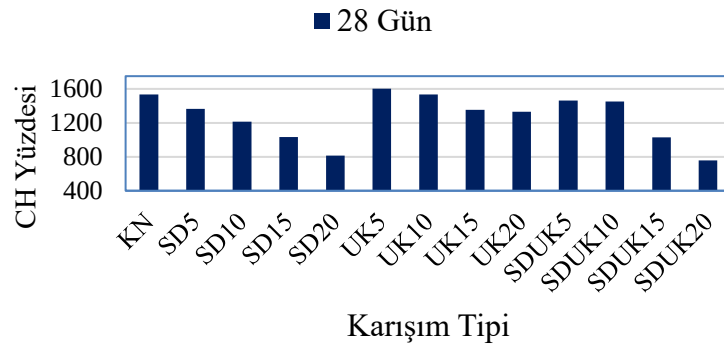
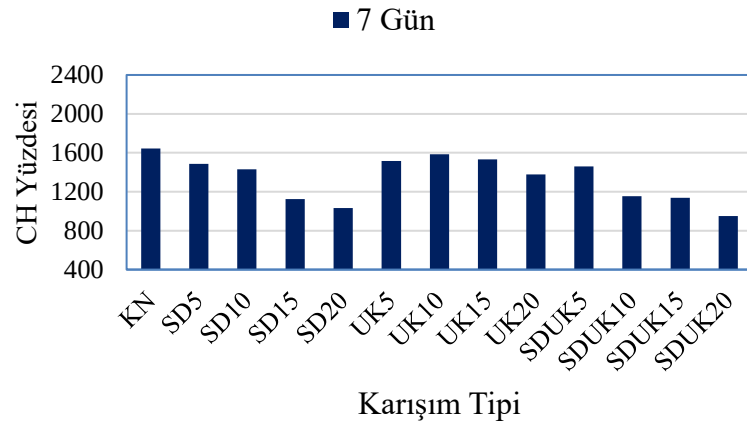
Bileşik veya faz bileşiminin oksitten hesaplanması teorik yöntemle veya deneysel yöntemle yapılabilir. XRD, bir yıldan beri mineral konsantrasyonlarının belirlenmesinde başarıyla kullanılmakta olup 1958’den beri, çimento bileşiminin belirlenmesi için XRD analizini kullanmak için çeşitli girişimler yapılmıştır (Bye *et al.*

1975). XRD analizinde yüzde yüz doğru bir sonuç elde edilemese bile alternatif yöntemlere göre prensip olarak daha iyi analitik yöntem olduğunu yapılan çalışmalarda görülmüştür.

XRD tekniği Portland çimentosunun performansını tahmin etmek için ve çimento veya klinkerin her fazını değerlendirmek için kullanılır. Portland çimentosunun, ayarlanma, hidrasyon ısı, mukavemet ve sülfat ataklarına karşı direnç açısından performansı genel olarak bileşimin fazları ve oranları gibi bileşimine bağlıdır. XRD analizi bu özelliklerinde belirlenmesinde doğrudan yöntemlerdir. XRD analizi için standart bir prosedür yoktur, bu nedenle deney prosedürünün detayları, analiz edilen materyal ve analiz için kullanılan cihaza bağlı olarak önemli derecede değişebilmektedir.

Katkı içermeyen çimento esaslı numune, farklı oranlarda silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve bunların ikili kombinasyonlarını (SD+UK) içeren kompozitlerden 7, 28 ve 90 günlük priz süresinden sonra elde edilen numuneler hazırlanarak x-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak analiz yapıldı. XRD analizinde pik noktalar, hazırlanmış tüm karışım numuneleri için mineral fazlarla tanımlanmıştır. Hazırlanmış olan tüm çimentolu karışımlarda bulunan Ca(OH)_2 miktarı hidrasyon derecesinin bir göstergesini temsil etmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, 0,60 su/bağlayıcı oranlı karışımlarda çimento yerine değişik oranlarda silis dumanı ve uçucu kül ile bunların ikili kombinasyonu kullanılarak elde edilen numunelerdeki Ca(OH)_2 'nin (portlandit) yüzdesinin değişimi hedeflenmiştir. Yine aynı numunelerden elde edilen basınç dayanımına göre Ca(OH)_2 'nin değişimi karşılaştırılmıştır.

Üretilen kontrol numunesi ile birlikte 13 farklı tipte (KN, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDUK5, SDUK10, SDUK15 ve SDUK20) karışımın 7 günlük yaştaki XRD analizleri kontrol numunesi (KN) referans alınarak mukayese edilmiştir.



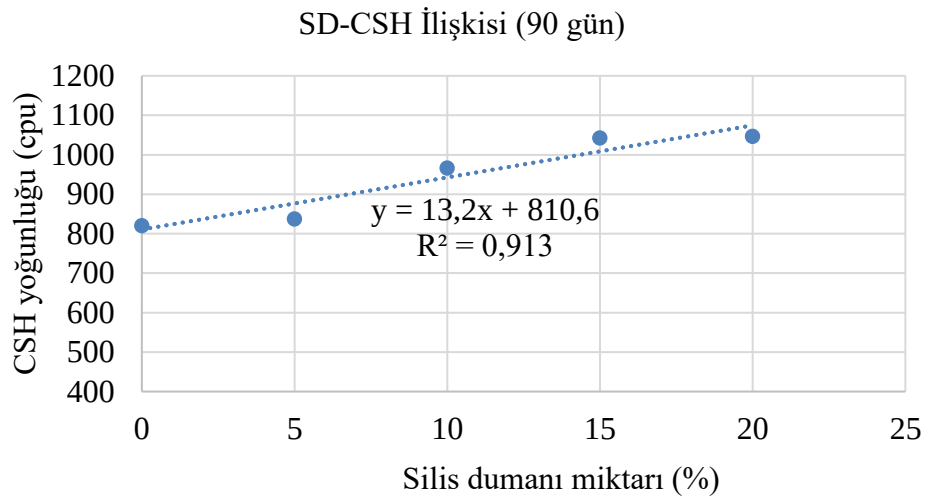
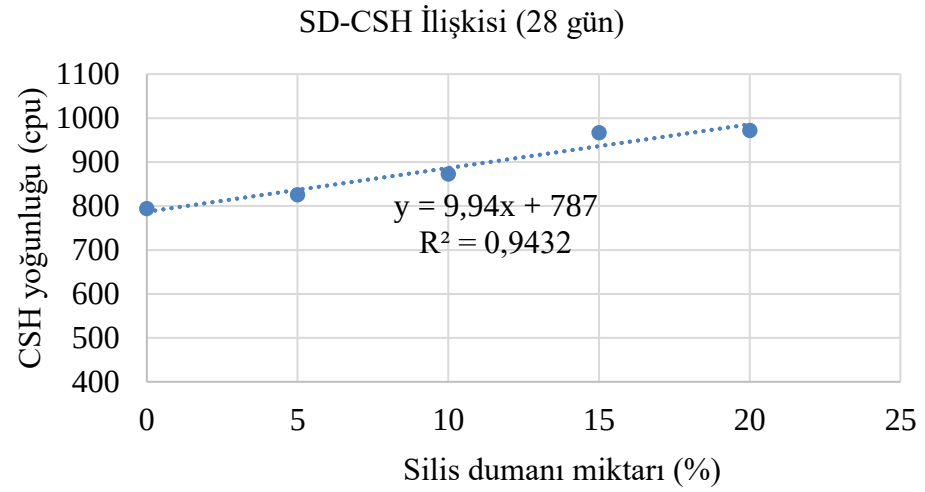
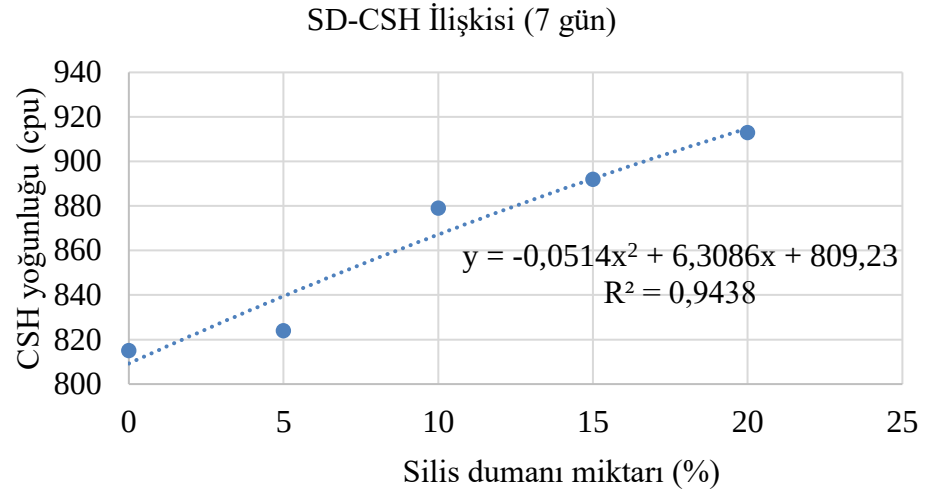
Şekil 4.86. Mineral katkıların CH miktarına etkisi (XRD 7, 28 ve 90 gün)

Çizelge 4.5. XRD analizi ile elde edilen 7, 28 ve 90 CH yoğunlukları

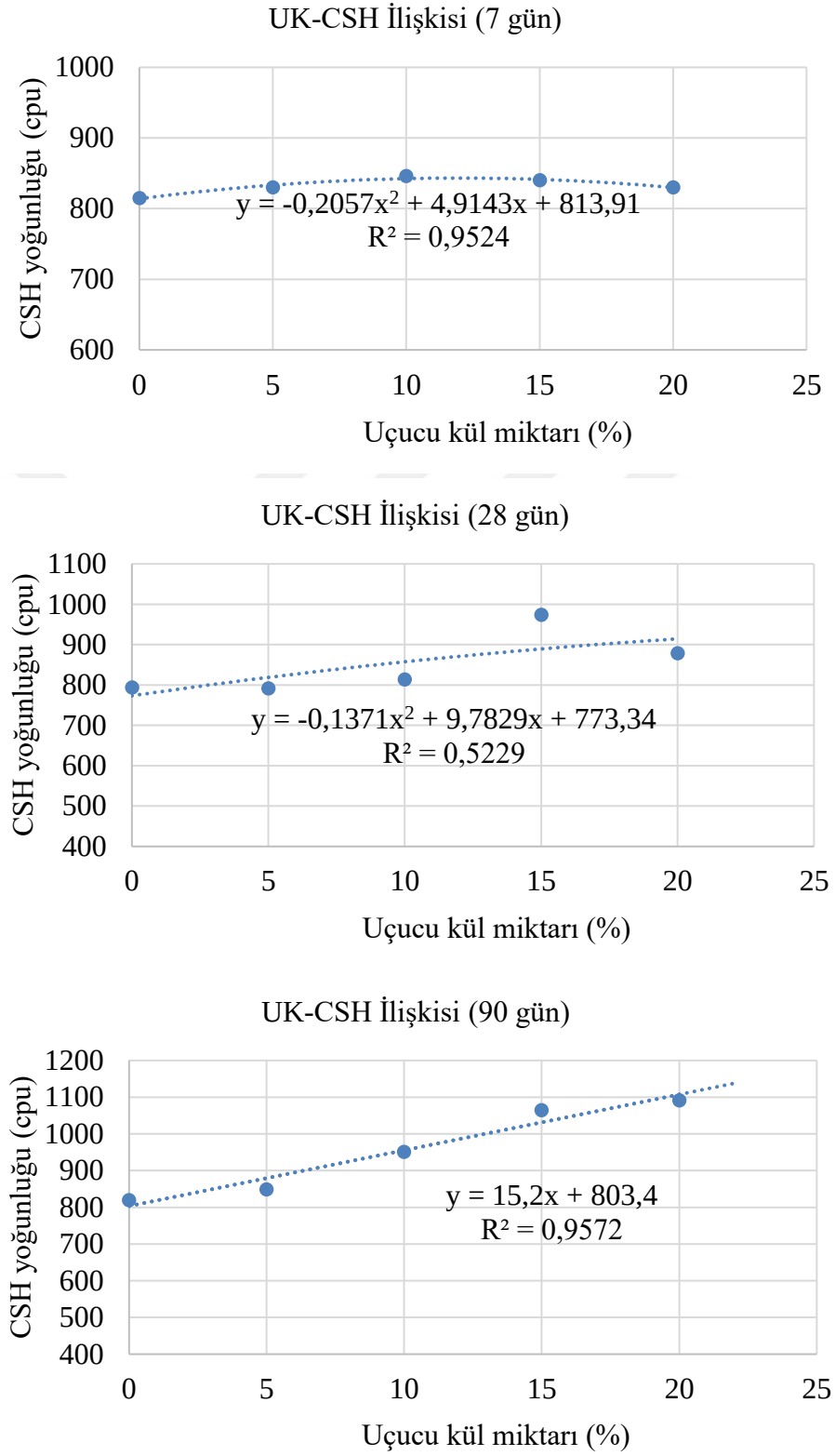
Numune Grupları	7 Gün	28 Gün	90 Gün
KN	1645	1533	2615
SD5	1485	1364	1740
SD10	1430	1212	1720
SD15	1125	1034	903
SD20	1034	815	473
UK5	1515	1604	2435
UK10	1584	1533	1374
UK15	1534	1354	1729
UK20	1378	1331	1263
SDUK5	1460	1462	1746
SDUK10	1154	1451	1729
SDUK15	1138	1029	1160
SDUK20	950	756	744

Çizelge 4.6. XRD analizi ile elde edilen 7, 28 ve 90 C-S-H yoğunlukları

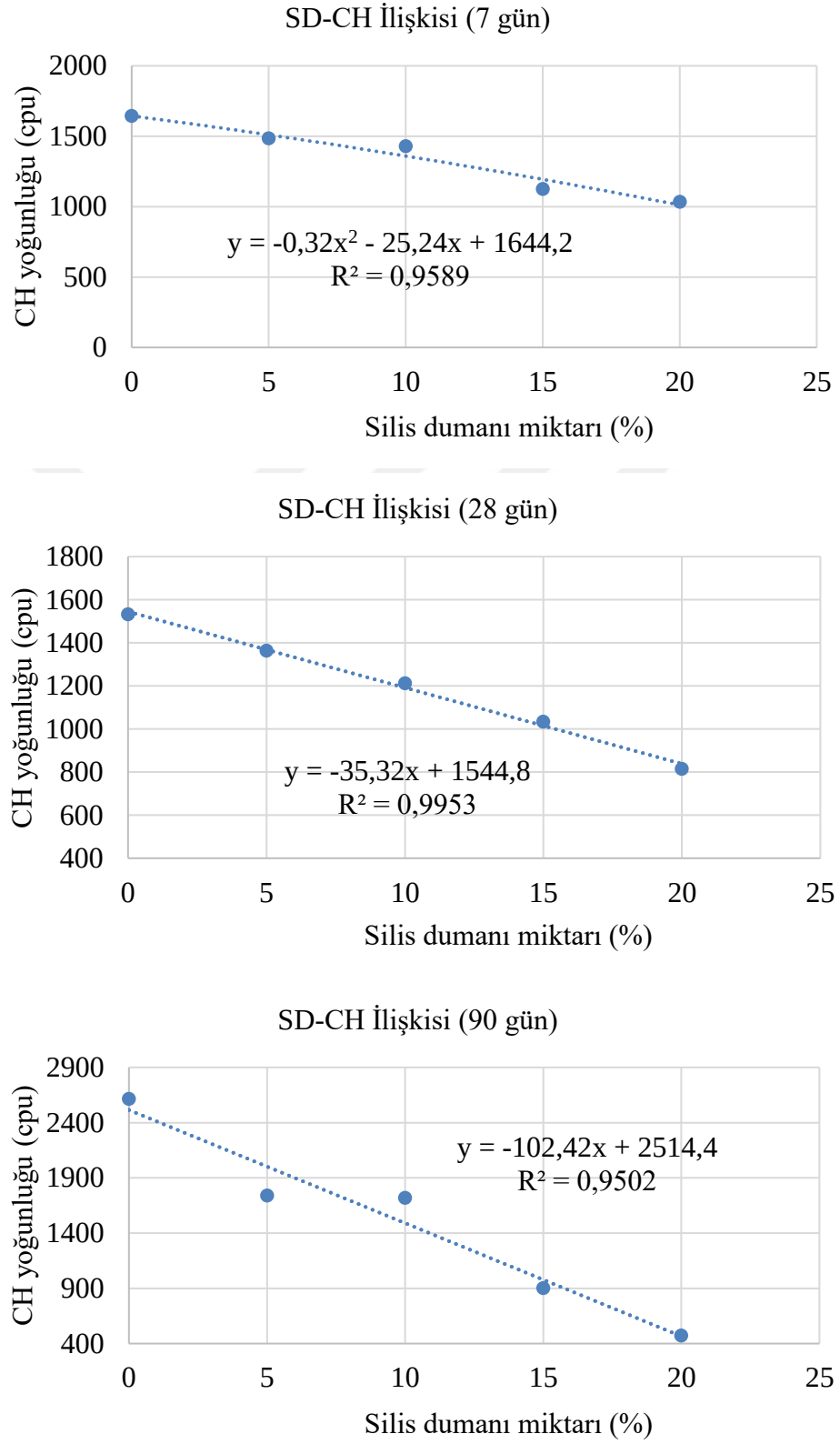
Numune Grupları	7 Gün	28 Gün	90 Gün
KN	815	794	820
SD5	824	826	837
SD10	879	873	966
SD15	892	967	1043
SD20	913	972	1047
UK5	830	792	849
UK10	846	814	951
UK15	840	974	1065
UK20	830	879	1092
SDUK5	744	854	837
SDUK10	756	862	918
SDUK15	789	963	971
SDUK20	805	888	1061



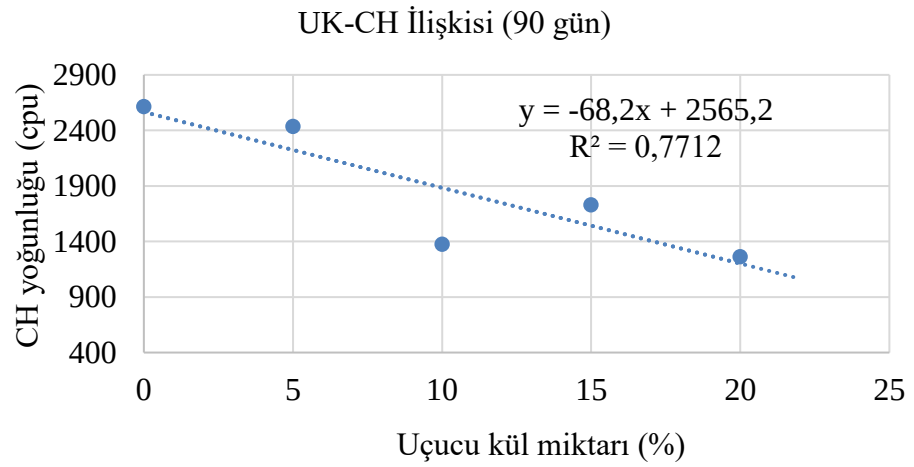
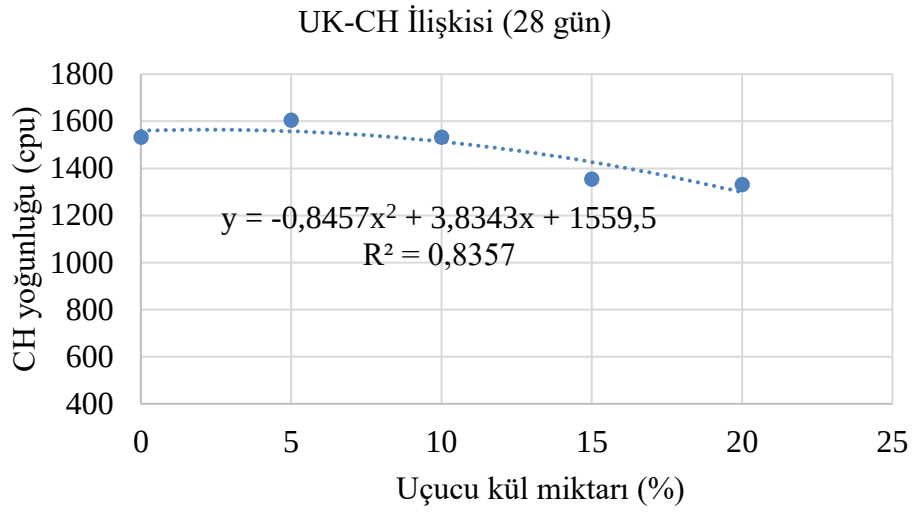
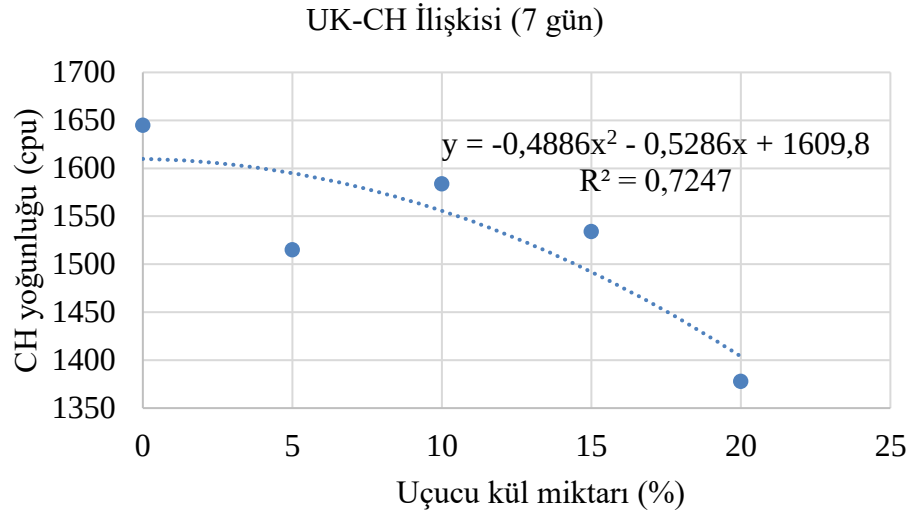
Şekil 4.87. Silis dumanı-CSH ilişkisi (7, 28 ve 90 gün)



Şekil 4.88. Uçucu kül-CSH ilişkisi (7, 28 ve 90 gün)



Şekil 4.89. Silis dumanı-CH ilişkisi (7, 28 ve 90 gün)



Şekil 4.90. Uçucu kül-CH (7, 28 ve 90 gün)

Ma ve Brown uçucu külün hidratasyon reaksiyonları araştırmış ve XRD analizi sırasında kalsiyum silikat hidrat, trikalsiyum alüminat hidrat ve etrenjit gözlenmiştir. Reaktiflikteki değişimlerin, eklenen Ca(OH)_2 veya $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ varlığına bağlı olduğu görülmüştür. Goni *et al.* uçucu külün puzolanik reaksiyonu ve oluşan bileşikten etkisini araştırmış ve alkalilerin, hidratasyon koşullarındaki reaktivitesinde uçucu kül hassasiyetinden daha önemli rol oynadığını göstermektedir (Sahoo *et al.* 2016).

4.6. SEM ve XRD Analiz Sonuçlarının Modellenmesi

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda değişkenlere bağlı olarak herhangi bir parametrenin tahminine yönelik çeşitli varyasyonlarla modelleme çalışması yapılmıştır. Modelleme yönteminde yapay sinir ağı (YSA) kullanılmıştır.

YSA modelinde üretilen 13 farklı grup numunenin 7, 28 ve 90 günlük yaştaki betonun basınç dayanımı üzerinde etkili olan SEM görüntü analizinden elde edilen CH, CSH, etrenjit, boşluk ve XRD analizinden elde edilen CH, CSH, CAH, C_2S - C_3S , giriş parametreleri, basınç dayanımı ise çıktı parametresi olarak tanımlanmıştır. Yapay sinir ağı ile tahmin yapılmadan önce verilerin aralarında istatistiksel olarak ilişkili olup olmadığı Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) programı ile test edilmiştir.

Çalışmada yapay sinir ağları çözümünde Waikato Üniversitesi tarafından geliştirilmiş ve ücretsiz kullanıma açık olan Weka 3.8 programı kullanılmıştır. Program ile YSA analizinde Sigmoid fonksiyonuna dayalı bir analiz yapılabilmektedir.



Şekil 4.91. Analiz programı ekran görüntüsü

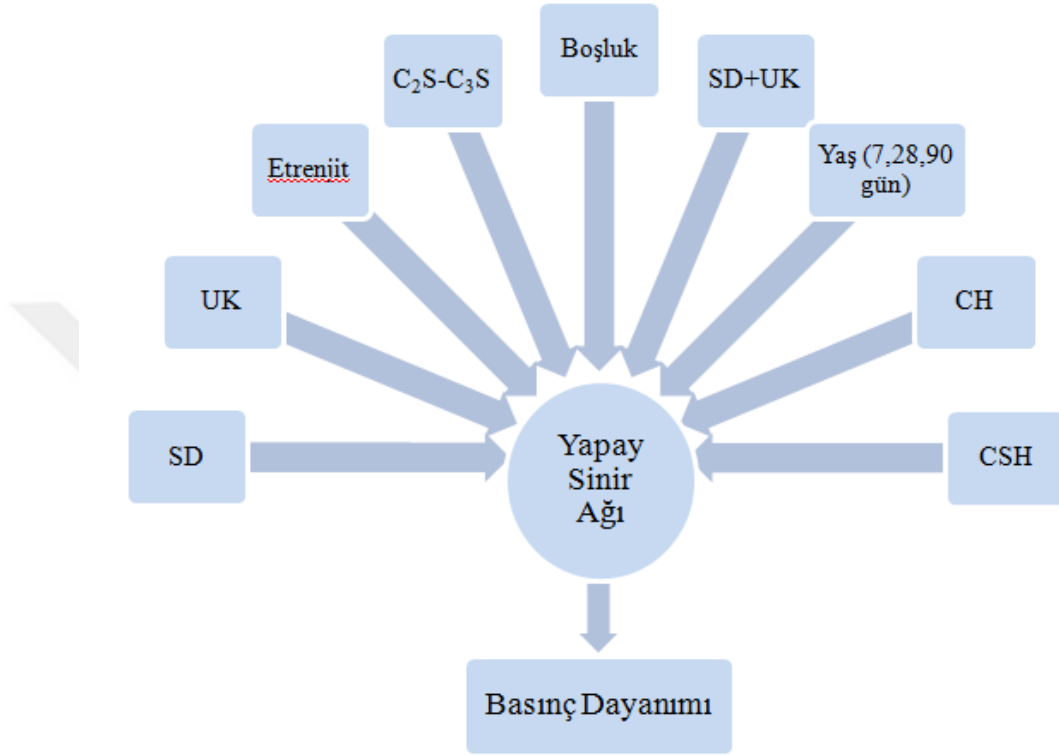
4.6.1. Verilerin hazırlanması

Yapay sinir ağı ile basınç dayanı tahmini yapılırken dayanımı etkileyen faktörler laboratuvar ortamında basınç dayanımı elde edildiğinden dayanımı etkileyen parametreler olarak aşağıda gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Çalışmada diğer değişkenler sabit tutulduğunda, değişken olarak silis dumanı, uçucu kül, silis dumanı ve uçucu kül ve yaş (7,28 ve 90 gün) girdi olarak alınmıştır.

Girdi parametreleri, silis dumanı oranı, uçucu kül oranı, silis dumanı + uçucu kül oranı, 7 günlük yaş, 28 günlük yaş, 90 günlük yaş, C-S-H, CH, boşluk, etrenjit, C₂S-C₃S olarak kabul edilmiştir. Çıkış parametresi ise basınç dayanımı olarak alınmıştır.

Yukarda verilen parametrelerin basınç dayanımına etki ettikleri tespit edilmiştir. Bunların etkisi ile tasarlanacak yapay sinir ağı sisteminin vereceği çıkış olarak ise

basınç dayanımı elde edilmiş olunacaktır. Bunun için tasarlanacak sistem için blok diyagramı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.92. Geliştirilen model için yapay sinir ağı diyagramı

Blok diyagramından da görüleceği üzere basınç dayanımının tahmin işleminde SD, UK, SD+UK, yaş (7, 28, 90), CH ve C-S-H, boşluk, etrenjit ve C₂S-C₃S olmak üzere sistem 9 girişli tek çıkışlı olmak üzere ileri beslemeli yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. Bu parametreler kullanılarak deneysel verilerden elde edilen basınç dayanımına karşılık tahmin işlemine dayalı basınç dayanımı elde edilmiştir.

Çalışmanın başında da belirtildiği gibi üretilen beton numenlerinde, s/ç oranı, çimento tipi, kür koşulları gibi parametreler sabit olarak alındığından tasarımda bu parametreler göz önünde bulundurulmamıştır. Üretilen numenlerin basınç dayanımına etki eden faktörler SD oranı, UK oranı, yaş, C-S-H, CH, boşluk, etrenjit ve C₂S-C₃S kabul

edilmiştir. Bu doğrultuda basınç dayanımına etki eden faktörler aşağıdaki tabloda açıklanmıştır.

Çizelge 4.7. XRD analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (7 gün)

Numune Grupları	Basınç Dayanımı (MPa)	SD miktarı (%)	UK miktarı (%)	Yaş (Gün)	CH Yoğunluğu (cpu)	CSH Yoğunluğu (cpu)	CAH	C2S/C3S Yoğunluk
KN	32,49	0	0	7	1645	815	588	443
SD5	32,52	5	0	7	1485	824	587	468
SD10	33,62	10	0	7	1430	879	568	400
SD15	34,42	15	0	7	1125	892	548	428
SD20	33,70	20	0	7	1034	913	537	448
UK5	31,28	0	5	7	1515	830	666	403
UK10	30,48	0	10	7	1584	846	686	406
UK15	29,28	0	15	7	1534	840	608	408
UK20	29,07	0	20	7	1378	830	556	416
SDUK5	31,80	2,5	2,5	7	1460	744	551	413
SDUK10	32,80	5,0	5,0	7	1154	756	522	407
SDUK15	33,58	7,5	7,5	7	1138	789	520	407
SDUK20	31,90	10	10	7	950	805	519	386

Çizelge 4.8. XRD analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (28 gün)

Numune Grupları	Basınç Dayanımı (MPa)	SD miktarı (%)	UK miktarı (%)	Yaş (Gün)	CH Yoğunluğu (cpu)	CSH Yoğunluğu (cpu)	CAH	C2S/C3S Yoğunluk
KN	38.34	0	0	28	1533	794	602	384
SD5	41.71	5	0	28	1364	826	566	371
SD10	42.10	10	0	28	1212	873	578	379
SD15	43.13	15	0	28	1034	967	599	381
SD20	41.41	20	0	28	815	972	549	378
UK5	39.62	0	5	28	1604	792	627	390
UK10	40.69	0	10	28	1533	814	614	376
UK15	40.05	0	15	28	1354	974	622	405
UK20	38.91	0	20	28	1331	879	621	378
SDUK5	40.36	2,5	2,5	28	1462	854	568	401
SDUK10	41.24	5,0	5,0	28	1451	862	588	384
SDUK15	42.84	7,5	7,5	28	1029	963	566	374
SDUK20	40.60	10	10	28	756	888	833	362

Çizelge 4.9. XRD analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (90 gün)

Numune Grupları	Basınç Dayanımı (MPa)	SD miktarı (%)	UK miktarı (%)	Yaş (Gün)	CH Yoğunluğu (cpu)	CSH Yoğunluğu (cpu)	CAH	C2S/C3S Yoğunluk
KN	40.28	0	0	90	2615	820	1170	437
SD5	42.43	5	0	90	1740	837	1164	408
SD10	43.28	10	0	90	1720	966	495	411
SD15	44.59	15	0	90	903	1043	613	414
SD20	43.37	20	0	90	473	1047	477	405
UK5	40.59	0	5	90	2435	849	600	425
UK10	41.95	0	10	90	1374	951	415	373
UK15	41.56	0	15	90	1729	1065	748	453
UK20	40.33	0	20	90	1263	1092	586	521
SDUK5	41.56	2,5	2,5	90	1746	837	1223	418
SDUK10	41.69	5,0	5,0	90	1729	918	592	424
SDUK15	42.84	7,5	7,5	90	1160	971	893	566
SDUK20	41.83	10	10	90	744	1061	503	536

Basınç dayanımı elde edilirken yukarıdaki tabloda verilen etkenlerin olumlu ya da olumsuz etkisi olabileceği düşünülmüş ve çıktıdan elde edilen sonuçlar deneysel yoldan elde edilen basınç dayanımları ile kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.10. SEM analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (7 gün)

Numune Grupları	Basınç Dayanımı (MPa)	SD miktarı (%)	UK miktarı (%)	Yaş (Gün)	CH Oranı (%)	CSH Oranı (%)	Etrenjit (%)	Boşluk vd. (%)
KN	32,49	0	0	7	25,20	65,10	5,80	3,90
SD5	32,52	5	0	7	23,70	68,60	4,10	3,60
SD10	33,62	10	0	7	19,10	75,40	3,00	2,50
SD15	34,42	15	0	7	10,30	85,10	2,40	2,20
SD20	33,70	20	0	7	7,20	88,90	1,50	2,40
UK5	31,28	0	5	7	27,30	60,40	6,10	6,20
UK10	30,48	0	10	7	17,30	71,50	5,10	6,10
UK15	29,28	0	15	7	21,80	67,70	4,90	5,60
UK20	29,07	0	20	7	22,60	60,70	7,80	8,90
SDUK5	31,80	2,5	2,5	7	28,30	57,10	6,70	7,90
SDUK10	32,80	5,0	5,0	7	21,50	67,10	5,00	6,40
SDUK15	33,58	7,5	7,5	7	15,10	77,50	3,30	4,10
SDUK20	31,90	10	10	7	19,30	73,40	3,40	3,90

Çizelge 4.11. SEM analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (28 gün)

Numune Grupları	Basınç Dayanımı (MPa)	SD miktarı (%)	UK miktarı (%)	Yaş (Gün)	CH Oranı (%)	CSH Oranı (%)	Etrenjit (%)	Boşluk vd. (%)
KN	38,34	0	0	28	19,40	74,10	4,10	2,40
SD5	41,71	5	0	28	16,70	79,60	2,30	1,40
SD10	42,10	10	0	28	15,20	82,20	1,50	1,10
SD15	43,13	15	0	28	10,30	88,10	1,00	0,60
SD20	41,41	20	0	28	7,10	91,20	1,00	0,70
UK5	39,62	0	5	28	15,90	78,70	2,10	3,30
UK10	40,69	0	10	28	13,60	81,30	1,90	3,20
UK15	40,05	0	15	28	14,70	80,80	2,40	2,10
UK20	38,91	0	20	28	16,30	78,50	1,70	3,50
SDUK5	40,36	2,5	2,5	28	19,10	74,40	3,90	2,60
SDUK10	41,24	5,0	5,0	28	18,30	75,60	3,60	2,50
SDUK15	42,84	7,5	7,5	28	16,40	78,70	2,30	2,60
SDUK20	40,60	10	10	28	19,30	74,90	3,10	2,70

Çizelge 4.12. SEM analizine göre basınç dayanımına etki eden faktörler (90 gün)

Numune Grupları	Basınç Dayanımı (MPa)	SD miktarı (%)	UK miktarı (%)	Yaş (Gün)	CH Oranı (%)	CSH Oranı (%)	Etrenjit (%)	Boşluk vd. (%)
KN	40,28	0	0	90	16,60	80,40	1,70	1,30
SD5	42,43	5	0	90	10,90	85,70	1,50	1,90
SD10	43,28	10	0	90	8,80	88,30	0,80	2,10
SD15	44,59	15	0	90	8,60	88,40	1,20	1,80
SD20	43,37	20	0	90	4,80	92,70	0,00	2,50
UK5	40,59	0	5	90	7,70	89,20	1,00	2,10
UK10	41,95	0	10	90	8,40	87,10	1,60	2,90
UK15	41,56	0	15	90	9,10	88,60	1,00	1,30
UK20	40,33	0	20	90	11,30	87,00	0,00	1,70
SDUK5	41,56	2,5	2,5	90	11,20	82,60	3,40	2,80
SDUK10	41,69	5,0	5,0	90	10,30	83,70	3,30	2,70
SDUK15	42,84	7,5	7,5	90	9,80	84,60	1,10	4,50
SDUK20	41,83	10	10	90	14,50	81,60	1,00	2,90

4.6.2. XRD analiz verileri ile dayanım elde edilmesi

Yukarıdaki çizelge doğrultusunda XRD analizi ile numunelerden 7, 28 ve 90 günlük yaşta elde edilen CH, CSH, CAH, C₂S-C₃S ve silis dumanı ve uçucu kül oranları giriş parametresi, beton basınç dayanımı ise çıktı olarak kabul edilmiş ve basınç dayanımının girdilere bağlı olarak değişimi ampirik olarak ifade edilmiştir.

Lineer Model

İlk olarak lineer regresyon fonksiyonu kullanılarak yukarıda verilmiş olan girdi parametrelerinin basınç dayanımı üzerine etkisi ampirik ifade oluşturulmuştur. Programın çalıştırılması sonucunda aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir (**EK 1**).

$$\text{Basınç Dayanımı} = [(0,086 * GÜN) - (14,555 * UK) + (0,019 * CSH) - (0,039 * C_2S - C_3S) + (34,789)] \text{ (7 günden itibaren)}$$

Burada;

CSH : Kalsiyum silikat hidrat yoğunluğu

UK : Uçucu kül oranı

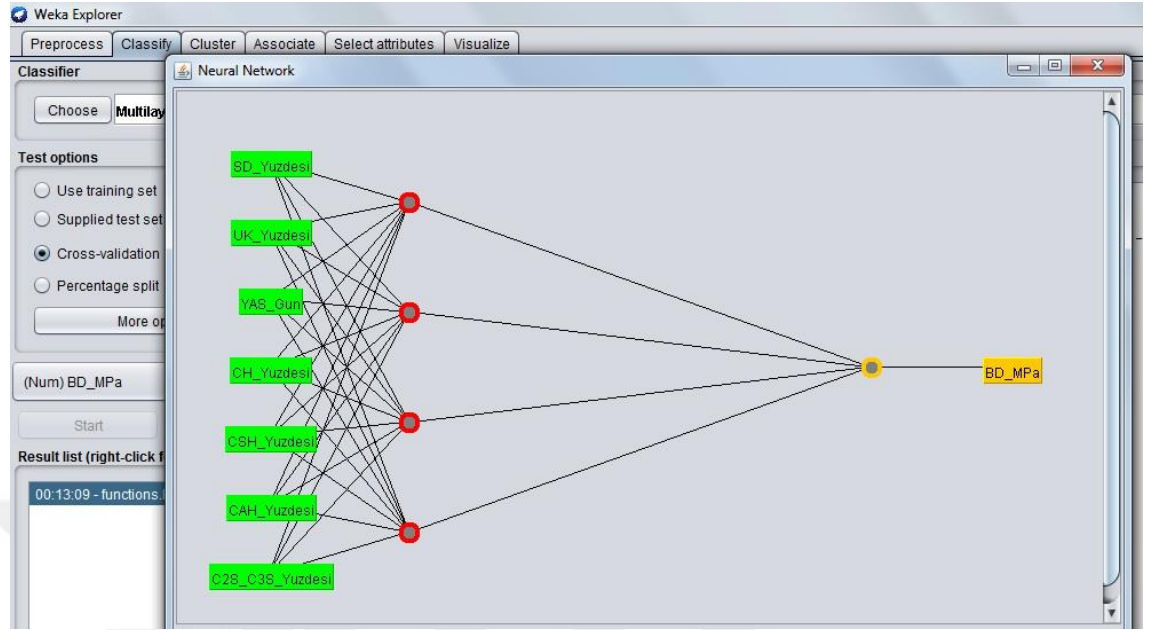
GÜN : Betonun gün olarak yaşı

C₂S-C₃S: C₂S-C₃S yoğunluğu

Elde edilen ampirik bağıntı incelendiğinde betonun dayanımında yaş ve CSH yoğunluğu pozitif etki ederken uçucu külün ve C₂S-C₃S ise negatif etki yaptığı görülmektedir. Deneysel çalışmalar sonunda elde edilen basınç dayanımı incelendiğinde silis dumanının betonun dayanımını bütün yaşlarında arttırdığı ve uçucu külün betonun dayanımını ileri yaşlarda arttırdığı tespit edilmiştir. **EK 1**'de verilen program çıktısına bakıldığında lineer bu modelin korelasyon katsayısının 0,836 olduğu görülmektedir. Bu da deneysel verilerden edilen sonuçların geliştirilen model ile %83 oranında doğrulandığını ifade etmektedir.

Yapay Sinir Ağı (YSA) Modeli

Daha geçekçi ve bütün parametreleri dikkate alan bir model oluşturulması için program aynı datalar ile çok katmanlı algılayıcı modunda (MultilayerPerception) analiz yapılmıştır.



Şekil 4.93. Geliştirilen model katmanları (XRD)

Girdi dataları hazırlanan program en iyi sonuçları veren 2 Node altında çalıştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir (EK 2).

Program çalışma bilgilerine bakıldığında hesaplamalarda Sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Program için çeşitli Node sayılarında deneme yapılmış ve en uygun ve gerçeğe en yakın sonuçlar 2 Node'lu fonksiyondan elde edilmiştir. Genel ifade ile basınç dayanımı aşağıdaki gibi olmaktadır.

YSA analiz sonucunda elde edilen her girdi değeri kendi ağırlığı ile çarpılarak toplama (birleştirme) fonksiyonunda toplanmış ve böylece net gelen girdi elde edilmiştir.

$$\text{Net} = w_{ji} x_i + \theta_j$$

Biçiminde ifade edilen toplama fonksiyonunda:

Net : Nöronunun net girdisini,

w_{ji} : j ve i nöronları arasındaki bağlantının ağırlığını,

x_i : i nöronunun çıktısını,

θ_j : eşik değeri ifade etmektedir.

$$F(Net) = \frac{1}{1+e^{-Net}}$$

Analiz sonucunda oluşan 4 node'lu sigmoid toplam net fonksiyon aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$Node1 = \frac{1}{1+e^{-[(-0,057*SD) - (0,194*UK) + (4,876*YAŞ) - (1,534*CH) + (0,131*CSH) - (1,122*CAH) + (0,002*CS) + 3,140]}}$$

$$Node2 = \frac{1}{1+e^{-[(1,90*SD) + (1,305*UK) - (0,571*YAŞ) - (0,331*CH) + (0,099*CSH) - (0,78*CAH) + (0,505*CS) - 1,196]}}$$

$$Node3 = \frac{1}{1+e^{-[(-1,046*SD) - (0,545*UK) + (0,269*YAŞ) + (1,297*CH) + (0,080*CSH) + (0,284*CAH) + (0,532*CS) - 0,781]}}$$

$$Node4 = \frac{1}{1+e^{-[(1,127*SD) - (0,697*UK) - (0,786*YAŞ) + (0,152*CH) + (1,093*CSH) + (0,427*CAH) + (0,572*CS) - 0,884]}}$$

EK 2'de program çıktısından elde edilen değerler yukarıdaki ifadede yerine konularak sadeleştirilirse net fonksiyonuna ait ifade aşağıdaki şekilde oluşmaktadır. Node 0 fonksiyonu lineer olarak verilmiştir.

$$\text{Basınç Dayanımı (Node 0)} = (2,031*Node1) - (1,404*Node2) - (0,596*Node3) + (0,822*Node4) - 0,934 \text{ (7 günden itibaren)}$$

Burada;

SD : Silis dumanı yüzdesi

UK : Uçucu kül yüzdesi

YAŞ : Betonun gün olarak yaşı

CH : Kalsiyum hidroksit yoğunluğu

CSH : Kalsiyum silikat hidrat yoğunluğu

CAH : CAH yoğunluğu
 C₂S-C₃S:C₂S-C₃S yoğunluğunu

ifade etmektedir.

Hesaplanan net değeri aktivasyon fonksiyonunda yerine yazıldığında formülasyonun tam sonucu elde edilmiş edilecektir. EK 2’de verilen program çıktısına bakıldığında yapay sinir ağı bu modelin korelasyon katsayısının 0,962 olduğu görülmektedir. Bu da deneysel verilerden edilen sonuçların geliştirilen model ile %96 oranında doğrulandığını ifade etmektedir.

4.6.3. SEM analiz verileri ile dayanım elde edilmesi

Yukarıdaki çizelge doğrultusunda SEM analizi ile numunelerden 7, 28 ve 90 günlük yaşta elde edilen CH, CSH, etrenjit, boşluk, ve silis dumanı ve uçucu kül oranları giriş parametresi, beton basınç dayanımı ise çıktı olarak kabul edilmiş ve basınç dayanımının girdilere bağlı olarak değişimi ampirik olarak ifade edilmiştir.

Lineer Model

İlk olarak lineer regresyon fonksiyonu kullanılarak yukarıda verilmiş olan girdi parametrelerinin basınç dayanımı üzerine etkisi ampirik ifade oluşturulmuştur. Programın çalıştırılması sonucunda aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir (EK 3).

Basınç Dayanımı = [(0,066*GÜN) – (1,317*BOŞLUK) + (39,702)] (7 günden itibaren)

Burada;

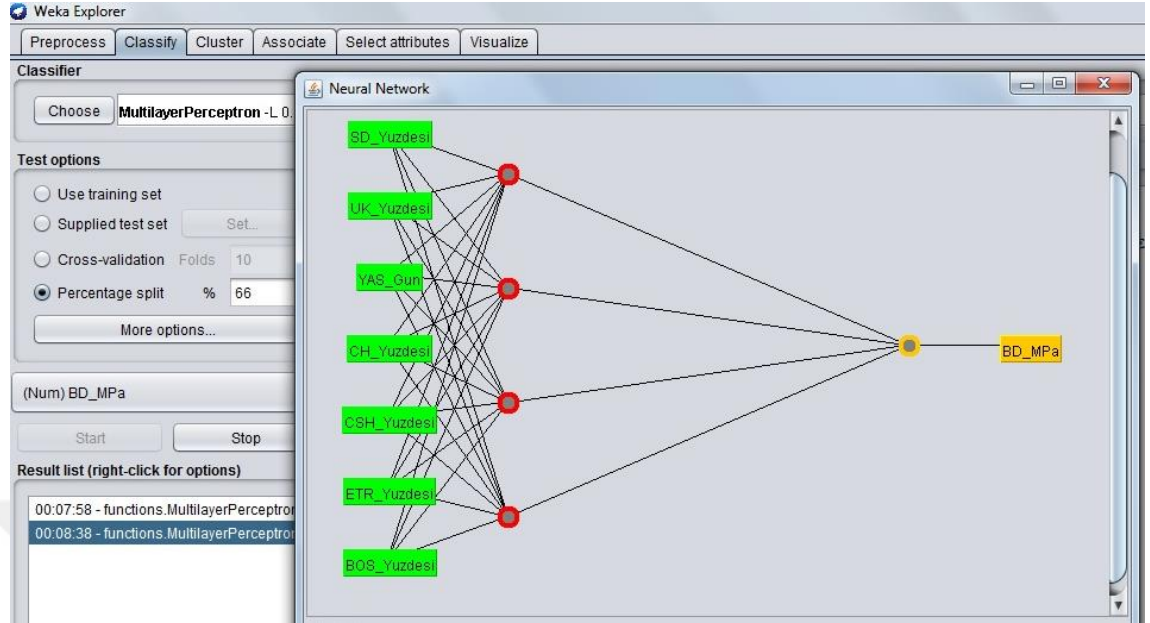
YAŞ : Betonun gün olarak yaşı

BOŞLUK: İncelenen kesitteki boşluk oranı (%)

Elde edilen ampirik bağıntı incelendiğinde betonun dayanımında yaş pozitif etki ederken boşluk ise negatif etki yaptığı görülmektedir. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlara bakıldığında SD'nin bütün yaşlarda, uçucu külün ileri yaşlarda dayanımı artırdığı görülmüştür. Ancak modelde ana parametre olarak boşluğun ve yaşı daha baskın olduğu görülmüştür. **EK 3**'de verilen program çıktısına bakıldığında lineer bu modelin korelasyon katsayısının 0,881 olduğu görülmektedir. Bu da deneysel verilerden edilen sonuçların geliştirilen model ile %88 oranında doğrulandığını ifade etmektedir.

Yapay Sinir Ağı (YSA) Modeli

Lineer modelde kullanılan CH, CSH, etrenjit, boşluk, ve silis dumanı ve uçucu kül parametreleri girdi olarak alınmış ve bütün parametreleri dikkate alan bir model oluşturulması için program aynı datalar ile çok katmanlı algılayıcı modunda (MultilayerPerception) analiz yapılmıştır. Program çalışma bilgilerine bakıldığında hesaplamalarda Sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Program için çeşitli Node sayılarında deneme yapılmış ve en uygun ve gerçeğe en yakın sonuçlar 4 Node'lu fonksiyondan elde edilmiştir. Genel ifade ile basınç dayanımı aşağıdaki gibi olmaktadır.



Şekil 4.94. Geliştirilen model katmanları (SEM)

YSA analiz sonucunda elde edilen her girdi değeri kendi ağırlığı ile çarpılarak toplama (birleştirme) fonksiyonunda toplanmış ve böylece net gelen girdi elde edilmiştir.

$$Net = w_{ji} x_i + \theta_j$$

Biçiminde ifade edilen toplama fonksiyonunda:

Net : nöronunun net girdisini,

w_{ji} : j ve i nöronları arasındaki bağlantının ağırlığını,

x_i : i nöronunun çıktısını,

θ_j : eşik değeri ifade etmektedir.

$$F(Net) = \frac{1}{1+e^{-Net}}$$

Girdi dataları hazırlanan programda en iyi sonucu veren 4 node altında çalıştırılmış ve analiz sonucunda oluşan sigmoid toplam net fonksiyon aşağıdaki şekilde elde edilmiştir (**EK 4**).

$$Node1 = \frac{1}{1 + e^{-[-(0,889*SD) + (2,311*UK) + (4,663*YAŞ) + (0,521*CH) + (0,710*CSH) - (0,547*ETR) - (3,975*BOŞ) + 2,084]}}$$

$$Node2 = \frac{1}{1 + e^{-[(0,208*SD) + (1,590*UK) - (0,211*YAŞ) + (1,530*CH) - (1,006*CSH) + (0,558*ETR) - (0,349*BOŞ) - 0,949]}}$$

$$Node3 = \frac{1}{1 + e^{-[(0,622*SD) - (0,552*UK) - (0,756*YAŞ) + (0,195*CH) - (0,615*CSH) + (1,36*ETR) + (7,48*BOŞ) - 0,490]}}$$

$$Node4 = \frac{1}{1 + e^{-[(1,169*SD) + (0,071*UK) - (0,552*YAŞ) - (1,269*CH) + (0,998*CSH) - (0,435*ETR) - (0,263*BOŞ) - 0,299]}}$$

EK 4'de program çıktısından elde edilen değerler yukarıdaki ifadede yerine konularak sadeleştirilirse Sigmoid net fonksiyonuna ait ifade aşağıdaki şekilde oluşmaktadır. Node 0 fonksiyonu lineer olarak verilmiştir.

$$\text{Basınç Dayanımı (Node 0)} = (2,048*Node1) - (0,948*Node2) + (1,882*Node3) + (0,609*Node4) - 1,661 \text{ (7 günden itibaren)}$$

Burada;

SD : Silis dumanı yüzdesi
 UK : Uçucu kül yüzdesi
 YAŞ : Betonun gün olarak yaşı
 CH : Kalsiyum hidroksit yoğunluğu
 CSH : Kalsiyum silikat hidrat yoğunluğu
 ETR : Kesitteki etrenjit yüzdesi
 BOŞ : Kesitteki boşluk yüzdesi
 ifade etmektedir.

Hesaplanan Net değeri aktivasyon fonksiyonunda yerine yazıldığında formülasyonun tam sonucu elde edilmiş edilecektir. **EK 4'**de verilen program çıktısına bakıldığında

lineer bu modelin korelasyon katsayının 0,976 olduğu görülmektedir. Bu da deneysel verilerden edillen sonuçların geliştirilen model ile %98 oranında doğrulandığını ifade etmektedir.

4.6.4. SEM ve XRD modellerinin karşılaştırılması

SEM ve XRD analizinden elde edilen verilen doğrultusunda dört farklı model geliştirilmiştir. SEM lineer modeli %88, YSA modeli ise %97 oranında doğru sonuç verirken, XRD lineer modeli %83, YSA modeli ise %96 oranında doğru sonuç vermiştir.

Lineer modeller karşılaştırıldığında SEM modeli yaş ve boşluk yüzdesini girdi parametresi kabul ederken, XRD modeli ise uçucu kül, yaş, CSH yüzdesi ve $C_2S_C_3S$ yüzdesini girdi parametresi olarak kabul etmiştir. Bu iki modelde uçucu kül, $C_2S_C_3S$ ve boşluk basınç dayanımını azaltıcı yönde etkilerken, yaş ve CSH ise basınç dayanımını artırıcı yönde etkilemiştir. Lineer modelde SEM verileri ile geliştirilen model XRD verileri ile geliştirilen modelden %6 daha fazla gerçeğe yakın sonuç vermiştir. YSA modelleri karşılaştırıldığında SEM verileri ile geliştirilen model XRD verileri ile geliştirilen modelden %1 daha fazla gerçeğe yakın sonuç vermiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Silis dumanı ve uçucu kül ikameli betonların basınç dayanımı 7 günlük yaşta en yüksek 34,42 N/mm²'lik dayanım ile SD15 katkı durumunda, en düşük 29,07 N/mm² değeri ile UK20 katkı durumunda elde edilmiştir. 28 günlük yaşta basınç dayanımı en yüksek 43,13 N/mm²'lik dayanım ile SD15 beton numunesi ve en düşük basınç dayanımı ise 38,34 N/mm² değeri ile KN betonundan elde edilmiştir. 90 günlük yaşta basınç dayanımında en yüksek dayanım 44,59 N/mm²'lik dayanım ile SD15 beton numunesinden ve en düşük basınç dayanımı ise 40,28 N/mm² değeri ile KN betonundan elde edilmiştir.

Silis dumanın kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidratları (C-S-H) ürettiğini fark edilmiş ve böylece betonun basınç dayanımı artmıştır. Silis dumanı çok yüksek yüzey alanına sahip olduğu için, normal beton karışımı için su gereksinimini artırdığı için, iyi işlenebilirlik istenen betonlar için silis dumanının çimento ağırlığının %15'inden daha yüksek miktarlar kullanılması tavsiye edilmez.

X-ışını kırınım analizi katkısız ve mineral katkılı hidratlı çimento numuneleri üzerinde 7, 28 ve 90 günlerde gerçekleştirilmiştir. Silis dumanı içeren beton numunelerinin XRD analizleri incelendiğinde, silis dumanı miktarının artmasıyla birlikte CH kristal fazında düşüş görülmüştür. Silis dumanının miktarının artması C₂S ve C₃S fazlarının yoğunluklarını da düşürdüğü tespit edilmiştir. Azalmış C₂S ve C₂S pikleri muhtemelen klinker fazının daha iyi çözünürlüğü ile ilişkilidir. CH piklerindeki azalmanın sebebi ise muhtemelen silis dumanının pozolanik reaksiyonu ile CH tüketmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Deney sonuçları, numunelerdeki (KN, SD5, SD10, SD15 ve SD20) klinker fazlarının su ile reaksiyona girerek amorf fazları ve portlanditi oluşturmaya devam ettiğini ortaya koymuştur. Ayrıca silis dumanı portlandit ile reaksiyona girerek ilave C-S-H fazlarını oluşturmaktadır. Silis dumanı ile en yüksek portlandit madde tüketimi SD20 (çimento

ağırlığının %20'si silis dumanı) karışımında oluşurken, en yüksek basınç mukavemeti SD15 (çimento ağırlığının %15'i silis dumanı) karışımında elde edilmiştir.

XRD analizinde, beton içerisinde çimento yerine ikame edilen silis dumanı (SD) miktarının oluşan C-S-H yoğunluğu ile 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda doğru orantılı olduğu görülmüştür. SD-CSH ilişkisi grafiği incelendiğinde ikame edilen SD oranı ile CSH arasındaki polinomda 7 günlük yaşta R kare değeri 0,9438, 28 günlük yaşta R kare değeri 0,9432 ve 90 günlük yaşta R kare değeri 0,913 olarak elde edilmiştir. Bu da SD-CSH yoğunluğu arasında güçlü bir ilişki olduğunu ifade etmektedir.

Üretilen beton içerisinde çimento yerine ikame edilen uçucu kül (UK) miktarının oluşan C-S-H yoğunluğu ile 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda doğru orantılı olduğu görülmüştür. SD-CSH ilişkisi grafiği incelendiğinde ikame edilen UK oranı ile CSH arasındaki polinomda 7 günlük yaşta R kare değeri 0,9524, 28 günlük yaşta R kare değeri 0,5229 ve 90 günlük yaşta R kare değeri 0,9572 olarak elde edilmiştir. Bu da UK-CSH yoğunluğu arasında güçlü bir ilişki olduğunu ifade etmektedir.

Beton içerisinde çimento yerine ikame edilen silis dumanı (SD) miktarının oluşan CH yoğunluğu ile 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda ters orantılı olduğu görülmüştür. SD-CH ilişkisi grafiği incelendiğinde ikame edilen SD oranı ile CH arasındaki polinomda 7 günlük yaşta R kare değeri 0,9589, 28 günlük yaşta R kare değeri 0,9953 ve 90 günlük yaşta R kare değeri 0,9502 olarak elde edilmiştir. Bu da SD-CH yoğunluğu arasında güçlü bir ilişki olduğunu ifade etmektedir.

Beton içerisinde çimento yerine ikame edilen uçucu kül (UK) miktarının oluşan CH yoğunluğu ile 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda doğru orantılı olduğu görülmüştür. SD-CH ilişkisi grafiği incelendiğinde ikame edilen UK oranı ile CH arasındaki polinomda 7 günlük yaşta R kare değeri 0,7247, 28 günlük yaşta R kare değeri 0,8357 ve 90 günlük yaşta R kare değeri 0,7712 olarak elde edilmiştir.

XRD analizinde, alitin numunedeki çoğunluğu temsil ettiğini, bir kısmının hidratlandığını ve hidratlı kalsiyum silikatın üretildiğini görülmüştür. XRD analizinde, alitin numunedeki çoğunluğu temsil ettiğini, bir kısmının hidratlandığını ve hidratlı kalsiyum silikatın üretildiğini görülmüştür. Betonun yaşı ilerledikçe hidratasyon süreci ile birlikte mineral katkıları CH'ı tüketmiş ve C-S-H oluşturmuştur. Silis dumanı ve uçucu kül numunelerindeki portlandit yüzdesi, çimento yerine SD ve UK kullanılması ile birlikte azalmıştır.

SEM analizinde kontrol numunesinde oluşan etrenjit ve boşluklar silis dumanı ve uçucu kül katkısının kullanılması ile azalmış ve daha sıkı yapı oluşmuştur. Mineral katkıların çimentoya göre daha küçük boyutta olması numunelerin daha az boşluklu yapılar elde edilmiştir. Silis dumanı CH'nın morfolojisini de etkilediği görülmüştür. Silis dumanı içermeyen çimentoda, CH, çoğunlukla, birkaç plaka ile CH kitleleri oluşturmaktadır. Silis dumanı karışımlarında ise plakaların yoğunluğu artmıştır. Silis dumanı oranı arttıkça morfolojideki bu değişiklikler daha belirgin hale gelmiştir.

SEM analizinde 7 günlük yaşta en yüksek CH oranı SDUK5 numunesinde, en düşük SD20 numunesinden elde edilirken, en yüksek CSH oranı SD20 numunesinde, en düşük KN numunesinden elde edilmiştir. Görüntü analizinde, 7 günlük yaşta en yüksek etrenjit oranı UK20 numunesinde, en düşük SD20 numunesinde görülmüştür. Boşluk yapısı incelendiğinde en fazla boşluk oranı UK20 numunesinde, en az boşluk ise SD15 numunesinden elde edilmiştir.

SEM analizinde 28 günlük yaşta en yüksek CH oranı KN numunesinde, en düşük SD20 numunesinden elde edilirken, en yüksek CSH oranı SD20 numunesinde, en düşük KN numunesinden elde edilmiştir. Görüntü analizinde, 28 günlük yaşta en yüksek etrenjit oranı KN numunesinde, en düşük SD15 ve SD20 numunelerinde görülmüştür. Boşluk yapısı incelendiğinde en fazla boşluk oranı SDUK5 numunesinde, en az boşluk ise SD15 numunesinden elde edilmiştir.

SEM analizinde 90 günlük yaşta en yüksek CH oranı KN numunesinde, en düşük SD20 numunesinden elde edilirken, en yüksek CSH oranı SD20 numunesinde, en düşük KN numunesinden elde edilmiştir. Görüntü analizinde, 90 günlük yaşta en yüksek etrenjit oranı SDUK5 numunesinde, en düşük SD20 numunelerinde görülmüştür. Boşluk yapısı incelendiğinde en fazla boşluk oranı SDUK15 numunesinde, en az boşluk ise KN ve UK15 numunesinden elde edilmiştir.

Silis dumanı ve uçucu külün beton içyapısına etkisi XRD ve SEM analizine benzer sonuçlar vermiş ve sonuçlar birbirini doğrulamıştır. Mineral katkıları iki analiz sonucunda görüldüğü gibi; yaşa bağlı olarak hidratasyonun ilerlemesi ile oluşan kalsiyum hidroksit miktarı azalmış, kalsiyum silikat hidrat miktarı artmış, etrenjit ve boşluk ise azalmıştır.

Geçmişte diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda genel olarak tek parametre kullanılmış ve içyapı ürünleri tek bir cihaza dayalı olarak incelenmiştir. Buda XRD ile elde edilen sonuçlar ile SEM incelemesinden elde edilen analizleri kıyaslamada yetersiz kalmıştır. Bu çalışma, SEM ve XRD cihazlarının tek başına kullanıldıklarında ortaya çıkan dezavantajları ortadan kaldırmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrı ayrı incelendiğinde literatür çalışmaları ile örtüşmektedir.

SEM ve XRD analizi görüntüsü analizlerinden elde edilen parametreler kullanılarak matematiksel modeller oluşturulmuştur. XRD analizi ile numunelerden 7, 28 ve 90 günlük yaşta elde edilen CH, CSH, CAH, C₂S-C₃S ve silis dumanı ve uçucu kül oranları giriş parametresi, SEM analizinde CH, CSH, etrenjit, boşluk, ve silis dumanı ve uçucu kül oranları giriş parametresi, beton basınç dayanımı ise çıktı parametresi olarak alınmıştır. Geliştirilen modellerde, SEM lineer modeli %88, YSA modeli ise %97 oranında doğru sonuç verirken, XRD lineer modeli %83, YSA modeli ise %96 oranında doğru sonuç vermiştir.

Geliştirilen modeller SEM ve XRD analizlerinden bileşen tahminini yapacak şekilde daha da geliştirilip, beton içyapısının dayanım üzerine etkisini tahribatsız bir şekilde

tahmin etmede kullanılacak pratik bir yöntem olarak kullanılabilecektir. Bu yöntemin daha gerçekçi olması için SEM ve XRD sonuçlarının tamamını içerek birleşik bir model geliştirilebilir.

SEM analizleri kırık yüzey numunler üzerinde yapılmış olduğundan arayüzey incelemesi için yetersiz kalmıştır. Benzer SEM analizleri parlatılmış yüzey numuneleri için yapılarak boşluk ve çimento-agraga ara yüzey bölgesi ve çimento hidretasyon ürünleri için yapılabilir. Yapılan çalışmada SD ve UK kullanılmıştır, benzer çalışmalar yüksek fırın curufu gibi diğer mineral katkıları içinde uygulanarak geliştirilebilir.

Yapılan deneysel çalışmada su/bağlayıcı oranı, kür şartları, agraga gradasyonu, çimento tip ve dozajı ve çalışmada ortam koşulları sabit olarak alınmış ve betonun dışardan herhangi bir etkiye maruz kalmadığı kabul edilmiştir. Ancak beton hizmet süresi boyunca sürekli değişik dış etkilere maruz kalmaktadır. Bu sebeple benzer deneysel çalışmalar farklı ortam koşullarında betonun durabilite deneyleriyle ile genişletililerek daha gerçekçi modeller geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah M.M.A.B., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K.N., Yahya Z., Razak R.A., 2012. Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent. *International Journal of Molecular Sciences*, 13 (1422-0067), 7186-7198.
- Açıkgenç, M., Arazsu, U., Alyamaç, K.E., 2012. Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen Lifli Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri. *SDU International Technologic Science*, 4 (3), 41-54.
- Açıkgenç, M., Arazsu, U., Alyamaç, K.E., 2012. Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen Lifli Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri. *SDU International Technologic Science*, 4 (3), 41-54.
- Almeida A.E.F., Sichieri E.P., 2006. Experimental study on polymer-modified mortars with silica fume applied to fix porcelain tile. *Science Direct*, 42 (2007), 2645-2650.
- Al-Salami A.E., Al-Gawati M.A., 2013. Pozzolan Activity of Nano-Silica and Its Application for Improving Physical, Mechanical and Structural Properties of Hardened Cement. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 3 (6), 376-380.
- Arioz, E., Arioz, Ö., Koçkar, Ö.M., 2013. Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash Based Geopolymers. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 4 (6), 397-400.
- Atış, C.D., Özcan, F., Karahan, O., Bilim, C., Sevim, U.K., Demir, A., 2003. Silis Dumanı Kullanımının Beton BASINÇ Dayanımı Üzerindeki Etkisi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 (2003/4), 121-124.
- Aydın A. C., Karakoç M. B., Düzgün O. A., Bayraktutan M. S., 2010. Effect of low quality aggregates on the mechanical properties of lightweight concrete. *Scientific Research and Essays* 5 (10) 1133-1140.
- Aydın A.C., Arslan A., Gül R., 2007. Mesoscale simulation of cement based materials' time-dependent behavior. *Computational Materials Science* 41, 20-26.
- Aydın A.C., Düzgün O.A., Tortum A., 2008. Optimum conditions for steel fibers on the pumice concrete. *An International Journal for Engineering and Information Sciences* 3 (1) 101-112.
- Aydın A.C., Öz A., Polat R., Mindivan H., 2015. Effects of the different atmospheric steam curing processes on the properties of self-compacting-concrete containing microsilica. *Indian Academy of Sciences* 40 (4) 1361-1371.
- Aydın, A.C., 2004. Çimento Esaslı Malzemelerin Zamana Bağlı Davranışının Sayısal (Lattice) Modellenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aydın, A.C., 2004. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 21, 1149-1154.
- Aydın, A.C., Gül R., 2007. Influence of volcanic originated natural materials as additives on the setting time and some mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* 21, 1277-1281.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2012. Beton. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, 825 s, İzmir.

- Behfarnia, K., Keivan, A., Keivan, A., 2013. The Effect of TiO₂ and ZnO Nanoparticles on Physical and Mechanical Properties of Normal Concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 14 (4), 517-531.
- Bentz D., P., Stutzman P., E., 1999. SEM/X-RAY Imaging of cmenet – based materials. Microscopy applied to building materials, Delft, Netherlands.
- Bingöl A. F., Balaneji H. H., 2018. Determination of Sulfate Resistance of Concretes Containing Silica Fume and Fly Ash. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-12.
- Binici, H., Eken, M., Dinçer, A., 2013. Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (1), 11-20.
- Çalışkan S., 2003. Aggregate/mortar interface: influence of silica fume at the micro and macro level. *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003), 557-564.
- Çayiroğlu İ., 2015. İleri Algoritma Analizi-5, Yapay Sinir Ağları. Karabük Üniversitesi, <http://www.ibrahimcayiroglu.com/dokumanlar/ilerialgoritmaanalizi/ilerialgoritmaanalizi-5.hafta-yapaysiniraglari.pdf> 17.01.2018.
- Celik, K., Meral, C., Mancio, M., Mehta, P.K., Monteiro, P.J., 2014. A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building materials*, 67(9), 14-19.
- Çelik, Ö., Damcı, E., Pişkin, S., 2008. Characterization of fly ash and it effects on the compressive strength properties of Portland cement. *Indian Journal of Engineering and Materials Science*, 15 (2008), 433-440.
- Chen B., Wu K., Yao W., 2003. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 26 (2004), 291-297.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Sinsiri, T., 2007. Effect of Fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and building materials*, 21 (2007), 1534-1541.
- Corr D. J., Juenger M. C.G., Monteiro P. J.M., Bastacky J., 2004. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. *Cement & Concrete Composites* 26, 1007–1012.
- Demir, İ., 2009. Aynı Oranlarda İkame Edilen Silis Dumanı ve Uçucu Külün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. *International Journal Engineering Research and Development*, 1 (2), 1-8.
- Demir, İ., Savaş, M., Yaprak, H., Doğan, O., Özel, G., 2015. Investigation of effect of sepiolite on the properties of autoclaved aerated concrete. *Cement Wapno Beton*, 6, 359-365.
- Demirel B., Gönen T., 2007. Karbon Fiber Takviyeli Betonda Farklı Fiber Boyunun Kapileriteye Etkisi. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları. Elazığ*.
- Demirel, B., Yazıcıoğlu, S., 2007. Uçucu Külün Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi*, 9 (1), 24-40.
- Demirel, B., Yazıcıoğlu, S., 2007. Silis Dumanının Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi*, 11 (1), 103-109.
- Deschner F, Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Dittrich S., Goetz-Neunhoeffter F., Neubauer J., 2012. Hydration of Portland cement with high

- replacement by siliceous fly ash. *Cement and Concrete Research* 42, 1389 – 1400.
- Diamond S., 2004. The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer. *Cement & Concrete Composites* 26, 919–933.
- Diamond S., Kjellsen K.O., 2008. Scanning Electron Microscopic Investigations of Fresh Mortars: Well-defined water-filled Layers Adjacent to Sand Grains. *Cement and Concrete Research* 38, 530 – 537.
- Dorum A., Koçak Y., Yılmaz B., Uçar A., 2010. Uçucu Kül Katkılı Çimento Hidratasyonuna Elektrokinetik Özelliklerin Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (3), 449-457.
- Elena, J., Lucia, M.D., 2012. Applications of XRD and SEM Methods to the Portland Cement Hydration Processes. *Journal of Applied Engineering Science*, 2 (13), 35-42.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Yayıncılık ve İletişim, 741 s, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., Erdem, T.K., 2002. Buhar Kürü Uygulamasında Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörlerden “Bekleme Süresi’nin Önemi. *Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, Ankara.
- Ersoy, Y.H., 2001. Kompozit Malzeme. *Literatür Yayınları*, 227 s, İstanbul.
- Escalante-Garcia J.-I., Sharp J.H., 2004. The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements. *Cement & Concrete Composites* 26, 967-976.
- Folagbade, S.O., 2012. Effect of Fly Ash and Silica Fume on The Sorptivity of Concrete. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4 (9), 4238-4246.
- Gallucci E., Mathur P., Scrivener K., 2010. Microstructural development of early age hydration shells around cement grains. *Cement and Concrete Research* 40, 4–13.
- Gao J.M., Qian C.X., Liu H.F., Wang B., Li L., 2005. ITZ Microstructure Of Concrete Containing GGBS. *Cement and Concrete Research* 35, 1299 – 1304.
- Girao A.V., Richardson I.G., Porteneuve C.B., Brydson R.M.D., 2007. Composition, morphology and nanostructure of C–S–H in white Portland cement pastes hydrated at 55 °C. *Cement and Concrete Research* 37, 1571-1582.
- Goni S., Guerrero A., 2007. SEM/EDX Characterization of the Hydration Products of Belite Cements from Class C Coal Fly Ash. *Journal American Ceramic Society* 12, 3915–3922.
- Gül R., Yavuz M., Aydin A.C., 2010. Predicting the chloride content from the color analysis for various cement-based materials. *Scientific Research and Essays* 5(15) 2004-2015.
- Guo X., Shi H., Dick W. A., 2010. Compressive Strength and microstructural Characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites* 32, 142-147.
- Handoo S.K., Agarwal S., Agarwal S.K., 2002. Physicochemical, Mineralogical, And Morphological Characteristics Of Concrete Exposed To Elevated Temperatures. *Cement and Concrete Research* 32, 1009 – 1018.
- Haq E., Padmanabhan S.K., Licciulli A., 2013. Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers-A comparative study. *Ceramics International*, 40 (2014), 2965-2971.

- Hasar U C., Akkaya G., Aktan M., Gozu C. Aydın A.C., 2009. Water-to-cement ratio prediction using ANNS from non-destructive and contactless microwave measurements. *Progress In Electromagnetics Research* 94, 311-325.
- Hasar U C., Simsek O., Aydın A.C., 2010. Application of varying-frequency amplitude-only technique for electrical characterization of hardened cement-based materials. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52 (5) 801-805.
- Hasdemir S., Tuğrul A. Feldspat, Mika ve Kil Minerallerinin Harç Basınç Dayanımlarına Etkisi.
<http://www.duzce.edu.tr/~serkansubasi/yayinlar/B8.pdf> (25.08.2014).
- Haykin S., 2009. *Neural Networks and Learning Machines*. Pearson Education Ltd, 906 p, New Jersey, USA.
- Igarashi S., Kawamura M., Watanabe A., 2004. Analysis of cement pastes and mortars by a combination of backscatter-based SEM image analysis and calculations based on the Powers model. *Cement & Concrete Composites* 26, 977–985.
- Ikram M., 2016. High volume fly ash-strength development in concrete: a review. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 5 (2), 52-57.
- Jacobsen S., Marchand J., Hornain H., 1995. SEM Observation of The Microstructure of frost Deteriorated and Self-Healed Concretes. *Cement and Concrete Research*, 25 (8), 1781-1790.
- Jiminez A. M. F., Lachowski Ei E., Palomo A., Macphee D. E., 2004. Microstructural characterisation of alkali-activated PFA matrices for waste immobilisation. *Cement & Concrete Composites* 26, 1001–1006.
- Jozic D., Zelic J., 2006. The effect of fly ash on cement hydration in aqueous suspensions. *Faculty of Chemical Technology, Seramics – Silikaty* 50 (2), 98-105.
- Kakooei S., Akil H.M., Jamshidi M., Rouhi J., 2011. The effect of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 27 (2012), 73-77.
- Kılıç G., 2015. Yapay Sinir Ağları İle Yemekhane Günlük Talep Tahmini. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Kjellsen K. O., Justnes H., 2004. Revisiting the microstructure of hydrated tricalcium silicate a comparison to Portland cement. *Cement & Concrete Composites* 26, 947–956.
- Kruse K., Jasso A., Folliard K., Ferron R., Juenger M., Drimalas T., 2012. Characterizing Fly Ash. The University of Texas, CTR Technical Report , 6648 (1)
- Kurt M., Aydın A.C., Gül M.S, Gül R., Kotan T., 2015. The effect of fly ash to self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Indian Academy of Sciences* 40 (4) 1343–1359.
- Kurt M., Gül M.S., Gül R., Aydın A.C., Kotan T., 2016. The effect of pumice powder self-compactability of pumice aggregate lightweight concrete. *Construction and Building Materials* 103, 36-46.
- Lee C.Y., Lee H.K., Lee K.M., 2003. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash – cement systems. *Cement and Concrete Research* 33, 425-431.

- Li X., Ma X, Zhang S., Zheng E., 2013. Mechanical Properties and Microstructure of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Paste and Mortar. *Materials*, 6 (1996-1944), 1485-1495.
- Lilkov V., Dimitrova E., Petrov O.E., 1997. Hydration Process Of Cement Containing Fly Ash And Silica Fume: The First 24 Hours. *Cement and Concrete Research*, 27 (4), 577-588.
- Liu J., Qui Q., Xing F., Pan D., 2014. Permeation Properties and Pore Structure of Surface Layer of Fly Ash Concrete. *Materials*, 7 (1996-1944), 4282-4296.
- Mobasher B., Bonakdar A., Anantharaman S., 2007. Modelling of Sulfate resistance of Flyash Blended Cement Concrete Materials. 2007 World of Coal Ash, Northern Kentucky, USA.
- Mohammed M.K., Dawson A.R., Thom N.H., 2013. Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. *Construction and Building Materials*, 49 (2013), 84-92.
- Muller A. C. A., Scrivener K.L., Skibsted J., Gajewicz A.M., McDonald P.J., 2015. Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from H NMR relaxometry. *Cement and Concrete Research* 74, 116–125.
- Murahari, K., Raop, R., M., 2013. Effect of Polypropylene fibres on the strength properties of fly ash based concrete. *International Journal of Engineering Science Invention*, 2 (5), 13-19.
- Nadaf, M.B., Mandal, J.N., 2013. Experimental Studies and Analyses for Basic Characterization of Fly Ash. *Proceedings of 4th Global Engineering, Science and Technology Conference*, Dhaka, Bangladesh.
- Naik N. M., Kulkarni G. S., Prakash K.B., 2013. Effect of solid wastes on the characteristics behaviour of petroleum products soaked concrete – A Review. *International Journal of Current Engineering and Technology*.
- Narayanan N., Ramamurthy K., 2000. Microstructural investigations on aerated concrete. *Cement and Concrete Research* 30, 457-464.
- Narmluk M., Nawa T., 2011. Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41 (2011), 579-589.
- Nath, P., Sarker P. , 2011. Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete. *Procedia Engineering* 14, 1149–1156.
- Nemati K.M., 1997. Fractur Analysis of Concrete Using Scanning Electron Microscopy. *Scanning*, 19 (6), 426-430.
- Niu D., Jiang L., Bai M., Miao Y., 2012. Study of the performance of steel fiber reinforced to water and salt freezing condition. *Materials and Design*, 44 (2013), 267-273.
- Nochaiya T., Wongkeo W., Chaipanich A., 2010 .Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, 89, 768-774.
- Oğuz E., Aydın A.C., 2003. Prediction of adsorption rate of phosphate removal from wastewater with gaz concrete. *International Journal of Environment and Pollution* 19 (16), 603-614.
- Onaran, K., 2009. *Malzeme Bilimi*. Bilim Teknik Yayınevi, 383 s, İstanbul.
- Özkul, H., Taşdemir, M. A., Tokyay, M., Uyan, M., 2004. *Her Yönüyle Beton*. Türkiye Hazır Beton Birliği, 126 s, İstanbul.

- Patel, M.J., Kulkarni, S.M., 1999. Effect of Polypropylene Fibre on the High Strength Concrete. *Journal of Information Knowledge and Research in Civil Engineering*, 2 (2), 125-129.
- Ramachandran, V.S., Beaudoin, J. J., 1999. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. Noyes Publications / William Andrew Publishing, 964 s, New York.
- Ramujee K., 2013. Strength Properties of Polypropylene Fiber reinforced Concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2 (8), 3409-3413.
- Rana, A., 2013. Some Studies on Steel Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3 (1), 120-127.
- Ranjbar N., Mehrali M., Behnia A., Alengaram U. J., Jumaat M. Z. , 2014. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Materials and Design* 59, 532-539.
- Reese J., Lenz P., Zilch K., Plank J., 2013. Influence of type superplasticizer and cement composition on the adhesive bonding between aged and fresh concrete. *Construction and Building Materials*, 48 (2013), 717-724.
- Rong Z.D., Sun W., Xiao H.J., Wang W., 2013. Effect of silica fume and fly ash on hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water-binder ratios. *Construction and Building Materials*, 51 (2014), 446-450.
- Saad M., Abo-El-Enein S.A., Hanna, G.B., Kotkata, M.F., 1996. Effect of Silica Fume on the Phase Composition and Microstructure of Thermally Treated Concrete. *Cement and Concrete Research*, 26 (10), 1479-1484.
- Sahoo S., 2016. A Review of Activation Methods in Fly Ash and the Comparison in Context of Concrete Strength. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 3 (10), 883-887.
- Sahu S., Badger S., Thaulow N., Lee R.J., 2004. Determination of water-cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy. *Cement & Concrete Composites* 26, 987-992.
- Sahu S., Exline D. L., Nelson M. P., 2002. Identification of thaumasite in concrete by Raman chemical imaging. *Cement and Concrete Research* 24, 347-350.
- Sancak, E., Şimşek, O., 2006. Yüksek Sıcaklığın silis dumanı ve super akışkanlaştırıcı katkılı hafif betona etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 21 (3), 443-450.
- Scrivener K. L., 2004. Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification. *Cement & Concrete Composites* 26, 935-945.
- Scrivener K.L., Füllmann T., Gallucci E., Walenta G., Bermejo E., 2004. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. *Cement and Concrete Research* 34, 1541 – 1547.
- Selvi, M.T., Thandavamoorthy, T.S., 2013. Studies on Properties of Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete without any Admixture. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 3 (1), 411-416.
- Seslija M., Resic A., Radovic N., Vasic M., Dogo M., Jotic M. , 2016. Laboratory Testing of Fly Ash. *Tehnicki Vjesnik* 23 (6), 1839-1848.
- Shi X.S., Collins F.G., Zhao X.L., Wang Q.Y., 2012. Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 237-238 (2012), 20-29.

- Şimşek, O., Erdal, M., Sancak, E., 2005. Silis Dumanının Çelik Lifli Betonun Eğilme Dayanımına Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 20 (2), 211-215.
- Stutzman P. E., Centeno L., 1995. Compositional Analysis of Beneficiated fly ashes. Building and Fire Research Laboratov National Institute of Standards and Technology Gaithersburg.
- Stutzman P.E., 2001. Scanning electron microscopy in concrete petrography. The American Ceramic and Society 59-72.
- Stutzman, P., 2004. Scanning Electron Microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. Cement and Concrete Composites, 20 (8), 957-966.
- Subaşı, S., Kap, T., Beycioğlu, A., Çullu, M., Uçucu Kül Katkı Miktarının Beton İşlenebilirliği ve Sertleşme Sürelerine Etkisi.
- Sümer, B., Sarıbıyık, M., 2013. Betonda silis dumanı ve polipropilen lif kullanımının beton özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri dergisi 17 (29), 217-224.
- Sun Z., Xu Q., 2008. Micromechanical analysis of polyacrylamide-modified for improving strengths. Materials Science and Engineering A, 490 (2008), 181-192.
- Sun Z., Xu Q., 2009. Microscopic, physical and mechanical of polypropylene fiber reinforced concrete. Materials Science and Engineering A, 527 (2009), 198-204.
- Talero R., 1996. Comparative XRD Analysis Ettringite Originating From Pozzolan and From Portland Cement. Cement and Concrete Research, 26 (8), 1277-1283.
- Tangüler M., Gürsel P., Meral Ç. , 2015. Türkiye’de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi. ResearchGate.
- Tasong W. A., Lynsdale C.J., Cripps J. C., 1999. Aggregate-cement paste interface Part I. Influence of aggregate geochemistry. Cement and Concrete Research 29, 1019–1025.
- Temiz H., Karakeçi A.Y., 2002. An investigation on microstructure of cement paste containing fly ash and silica fume. Cement and Concrete Research 32, 1131-1132.
- Termkhajornkit P., Nawa T., Kurumisawa K., 2006. Effect of water curing conditions on the hydration degree and compressive strengths of fly ash-cement paste. Cement and Concrete Composites, 28 (2006), 781-789.
- Thaulow N, Jakobsen U. H. and Clark B., 1996. Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete Railroad ties: sem-edx and x-ray diffraction analyses. Cement and Concrete Research, 26 (2), 309-318.
- Thomas M.D.A., Shehata M.H., Shashiprakash S.G., Hopkins D.S., Cail K., 1999. Use of ternary cementitious systems containing silica fume and fly ash in concrete. Cement and Concrete Research 29, 1207-1214.
- Tohumcu İ., Bingöl A. F., 2013. Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkili Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri ve Basınç Dayanımları. DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 15 (2), 31-44.
- Tokay M., 2013. Betonda UK, GYFC ve SD’nin Rolü: Mevcut Bilgi Birikimi. [http://www.thbb.org/Files/File/beton2013bildiriler/Beton2013cagrilibildiriler / \[201-238\]](http://www.thbb.org/Files/File/beton2013bildiriler/Beton2013cagrilibildiriler_/[201-238]) (22.08.2014).
- Topçu İ. B., Canbaz M., 2004. Silis Dumanlı Betonlarda Donma-Çözülme Etkisinin İncelenmesi. <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/11145.pdf> (02.04.2017).

- Topçu İ.B., 2016. Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. ResearchGate.
- Topçu İ.B., Canbaz M., 2002. Silis Dumanlı Betonların Ara Yüzeylerinin İncelenmesi. Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, Ankara.
- Türk K., Karataş M., Ulucan Z.Ç., 2008. Farklı Oranlarda Silis Dumanı İkameli Kendiliğinden Sıkışan Betonun Mühendislik Özellikleri. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20 (1), 165-174.
- Ukrainezyk, N., Ukrainezyk, M., Sipusic, J., Matusinovic, T., 2006. XRD and TGA Investigation of Hardened Cement Paste Degradation. 11. Conference on Materials, Processes, Friction and Wear, Vela Luka.
- Uzbaş, B., 2004. Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Vairagade, V.S., Kene, K.S., 2012. Experimental Investigation on Hybrid Fiber Reinforced Concrete. International Journal of Engineering Research and Applications, 2 (3), 1037-1041.
- Vidivelli, B., Mageswari, M., 2010. Study on Fly Ash Concrete Using SEM Analysis. Journal of Environmental Research and Development, 5 (1), 46-52.
- Wang S., Baxter L. Fonseca F., 2007. Biomass fly ash in concrete: SEM, EDX and ESEM analysis. Science Direct, 87 (2008), 372-379.
- Winter, N.B., 2012. Scanning Electron Microscopy of Cement and Concrete. WHD Microanalysis Consultants Ltd, 192 p, United Kingdom.
- Wong Y.L., Lam L., Poon C.S., Zhou F.P., 1999. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces. Cement and Concrete Research, 29 (1999), 1905-1913.
- Yalçın, H., Gürü, M., 2006. Çimento ve Beton. Palme Yayınları, 406 s, Ankara.
- Yang R., Buenfeld N. R., 2000. Microstructural Identification Of Thaumasite In Concrete By Backscattered Electron Imaging At Low Vacuum. Cement and Concrete Research 30, 775- 779.
- Yayık, A., 2013. Yapay Sinir Ağı İle Kriptoloji Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Yıldırım S.T., Ekinci C.E., 2006. Çelik Cam ve Polipropilen Lifli Betonlarda Donam-Çözülme Etkilerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18 (3), 359-366.
- Yip, W.K., 1998. Generic Form of Stress-Strain Equations for Concrete. Cement and Concrete Research, 28 (4), 499-508.
- Zheng C., Liua Z., Xub J., Lia X., Yaoa Y., 2007. Compressive Strength and Microstructure of Activated Carbon-fly Ash Cement Composites. Chemical Engineering Transactions, 59, 475-480.
- Zheng W., Li H., Wang Y., 2012. Compressive behavior of hybrid-reinforced reactive powder concrete after high temperature. Materials and Design, 41 (2012), 403-409.

ÖZGEÇMİŞ

Burhan UZBAŞ, 1980 yılında İskenderun’da doğdu. 1998 yılında Uzundere Lisesi’ni bitirdi. 1999 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2004 yılında mezun oldu. Mezun olduktan sonra Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde aynı bölümde Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve 2008 yılında “Çimento Esaslı Malzemelerin Tek Eksenli Yük Altındaki Davranışının Mezo Düzey Modellenmesi” konulu tezini vererek tamamladı. 2004 yılında başladığı iş hayatını, 2006 yılından itibaren petrol ve enerji sektöründe faaliyet gösteren özel bir şirkette başmühendis olarak sürdürmektedir. İngilizce bilmektedir.