

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ YÜKSEK
FIRIN CÜRUFU ETKİNLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdurrahman Selim EMEKLİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ YÜKSEK
FIRIN CÜRUFU ETKİNLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Abdurrahman Selim EMEKLİ
(501121001)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501121001 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Abdurrahman Selim EMEKLİ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ETKİNLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Turan ÖZTURAN
Boğaziçi Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Sunmuş olduğum bu yüksek lisans tez çalışmamda değerli bilgileriyle ve tecrübesiyle bana yol gösteren tez hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yardımlarını benden esirgemeyen İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca bana sonsuz destek sağlayan aileme teşekkürlerimle.

Bu çalışmaya verdikleri destekten ötürü OYAK Beton merkez laboratuvar kalite kontrol sorumlusu Saadettin PEHLİVAN'a ve BASF Yapı Kimyasalları firmasından Osman TEZEL ve satış müdürü İsmail ÇİL'e teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesindeki maddi katkılarından dolayı İ.T.Ü. Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine ve çalışmaya 113M985 nolu proje ile destek veren TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu'na (MAG) teşekkür ederim.

Aralık 2014

Abdurrahman Selim EMEKLİ
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton Bileşenleri	3
1.1.1 Çimento	3
1.1.2 Agregası	3
1.1.3 Beton karma suyu.....	4
1.1.4 Kimyasal katkıları	4
1.1.4.1 Süper akışkanlaştırıcı katkıları	5
1.1.4.2 Priz hızlandırıcı katkıları	6
1.1.5 Mineral katkıları	8
1.1.5.1 Uçucu kül	8
1.1.5.2 Silis dumanı.....	9
1.1.5.3 Yüksek fırın cürufu	10
1.2 Beton Kürü	13
1.2.1 Parafin emülsiyon esaslı.....	15
1.2.2 Akrilik emülsiyon esaslı.....	15
1.2.3 Akrilik reçine esaslı	15
1.2.4 Hidrokarbon reçine esaslı.....	15
1.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton Özellikleri	16
1.3.1 Taze betonun özellikleri.....	17
1.3.1.1 Doldurma yeteneği	18
1.3.1.2 Ayırmaya karşı direnç	18
1.3.1.3 Geçiş yeteneği	18
1.3.2 Reoloji	19
1.3.2.1 Newtona uyan akış	19
1.3.2.2 Newtona uymayan akış	20
1.3.2.3 Taze beton reolojisi	21
1.3.3 Taze beton deneyleri	22
1.3.3.1 Çökme-yayılma deneyi	23
1.3.3.2 V-hunisi deneyi	23
1.3.3.3 U kutusu deneyi	24
1.3.3.4 L kutusu deneyi	25
1.3.3.5 Doldurma kutusu deneyi	25
1.3.3.6 J halkası deneyi	26
1.3.3.7 Ayırışma deneyi	26

1.3.3.8 Viskometre	26
1.4 Tezin Amacı	27
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	29
2.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	29
2.1.1 Çimento	29
2.1.2 Yüksek fırın cürufu	30
2.1.3 Agregası	30
2.1.4 Kimyasal Katkılar	31
2.1.5 Karışım suyu	31
2.1.6 Membran oluşturarak uygulanan kürler	32
2.1.6.1 Akrilik emülsiyon esaslı	32
2.1.6.2 Styren reçinesi esaslı	32
2.1.6.3 Parafin emülsiyon esaslı	32
2.2 Karışımlar	33
2.3 Taze Beton Deneyleri	35
2.3.1 Çökme-akma deneyi	35
2.3.2 V-hunisi deneyi	36
2.3.3 Elek ayırma deneyi	37
2.3.4 Hava miktarı deneyi	38
2.3.5 Birim ağırlık deneyi	38
2.3.6 Reoloji deneyi	39
2.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri	39
2.4.1 Basınç dayanımı deneyi	40
2.4.2 Yarma dayanımı deneyi	40
2.4.3 Üç noktalı eğilme deneyi	40
2.4.4 Kılcallık katsayısı deneyi	41
2.4.5 Elektriksel iletkenlik deneyi	42
2.4.6 Kuruma rötresi (büzülme) deneyi	44
2.4.7 Ağırlık kaybı deneyi	44
2.4.8 İç yapı analizi	45
3. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRMELER.....	47
3.1 Taze Beton Deney Sonuçları	47
3.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri	49
3.2.1 Basınç deneyi	49
3.2.2 YFC etkinlik katsayıları	55
3.2.3 Yarma deneyi	62
3.2.4 Eğilme deneyi	67
3.2.5 İletkenlik deneyi	69
3.2.6 Kılcallık deneyi	75
3.2.7 Kuruma rötresi deneyi	80
3.2.8 Ağırlık kaybı deneyi	83
3.2.9 İç yapı analizi	85
3.2.10 Kür metodlarının performans-maliyet analizi	91
4. SONUÇLAR	93
KAYNAKLAR.....	95
EKLER.....	101
ÖZGEÇMİŞ	135

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CH	: Serbest Kireç Ca(OH)_2
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrate
ESEM	: Environmental Scanning Electron Microscope
KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
Ref	: Referans
SiO_2	: Silisyum dioksit
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : YFC kullanımının beton özelliklerine etkisi	11
Çizelge 1.2 : KYB'nin temel özelliklerini belirlemek için yaygın testler	22
Çizelge 1.3 : KYB özelliklerinin sınıflandırma değerleri.....	23
Çizelge 2.1 : Kullanılan çimentonun yapısal bileşeni değerleri	29
Çizelge 2.2 : Kullanılan çimentonun basınç dayanımları sonuçları	29
Çizelge 2.3 : YFC kimyasal bileşeni	30
Çizelge 2.4 : Kullanılan agreganın özellikleri ve elek analizleri.....	30
Çizelge 2.5 : Masterglenium 51'in teknik özellikleri	31
Çizelge 2.6 : X-Seed 100'ün teknik özellikleri	31
Çizelge 2.7 : Masterkure 101 teknik özellikleri.....	32
Çizelge 2.8 : Masterkure 181 teknik özellikleri.....	32
Çizelge 2.9 : Masterkure 215 teknik özellikleri.....	33
Çizelge 2.10: Karışımların ince malzeme ve katkı miktarları	34
Çizelge 2.11: Özdirenç ile korozyon seviyesi arasındaki korelasyon	43
Çizelge 3.1 : Taze beton sonuçları.....	47
Çizelge 3.2 : Su kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları.....	49
Çizelge 3.3 : Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları	50
Çizelge 3.4 : Hava kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları	50
Çizelge 3.5 : Akrilik kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları	50
Çizelge 3.6 : Parafin kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları	51
Çizelge 3.7 : Reçine kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları.....	51
Çizelge 3.8 : Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin k değerleri (28 günlük).....	56
Çizelge 3.9 : Sentetik C-S-H içeren numunelerin k değerleri (28 günlük)	56
Çizelge 3.10: Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin k değerleri (90 günlük).....	57
Çizelge 3.11: Sentetik C-S-H içeren numunelerin k değerleri (90 günlük)	57
Çizelge 3.12: Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin denklemleri (90 günlük).....	59
Çizelge 3.13: Sentetik C-S-H içeren numunelerin denklemleri (90 günlük).....	60
Çizelge 3.14: Su kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları.....	62
Çizelge 3.15: Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları	63
Çizelge 3.16: Hava kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları	63
Çizelge 3.17: Akrilik kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları	63
Çizelge 3.18: Parafin kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları	63
Çizelge 3.19: Reçine kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları	64
Çizelge 3.20: Su kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m).....	69
Çizelge 3.21: Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)	70
Çizelge 3.22: Hava kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m).....	70
Çizelge 3.23: Akrilik kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)	70
Çizelge 3.24: Parafin kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)	70
Çizelge 3.25: Reçine kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m).....	71
Çizelge 3.26: Su kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları ($\times 10^{-5}$ gr/cm ² sn ^{0,5}). 75	

Çizelge 3.27: Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları ($\times 10^{-5}$ gr/cm ² sn ^{0,5}).....	76
Çizelge 3.28: Hava kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları ($\times 10^{-5}$ gr/cm ² sn ^{0,5}).....	76
Çizelge 3.29: Akrilik kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları ($\times 10^{-5}$ gr/cm ² sn ^{0,5}).....	76
Çizelge 3.30: Parafin kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları ($\times 10^{-5}$ gr/cm ² sn ^{0,5}).....	77
Çizelge 3.31: Reçine kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları ($\times 10^{-5}$ gr/cm ² sn ^{0,5}).....	77
Çizelge 3.32: Deney malzemelerinin fiyat listesi	91
Çizelge 3.33: Kür malzemelerinin fiyat tablosu	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Isı gelişim oranı-zaman grafiği.....	7
Şekil 1.2 : YFC parçacıklarının görüntüsü	10
Şekil 1.3 : Taze beton için Newton ve Bingham modeli	20
Şekil 1.4 : Newtona uymayan akış tipleri.....	20
Şekil 1.5 : V-hunisi deney aparatı.....	24
Şekil 1.6 : U-kutusu deney aparatı.....	24
Şekil 1.7 : L-kutusu deney aparatı	25
Şekil 1.8 : Doldurma kutusu deney aparatı.....	25
Şekil 2.1 : Kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi.....	31
Şekil 2.2 : Çökme-Akma deney düzeneği	36
Şekil 2.3 : V-hunisi.....	37
Şekil 2.4 : Havametre aleti.....	38
Şekil 2.5 : Reometre aleti	39
Şekil 2.6 : Kılcallık grafiği	42
Şekil 2.7 : İletkenlik deneyi düzeneği.....	43
Şekil 2.8 : Rötire ölçümlerinin yapıldığı cihaz	44
Şekil 2.9 : ESEM deneyi için kullanılan makine ve bilgisayar	45
Şekil 3.1 : Ref kodlu karışımın moment-dönme hızı grafiği	48
Şekil 3.2 : Su kürü uygulanmış sentetik C-S-H içermeyen numunelerin 90 günlük basınç dayanımları.....	53
Şekil 3.3 : Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları...	54
Şekil 3.4 : Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları.....	55
Şekil 3.5 : Bolomey denklemi için su küründe beklemiş numunenin eşdeğer çimento –YFC miktarı grafiği.....	59
Şekil 3.6 : Sentetik C-S-H içermeyen 28 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği.....	60
Şekil 3.7 : Sentetik C-S-H içeren 28 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği.....	61
Şekil 3.8 : Sentetik C-S-H içermeyen 90 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği.....	61
Şekil 3.9 : Sentetik C-S-H içeren 90 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği.....	61
Şekil 3.10: Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin yarma dayanımları...	66
Şekil 3.11: Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin yarma dayanımları.....	67
Şekil 3.12: Sentetik C-S-H içermeyen karışımların eğilme dayanımları	68
Şekil 3.13: Sentetik C-S-H içeren karışımların eğilme dayanımları	68

Şekil 3.14: Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin özdirenç grafikleri...	73
Şekil 3.15: Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin özdirenç grafikleri.....	74
Şekil 3.16: Ref kodlu karışımın kılcallık grafiği	75
Şekil 3.17: Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin kılcallık katsayıları...	79
Şekil 3.18: Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin kılcallık katsayıları.....	80
Şekil 3.19: Ref kodlu karışımın kuruma rötresi grafiği	81
Şekil 3.20: Sentetik C-S-H içermeyen karışımların deformasyonları (56 günlük)....	81
Şekil 3.21: Sentetik C-S-H içeren karışımların deformasyonları (56 günlük)	82
Şekil 3.22: Ref kodlu karışımın ağırlık kaybı oranı-gün grafiği.....	83
Şekil 3.23: Ref kodlu karışımın yığışımli ağırlık kaybı oranı-gün grafiği	83
Şekil 3.24: Sentetik C-S-H içermeyen karışımların toplam ağırlık kaybı oranları....	84
Şekil 3.25: Sentetik C-S-H içeren karışımların toplam ağırlık kaybı oranları.....	84
Şekil 3.26: Etrenjit ve CH yapılarının mikroskop görüntüsü	86
Şekil 3.27: C-S-H yapısının mikroskop görüntüsü	86
Şekil A.1 : 1 günlük su kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü.....	102
Şekil A.2 : 3 günlük su kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü.....	102
Şekil A.3 : 28 günlük su kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü...	103
Şekil A.4 : 1 günlük su kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü..	103
Şekil A.5 : 3 günlük su kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü..	104
Şekil A.6 : 28 günlük su kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü	104
Şekil A.7 : 1 günlük su kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	105
Şekil A.8 : 3 günlük su kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	105
Şekil A.9 : 28 günlük su kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	106
Şekil A.10: 1 günlük su kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü...	106
Şekil A.11: 3 günlük su kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü...	107
Şekil A.12: 28 günlük su kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü.	107
Şekil A.13: 1 günlük su kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	108
Şekil A.14: 3 günlük su kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	108
Şekil A.15: 28 günlük su kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	109
Şekil A.16: 1 günlük su kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	109
Şekil A.17: 3 günlük su kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	110
Şekil A.18: 28 günlük su kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	110
Şekil A.19: 1 günlük su kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü ..	111
Şekil A.20: 3 günlük su kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü ..	111
Şekil A.21: 28 günlük su kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	112
Şekil A.22: 1 günlük su kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	112
Şekil A.23: 3 günlük su kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	113
Şekil A.24: 28 günlük su kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	113
Şekil A.25: 3 günlük hava kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü	114
Şekil A.26: 28 günlük hava kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü	114

Şekil A.27: 3 günlük hava kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü	115
Şekil A.28: 28 günlük hava kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü	115
Şekil A.29: 3 günlük hava kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü .	116
Şekil A.30: 28 günlük hava kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	116
Şekil A.31: 3 günlük hava kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	117
Şekil A.32: 28 günlük hava kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	117
Şekil A.33: 3 günlük hava kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	118
Şekil A.34: 28 günlük hava kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	118
Şekil A.35: 3 günlük hava kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	119
Şekil A.36: 28 günlük hava kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü.....	119
Şekil A.37: 3 günlük hava kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	120
Şekil A.38: 28 günlük hava kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	120
Şekil A.39: 3 günlük hava kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	121
Şekil A.40: 28 günlük hava kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	121
Şekil A.41: 1 günlük akrilik kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü	122
Şekil A.42: 3 günlük akrilik kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü	122
Şekil A.43: 28 günlük akrilik kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü.....	123
Şekil A.44: 1 günlük akrilik kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü	123
Şekil A.45: 3 günlük akrilik kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü	124
Şekil A.46: 28 günlük akrilik kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü.....	124
Şekil A.47: 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	125
Şekil A.48: 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	125
Şekil A.49: 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	126
Şekil A.50: 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	126
Şekil A.51: 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	127
Şekil A.52: 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü.....	127

Şekil A.53: 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	128
Şekil A.54: 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	128
Şekil A.55: 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	129
Şekil A.56: 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	129
Şekil A.57: 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	130
Şekil A.58: 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	130
Şekil A.59: 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	131
Şekil A.60: 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	131
Şekil A.61: 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü	132
Şekil A.62: 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	132
Şekil A.63: 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	133
Şekil A.64: 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü	133

YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARDA KÜR KOŞULLARININ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ETKİNLİĞİ ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZET

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB), özellikle son on yılda, yapıların onarım ve güçlendirilmesinde, prefabrik elemanların üretiminde, yoğun donatı ve karmaşık kalıp sistemi içeren yapılarda çok fazla yer almıştır. KYB'lerin içeriğinde yüksek miktarda bulunması gereken ince malzemenin önemli bir kısmı, hem ekonomik nedenlerle hem de projeye uygunluğu bakımından, yüksek fırın cürufu ile ikame edilmektedir. Ancak bu betonlarda oluşan puzolanik reaksiyonun yeterli seviyede gerçekleşebilmesi için sadece Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha uzun süre kür uygulanması gerekmektedir.

Günümüzde gelişen teknoloji sayesinde yapı imalat süreleri de oldukça kısalmıştır. Özellikle prefabrik sektöründe, yapı elemanlarına buhar kürü uygulayarak betonun dayanım kazanması hızlandırılmaktadır. Beton özelliklerine zarar vermeden yüksek erken dayanıma ulaşmak amacıyla alternatif yöntemler geliştirmek üzere birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, bir hidrasyon ürünü olan C-S-H bileşeninin sentetik halde taze betona katılması sonucunda erken dayanım değerlerinin oldukça yükseldiği görülmüştür.

Kendiliğinden yerleşen betonlarda puzolan kullanımı üzerine de oldukça fazla çalışma mevcuttur. Ancak kimyasal kür uygulamalarının puzolan katkılı betonlar üzerindeki etkisi ile ilgili yayınlar oldukça sınırlı sayıdadır. Sentetik C-S-H kullanılan betonlara farklı kür koşullarının uygulandığı araştırmalara ise rastlanmamıştır. Sentetik C-S-H üzerine yapılan çalışmalarda daha çok C-S-H formülasyonunun etkisi üzerinde durulduğu ve çimento hidrasyon sürecinin incelenmiş olduğu görülmüştür. Kimyasal kür malzemeleri ile ilgili çalışmalarda ise su kaybına bağlı olarak gelişen rötre ile mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelendiği ancak içyapısal özelliklerinin üzerinde durulmadığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada KYB'nin maliyetini düşürmek ve bazı özelliklerini iyileştirmek için YFC ile çimento ikame edilip betonun taze ve sertleşmiş halindeki mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla 8 farklı karışım üretilmiştir. Referans betonun çimento miktarı %40 azaltılıp yerine sırasıyla ağırlıkça 1:1, 1:1,25, 1:1,5 ve 1:2 oranlarında YFC ile ikame edilmiştir. Daha sonra bu karışımlara bağlayıcı miktarın %2 si kadar sentetik C-S-H konulmuştur.

Üretilen karışımlar, kalıplara dökülmeden önce taze hal deneyi olarak yayılma çapı ve süresi, V-hunisi, hava içeriği, birim ağırlık, reometre ve ayrışma testleri yapılmıştır. Üretilen beton, Basınç ve yarma deneyi için 10x10x10 cm lik küp kalıba, iletkenlik ve kılcallık için 7x7x28 cm lik kalıba, ESEM, rötre, ağırlık kaybı ve üç noktalı eğilme deneyi için 4 mm lik elekten geçirilip harç fazı elde edilip 4x4x16 cm lik kalıba dökülmüştür. Kalıptan sökülen numunelere sürekli laboratuvar koşullarında hava kürü, 7 gün ıslak çuvalaltı sonra laboratuvarında hava kürü, sürekli 21±2°C kireçli suda, kimyasal kür olarak akrilik, parafin ve reçine malzemelerinin

numune yüzeyine uygulanıp laboratuvar koşullarında bekleme gibi 6 çeşit kür metodu uygulanmıştır.

Taze haldeki betonun deney sonuçlarında istenilen özellikler 1:2'lik ikame dışında sağlanmıştır. Karışıma yüksek fırın cürufu ilave edilince hedef yayılma çapına daha az süper akışkanlaştırıcı katkı ile ulaşılmıştır. Benzer sonuç V-hunisi deneyinde de görülmüştür. Burada cürufun işlenebilirliğe olumlu etkisi görülmüştür. Sentetik C-S-H ilavesinin taze beton özelliklerine olumsuz etkisi nedeniyle karışıma süper akışkanlaştırıcı ilave edilmesi gerekmiştir. Bu da sentetik C-S-H'nin işlenebilirliğe olumsuz etkisini göstermiştir. Reometre deneyinde ölçülen moment ile dönme hızı arasındaki bağıntı ile viskozite katsayıları hesaplanmıştır. Viskozite değeri su/bağlayıcı oranının azalmasıyla artmıştır.

Sertleşmiş betonun mekanik özellikleri erken yaşlarda sentetik C-S-H katkısıyla olumlu yönde gelişirken ileriki yaşlarda olumsuz yönde geliştiği görülmüştür. İleri yaşlarda yüksek fırın cürufunun pozolanik reaksiyonu ile mekanik özellikleri YFC/bağlayıcı oranı %50-53 aralığına (optimum miktar) kadar referansa göre daha fazla gelişmiştir. Daha fazla YFC miktarı kullanılması tüm cüruf taneciklerinin hidrate olamamasına ve bunların daha çok filler etkisi göstermesine neden olmuş, mekanik özellikleri negatif yönde etkilemiştir. Kür metotlarında ise en yüksek performans su ile sağlanmıştır. Kimyasal kürler arasında erken yaşlarda reçine esaslı kür malzemesi daha olumlu sonuçlar verirken ilerleyen yaşlarda akrilik esaslı kür malzemesinin performansı daha yüksek çıkmıştır.

Etkinlik katsayıları Bolomey ve Feret denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. YFC miktarlarının artmasıyla etkinlik katsayıları azalma göstermiştir. Bunun nedeni, birim hacme gelen çimento miktarı değişmediğinden pozolanik reaksiyon için gerekli serbest kirecin, artan cüruf miktarının hidratasyonunu için yeterli olmamasından kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan YFC katkılı betonlarda 28 günden sonra gerçekleşen dayanım artışının havada tutulmuş numunelerde bile sadece çimento ile üretilenlere göre daha fazla olduğu hesaplanan etkinlik değerlerinden anlaşılmıştır. Sentetik C-S-H'nin ise etkinlik değerine olumsuz etki yaptığı görülmüştür.

Kimyasal kür uygulamaları su kaybını azaltması nedeniyle kılcallık, iletkenlik gibi durabilite deneylerinde kür uygulanmayan numunelere oranla daha olumlu etkileri görülmüştür. Betonda YFC kullanılması sadece çimentolu numunelere oranla özdirenç değerlerini ilerleyen yaşlarda 5-7 kat daha fazla geliştirmiştir. YFC miktarının artmasıyla numunelerin kılcallık katsayıları olumlu yönde azalmıştır.

Rötre değerlerinde kimyasal kür uygulanan numuneler hava kürü uygulanan numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Büzülmeyi kısıtlaması sayesinde reçine esaslı kür en iyi sonuçları verirken ağırlık kaybı deneylerinde akrilik esaslı kür malzemesi daha iyi performans göstermiştir.

ESEM görüntülerinde ise erken ve ileriki yaşlarda numunenin içyapısı incelenmiştir. C-S-H, CH ve etrenjit oluşumları analiz edilmiştir.

EFFECT OF CURING CONDITIONS ON THE EFFICIENCY OF GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG IN HIGH PERFORMANCE CONCRETE

SUMMARY

In order to obtain an impermeable and durable concrete, having a sufficient strength, curing applications are of great importance. The poor curing after casting on site may cause insufficient characteristics of concrete, in an irreversible way.

In the last decade, self compacting concrete which is also widely used in repair and strengthening of structures, in the production of prefabricated elements and for the structures which include heavy reinforcement and complicated molding systems. SCCs have significant amount of fine material such as ground granulated blastfurnace slag (GGBS), fly ash and silica fume are commonly used in concrete because they improve durability and reduce porosity; improve the interface with the aggregate. Economics (lower cement requirement), energy, and environmental considerations have had a role in the mineral admixture usage as well as better engineering and performance properties. The lower cement requirement also leads to a reduction for CO₂ generated by the production of cement. The engineering benefits from the use of mineral admixtures in concrete result partly from their particle size distribution characteristics, and partly from the pozzolanic and cementitious reactivity. However, in order to provide sufficient level of pozzolanic reaction, water curing should be extended in longer periods than ordinary portland cement concretes. For this reason, the importance of the application of curing becomes more important.

Recently, construction processes are shortened due to the improved technology. Concrete is expected to accomplish sufficient strength as soon as possible in order to pass to the next step of the construction. Particularly in precast industry, strength gaining of concrete is accelerated by applying steam curing to structural elements. So as to achieve high early strength without any negative effect on concrete properties, numerous studies have been carried out to develop alternative methods. Recently in studies, it is observed that early strength values were substantially increased due to addition of synthetic C-S-H, hydration product of cement, to the fresh concrete.

Sensitivity of pozzolan blended concrete to curing conditions is well-established. Utilization of pozzolan in self compacting concrete has been excessively studied. However, publications upon the impact of curing compounds on the properties of pozzolan added concretes are very limited. Besides, no researches on the properties of synthetic C-S-H added concretes cured in different conditions were found. In the studies on synthetic C-S-H, it can be seen that more emphasis is put on the effect of C-S-H formulation and on the cement hydration process. And in the studies on curing materials, mechanical and physical properties of concretes together with shrinkage due to water loss are examined but are not focused on the micro structural properties of concrete.

In the scope of this experimental study, fresh and hardened properties of self compacting concrete prepared with or without blast furnace slag which not only reduces cost but also improve some mechanical and physical properties of concrete, were investigated. For this purpose, 10 different mixes were produced. The first mixture contained only Portland cement as cementitious material, and in the remaining four concrete mixtures, 40% of the cement was replaced with blast furnace slag by 1:1 or 1.1,25 or 1:1,5 or 1:2. A commercial synthetic C-S-H admixture was also added (2% of binder content) in the same concrete mixture as a second series.

Water/cement ratios and water reducing admixture dosages adjusted so as to obtain 70 ± 3 cm spread. Additionally, spread time, V-funnel, air content, unit weight, rheometry and segregation tests were performed on fresh concrete. Concretes were casted in 10 x 10 x 10 cm cubes, 7 x 7 x 28 cm prismatic molds. Furthermore, mortar phase of concrete obtained from fresh concrete passing 4 mm sieve, and were casted in 4 x 4 x 16 cm prismatic molds. The specimens were divided into 6 groups of curing conditions after demoulding. The first group of concretes were continuously kept in $21 \pm 2^\circ\text{C}$ water, continuously stored in air and stored under wet burlap for 7 days then continuously stored in air. Acrylic, paraffin and resin based curing compounds applied on the surface of concrete specimens of the remaining three groups and kept in laboratory conditions. Compression, splitting, conductivity and capillary tests performed on the concrete samples and shrinkage, weight loss, bending tests and SEM measurements were carried out on mortar specimens.

According to the experimental results of fresh concretes, required properties was maintained except 1:2 substitution. The target spread diameter was achieved with less super plasticizer when incorporated blast furnace slag. Similar results were also seen in the V-funnel test. Positive impact of slag on the workability of concrete was seen.

Due to addition of synthetic C-S-H, more super plasticizer admixture is required to obtain certain workability. This shows the negative impact of synthetic C-S-H on the workability of concrete.

Viscosity was measured by the relation between the measured torque and shear rate of the rheometer test. The viscosity value decreased with blast furnace slag addition but increased with decreasing the water / binder ratio.

The hardened properties of concrete were examined at 9 hours, 1, 3, 7, 28, 90 days. The synthetic C-S-H contributed to hardened concrete mechanical properties developed in a positive direction at early age but no developments were seen in further ages. The highest performance was provided for the water curing method. The resin based curing material showed the best performance at an early age, acrylic based curing compound yielded the best concrete properties in further ages among the chemical cures.

Mechanical strength of blast furnace slag added concretes increased as the amount of blast furnace slag increase. After an optimum point, at around %50 of the total binder content, the additional blast furnace slag did not improve the compressive strength. This can be attributed to the presence of unreacted blast furnace slag, acting as a filler material in the paste.

Efficiency coefficient was reduced with increase of blast furnace slag amount. The reason of reduction is the remnants of unhydrate blast furnace slag particles in cement paste. Efficiency of blast furnace slag was also calculated for each curing methods. It is clearly shown that all the curing methods led to higher values than air curing. Furthermore, according to the efficiency values, after 28 days strength gain of concretes, which contain blast furnace slag, had more than concretes which produced only Portland cement was understood.

Positive effects of curing applications were observed on the durability test such as capillarity and conductivity because of reduction the loss of water. Performance ranking was water, wet burlap, acrylic, paraffin, resin and air curing methods. In addition, blast furnace slag added concrete's resistivity had higher values, 5 to 7 times, against only Portland cement specimens. Capillarity coefficients were decreased by increasing of blast furnace slag amount.

Concrete specimens cured by applying curing compounds exhibited higher efficiency in decreasing drying shrinkage deformation than specimens kept in air. Among the three curing compounds investigated, resin based curing compound had the best performance at shrinkage, acrylic-based curing compound had the best performance at weight loss test.

In the ESEM images, microstructures of the samples were studied at 1, 3 and 28 days of ages. C-S-H, CH and ettringite formations were monitored.

According to performance-cost values, acrylic based cure material is better option than other chemical curing compounds.

Under wet burlap have close performance to water curing methods. Therefore, in the future studies, using under wet burlap then curing compound can be investigated.

1. GİRİŞ

İlk çağlarda insanlar doğada bulunan malzemeleri kullanarak kendileri için yaşam alanları yapmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak kullandıkları harçlar ile uzun süre dayanıklı yapılar inşa etmişlerdir. Sanayi devriminin başlaması ile birlikte iş gücü için insanların kent hayatına geçirildiği dönemde inşaat sektöründe çok fazla gelişme yaşanmıştır. İlk yapay çimentonun Louis Vicat tarafından Fransa'da üretilip, İngiltere'de ilk çimento fabrikasının kurulması, çekme dayanımı düşük diye Joseph Monier'in daha sağlam saksılar üretmek için betona demir çubuklar eklemesi ile betonarmenin keşfedilmesi inşaat sektörünün önünü açmıştır [1]. 1900'lerin başında gelişen beton teknolojisi ile köprü, baraj ve yüksek yapılarda yapı malzemesi olarak beton tercih edilmiştir. I. ve II. Dünya savaşında da yüksek dayanımından dolayı siperler, sığınaklar ve kuleler de betondan yapılmıştır.

Kendiliğinden yerleşen betonlar (KYB) ilk kez su altı beton uygulamaları için geliştirildi. KYB üzerine yazılan ilk bildiri 1989'da Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansında sunulmuştur. Aynı bildirinin 1992'de İstanbul'daki CANMET & ACI Uluslararası Konferansında sunulması KYB kavramının dünyaya yayılmasını hızlandırmıştır. 1994'de Bangkok'daki ACI çalıştayından sonra KYB, dünyadaki araştırmacıların ve mühendislerin ilgi odağı haline gelmiştir. 1996'da New Orleans'da ACI Sonbahar Kongresinde KYB, Amerika ve Kanada'da da iyice yaygın hale geldi; sonuç olarak KYB üzerine dünya ölçeğinde araştırmalar başlamış oldu [2].

KYB'nin en yaygın kullanım alanı olarak donatıların çok yoğun olduğu ve vibratörlerin ulaşamadığı elemanların üretimi sayılabilir. Yüksek perdelerin üretiminde ve betonarme yapıların onarım ve güçlendirme işlerinde KYB kullanılmasına başlanmıştır. Son yıllarda ise KYB'nin yeni bir kullanım alanı olarak prefabrik sektörü öne çıkmıştır [3]. Bu son kullanım alanında vibratör gereksinimini ortadan kaldırdığı için gürültünün zararlı etkilerinden korunmak olanağını da doğurmuştur. Aynı nedenle yerleşim bölgelerinde, gece üretim yapılması gereken durumlarda KYB kullanılabilir. KYB'un diğer bir yararı işçiliği azaltırken yapım

hızını artırmasıdır. Bir yapıda döşeme ve düşey elemanların üretiminin geleneksel betonla üretime göre KYB kullanılması durumunda 1/5 oranında daha kısa sürede gerçekleşebileceği belirtilmiştir [4].

KYB’de akışkanlığı yüksek olan yeni nesil akışkanlaştırıcılar kullanılınca betonun homojen ve uniform olup, ayrışma olmaması için geleneksel betona nazaran daha fazla miktarda ince malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak çimentonun bu kadar yüksek miktarda kullanılması hem ekonomik hem de çevresel nedenlerle sorun teşkil etmektedir. Çimento üretimi, dünyadaki CO₂ emisyonunda ana kaynaklardan biridir. Avrupa çimento birliği verilerine göre, 2008 yılında dünya genelinde 2,83 milyar ton CO₂ emisyonu (yaklaşık %2,3) çimento üretiminde açığa çıkmıştır [5]. Bu nedenle hem ekonomik hem de çevresel sorunları azaltmak için endüstriyel atık malzemesi olan puzolanların kullanımı KYB üretiminde daha fazla önem kazanmıştır. Ayrıca puzolan kullanılması hem puzolanik reaksiyon ile serbest kireci bağlayıp betonun dayanımını sağlayan temel malzeme olan C-S-H oluşturur hem de silis dumanı dışında KYB’nin taze hal özelliklerine de olumlu etki yapar. CH’in bağlanması ile daha boşluksuz ve geçirimsiz beton elde edilir. Puzolan kullanılması son dayanımı yüksek, daha iyi işlenebilirliğe sahip ve daha dayanıklı beton üretimini sağlamaktadır [6].

Mineral katkılı betonlarda bağlayıcı malzemelerin kuru ve sıcak havalarda tam olarak verimli olabilmesi için kür uygulaması çok önemlidir [7]. Şantiye ortamında, rüzgârlı ve sıcak havalarda su kürü uygulamasının zor olduğu kısımlarda veya su eksikliği olan yerlerde alternatif yöntemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Islak bez sarma, polietilen ve polivinil esaslı plastik örtü gibi [8] yöntemlerin yanında betonun karışım suyunun kaybolmasını engellemek amacıyla kimyasal kür malzemelerinin (reçine emülsiyon esaslı, parafin emülsiyon esaslı, hidrokarbon reçine esaslı, zift ve bitüm esaslı, akrilik esaslı) [9] beton yüzeyine uygulanması gibi yöntemler geliştirilmiştir.

Kür etkisi yanında imalat süresini de kısalttığı için bu yöntemlerle aynı şekilde sınıflandırılmayan buhar kürü özellikle prefabrik yapılar için üretilen elemanlarda kullanılmaktadır. Ancak buhar kürü ile priz hızlandırılması betonda iri ve sürekli boşluklu yapıların oluşmasına yol açmaktadır [10,11]. Buna alternatif geliştirilen priz hızlandırıcı katkıları da benzer sonuçlara yol açmaktadır [12]. Son yıllarda çimento hidratasyonunu hızlandırmak için sentetik C-S-H tohumu gibi nanopartiküllerden de

faaydalanılmaktadır. Bu yöntemle, normal Őartlarda kristal gelişimi için gerekli olan çekirdeklenme reaksiyonlarına ihtiyaç kalmamakta, imento hidratasyonunun l evresi kısıalmaktadır [13,14]. Bu sayede erken dayanımı artarken ileriki yaştaki betonun performansına olumsuz etki diğerlerine oranla azalır veya olmayabilir. Ancak yeni olduğu için bu konu hakkında yeterince araştırma yapılmamıŐtır.

1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton Bileşenleri

Geleneksel betonda kullanılan malzemelerin birçoğu KYB içinde kullanılabilir. Kullanılan malzeme özelliklerindeki değişim normal betona nazaran KYB'nin performansına taze halde daha çok etki eder. Bu nedenle seçilen malzemelerin belirli bir standart içinde kalması gerekir [15].

1.1.1 Çimento

Kil ve kalkerin belirli oranlarda karıŐtırılıp 1400°C sıcaklıkta döner fırınlarda piŐirilip priz süresini ayarlamak için yaklaşık %3-5 alçıtaŐı katılarak öğütülmek suretiyle elde edilen, su ile karıŐtırıldıđında hem havada hem de suda katılaŐan hidrolik ve inorganik bağlayıcıdır. 5 tip imento türü vardır:

- Portland imentosu
- Portland-kompoze imentosu
- Yüksek fırın cüruflu imento
- Puzolanik imento
- Kompoze imento

Dayanım sınıfı olarak çimentonun 28 günlük değerleri 32,5; 42,5 ve 52,5 olarak üç grupta mekanik özellikleri incelenir. Normal erken dayanıma sahip olanlar N, yüksek erken dayanıma sahip olanlar R olarak belirtilir. Çimento yapısındaki karma oksitlerin içerikleri mekanik, fiziksel, kimyasal ve durabilite özelliklerini etkilemektedir [16].

1.1.2 Agrega

Mekanik işlem dışında herhangi bir işleme tabi tutulmadan elde edilen kum, çakıl, kırmataş ve ısıl işlem veya diğer uygulamalar ile elde edilen piŐmiŐ toprak ürünü, yüksek fırın cürufu gibi yapay kaynaklı olan malzemelerdir. Tane byklğu olarak

iri ve ince olmak üzere iki sınıfta incelenir. KYB kendi ağırlığı etkisi altında yayılırken agregaların küçük ve yuvarlak boyutlarda olması gerekmektedir [17]. EN 12620 standardına [18] göre 20 mm den büyük agrega kullanılamaz.

Betonun yaklaşık %75'ini mineral kökenli taneli malzemeler oluşturur. Agregalar çimento hamuru ile mekanik bağlantı yaparlar. Betonda kullanılan agreganın teknik avantajı ise betonun sertleştikten sonraki hacim değişikliğini önlemesi veya azaltması, dış etkilere karşı dayanıklılığı artırırken sahip olduğu dayanımla betondan istenilen mukavemet elde edilmektedir [19].

1.1.3 Beton karma suyu

Beton üretiminde çimentonun kimyasal reaksiyona girip mukavemet kazanması için gerekli olan malzemedir. Optimum miktara göre fazla su koymak betonda dayanım kayıplarına sebep olur. Karma suyu taze haldeki betonda işlenebilirliği sağlar. Bu sayede minimum enerji kullanılarak homojen, boşluksuz ve istenilen kıvamda beton elde edilir. Ayrıca TS EN 1008 standardında [20] belirtildiği üzere su içinde bulunan tuz, asit, yağ, şeker, lağım gibi organik maddeler betonun prizine veya ileriki yaşlardaki performansına etki edebileceği için kontrol edilmelidir.

1.1.4 Kimyasal katkılar

Betona çimento, su ve agrega dışında katılan organik veya inorganik malzemelerdir. Kimyasal katkıların toplam miktarı çimento ağırlığının %5'ini geçmemelidir [21]. Katkılar kötü bir betonun performansını iyileştirmez. Her çimento, her agrega türü ve granülometrisi için olumlu sonuç vermeyebilir. Bu nedenle katkının eldeki malzeme ile uyumu araştırılmalıdır. Katkı maddelerinin ana fonksiyonları yanında ikincil bir etkileri de olabilir. Bir özellik düzeltilirken başka özelliği bozmak olasıdır. Birden fazla katkı kullanımında ise bunların birbirine etkisi de önemlidir.

Kimyasal katkıların taze haldeki beton ve harcın şu özelliklerinde şu değişimleri sağlar [22]:

- Akışkanlaştırıcılar ile su bileşeni arttırılmadan işlenebilirliğin artması veya işlenebilirlik değişmeden su bileşeninin azalması
- Priz başlama süresinde gecikme ve hızlanma
- Kuma özelliğinin düzenlenmesi

- Ayrışmada azalma
- Pompalanabilirliğin gelişmesi
- Çökme kaybının azalması
- Kimyasal katkıları sertleşmiş beton ve harçta ise şu değişimleri sağlayabilir.
- Erken çimento hidratasyon süresince ısı çıkartım oranında düşme
- Erken yaşlarda mukavemet gelişim oranında artma
- Basınç, çekme veya eğilme dayanımlarında artma
- Hava sürükleyici ile donma-çözülme direncinde artma
- Buz eritici tuzun neden olduğu zararları azaltma
- Geçirimsizlikte düşme
- Beton ve donatı arasındaki aderansta artma
- Kuruma rötresinde azalma

1.1.4.1 Süper akışkanlaştırıcı katkıları

Akışkanlaştırıcılar betonun taze haldeki işlenebilirliğinin veya kıvamının daha az su kullanılarak elde edilmesini sağlar. Bu sayede dayanımı yüksek betonlar elde edilir.

Çimento tanecik yüzeyleri, geleneksel melamin ve naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı polimerlerde, beton karıştırma işleminin en erken aşamasında kuşatılırlar. Polimer zincirlerinin sülfonik grupları, çimento tanecik yüzeylerinin negatif yükünü artırır ve elektrostatik kuvvet bu tanecikleri iter. Bu elektrostatik mekanizma, çimento hamurunun dağılmasına neden olur ve buna bağlı olarak, beton işlenebilirliğinin daha az su karışımı ile elde edilmesi sağlanır. Bununla beraber hidratasyon işlemi, çimento taneciklerinin suya temas etmesi ile birlikte başlar. Hızla büyüyen hidratasyon kristalleri, taneciklerin yüzey mekaniğini değiştirir, böylece bunların serbestçe dağılımını önler [23].

Şimşek ve arkadaşları [24] beton üretiminde süper akışkanlaştırıcı çeşiti ve oranının belirlenmesini araştırmışlardır. Kimyasal yapısına göre sırasıyla melamin, naftalin formaldehit sülfonat ve modifiye edilmiş linyosülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıların betonun işlenebilirliğini en iyi derecede arttırdığı görülmüştür. Süper akışkanlaştırıcı, bütün karışımlarda kullanılan katkı oranına bağlı olarak

işlenebilirliği arttırmıştır. Katkı oranı arttıkça hava miktarı da çok küçük oranlarda artmıştır. Ayrıca, süper akışkanlaştırıcıların betonun donma – çözülme dayanıklılığını olumlu yönde etkilediği ve modifiye edilmiş linyosülfonatlı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin betonun donma - çözülme dayanıklılığında en iyi sonucu verdiği görülmüştür.

Akışkanlaştırıcı katkıların geliştirilmesi ile elde edilen yeni tip süper akışkanlaştırıcılar sayesinde KYB üretimine olanak sağlanmıştır.

1.1.4.2 Priz hızlandırıcı katkıları

Özellikle soğuk hava şartlarında taze betonun hidratasyonunu çabuklaştırıp hızla priz almasını sağlamaktadırlar. Erken dayanımı arttırdığı için $\sigma_c \geq 5-7$ MPa koşuluna göre dona dayanıklılık sağlar. Başlıca priz hızlandırıcı katkılara örnek olarak alüminat esaslı, kalsiyum esaslı hızlandırıcılar ve sentetik C-S-H verilebilir.

Alüminat esaslı hızlandırıcı

Alüminat esaslı katkılar taze püskürtme betonu için tavanda kalın astar üretimi imkânını sağlar. Yüksek alkali içeriği ve sağlık tehlikesi sebebi ile yaygın olarak kullanılması sınırlıdır. Ayrıca, reaktif agrega bulunduran betonlarda alkali agrega reaksiyonunu arttırabileceği endişesi de mevcuttur [25].

Kalsiyum esaslı hızlandırıcı

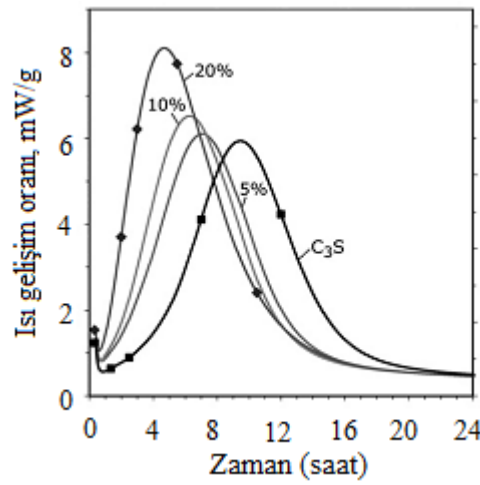
Betonda klor iyonlarının bulunması durumunda, gömülü çelik donatıda korozyon riski ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle hızlandırıcı katkılar klorlu ve klorsuz olarak ikiye ayrılmaktadır. Kalsiyum klorür, C_3S fazına etki ederek uyuma periyodunu düşürerek reaksiyonu hızlandırır. Kalsiyum klorür kadar olmasa da kalsiyum formatta C_3S 'in hidratasyon hızını artırır. Bu sayede betonun erken dayanım kazanması artarken priz süresi kısalmaktadır [26].

Sentetik C-S-H

Katılaşma sırasında atomik diziliş, en düzenli kısa mesafeli düzenden uzun mesafeli düzene veya kristal yapıya kadar değişir. Katılaşma iki aşamadan meydana gelir. Bunlar; çekirdeklenme ve büyümedir. Çekirdeklenme, küçük katı parçacıkların sıvıdan embriyolaşması ile olur. Çekirdek kararlı olmadan önce minimum kritik çapa

gelmelidir. Katının büyümesi atomların sıvıdan oluşan çekirdeklere geçmeleri ile olur ve bu şekildeki büyüme sıvı bitene kadar devam eder [27].

C_3S 'in su ile temas etmesi ve Ca^{+2} , OH^- gibi iyonların su içerisinde çözünmesi ile önemli miktarda ısı üretildiği bilinmektedir. Priz başlangıcından itibaren birkaç saat boyunca (uyuma periyodu) hidrasyon oranı ihmal edilebilir. Bu periyottan sonra hidrasyon süreci hızlanır ve ısı açığa çıkar [28,29]. Hidrasyon sürecini hızlandırmak için örnek olarak kalsiyum klorür kullanılması Şekil 1.1'de görüldüğü gibi uyuma periyodunu kısaltmış ve hidrasyon anında daha fazla ısı çıkmasına neden olmuştur [28].



Şekil 1.1 : Isı gelişim oranı-zaman grafiği

Sentetik C-S-H, 6-12 saatlik erken yaşta çimentonun hidrasyon sürecini hızlandırmak amacıyla tasarlanmış, nanopartiküller içeren kristal tohumlardır. Çekirdeklenme teknolojisine dayanarak gerekli kalsiyum silikat hidrat kristallerinin büyümesi büyük oranda hızlandırılır [30].

Sentetik C-S-H, ısı ile kür metodlarına bir alternatiftir ve hidrasyonun desteklenmesi sayesinde özellikle daha düşük klinker içeriği olan bağlayıcı madde kullanımına yardımcı olduğu söylenmektedir [30].

Alizadeh ve arkadaşları [14] sentetik C-S-H varlığının C_3S 'in hidrasyonuna etkisini incelemişlerdir. Sentetik C-S-H kullanılması C_3S hidrasyonunu hızlandırıp açığa çıkan ısı miktarını arttırmıştır. C-S-H hidrasyon ürünleri özelliklerinin sentetik C-S-H'taki CaO/SiO_2 oranına da bağlı olduğu bulunmuştur. Stokiyometri (C/S oranı) ile C-S-H'n mekanik ve kimyasal özellikleri daha iyi kontrol edilebildiğini test etmişlerdir. C/S oranı olarak 0,8 ve 1,2 kullanmışlardır. C/S oranı 1,2 olanda daha

fazla ısı açığa çıkarken bir haftalık hidratasyon derecesine bakılınca C/S oranı 0,8 olan çok az daha yüksek çıkmıştır.

1.1.5 Mineral katkıları

Mineral katkıları, beton yapımında kullanılan çimentonun, suyun, agreganın ve fiber donatının dışında, beton karışımının içerisine karılma işleminden hemen önce ve karılma işlemi esnasında katılan ince taneli mineral katı parçacıklardır. Volkanik kül, volkanik tuf, diatomlu toprak, pişirilmiş kil, uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı beton yapımında kullanılan başlıca çimento katkıları olup bunlar, puzolanik özelliklidir. Çimentoda kaliteyi arttırmak, ekonomiklik sağlamak ve standartlara uygun çimento üretimi için mineral katkıları kullanılmaktadır.

KYB’larda akışkanlığı sağlamak için yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar kullanılır. Ancak, akışkanlığı tek başına akışkanlaştırıcı katkı kullanarak elde etmeye çalışınca betonda ayrışma problemi ortaya çıkar. Buna çözüm olarak beton içindeki agrega tanelerinin arasındaki sürtünme etkilerini azaltmak için tanelerin birbirinden uzaklaştırılması gerekir. Bu amaçla çimento hamuru miktarı arttırılabilir. Bunun sonucu betonun şekil değiştirme yeteneği artar [31].

Çimento miktarının yüksek olması hem ekonomik hem de çevresel sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle çimentoya alternatif bağlayıcı olarak endüstriyel atık malzemesi olan puzolanik ve filler etkisine sahip mineral katkıları kullanılabilir. YFC dışındaki mineral katkıları tek başına bağlayıcı özelliği olmayan ancak kireç veya çimento ile kullanıldığında hidrolik bağlayıcı özelliği kazanan malzemelerdir. Ayrıca mineral katılardan uçucu kül taze betonun işlenebilirliğini de geliştirir.

Beycioğlu ve Aruntaş [32] yaptıkları çalışmada mineral katkıların geometrik şekilleri ve yüzeylerinin pürüzsüz olması sayesinde betonun su ihtiyacının azaldığı dolayısıyla işlenebilirliğinin geliştiğini gözlemlemişlerdir. YFC ve uçucu külün bağlayıcı malzeme olarak ikame edilmesi ile yayılma, V hunisi, L kutusu, U kutusu ve J halkası deneylerinde KYB’nin taze hal özellikleri olumlu gelişmiştir.

1.1.5.1 Uçucu kül

Termik santrallerin en önemli atık maddesi, toz linyit kömürün yanması ile meydana gelen ve baca gazlarıyla sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Bunlar, elektrostatik yöntemle elektro filtrelerde ve silikonlarda yakalanmakta böylece baca gazlarıyla

atmosfere çıkmaları önlenmektedir. Uçucu küller genellikle küresel yapıda olmakta ve çapları 1-200 mikron arasında değişmektedir [33].

Uçucu kül'ler, ASTM C 618'e göre de iki başlık altında toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla, 1) bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 70'in üzerinde olan F sınıfı uçucu kül. 2) genellikle linyit veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilen ve S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan C sınıfı uçucu küllerdir. Yukarıda belirtilen siliko alüminalı uçucu kül, F sınıfındadır. Siliko kalsik uçucu küllerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfokalsik uçucu küllerin çoğu, C sınıfı uçucu kül olarak isimlendirilmektedir [34].

Bir puzolanik malzeme olan uçucu kül betonda mineral katkı olarak kullanılmasıyla hidrasyon ısı azalır, ileri yaşlarda dayanım artar, işlenebilirlik gelişir, dayanıklılık artar ve atık malzemeler kullanıldığı için hem çevresel açıdan hem de maliyet bakımından önemli derecede fayda sağlanır [33].

1.1.5.2 Silis dumanı

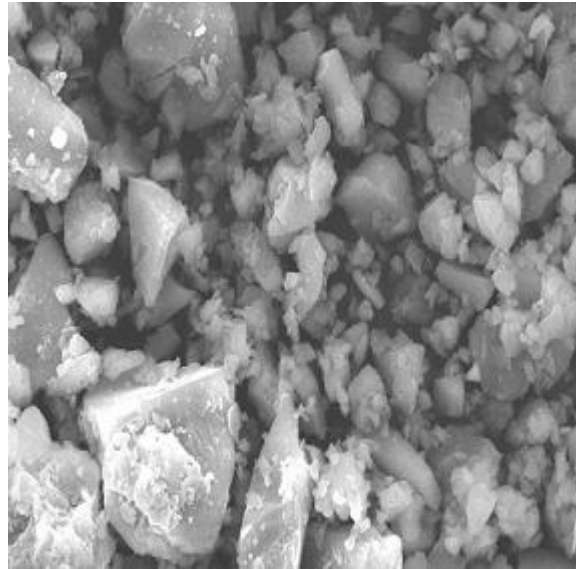
Silis dumanı elektronik endüstrisinde yarı iletkenlerin üretiminde kullanılan saf silisyum veya onun alaşımlarının elektrik ark fırınlarında yüksek sıcaklıkta ısıtılması ile elde edilir. Yüksek sıcaklığın etkisi ile amorf SiO_2 'e dönüşen silis, baca külü olarak açığa çıkar.

Silis dumanı $1\mu\text{m}$ 'den daha küçük çapa sahip küresel parçacıklardır. Bu da yaklaşık olarak çimento parçacığından 100 kat küçük olduğunu gösterir. Silis dumanının yüzey alanı 15000 ile 30000 arasında değişmektedir. Silis dumanının sahip olduğu geniş yüzey alanı nedeniyle betona eklenen silis dumanı içeriği ile taze betonun slump kaybı doğru orantılıdır. Karışım bu nedenle yüksek kohezyona sahiptir. Ayrıca, silis dumanı geniş yüzey alanı ile serbest suyu bünyesinde tuttuğundan taze betonun terlemesi ve ayrışması azalır [35].

Silis dumanı başta Norveç olmak üzere Avrupa ve ABD'de yaygın biçimde kullanılmakta olup iki işleve sahiptir; birincisi betondaki boşlukları doldurma (filler), diğeri ise puzolanik etkidir. Bu etkilerden hangisinin belirleyici olduğu yönünde değişik görüşler vardır. Ancak silis dumanının bu iki etkisinden biri olan filler etkisinin betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyini güçlendirmede önemli olduğu mikro yapısal incelemeler ve mekanik deneylerle kanıtlanmıştır [36].

1.1.5.3 Yüksek fırın cürufu

Demir-çelik üretiminde kullanılan yüksek fırınlarda, demir oksit (maden filizi, peletler, sinter), akıcılık düzenleyiciler (kalker, dolomit), ve yakıt (kok) kullanılır. Fırından iki ürün elde edilir: fırının alt kısmında toplanan erimiş demir ve erimiş demir üzerinde yüzen safsızlıklar. Yüksek fırın cürufunun kompozisyonu yüksek fırına beslenen maden filizi, akıcı taş ve koktaki safsızlıklara bağlıdır. Genelde yüksek fırın cürufunun %95'i veya daha fazlası silika, kalsiyum, alüminyum, magnezyum ve oksijenden oluşur [37]. Bu kısmın erimiş demirden ayrıldıktan sonra ani soğutma uygulanmasıyla amorf yapıya sahip olması sağlanmalıdır. Aksi halde YFC reaktivitesi azalır ve puzolanik özellik zarar görür. YFC'nin mikroskop görüntüsü Şekil 1.2'de görülmektedir.



Şekil 1.2 : YFC parçacıkları görüntüsü

Çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan CH bileşeni ile YFC'nin yapısında bulunan silisyum dioksit reaksiyona girerek C-S-H bileşenini oluşturur. Buna puzolanik reaksiyon adı verilir. Ayrıca YFC'nin hidrolik bağlayıcı özelliği ve filler etkisi de mevcuttur. Bu sayede öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento hamurunda daha ince ve süresiz boşluk oluştuğu, agrega-çimento ara yüzündeki boşlukların azaldığı, betonun kalıcılığının yani durabilitesinin arttığı gözlenmiştir [8, 33, 38].

Teng ve arkadaşları [38] çok ince YFC kullanarak yüksek performanslı betonun mekanik ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Cüruf kullanılması betonun taze haldeki işlenebilirliğini ve kıvamını geliştirmiştir. 3 günlük kürde bile çok ince

yüksek fırın cürufu içeren betonlar daha yüksek erken dayanım ve düşük permeabiliteye sahiptir. Durabilite özellikleri olarak daha düşük klorur difüzyon katsayısı ve porozite ile korozyona karşı yüksek elektriksel direnç sağlamıştır.

YFC'nin betona etkileri Çizelge 1.1'de gösterilmiştir [33].

Çizelge 1.1 : YFC kullanımının beton özelliklerine etkisi

Beton özelliği	Etkisi
İşlenebilme	Arttırır
Terleme	Azaltır
Ayrışma	Azaltır
Plastik büzülme	Arttırır
Priz süresi	Arttırır
Hidratasyon ısısı	Azaltır
Basınç dayanımı	Arttırır
Aderans	Arttırır
Sünme	Azaltır
Geçirimlilik direnci	Arttırır
Asit ve sülfat direnci	Arttırır
Alkali silika reaksiyonu	Azaltır
Donma dayanımı direnci	Arttırır
Kılcal su emme	Azaltır

Ayrıca, YFC ile çimento ikame edilmesi ile etkinlik katsayısı gündeme gelmektedir. Bağlayıcı malzemenin etkinlik katsayısı (k) portland çimentosunun eşdeğeri anlamına gelir [39]. Diğer bir deyişle k değerinin 1'e eşit olması çimentonun 1:1 oranda cüruf ile yerdeğiştirmesi durumunda da betonun aynı özelliklere sahip olduğunu, 1'den küçük olması ise betonun aynı özelliklere sahip olması için çıkan çimento miktarından daha fazla YFC girmesi gerektiğini gösterir. Aynı yaklaşımla etkinlik katsayısının 1'den büyük olması ise aynı performans için çıkan çimento miktarının giren YFC miktarından fazla olması anlamına gelir. Etkinlik (k) çimento içeriği, su/bağlayıcı oranı gibi unsurlarla değerlendirilir. Genelde betonun basınç dayanımı için kullanılsa da başka özellikleri için de kullanılabilir.

Bolomey ve Feret dayanım denklemleri ile puzolanın çimento içeriğine eşdeğerinin bulunmasında kullanılır [40]. Bolomey denklemi: **(1.1)**

$$f'_c = K_B \left(\frac{1}{W/C} - B \right) \quad (1.1)$$

Karışımın tasarımına ve yaşına bağlı olarak K_B (MPa) Bolomey katsayısını, f_c^1 betonun basınç dayanımını (MPa), C betondaki çimento içeriğini (kg/m^3), W betondaki su içeriğini (kg/m^3) ifade eder. B ise bir sabittir ve 0,3 ile 0,5 arası bir değer alır. Yapısal beton için Bolomey denklemi birçok durumda $B = 0,5$ alınarak basitleştirilebileceği gösterilmiştir [8]. Feret denklemi ise: **(1.2)**

$$f_c' = K_F \left(\frac{C}{C + W + H} \right)^2 \quad (1.2)$$

Karışımın tasarımına ve yaşına bağlı olarak K_F (MPa) Feret katsayısını, f_c^1 betonun basınç dayanımını (MPa), C betondaki çimento içeriğini (m^3/m^3), W betondaki su içeriğini (m^3/m^3), H betondaki hava içeriğini (m^3/m^3) ifade eder.

YFC'nin çimento ile ikamesi sonucunda denklemlerde değişiklikler meydana gelir. Bolomey denklemi: **(1.3)**

$$f_c' = K_B \left(\frac{1}{W / (C + kP)} - B \right) \quad (1.3)$$

Zamana ve değişime bağlı olarak k değeri YFC'nin etkinlik faktörüdür. P ise YFC'nin betondaki içeriğidir (kg/m^3). Feret denklemi ise: **(1.4)**

$$f_c' = K_F \left(\frac{C + kP}{C + W + H + kP} \right)^2 \quad (1.4)$$

k değeri yine YFC'nin etkinlik faktörüdür ve P de betondaki YFC içeriğidir (m^3/m^3).

Hannesson ve arkadaşları [41] kendiliğinden yerleşen betonda yüksek miktarda uçucu kül ve cüruf kullanılmasının basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Farklı bölgelerden aldıkları cüruf ve külleri çimento ile sırasıyla %20, 40, 60, 80 ve 100 şeklinde ikame etmişler. Erken yaştaki (14 gün ve öncesi) pozolanlı karışımların basınç dayanımları kontrol karışımından düşüktür. İleriki yaşlarda ise %60 ve daha az oranda yapılan yer değiştirmelerde basınç dayanımı kontrol numunesine göre daha iyidir. Daha yüksek ikame oranlarının düşük olmasının nedeni pozolanik reaksiyon için gerekli olan çimento hidratasyon ürünlerinin olmamasıdır. Etkinlik faktörü kullanılarak hesaplanan veriler ile numunelerin kırılmasıyla ölçülen değerler arasında Bolomey dayanım denklemi ile %86, Feret dayanım denklemi ile %89'a benzer limitte veri elde edilmiştir. Etkinlik faktörü ile bağlayıcıların $\text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ oranı arasındaki ilişki gözlenmiştir.

Oner ve Akyuz [42] betonun basınç dayanımı için optimum YFC kullanımını hesaplanmıştır. Bu çalışmada 250, 300, 350, 400 kg/m³ dozajda karışımların çimentosunun %30'u çıkartılarak farklı oranlarda YFC eklenmiştir. YFC içeriği artsa da aynı işlenebilirlik daha düşük su/bağlayıcı ile sağlanmıştır. Erken yaşlardaki basınç dayanımı, aynı bağlayıcı miktarına sahip karışımlarda YFC'li betonların kontrole göre daha düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksek dayanımda olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, puzolanik reaksiyonun yavaş olmasına dayandırılmıştır. YFC içeriği optimum noktadan sonra basınç dayanımı grafiğinde düşüşe geçmiştir. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları Bolomey ve Feret denklemlerinde kullanılarak toplam bağlayıcı miktarın %55-59 YFC olunca maksimum dayanım elde edilebileceği tespit edilmiştir. Daha fazla miktardaki YFC tanecikleri puzolanik reaksiyona girmeyip filler görevi gördüğü belirtilmiştir.

1.2 Beton Kürü

Çimento hidratasyonunun sürekli olabilmesi için ortamda suyun bulunması gerekmektedir. Bağıl nemin %80 altına düştüğü durumlarda hidratasyon oldukça yavaşlamakta, %30'un altında ise pratik olarak durmaktadır. Taze haldeki beton yerleştirildikten sonra oluşabilecek su kaybını engellemek için betona bakım (kür) uygulanır. Kür tekniği ve süresi betonun dayanımını ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Dayanım ve geçirimsizlik gibi beton özelliklerinin olumlu yönde gelişimi çimento hidratasyonuna bağlıdır. Çimento hidratasyonunu en fazla etkileyen faktörler ise nem ve sıcaklıktır. Uygun kürleme ile betonda yeterli nem içeriği ve sıcaklık sağlanarak istenilen özellikler geliştirilebilir [43].

Kürleme aynı zamanda puzolanik reaksiyonda su ihtiyacından dolayı önemlidir. Kür süresi ve metodu dayanıklı beton üretimi için önemli adımlardır. Eğer beton yeterince kürlenmezse yüzey tabakalarının geçirgenliği normalden 5 kat daha fazla artar [44].

Sıcak havada betonun aşırı su kaybı engellenmediğinde çatlaklar oluşur ve en önemlisi hidratasyon reaksiyonu için gerekli su kaybolur. Beton daha kırılgan bir yapıya sahip olur. Soğuk havada ise hidratasyon reaksiyonları yavaşlayacağı için betonun mukavemet kazanması gecikir. Bu etkiler betonun sadece dayanımını değil, dayanıklılık (durabilite) kriterlerini de olumsuz etkiler [45]. Bunlara engel olmak için üç yol izlenir:

1. Sürekli olarak betonun yüzeyinin nemli kalması sağlanır. Genelde hortum ya da mekanik spreyleme sistemi ile su dökülür ya da su göleti oluşturulur.
2. Su geçirmeyen(naylon-polietilen) bir tabaka ile beton yüzeyi kapatılır.
3. Kimyasal kür katkıları kullanılır.

Bu yöntemler arasında en yaygın olanı su ile yapılan kür çeşididir. Şantiye ortamında yapılan su kürüyle beton yüzeyinde sürekli ıslanma kuruma döngüsünün olması betonda olumsuz etki oluşturabilir. Sıcak havalarda ısınan beton yüzeyine temas eden su tanecikleri ani ısıl gerilmelere sebep olup betonda yüzeysel çatlaklar oluşarak beton ömrünü etkileyebilir [46]. Bu yöntem kullanılacaksa su göleti oluşturup sürekli nemli bir yüzey oluşturulmalıdır.

Beton yüzeyinin örtülerle kaplanması her uygulamada gerekli ve verimli olmasada bazı özel uygulamalar için tercih edilebilir. En büyük avantajları, hem yatay hem düşey elemanlarda kolayca uygulanabilir olmalarıdır. Belirli aralıklarla örtüler nemlendirilip betondaki suyun buharlaşması engellenir.

Huo ve Wong [47] yüksek performanslı beton döşemelerin farklı kür metodları altında erken yaş davranışı incelemiştir. Islak çuval örtüsü, pamuk keçe, kimyasal kür ve polietilen örtü kullanılarak beton kürlenmiştir. Nemli kür metodları erken yaştaki hidrasyon ısını düşürmüştür. Islak çuval, polietilen örtü ve pamuk keçenin rötre gelişimini kısıtlamada iyi kür metodları olduğu görülmüştür. Uzun kür süresi de tüm yöntemlerde düşük rötre deformasyonu ve düşük buharlaşma oranı vermektedir.

Betonun dayanım gelişimini hızlandırmak için yıllardır kullanılan buhar kürü bir ısı işlemidir. Çimentonun hidrasyon oranının artışı ısının artışı ile orantılı olduğu için dayanım gelişimi buhar kürü ile hızlandırılabilir [48]. Ancak, buhar kürü erken yaşlardaki dayanımı geliştirirken, ileriki yaşlarda dayanım dışındaki özelliklere de zarar vermektedir. Örnek olarak, 54 °C de kısa buhar kürü uygulanan numuneyle 28 gün suda beklemiş numune kıyaslandığında buhar küründeki numunenin geçirimsizlik değeri suda bekleyenden 40 kat fazla çıkmıştır. Bütün buhar kürleri geçirgenliği arttırarak sonuçlanmıştır. Buhar kürlerinden sonra sis küründe bekletilen numuneler kuru ortamda bekleyenlere göre daha az geçirimsizliğe sahiptir [49].

Bir diğer yöntem olan kimyasal kür bileşiklerinin beton yüzeyine uygulanmasıdır. Diğer yöntemlerle kür uygulamasının zor olduğu bölgelerde kullanılır. Tipik olarak bir reçine ve çözücünden oluşan kür malzemeleri uygulanma sonrası çözücünün

yüzeyden uzaklaşarak geride kalan reçinenin yüzeyde geçirimsiz bir film tabakası oluşturması prensibine dayanır. Ancak bu kür malzemelerinin betondaki etkinliği, oluşan filmin kalitesine, kalınlığına ve uygulanmış yüzeydeki homojenliğine bağlıdır. Yüzeyine kür malzemesi uygulanmamış beton yollarda yüzey özellikleri ile iç tabakaların özelliklerinin birbirinden farklı olduğu, ancak kür malzemesi uygulanmış betonlarda iç ve dış özelliklerin uniformluk gösterdiği belirtilmiştir [50]. Çok kuru veya çok ıslak bölgelere kimyasal kür uygulanmaz. Uygulama yönteminde ise spreyleme veya silindir fırça kullanılabilir. Başlıca kür çeşitleri aşağıdaki gibidir.

1.2.1 Parafin emülsiyon esaslı

Yeni yerleştirilmiş veya kalıbı yeni alınmış beton yüzeyine uygulanan emülsiyon içindeki suyun yüzeyden buharlaşması ile oluşan film tabakası ile suyu beton bünyesinde tutar. Ancak, daha sonraki uygulamalar için ayırıcı bir tabaka oluşturur. Yüzeye yapılacak sonraki sıva, şap, ikinci beton tabakası gibi uygulamaların aderansını olumsuz etkileyebilir. Aynı zamanda, kaydırıcı etkisi nedeni ile havaalanı iniş ve kalkış pistlerinde kullanımı sorun yaratabileceğinden, bazı şartnamelerde önerilmemektedir [51].

1.2.2 Akrilik emülsiyon esaslı

Bu malzemeler de, bileşiğin içindeki suyun buharlaşması ile beton yüzeyinde akrilik bir film tabakası oluşmasına dayanır. Bir sonraki uygulamanın aderansını olumsuz etkilemesi beklenmez. Su esaslı olması nedeniyle kapalı alanlarda kullanımı tercih edilir [51].

1.2.3 Akrilik reçine esaslı

Bu malzemeler uygun çözeltiler halinde uygulanır ve çözeltideki sıvının buharlaşması ile güçlü bir film oluşur. Akrilik reçinenin kimyasal yapısına göre, oluşan film yapışma özelliğinden dolayı sonradan üzerine kaplama (sıva, flap, boya, seramik ve epoksi kaplama) yapılması planlanan yüzeylerde kullanılabilir [51].

1.2.4 Hidrokarbon reçine esaslı

Belirli çözücülerde çözünebilen termoplastik reçinelerdir. Solventin buharlaşması sonucu kırılkan ve zayıf bir film oluşur. Bu film, mekanik etkiler ve ultraviyole ışığı altında kısa sürede yüzeyden kalkar. Bu özelliği sayesinde havaalanı pist ve

apronlarda kullanımı yaygındır. Kapalı ortamlarda kullanılacak ise, düşük organik uçucu madde (VOC) özelliğine sahip solventlerde çözünmesi tavsiye edilir. Sonradan yüzeye bir uygulama düşünülüyorsa mekanik olarak veya özel kimyasal maddeler ile silinerek yüzeyden uzaklaştırılır [51].

Al-Gahtani [52] kür metodlarının sade çimentolu ve puzolanlı betonların özelliklerine etkisini incelemiştir. Portland çimentolu, silis dumanlı ve uçucu küllü üretilen karışımlara ıslak çuval ve akrilik veya su esaslı kimyasal kürler uygulanmıştır. Islak çuvala kaplanan numunelerin basınç dayanımı kimyasal kür kullanılanlara oranla daha fazladır. Plastik ve kuruma rötresinin azalmasında kimyasal kürler ıslak çuval uygulamasına oranla yüksek etki sergilemişlerdir. Akrilik esaslı kür malzemesi su esaslıya göre daha iyi performansa sahiptir.

Maslehuddin ve arkadaşları [44] kür metodunun betonun rötresine ve korozyon direncine olan etkisini incelemiştir. Portland çimentolu ve silis dumanlı hazırlanan karışımlara kür metodu olarak ya ıslak çuvala kaplanmıştır ya da yüzeylerine kimyasal kür olarak su esaslı, akrilik esaslı, bitüm esaslı veya katranlı epoksi uygulanmıştır. Deney sonuçlarında her iki karışım için de kimyasal kürlerin rötreyi azalttığı ve korozyon direncini arttırdığı görülmüştür. Normal çimentolu karışım için 3 gün ıslak çuval sonrasında yüzeyine kimyasal kür uygulanması daha olumlu sonuç verirken, silis dumanlı karışımında 7 gün ıslak çuval daha etkilidir. Bunun nedeni puzolanik reaksiyonun çimento hidrasyonuna oranla daha yavaş olmasıdır. Plastik rötre için bitüm esaslı kür malzemesi daha iyi kuruma rötresinde katranlı epoksi daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bitüm esaslı kür malzemesinin suyun buharlaşmasına karşı direnci daha iyi olmasından dolayı bu sonuç elde edilmiştir. Başlangıçta su kürü uygulamasının mümkün olmadığı yerlerde katranlı epoksi uygulanması daha tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir.

1.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton Özellikleri

Çimento hamuru, agrega ve diğer katı parçacıklarından oluşan plastik karışımdır. Çimento hamuru betonun hacmen yaklaşık %75 ini oluşturan agregaların etrafını kaplar ve aralarındaki boşlukları doldurur. Taze haldeki çimento hamuru agregalar arasındaki sürtünmeyi azaltarak işlenebilirliği artırır. Katkılar da dahil bütün bileşenler karışım içinde minimum enerji ile hızlı ve homojen bir şekilde dağılmalıdır. Karışım, kalıbı vibrasyonla ya da vibrasyonsuz tam olarak doldurmaya

yetecek kadar işlenebilir olmalıdır. Beton sertleştikten sonra, hamur agregaları bir arada tutar ve sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığında önemli rol oynar [53].

Geleneksel beton dökümünde vibrasyon, yani yerleştirme ve sıkıştırma işlemi, betonun içindeki hava boşluklarını dışarı atmak, böylece dayanımı ve dayanıklılığı daha yüksek ve aynı zamanda daha düzgün yüzeyli bir beton elde etmek için zorunludur. Vibrasyon uygulanmamış betonların basınç dayanımında, vibrasyon uygulanmış olanlara göre % 30'lara varan düşüşler görülmektedir. Özellikle binaların depreme karşı güçlendirilmesi için yapılan güçlendirme projelerinde tüm bu etkenlere dar beton kesitleri ve sık donatı eklenince, vibrasyon uygulaması daha da zahmetli, bazen de olanaksız hale gelir. Oysa süper akışkanlaştırıcıların geliştirilmesi ile üretimine başlanan KYB, kendi kendine sıkışma yeteneği sayesinde vibrasyon gerektirmez ve tüm olumsuz etkenleri ortadan kaldırarak, işçilikten ve zamandan tasarruf sağlar. Ayrıca gürültü probleminin ortadan kalkması, şehir merkezlerinde ve özellikle gece beton dökümlerinde üstünlük sağlar. KYB'ların diğer kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Güçlendirme projelerinde,
- Sık donatılı elemanlarda,
- Estetik kalıp tasarımlarında,
- Zor ve ulaşılmaz kalıplarda,
- Vibratör kullanımının imkânsız olduğu yerlerde [54].

1.3.1 Taze betonun özellikleri

KYB'lerin performansları ile taze beton özellikleri arasında önemli bir ilişki vardır. Reoloji ve işlenebilirlik parametreleri KYB'nin pratikteki kullanım performansını etkilemektedir. Kendiliğinden yerleşme yeteneği üç parametre ile karakterize edilebilir:

- Doldurma yeteneği
- Ayırmaya karşı direnç
- Geçiş yeteneği [31]

Bir KYB bu özelliklerin üçünü de taşımalıdır ve taşıma ve yerleştirme boyunca bu özellikleri korumalıdır.

1.3.1.1 Doldurma yeteneği

KYB herhangi bir dış etkiye gerek duymadan kendi ağırlığı ile akabilmeli ve kalıp içerisindeki tüm boşlukları doldurmalıdır. Bu zellik KYB'nin ne kadar uzağa gidebileceğini ve akışın hızını gösterir. İyi doldurma yeteneği için yayılma hızı ve çapı arasında bir denge olmalıdır.

Betonun iyi deforme olabilmesi için katı tanecikler arasındaki sürtünmenin azaltılması faydalıdır. Ancak bu yeterli değildir; imento hamur fazı da iyi deforme olabilmelidir. Yüksek akışkanlıkla birlikte ayrışmaya karşı yüksek direncin sağlanması, KYB'nin engellerin (donatı vs.) arasından geçerek doldurma kapasitesinin arttırılması açısından önemlidir [55].

1.3.1.2 Ayrışmaya karşı direnç

Ayrışma direnci taze karşının bileşenlerinin homojenliğini taşıma, yerleşme ve sıkışma boyunca koruyabilme yeteneğidir. Normal akışta ayrışma göstermeyen taze beton sık donatıların bulunması durumunda ayrışmaya uğrayabilir. KYB'nin yeterli kohezyonu olmaması nedeniyle durağan durumda ya da pompalama veya akış sırasında agrega ve imento hamuru ayrı hareket edebilir. Bu da homojen olmayan beton kitlelerine neden olur.

Terlemeden kaçınmak için, karışımda hareket eden su miktarının az olması gerekmektedir. Yer değiştiren su, karışım içerisinde katı malzemeye karışmayan bağımsız olarak hareket eden su anlamına gelmektedir. Hareket eden su miktarı, su/ince madde oranı azaltılarak sağlanır. Serbest su, yüzeyi büyük olan malzemelerin üzerinde daha fazla bulunacağından, yüzey alanı çok olan ince malzemeler kullanarak terlemeyi azaltmak mümkündür. Böylece zgl ağırlığı betonun diğer bileşenlerine göre oldukça düşük olan suyun ayrışması, ince malzemelerin yüzeyine tutunması sayesinde engellenmiş olur. Bunun yanında serbest suyun özgül ağırlığını ve viskozitesini arttıran viskozite düzenleyici katkılar ile ayrışma direncinin iyileştirilebilmesi mümkündür [56].

1.3.1.3 Geçiş yeteneği

KYB yeterli akıcılığa ve aynı zamanda ayrışmaya karşı dirence sahip olduğuunda etkili bir işlev görür. Ancak, erveledenmiş boşluklardan, dar açıklıklardan ve donatılar arasından geçebilme yeteneği de önemlidir. Akış anında iri agregaların

birbiriyle temas edip akış yönünde engel oluşturma ihtimali vardır [57]. Ayırışmaya neden olabilecek bu tarz sorunlarla karşılaşmamak için iri agrega çapı ve içeriğinin düşük tutulması, şekilleri küresel biçimde olması ve böylece ayırışmaya karşı direnci ve akıcılığı yeterli seviyede olan KYB'lerin üretilmesi gereklidir.

Geleneksel betonda çok yoğun donatılı bölgede vibrasyon kullanınca ayırışma çok fazla olmaktadır. KYB'de mevcut olan agregalar geleneksel betona nazaran daha küçük olduğu için durumlarda daha avantajlı olduğu söylenebilir.

1.3.2 Reoloji

Katı, sıvı ve gaza uygulanan deformasyon ve akma kanunlarına uymayan malzemelerin davranışlarını açıklamak için kullanılır. Bu sayede reoloji betonun hem taze hem de sertleşmiş haldeki fazlarına uygulanabilir. Sertleşmiş betonun kırılmaya yakın olan ya da sünme gibi uzun süreli yüklemekten kaynaklanan plastik deformasyonun değerlendirilmesinde kullanılabilir. Diğer açıdan KYB için taze haldeki reolojisi daha önemlidir.

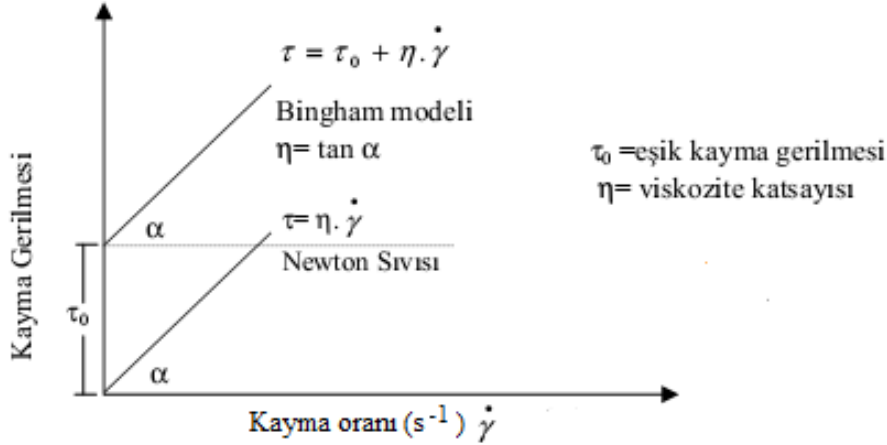
Taze beton karmaşık değişken bir malzeme olduğu için bazı kabuller yapılır. Burada taze betonun uniform, homojen ve izotrop olduğu kabul edilir. Bu kabuller yapıldıktan sonra taze betonun reolojik özelliklerini iki davranış yansıtır: Newton'a uyan ve Newton'a uymayan akış [53].

1.3.2.1 Newtona uyan akış

Kayma oranının kayma gerilmesiyle doğru orantılı olduğu akışkanlara Newton tipi akışkanlar denilmektedir. Su, hava, benzin, yağlar, vs. akışkanlar en çok bilinen newton tipi akışkanlara örnektir. Bu tarz akışkanların viskozitesi Newton modeli ile bulunabilirken taze betonda başlangıç için eşik kayma gerilmesinin aşılması gerekmektedir.

Reolojik incelemeler KYB'nin gelişiminde daima merkez konumu oluşturur. Akışkan harç fazındaki iri agrega veya akışkan çimento hamuru fazındaki kum taneleri ayırışmadan homojen dağılımlarını sürdürmelidir. Bu bakımdan reolojik davranışın agrega tanelerinin boyutuna, türüne ve içeriğine bağlı olarak değerlendirilmesi doğaldır. Taze betonun reolojik davranışı, kayma eşiği ve plastik viskozite katsayısını içeren Bingham Modeli ile belirlenir. En genel halde taze beton davranışını gösteren model ve modelin parametreleri Şekil 1.3'te görülmektedir [58].

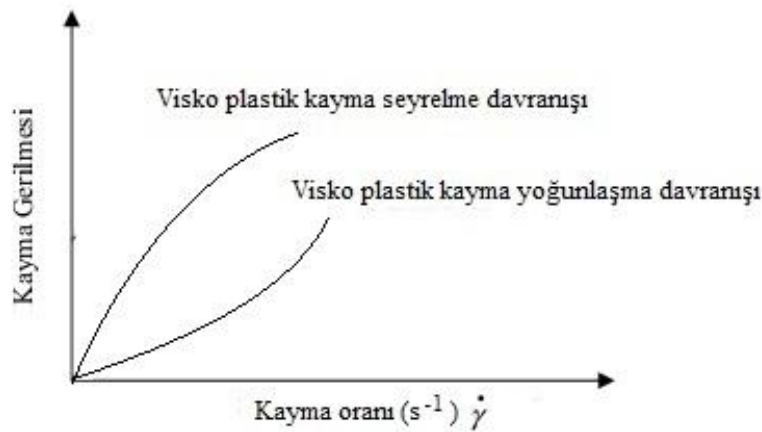
Taze betonun en önemli iki özeliği akıcılık ve viskozitedir (stabilite). Akıcılık, betonun az enerji ile yerine yerleştirilebilmesidir. Viskozite ise beton karıştırılması ve yerleştirilmesi sırasında ayrışmadan homojenliğini koruyabilmesi özelliğidir. Ayrıca aynı çökmeye sahip betonlardan plastik viskozitesi küçük olanın daha akışkan bir beton olacağı, kayma eşikleri ve çökmeleri eşit betonlardan plastik viskozitesi yüksek olanın kararlılığının daha iyi olacağı beklenebilir [58].



Şekil 1.3 : Taze beton için Newton ve Bingham modeli

1.3.2.2 Newtona uymayan akış

Bazı akışkanlar kayma gerilmesi deformasyonuna uğradığı süre boyunca sabit bir lineer grafik göstermez. Genelde yoğun ve kompleks karışımlardır. Örnek olarak kan, ketçap, boya, şampuan, krema, pekmez ve bazı kayganlaştırıcılar verilebilir. Kayma gerilmesi ve kayma oranı arasındaki bağıntı değişim gösterir (düşüş veya artış). Şekil 1.4'te bu davranışlar görülebilir [59].



Şekil 1.4 : Newtona uymayan akış tipleri

Kayma seyrelme davranışı Pseudoplastikler olarak adlandırılır. Kayma oranı arttıkça kayma direnci azalır. En bilinen örneklerinden birisi boyadır. Örneğin duvar boyası fırçadan akamaz durumdayken duvara uygulanırken rahatça sürülebilir. Kayma yoğunlaşma davranışı ise Dilatant akışkanlardır. Kayma oranı ile viskozitesi artan akışkanlardır. Örnek olarak nişasta solüsyonu verilebilir [59].

Düşük işlenebilirlikli geleneksel beton genellikle yüksek kayma gerilmesine sahip bir Bingham akışkanı gibi davranırken, tipik bir KYB çok düşük ya da sıfır kayma gerilmesine sahiptir ve genellikle Newton uyumlu akışkan gibi davranır [15]. Plastik viskozite, kullanılan malzemelere ve döküm tekniğine bağlıdır.

1.3.2.3 Taze beton reolojisi

Taze haldeki betonun viskozitesi (kaymaya karşı gösterdiği direnç) sayesinde agrega ile çimento hamurunun ayrışması engellenir. Reometre aletiyle yapılan ölçüm ile taze haldeki betonun viskozitesi bulunabilmektedir. Verilerle moment-dönme hızı grafiği elde edilir. Bu grafikten taze betonun viskozitesini ölçmek için bazı kabuller yapılır:

- Düşük dönme hızında ve akışkanın yüksek viskozitesinde akışkan stabildir ve bu sayede z-ekseni boyunca simetriktir.
- Hız kesiti silindirin yüksekliğinden yani z ekseninden bağımsızdır.
- Dönme akışı yani θ , dönme alanı ve basınç dağılımından bağımsızdır.
- Her açısal hız frekansları için zaman bağımsızdır [60,61].

Bu dört adımı göz önünde bulundurunca hız denklemi: **(1.5)**

$$\vec{v} = v_r(r, \theta, z, t)\vec{i}_r + v_\theta(r, \theta, z, t)\vec{i}_\theta + v_z(r, \theta, z, t)\vec{i}_z \quad (1.5)$$

Basitleştirilmiş haliyle: **(1.6)**

$$\vec{v} = v_\theta(r)\vec{i}_\theta \quad (1.6)$$

İç silindirdeki test malzemesine uygulanan kayma gerilmesi, θ yönündeki momentumum korumasının ayrışması ve Cauchy gerilim ilkesiyle gözlemlenerek tork (T) ve kayma gerilmesi ($T(r)$) arasında şu denklem oluşturulur: **(1.7)** [60,61]

$$T(r) = \frac{T}{2\pi r^2 h} \quad (1.7)$$

Reiner-Riwlın denklemleriyle ters Couette probleminin analitik çözümü Bingham akışkanları için yapılabilmektedir. Hız denklemi hem tork (T) hem de kayma gerilmesi T_0 , $v_\theta(R_i) = 0$ sınır şartında hesaplanırsa: **(1.8)** [62]

$$v_\theta(r) = \frac{\hat{T}r}{4\pi\mu h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{r^2} \right) - \frac{T_0 r}{\mu} \ln \left(\frac{r}{R_i} \right) \quad (1.8)$$

μ plastik viskozite, h iç silindirin yüksekliği, R_i iç silindirin yarıçapı, $\hat{T}$ boyutsuz torktur. Buradan tork için çözmek için sınır şartı $v_\theta(R_o) = R_o\Omega$ uygulanır ve direk olarak her dönme hızı (Ω) için tork değerleri ölçülerek denklem oluşturulur: **(1.9)**

$$\hat{T} = \frac{4\pi\mu h}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right)} \Omega + \frac{4\pi\mu h}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right)} \ln \left(\frac{R_o}{R_i} \right) = H\Omega + G \quad (1.9)$$

Her dönme hızı için ölçülen tork değerleri ile elde edilen lineer grafiklerle Bingham parametreleri olan bağıl viskozite H (Nms) ve akma direnci G (Nm) bulunur [63].

1.3.3 Taze beton deneyleri

KYB'nin taze hal özelliklerini belirlemek için pek çok test geliştirilmiştir. Çizelge 1.2'de KYB'nin temel özelliklerini belirlemek için yaygın olan testler sıralanmıştır [64].

Çizelge 1.2 : KYB'nin temel özelliklerini belirlemek için yaygın testler

Özellik	Test metodu	Ölçülen değer
Doldurma yeteneği/Akıcılık	Çökme - akma	Toplam yayılma
	Kajima kutusu	Görsel doldurma
Viskozite/Akıcılık	t_{500}	Akma zamanı
	V hunisi	Akma zamanı
	O hunisi	Akma zamanı
	Orimet	Akma zamanı
Geçme yeteneği	L kutusu	Geçme oranı
	U kutusu	Yükseklik farkı
	J halkası	Kademeli yükseklik, akma
	Kajima kutusu	Görsel geçme yeteneği
Ayrışma direnci	Penetrasyon	Derinlik
	Elek ayrışma	Terleme yüzdesi
	Oturma kolonu	Ayrışma

Şartnamede istenilen beton, taze ve sertleşmiş haldeki performansları karşılayacak şekilde seçilir. KYB için öncelikli olarak taze hal önemlidir. Doldurma yeteneği, viskozitesi, geçme yeteneği ve ayrışma direnci için uygulanan testler ile ölçülen beton performansına göre KYB’ler EFNARC tarafından sınıflandırılmıştır. Sınıflar Çizelge 1.3’te mevcuttur [64].

Çizelge 1.3 : KYB özelliklerinin sınıflandırma değerleri

Akıcılık		Viskozite			Geçme yeteneği		Ayrışma direnci	
Sınıf	Çökme-akma(mm)	Sınıf	t ₅₀₀ (sn)	V-hunisi (sn)	Sınıf	L kutusu H2/H1 oranı	Sınıf	Elekt ayrışması
SF1	520-700	VS1 VF1	≤ 2	≤ 10	PA1	≥ 0,8 ve 2	SR1	≤ 23
SF2	640-800	VS2 VF2	> 2	7-27	PA	≥ 0,8 ve 3	SR2	≤ 18
SF3	740-900							

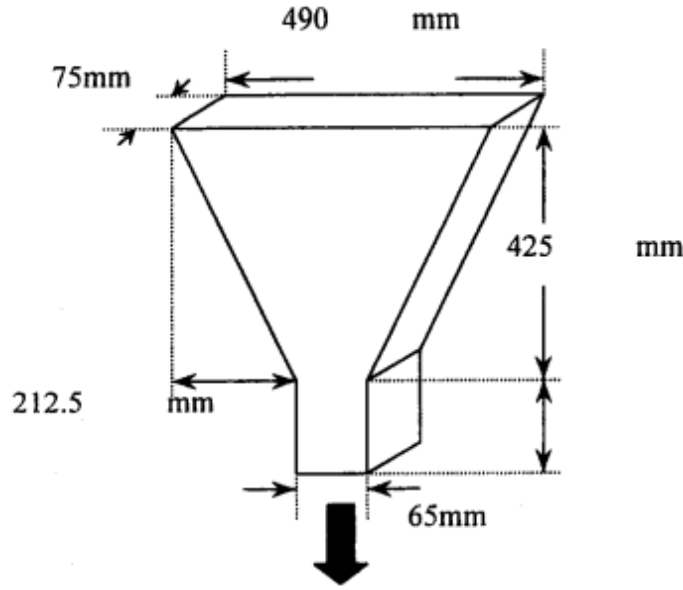
Taze haldeki beton özelliklerini belirlemek için çok sayıda deney metodu mevcuttur. Bunlardan başlıcaları RILEM teknik komitesi tarafından belirtilmiştir.

1.3.3.1 Çökme-yayılma deneyi

Bu deney taze KYB’nin deformasyon hızının gözlenmesini ve numunenin kendi ağırlığı ile yayılarak oluşturacağı çapın ölçülmesini kapsar. Deney aparatı olarak çökme (slump) hunisi ve en az 80 cm x 80 cm boyutlarında bir tabla kullanılır. Çökme hunisi KYB ile doldurularak kendi ağırlığı ile seviyelenmesi beklenir. Slump hunisinin dar ağzı tablaya gelecek şekilde taze beton doldurulup çekildiğinde dairesel olarak yayılan KYB’nin ortalama çapı ölçülür. Ayrıca bir kronometre ile 50 cm yayılma değeri için geçen zaman tutulur [31].

1.3.3.2 V-hunisi deneyi

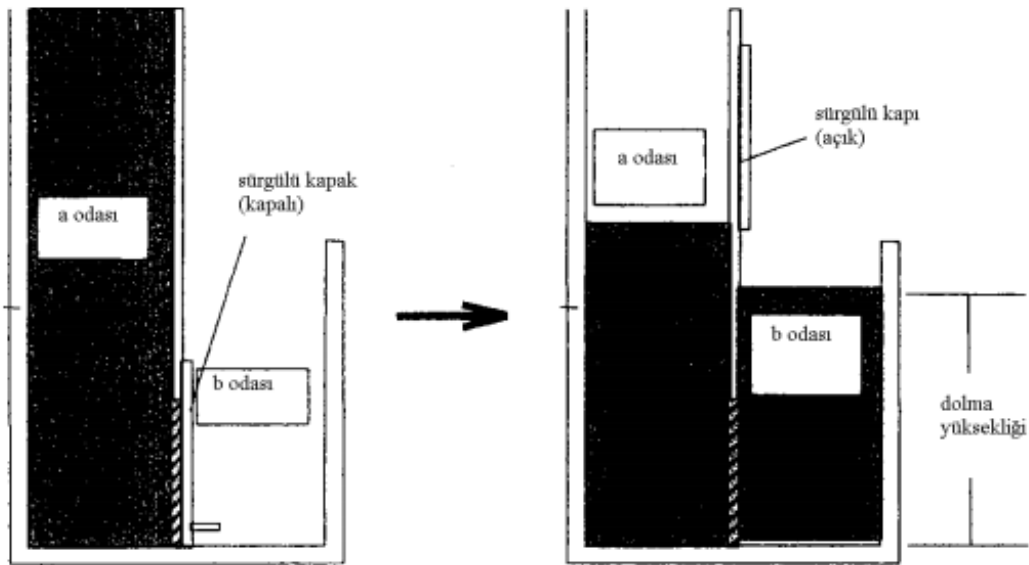
Bu deney, taze KYB’nin kendi ağırlığı ile özel tasarlanmış bir huninin dar olan ağzından boşalma süresinin ölçülmesini içerir. Akış hızının belirlenmesi ve gözlem yapılması sureti ile KYB’ nin viskozitesi hakkında bilgi veren bu deney yönteminde, belirli aralıklarla belirlenen akış sürelerinin kullanılması sonucu ayrışma direnci hakkında da bilgi edinilmektedir. Aparat olarak Şekil 1.5’teki özel bir huni kullanılır. Huniye KYB doldurulduktan sonra en altta bulunan sürgülü kapak açılır ve huni içindeki tüm betonun boşalma süresi ölçülür [31].



Şekil 1.5 : V-hunisi deney aparatı

1.3.3.3 U kutusu deneyi

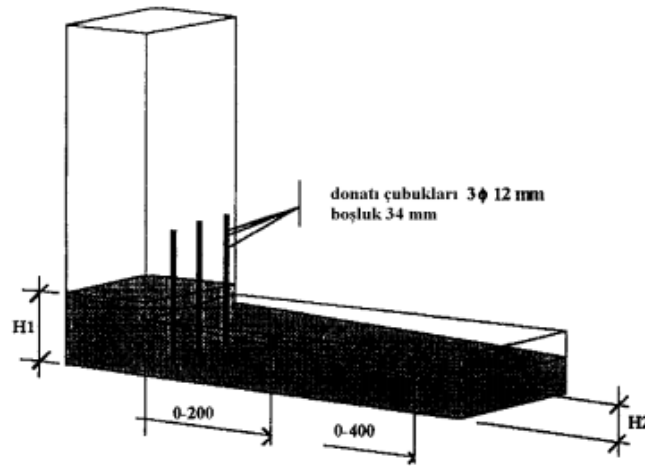
Bu deney taze KYB'nin kendiliğinden yerleşme yeteneğinin ve numunenin özel bir kutu içerisinde kendi ağırlığı ile yükselmesini gözlenmesini kapsar. Şekil 1.6'da gösterilen U şeklinde, alt ortasında sürgülü bir kapak olan ve aynı zamanda engel teşkil edecek demir çubuklar bulunan bir kutu kullanılır. KYB doldurulduktan sonra sürgülü kapak çekilerek betonun diğer bölüme doğru dolarak yükselmesi beklenir. Her iki bölmedeki beton yüksekliklerinin farkı betonun geçme yeteneğini gösterir. Yükseklik farkının en fazla 30 cm olması istenir. Deney süresi 5 dakikadır. Donatı çapları ve açıklıkları projeye uygun seçilebilir [31].



Şekil 1.6 : U-kutusu deney aparatı

1.3.3.4 L kutusu deneyi

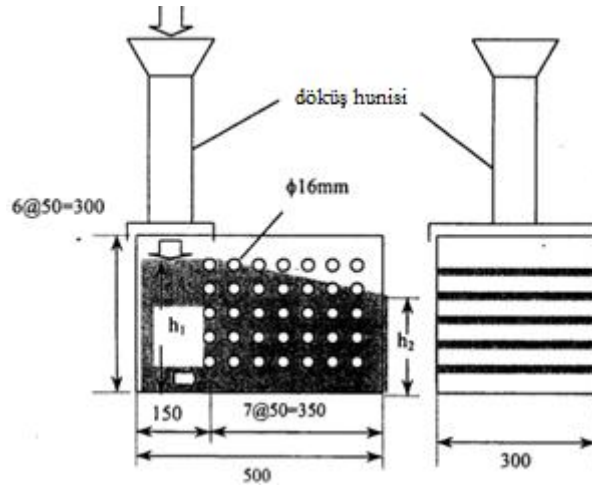
Bu deney, taze KYB'nin kendiliğinden yerleşme yeteneğinin, doldurma yeteneğinin, geçiş yeteneğinin ve ayrışmaya karşı direncinin L şeklindeki bir kutu içerisinde gözlenmesini kapsar. L kutusu Şekil 1.7'de görülmektedir. Kutunun alt ortasında sürgülü bir kapak ve aynı zamanda engel teşkil edecek demir çubuklar bulunmaktadır. Sürgülü kapak çekilerek betonun diğer bölüme 20 cm ve 40 cm ilerlemesinin süreleri ölçülür. Aynı zamanda kutunun her iki tarafındaki seviye farkı tespit edilir [31].



Şekil 1.7 : L-kutusu deney aparatı

1.3.3.5 Doldurma kutusu deneyi

Bu deney, KYB'nin akış hareketinin ve özel şeffaf bir kutu içerisinde yükselme yeteneğinin gözlenmesini kapsar. Bu deneyde Şekil 1.8'de kullanılan şeffaf ve içinde engeller bulunan bir kutuya KYB boşaltılarak kutunun iki ucundaki seviye farkı ölçülür [31].



Şekil 1.8 : Doldurma kutusu deney aparatı

1.3.3.6 J halkası deneyi

J halkası deneyi, kendiliğinden yerleşen betonun, donatılar arasından ve diğer engeller arasındaki dar açıklıklardan, ayrışma veya blokajlanma olmaksızın akarak geçme yeterliliğinin değerlendirilmesi için kullanılır. Deneyin amacı L kutusu ile benzer özellikler taşır.

Deneyin, dar çubuk aralıklı deney ve geniş çubuk aralıklı deney olmak üzere iki çeşidi vardır. Dar çubuk aralıklı deney, daha sık donatıyı temsil etmektedir.

Deneyde, koni betonla doldurulmadan önce, etrafına düzgün aralıklarla düşey olarak yerleştirilmiş düz çubuklar bulunan J halkasının yerleştirilmesi haricinde çökme-yayılma deneyinde tarif edilen işlemler uygulanır. Daha sonra birbirine dik 2 doğru üzerinde halkanın içinden ve dışından yükseklik okumaları yapılır. Aradaki yükseklik farkı 15 mm küçük olunca betonun iyi geçiş yeteneğine sahip olduğu kabul edilir [65].

EN 206-12 taslağında J halkası deneyi için de sınıflandırma getirilmiştir. 12 çubuklu J halkasında PJ değeri 10'a eşit veya küçük ise PJ1, 16 çubuklu J halkasında PJ değeri 10'a eşit veya küçük ise PJ2 olarak sınıflandırılır.

1.3.3.7 Ayrışma deneyi

KYB'nin ayrışmaya karşı direncini ölçmek için geliştirilmiş bir deneydir. Hem laboratuarda hem de sahada betonun stabilitesi kontrol edilebilir. Taze haldeki betondan 2 litre numune alınıp 15 dakika üstü kapalı bir şekilde bekletilir. Süre dolunca 50 cm yükseklikten numune 5 mm lik elek üstüne dökülür. 2 dakika sonra elek altına geçen numune ağırlığı hesaplanır ve toplam numune ağırlığına bölünerek betonun ayrışma miktarı bulunur [65].

1.3.3.8 Viskometre

Beton, harç ve hamur gibi numunelerin reolojik parametreleri olan eşik kayma değeri ve plastik viskozitesini direk olarak hesaplayabilen deneydir. 3 ile 24 litre arası değişen hacimlerde numuneler silindir içine yerleştirilerek deney başlatılır. Farklı hızlarda dönerken karşılaştığı torkları bilgisayar not eder. Daha sonra dönme hızı ve tork değerleri arasından geçen lineer çizginin eğimi ile numunenin viskozitesi, lineer çizgi, dönme hızının sıfır olduğu yerden de numunenin eşik kayma gerilmesi bulunur [65].

1.4 Tezin Amacı

Projede üretilmesi planlanan sentetik C-S-H ile farklı miktarlarda yüksek fırın cürufu içeren kendiliğinden yerleşen betonların çeşitli kür koşulları altında basınç ve yarma dayanımı, kılcallık katsayısı, rötre, ağırlık kaybı, elektriksel iletkenlik ölçümleri ile elektron mikroskobu görüntüleri incelenecektir. Elde edilen verilerle ulaşılabilecek sonuçlar yardımıyla sentetik C-S-H'nin hem erken hem de ileri yaşlardaki mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi nano boyuttan makro boyuta kadar belirlenebilecektir. Ayrıca sentetik C-S-H katkısının yüksek fırın cürufu etkinliğine etkisi, uygulanan kimyasal kür sayesinde su kaybının azalmasıyla beton performansındaki değişiklikler araştırılacaktır. Bunun yanında, uygulanan kür koşullarının performans – maliyet ilişkisi ortaya çıkarılacaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, beton üretiminde kullanılan malzemeler, malzemelerin özellikleri, beton karışımları ile üretimi ve yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri açıklanmıştır.

2.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.1.1 Çimento

Bu çalışmada Aslan çimentodan alınan CEM I 42,5 normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Yapılan özgül ağırlık deneyinde çimentonun özgül ağırlığı $3,07 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. Çimentonun kimyasal bileşimi Çizelge 2.1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Kullanılan çimentonun yapısal bileşeni

SiO ₂ (%)	19,13
Al ₂ O ₃ (%)	4,86
Fe ₂ O ₃ (%)	2,94
CaO (%)	62,17
MgO (%)	1,56
SO ₃ (%)	3,50
K ₂ O (%)	0,75
Na ₂ O (%)	0,15
Cl (%)	0,02
Serbest CaO (%)	0,75

Çizelge 2.2 : Kullanılan çimentonun basınç dayanımı sonuçları

Gün	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	TS EN 197-1 Standart
2	22,7	min. 20
7	47,0	-
28	56,2	min. 42,5 max. 62,5

2.1.2 Yüksek fırın cürufu

Ereğli demir-çelik tesislerinden temin edilen YFC deneysel çalışmada kullanılmıştır. Yapılan özgül ağırlık deneyinde YFC'nin özgül ağırlığı $2,86 \text{ g/cm}^3$ bulunmuştur. YFC'nin kimyasal analizi Çizelge 2.3'de mevcuttur.

Çizelge 2.3 : YFC kimyasal bileşeni

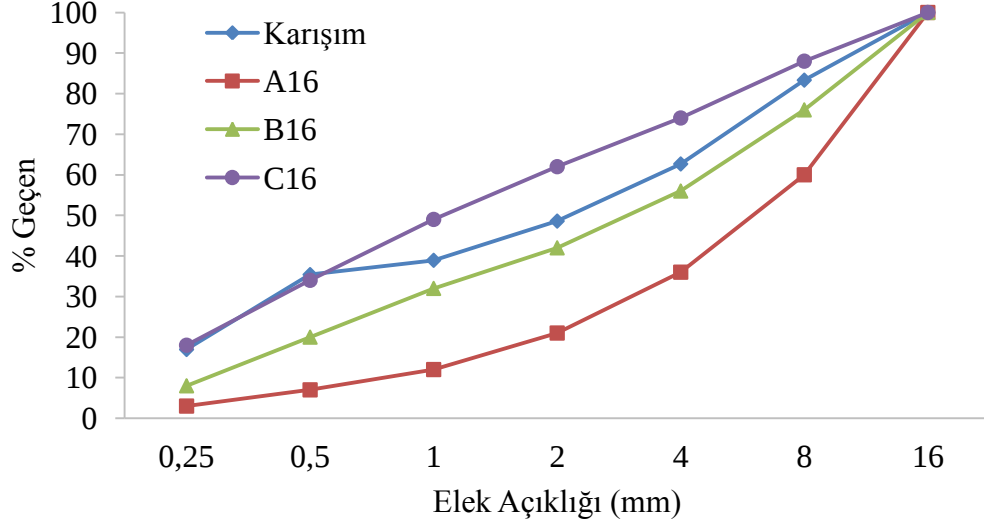
SiO ₂ (%)	42,03
Al ₂ O ₃ (%)	10,48
Fe ₂ O ₃ (%)	1,19
CaO (%)	36,85
MgO (%)	5,45
SO ₃ (%)	0,08
K ₂ O (%)	1,15
Na ₂ O (%)	0,63
Cl (%)	0,0191

2.1.3 Agregat

Bu çalışmada doğal kum, kırma kum ve kırmataş I kullanılmıştır. Agregat granülometrisi A16 ve C16 eğrileri arasında B16 eğrisinin üstünde olacak şekilde seçilmiştir. Agregaları özgül ağırlıkları ve elek analizleri Çizelge 2.4'te, granülometri eğrisi ise Şekil 2.1'de verilmiştir. Her karışımda toplam agregat hacminin %40'ı kırmataş I, %30'u kırma kum ve %30'u doğal kum kullanılarak karışım 1 m^3 'e tamamlanmıştır.

Çizelge 2.4 : Kullanılan agreganın özellikleri ve elek analizleri

	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırmataş I	Karışım
Özgül ağırlık	2,65	2,75	2,76	
Elek açıklığı(mm)	Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)	
16	100	100	100	100
8	100	99	58	83
4	100	94	11	63
2	100	53	7	49
1	100	22	6	39
0,5	99	12	5	36
0,25	45	6	4	17
İncelik modülü				3,1



Şekil 2.1 : Kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi

2.1.4 Kimyasal Katkılar

Karışımların hepsinde süper akışkanlaştırıcı olarak polikarboksilik eter esaslı ‘MasterGlenium51’ kullanılmıştır. Sentetik C-S-H olarak ‘X-Seed 100’ tercih edilmiştir. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri Çizelge 2.5’te, sentetik C-S-H’nin teknik özellikleri Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.5 : MasterGlenium51’in teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,082 - 1,142 kg/litre
Klor İçeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 3

Çizelge 2.6 : X-Seed 100’ün teknik özellikleri

Görünüm	Beyaz / nanopartiküller ve nitratlar içeren kokusuz süspansiyon
20°C’de Yoğunluk	1,135 g/cm ³
20°C’de pH değeri	11
Alkali içeriği (Na ₂ O’ya denk)	≤ 3.0 M%
Klorit iyonu içeriği	≤ 0.1 M%

2.1.5 Karışım suyu

Beton numuneleri üretiminde ve küründe pH değeri 7 (nötr) olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.6 Membran oluşturarak uygulanan kürler

2.1.6.1 Akrilik emülsiyon esaslı

Deneyisel çalışmada BASF'den alınan 'Masterkure 101' kullanılmıştır. Üretici tarafından tavsiye edilen sarfiyat uygun olarak $0,25 \text{ kg/m}^2$ dozajında uygulanmıştır. Çizelge 2.7'de ürünün teknik özellikleri verilmiştir. Numune yüzeylerine kür uygulanabilmesi için fırça tercih edilmiştir.

Çizelge 2.7 : Masterkure 101 teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı	Akrilik emülsiyon esaslı
Renk	Beyaz sıvı
Yoğunluk	0,95 – 1,00 kg/litre
Parlama Noktası	Yok
Bitmiş Tabaka Görünümü	Açık opak tabaka
Kuruma Süresi ASTM C 309	2 saat 15 dakika

2.1.6.2 Styren reçinesi esaslı

Deneyisel çalışmada BASF'den alınan 'Masterkure 181' kullanılmıştır. Üretici tarafından tavsiye edilen sarfiyat uygun olarak $0,17 \text{ kg/m}^2$ dozajında uygulanmıştır. Çizelge 2.8'de ürünün teknik özellikleri verilmiştir. Kür uygulaması için fırça tercih edilmiştir.

Çizelge 2.8 : Masterkure 181 teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı	Styren
Görünüm	Şeffaf sıvı
Yoğunluk	$\approx 0,82 \text{ kg/litre}$
Parlama Noktası	+88°C
Bitmiş Film Görünümü	Şeffaf, Pürüzsüz film
Su Tutma (ASTM C 156)	Geçer
Kuruma Süresi (ASTM C 309)	45 dakika

2.1.6.3 Parafin emülsiyon esaslı

Deneyisel çalışmada BASF'den alınan 'Masterkure 215' kullanılmıştır. Üretici tarafından tavsiye edilen sarfiyat uygun olarak $0,20 \text{ kg/m}^2$ dozajında uygulanmıştır. Çizelge 2.9'da ürünün teknik özellikleri verilmiştir. Kür uygulaması için fırça tercih edilmiştir.

Çizelge 2.9 : Masterkure 215 teknik özellikleri

Malzemenin yapısı	Parafin emülsiyon esaslı
Görünüm	Beyaz
Yoğunluk	≈0,97 kg/litre
Parlama Noktası	Yok
Bitmiş Film Görünümü	Şeffaf, Pürüzsüz film
Uygulama Sıcaklığı	>5°C
Sıcaklık Direnci	5°C - 40°C

2.2 Karışımlar

Yüksek performanslı beton olarak KYB üretilmesine karar verilmiştir. Bu nedenle başlangıçta kendiliğinden yerleşen beton için gerekli bağlayıcı dozajı 500 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Deneme üretimlerinde KYB'nin yayılma çapı ve süresi, V-hunisi deneyleri göz önüne alınarak referans karışımında (500 kg/m^3 çimento) su/bağlayıcı oranı 0,37 belirlenmiştir. Aynı zamanda agrega granülometrisinin KYB'nin taze hal özelliklerine etkisi geleneksel betona nazaran daha etkili olması nedeniyle yapılan denemelerden sonra toplam agrega hacminin %40'ı kırmataş I, %30'u kırma kum ve %30'u doğal kum kullanılarak karışım 1 m^3 'e tamamlanmıştır. KYB'nin doğal kumdaki organik maddelerden etkilenmemesi için üretimden önce kırma kum 1 mm'lik elekten elenerek üretime hazır hale getirilmiştir. YFC etkinliğini belirlemek amacıyla referans karışımdan %40 çimento çıkarıp yerine sırasıyla 1:1; 1:1,25; 1:1,5 oranlarında YFC konulmuştur. Tüm karışımlarda su miktarı sabit tutulmuş (190 lt/m^3), yayılma çapı $70 \pm 3 \text{ cm}$ ve V-hunisi deneyi süresi 12 sn'den az olacak şekilde süperakışkanlaştırıcı dozajı ayarlanmıştır. Reçetesi belirlenen bu 5 karışımın aynısı bağlayıcı miktarın %2'si kadar sentetik C-S-H katkısı ilave edilerek ikinci bir seri beton üretilmiştir. Eklenen priz hızlandırıcı özellikteki sentetik C-S-H katkısı KYB'nin işlenebilirliğini düşürdüğü için süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı değiştirilerek istenilen kıvamlar elde edilmiştir. Betonların hava içeriği yapılan denemeler sonunda %1,5 olarak kabul edilmiştir. YFC etkinliğini belirleyebilmek için sonradan 1:2'lik ikame oranlı karışım hem normal hem de sentetik C-S-H içinde hazırlanmıştır. Çizelge 2.10'da karışımlarda kullanılan malzemelerin miktarları verilmiştir. Ayrıca, üretimde kullanılacak bütün malzemeler laboratuvar ortamında bekletilerek üretimde oluşacak hata payı minimuma indirilmiştir. Katkıların tartımlarında 0,1 gram hassasiyetindeki tartı kullanılmıştır.

Çizelge 2.10 : Karışımların ince malzeme ve katkı miktarları

Karışım Kodu	Çimento (kg/m ³)	YFC (kg/m ³)	Kırmataş I (kg/m ³)	Kırma kum (kg/m ³)	Doğal kum (kg/m ³)	Süper Akış. (%)	Sentetik C-S-H (%)
Ref	500	-	697,9	521,5	502,5	0,95	-
RefX	500	-	697,9	521,5	502,5	1,15	2
S1	300	200	692,6	517,6	498,7	0,8	-
S1X	300	200	692,6	517,6	498,7	0,9	2
S1,25	300	250	673,3	503,1	484,8	0,75	-
S1,25X	300	250	673,3	503,1	484,8	0,8	2
S1,5	300	300	654	488,7	470,9	0,7	-
S1,5X	300	300	654	488,7	470,9	0,8	2
S2	300	400	615,4	459,9	443,1	0,65	-
S2X	300	400	615,4	459,9	443,1	0,75	2

Beton üretiminde İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvar'ında bulunan 50lt hacimli düşey eksenli karıştırıcı kullanılmıştır. Üretim işlemi bütün karışımlar için şu sırayla gerçekleştirilmiştir.

- İlk önce agregalar karıştırıcıya koyulup 30 saniye boyunca kuru karışım yapılmıştır.
- Sonraki 30 saniye boyunca karma suyu yavaş yavaş eklenerek karışım devam etmiştir.
- Karıştırma tamamlanınca agregaların ortası açılıp çimento ve varsa cüruf ilave edilip üstü agrega ile kapatılarak karışım tekrar başlamıştır.
- Karıştırma esnasında önce süper akışkanlaştırıcı sonra Sentetik C-S-H malzemesi yavaşça koyulmuştur.
- Kalan su ile katkıların dibi çalkalanıp karışıma ilave edilmiştir.
- Homojen karışımı sağlamak için bütün karışımlar toplam 10 dakika karıştırılmıştır.
- Hazırlanan betonlara taze hal deneyleri yapıldıktan sonra kalıplara yerleştirilmiştir.

Her karışım için 100 x 100 x 100 mm boyutlu 144 adet küp, 70 x 70 x 280 cm boyutlu 6 adet prizma ve taze haldeki betonun 4 mm lik elekten elenmesiyle elde edilen harçlardan 40 x 40 x 160 mm lik 21 adet prizma numuneler üretilmiştir. S2 ve

S2X kodlu karışımlardan sadece 100 x 100 x 100 mm boyutlu 24 adet küp üretilmiştir.

Hazırlanan numunelerin üst hizasından 1-2 cm yüksekten olucak şekilde çift katlı naylonla örtülmüştür. Kimyasal kür uygulanacak numunelerin yüzeyleri 4 saat 15 dakika sonra açılıp yukarıda belirtilen miktarlarda kür uygulanmıştır. Üretimden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler gruplara ayrılmış, 1. grup deney gününe kadar laboratuvar şartlarında havada bekleyerek, 2. grup ıslak bezle sarılarak üstü çift katlı naylonla ilk 7 gün boyunca kapalı tutulup daha sonra laboratuvar şartlarında havada, 3. grup ise sürekli $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kireçli suda bekletilmiştir. 4., 5., ve 6. gruplar kür sürülmemiş diğer yüzeylerine kimyasal kür sürülerek deney gününe kadar laboratuvar koşullarında saklanmıştır.

2.3 Taze Beton Deneyleri

2.3.1 Çökme-akma deneyi

KYB'ler için taze beton kıvamının kontrol edilmesindeki en önemli testtir. Geleneksel betonda çökme deneyinde kullanılan Abrams hunisi burada da kullanılır. Ancak, KYB'nin kendi ağırlığı ile yayılmasından dolayı bu deneyde çökme değil betonun yayılma çapı ve süresi ölçülür. Yayılma esnasında görsel olarak betonun ayrışması hakkında bilgi elde edilir. Test metodu şu şekilde yapılır:

- Taban levhası düz zemine yerleştirilir ve yatay pozisyonda olduğu kontrol edilir
- Yüzey ıslatılır ve bir bezle silinerek fazla nem alınır.
- Abraham hunisi dar ağzı aşağıya gelecek şekilde merkeze yerleştirilir.
- KYB herhangi bir şişleme yapılmadan kademesiz olarak huniye doldurulur.
- Koninin ağzındaki fazla beton sıyrılır ve tabandan sızan beton varsa temizlenir.
- Dolu koninin 30 saniyeden fazla bekletilmeden, sarsmadan belli bir miktar havaya kaldırılır.
- Koni kaldırıldığı anda kronometre başlatılır ve beton 500mm çapına ulaşıncaya kadar geçen süre kaydedilir.

- Betonun yayılması durunca en büyük çap ölçülür, daha sonra bu çapa dik bir tane daha çap ölçülür.
- Çapların aritmetik ortalaması alınınca betonun çökme-akma değeri elde edilir. Ölçülen iki çap arasında 50mm den fazla fark olmamalıdır.
- Akma esnasında görsel olarak inceleme yapıp su kuma, agrega-hamur ayrışması olup olmadığı gözlemlenir [66].

Deney düzeneği Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2 : Çökme-Akma deney düzeneği

2.3.2 V-hunisi deneyi

KYB’ nin dar bir kesitten kendi ağırlığı altında geçiş yeteneğini incelemek amacı ile yapılan bir deneydir. Şekil 2.3’te görülen 12 lt hacimli çelik bir V- hunisi, kronometre ve hunideki beton numunesinin üst yüzeyini düzeltmek için düz bir çubukla deney gerçekleştirilir. Deneyde kullanılan betondaki agrega boyutu maksimum 20 mm boyutunda olmalıdır. Deney şu şekilde yapılmaktadır:

- V şeklinde dikdörtgen kesitli huni ve tabanındaki kapak temizlendikten sonra nemlendirilir.
- Kapak kapatılarak beton huniyi sarsmadan ve şişlemeden dökülür.
- Huninin üst seviyesi aynı hizada sonuna kadar doldurulup düz çubuk ile düzlenir.

- Huninin altına yeterli büyüklükte bir kap yerleştirilir.
- Kapak açıldıktan sonra huninin üstünden bakılır ve aşağıdaki delikten ışık görüldüğünde kronometre durdudur. V-hunisi akma süresi elde edilmiş olur [66].



Şekil 2.3 : V-hunisi

2.3.3 Elek ayırışma deneyi

İri agrega ve harç arasında ne kadar ayırışma olacağını belirleme temeline dayanır. Amaç bir KYB karışımında iri agreganın oturmasından kaynaklanan ayırışma riskini değerlendirmektir. Deney şu şekilde yapılır:

- KYB üretildiği anda yaklaşık 2 lt lik numune kaba koyulup üstü kapatılır.
- 15 dakika bekledikten sonra kabın ağzı açılır ve terleme kontrol edilir.
- Terleme varsa not edilir.
- Bu sırada elek kabının ağırlığı ve elek ile birlikte kabın ağırlığı not edilir.
- Kabın içindeki beton 5 mm açıklıklı eleğe 50 cm yükseklikten dökülür.
- Elek, elek kabı ve dökülen beton tartıldıktan sonra dökülen beton ağırlığı bulunur.
- Beton numune elek üzerinde 120 saniye durduktan sonra elek sarsmadan kaldırılır.
- Elekten geçen beton ağırlığı tartılır.

- Elek altına geçen ve toplam numune ağırlığı birbirine oranlanır ve ayrışma oranı belirlenir [66].

2.3.4 Hava miktarı deneyi

Taze haldeki betonun hava içeriğini belirlemek ve standartlaştırmak için farklı metodlar mevcuttur. Bütün metodlar toplam hava içeriğini ölçerken hapsolmuş hava ile sürüklenmiş hava arasında ayırım yapmamaktadır. Testler, hava kabarcıkları ve aralıklarının boyutları ve boyut dağılımlarını göstermez. Sertleşmiş betonda dayanıklılığın, donma-çözülme direncinin artması sürüklenmiş havanın boyutu ve dağılımına bağlıdır. Hava içeriği için genelde kullanılan metodlar:

- Basınç metodu
- Hacimsel metod [53]

Bu çalışmada basınç metodu kullanılmıştır. KYB'yi 7 lt'lik hazneye herhangi sıkıştırma ve şişleme yapmadan yerleştirilir. Üstü düzleştirildikten sonra aletin üst aparatı takılır ve el pompası yardımıyla sisteme basınç verilir. Daha sonra fazla basınç boşaltılır ve beton içindeki hava miktarına su dolduğu için göstergede taze beton içine giren su oranı yüzde olarak görülür. Bu sayede taze haldeki betonun hava miktarı belirlenir. Deneyde kullanılan alet Şekil 2.4'te mevcuttur.



Şekil 2.4 : Havametre aleti

2.3.5 Birim ağırlık deneyi

Bu deneyde taze haldeki betonun birim ağırlığı ölçülür. Hava miktarı deneyi için doldurulan beton test edilmeden önce ağırlığı tartılır. Daha sonra kabın boş ağırlığında öğrenilir. Aradaki fark kabın hacmine bölünmesi ile birim ağırlık bulunur.

2.3.6 Reoloji deneyi

Bu deneyde Ali Raif SAĞLAM'ın [67] doktora tezinden yararlanılmıştır. Reometre aleti toplamda 28 dm³ hacminde dış silindirin iç çapı 290 mm iç silindirin dış çapı 200 mm boyutlarındadır. Tork ölçümü esnasındaki sapmaları önlemek için dış silindirin üst kenarından 40 mm aşağıda başlayarak alt yüzeye kesintisiz devam eden eni 20 mm olan 16 adet kanatla donatılmıştır. Hazırlanan taze haldeki betondan reometre aletine yaklaşık 22 lt koyulur. Hazne sarsmadan makineye yerleştirilir. Dönüş hızı olarak maksimum 0,6 rps (saniye başına tur) hızından minimum 0,09 rps hızına kadar 5 aşamada azalır. Dönüş esnasında her dönme hızı için 5 saniye boyunca 50 tane moment değeri kaydeder. Dönüş hızları değişirken homojen sonuç elde edemeyeceği için her aşamada 3 saniye boyunca veri kaydetmez. Deney sonunda her dönme hızında kaydedilen moment değerlerinin ortalamasını alarak moment-dönme hızı grafiği elde edilir. Bölüm 1.3.2.3'te anlatıldığı üzere bazı kabullere dayanarak taze betonun viskozitesi hesaplanır. Deneyde kullanılan alet Şekil 2.5'de mevcuttur.



Şekil 2.5 : Reometre aleti

2.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş betonda dayanım ve dayanıklılık performanslarını belirlemek için birçok deney metodu vardır. Aşağıda bu çalışma kapsamında sertleşmiş beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler anlatılmıştır.

2.4.1 Basınç dayanımı deneyi

Numune düşey yükte sabit bir hızda yüklenir. İzlenmesi gereken yollar şu şekildedir:

- Deney sisteminde numunenin konucağı yüzey temizlenir ve numunenin kalıp yüzeyi yatay olacak şekilde yerleştirilir.
- Deney cihazına TS EN 12390-3 standartında [68] belirtildiği şekilde yükleme hızı 0,6 MPa/s (N/mm²s) ayarlanır ve test başlatılır.
- Numune kırılma yükü kaydedilir ve numunenin yükleme yüzeyinin alanına bölünerek basınç dayanımı elde edilir.

2.4.2 Yarma dayanımı deneyi

Çekme yüklerinin dolaylı olarak uygulanması ile çekme dayanımının elde edildiği yöntemdir. Deney şu şekilde gerçekleştirilir:

- Basınç deneyinde kullanılan presin tablaları arasına numune döküm yüzeyi yatay olacak şekilde yerleştirilir.
- Numunenin üstüne ve altına yerleştirilen çıtalar sayesinde çizgisel yük uygulanır.
- TS EN 12390-6 standardında [69] belirtildiği şekilde yükleme hızı ayarlanır ve test başlatılır.
- Yükün artmasıyla dolaylı olarak çekme gerilmeleri oluşur ve yük eksenı boyunca yarılarak göçer.
- Deney sonunda şu formül kullanılarak yarma gerilmesi hesaplanır: (2.1)

$$\sigma = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2.1)$$

Bu formülde σ yarma gerilmesini, P uygulanan yükü, L yarıma yüzeyinin yük eksenine dik doğrultudaki boyutunu ve D yarıma yüzeyinin yük eksenı doğrultusundaki boyutunu temsil etmektedir.

2.4.3 Üç noktalı eğilme deneyi

TS EN 12390-5 standardı [70] kullanılarak deney gerçekleştirilir. Numune 160 mm uzunluğunda mesnet açıklığı ise 100 mm dir. Mesnet açıklığının orta noktasından yükleme yapılarak eğilme dayanımı bulunur. Yükleme hızı dakikada 400-500 kg

olacak şekilde ayarlanmıştır. Aşağıdaki formül kullanılarak numunenin eğilme dayanımı hesaplanır: (2.2)

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{Pl}{4}}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (2.2)$$

Bu formülde P kırma yükünü, σ eğilme dayanımını, l mesnetler arası mesafeyi, b numune genişliğini ve h numune yüksekliğini temsil eder.

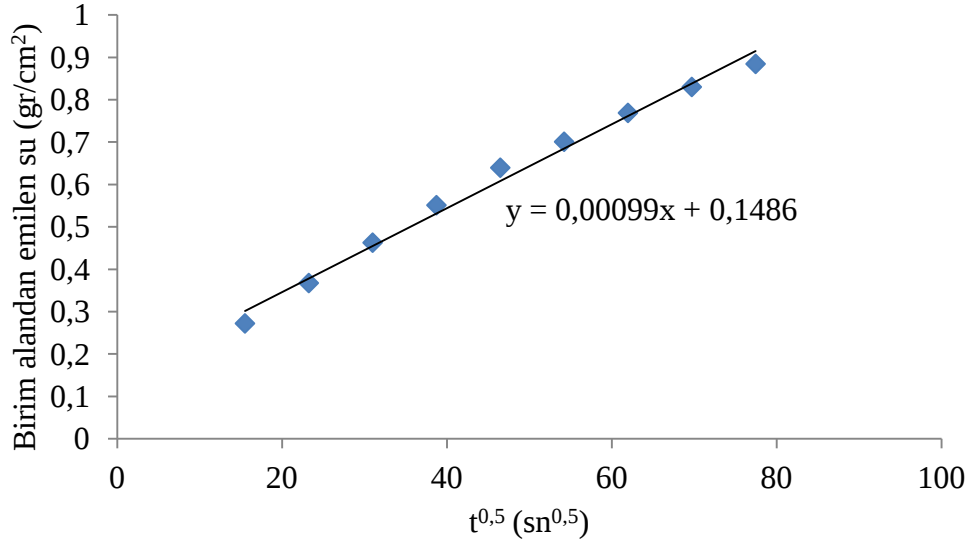
2.4.4 Kılcallık katsayısı deneyi

Betonun geçirimliliği hakkında bilgi elde etmek için yapılan testlerden biridir. Betonun sahip olduğu kılcallık katsayısı ne kadar düşükse o kadar geçirimsiz olduğunu gösterir. Deney ASTM C 1585-13 standardıyla [71] şu şekilde yapılır:

- Deney günü gelmiş numunelerde iç kısımlar betonu daha iyi temsil ettiği için üç parça olacak şekilde kesilip 70°C sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa gelene kadar bekletilir.
- Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra su emilecek yüzeye yakın kenarlarına parafin sürülür.
- Bir kabın içine ızgara yerleştirilip su seviyesi ızgara yüzeyini 3-4 mm geçecek şekilde doldurulur.
- Numunelerin kuru ağırlıkları ölçülür.
- Yan yüzeyleri parafinli olan çıplak yüzeyler ızgaraların üzerine yerleştirilir.
- Numuneler suyla temas ettiği anda kronometre başlatılır ve 1, 4, 9, 16. dakika şeklinde sayıların karesinde her bir numunenin ağırlığı tartılır.
- Ağırlık artışı numunenin yüzey alanına bölünüp ölçüm anındaki saniyelerin kareköküyle bir grafik oluşturulur. Şekil 2.6'da kılcallık grafiği mevcuttur. Elde edilen grafik sayesinde kılcallık katsayısı aşağıdaki denklemle hesaplanır: (2.3)

$$q = k\sqrt{t} + c \quad (2.3)$$

q birim alandan emilen suyu (gr/cm^2), k kılcallık katsayısını, c sabiti ve t saniyeyi ifade eder.



Şekil 2.6 : Kılcallık grafiği

- Bu grafiğin eğimi ile kılcallık katsayısı elde edilir.

2.4.5 Elektriksel iletkenlik deneyi

Betonarme yapıdaki dayanıklılık problemleri arasında çelik donatı korozyonu önemli bir sorun teşkil eder. Korozyon oluşumu betonun performansına bağlıdır. Donatı üstünde oluşan anot ve katot bölgeleri nedeniyle akım oluşur. Betonun elektriksel direnci oluşan akımın büyüklüğü üzerinde etkili olması nedeniyle donatının korozyon hızını kontrol eder. Betonun elektriksel iletkenliği ise büyük oranda içerdiği OH^- iyonu konsantrasyonuna bağlıdır. Puzolan katkılı betonlarda çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan OH^- iyonları bağlandığı için daha yüksek elektriksel direnç (düşük iletkenlik) değerleriyle karşılaşılır. Yapılan iletkenlik deneyi ile betonun öz direnci hakkında fikir sahibi olup donatıların korozyona karşı ne kadar güvenli olduğu tespit edilir. ASTM C 1760-12 standardına [72] göre gerçekleştirilen deney numunelerinin en küçük boyutu cihazın betona temas eden uçları arasındaki mesafeden büyük olmalıdır.

İletkenlik deneyi için hazırlanan kimyasal kür uygulanmış 7x7x28 lik prizma numunelerden deney düzeneğinin temas edeceği yüzeyleri zımpara kağıdı ile temizlenmiştir. Çünkü kimyasal kürler o bölgede yalıtkan bir tabaka oluşturduğu için elektrik akımını engellemektedir.

Naik ve arkadaşları [73] yaptıkları araştırmada uçucu külün betonda iletkenliğini araştırmışlardır. Su ve hava kürü uygulanan numunelerin ölçümlerinde betondaki

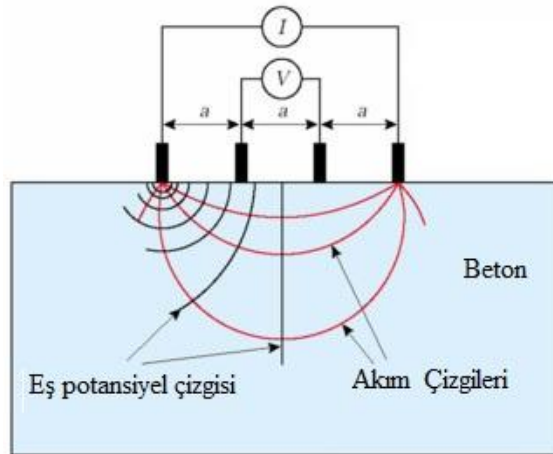
nem farkından dolayı ölçülen değerler arasında bağlantı olmamıştır. Bu nedenle daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için su kürtü dışındaki diğer kürlere ait numuneler 30 dakika suda bekletilip çıkarılmıştır.

- Numunedeki yüzey suyunun uzaklaşması için ya havlu kullanılır ya da 10 dakika beklenilir.
- Fazla su uzaklaştıktan sonra cihazın 4 ucu da numune yüzeyine temas edecek şekilde yerleştirilir ve numuneden geçen amper ve volt kaydedilir.
- Ölçülen potansiyel farkın akıma bölünmesi ile direnç bulunmuş olur. Ancak direnç numune ve cihaz boyutlarına bağlı olduğu için buradan da boyuttan bağımsız öz dirence geçmek gerekir.

- Wenner bağlantısı kullanılarak öz direnç hesaplanır. İlgili formül şu şekildedir:
(2.4)

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

ρ işareti öz direnci, a problar arasındaki mesafeyi, V ölçülen potansiyel farkı ve I ölçülen akımı göstermektedir. Deney sistemi Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7 : İletkenlik deneyi düzeneği

Elde edilen öz direnç Çizelge 2.11’deki sınıflandırmalara dayanarak değerlendirilir [74]:

Çizelge 2.11 : Öz direnç ile korozyon seviyesi arasındaki korelasyon

Korozyon seviyesi	İhmal edilebilir	Düşük	Orta	Yüksek
ρ (Ω -m)	>1000	1000-500	500-100	<100

2.4.6 Kuruma rötresi (büzülme) deneyi

Betondan atmosfere doğru gerçekleşen su kaybı b z lmeye neden olur. Yavaş olan kuruma rötresi  imento hamurundan kaynaklıdır. Agreg a  imento hamurunun büzülmesini engeller ve agreg a hacmi ile agreg anın elastisite modülü arttıķa kurumaya bağlı gerçekleşen rötre azalır [64]. Bu çalışmada kuruma rötresi deneyleri 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. ASTM C 1038 standardına [75] göre deney şu şekilde yapılır:

- Harç  ubuklar üretilirken 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıba pimler yerleştirilir.
- 1. günde kalıptan sökülen numunelerin boyu 1/100 mm hassasiyetteki alette ölçülür.
- İki hafta boyunca iki günde bir ölçülen numune daha sonra büzülme durana kadar haftada bir ölçümler devam eder.
- Numune boy değişimi bitince numunede meydana gelen kısalmanın numune boyuna oranı birim olarak mikro deformasyon cinsinden hesaplanır.

Deneyde kullanılan alet şekil 2.8’de mevcuttur.



şekil 2.8 : Rötre  l  mlerinin yapıldığı cihaz

2.4.7 Ağırlık kaybı deneyi

ASTM C 156-11 standardına [76] uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kuruma rötresinde kullanılan numuneler kalıp sökümünden itibaren kuruma rötresi için yapılan her boy  l me deneyiyle birlikte tartılır. Numune su kaybettikçe ağırlığında azalma meydana gelir.

Ağırlık kaybı ölçülen numunelerin boyutları bilinmektedir. Ağırlık kaybı değerini numunenin toplam yüzey alanına bölerek numunenin kg/m^2 cinsinden ağırlık kaybı miktarı hesaplanır.

2.4.8 İç yapı analizi

Deney ASTM C 1723-10 standardına [77] uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile sertleşmiş harç numunelerinin mikro boyuttaki görüntüleri elde edilerek iç yapı morfolojisi hakkında bilgi sahibi olunur.

Yaklaşık 10x10x10 mm boyutlarında hazırlanan numunenin hidratasyonunu durdurmak amacıyla vakum basıncı altında aseton emdirilir. Numune içindeki suyun aseton tarafından uzaklaştırılması ile hidratasyon durur. Deney öncesinde numuneler, içerisinde sıvı kalmaması için 50°C sıcaklıktaki etüvde 48 saat süreyle tutulur.

Deneyde FEI marka Quanta FEG 250 model cihaz kullanılmıştır. Numune deney aleti içine yerleştirilince ortam vakumlanır ve numune yüzeyine elektronlar yollar. Yüzeyden geri seken elektronlar mercek tarafından yakalanır ve görüntü oluşturulur. Numune cinsine göre geri dönen elektrona bağlı olarak yakınlaştırılma yapılır. Daha sonra netleştirme işlemi yapılarak fotoğraf çekilir. Şekil 2.9'da deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.9 : ESEM deneyi için kullanılan makine ve bilgisayar

3. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRMELER

3.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Deneyisel çalışma bölümünde tarif edilen deney metodları kullanılarak 10 farklı KYB'nin taze haldeki özellikleri belirlenmiştir. Birim hacimde sabit miktarda su katılarak üretilen tüm betonların hedeflenen taze beton özelliklerine sahip olabilmesi için süper akışkanlaştırıcı dozajı değiştirilerek KYB özelliklerine sahip olması sağlanmıştır. Çizelge 3.1'de taze beton sonuçları mevcuttur.

Çizelge 3.1 : Taze beton sonuçları

	Yayılma (cm)	t ₅₀₀ (sn)	V hunisi (sn)	S.akış. oranı (%)	Birim ağırlık (kg/lt)	Hava miktarı (%)	5 mm lik elekten geçen (%)	Viskozite katsayısı (Pa.s)	Kayma eşiği (Pa)
Ref	67	6	11	0,95	2,417	1,5	1,23	20,768	0,28
RefX	68	5	8	1,15	2,414	1,5	0,63	19,296	0,07
S1	70	4	10	0,8	2,403	1,6	0,99	18,134	1,05
S1X	68	5	7,5	0,9	2,397	1,8	4,08	13,463	0,10
S1,25	73	3,5	8	0,75	2,406	1,8	4,21	21,572	1,27
S1,25X	70	4	8	0,8	2,402	1,5	5,65	13,851	0,31
S1,5	68	4,5	9	0,7	2,405	1,6	4,64	25,889	0,91
S1,5X	71	4	9	0,8	2,406	1,5	2,44	14,967	0,66
S2	61	6	17	0,65	-	-	-	-	-
S2X	62	5	15	0,75	-	-	-	-	-

Hedeflenen yayılma çapı olan 70±3 cm seviyesine ilk 8 karışımla ulaşırken S2 ve S2X bu sınırın altında kalmıştır. YFC ikame edilince referans numunesinden %0,15 daha az süper akışkanlaştırıcı kullanılmasına rağmen istenilen yayılma elde edilmiştir. Bu da YFC'nin KYB işlenebilirliğine olumlu etkisini göstermektedir. Deneme üretimlerinde sentetik C-S-H katkısı ise taze beton özelliklerine olumsuz etki yaratmış, yayılma çapları %10-15 kadar azaltmıştır. Bu nedenle hedeflenen yayılmaya ulaşmak için kullanılan akışkanlaştırıcı miktarı bütün reçetelerde %0,05 ile %0,2 arasında arttırılarak toplam yayılma miktarları ve 500 mm çapta yayılma için geçen süre kabul edilebilir seviyeye çekilmiştir. V-hunisi deney sonuçlarının 7-

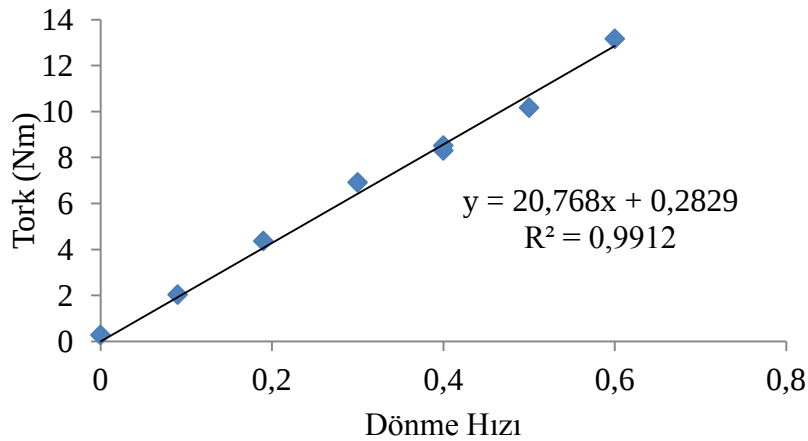
12 sn arasında olması da akışkanlaştırıcı katkı ile sağlanmıştır. Yayılma testlerinde herhangi bir su kusma belirtisine rastlanmamıştır.

YFC katkılı betonların taze birim ağırlıklarında referansa oranla çok az azalma meydana gelmiştir. Bu durum çimento yerine karışıma giren YFC'nin özgül ağırlığının çimentoya göre bir miktar daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Sentetik C-S-H miktarının betonda kullanılan diğer malzemelere oranla çok az olması nedeniyle birim ağırlık sonuçları kendi referans numunelerinin değerlerine benzer çıkmıştır.

Birim ağırlık deneyi yapıldıktan sonra mevcut olan betonda hava miktarı ölçülmüştür. Teoride denemeler sonrasında %1,5 alınan hava değerine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak hava içeriği %1,5 ile %1,8 arasında değişmiştir.

Taze betonun elenmesi yoluyla gerçekleştirilen ayırışma deneyinde ise 5 mm lik elek altına geçen numune ağırlığı toplam ağırlığa bölünerek ayırışma yüzdeleri bulunmuştur. Uzman yapı kimyasalları ve beton birliği Avrupa federasyonunun (EFNARC) hazırladığı talimatlara göre [64] %15 sınır değeri altındaki değerler KYB için uygun olduğundan sonuçlar kabul edilebilir seviyededir.

Taze beton özellikleri yukarıda tarif edilen sınır değerler arasında tutulan betonların reolojik özellikleri eş eksenel bir viskometre kullanılarak ölçülmüştür. Viskozite deneylerinde elde edilen moment ile dönme hızları arasında grafik çizilmiştir. Daha sonra elde edilen noktalara en yakın geçen doğrunun eğiminden bağıl viskozite katsayısı bulunur. Örnek olarak Ref kodlu karışımın grafiği Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 : Ref kodlu karışımın moment-dönme hızı grafiği

Daha fazla katkı kullanarak hedeflenen yayılma çapı ve süresi elde edilirken taze haldeki betonda reometre aleti ile elde edilen sonuçlara bakılınca sentetik C-S-H kullanılması referansa oranla bağıl viskozite azalışına neden olmuştur. Değişen akışkan katkı miktarlarından bağımsız olarak değerlendirildiğinde, referans ile 1:1'lik ikame karşılaştırıldığında bağıl viskozite %13 azalırken, cüruf oranı artmasıyla 1:1,25'lik ikamede bağıl viskozite %4, 1:1,5'lik ikamede bağıl viskozite %25 artmıştır. Burada katkı oranı azalmasına rağmen cürufun işlenebilirliğe olumlu etkisi sayesinde yayılma çapı artarken taze haldeki betonun bağıl viskozitesi azalmıştır. Daha sonra cüruf miktarının artması nedeniyle su/bağlayıcı oranının azalması etkisiyle bağıl viskozite artmıştır. Üretilen betonların KYB olmasından dolayı kayma eşiği gerilmeleri çok düşük değerlerde bulunmuştur. Beton mevcut olan kayma eşiğini kendi ağırlığı sayesinde geçerek yayılmaya başlamaktadır.

3.2 Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.2.1 Basınç deneyi

Üretilen 10x10x10 cm'lik küp numunelerde su, çuvalaltı ve hava kürleri için kalıptan sökme işlemine kadar benzer şekilde üstü çuvala kapalı beklemesinden dolayı 9 saat ve 1 günlük dayanım değerleri eşittir. Kimyasal kürler üretim yapıldıktan 4 saat 15 dakika sonra yüzeylerine kür uygulandığı için bu kürlerde 9 saat ve 1 günlük dayanım sonuçları farklıdır. Basınç dayanımı sonuçları uygulanan su, çuvalaltı, hava, akrilik, parafin ve reçine kür metotları sırasıyla Çizelge 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 ve 3.7'dedir.

Çizelge 3.2 : Su kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları

Su	9. saat	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	1,16	15,5	60,1	70,4	79,5	84,4
RefX	1,92	17,7	56,4	61,5	73,3	81,5
S1	0,69	9,1	31,1	49,3	74,7	86,3
S1X	0,95	10,1	30,5	46,6	64,5	80,0
S1,25	1,14	11,5	34,0	51,4	81,3	91,0
S1,25X	1,86	12,8	33,6	51,8	70,2	83,9
S1,5	1,61	13,8	37,4	53,3	82,7	92,7
S1,5X	1,98	15,4	33,2	47,9	75,0	87,7
S2	-	-	-	-	75,2	90,2
S2X	-	-	-	-	65,6	83,3

Çizelge 3.3 : Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları

Çuvalaltı	9. saat	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	1,16	15,5	56,9	62,8	73,8	81,8
RefX	1,92	17,7	54,7	59,2	72,7	80,9
S1	0,69	9,1	31,4	41,5	72,4	84,2
S1X	0,95	10,1	29,8	38,7	62,6	79,7
S1,25	1,14	11,5	30,5	44,3	77,1	87,2
S1,25X	1,86	12,8	32,0	44,8	68,8	81,8
S1,5	1,61	13,8	37,4	50,6	80,0	90,8
S1,5X	1,98	15,4	30,9	45,4	72,6	83,7
S2	-	-	-	-	71,9	86,6
S2X	-	-	-	-	62,6	80,0

Çizelge 3.4 : Hava kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları

Hava	9. saat	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	1,16	15,5	45,6	56,9	63,7	66,2
RefX	1,92	17,7	43,0	52,3	59,9	64,1
S1	0,69	9,1	27,5	38,3	50,2	64,0
S1X	0,95	10,1	26,9	34,7	48,6	62,3
S1,25	1,14	11,5	28,2	41,2	54,5	69,5
S1,25X	1,86	12,8	29,6	41,9	52,4	64,5
S1,5	1,61	13,8	34,9	48,2	55,7	72,4
S1,5X	1,98	15,4	30,8	44,2	56,1	65,8
S2	-	-	-	-	50,3	69,5
S2X	-	-	-	-	48,6	64,0

Çizelge 3.5 : Akrilik kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları

Akrilik	9. saat	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	1,03	13,1	47,6	56,9	67,1	69,3
RefX	1,69	14,1	45,3	54,9	64,6	66,6
S1	0,62	8,2	29,0	39,6	56,3	71,0
S1X	0,91	9,3	26,7	37,4	53,8	66,8
S1,25	1,06	11,2	29,8	42,6	61,0	73,9
S1,25X	1,70	11,4	29,8	43,8	60,0	69,2
S1,5	1,47	13,6	34,8	47,6	64,5	76,7
S1,5X	1,76	14,6	29,2	45,2	62,8	72,1
S2	-	-	-	-	56,1	73,7
S2X	-	-	-	-	53,3	68,7

Çizelge 3.6 : Parafin kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları

Parafin	9. saat	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	1,09	14,2	48,0	57,0	65,2	67,1
RefX	1,56	15,8	46,5	55,3	61,6	65,1
S1	0,62	8,0	28,5	39,6	54,1	69,7
S1X	0,90	9,0	27,2	37,7	52,9	65,1
S1,25	1,12	11,3	28,3	42,8	57,8	72,0
S1,25X	1,65	11,4	28,4	40,5	57,2	67,3
S1,5	1,48	13,2	32,8	48,9	61,4	74,2
S1,5X	1,86	14,4	29,1	45,1	59,1	69,3
S2	-	-	-	-	53,9	71,9
S2X	-	-	-	-	52,4	66,7

Çizelge 3.7 : Reçine kürü uygulanmış betonun basınç dayanımları

Reçine	9. saat	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	1,04	14,9	48,2	58,8	64,3	66,6
RefX	1,85	16,3	46,9	57,2	59,7	64,1
S1	0,63	8,5	29,0	40,7	54,0	66,3
S1X	0,94	9,6	27,9	38,1	49,9	63,7
S1,25	1,13	11,3	29,1	41,8	57,3	69,7
S1,25X	1,79	11,9	29,6	40,1	55,4	65,6
S1,5	1,59	13,5	34,4	48,0	59,3	73,7
S1,5X	1,91	14,6	30,0	44,2	57,4	67,3
S2	-	-	-	-	53,9	69,9
S2X	-	-	-	-	49,3	64,4

9 saatlik sonuçlara göre kür grupları arasından su, çuvalaltı ve hava için 0,7-2 MPa mertebesinde sonuç elde edilirken kimyasal kür uygulanan betonlarda su altında tutulanlara oranla reçine uygulananda %3-5, parafin uygulananda %4-10 ve akrilik uygulananda ise %10-12 daha düşük değere ulaşmıştır. Bunun nedeni kimyasal kür malzemelerin uygulanan numunelerin çuval altında tutulan numunelere göre daha fazla su kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan kimyasal kür tiplerinin su kaybını engelleme performanslarının 4,5 saatlik bir uygulama süresinde meydana getirdiği fark görülebilmektedir. 9. saatteki sonuçlara bakılınca çimento yerine 1:1 lik ikame yapılan betonların dayanım değeri %40 azalmıştır. Daha sonra cüruf miktarı arttıkça basınç değerleri referans karışıma oranla 1:1,25'lik karışım için %3-8, 1:1,5'lik karışımında ise %40-50 arasında basınç dayanımı değeri yükselmiştir. Bu durum 1:1,5 ikame uygulanan karışımlarda su/bağlayıcı oranının 0,37'den 0,32'ye

kadar düşmesinden kaynaklanmaktadır. Sentetik C-S-H kullanılması ise referans karışım numunelerinin 9 saatlik basınç dayanım değerlerinde %45-75 arasında artış sağlarken YFC'li numunelerde ise %20-50 arasında artış elde edilmiştir. Buradan sentetik C-S-H katkısının çimentonun hidratasyonunu hızlandırdığını, YFC'nin puzolanik reaksiyonunu etkilemediği söylenebilir.

1 günlük değerlere göre ise su, çuvalaltı ve hava kürü uygulanan betonlar 9-18 MPa dayanıma sahipken kimyasal kür gruplarında su kürüne göre akrilik uygulananlarda %2-18 arasında, parafin uygulananlarda %4-10 arasında ve reçine uygulananlarda %5-8 arasında daha düşük dayanım değerleri vermiştir. YFC katkılı sentetik C-S-H içermeyen betonların basınç dayanımları referansla karşılaştırıldığında sadece çimento kullanılan karışımlara göre kür koşullarına bağlı olarak 1:1'lik ikamede %35-45, 1:1,25'lik ikamede %15-25, 1:1,5'lik ikamede ise %8-12 arasında azalmıştır. Sentetik C-S-H kullanılan betonlarda referansa oranla 1:1'lik ikamede %30-45, 1:1,25'lik ikamede %0-10 arasında azalış mevcutken 1:1,5'lik ikamede ise %7-11 arasında artmıştır.

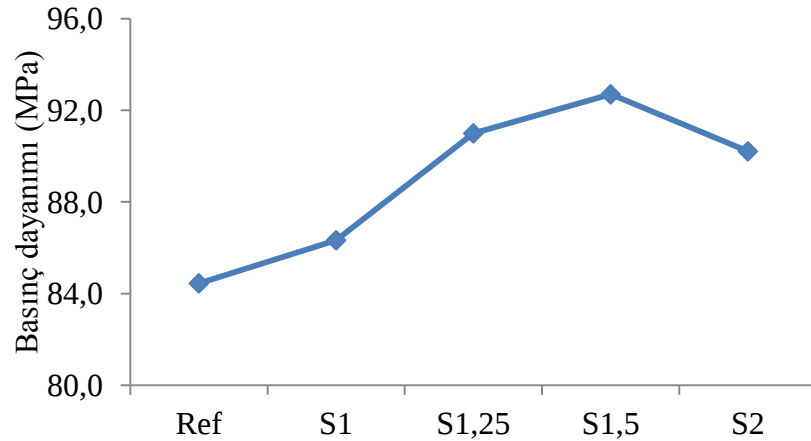
3 günlük sonuçlarında ise en yüksek basınç dayanımı beklendiği üzere su kürü için elde edilmiş, ardından sırasıyla çuvalaltı, reçine, parafin, akrilik ve hava kürü uygulanan numuneler gelmiştir. Çimentolu karışımlar yaklaşık 45-60 MPa dayanıma sahipken S1 (300 kg/m³ çimento + 200 kg/m³ cüruf) grubunda %50 azalarak 27-31 MPa mertebelerinde dayanıma ulaşmıştır. Cüruf miktarı arttıkça dayanımlar 1:1,25'lik karışım için 30-35 MPa'a, 1:1,5'lik karışım için ise 33-37 MPa mertebesine çıkarak referansa yaklaşmıştır. Sentetik C-S-H kullanılan betonlarda ise dayanım artışı kullanılmayanların gerisinde kalmış ve 3 günlük basınç değerleri sadece çimentolu karışımlarda %3-10, cüruf lu karışımlarda %2-15 arasında azalmıştır.

7. gündeki sonuçlarda da genel olarak 3 günlük basınç dayanımı sonuçlarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sadece çimentolu ikamelerde en yüksek dayanıma ulaşılırken 1:1'lik cüruf ikameli numunelerde en düşük dayanım sonuçları vermiştir. Su küründe 45-75 MPa, çuvalatı küründe 39-63 MPa ve hava küründe 34-57 MPa basınç dayanımı çıkmıştır. Kimyasal kürlerde de reçine 38-59 MPa'a ulaşırken akrilik 37-57 MPa arasında değerlere sahiptir. Ref kodlu karışıma oranla 1:1'lik ikame yapılınca dayanım %30-35'lik daha düşük değere sahipken cüruf miktarı arttıkça bu fark %15-25'e kadar azalmıştır. Sentetik C-S-H olan betonlarda RefX

kodlu karışıma göre 1:1'lik ikame yapılınca dayanım %25-35'lik daha düşük değere sahipken cüruf miktarı arttıkça bu fark %15-25'e kadar azalmıştır.

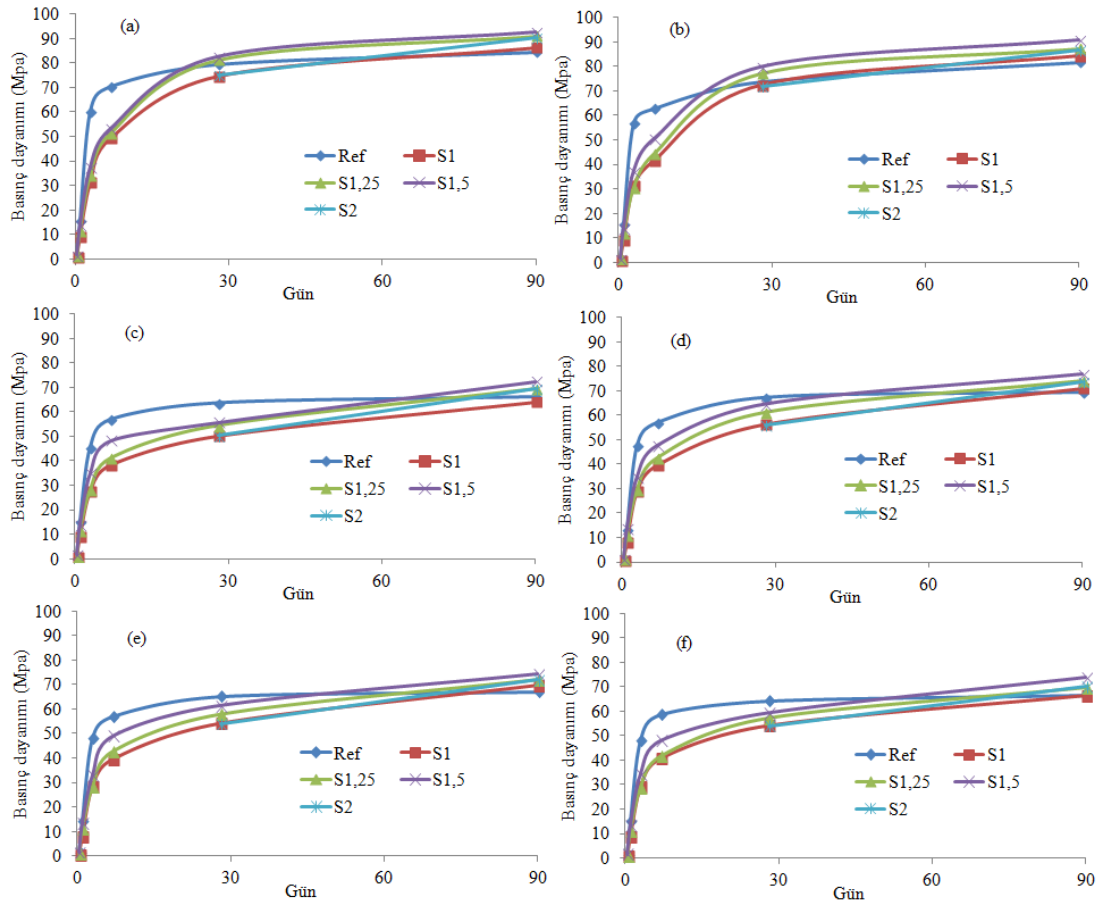
28 günlük değerlerde ise su kürü uygulanan betonlar 65-83 MPa dayanıma ulaşırken hava kürü uygulananlar 48-64 MPa dayanıma seviyesinde kalmıştır. Kimyasal kürlerde ise akrilik uygulanan 54-67 MPa değerde iken parafin uygulanan 54-65 MPa, reçine uygulanan ise 54-64 MPa dayanımına ulaşmıştır. YFC'li karışımlardan su kürü uygulanmış numunelerin basınç dayanımlarında referansa göre S1,25 için %2 ve S1,5 için %4 daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bu artış 1:2'lik karışımlarda sona erip %5'lik değer kaybı gözlemlenmiştir. Sentetik C-S-H olan karışımlarda RefX karışımına oranla basınç dayanımları 1:1'lik ikamede %10-20 arasında, 1:1,25'lik ikamede %5-12 arasında, 1:1,5'lik ikamede %0-4 arasında azalmıştır.

90 günlük sonuçlarda ise yüksek basınç dayanımları sıralaması su, çuvalaltı, akrilik, parafin, reçine ve hava kürleri olmuştur. YFC'li bütün karışımlar YFC'nin hidratasyonu için yeterli süre olmasından dolayı referans karışımdan %1-10 daha yüksek basınç dayanıma sahiptir. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere Ref karışımından sonra artış S1,5 karışımında en yüksek seviyeye ulaşip S2 karışımı sonuçları ile azalışa geçmiştir. Bunun nedeni, YFC'nin belli bir ikame oranından sonra puzolanik reaksiyonun ikinci planda kalıp cürufun filler etkisinin ortaya çıkmasıdır. Sentetik C-S-H olan karışımlar kendi referanslarından %3-7 kadar daha düşük değerler elde etmiştir. Bu sonuç sentetik C-S-H'ın erken yaşlarda dayanımı arttırırken betonun boşluk yapısını etkileyip ileriki yaşlarda betonun basınç dayanımına olumsuz etkisinden kaynaklanmıştır.



Şekil 3.2 : Su kürü uygulanmış sentetik C-S-H içermeyen numunelerin 90 günlük basınç dayanımları

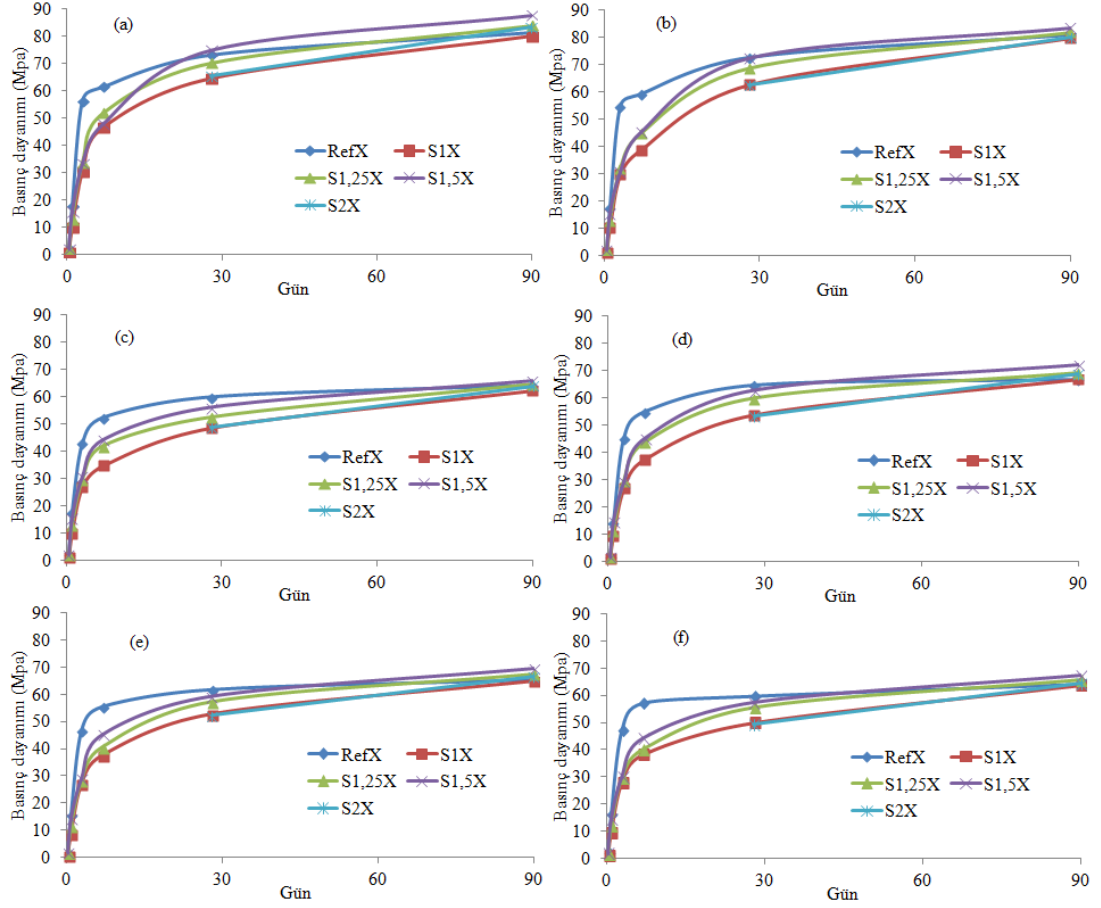
Sentetik C-S-H içermeyen numunelerde Şekil 3.3’de bütün kür uygulamaları için basınç dayanımları gösterilmiştir. Kür koşullarına göre incelendiğinde su ve çuvalaltı kürü uygulanan cürufllu numunelerde dayanım gelişiminin diğer kürlere göre daha iyi olması dayanım gelişimi için su ihtiyacının önemini göstermektedir. Hava kürü uygulansa bile 90 günlük numunelerde cüruf ikamelı karışımların sadece çimentolu karışımların dayanımına ulaşması kür süresinin önemini göstermektedir. Çimento hidratasyonunun puzolanik reaksiyona göre daha hızlı olmasından dolayı Ref kodlu karışımın hızlı gelişimi görülmektedir. Ancak ileriki yaşlarda YFC’nin puzolanik reaksiyonu nedeniyle cürufllu karışımlar referanstan daha yüksek dayanıma ulaşmıştır. Ayrıca 9. saatte su/bağlayıcı oranının YFC etkinliği üzerine etkisi en fazla iken 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük numunelerde bu etki azalmaktadır.



Şekil 3.3 : Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları

Sentetik C-S-H içeren numunelerde ise Şekil 3.4’te bütün kür uygulamaları için basınç dayanımları verilmiştir. Kür koşullarına göre incelendiğinde dışarıdan su verilen numunelerde dayanım gelişimi diğer kür metotlarından daha etkili olduğu

görülmektedir. Uzun süre kür uygulanması durumunda ise cürufun puzolanik reaksiyon için yeterli süre bulmasıyla dayanım gelişimi bütün kür metotlarında artış göstermiştir. Sadece çimentolu karışımlarda erken yaşlarda gelişim daha fazla iken cüruf ikameli betonlarda ileriki yaşlar için daha fazla gelişim kaydedilmiştir. Bu da YFC'nin hidratasyonu için daha uzun süre gerekmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.4 : Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin basınç dayanımları

3.2.2 YFC etkinlik katsayıları

YFC bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip olması bakımından beton üretiminde diğer puzolanlara oranla daha fazla çimento ile ikame edilmektedir. Bu çalışmada 500kg/m^3 çimento içeren bir kendiliğinden yerleşen betonda %40 oranında çimento YFC ile yer değiştirilmiştir. YFC etkinliğinin belirlenmesi amacıyla %40 oranında çimento ile ikame edilen YFC miktarları daha önce tarif edilen şekilde değiştirilmiştir. Sadece çimento ile üretilen karışım ile aynı basınç dayanımına sahip YFC katkılı betondaki YFC miktarı, ikame edilen çimentoya eşdeğer YFC miktarını vereceğinden bu miktarları birbirine bölerek etkinlik katsayıları hesaplanmıştır.

Çalışmada, basınç dayanımları elde edildikten sonra bu veriler bölüm 1.1.5.3'te anlatıldığı üzere Bolomey ve Feret denklemlerinde kullanılarak YFC'nin etkinlik katsayıları bulunmuştur. Buradan elde edilen cüruf ve eşdeğer çimento miktarı grafiği ile en ideal cüruf/bağlayıcı oranı belirlenebilir [41, 42].

Örnek olarak göstermek için su küründe bekleyen numune değerlerine göre çözüm yaparsak Bolomey ve Feret denklemleri ile K_B değeri 39,62 MPa (90 günlük) K_F değeri ise 430,82 MPa (90 günlük) çıkmıştır. Daha sonra cürufun ikamesi ile bu değerler 1.3 ve 1.4 denklemlerinde yerine koyarak YFC'nin eşdeğer çimento içeriği değerleri (k.YFC) bulunur. Ardından eşdeğer çimento içeriği YFC miktarına bölünerek k değeri hesaplanır.

Sentetik C-S-H içeren ve içermeyen numunelerin 28 ve 90 günlük Bolomey ve Feret denklemleri uygulanarak bulunan k değerleri Çizelge 3.8, 3.9, 3.10 ve 3.11'de mevcuttur.

Çizelge 3.8 : Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin k değerleri (28 günlük)

Sentetik C-S-H'sız	Bolomey				Feret			
YFC miktarı	200	250	300	400	200	250	300	400
Su	0,88	0,84	0,72	0,45	0,81	0,78	0,68	0,41
Çuvalaltı	0,96	0,87	0,78	0,47	0,89	0,82	0,74	0,44
Hava	0,57	0,57	0,50	0,29	0,50	0,51	0,45	0,25
Akrilik	0,67	0,65	0,61	0,33	0,60	0,59	0,57	0,30
Parafin	0,66	0,62	0,59	0,32	0,59	0,56	0,54	0,29
Reçine	0,68	0,62	0,56	0,34	0,61	0,56	0,51	0,30

Çizelge 3.9 : Sentetik C-S-H içeren numunelerin k değerleri (28 günlük)

Sentetik C-S-H'lı	Bolomey				Feret			
YFC miktarı	200	250	300	400	200	250	300	400
Su	0,76	0,73	0,70	0,39	0,69	0,68	0,65	0,36
Çuvalaltı	0,72	0,71	0,67	0,36	0,65	0,66	0,62	0,32
Hava	0,62	0,60	0,58	0,31	0,55	0,54	0,54	0,27
Akrilik	0,66	0,68	0,63	0,32	0,59	0,63	0,58	0,29
Parafin	0,71	0,69	0,61	0,35	0,64	0,63	0,57	0,31
Reçine	0,67	0,68	0,61	0,32	0,59	0,63	0,57	0,29

Çizelge 3.10 : Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin k değerleri (90 günlük)

Sentetik C-S-H'sız	Bolomey				Feret			
YFC miktarı	200	250	300	400	200	250	300	400
Su	1,05	0,93	0,80	0,57	0,98	0,88	0,76	0,54
Çuvalaltı	1,06	0,91	0,82	0,56	0,99	0,86	0,78	0,53
Hava	0,93	0,88	0,79	0,55	0,86	0,83	0,75	0,52
Akrilik	1,05	0,91	0,81	0,57	0,98	0,86	0,77	0,53
Parafin	1,08	0,92	0,81	0,57	1,01	0,87	0,77	0,54
Reçine	0,99	0,87	0,81	0,55	0,92	0,82	0,77	0,52

Çizelge 3.11 : Sentetik C-S-H içeren numunelerin k değerleri (90 günlük)

Sentetik C-S-H'lı	Bolomey				Feret			
YFC miktarı	200	250	300	400	200	250	300	400
Su	0,96	0,85	0,77	0,52	0,89	0,80	0,73	0,49
Çuvalaltı	0,97	0,82	0,71	0,49	0,90	0,76	0,67	0,45
Hava	0,94	0,81	0,70	0,50	0,87	0,75	0,66	0,46
Akrilik	1,01	0,86	0,78	0,53	0,94	0,81	0,74	0,50
Parafin	1,00	0,85	0,75	0,52	0,93	0,80	0,71	0,49
Reçine	0,99	0,84	0,73	0,50	0,92	0,78	0,69	0,47

28 günlük sentetik C-S-H içermeyen numunelerin Bolomey denkleminde hesaplanan k değerlerine göre hava küründe 0,29 ile 0,57 arasında olduğu görülmektedir. Bu durum, 500 kg/m³ çimento içeren bir betonda çimentonun 200 kg kadarını cüruf ile beton basınç dayanımından ödün vermeden yer değiştirmek istediğimizde beton hesabına girmesi gereken YFC miktarının eş değer çimento içeriği yaklaşık 350 kg (k=0,57 için) ile 690 kg (k=0,29 için) arasında olması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu da hava kürünün YFC için yetersiz olduğunu göstermektedir. Su ve çuvalaltı kürü uygulanan numunelerde k değerlerinin 0,96 ile 0,45 arasında bulunmuştur. Kimyasal kür uygulanan beton numunelerinde su kürü uygulananlara göre %18-33 daha düşük etkinlik katsayısı elde edilmesi, buharlaşmasını engellemenin yeterli olmadığını, karışım suyunun yanında dış ortamdan da su ihtiyacının karşılanması dayanım gelişimine etkisini göstermektedir. Kimyasal kür gruplarının k değerleri 0,67 ile 0,33 arasında, birbirine yakın çıkmıştır. Ayrıca cüruf oranı arttıkça k değerinde azalma meydana

gelmektedir. Bu da belli bir sınırdan sonra karışıma eklenen YFC'nin betonun mekanik özelliklerine etkisinin azaldığını göstermektedir. Bolomey denklemi ile elde edilen k değerleri, Feret denklemi ile elde edilen k değerlerinden %7-8 daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, kullanılan malzemelerin Bolomey denkleminde ağırlığa göre hesap yapılırken Feret denklemine ise hacme göre hesap yapılması olduğu düşünülmektedir.

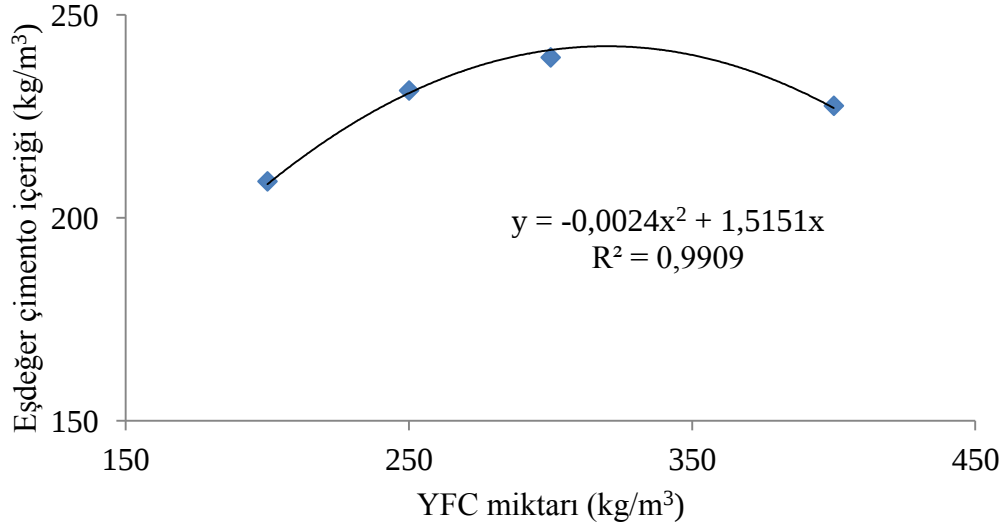
28 günlük ve sentetik C-S-H içeren numunelerin Bolomey denklemlerinde k değerlerine genel olarak bakıldığında hava kürü dışında sentetik C-S-H olmayan numunelere oranla %2 ile %14 arasında daha düşük çıktığı görülmüştür. Sentetik C-S-H'nin ileri yaşlarda etkinlik değerine olumsuz etki yaptığı anlaşılmaktadır. Hava küründe k değeri 0,62 ile 0,31 arasında çıkmıştır. Sentetik C-S-H, YFC etkinliğini bir miktar arttırsa da pozolanik reaksiyonun gerçekleşmesi için su gerekliliği burada da kendini göstermiştir. Etkinlik katsayısı (k) değerleri yine cüruf oranı artmasıyla azalma göstermiştir. Bu da daha önceden bahsedildiği üzere YFC'nin belli bir ikame oranından sonra pozolanik reaksiyonun ikinci planda kalıp cürufun filler etkisinin ortaya çıkmasındandır.

90 günlük sentetik C-S-H içermeyen numunelerin k değerleri, Bolomey denklemiyle hesaplandığında hava kürü için 0,93-0,55 arasında diğer kürlerde ise 1,05-0,57 arasında çıkmıştır. Etkinlik katsayısı (k) değerinin 1'den yüksek olması çıkarılan çimento yerine eklenen YFC'nin daha etkili olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle aynı beton basınç dayanımına ulaşmak için çıkarılan çimento miktarından daha düşük miktarda YFC'nin beton hesabına katılması yeterli olacağı anlamına gelmektedir.

90 günlük sentetik C-S-H olan numunelerde ise Bolomey denklemi kullanılarak sırasıyla su kürü ile 0,96-0,52, çuvalaltı kürü ile 0,97-0,49, hava kürü ile 0,94-0,5, akrilik kürü ile 1,01-0,53, parafin kürü ile 1-0,52, reçine kürü ile 0,99-0,5 etkinlik değerleri bulunmuştur.

28 günlük k değerleri 90 günlükler ile karşılaştırıldığında ise, bütün YFC dozları için artış görülmektedir. Bunun nedeni pozolanik reaksiyonun erken yaşlarda çimento hidratasyonuna göre yavaş olması ve 28 günden sonra çimento hidratasyonu büyük oranda tamamlanırken YFC'nin pozolanik reaksiyonunun devam etmesinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, eşdeğer çimento içeriği ile ikame edilen YFC miktarları arasında Şekil 3.5'te görülen ilişki elde edilmiştir. Grafikte gösterilen polinomial denkleme ait eğrinin tepe noktasında dayanımın en büyük değerine ulaşmasından dolayı cürufun optimum miktarı bulunabilir. Çizelge 3.12 ve 3.13'te sırasıyla denklemler ve korelasyon katsayıları mevcuttur.



Şekil 3.5 : Bolomey denklemi için su küründe beklemiş numunenin eşdeğer çimento-YFC miktarı grafiği

Çizelge 3.12 : Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin denklemleri (90 günlük)

Sentetik C-S-H'siz	Bolomey	R ²	Feret	R ²
Su	$y = -0,0024x^2 + 1,5151x$	0,9909	$y = -0,0022x^2 + 1,4274x$	0,9957
Çuvalaltı	$y = -0,0024x^2 + 1,537x$	0,9232	$y = -0,0023x^2 + 1,4503x$	0,9151
Hava	$y = -0,0021x^2 + 1,3933x$	0,8912	$y = -0,0019x^2 + 1,3014x$	0,8498
Akrilik	$y = -0,0024x^2 + 1,5179x$	0,9575	$y = -0,0022x^2 + 1,4303x$	0,95
Parafin	$y = -0,0024x^2 + 1,5413x$	0,9021	$y = -0,0023x^2 + 1,4547x$	0,9468
Reçine	$y = -0,0022x^2 + 1,449x$	0,8878	$y = -0,0021x^2 + 1,3589x$	0,8488

Sentetik C-S-H içermeyen 90 günlük numunelerde Bolomey ve Feret ile elde edilen denklemlere bakılınca YFC/bağlayıcı miktarı %50 ile %53 arasında iken maksimum noktaya ulaştığını göstermiştir. Bu da optimum YFC miktarının 300 ile 340 kg arası olduğunu göstermektedir. Oner ve Akyuz [42] yaptıkları çalışmada %30 ikame oranı için bu değeri %55 ile 59 arasında olduğunu hesaplamışlardır. Hava ile reçine küründe korelasyon değerleri 0,9'un altında iken diğer kür gruplarında 0,9'un üstünde çıkmıştır.

CEM I tipi çimentolar için çimento kütlesine oranla % 45'e kadar yüksek fırın cürufu kullanıldığında eşdeğer su/çimento oranı (su/çimento)_{eq} hesaplanmasında $k = 0,8$ alınır [21]. 90 günlük numunelerde optimum değer olarak seçilen (yaklaşık YFC/ toplam bağlayıcı = %50) etkinlik değerleri 0,79-0,82 arasında olmasıyla standarda yakın bir değer elde edilmiştir.

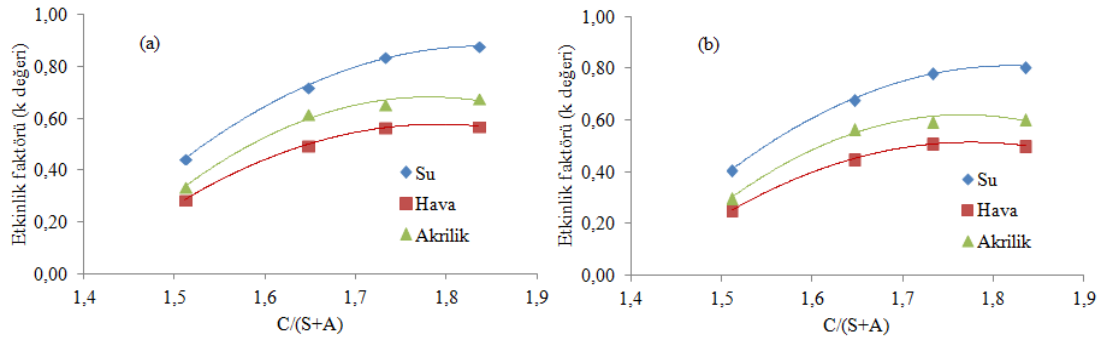
Çizelge 3.13 : Sentetik C-S-H içeren numunelerin denklemleri (90 günlük)

Sentetik C-S-H'lı	Bolomey	R ²	Feret	R ²
Su	$y = -0,0022x^2 + 1,4165x$	0,9273	$y = -0,0021x^2 + 1,3248x$	0,8921
Çuvalaltı	$y = -0,0023x^2 + 1,4113x$	0,8636	$y = -0,0022x^2 + 1,3186x$	0,9263
Hava	$y = -0,0021x^2 + 1,3537x$	0,908	$y = -0,002x^2 + 1,2593x$	0,9645
Akrilik	$y = -0,0023x^2 + 1,4594x$	0,9304	$y = -0,0022x^2 + 1,3692x$	0,9192
Parafin	$y = -0,0023x^2 + 1,4414x$	0,9458	$y = -0,0021x^2 + 1,3502x$	0,967
Reçine	$y = -0,0023x^2 + 1,4335x$	0,9084	$y = -0,0022x^2 + 1,3418x$	0,9475

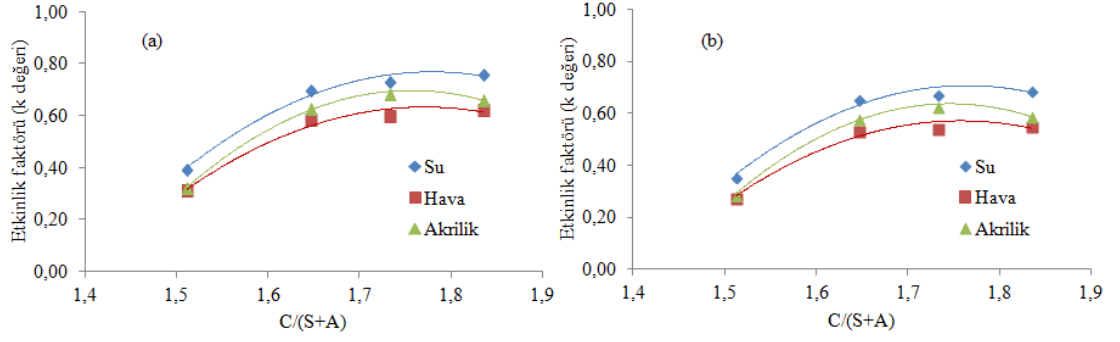
Sentetik C-S-H katkılı 90 günlük numunelerde de Bolomey ve Feret ile elde edilen denklemlere göre YFC/ bağlayıcı miktarı %50 ile %53 arasında iken en büyük basınç dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Bu da optimum YFC miktarının 300 ile 340 kg arası olduğunu göstermektedir. Korelasyon değerleri ise yüksek çıkmıştır.

TS EN 206-1'de sentetik C-S-H kullanılması durumunda YFC'nin etkinlik değeri için bir veri belirtilmediği için herhangi bir kıyaslama yapılamamaktadır.

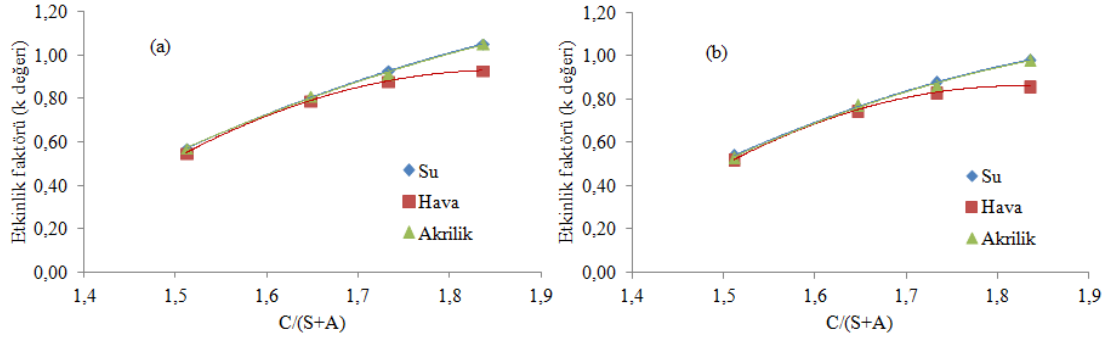
Karışımlardaki miktarlarına bağlı olarak çimento ve cürufun kimyasal bileşenlerinin (kalsiyum oksit, silisyum dioksit ve alüminyum oksit) etkinlik değerine etkisini inceleyebilmek için numunelerin 28 günlük sonuçlarının kimyasal bileşen-etkinlik grafikleri Şekil 3.6 ve 3.7'de, 90 günlük sonuçların kimyasal bileşen-etkinlik grafiği Şekil 3.8 ve 3.9'da mevcuttur.



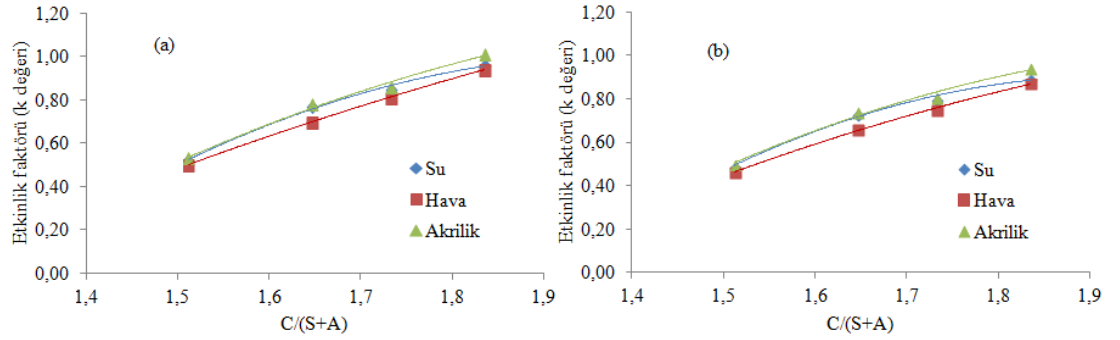
Şekil 3.6 : Sentetik C-S-H içermeyen 28 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği



Şekil 3.7 : Sentetik C-S-H içeren 28 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği



Şekil 3.8 : Sentetik C-S-H içermeyen 90 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği



Şekil 3.9 : Sentetik C-S-H içeren 90 günlük numunelerin (a) Bolomey ve (b) Feret denklemi için kimyasal bileşen-etkinlik faktörü grafiği

Çimentodaki kalsiyum oksit (CaO) içeriği cüruftan daha fazla iken silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içeriği cürufda daha fazladır. Bu nedenle karışıma ikame edilen cüruf miktarı arttıkça C/S+A miktarı azalmaktadır. Önceki verilerde görüldüğü üzere YFC miktarının artmasıyla etkinlik değerleri azalmıştır. Grafiklerde de C/S+A oranının azalması ile etkinlik değeri azalmaktadır. Bu da puzolanik reaksiyonda CaO 'nun hidrate olmasıyla açığa çıkan serbest kireç ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Numune içinde yeterli miktarda serbest kireç olmazsa cüruf reaksiyona girmeyip ince agregası görevi görmektedir. Bu da etkinlik değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Kür metotlarına bağlı olarak değişen etkinlik değerleri

28 günlük numunelerin grafiklerinde belirgin olarak görülmektedir. Su kürü cürufun hidratasyonunda gereken su ihtiyacını hava kürüne göre daha iyi sağlamasından dolayı etkinlik değeri yüksek çıkmıştır. Kimyasal kürlerde mevcut suyun buharlaşmasını yavaşlatmasından dolayı hava kürüne göre daha iyi bir etkinlik değerine ulaşmıştır. 90 günlük numunelerin grafiklerinde ise 28 günlüklere oranla etkinlik katsayılarındaki artış görülmektedir. Etkinlik değerlerinin 1'i geçmesi ise karışıma ilave edilen cürufun çıkarılan çimentodan daha yüksek bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Sentetik C-S-H katkısı ise etkinlik katsayısını azaltması ise erken yaşta hidratasyonu hızlandırırken ileri yaşlardaki numunenin performansına olumsuz etki oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, bu yöntemde kimyasal bileşen ile etkinlik değeri arasındaki ilişki kullanılan cürufun incelik, aktif silis ve özgül ağırlık gibi fiziksel özellikleri dikkate almadığından sınırlıdır.

3.2.3 Yarma deneyi

Üretilen karışımlardan elde edilen 10x10x10 cm'lik küp numuneler 9. saatte yapılan yüklemelerde ideal bir biçimde göçmediği için yarma dayanımlarının ölçümüne 1. günden itibaren başlanmıştır. Su, çuvalaltı ve hava kürü uygulanacak numuneler 24 saat boyunca plastik örtü altında tutulduğu için değerleri aynı bulunmuştur. Çizelge 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 ve 3.19'da farklı kür koşulları (su, çuvalaltı, hava, akrilik, parafin ve reçine) için 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük numunelerin yarma dayanımı sonuçları mevcuttur.

Çizelge 3.14 : Su kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları

Su	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	2,32	5,42	6,31	6,71	7,17
RefX	2,34	5,53	5,78	6,05	6,33
S1	1,23	3,61	4,58	6,89	7,83
S1X	1,25	3,14	4,27	6,59	6,86
S1,25	1,48	3,52	5,43	7,57	8,03
S1,25X	1,48	3,41	4,65	6,52	7,66
S1,5	1,87	3,79	5,51	7,75	8,12
S1,5X	1,89	3,46	5,24	6,89	7,77

Çizelge 3.15 : Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları

Çuvalaltı	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	2,32	4,68	5,91	6,14	6,56
RefX	2,34	5,11	5,37	5,78	6,03
S1	1,23	3,48	4,20	5,52	6,60
S1X	1,25	3,09	4,00	5,54	6,32
S1,25	1,48	3,45	4,44	6,09	7,22
S1,25X	1,48	3,25	4,11	5,71	7,06
S1,5	1,87	3,56	4,61	6,08	7,34
S1,5X	1,89	3,40	4,95	5,96	6,84

Çizelge 3.16 : Hava kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları

Hava	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	2,32	3,68	4,80	5,32	5,95
RefX	2,34	4,26	4,64	5,13	5,43
S1	1,23	2,85	4,02	4,85	5,59
S1X	1,25	2,70	3,78	4,76	5,07
S1,25	1,48	2,84	4,04	5,31	5,91
S1,25X	1,48	3,00	3,65	5,13	5,90
S1,5	1,87	2,85	3,93	5,40	6,11
S1,5X	1,89	2,85	4,42	5,14	5,88

Çizelge 3.17 : Akrilik kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları

Akrilik	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	2,12	4,57	5,43	5,66	6,70
RefX	2,02	4,82	5,22	5,78	6,12
S1	1,13	3,03	4,20	5,08	6,38
S1X	1,04	3,02	3,68	5,30	5,73
S1,25	1,32	3,15	4,48	5,62	6,65
S1,25X	1,15	3,15	4,15	5,33	6,05
S1,5	1,73	2,94	4,53	6,21	6,94
S1,5X	1,85	3,08	4,75	5,54	6,27

Çizelge 3.18 : Parafin kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları

Parafin	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	2,13	4,89	5,30	5,59	6,16
RefX	1,83	4,48	4,89	5,62	5,96
S1	1,13	2,88	4,25	4,96	6,16
S1X	1,21	2,98	4,07	4,95	5,65
S1,25	1,39	3,07	4,41	5,48	6,24
S1,25X	1,22	2,84	3,98	5,19	5,97
S1,5	1,70	3,33	4,95	5,49	6,53
S1,5X	1,85	3,36	4,68	5,50	6,14

Çizelge 3.19 : Reçine kürü uygulanmış betonun yarma dayanımları

Reçine	1. gün	3. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	2,33	4,39	5,23	5,34	6,10
RefX	2,27	4,33	5,09	5,44	6,04
S1	1,22	3,04	3,98	5,05	5,80
S1X	1,22	2,96	3,68	4,77	5,37
S1,25	1,50	3,07	4,11	5,46	6,24
S1,25X	1,31	3,04	4,11	5,41	6,08
S1,5	1,77	3,34	4,61	5,39	6,58
S1,5X	1,90	3,20	4,45	5,08	6,26

1 günlük numunelerde referans numunesi 2,1-2,3 MPa yarma dayanımına sahipken cürufun ikame edilmesi ile dayanımlar %45-50 azalmıştır. Cüruf miktarının artmasıyla birlikte 1:1'lik ikameye oranla 1:1,25'lik ikamede %16-23, 1:1,5'lik ikamede ise %45-50 oranında yarma dayanımı yükselmiştir. Ancak referans beton dayanımlarına göre %20-40 oranında düşük kalmıştır. İlk 24 saat süresince plastik örtü altında tutulan numuneler 1,3-2,3 MPa arasında yarma dayanıma sahipken kimyasal kür uygulanmak amacıyla 4,5 saat sonra üstü açılan numunelerde ise su kürü uygulananlara oranla akrilik uygulananda %4-14, parafin uygulananda %4-10, reçine uygulananda ise %0-5 daha az dayanıma sahip olmuştur. Sentetik C-S-H katkılı numuneler içermeyenlere oranla %1-2 daha yüksek sonuç vermiştir.

3 günlük sonuçlara göre bağlayıcı olarak sadece çimento ile üretilen numuneler 3,7-5,4 MPa ile en yüksek değerlere sahip olmuştur. Cüruf ikame edilmesi ile yarma dayanımı 1:1'lik ikamede %25-40, 1:1,25'lik ikamede %25-35 ve 1:1,5'lik ikamede %25-30 azalmıştır. Kür gruplarından su kürü ile 3,2-5,5 MPa yarma dayanımı elde edilmiştir. Su kürü uygulanan numuneye göre çuvalaltında tutulanlarda %3-8, havada tutulanlarda %16-22, akrilik esaslı kür uygulananlarda %6-13, parafin uygulananlarda %10-12 ve reçine uygulananlarda %7-20 daha düşük dayanıma ulaşılmıştır. Kür gruplarında sınıflandırma yapılırsa su kürü en iyisi olurken hava en olumsuz sonucu vermiştir. Sentetik C-S-H kullanılması çimentolu karışımlarda %2-5 artış sağlarken cürufli karışımlarda %5-14 azalmaya neden olmuştur. Bunun nedeni, sentetik C-S-H'nin çimento hidrasyonunda YFC'ye göre daha etkili olması düşünülmüyor.

7 günlük yarma dayanımlarında bağlayıcı bileşimi bakımından değerlendirildiğinde, sadece çimento içeren Ref kodlu reçete 4,8-6,3 MPa sonuç verirken cüruf ikame edilince S1 kodlu karışımda %16-29, S1,25 kodlu karışımda %14-25 ve S1,5 kodlu

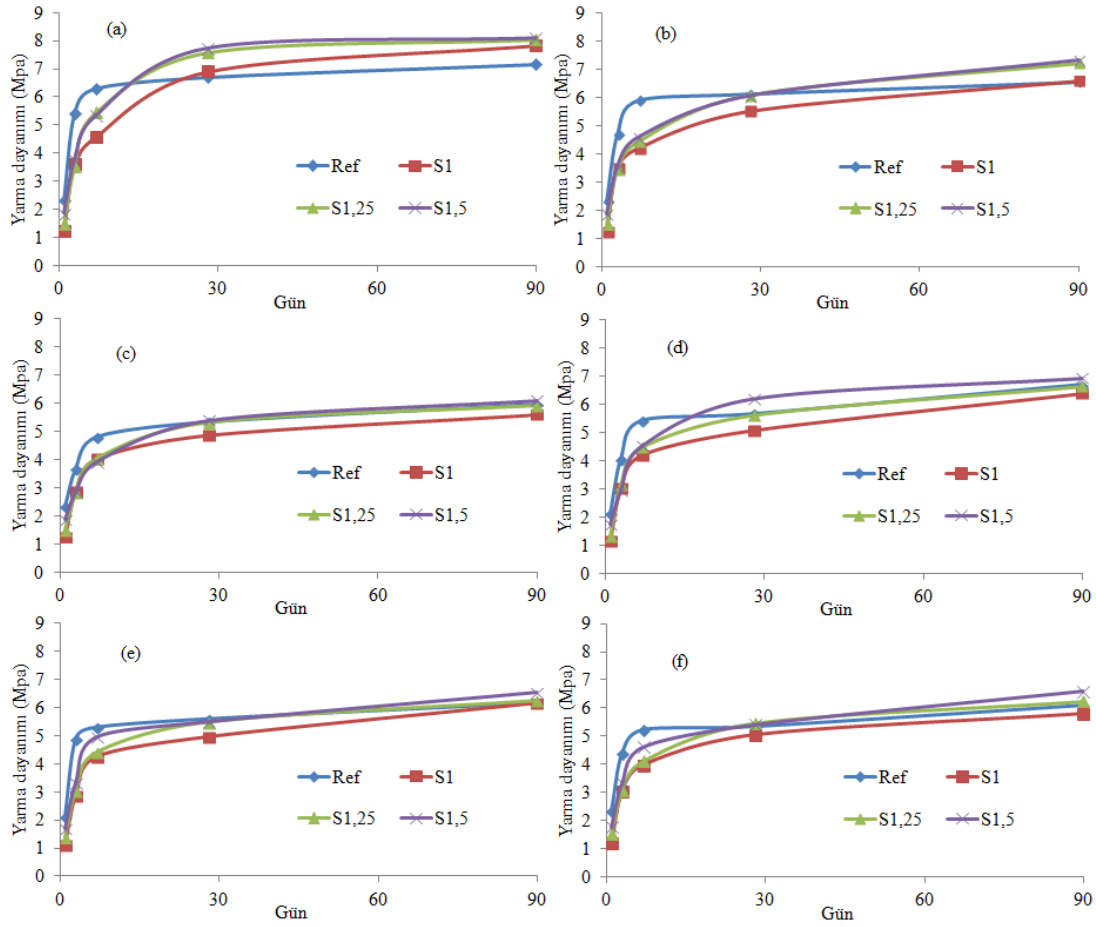
karışımda %13-22 daha düşük dayanım elde edilmiştir. Su kürü uygulanan numunelerde 4,3-6,3 MPa sağlanırken hava kürü uygulananlar ile 3,7-4,8 MPa sonuç vermiştir. Kimyasal kürler arasında akrilik uygulanan 3,7-5,4 MPa, parafin uygulanan 4,1-5,3 MPa, reçine uygulanan ise 3,7-5,2 MPa çıkmıştır. Sentetik C-S-H kullanılan karışımlar referanslara kıyasla sadece çimentolu karışımlarda %3-10, cürufllu karışımlarda %5-14 düşük sonuçlar vermiştir. Sentetik C-S-H hidratasyonu hızlandırırken sentetik C-S-H içermeyen numunelere göre daha boşluklu bir yapı oluşturduğu düşünülmektedir.

28 günlük sonuçlarda ise sadece çimento içeren numuneler 5,3-6,7 MPa dayanıma ulaşırken 1:1'lik cüruf ikameli numunelerde 4,8-6,9MPa, 1:1,25'lik cüruf ikameli numunelerde 5,3-7,6 MPa ve 1:1,5'lik cüruf ikameli numunelerde ise 5,4-7,8 MPa yarma dayanımı elde edilmiştir. Su küründe bekleyen cürufllu karışımlar 6,9-7,8 MPa dayanıma ulaşarak çimentolu karışımlardan %3-13 daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir. Su kürüne göre hava kürü uygulananlar %25-40 daha düşük dayanım sonucu verirken kimyasal kürlerde ise akrilikle uygulanan %15-20, parafin uygulanan %20-30 ve reçine uygulanan %20-35 düşük dayanım elde edilmiştir. Sentetik C-S-H olan numuneler referanslara oranla %1-10 daha düşük değer elde etmiştir.

90 günlüklerde ise çimento içeren numuneler 5,9-7,2 MPa dayanıma ulaşırken 1:1'lik cüruf ikameli numune 5,6-7,9MPa, 1:1,25'lik cüruf ikameli numune 5,9-8,0 MPa ve 1:1,5'lik cüruf ikameli numunede ise 6,1-8,1 MPa yarma dayanımı elde edilmiştir. Hava kürü ve akrilik ile reçine kürünün 1:1'lik ikameli numuneleri dışında cürufllu numuneler, sadece çimentolu numunelere oranla %2-10 daha yüksek dayanım sonucu vermiştir. Beklendiği üzere en yüksek yarma dayanımı değerleri 6,9-8,1 MPa ile su kürü uygulanan betonlarda elde edilmiş, ardından çuvalaltı ve akrilik kür metodları uygulanan numuneler sırasıyla 6,0-7,3 MPa ve 6,1-6,9 MPa dayanım değerleriyle elde edilmiştir. En düşük yarma dayanımları ise (5,1-6,1 MPa) havada saklanan numunelerden elde edilmiştir. Sentetik C-S-H kullanılması dayanım sonuçlarını %10-12 azaltmıştır. Bu da basınç deneyi sonuçlarında da görülen sentetik C-S-H'nin erken yaştaki dayanımları artırırken ileri yaşlarda dayanıma olumsuz etkisinden kaynaklanmaktadır.

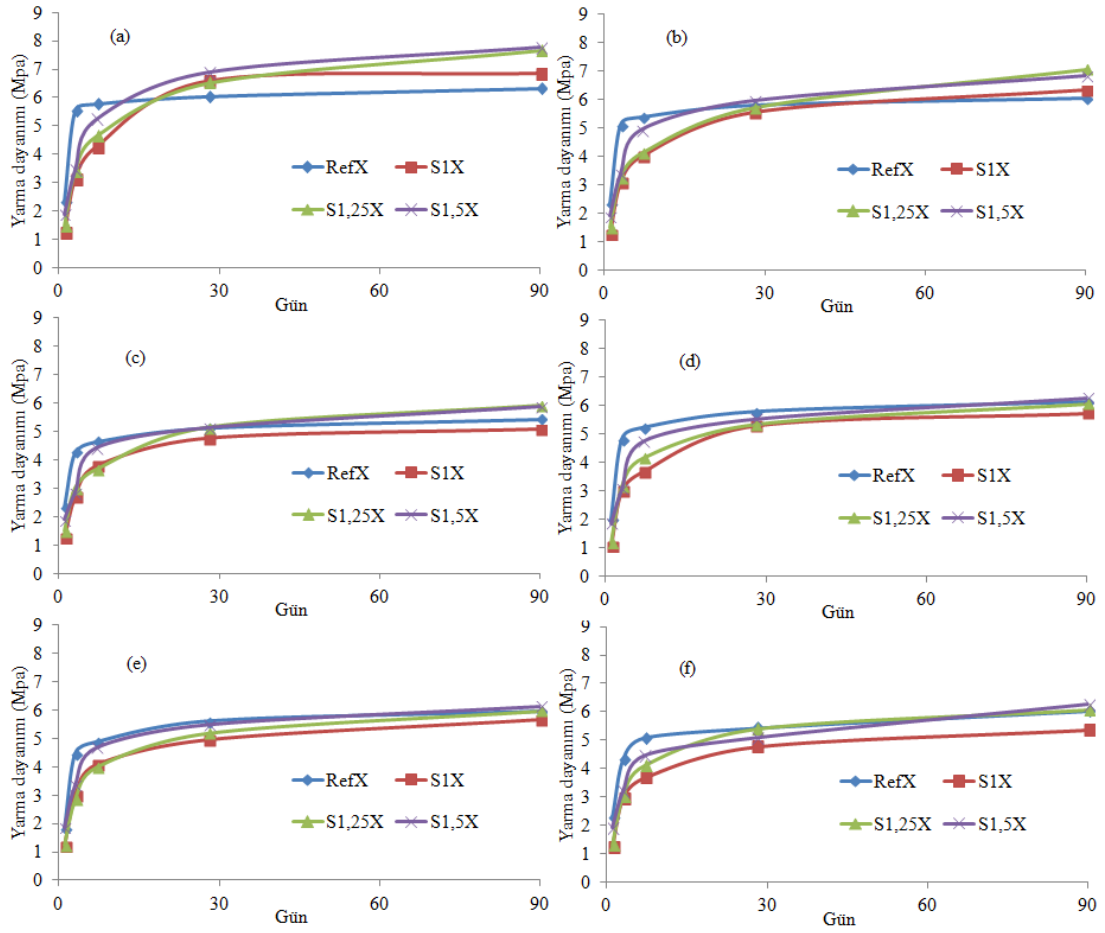
Sentetik C-S-H içermeyen numunelerde Şekil 3.10'da bütün kür uygulamaları için yarma dayanımları mevcuttur. Kür koşullarına göre incelendiğinde su kürü

uygulanan cürüflü numunelerde dayanım gelişiminin diğer kürlere göre daha iyi olması dayanım gelişimi için su ihtiyacını önemini göstermektedir. Diğer kür metodlarında ise 28 günde cüruf ikameli karışımlar referans üretiminin dayanım değerine yaklaşmış 90 günlük numunelerde 1:1'lik ikameler dışında cüruf ikameli karışımlar sadece çimentolu karışımların dayanımına ulaşmış geçmiştir. Bu da kür süresinin önemini göstermektedir. Su ve çuvalaltı kürü uygulanan 1:1'lik cüruf ikameli karışımlar çimentolu karışımları 90. günde geçerken diğer kür metodlarında bu değerler referanstan düşük çıkmıştır. Bu da eşit miktarda bağlayıcı malzeme ikamesi yapılınca cürufun hidratasyonu için gerekli olan suyun önemini bir kez daha göstermektedir. Çimento hidratasyonunun pozolanik reaksiyona göre daha hızlı olmasından dolayı Ref kodlu karışımın hızlı gelişimi görülmektedir. Ancak ileriki yaşlarda YFC'nin hidratasyonunu tamamlamasıyla 1:1,25 ve 1:1,5 cüruf ikameli karışımlar referanstan daha yüksek dayanıma ulaşmıştır. Kür gruplarına göre yarma dayanımı sonuçları basınç dayanımı sonuçlarına benzer çıkmıştır.



Şekil 3.10 : Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin yarma dayanımları

Sentetik C-S-H içeren numunelerde ise Şekil 3.11’de bütün kür uygulamaları için yarma dayanımları mevcuttur. Kür koşullarına göre incelendiğinde su kürü uygulanan numunelerde dayanım gelişimi diğer kür metotlarından daha etkili olduğu görülmektedir. Uzun süre kür uygulanması durumunda ise cürufun puzolanik reaksiyon için yeterli süre olmasıyla dayanım gelişimi bütün kür metotlarında artış göstermiştir. Sadece çimentolu karışımlarda erken yaşlarda gelişim daha fazla iken cüruf ikameli betonlarda ileriki yaşlar için daha fazla gelişim kaydedilmiştir. Ancak, hava ve kimyasal kürlerde 1:1’lik ikamede dayanım değerleri referanstan düşük çıkmıştır. Eşit miktarda bağlayıcı malzeme ikame yapılınc cürufun hidratasyonu için gerekli olan suyun önemini bir kez daha göstermektedir.

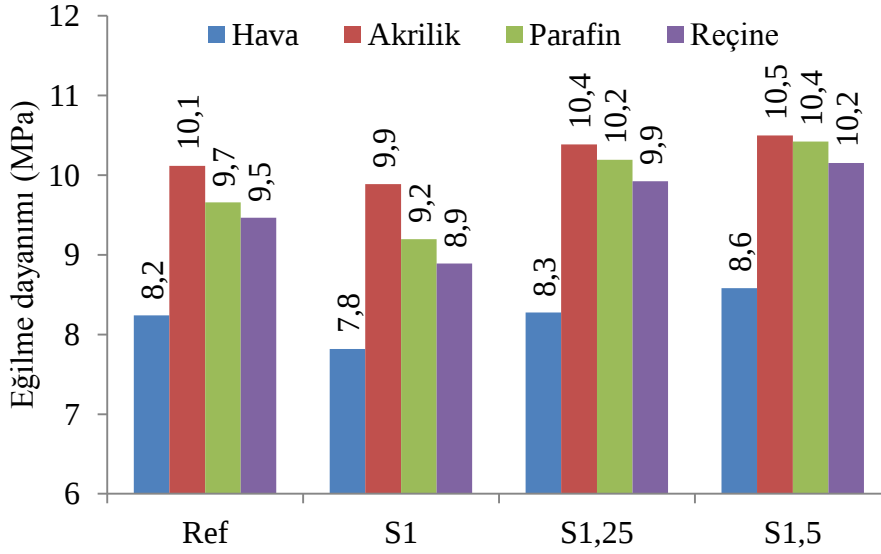


Şekil 3.11 : Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin yarma dayanımları

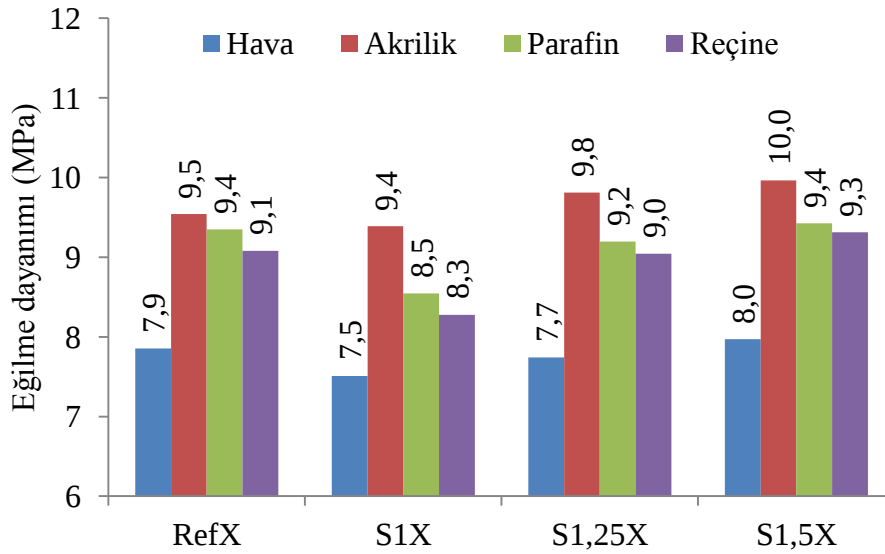
3.2.4 Eğilme deneyi

Rötre ve ağırlık kaybı deneylerinde kullanılmış 4x4x16 cm’lik numunelerde 90. günde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Bu deney rötre ölçümleri için hazırlanan numuneler üzerinde yapıldığından su ve çuvalaltı kürü uygulanan numuneler için

eğilme dayanımları ölçülmemiştir. Şekil 3.12 ve 3.13'te eğilme dayanımı sonuçları mevcuttur.



Şekil 3.12 : Sentetik C-S-H içermeyen karışımların eğilme dayanımları



Şekil 3.13 : Sentetik C-S-H içeren karışımların eğilme dayanımları

90 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına bakıldığında çimentolu karışımlar 8,2-10,1 MPa dayanıma sahipken %40 cüruf ikamesi yapılan karışımların dayanım değeri %2-4 azalmıştır. Ancak cüruf miktarının artmasıyla bu değerlerde kür koşullarına bağlı olarak %1-7 arasında artış görülmüştür. Hem puzolanik reaksiyon hem de su/bağlayıcı oranının düşmesi nedeniyle bu sonucun elde edildiği söylenebilir.

Kür malzemelerinin performanslarına bakıldığında hava küründe bekleyen numune 7,8-8,6 MPa ile en düşük sonucu verirken akrilik kürü uygulanmış numune 9,9-10,5

MPa ile en yüksek değer elde edilmiştir. Parafın ile 9,2-10,4 MPa ve reçine ile 8,9-10,2 MPa elde edildiği g r lm ştir.

Sentetik C-S-H kullanılması 90 günlük eğilme dayanımlarında %2-4 azalışa yol ağmıştır. Sentetik C-S-H malzemesinin hidratasyonu hızlandırması nedeniyle erken yaşlarda oluşan sertleşmiş imento hamurunun daha boşluklu bir i yapıya sahip olduğu ve bu durumun ileriki yaşlarda, hidratasyonu hızlandırılmamış (sentetik C-S-H içermeyen) betonlara kıyasla dezavantaj oluşturduğu söylenebilir. Diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi eğilme dayanımı değerlerinde de görülen söz konusu azalmanın aynı nedenden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Eğilme ve yarma dayanımları karşılaştırıldığında her iki deney için 1:1'lik ikamede dayanımlar referanstan daha düşük olup diğer ikamelerde referanstan daha yüksek dayanımlar elde edildiği g r lm ştir. İki dayanım değeri içinde hava en olumsuz k r metodu iken en olumlu sonucu akrilik esaslı k r metodu vermiştir. Reçine k r n n performansıylar diğer kimyasal k rlerin performansları arasındaki fark basınç dayanımlarına göre çekme dayanımlarında biraz daha azalmıştır. Bu da reçinenin epoksi bazlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.2.5 İletkenlik deneyi

Bölüm 2.4.5'de tarif edilen 4 noktalı iletkenlik ölçüm sistemi laboratuvarında kurulmuş ve 7x7x28 cm'lik prizma numunelerde ölçülen potansiyel fark ve akım formüller yardımıyla özdirenç çevrilmiştir. Çizelge 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 ve 3.25'te farklı kür metotları için 7, 28 ve 90 günlük numunelerin ölçülen ve hesaplanan özdirenç değerleri mevcuttur.

Çizelge 3.20 : Su kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)

Su	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	130,5	158,3	162,8
RefX	137,9	165,0	169,3
S1	154,2	742,5	925,6
S1X	171,1	758,8	941,7
S1,25	176,0	869,0	1064,3
S1,25X	184,0	945,3	1118,3
S1,5	183,3	895,9	1113,3
S1,5X	219,5	962,5	1150,3

Çizelge 3.21 : Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)

Çuvalaltı	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	116,6	144,0	150,7
RefX	127,1	149,4	157,3
S1	121,0	715,1	840,6
S1X	127,5	739,9	849,4
S1,25	129,3	805,9	906,1
S1,25X	150,9	829,4	966,0
S1,5	154,6	823,0	986,0
S1,5X	180,7	854,2	1014,2

Çizelge 3.22 : Hava kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)

Hava	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	58,3	82,9	87,3
RefX	63,4	86,3	93,9
S1	74,0	348,5	404,2
S1X	76,9	364,2	436,4
S1,25	81,2	353,5	416,3
S1,25X	88,1	409,7	467,5
S1,5	99,8	432,6	493,5
S1,5X	105,5	437,7	512,5

Çizelge 3.23 : Akrilik kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)

Akrilik	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	93,4	139,9	146,5
RefX	96,0	146,5	151,0
S1	118,7	669,9	783,1
S1X	118,6	719,4	809,4
S1,25	138,2	719,2	823,0
S1,25X	143,2	764,1	877,8
S1,5	147,5	783,1	896,8
S1,5X	169,7	803,8	916,2

Çizelge 3.24 : Parafin kürü uygulanmış betonun özdirenç değerleri (Ω -m)

Parafin	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	87,1	129,4	135,9
RefX	90,5	133,6	143,3
S1	102,0	661,8	744,6
S1X	98,5	685,4	752,6
S1,25	122,8	691,8	757,5
S1,25X	133,1	712,3	809,7
S1,5	140,1	740,6	809,2
S1,5X	154,0	786,5	848,3

Çizelge 3.25 : Reçine kürü uygulanmış betonun öz direnç değerleri (Ω -m)

Reçine	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	82,5	114,3	121,9
RefX	84,1	127,7	130,5
S1	97,8	605,2	695,9
S1X	97,1	679,8	737,0
S1,25	103,4	615,9	704,3
S1,25X	120,4	683,6	769,1
S1,5	136,2	699,0	735,9
S1,5X	148,2	734,8	783,7

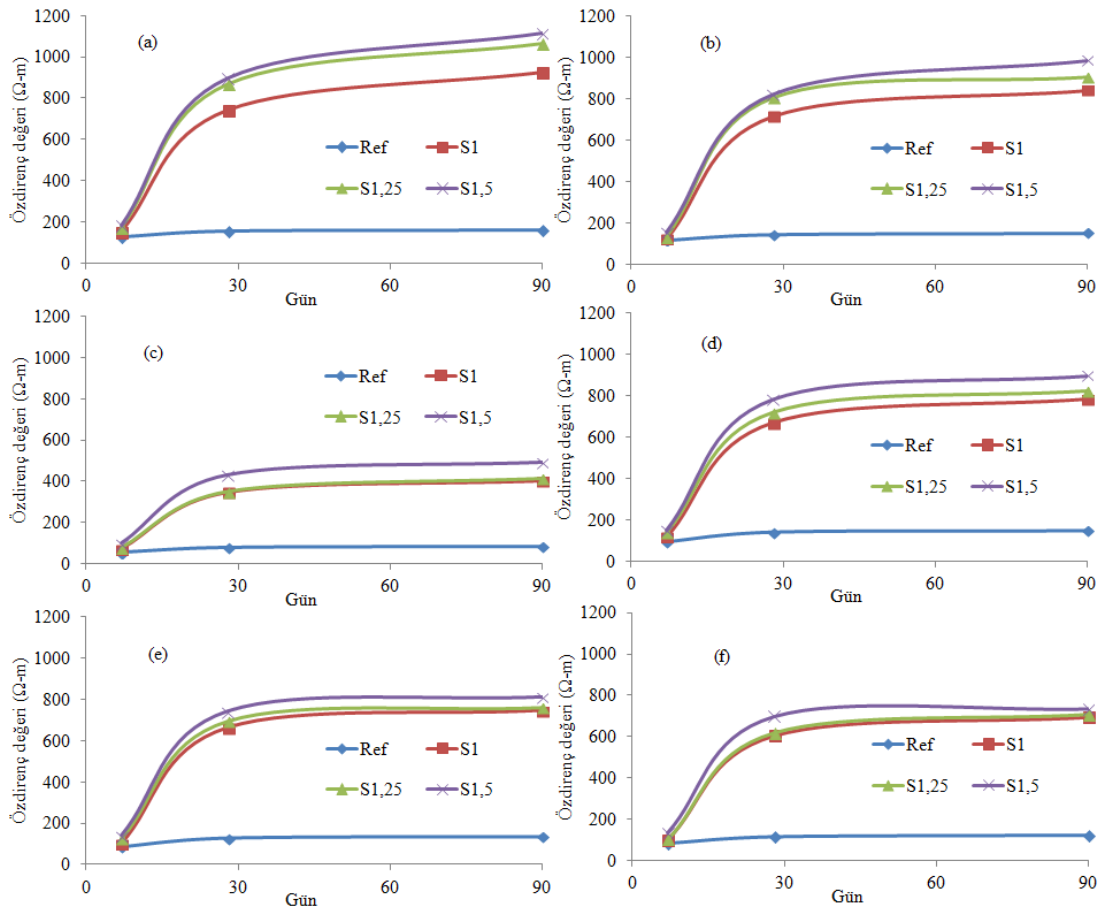
7 günlük sonuçlara bakıldığında referans betonunun öz direnci 60-130 Ω -m değere ulaşırken cürufu numunelerde 1:1'li karışımlarda 75-155 Ω -m, 1:1,25'li karışımlarda 80-175 Ω -m ve 1:1,5'li ikame 100-185 Ω -m çıkmıştır. İletkenlik beton içerisindeki iyon konsantrasyonuna olduğu kadar betonun boşluk miktarına da bağlıdır. Puzolan katkılı betonların betonun alkalinitesini düşürdüğü yani OH⁻ iyon konsantrasyonunu azalttığı bilinmektedir. YFC katkılı betonlarda meydana gelen öz direnç artışı bu nedenden kaynaklanmaktadır. Kür koşulları kıyaslandığında su kürü ile 130-185 Ω -m çıkarken hava kürü 60-100 Ω -m sonucu vermiştir. Kimyasal kürler için sıralama yaparsak akrilik (93-147 Ω -m), parafin (87-140 Ω -m), reçine (82-136 Ω -m) şeklinde bir sonuç çıkmıştır. Kür koşullarına bağlı iletkenlik değişimi büyük oranda hidratasyona bağlı boşluk miktarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Su dolu boşluk hacmi arttıkça öz direnç değerlerinde azalma görülmektedir. Kimyasal kürler arasında iletkenlik değerlerindeki farklılıklar ise boşluk miktarları arasındaki farkı yani betondan kaybolan su miktarını, dolayısıyla kimyasal kürün performansını göstermektedir. Diğer taraftan beton iletkenliği betona gömülü donatı korozyonu üzerinde de etkilidir. Korozyon hücresindeki elektrolit görevi gören nemli betona gömülü donatı korozyon hızı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynar. Bu nedenle öz direnç 100 Ω -m'den düşük betonlarda korozyon riski yüksek ve 100-500 Ω -m arasında orta seviyede riskli olduğu söylenebilir. Hava küründe 1:1,5 ikameli sentetik C-S-H içeren karışım dışındaki betonlarda korozyon ihtimali yüksektir. Sadece çimentolu karışımlarda akrilik, parafin ve reçine küründe, 1:1'lik ikameli karışımda reçine küründe, 1:1'lik ikameli sentetik C-S-H içeren karışımda parafin ve reçine küründe korozyon ihtimali yüksektir. Diğer durumlarda ise korozyon ihtimali orta seviyededir. Ancak, korozyonun yavaş olması nedeniyle erken yaştaki sonuçlar betonun performansını tam olarak temsil etmemektedir.

Tüm betonların özdirençleri ilerleyen hidrasyon artan beton yaşı ile birlikte yükselmiştir. Çünkü ilerleyen hidrasyon betonun porozitesinin azalması anlamına gelmektedir. Su dolu boşluk hacmindeki azalma da özdirenç değerlerinde yükselmeye neden olmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta –tüm kür koşullarında geçerli olmak üzere- YFC içeren karışımlardan özdirenç değerlerinin 7. günden sonra önemli ölçüde artması (en az 5 kat) söz konusu iken YFC içermeyen referans betonlarda bu artışın (7 gün ile 28 gün arasında) çok daha sınırlı seviyede meydana gelmiştir. Bu sonuçlar puzolanik reaksiyon sonucunda azalan alkalinite ve boşluk oranının büyük oranda 7 ile 28 gün arasında meydana geldiğini göstermektedir. Diğer taraftan YFC katkılı betonlarda aynı periyod içerisinde en düşük seviyede artışın hava kürüne tabi tutulan betonlarda gerçekleşmesi beklenen bir durumdur. 500-1000 Ω -m arası özdirenç sahip olan betonun donatı korozyonuna karşı koruma sağlamaktadır. Sadece çimentolu karışımlarda orta seviyede korozyon oluşma ihtimali bulunurken diğer karışımlarda hava küründe bekleyen numuneler dışında hepsinde düşük oranda korozyon riski bulunmaktadır. Su küründe 160-900 Ω -m özdirenç elde edilirken hava küründe 80-430 Ω -m özdirenç çıkmıştır. Kimyasal kürlerde elektriksel direnç sıralaması büyükten küçüğe akrilik, parafin, reçine şeklinde gerçekleşmiştir.

90 günlük karışımların özdirenç sonuçlarında çimentolu karışımlarda 28 günlük sonuçlara göre %3-7 artış varken cürufllu karışımlarda %15-20 artış olmuştur. Referansa göre cürufllu karışımlar yaklaşık 6-7 kat daha fazla çıkmıştır. Özdirenç değeri 1000 Ω -m den yüksek olan numunelerde korozyon ihtimali göz ardı edilebilmektedir. Su küründe bekleyen 1:1,25 ve 1:1,5 cürufllu numunelerde bu değerlere ulaşılmıştır. Çimentolu karışımların sonuçları orta seviyede korozyon riskine sahipken cürufllu karışımlarda hava kürü dışındaki kürlerde düşük seviyede korozyon riski bulunmaktadır. Kür koşullarından su kürüyle 160-1150 Ω -m özdirenç elde edilirken hava kürüyle 90-510 Ω -m özdirenç ulaşılmıştır. Kimyasal kürlerde ise özdirenç değerleri sıralaması büyükten küçüğe akrilik, parafin, reçine şeklinde bulunmuştur.

Ölçülen ve hesaplanan özdirenç değerleri YFC içeriği ile 5-7 kat arasında değişirken kür koşulları açısından en fazla 2-3 kat fark olduğu görülmüştür. Bu nedenle özdirenç değerlerine etkisi YFC içeriği için birinci dereceden önemli iken kür metotları için ikinci dereceden olduğu tespit edilmiştir.

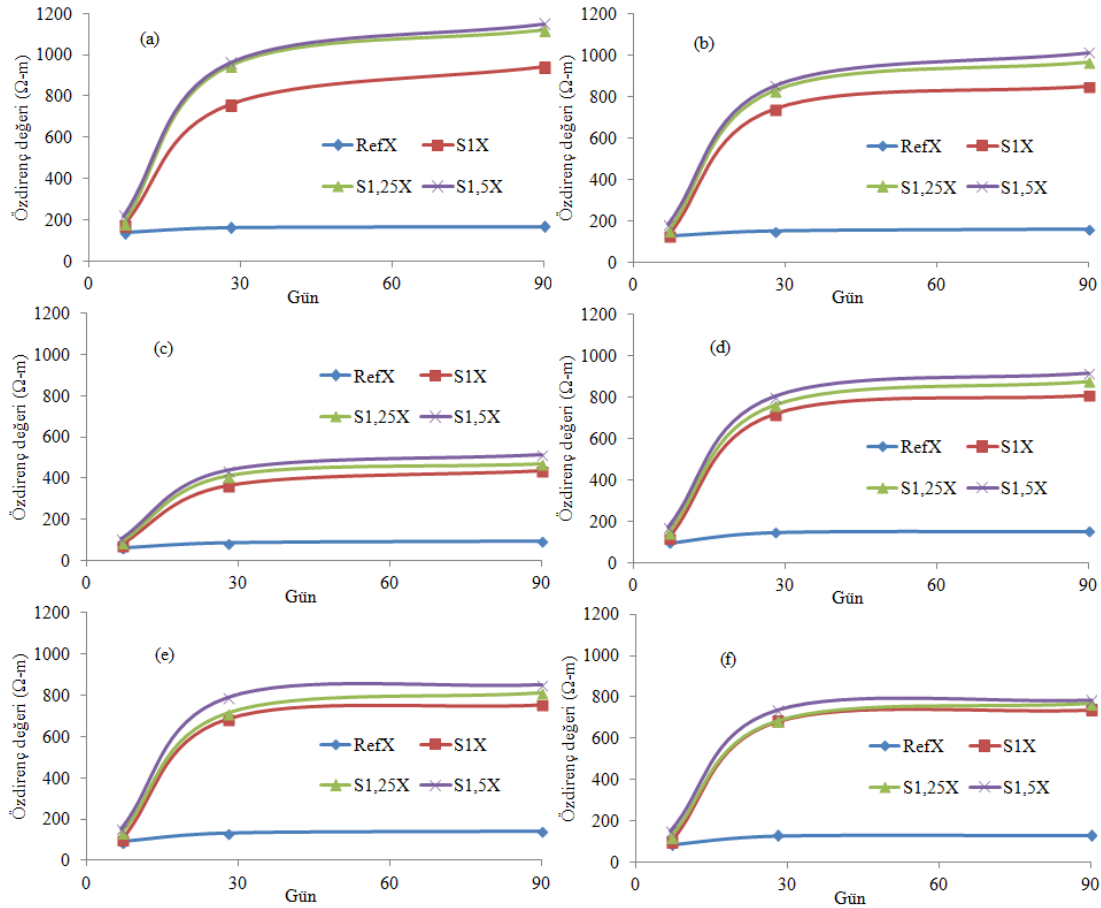
Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin Şekil 3.14'te tüm kür koşulları için özdirenç grafikleri mevcuttur. Puzolanik reaksiyon ile betonda bulunan serbest kirecin bağlanırken e^- taşıyan iyonik bileşenleri de bağlar. Böylece beton akım iletme özelliğini de önemli ölçüde düşürür. Sadece çimentolu karışımlar ile YFC'li karışımlar arasındaki yaşa bağlı olarak özdirenç gelişimi görülmektedir. Cüruf miktarı arttıkça özdirenç değerleri de artmıştır. Kür koşulları incelendiğinde su kürü uygulaması en iyi sonucu verirken sadece 7 gün çuvalaltında daha sonra havada tutulan numunelerin su kürüne yakın sonuç vermesi ilk 7 gündeki kürün önemini bir kez daha göstermektedir. Kimyasal kürlerde su tutma özelliklerine bağlı olarak akrilik, parafin, reçine sıralaması mevcuttur. En olumsuz sonuç ise beklendiği üzere hava küründe görülmüştür.



Şekil 3.14 : Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin özdirenç grafikleri

Sentetik C-S-H içeren numunelerin kendi referanslarına oranla daha boşluklu bir yapı oluşturması hakkında önceki bölümlerde bahsedilse de numunedeki iyon konsantrasyonunu arttırması ile özdirenç değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 7

günlük numunelerde sentetik C-S-H içeren numuneler referanslardan %1-20 daha yüksek sonuç vermiştir. 28 günlük numunelerde ise sentetik C-S-H kullanılan betonlar referanslarına oranla özdirenç değerlerinde %3-8 artış sağlamıştır. 90 günlük numunelerde sentetik C-S-H kullanılması %3-4 kadar özdirenç artışı sağlamıştır. Sentetik C-S-H içeren ve içermeyen numuneler arasındaki farkın betondaki hidratasyon gelişimi nedeniyle azaldığı düşünülmektedir. Sentetik C-S-H içeren numunelerde ise bütün kür koşulları için özdirenç değerleri Şekil 3.15'te bulunmaktadır. Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin özdirenç grafiklerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. YFC içeren numuneler puzolanik reaksiyon sayesinde sadece çimentolu karışımlardan daha yüksek özdirenç sahiptir. Kür metotlarında ise özdirenç değerleri için su, çuvalaltı, akrilik, parafin, reçine ve hava sıralaması mevcuttur.

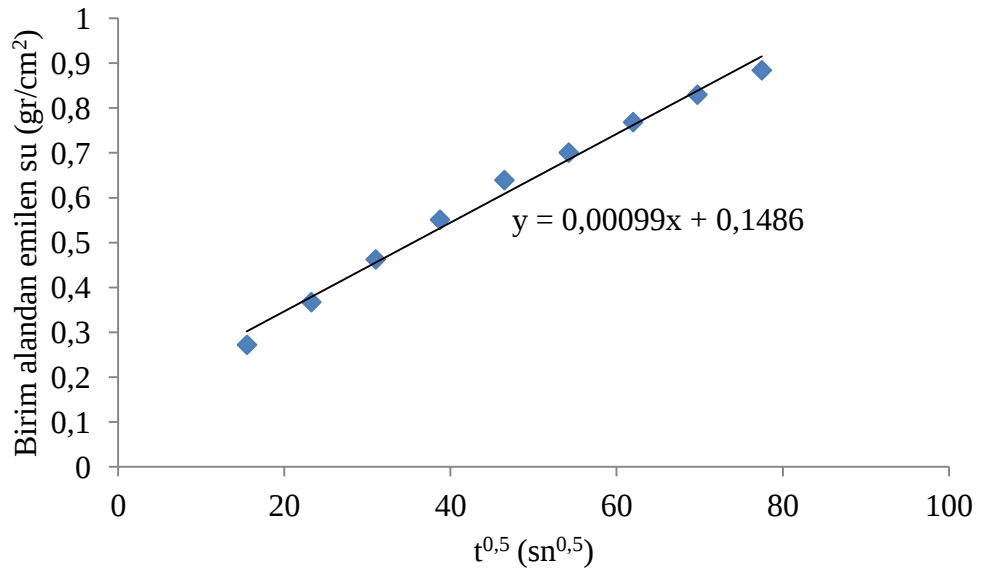


Şekil 3.15 : Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin özdirenç grafikleri

Özdirenç değerlerinin yüksek olması betonu korozyona karşı koruması nedeniyle betonun servis ömrünün uzadığı bilinmektedir. Bu nedenle, cüruf kullanılması ve doğru kür metodu uygulanması ile servis ömrüne olumlu yönde gelişmektedir.

3.2.6 Kılcallık deneyi

Betonun kılcal boşluk yapısı hakkında bilgi veren bir deneydir. Örnek olarak göstermek için Şekil 3.16’da görülen grafikte 7 günlük Ref kodlu (sadece çimento içeren) karışımın kılcallık deneyi ile elde edilen birim alandan emilen suyun zamanın kareköküne göre değişimi verilmiştir. Karışımların farklı kür koşulları için hesaplanan kılcallık katsayısı değerleri Çizelge 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 ve 3.31’de verilmiştir.



Şekil 3.16 : Ref kodlu karışımın kılcallık grafiği

Şekilde görüldüğü üzere birim alandan emilen su ile saniyenin karekökü arasında çizilen doğrunun eğimi numunenin kılcallık katsayısını göstermektedir. Elde edilen kılcallık katsayı değerleri tablo halinde düzenlenmiştir.

Çizelge 3.26 : Su kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları($\times 10^{-5}$ gr/cm²sn^{0,5})

Su	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	99	86	71
RefX	100	79	66
S1	88	50	36
S1X	85	63	47
S1,25	67	41	34
S1,25X	69	54	41
S1,5	59	38	29
S1,5X	64	48	39

Çizelge 3.27 : Çuvalaltı kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları($\times 10^{-5}$ gr/cm²sn^{0,5})

Çuvalaltı	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	100	95	92
RefX	102	93	87
S1	93	84	77
S1X	97	89	82
S1,25	83	72	65
S1,25X	88	79	71
S1,5	68	59	58
S1,5X	70	66	65

Çizelge 3.28 : Hava kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları($\times 10^{-5}$ gr/cm²sn^{0,5})

Hava	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	175	160	154
RefX	178	166	162
S1	212	201	194
S1X	195	183	175
S1,25	193	183	167
S1,25X	184	175	166
S1,5	180	171	160
S1,5X	178	165	157

Çizelge 3.29 : Akırlık kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları($\times 10^{-5}$ gr/cm²sn^{0,5})

Akırlık	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	134	129	123
RefX	135	122	114
S1	123	122	112
S1X	128	116	104
S1,25	115	113	110
S1,25X	122	107	98
S1,5	106	104	97
S1,5X	118	97	92

Çizelge 3.30 : Parafin kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları($\times 10^{-5}$ gr/cm²sn^{0,5})

Parafin	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	139	138	133
RX	141	131	125
S1	132	131	124
S1X	137	124	114
S1,25	132	124	116
S1,25X	133	113	107
S1,5	125	110	100
S1,5X	129	107	97

Çizelge 3.31 : Reçine kürü uygulanmış betonun kılcallık katsayıları($\times 10^{-5}$ gr/cm²sn^{0,5})

Reçine	7. gün	28. gün	90. gün
Ref	170	161	159
RefX	169	156	149
S1	182	168	155
S1X	163	150	138
S1,25	169	155	148
S1,25X	156	142	132
S1,5	163	150	145
S1,5X	151	136	128

7 günlük kılcallık katsayıları incelendiğinde referans numunesinin kılcallık katsayısı 99-175 ($\times 10^{-5}$) gr/cm²sn^{0,5} olurken hava ve reçine kürü dışındaki kürlerde çimento ile YFC ikame yapılırca kılcallık katsayısı 1:1'lik karışımda %7-10, 1:1,25'lik karışımda %10-30, 1:1,5'lik karışımda ise %10-40 azalmıştır. Bu da YFC'nin kılcallığa karşı etkili olduğunu göstermektedir. Havada saklanan betonlarda ise beklendiği üzere su kürü uygulandığında ortaya çıkan sıralamanın tersine 1:1 yerdeğiştirme uygulanan betonlarda kılcallık katsayısı %20 artmıştır. Cüruf miktarı arttıkça bu oran %3'e düşmüştür. Kür metotlarından hava küründe boşluk yapısı daha fazla olmasından dolayı kılcallık katsayısı en yüksek değer çıkmıştır. Ayrıca cüruf miktarının artmasıyla su/bağlayıcı oranı azaldığından kılcallık katsayısı 1:1'lik ikameye göre daha çok azalmıştır. Su kürü uygulanan numunelerde kılcallık katsayısı 60-100 ($\times 10^{-5}$) gr/cm²sn^{0,5} en iyi sonucu verirken sonra çuvalaltı küründeki numunelerin katsayısı 68-102 ($\times 10^{-5}$) gr/cm²sn^{0,5} ölçülmüştür. Kimyasal kürlerde ise kılcallık katsayı sıralaması küçükten büyüğe akrilik, parafin, reçine şeklinde

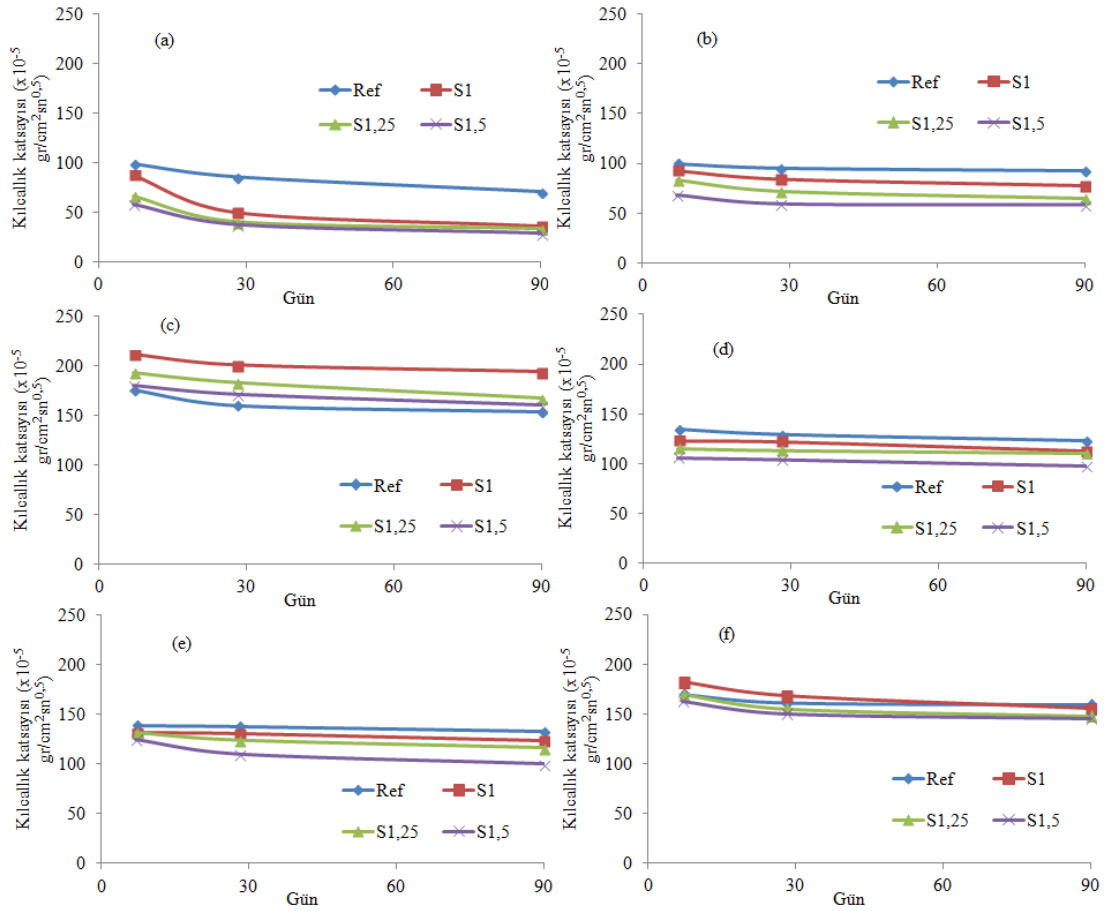
bulunmuştur. Bu da ağırlık kaybı değerindeki sıralamayla aynı olmasından dolayı ikisi arasında bağlantı olduğu göstermiştir.

28 günlük numunelerde bütün numuneler için kılcallık değeri 7 günlüklere göre %5 ile %25 arasında azalmıştır. Çimentolu karışıma göre hava ve reçine kürü dışında kılcallık değeri 1:1'lik karışımda %5-40 azalırken cüruf miktarı arttıkça hem YFC'nin hem de su/bağlayıcının etkisi ile kılcallık katsayıları 1:1,25'lik karışımda %13-52, 1:1,5'lik karışımda %20-56 azalmıştır. Su kürü uygulanan numunedeki kılcallık değeri $38-86 (x10^{-5}) \text{ gr/cm}^2\text{sn}^{0,5}$ ile en iyi sonucu verirken hava küründeki numunelerin kılcallık değeri $160-201 (x10^{-5}) \text{ gr/cm}^2\text{sn}^{0,5}$ en kötü sonucu vermiştir. Kimyasal kürlerde ise kılcallık katsayı sıralaması küçükten büyüğe akrilik, parafin, reçine şeklinde sıralanmıştır.

90 günlüklerde ise 28 günlüğe benzer sonuçlar elde edilmiştir. En düşük kılcallık katsayısı değerleri su küründe bekleyen numunelerde $29-71 (x10^{-5}) \text{ gr/cm}^2\text{sn}^{0,5}$ arasında elde edilmiştir. Hava kürü uygulanan numuneler ise $157-194 (x10^{-5}) \text{ gr/cm}^2\text{sn}^{0,5}$ ile en olumsuz sonucu vermiştir. Kimyasal kürlerde ise kılcallık katsayı sıralaması küçükten büyüğe akrilik, parafin, reçine şeklinde bulunmuştur. Hava kürü dışında bütün kürlerde ikame yapılıncı kılcallık katsayısı %9-60 arasında azalmıştır. Hava küründe ise %2-25 oranında kılcal su emme artışı görülmüştür. YFC yerdeğiştirme oranının artışı 28 günlük numunelerde olduğu gibi kılcal boşluk miktarını havada tutulan çimentolu referans karışımındaki miktara yaklaştırmıştır.

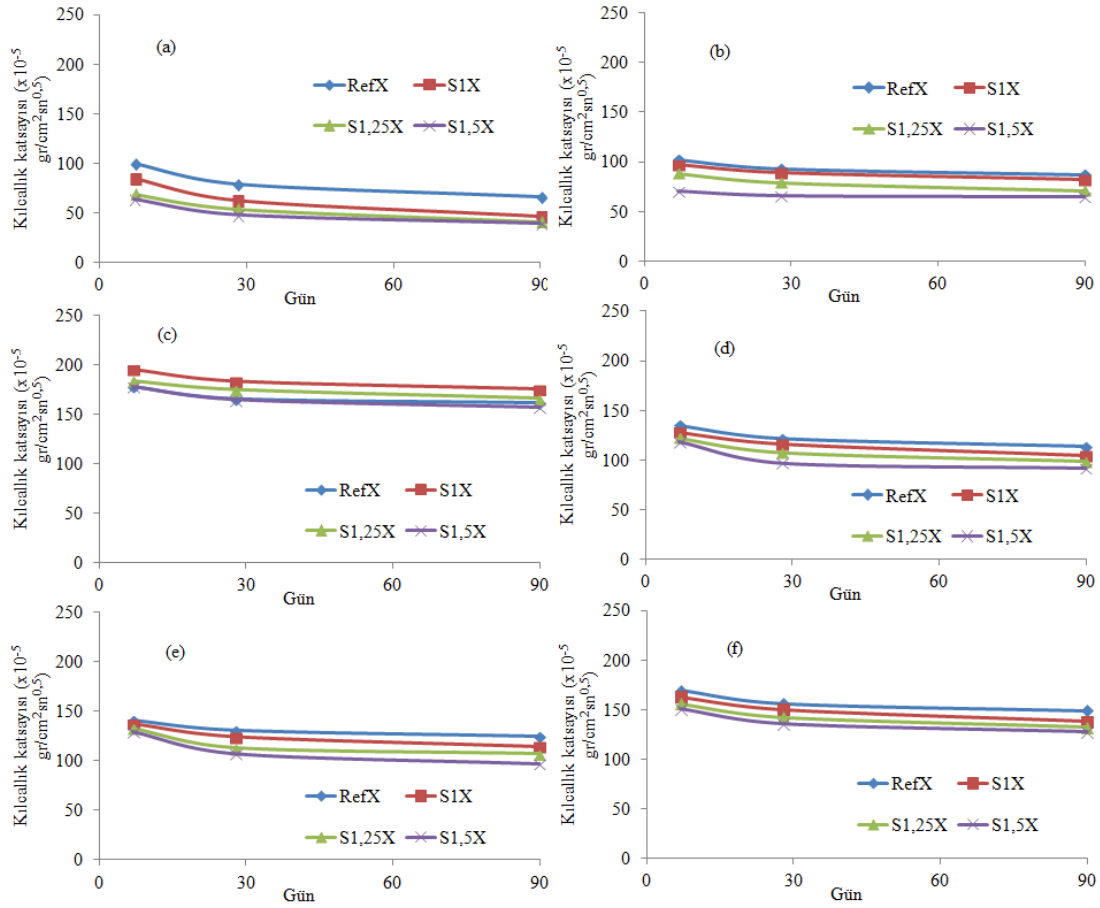
Kür gruplarına göre mekanik özellikler ile kılcallık katsayıları kıyaslandığında benzer ilişki görülmüştür. Su kürü en iyi sonuçları verirken hava kürü en olumsuz sonucu vermiştir. Kimyasal kürlerde ise ileri yaşlarda akrilik daha ön plandadır.

Sentetik C-S-H içermeyen numunelerin tüm kür koşulları için kılcallık katsayıları Şekil 3.17'de mevcuttur. Hem puzolanik reaksiyon hem de su/bağlayıcı oranı nedeniyle YFC katkılı numunelerin sadece çimentolu karışımlara göre daha düşük kılcallık değerlerine sahiptir. Kür koşulları incelendiğinde su kürü uygulaması en iyi sonucu verirken sadece 7 gün çuvalaltında daha sonra havada tutulan numunelerin su kürüne yakın sonuç vermesi ilk 7 gündeki kürün önemini bir kez daha göstermektedir. Kimyasal kürlerde su tutma özelliklerine bağlı olarak akrilik, parafin, reçine sıralaması mevcuttur. En olumsuz sonuç ise beklendiği üzere hava küründe görülmüştür.



Şekil 3.17 : Sentetik C-S-H içermeyen ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin kılcallık katsayıları

7 günlük sonuçlara bakıldığında sentetik C-S-H kullanılmasıyla çimentolu karışımlarda benzer sonuçlar elde edilirken cürufli karışımlarda hava ve reçine kürleri uygulananlarda %1-3 arasında azalış varken diğer kürlerde %1-3 artış mevcuttur. 28 günlük numunelerde sentetik C-S-H kullanılması ise YFC'li numunelerde su ve çuvalaltı kürlerinde kılcallık katsayısını %9-25 arttırırken diğer kürlerde %3-7 azaltmıştır. 90 günlük numunelerde ise sentetik C-S-H kullanılması referanslara yakın sonuç verirken kimyasal ve hava kürlerinde %3-12 daha düşük vermiştir. Sentetik C-S-H önceki bölümlerde boşluk yapısını arttırıp dayanım değerlerini azalttığı belirtilmiştir. Burada dayanım sonuçlarını etkileyen boşluklarla sentetik C-S-H kullanılması ile oluşan kılcal boşlukların aynı olmamasıyla açıklanabilir. Sentetik C-S-H içeren numunelerde ise bütün kür koşulları için kılcallık katsayıları Şekil 3.18'de bulunmaktadır. YFC ile hava ve reçine kürü dışında kılcallık katsayıları azalmıştır. Kür metodlarında kılcallık katsayıları için su, çuvalaltı, akrilik, parafin, reçine ve hava sıralaması mevcuttur.



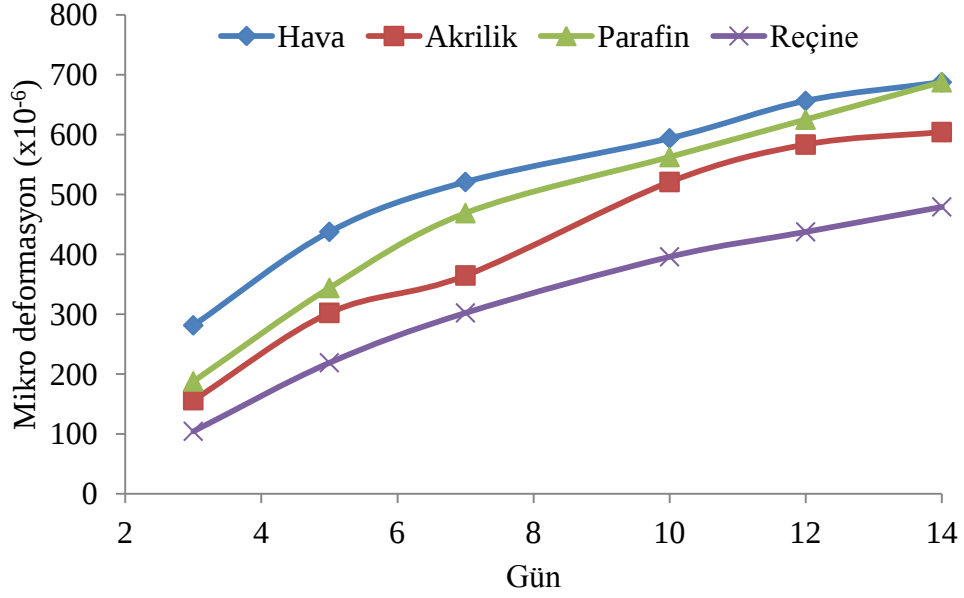
Şekil 3.18 : Sentetik C-S-H içeren ve (a) su, (b) çuvalaltı, (c) hava, (d) akrilik, (e) parafin, (f) reçine kürü uygulanan numunelerin kılcallık katsayıları

Durabilite özellikleri açısından kılcallık katsayıları ile öz direnç değerleri kıyaslandığında kür grupları benzer sonuç göstermiştir. Ancak, cürufun etkisi elektriksel dirençte daha etkin olduğu görülmüştür.

3.2.7 Kuruma rötresi deneyi

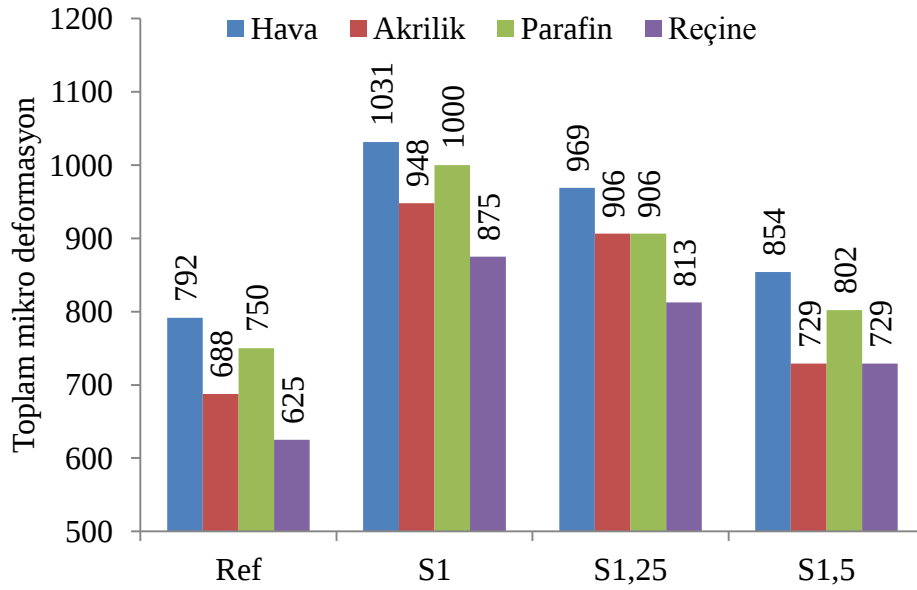
Betonun 4 mm lik elekten elenmesi ile elde edilen harçlardan üretilen 4x4x16 cm'lik numunelerde karışımların kurumadan kaynaklanan boy değişimleri ölçülmüştür. Numunenin su kaybetmesi ile harçlarda boy kısılması meydana gelmektedir. Büzülme esnasında kür koşullarının kuruma rötresine etkisi de gözlemlenebilmektedir.

Örnek olarak Şekil 3.19'da 4 farklı kür uygulanan Ref kodlu karışımın kuruma rötresi deformasyonunun zamana bağlı değişimi (14 günlük) verilmiştir. Daha sonraki deformasyonların az olmasından dolayı haftalık olarak ölçümler yapılmıştır. Deformasyonlar okuması boy değişiminin durmasından dolayı 56. güne kadar okuma yapılmıştır.

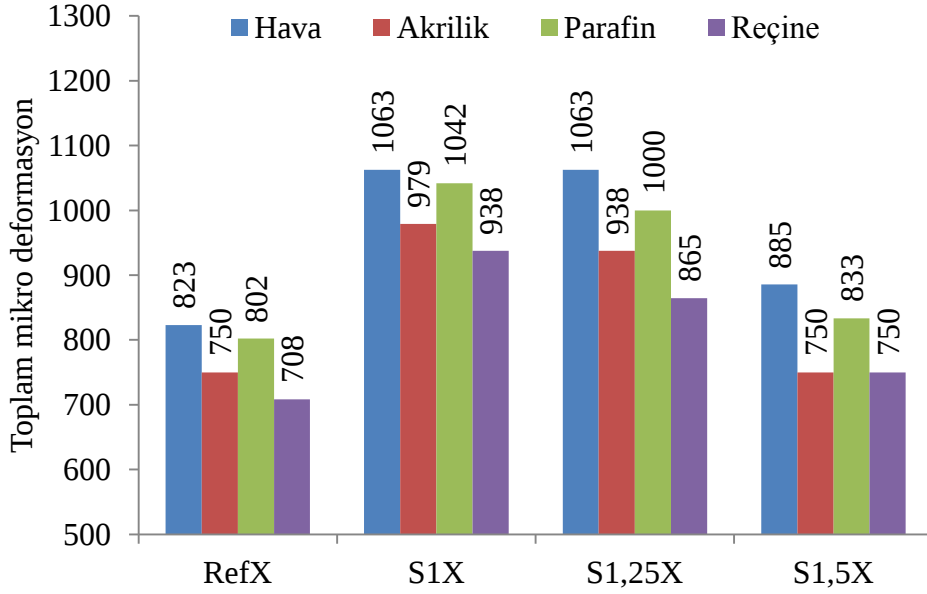


Şekil 3.19 : Ref kodlu karışımın kuruma rötresi grafiği

Rötre değerleri incelendiğinde başlangıçtaki deformasyonlarda kür uygulamasına göre değişirken ilerleyen günlerde bağımsız olarak birbirine yakın artış yaparak devam etmiştir. Bu da numunenin bağlayıcı özelliğinin ilerleyen yaşlarda daha etkili olduğunu göstermektedir. Üretilen tüm beton karışımlarında görülen kuruma rötresi miktarlarının küçükten büyüğe sıralanması durumunda reçine, akrilik, parafin, hava şeklinde bir sonuç elde edilmiştir. Karışımların 56 günlük toplam mikro deformasyon değerleri Şekil 3.20 ve 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20 : Sentetik C-S-H içermeyen karışımların deformasyonları (56 günlük)



Şekil 3.21 : Sentetik C-S-H içeren karışımların deformasyonları (56 günlük)

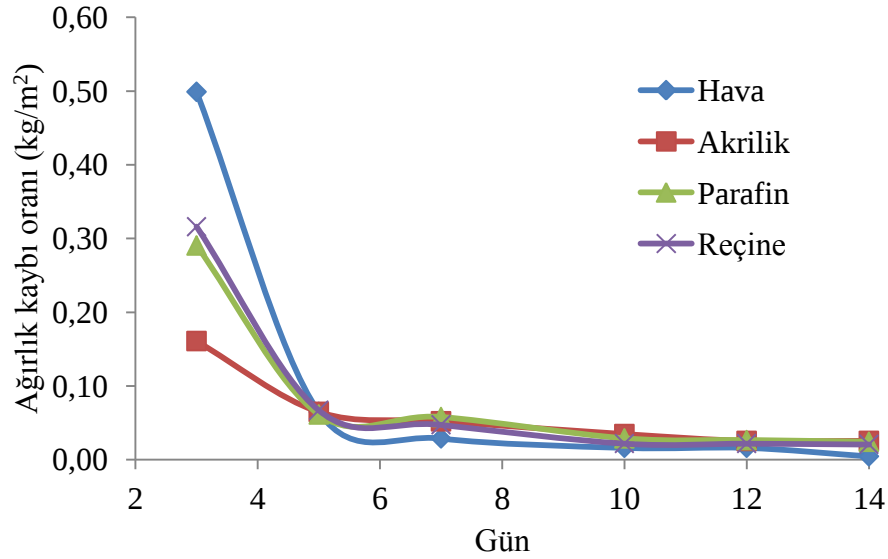
Ref kodlu karışımın rötre değerleri $625-792 (x10^{-6})$ arasında iken çimentonun %40 cüruf ile ikame yapılmasıyla rötre değerleri %23-29 arasında artış göstermiş cüruf miktarının artmasıyla bu değer 1:1,25'lik ikamede %17-23 ve 1:1,5'lik ikamede %6-14 kadar artmıştır. Bunun, bağlayıcı miktarı artarken su miktarı sabit kalması nedeniyle su/bağlayıcı oranının azalması yani birim bağlayıcıya düşen su miktarının azalması dolayısıyla daha fazla su ince malzeme tarafından kullanıldığı için su kaybının azalmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Kür koşullarının kuruma rötresine etkisi bakıldığında ise kimyasal kür uygulanan bütün numunelerde havada bekleyen numunelere oranla %6-22 daha az deformasyon olduğu görülmektedir. Kimyasal kürleri kendi arasında kıyaslayınca reçine uygulanan numunelerde toplam mikro deformasyonu $625-940 (x10^{-6})$ arasında değer elde ederek en iyi performansı gösterirken akrilik uygulanan numunelerde toplam mikro deformasyonu $690-980 (x10^{-6})$ arasında değer ile orta seviyede, parafin uygulanan numunelerde ise toplam mikro deformasyonu $750-1040 (x10^{-6})$ arasında değer ile en kötü performansa sahip olduğu görülmüştür.

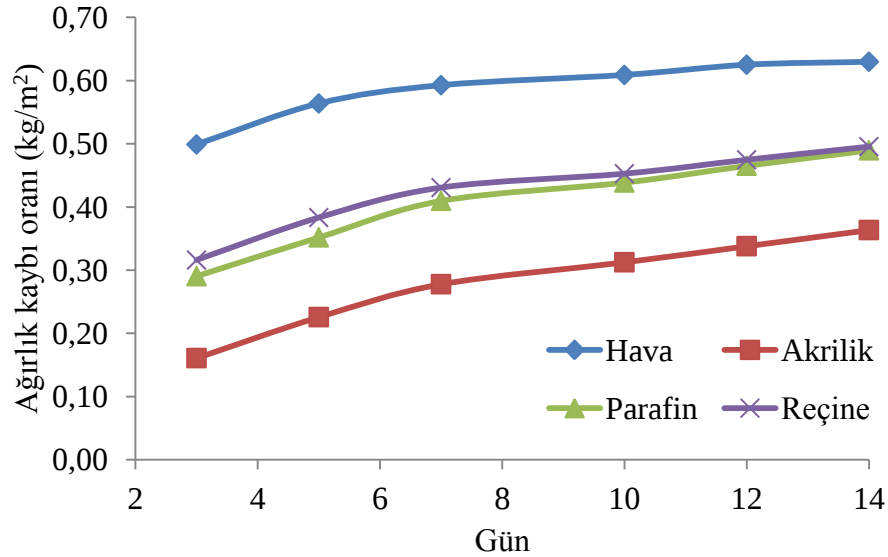
Sentetik C-S-H kullanılması ise çimentolu numunelerde %4-9, cüruf lu numunelerde %3-10 oranında kuruma rötresini arttırmıştır. Sentetik C-S-H'nin erken yaşta hidratasyonu hızlandırması sonucunda boşluk miktarını arttırmasından dolayı buharlaşma yoluyla meydana gelen su kaybını arttırdığı söylenebilir. Bunun etkisinden dolayı da numune daha fazla deformasyon yapmış olduğu düşünülmektedir.

3.2.8 Ağırlık kaybı deneyi

4x4x16 cm'lik numuneler rötire deneyi için boy ölçüldüğü günlerde ağırlıkları da ölçülmüştür. Böylece büzölmeye neden olan birim yüzey alanından kaybolan su miktarı, kg/m^2 cinsinden belirlenmiştir. Bütün karışımlarda kür metotlarına bağılı olarak benzer eğilimde olmasından dolayı örnek olarak Şekil 3.22 ve 3.23'te Ref kodlu karışımın ağırlık kaybı oranı-gün grafikleri görölmektedir.



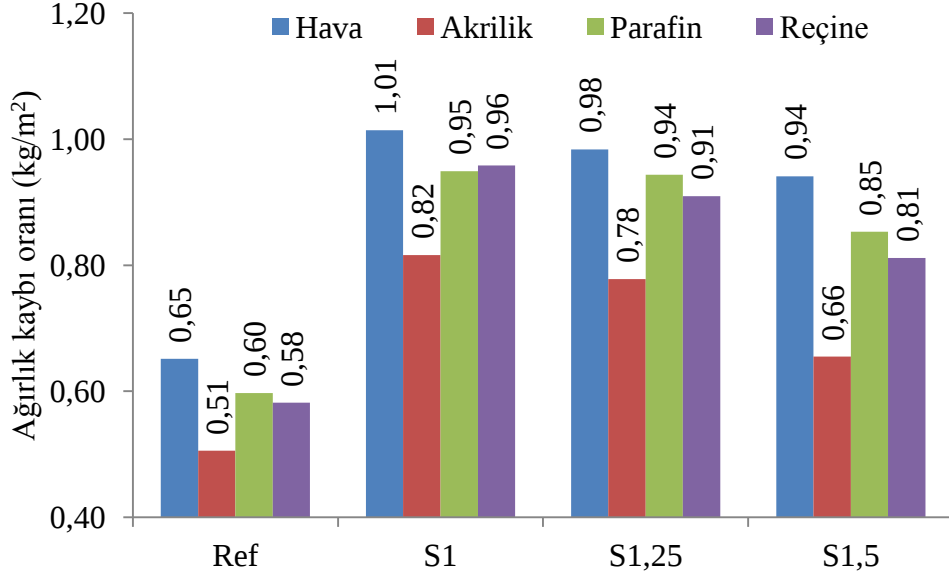
Şekil 3.22 : Ref kodlu karışımın ağırlık kaybı oranı-gün ilişkisi



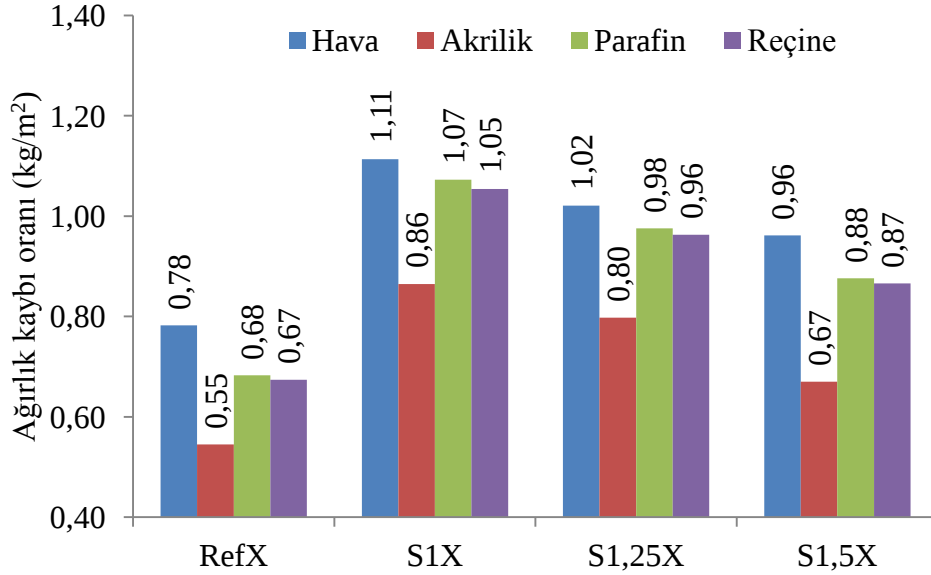
Şekil 3.23 : Ref kodlu karışımın yığışımli ağırlık kaybı oranı-gün ilişkisi

Ref kodlu karışımın grafiğine bakıldığında hava küründe başlangıçta $0,5 \text{ kg/m}^2$ ile en fazla nem kaybı gözlemlenirken, akrilikte bu değer $0,16 \text{ kg/m}^2$ ile en düşük çıkmıştır. Reçine küründe parafine oranla %8 daha fazla buharlaşma olsa da bu fark ihmal

edilebilir düzeydedir. 14. günden sonra ağırlık kaybı oranı çok azalmıştır. Ölçümlere 56. güne kadar haftalık olarak devam edilmiş, 14. günden 56. güne kadar %1-28 mertebesinde ağırlık kaybı olduğu için grafiğe dahil edilmemiştir. Numunelerin toplam ağırlık kaybı oranları 56 günlük sonuçlara göre oluşturulup Şekil 3.24 ve 3.25'te mevcuttur.



Şekil 3.24 : Sentetik C-S-H içermeyen karışımların toplam ağırlık kaybı oranları



Şekil 3.25 : Sentetik C-S-H içeren karışımların toplam ağırlık kaybı oranları

Çimentolu karışımlarda buharlaşma oranı 0,5-0,65 kg/m² iken %40 lık ikame yapılması ile %35-40 artmıştır. Çimento karışım suyunu erken yaşta bağlarken cürufun pozolanik reaksiyonunun yavaş olmasından dolayı karışım suyu reaksiyona

girmeden buharlaşmaktadır. Bu nedenle bu fark oluşmaktadır. Cüruf miktarının artmasıyla birim alandan buharlaşan su miktarı referansa göre bu değer %30-35 artmıştır. Burada da sabit su miktarına düşen bağlayıcı miktarı arttığı için 1:1'lik ikameye göre %5 daha az su buharlaşması olmuştur.

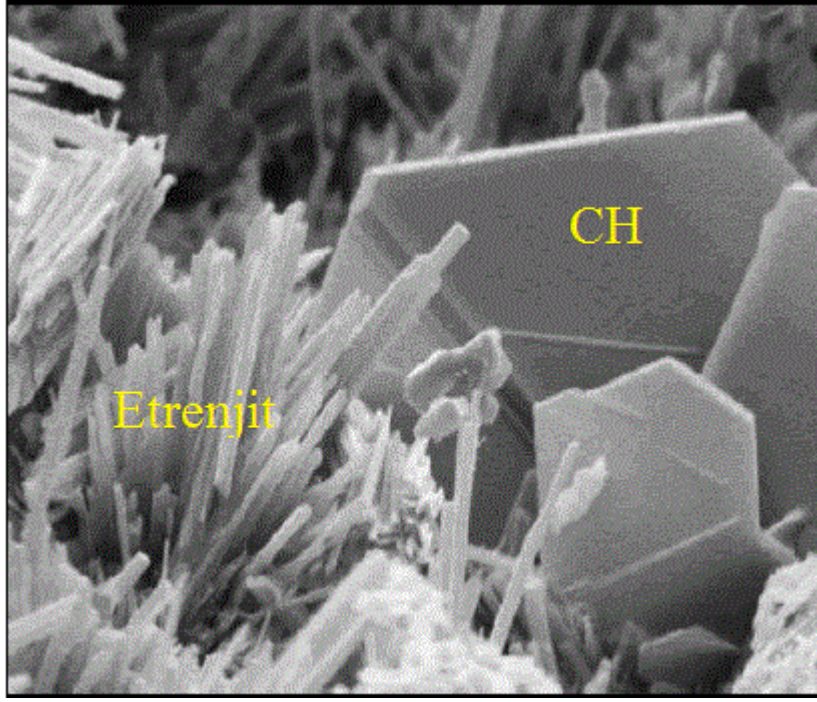
Kür koşulları incelendiğinde hava kürü uygulanan numunede $0,65-1,11 \text{ kg/m}^2$ ile en fazla toplam nem kaybı, akrilik uygulanan numunede $0,5-0,86 \text{ kg/m}^2$ ile en az toplam nem kaybı saptanmıştır. Parafin ile reçinenin nem kaybı oranları birbirine yakın olsa da reçine uygulanan numunelerin ağırlık kaybı oranı %2-5 daha düşük çıkmıştır. Reçine kürü için rötre değerleri ile birim alandan buharlaşma miktarı arasındaki çelişki, reçinenin büzülmeyi kısıtlaması sebebiyle numunenin kaybettiği neme oranla daha düşük büzülme meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, diğer deneylerde ileri yaşlarda akriliğin kimyasal kürler arasında en iyi sonucu vermesinin nedeni akrilik kürüyle elde edilen en düşük ağırlık kaybı oranı olduğu düşünülmektedir.

Sentetik C-S-H kullanılması ile çimentolu ve cürufllu numunelerde ağırlık kaybı oranını %8-20 değerinde artış göstermiştir. Bu sonucun kuruma rötresi sonuçlarına benzer şekilde sentetik C-S-H'nin boşluk miktarını arttırmasından kaynaklandığı söylenebilir.

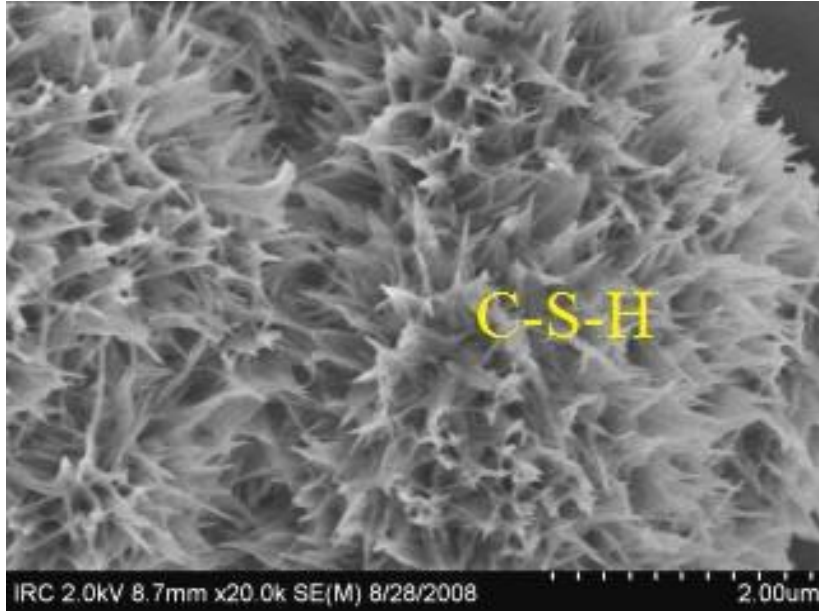
3.2.9 İç yapı analizi

Elde edilen harç numunelerde ESEM (çevresel taramalı elektron mikroskop) aleti kullanarak farklı kür uygulanan numunelerin farklı günlerdeki iç yapısında oluşan C-S-H, C-H ve etrenjit hakkında daha detaylı fikir sahibi olmak için analiz yapılmıştır. Yapılan analizler sayesinde agrega ara yüzeyleri, boşluk yapıları ve hidrate olmamış cüruf parçacıkları da tespit edilmiştir. Ayrıca, oluşan etrenjit, serbest kireç ve C-S-H yapıları da incelenmiştir.

Etrenjit, çimento karma oksiti olan C_3A 'nın sülfat iyonları ile reaksiyona girmesiyle oluşan iğnemsî yapılarıdır. Serbest kireç (CH), çimentoda bulunan silikat esaslı bileşiklerden açığa çıkan altıgen morfolojiye sahip tabakalı yapılarıdır. C-S-H ise betona esas dayanımını veren silikatların su ile birleşmesi sonucu oluşan karmaşık haldeki iğnemsî yapılarıdır. İleri yaşlarda ise iğnemsî yapıdaki C-S-H'lar üst üste çoğalarak tabakaları oluştururlar. Şekil 3.26 ve 3.27'de etrenjit, CH ve C-S-H görüntüleri mevcuttur [78].



Şekil 3.26 : Etrenjit ve CH yapılarının mikroskop görüntüsü



Şekil 3.27 : C-S-H yapısının mikroskop görüntüsü

Yapılan analizler sonunda elde edilen görüntüler Ekler bölümünde bulunan Şekil A.1'den Şekil A.64'e kadar mevcuttur.

Üretilen betonlar arasında, kimyasal kürler arasında en iyi performansı göstermesi bakımından, akrilik esaslı kür uygulanan numuneler görüntü almak amacıyla seçilmiştir. Bu numuneler ile karşılaştırmak için sürekli suda saklanan ve kalıptan söküldükten sonra deney gününe kadar laboratuarda havada tutulan numunelerin

görüntüleri alınmıştır. Ayrıca erken ve sonraki yaşlardaki durumu incelemek için 1, 3 ve 28. gündeki numunelere analiz yapılmıştır.

Ref kodlu karışımın su kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde çeşitli aşamalarda yoğun etrenjit ve küçük C-S-H parçacıkları oluşumları mevcuttur. Numunenin 1 günlük olmasından dolayı boşluklu bir yapıya sahiptir (Şekil A.1). 3 günlük numuneye bakıldığında ise yoğun C-S-H oluşumları ve arkada CH tabakaları görülmektedir (Şekil A.2). 28 günlük numunelerde ise C-S-H parçacıkları bir araya gelip tabakaları oluşturduğu dolu bir yapı görülmektedir (Şekil A.3).

RefX kodlu karışımın su kürü uygulanan 1 günlük numunesinde hem etrenjit hem de C-S-H hidratasyonu varken arka planda tabakalı C-S-H ve CH bulunmaktadır (Şekil A.4). 3 günlük numuneye bakıldığında C-S-H parçacıkları ve tabakaları görülmektedir (Şekil A.5). 28 günlük numunelerde ise C-S-H ve CH tabakalarının olduğu yoğun bir tabaka bulunmaktadır (Şekil A.6).

S1 kodlu karışımın su kürü uygulanan 1 günlük numunesinde yer yer etrenjit, CH ve C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.7). 3 günlük numuneye bakıldığında ise yoğun miktarda C-S-H parçacıkları ve CH tabakası görülmektedir (Şekil A.8). 28 günlük numunelerde ise mevcut olan C-S-H tabaka ve parçacıkları ile yoğun bir agrega ara yüzeyi mevcuttur (Şekil A.9).

S1X kodlu karışımın su kürü uygulanan 1 günlük numunesinde hafiften boşluklu bir yapı ile beraber CH tabakaları ve C-S-H oluşumları görülmektedir (Şekil A.10). 3 günlük numunede ise yoğun C-S-H tabakaları ve etrenjitler görülmektedir (Şekil A.11). 28 günlük numunelerde ise yoğun C-S-H tabakalarıyla beraber dolu bir yapı mevcuttur (Şekil A.12).

S1,25 kodlu karışımın su kürü uygulanan 1 günlük numunesinde yoğun miktarda oluşan C-S-H parçacıkları ve cüruf parçacıkları görülmektedir (Şekil A.13). 3 günlük numunede ise bir tane hava boşluğu ile cüruf ve C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.14). 28 günlük numunelerde ise yoğun C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.15).

S1,25X kodlu karışımın su kürü uygulanan 1 günlük numunesinde C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.16). 3 günlük numunede ise yoğun miktarda etrenjit ve C-S-H parçacıkları ile cüruf parçacıkları mevcuttur (Şekil A.17). 28 günlük numunede ise yoğun C-S-H tabakaları ile çok az CH tabakası mevcuttur (Şekil A.18).

S1,5 kodlu karışımın su kürü uygulanan 1 günlük numunesinde agrega ara yüzeyde C-S-H parçacıkları ile cüruf parçacığı gözükmemektedir (Şekil A.19). 3 günlük numunede ise agrega ara yüzeyde etrenjit ve C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.20). 28 günlük numunede ise yoğun miktarda C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.21).

S1,5X kodlu karışımın su kürü uygulanan 1 günlük numunesinde agrega ara yüzeyinde C-S-H oluşumları görülmektedir (Şekil A.22). 3 günlük numunede ise etrenjit ve C-S-H parçacıkları mevcuttur (Şekil A.23). 28 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde yoğun miktarda C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.24).

Ref kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde hidrasyonun yavaş olmasından dolayı küçük C-S-H parçacıkları ve CH tabakaları görülmektedir (Şekil A.25). 28 günlük numunede ise C-S-H tabakalarının görülmesiyle rağmen hidrasyon yeterli seviyede olmaması nedeniyle yüzey girintili çıkıntılı bir görüntüye sahiptir (Şekil A.26).

RefX kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde boşluklu bir yapı olmasıyla birlikte küçük etrenjit ve C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.27). 28 günlük numunede ise boşluklu yapılar etrenjitler ile dolmaya başlamış ve küçük C-S-H'lar görülmektedir (Şekil A.28).

S1 kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde boşluklu bir yapı olmasıyla birlikte etrenjitler görülmektedir (Şekil A.29). 28 günlük numunede ise C-S-H parçacıkları, etrenjit ve cüruf parçacıkları mevcutken anlaşılamamış yabancı bir malzeme de görülmektedir (Şekil A.30).

S1X kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde CH, C-S-H parçacıkları ve etrenjit görülmektedir (Şekil A.31). 28 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde C-S-H parçacıkları bulunmaktadır (Şekil A.32).

S1,25 kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde C-S-H parçacıkları ve hidrate olmamış cüruf parçacığı görülmektedir (Şekil A.33). 28 günlük numunede ise boşluklu bir yapı olmasıyla birlikte C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.34).

S1,25X kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde C-S-H parçacıkları ve cüruf taneleri görülmektedir (Şekil A.35). 28 günlük numunede ise

agrega ara yüzeyinde C-S-H parçacıkları ve cüruf taneleri görülmektedir (Şekil A.36).

S1,5 kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde boşluklu bir yapı ile birlikte C-S-H oluşumları ve hidrate olmamış cüruflar bulunmaktadır (Şekil A.37). 28 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde yoğun C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.38).

S1,5X kodlu karışımın hava kürü uygulanan 3 günlük numunesinde agrega ara yüzeyinde C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.39). 28 günlük numunede ise boşluklu bir yapı olmasıyla birlikte C-S-H ve cüruf parçacıkları görülmektedir (Şekil A.40).

Ref kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde çimento hidratasyonu başlayıp henüz birleşmemiş C-S-H'lar görülmektedir. Yer yer etrenjit ve arkada da C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.41). 3 günlük numunede ise henüz birleşmemiş C-S-H parçacıkları daha az olmakla beraber C-S-H tabakaları ve etrenjitler görülmektedir (Şekil A.42). 28 günlük numunede ise az da olsa boşluklar mevcutken C-S-H yapılarının olduğu sürekli ve dolu bir yapı mevcuttur (Şekil A.43).

RefX kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde CH ve C-S-H tabakaları olduğu düşünülmektedir (Şekil A.44). 3 günlük numunede ise hidratasyon başında olmasından dolayı boşluklu bir yapı olsa da C-S-H, CH ve etrenjit görülmektedir (Şekil A.45). 28 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde dolu bir C-S-H fazı mevcuttur (Şekil A.46).

S1 kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde agrega ara yüzeyinde cürufun eklenmesiyle daha dolu bir yapı olmuştur (Şekil A.47). 3 günlük numunede ise az miktarda boşluklu olmasıyla birlikte C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.48). 28 günlük numunede ise yoğun C-S-H tabakalarıyla birlikte az miktarda etrenjit görülmektedir (Şekil A.49).

S1X kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde agrega ara yüzeyi boşluklu bir yapıya sahipken C-S-H ve CH görülmektedir (Şekil A.50). 3 günlük numunede ise 1 günlüğe göre daha dolu bir yapı mevcuttur (Şekil A.51). 28 günlük numunede ise az boşluklu bir yapıyla C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.52).

S1,25 kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde agrega ara yüzeyinde CH ve C-S-H parçacıkları ile etrenjit görülmektedir (Şekil A.53). 3 günlük numunede ise daha yoğun bir yapı görülmektedir (Şekil A.54). 28 günlük numunede ise yoğun C-S-H tabaka ve parçacıkları ile az miktarda CH tabakaları görülmektedir (Şekil A.55).

S1,25X kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde agrega ara yüzeyinde CH tabakası ile C-S-H ve cüruf parçacıkları görülmektedir (Şekil A.56). 3 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde kırımdan kaynaklı çatlak olmasıyla birlikte C-S-H parçacıkları mevcuttur (Şekil A.57). 28 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde yoğun C-S-H parçacıkları bulunurken cüruftan dolayı CH tabakalarına rastlanmamıştır (Şekil A.58).

S1,5 kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde çok az etrenjit varken C-S-H parçacıkları tabakalaşmaya başladığı görülmüştür (Şekil A.59). 3 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.60). 28 günlük numunede ise az miktarda etrenjit ile C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.61).

S1,5X kodlu karışımın akrilik kürü uygulamasında bulunan 1 günlük numunesinde az miktarda etrenjit ile C-S-H tabakaları görülmektedir (Şekil A.62). 3 günlük numunede ise C-S-H oluşumları mevcuttur (Şekil A.63). 28 günlük numunede ise agrega ara yüzeyinde yoğun C-S-H parçacıkları görülmektedir (Şekil A.64).

Genel olarak ESEM görüntülerine bakıldığında sadece çimentolu numunelerde erken yaşlarda yoğun miktarda etrenjit ve CH yapıları görülürken ileriki yaşlarda C-S-H ve CH tabakaları yoğun biçimde görülmektedir. YFC ikamesiyle, karışımdaki çimento miktarının azalması nedeniyle, karışımdaki C_3A miktarı azaldığı için etrenjit yapılarına sadece çimentolu karışımlara göre daha az rastlanılmıştır. Aynı şekilde, YFC'li numunelerde puzolanik reaksiyonda serbest kireçlerin kullanılmasıyla ileri yaşlardaki numunelerde C-S-H tabakalarının daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. YFC içeriğinin artması nedeniyle hidrate olmamış YFC parçacıkları da görülmüştür. Kür koşullarına göre bakıldığında hava kürüne oranla diğer kür uygulamalarında daha az boşluklu yapılar mevcuttur. Bu da kür uygulamasının, betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmesindeki sebebini göstermektedir. Sentetik C-S-H'ların ölçüm aralığından daha küçük olması nedeniyle görüntülerde rastlanılmamıştır.

3.2.10 Kür metotlarının performans-maliyet analizi

Çalışmada kullanılan malzemelerin birim fiyatları Çizelge 3.32’de mevcuttur.

Çizelge 3.32 : Deney malzemelerinin fiyat listesi

	m ³ fiyatı	kg fiyatı	satın alma yeri
Kırmataş 1	50 TL	-	ocak
Kırma kum	50 TL	-	ocak
Doğal kum	50 TL	-	ocak
Çimento	320 TL	-	santral
Cüruf	260 TL	-	santral
Glenium 51	-	7 TL	perakende
X-Seed 100	-	4,2 TL	perakende

Deneyde kullanılan çuvalaltı ve dozajlarına bağlı olarak akrilik, parafin ve reçine kürlerinin şantiye ortamında kullanılması için maliyetlerinin tablosu (perakende) Çizelge 3.33’te verilmiştir. Kıyas yapabilmek için Ref kodlu karışımın basınç dayanımı ve rötre değerleri de eklenmiştir.

Çizelge 3.33 : Kür malzemeleri fiyat tablosu

Kür çeşidi	lt fiyatı	m ² fiyatı	Ref kodlu numune	
			Basınç dayanımı (MPa)	Rötre değerleri
Akrilik	8,20 TL	2,05 TL	69,3	688
Parafin	3,55 TL	0,70 TL	67,1	750
Reçine	19,75 TL	3,35 TL	66,6	625
Çuvalaltı	-	3,50 TL	81,8	-
Hava	-	-	66,2	792

Değerlendirme açısından Ref kodlu karışım kullanılarak 300x300x30 cm boyutlarında perdenin üretileceği baz alınmıştır. Beton fiyatı taşımacılık dahil olunca yaklaşık 600 tl olmaktadır. Kimyasal kürlerden akrilik esaslı kullanılırsa üretim fiyatı %7 artarken basınç dayanımı %5 artmış rötre değeri %13 daha az çıkmıştır. Parafin esaslı kür malzemesinde üretim fiyatı %2,5 artarken basınç dayanımı %2 artmış rötre değeri %5 daha az çıkmıştır. Reçine esaslı kür malzemesinde ise üretim fiyatı %11 artarken basınç dayanımı %1 artmış rötre değeri %21 daha az çıkmıştır. Bu sonuçlar ışığında basınç değerleri için akrilik, parafin, reçine sıralaması mevcuttur. Rötre değerlerinde ise parafin, akrilik, reçine sıralaması görülmektedir. Yapılan yapının özelliklerine göre rötre değerleri basınç dayanımına göre daha çok önemliyse ve hızlı üretim gerekiyorsa reçine ideal bir seçimdir. Ancak, diğer özellikler açısından akrilik

kürünün en iyi seçim olduğu düşünülmektedir. Maliyet açısından parafin ucuz bir seçim olarak gözüke de performansda göz önünde bulundurunca akrilik daha ideal bir seçimdir. Bu durumlardan dolayı yapının dayanım sınıfı, rötre gibi özellikleriyle beraber maliyet ve zaman durumuna göre farklı tercihler yapılabilir. Kimyasal kürler incelendiğinde akrilik ve parafin uygulanan yüzeylere daha sonradan sıva tarzı bir işlem yapılacaksa basınçlı suyla yüzey işlemi yapılması gerekmektedir. Bu işlem hem ekstra masraf hem de zaman gerektirmesinden dolayı önemlidir. Reçine küründe ise malzemenin epoksi bazlı olmasından dolayı bu tarz bir işleme gerek yoktur.

Alternatif olarak çuvalaltı kürü uygulamasında ise ortamda su varsa kimyasal kürle göre beton özelliklerini daha iyi geliştirmektedir. Üretim fiyatını %11 artırmaya rağmen basınç dayanımını %23 artırmıştır. Ayrıca kullanılan malzemelerin tekrardan kullanılma imkânı da mevcuttur. Ancak, şantiye ortamında 1 hafta çuvalaltı kür uygulamasının çalışma şartlarını etkileyebileceği de düşünülmelidir.

4. SONUÇLAR

Gerçekleştirilmiş bu deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda aşağıda sunulan yargılara varılabilir;

- 1) Taze beton özelliklerinden yayılma çapları 70 ± 3 cm aralığında olan karışımların yüksek fırın cürufu ikamesi ile daha az süper akışkanlaştırıcı katkıya ihtiyacı olduğu görülmüştür. Bu sayede bu çalışmada kullanılan YFC'nin tane işlenebilirliğe olumlu etkisi olduğu söylenebilir.
- 2) Üretilen tüm betonlarda sentetik C-S-H ilavesi yapılması kıvam kaybına neden olmuş ve belirlenen sınırlar dâhilinde yayılma elde edebilmek için toplam bağlayıcı ağırlığına göre %0,2 ile %0,05 arasında ilave süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir.
- 3) Toplam bağlayıcı miktarının %2'si kadar karışıma eklenen sentetik C-S-H'nin mekanik özelliklere etkisi erken yaşta (9.saat) görülmüştür. Bu sayede kalıp alma sürelerini kısaltabileceği söylenebilir.
- 4) Yüksek fırın cürufu içeren betonların ileri yaşlardaki basınç dayanımı ile sadece çimento ile üretilen referans betonun basınç dayanımı arasındaki fark optimum miktara kadar (YFC/bağlayıcı = %50-53) artmış, cüruf içeriğinin bu seviyeyi aşması durumunda aradaki fark azalmıştır. Bir başka ifadeyle en yüksek dayanım değerleri optimum YFC oranı olan %50-53 seviyesinde elde edilmiştir.
- 5) Uygulanan kimyasal kürlerde betonun mekanik özelliklerine etkisi bakımından en yüksek performans erken yaşlarda reçine esaslı kür malzemesi, ileri yaşlarda ise akrilik esaslı kür malzemesi göstermiştir.
- 6) Mekanik özellikler için üstü sadece 1 gün çuvalla kapalı daha sonra laboratuvarında beklemiş numunelerle döküldükten 4,5 saat sonra üzeri açılarak kimyasal kür uygulanan numunelerin dayanımları 3. günde eşdeğer seviyeye ulaşmışlardır.

- 7) 7 gün ıslak çuvalaltında tutulup daha sonra laboratuvar ortamında beklemiş numuneler, sürekli kireçli suda beklemiş numunelere yakın performans göstermesi ilk 1 haftalık kürün önemini göstermektedir.
- 8) Etkinlik değerleri YFC miktarının artmasıyla tüm cüruf taneciklerinin hidrate olamaması nedeniyle azalmıştır. Ayrıca, puzolanik reaksiyonun çimento hidratasyonuna göre yavaş olması nedeniyle 28. güne oranla 90 günlük numunelerde daha yüksek etkinlik katsayıları elde edilmiştir.
- 9) Kür uygulanan numunelerde etkinlik değerleri kür uygulanmayanlara göre daha yüksek çıkmıştır.
- 10) Sentetik C-S-H kullanılması numunelerin etkinlik değerlerini olumsuz etkilemiştir.
- 11) Kür uygulamaları su kaybını azalttığı için kılcal su emme katsayılarını düşürmüştür. Mekanik özelliklerde olduğu gibi 7. günden itibaren performans sıralaması akrilik, parafin ve reçine olmuştur.
- 12) Cüruf miktarı elektriksel direnç özelliklerine, iyon konsantrasyonunu değiştirmesi bakımından, en fazla etki eden parametre iken kür koşullarının ikinci dereceden etkili olduğu görülmüştür. Sentetik C-S-H ilavesi de betonun elektriksel direncini arttırmıştır.
- 13) Rötire değerlerinde kimyasal kür uygulanan numuneler hava kürü uygulanan numunelere oranla daha az büzülmüştür. Reçine esaslı kür malzemesinin büzülmeyi kısıtlanması (epoksi) nedeniyle rötire değerlerinde performans sıralaması reçine, akrilik, parafin iken ağırlık kaybı sonuçlarına göre performans sıralaması akrilik, reçine, parafin olduğu tespit edilmiştir.
- 14) Kür malzemelerinin maliyet-performans durumuna göre en ideal seçimin akrilik olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Beton Tanımı ve Tarihçesi.** (t.y). *Tonbullar Hazır Beton*. Alındığı tarih: 23.11.2014, adres: <http://www.tonbullar.com.tr/index.php/293/>
- [2] **Okamura, H. ve Ouchi, M.** (1999). Self Compacting Concrete Development, Present and Future, *proceeding of 1st International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete*, Sweden.
- [3] **Özkul, M. H., Sağlam, A. R., Parlak, N., Doğan, A., Mutlu, M., Manzak, O.** (2002). The Usage of Self-Compacting Concrete in Precast Industry, *17th Int. congress of the Precast Concrete Industry*, BIBM, Istanbul.
- [4] **Semioli, W. J.** (2002). Self-Placing Concrete, *Concrete International*, Vol. 23, No. 12, 69-72.
- [5] **CEMBUREAU** (2009). ‘Activity Report 2008’, *CEMBUREAU*, Brussels.
- [6] **Mehta, P. K. ve Monteiro, P. J. M.** (2013). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th edition, Mc Graw Hill Education, ISBN 978-0-07-179-787-0.
- [7] **Ramezaniapour, A. A.** (1995). Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concrete incorporaitng slag, fly as hor silica fume, *Cement and Concrete Composite*, 80(1), 125-133.
- [8] **Neville, A. M.** (1996). *Properties of Concrete*, 4th edition, John Wiley and Sons Inc., New York, ISBN 0-582-23070-5.
- [9] **Fattuhi, N. I.** (1986). Curing Compounds for Fresh or Hardened Concrete, *Building Environment*, 21, 2, 119-125.
- [10] **Lothenbach, B., Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E., Lunk, P.** (2007) Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 37, 483–491.
- [11] **Cao, Y. ve Detwiler, R. J.** (1995). Backscattered electron imaging of cement pastes cured at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 25, 627–638.
- [12] **Morch, A., Loken, J., Farstad, T., Reknes, K.** (1996). Production of steel fibre reinforced sprayed concrete and the influence of setting accelerator dosage on durability, *Production Methods and Workability of Concrete*, E&FN Spon, 109-114.
- [13] **Nicoleau L.** (2010). New Calcium Silicate Hydrate Network, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2142, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 42–51.

- [14] **Alizadeh, R., Raki, L., Makar, J. M., Beaudoin, J. J., Moudrakovski, I.** (2009). Hydration of tricalcium silicate in the presence of synthetic calcium silicate hydrate, *Journal of Materials Chemistry*, 19, 7937–7946
- [15] **Schutter, G. D., Gibbs, J., Domone, P., Bartos, P. J. M.** (2008). *Self-Compacting Concrete*, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland.
- [16] **EN 197-1** (2000). Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, *European standards*.
- [17] **EFNARC** (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*, United Kingdom.
- [18] **EN 12620** (2013). Aggregates for Concrete, *European standards*.
- [19] **Çağlayan, M., Haberveren, S., İpekoğlu, B., Kurşun, İ.** (1999). Beton Yapımında Kullanılan Agregaların Özellikleri ve Örnek Bir Kuruluş 'İSTON', 2. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu'99*, İstanbul.
- [20] **TS EN 1008** (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [21] **TS EN 206-1** (2002). Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [22] **ACI Committee 212** (2010). Report on Chemical Admixtures for Concrete, *ACI 212.3R-10*
- [23] **Glenium 51 Formu** (2014). *BASF Yapı Kimyasalları*.
- [24] **Şimşek, O., Aruntaş, H. Y., Demir, İ.** (2007). Beton Üretiminde Süper Akışkanlaştırıcı Çeşiti ve Oranı Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 4, 829-835.
- [25] **Rixom, R. ve Mailvaganam, N.** (2002). *Chemical Admixtures for Concrete*, 3th edition, E&FN Spon, ISBN 0-419-22520-X.
- [26] **Pailhere, A. M.** (2005). Application of Admixtures in Concrete, *RILEM Report 10*, E&FN Spon, United Kingdom.
- [27] **Çekirdeklenme.** (t.y.). *Teknolojik Araştırmalar*. Alındığı Tarih: 25.11.2014, adres: <http://teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/malzeme/cekirdeklenme.htm>
- [28] **Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J., Delgado, A. H.** (2003). *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, Noyes Publications/William Andrew Publishing, 680.
- [29] **Angstadt, R. L. ve Hurley, F. R.** (1963). Hydration of the alite phase in Portland cement, *Nature*, 197, 688.
- [30] **X Seed 100 Formu** (2014). *BASF Yapı Kimyasalları*.
- [31] **Skarendahl, A. ve Petersson, O.** (2000). Self Compacting Concrete, *State-of-the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC*.

- [32] **Beycioğlu, A. ve Aruntaş, H.** (2014). Workability and mechanical properties of self-compacting concretes containing LLFA, GBFS and MC, *Construciton and Building Materials*, 73, 626-635
- [33] **Şimşek O.** (2007). *Beton ve Beton Teknolojisi*, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye
- [34] **Aruntaş H. Y.** (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt No:21, No:1, sf. 193-203, Ankara.
- [35] **Silica fume.** (t.y.). *Wikipedia*. Alındığı tarih: 09.12.2014, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/Silica_fume
- [36] **Taşdemir, C. ve Atahan, H. N.** (1996). Filler Malzemelerin Betonun Mekanik Özelliklerine ve Durabilitesine Etkisi, *I. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye.
- [37] **ACI 233.R-95**, (2000). Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete Reported by ACI Committee 233, *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan.
- [38] **Teng, S., Lim, T., Divsholi, B. S.** (2013). Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag, *Construction and Building Materials*, 40, 875-881.
- [39] **Papadakis, V. G. ve Tsimas, S.** (2002). Supplementary cementing materials in concrete Part I: efficiency and design, *Cement and Concrete Research*, 32, 1525-1532.
- [40] **Rajamane N. P., Annie Peter, J., Ambily, P. S.** (2007). Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material, *Cement Concrete Composite*, 29(3), 218-223.
- [41] **Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R., Lehman, D.** (2012). The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete, *Construction and Building Materials*, 30, 161-168.
- [42] **Oner, A. ve Akyuz, S.** (2007). An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 505-514.
- [43] **Nawy, E. G.** (1997). *Concrete construction engineering handbook*, Boca Raton (NY), CRS Press, 20-55
- [44] **Maslehuddin, M., Ibrahim, M., Shameem, M., Ali, M. R., Al-Mehthel, M. H.** (2013). Effect of curing methods on shrinkage and corrosion resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 41, 634-641
- [45] **Beton Bakımı (Kürü).** (t.y.) *Türkiye Hazır Beton Birliği*. Alındığı tarih: 14.11.2014, adres: <http://www.thbb.org/Utility.aspx?o=file&id=33>
- [46] **Ünveren, A.** (24.06.2013). Sıcak Havada Beton Dökümü, *İnşaat Mühendisleri Odası*. Alındığı tarih: 25.11.2014, adres: http://www.imo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=1943&tipi=3&su=5

- [47] **Huo, X. S. ve Wong, L. U.** (2006). Experimental study of early-age behavior of high performance concrete deck slabs under different curing methods, *Construction and Building Materials*, 20, 1049-1056.
- [48] **Türkel, S. ve Alabaş, V.** (2005). The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 35, 405-411
- [49] **Higginson, E. C.** (1961). Effect of steam curing on the important properties of concrete, *Journal American Concrete Institute*, 58, 3, September, 281-298
- [50] **Wang, K. J., Cable, J. K., Ge, Z.** (2006). Evaluation of pavement curing effectiveness and curing effects on concrete properties, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No.3, 377-389.
- [51] **Özkul, M. H., Özer, B., Parlak, N., Sağlam, A.** (2007). Farklı Kimyasal Yapıdaki Kür Malzemelerinin Su Kaybını Önleme ve Yapışma Davranışlarının İncelenmesi, 7. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul-Türkiye, 43-54
- [52] **Al-Gahtani, A. S.** (2010). Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes, *Construction and Building Materials*, 24, 308-314
- [53] **Bartos, P.** (1992). *Fresh concrete: properties and tests*, Elsevier Science Publisher, Amsterdam, Netherlands.
- [54] **Gürdal, H. ve Yüceer, Z.** (2004). Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları, *Beton 2004 Kongre Bildiri*, İstanbul.
- [55] **Bui, V. K., Montgomery, D., Hinczak, I., Turner, K.** (2002). Rapid Testing Method for Segregation Resistance of Self – Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 9, 1489-1496.
- [56] **Okamura, H. ve Ouchi, M.** (2003). Self Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 1, Japan Concrete Institute.
- [57] **Demirtaş, M.** (2004) *Yüksek Akışkanlığa Sahip Betonlarda (Kendiliğinden Yerleşen Betonlar) bileşimin taze ve sertleşmiş betonlara etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [58] **Kendiliğinden Yerleşen Beton Teknolojisi.** (t.y.) *İnşaat Mühendisleri Odası*, Alındığı tarih: 17.11.2014, adres: http://www.imo.org.tr/resimler/dosya_ekler/f400d572632feb5_ek.pdf
- [59] **Non-Newtonian Akışkanlar.** (13.09.2012). *Mühendis oldum*, Alındığı tarih: 25.11.2014, adres: <http://muhendisoldum.blogspot.com/2012/09/non-newtonian-akiskanlar.html>
- [60] **Wallevik, J. E.** (2003). Rheology of Particle Suspensions, *Fresh Concrete, Mortar and Cement Paste with Various Types of Lignosulfonates (PhD dissertation)*, NTNU Trondheim, 397.
- [61] **Heirman, G. ve Marchand, J.** (2006). *Proceedings of 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and*

Engineering, Quebec, 11–13 September, RILEM Publications SARL, Bagnaux, 327

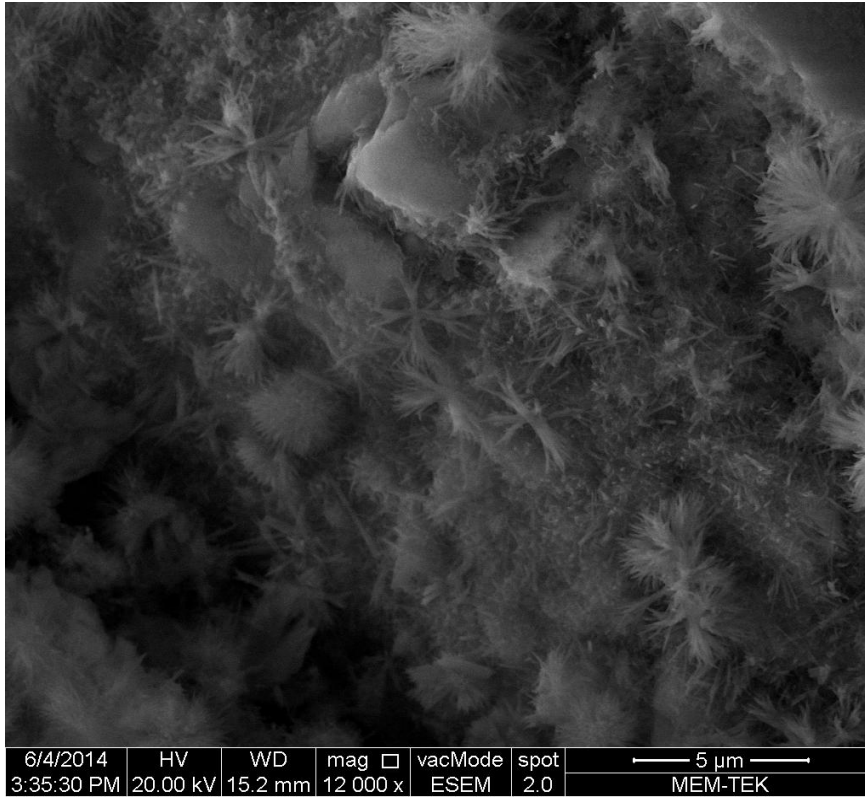
- [62] **Wallevik, J. E.** (2008). Minimizing end-effects in the coaxial cylinders viscometer: Viscoplastic flow inside the ConTec BML Viscometer 3, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 155, 116-123
- [63] **Faleschini, F., Jiménez, C., Barra, M., Aponte, D., Vázquez, E., Pellegrino, C.** (2014). Rheology of fresh concretes with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 73, 407-416.
- [64] **EFNARC** (2005). The European guidelines for self-compacting concrete “specification, production and use”, *The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*, United Kingdom.
- [65] **Bartos, P. J. M., Sonebi, M., Tamimi, A. K.** (2002). Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests, *Report of RILEM Technical Committee TC 145-WSM Workability of Special Concrete Mixes*, ISBN: 2-912143-32-2.
- [66] **European Committee for Standardization** (2010). *EN 206-9: 2010 Concrete - Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC)*.
- [67] **SAĞLAM, A. R.** (2003). Kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özelliklerine bileşim parametrelerinin etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [68] **TS EN 12390 – 3** (2003). Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [69] **TS EN 12390 – 6** (2003). Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [70] **TS EN 12390 – 5** (2000). Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [71] **ASTM C 1585-13** (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, *American Society for Testing and Materials*, United States.
- [72] **ASTM C 1760-12** (2014). Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, *American Society for Testing and Materials*, United States.
- [73] **Naik, T. R., F. ASCE, F., Kraus R. N., Ramme, B. W., Chun, Y. M., Rakesh Kumar, R.** (2006). High-Carbon Fly Ash in Manufacturing Conductive CLSM and Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18, 6, 743-746.
- [74] **Cost 509** (1997). *Corrosion and protection of metals in contact with concrete*, Final Report, In: Cox RN, Cigna R, Vennesland O, Valente T editors, European Commission, Directorate General Science, Research and Development, Brussels, EUR 17608 EN, p. 64.

- [75] **ASTM C 1038** (2014). Standart Test Method for Expansion of Hydraulic Cement Mortar Bars Stored in Water, *American Society for Testing and Materials*, United States.
- [76] **ASTM C 156-11** (2011). Standard Test Method for Water Loss [from a Mortar Specimen] Through Liquid Membrane-Forming Curing Compounds for Concrete, *American Society for Testing and Materials*, United States.
- [77] **ASTM C 1723-10** (2010). Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy, *American Society for Testing and Materials*, United States.
- [78] **Federal Highway Administration**. (07.2006). *Chapter 14. Sample Preparation for and Examination With The Scanning Electron Microscope*, U.S. Department of Transportation, Alındığı tarih: 25.11.2014, adres: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/chapt14.cfm>

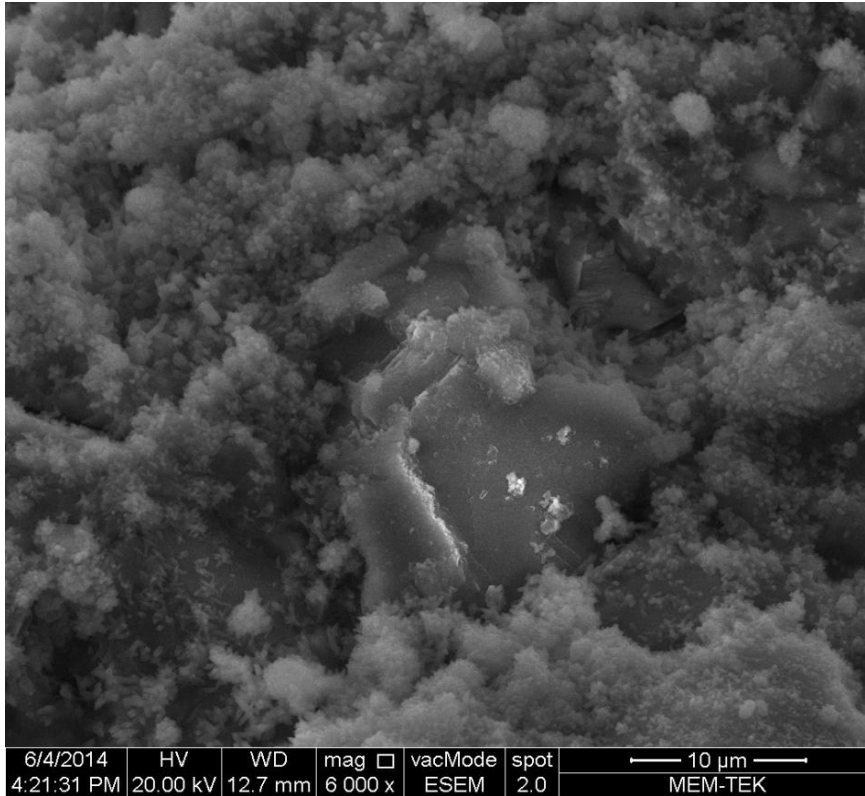
EKLER

EK A: ESEM görüntüleri

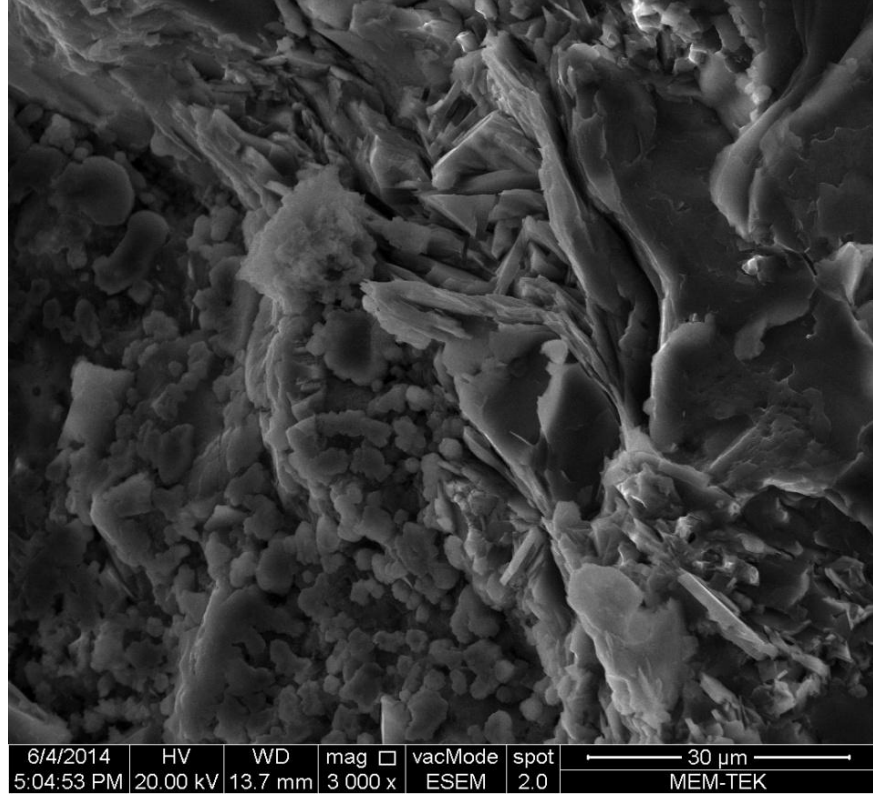
EK A



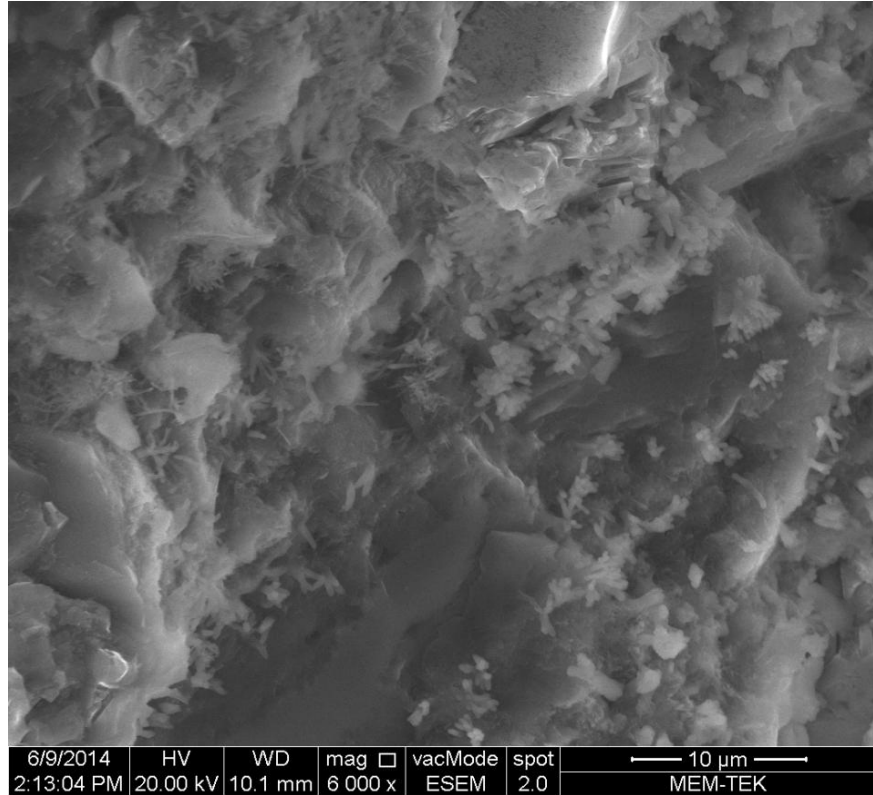
Şekil A.1 : 1 günlük su kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



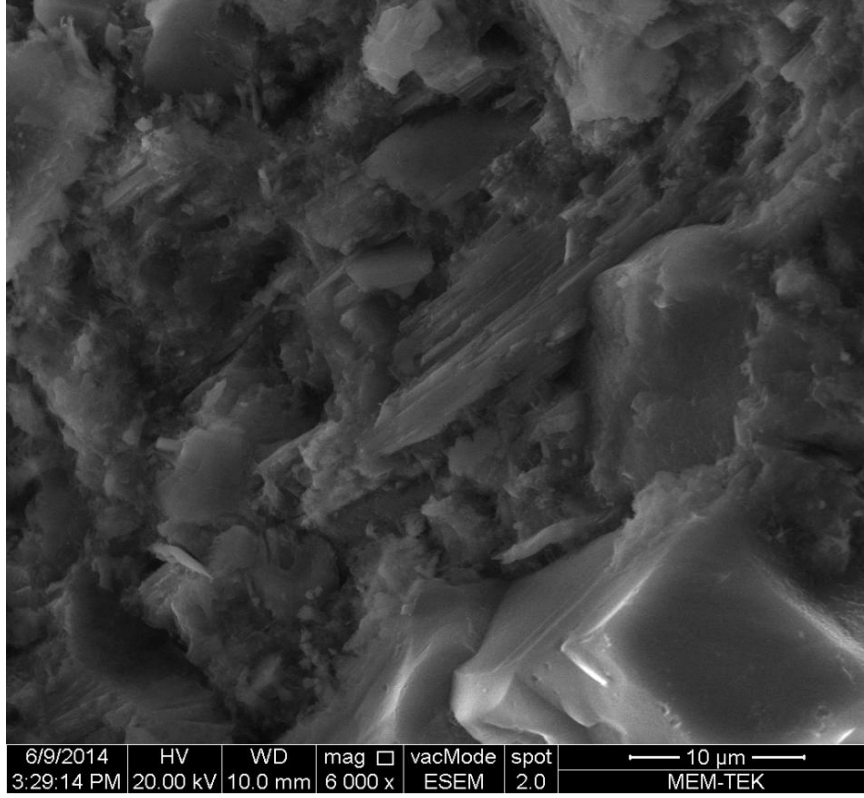
Şekil A.2 : 3 günlük su kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



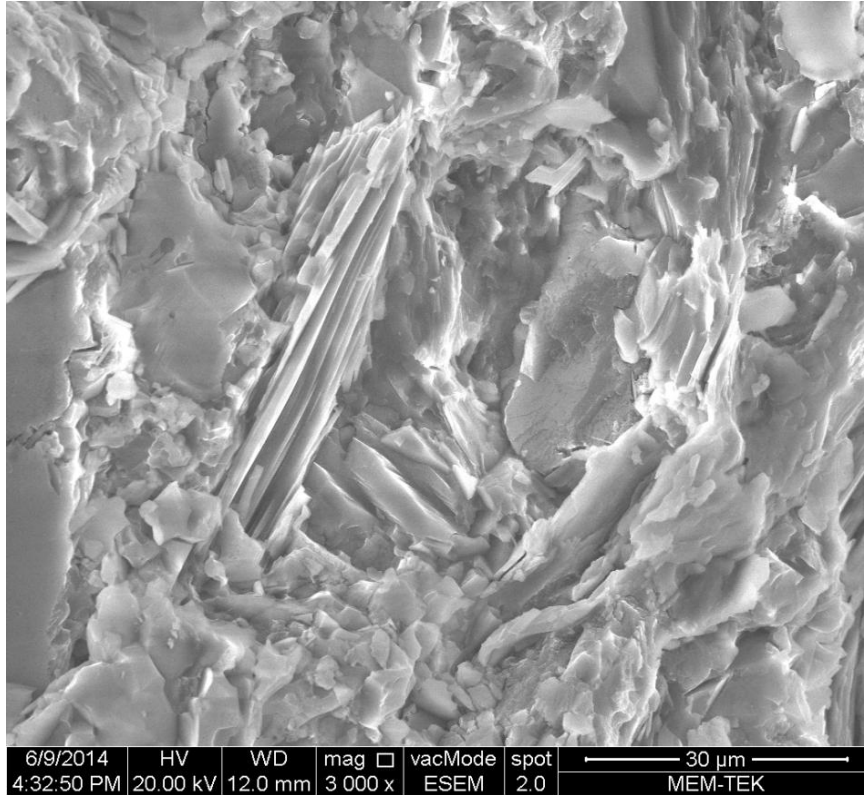
Şekil A.3 : 28 günlük su kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



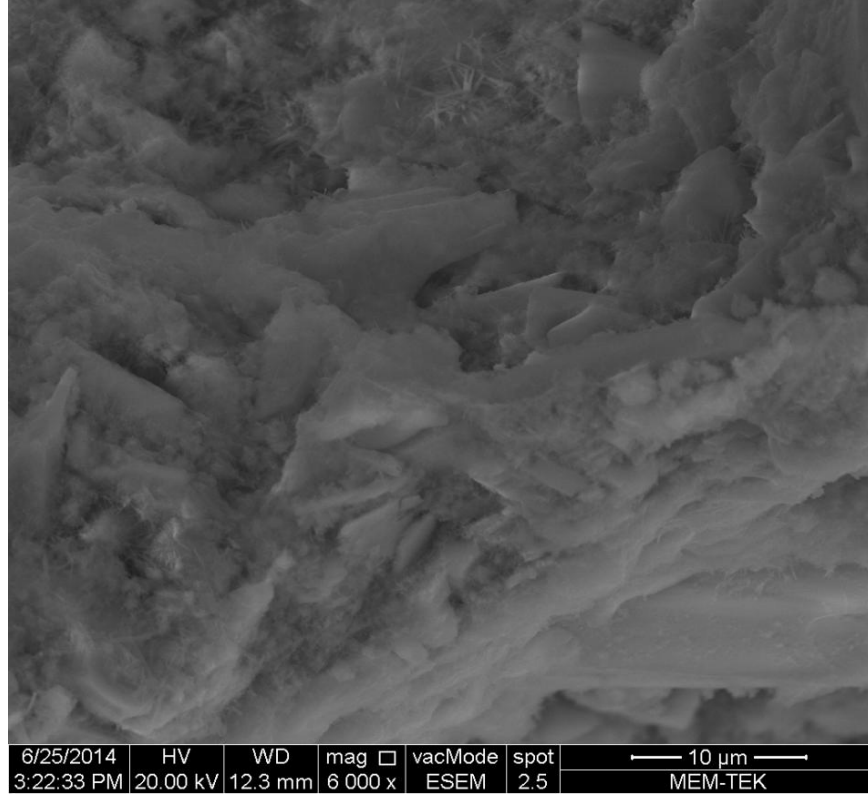
Şekil A.4 : 1 günlük su kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü



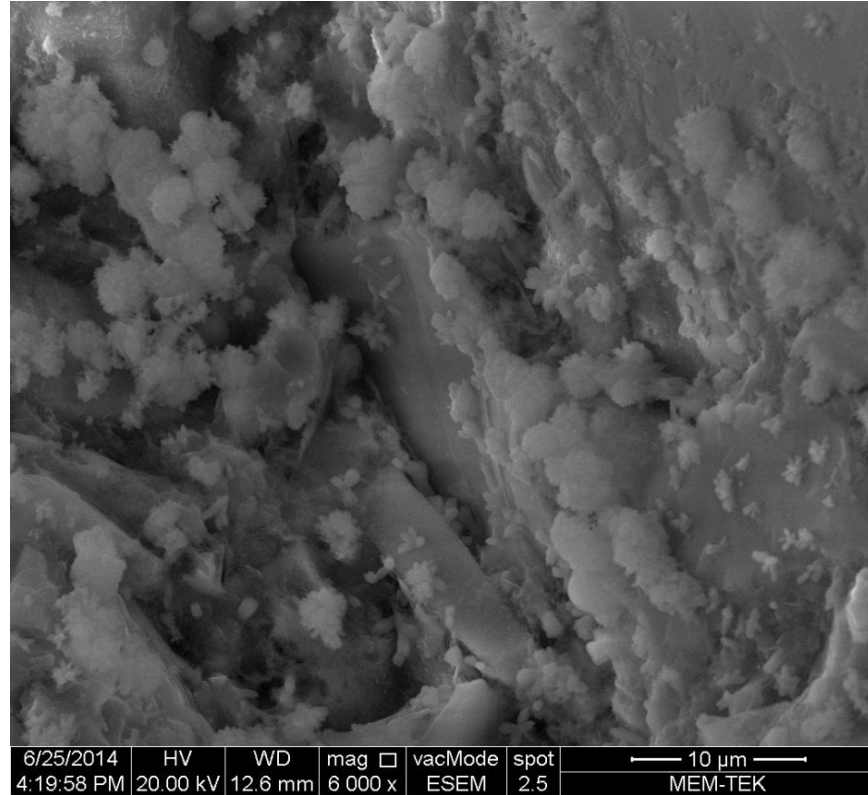
Şekil A.5 : 3 günlük su kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü



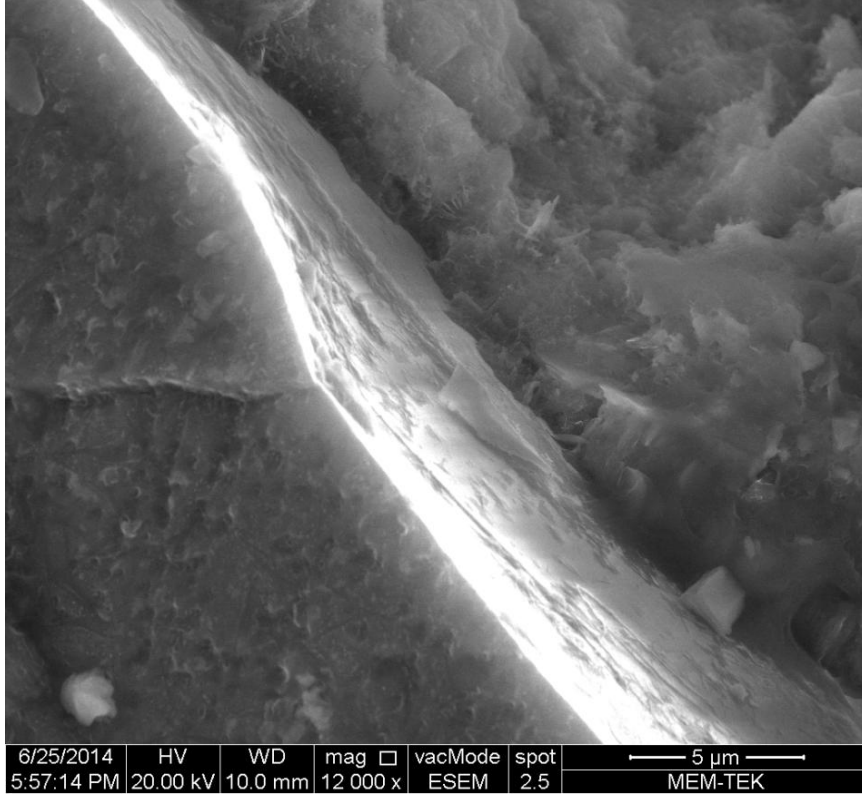
Şekil A.6 : 28 günlük su kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü



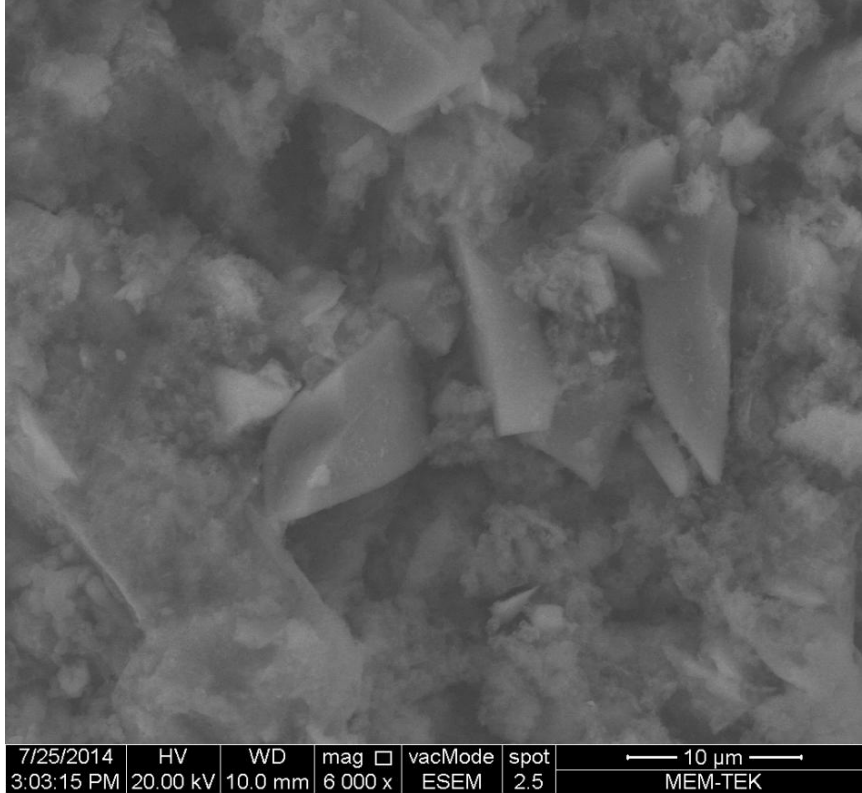
Şekil A.7 : 1 günlük su kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



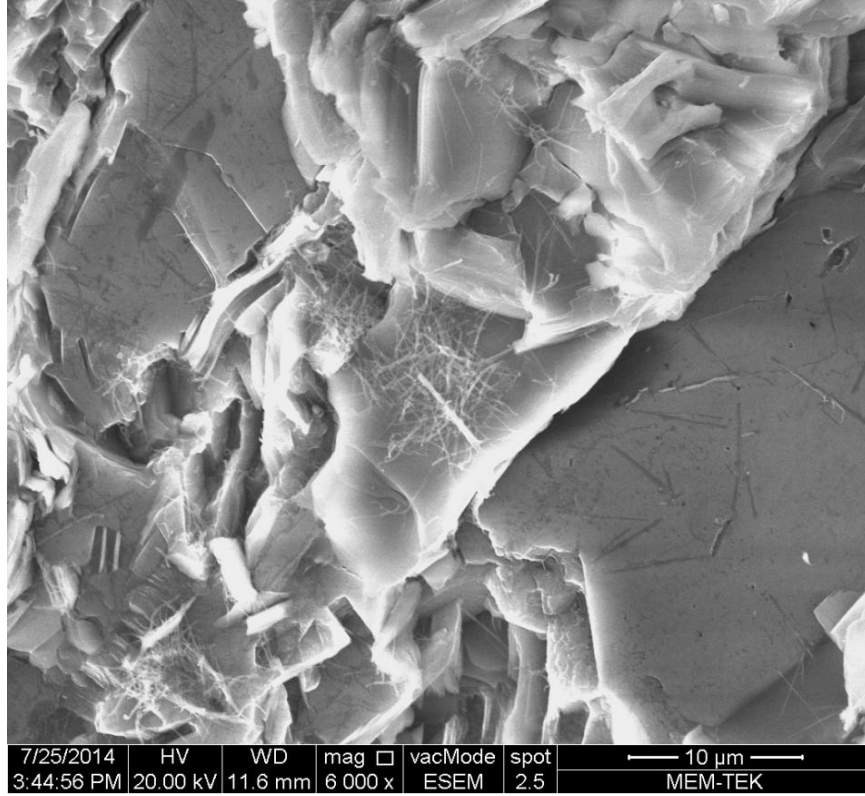
Şekil A.8 : 3 günlük su kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



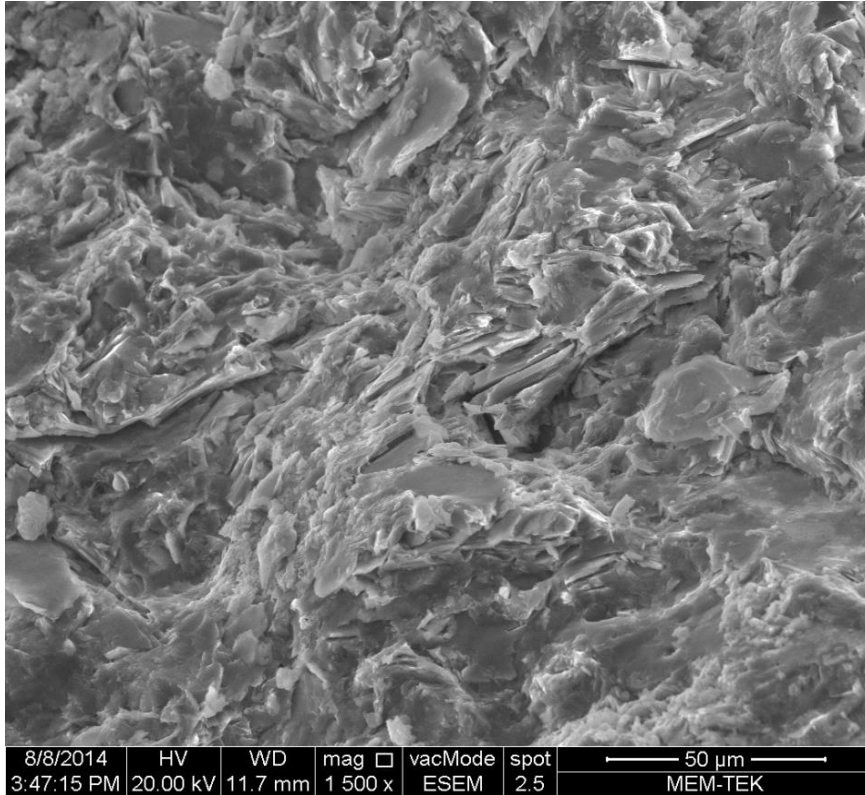
Şekil A.9 : 28 günlük su kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



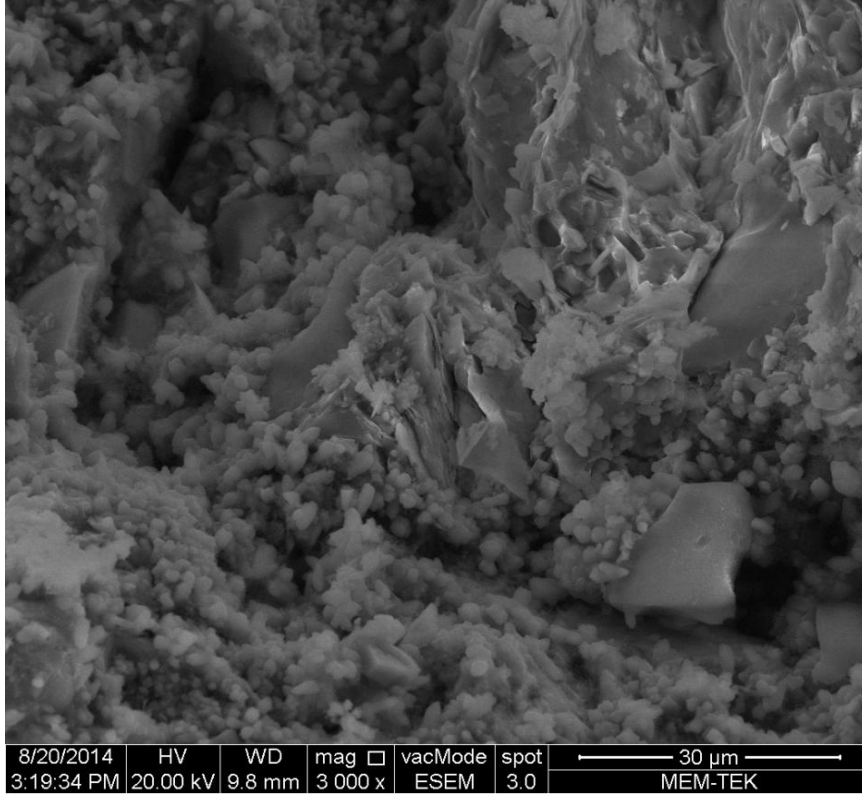
Şekil A.10 : 1 günlük su kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



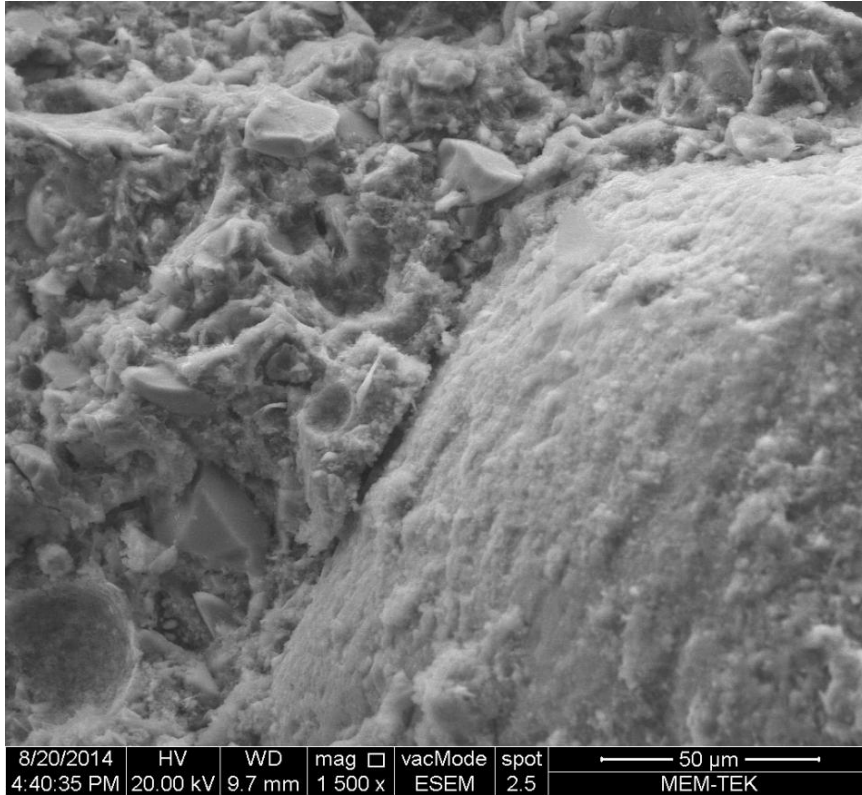
Şekil A.11 : 3 günlük su kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



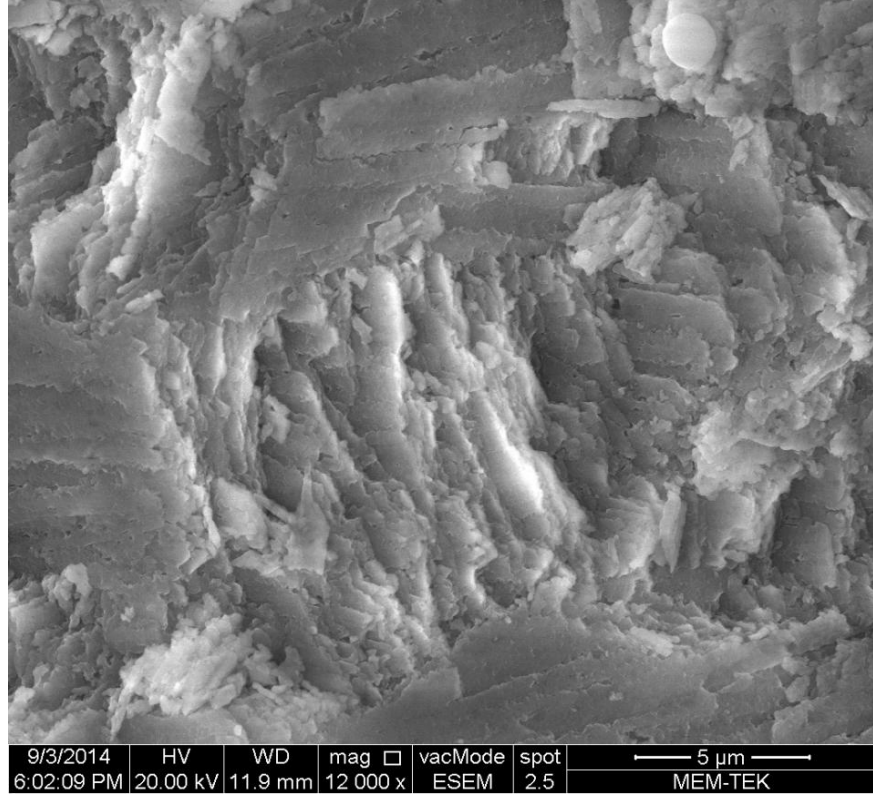
Şekil A.12 : 28 günlük su kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



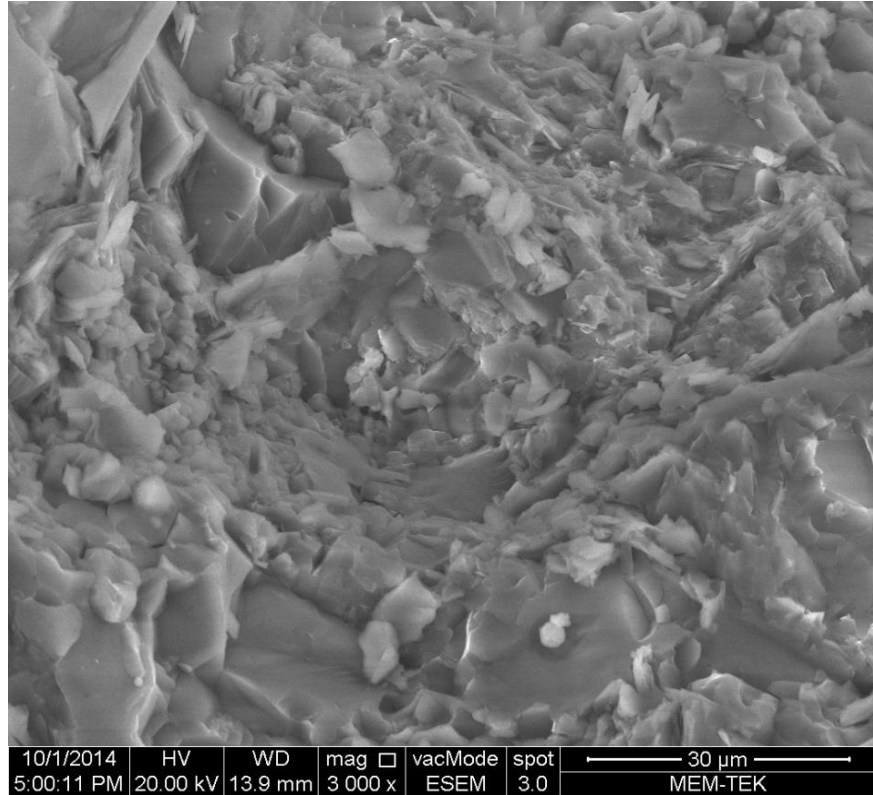
Şekil A.13 : 1 günlük su kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



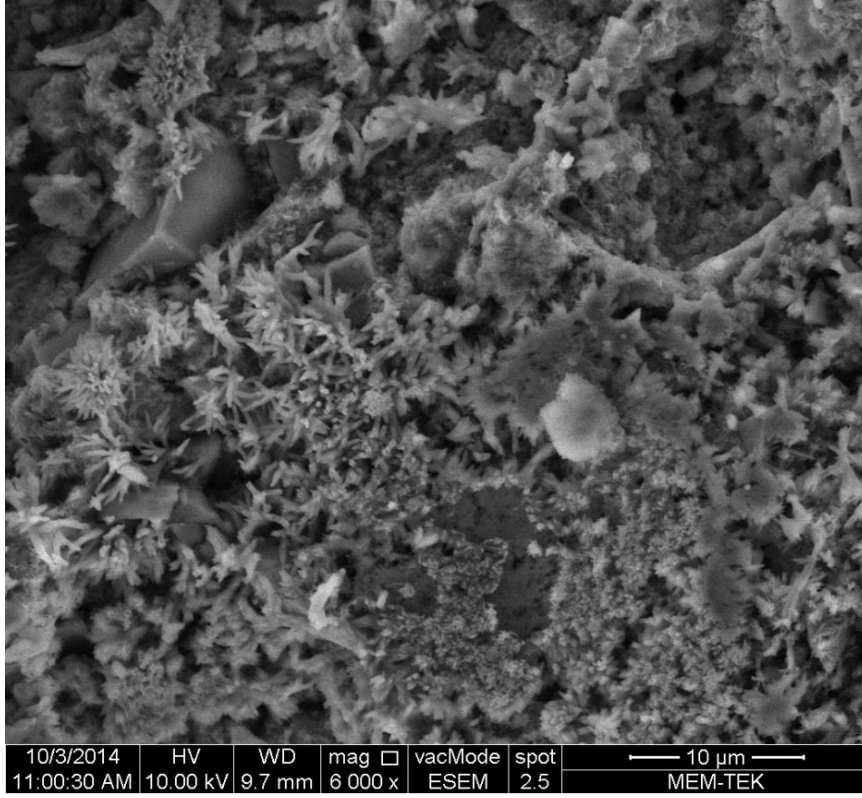
Şekil A.14 : 3 günlük su kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



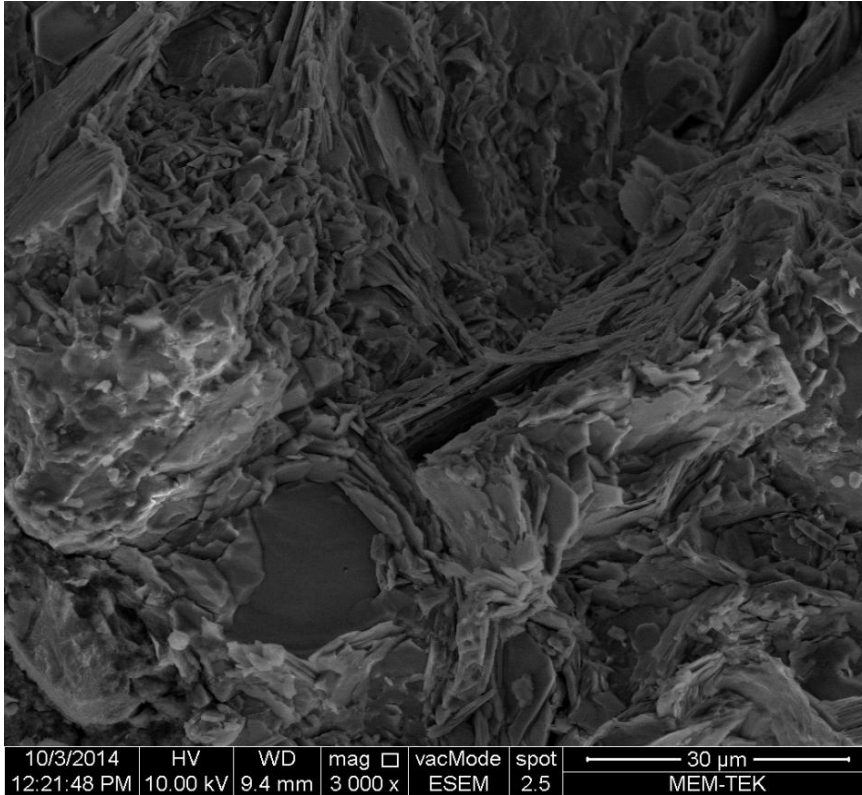
Şekil A.15 : 28 günlük su kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



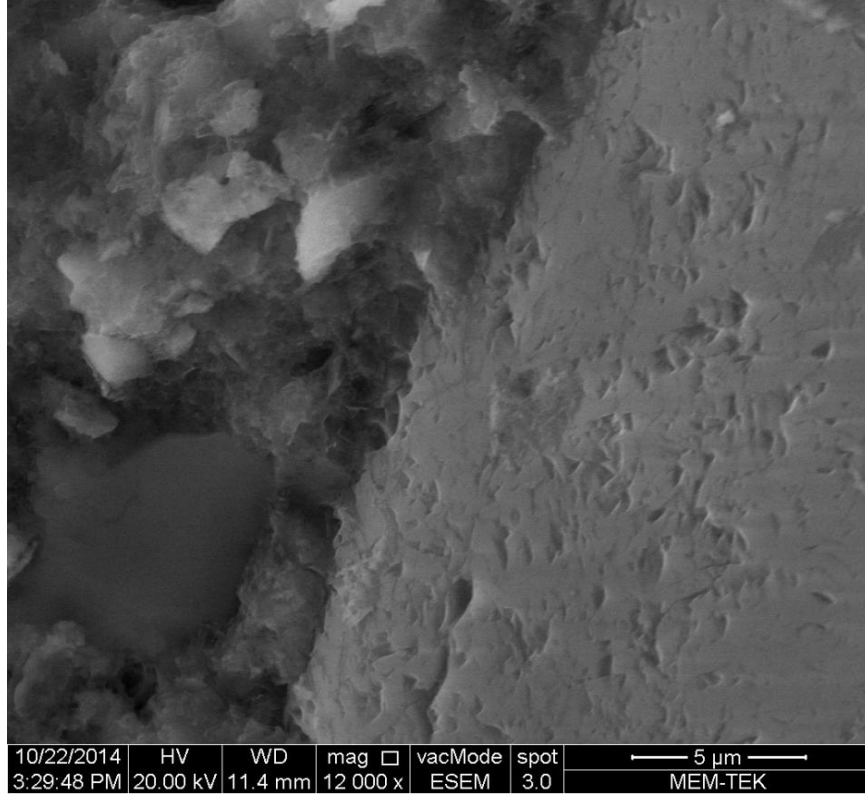
Şekil A.16 : 1 günlük su kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



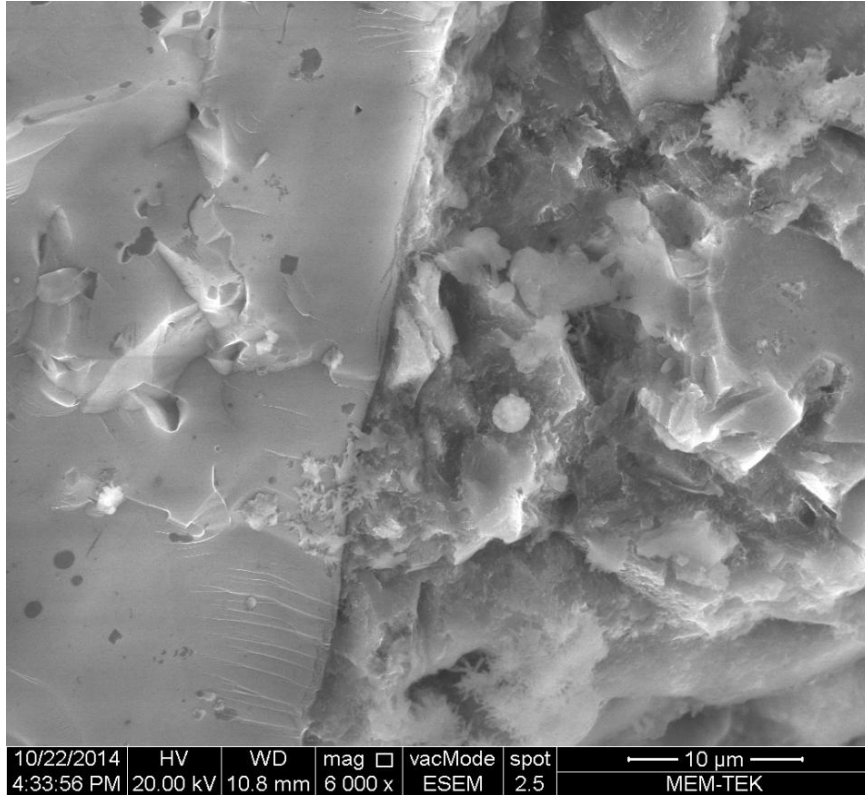
Şekil A.17 : 3 günlük su kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



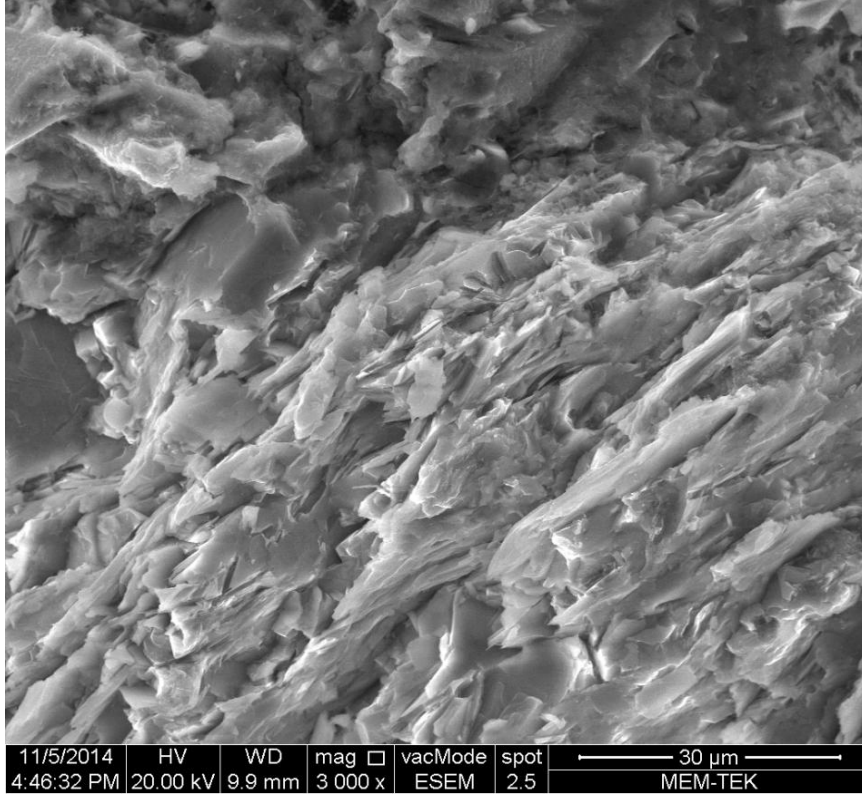
Şekil A.18 : 28 günlük su kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



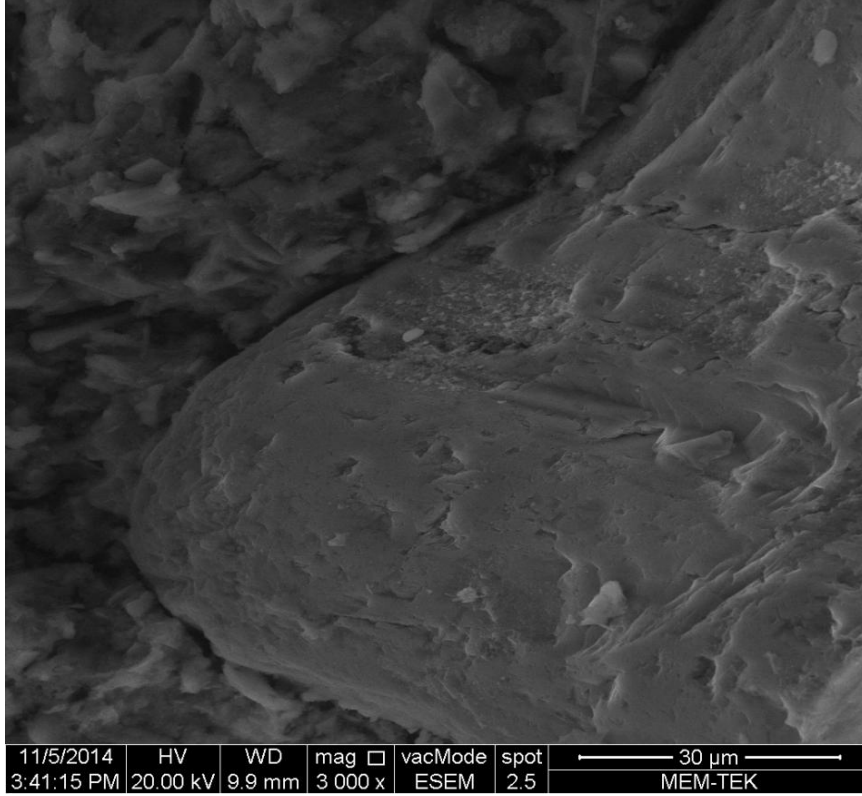
Şekil A.19 : 1 günlük su kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



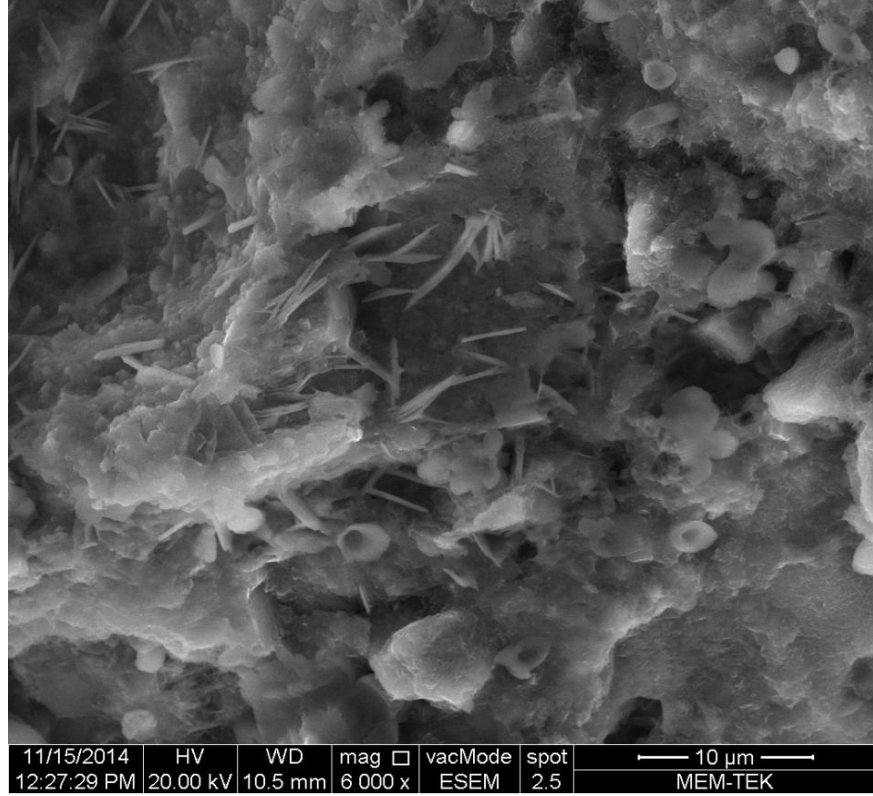
Şekil A.20 : 3 günlük su kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



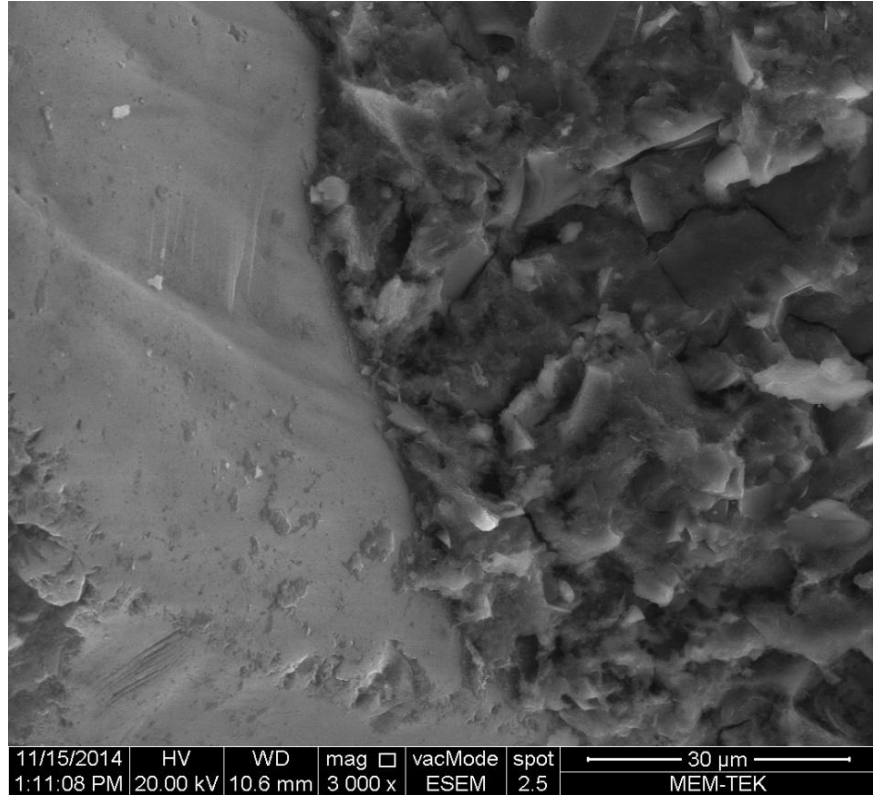
Şekil A.21 : 28 günlük su kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



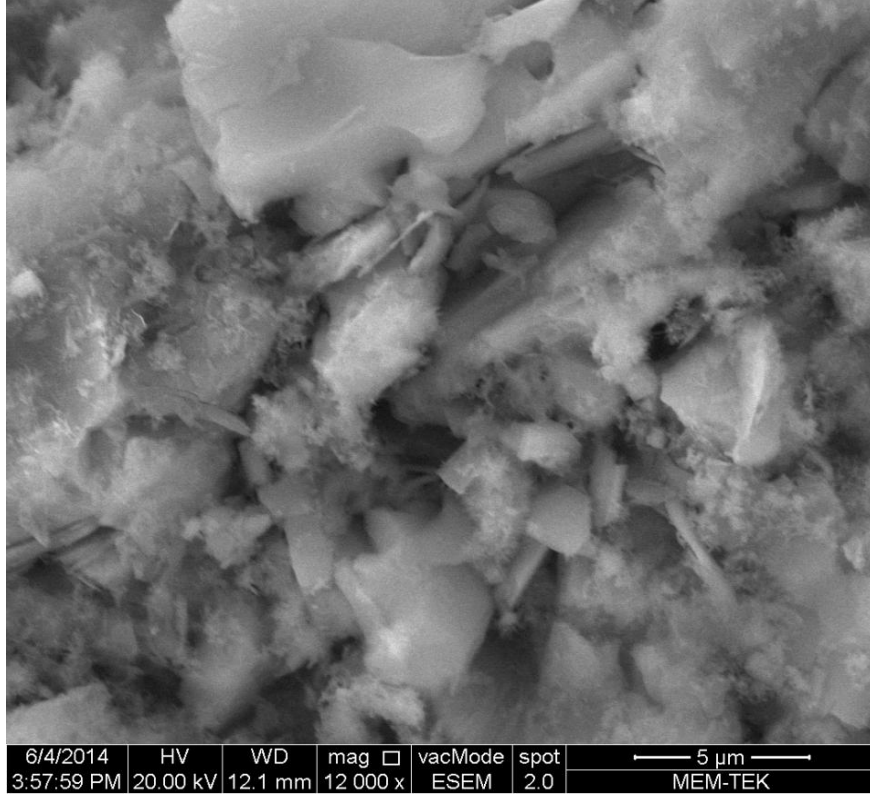
Şekil A.22 : 1 günlük su kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



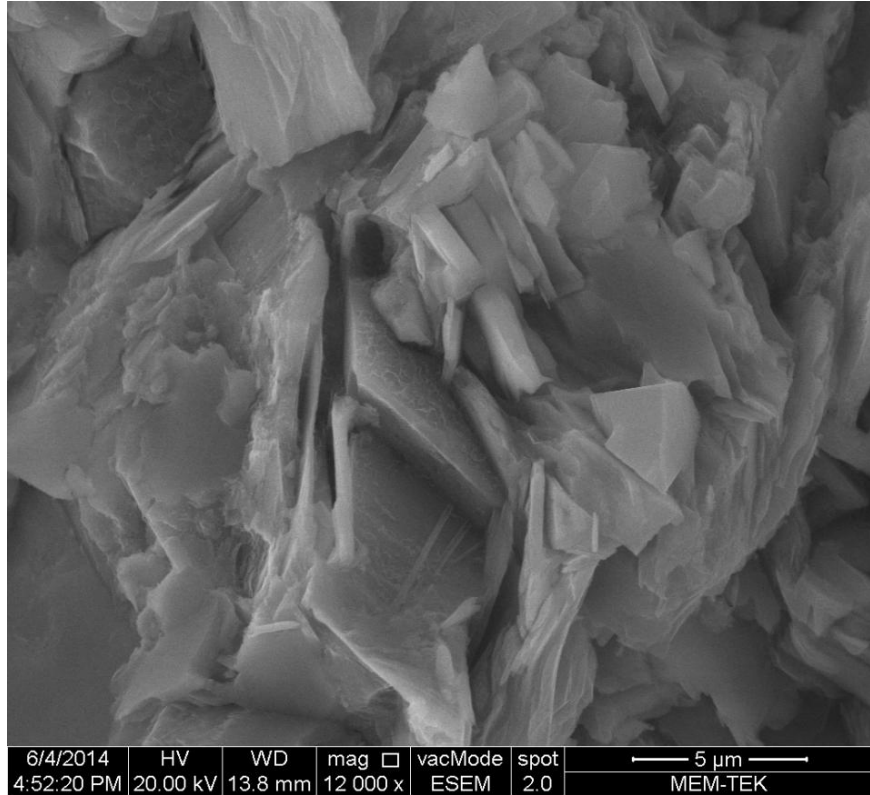
Şekil A.23 : 3 günlük su kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



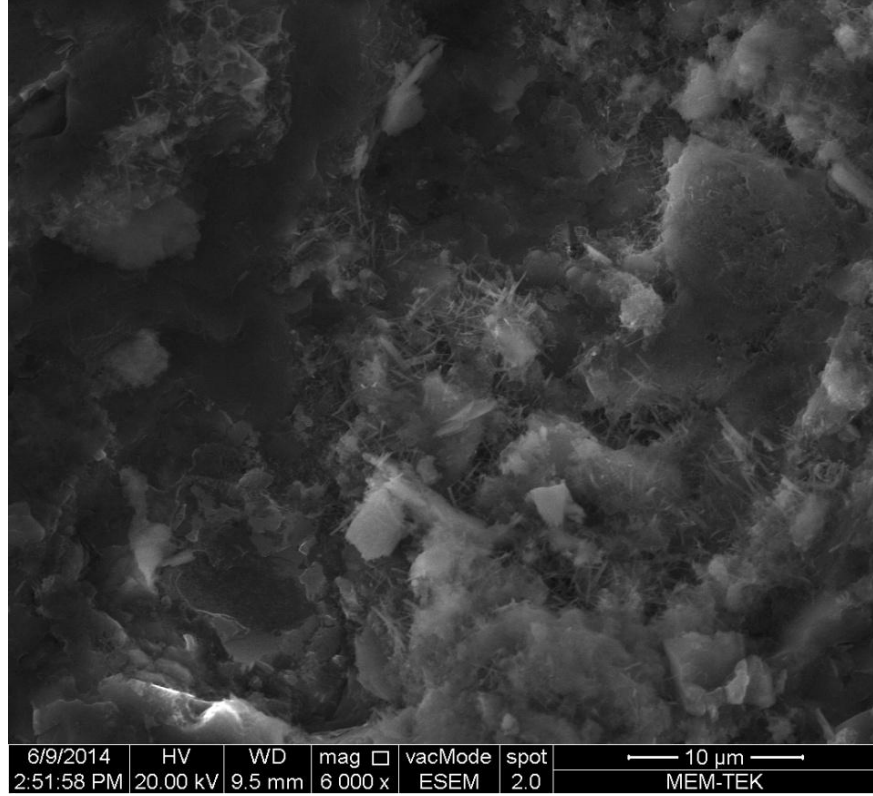
Şekil A.24 : 28 günlük su kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



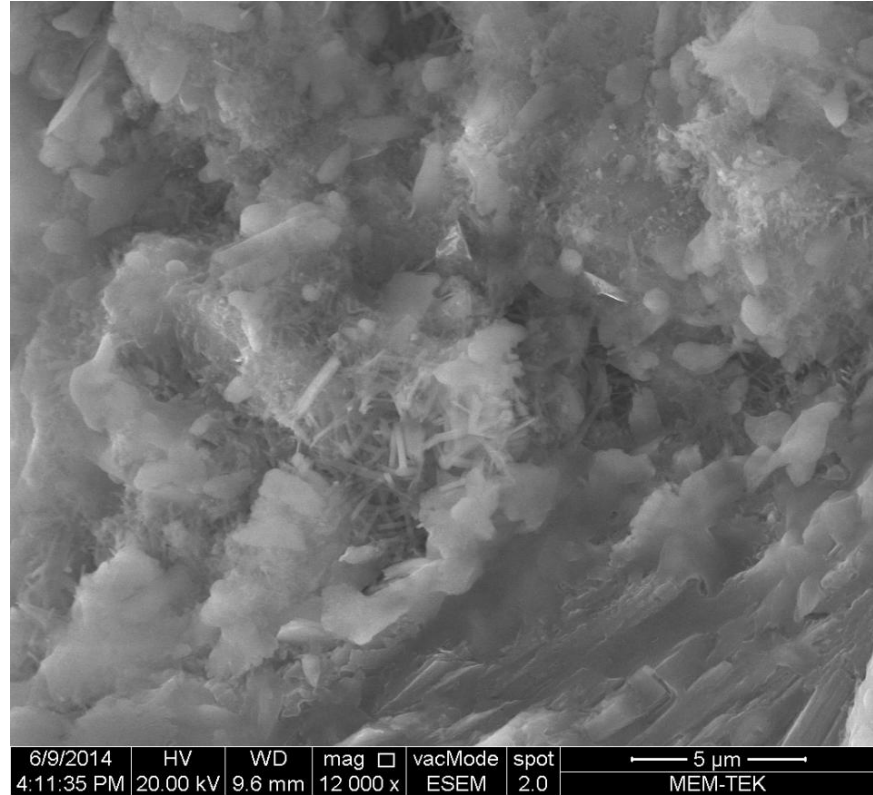
Şekil A.25 : 3 günlük hava kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



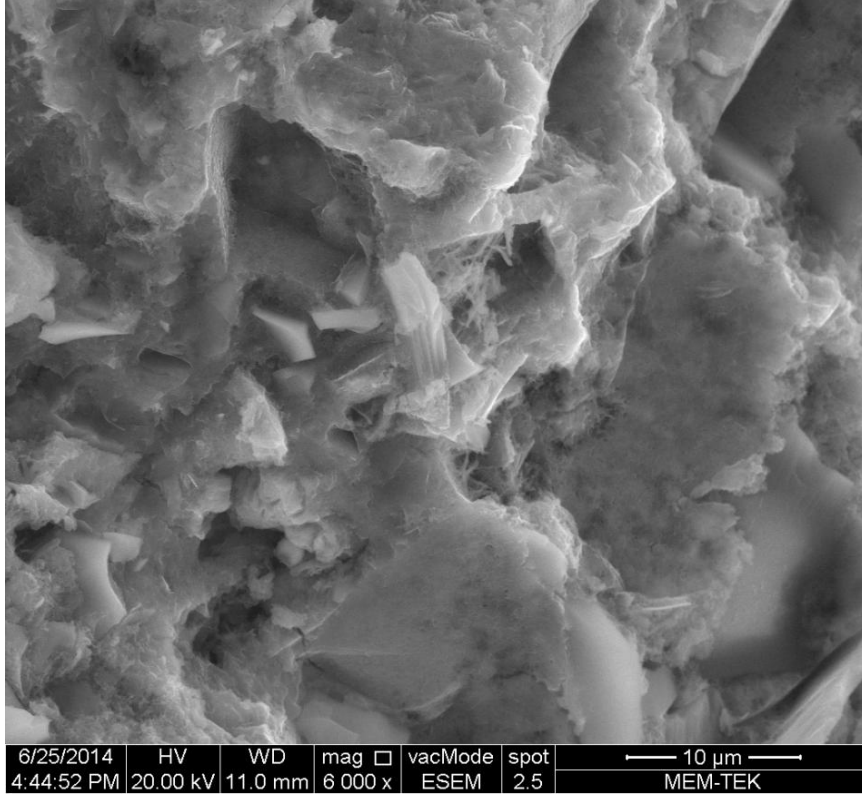
Şekil A.26 : 28 günlük hava kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



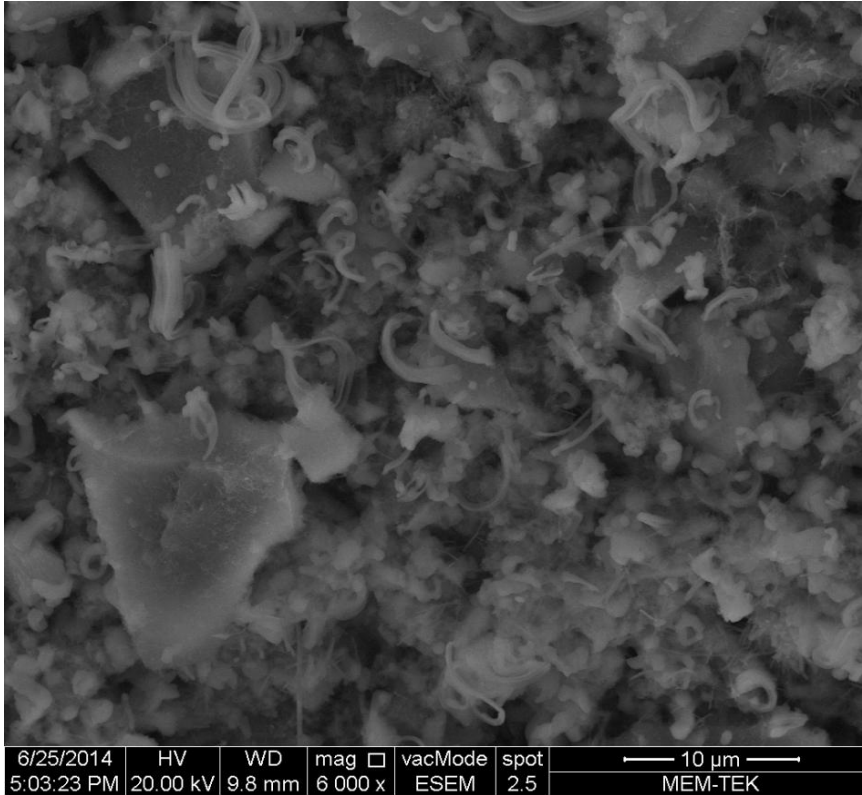
Şekil A.27 : 3 günlük hava kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü



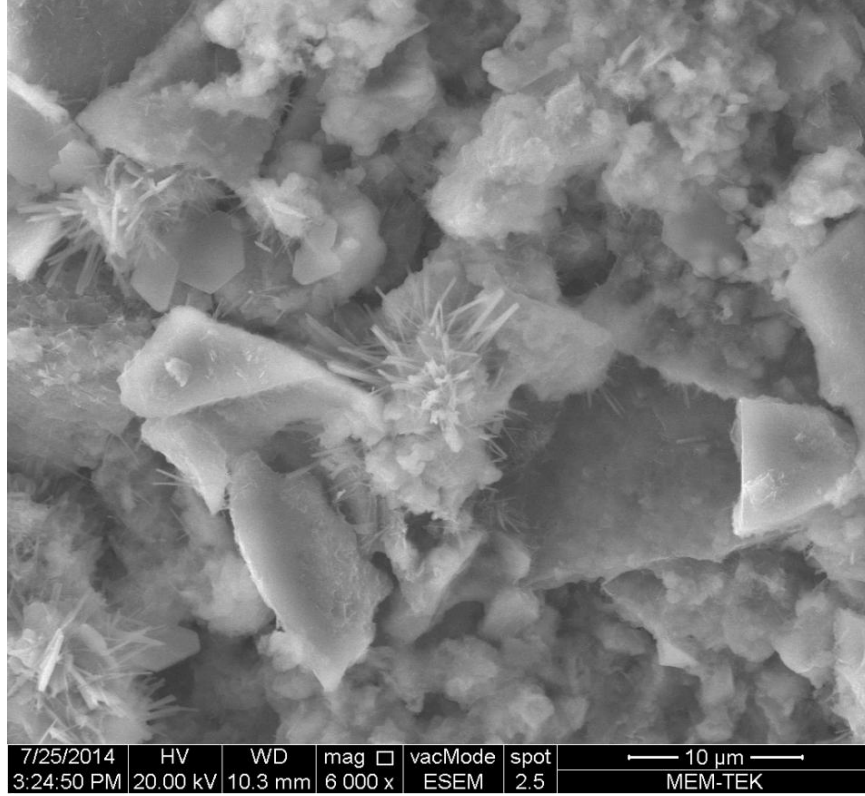
Şekil A.28 : 28 günlük hava kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü



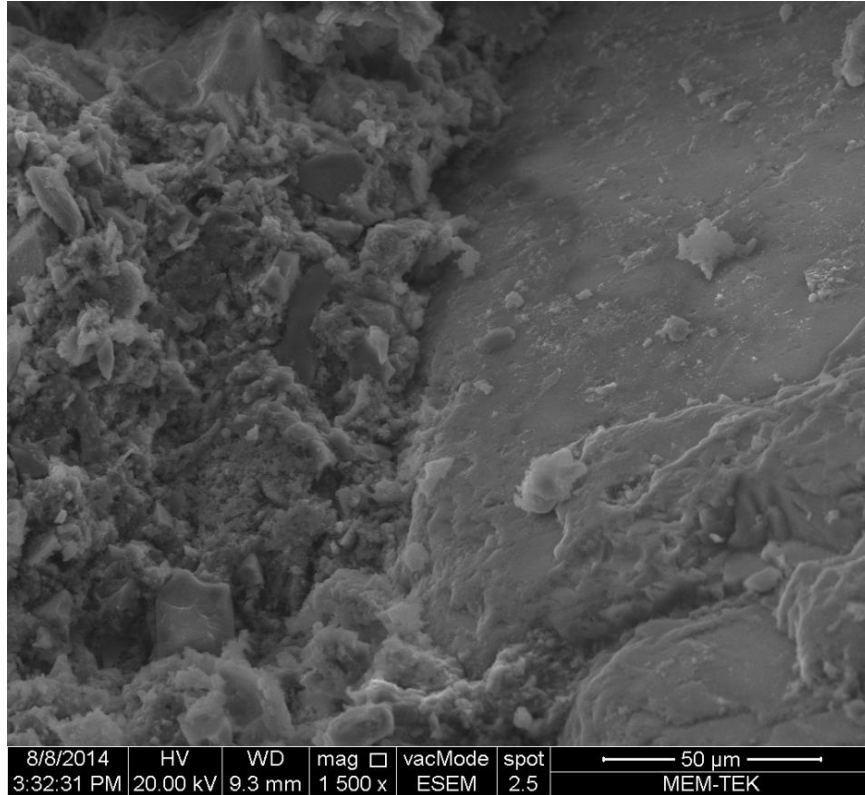
Şekil A.29 : 3 günlük hava kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



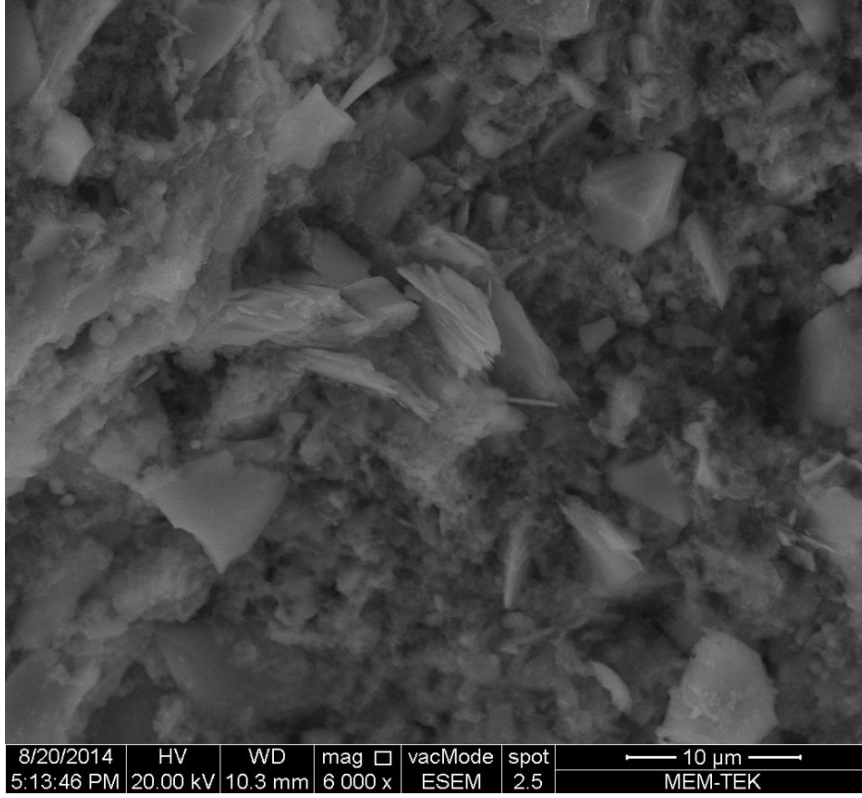
Şekil A.30 : 28 günlük hava kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



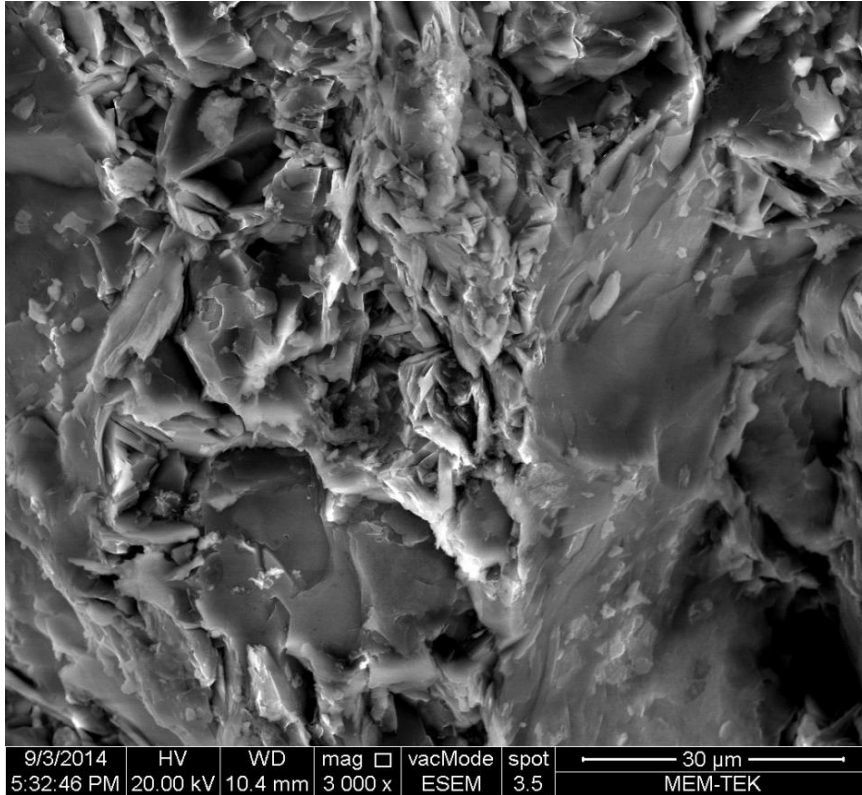
Şekil A.31 : 3 günlük hava kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



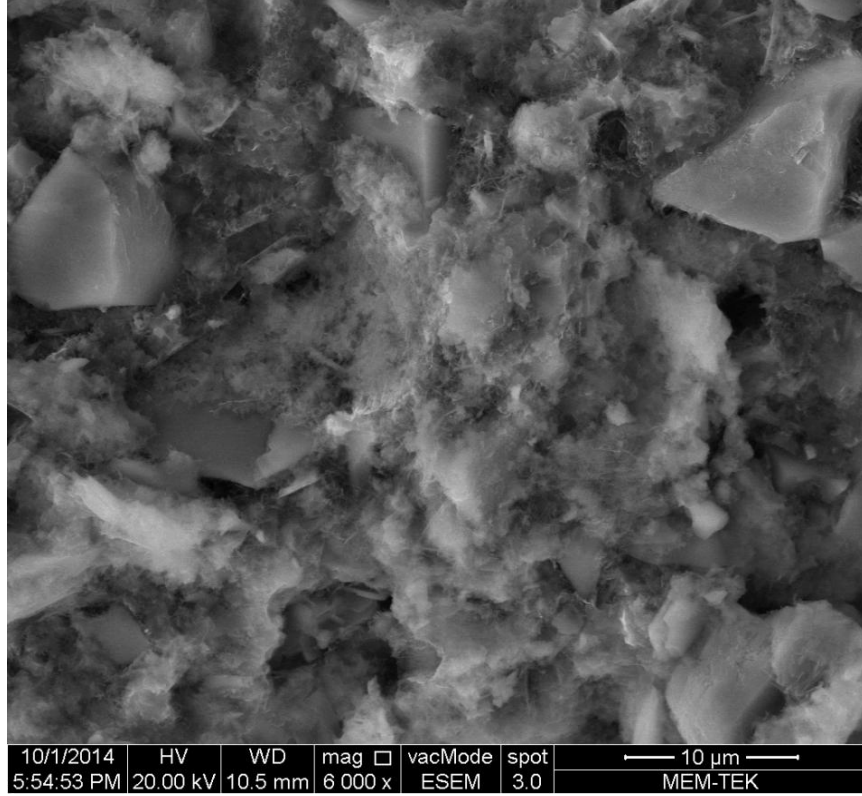
Şekil A.32 : 28 günlük hava kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



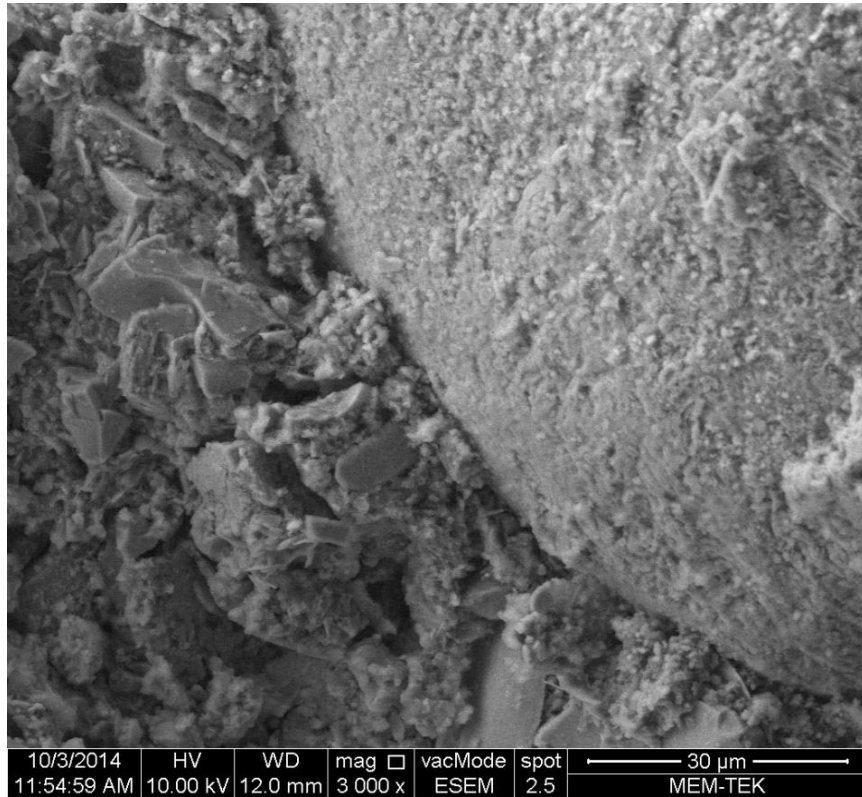
Şekil A.33 : 3 günlük hava kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



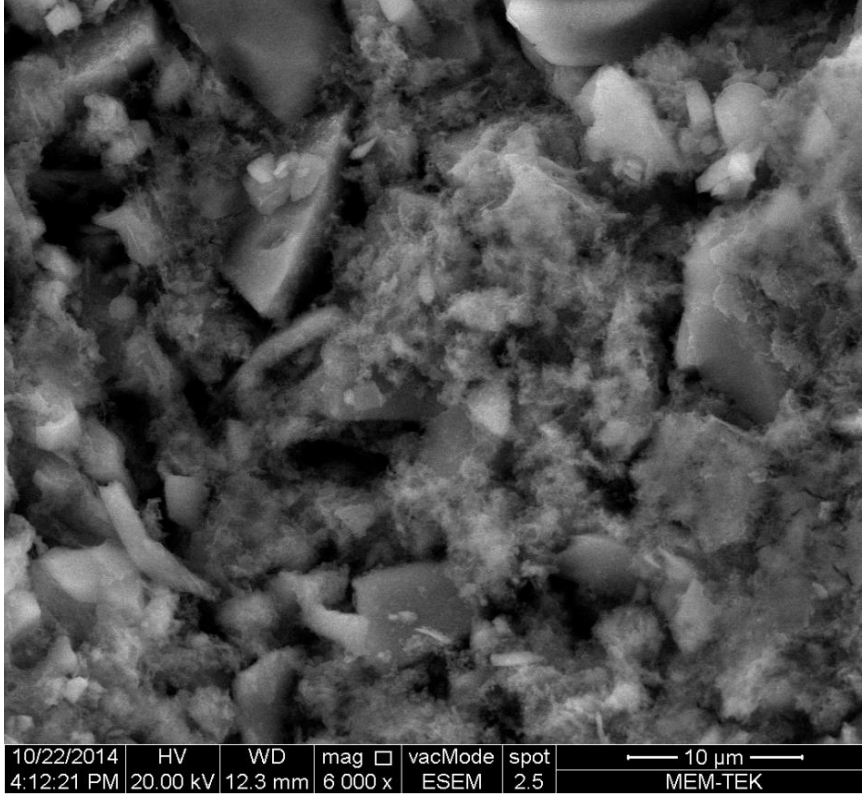
Şekil A.34 : 28 günlük hava kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



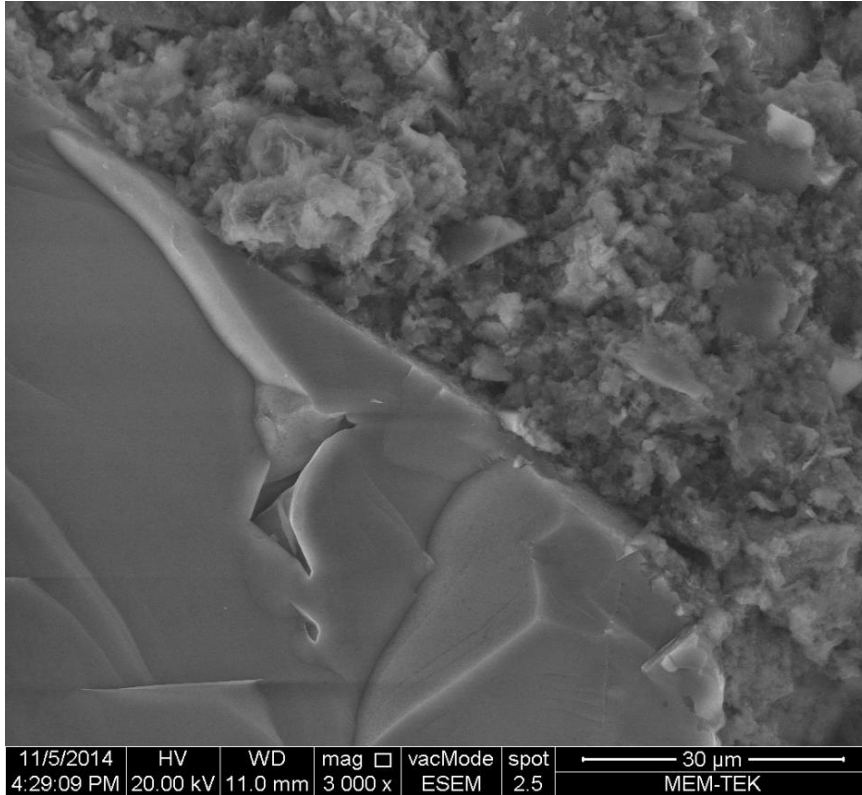
Şekil A.35 : 3 günlük hava kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



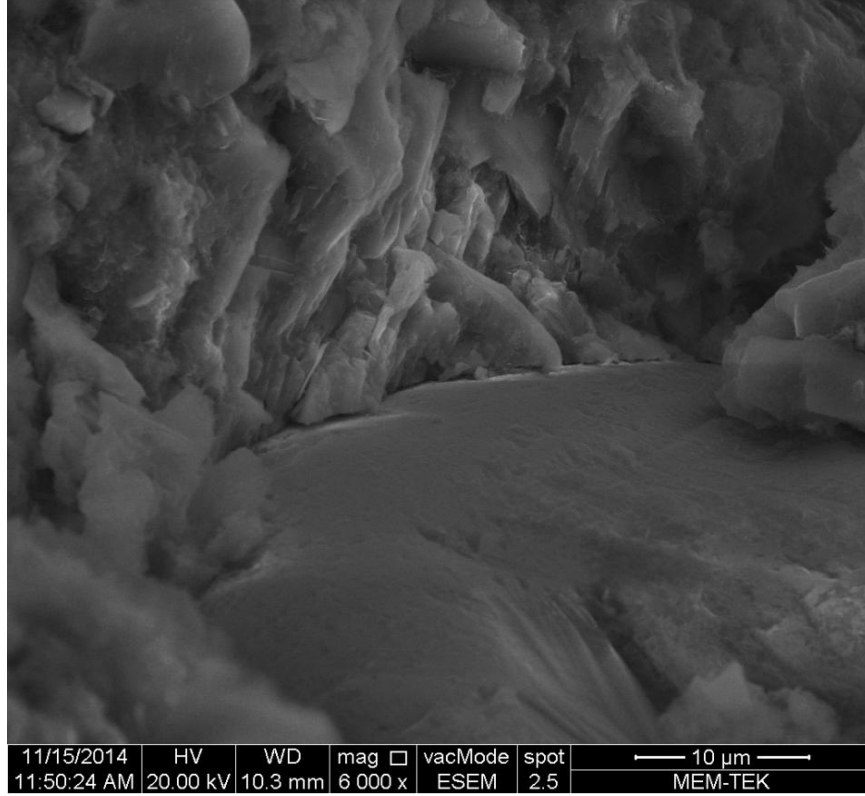
Şekil A.36 : 28 günlük hava kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



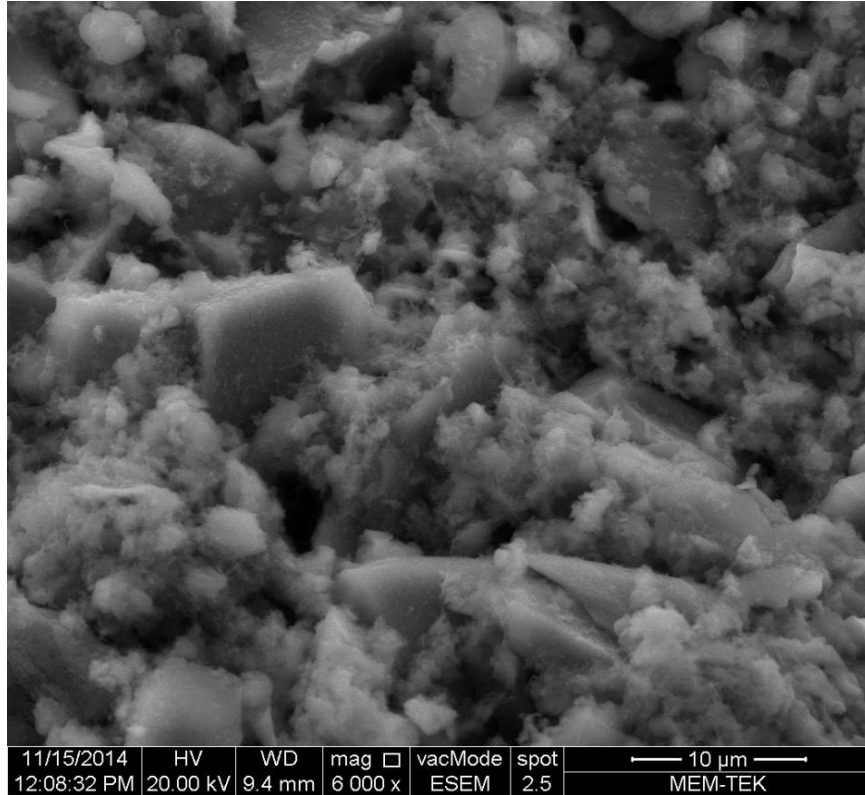
Şekil A.37 : 3 günlük hava kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



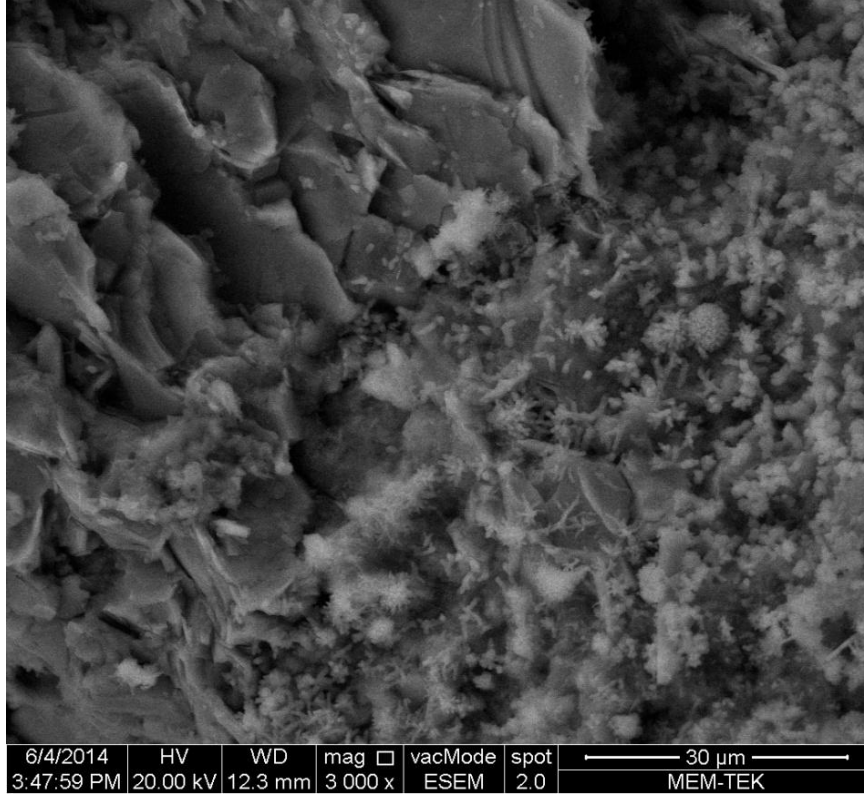
Şekil A.38 : 28 günlük hava kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



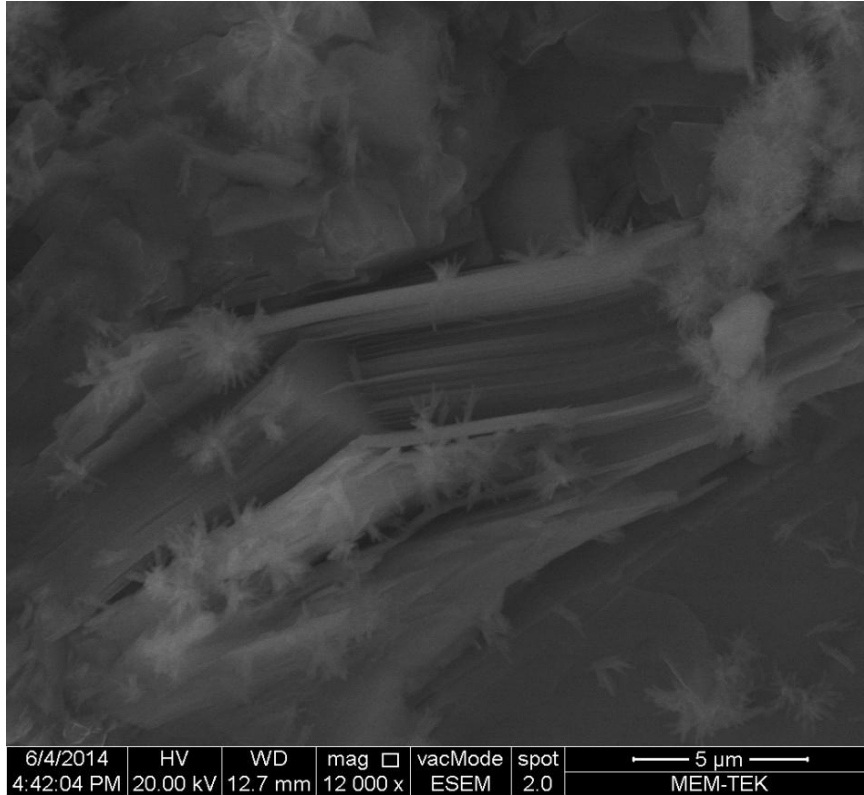
Şekil A.39 : 3 günlük hava kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



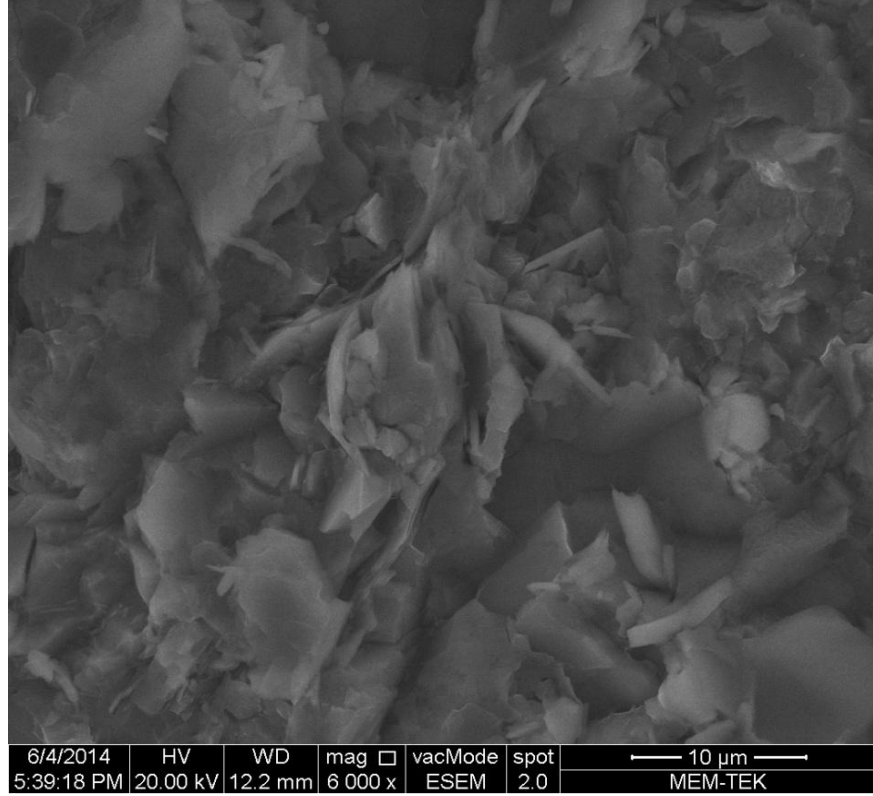
Şekil A.40 : 28 günlük hava kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



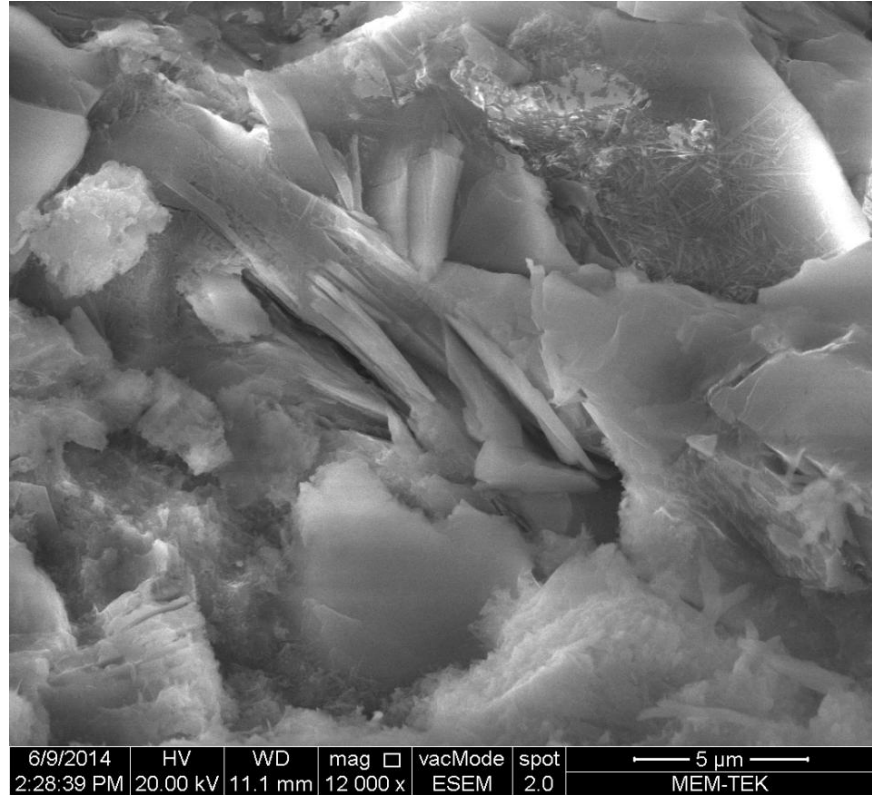
Şekil A.41 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



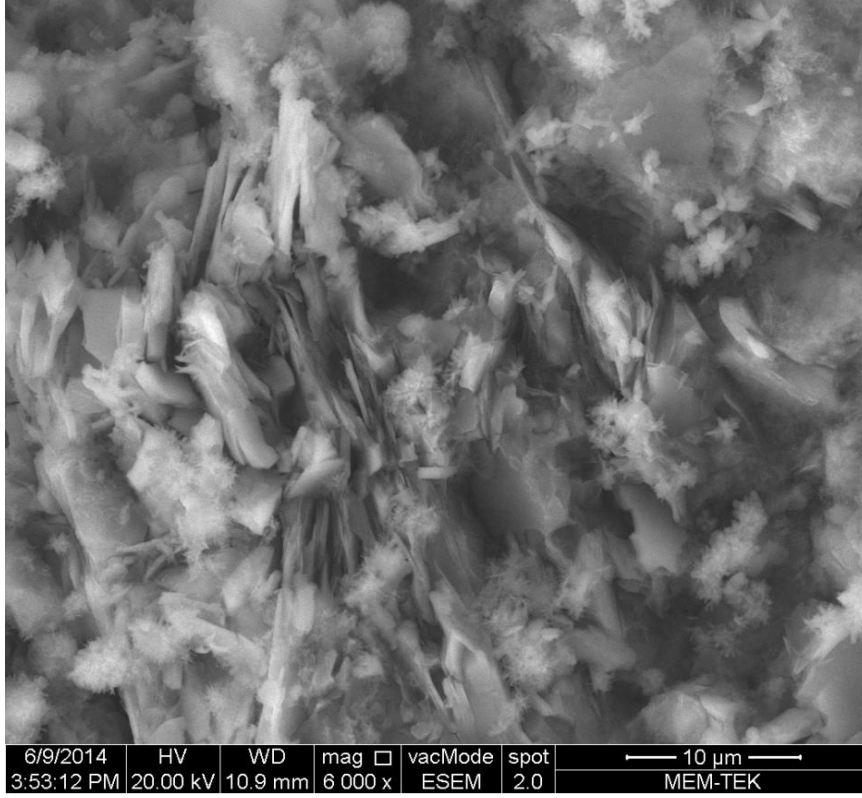
Şekil A.42 : 3 günlük akrilik kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



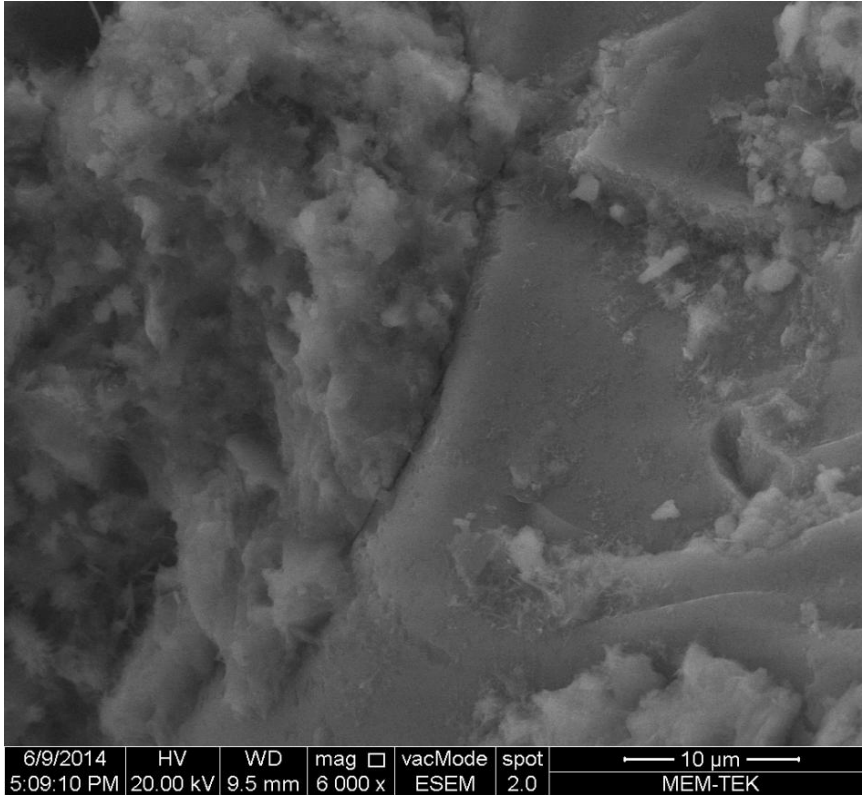
Şekil A.43 : 28 günlük akrilik kürü uygulanan Ref kodlu karışımın ESEM görüntüsü



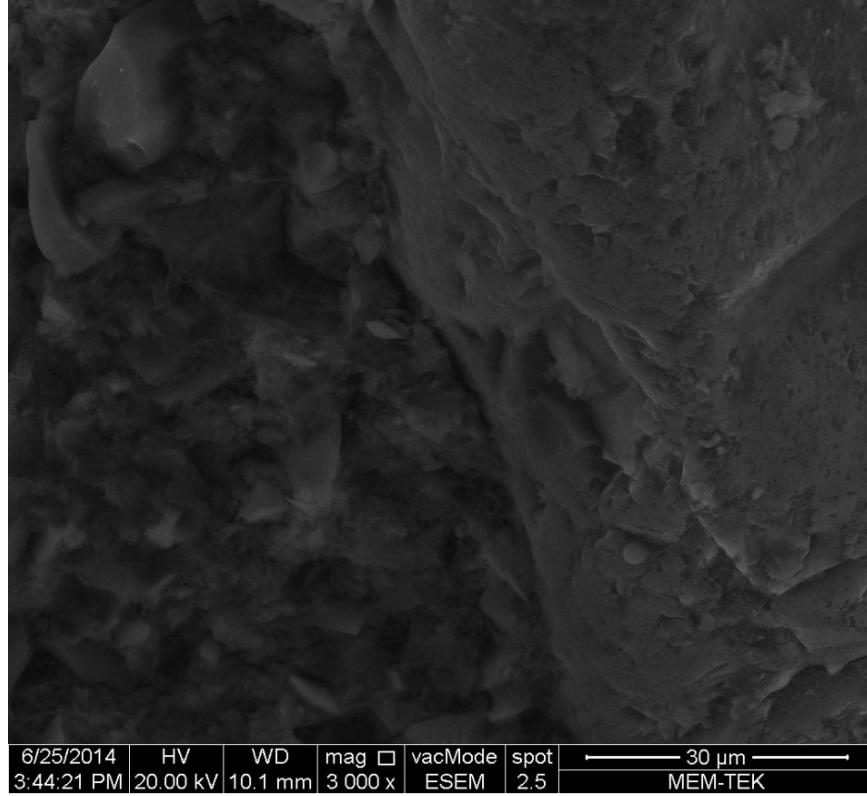
Şekil A.44 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görüntüsü



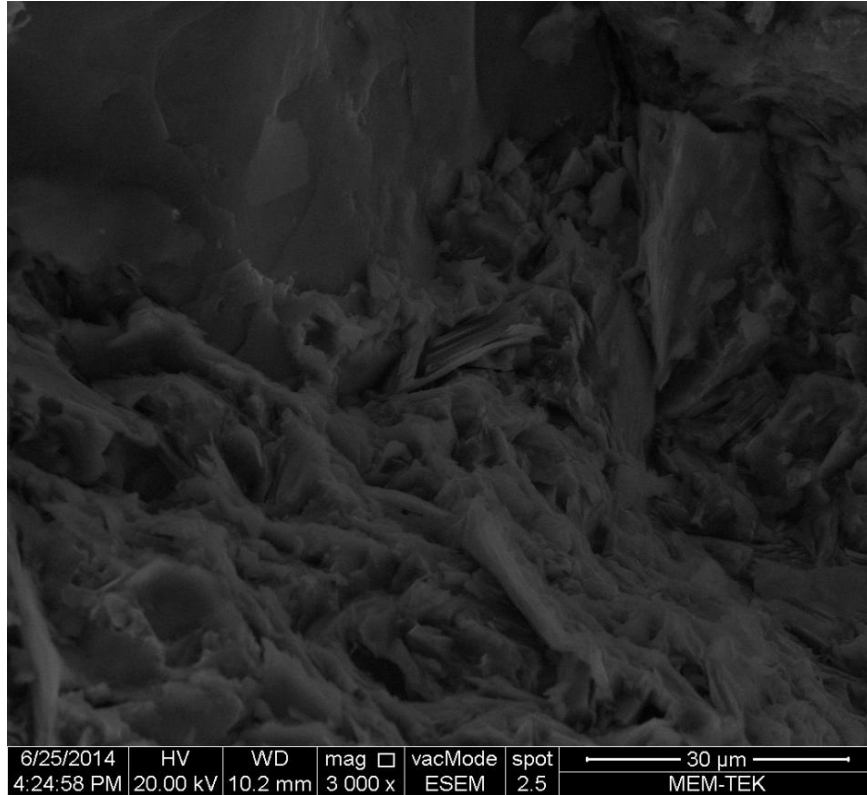
Şekil A.45 : 3 günlük akrilik k   uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM görünt  s  



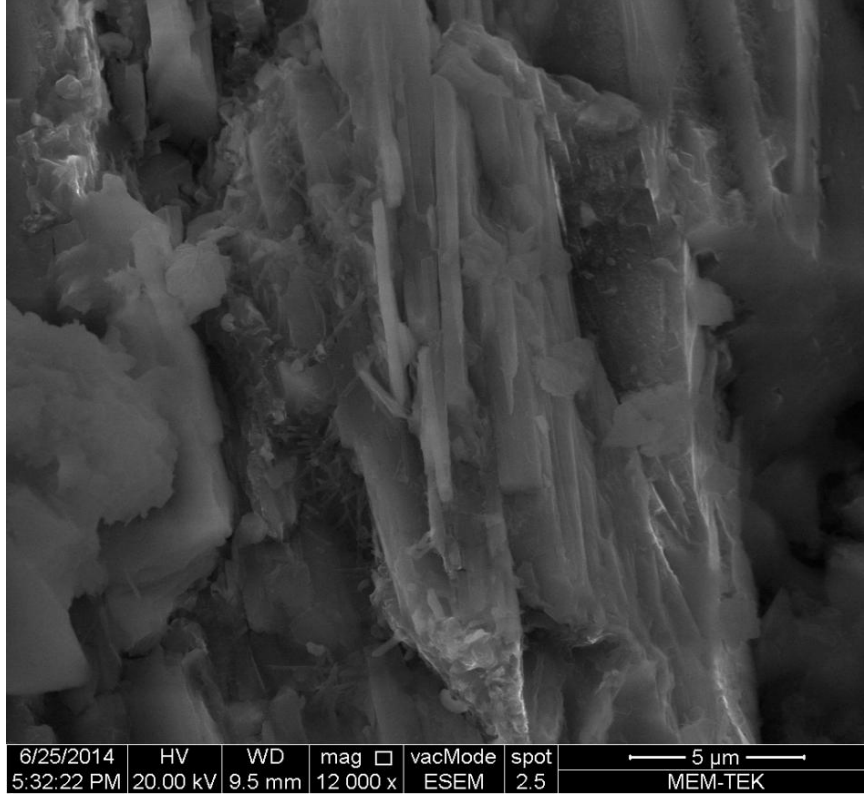
Şekil A.46 : 28 g  nl  k hava k  r   uygulanan RefX kodlu karışımın ESEM g  r  nt  s  



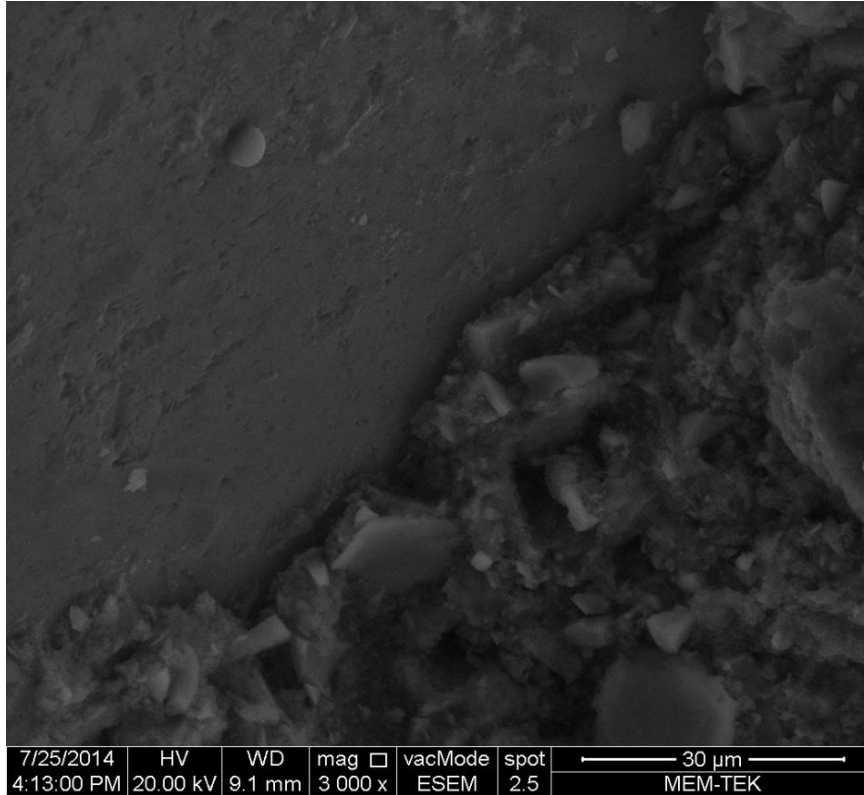
Şekil A.47 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



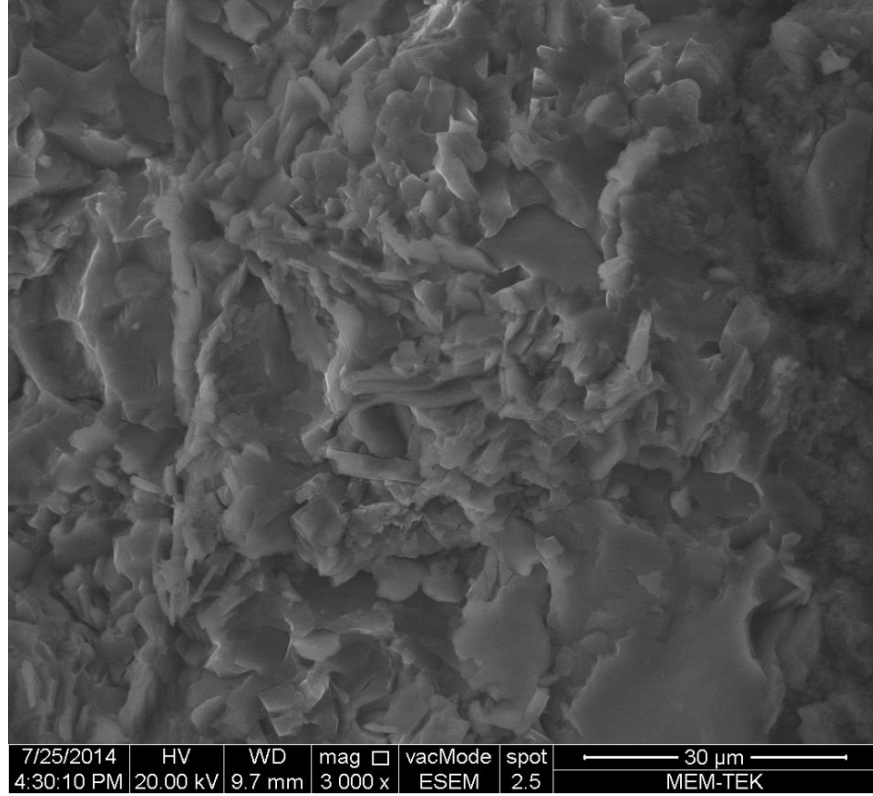
Şekil A.48 : 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



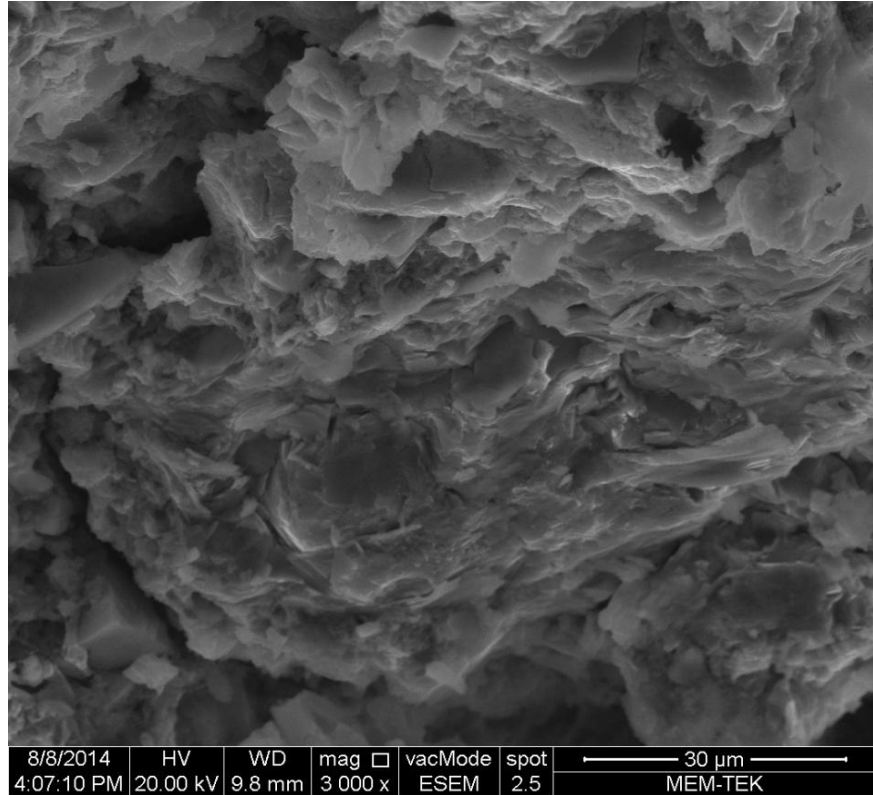
Şekil A.49 : 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



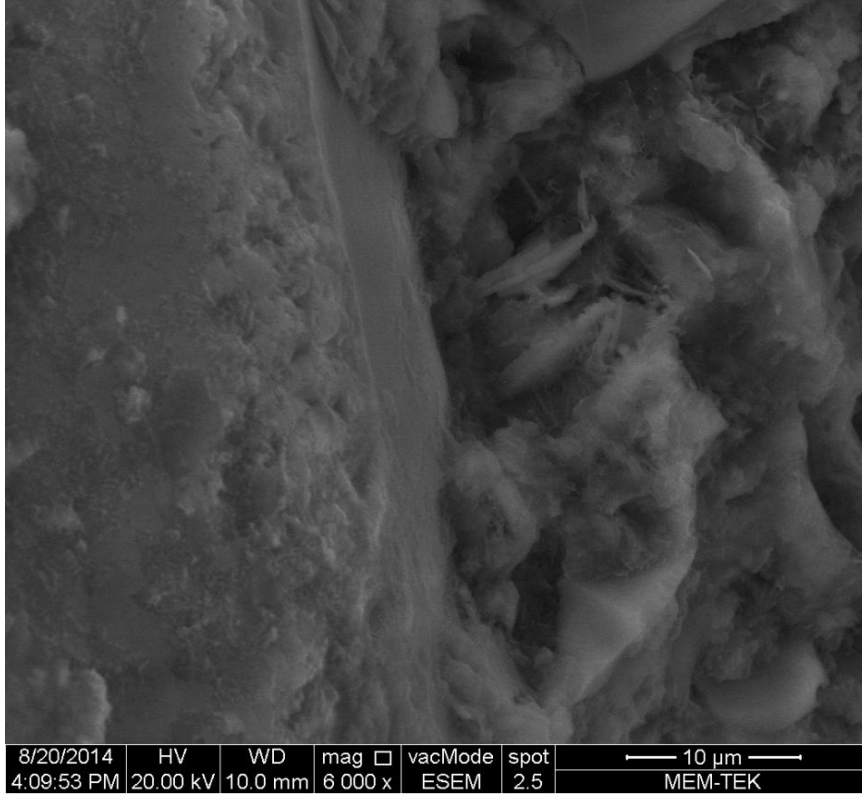
Şekil A.50 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



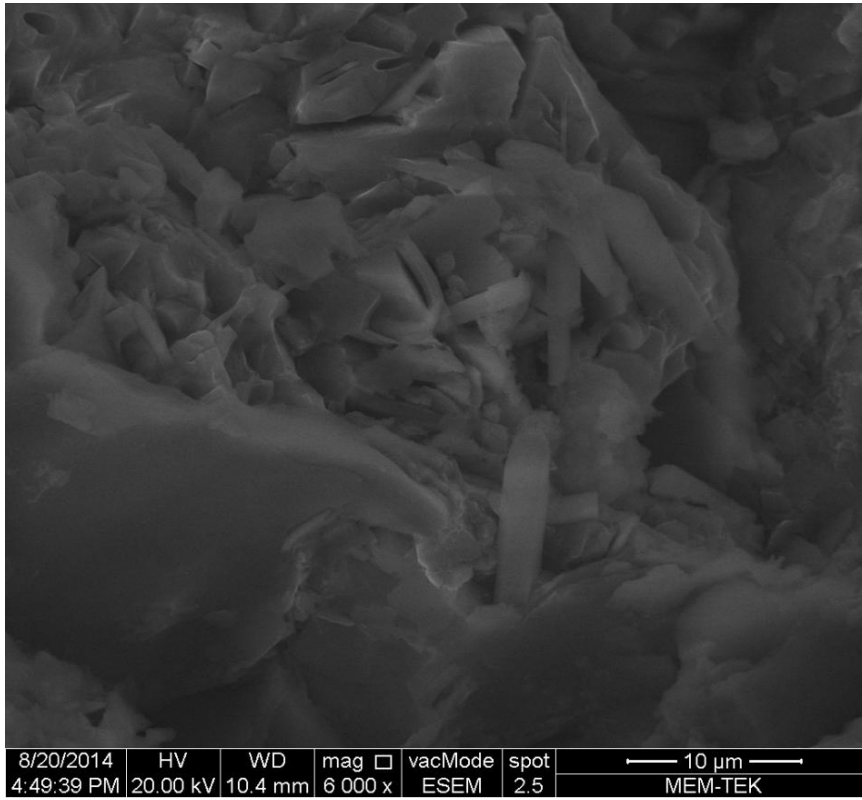
Şekil A.51 : 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



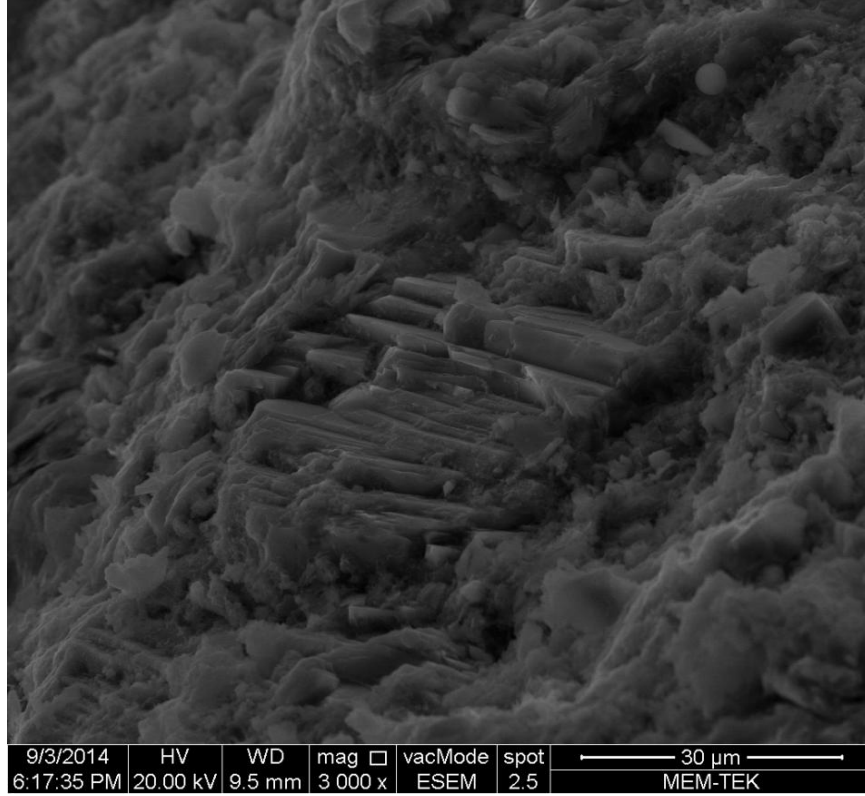
Şekil A.52 : 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



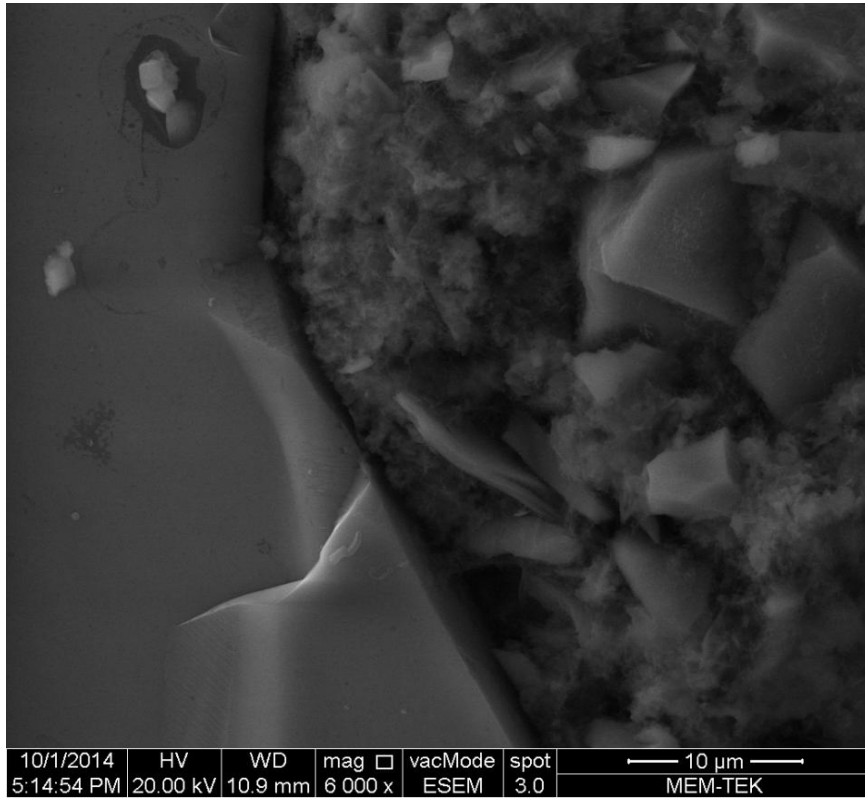
Şekil A.53 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



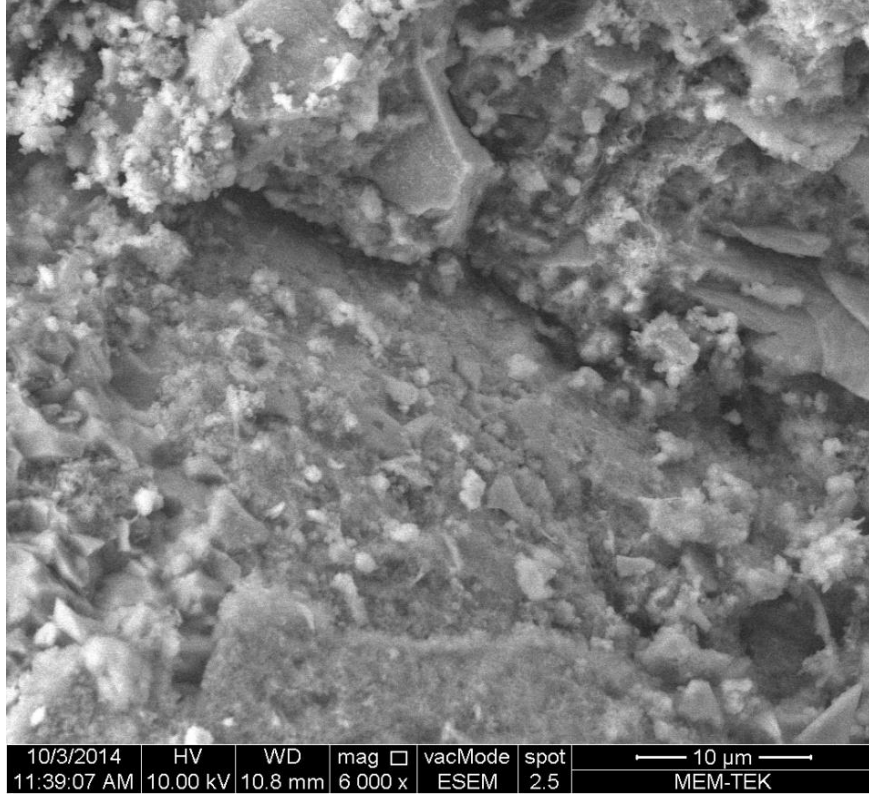
Şekil A.54 : 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



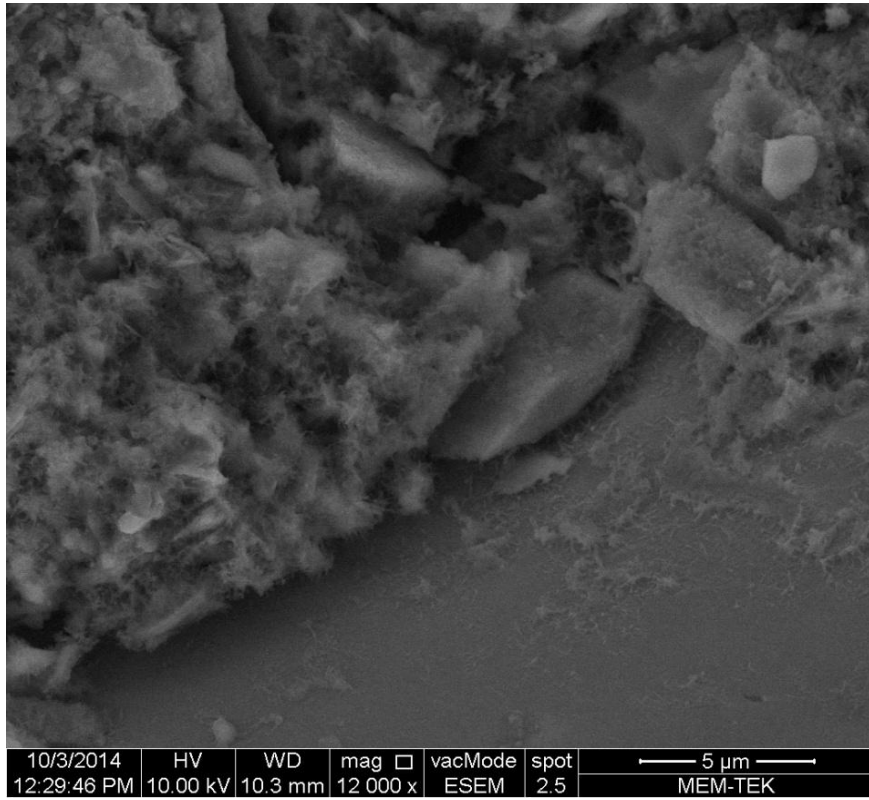
Şekil A.55 : 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



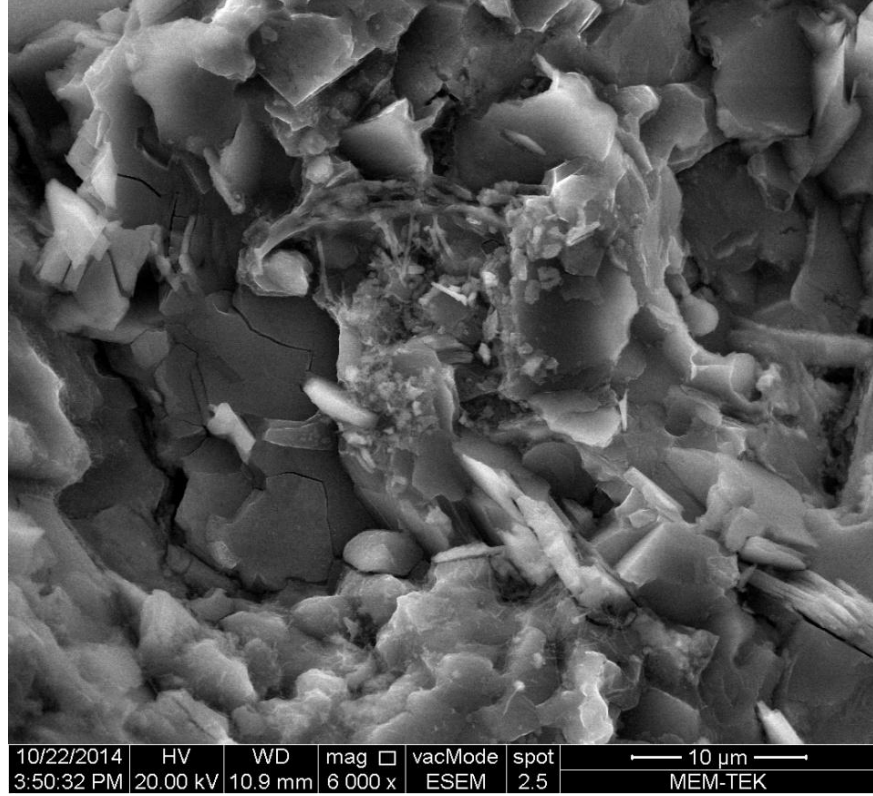
Şekil A.56 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



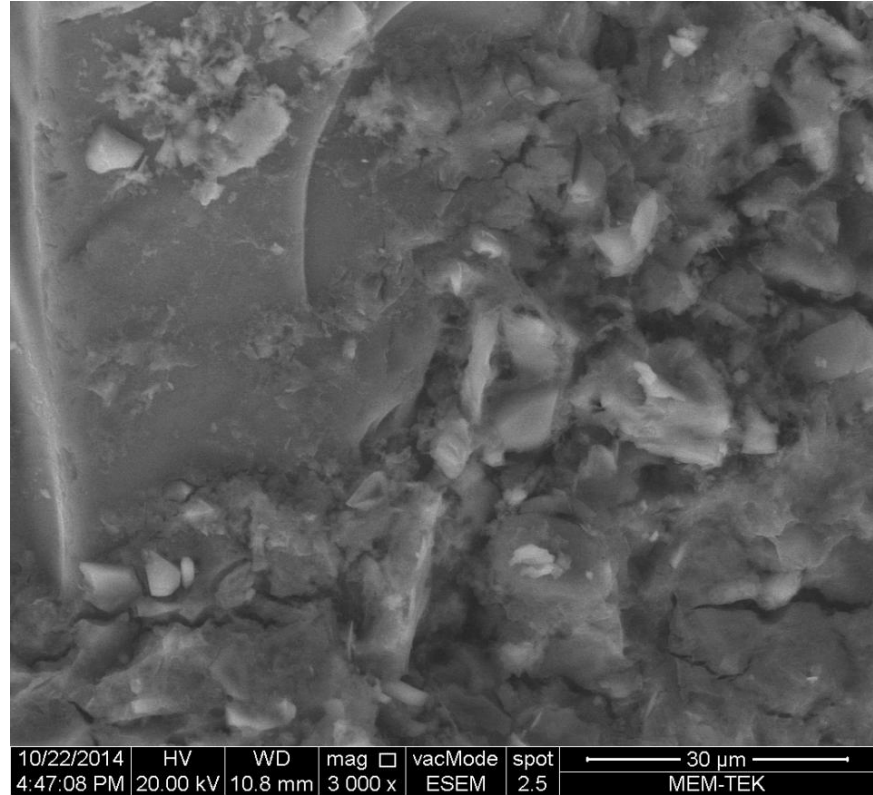
Şekil A.57 : 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



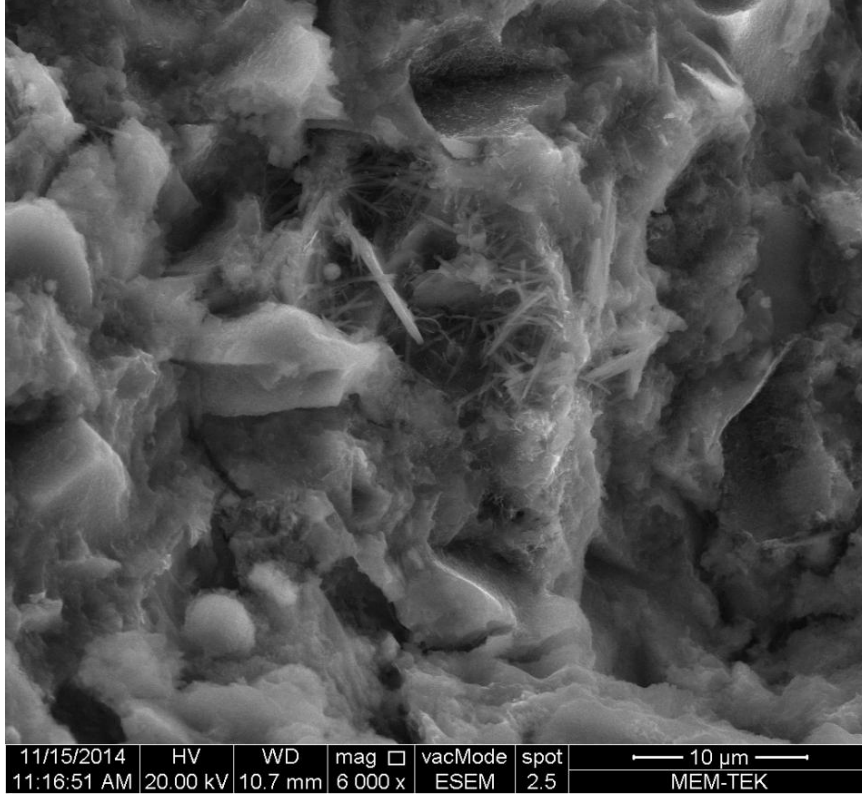
Şekil A.58 : 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,25X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



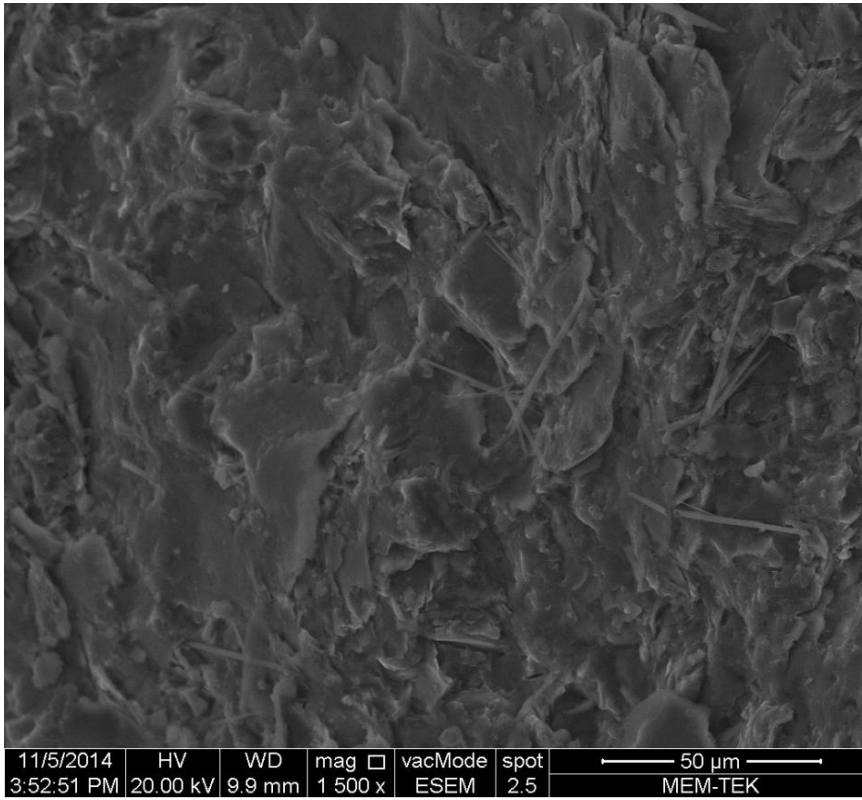
Şekil A.59 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



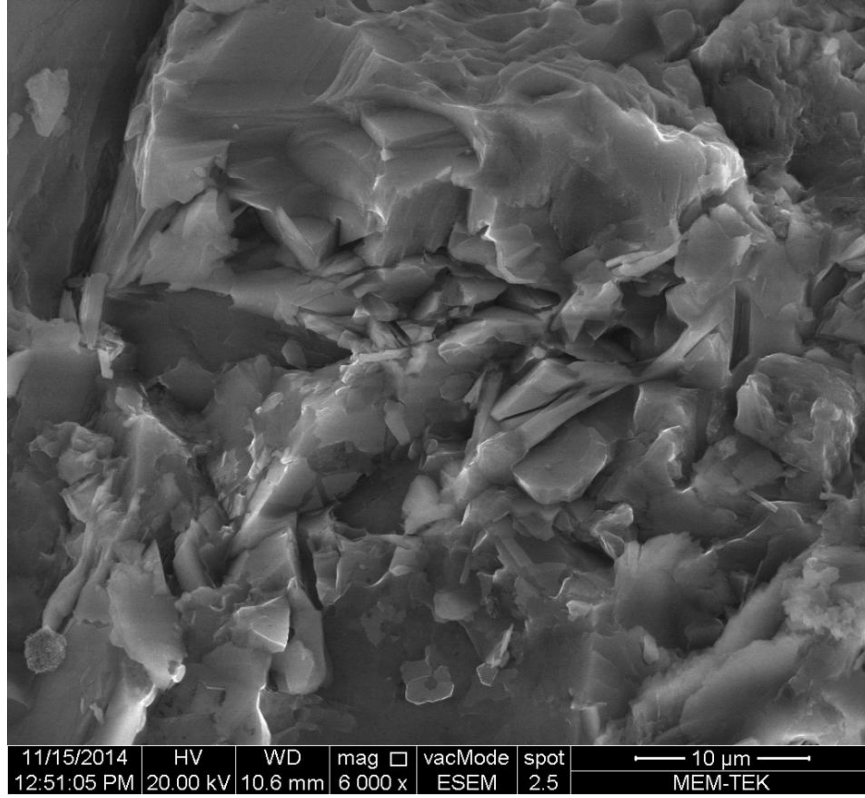
Şekil A.60 : 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



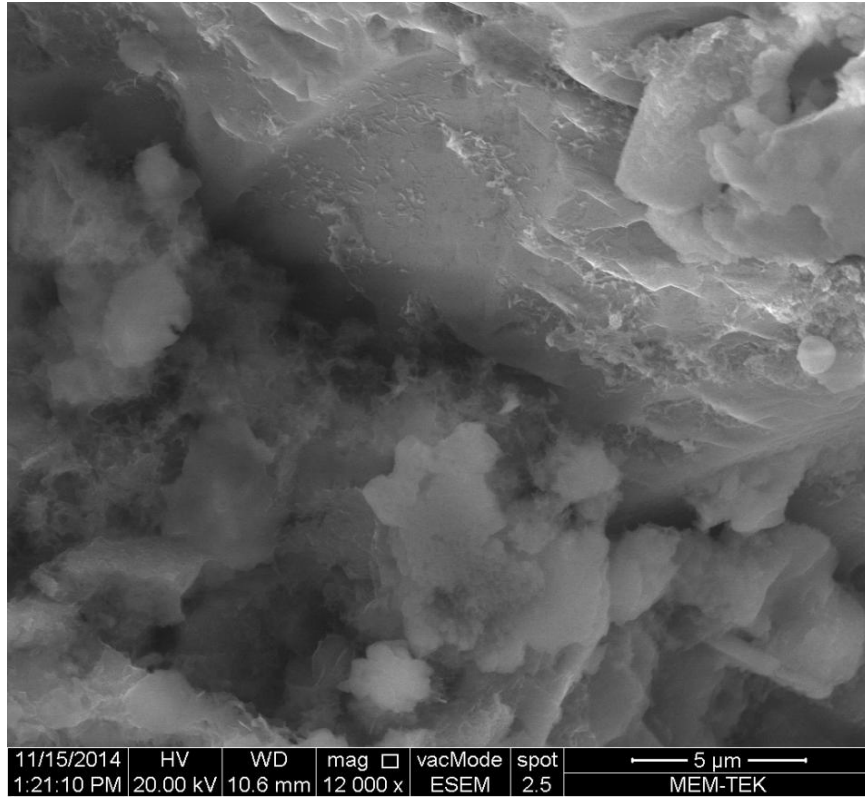
Şekil A.61 : 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5 kodlu karışımın ESEM görüntüsü



Şekil A.62 : 1 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



Şekil A.63 : 3 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü



Şekil A.64 : 28 günlük akrilik kürü uygulanan S1,5X kodlu karışımın ESEM görüntüsü

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Abdurrahman Selim EMEKLİ

Doğum Yeri ve Tarihi : Üsküdar/20.12.1990

E-Posta : selimemekli@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği