

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇ VE ATIK ÇELİK TEL DONATILI
BETONLARIN (SIFCON) FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Saadet Gökçe GÖK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ARALIK 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇ VE ATIK ÇELİK TEL DONATILI
BETONLARIN (SIFCON) FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Saadet Gökçe GÖK
(501132005)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL

ARALIK 2020

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501132005 numaralı Doktora Öğrencisi Saadet Gökçe GÖK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇ VE ATIK ÇELİK TEL DONATILI BETONLARIN (SIFCON) FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Turan ÖZTURAN
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan YILDIRIM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yuşa ŞAHİN
Yozgat Bozok Üniversitesi

Teslim Tarihi : 30 Ekim 2020
Savunma Tarihi : 11 Aralık 2020





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ortaya konmasında emeği geçen herkese, katkıları ve yol göstericiliği ile bana rehberlik eden değerli hocam Sayın Doç. Dr. Özkan ŞENGÜL'e, Sayın Murat MEYDAN ve Sayın Oktay YALÇINKAYA başta olmak üzere İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı teknik personeline; Gazisan Geri Kazanım San. ve Tic. Ltd. Şti. (Gazisan Kauçuk Granül Sanayi-GAKSAN), Yazgan Yenilenebilir Enerji ve Endüstriyel Kimya Sanayi Dış Ticaret Ltd. Şti., Es Geri Dönüşüm, Marmore Mühendislik A.Ş., Ağbaş Kauçuk Plastik İnş. Mlz. İmalat İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti., Prokom Madencilik Oto. İnş. Elekt. Elektr. Taah. İth. İhr. San. ve Tic. Ltd. Şti., Ciner İnşaat, Perhabbe ve Akcihan Cam Geri Dönüşüm başta olmak üzere malzeme konusunda yardımcı olan bütün firmalara ve çalışanlarına, hayatım boyunca hiçbir desteği esirgemeyip bugüne gelmemde çok önemli rol oynayan aileme ve üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı (BİDEB) tarafından 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir. Doktora çalışmalarım süresince sağlamış olduğu destek için TÜBİTAK-BİDEB'e çok teşekkür ederim.

Ekim 2020

Saadet Gökçe Gök
(İnşaat Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ, TANIMLAR VE ARAŞTIRMANIN KONUSU	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Amaç ve Kapsam.....	2
1.3 Alkali ile Aktifleştirmenin Önemi.....	3
1.4 Sürdürülebilir Malzeme Olarak Beton	7
1.5 Özgün Değer	9
2. TEZ KONUSU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	11
2.1 Geopolimerler.....	13
2.1.1 Polimer kimyası ve geopolimerlerin polimer sınıfı	21
2.1.2 Molekül yapısını ve kimyasal mekanizmayı incelemeye kullanılan deneyler.....	22
2.1.3 Geopolimer kimyası ve geopolimer türleri	24
2.2 Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Betonlar	31
2.3 Atık Ürünlerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi	34
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	41
3.1 Alkali ile Aktifleştirilmiş Harçlar.....	41
3.1.1 Malzemeler.....	41
3.1.1.1 Çimento	41
3.1.1.2 Agregası	41
3.1.1.3 Su	42
3.1.1.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	42
3.1.1.5 Sodyum hidroksit	43
3.1.1.6 Sodyum silikat.....	43
3.1.1.7 Cam	43
3.1.2 Harç tasarımı	46
3.1.3 Harç üretimleri	46
3.1.4 Kür koşulları	48
3.1.5 Sertleşmiş harç deneyleri	48
3.1.5.1 Eğilme deneyi.....	48
3.1.5.2 Basınç deneyi	49
3.1.5.3 Sülfat etkisi deneyi.....	49

3.1.5.4 Donma-çözülme deneyi.....	50
3.1.5.5 Kılcal su emme deneyi	50
3.1.5.6 Toplam su emme deneyi	50
3.1.5.7 Hızlı klor geçirimliliği deneyi	50
3.1.5.8 Elektriksel öz direnç deneyi	51
3.2 Alkali ile Aktifleştirilmiş Betonlar	51
3.2.1 Malzemeler.....	52
3.2.1.1 Çimento	52
3.2.1.2 Agregası	52
3.2.1.3 Su.....	55
3.2.1.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	55
3.2.1.5 Sodyum hidroksit	55
3.2.1.6 Sodyum silikat.....	56
3.2.1.7 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı	56
3.2.2 Beton tasarımı	56
3.2.3 Beton üretimleri	58
3.2.4 Kür koşulları.....	58
3.2.5 Sertleşmiş beton deneyleri	58
3.2.5.1 Kılcal su emme deneyi	58
3.2.5.2 Toplam su emme deneyi	59
3.2.5.3 Hızlı klor geçirimliliği deneyi	59
3.2.5.4 Elektriksel öz direnç deneyi	59
3.3 Alkali ile Aktifleştirilmiş Çelik Lif Donatılı Betonlar (SIFCON)	59
3.3.1 Malzemeler.....	59
3.3.1.1 Çimento	59
3.3.1.2 Agregası	59
3.3.1.3 Su.....	60
3.3.1.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	60
3.3.1.5 Sodyum hidroksit	60
3.3.1.6 Sodyum silikat.....	60
3.3.1.7 Cam	60
3.3.1.8 Kullanılmış araç lastiklerinden elde edilen hurda çelik teller	61
3.3.2 SIFCON tasarımı.....	74
3.3.2.1 Deneme üretimleri.....	74
3.3.3 SIFCON üretimleri.....	76
3.3.3.1 Lif dağılımı.....	78
3.3.4 Kür koşulları.....	83
3.3.5 Sertleşmiş beton deneyleri	84
3.3.5.1 Eğilme deneyi.....	84
3.3.5.2 Yarma deneyi	86
3.3.5.3 Basınç deneyi	87
4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ	89
4.1 Harçlar Üzerinde Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	89
4.1.1 Eğilmede çekme dayanımı	89
4.1.2 Basınç dayanımı	93
4.1.3 Sülfat direnci	96
4.1.4 Donma-çözülme direnci	102
4.1.5 Kılcallık katsayısı.....	105
4.1.6 Su emme yüzdesi.....	107
4.1.7 Hızlı klor geçirimliliği.....	110

4.1.8 Elektriksel özdirenç.....	112
4.1.9 Sodyum hidroksit derişimi ve kür koşullarının etkisi	114
4.2 Betonlar Üzerinde Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar	120
4.2.1 Kılcallık katsayısı.....	120
4.2.2 Su emme yüzdesi	121
4.2.3 Hızlı klor geçirimliliği	124
4.2.4 Elektriksel özdirenç.....	125
4.3 Çelik Lif Donatılı Betonlar Üzerinde Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar.....	128
4.3.1 Ön deneyler: Hurda çelik tel içeren SIFCONların yük-sehim grafikleri	128
4.3.2 Eğilmede çekme dayanımı	132
4.3.3 Yarmada çekme dayanımı.....	142
4.3.4 Tokluk	149
4.3.5 Kırılma enerjisi	155
4.3.6 Basınç dayanımı	160
4.3.7 Elde edilen sonuçların literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması	166
5. SONUÇLAR	169
5.1 Alkali ile Aktive Edilmiş Harçlar.....	169
5.2 Alkali ile Aktive Edilmiş Betonlar	170
5.3 Alkali ile Aktive Edilmiş Atık Çelik Lif Donatılı Betonlar	170
KAYNAKLAR	175
EKLER	197
ÖZGEÇMİŞ.....	223



KISALTMALAR

ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
C-A-S-H	: Kalsiyum alüminosilikat hidrat
C-H	: Kalsiyum hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum silikat hidrat
DUCON	: Ductile Concrete (Sünek Beton)
FRP	: Fiber Reinforced Polymer (Lif Takviyeli Polimer)
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam Elyaf Takviyeli Polimer)
HPFRC	: High Performance Fiber Reinforced Concrete (Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Beton)
HSC	: High Strength Concrete (Yüksek Dayanımlı Beton)
HSCFFT	: High Strength Concrete Filled Fiber Reinforced Polymer Tubes (Yüksek Dayanımlı Betonla Doldurulmuş Lifli Polimer Tüpler)
MAS	: Magic-Angle Spinning
N-A-S-H	: Sodyum alüminosilikat hidrat
NMR	: Nükleer Manyetik Rezonans Spektrometresi
PVC	: Polivinil klorür
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SFRHSC	: Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete (Çelik Lif Takviyeli Yüksek Dayanımlı Beton)
SFRHSCFFT	: SFRHSC Filled FRP Tubes (Çelik Lif Takviyeli Yüksek Dayanımlı Beton Dolgulu Lifli Polimer Tüpler)
SIFCON	: Slurry Infiltrated Fiber Reinforced Concrete (Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Beton)
SIFCONFFT	: SIFCON Filled FRP Tubes (Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Beton Dolgulu Lifli Tüpler)
TEM	: Transmission Electron Microscopy (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
UHPC	: Ultra High Performance Concrete (Ultra Yüksek Performanslı Beton)
XRD	: X-Ray Diffraction Spectroscopy (X-ışını Difraksiyon Spektrometresi)
XRF	: X-Ray Fluorescence Spectroscopy (X-ışını Floresans Spektrometresi)



SEMBOLLER

a	: Çentik derinliği
A	: Al_2O_3
b	: Numune genişliği
B	: Kiriş eni
C	: CaO
d	: Numune kalınlığı
F	: Kuvvet
f_{ct}	: Yarmada çekme dayanımı
g	: Yerçekimi ivmesi
G_F	: Kırılma enerjisi
h, H	: Kiriş yüksekliği
H	: H_2O
K	: Kılcallık katsayısı
L	: Mesnet açıklığı veya uzunluk
L'	: Numune boyu
m	: Kütle
P	: Yük
S	: SiO_2
Sw	: Su emme yüzdesi
v_f	: Fiber hacim oranı
w	: Ağırlık
W_0	: Tokluk
δ_0	: Açıklık ortasında son sehim
Δ	: Değişim, fark
ε	: Birim şekil değiştirme
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilme
Φ	: Çap



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1	: Öğütülmüş yüksek fırın cürufu için fiziksel analiz sonuçları.....	42
Çizelge 3.2	: Öğütülmüş yüksek fırın cürufu için kimyasal analiz sonuçları.....	42
Çizelge 3.3	: Sodyum silikatın özellikleri.....	43
Çizelge 3.4	: Camın XRF ile kimyasal analizi.	44
Çizelge 3.5	: Öğütülmüş atık camın özellikleri.	45
Çizelge 3.6	: Alkali ile aktifleştirilmiş harç tasarımı.	46
Çizelge 3.7	: Harç karışımları.	48
Çizelge 3.8	: Kırmataş için elek analizi sonuçları.	53
Çizelge 3.9	: Ferrokrom cürufu için elek analizi sonuçları.	54
Çizelge 3.10	: Ferrokrom cürufunun kimyasal analizi.	54
Çizelge 3.11	: Doğal kum için elek analizi sonuçları.	54
Çizelge 3.12	: Yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi.	55
Çizelge 3.13	: Akışkanlaştırıcı kimyasal katkının teknik özellikleri.	56
Çizelge 3.14	: Birinci seri için karışım oranları.....	57
Çizelge 3.15	: İkinci seri için karışım oranları.	57
Çizelge 3.16	: Üçüncü seri için karışım oranları.	58
Çizelge 3.17	: Cam tozunun özellikleri.	61
Çizelge 3.18	: Çelik teller için çekme deneyi sonuçları.	69
Çizelge 3.19	: Çelik teller için kimyasal analiz.	70
Çizelge 3.20	: Numunelerin 12 günlük basınç dayanımları.	73
Çizelge 3.21	: Deneme üretimleri.....	75
Çizelge 3.22	: Birim ağırlık, su emme ve dayanım değerleri.	76
Çizelge 3.23	: SIFCON için karışım oranları.	78
Çizelge 3.24	: SIFCON karışımları.	81
Çizelge 4.1	: Farklı yaşlarda harçların eğilmede çekme dayanımları (MPa).	90
Çizelge 4.2	: Farklı yaşlarda harçların basınç dayanımları (MPa).	93
Çizelge 4.3	: 50 g/L sodyum sülfat ile ağırlık ve dayanımlardaki değişim.	99
Çizelge 4.4	: 150 g/L sodyum sülfat ile ağırlık ve dayanımlardaki değişim.	99
Çizelge 4.5	: Donma-çözülme etkisiyle ağırlık ve dayanımlardaki değişim.	103
Çizelge 4.6	: Harç numunelerin kılcallık katsayıları.	105
Çizelge 4.7	: Harç numunelerin su emme yüzdeleri.....	108
Çizelge 4.8	: Harç numuneler için hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları.....	110
Çizelge 4.9	: Harç numunelerin elektriksel özdirençleri.	112
Çizelge 4.10	: Farklı kür koşullarında harçların eğilmede çekme dayanımı.	114
Çizelge 4.11	: Farklı kür koşullarında harçların basınç dayanımı.	116
Çizelge 4.12	: Beton numunelerin kılcallık katsayıları.	120
Çizelge 4.13	: Beton numunelerin su emme yüzdeleri.	122
Çizelge 4.14	: Beton numunelerde hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları.	124

Çizelge 4.15 :	Beton numunelerin elektriksel özdirenç değerleri.....	125
Çizelge 4.16 :	28 günlük eğilme ve basınç dayanımları.	130
Çizelge 4.17 :	Deneme üretimlerinde elde edilen sonuçlar.	131
Çizelge 4.18 :	SIFCON numunelerin eğilmede çekme dayanımı.....	133
Çizelge 4.19 :	SIFCON numunelerin yarmada çekme dayanımı.....	143
Çizelge 4.20 :	SIFCON numunelerin tokluğu.	150
Çizelge 4.21 :	SIFCON numunelerin kırılma enerjisi.	156
Çizelge 4.22 :	SIFCON numunelerin basınç dayanımı.....	161
Çizelge 4.23 :	Literatürdeki SIFCON numunelerden elde edilmiş veriler.	166
Çizelge 4.24 :	SIFCON numunelerden elde edilen sonuçlar.	167
Çizelge A.1 :	Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (A firması).	199
Çizelge A.2 :	Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (B firması).	202
Çizelge A.3 :	Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (C firması).	205
Çizelge A.4 :	Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (D firması).	208



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	: Alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler.....	4
Şekil 2.1	: Otomobil lastiği kesiti.	38
Şekil 2.2	: (a) Lastik parçası (b) Çelik tel.....	39
Şekil 3.1	: Hızlı klor geçirimsizliği deneyi için kesilen harç numune.	47
Şekil 3.2	: Cam tozu elek analizi.	61
Şekil 3.3	: A firmasından alınan çelik tel örneği.	62
Şekil 3.4	: Lif uzunluğu (L_1) dağılımı (A firması).....	62
Şekil 3.5	: Lif uzunluğu (L_2) dağılımı (A firması).....	63
Şekil 3.6	: Lif çapı (D) dağılımı (A firması).....	63
Şekil 3.7	: B firmasından alınan çelik tel örneği.	63
Şekil 3.8	: Lif uzunluğu (L_1) dağılımı (B firması).....	64
Şekil 3.9	: Lif uzunluğu (L_2) dağılımı (B firması).....	64
Şekil 3.10	: Lif çapı (D) dağılımı (B firması).....	64
Şekil 3.11	: C firmasından alınan çelik tel örneği.	65
Şekil 3.12	: Lif uzunluğu (L_1) dağılımı (C firması).....	65
Şekil 3.13	: Lif uzunluğu (L_2) dağılımı (C firması).....	65
Şekil 3.14	: Lif çapı (D) dağılımı (C firması).....	66
Şekil 3.15	: D firmasından alınan çelik tel örneği.	66
Şekil 3.16	: D firmasından temin edilen numune.	66
Şekil 3.17	: Lif uzunluğu (L_1) dağılımı (D firması).....	67
Şekil 3.18	: Lif uzunluğu (L_2) dağılımı (D firması).....	67
Şekil 3.19	: Lif çapı (D) dağılımı (D firması).....	67
Şekil 3.20	: Atık kamyon/tır lastiklerinden elde edilen çelik teller.	69
Şekil 3.21	: Deneme üretiminde kullanılan çelik teller.	72
Şekil 3.22	: Yük-sehim eğrisi.	72
Şekil 3.23	: Farklı çelik tel numuneleri.	73
Şekil 3.24	: Hurda çelik tel numunesi.....	74
Şekil 3.25	: Dökümden önce çelik liflerin yerleştirilmesi.	78
Şekil 3.26	: Sürekli liflerin dağılımı.	79
Şekil 3.27	: Süreksiz liflerin dağılımı.	79
Şekil 3.28	: Taze haldeki numunelerin görünümü.....	82
Şekil 3.29	: 14M kodlu numunelerin kalıptan çıktıktan sonraki görünümü.	82
Şekil 3.30	: 14 M NaOH ve öğütülmüş atık cam ile hazırlanan aktivatör.....	82
Şekil 3.31	: Üç noktalı eğilme deneyi.....	85
Şekil 3.32	: Tipik bir yük-deplasman eğrisi ve kırılma tokluğu.	85
Şekil 3.33	: Tokluk.	85
Şekil 4.1	: Farklı yaşlarda harçların eğilmede çekme dayanımları.....	91
Şekil 4.2	: Farklı yaşlarda harçların basınç dayanımları.....	94
Şekil 4.3	: 50 g/L sodyum sülfatla çekme ve basınç dayanımı değişimleri.....	100

Şekil 4.4	: 150 g/L sodyum sülfatla ağırlık ve dayanım değişimleri.	101
Şekil 4.5	: Harç numunelerin kılcallık katsayıları.	106
Şekil 4.6	: Harçlarda kılcallık katsayısı-donma çözülme direnci ilişkisi.	107
Şekil 4.7	: Harç numunelerin su emme yüzdeleri.	108
Şekil 4.8	: Harçlarda kılcallık katsayısı-toplam su emme ilişkisi.	109
Şekil 4.9	: Harçlarda kılcallık katsayısı-donma çözülme direnci ilişkisi.	110
Şekil 4.10	: Harçlarda hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçları.	111
Şekil 4.11	: Harçların elektriksel özdirençleri.	112
Şekil 4.12	: Harçta elektriksel özdirenç ile klor geçirimsizliği ilişkisi.	113
Şekil 4.13	: Harçların eğilmede çekme dayanımları.	115
Şekil 4.14	: Harçların basınç dayanımları.	117
Şekil 4.15	: Kür koşullarının harçların eğilmede çekme dayanımına etkisi.	119
Şekil 4.16	: Kür koşullarının harçların basınç dayanımına etkisi.	120
Şekil 4.17	: Beton numunelerin kılcallık katsayıları.	121
Şekil 4.18	: Beton numunelerin su emme yüzdeleri.	122
Şekil 4.19	: Kılcallık katsayıları ve su emme yüzdelerinin değişimi.	123
Şekil 4.20	: Betonlarda kılcallık katsayısı-toplam su emme ilişkisi.	123
Şekil 4.21	: Beton numunelerde hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçları.	124
Şekil 4.22	: Beton numunelerin elektriksel özdirenç değerleri.	126
Şekil 4.23	: Betonda elektriksel özdirenç ile klor geçirimsizliği ilişkisi.	127
Şekil 4.24	: Yanak teli.	128
Şekil 4.25	: Çimento bulamacı.	128
Şekil 4.26	: SIFCON üretimi.	129
Şekil 4.27	: Taze haldeki SIFCON numuneleri.	129
Şekil 4.28	: RK%2 numunesinin eğilme deneyi sonunda durumu.	130
Şekil 4.29	: RD%2 numunesinin eğilme deneyi sonunda durumu.	130
Şekil 4.30	: RK%5 numunesinin yük-sehim grafiği.	131
Şekil 4.31	: Eğilmede çekme dayanımı.	134
Şekil 4.32	: Eğilmede çekme dayanımının lif miktarına bağlı değişimi.	138
Şekil 4.33	: SIFCON içerisindeki süreksiz lifler.	140
Şekil 4.34	: PÇ-%1D numunesinin kırılma şekli.	141
Şekil 4.35	: PÇ-%3D numunesinin kırılma şekli.	141
Şekil 4.36	: PÇ-%5D numunesinin kırılma şekli.	141
Şekil 4.37	: Yarmada çekme dayanımı.	144
Şekil 4.38	: Yarmada çekme dayanımının lif miktarına bağlı değişimi.	145
Şekil 4.39	: Çekme dayanımı.	148
Şekil 4.40	: Tokluk.	151
Şekil 4.41	: Betonda toklaşma mekanizmaları.	153
Şekil 4.42	: Çelik lifler ile tokluk artışının sağlanması.	153
Şekil 4.43	: Tokluk değerlerinin lif miktarına bağlı değişimi.	154
Şekil 4.44	: Kırılma enerjisi.	157
Şekil 4.45	: Kırılma enerjisinin lif miktarına bağlı değişimi.	159
Şekil 4.46	: Basınç dayanımı.	162
Şekil 4.47	: Basınç dayanımının lif miktarına bağlı değişimi.	165
Şekil A.1	: PÇ-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.	211
Şekil A.2	: PÇ-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.	212
Şekil A.3	: 8M-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.	213
Şekil A.4	: 8M-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.	214
Şekil A.5	: 14M-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.	215
Şekil A.6	: 14M-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.	216

Şekil A.7 : 8MWG-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.....	217
Şekil A.8 : 8MWG-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.....	218
Şekil A.9 : 14MWG-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.....	219
Şekil A.10: 14MWG-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.....	220
Şekil A.11: $v_f=3\%$ için yük-sehim grafikleri.....	221





ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇ VE ATIK ÇELİK TEL DONATILI BETONLARIN (SIFCON) FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Geleneksel beton üretimi, günden güne büyümekte olan büyük ölçekli bir endüstridir. Çimento üretimi sırasında açığa çıkan yüksek miktarlardaki karbondioksit emisyonu ve üretim için ihtiyaç duyulan büyük enerji ihtiyacı, bu süreci maliyetli, kirlетici ve çevreye zararlı hale getirmektedir. Bu durum, uygun işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahip olmanın yanı sıra ekonomik de olan alternatif yapı malzemeleri arayışına ihtiyaç doğurmaktadır. Sürdürülebilir bir beton üretimi için, sürdürülebilirliğin temel ayakları olan çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan iyileştirme gerekmektedir. Farklı sanayilerden elde edilen yan ürünlerin veya atık ürünlerin betonda yeniden değerlendirilmesi, söz konusu sürece dikkate değer bir katkı sağlayacaktır. Alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler, sürdürülebilir olmaları ve çimento içermeyişleriyle öne çıkan birtakım olumlu özelliklere sahip doğa dostu malzemelerdir.

Bu araştırmada, atık ya da yan ürünlerin kullanımıyla bir malzeme üretmek amaçlanmış olup öğütölmüş yüksek fırın cürufu; sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve sıvı sodyum silikat kullanılarak aktive edilmiştir. Sodyum silikat yerine, silikat kaynağı olarak öğütölmüş atık camın kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, sodyum silikat, öğütölmüş atık cam ile ikame edilerek değişen molaritelerde (8-14 M) NaOH içeren harç numuneler üretilmiştir. Alkali ile aktifleştirilmiş harçların mekanik ve dürabilite özellikleri, su kürü, hava kürü ve ısıt işlem (24 saat 60°C) olmak üzere üç farklı kür koşulunda incelenmiştir. Referans karışımlarda, CEM I 42,5 R Portland çimentosu, su ve standart kum kullanılmıştır. Üretilen numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve eğilmede çekme dayanımları ölçölmüştür. Bununla birlikte harçlar üzerinde, sülfat direnci, donma-çözölme, kılcal su emme, toplam su emme miktarının belirlenmesi, hızlı klor geçirimliliği ve elektriksel özdirenç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonunda, atık camın alkali ile aktifleştirilmiş harçlarda alternatif silikat kaynağı olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın diğер aşamasında alkali ile aktive edilmiş beton üretimi gerçekleştirilmiş ve alkali ile aktifleştirilmiş beton numunelerin geçirimliliğini incelemek amacıyla kılcal su emme, toplam su emme miktarı, hızlı klor geçirimliliği ve elektriksel özdirenç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında çimento bulamacı emdirilmiş lifli beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Burada, Portland çimentosu ile yapılan üretimin yanı sıra, 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat, 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat, 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütölmüş atık cam, 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütölmüş atık cam aktivatör olarak kullanılarak yüksek fırın cürufu ve ince kum ile üretim gerçekleştirilmiştir. Kullanılmış araç

lastiklerinin geri dönüştürülmesiyle elde edilen hurda çelik teller, çelik lif olarak kullanılmıştır. Yanak teli (sürekli lif) ve kırılmış tel (süreksiz lif) olmak üzere iki farklı lif tipinin etkisi incelenmiştir. Çelik tel olarak atık lastiklerin içerisinde bulunan çeliğin seçilmesindeki sebep, bu tellerin yüksek çekme dayanımına sahip olması ve büyük miktarlarda kullanılması gerektiğinde, temininde bir zorlukla karşılaşılmayacak olmasıdır. Kullanılamaz duruma gelen, otomobil ve kamyon/tır lastiklerinin miktarı göz önünde bulundurulduğunda, bu lastikleri depolamak ve bertaraf etmek bir sorun haline gelmektedir. Türkiye’de, bu telleri ayrıştırmada ve malzemenin geri kazanımını sağlamada, piroliz ve geri dönüşüm hizmeti veren çok sayıda firma mevcuttur. Çalışmada, farklı geri dönüşüm firmalarından temin edilen hurda çelik tellere ait boy/çap dağılımları histogram olarak verilmiştir. Üretilen lifli betonlarda fiber hacim oranı %0, 1, 2, 3, 4 ve 5 olarak değişmektedir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerde deplasman kontrollü üç noktalı eğilme deneyi yapılmış ve yük-sehim grafikleri elde edilmiş; numunelerin eğilmede çekme, yarmada çekme ve basınç dayanımları belirlenmiş, tokluk ve kırılma enerjisi değerleri hesaplanmıştır. Atık çelik liflerin kullanımı, eğilme dayanımlarını ve toklukları arttırmıştır. Kullanılan atık çelik lifler, uygulamada kullanılan ticari liflere benzer sonuçlar vermiştir.

A STUDY ON THE INVESTIGATION OF PHYSICAL, MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED MORTARS AND WASTE STEEL FIBER REINFORCED CONCRETES (SIFCON)

SUMMARY

Conventional concrete production is a large-scale industry growing day by day. High levels of carbon dioxide emission and energy consumption during cement production make this process pollutant and environmentally hazardous. This phenomenon creates the need of searching for alternative construction materials having appropriate characteristics in workability, strength and durability as well as being economical. Environmental, economic and social improvement, which are the main pillars of sustainability, is required for a sustainable concrete production. Re-evaluation of by-products or waste products from different industries in concrete will make a remarkable contribution to this process. Alkali-activated mortars and concretes are materials with advantageous properties such as being more sustainable and environmentally-friendly thanks to containing no cement. The concept of alkali-activated materials has been known since early 1900s. The early researches about alkali-activated binders were performed with blast furnace slag, which is a by-product of metallurgical industry. The ability to achieve high strengths at early ages by rapid hardening is one of the important properties of alkali-activated materials. Although studies on alkali-activated materials have intensified recently, there has not been any application to replace the Portland cement yet. In alkali-activated materials, there can be problems in workability which cannot be solved with adding chemical admixtures such as plasticizers that work with ordinary Portland cement.

There are various studies with different binders (ground granulated blast furnace slag, fly ash, metakaolin, etc.) and different alkaline solutions (hydroxides, silicates, alkali carbonates, sulfate solutions, etc.) which investigate the properties of the materials produced through alkali-activation. By the substitution of by-products like blast furnace slag and fly ash for traditional cementitious materials, the emissions of greenhouse gases during cement production can be decreased and their environmentally hazardous effects can be eliminated. However, to produce a sustainable construction material, workability, durability and strength characteristics of alkali-activated materials should be investigated thoroughly as well as their cost of production, and the need of the development of standards for these materials become apparent.

This study differs from others with the aim of re-evaluating waste or by-products to produce a construction material which is more environmentally-friendly and sustainable. The evaluation of waste glass as an alternative activator with investigating the effect of activator concentration and curing condition makes this study different from the existing studies. In this study, the strength and durability properties of alkali-activated mortar were investigated extensively through performing compressive and flexural strength, the capillary suction, total absorption

of water, rapid chloride penetration, electrical resistivity, freeze-thaw and sulfate resistance tests. In this research, producing a material by using waste or by-products was aimed, and ground granulated blast furnace slag was activated with sodium hydroxide solution and liquid sodium silicate. The use of ground waste glass as a source of silicate instead of sodium silicate was investigated. For this purpose, mortar specimens with NaOH content in different molarities (8-14 M) were produced by replacing sodium silicate with ground waste glass. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortars were examined in three different curing conditions: moist curing entire-time, in laboratory air entire-time, and in laboratory air after 24 hours in 60°C. Portland cement CEM I 42.5 R, water and standard sand were used in reference samples. The compressive and flexural strengths of the mortar specimens were determined at the ages of 3, 7, 28 and 90 days. Furthermore, the capillary suction, total absorption of water, rapid chloride penetration, electrical resistivity, freeze-thaw and sulfate resistance tests were performed on mortars. The electrical resistivity of alkali-activated slag mortars (AASMs) increased with the use of ground waste glass as an activator. The flexural and compressive strength decreased but the durability properties were enhanced with the use of ground waste glass. The chloride ion penetrability decreased with the use of ground waste glass in alkali-activated slag mortars compared to AASMs produced with sodium silicate. The capillary suction and total absorption of water of AASMs produced with ground waste glass were less than the reference sample produced with Portland cement. Based on the test results, it was concluded that the alkali-activated mortars produced with waste glass as an alkaline activator have a potential on being alternative materials to ordinary Portland cement mortars with their similar mechanical and durability properties.

At the other stage of the study, alkali-activated concrete was produced and experiments were carried out for capillary water absorption, total water absorption, rapid chloride permeability and electrical resistivity in order to examine the durability properties of alkali-activated concrete specimens.

At the last stage of the study, slurry infiltrated fiber reinforced concrete (SIFCON) was produced. Scrap steel obtained by recycling used vehicle tires were used as steel fiber. Since steel fibers used in concrete production, which are used to improve toughness and ductility of concrete, are expensive materials, the use of scrap steel provides a significant cost benefit. The effects of two different fiber types, continuous and discontinuous fibers, were investigated. The reason for choosing the waste steel fibers recovered from tires as steel fiber is that these materials have high tensile strength and it will not be difficult to obtain when used in large quantities. Considering the amount of unused car and truck tires, it becomes a problem to store and dispose of these tires. The recovery of the scrap tires, and the separation of steel fiber and rubber in used tires can be provided by pyrolysis and recycling services, which are available in numerous companies in Turkey. In the study, the length/diameter distributions of scrap steel obtained from different recycling companies were given as histograms. The fiber volume ratio in the slurry infiltrated fiber concretes produced changed as 0, 1, 2, 3, 4 and 5%. Also, the usability of ground glass as a silicate source in activator solutions in production of alkali-activated SIFCONs was investigated. For this purpose, productions were made using both 8 M NaOH and 14 M NaOH. While sodium hydroxide and sodium silicate were used in one group, ground glass was used instead of sodium silicate in the other group. Durability problems such as bleeding and crystallization on the surface were

observed in production with 14 M sodium hydroxide and ground waste glass. Three-point bending test was carried out on the specimens produced and load-deflection curves were obtained, the flexural, split tensile and compressive strengths of the specimens were determined, the toughness and fracture energy values were calculated, and compared with those of produced by using Portland cement. The use of waste fibers has increased the flexural strength and toughness. The waste steel fibers used gave similar results to commercially available fibers.





1. GİRİŞ, TANIMLAR VE ARAŞTIRMANIN KONUSU

1.1 Giriş

Portland çimentosu (PÇ), Amerika Birleşik Devletleri'nde yıllık 120 milyon metrik tonun üzerinde tüketime ulaşmıştır ve 2016 yılında küresel çimento üretiminin 4,65 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir (Portland Cement Association, 2016; CEMBUREAU, 2017). Çin'de yılda 1,8 milyar ton çimento üretilmekte olup bu miktar, bugün dünya çimento üretiminin yaklaşık %60'ını oluşturmaktadır. Bu yüksek miktardaki çimento üretimi, klinker üretimi sırasında kireçtaşının (CaCO_3) kirece (CaO) dönüştürülmesi ve bu kimyasal reaksiyonun yan ürünü olarak çıkan karbondioksitin (CO_2) yanı sıra, döner fırınlarda yüksek sıcaklığın sağlanması ve kalsinasyon için kullanılan fosil yakıtlar yüzünden başta karbondioksit olmak üzere sera etkisine neden olan gazları açığa çıkarmaktadır (Ali ve diğ, 2011). Geleneksel beton üretimi, çimento, taş ocakları ve su kullanımını gerektirirken bir ton çimento üretimi yaklaşık bir ton karbondioksit ve sera gazı emisyonuna neden olmaktadır. Taş ocaklarının ve suyun tükenmesi göz ardı edilse bile, çimentonun her bir tonu ile birlikte yan ürün olarak açığa çıkan bir ton karbondioksitin ve üretim esnasında açığa çıkan diğer sera etkisi yapıcı gazların çevreye verdiği zarar ele alındığında, çimento ile üretilen geleneksel betonun ne derece sürdürülebilir bir malzeme olarak kalacağı tartışma konusudur (Davidovits, 2008a).

Dünya yıllık çimento üretimi, küresel karbondioksit emisyonlarının %8'inden sorumludur (Andrew, 2018). Mevcut sera gazı emisyonlarının, 1990 yılından yaklaşık %55 ve 2000 yılından %40 daha fazla olduğu ve küresel sera gazı emisyonlarının 2017 yılında 55,1 Gt olduğu bildirilmiştir (Olivier ve Peters, 2018). Bir milyar ton Portland çimentosu her yıl aynı miktarda CO_2 emisyonuna neden olmakla birlikte, son çalışmalar 2025 yılına kadar bu CO_2 miktarının şehirlerin hızlı kentleşmesi, modernizasyonu ve gelişmesi nedeniyle 10 milyar tona çıkacağını göstermektedir (Dhir, 2005). Gelişmekte olan Çin, Hindistan ve Türkiye gibi ülkelerdeki, hızla artan çimento ihtiyacı da göz önüne alındığında, çimentolu betonun

sürdürülebilir bir malzeme olup olmadığı, yakın zamanda çok daha fazla tartışılır hale gelecektir (Davidovits, 2008a).

Daha çevre dostu ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak atık veya yan ürünlerin beton üretiminde yeniden değerlendirilmesi ve geleneksel betonun üretim maliyetinin azaltılması amacıyla, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi yan ürünler, çimentonun yerine %40-60 oranında kullanılabilir (Topçu ve Karakurt, 2007; Aramburo ve diğ, 2020; López ve Castro, 2010; Allahverdi ve Ghorbani, 2006). Bu şekilde bile, santrallerde üretilen uçucu külün ancak %35'i kullanılabilir (Mehta, 2000).

Endüstriyel prosesler sonucunda ortaya çıkan yan ürünlerin veya atıkların taşınması, depolanması ve çevreye zarar vermeyecek şekilde bertaraf edilmesi, enerji tüketimi ve maliyet konularında sorun teşkil etmektedir.

Gelişen teknolojiyle birlikte, çimento üretiminin daha enerji verimli ve çevre dostu hale getirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu tez çalışmasının amacı, tamamen atıklardan oluşan bir beton üretimi gerçekleştirmektir. Bu nedenle üretimi sırasında çevreye salınan yüksek miktardaki karbondioksit ve diğer sera gazlarının yanında, üretimi için gereken enerji de göz önünde bulundurulduğunda, çimento yerine başka bir bağlayıcı kullanılması yoluna gidilmiştir. Bu çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu alkalilerle aktive edilmiş, cürufun bağlayıcı olarak kullanılmasıyla çimento içermeyen beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Yüksek fırın cürufu, demir ve çelik tesislerinde demir üretimi sırasında yüksek fırınlarda salınan, daha sonra aniden soğutularak ve daha küçük parçacıklara öğütülerek granüle edilen bir yan üründür. Yapılan tez çalışmasıyla, atık ya da yan ürünlerin beton içerisinde yeniden değerlendirilerek dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik ve ekonomiklik açısından uygun özelliklerde bir beton üretimi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Yapılan çalışmanın kapsamında, atık malzemeler kullanılarak çekme, basınç ve eğilme dayanımı yüksek prefabrike elemanlar üretmek amaçlanmıştır. Söz konusu malzeme, kimyasalların kullanımı nedeniyle iş ve işçi sağlığı açısından çeşitli riskler içermesi, işçiliğin fazla olması ve malzeme özelliklerinin üretim koşullarına

fazlasıyla bağılı olması gibi sebeplerle prefabrike eleman üretiminde kullanım için uygundur. Çalışmanın amacı doğrultusunda, alkali aktive edilmiş cüruf kullanılarak SIFCON üretimi yapılmış, çelik tel donatı olarak atık ürün kullanılmış, ardından, üretilen numuneler üzerinde mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Aktivasyon için kullanılan alkali özellikteki çözelti, cüruf, çelik tel donatı bileşenlerinin atık ürünlerden elde edildiği yüksek dayanıma sahip SIFCON üretiminin gerçekleştirilmesiyle, bilinmekte olan iki farklı teknik (alkali aktivasyon ve SIFCON üretimi) bir arada kullanılmıştır. Atık ürünlerin kullanımının bu süreçte dayanıma ve dayanıklılığa katkısı incelenmiş, mevcut iki tekniğin farklı olarak bir arada kullanımının sonuçları araştırılmış ve bu sonuçlar, Portland çimentosu kullanılarak üretilen referans betonla kıyaslanmıştır. SIFCON üretiminde alkali aktive edilmiş cüruf ve atık çelik tel kullanımıyla bilinen malzemeler ve bilinen yöntemler birlikte kullanılarak farklı bir kombinasyon gerçekleştirilmiştir. Tezin gerçekleştirilmesi sonucu, atık ürünlerin yapı malzemesi olarak yeniden değerlendirilmesi sayesinde, bu atıkların taşınması, depolanması ve çevreye zarar vermeyecek biçimde imha edilmesi için gerekli enerji ve maliyetten kazanım sağlanması hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra, çimento yerine alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcı kullanılmasıyla çimento üretimi sırasında meydana gelen çevreye zararlı etkilerin azaltılması/ortadan kaldırılması, çalışmanın hedefleri arasında yer almaktadır.

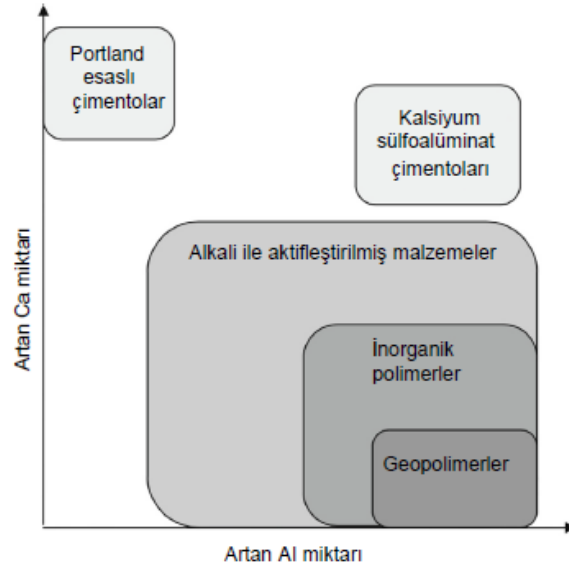
Üretilen yeni malzemede bağlayıcı olarak çimento kullanımının azaltılması hedeflenmiş ve çimento kullanmadan bağlayıcılık sağlanmıştır, böylece çevreye daha az zarar verecek bir süreç gerçekleştirilmiştir, bununla birlikte tel donatı, atık üründen elde edilmiş ve yüksek miktarda tel kullanımı sayesinde, çekme dayanımı geleneksel betondan çok daha yüksek bir malzeme üretilmiştir, çoklu çatlama mekanizması sayesinde malzemede tokluk ve süneklik artmıştır.

1.3 Alkali ile Aktifleştirmenin Önemi

Çeşitli doğal ve teknolojik alüminosilikat malzemelerden, düşük sıcaklıkta, Portland çimentosuyla karşılaştırılabilir özellikleri olan çimento üretimi için bir yaklaşım olan alkali ile aktivasyon, teorik araştırma ve uygulamaya yönelik geliştirme açısından artan bir ilgi görmektedir (Provis ve Van Deventer 2014; Pacheco-Torgal ve diğ., 2014). Bu alandaki ilerleme ham madde tabanının sürekli genişlemesinden, aynı zamanda geniş bir yelpazede doğal ve atık alüminosilikat malzemelerinin kullanım

olasılığından kaynaklanmıştır (Mehta ve Siddique, 2016; Yun-Ming ve diğ, 2016; Provis ve Bernal, 2014). Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin performansını arttırmak için yapılan çalışmalar, çeşitli mineral ve kimyasal katkıların ilavesi, farklı liflerin kullanımı üzerine yapılan araştırmalarla günden güne gelişmektedir (Sa Ribeiro ve diğ, 2017; Bernal ve diğ, 2016; Rashad, 2014; Rakhimova ve Rakhimov, 2014; Rashad, 2013).

Portland çimentosu ve kalsiyum sülfatlı bağlayıcı kimyasıyla karşılaştırmalar ve alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin farklı alt kümelerinin sınıflandırılması Şekil 1.1’de verilmiştir. Burada, renk tonlaması, yaklaşık alkali içeriğini belirtmektedir, daha koyu tonlama, daha yüksek sodyum ve/veya potasyum konsantrasyonlarına karşılık gelmektedir (Van Deventer ve diğ, 2010).



Şekil 1.1 : Alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler (Van Deventer ve diğ, 2010).

Hem Portland klinker esaslı, hem de geleneksel olmayan bağlayıcıların geliştirilmesi üzerine son çalışmalar; tekli, çiftli veya üçlü bileşenli, mineral harmanlama ve/veya modifiye edici katkıların birlikte kullanımı konularında yoğunlaşmaktadır. Karışık çimentoların araştırılması ve geliştirilmesi; ekonomik/ekolojik performansı kontrol etmenin, reaksiyon ürünlerinin birleşiminin, yapısının, teknolojik, fiziko-teknik özelliklerinin ve dayanıklılığının tasarlanması ile uyarlanması en etkili yollarından biridir (Scrivener ve diğ, 2018; Cheung ve diğ, 2018; Brylewski ve diğ, 2018; Papa ve diğ, 2018; Clausi ve diğ, 2018; Rakhimov ve diğ, 2017; Ludwig, 2015; Lothenbach ve diğ, 2011). Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin yapısı,

özellikleri ve mikro yapıları üzerine araştırmalar devam etmektedir (Rakhimova ve Rakhimov, 2019; Rakhimova, 2015).

Kalsiyum içeriği yüksek olan cüruf gibi ham maddelerle üretilen alkali aktifleştirilmiş alüminosilikat malzemelerde, ana reaksiyon ürünü olarak kalsiyum alüminosilikat hidrat (C-A-S-H) jeli oluşur. Bu yapı, çimento hidratasyon ürünü tobermorit (C-S-H) jeli ile benzerlik göstermektedir ancak Portland çimentosu hidratasyon ürününden daha düşük CaO/SiO_2 oranına sahiptir ve iç yapıları açısından farklar taşımaktadır (Torres-Carrasco ve Puertas, 2017a). Burada, reaksiyonun yan ürünü olarak yüksek MgO içeriğine sahip hidrotalsit; zeolit, yüksek Al_2O_3 , düşük (%5'ten az) MgO içeren gismondin oluşur (Haha ve diğ, 2011; Bernal ve diğ, 2010; Bernal ve diğ, 2011). Kalsiyum içeriği yüksek olan cüruf gibi ham maddelerle üretilen alkali aktifleştirilmiş alüminosilikat malzemelerde, üç boyutlu polimer yapı oluşmamaktadır. Bu malzemelerde çelik ile oluşan adhezyon, Portland çimentosu ile çelik arasındaki adhezyondan kuvvetlidir. Hızlı priz, rötre, çatlama gibi problemler görülebilmektedir, rötre çatlaklarını önlemek için su kürü uygulanması gerekir, bu malzemeler su içinde kendi kendini iyileştirebilmektedir (Šimonová ve diğ, 2019). Bu malzemelerde, oda sıcaklığında kristal yapı yıllarca gözlenmeyebilir, yüksek sıcaklıkta C-S-H kristalinitesi artar (Shi ve diğ, 2003). Sodyum hidroksit ile aktive edilenlerde, silikat ile aktive edilene kıyasla daha fazla kristalinite gözlenir. pH değerleri 13,8-14 arasında değişebilmektedir. Sülfat direnci, asit direnci, alkali-silika reaksiyonu ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık konularında dürabilite performansları iyidir (Shi ve diğ, 2003). Bu malzemelerin dayanımları geopolimerlerden iyi olmakla birlikte, dürabilite özelliklerinin geopolimerlerden kötü olduğuna ilişkin çalışmalar mevcuttur (Torres-Carrasco ve Puertas, 2017a).

Geopolimerler, metakaolin, uçucu kül gibi düşük Ca içeriğine sahip ham maddeler kullanılarak sentezlenir. Silis ve alüminyum tetrahedronları, rastgele, bir polimerik zincir üzerinde dizilir ve inorganik mineral polimer üzerinde dağılarak üç boyutlu bir yapı oluşturur. Geopolimerler, asit ile de sentezlenebilir ancak bu, daha pahalı bir uygulamadır ve tıp, diş hekimliği gibi özel alanlarda uygulama bulmaktadır. Geopolimerlerde 160 MPa'ya varan yüksek basınç dayanımları elde edilebilmektedir. Uzun kür süreleriyle, silis açısından zengin yapı sayesinde iyileşen özellikler elde edilir. Yüksek sıcaklıkta uygulanan kür olumlu etkiler oluştururken, su kürü dayanımlarda kayıp gerçekleşmesine neden olabilmektedir. Çelik ile adhezyon,

oluşan kovalent bağlar nedeniyle çok kuvvetlidir, kullanılan malzemenin Portland çimentosundan çok daha ince, reaktif ve yapışkan olmasının da bu konuda etkisi bulunmaktadır. Geopolimerlerde, çeşitli alkalilerle (potasyum/sodyum silikat/hidroksit) gerçekleşen sıralı reaksiyon, üç adımda meydana gelir: yıkım-koagülasyon, koagülasyon-kondenzasyon, kondenzasyon-kristalizasyon. Burada, ana reaksiyon ürünü N-A-S-H jeli veya $(M_n-(SiO_2)-(AlO_2)_n \cdot wH_2O)$ olarak da bilinen amorf bir alkali alüminosilikat hidrattır (Palomo ve diğ, 2005). İkincil reaksiyon ürünleri hidroksisodalit, zeolit P, Na-çabazit, zeolit Y ve fojasit gibi zeolitlerdir (Duxson ve diğ, 2007). Elde edilen ürünün reaksiyonu, yapısı ve özellikleri; alüminosilikat kaynağının doğası ve bileşimi, alkali aktivatörün tipi ve konsantrasyonu, kür koşulları dâhil olmak üzere birden fazla faktör tarafından kontrol edilir (Provis ve Van Deventer, 2014; Pacheco-Torgal ve diğ, 2014; Tennakoon ve diğ, 2014; Rovnanik, 2010; Duxson ve Provis, 2008). Bu malzemede karşılaşılabilecek sorunlar; kaolin kilinin azlığı nedeniyle ham madde kıtlığı, yüksek alkalinite ihtiyacı, yüksek incelik ve yüksek özgül yüzey alanı gerekliliği, buna bağlı olarak fazla su ihtiyacı, fazla rötre oluşumu ve çatlamadır (Lloyd, 2009). Alkali ile sentezlenen geopolimerlerde pH, 13,2-13,4 arasındadır. Geopolimer ile alkali aktifleştirilmiş malzeme ayrımını yapabilmek için oluşan C-S-H miktarının seviyesi önemlidir (Torres-Carrasco ve Puertas, 2017a).

Literatürde SIFCON üretimi ve geopolimerleşme mekanizması üzerinde araştırmaların yoğunlaştığı konular olmasına rağmen, bu iki sürecin bir arada kullanıldığı bir çalışma, tamamen atıklardan oluşan ve çimento kullanılmayan bir beton üretimi sağlamasıyla, atıkların yeniden değerlendirilmesine olanak tanıyarak daha sürdürülebilir bir yapı malzemesi üretimine katkı sağlama açısından bir yenilik olmuştur. Yapılan çalışmayla her iki yöntemin de kendine özgü avantajlarından faydalanılmıştır. Yapılan çalışmayla, tamamen atık malzemeleri kullanarak sürdürülebilir bir yapı malzemesi geliştirilmesi, çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır. Bunun çevresel anlamda katkı getireceği, atık malzemelerin taşınması, depolanması ve bertaraf edilmesi için gerekli olan enerji ve maliyetten kazanım sağlanarak bu malzemelerin bir yapı malzemesi üretiminde yeniden değerlendirilmesine olanak sağlayacağı; bu şekilde gerek çimento üretimi için gereken yüksek enerji ihtiyacında gerekse bu süreçte açığa çıkan sera gazı emisyonlarında azalma sağlanarak ekolojik ve ekonomik anlamda katkı

yaratılabileceği düşünülmektedir. 2004 yılı itibarıyla, sadece Avrupa Birliği ülkelerinde, kullanılmış araç lastiklerinden geri kazanılan yüksek kaliteli çelik liflerin 500.000 tondan fazla olduğu göz önünde bulundurulursa, bu çelik liflerin betonda tel donatı olarak kullanımın, uygulama potansiyeli olduğu açıktır (Pilakoutas ve diğ., 2004). Lastiklerden geri dönüştürülmüş çelik tellerle beton üretimi gerçekleştirildiğinde, yaklaşık olarak aynı mukavemete veya tokluğa sahip bir beton elde etmek için kullanılan lif miktarı, endüstriyel çelik lifler ile üretilen betonda kullanılanlardan yaklaşık %1-2 daha fazla olmalıdır (Zhang ve Gao, 2020). Tez çalışmasında elde edilen sonuçlardan, atıklardan oluşan, tel miktarı ve dayanımı yüksek prefabrike eleman üretiminde faydalanılabileceği beklenmektedir. Literatürde, atık çelik teller ile yapılmış olan çalışmalar sınırlıdır, bu alandaki çalışmalara son yıllarda ağırlık verilmektedir (Hamzaçebi, 2015; Şengül, 2016; Şengül 2018; Onuaguluchi ve Banthia, 2018; Centonze ve diğ., 2012; Aghaee ve Yazdi, 2014). Kullanılmış araç lastiklerinin parçalanarak lif olarak kullanıldığı lif takviyeli betonlar üzerine çalışmalar yapılmıştır (Li ve diğ., 2004a; Li ve diğ., 2004b). Yapılan tez çalışmasıyla, kullanım ömrünü doldurmuş araç lastiklerinin geri kazanımı ile elde edilen hurda çelik teller kullanılarak daha önce yapılmış çalışmaların kapsamı genişletilmiş, böylece alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin performansını arttırmaya ve sürdürülebilir bir beton üretimi gerçekleştirmeye katkı sağlanmıştır.

1.4 Sürdürülebilir Malzeme Olarak Beton

Hızlı sanayileşme ve nüfus artışı ile birlikte artan tüketim, kaynakların verimli kullanılamaması, çevreye ve ekosisteme verilen, insan faaliyetleri kaynaklı zararlar; insanlığın, doğanın gelecek nesillerin gereksinimlerine yanıt verme yeteneğini tehlikeye atmadan, günlük ihtiyaçları temin ederek kalkınmayı sürdürülebilir kılmasının gerektiği konusunu gündeme getirmiştir. Çevrenin ve dünya kaynaklarının, insan etkinlikleri sonucunda tükenme sınırına doğru ilerlediği konusunda genel bir fikir birliği bulunmakla birlikte, sürdürülebilirliğin yalnızca doğanın sunduğu kaynakların kendiliğinden yenilenebilmesine olanak tanıyacak hızda kullanılmasıyla sağlanacağı görüşü yaygındır. Sürdürülebilirlik kavramı, ekolojik, ekonomik ve toplumsal boyutları bir arada barındıran bütünsel bir yaklaşımdır. Sürdürülebilirliğin çevre koruma, ekonomik büyüme ve sosyal gelişim

olmak üzere üç temel bileşeni bulunmaktadır. Sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için, sacayağı denilebilecek bu kavramlar dengeli bir biçimde yönetilmelidir. Sürdürülebilirlik kavramı, temel prensip olarak çevre ve doğada yer alan kaynakların tükenebilir olduğunu belirterek bu kaynakların akılcı yaklaşımlar ile kullanılması gerektiği konusuna odaklanır, böylece ekosistemlerin bütünlüğü ve esnekliğini korumayı hedefler. Sürdürülebilirlik, çevreye zarar vermeden, toplumları refaha kavuşturacak ekonomik kalkınmayı da sağlamayı amaçlar. Çevre koruma, ekonomik büyüme ve sosyal gelişim bileşenleri birlikte uyum içinde çalıştığında, insan istek ve ihtiyaçlarının bugün ve gelecekte karşılanabilme potansiyeli artarak sürdürülebilir kalkınma sağlanmış olur. Sanayi devrimi ile birlikte, hızla büyüyen sanayinin ihtiyaç duyduğu enerji ihtiyacının artması, petrol ve kömür gibi yenilenemeyen doğal kaynakların kullanılmasına sebep olmuştur. Sanayinin giderek baskın sektör olması, insanların tarıma dayalı ekonomisinin yarattığı çevresel bozulmalara, yenilerinin hızla ve daha büyük çapta eklenmesine neden olmuştur. Hızlı sanayileşme ve bunun bir sonucu olarak modern şehirleşme, hızlı nüfus artışı gibi faktörler, hava, su ve toprak kirliliğine, biyoçeşitlilikte azalmaya sebep olmuş, çölleşme ve toprak kaybı gibi sorunların daha da ciddi boyutlara ulaşması sonucunu doğurmuştur. Canlılar, birbirleriyle ve diğer cansız varlıklarla etkileşim içinde oldukları bir ekosistemin parçasıdır. Bir ekosistemin bütün parçaları karmaşık bir şekilde birbirine bağlıdır, ekosistemin bir parçası yok edilir ya da zarar görürse diğer bölümlerinde de bununla bağlantılı sonuçlar ortaya çıkacaktır. İnsanoğlunun doğal çevre üzerindeki bu bozucu etkisi, doğal çevrenin kendini iyileştirme hızına baskın çıkmış ve bu noktada ekosistemin dengesini bozmadan hareket etme gereksinimi ortaya çıkmıştır. Tüm bunlar, sürdürülebilirlik konusunun önemini vurgulamaktadır.

Sürdürülebilir bir beton için önerilen çözümler şunlardır: kullanılan çimento miktarının azaltılması, arıtılmış atık suların karışım suyu olarak kullanılması ve geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması (Arioğlu ve diğ., 2002; Drochytka, 2020). Çimento miktarını azaltmak için çimento yerine puzolanik malzemeler kullanılabilir. Çimento; metakaolin, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, vb. gibi puzolanik malzemelerle tamamen değiştirilebilir, çünkü bu malzemeler alkali aktivasyon ile bağlayıcılık kazanma özelliğine sahiptir. Sürdürülebilir bir yapılaşma bakımından, ekonomisi hızla gelişen Çin ve diğer Uzak Doğu ülkelerinde, alkali ile aktive edilmiş beton üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Alkali ile aktive edilen betonların

Portland çimentosu ile üretilen betona kıyasla karbondioksit emisyonu azaltma oranı genellikle %55 ile 75 arasındadır, ancak alkali ile aktive edilen betonun karbondioksit azaltma oranı, kullanılan aktivatörlerin tipine, konsantrasyonuna ve dozajına bağlıdır (Yang ve diğ, 2013).

Yapı ve çeşitli araçlarda kullanılan malzeme teknolojilerinin özellikleri, malzeme dayanımı, esneklik, süneklik, yanmazlık, ısı ve ses yalıtım kapasitesi, geçirgenlik, kimyasal direnç gibi malzeme özellikleri insanların artan ihtiyaçlarına ve kompleksleşen amaçlarına göre şekillenmektedir. Uzay ve nükleer sanayileri için geliştirilen malzemelerle birlikte, ekonomik koşullar sağlandığında bugün neredeyse tüm malzemelere araştırmalarda amaçlanan yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri kazandırılabilir. Artık sadece en iyi malzemeyi üretmek değil, aynı zamanda en ekonomik, çevreye en az zarar veren ve doğal kaynakların tüketimini en aza indiren, yüksek teknoloji ve maliyet gerektirmeyen, kısacası sürdürülebilir malzemelerin üretimi önem kazanmıştır. Bağlı kolları ile yapı endüstrisi gibi dünya ekonomisinin %60'ını oluşturan büyük bir sektörde, üretilen iş ve malzemelerin sürdürülebilir özellikte olması ise artık kaçınılmazdır. Geri dönüşüm malzemeleriyle alkali aktifleştiriciler kullanılarak ve yarı kuru karışım ile çalışılarak farklı yöntemler (basınçla şekillendirme, ekstrüzyon vb.) yardımıyla; prefabrike eleman, kaplama tuğlası, beton boru, parke taşı, bordür taşı, her türlü dekoratif taş, briket, her türlü refrakter yapı malzemesi üretilmesi mümkün olmaktadır.

Bu çalışmanın temelini oluşturan geopolimer kimyası ile yüksek verimli, düşük maliyet ve teknolojik ürünler üretmek mümkündür. Doğal jeolojik minerallerin kimyasal kompozisyonlarının işlenmesi sayesinde elde edilen geopolimer ile ısı direnci yüksek seramiklerden, yüksek dayanımlı betona, yapı tuğlasından güçlendirme harcına, elektrik sigortasından radyoaktif atık istifleme ünitelerine kadar pek çok farklı amaca hizmet edebilecek malzemeler üretilmektedir (Davidovits, 2008a).

1.5 Özgün Değer

Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu, alkali ile aktive edilerek bağlayıcı özellik kazanmış, agrega olarak yalnızca ince kum kullanılmış ve bu malzemeyle hazırlanan akıcılığı yüksek karışımın matris, atık otomobil lastiklerinden elde edilen çelik

tellerin ise lif olarak kullanıldığı bir kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemenin dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir.

Tez çalışmasının gerçekleştirdiği tarih itibarıyla, literatürde, atık tel ve SIFCON ile ilgili çalışmalar sınırlı düzeydedir, bu çalışmada ayrıca alkali aktivasyon gerçekleştirilmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, tez konusuyla tamamen örtüşen bir çalışma literatürde bulunmamakta olup bu çalışmayla yenilik yapılmış ve bir ilk gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışma, atık ürünlerin kullanılmasıyla çevreye zararın azaltılmasını ve maliyetin düşürülmesini hedeflediğinden önemlidir. Bununla birlikte, işlenebilirlik, dayanım ve dayanıklılık açısından uygun sonuçlara ulaşılarak prefabrike eleman üretiminde kullanılabilecek bir yapı malzemesi elde edilmiştir.

2. TEZ KONUSU İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Yüksek fırın cürufu, demir ve çelik tesislerinde, demir üretimi sırasında yüksek fırınlarda salınan, daha sonra aniden soğutularak ve daha küçük parçacıklara öğütülerek granüle edilen bir yan üründür. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun beton üretiminde kullanılmasının, bağlayıcı olarak kullanılan çimento miktarını sınırlandırması sayesinde çimento üretimi sırasında açığa çıkan karbondioksit emisyonunu azaltması, betonda düşük hidratasyon ısısı sağlaması ve işlenebilirliği arttırması gibi birtakım avantajları bulunmaktadır. Yine de, çimento mukavemet kazanma hızı ile karşılaştırıldığında, puzolanik reaksiyonun çimento hidratasyonundan daha yavaş olması nedeniyle, cüruf kullanılarak üretilen betonlarda düşük mukavemet kazanma hızı bir sorun olabilir. Cüruf içeren beton ile yeterli mekanik ve dırabilite özellikleri elde etmek ve hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırmak için alkali aktivatörler eklemek bir çözüm olabilir; bu şekilde, alkali ile aktifleştirilmiş cürufllu beton, Portland çimentosuyla üretilen geleneksel beton ile karşılaştırıldığında CO₂ emisyonlarında %45 oranında azalma sağlayabilmektedir (Thomas ve Peethamparan, 2015). Mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, alkali ile aktifleştirilmiş cürufllu beton, kür koşullarına bağlı olarak geleneksel betondan daha yüksek basınç dayanımı ve daha düşük elastisite modülü değerlerine sahiptir (Prinsse, 2017). Bilindiği gibi, oranlarda önemli farklılıklar olmasına karşın öğütülmüş yüksek fırın cürufunun oksit bileşenleri Portland çimentosunununkiye benzerdir, ancak hidratasyon reaksiyonu çok yavaştır. Daha kısa priz süresi ve daha hızlı mukavemet gelişimi sağlayan kireç-doğal puzolan çimentoları elde etmek için, doğal puzolanın puzolanik reaktivitesini iyileştirmek üzere kalsinasyonlar, asit ile muamele, uzun süreli öğütme, yüksek sıcaklık kürü, kimyasal aktivatörlerin eklenmesi gibi farklı yöntemler denenmiştir (Mielenz ve diğ, 1950; Rossi ve Forchielli, 1976; Costa ve Massazza; 1977; Shi ve Day, 1993a; Techner ve Pernoux, 1951; Alexander, 1955; Alexander, 1960; Chatterjee ve Lahiri, 1967; Day ve Shi, 1994; Collepari ve diğ, 1976; Alexander ve Wardlaw, 1955; Huizer ve diğ, 1992; Shi ve Day, 1993b; Shi ve Day, 2000a; Shi ve Day, 2000b; Shi ve Day, 2001, Hemmings ve diğ, 1989). Bununla birlikte, bu yöntemlerden bazıları uygulamada

kullanılamayacak kadar pahalıdır ve bazıları da yeterli bir etkinlik göstermez. Bu nedenle, uzun yıllardır öğütölmüş yüksek fırın cürufu, alkalilerle aktifleştirilerek çok sayıda çalışma yapılmıştır. Nitekim çok az miktarda bile Portland çimentosu klinkeri (%5) ile uygulamada yer alan CEM III/C çimentosu (%5 Portland çimentosu klinkeri + %95 öğütölmüş yüksek fırın cürufu) da üretilmektedir. Öğütölmüş yüksek fırın cürufu, çimento klinkeriyle birlikte veya ayrı ayrı öğütölüp kullanılır. Hızlı bir biçimde soğutularak elde edilen yüksek fırın cürufunun açık havada tutulup atmosfer etkilerine maruz bırakılarak kısmen de olsa hidrate olduğu, böylece reaktivitesini büyük ölçüde yitirdiğı bilinmektedir. Bu açıklamalarla birlikte, birçok yayında öğütölmüş yüksek fırın cürufunun ‘mineral katkı’ olarak göz önüne alınmadığını da belirtmekte yarar vardır.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde, kimyasal reaksiyonların sonucunda ortaya çıkan ürünler ve bunların mikro yapısı, malzemenin dayanıklılık özelliklerini belirlemektedir. Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf ve Portland çimento betonu karşılaştırıldığında, amorf ve nano kristal reaksiyon ürünleri, Portland çimentosu hidratasyon ürünlerinden daha yoğun bir mikro yapıya sahip olduğundan, alkali aktifleştirilmiş malzemeler daha iyi dayanıklılık özellikleri gösterir (Kriven ve diğ, 2003). Bu malzemelerin elastisite modülü değerleri de reaksiyon ürünlerinin mikro yapısından etkilenmektedir (Duxson ve diğ, 2005).

Alkali ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu esaslı betonların mikro yapısı için, mükemmel C-S-H zincir uzunluğu 1,1 ile 1,4 nm arasındadır ancak alüminyum bu zincire dâhil edildiğinde zincir uzunluğu azalır (Puertas ve diğ, 2011). Zincir uzunluğu, paketlenme faktöründen etkilenir. Paketlenme faktörü, bir doğrultu ya da düzlemde, atom veya iyonlar tarafından işgal edilmiş alanların miktarını belirtmektedir. Başka bir ifadeyle, paketlenme faktörü (atomik dolgu faktörü), birim hücrede, atomların işgal ettikleri alan olup boyutsuz bir büyüklüktür ve 1’den küçüktür. Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelinin paketlenme faktörü 0,68, 0,77 ve 0,90 civarındadır, buna rağmen kalsiyum alüminosilikat hidratın (C-A-S-H) paketlenme faktörü 0,63, 0,68, 0,79 civarında değişmektedir. Bu uzunluk farkı da malzemenin elastisite modülü değerini etkileyebilir (Puertas ve diğ, 2011). Karışım tasarımı, alkali aktivasyonda kullanılan kimyasalların elde edildiğı kaynaklar ve kür koşulları, malzeme özelliklerini etkiler (Valcke ve diğ, 2012).

2.1 Geopolimerler

İlk olarak 1978 yılında Joseph Davidovits tarafından tanımlanan geopolimerler, inorganik polimerler olarak da adlandırılmakta olup amorf veya yarı kristal yapılı olabilen, alüminyum oksit ve silisyum oksit esaslı malzemelerdir (Davidovits, 1991). Geopolimerler, uçucu kül, cüruf, kaolin, metakaolin vb. bağlayıcılar ile sodyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit gibi çözeltilerin karışımından elde edilir. Bu bileşim geopolimer hamuru olarak da adlandırılır. Uçucu kül esaslı geopolimerlerde, uçucu külden bulunan silisyum ve alüminyum, alkali çözeltilerin kombinasyonu ile aktifleştirilir. Geopolimerleşme için kullanılan ana malzeme tek bir malzeme olabileceği gibi birkaç farklı malzemenin kombinasyonundan da oluşabilir (Xu ve Van Deventer, 2002). Sodyum silikat-sodyum hidroksit ile sodyum silikat-potasyum hidroksit karışımları yaygın olarak kullanılan alkali aktifleştiricilerdir (Palomo ve diğ, 1999; Xu ve Van Deventer, 2000; Van Jaarsveld ve diğ, 2002; Swanepoel ve Strydom, 2002).

Geopolimerler, SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral yapıların, yoğun amorf ya da yarı kristalli üç boyutlu yapı oluşturmak üzere ortak oksijen atomu ile bağlandığı, kovalent bağlı kristal olmayan Si-O-Al ağları olarak tanımlanabilir; geopolimerizasyon reaksiyonları çözünme, oligomerizasyon, polikondenzasyon ve sertleşme adımlarından oluşmaktadır (Amritphale ve diğ, 2019). Geopolimerlerin kimyasal bileşimi zeolite çok benzemekle birlikte geopolimerler amorf mikro yapıya sahiptir (Xu ve Van Deventer, 2000). Geopolimerler polimerik Si-O-Al-O kafesinden, bu kafes de SiO_4 ve AlO_4 bileşiklerinden oluşur. Burada bileşikler bütün oksijen atomlarını paylaşır. Alüminyumun balans değerinin dört olması, oksijene göre negatif bir balans yaratır, bu nedenle K^+ , Na^+ ve Ca^{+2} gibi katyonların varlığı matristeki dengeyi sağlamak için gereklidir (Swanepoel ve Strydom, 2002).

Geopolimer üretimi sırasında alüminyum ve silisyum oksit içeren doğal minerallerin kimyasal yapıları, kimyasal bağları ve bileşimleri birtakım yöntemlerle değiştirilmektedir ve alkali ortamda, düşük sıcaklıkta, doğal kayaç oluşumuna benzer bir süreç hızlandırılmış olarak gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin sonucunda kimyasal direnci ve yangına karşı dayanıklılığı yüksek bir malzeme elde edilmiştir (Sun, 2005). Johnson (2007), geopolimer betonu, hazırlama ve döküm yöntemi üzerine patent sahibidir.

Geopolimer oluşumu sırasında, serbest silis ve alümin içeren ham madde; sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum hidroksit (KOH), potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi alkalilerle aktive edilerek bağlayıcı özellik kazanır. Geopolimer ham maddesi olarak metakaolin, yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi puzolanik malzemeler kullanılabilir. Geopolimer üretiminde, Si/Al oranı değiştiğinde, geopolimerin özelliklerinde değişimler meydana gelir. Alkali ile aktive edilmiş cürufu harç ve betonların mekanik özelliklerinin gelişimini etkileyen ana faktörleri araştırmak için çok sayıda deney yapılmıştır (Aydın ve Baradan, 2012; Behfarnia ve diğ., 2015; Fernández-Jiménez ve diğ., 1999; Lee ve Lee, 2013). Al-Otaibi (2008), aktivatör tipinin ve dozajının alkali ile aktive edilmiş cüruf betonunda önemli bir etkiye sahip olduğunu, daha yüksek dozaj ve aktivatörün daha yüksek silikat modülü değerlerinin, betonda daha yüksek mukavemet sağladığını ifade etmiştir.

Geopolimerler, bol ham madde kaynağına sahip olma, düşük CO_2 yayımı sağlama, düşük enerji tüketimi ve düşük maliyetle üretilebilme, yüksek erken dayanım ve hızlı dayanım kazanma özelliklerine sahiptir. Bu özellikler, geopolimerlerin kullanımını inşaat mühendisliğinde, otomotiv endüstrisinde, havacılık sektöründe, metalurjide, plastik endüstrisinde, atık yönetimi konusunda, sanat ve dekorasyon gibi diğer birçok endüstride oldukça uygun hale getirmektedir. Toksik atıkların değerlendirilmesi de geopolimerlerin yaygın kullanıldığı alanlardan biridir ve giderek yaygınlaşmaktadır. Geopolimerlerin moleküler yapısı, zeolit ve feldispatların moleküler yapısına çok benzer. Zeolit ve feldispatlar, yüksek absorbe özelliğine sahiptir ve toksik kimyasal atıkları, ağır metal iyonları ve nükleer kalıntıları kendilerine çekerek çevre kirliliği kontrolünde kullanılabilirler. Geopolimer bağlayıcılar, oda sıcaklığında priz alabilir ve sertleşebilir, kısa sürede belirli bir dayanım kazanabilirler. Geopolimer bağlayıcılar yapım, ulaşım gibi birçok uygulama sahasında test edilmiştir. Yüksek mekanik performans, yüksek yüzey sertliği (4-7 Mohs sertlik skalası), yalıtım malzemesi olarak kullanılabilme, kalıcılık ve aside karşı yüksek dayanıklılık özellikleri geopolimerlerin önemli özelliklerindendir. Geopolimerik çimento 1200°C 'ye varan çok yüksek sıcaklıklara dayanabilmekte, ayrıca 50 kW/m^2 'ye kadar da yangın dayanıklılığına sahip olabilmektedir (Davidovits, 1994). Geopolimerlerde, sıcaklık artışından dolayı gaz ve duman çıkışı olmamaktadır. Bu unsurlar, geopolimerlere, otomotiv ve havacılık sanayiinde büyük avantajlar sağlar. Bu

nedenlerle, bazı geopolimerik ürünler, uçak kazalarında kabin yangınlarını önlemek amacıyla, uçaklarda kullanılmıştır.

Geopolimer konusunda bugüne kadar çeşitli araştırmalar yapılmış olsa da, en kapsamlı araştırmalar Joseph Davidovits tarafından gerçekleştirilmiştir. Davidovits, uçucu kül ve alkali çözeltilerin bileşiminden oluşan malzemeyi geopolimer olarak tanımlamıştır (Davidovits, 1999). 1970'li yıllarda, Profesör Joseph Davidovits bir teori geliştirmiş, bu teori genişlemiş ve dünyaca kabul görmüştür (Lyon, 1994). Davidovits tarafından geliştirilen bu teoride, Mısır'daki büyük piramitlerin doğal taşlardan yapılmadığı belirtilmiş, blokların yerinde dökülmüş olabileceğine değinilmiştir. Sertleşmiş geopolimerik malzemelerin mikro yapısı, Mısır'daki piramitlerin, Roma'daki amfi tiyatronun mikro yapısına çok benzemektedir. Sonuç olarak bu eski yapıların inşasının, doğal taşların kesilip taşınmasıyla yapılmasından ziyade, geopolimerizasyon esasına dayandığı düşünülmektedir. Bu konu üzerinde birçok bilim adamı, eski zamanlarda geopolimer teorilerinin olup olmadığını ve eski yapıların bu teoriler üzerine kurulup kurulmadığını belirlemek için araştırma yapmaya devam etmektedir (Li ve diğ, 2004c). Davidovits, geopolimerizasyon teorisinin doğrulandığına dair eski Mısır literatürlerinden ve örneklerinden birçok kanıt bulmuş, daha sonra geopolimer üzerinde çalışmalar artmış, bu konuda yayınlar yapılmış ve bazı patentler alınmıştır (Davidovits ve Comrie, 1988; Davidovits ve Morris, 1988; Davidovits, 1987; Morris, 1991; Morris, 1987; Campbell ve Folk, 1991; Davidovits, 1992; Morris, 1992; Folk ve Campbell, 1992; Harrell ve Penrod, 1993; Mckinney, 1993; Morris, 1993).

İçerikleri, oluşumları ve özellikleri açıklanmış olan geopolimerler, bir mühendislik malzemesi olarak aşağıda özetlenen avantajlara sahiptir (Li ve diğ, 2004c):

- Üretiminde kullanılabilen bol ham madde kaynakları: Alkali çözeltide çözünen silikat veya alüminli silikatlar, geopolimer üretim kaynağı olarak kullanılabilir ve bu maddeler, doğada bol miktarda bulunur. Geopolimerler, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstri atıklarından ve yan ürünlerinden de elde edilebilmektedir.
- Enerji tasarrufu sağlama ve çevrenin korunmasına katkıda bulunma: Geopolimerler, çimentonun üretim sürecinde gerektirdiği gibi yüksek enerji tüketimi gerektirmezler. Doğal alüminosilikatların düşük rölatif sıcaklıklarda (600°C-800°C) ısıtılma süreci, uygun geopolimerik ham maddeleri sağlar.

Geopolimer üretimi için gerekli enerji tüketimi az olup bu üretim sırasında az miktarda karbondioksit açığa çıktığından, geopolimerlerin çevre dostu malzemeler olduğu söylenebilir.

- Hazırlama yönteminde kolaylık: Geopolimerler, alüminosilikat reaktif malzemelerin, kuvvetli alkali çözeltilerle düzenli karıştırılmasıyla sentezlenebilir. Daha sonra, oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta kür uygulanır. Bu şekilde, kısa bir zaman diliminde, hedeflenen dayanım elde edilebilir.
- İyi hacim stabilitesi sağlama: Geopolimerik bağlayıcıların rötre değerleri, diğer bağlayıcılara oranla daha düşüktür.
- Kısa sürede dayanım kazanma: Geopolimerler, prizin ilk dört saatinde, nihai basınç dayanımının yaklaşık %70'ini kazanabilmektedirler.
- Kalıcılık: Geopolimerik malzemeler, dayanımından çok fazla kayıp olmadan çok uzun süre dış etkilere dayanabilir.
- Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık ve düşük ısı iletkenlik: Geopolimerler, 1200°C'ye kadar önemli bir zarar görmeden dayanabilirler. Isı iletkenlikleri ise diğer yapı malzemelerine göre düşük olup 0,24 W/mK–0,30 W/mK arasında değişmektedir.

1970 ile 1980 yılları arasında, Fransa'da özellikle ahşap ve çelik yapı binalarda yangınların artmasıyla yapıların hasar görmesi, yangın direnci yüksek yeni kaplama malzemelerinin kullanımını gerektirmiştir. Kapı ve pencerelerde kullanılan polivinil klorür ve yalıtımda kullanılan poliüretan gibi organik kimya ürünü termoset polimerlerin yanmazlık özelliği göstermesi, organik polimerlerin ana yapısında bulunan petrol türevi karbon içeren monomerlerin yanıcı olması nedeniyle mümkün değildir (Davidovits, 2008a). Yanmazlık özelliği, ancak metal minerallerde (maden) bulunmaktadır. Silisyum (Si), organik kimyanın ana elementlerinden olan karbon (C) elementi ile periyodik tabloda atom özellikleri itibarı ile aynı grupta bulunmakla beraber, bir alt periyotta yer almaktadır. Bu durum, ametal olan karbondan farklı olarak silisyum elementinin metaloit özellikleri olduğunu gösterir. Metaloitler kimyasal olarak ametal gibi davranmakla birlikte, yarı iletkenlikleri yönüyle metalik özellik de gösterirler (Brady ve Holum, 1996). Bir metaloit olan silisyumun iyonizasyon enerjisi, karbona nazaran daha düşüktür. Silisyumun oksijen ve diğer elementlerle kurduğu bileşikler daha kararlı davranmakta, bu da daha sıkı kristalize

ve yanıcılığı az olan malzeme yapısını sağlayabilmektedir. Doğadaki kuvars, silisyum ve oksijen atomlarından oluşan, oldukça sert bir mineraldir. Kuvarsı yapay olarak üretmek oldukça zordur ancak başka element ve bileşiklerin silikatlarla (SiO_2) kovalent bağlı polimerler oluşturmasıyla, üç boyutlu yarı kristal amorf yapıda, basınç ve yanma dayanımı yüksek malzemeler elde edilebilmektedir. Buradan yola çıkılarak ahşap yapı malzemelerinin yangına dayanım gösteren, yapay zeolitler ya da polisialatlarla kaplanmasıyla geopolimer kimyasının temelleri atılmıştır (Davidovits, 2008a).

Geopolimerler, hızlı dayanım kazanma özellikleri sayesinde onarım işlerinde rahatlıkla kullanılabilir. Geopolimerlerin 14 günlük basınç dayanımı 5–50 MPa aralığındadır (Van Jaarsveld ve diğ., 1999). Bununla birlikte, mekanik özelliklerin gelişimi üzerinde kür sıcaklığı, aktivatör derişimi ve aktivatör özellikleri gibi faktörler etkilidir (Fernández-Jiménez ve diğ., 1999).

Geopolimerlerin keşfedilmesinden sonra, oluşum mekanizması üzerinde de araştırmalar yürütülmüştür. Davidovits, geopolimer sentezinin üç aşamada oluştuğunu ifade etmiştir; bunlar, alüminosilikatların kuvvetli alkali çözeltilerde çözülmesi, serbest iyon gruplarının dağılımı ve polikondenzasyondur; ancak her aşama birden fazla adımdan oluşmaktadır, örneğin çözünme aşaması ele alınacak olursa, bu aşama termodinamiğe göre sekiz adımdan oluşur ve her farklı yol, geopolimerlerin son özelliklerini belirleyecek farklı iyon gruplarını oluşturabilmektedir. Bu nedenle, geopolimer üretiminde geopolimerizasyon mekanizmasını açıkça anlamak için kesin ve doğru yolu seçmek çok önemlidir ancak şu zamana kadar bunun için yapılan çalışmalar yeterli değildir, çünkü geopolimerin oluşması çok hızlı gerçekleşmektedir. Sonuç olarak, bu üç adım aynı anda ve aynı zamanda meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, araştırmalarda bu üç aşamayı birbirinden ayırmak zor olmaktadır (Li ve diğ., 2004c; Li ve diğ., 2005; Hardjito ve diğ., 2004).

Geopolimerler, göstermiş oldukları üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde, prekast yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykelcilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, zehirli ve nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak ve yarış arabası endüstrisi ve nükleer santrallerde

kullanılabilmektedir (Davidovits, 2008a). Geopolimer kimyası ile ilgili bilgiler, Mısır Piramitlerinin gizemini, Roma ve Horasan harçlarının kimyasal yapısını da aydınlatmada ışık tutmaktadır (Davidovits, 2008a).

1987 yılında Hardjito ve arkadaşları ana malzeme olarak iki farklı uçucu kül, alkali aktifleştirici olarak ise sodyum silikat-sodyum hidroksit çözeltilerini kullanarak geopolimerik beton üretmiş, betonlara etüvde farklı sıcaklıklarda kür uygulamış ve sonuç olarak Portland çimentolu betonda olduğu gibi karışımdaki su miktarının geopolimerik betonun işlenebilirliğini etkilediğini görmüşlerdir. Araştırmacılar, karışımdaki su miktarı ne kadar yüksek olursa, sodyum oksit (Na_2O), silisyum dioksit (SiO_2) olan molar oranının da o kadar yüksek olacağını belirtmiş ancak $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranındaki artışın sertleşmiş betonun basınç mukavemeti üzerinde etkisinin ise önemsiz olduğunu görmüşlerdir. Priz deneyleri sonucunda, uçucu küllü taze geopolimerik betonun karıştırıldıktan en az 120 dakika sonra kullanılması gerektiğini bulmuşlardır. Sertleşmiş beton özellikleri incelendiğinde ise $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ molar oranının, uçucu küllü geopolimerik betonun basınç mukavemetini önemli derecede etkilediğini ifade etmişlerdir. Sertleşmiş uçucu küllü geopolimerik betonun özelliklerini etkileyen diğer önemli faktörlerin ise kür sıcaklığı ve süresi olduğu gözlemlenmiştir. Kür sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, basınç mukavemetinin de o kadar yüksek olduğu, uzun süre kür uygulanan uçucu küllü geopolimer betonunun en azından 48 saate kadar olan basınç mukavemetinde bir artış meydana geldiği görülmüştür. Araştırmacılar uçucu küllü geopolimerik betonda, kür sıcaklığı ve süresinin sadece kimyasal reaksiyonu hızlandırıcı olarak rol oynamadığını, aynı zamanda reaksiyon varlığını açıkladığını ifade etmişlerdir. Kimyasal reaksiyonun hızlanması ile birlikte, 60°C sıcaklıkta 24 saat kür uygulanan geopolimerik beton numunelerin, kürden sonra çok az mukavemet kazandığı belirtilmiştir (Hardjito ve diğ., 1987). Kaya ve diğ. (2018), geopolimer harçlarda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisini, varyans analizi ile incelemişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında, farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmediğini, numunelerin boşluk oranlarının numune yaşına göre anlamlı değişim göstermediğini ifade etmiş fakat geopolimeri oluşturan malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir (Kaya ve diğ., 2018). Kür sıcaklığı ve süresindeki artışlar, geopolimer

harçların yoğunluğunu azaltır; 60°C gibi düşük kür sıcaklıklarında, kür süresinin uzamasıyla basınç dayanımlarında artış meydana gelmektedir, öte yandan uzayan kür süreleri ekolojik anlamda olumsuz etki yaratır (Atabey ve diğ., 2020).

Gruskovnjak ve diğ. (2006), çalışmalarında, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşumunun alkali aktive edilmiş cüruflarda Portland çimentosuna göre çok daha hızlı olduğunu belirtmiş, bu durumun üzerinde sodyum metasilikat bileşeninin hızlı çözünmesi ve alkali ile aktifleştirilmiş cüruf sistemlerindeki cüruf inceliğinin yüksek oluşunun etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Basınç dayanımını etkileyen faktörler arasında karıştırma işlemi ve süresi, ayrıca kullanılan puzolanik maddenin türü yer almaktadır. Kalsiyum oksit (CaO), bir diğer deyişle sönmemiş kireç içeriği arttıkça, geopolimerin porozitesi azalmakta ve basınç dayanımı artmaktadır. Su/bağlayıcı oranı da geleneksel betonlarda olduğu gibi geopolimerlerin basınç dayanımı üzerinde etkilidir. Çimento kullanılarak üretilen geleneksel betonda olduğu gibi, su/bağlayıcı oranının artması, basınç dayanımında azalmaya sebep olmaktadır (Sumajouw ve diğ., 2006). Bunun yanı sıra, kür sıcaklığı ve süresi geopolimerin basınç dayanımını etkilemektedir. 85°C sıcaklıkta, 5 saat kür uygulandığında, 60 MPa basınç dayanımına ulaşılabilmiştir (Palomo ve diğ., 1999). Swanepoel ve Strydom (2002), 60°C sıcaklıkta 48 saat kür ile en iyi dayanım değerine ulaşmışlardır. Öte yandan, çok uzun süreli kürler, basınç dayanımını düşürebilmektedir (Van Jaarsveld ve diğ., 2002).

Alkali ile aktifleştirilmiş cürufta ana hidratasyon ürünleri, düşük Ca/Si oranına sahip kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), hidrotalsit ve alüminat-ferrit-mono(sülfat) hidrat fazıdır (Wang ve Scrivener, 1995; Jiang ve diğ., 1997). Portland çimentosu ve alkali ile aktifleştirilmiş cüruftaki C-S-H fazları; morfoloji, kimyasal bileşim ve kristalinite açısından birbirinden farklıdır (Wang ve Scrivener, 1995; Richardson, 1999; Richardson ve diğ., 1994, Pacheco-Torgal ve diğ., 2008).

Davidovits (1994) tarafından, ticari geopolimerik ürünler kullanılarak araştırmalar yapılmıştır, çalışmaların sonucunda ağır metal iyonlarının %90'ından fazlasının üç boyutlu geopolimerik kafeste sıkıca saklanabileceği ifade edilmiştir. Amerikan Federal Havacılık Kurumu ve Fransa'daki Cordi-Geopolimer Enstitüsü, uçak kompozitleri ve kabin uygulamalarında kullanım için, kabin yangınlarını önlemeye yönelik, düşük fiyatlı, çevre dostu, yangına dayanıklı matrise sahip olan malzemeler üretmeye yönelik bir araştırma programı gerçekleştirerek 50 kW/m²'ye kadar

dayanıklı malzemeler geliştirmiştir. Bunun için, karbon fiber, cam fiber, silisyum karbür (SiC) fiber gibi farklı malzemelerle güçlendirilmiş geopolimerlerin yüksek sıcaklığa dayanıklılık özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, geopolimer bileşikleri ve karbonla güçlendirilmiş polyester, vinil, epoksi, siyanat ester, poliamit, fenol ve termoplastik laminantlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Deneylerin sonucunda, büyük organik moleküler polimerler kolayca tutuşmuş ve yüksek oranda ısı enerjisi ve duman ortaya çıkarmıştır ancak karbon fiberli geopolimerik bileşikler tutuşmamış, yanmamış ve yüksek sıcaklıktan sonra duman açığa çıkarmamıştır. Bu çalışmaların ışığında, uçak kabinleri ve kargolar için yanıcı olmayan geopolimerik bileşikler üretilmiştir. Daha sonra bu malzemeler 1998 yılında, Amerika’da New Jersey eyaletinde kullanılmaya başlanmıştır (Li ve diğ, 2004c).

2002’de Southeast Üniversitesi’nden Sun Wei ve Hong Kong Bilim ve Teknoloji Üniversitesi’nden Zongjin Li, Çin’de doğada bulunan ve insan yapımı alüminosilikat malzemelerinden üretilen geopolimerlerin sentetik mekanizması, yapısal doğası, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini belirlemek için bir araştırma projesi yürütmüşlerdir. Proje, Çin Ulusal Bilim Komitesi tarafından kabul edilmiş ve böylece geopolimer konusundaki kapsamlı çalışmalar 2000’li yılların başlarında hız kazanmıştır (Li ve diğ, 2004c). 2002 yılında Swanepoel ve Strydom, uçucu kül, kaolin, sodyum silikat çözeltisi ve suyu karıştırarak geopolimerik hamurlar üretmiştir. Araştırmacılar, numunelere 40, 50, 60 ve 70°C sıcaklıklarda, 6, 24, 48 ve 72 saat kür uygulamış ve optimum özellikleri 48 saat 60°C’de kür uygulanan numunelerde görmüş, 28 günlük basınç dayanımını ise 8 MPa olarak elde etmişlerdir. Çalışmaların sonucunda 60°C’de 48 saat ısıtılan numunede geopolimerizasyon reaksiyonu görölmüş ve basınç dayanımındaki artış, mukavemet oluşum reaksiyonlarını göstermiştir. Araştırmacılar bu ham maddeleri kullanarak 60°C’nin altında ısıtma yapıldığında, geopolimerizasyon reaksiyonlarının belirli bir oranda görölmesi ihtimalinin oldukça düşük olduğunu belirlemişlerdir (Swanepoel ve Strydom, 2002). Son olarak farklı araştırmacılar, farklı gelişmiş teknikler kullanarak geopolimerin mikro yapısını araştırmışlar, ancak geopolimerin karmaşık bir bileşime sahip olması ve amorf üç boyutlu bir yapıya sahip olması nedenleriyle, farklı atomların kimyasal atmosferini ve açık dağılımını ölçmenin oldukça zor olduğunu görmüşlerdir. Araştırmacılar, bu zorluğu aşmanın çözümünün, geopolimerin moleküler yapısını keşfetmek için istatistiksel teorileri kullanmak

olduğunu belirtmişlerdir, ancak bu araştırmalar henüz sonlanmamıştır (Li ve diğ., 2004c; Hardjito ve diğ., 2004). Bu nedenle, geopolimerlerin yapısal doğası henüz yeterince anlaşılamamıştır.

2.1.1 Polimer kimyası ve geopolimerlerin polimer sınıfı

Polimer kimyası ve teknolojisi, malzeme biliminin önemli konularından biridir. Ecza, elektronik, otomobil ve daha pek çok sanayi kolu, polimer kimyası ile üretilmiş ürünlerle desteklenmektedir. Polimerler, monomer adı verilen molekül ve elementlerin çeşitli fiziksel ve kimyasal etkileşimiyle oluşan, uzun molekül zincir bileşik yapıdaki kimyasal ürünlerdir. Polimerler, kompozit malzeme oluşturmada da kullanılır. Plastik, en çok bilinen polimer malzeme olmakla birlikte pek çok sentetik ve doğal polimer madde bulunmaktadır. Sentetik olarak üretilen ilk polimer ise bakalitir. Organik kimya ürünlerinden alkol, aseton, polyester, petrol esaslı polivinil klorür (PVC) birer polimer olmakla beraber, biyokimya ürünü şeker, lipit ve proteinler de organik polimer bileşiklerdir. Canlıların yapısında sık bulunan karbon, hidrojen, oksijen ve azot elementlerinin monomer olduğu polimerler, organik polimerler olarak adlandırılmaktayken diğer halojen, metal, yarı metal ve maden elementlerin monomerlerin ana bileşenini oluşturduğu polimerler, inorganik polimer olarak isimlendirilir (Yaşar, 2000).

Polimerlerin bağ yapısı, genellikle kovalent bağdır; kovalent bağ yapısı, çeşitli molekül ve elementler arasında son enerji düzeylerinde elektron paylaşımı ya da diğer bir ifadeyle elektron ortaklaşması ile oluşur.

Kimya biliminde, polimer yapının oluşumu, polimerizasyon süreci olarak adlandırılır. İki tür polimer yapısı bulunmaktadır. Bunlardan biri, molekül zincirlerinin birbirinden ayrı olduğu ve birbiri üzerinde kayabildiği monomerlerin uzun zincir şeklinde bağlandığı (katılma polimerizasyonu) termoplastik polimerler, diğeri ise yüksek sıcaklık ve basıncın uygulandığı vulkanizasyon işlemi ile sert ve akıcı yapıda olmayan çapraz bağ yapılı (yoğuşma polimerizasyonu) termoset polimerlerdir. Katılma reaksiyonu ile oluşan termoplastik polimerlerde monomerler birleşirken yan ürün oluşturmazlar. Termoplastik polimerlerin, tek tip monomerin zincir bağlarından oluşanlarına homopolimer ve birden fazla cins monomerin birleşiminden oluşanlarına da kopolimer adı verilir. Termoplastik polimerlerde monomerleri oluşturan moleküller zayıf Van der Waals bağları ile bağlı iken,

monomerler arasındaki uzun zincir bağ yapısı, kuvvetli bir yapıdır. Isıtma uygulandığında bağ yapısı gevşer, esnek ve akıcı bir malzeme oluşur. Termoplastik polimerler, yarı kristal ya da amorf yapıdadır. Termoplastik polimerler, bu yapılarından dolayı eritilerek yeniden şekillendirilebilirler. Termoset polimerler ise sıcaklık ve basınç etkisi altında bir kez şekillendirildikten sonra herhangi bir fiziksel veya kimyasal etkiyle bozulup yeniden şekillendirilemezler. Termoset polimerler, monomerlerin molekül yapısında bulunan bir ürünün yan ürün olarak ayrılması ve diğer farklı yapıdaki monomerlerin uygun bağları oluşturarak yüksek basınç ve sıcaklık altında birleşimiyle oluşur. Petrolün işlenmesi ile üretilen polipropilen ve bir poliamit olan Naylon 66, termoplastik polimer olup karbon-hidrojen bağlarından oluşur. Polyester ve epoksi ise termoset polimer yapıdadır. Sentetik olarak laboratuvarında polimer üretim metodu kondenzasyon (yoğuşma), katılma ve plazma yöntemleri olmak üzere üç şekilde gerçekleştirilmektedir (Yaşar, 2000).

Geopolimer, polikondenzasyon sonucu oluşan termoset polimer yapısına sahiptir. Polikondenzasyon, çeşitli ısı ve kimyasal etki ile monomerler arasındaki bağların ve moleküller içindeki atomların enerji düzeylerinin değişmesi ile gerçekleşir. Bakalit, fenol ve formaldehitin alkali ortamda polikondenzasyona uğraması ile oluşmuştur. Geopolimer oluşumunda ise 100–150°C sıcaklıklarda kaolin, alkali özellikteki sodyum hidroksit ile reaksiyona girerek hidratasyon sodası halinde polikondenzasyona uğrar, oluşan ürün tektoalüminosilikat (feldispatoit) ve hidroksisodalittir (Davidovits, 2008a). Geopolimerler, organik kimya ürünü polimerlerden farklı olarak karbon elementi yerine, kuvars içerisindeki silisyum moleküllerinin yüksek pH'lı alkali ortamda, alüminatlarla polikondenzasyona uğraması ile oluşur. Geopolimerler, kayaç oluşturan madenlerden üretilmesine rağmen, tüm geopolimer üretim tekniğini inorganik polimerler olarak sınıflandırmak doğru olmayabilir. Organik polimer elementlerinin de sentezlendiği metil grubu, petrol ve kerosen bileşikli organo-geopolimerler üretilmektedir (Kim ve diğ, 2004). Geopolimerleri, termoset maden polimerler olarak tanımlamak daha uygundur (Davidovits, 2008a).

2.1.2 Molekül yapısını ve kimyasal mekanizmayı incelemeye kullanılan deneyler

Katı malzemelerin fiziksel yapısı, birinci derecede, katıyı oluşturan atom, iyon ya da moleküllerin dizilimlerine ve aralarındaki bağ kuvvetine bağlıdır. Atom veya iyonlar,

üç boyutta tekrar eden düzenli bir örüntü içinde dizilmişse, oluşan yapı kristalli malzeme olarak adlandırılır. Metaller, kristal yapı malzemelerdir. Kristalli katılarda atom veya moleküller, uzay kafes dizilimindedir. Atomlar arası mesafe ve birbirleri ile oluşan açı, aralarındaki çekim kuvvetine bağlıdır. Atom ya da moleküllerin düşük enerji düzeyine ulaştıkları kararlı hallerinde, oluşan uzay kafes düzeni daha sıkıdır. Maddenin fiziksel özellikleri, kristal yapı dizilimine göre değerlendirilebilir. Metallerde en yaygın görülen kristal birim hücreleri, hacim merkezli kübik ve sıkı düzen hekzagonal geometridir (Smith, 1996).

Maden moleküllerinin uzay kafes dizilimlerini, gelişmiş teknoloji nükleer ve optik ışın cihazları ile incelemek mümkündür. Malzeme molekülleri ya da atomları arasındaki mesafe, atom ya da iyon enerji düzeylerine bağlı olarak 10^{-10} – 10^{-9} m arasında değişmektedir. Sırasıyla Angstrom ve nanometre olarak isimlendirilen bu SI birimlerindeki molekül mesafelerini ve dizilişi gözlemlemek için, geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ya da taramalı elektron mikroskopundan (SEM) faydalanılmaktadır, böylece moleküllerin kafes yapısı ve doluluk oranı değerlendirilmektedir. Mikroskobun gönderdiği elektron demeti, numune içinden geçerek mercekle kırılır ve floresan perdede malzeme içinden geçen ışın demetleri odaklanır, böylece malzeme yüzeyinin 10.000-100.000 kat aralığında büyütülmüş görüntüsü meydana gelir. SEM sayesinde atom ya da moleküllerin dizilişi, kristal kusurları ile birlikte görüntülenmekte, doğal kayaç ve madenler için petrografik veriler de gelişmekte ve netleşmektedir (Smith, 1996).

Geopolimer gibi amorf ve yarı seramik malzemelerin iç yapılarındaki değişken dizilim de SEM ile değerlendirilebilmektedir. Özellikle kristal yapı malzemelerde, atomlar arası mesafeyi ve uzay kafes dizilişi belirlemede etkin olarak kullanılan yöntem, XRD olarak da bilinen X-ışını difraksiyon spektroskopisidir. Bu yöntemde malzemenin farklı bölgelerinden alınan toz homojenize karışım üzerine, $1-10^\circ$ aralığında ışın demetleri gönderilir. Gönderilen ışınların kırılma açısı ve indisinden kristal yapısı tayin edilir, ancak, amorf malzemelerde ışınlar malzeme içinde soğurulduğundan uzay kafes yapısı hakkında yorum yapmak zordur. XRD, malzeme kompozisyonu hakkında da veri sağlamaktadır (Smith, 1996). Geopolimerler, içinde zeolit kristalleri ve feldispat camı bulundurmamakla beraber, suyun kaynama noktasının altında sentezlenen geopolimer, amorf ve camsı bir malzemedir (Davidovits, 2008a). Hidrotermal priz alma koşullarında, termoset priz alan geopolimer yapısı ise

kristalleşme şeklinde olup gönderilen 3 Å dalga boyunda Na-K-polisialat-silokso geopolimer partikülleri $2\theta=26-28^\circ$ kırınımını vermektedir. Geopolimer hamurundan alınan örneklerdeki yansımalar, malzeme içinde bulunan muskovit ($KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$), titanyumdioksit (TiO_2), kuvars (SiO_2), korendon (Al_2O_3) gibi parçalı kristallerden etkilenmektedir (Kim ve diğ, 2004).

XRD uygulaması kullanılarak geopolimerin amorf yapıya ulaşan süreci izlenebilir (Van Deventer ve diğ, 2007). XRD, gönderilen ışın dalgalarının molekül yapı içerisindeki boşluklardan geçiş ve yansımalarını değerlendirerek doğal ve yapay taşların yapısı ve cinsi hakkında bilgi edinmeyi sağlayan bir deneydir (Smith, 1996).

Geopolimer hamuru, gerekli sıkıştırma ve kür işlemleri uygulandıktan sonra monolitik yani tek parçalı, başka bir ifadeyle parçalı olmayan tek tip taş bir yapı oluşturur. Sert geopolimer yapıya uygulanan farklı açılardaki ışınların yansımalarının frekansları göstermektedir ki geopolimerler, doğadaki zeolit kayaçlarla benzer yapıya sahiptir (Brew ve MacKenzie, 2007).

2.1.3 Geopolimer kimyası ve geopolimer türleri

Geopolimerizasyon süreci, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, kömür cürufu gibi endüstriyel atık, parçalanmış doğal başkalaşım kayaçlar, volkanik tüf ya da $750^\circ C$ sıcaklıkta fırınlanmış kaolinit kili (metakaolinit) gibi, bünyesindeki suyu kaybetmiş alüminosilikat yapıdaki toprak katılarıyla, alkali silikat ve alkali tuzların düşük sıcaklıklarda tepkimeye girmesiyle başlamaktadır. Elde edilecek ürünün amaçlanan fiziksel özellikleri sağlayabilmesi için, katı ham madde bileşiminin uygunluğu, ilgili kimyasalların doğru molar oranlarda karıştırılarak tepkimeye sokulması, uygulanan ısıl kür veya kalsinasyon işleminin sıcaklığı ve süresinin uygun olması gerekmektedir, bu koşullara bağlı olarak üretilen malzemenin molekül yapısı ve özellikleri değişmektedir (Davidovits, 2008a). Geopolimerizasyon; yüksek alkali ortamlarda, moleküllerin çözünme, taşınma, yönelme ve polikondenzasyon ya da diğer bir ifadeyle çoklu yoğunlaşma süreçlerini kapsayan, ekzotermik (ısıveren) bir kimyasal reaksiyondur (Davidovits, 1999).

Geopolimer, fırınlanmış kil içinde bulunan silikatlar ile alüminatların, oksijen atomu elektronlarını ortaklaşa kullanmasıyla, kovalent bağlı bileşik oluşturması sayesinde sentezlenmesi esasına dayanır. Silikat (SiO_2) mineralleri son derece kararlı bileşikler olmasına rağmen; alkali aktifleştircilerin silikat monomerlerinin sarmal üç boyutlu

ağ yapısını zayıflatması, ilerleyen tepkime sürecinde, geopolimer ana bileşiği olan Si-O-Al sialatların oluşumunu mümkün kılmaktadır (Davidovits, 2008a).

Geopolimer anlayışıyla gerçekleştirilen tüm üretimlerde, molekül yapısını belirleyici olan, jeolojik toprak kaynak ve aktifleştirici alkali silikatların toplam Si:Al molar oranıdır (Davidovits, 2008a). Bu oranın 1'e eşit olduğu sistemlerde zeolit kristaline benzeyen seramik, tuğla ve yalıtım gücü yüksek, yangından koruyucu ürünler elde edilebilmektedir. Bu oran 2 olduğunda ise, yine seramik ile amorf arası yapıda geopolimer çimento ve beton sentezlenebilmekteyken, biraz daha ileri teknolojiyle radyoaktif atıkların depolanması için gerekli yapılar üretilebilir. Si:Al oranının 3'e eşit olduğu durumlarda, akışkan polimerik karakter artmakta, fırın kaplamaları, yangından koruyucu kaplamalar ve gelişmiş teknolojiler için 1000°C sıcaklığa dayanabilen malzemeler üretilebilmektedir. Si:Al oranı 3'ün üzerine çıktığında yalıtım kabiliyeti yüksek, dolgu malzemesi köpükler üretilebilmektedir. Si:Al oranı 15'ten büyük olduğunda ise iki boyutlu moleküler ağ yapısında, geopolimer hamuru oluşmaktadır; bu yapıdan, savaş uçaklarında kullanılabilecek, yangın ve ısıl dayanımı yüksek nano kompozit malzemelerin üretiminde faydalanılabilmektedir (Davidovits, 2008a).

Geopolimerizasyon yöntemi kullanılarak gelişmiş teknoloji seramik malzemelerin üretiminde, reaksiyon stokiyometrisi iyi gözlenmelidir. Mineral esaslı tepkimelerde ham maddenin dikkate değer bir kısmı reaksiyona girmemektedir ancak uygun molarite ve mol kütlelerinde alkali soda ve tuzların etkilmesi ve ısıl etkilerin tepkime entalpilerinin değerlendirilmesine göre uygulanmasıyla, hedeflenen fiziksel özellikteki kompozit veya monolitik malzemelere ulaşılabilmektedir. Malzeme mikro yapısı da incelenerek ani soğutma ve ikincil fırınlama işlemleri gibi ısıl işlemler sayesinde, emayeleşme, yüzey parlaklığı gibi özellikler, geopolimer malzemeye kazandırılabilir (Davidovits, 2008a).

Karışım içerisinde bulunan alkali tuzların da etkisiyle, geopolimerizasyon süreci ısı açığa çıkaran (ekzotermik) bir tepkimedir. Bu süreçte su moleküllerinin dehidrasyonu, geopolimer polikondenzasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Kullanılacak olan temel ham maddenin mineral yapısı, bileşimi, inceliği ve özgül yüzey alanı, her malzemede olduğu gibi geopolimerik ürünlerde de fiziksel ve kimyasal özellikleri etkilemektedir. Bazı malzemeler kullanıldığında basınç dayanımı düşük, zayıf yapıları karışımlar elde edilmekteyken, 750°C sıcaklıkta

fırınlanmış metakaolinit veya uygun oranlarda Al-Si bileşiği bulunduran ve serbest kalsiyumun düşük olduğu (<%10) mineral kompozisyonundaki, düşük kireçli uçucu kül (F tipi uçucu kül) gibi ham maddeler kullanılarak yüksek dayanım ve kalıcılık özellikleri olan malzemeler üretilir. Fırınlanmamış kaolin kili kullanıldığında ise daha düşük basınç dayanımı değerleri elde edilmektedir (Rangan ve diğ, 2005). Ham maddeye uygulanan ısı bir işlem olan fırınlama işlemi, boşluk suyunun ve karbonlu bileşiklerin ayrışmasına katkıda bulunmakta, malzeme bileşimi içerisindeki mineral element ve bileşiklerin enerji düzeyinin yükselmesi ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamakta, bu sayede elde edilecek ürünün reolojik özelliklerini geliştirmektedir (Davidovits, 2008a).

Bazı araştırmacılar, ham maddenin düzensiz özelliklerinin deneysel çalışmaya olan etkisini azaltarak geopolimer kimyasını tanımlayabilmek amacıyla, sadece kimyasal yapısı iyi bilinen killeri kullanarak çalışma yapmışlardır; yine de ham maddede ön iyileştirmeler yapılsa bile, alüminosilikat minerallerin yapısal ve kimyasal özellikleri, farklı ve karmaşık sonuçlar doğurabilmektedir (Brew ve MacKenzie, 2007). Uygun jel bileşimini sağlayabilmek için, geopolimerik çözelti içerisindeki çözünen alüminyum azaldığında, ilave kaolinit ya da alüminyum eklenebilir. Alüminatların yavaş reaksiyon vermesiyle tepkimenin tüm ana bileşenleri arasında bağlanma reaksiyonları gerçekleşmekte iken, yüksek miktarda alüminat içeren kaolinit ağırlıklı bir karışım, zayıf malzeme özellikleri sergiler (Van Deventer ve diğ, 1989).

Geopolimer reaksiyonu oda sıcaklığında başlasa da, malzeme özelliklerini iyileştirebilmek için kritik erken dönemde sıcaklık ve nem koşullarının değiştirilmesi gibi birtakım ek işlemler uygulanabilir. Uygun karışım tasarımı oluşturulduktan sonra, malzeme 40 ile 100°C arası sıcaklıklarda, etüv ya da buhar odasında ısı işleme tabi tutularak geopolimer malzemeye kür uygulanır ve polimerizasyon süreci uzatılır; bu şekilde, üretilmek istenilen geopolimer malzeme özellikleri iyileştirilirken hızlı erken dayanım sağlanabilir. Geopolimerlerin kimyasal mekanizması ve tepkime entalpi değerleri tam olarak tanımlanamamıştır ancak metakaolinit içerisindeki silisyumlu ve alüminyumlu oksit parçacıkların, üç boyutlu tetrahedral bağlı termoset polimer mikro moleküler yapıyı oluşturmasıyla, seramiksi, yarı camı-amorf bir yapının oluştuğu bilinmektedir (Komnitsas ve Zaharaki, 2007). Tepkime termokinematığının incelenmesiyle, amaçlanan malzeme özelliklerinin geopolimere kazandırılması mümkündür. Alkali tuzlar içerisinde bulunan sodyum

(Na), potasyum (K), kalsiyum (Ca) gibi alkali metaller elektron kaybederken, silisyum (Si) ve alüminyum (Al), oksijen atomlarını paylaşarak kimyasal bağ kurulmasını sağlamaktadır. Bu şekilde, Si-O-Al moleküllerinden oluşan, sialat olarak adlandırılan, alkali silikon okso-alüminat yapı meydana gelir. Polimer bağ yapısının oksijenli dizilişinin sıklık düzeyine ve elementlere göre, sialat, polisialatsilokso, polisialatdisilokso gibi farklı yapılar oluşabilmektedir. Sialat (Si-O-Al-O-) yapısı, SiO₄ ve AlO₄ molekülleri arasında, tüm oksijen atomlarının tetrahedral bağlar kurmasıyla meydana gelir (Davidovits, 1999). Geopolimer reaksiyonunda tepkimeye giren maddeler, başka bir ifadeyle ham madde, alkali çözeltideki sialat ve alüminatın Si/Al molar oranı; ürünleri, oluşacak kristal yapıyı ve malzeme özelliklerini etkilemektedir (Davidovits, 2008a).

Polisialatlar biraz daha düzenli, kristal yapıya sahipken polisialatsilokso daha amorf yapıdadır. Polisialat yapıyı veren genel formül aşağıdaki gibidir (Davidovits, 1994; Xu ve Deventer, 2000; Palomo ve diğ., 1999; Roy, 1999; Davidovits, 1999):

$$M_n\{-(SiO_2)_z-AlO_2\}_n, wH_2O \quad (2.1)$$

Burada,

M: alkali katyon (Na, K, Ca gibi),

n: polikondenzasyon sayısı ya da polimerizasyon derecesi,

z: üç boyutlu polikondenzasyon ağ yapı tekrar sayısı (z=1, 2, 3)

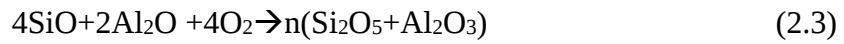
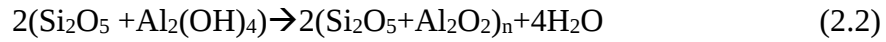
w: birim hücredeki su molekülü sayısıdır.

Joseph Davidovits tarafından tanımlanan geopolimer tepkimesine giren ve oluşan molekül grupları şu şekilde ifade edilmiştir:

- Si-O-Si-O- silokso, poli(silokso) (cam suyu alkali-silikatlar) bağlayıcılık kazandırıcı ham madde
- Si-O-Al-O- sialat, poli(sialat)
- Si-O-Al-O-Si-O- sialat-silokso, poli(sialat-silokso)
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- sialat-disilokso, poli(sialat-disilokso)
- P-O-P-O- fosfat, poli(fosfat)
- P-O-Si-O-Al-O-P-O- fosfo-sialat, poli(fosfo-sialat)

- (R)-Si-O-Si-O-(R) organo-silokso, poli-silikon (Davidovits, 2008a; Davidovits, 2008b).

Geopolimerlerde, Portland çimentolu betona benzer şekilde, sertleşme tamamlandıktan sonra da reaksiyonlar devam eder. Isıveren geopolimer reaksiyonu, üç boyutlu, oligomer makromoleküler yapıyı oluşturacak şekilde ilerler. Alüminosilikat hidratların ısıtılmasıyla, hidroksil (OH⁻) iyonları, su oluşturacak şekilde ayrışmakta ve polimerik Si-O-Al bağları oluşmaktadır. Geopolimerin yoğuşma (polikondenzasyon) ile oluşumu ise şu adımlarla gerçekleşir:



Buhar fazında gerçekleşen bu reaksiyon ve önceki reaksiyon ham maddeye uygulanan ön ısıtma ve 100°C sıcaklığa kadar olan ısıl kür işlemlerinin, geopolimer reaksiyonlarını hızlandırdığını ve reaksiyona giren alüminosilikat miktarını arttırdığını göstermektedir. Yoğuşmuş silis dumanı (SiO₂) ve korendon (Al₂O₃) geopolimer tepkimesine yatkın bileşiklerdendir. Geopolimerizasyon süreci, bu alüminosilikat oksitlerin, alkali hidroksit tuzlarda çözünmesiyle başlamaktadır. Kullanılan jeolojik kaynak malzemenin inceliği, alüminyumlu ve silisyumlu moleküllerin çözünürlük düzeyi, reaksiyonu etkilemektedir (Van Jaarsveld ve diğ, 1998). Alüminosilikat jel çözeltinin oluşum süreci, ham maddelere uygulanan kür sıcaklığından ve kür süresinden etkilenir (Ivanova ve diğ, 1994).

Yüksek alkali ortam, hidroksil iyonlarının da etkisiyle, silikat ve alüminatların çözünmesini hızlandırmaktadır. Aşırı alkali bir ortam sağlandığında, silikat anyonları arasındaki bağlar gevşeyebilmektedir (Ivanova ve diğ, 1994). Daha hafif bir element olan sodyumun bulunduğu alkali tuzlar, potasyumlu tuzlara kıyasla daha fazla çözünmektedir, bunun sebebi, sodyumun, daha hafif ve küçük bir atom oluşudur. Sodyumun elektron ilgisinin daha az olmasının da, hidroksil iyonlarını bırakmasını kolaylaştırdığı söylenebilir (Panagiotopoulou ve diğ, 2007). Alkali tuz ile birlikte, uçucu kül gibi kullanılan ham maddenin içerisinde bulunan ana bileşenlerin daha düzenli çözünerek geopolimer malzeme özelliklerini iyileştirmesi için, cam suyu sodyum silikat (Na₂SiO₃) veya sodyum alüminat (jipsit), (Na₂O-Al₂O₃) ilave edilebilir. Bu kimyasalların eklendiği çözeltiler, katı-jel çözeltiler şeklinde isimlendirilir. Bu tür çözeltilerde, kimyasalları çözmekte kullanılan çözücünün yani

su miktarının fazla oluşu, Portland çimentosuyla üretilen karışımlarda olduğu gibi, malzemenin basınç dayanımını olumsuz etkiler. Bu tip oluşumlarda çökelti halindeki sodyum iyonu da fazladır, çünkü sodyumlardan ayrılan alüminat ve silikat molekülleri birlikte reaksiyon vermektedir. Uçucu kül içerisindeki ana elementler, alüminyum ve silisyumdur. Kimyasal olarak kullanılan sodyum alüminat, tetrahedral alüminyum bağ yapısı oluşumunu kolaylaştırmaktayken, cam suyunun çapraz bağlı silikat moleküllerini arttırdığı, nükleer manyetik rezonans (NMR) spektroskopisi ve MAS-NMR ile gözlemlenmektedir (Ivanova ve diğ, 1994).

Geopolimerlerin fiziksel özellikleri, kullanılan ham maddedeki Al-Si oranlarına göre farklılık gösterir. Hedeflenen kalıcılık ve dayanım özelliklerini malzemeye kazandırabilmek için, ham maddenin kimyasal özelliklerinin iyi tespit edilerek istenilen özellikleri sağlayacak karışımların oluşturulması gerekir (Duxson ve Provis, 2005). Örnek olarak polisialat kristallerinin arasına sudaki hidroksil iyonlarının kimyasal olarak bağlanmasıyla ısı direnci yüksek, yalıtım malzemesi olarak kullanılabilen kaplama malzemeleri üretilmektedir (Davidovits, 2008a). Uçak kabin kaplama malzemesi olarak kullanılan, ticari olarak üretilen geopolimer malzemelerin, 50 kW/m² enerjiye uzun süre dayanabildiği tespit edilmiştir (Davidovits, 2008a; Davidovits, 2008b).

Geopolimerin basınç dayanımını kazandığı süreçte, pH düzeyi önemlidir. Geopolimer ısı işlem sıcaklığı yükseldikçe, hamurun pH düzeyi düşer. 85°C sıcaklıkta geopolimer hamurunun pH değeri 10,5 iken, 700°C'lik ısı işlem gördüğünde aynı geopolimer hamurunun pH değeri 7,5'e kadar düşebilmektedir. K₂O/SiO₂ molar oranı, ısı kür sıcaklığının yüksek olduğu işlemlerde pH düzeyini dengelemek için arttırılmaktadır. Geopolimer hamurunun genel pH düzeyi 10–12 arasındadır. Kullanıcıya zarar vermeyen karışımlar elde edebilmek, böylece malzemenin üretimi ile kullanımını kolaylaştırmak, bugünkü bilimsel araştırmaların ve standartların zorunlu ölçütlerindendir. İstenilen özellikleri sağlayabilen, pH düzeyi düşük geopolimer formülleri geliştirmek, doğa ve insan sağlığı açısından geopolimerin yaygın kullanımını arttıracaktır (Davidovits, 2008a).

Bugüne dek tanımlanmış on tip geopolimer malzeme bulunmaktadır. Bu malzemeler aşağıda ifade edilmiştir:

- Cam suyu esaslı geopolimer, polisiloksonat, (Si:Al=1:0)

- Kaolin hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat, (Si:Al=1:1)
- Metakaolinit esaslı geopolimer, poli(sialat-silokso), (Si:Al=2:1)
- Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialat, (Si:Al=1, 2, 3)
- Kayaç esaslı geopolimer, poli(sialat-multisilokso), ($1 < \text{Si:Al} < 5$)
- Silis esaslı geopolimer, sialat ve silokso bağlı poli(siloksonat), (Si:Al>5)
- Uçucu kül esaslı geopolimer,
- Fosfat esaslı geopolimer,
- Ferro-sialat esaslı geopolimer, (-Fe-O-Si-O-Al-O-)
- Organik maden esaslı geopolimer (Davidovits, 2008a; Davidovits, 2008b, Davidovits ve Davidovits, 2020).

Bu geopolimer çeşitlerinden ferro-sialat esaslı geopolimerler, diğerlerine nazaran daha yeni tanımlanmış olup bu geopolimerlerde özellikler, kayaç esaslı geopolimer bağlayıcının özelliklerine benzemekle birlikte, malzeme, alüminyum yerine yüksek demir oksit içeriğine sahip jeolojik elementler içermektedir. Geopolimerik yapı, poli(ferro-sialat) (Ca, K)-(-Fe-O)-(Si-O-Al-O-) tipindedir. Bu kullanıcı dostu geopolimer bağlayıcı, geliştirme ve ticarileştirme aşamasındadır (Davidovits ve Davidovits, 2020). Kullanılan ham madde değiştikçe, geopolimer malzemenin oluşumu, yapıları ve özellikleri değişmektedir (Yeşilyurt, 2013).

Ruiz-Santaquiteria ve diğ. (2012), alkali çözelti/bağlayıcı oranının, alüminosilikatların alkali aktivasyonunda oluşan reaksiyon ürünlerinin bileşimi ve nano yapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, deneylerde, uçucu kül ve dehidroksile beyaz kilden oluşan iki karışım ve bunların her biri için değişen oranlarda çözelti bileşenleri kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak 0,50, 0,75 ve 1,25 olmak üzere üç aktivatör/bağlayıcı oranında, 8 M sodyum hidroksit çözeltisi (sodyum silikatlı ve sodyum silikatsız) kullanılmıştır. Reaksiyon ürünlerinin ^{29}Si , ^{27}Al MAS NMR ve XRD karakterizasyonu, uygun macun işlenebilirliği sağlayan değere en yakın oranlar için, reaksiyon ürünü bileşimi ve yapısının, esas olarak başlangıç malzemelerinin ve kullanılan alkali aktivatörün doğasına ve bileşimine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, sistemde fazla miktarda alkali aktivatör bulunduğunda, reaksiyon ürünleri, başlangıç bağlayıcısının veya alkali aktivatörün bileşiminden bağımsız olarak yaklaşık 1 değerinde $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranları sergileme eğilimindedir (Ruiz-Santaquiteria ve diğ, 2012).

Tüm bu bilgilerin ışığında, alkali ile aktifleştirilmiş malzemeler ile geopolimerlerin birbirlerinden farkı, iç yapıları ve nasıl sınıflandırılması gerektiği üzerine tartışmalar, bu konu üzerine yapılan çalışmalarla birlikte hâlâ devam etmektedir (Davidovits, 2018). Nano malzemeler ve çelik lifler kullanılarak geopolimer beton özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar güncelliğini korumaktadır (Rabiaa ve diğ, 2020).

2.2 Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lifli Betonlar

Geleneksel lifli betonda, lif miktarının çok fazla artması, işlenebilirlik sorunlarını beraberinde getirir. Bu hususta bir alternatif olarak çimento bulamacı emdirilmiş lifli beton ya da diğer bir deyişle SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) karşımıza çıkmaktadır. SIFCON, döküm öncesinde süreksiz çelik liflerin kalıba yerleştirilmesi ve ardından çimento, puzolan, ince agrega, su ve akışkanlaştırıcı katkıdan oluşan akıcılığı yüksek karışımın kalıba dökülmesi ile üretilen bir kompozit malzemedir. Bu malzemede, yüksek miktarda çelik lif içeriği sayesinde çekme dayanımı, darbe dayanımı, tokluk ve süneklik, geleneksel betona göre fazladır. Lif miktarının fazla olması nedeniyle doluluğu sağlamak, ayrışmayı önlemek ve yüksek akıcılıkta kıvama sahip ince madde miktarı yüksek karışım oluşturmak SIFCON üretiminde dikkat edilmesi gereken noktalardır. Her kompozit malzemede olduğu gibi, lif yönlendirilmesi, lif ve matrisin özellikleri, lif miktarı dayanımı etkiler.

SIFCON içerisinde kum kullanıldığında doğru orana ve kalite kontrole dikkat edilmelidir. SIFCON üretiminde sadece ince kum kullanılabilir ve maksimum tane büyüklüğü 30 no'lu elekten geçebilecek kum tercih edilmelidir. Aşırı akıcı karışımlarda kum dibe çökerken aşırı viskoz karışımlarda işlenebilirlikte sorun çıkacaktır. Önerilen akış 25–40 saniye aralığındadır. Lif yoğunluğu arttığında karışımın akıcılığı ona göre tasarlanmalı ve vibrasyon uygulanmalıdır. SIFCON içerisinde kum doğru şekilde kullanıldığında maliyet düşer ve dayanımda azalma meydana gelmez (Mondragon, 1988).

Taze haldeki (plastik haldeki) SIFCON'a özel bir kalıp sistemiyle basınç uygulanan bir çalışmada, boşluklarda azalma oluşmuş, mikro-agregalar ile bağlayıcı arasındaki ve fiber-matris arasındaki aderansta artma meydana gelmiş; birim hacim ağırlık artmış, dürabilite özellikleri iyileşmiştir. Bunun yanı sıra, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri artmıştır (İpek ve diğ, 2014).

Yerlikaya'nın yapmış olduğu çalışmada (2003), SIFCON ile hazırlanan ince plaklar, kayma donatısı yetersiz kirişlerin çevresine sarılarak güçlendirme levhası olarak kullanılmıştır. Kirişin yük-sehim eğrisi incelenmiştir. Tokluk, süneklik ve yük taşıma kapasitesinde artış görölmüştür.

Bir başka çalışmada %4–10 arasında ucu kancalı çelik lif içeren SIFCON numuneler üzerinde basınç dayanımı ve çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda numunelerin lif içeriklerinin artması ile çekme dayanımları ve kırılma enerjilerinin arttığı görölmüştür. Basınç dayanımında lif oranına bağlı bir değişim meydana gelmemiştir (Wecharatana & Lin, 1992).

Yan ve diğ. (2002) yaptıkları çalışmada, SIFCON'da lif miktarı arttıkça basınç, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu değerlerinde belirgin bir şekilde artış gözlenmiştir. En büyük artış kırılma tokluğu değerlerinde olmuştur. Deney sonucunda numunelerde oluşan çatlak şekilleri incelendiğinde lif miktarı arttıkça kiriş yan yüzeylerinde oluşan çatlakların daha homojen olarak yüzeye dağıldığı görölmüştür.

Tuyan ve Yazıcı (2012), SIFCON içerisindeki çelik lifin aderansını ve davranışını incelemişlerdir. SIFCON bulamacının karışım oranları, kür koşulları, çelik lif yönlenme oranı ve gömülme uzunluğu üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bulamaç dayanımının artması, uygun kür uygulanması ve lif çapının artması ile lif aderansının arttığı görölmüştür. Çekip çıkarma deneyinde lif gömülme derinliği arttıkça aderans artmasıyla birlikte tokluk da artmıştır. Kancalı liflerin, düz liflere göre aderansının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Rao ve diğ. (2010) çalışmalarında, normal beton, lifli beton, betonarme, %8, %10, %12 lif içerikli SIFCON ve %8, %10, %12 lif içerikli ve donatılı SIFCON üzerinde darbe deneyi yapmışlardır. Deney numunesi olarak plakalar üretmiş ve numunelerin orta noktasına, geliştirilen deney düzeneği sayesinde çarpma etkisi uygulamışlardır. Deney sonucunda numunelerin enerji yutma kapasiteleri ve çarpma etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. 100 mm çapında ve 50 N ağırlığındaki çelik bilye, plakada delik oluşturana kadar 45 cm yükseklikten numunenin orta noktasına düşürölmüştür. Ardından, plağın arka tarafında hasar oluşturması için gerekli düşüş sayısı kaydedilmiş ve enerji yutma miktarı hesaplanmıştır. En iyi sonucu %12 lif içeren donatılı SIFCON göstermiştir ve bu numunede parçalanma en az olmuştur.

Silindir geometriye sahip betonarme kolonlarda farklı malzemelerle (SIFCON, DUCON, UHPC) güçlendirme yapıldığında, SIFCON kolonun tek eksenli basınca maruz kalması durumunda betonarme kolona göre çok daha fazla yük taşıyabildiği (%85) görülmüştür. Enerji yutucu ince bir tabaka eklenmesi, yük taşıma kapasitesinde büyük artış sağlamıştır (Roller ve diğ, 2013).

İpek ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, çimento bulamacı infiltre edilmiş lifli betonda (SIFCON) genel olarak kullanılan iki ucu kancalı liften farklı olarak farklı geometriye ve malzeme yapısına sahip liflerin, SIFCON'un mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi incelenmiştir. Numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, kırılma tokluğu, ultrases geçiş hızı, Schmidt test çekici deneyleri yapılmıştır. Mekanik özellikler üzerinde çelik liflerin polipropilen liflere göre daha iyi olduğu, birim dayanım maliyet yönünden incelendiğinde ise dalgalı geometriye sahip çelik lifin daha ekonomik olduğu görülmüştür. Korozyon riskinin yüksek olduğu yerlerde ise daha düşük dayanıma sahip olmasına rağmen polipropilen liflerin kullanımının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Farnam ve diğerleri tarafından (2010), HSC, HPFRC ve iki tür SIFCON (çelik lif $v_f=0, 2, 5$ ve 10) üzerinde üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir ve şu sonuçlara varılmıştır:

- Üç eksenli mekanik özellikler, çelik lif miktarı ve sargılama basıncına bağlıdır.
- Çelik lif miktarı ve sargılama basıncı arttıkça sünek davranış gözlenir; tokluk, üç eksenli basınç dayanımı ve Poisson oranı artar.
- SIFCON yüksek süneklik ve üç eksenli basınç dayanımına sahiptir.

Xie ve Özbakkaloğlu'nun yaptığı çalışmada (2015), yüksek dayanımlı beton dolgulu lifli polimer kompozit tüpler (HSCFFT), çelik lif donatılı yüksek dayanımlı beton dolgulu lifli polimer kompozit tüpler (SFRHSCFFT) ve SIFCON dolgulu lifli polimer kompozit tüpler (SIFCONFFT) üzerinde eksenel basınç deneyi yapılmıştır. Yeterince sargılanmış HSCFFT ve diğer numuneler yüksek süneklik göstermiştir. $v_f=5$ içeren SIFCONFFT'nin en iyi basınç dayanımına sahip olduğu ve en fazla deformasyonu yaptığı görülmüştür. Lif miktarı arttıkça gerilme-şekil değiştirme grafiğinde pik sonrası düşüş azalmıştır.

Abdollahi ve diğ. (2012) yaptığı çalışmada, SIFCON ve GFRP sargılama ile güçlendirme yapılmış ve SIFCON'un güçlendirmede daha etkili olduğu sonucuna

varılmıştır. Her iki durumda da dayanım, birim şekil değiştirme ve enerji yutma kabiliyeti artmıştır. Sargı kalınlığı, güçlendirme üzerinde en etkili parametre olmuştur. Lif uzunluğunun belirgin bir etkisi olmamıştır ve GFRP'nin lif yönlenmesine karşı oldukça hassas olduğu görülmüştür.

Yazıcı ve diğ. (2005), yaptıkları çalışmada yüksek miktarda C sınıfı uçucu kül kullanımının otoklav kürü uygulanmış SIFCON'un mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, çimento %60'a varan miktarda uçucu kül ile değiştirilmiş ve üç farklı miktarda (v_f =%2, 6, 10) çelik lif kullanılmıştır. Sonuç olarak, mekanik özellikler uçucu kül kullanımıyla iyileşmiştir. Artan lif miktarıyla birlikte eğilme dayanımı ve tokluk önemli derecede artmıştır. %10 lif oranında %60 uçucu külle 55 MPa eğilme dayanımı değerine ulaşılmıştır.

2.3 Atık Ürünlerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi

Atık ürünlerin geri dönüşümle yeniden kazandırılması, çevreye ve ekonomiye fayda sağlayacaktır. Beton üretiminde kullanılan ham maddelerin elde edilmesi sırasında gereken yüksek miktardaki enerji göz önünde bulundurulduğunda, atık malzemelerin beton içerisinde değerlendirilmesi fikri ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda, kullanılacak atık malzemenin özellikleri ve betonun dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik özelliklerine etkisi üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yıkılan binalardan elde edilen agreganın betonda yeniden kullanımı veya sanayide yan ürün olarak ortaya çıkan bazı puzolanların kullanımı söz konusu olabildiği gibi, bitki kabuklarının, atık plastik poşet liflerinin, atık çeliklerin lif olarak kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Avrupa Çimento Birliği'ne göre beton talebi artan bir eğilim göstermekte ve küresel çimento üretiminin 2017 yılında 4,7 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir (CEMBUREAU, 2017). Üretimi sırasında açığa çıkan yüksek miktardaki karbondioksit, bu sürecin çevreye zarar vermesine sebep olmaktadır. Bu çevre kirleticisi prosesin olumsuz etkilerinden kaçınmak için alternatif yapı malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada, düşük miktarlarda çimento kullanılarak veya bağlayıcı olarak çimento olmadan üretilebilen alkali ile aktive edilen malzemeler, atık veya yan ürünler kullanılarak üretilebilme gibi çeşitli avantajları ile ön plana çıkmaktadır. Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf, Portland çimentosuna nazaran daha çevre dostu bir malzemedir (Ding ve diğ, 2018).

Doğal puzolanlar, en eski yapı malzemelerinden biridir. Kireç-puzolan çimentoları çok uzun süredir kullanılmaktadır ve dayanıklılıkları açısından iyi bir üne sahiptir. Puzolanlar, Portland çimento betonunda çimento ikamesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Puzolanların kullanımı, daha düşük maliyet ve daha iyi dayanıklılık avantajlarına sahiptir, ancak puzolanların daha uzun bir priz süresi ve daha yavaş bir erken dayanım gelişimi gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için doğal puzolanların reaktivitesini arttırmak amacıyla farklı teknikler denenmiştir. Doğal puzolanların puzolanik aktivitesini arttırmak için kullanılan çeşitli yöntemler gözden geçirilmiş ve tüm aktivasyon yöntemleri üç kategoride sınıflandırılmıştır: termal, mekanik ve kimyasal aktivasyon. Mukavemet-maliyet ilişkisine dayalı bir karşılaştırma, kimyasal aktivasyon yönteminin en etkili ve en ucuz yöntem olduğunu göstermektedir (Shi, 2001).

Alkali aktivasyon yoluyla alternatif yapı malzemelerinin üretiminde, atık malzemelerin tekrar değerlendirilmesi üzerine birtakım çalışmalar mevcuttur (Alonso ve diğ., 2018; Beghoura ve diğ., 2017; Bernal ve diğ., 2016; Bobirică ve diğ., 2015; Christiansen, 2013; Novais ve diğ., 2016; Robayo-Salazar ve diğ., 2017; Tashima ve diğ., 2016; Toniolo ve diğ., 2018). Alkali ile aktive edilen malzemelerin öncülleri doğrudan kullanılabilirdiği gibi, yüksek sıcaklıklarda öğütme, kalsinasyon ve termal aktivasyondan sonra da kullanılabilirler (Provis ve diğ., 2015). Aktivatör üretimi ile ilgili emisyonlar dikkate alındığında dahi, alkali ile aktive edilen malzemeler sürdürülebilir kalkınmada, Portland çimentosuna göre üstünlüklere sahiptir (Provis ve diğ., 2015). Uzun dönemdeki dürabilite özelliklerinin araştırılmasına ihtiyaç duyulmakla birlikte, alkali ile aktifleştirilmiş cüruf, Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında, düşük hidrasyon ısı, daha erken ve daha yüksek dayanım, asit etkisine, kimyasal etkilere ve donma-çözülme döngülerine karşı daha iyi direnç gibi çeşitli avantajlara sahiptir (Provis ve diğ., 2014; Wang ve diğ., 1994).

Rooholamini ve diğ. (2020), farklı puzolanik malzemelerle ürettikleri alkali aktifleştirilmiş betonlarda mekanik özellikleri ve kırılma davranışını incelemişlerdir. Bu malzemelerin çekme ve kesme performansının, Portland çimento betonu ile neredeyse aynı olduğu sonucuna varmışlardır. Pull-off yapışma testi ve görüntü işleme sonuçlarına göre, farklı alkali aktifleştirilmiş cürufli beton karışımlarındaki yüksek hamur mukavemetinin, daha iyi bir agrega-hamur bağ kuvveti oluşturduğunu;

alkali aktive cüruf betonlarının Portland çimento betonunkine benzer mekanik dayanım sergilediğini ifade etmişlerdir.

Uçucu kül ve öğütölmüş yüksek fırın cürufu gibi, alkali ile aktifleştirilmiş harç ve betonlarda kullanılan bazı puzolanik malzemeler, geri dönüştürülebilir endüstriyel yan ürünlerdir. Cam, beton endüstrisinde kullanılabilecek bir başka geri dönüştürülebilir malzemedir (Šimonová ve diğ, 2017; Lu ve diğ, 2017a; Lu ve diğ, 2017b; Lu ve diğ, 2017c). Cam agregalar hafif beton üretiminde kullanılabilirken atık camlar da hafif malzemeler üretmek amacıyla kullanılabilmektedir (Kastiukas ve diğ, 2019). Alkali-silika reaksiyonu (ASR), agrega olarak cam kırığı içeren karışımlarda bir dürabilite problemi olarak karışımıza çıkabilmekle beraber bu harçlarda atık cam tozu ile birlikte nano-silikaların kullanılması, ASR'nin neden olduğu hacim artışını azaltabilmektedir (Afshinnia ve Rangaraju, 2015; Cai ve diğ, 2019; Idir ve diğ, 2010; Lu ve diğ, 2017b; Zheng, 2016). Karışık cam kırıkları, partiköllerin inceliğı ile artan puzolanik aktiviteye sahiptir (Idir ve diğ, 2011). Cam tozu kullanımı, puzolanik reaksiyonu sayesinde ve mikro dolgu etkisi ile iç mikro yapıyı iyileştirerek ve ilerleyen yaşlarda yüksek yoğunluklu C-S-H içeriğini arttırarak sünmeyi azaltmada yararlı olabilir (He ve diğ, 2019). Cam tozu içeren cam esaslı harçlar, asit etkisine karşı iyi bir performans sergilerken ASR genişmesine karşı da iyi bir direnç gösterir (Lu ve diğ, 2017c). Lu ve diğ. (2017a), çimento yerine atık cam tozu kullanılmasının daha düşük hidratasyon ısısı ile sonuçlandığını bulmuşlardır. Erken yaşlarda, atık cam tozu düşük puzolanik aktiviteye sahiptir ancak mekanik özellikler daha ince atık cam tozu kullanılarak zamanla geliştirilebilmiştir (Lu ve diğ, 2017a). Cercel ve diğ. (2020), yüksek fırın cürufu ve cam tozunun bağlayıcı olarak kullanıldığı, alkali ile aktifleştirilmiş çevre dostu harçlar üreterek basınç dayanımı ve permeabilite özelliklerini incelemiş, harç kalitesini değerlendirmek üzere tahribatsız deney yöntemlerinden faydalanmışlardır. Çalışmalardan elde ettikleri bulgularla, harç karışımlarında, alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcıların Portland çimentosuna sürdürülebilir bir alternatif olabileceğı sonucuna varmışlardır (Cercel ve diğ, 2020).

Atık cam, ticari sodyum silikat hidratlar için uygun bir ikame olabilir (Puertas ve Torres-Carrasco, 2014; Torres-Carrasco ve diğ, 2015; Torres-Carrasco ve Puertas, 2015). Vinai ve Soutsos (2019), sodyum hidroksit, cam kırıntısı tozu ve suyu karıştırarak ve bu karışımı fırında iki saat boyunca 330°C'de ısıtıp daha sonra tozu

toplayarak karbon ayak izi düşük toz aktivatörü geliştirmişlerdir. Alkali aktivatörün alkali aktifleştirilmiş malzemelerde en ciddi rolü, alüminosilikatın çözülmesi ve reaksiyonun en az 11,5 olması gereken yüksek pH dereceleri ile hızlandırılmasıdır (Torres-Carrasco ve Puertas, 2017a).

Alkali aktifleştirilmiş harç üretiminde, farklı atık cam kaynakları yeniden kullanılabilmekte olup camların reaktifliği, hidrasyon ürünleri ve alkali aktifleştirilmiş harçların performansı atık camdaki oksit içeriğine bağlıdır (Liu ve diğ., 2019; Martinez-Lopez ve Escalante-Garcia, 2016; Wang ve diğ., 2017; Wang ve diğ., 2016). Betonda uygun bir yapı oluşumu, esas olarak cam tozunun kimyasal bileşimi, parçacık boyutu ve safsızlıklarından etkilenir (Vaitkevičius ve diğ., 2014). Çimento esaslı malzemelerde, mikro ölçekli tane dağılımına sahip cam tozu, puzolan olarak kullanılabilir ve çimento hamurlarında mikro yapıyı iyileştirerek elektriksel özdirenci artırır (Kamali ve Ghahremaninezhad, 2016). Eklenen atık camın parçacık boyutu, alkali ile aktive edilen malzemelerin basınç mukavemetini ve su emme kapasitesini etkiler (Marcin ve diğ., 2018).

Mekanik özellikleri ve yangın dayanımlarıyla, alkali aktifleştirilmiş çimento harçlarında öncül olarak atık cam kullanımı uygulanabilir bulunmuştur (Lu ve Poon, 2018). Son çalışmalarda, yüksek miktarda silis içeren cam tozu, geopolimer harç ve betonlardaki uçucu külün yerine alternatif bir bağlayıcı olarak kullanılmıştır (Abdollahnejad ve diğ., 2017; Sasindran ve Muñoz-San José, 2017). Alkali aktive edilmiş harçlarda bağlayıcı olarak atık camın potansiyel kullanımının uygulanabilirliği doğrulanmış ve mikro-yapısal analizde ana reaksiyon ürününün C-(N)-A-S-H tipi jel olduğu bulunmuştur (Zhang ve diğ., 2017). Tungsten madenciliği atığı kullanılarak üretilen alkali aktifleştirilmiş malzemelerde atık cam ilavesi, reaktif silis açığa çıkarması ve CaO içeriği ile basınç mukavemetini arttırmış ve tungsten madencilik atığının amorfluk derecesini geliştirmiştir (Kastiukas ve diğ., 2017; Kastiukas ve Zhou, 2017). Cam tozu, fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri açısından değerlendirildiğinde, F sınıfı ve C sınıfı puzolanik malzeme sınırlarını karşılamakta olup çimento yerine cam tozunun kullanılması taze halde beton çökme değerini arttırırken, cam tozunun çimento ilavesi olarak kullanımı yoğunluğu arttırmış, su emme değerlerini azaltmış ve mekanik özellikleri iyileştirmiştir (Aliabdo ve diğ., 2016). Kür ortamının bağıl nemi, cam içeren alkali ile aktifleştirilmiş hamurların mukavemet kazanma hızı üzerinde önemli bir etkiye

sahiptir (Torres-Carrasco ve Puertas, 2017b). Bununla birlikte, dayanım değerleri, alkali kimyasal aktivasyona direnci nedeniyle, cam atık içeriğinin artmasından olumsuz etkilenebilir (Torres ve diğ., 2009). Kalsiyum alüminat çimentoları kullanılarak atık cam tozuna reaktif alümina ilavesi, geopolimerizasyon reaksiyonunu arttırabilir ve daha yoğun bir mikro yapı sağlar, böylece mekanik özellikleri ve çiçeklenme problemini iyileştirir (Vafaei ve Allahverdi, 2017).

Hurda lastikler gibi zararlı olma potansiyeli olan atık ürünlerin mevcut teknoloji kullanılarak değerli bir kaynağa dönüştürülmesi mümkündür (Reschner, 2008). Otomobil lastiklerinde Şekil 2.1’de görüldüğü gibi kullanılmakta olan çelik teller, lastik kullanılamaz duruma geldiğinde beton içerisinde yeniden değerlendirilebilmektedir.



Şekil 2.1 : Otomobil lastiği kesiti (Url-1, 2015).

Otomobil lastiklerinde kullanılan çelik teller yüksek çekme dayanımına (1500-1900 MPa) sahip olup atık otomobil lastiklerinden elde edilen ve bir miktar kauçuk kaplı çelik tellerin (Şekil 2.2-b), betonda kullanıldığı bir çalışmada şu sonuçlara varılmıştır: Bu malzeme betonda düşük miktarlarda kullanılabilir. Hacimce %4’e kadar olan miktarlarda işlenebilirlikte sorun olmamakla birlikte, artan miktarlarda, işlenebilirlik olumsuz etkilendiği gibi basınç dayanımı da düşmüştür. Bu malzeme betonun yoğunluğunu bir miktar düşürmektedir. $v_f = \%2$ iken basınç dayanımındaki düşüş %2 olmuş, süneklikteki artış ise %20 olmuştur, bununla birlikte tokluk da artmıştır. Artan atık malzeme miktarıyla birlikte yarmada çekme dayanımı düşmüş ancak numuneler dağılmamıştır, çünkü çelik teller donatı gibi davranmıştır. Artan atık malzeme miktarıyla kauçuk içeriğinin artışı ve topaklanma etkisi betonda olumsuz etki yaratmıştır (Papakonstantinou ve Tobolski, 2006).



Şekil 2.2 : (a) Lastik parçası (b) Çelik tel (Papakonstantinou ve Tobolski, 2006).

Lastik parçaları (Şekil 2.2-a), iri agrega yerine kullanıldığında tokluk ve süneklikte büyük miktarda artış olmasına rağmen, basınç dayanımında meydana gelen düşüş nedeniyle bu malzemenin betonda kullanılabilirliği sınırlıdır, iri agrega yerine tamamen bu malzeme kullanıldığında %85'e varan basınç dayanımı düşüşü gözlenmiştir (Li ve diğ, 2004a; Li ve diğ, 2004b). Kullanılan lastiğin türüne göre malzeme özelliklerinde değişim olmaktadır, otomobil lastiği yerine tır lastiği kullanıldığında malzeme mukavemeti ve rijitliği artmaktadır.

Canbaz ve Çelikten (2020), kırılmış atık taşıt lastiklerinin SIFCON üretiminde farklı bağlayıcılarla değerlendirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, kırılmış taşıt lastiklerinin lif olarak kullanılmasıyla, CEM I çimentosu ile 12 MPa eğilme dayanımına sahip SIFCON kompozitler üretilebileceği sonucunu elde etmişlerdir.

Ghernouti ve diğ. (2015), atık plastik poşet lifleri içeren kendiliğinden yerleşen betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, lif uzunluğu ve lif miktarının bu özelliklere etkisini, üretilen kompozitin gerilme-şekil değiştirme ve yük-sehim davranışını araştırmışlardır. Su/çimento oranı 0,40 olan on dört adet kendiliğinden yerleşen beton karışımı üzerinde çalışmışlardır; bu karışımların on iki adedi değişmekte olan lif uzunluğuna (2, 4, 6 cm) ve lif miktarına (1, 3, 5, 7 kg/m³) sahipken, bir adedi 1 kg/m³ polipropilen lif içermekte, bir adedi ise (şahit numune) hiç lif içermemektedir. 2 cm uzunluğunda atık plastik poşet lifi içeren numuneler, lif miktarından bağımsız olarak kendiliğinden yerleşme özelliğini sağlamış olup atık plastik poşet lifleri kendiliğinden yerleşen betonda mikro çatlak gelişimini geciktirmiştir. Bununla birlikte bu liflerin basınç ve eğilme dayanımlarına belirgin bir katkısı olmamıştır, ancak 28 günlük yarmada çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Çekme dayanımındaki iyileşme %4 ile %74 arasında, lif miktarına bağlı olarak değişmiştir, lif uzunluğunun çekme dayanımı üzerinde bir

etkisi olmamıştır. Atık plastik poşet lifi kullanımı, geri dönüşüme katkısıyla çevresel fayda sağlamış olup kendiliğinden yerleşen betonda, taze ve sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirmiştir (Ghernouti ve diğ, 2015).

Kendiliğinden yerleşen harç üretiminde ince agrega yerine atık plastiklerin kullanıldığı bir çalışmada, akıcılık özelliği iyileşmiş, 28 günlük numunelerde plastik ile çimento hamuru arasında adhezyon olduğu görülmüş, artan atık plastikle birlikte eğilme dayanımında düşüş gerçekleşmiştir. Aynı çalışmada, kum ağırlığının %20'si ile 50'si arasındaki atık plastik içeriğinin %15–33 arasında basınç dayanımı düşüşüne neden olduğu ve düşük yoğunluklu harçların üretiminde atık plastik kullanımının kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır (Safi ve diğ, 2013).

Endüstriyel atık liflerin beton üretiminde kullanılması üzerine yapılan çalışmalarla, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı sürdürülebilir bir beton üretiminin gerçekleştirilmesi yolunda önemli adımlar atılmaktadır (Sekar, 2004; Tlemat ve diğ, 2006; Wang ve diğ, 2000; Meddah ve Bencheikh, 2009; Aiello ve diğ, 2009; Yang ve diğ, 2019; Neocleous ve diğ, 2006). Bu tez çalışmasıyla, atık çelik tellerle, öğütülmüş atık camın aktivatör olarak kullanıldığı ve demir-çelik endüstrisi yan ürünü olan yüksek fırın cürufunun bağlayıcı olarak kullanıldığı bir malzeme üretilip özellikleri incelenerek literatüre katkı sağlanacaktır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Alkali ile Aktifleştirilmiş Harçlar

Alkali ile aktive edilen karışımlar, çimento içermedikleri için daha sürdürülebilir ve çevre dostu olma gibi avantajlara sahip malzemelerdir. Tez çalışmasının bu bölümünde, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilmiştir. Öğütülmüş atık camın sodyum silikat yerine silikat kaynağı olarak kullanımı araştırılmıştır. Bu kısımdaki deneysel çalışmanın temel amacı, atık camın alkali ile aktifleştirilmiş karışımların özellikleri üzerindeki etkileri hakkında daha fazla veri elde etmektir. Bu amaçla, alkali ile aktive edilmiş harçlar üretilmiş ve atık camın aktivatör çözeltilerinde bir silikat kaynağı olarak kullanılabilirliği, mekanik deneyler ve dürabilite deneyleri yapılarak incelenmiştir. Sodyum silikat yerine öğütülmüş atık cam kullanılarak farklı molaritelerde sodyum hidroksit içeriğine sahip harç karışımları üretilmiştir. Karışımların mekanik özellikleri ve dürabilite özellikleri üç farklı kür koşulunda incelenmiştir: su kürü, hava kürü ve 60°C’de 24 saat beklettikten sonra hava kürü. Numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Kapiler su emme, su emme, hızlı klor geçirimsizliği, elektriksel özdirenç, donma-çözülme ve sülfat direnci deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, atık camın alkali aktifleştirilmiş harçlarda alternatif bir silikat kaynağı olarak kullanılabileceği öngörülmüştür.

3.1.1 Malzemeler

3.1.1.1 Çimento

Çimento, yalnızca referans numunelerin üretiminde kullanılmış olup kullanılan çimento CEM I 42,5 R Portland çimentosudur.

3.1.1.2 Agrega

Harç üretiminde kullanılan ince agrega, Limak firmasından temin edilen Rilem-Cembureau standart kumudur.

3.1.1.3 Su

Su, yalnızca, çimento içeren referans numunelerin üretiminde kullanılmıştır. Alkali ile aktiveleştirilmiş harçlarda, aktivatör çözeltinin haricinde ilave su kullanılmamıştır.

3.1.1.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

Harç üretimlerinde iki farklı öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Cürufların fiziksel analiz sonuçları Çizelge 3.1’de, kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu-I (YFC-I), Ciner İnşaat adlı firmadan temin edilmiş olup kaynağı, Adana Çimento San. Tic. A.Ş. İskenderun tesisleri fabrikasıdır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu-II (YFC-II), Bağdan Beton (Kırklareli) adlı firmadan temin edilmiş olup kaynağı, Zonguldak-Ereğli demir çelik fabrikasıdır.

Çizelge 3.1 : Öğütülmüş yüksek fırın cürufu için fiziksel analiz sonuçları.

	YFC-I (%)	YFC-II (%)
Özgül yüzey alanı (Blaine) (cm ² /g)	5040	5240
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,88	2,92
0,090 mm elekte kalıntı (%)	0,1	--
0,045 mm elekte kalıntı (%)	1,1	--
Priz başlangıcı (dakika)	200	195
Referans priz başlangıcı (dakika)	181	130

Çizelge 3.2 : Öğütülmüş yüksek fırın cürufu için kimyasal analiz sonuçları.

Bileşen	YFC-I (%)	YFC-II (%)
Kızdırma Kaybı	1,89	0,05
CaO	37,01	37,56
SiO ₂ -çözünen	39,79	-
Erimez Kalıntı	-	-
Al ₂ O ₃	11,91	17,63
S ⁻² (Sülfür)	0,49	0,57
Fe ₂ O ₃	1,00	0,35
MgO	6,34	5,55
K ₂ O	0,76	0,46
Na ₂ O	0,19	0,49
Toplam Alkali-Na ₂ O Eşdeğeri (Na ₂ O+0,658K ₂ O)	0,69	0,79
SO ₃	0,60	0,25
Cl ⁻	0,0049	0,0157
Serbest CaO	-	-
Rutubet	0,1	0,06
Mekanik Özellikler-Aktivite İndeksi (Basınç Dayanımı)	7 günlük: 56,79 28 günlük: -	7 günlük: 54,0 28 günlük: 73,6
Mineralojik Özellikler (Camsı Faz)	100,00	100,00

3.1.1.5 Sodyum hidroksit

Kullanılan sodyum hidroksit katı formda olup %99 saflıktadır. Farklı molaritelerde sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken katı haldeki sodyum hidroksit, su içerisinde çözülmüştür, gerçekleşen reaksiyon ekzotermik olduğundan, çözelti üretimde kullanılmadan önce, yeterli soğumanın sağlanması için en az 24 saat beklenmiştir.

3.1.1.6 Sodyum silikat

Atık cam içermeyen numunelerde Koray Kimya'dan temin edilen, 85 kg ambalajlı, sıvı haldeki sodyum silikat kullanılmıştır. Kullanılan sodyum silikatın özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Sodyum silikatın özellikleri (Url-2, 2020).

Yoğunluk	2,61 g/cm ³
Kaynama noktası	83°C, %68 saflıktaki solüsyon için 121°C
Erime noktası	1,088°C
Molar kütle	122,06 g/mol

3.1.1.7 Cam

Alkali aktivasyonunda atık cam kullanımı üzerine, çeşitli araştırmacılar tarafından yüksek alkali ortamda atık camın çözünürlüğüne ilişkin farklı denemeler yapılmıştır. Puertas ve diğ. (2015) tarafından yapılan bir araştırmada, bu denemeler üç farklı grup altında incelenmiştir:

- Oda sıcaklığı (22±2°C)
- Yüksek sıcaklık (80±2°C)
- Mekanik+kimyasal işlem uygulanarak (öğütücü kullanımı ve ortam sıcaklığında sabit hızla manyetik karıştırma ile) oda sıcaklığı (22±2°C)

koşullarında atık camın çözünürlüğü araştırılmıştır. Bu çalışmada katı/sıvı oranı (1:100), 1 gram cam için 100 mL çözelti olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin dışında atık cam boyutu olarak üç tip parçacık boyutu (<45 µm, 45–90 µm, >125 µm) kullanılmıştır. Karıştırma süreleri 10 dakika, 2 saat, 4 saat ve 6 saat olarak değiştirilmiştir. Üç farklı tip çözelti hazırlanmıştır: Referans olarak kullanılan distile su (pH=7), %5 Na₂O konsantrasyonunda NaOH çözeltisi (pH=13,8) ve %5 Na₂O konsantrasyonunda 1:1 NaOH/Na₂CO₃ çözeltisi (pH=13,6). Mekanik işlem uygulanırken çelik bilyeli öğütücüde cam öğütülmüştür. En iyi öğütme 5 gram katı,

500 mL çözelti ve 1 kg çelik bilye ile gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan çelik bilyelerin %2,5'i 20 mm çapında, %12,3'ü 15 mm çapında, %29,3'ü 9 mm çapında ve %56'sı 5 mm çapındadır. En iyi sonuç (en fazla çözünen SiO_2 ve Al_2O_3) $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ çözeltisinde (%5 Na_2O), $80\pm 2^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılarak (6 saat) uygun filtreleme uygulanmasıyla alınmıştır. Atık cam boyutu küçüldükçe çözünürlüğün arttığı belirtilmiş ve atık camın alkali aktivasyonunda kullanılabileceği ifade edilmiştir (Puertas ve diğ, 2015).

Kouassi ve diğ. (2010), atık camın yüksek alkali çözeltiler içerisindeki çözünürlüğünü araştırmışlardır. Bunun için üç farklı cam kullanmışlar, farklı parçacık boyutu dağılımındaki camlarla farklı sıcaklık ve konsantrasyonlardaki alkali çözeltiler kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Ana sonuçlar, camın çözünme hızının reaksiyonun sıcaklığı, cam bileşimi ve parçacık boyutu dağılımından büyük ölçüde etkilendiğini ve alkali çözelti konsantrasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Çözünme hızı ayrıca dağlama çözeltisindeki alkali katyondan da etkilenmiştir (Kouassi ve diğ, 2010).

Alkali ile aktifleştirilmiş harç üretiminde sodyum silikat yerine silikat kaynağı olarak kullanılan cam, Perhabbe firmasından temin edilmiş olup bu malzeme daha sonra bilyalı değirmende öğütülerek yüzey alanı arttırılmıştır. Deney programında kullanılan camın pH değeri 8 ile 11 arasında değişmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan camın XRF yöntemi ile kimyasal analizi Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Camın XRF ile kimyasal analizi (Url-3, 2020).

Bileşen	%
Kızdırma Kaybı	2,33
CaO	4,35
SiO_2	72,95
Al_2O_3	0,41
TiO_2	0,03
Fe_2O_3	0,09
Mn_2O_3	0
MgO	0,89
K_2O	0,2
Na_2O	18,74
SO_3	0
Cl^-	0

Perhabbe adlı firmadan temin edilen, tane boyutu 100–250 mikron arasında değişen atık cam, bilyalı değirmende öğütülürken değirmen ilk olarak dakikada 500 devirde, 10 dakika çalıştırılmış ve 45 mikronun üzerinde elek üstü kalan malzeme %65,5 olmuştur. Tekrar dakikada 500 devirde, 10 dakika süreyle aynı işlem gerçekleştirilmiş, bu sefer elek üstü kalan malzeme %46 olmuştur. Bunun üzerine dakikada 1000 devirde, 20 dakika daha öğütülmüş, elek üstü kalan malzeme %19 olmuş, yine hedeflenen 45 mikron tane boyutuna ulaşamamıştır. Son olarak tekrar dakikada 1000 devirde öğütme işlemi gerçekleştirilmiş ve 45 mikron elek üstü kalan malzeme %8 olmuştur.

Öğütme işlemi sonucunda, atık camın özellikleri Çizelge 3.5’te verilmiştir. Bu atık cam, sodyum silikat yerine, silikat kaynağı olarak alkali aktivatörün içerisinde kullanılmıştır, malzeme inceliği arttıkça aktivatör performansı arttığı için öğütme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 3.5 : Öğütülmüş atık camın özellikleri.

Malzeme: Cam Kırığı	
Miktar: 2750 gram	Devir sayısı: 3000 devir/dakika
Özgül Ağırlık:	2,35 g/cm ³
Blaine:	7115 cm ² /g
45 mikron üstü kalan malzeme:	%8

Bu çalışmada, sodyum silikatın bir alternatifi olarak, farklı konsantrasyonlardaki bir litre sodyum hidroksit çözeltisine, yüksek miktarlarda silisyum dioksit içeren 150 g atık cam tozu ilave edilmiş, bu karışım 80° C sıcaklıkta 6 saat boyunca karıştırılmış ve süzülmüştür. Tüm aktivatör çözeltileri, yeterli soğutmayı sağlamak için hazırlandıktan en az 24 saat sonra harçlarda kullanılmıştır. Atık camla yapılan üretimlerde Le Chatelier halkası ile gerçekleştirilen deneylerde iğneler arası açılma 2 mm kadar olmuştur.

Öğütülmüş atık camın dışında, aktivatör olarak kullanılabilecek, alkali özellik gösteren atıklar araştırılmış, tekstil endüstrisinden kaynaklanan arıtma çamurunun sulu çözeltisinin 8,55 pH değerine sahip olduğu, hafif bazik, az nemli, hem inorganik, hem de organik içeriğe sahip olduğu ve yüksek organik karbon içeriğinde olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu maddenin kalorifik değeri yüksek olup yakma açısından uygun yapıda olduğu değerlendirilmiş, yüksek kalsit içeriği nedeniyle prosesinde yüksek ısı olan çimento üretimi, tuğla vb. üretiminde ham madde olarak kullanımı mümkün görülmüştür. Alkali ile aktifleştirilmiş malzeme üretiminde daha

yüksek pH içeriğinin daha iyi malzeme özellikleri ile sonuçlanması öngörüldüğünden, bu malzeme ile üretim yapılmamış, atık olarak cam kullanımının etkileri incelenmiştir.

3.1.2 Harç tasarımı

Alkali ile aktifleştirilmiş harçlarda, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, standart kum, sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikattan oluşan alkali aktivatör kullanılmıştır. Harç üretiminde 8 M ile 14 M arasında değişen molaritelerde (8, 10, 12 ve 14 M) farklı sodyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Alkali ile aktifleştirilmiş harç tasarımı Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Alkali ile aktifleştirilmiş harç tasarımı.

	Metreküp başına miktar (kg/m ³)
Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	860
Standart kum	1388
Sodyum silikat	267
Sodyum hidroksit çözeltisi	107
İlave su	0
Katkı	0

Referans (R) karışımlar, aynı miktarlarda standart kum, öğütülmüş yüksek fırın cürufu yerine CEM I 42.5 R Portland çimentosu, aktivatör çözelti yerine su kullanılarak hazırlanmıştır.

Atık cam içeren alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçları, sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile hazırlanan aktivatör çözelti kullanılarak üretilmiş olup herhangi bir ticari sodyum silikat içermemektedir. Alkali ile aktifleştirilmiş harçlarda aynı tasarım kullanılmış, aktivatörün toplam miktarı sabit tutulmuştur. Atık cam içeren aktivatörler, 10 M, 12 M ve 14 M molaritelerinde sodyum hidroksit çözeltileri kullanılarak hazırlanmıştır. Aktivatörün toplam miktarı, tüm karışımlar için sabit tutulduğundan, artan sodyum hidroksit konsantrasyonlarıyla harçların işlenebilirliği azalmıştır. Su/bağlayıcı oranı, artan NaOH çözeltisi molariteleri ile azalmıştır.

3.1.3 Harç üretimleri

Atık camın aktivatör olarak kullanılabilirliğini araştırmak üzere, ilk grup üretim, karşılaştırma yapabilmek için ticari sodyum silikat ve farklı molaritelerde hazırlanan (8 M, 10 M, 12 M ve 14 M) sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer grup üretimde ise sıvı sodyum silikat yerine silikat kaynağı

olarak atık cam kullanılmıştır. Bu amaçla öğütölmüş haldeki atık cam 6 saat süreyle 80°C sıcaklıkta, farklı molaritelerdeki (10 M, 12 M ve 14 M) sodyum hidroksit çözeltisi içinde karıştırılmış ve filtreleme yapılmıştır.

Çimento içeren referans numune, öğütölmüş yüksek fırın cürufu yerine Portland çimentosu, aktivatör yerine su ve ince agrega olarak Rilem-Cembureau standart kumu kullanımıyla üretilmiş, miktarlar değiştirilmemiştir.

Harç dökümünde 4 cm×4 cm×16 cm boyutlu prizmatik kalıplar kullanılmıştır.

İşlenebilirlik sorunu, alkali ile aktifleştirilmiş cürufu harçlarda homojenliği sağlayabilmek açısından zorlayıcı olmasına rağmen, bu harç tasarımında atık cam içeren karışımlar, ticari sodyum silikat içeren numunelerden daha iyi işlenebilirliğe sahip olmuştur.

Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve uygun kür uygulanmıştır.

Hızlı klor geçirimliliği deneyi için $\Phi 10$ cm×20 cm boyutlu silindirik kalıplara dökülen numuneler, kür uygulanmasının ardından deney öncesi ASTM C1202 (2019) standardına uygun olarak Şekil 3.1’de görüldüğü üzere üç parça halinde kesilmiştir. Daha sonra bu numunelerin yan yüzeyleri su geçirmeyecek şekilde poliüretan esaslı malzeme (mastik) ile kaplanmıştır.



Şekil 3.1 : Hızlı klor geçirimliliği deneyi için kesilen harç numune.

Üretilen harç karışımları Çizelge 3.7’de belirtilmiştir.

Alkali ile aktifleştirilmiş harçların birim ağırlık değerleri 2,28–2,46 g/cm³ arasında değişirken atık cam kullanılan harç numunelerde 2,19–2,43 g/cm³ arasında, Portland çimentosu ile üretilen harçlarda ise 1,96–2,28 g/cm³ arasındadır.

Çizelge 3.7 : Harç karışımları.

Karışım Kodu	Tanım	İçerik
R	Referans	Portland çimentosu + su + standart kum
8M/YFC-I	NaOH ve Na ₂ SiO ₃ kullanılarak üretilen	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (I) + 8 M NaOH çözeltisi + sodyum silikat + standart kum
14M/YFC-I	alkali aktifleştirilmiş harç	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (I) + 14 M NaOH çözeltisi + sodyum silikat + standart kum
10MWG/YFC-I	NaOH ve cam kullanılarak üretilen	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (I) + 10 M NaOH çözeltisi + öğütülmüş atık cam + standart kum
12MWG/YFC-I	alkali aktifleştirilmiş harç	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (I) + 12 M NaOH çözeltisi + öğütülmüş atık cam + standart kum
14MWG/YFC-I		Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (I) + 14 M NaOH çözeltisi + öğütülmüş atık cam + standart kum
10M/YFC-II	NaOH, Na ₂ SiO ₃ ve farklı cüruf kullanılarak	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (II) + 10 M NaOH çözeltisi + sodyum silikat + standart kum
12M/YFC-II	üretilen alkali aktifleştirilmiş harç	Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (II) + 12 M NaOH çözeltisi + sodyum silikat + standart kum

3.1.4 Kür koşulları

Sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı kullanılarak üretilen cürufu harçların mekanik ve dürabilite özellikleri üç farklı kür koşulunda incelenmiştir: laboratuvar açık ortam, kür havuzu, 24 saat boyunca 60°C sıcaklıktaki etüvde ısıtılmasının ardından deney zamanına kadar laboratuvar açık ortam. Atık cam ile üretilen harçlar ve hızlı klor geçirimsizliği deneyine tabi tutulan numuneler ise kalıptan çıkarıldıktan sonra deney zamanına kadar 20±2°C sıcaklıkta kirece doymuş suda (kür havuzunda) bekletilmiştir. Alkali ile aktifleştirilmiş cürufu harçlarda, 60°C kür sıcaklığında silis aktifleşerek agrega-hamur arasındaki bağ kuvvetlenir, bu da mekanik özellikleri olumlu etkiler (Massazza ve Costa, 1986). Daha yüksek sıcaklıklarda, gecikmiş etrenjit oluşumu gibi sorunlarla karşılaşılabilir (Akman, 2003; Taylor ve diğ., 2001). Bu nedenle ısıtılmasında, kür sıcaklığı olarak 60°C seçilmiştir.

3.1.5 Sertleşmiş harç deneyleri

Harç numunelerde eğilme deneyi, basınç deneyi, sülfat direnci tayini, donma-çözülme direnci tayini, kapiler su emme deneyi, toplam su emme yüzdesinin tayini, hızlı klor geçirimsizliği ve elektriksel öz direnç ölçümü deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.1.5.1 Eğilme deneyi

Eğilmede çekme dayanımı üç noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir; 3, 7, 28 ve 90 günlük numuneler test edilmiştir. Her bir deney grubu için en az üç numune test

edilmiş olup ortalama değerler belirlenmiştir. Üç noktalı eğilme deneyinde σ_t çekme dayanımı (MPa), aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_t = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de,

P: Maksimum yük (N),

L: Mesnetler arası mesafe (mm),

b: Numune genişliği (mm),

d: Numune kalınlığı (mm) olarak ifade edilmiştir.

Harç numunelerde üç noktalı eğilme deneyi yapılırken iki mesnet arası açıklık 10 cm’dir. Yükleme hızı 1 MPa/s olarak alınmıştır.

3.1.5.2 Basınç deneyi

Basınç dayanımının belirlenmesinde EN 12390-3 (BSI, 2009) standardı esas alınarak 3, 7, 28 ve 90 günlük numuneler test edilmiştir. Her bir deney grubu için en az altı numune test edilmiş olup ortalama değerler belirlenmiştir. Yükleme hızı 1,5 MPa/s olarak alınmıştır.

3.1.5.3 Sülfat etkisi deneyi

Sülfat direncinin tayini için numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 50 g/L derişimdeki ve 150 g/L derişimdeki sodyum sülfat (Na_2SO_4) zltilerinde 28. güne kadar bekletilmiş, ardından numunelerdeki ağırlık ve dayanım değişimleri kaydedilmiştir. Numunelerin kalıptan çıkarılır çıkarılmaz, farklı kür koşullarında bekletilmeden, hemen sülfat zltisine maruz bırakılmalarıyla, oluşabilecek zararlı etkilerin en fazla düzeyde gerçekleşmesi durumunda numunelerin ne derece hasar göreceğini incelemek amaçlanmıştır.

ASTM C1012/C1012M-18b’ye göre, Portland imentosu, Portland imentosunun puzolanlar veya cruflarla karışımı veya harmanlanmış hidrolik çimentolar kullanılarak yapılan harçların sülfat direncinin tayini için 50 g/L derişiminde sodyum sülfat zltisi kullanılmalıdır (ASTM, 2018). Bununla birlikte, daha önceki çalışmalarda, 50 g/L sodyum sülfat zltisinin, hazırlanan karışımların sülfat direnci açısından farklılıklarını ortaya koymada yetersiz olduğu gözlenmiştir (Tosun ve diğ,

2003). Bu nedenle, numuneler, sülfat çözeltisi konsantrasyonu artırılarak daha yoğun bir ortama maruz bırakılmış ve benzer araştırmalar dikkate alınarak bu araştırmada 150 g/L sodyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır (Yazıcı, 2006).

3.1.5.4 Donma-çözülme deneyi

Donma-çözülme direncinin tayini için en az altı numune test edilmiştir. Her bir çevrim, -20°C sıcaklıkta 12 saat bekletme ve +20°C sıcaklıkta 12 saat bekletme sürecinden oluşmaktadır. 25 çevrim sonunda numunelerdeki ağırlık değişimleri ve dayanım değişimleri belirlenmiştir. Burada numuneler, 28 günlük kürün ardından 25 çevrim donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır.

3.1.5.5 Kılcal su emme deneyi

Kılcal su emme deneyi, EN 772-11 (BSI, 2011) esas alınarak yapılmıştır. Deney öncesinde numunelerin yan yüzeyleri, bu yüzeyden su emilimini önlemek için parafin ile kaplanmıştır.

3.1.5.6 Toplam su emme deneyi

Toplam su emme deneyi, EN 772-11 (BSI, 2011) standardına göre yapılmıştır. 48 saat boyunca etüvde kurutularak sabit ağırlığa gelen numunelerin ağırlıkları kaydedilmiş, ardından numuneler 24 saat boyunca suda bekletilmiş ve numunelerin su emme yüzdeleri hesaplanmıştır.

3.1.5.7 Hızlı klor geçirimsliliği deneyi

Hızlı klor geçirimsliliği deneyi, ASTM C1202 (ASTM, 2019) standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Klor iyonu, deniz suyunda yoğun olarak bulunur ve deniz altındaki yapılarda klor iyonlarının beton içerisindeki hareketi ile korozyon oluşur; buna bağlı olarak betonun servis ömrü ve dayanıklılığı azalır. Bu hareketi önlemek için su/çimento oranının düşük olması, pas payının büyük olması ve geçirimsliliğin azaltılması gerekir.

Hızlı klor geçirimsliliği deneyi, şu şekilde özetlenebilir: Numunenin yan yüzeyi, epoksi gibi su geçirmez bir malzeme ile kaplanır, kaplamanın kurumamasından sonra numune, üç saat hava vakumuna, bir saat su vakumuna maruz bırakılmak üzere bir vakum odasında (vakum uygulanmış bir desikatörde) tutulur. Suyu doygun hale getirilen numuneler, hızlı klor geçirimsliliği için kullanılan hücreler arasına silikon ile

sabitlenir ve silikonun kurumasından sonra deneye başlanır. Önceden deney için hazırlanmış 50 mm kalınlığında, 100 mm çapında silindir numunenin uç yüzeyleri 0,3 N NaOH ve %3 NaCl çözeltilerine batırılır, burada test hücresinin (-) tarafı NaCl ile doldurulurken (+) tarafı NaOH ile doldurulmaktadır. Numune üzerine 60 V'luk bir potansiyel farkı uygulanır ve geçen elektrik akımı 6 saat boyunca, 30 dakikada bir olmak üzere kaydedilir. Coulomb cinsinden geçen yük, elektrik akımı-zaman grafiğinin integrasyonu ile hesaplanır. Geçen yük, numunenin permeabilitesi ile ilişkilidir, akım ne kadar büyük olursa numunenin o kadar geçirimli olduğu söylenebilir. Bununla birlikte daha yüksek klor geçirimliliği, korozyon riski açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

3.1.5.8 Elektriksel özdirenç deneyi

Elektriksel özdirenci belirlemek için iki elektrot yöntemi kullanılmış, iki çelik plaka arasına yerleştirilen numunenin elektriksel direnci, direnç ölçer (ohmmetre) kullanılarak okunmuştur.

Hızlı klor geçirimliliği deneyi için üretilen silindirik numuneler, ASTM C1202 (2019) standardında atıf yapılan standart kür uygulamasına uygun olarak kür koşullarına tabi tutulmuş, toplam su emme, kılcal su emme ve elektriksel özdirenç deneyleri de 10 cm çapında, 20 cm yüksekliğinde üretilen bu silindir şeklindeki numunelerden kesilen parçalar üzerinde yapılmıştır. Bu numuneler, deney gününe kadar $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, kirece doygun suda bekletilmiş 28 günlük numunelerdir.

3.2 Alkali ile Aktifleştirilmiş Betonlar

Alkali ile aktifleştirilmiş beton üretiminde 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde silindir kalıplar kullanılmış, Salihpaşaoğlu'nun (2017) yüksek lisans tezinde yer alan karışımlar esas alınarak üretilmiş numuneler üzerinde kılcal su emme, toplam su emme miktarının tayini, hızlı klor geçirimliliği ve elektriksel özdirenç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tezde (Salihpaşaoğlu, 2017), ferrokrom cüruf agregasının betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş, geçirimliliğe ilişkin deneyler yapılmamıştır. Bilindiği üzere, hızlı klor geçirimliliği deneyi, esasen, çimento ile üretilen, geleneksel beton numuneler için tasarlanmış bir deney prosedürü olup beton üretiminde kullanılan kimyasal katkı bile deney sonuçlarını etkileyebilmektedir. Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde ise elektriksel iletkenliği

sağlayan, yüksek miktardaki iyon varlığı ve bu iyonların hareket kabiliyetleri, hızlı klor geçirimliliği deneyinde, deney sırasında sıcaklıkların yükselmesine sebep olabilmekte ve deney sonuçları üzerinde etkili olabilmektedir. Bu çalışmada, harç numunelerinin hızlı klor geçirimliliği deney sonuçlarına göre, alkali ile aktifleştirilen (sıvı sodyum silikat-sodyum hidroksit çözeltisi kombiniyle aktive edilen) harçların klor iyonu geçirimlilikleri, Portland çimentosu ile üretilen numunelerinkinden fazla olmuştur. Beton numuneler üzerindeki deneyler, harç üretiminde olduğu gibi yalnızca ince agrega kullanmak yerine, iri agrega da kullanıldığında, sonuçların ne şekilde değiştiğini görmek, beton numuneler ile harç numunelerden elde edilen sonuçların benzer eğilimde olup olmadığını incelemek, klor iyonu geçirimliliğinin alkali ile aktive edilmiş betonlarda Portland çimentosu betonundan fazla olup olmadığını araştırmak üzere yapılmıştır. Bu kısımda, tamamen atıklardan üretilen bir beton üretimi hedefiyle, alkali ile aktifleştirilmiş beton üretiminde bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu kullanılırken agrega olarak da bir atık olan ferrokrom cüruf agregası kullanıldığında geçirimlilik ile ilgili değerlerin nasıl değiştiği incelenmiştir. Beton üzerinde yapılan deneylerin tez çalışmasına doğrudan değil ancak dolaylı yoldan bir katkısı bulunmaktadır.

3.2.1 Malzemeler

Kontrol grubunda, Portland çimentosu ve kırmataş ile üretim gerçekleştirilmiştir. Alkali ile aktifleştirilmiş beton üretiminde alkali aktivatör, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ile ferrokrom cüruf agregası kullanılırken diğer bir grupta Portland çimentosu ile birlikte ferrokrom cüruf agregası kullanılarak beton üretilmiştir.

3.2.1.1 Çimento

Deneyisel çalışmalarda, Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilmiş, TS EN 197-1 (2012) standardı ile uyumlu Portland CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır.

3.2.1.2 Agrega

Üretimlerde, kırmataş agregası ve ferrokrom cüruf agregası olmak üzere iki tür iri agrega kullanılmıştır. İnce agrega olarak doğal kum kullanılmıştır.

Kırmataş

Deneyssel çalışmaların bir grubunda kırmataş 1 ve 2 numaralı agregalar kullanılmıştır.

Agregaların özgül ağırlık deneyleri, TS 3526 (1980) standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Agregaların özgül ağırlıkları, 1 numaralı agregaya için $2,69 \text{ g/cm}^3$ ve 2 numaralı agregaya için $2,72 \text{ g/cm}^3$ olarak elde edilmiştir.

Agregaların elek analizi, TS EN 933-2 (1996) standardına uygun şekilde, kare göz açıklıklı elekler kullanılarak yapılmıştır. Agregaların elek analizi TS EN 933-1 (2012) standardına uygun olarak yapılmış ve sonuçlar Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : Kırmataş için elek analizi sonuçları.

Elek boyutu (mm)	Kırmataş 1 Geçen (%)	Kırmataş 2 Geçen (%)
31,50	100,00	100,00
16,00	100,00	42,13
8,00	52,53	0,26
4,00	2,53	0,00
2,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00
0,50	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00

Ferrokrom cürufu

Üretimlerde kullanılan ferrokrom cüruf agregaları, Elazığ’daki ferrokrom fabrikalarında üretilmiş olup Eti Krom A.Ş.’den temin edilmiştir.

Ferrokrom cüruf agregaları, inceden kalına doğru olacak şekilde 1, 2 ve 3 seklinde numaralandırılmış ve ardından özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Özgül ağırlıklar, sırasıyla $2,98 \text{ g/cm}^3$, $2,91 \text{ g/cm}^3$ ve $3,09 \text{ g/cm}^3$ olarak elde edilmiştir.

Ferrokrom cüruf agregasının elek analizi sonuçları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9 : Ferrokrom cürufu için elek analizi sonuçları.

Elek boyutu (mm)	Ferrokrom cürufu 1 numara	Ferrokrom cürufu 2 numara	Ferrokrom cürufu 3 numara
	Geçen (%)	Geçen (%)	Geçen (%)
31,50	100,00	100,00	100,00
16,00	100,00	100,00	28,53
8,00	99,40	41,67	0,00
4,00	38,73	0,00	0,00
2,00	3,50	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,00	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00	0,00

Ferrokrom cüruf agregasının kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Ferrokrom cürufunun kimyasal analizi.

Kimyasal Analiz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	KK
Analiz Sonuçları (%)	59,72	7,87	1,43	23,15	5,67	0,28	0,12	0,02	0,0547	0,58

Kum

İnce agrega olarak doğal kum kullanılmıştır. Kullanılan kumun özgül ağırlığı 2,65 g/cm³’tür. Kullanılan doğal kumunun elek analizi sonuçları Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11 : Doğal kum için elek analizi sonuçları.

Elek boyutu (mm)	Doğal kum Geçen (%)
31,50	100,00
16,00	100,00
8,00	100,00
4,00	100,00
2,00	100,00
1,00	87,80
0,50	69,00
0,25	17,60

3.2.1.3 Su

Beton üretimi ve kür uygulanması aşamalarında kullanılan su, İstanbul şehir şebeke suyudur. Şehir şebekesinden alınan suyun, beton karışım ve bakım suyunun kalitesi ile ilgili TS EN 1008 (2003) standardında verilen özellikleri sağladığı kabul edilmiştir.

3.2.1.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

Beton üretiminde, Kardemir Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. Fabrikası'ndan temin edilmiş olan öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Cürufun Blaine özgül yüzeyi 5500 cm²/gram olup özgül ağırlığı 2,97 g/cm³'tür. Cürufun kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12 : Yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi.

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl ⁻	KK
Analiz Sonuçları (%)	43,5	1,2	11,3	29,2	10,3	1,3	1,1	0,35	0,011	1,9

3.2.1.5 Sodyum hidroksit

Deneysel çalışmalarda, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunu aktive etmek için alkali aktivatörler kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat tercih edilmiştir. Çözeltilerde kullanılan su, karma suyunun toplam miktarından düşürülmüştür. Asıl üretimlerin öncesindeki deneme üretimlerinde alınan en iyi sonuçlar, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuna sodyum hidroksitin kütlece %7,1, sodyum silikatın ise kütlece %17,34 oranında, sodyum silikat ile sodyum hidroksit çözeltisinin birlikte kullanıldığı durumlarda elde edilmiştir. Beton üretiminde kullanılan sodyum hidroksit, Bereket Kimya Tıp Teknik Tic. ve San. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Temin edilen sodyum hidroksit pelet hâlinde. Katı hâldeki sodyum hidroksit, üretim öncesinde suda çözülmüş, çözeltinin oda sıcaklığına kadar soğuması için beklenmiş, ardından üretime dâhil edilmiştir. Sodyum hidroksit, beyaz renkte, nem çekici ve kokusuz bir maddedir. Su ile tepkimeye girdiğinde, ekzotermik bir reaksiyon meydana gelerek yaklaşık 5 dakika içinde sıcaklığı 50°C sıcaklığa çıkmaktadır. Sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken sıcaklığın aşırı artmasını önlemek amacıyla, önce suyun, ardından katı haldeki sodyum hidroksitin yavaş yavaş eklenmesinde fayda vardır. Sodyum hidroksit, yumuşak, kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. Çok kuvvetli bir baz olup

canlı dokularını tahriş edici bir etkisi bulunmaktadır. Molekül ağırlığı 40 g/mol, yoğunluğu ise oda sıcaklığında 2,13 g/cm³'tür.

3.2.1.6 Sodyum silikat

Beton üretiminde kullanılan sodyum silikat, Bereket Kimya Tıp Teknik Tic. ve San. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Cam suyu olarak da bilinen sodyum silikat, renksiz ve kokusuz bir maddedir. Temin edilen sodyum silikat, suda çözünmüş hâldedir. Molekül ağırlığı 184,04 g/mol, yoğunluğu ise oda sıcaklığında 1,35 g/cm³'tür.

3.2.1.7 Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

Taze beton karışımlarında, su/bağlayıcı oranının istenilen işlenilebilirliği sağlamadığı durumlarda, işlenebilirliği arttırmak, erken ve nihai dayanımda yüksek performans sağlamak amacıyla, karma suyunu azaltmayı sağlayan yeni nesil bir süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı, işlenebilirliğin yetersiz geldiği durumlarda, bağlayıcı kütlelerinin %1-3'ü arasında kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkıya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.13 : Akışkanlaştırıcı kimyasal katkının teknik özellikleri.

Teknik özellikler	
Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Yeşil-sıvı
Özgül ağırlık (20° C'de)	1,00-1,1 kg/l
pH değeri	5-8
Alkali içeriği (%)	≤ 3,00 (Kütlece)
Klor iyon içeriği	≤ 0,10 (Kütlece)

3.2.2 Beton tasarımı

Beton üretimleri üç farklı seri olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir seride beş farklı üretim yapılmıştır. Her bir üretimdeki su/bağlayıcı oranı farklıdır. Karışım oranları Çizelge 3.14, 3.15 ve 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.14 : Birinci seri için karışım oranları.

Malzemeler	C serisi (Portland çimentosu+kırmataş)				
	C20	C35	C50	C75	C90
Çimento (kg)	271	314	402	453	499
Su (l)	224	208	181	149	139
Su/çimento	0,83	0,67	0,45	0,33	0,28
Akışkanlaştırıcı katkı (kg)	-	-	2	7	8
Kırmataş no 1 (kg)	721	722	720	736	728
Kırmataş no 2 (kg)	364	365	364	372	368
Kum (kg)	710	711	709	725	717

Çizelge 3.15 : İkinci seri için karışım oranları.

Malzemeler	CC serisi (Portland çimentosu+ferrokrom cürufu)				
	CC20	CC35	CC50	CC75	CC90
Çimento (kg)	270	311	401	449	501
Su (l)	223	208	180	148	141
Su/çimento	0,83	0,67	0,45	0,33	0,28
Akışkanlaştırıcı katkı (kg)	-	-	2	8	16
Ferrokrom cüruf agregası no 1 (kg)	599	600	598	612	605
Ferrokrom cüruf agregası no 2 (kg)	390	390	389	398	394
Ferrokrom cüruf agregası no 3 (kg)	311	311	310	317	313
Kum (kg)	621	622	620	635	627

Üçüncü serinin üretiminde, ilk iki üretimden farklı olarak karışıma, alkali aktivatörler ve yüksek fırın cürufu dâhil edilmiştir. Alkali aktivatör olarak granüle yüksek fırın cürufuna kütlece %7,1 oranında sodyum hidroksit ve kütlece %17,34 oranında sodyum silikat beraber kullanılmıştır. Alkali aktivatörlerden ilki olan sodyum hidroksit, katı ve pelet hâlde olduğundan, beton karışımına katılmadan önce su içerisinde çözülmüştür. Çözelti için kullanılacak su ve katı sodyum hidroksitin miktarları ön deneyler sonucu belirlenmiş ve sodyum hidroksit çözeltisinin %47'sini su, %53'ünü ise katı haldeki sodyum hidroksit oluşturacak şekilde karışım hazırlanmıştır. Kullanılan bir diğer aktivatör olan sodyum silikat ise sıvı formda temin edilmiştir.

Alkali aktivatörler; ferrokrom cüruf agregası, doğal kum, yüksek fırın cürufu ve su bir araya getirilip karıştırıldıktan sonra karışıma eklenmiştir.

Çizelge 3.16 : Üçüncü seri için karışım oranları.

Malzemeler	A serisi (Alkali+ferrokrom cürufu)				
	A20	A35	A50	A75	A90
Yüksek fırın cürufu (kg)	269	312	404	452	505
Toplam su miktarı (l)	223	209	183	150	141
Su/çimento	0,83	0,67	0,45	0,33	0,28
Akışkanlaştırıcı katkı (kg)	-	-	2	8	16
Ferrokrom cüruf agregası no 1 (kg)	571	550	534	539	524
Ferrokrom cüruf agregası no 2 (kg)	372	358	347	351	341
Ferrokrom cüruf agregası no 3 (kg)	296	285	277	280	272
Kum (kg)	593	570	554	559	544
Sodyum silikat (kg)	47	54	69	78	87
Sodyum silikattan gelen su miktarı (l)	35	40	51	58	64
Sodyum hidroksit-katı (kg)	10	12	15	17	19
Sodyum hidroksit için gerekli su miktarı (l)	9	10	13	15	17
Karma suyu (l)	180	158	116	76	59

3.2.3 Beton üretimleri

Her bir seri için en az üçer adet silindir numune üretilmiştir. Taze betonda, çökme (slump) değerleri, C20 için 19 cm, C35 için 18 cm, C50 için 12 cm, C75 için 22 cm ve C90 için 10 cm olmuştur. Çimento ve ferrokrom cürufu ile üretilen seride ise çökme, CC20 için 19 cm, CC35 için 10 cm, CC50 için 7 cm, CC75 için 11 cm ve C90 için 0 değerlerini almıştır. Alkali ile aktifleştirilen seride çökme, A20 için 16 cm, A35 için 19 cm, A50 için 18 cm, A75 için 12 cm ve A90 için 0 değerlerindedir.

3.2.4 Kür koşulları

Üretilen numuneler, deney gününe kadar kür havuzunda, kirece doymun suda bekletilmiştir.

3.2.5 Sertleşmiş beton deneyleri

Üretilen betonlarda kılcal su emme, toplam su emme, hızlı klor geçirimsizliği ve elektriksel öz direnç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler, nihai dayanımların hemen hemen sağlandığının düşünüldüğü 210 günlük numuneler üzerinde yapılmıştır.

3.2.5.1 Kılcal su emme deneyi

Beton numunelerde kılcal su emme deneyi, EN 772-11 (BSI, 2011) standardı esas alınarak yapılmış ve numunelerin kılcallık katsayıları belirlenmiştir. Deney öncesinde numunelerin yan yüzeyleri parafin ile kaplanmıştır.

3.2.5.2 Toplam su emme deneyi

Beton numunelerde toplam su emme deneyi, EN 772-11 (BSI, 2011) standardı esas alınarak yapılmıştır.

3.2.5.3 Hızlı klor geçirimliliği deneyi

Beton numunelerde hızlı klor geçirimliliği deneyi, ASTM C1202 (ASTM, 2019) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla her bir silindir numune üçer parçaya kesilerek yan yüzeyleri su geçirmeyen malzeme ile kaplanmış, deney öncesi kaplamanın kurumması beklenmiş ve vakum uygulanarak numuneler deneye hazırlanmıştır.

3.2.5.4 Elektriksel özdirenç deneyi

Beton numunelerin elektriksel özdirençini belirlemek için iki elektrot yöntemi kullanılmış ve iki adet metal plaka arasına yerleştirilen numunenin elektriksel direnci direnç ölçer ile okunmuştur.

3.3 Alkali ile Aktifleştirilmiş Çelik Lif Donatılı Betonlar (SIFCON)

3.3.1 Malzemeler

Alkali ile aktifleştirilmiş çelik lif donatılı beton üretiminde, araç lastiklerinin geri dönüşümünden elde edilen çelik teller, çelik lif donatı olarak kullanılmış ve kalıba sığdırılabilen maksimum hacimdeki çelik tel miktarı belirlenerek çalışmaya başlanmıştır. Çelik liflerin kalıba yerleştirilmesinin ardından, akıcı kıvamdaki çimento bulamacı dökülmüştür.

3.3.1.1 Çimento

Çimento, yalnızca referans numunede kullanılmış olup kullanılan çimento CEM I 42,5 R Portland çimentosudur.

3.3.1.2 Agregata

SIFCON üretiminde, çimento dozajının yüksekliği nedeniyle karşılaşılabilecek bir sorun oran rötreyi azaltmak için kum kullanılmış olup yerleşmede sorun yaşanmaması için ince kum tercih edilmiştir.

3.3.1.3 Su

Su, yalnızca referans numunelerin üretiminde kullanılmıştır. Alkali ile aktifleştirilmiş SIFCON üretiminde, aktivatör çözeltinin haricinde ilave su kullanılmamıştır.

3.3.1.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu

Alkali ile aktifleştirilmiş SIFCON numunelerde referans numunelerin dışındaki tüm üretimlerde, bağlayıcı olarak çimento yerine öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. SIFCON üretiminde kullanılan yüksek fırın cürufu, alkali ile aktifleştirilmiş beton üretiminde kullanılan yüksek fırın cürufu ile aynıdır, cüruf özellikleri daha önce verildiğinden bu bölümde tekrar verilmemiştir.

3.3.1.5 Sodyum hidroksit

Katı formda bulunan %99 saflıktaki sodyum hidroksit, su içerisinde çözülerek 8 M ve 14 M derişimli sodyum hidroksit çözeltileri hazırlanmıştır. Bu çözeltiler, sodyum silikat ile birlikte kullanılarak üretim yapıldığı gibi, sodyum silikat yerine öğütülmüş atık camın sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde 6 saat boyunca 80°C sıcaklıkta ısıtılıp karıştırılması ve filtrelenmesiyle hazırlanan aktivatör ile üretim de gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan aktivatör çözeltiler üretimde kullanılmadan önce, yeterli soğumanın sağlanarak çözeltinin oda sıcaklığına gelmesi için en az 24 saat beklenmiştir.

3.3.1.6 Sodyum silikat

Atık cam içermeyen numunelerde, Pozitif Kimya'dan temin edilen 44 kg ambalajlı, sıvı formda, 2 Modül 40 Bome sodyum silikat kullanılmıştır. Kullanılan sodyum silikat içerisindeki katı madde miktarı, minimum %33 olarak ifade edilmiştir.

3.3.1.7 Cam

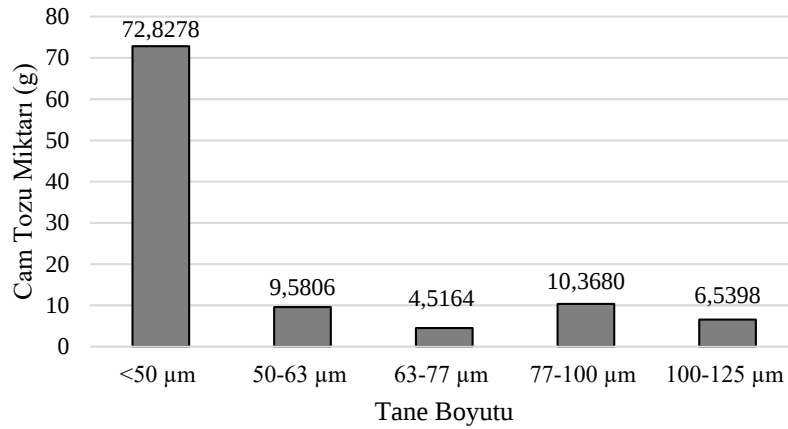
Alkali ile aktifleştirilmiş SIFCON üretiminde silikat kaynağı olarak kullanılan öğütülmüş atık cam, Akcihan Cam Geri Dönüşüm firmasından temin edilmiş olup bu camın yoğunluk, nem absorpsiyonu ve tane boyutu analizi 0,1 mg hassasiyete sahip VA304 Model GEC (Avery, İngiltere) marka terazi ve elekler kullanılarak yapılmıştır.

Cam tozu, ortalama 30 µm boyutundadır. Cam tozunun özellikleri Çizelge 3.17'de verilmiştir.

Çizelge 3.17 : Cam tozunun özellikleri.

Özgöl ağırlık (g/cm ³)	2,58
Yığın yoğunluğu (g/cm ³)	1,56
Erime derecesi (°C)	720
Su absorpsiyonu	0,02
Tane boyutu	<0,125 (120 mesh altı)

Kullanılan cam tozunun elek analizi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Cam tozu elek analizi.

3.3.1.8 Kullanılmış araç lastiklerinden elde edilen hurda çelik teller

Araç lastiklerinden elde edilen hurda çelik tellerin boy/çap dağılımları

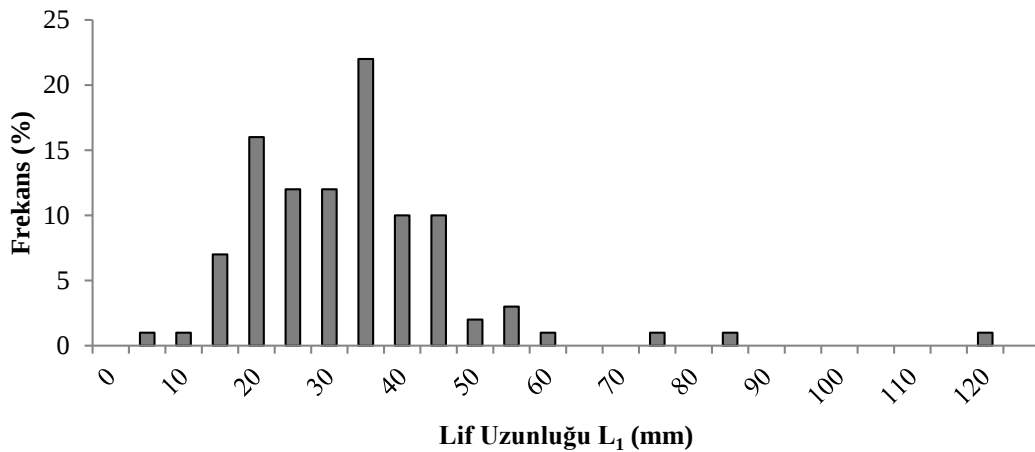
Atık otomobil lastiklerinden elde edilen çelik tel donatı temini için, farklı geri dönüşüm/piroliz firmaları araştırılmış ve temin edilen numuneler üzerinde uzunluk ile çap ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için her firmadan gelen numune üzerinde, rastgele 100 adet çelik tel alınarak yapılan ölçümler sonucunda, çizelgelerde belirtilen veriler elde edilmiş, sonuçlar histogram üzerinde de gösterilmiştir. Söz konusu lifler, tek bir türden çelik olmayıp kullanılmış araç lastiklerinden elde edilmiş çelik hurdasıdır. Teller, lastik ömrü boyunca, sürtünme, aşınma, sıcaklık değişimi, basınç, çekme ve tekrarlayan yükleme gibi etkilere maruz kalmaktadır. Otomobil lastiklerinde kullanılan çelik lifler ile kamyon lastiklerinde kullanılan çelik lifler, farklılık gösterebilmektedir. Geri dönüşüm sonucunda elde edilen çelik teller doğrusal olmadığından çizelgelerde L₁ ve L₂ olarak gösterilmekte olan iki farklı boy ölçümü bulunmaktadır. L₁ olarak gösterilen uzunluk, doğrusal olmayan telin iki uç noktası arasındaki uzaklığı belirtmekte olup L₂ olarak gösterilen

uzunluk telin mümkün olduğunca doğrusal hale getirilmesiyle elde edilen uzunluktur. Bu değerlere göre çelik telin narinlik değeri de hesaplanmıştır. Uygun olan malzeme araştırılırken sonuçların olabildiğince normal dağılıma yakın olması ve malzemenin kauçuk, elyaf gibi yabancı malzemelerden uzak, temiz olması beklenmektedir. Şekil 3.3'te A firmasından alınan numune görülmektedir. A firmasından temin edilen numune üzerinde yapılmış olan boy-çap ölçümleri ve buna bağlı olarak hesaplanan narinlik değerleri ekte, Çizelge A.1'de gösterilmiştir.

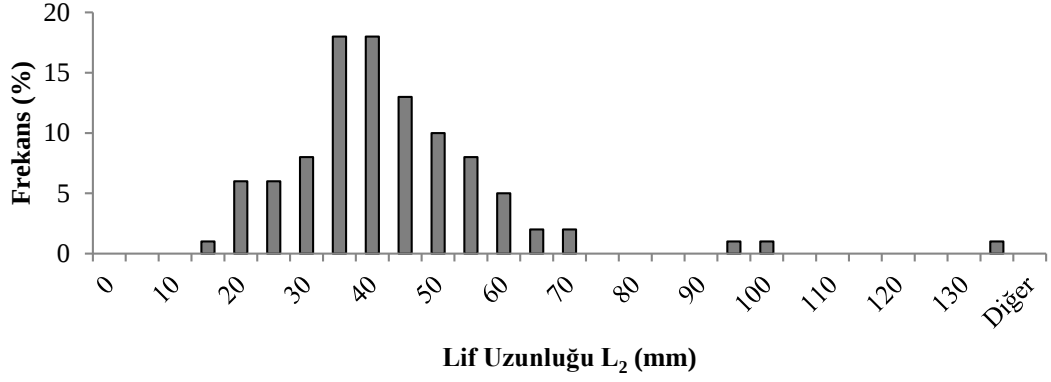


Şekil 3.3 : A firmasından alınan çelik tel örneği.

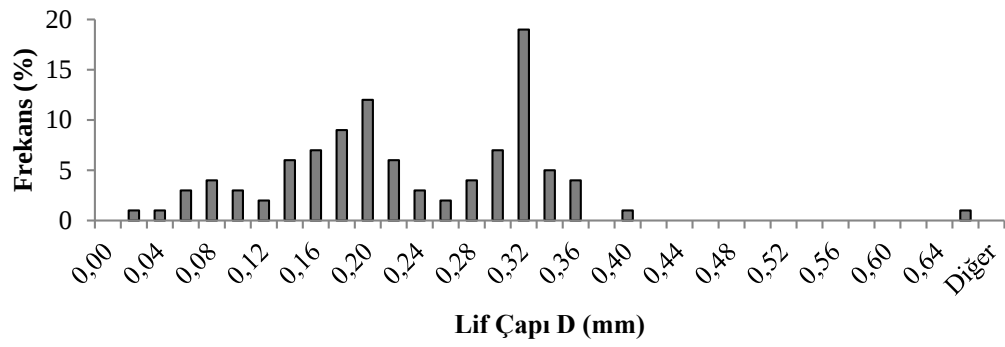
A firmasından temin edilen numune için L_1 lif uzunluğu dağılımı Şekil 3.4'te, L_2 lif uzunluğu dağılımı Şekil 3.5'te, D lif çapı dağılımı ise Şekil 3.6'da histogram olarak verilmiştir. Süreksiz lif olarak kullanılan, kırılmış tellerin boy-çap dağılımları, karma liflerin normal dağılıma ne derece yakın olduğunu görmek amacıyla sunulmuştur.



Şekil 3.4 : Lif uzunluğu (L_1) dağılımı (A firması).



Şekil 3.5 : Lif uzunluğu (L₂) dağılımı (A firması).



Şekil 3.6 : Lif çapı (D) dağılımı (A firması).

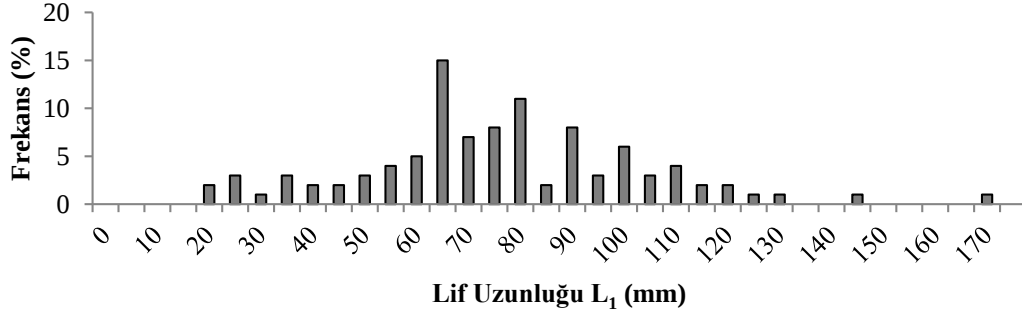
B firmasından temin edilen numune Şekil 3.7’de görülmektedir.



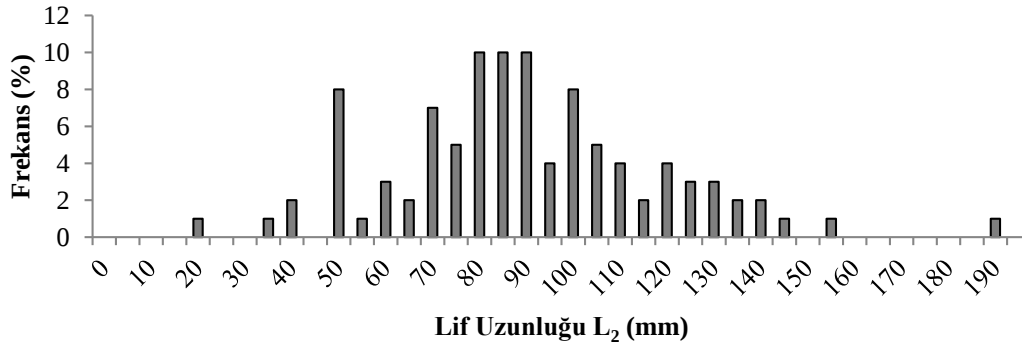
Şekil 3.7 : B firmasından alınan çelik tel örneği.

B firmasından temin edilen numune üzerinde yapılmış olan boy-çap ölçümleri ve buna bağlı olarak hesaplanan narinlik değerleri Çizelge A.2’de gösterilmiştir.

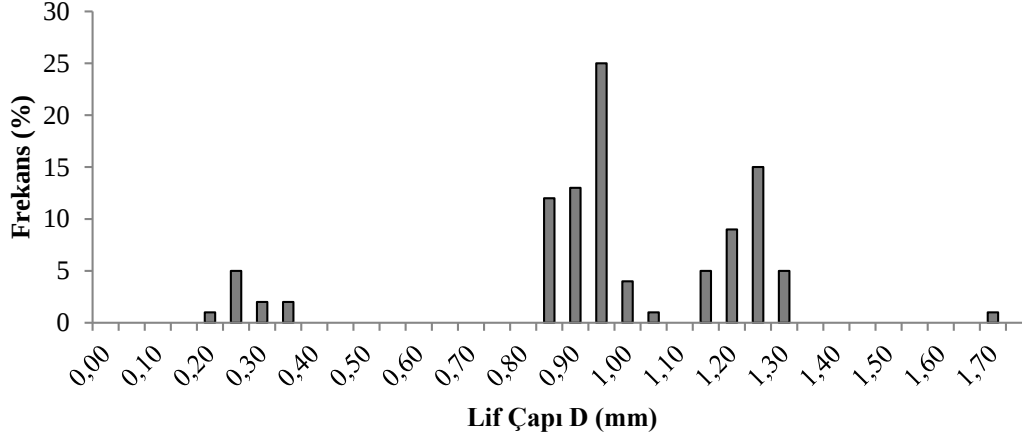
B firmasından temin edilen numune için L₁ lif uzunluğu dağılımı Şekil 3.8’de, L₂ lif uzunluğu dağılımı Şekil 3.9’da, D lif çapı dağılımı ise Şekil 3.10’da histogram olarak verilmiştir.



Şekil 3.8 : Lif uzunluğu (L_1) dağılımı (B firması).



Şekil 3.9 : Lif uzunluğu (L_2) dağılımı (B firması).



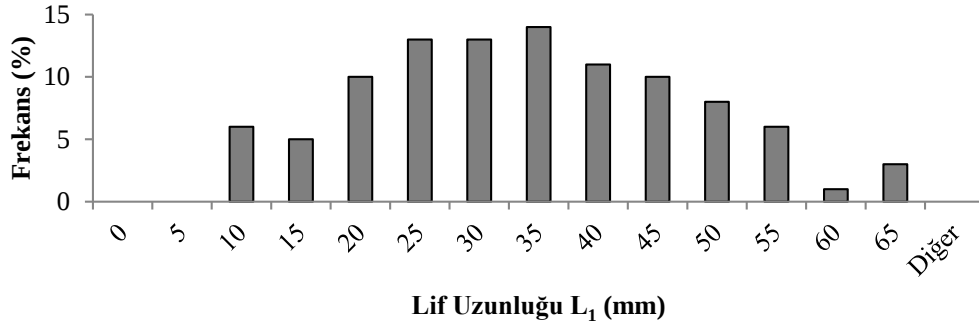
Şekil 3.10 : Lif çapı (D) dağılımı (B firması).

C firmasından temin edilen numune Şekil 3.11’de görülmektedir.

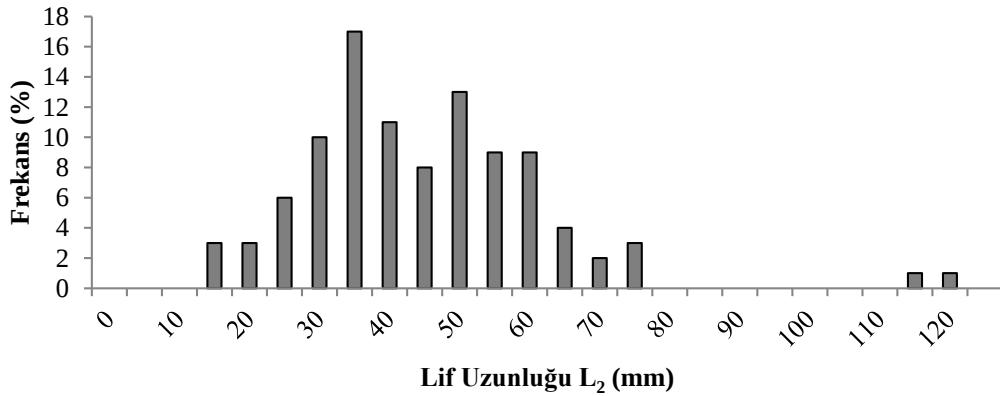


Şekil 3.11 : C firmasından alınan çelik tel örneği.

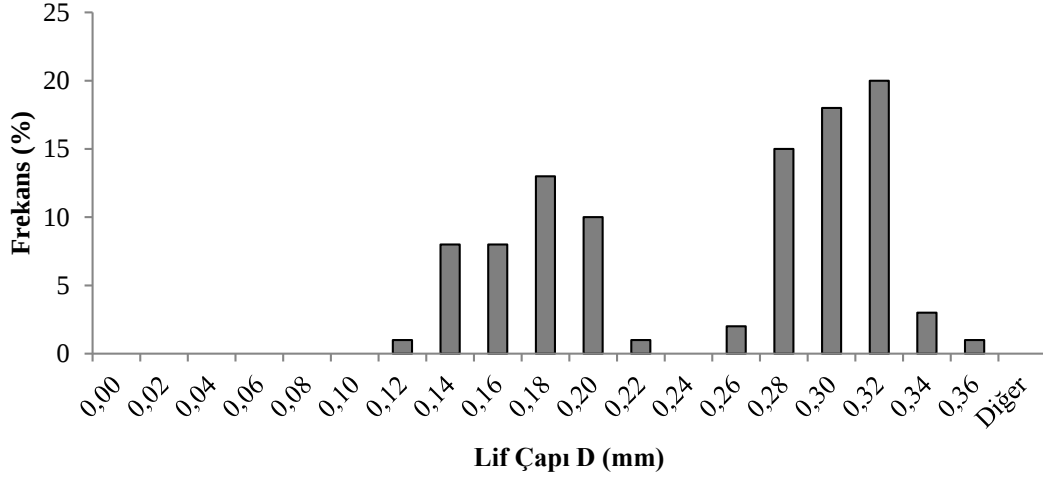
C firmasından temin edilen numune üzerinde yapılmış olan boy-çap ölçümleri ve buna bağlı olarak hesaplanan narinlik değerleri Çizelge A.3'te gösterilmiştir. C firmasından temin edilen numune için L_1 lif uzunluğu dağılımı Şekil 3.12'de, L_2 lif uzunluğu dağılımı Şekil 3.13'te, D lif çapı dağılımı ise Şekil 3.14'te histogram olarak verilmiştir.



Şekil 3.12 : Lif uzunluğu (L_1) dağılımı (C firması).



Şekil 3.13 : Lif uzunluğu (L_2) dağılımı (C firması).



Şekil 3.14 : Lif çapı (D) dağılımı (C firması).

D firmasından temin edilen numune Şekil 3.15'te ve Şekil 3.16'da görülmektedir.



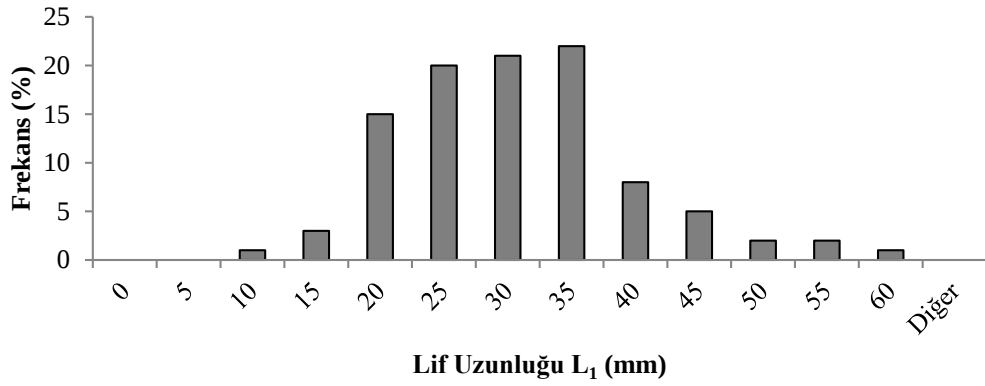
Şekil 3.15 : D firmasından alınan çelik tel örneği.



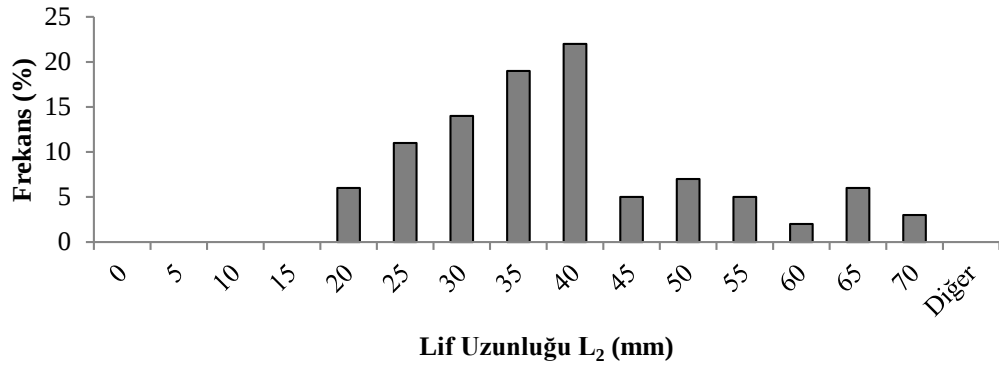
Şekil 3.16 : D firmasından temin edilen numune.

D firmasından temin edilen numune üzerinde yapılmış olan boy-çap ölçümleri ve buna bağlı olarak hesaplanan narinlik değerleri Çizelge A.4'te gösterilmiştir. D firmasından temin edilen numune için L_1 lif uzunluğu dağılımı Şekil 3.17'de, L_2 lif

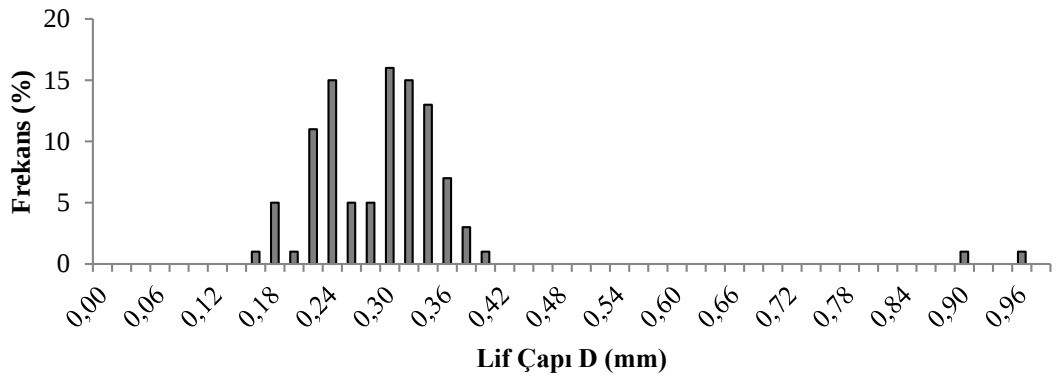
uzunluğu dağılımı Şekil 3.18’de, D lif çapı dağılımı ise Şekil 3.19’da histogram olarak verilmiştir.



Şekil 3.17 : Lif uzunluğu (L₁) dağılımı (D firması).



Şekil 3.18 : Lif uzunluğu (L₂) dağılımı (D firması).



Şekil 3.19 : Lif çapı (D) dağılımı (D firması).

Bu grafiklerde, süreksiz lif olarak kullanılabilecek, piyasadaki farklı hurda çelik liflerinin boy-çap dağılımları verilmiştir, esas üretimlerde kısa ve temiz karma çelik teller süreksiz lif olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte teller, düz bir şekle sahip değildir. Kalıp boyutundan daha uzun olan yanak telleri ise kalıba yerleştirilmeden

önce kalıp uzunluğunda kesilerek sürekli lif olarak kullanılmıştır. Lifler mümkün olduğunca homojen dağılımı sağlayacak şekilde, üretimden önce, kalıba elle tek tek yerleştirilmiştir, bu işlem yapılırken kauçuk, elyaf vb. atıklar temizlenmiştir. Üretimden sonra beton kesiti de alınarak dağılım durumu tekrar kontrol edilmiştir, bu kontrol görsel inceleme ile yapılmıştır. Boy ve çap ölçümlerinden başka, atık kamyon/tır lastiklerinden elde edilen farklı kesitlerdeki (dairesel ve dikdörtgen kesitli) uzun çelik teller için çekme deneyi yapılmıştır. Kullanılmış lastiklerden tel çekme makinesiyle ayrılan bu teller Şekil 3.20’de gösterilmektedir. Bu incelekte teller için kullanılması gereken makine 200 kgf’a kadar dayanabildiğinden ve mevcut tellerde 200 kgf kuvvet altında bir değişiklik gözlenmediğinden daha büyük kuvvet uygulayabilen makinede deney yapılmıştır. Bu sefer de, tellerin ince kesitli ve yüksek miktardaki karbon içeriğine bağlı olarak gevrek olması sebebiyle sıyrılma ya da alt çeneden kesilme gözlenmiş olup yanak teli temin edilmiş olan her firmadan ikişer tel numunesi çekilmiştir. Atık kamyon/tır lastiklerinden elde edilmiş çelik teller için çekme deneyi sonuçları Çizelge 3.18’de verilmiştir. Bu sonuçların teller için gerçek kopma dayanımı değerleri olmadığı bilinmekte olup tellerin minimum bu dayanıma sahip olduğu söylenebilir. Çizelge 3.18’de, kesit küçüldükçe çekme dayanımı artmaktadır. Böyle bir sonuç bilindiği gibi heterojen malzemelerde olur, bu gibi bir sonucun çelikte olması beklenmemektedir, buradan söz konusu tellerin aynı çelikten imâl edilmediği söylenebilir. Sadece yanak teli olarak temin edilen sürekli liflerde çekme deneyi yapılabilmektedir. B ve D firmalarından hem kırılmış tel, hem de yanak teli temin edilmiş olup yanak tellerinde çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. B ve D firmaları dışındaki firmalarda, deneylerin gerçekleştirildiği tarih itibarıyla tel çekme işlemi gerçekleştirilmemekte, geri kazanılan teller, lastiğin parçalanması suretiyle elde edilmektedir. Temin edilen teller, kamyon, tır ve otomobil lastiklerinden çıkma hurda teller olduğundan farklı özellikler gösterebilmektedir.

Mart 2019 itibarıyla kırılmış tel fiyatı 600 TL/ton iken yanak telinin fiyatı 700 TL/ton’dur.



Şekil 3.20 : Atık kamyon/tır lastiklerinden elde edilen çelik teller.

Kullanılan teller, yüksek mukavemetli çelikten imâl edilmiştir. Bu teller, atık lastiklerin parçalanma işlemi sırasında elde edilen hafif eriyen bir hurdadır. Bu malzeme, yüksek karbon içeriğine sahip, yüksek kaliteli bir çeliktir. Darbelere, ısıya ve diğer tehlikeli koşullara dayanacak şekilde lastik yapısına dâhil edilmiştir. Sonuç olarak geri kazanılan lastik teli çok yüksek kalitededir ve bilinen standartlara uygundur (Url-4, 2020).

Çizelge 3.18 : Çelik teller için çekme deneyi sonuçları.

Firma	#	Ölçülen Boyut	Kesit (mm ²)	Kuvvet (kgf)	Dayanım (MPa)
B	1	Φ1,59	1,99	440	2174
	2	Φ1,59	1,99	440	2174
D	1	2,71x1,34	3,63	640	1729
	2	2,75x1,47	4,04	635	1541
B	1	2,80x1,35	3,78	660	1713
	2	2,70x1,35	3,65	630	1696

* Tüm numunelerde kopma çeneden gerçekleşmiştir.

Mevcut lastik geri dönüşüm teknolojileri, işleme hattındaki makineleri korumak için, mümkün olan en erken aşamada teli ayırma eğilimindedir. Ortam sıcaklığında ön parçalamayı genellikle bir ilk granülasyon aşaması izler, bu aşamada tesisin konfigürasyonuna bağlı olarak 15 ila 25 mm’lik bir ayırıcı, lastik parçalarını filtreler. Bu granülasyondan hemen sonra, manyetik bir cihaz, çelik teli kauçuktan ayırır. Tellerle birlikte, ağırlıkça yaklaşık yüzde 10 ila 35 oranında kauçuk ve tekstil ürünleri de çekilir, bu nedenle malzemenin nihai geri kazanımı, malzemenin kirlilik derecesine (kauçuk/elyaf) bağlı olarak farklılık gösterir. Genel olarak eski bir binek otomobil lastiğinin ağırlığının %10-20’si çelikten oluşur. Ortalama bir öğütme tesisi

yaklaşık 100-200 Mt çelik lastik teli üretir ve kalitesi, üretim tesislerinin benimsediği teknoloji, depolama ve yönetim sistemlerine göre değişebilir. Malzemenin kalitesinin belirlenmesinde bir diğer önemli faktör, çeliğin atmosferik etkenlerden korunmasıyla ilgilidir. Malzeme ince tellerden oluştuğundan kolaylıkla oksitlenebilir. Bu nedenle, kalitesinin iyileştirilmesindeki kilit faktör, teli herhangi bir atmosferik etkiden korumaktır (Url-4, 2020).

Fiziksel özellikler açısından, görsel incelemede, malzemenin farklı derecelerde elyaf ve kauçuk içeren ince ve parçalanmış tellerden oluştuğu gözlenir. Katı, gri renkli, kokusuz, 300 kg/m³ yoğunluğunda, 1369-1704°C erime noktasına sahip ve suda çözünmez yapıdadır (Url-4, 2020).

Çizelge 3.19'daki kimyasal analizde vurgulandığı gibi malzeme, %0,80'e varan yüksek karbon içeriğine sahip ve bronz/bakır kaplı harmonik bir çeliktir. Burada, ortalama kimyasal bileşim verilmiştir, verilerin ortalama bir bileşimi temsil ettiği kabul edilmekle birlikte, bu ayrıntıların yeterli olduğu garanti edilememektedir, çünkü kimyasal bileşim, üretim tesisine göre makul bir şekilde değişebilir (Url-4, 2020).

Kirlilik derecesine göre, lastik teller metalurji tesislerinde birincil olarak geri dönüştürülebilir. Malzeme hâlâ yüksek derecede kirlilik içeriyorsa, yeniden eritmeye daha uygun bir malzeme elde etmek için fiziksel veya termo-fiziksel işlemler uygulayan yetkili tesislerde işlenebilir ve sıkıştırılabilir. Geri dönüşüm tesislerinde işlenen lastik çelik tel hurdası, kalite güvencesi için sertifikalı satıcılardan temin edilmektedir (Url-4, 2020).

Çizelge 3.19 : Çelik teller için kimyasal analiz (Url-4, 2020).

Element	%
C	0,730
Si	0,220
Mn	0,670
P	0,026
Ni	0,023
S	0,018
Cu	0,022
Mo	0,002
Cr	0,024

Çelik tellerin kimyasal analizi incelendiğinde, karbon miktarının %0,60'tan fazla olduğu ve bu çeliğin yüksek karbonlu çelik olduğu görülmektedir. Yüksek karbonlu çelikler, %0,60'tan daha fazla karbon ihtiva eden çelikler olup ısıtılma işlemi uygulanmamış durumda, yüksek mukavemetli ve sünekliği az olan çeliklerdir. Isıl işlemlerle sertleştirilmeleri durumunda yüksek sertlik kazanırlar. Bu bakımdan, aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliğe sahip malzemelerdir. İşlenme ve şekil alabilme kabiliyetleri, düşük (%0,20'den az karbon ihtiva eden) ve orta karbonlu (%0,20-0,60 arasında karbon ihtiva eden) çeliklere göre daha düşüktür. Kaynak kabiliyetleri de düşük olup daha özel tekniklerle kaynakları yapılabilir. Bu gruptaki çelikler daha ziyade takım çeliği olarak kullanılırlar. Yüksek karbonlu çeliklerin bileşiminde bulunan karbon miktarının sınırı, demir-karbon denge diyagramı gereğince %2'ye kadar çıkabilirse de, uygulamada bu değer %1,2-1,4 ile sınırlı kalmaktadır. Yüksek karbonlu çelikler, düşük ve orta karbonlu çeliklere göre daha kolay su alabilirler ve elde edilen martenzitik yapının sertliği de yüksek karbonlu çeliklerde daha fazladır. Martenzitik yapı, ısıtılma işlemin ardından malzemenin hızlı soğutulmasıyla elde edilen bir yapıdır, bu yapıdaki malzemelerde sertlik fazladır, bununla birlikte malzeme kırılgan yapıdadır. Martenzitik dönüşümde, hızlı soğumayla, yüzey merkezli kübik yapı, hacim merkezli tetragonal yapıya dönüşürken oluşan dislokasyon yoğunluğuyla sertlik ve mukavemet artar, sertleşme sırasında mikro çatlaklar oluşur, hacimde artış meydana gelir. Bu yapıdaki malzemelerde, gevrekliği gidermek ve tokluğu arttırmak için temperleme işlemine ihtiyaç duyulur. Yüksek karbonlu çelikler; kesici basit takımlar, mil, şaft, cıvata, somun, spiral ve yaprak yaylar, makaslar, zımba, kepçe dişlisi, greyder bıçağı, yüksek mukavemetli makine parçaları, ege, keser, ağaç testeresi gibi araç gereçlerin yapımında kullanılmakta olup ısıtılma işlemi ile sertleştirilmeye uygundur (Url-5, 2020).

Kullanılmış araç lastiklerinden geri kazanılan çelik tellerle, çimento kullanılarak deneme üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu üretim için Şekil 3.21'de gösterildiği üzere 7 cm×7 cm×28 cm boyutundaki prizmatik çelik kalıp içerisine sığdırılabilecek maksimum çelik tel miktarı ölçülmüştür. Uygun sıkıştırmayla kalıba en fazla 515 gram tel sığdırılabilmektedir. Bir miktar kauçuk ve elyaf içeren çelik liflerin ortalama birim hacim ağırlığı 7,84 g/cm³ alındığında lif hacim oranı $v_f = 4,79\%$ olan bir numune üretilmiştir. Bununla birlikte, lifler çok sıkıştırılmadan yerleştirildiğinde, aynı hacim içerisine 385 gram çelik tel konulabilmektedir ve bir üretim daha

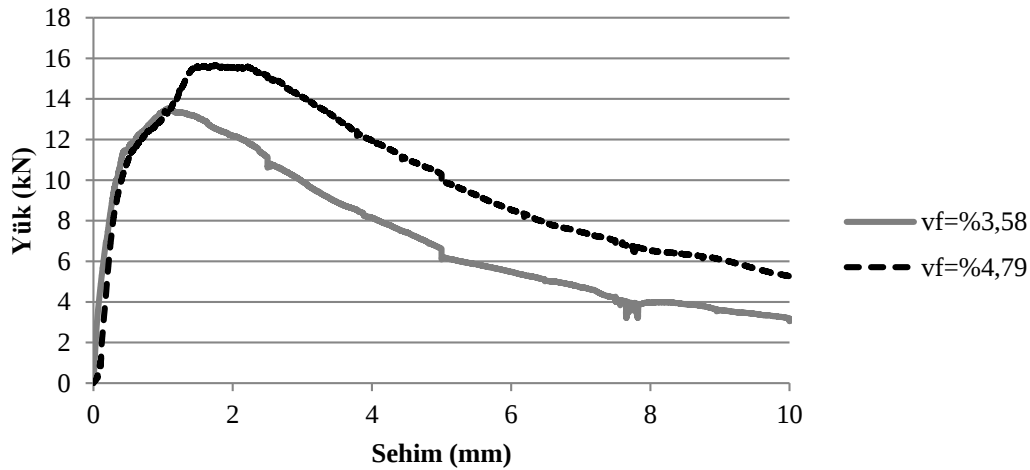
yapılmıştır. Bu durumda lif hacim oranı $v_f = \%3,58$ olarak hesaplanmıştır. Her iki numunede de aynı çimento hamuru kullanılmıştır, yerleşmeyi sağlayabilecek akıcılıktaki çimento hamuru için su/çimento oranı $\%46,43$ olmuştur.



Şekil 3.21 : Deneme üretiminde kullanılan çelik teller.

Üretilen numuneler kür havuzunda bekletildikten sonra deplasman kontrollü üç noktalı eğilme deneyi ve basınç deneyi yapılmıştır. Eğilme deneyi için, numunelerin orta noktasından $(1/6) \times$ numune yüksekliği kadar derinlikte çentik açılmıştır. Eğilme deneyinde iki mesnet arası mesafe 20 cm olarak ayarlanmıştır.

Bu üretimler, deneme amaçlı üretimler olduğu için, beton sertleştikten sonra, laboratuvarın deney için uygun olduğu 11. günde eğilme deneyi yapılmıştır. 11. günde yapılan eğilme deneyi sonunda elde edilen, C firmasından temin edilen atık çelik tellerle üretilmiş, farklı lif hacim oranına sahip numunelere ait yük-sehim eğrileri Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Burada, tek bir lif türü, farklı miktarlarda kullanılarak yük-sehim grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.22 : Yük-sehim eğrisi.

Grafikten de görüleceği üzere lif miktarındaki artış ile birlikte elastisite modülü ve rijitlikte bir miktar düşüş olurken, tokluk ve süneklikte önemli bir artış sağlanmıştır. Lifli numuneler için deplasman kontrollü eğilme deneyi uzun sürdüğünden, eğilme deneyinin ardından, basınç deneyi ertesi gün yapılabilmiş ve aynı numuneler üzerinde 12. günde basınç deneyi uygulanmıştır.

Farklı lif oranına sahip prizmatik numuneler üzerinde 12. günde yapılan basınç deneyi sonuçları Çizelge 3.20’de verilmiştir.

Çizelge 3.20 : Numunelerin 12 günlük basınç dayanımları.

Lif Hacim Oranı v_f (%)	Yük (kN)	Basınç Deneyi Sonuçları		
		Ortalama Yük (kN)	Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
3,58	189,5	185,5	38,7	37,9
3,58	181,4		37,0	
4,79	159,8	155,8	32,6	31,8
4,79	151,8		31,0	

Lif hacim oranı, %3,58’den %4,79’a çıkarıldığında, basınç dayanımının düştüğü görülmektedir. Bunun sebepleri arasında lif miktarının çok fazla olmasının işlenebilirliğe olumsuz etkisi ve çimento hamurunun yerleştirilmesinde meydana gelen zorluk yer almaktadır. Bir diğer faktör de liflerin kauçuk ve elyaf gibi yabancı maddelerden tamamen arınmış olmaması ve lif içeriğiyle birlikte bu yabancı maddelerin de miktarının artmasıdır. Şekil 3.23 ve 3.24’te geri dönüşüm firmalarından alınan farklı çelik tel örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.23 : Farklı çelik tel numuneleri.



Şekil 3.24 : Hurda çelik tel numunesi.

3.3.2 SIFCON tasarımı

Yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktivasyonu sırasında karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi işlenebilirlik konusunda olmuştur. Beklenildiği üzere, su/bağlayıcı oranı arttırıldığında işlenebilirlik iyileşmiş ancak bu artış, basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur. Bu durumu önlemek amacıyla, su/bağlayıcı oranını çok arttırmadan üretim yapmak hedeflenmiş, SIFCON üretimine uygun olabilecek akıcı kıvamdaki alkali ile aktifleştirilmiş harç üretimi için farklı karışım oranlarıyla deneme üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Dizayn doğru yapılmadığında alkali ile aktifleştirilmiş harçlarda rötire ve çiçeklenme sorunları görülebilmektedir, 25 farklı karışım yapılarak dayanım açısından yeterli sonucu veren, rötire çatlağı oluşmayan, çiçeklenme gözlenmeyen ve kıvam açısından SIFCON üretiminde sorun yaratmayacak olan karışımlardan biri esas alınmıştır.

3.3.2.1 Deneme üretimleri

Deneme amaçlı üretilen harçlarda deneyler 90 günlük numunelerde gerçekleştirilmiş, numuneler deney gününe kadar kür havuzunda bekletilmiştir, ardından sertleşmiş harç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneme üretimlerinde lif içermeyen harçlar 4 cm×4 cm×16 cm boyutlu prizmatik kalıplar kullanılarak üretilmiştir, çelik tel içeren 1 numaralı karışım ise 7 cm×7 cm×28 cm boyutlu prizmatik çelik kalıp ile üretilmiştir.

Üretim aşamasında, aktivatörler (sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat), bağlayıcı ve kum karışımına eklenmeden önce birlikte karıştırılmış, aktivatör sıcaklığının oda sıcaklığına düşmesi için beklenmiş, ardından döküm yapılmıştır.

Deneme üretimleri Çizelge 3.21’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.21 : Deneme üretimleri.

Karışım No	Dozaj (kg/m ³)	Agrega/Bağlayıcı	Su/Bağlayıcı	Sodyum Silikat/Sodyum Hidroksit	NaOH Çözeltilisinin Derişimi	Katkı
1	785	1,00	0,45	2,50	14 M	- (%2 çelik tel)
2	801	1,00	0,45	2,50	14 M	%1,5 Hava Sürükleyici
3	805	1,00	0,45	2,50	14 M	%1 Süperakışkanlaştırıcı
4	805	1,00	0,45	2,50	14 M	%1 Sika Paver C1
5	805	1,00	0,45	2,50	14 M	-
6	805	1,00	0,45	2,50	14 M	%1 Sika Viscocrete SF-18
7	961	1,00	0,35	2,50	14 M	%1,5 Sika Viscocrete SF-18
8	961	1,00	0,40	2,50	14 M	%1,5 Sika Paver C1
9	961	1,00	0,40	1,00	14 M	-
10	961	1,00	0,40	1,00	14 M	%1,5 Sika Viscocrete SF-18
11	961	1,00	0,40	1,00	14 M	%1,5 Sika Paver C1
12	961	1,00	0,40	3,00	14 M	-
13	961	1,00	0,40	3,00	14 M	%1,5 Sika Paver C1
14	961	1,00	0,40	3,00	14 M	%1,5 Sika Viscocrete SF-18
15	645	2,00	0,40	1,00	14 M	%1,5 Molekül HP 807
16	645	2,00	0,40	3,00	14 M	-
17	773	1,50	0,40	2,50	14 M	%1,5 Molekül HP 807
18	859	1,25	0,40	2,50	14 M	%1,5 Molekül HP 807
19	859	1,25	0,40	3,00	14 M	%1,5 Molekül HP 807
20	859	1,25	0,45	2,50	14 M	-
21	773	1,50	0,45	2,50	14 M	%1,5 Molekül HP 807
22	773	1,50	0,45	3,00	14 M	%1,5 Molekül HP 807
23	859	1,25	0,45	2,50	14 M	-
24	859	1,25	0,45	2,50	10 M	-
25	859	1,25	0,40	2,50	10 M	%1,5 Sika Paver C1

Farklı kimyasal katkıları kullanılarak alkali ile aktifleştirilmiş harç üretimi gerçekleştirilse de, bu katkıları çimento ile çalışmaları gibi etkin olmamıştır. Bakharev ve diğ. (2000), alkali ile aktifleştirilmiş betonda işlenebilirliği arttırmak için hava sürükleyici katkı kullanılabileceğini, bunun basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki yaratmadığını ifade etse de, yapılan denemelerde kullanılan hava sürükleyici kimyasal katkıları ile işlenebilirlik iyileştirilememiştir. Kimyasal katkı kullanımı yerine, kullanılan cürufun inceliğinin arttırılması ve mümkünse ultra ince cüruf kullanılması kıvamı daha akıcı hale getirmektedir. Bunun haricinde, yüksek fırın cürufu yerine uçucu kül ile yapılan deneme üretimlerinde su/bağlayıcı oranı düşük olsa dâhi kıvamın çok daha akıcı olduğu gözlenmiştir, ancak bu üretimlerde dayanım, yüksek fırın cürufu ile yapılan üretime göre oldukça düşük olmuştur. Kıvamı daha akıcı duruma getirmek için yüksek fırın cürufu ile birlikte bir miktar silis dumanı kullanımı çözüm olabilmektedir.

Deneme üretimlerinde kıvam, rötre oluşumu, priz süresi ve çiçeklenme oluşumu konularında sorunlarla karşılaşmıştır. Esas üretimden önce, uygun dizayn yapılarak bu sorunlar giderilmeye çalışılmıştır.

Deneme amaçlı üretilen harç numunelerin birim ağırlık, su emme değerleri ile 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları Çizelge 3.22’de verilmiştir.

Çizelge 3.22 : Birim ağırlık, su emme ve dayanım değerleri.

Karışım No	Birim Ağırlık (g/cm ³)	Su Emme (%)	90 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
1	1,72	12,2	7,7	86,3
2	1,89	8,6	-	37,8
3	1,95	12,0	1,8	46,6
4	1,99	11,8	2,5	50,5
5	1,97	7,9	3,7	52,9
6	1,98	15,7	2,7	43,6
7	2,07	3,8	5,0	58,6
8	2,20	7,1	2,8	52,4
9	1,95	11,1	3,6	74,1
10	1,93	11,9	3,7	62,9
11	1,72	15,6	3,7	40,5
12	1,90	12,6	3,2	51,9
13	1,86	13,7	3,8	47,6
14	1,83	13,7	3,9	49,7
15	1,95	9,0	5,4	74,3
16	1,95	10,5	5,0	56,2
17	1,89	11,9	5,1	61,6
18	1,85	12,9	4,1	49,9
19	1,87	13,2	3,9	49,1
20	1,87	13,4	3,3	48,5
21	1,83	12,7	3,9	48,0
22	1,82	13,2	4,0	44,5
23	1,88	13,4	3,5	43,2
24	1,86	13,1	3,7	50,7
25	1,92	12,2	4,4	58,4

Deneme üretimlerinde gözlenen sonuçlar şunlardır:

- Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı arttığında kıvam iyileşmiştir.
- Su/bağlayıcı oranı arttığında kıvam iyileşmiştir.
- Kullanılan katkıları, çimento ile çalıştığı gibi etkin çalışmamaktadır.
- Kullanılan NaOH molaritesi arttığında su ihtiyacı artmaktadır.
- Kıvam kötüleşerek akıcılık azaldıkça dayanım değerleri artmaktadır. Bununla birlikte, en akıcı kıvamdaki karışımla bile taşıyıcı eleman için yeterli bir basınç dayanımı elde edilebilmiştir.

3.3.3 SIFCON üretimleri

Kullanılmış araç lastiklerinin geri dönüşümü sonucu elde edilmiş hurda çelik teller ile SIFCON üretimi gerçekleştirilmiş, yanak teli (sürekli, düz) ve kırılmış tel (süreksiz) olmak üzere iki çeşit hurda çelik tel kullanılmıştır. Bu teller, Gazisan Geri

Kazanım adlı firmadan temin edilmiştir. Yanak tellerinin çapı ortalama 1,79 mm olup bu teller, kalıba yerleştirilmeden önce, kalıba sığacak uzunlukta kesilerek kompozit üretiminde sürekli lif olarak kullanılmıştır. Fiber hacim oranları %0, 1, 2, 3, 4 ve 5 olacak şekilde değiştirilmiş ve her bir karışımdan en az üç adet olacak şekilde 7 cm×7 cm×28 cm boyutlu numuneler üretilmiştir. Bu boyuttaki numunelerde, boyut etkisinin sonuçlar üzerinde etkili olacağı ve temsil durumu göz önünde bulundurulduğunda daha büyük kalıplarla üretim yapılmasının daha uygun olacağı bilinmekle birlikte, laboratuvarında bulunan kalıplar kullanılarak üretim gerçekleştirildiğinden söz konusu boyutlar tercih edilmiştir. Aynı geometrik şekle sahip numunelerde, boyut değişmesi durumunda basınç dayanımı değerlerinin önemli ölçüde değişiklik göstermesi durumu, boyut etkisi olarak adlandırılmaktadır. Heterojen malzemelerde, malzeme hacmi arttıkça, bu hacim içerisinde kusur bulunma olasılığı da artacağından, büyük boyutlu numunelerle çalışıldığında basınç dayanımlarında azalma gözleneceği dikkate alınmalıdır.

Sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi ile yapılan üretimlerde, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2,6, bağlayıcı/kum oranı 0,8 olacak şekilde tasarım yapılmıştır.

SIFCON üretiminde kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.23'te verilmiştir.

PÇ koduyla verilen üretimde, Portland çimentosu, su ve ince kum kullanılmıştır.

8M koduyla verilen seride, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, 8 M sodyum hidroksit çözeltisi, sıvı sodyum silikat ve ince kum ile üretim yapılmıştır.

14M koduyla verilen seride, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, 14 M sodyum hidroksit çözeltisi, sıvı sodyum silikat ve ince kum ile üretim gerçekleştirilmiştir.

8MWG koduyla verilen seride, 8 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam aktivatör olarak kullanılmış, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve ince kum ile üretim yapılmıştır.

Son olarak 14MWG koduyla verilen seride ise, 14 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam aktivatör olarak kullanılmış, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve ince kum ile üretim gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.23 : SIFCON için karışım oranları.

Karışım	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	Yüksek Fırın Cürufu (kg/m ³)	Sodyum Hidroksit Çözeltisi (kg/m ³)	Sodyum Silikat (kg/m ³)	Toplam Aktivatör (kg/m ³)
PÇ	795	431	994	0	0	0	0
8M	0	0	963	771	181	470	651
14M	0	0	963	771	195	507	702
8MWG	0	0	963	771	0	0	763
14MWG	0	0	963	771	0	0	864

SIFCON üretiminde, taze betonun kıvamı çok akıcıdır, bu durum karışımın lifler arasından geçebilmesine olanak tanır. Elde edilen kıvamda ayrışma gerçekleşmemiş, kum dibe çökmemiştir. SIFCON üretimi için literatürde önerilen 25–40 s akış aralığında kalınması sağlanmıştır.

3.3.3.1 Lif dağılımı

Döküm öncesinde, çelik lifler kalıplara Şekil 3.25’te gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir. Lif dağılımı, sürekli ve süreksiz lifler için sırasıyla, Şekil 3.26 ve 3.27’de yakından gösterilmiştir. Lifler önceden yerleştirilmiş olup uzundur, bu nedenle akıcı kıvamdaki harcın dökümü sırasında lifler yer değiştirmemekte veya yönleri değişmemektedir.



Şekil 3.25 : Dökümden önce çelik liflerin yerleştirilmesi.



Şekil 3.26 : Sürekli liflerin dağılımı.



Şekil 3.27 : Süreksiz liflerin dağılımı.

Aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılan numunelerde, alkali silikat kullanımı sebebiyle, üretilen malzeme ve çelik kalıp arasında güçlü adhezyon oluşmuş, numuneler kalıba yapışma eğilimi göstermiş ve bu sorun kalıp yağı kullanımıyla giderilemiştir, bu nedenle bu numunelerin üretiminde ahşap kalıp kullanımı tercih edilmiştir. Sodyum silikat yerine öğütülmüş cam kullanılan numunelerde böyle bir sorunla karşılaşılmamıştır.

Üretilen SIFCON karışımları Çizelge 3.24'te verilmiştir.

Cam içeren çözeltiler hazırlanırken 1 litre sodyum hidroksit çözeltisi içerisinde 150 g öğütülmüş cam kullanılmıştır. WG kodlu üretimlerde öğütülmüş atık cam içeren sodyum hidroksit çözeltisi aktivatör olarak kullanılmıştır.

14MWG kodlu üretimlerde, aktivatör/bağlayıcı oranı yerleştirmede yaşanan problemler nedeniyle arttırılmak zorunda kalınmıştır.

14MWG kodlu üretimlerde kuruma, soğuk havanın da etkisiyle çok geç gerçekleşmiş, bunun dışındaki üretimlerde böyle bir sorunla karşılaşılmamıştır.

Çimentolu üretimler, dozaj 795 kg/m^3 , su/çimento oranı 0,54, çimento/kum oranı 0,80 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin taze haldeki görünümü Şekil 3.28'de verilmiştir.

Esas üretimlerin dışında, 8 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş cam ile akıcı kıvamlı (8MWG-akıcı, kum/YFC=1,25, çözelti/YFC=1,16) ve daha kuru kıvamlı (8MWG-kuru, kum/YFC=1,25, çözelti/YFC=0,57) iki üretim daha gerçekleştirilmiş ve dayanımların ne şekilde değiştiği araştırılmıştır.

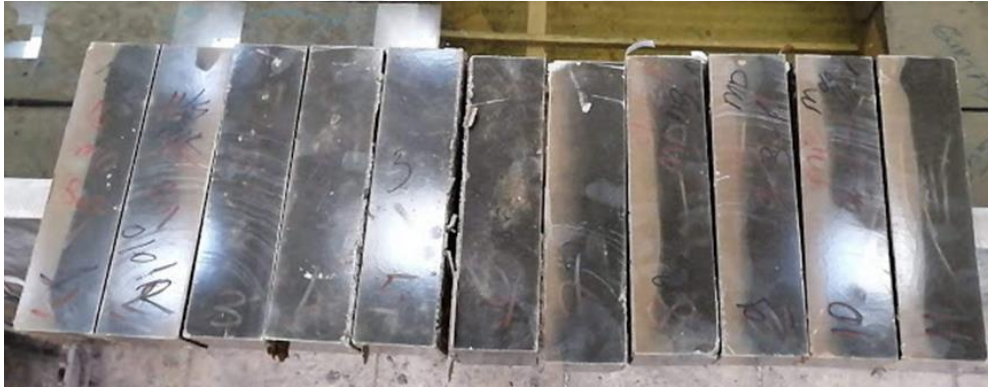
Çizelge 3.24 : SIFCON karışımları.

Karışım Kodu	Çelik lif türü	Lif hacim oranı v_f (%)	Açıklama
PÇ-%0R	-	0	
PÇ-%1D	Yanak teli	1	
PÇ-%2D	Yanak teli	2	
PÇ-%3D	Yanak teli	3	
PÇ-%4D	Yanak teli	4	
PÇ-%5D	Yanak teli	5	Su+çimento+ince kum+hurda çelik tel
PÇ-%1K	Kırılmış tel	1	
PÇ-%2K	Kırılmış tel	2	
PÇ-%3K	Kırılmış tel	3	
PÇ-%4K	Kırılmış tel	4	
PÇ-%5K	Kırılmış tel	5	
8M-%0R	-	0	
8M-%1D	Yanak teli	1	
8M-%2D	Yanak teli	2	
8M-%3D	Yanak teli	3	
8M-%4D	Yanak teli	4	
8M-%5D	Yanak teli	5	8 M NaOH+sodyum silikat+öğütülmüş yüksek fırın cürufu+ince kum+hurda çelik tel
8M-%1K	Kırılmış tel	1	
8M-%2K	Kırılmış tel	2	
8M-%3K	Kırılmış tel	3	
8M-%4K	Kırılmış tel	4	
8M-%5K	Kırılmış tel	5	
14M-%0R	-	0	
14M-%1D	Yanak teli	1	
14M-%2D	Yanak teli	2	
14M-%3D	Yanak teli	3	
14M-%4D	Yanak teli	4	
14M-%5D	Yanak teli	5	14 M NaOH+sodyum silikat+öğütülmüş yüksek fırın cürufu+ince kum+hurda çelik tel
14M-%1K	Kırılmış tel	1	
14M-%2K	Kırılmış tel	2	
14M-%3K	Kırılmış tel	3	
14M-%4K	Kırılmış tel	4	
14M-%5K	Kırılmış tel	5	
8MWG-%0R	-	0	
8MWG-%1D	Yanak teli	1	
8MWG-%2D	Yanak teli	2	
8MWG-%3D	Yanak teli	3	
8MWG-%4D	Yanak teli	4	
8MWG-%5D	Yanak teli	5	8 M NaOH+öğütülmüş atık cam +öğütülmüş yüksek fırın cürufu+ince kum+hurda çelik tel
8MWG-%1K	Kırılmış tel	1	
8MWG-%2K	Kırılmış tel	2	
8MWG-%3K	Kırılmış tel	3	
8MWG-%4K	Kırılmış tel	4	
8MWG-%5K	Kırılmış tel	5	
14MWG-%0R	-	0	
14MWG-%1D	Yanak teli	1	
14MWG-%2D	Yanak teli	2	
14MWG-%3D	Yanak teli	3	
14MWG-%4D	Yanak teli	4	
14MWG-%5D	Yanak teli	5	14 M NaOH+öğütülmüş atık cam+öğütülmüş yüksek fırın cürufu+ince kum+hurda çelik tel
14MWG-%1K	Kırılmış tel	1	
14MWG-%2K	Kırılmış tel	2	
14MWG-%3K	Kırılmış tel	3	
14MWG-%4K	Kırılmış tel	4	
14MWG-%5K	Kırılmış tel	5	



Şekil 3.28 : Taze haldeki numunelerin görünümü.

Numunelerin sertleşmiş haldeki görünümü Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29 : 14M kodlu numunelerin kalıptan çıktıktan sonraki görünümü.

Öğütülmüş cam kullanılarak hazırlanan aktivatör çözelti Şekil 3.30’da gösterilmiştir.



Şekil 3.30 : 14 M NaOH ve öğütülmüş atık cam ile hazırlanan aktivatör.

3.3.4 Kür koşulları

Çimento kullanılarak üretilen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra deney gününe kadar kür havuzunda kirece doymun suda bekletilmiştir.

Tezin odak noktasında bulunan beton üretiminde atıkları değerlendirerek enerji ve maliyetten kazanım sağlanması hedefi, ısıt işlem uygulamasıyla tekrar bir enerji sarfiyatı gerçekleşeceğinden bu kür koşuluyla ters düşmektedir. SIFCON üretiminde yüksek erken dayanım gibi bir hedef bulunmadığından SIFCONlarda ısıt işlem uygulanmamış, yine de ısıt işlem ile yapılan kürün etkisini görmek için farklı kür koşullarında harç numuneler üzerinde deney yapılmıştır. Benzer şekilde, çevresel ve ekolojik zararı azaltmak, üretim için gerekli enerji ihtiyacını ve üretim maliyetini düşürmek gibi hedeflerle yola çıkıldığından, kullanılan aktivatör miktarı da fazla artırılmamaya çalışılmıştır. Bunun yanı sıra, aktivatör/bağlayıcı oranındaki artışın basınç dayanımında azalmaya sebep olduğu görülmüştür.

Alkali ile aktifleştirilen çimento bulamacı emdirilmiş lif donatılı betonlarda kontrollü bir kür uygulanabilmesi açısından, numunenin deney zamanına kadar kür havuzunda bekletilmesi tercih edilmiştir. Ancak, sodyum silikat yerine öğütölmüş atık cam kullanılan numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra deney gününe kadar laboratuvar koşullarında açık ortamda bekletilmiştir. Bunun sebebi 14 M sodyum hidroksit ve öğütölmüş atık cam içeren numunelerde, aktivatörün zamanla numune yüzeyine çıkması ve kurumanın çok geç gerçekleşmesidir, kuruma gerçekleşikten sonra ise yüzeyde kristalleşme oluşmuştur, hava ile temas halinde ilerleyen yaşlarda numune yüzeyinde suda çözünebilen beyaz bir tabaka birikmiştir. Tüm bunları gözleyebilmek için cam içeren numuneler kür havuzuna konmamıştır. 8 M sodyum hidroksit ve öğütölmüş atık cam içeren numunelerde böyle bir sorunla karşılaşılmamıştır. Bununla birlikte, molarite yüksek olsa dahi, daha az aktivatör kullanıldığında da bu gibi sorunlarla karşılaşılmamış, ancak bu sefer de kıvam kötü etkilenmiş, SIFCON üretimi için uygun akıcılık sağlanamamıştır. Geopolimer malzemelerde çiçeklenme, esasen geopolimer ürününde reaksiyona girmemiş veya fazla miktardaki alkali çözeltinin varlığından kaynaklanır, bu da kür esnasında hava ile temas ettiğinde, karbondioksitle reaksiyona girerek malzeme yüzeyinde sodyum karbonat, potasyum karbonat gibi bir karbonat tuzu oluşturur (Kang ve Kwon, 2017; Zhang ve diğ, 2014, 2018; Kani ve diğ, 2012). Yapılan üretimlerde malzeme üzerinde biriken beyaz renkli tabakanın, sodyum hidroksit kullanılarak aktivasyon gerçekleştirildiğinden

sodyum karbonat olduğu söylenebilir. Bu durumu azaltmak için, karışımındaki alkali konsantrasyonu azaltılabilir, ancak bu derişimi çok azaltmak da, priz süresi, kıvam, bağlayıcılık kazanma, dayanım, üretilen malzemedeki boşluk hacmi gibi konularda malzeme özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle alkali derişiminde azaltma, sadece reaksiyon için gerekli olan alkali konsantrasyonunun kullanıldığı bir seviyeye kadar yapılmalıdır. Özetle, karışım dizaynı yapılırken dikkatli olunmalıdır, sistemde çok fazla çözünür tuz olması, kötü karıştırma, reaksiyona katılmayan durumdaki fazla miktardaki serbest su, bu tuzların çözünerek alkali oksitlerin yüzeye doğru hareketine ve buna bağlı olarak da alkali ile aktive edilen malzemelerde çiçeklenme problemine neden olmaktadır, fazla su miktarının azaltılması dayanıma katkı sağlayacağı gibi sodyum iyonunun yüzeye hareketini de azaltacaktır (Wang ve diğ, 2020; Boccalon ve diğ, 2019; Brocken ve Nijland, 2004). Böyle bir durumda yüksek sıcaklık kürü uygulamak ya da kullanılan aktivatörü değıştirmek de bir çözüm olabilir, örneğin sodyum yerine potasyum esaslı aktivatör kullanılarak yapılan üretimlerde, potasyumun atom ağırlığının, iyon yarıçapının ve polikondenzasyon hızının sodyuma göre büyük oluşu, ürünün daha kararlı olmasını ve daha zor hareketini sağlamış, çiçeklenme problemini azaltmıştır, ayrıca potasyumun viskozitesinin düşük olması betonun daha iyi ıslanmasına olanak tanımış ve daha az aktivatör kullanarak daha iyi bir kıvam, işlenebilirlik ve dayanım sağlayabilmeye izin vermiştir (Zhang ve diğ, 2014; Hounsai ve diğ, 2014; Lv ve diğ, 2020).

3.3.5 Sertleşmiş beton deneyleri

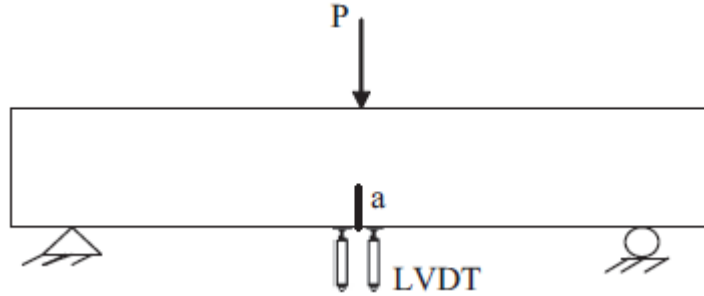
Üretilen numunelerin 90 günlük eğilme, yarmada çekme ve basınç dayanımları belirlenmiştir.

3.3.5.1 Eğilme deneyi

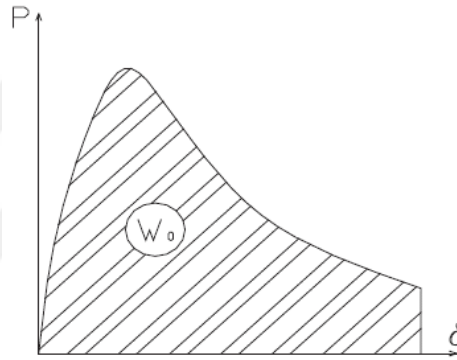
Üretilen numunelerin ortasında 1 cm derinliğinde çentik açıldıktan sonra, yer değıştirme (deplasman) kontrollü eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Üç noktalı eğilme deneyi, şematik olarak Şekil 3.31’de gösterilmiştir. Tipik bir yük-deplasman eğrisi, Şekil 3.32’de verilmiştir.

Üç noktalı eğilme deneyi ile numunelere ait yük-sehim grafikleri elde edilmiştir. Mesnet açıklığı 20 cm, yükleme hızı 0,15 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Deplasman ölçümleri, numune üzerine bağlanan iki adet LVDT yardımıyla alınmış, yük değıerleri ise loadcell kullanılarak datalogger aracılığıyla üç kanaldan elde

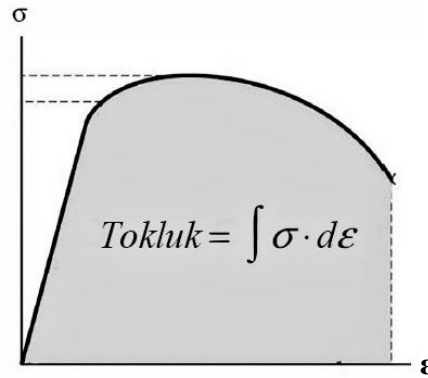
edilmiştir. Tokluk, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi, elde edilen yük-sehim grafiklerinden faydalanılarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğunun hesaplanması, Şekil 3.33'te gösterilmiştir. Tokluk değeri, yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın trapez kuralı ile hesaplanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 3.31 : Üç noktalı eğilme deneyi.



Şekil 3.32 : Tipik bir yük-deplasman eğrisi ve kırılma tokluğu.



Şekil 3.33 : Tokluk.

Çentikli numuneler için üç noktalı eğilme deneyinde yük-sehim eğrisinin altında kalan alan W_0 kullanılarak RILEM TC 50-FMC (1985) tarafından önerilen formül ile kırılma enerjisi G_F , N/m ya da J/m^2 cinsinden hesaplanmıştır (3.2).

$$G_F = \frac{W_0 + \frac{L}{L'} mg \delta_0}{B(H-a)} \quad (3.2)$$

Bu ifadede,

m: Numune kütlesi (kg),

L: Mesnet açıklığı (m),

L': Numune boyu (m),

g: Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²),

δ₀: Açıklık ortasında son sehim (m),

B: Kiriş eni (m),

H: Kiriş yüksekliği (m),

a: Çentik derinliği (m) değerini göstermektedir.

Çentikli numunelerin eğilme dayanımı $\sigma_{\text{eğilme}}$, MPa biriminden denklem 3.3 ile hesaplanmıştır:

$$\sigma_{\text{eğilme}} = \frac{3PL}{2B(H-a)^2} \quad (3.3)$$

Burada,

P: Üç noktalı eğilme deneyinde kaydedilen en büyük yük (N),

L: İki mesnet arası açıklık (mm),

B: Kiriş eni (mm),

H: Kiriş yüksekliği (mm),

a: Çentik derinliği (mm) olarak ifade edilmiştir.

3.3.5.2 Yarma deneyi

7 cm kenar uzunluğuna sahip prizmatik numuneler üzerinde yarma deneyi yapılarak numunelerin yarmada çekme dayanımları f_{ct} , MPa biriminden aşağıdaki formülle tespit edilmiştir:

$$f_{\text{ct}} = \frac{2F}{\pi a^2} \quad (3.4)$$

Burada,

F: Numuneye gelen en büyük basınç yükü (N),

a: K p numunenin kenar uzunluğu (mm) şeklinde ifade edilmiştir.

3.3.5.3 Basınç deneyi

Eğilme deneyi sonunda kırılan numunenin her iki parçası için de basınç deneyi yapılarak ortalama basınç dayanımları belirlenmiştir.





4. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Harçlar Üzerinde Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

4.1.1 Eğilmede çekme dayanımı

Çizelge 3.7’de belirtilen harçların, farklı yaşlarda eğilmede çekme dayanımları Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1’de verilmiştir. İfade edilen dayanım değerleri, deney gününe kadara kirece doymun suda kürlenem üç numunenin ortalama değerleridir.

Atık cam içeren numunelerin eğilme mukavemeti değerlerinin referans numuneninkinden daha düşük olduğu gözlenmiştir, ancak daha yüksek NaOH derişimleri eğilmede çekme dayanımı sonuçlarını iyileştirmiştir.

90 günlük veriler incelendiğinde, atık camın silikat kaynağı olarak kullanıldığı numunelerde elde edilen eğilmede çekme dayanımı değerlerinin, aynı sodyum hidroksit derişimi ve aynı cüruf kullanılıp cam yerine ticari sodyum silikat ile aktive edilen numunelerinkinden düşük olduğu görölmektedir. Bu sonucun elde edilmesinde, camın yetersiz aktivasyonu ve amorf yapısı etkili olabilir. Cam içeren numunelerde kum ile çimento hamuru arasındaki bağ daha zayıf olabilir, bu da mekanik özellikleri olumsuz etkilemiş olabilir.

Erken yaşlarda, cam ile aktifleştirilen numunelerde, ticari sodyum silikat ile aktifleştirilen numunelere nazaran daha yüksek eğilmede çekme dayanımı değerleri elde edilebilmiştir, bu da, camlı numunelerde reaksiyonun daha hızlı olduğunu ve daha erken tamamlandığını ifade etmekte, nihai dayanımın büyük bir kısmının erken yaşlarda kazanılabildiğini göstermektedir. Ticari sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde reaksiyon daha yavaş olmuş, daha geç tamamlanmış ve ileri yaşlardaki dayanım ile erken yaşlardaki dayanım farkı daha fazla olmuş, diğer bir ifadeyle numune yaşına göre dayanımlar daha geniş bir bant aralığında değişmiş, bununla birlikte ileri yaşlarda daha yüksek dayanım değerlerine erişilebilmiştir.

Çizelge 4.1 : Farklı yaşlarda harçların eğilmede çekme dayanımları (MPa).

Numune	Numune Yaşı			
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
R	5,6	9,0	9,4	10,2
8M/YFC-I	3,4	5,0	7,0	9,5
14M/YFC-I	4,5	5,7	8,3	10,0
10MWG/YFC-I	3,5	6,4	6,4	7,5
12MWG/YFC-I	5,9	6,1	7,3	7,9
14MWG/YFC-I	6,4	7,7	7,8	8,3
10M/YFC-II	3,3	6,7	10,3	10,5
12M/YFC-II	3,5	8,9	10,6	11,8

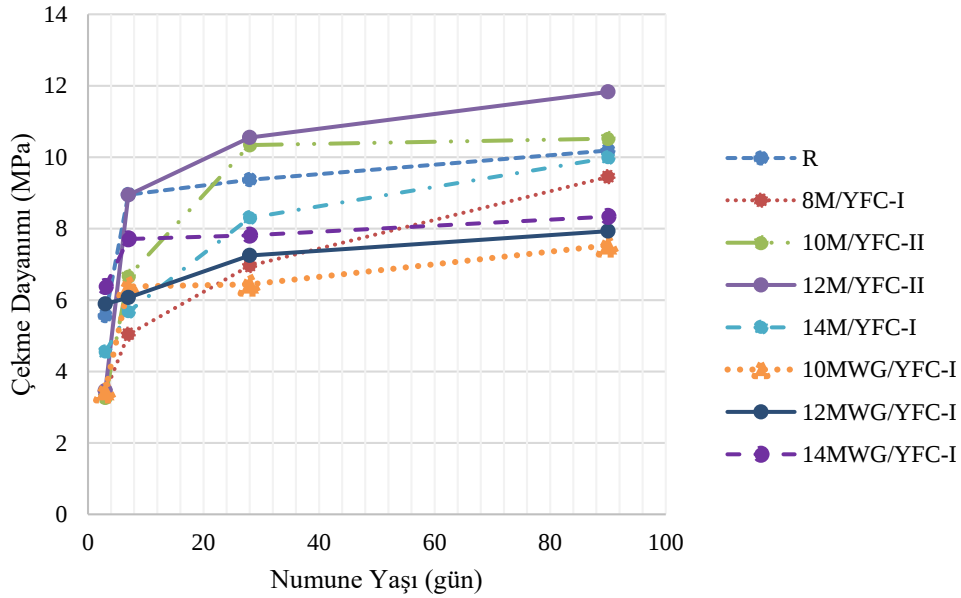
3 günlük en yüksek eğilmede çekme mukavemeti değeri, atık cam içeren ve 14 M sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilen 14MWG/YFC-I numunesi ile elde edilmiştir. Daha sonraki yaşlarda, referans numunenin eğilme mukavemeti, cüruf-I ile üretilen alkali ile aktifleştirilmiş harçlarınkinden daha yüksek olmuştur. Erken yaşlarda, atık cam içeren alkali ile aktifleştirilmiş harç numuneleri, aynı derişimdeki sodyum hidroksit ile aktive edilen ve cam içermeyen numunelerden daha yüksek eğilmede çekme mukavemeti değerine sahipken bu durum ilerleyen yaşlarda tersine dönmüştür, bu durum, sıvı sodyum silikat ile üretilen numunelerin aktivasyon reaksiyonunun daha uzun sürdüğünü göstermektedir.

Sıvı sodyum silikat ile aktifleştirilen numunelerde erken yaşlarda, çimento ile üretilen referans numunenin dayanım değerlerine ulaşamamıştır. Burada, kullanılan çimentonun hızlı erken dayanım sağlayacak özellikte olmasının etkisi bulunmaktadır. Eğilmede çekme dayanımının erken yaşlarda yüksek olması istenen durumlarda, atık cam ile aktivasyon daha uygun olabilir. Öte yandan, sodyum silikat yerine atık cam kullanımı 28. günde ve 90. günde eğilmede çekme mukavemetini azaltmıştır.

İlerleyen yaşlarda, artan NaOH derişimleri ile referans numunenin eğilmede çekme mukavemeti değerlerine ulaşmak mümkün hale gelmiştir. Ticari sodyum silikat ile hazırlanan alkali aktifleştirilmiş harçlarda reaksiyon süresinin, çimentonun hidratasyon reaksiyonundan daha uzun olduğu söylenebilir.

90 günlük veriler değerlendirildiğinde, cüruf-II ile üretilen numunelerin eğilmede çekme dayanımı açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Cüruf-II'nin inceliğinin fazla oluşu, reaktiviteyi arttırarak üretim sırasında işlenebilirliğin daha iyi olmasını sağlamıştır, böylece taze halde harcın yerleştirilmesi daha kolay gerçekleştirilmiştir, bu da mekanik özelliklerin iyileşmesine katkı sağlamıştır. Bunun

yanı sıra cüruf-II'nin CaO ve Al₂O₃ içeriğinin fazla oluşu, ürün olarak oluşan C-A-S-H fazının artmasına katkıda bulunarak dayanım değerlerini iyileştirmiştir. Bu cürufta sülfat, Na₂O ve toplam alkali miktarı da cüruf-I'den fazladır, bu değerler de sonuçlar üzerinde etkili olmuştur.



Şekil 4.1 : Farklı yaşlarda harçların eğilmede çekme dayanımları.

Genel olarak sodyum hidroksit derişiminin artması mekanik özellikleri iyileştirmiştir. Öğütülmüş cam ve sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak aktifleştirilmiş harç numunelerde, sodyum hidroksit derişimi arttıkça eğilmede çekme dayanımı değerleri artmıştır. Bu durum, aktivasyonun yüksek derişimlerde daha etkin olduğunu göstermektedir. Aynı cüruf ile üretilen, sodyum hidroksit ve sodyum silikatın aktivatör olarak kullanıldığı numunelerde de sodyum hidroksit derişiminin artması çekme dayanımı sonuçlarını iyileştirmiştir. Bu durum beklenen bir sonuç olmasına rağmen, aşırı yüksek aktivatör konsantrasyonlarının karışım tasarımına bağlı olarak dayanımı düşürebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Hashim ve diğ, 2015). Yüksek konsantrasyonlarda, reaksiyona katılmayan ve bağlanmayan aktivatör, numune yüzeyine ilerleyerek malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Atık cam içeren numunelerde, NaOH konsantrasyonundaki artış, eğilmede çekme mukavemeti değerlerini arttırmış olup bu etki, erken yaşlarda daha belirgin olmuştur.

12MWG/YFC-I ve 14MWG/YFC-I ile kodlanan numunelerin üç günlük eğilmede çekme dayanımı değerleri, referans değerini aşmıştır ancak daha sonraki yaşlarda, referansın eğilmede çekme dayanımına öğütülmüş cam içeren alkali aktifleştirilmiş harçlarla ulaşılamamıştır. Atık cam kullanımı, 3 günlük eğilmede çekme mukavemetini %42,2 arttırmış ancak 90 günlük eğilmede çekme mukavemeti değerini %17,0 oranında düşürmüştür. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş harçlarda uygun bir tasarım ile prefabrike yapısal elemanlarda kullanılacak bir yapı malzemesi için yeterli eğilmede çekme mukavemeti değerleri elde edilebilir.

Harçların 28 günlük eğilmede çekme dayanımı sonuçlarını karşılaştırarak maksimum çekme dayanımının 12M/YFC-II numunesi ile elde edildiği söylenebilir. Buradan, alkali ile aktifleştirilen malzemelerin eğilmede çekme dayanımı değerleri üzerinde, cüruf özelliklerinin, sodyum hidroksit konsantrasyonundan daha fazla etkili olduğu; ham madde bileşiminin, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, malzeme özelliklerini belirlemede daha baskın olduğu sonucu çıkarılabilir.

14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat içeren numune, cüruf-I kullanılarak üretilen alkali ile aktive edilmiş harçlar arasında, en yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip olup bu numunenin 28 günlük eğilmede çekme mukavemeti değeri, referanstan %11,7 daha düşüktür.

90. günde eğilmede çekme dayanımları karşılaştırıldığında, referans (R) ile cüruf-I kullanımıyla elde edilebilen en yüksek eğilmede çekme dayanımına sahip numune (14M/YFC-I) arasındaki farkın %2,0 olduğu görülmüştür. Referans numune ile maksimum fark, %26,5 olup 10MWG/YFC-I numunesiyle elde edilmiştir. Bunun nedeni, öğütülmüş camın yetersiz aktivasyonu olabilir. Camın aktivasyon hızını arttırmak böylece harçların mukavemet değerlerini arttırabilmek için; toplam yüzey alanını arttırmak amacıyla camın daha ince parçacıklara öğütülmesi, cam esaslı aktivatörün hazırlanmasında sıcaklıkların ve karıştırma süresinin arttırılması etkili olabilir. Alkali aktivasyon sırasında oluşan mikro çatlaklar eğilme deneyi sonuçlarını olumsuz etkiler, bu nedenle bu çatlakları en aza indirmek ve daha az boşluklu bir yapı elde etmek dürabilite performansını olduğu gibi eğilme mukavemetini de arttıracaktır. Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde rötre oluşumunun azaltılması da mekanik özelliklerde iyileşme sağlayacaktır.

4.1.2 Basınç dayanımı

Farklı yaşlardaki harçların basınç dayanımları sırasıyla Çizelge 4.2 ve Şekil 4.2’de verilmiştir. İfade edilen dayanımlar, su kürü uygulanan altı numunenin ortalama değerleridir. Elde edilen deneysel verilerde standart sapmalar düşük olup varyasyon katsayıları %18’den azdır. Grafiklerin daha anlaşılabilir olması için dağılıma ait veriler grafik üzerinde gösterilmemiştir.

Referans numunenin basınç mukavemeti, ticari sodyum silikat kullanımı ile aşılabılırken atık camın aktivatör olarak kullanımı, çimento esaslı harçların basınç mukavemetine ulaşmada yetersiz kalmıştır. Bu sonuç, atık cam içeren numunelerin yetersiz aktivasyonundan kaynaklanabilir. Bu durum, cam içeren aktivatör çözeltisinin hazırlanmasında daha yüksek sıcaklıklar ve daha uzun karıştırma süreleri sağlanması ile aşılabılır. Bunun yanı sıra, camın amorf yapısı da basınç dayanımı değerlerindeki azalmanın sebebi olabilir. Camlı numunelerde, agrega-hamur arasındaki bağ daha zayıf olabilir.

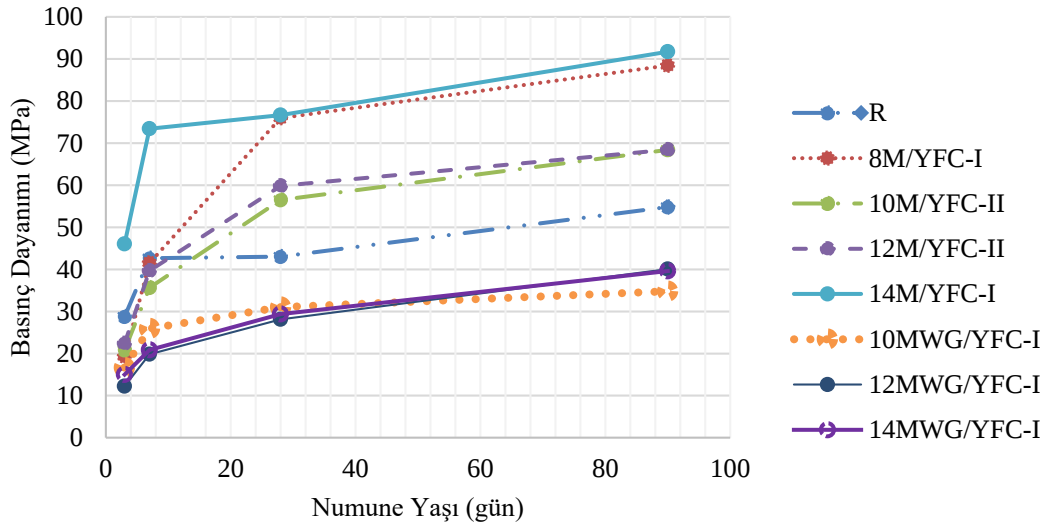
Numunelerin üç günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında, referans numune ile maksimum farkın 12MWG/YFC-I numunesinde olduğu gözlenmiştir ve bu fark %57,6 olmuştur, cam kullanımı harçların üç günlük basınç dayanımını azaltmıştır. Bununla birlikte, sodyum silikat ve 14 M sodyum hidroksit kullanımı, %59,7 oranında basınç dayanımı artışı ile sonuçlanmıştır.

Çizelge 4.2 : Farklı yaşlarda harçların basınç dayanımları (MPa).

Numune	Numune Yaşı			
	3 gün	7gün	28 gün	90 gün
R	28,8	42,7	43,0	54,8
8M/YFC-I	19,3	41,5	76,0	88,5
14M/YFC-I	46,0	73,4	76,7	91,7
10MWG/YFC-I	16,7	25,9	31,0	34,8
12MWG/YFC-I	12,2	19,8	28,1	40,1
14MWG/YFC-I	15,0	20,8	29,4	39,6
10M/YFC-II	20,8	35,7	56,5	68,4
12M/YFC-II	22,4	39,7	59,8	68,5

7 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, cüruf-I’in aktivite indeksi değerinin cüruf-II’den fazla olması, cüruf-I ile elde edilen basınç dayanımı değerlerinin cüruf-II’den fazla oluşunu açıklamaktadır. İlerleyen yaşlarda da benzer

bir eğilim söz konusu olup sodyum hidroksit derişiminin artmasıyla basınç dayanımları artmıştır.



Şekil 4.2 : Farklı yaşlarda harçların basınç dayanımları.

28 günde 14M/YFC-I numunesi ile en iyi basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Bu numunenin basınç dayanımı, referanstan %78,4 daha yüksektir. Bununla birlikte, 8M/YFC-I numunesinin 28 günlük basınç dayanımı değeri de 14M/YFC-I numunesininkine oldukça yakındır. 8M/YFC-I ve 14M/YFC-I numuneleri karşılaştırıldığında, 14M/YFC-I her yaşta 8M/YFC-I numunesinden daha yüksek basınç dayanımı değerlerine sahiptir. Artan NaOH konsantrasyonları daha iyi basınç dayanımı değerleri ile sonuçlanmıştır.

Tüm yaşlarda en iyi basınç dayanımı değerleri, 14M/YFC-I numunesi ile elde edilmiştir. Buradan, sodyum hidroksit konsantrasyonundaki artışın mekanik özellikleri olumlu etkilediği söylenebilir. Atık camla aktivasyonun ticari sodyum silikat ile olduğundaki kadar etkin olmadığı sonucuna varılabilir.

14M/YFC-I ve 14MWG/YFC-I numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçlarını karşılaştırarak cam kullanımının, numune yaşına bağlı olmaksızın, alkali ile aktive edilmiş harçların basınç dayanımını azalttığı söylenebilir. Bu, camın yetersiz aktivasyonunu göstermektedir ve aktivatör olarak cam içeren numuneler, sıvı sodyum silikat ile üretilen numunelerden daha boşluklu bir yapıya sahip olmuştur. Ek olarak, atık camsız örneklerde, sodyum hidroksit konsantrasyonu arttıkça harçların basınç dayanımı değerlerinin arttığı söylenebilir. Alkali ile aktive edilmiş

harçlarda, 90 günde 14 M sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile 91,7 MPa basınç dayanımına ulaşılabilmiştir, bu değer referans değerinden %67,3 daha yüksektir.

Artan NaOH molaritesi ile erken yaşlarda beton basınç dayanımlarında artış görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı değeri, erken yaşlarda da ilerleyen numune yaşlarında da, 14 M sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile elde edilirken ilerleyen yaşlarda referans numunenin eğilmede çekme dayanımına cüruf-I ile üretilen alkali aktifleştirilmiş harçlarla ulaşılammıştır. Bu sonuç, alkali ile aktivasyonda oluşan mikro çatlaklardan kaynaklanabilir, eğilme etkisi altında bu çatlaklar eğilme mukavemetinin azalmasında baskın durumda olabilir. Bununla birlikte, tek eksenli basınç yükü altında bu etki, çatlakların bir miktar kapanmasıyla azalır ve basınç mukavemeti önemli ölçüde düşmez, böylece alkali ile aktifleştirilmiş harçlarla referanstan daha yüksek basınç dayanımları elde edilebilmiştir.

Farklı cüruf kaynağı (cüruf-I) kullanılarak üretilen 8 ve 14 molarlık numunelerin sonuçları incelendiğinde, yüksek fırın cürufu içeriğinin dayanım sonuçları üzerinde aktivatör konsantrasyonundan daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Tänzer ve diğ. (2015), cüruf kimyasının alkali ile aktifleştirilmiş yüksek fırın cürufu esaslı malzemelerin hidratasyonu üzerindeki etkisini incelemiş ve şu sonuçları elde etmişlerdir: Cürufun TiO_2 içeriğinin, alkali aktive edilmiş bağlayıcıların hidrolik reaktivitesi ve basınç dayanımı üzerinde sadece küçük bir etkiye sahip olduğu gösterilebilir. Cürufun Al_2O_3 içeriğinin değişimi, farklı sonuçlara yol açmaktadır. Al_2O_3 içeriğindeki bir artış, sodyum hidroksit ile aktivasyon gerçekleştirildiğinde dayanımı arttırmıştır, ancak potasyum silikat ile aktive edildiğinde daha düşük bir dayanım elde edilmiştir. ^{29}Si MAS NMR spektroskopisinin sonuçları, Al_2O_3 içeriğinin artmasıyla reaksiyon derecesindeki düşüşü doğrulamaktadır. Bu durum, Al-O tetrahedronların dâhil edilmesiyle C-(A)-S-H fazlarının zincir uzunluğunun yükselmesinin daha düşük bir Si/Al oranıyla sonuçlanmasıyla bağlantılıdır. C/S oranındaki bir düşüş, daha az ısı açığa çıkmasını sağlamış, daha yüksek silikat içeriğine sahip potasyum silikat ile aktivasyon gerçekleştirildiğinde reaksiyon gecikmiştir. C/S oranındaki artış, daha az yoğunlaşmış cüruf camına ve dolayısıyla silikat zincir uzunluğunun eş zamanlı olarak azalmasıyla reaksiyon derecesinin artmasına neden olmuştur. Cürufun Al_2O_3 içeriğinin değiştirilmesi, hidrolik reaktivitede sistematik bir değişikliğe yol açmamıştır. Bu, kullanılan aktivatöre büyük ölçüde bağlıdır. Aynı sonuç, basınç dayanımı değerleri ölçülerek de

gözlenmiştir. Al_2O_3 miktarındaki artış, NaOH ile aktive edildiğinde dayanımı arttırırken potasyum silikat ile aktive edildiğinde dayanım değerlerini azaltmaktadır (Tänzer ve diğ, 2015). Cürufun reaktivitesi ve mukavemet gelişimi bileşim, camsı madde içeriği, parçacık boyutu dağılımı, aktivatör tipi ve alkali miktarı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır (Dongxu ve diğ, 2002; Wang ve diğ, 1994).

Sıvı sodyum silikat kullanımı, referanstan daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşılabilmesini sağlamıştır. Cam kullanıldığında bu değerlere ulaşılmasına rağmen, harçların aktivasyonunda atık cam kullanımı ile 28 günde 30 MPa basınç dayanımı değeri elde edilebilmiş ve dayanım artışı daha sonraki yaşlarda da devam etmiştir. Aşırı sodyum hidroksit içeriği, kimyasal reaksiyonu geciktirerek özellikle erken yaşlardaki mukavemet değerlerinde bir azalmaya neden olabilmektedir (Pascual ve diğ, 2014). Pascual ve diğ. (2014), sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonundaki artışın, yüksek miktarda bağlanmamış alkali iyonları nedeniyle, önemli bir karbonatlaşma sonucu heterojen bir jel oluşumuna neden olduğunu, hamur ve agregalar arasındaki kohezyonu azalttığını ve sodyum hidroksit derişimi arttıkça basınç mukavemetinin azaldığını belirtmişlerdir. Alonso ve Palomo (2001), geopolimerizasyon yerine, çözünme işleminin NaOH konsantrasyonundaki artışla desteklendiğini gözlemlemiştir.

Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, NaOH derişimi, öğütölmüş atık cam içeren alkali ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımı değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Kullanılan cürufun değişmesi, basınç dayanımı sonuçları üzerinde daha etkili olmuştur. 90 günde en düşük basınç dayanımı olan 34,8 MPa değeri, 10MWG/YFC-I numunesi ile elde edilmiş olup bu değer, referans değerinden %36,5 oranında daha düşüktür.

Üretilen numunelerde harç tasarımında değişiklik yapılmamış olup kullanılan sodyum hidroksit çözeltisinin ağırlığı sabit tutulmuştur. Sodyum hidroksit çözeltisinin molaritesi arttırıldığında çözünen katı NaOH miktarı artmış, su/bağlayıcı oranı azalmış, buna bağlı olarak işlenebilirlik olumsuz etkilenmiştir.

4.1.3 Sülfat direnci

Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçlarının sülfat ortamındaki dayanıklılığını araştırmak için, harç numuneleri farklı konsantrasyonlarda sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisi, gözenekli veya çatlamış bir numune için daha fazla

hasar vericidir, bu tür bir numune, sülfat içeren suyun daha hızlı nüfuz etmesine izin vererek daha fazla zarar görür. Daha az boşluklu bir yapı, sülfat direncini arttıracak, aynı zamanda mekanik dayanımları iyileştirecek, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini geliştirecektir (Neville, 2011; Monteiro ve Kurtis, 2003).

Sülfat etkisi, geleneksel beton yapıların uzun vadede dayanıklılığını etkileyen en agresif çevresel bozulma türlerinden biri olup iskeleler, temeller, köprüler, beton borular gibi sülfat etkisine maruz kalan birçok mühendislik yapılarında genleşmeye, şekil değişimine, çatlamaya ve bozulmaya neden olmaktadır. Beton, sülfat içeren sulara maruz kaldığında hem kimyasal hem de fiziksel bozulma gerçekleşir. Toprak, yeraltı suyu, deniz suyu gibi ortamlarda bulunan sülfat iyonları; sodyum, magnezyum, potasyum ve kalsiyum iyonları gibi diğer iyonlarla kombinasyon halindedir. Sülfat etkisinin ana nedenleri arasında, betonun yapısında yer alan çimento hidratasyon ürünü C-H (kalsiyum hidroksit), yer altı suyu ya da deniz suyu kaynaklı sülfat ve çimento içerisindeki C_3A fazı bulunmaktadır (Neville, 2004).

Sodyum sülfat, magnezyum sülfat, potasyum sülfat, kalsiyum sülfat tuzları; yeraltı sularında, bazı killi topraklarda, cüruflla doldurulmuş arazilerde oldukça yüksek miktarlarda bulunabilir. Bunun yanı sıra, deniz suları da önemli miktarlarda sülfat içeren ortamlardır. İnorganik tuz olan sülfat tuzları, sertleşmiş beton içerisine dışarıdan sızan sularla birlikte girmekte, etrenjit oluşumu gibi sülfatların varlığıyla oluşan kimyasal olaylar neticesinde beton genleşmekte, oluşan çekme gerilmesinin beton çekme dayanımını aşmasıyla beton çatlamaktadır. Sertleşmiş betonun yapısında bulunan C-H (kalsiyum hidroksit) dışarıdan suyla beraber gelen sülfat tuzlarıyla reaksiyona girerek kalsiyum sülfat oluşturur. Çimentonun yapısında yer alan C_3A fazı, su ve etrenjitin etkisi ile mono sülfata dönüşür. Beton içerisinde birleşen mono sülfat ve kalsiyum sülfat, sertleşmiş betonda genleşmelere sebep olur (Neville, 2004).

Sülfat etkisi sonucunda, sülfat iyonları ile kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alüminat hidratlar reaksiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit oluşumuna sebep olur. Sülfat etkisi sonucu oluşan etrenjit ve alçıtaşı bileşenleri, başlangıçta tepkimeye giren maddelere kıyasla oldukça büyük hacimlidir. Etrenjit ve alçıtaşı oluşumu, betonarme yapılarda genleşmeye, çatlak oluşumuna, bozulmalara, parçalanmalara ve dökülmelere sebep olmaktadır (Doğruyol ve Karaşin, 2011).

Etrenjit ve alçıtaşı oluşumundan sonra, sülfat etkisinden dolayı süzülen kalsiyum bileşiği, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jelinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu süreç, C-S-H jelinin sertliğini kaybetmesine ve çimento hamuru matrisinin bozulmasına neden olmaktadır (Neville, 2004).

Betonun sülfat etkisine karşı direncini belirleyen ana bileşenler, çimentodaki serbest kireç (Ca(OH)_2), kalsiyum alüminat (C_3A) ve ferroalüminat fazlarıdır (Monteiro ve Kurtis, 2003).

Etrenjit ve alçıtaşı, çimento hidratasyonunun kimyasal ürünleridir. Etrenjit oluşumu, genleşme ile hacim artışına sebep olur. Eğer bu hacim artışı sınırlandırılır ve büyük miktarda çekme gerilmeleri oluşursa çatlak oluşumu gözlenebilir. Alçıtaşı oluşumu, betonun ağırlık, dayanım ve rijitliğini kaybetmesine neden olur. Çimento bileşimi, betonun geçirimliliği, su/bağlayıcı oranı, sülfat tuzlarındaki katyon türü, sülfat iyonlarının konsantrasyonu, sülfat etkisine maruz kalma koşulları ve maruz kalma süresi, yeraltı su seviyesi ve yeraltı su seviyesinin hareketliliği gibi sülfat direncini etkileyen birçok etken vardır (Baradan ve diğ, 2002).

Yeraltı suyu, en yaygın dış sülfat kaynağıdır. Göl, nehir ve endüstriyel atık suları, dış sülfat kaynaklarından bazılarıdır. Endüstriyel atık suları, genelde göl ve nehir sularına göre daha fazla miktarda sülfat tuzu içerir. Bunların dışında, dış sülfat kaynağı olarak sülfat açısından zengin durumdaki kil, kurak bölgelerdeki topraklarda bulunan alçıtaşı ve diğer toprak türleri sayılabilir. Sülfat açısından zengin sular, betonda kalıcılık problemlerine neden olur (Baradan ve diğ, 2002).

Yağış sularının etkisiyle, yağış alan bölgelerdeki sülfat tuzları, yüzeysel sulara ve yeraltı sularına karışarak dış kaynaklı sülfat etkisine sebep olur. Tarım alanlarında kullanılan gübrenin, sulara karışarak beton yapılarına nüfuz etmesi ile de sülfat etkisi oluşabilmektedir. Sülfata maruz kalan betonda tipik görünüm, kenar ve köşelerden başlayarak yüzeye yayılan beyaz lekeler, yüzeyde çatlaklar ve köşelerde dökülmeler şeklindedir (Arslan, 2001).

Beton içerisine su içinde çözülmüş olarak giren sülfat iyonlarının etkisi sonucunda, beton boşluklarında bulunan kalsiyum hidroksit ile magnezyum sülfatın birleşmesiyle kalsiyum sülfat oluşur. Bu reaksiyon sonucunda meydana gelen magnezyum hidroksitin çözünürlüğü az olduğundan magnezyum hidroksit çöker. Magnezyum hidroksit, magnezyum elementinin elde edilmesinde kullanılan bir

cevher olup toprak alkali metallere magnezyum ile hidroksit iyonunun sentez reaksiyonu sonucunda oluşan oldukça kuvvetli bir bazdır. Kalsiyum sülfat ise iki mol su bağlayarak kristal hale gelir ve yaklaşık %15 oranında bir hacim genişlemesine neden olur (Neville, 2004; Nehdi ve Hayek, 2005; Al-Amoudi, 1997).

50 g/L ve 150 g/L derişimlerdeki sodyum sülfat çözeltisinin neden olduğu toplam ağırlıktaki ve mekanik dayanımlardaki değişimler sırasıyla Çizelge 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : 50 g/L sodyum sülfat ile ağırlık ve dayanımlardaki değişim.

Numune	ΔW_{ort} %	$\Delta \text{Çekme}_{ort}$ %	$\Delta \text{Basınç}_{ort}$ %
R	4,6	32,2	17,0
8M/YFC-I	-0,2	6,8	-33,2
14M/YFC-I	0,5	-3,4	14,8
10MWG/YFC-I	0,1	16,5	10,5
12MWG/YFC-I	0,3	13,4	18,9
14MWG/YFC-I	0,2	15,1	9,2
10M/YFC-II	0,8	21,9	9,7
12M/YFC-II	1,3	15,8	7,6

Çizelge 4.4 : 150 g/L sodyum sülfat ile ağırlık ve dayanımlardaki değişim.

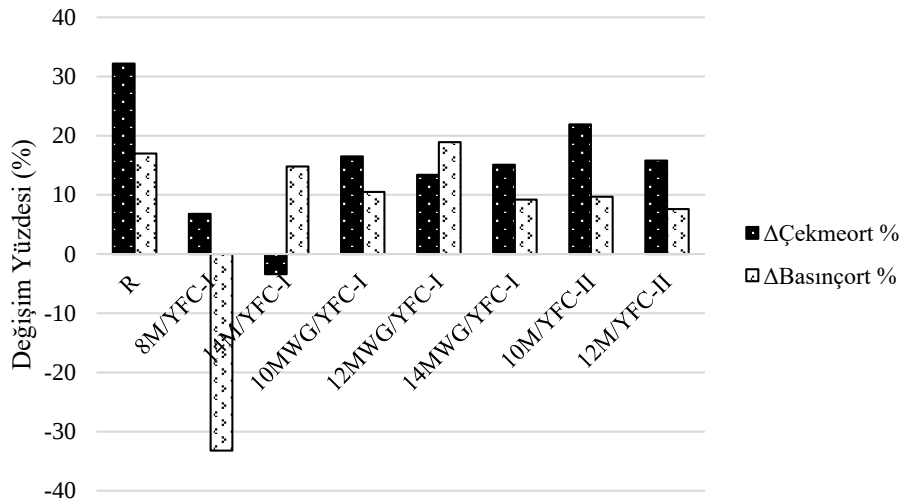
Numune	ΔW_{ort} %	$\Delta \text{Çekme}_{ort}$ %	$\Delta \text{Basınç}_{ort}$ %
R	4,8	28,2	-5,9
8M/YFC-I	0,8	39,3	-20,8
14M/YFC-I	0,5	-9,3	9,0
10MWG/YFC-I	0,5	37,6	-0,1
12MWG/YFC-I	0,2	11,9	5,4
14MWG/YFC-I	0,3	12,2	7,5
10M/YFC-II	0,7	4,9	10,5
12M/YFC-II	0,5	29,4	40,2

Maksimum basınç dayanımı kaybı, 8 M NaOH ve sıvı sodyum silikat kullanılarak aktive edilen harçlarda gözlenmiştir ancak numune yüzeylerinde ciddi bir bozulma gözlenmemiştir.

50 g/L sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen harç numunelerde meydana gelen çekme ve basınç dayanımı değişimleri grafik olarak Şekil 4.3'te verilmiştir. Ağırlık değişimleri, malzemede dökülme gibi sebeplerle malzeme kaybı kaynaklı olmayıp çok düşüktür. Ağırlık artışları, malzemenin çözeltiyi emmesi ve tam olarak kurumaması nedenleriyle gerçekleşmiş olabilir. Genel olarak, 50 g/L sodyum sülfat

çözeltilisinde dayanımların azalmak yerine arttığı görülmüştür, bu sonucun alınmasında numunelerin kalıptan çıkarılır çıkarılmaz sülfat çözeltisine konmasının etkisi bulunmaktadır, kür etkisi sülfat etkisinden daha baskın olmuş, numuneler 28 gün içerisinde sülfatlı su içerisinde dayanım kazanmıştır.

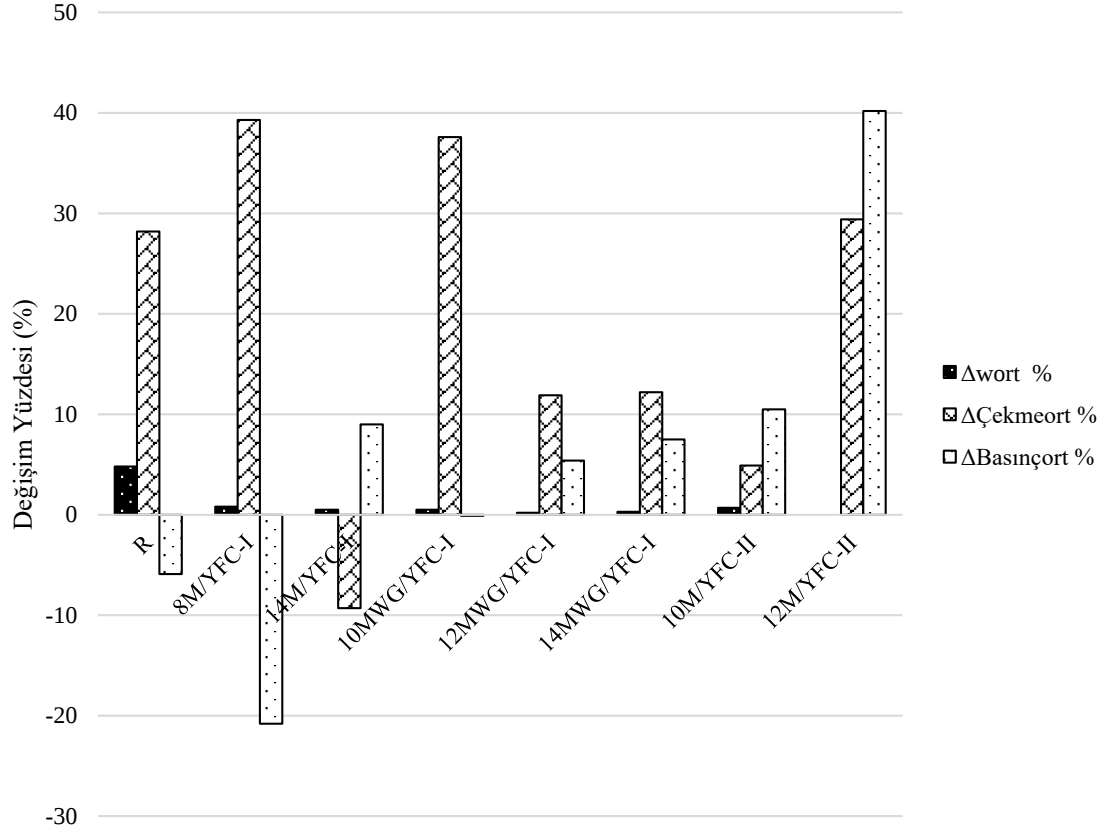
Sodyum sülfat, alkali ile aktifleştirilmiş çimentolar ve betonlarda kullanılan aktivatörlerden biridir ve bu malzemelerin konsantre sodyum sülfat çözeltilerinde iyi davranması beklenen bir sonuçtur (Shi ve diğ, 2003). Bu malzemeler, sodyum sülfat çözeltileri içerisinde, sülfata dayanıklı Portland çimentosu ile üretilen betondan daha üstündür ve bu durum, genişleyerek betonun yapısını bozan ürünlerin oluşum koşullarının sağlanmamasından kaynaklanabilir. Alkali ile aktifleştirilmiş cürufu çimento betonunun sülfat çözeltilerine daldırılması, hidrosilikat, hidroksitler ve $\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ gibi herhangi bir çimentolama özelliğine sahip olmayan ürünlerin oluşmasına neden olacaktır (Shi ve diğ, 2003).



Şekil 4.3 : 50 g/L sodyum sülfatla çekme ve basınç dayanımı değişimleri.

Sülfat etkisine bağlı maksimum eğilmede çekme dayanımı kaybı, 14 M sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde gözlenmiştir ve çekme dayanımı farkı, 150 g/L sodyum sülfat çözeltisinde %9,3 olmuştur. Bu numunenin çekme mukavemeti kaybının 50 g/L Na_2SO_4 çözeltisinde daha az ve %3,4 oranında olduğu görülmüştür.

150 g/L sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerde meydana gelen ağırlık, çekme dayanımı ve basınç dayanımı değişimleri, grafik olarak Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : 150 g/L sodyum sülfatla ağırlık ve dayanım değişimleri.

Ağırlıklardaki artış, sülfat çözeltisinin emilmesinden kaynaklanabilir, bunun dışında devam eden hidrasyon reaksiyonu ve maddenin mikro dolgu etkisi, boşluklu yapıyı doldurarak dayanım sonuçlarını iyileştirmiştir. Ek olarak sodyum sülfat, alkali ile aktive edilen numuneler için bir aktivatör görevi görerek dayanım değerlerini arttırmış olabilir.

Çizelge 4.3'te gösterildiği gibi, NaOH konsantrasyonu, öğütülmüş atık cam içeren çözelti ile aktifleştirilen harç numunelerinin sülfat direnci ile doğrusal bir ilişkiye sahip değildir, bu durum hidrasyon hızından kaynaklanabilir. Bununla birlikte, muhtemelen devam eden hidrasyona bağlı olarak öğütülmüş atık cam içeren numunelerin ağırlık, çekme mukavemeti ve basınç mukavemeti değerlerinde artış olmuştur. Bu sonuçlar, öğütülmüş atık cam ile aktive edilen harçların hidrasyonunun sülfat etkisinden olumsuz etkilenmediğini göstermektedir. Aktivatör çözeltisi olarak öğütülmüş atık cam kullanılarak sülfat etkisine karşı dayanıklı bir harç üretmek mümkün olmuştur.

150 g/L derişimindeki sodyum sülfat çözeltisine daldırma, referans, 8M/YFC-I ve 10MWG/YFC-I numuneleri için basınç dayanımı kaybına neden olmuştur. Diğer

alkali aktive edilmiş harçlar, basınç dayanımı kazanmıştır, bu durum, üretim sırasında homojen olmayan malzeme dağılımından veya sodyum sülfatın mikro dolgu etkisinden kaynaklanabilir, bu sonucun arkasındaki mekanizma bir SEM analizi ile daha iyi anlaşılabilir.

Ana bozunma ürününün alkali ile aktifleştirilmiş cürufta alçı olduğu, Portland çimentosu durumunda ise etrenjit ve alçı olduğu bildirilmiştir. Sülfat ortamında, alkali ile aktifleştirilmiş cüruf numunelerinin genişlemediği ama çatladığı, bazı numunelerin ise sodyum sülfat çözeltisinde dayanım kazandığı gözlenmiştir (Bakharev ve diğ, 2002).

Numunelerin uzunluklarındaki değişimin ölçülmesi ve daha uzun deney süreleri, sülfat etkisinin neden olduğu genişleme, parçalanıp dökülme ile numune kaybı veya çatlakların incelenmesi için daha iyi korelasyona sahip sonuçlar verebilir. Ayrıca, sülfat etkisine karşı dayanıklılığı belirlemek için magnezyum sülfat çözeltisi kullanılabilir. Deney aşaması, sülfat içeren ortamın alkali aktive edilmiş harçlar üzerindeki etkisini belirlemek için çok kısa kalmıştır, sülfat çözeltisi içerisinde 28 günlük deney süresi boyunca numunelerde herhangi bir bozulma belirtisi gözlenmemiştir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar incelenerek atık cam ile üretilen alkali aktifleştirilmiş numunelerin sülfat etkisine karşı iyi bir dürabilite performansına sahip olduğu söylenebilir; numunelerin dayanımları azalmamış, mukavemet kazanımı devam etmiştir, bu durum ince öğütülmüş camın mikro dolgu etkisinden kaynaklanabilir ve devam eden hidrasyon reaksiyonu da deney sonuçları üzerinde etkili olabilir.

4.1.4 Donma-çözülme direnci

Donma-çözülme direnci, özellikle soğuk iklimde sahip yerlerdeki yapılar için önemli dürabilite özelliklerinden biridir. Su donduğunda, hacminde yaklaşık %9'luk bir artış olur. Numunenin boşluklarından giren su donar ve soğuk hava koşullarında boşluklar üzerinde gerilme oluşturur. Donmanın neden olduğu bu hacim değişikliği için yeterli yer yoksa buz oluşumu sırasındaki genişleme nedeniyle çatlaklar oluşur ve bozulma meydana gelir. Tekrarlayan donma ve çözülme döngüleri, bu etkiyi zararlı hale getirir ve yapıda ciddi hasara neden olabilir. 28 gün kür uygulanması sonrası 25 çevrimlik donma-çözülme döngüsünün ardından toplam ağırlıklardaki, eğilmede

çekme dayanımındaki ve basınç dayanımındaki değişim yüzdeleri, aynı seri için üretilen numunelerin ortalaması hesaplanarak Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Donma-çözülme etkisiyle ağırlık ve dayanımlardaki değişim.

Numune	Kür Koşulu	Δw_{ort} %	$\Delta \text{Çekme}_{ort}$ %	$\Delta \text{Basınç}_{ort}$ %
R	Hava	3,3	-5,6	-6,9
	Su	-0,2	-4,4	16,8
	Isıl işlem	3,8	-10,9	-12,2
8M/YFC-I	Hava	1,7	23,4	4,6
	Su	-0,7	-5,0	17,4
	Isıl işlem	3,3	-80,5	-83,6
14M/YFC-I	Hava	1,6	-30,4	-4,5
	Su	-0,8	-5,6	32,7
	Isıl işlem	3,2	-61,5	-21,2
10MWG/YFC-I	Su	-0,2	6,7	18,8
12MWG/YFC-I	Su	-1,1	-5,0	13,9
14MWG/YFC-I	Su	-1,0	-22,0	17,6
10M/YFC-II	Hava	2,3	50,7	20,1
	Su	-0,6	68,7	28,8
	Isıl işlem	3,3	-16,5	-35,1
12M/YFC-II	Hava	3,0	-16,0	-3,8
	Su	-1,3	-19,5	39,7
	Isıl işlem	3,6	-59,1	-30,8

Donma-çözülme etkisinin neden olduğu basınç dayanımı kaybının maksimum değerleri ısıtıl işlem görmüş numunelerde görülmüştür. Isıl işlem görmüş numunelerde, suyun donmasıyla oluşacak hacim artışına izin veren boşlukların daha az olduğu sonucuna varılabilir. Su kürü, donma-çözülme direncini arttırmıştır, bu etki, malzemeden su ile taşınan hidrate olmamış partiküllerin oluşturduğu boşlukların bir sonucu olabilir. Burada, laboratuvarında açık ortamda bekletilen numunelerin, nem kontrolü yapılamadığından, nemli bir ortamda beklemesinin de sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

25 donma-çözülme döngüsünün sonunda numunelerde gözle görülür bir hasar olmamıştır ve su emilimi, ağırlık artışlarına neden olmuştur. Daha anlamlı bir korelasyon için çok daha fazla sayıda donma-çözülme çevrimine ihtiyaç vardır. Ayrıca, dayanım kayıplarının belirlenmesi için beton kırılıp numune kaybedilmeden önce şu şekilde bir yol izlemekte fayda bulunmaktadır: Donma-çözülme çevrimi öncesi ve sonrası tahribatsız bir deney yöntemi olan ultrases geçiş hızının ölçülmesiyle, geçiş hızında büyük değişiklikler okunduktan sonra donma-çözülme döngüsü sonlandırılmalı, ardından ağırlık ve dayanım değişimleri kaydedilmelidir.

Bu şekilde daha anlamlı veriler alınacaktır. Burada, 25 çevrimin yeterli olmadığı, numune kırıldıktan sonra görülmüştür. Topçu ve Canbaz (2008), donma-çözülme etkisinde kalan harçlarda çevrim sayısı arttıkça, dayanım değerlerinde azalma gözlediklerini ifade etmişlerdir.

Portland çimentosu ile üretilen referans numune için su kürü; hava kürü veya ısıtma işlemi ile karşılaştırıldığında en iyi sonuçları sağlamıştır. 8M/YFC-I kodlu ısıtma işlemi görmüş numune, üretilen tüm harç örnekleri arasında donma-çözülme etkisine karşı en zayıf numune olmuştur. Atık cam içeren numunelerde ağırlık kaybı gerçekleşmiştir, ancak 25 donma-çözülme döngüsünden sonra bu numunelerin basınç dayanımlarında bir azalma gözlenmemiştir. Aksine, atık camla aktive edilen numuneler için basınç dayanımı artışı, donma-çözülme etkisi altında devam etmiştir. Basınç dayanımındaki bu artış, su kürü uygulanan referans numunenin donma-çözülme etkisinden sonraki basınç dayanımı artışına yakındır. Basınç dayanımlarındaki artış, devam eden hidrasyon reaksiyonundan kaynaklanıyor olabilir.

Çizelge 4.5 incelendiğinde, donma-çözülme döngülerinden sonra maksimum mukavemet kaybının ısıtma işlemi görmüş numunelerde gözlemlendiği, buna rağmen bazı numunelerin mukavemet kazandığı söylenebilir, bu durum devam eden hidrasyon reaksiyonu veya üretim sırasında homojen olmayan malzeme dağılımının bir sonucu olabilir. Numunelerin çoğunda donma-çözülme döngülerinden sonra eğilme mukavemeti kaybı gözlemlenmiştir. Alkali aktivasyon sırasında oluşan mikro çatlaklar bu sonucun alınmasında etkili olabilir. Mikro çatlaklar eğilmede çekme mukavemetini azaltmada daha etkilidir, bu çatlaklar basınç etkisi altında bir miktar kapandığından bazı numunelerde çekme dayanımı azalırken basınç dayanımı artmıştır. Basınç dayanımı yüksek olan alkali aktifleştirilmiş malzemelerin eğilme dayanımlarının yetersiz oluşunu farklı araştırmacılar şu şekilde açıklamıştır: Yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu ile üretilen harçların boşluk oranı, çimentolu harçlarla neredeyse aynıdır fakat boşluk çapı daha küçük olup sayıca fazladır, bu durum, yüksek fırın cürufu harçlarda rötre oluşumuna ve mikro çatlaklara neden olur ve elastisite modülü daha düşük olarak elde edilir, yüksek fırın cürufunun bu yapısının eğilme dayanımlarının yetersiz kalmasına sebep olduğu düşünülmektedir (Lee ve Lee, 2013). Bu açıdan değerlendirildiğinde, eğilme dayanımlarını arttırmak üzere lif kullanımı bir çözüm yöntemi olarak düşünülebilir.

4.1.5 Kılcallık katsayısı

Harç numuneler için kapiler su emme deneyi sonucu elde edilen kılcallık katsayısı değerleri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.

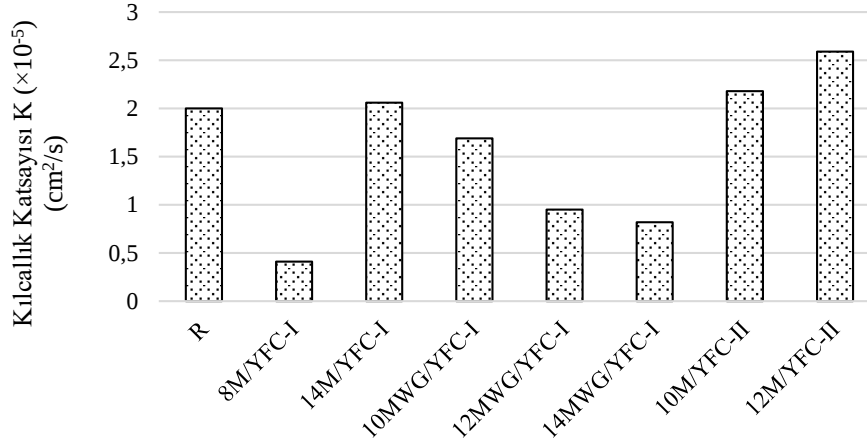
Kılcallık katsayısı ve toplam su emme yüzdesi değerleri ne derece düşük ise, üretilen harcın o kadar geçirimsiz ve dayanıklı olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.6 : Harç numunelerin kılcallık katsayıları.

	K ($\times 10^{-5}$) (cm ² /s)
R	2,00
8M/YFC-I	0,41
14M/YFC-I	2,06
10MWG/YFC-I	1,69
12MWG/YFC-I	0,95
14MWG/YFC-I	0,82
10M/YFC-II	2,18
12M/YFC-II	2,59

Atık cam kullanımı, dolgu etkisiyle, su emme yüzdeleri ve kılcallık katsayılarını azaltarak alkali ile aktifleştirilmiş harçların dürabilite performansını arttırmıştır. Bununla birlikte, söz konusu üretimlerde yüksek NaOH derişimleri, öğütölmüş cam ile aktifleştirilen harçlarda camın aktivitesini arttırmıştır. Böylece camlı üretimlerde artan sodyum hidroksit molaritesiyle birlikte kılcallık katsayısı azalmıştır. Atık cam kullanımının boşluk yapısını iyileştirdiği söylenebilir. Filtrelenemeyen cam parçacıkları, dayanım açısından zayıf bir malzeme olsa da, dolgu etkisiyle kılcallık katsayıları üzerinde olumlu etki yaratmıştır. Sodyum silikat kullanılan numunelerde ise sodyum hidroksit derişiminin artması kılcallık katsayısını arttırmıştır. Burada etkili olan mekanizmanın, yapılan dizaynda aktivatör miktarının sabit tutulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir, sodyum hidroksit derişimi arttıkça çözeltide bulunan su miktarı azalmış, bu da işlenebilirliği olumsuz etkilemiştir, betonda kötü yerleştirmeden kaynaklanabilecek boşlukların fazlalığı kılcallık katsayısını ve su emme yüzdelerini arttırmıştır. Literatürde, alkali ile aktive edilmiş cüruf betonlarının su emme kapasitesi ve toplam boşluk oranının çimento esaslı malzemelere nazaran daha düşük olduğuna, bağlayıcı madde dozajı arttıkça bu özelliklerin daha da iyileştiğine ilişkin çalışmalar mevcut olup yüksek fırın cürufu betonlarda, cürufun reaksiyonlarında daha az ısı açığa çıkarmasından ötürü mikro çatlakların daha az olduğu bildirilmiştir (Bernal ve diğ, 2011). Bu çalışmada da yüksek fırın cürufu-I ile

Üretilen numunelerde kılcallık katsayısı, imento ile üretilen referans numuneden düşük olmuştur. Yüksek fırın cürufu-II ile üretilen numunelerde ise kılcallık katsayısı referans numuneninkine yakındır.



Şekil 4.5 : Harç numunelerin kılcallık katsayıları.

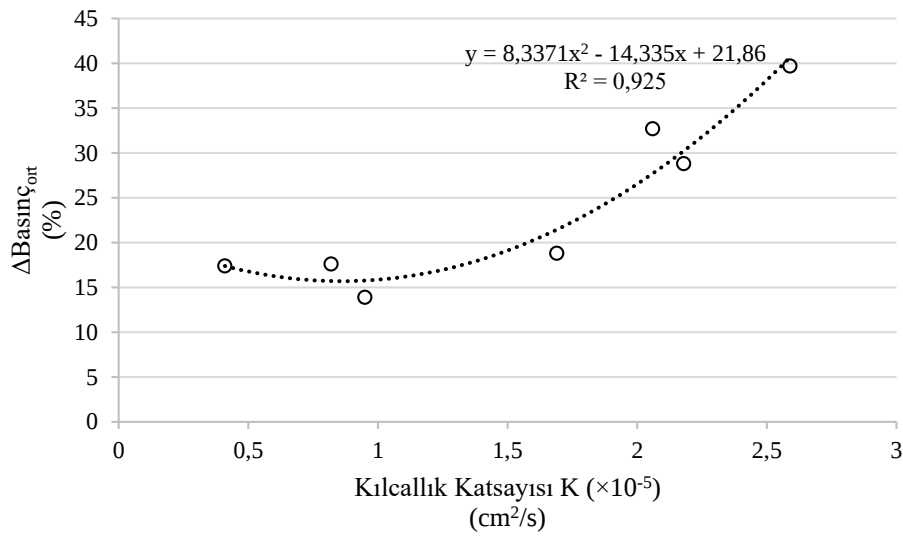
Kılcallık katsayısının minimum değeri 8M/YFC-I harcı ile elde edilirken 14MWG/YFC-I numunesinin toplam su emmesi en düşüktür. Ticari sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi ile üretilen numunelerde, düşük NaOH konsantrasyonu deney sonuçlarını iyiletirmitir.

Yüksek fırın cürufu-II ile yapılan üretimlerde numunelerin kılcallık katsayıları yüksektir. Burada, alkali aktivasyon yoluyla oluşan ürünlerin kılcallık katsayısı değerini etkilediği düşünülebilir.

8 M NaOH ve sıvı sodyum silikat içeren alkali ile aktifletirilmi harç, referans numuneden %79,5 daha düşük bir kılcallık katsayısı değerine sahiptir.

Suda kürlenen alkali aktifletirilmi harçların kılcallık katsayıları ile donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri incelendiğinde, ekil 4.6'daki grafik ortaya çıkmaktadır. Bu grafikte kılcallık katsayısı fazla olan numunelerin, 25 gün sonunda daha fazla basınç dayanımı kazandığı görülmektedir, bu da donma-çözülme etkisindeki dayanım kazançlarının devam eden hidrasyon reaksiyonlarından kaynaklandığına ilişkin bir bulgu olabilir, bununla birlikte bu numunelerdeki suyun donmasına izin verecek hapsolm hava boşlukları da numunede hasar oluşmasının önüne geçmiş olabilir. Kılcal boşlukların fazla olması, betonlarda donma-çözülme direncini azaltan bir faktörken, burada donma-çözülme çevrim sayısının az olmasının da sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Donma-zlme direncinin fazla

olmasını sağlayan faktörlerden biri, beton içerisine su girişini ve buna bağlı olarak suyun malzemenin içerisinde donmasını önleyecek kadar geçirimsiz bir beton üretmektir. Bunun söz konusu olmadığı durumlarda, beton içerisindeki hapsolmuş hava boşluklarının daha fazla olması ya da daha küçük boyuttaki sürüklenmiş hava boşluklarının oluşturularak toplam boşluk oranının artırılması, malzeme içine giren suyun donmasıyla gerçekleşen hacim artışına izin vererek ilave gerilmelerin oluşmasını ve buna bağlı olarak çatlakların meydana gelmesini önlemektedir. Hava sürükleyici katkılarla sürüklenmiş hava boşluğu oluşturularak donma-çözülme direncinin artması sağlanır. Bu boşlukların nihai basınç dayanımında bazı düşüşlere sebep olacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Hava boşluğundaki her %1’lik artış, beton dayanımını yüzde 2 ile 6 arasında azaltır (Kosmatka ve diğ, 2002). Şekil 4.6’da, düşey ekseninde, alkali aktifleştirilmiş harçlarda, oransal olarak basınç dayanımı değişimi gösterilmiş olup bu grafikte, numunenin basınç dayanımına ilişkin bir bilgi verilmemektedir.



Şekil 4.6 : Harçlarda kılcallık katsayısı-donma çözülme direnci ilişkisi.

4.1.6 Su emme yüzdesi

Harç numunelerin su emme yüzdeleri Çizelge 4.7 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

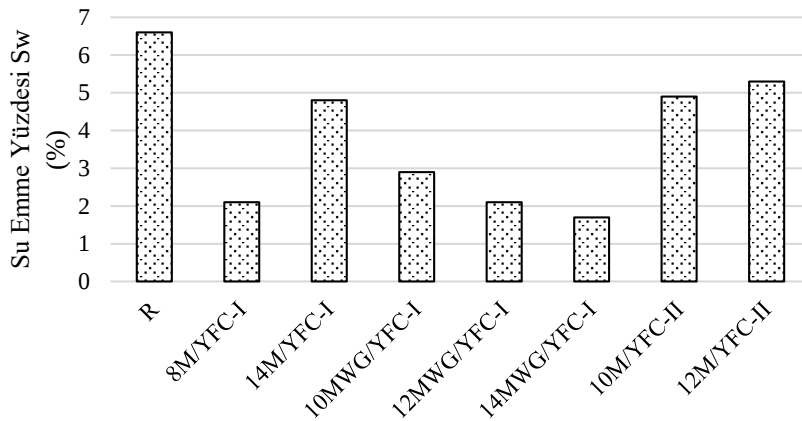
Alkali ile aktive edilen tüm numunelerin su emme yüzdeleri, çimento esaslı harca kıyasla daha düşüktür, bu da alkali aktivasyonun, su emme yüzdeleri açısından, harçların dürabilitesinin iyileşmesine katkı sağladığını göstermektedir. Kapiler su emme ve toplam su emme miktarı az olduğunda, dışarıdan malzeme içerisine girebilecek suda çözünen birtakım zararlı maddelerin girişi daha az olacaktır, bu da

dürabilite açısından fayda sağlayacaktır. Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı malzemelerde, cüruf ile gerçekleşen aktivasyon reaksiyonlarında daha az ısı açığa çıkması sayesinde mikro çatlakların daha az olduğu ve bu durumun su emme yüzdeleri azaltmada fayda sağladığı ifade edilmiştir (Bernal ve diğ, 2011).

Çizelge 4.7 : Harç numunelerin su emme yüzdeleri.

	Sw (%)
R	6,6
8M/YFC-I	2,1
14M/YFC-I	4,8
10MWG/YFC-I	2,9
12MWG/YFC-I	2,1
14MWG/YFC-I	1,7
10M/YFC-II	4,9
12M/YFC-II	5,3

Kılcallık katsayıları ve su emme yüzdeleri, cüruf-II ile üretilen numunelerde, referansta ve 14M/YFC-I numunelerinde diğer harçlardan daha yüksek değere sahiptir. 14M/YFC-I numunesinin kılcallık katsayısı, referans numunenin kılcallık katsayısı değerine en yakın olanıdır. Ayrıca, 14M/YFC-I numunesi referansa göre daha düşük su emme yüzdesine sahiptir, alkali aktivasyon, deney sonuçlarını iyileştirmiştir.

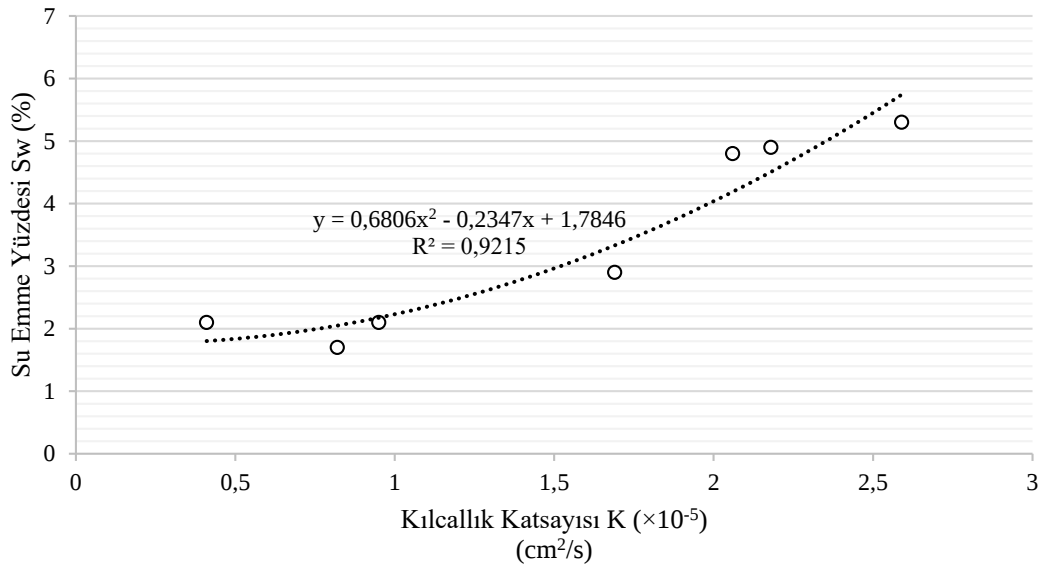


Şekil 4.7 : Harç numunelerin su emme yüzdeleri.

Kılcallık katsayıları ile toplam su emme yüzdeleri benzer bir eğilimdedir. Kılcallık katsayısında etkili olan mekanizmalar toplam su emme yüzdeleri konusunda da etkili olmuştur.

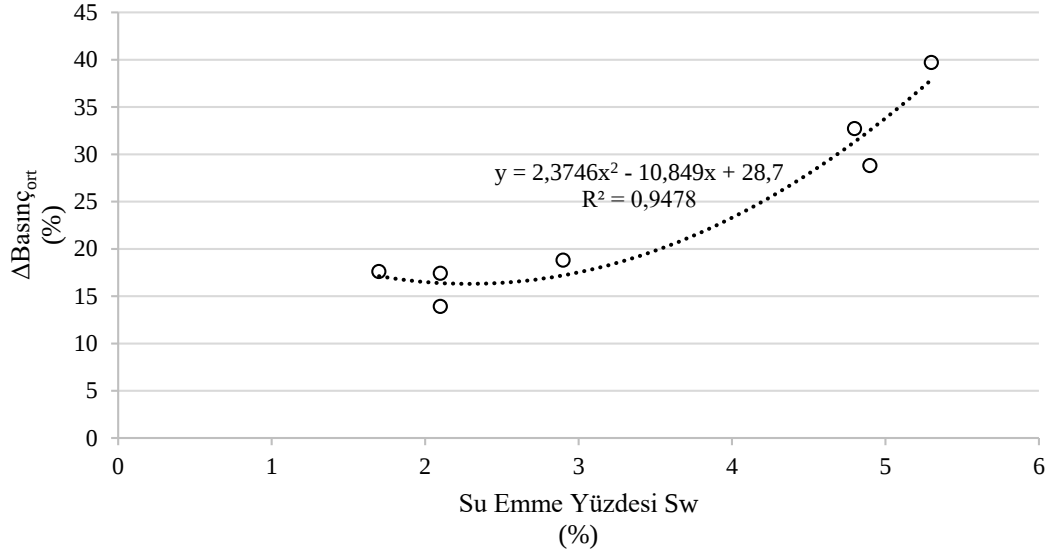
14 M NaOH çözeltisi ile öğütülmüş atık camın kullanılması, çimento esaslı harca kıyasla toplam su emilimini %74,2 oranında azaltmıştır.

Alkali ile aktifleştirilmiş harçlarda kılcallık katsayısı-su emme yüzdesi arasındaki ilişki Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bu grafikte kılcallık katsayısı arttıkça toplam su emme miktarının da arttığı görülmektedir. Buradan, kılcallık katsayısının yüksek olmasına sebep olan mekanizmaların toplam su emmelerde de artışa neden olacağı değerlendirilebilir.



Şekil 4.8 : Harçlarda kılcallık katsayısı-toplam su emme ilişkisi.

Suda kürlenmiş alkali aktifleştirilmiş harçların toplam su emme yüzdeleri ile donma-çözülme sonrasındaki basınç dayanımı değişimleri incelendiğinde, Şekil 4.9’daki grafik ortaya çıkmaktadır. Bu grafikte toplam su emme yüzdesi fazla olan numunelerin, 25 gün sonunda daha fazla basınç dayanımı kazandığı görülmektedir. Bu durum, daha boşluklu yapıların donma-çözülme etkisi altında, suyun donduktan sonraki hacim artışına müsaade etmeleri nedeniyle daha olumlu bir performans sergilediklerini ifade eder.



Şekil 4.9 : Harçlarda kılcallık katsayısı-donma çözülme direnci ilişkisi.

4.1.7 Hızlı klor geçirimliliği

Hızlı klor geçirimliliği deneyi ASTM C1202 (ASTM, 2019) standardına göre yapılmış olup deney sonuçları Çizelge 4.8 ve Şekil 4.10’da verilmiştir. Geçen akım değeri ne kadar yüksek ise klor iyonu geçirimliliği o derece yüksek olup numunenin daha boşluklu bir yapıya sahip olması beklenmektedir. Hızlı klor geçirimliliği deneyinin sonuçlarını etkileyen faktörlerden bazıları şu şekilde sıralanmıştır: elektrik yükü için ek bir taşıma ortamı olarak davranan iyonik tuzlar içeren katkılar, çimento faktörü, hava içeriği, su/çimento oranı, deney numunesinin kür koşulları, agrega kaynağı veya tipi (GCP, 2016).

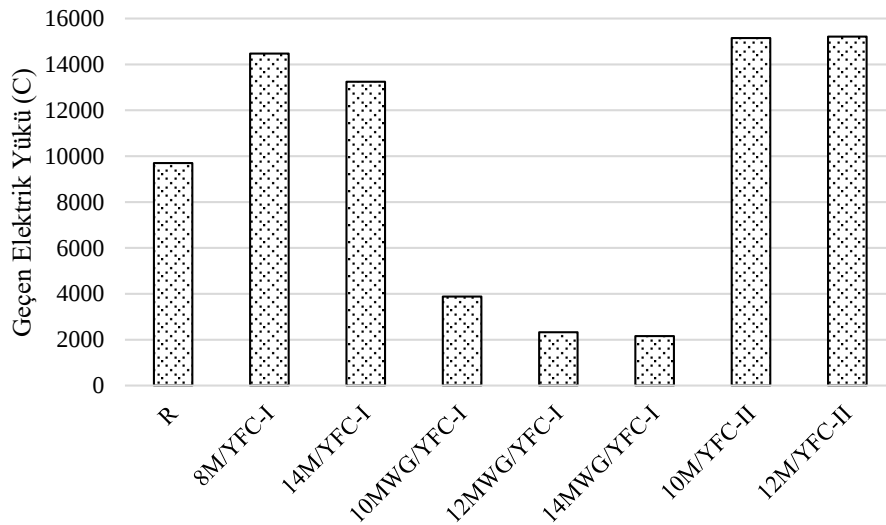
Çizelge 4.8 : Harç numuneler için hızlı klor geçirimliliği deney sonuçları.

Numune	Geçen Elektrik Yükü (Coulomb)	Klor İyonu Geçirimliliği (ASTM C1202)
R	9699	Yüksek
8M/YFC-I	14475	Yüksek
14M/YFC-I	13247	Yüksek
10MWG/YFC-I	3883	Orta
12MWG/YFC-I	2328	Orta
14MWG/YFC-I	2157	Orta
10M/YFC-II	15146	Yüksek
12M/YFC-II	15209	Yüksek

ASTM C1202'ye göre, geçen elektrik yükü, 4000 Coulomb’dan daha fazlaysa, numunenin klor geçirimliliği yüksek olarak yorumlanır, 2000 ile 4000 Coulomb arasındaysa klor geçirimliliği orta, 1000-2000 C arasında klor geçirimliliği düşük,

100-1000 C arasında çok düşük ve 100 Coulomb'dan düşük değerler için ihmal edilebilir seviyededir (ASTM, 2019). Geçen yük, elektron hareketi ile ilgilidir, bu nedenle iyonların varlığı ve deney sırasında artan sıcaklıklar elde edilen sonuçları etkilemektedir.

Çizelge 4.8'de görüldüğü üzere, Portland çimentosu ile üretilmiş olan referans numunenin klor iyonu geçirimsizliği yüksektir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen alkali ile aktive edilmiş harçların da klor geçirimsizliği yüksek olup bu harçlardan geçen toplam elektrik yükü, referanstan daha yüksektir. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanımı, iyonların varlığını arttırarak hızlı klor geçirimsizliği deneyi sırasında ilave bir taşıma mekanizması olarak davranmış, geçen elektrik yükünü arttırmıştır. Geopolimer betonlarda yüksek iletkenliğe sahip alkali aktivatör çözeltilerin kullanılıyor oluşu, reaksiyona girmemiş artık çözeltinin, hızlı klor geçirimsizliği deneyini yanlış yönde etkilemesine sebep olabilmekte ve numunenin geçirimsiz olduğu sonucuna götürebilmektedir (Rajamane ve diğ, 2011).



Şekil 4.10 : Harçlarda hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçları.

Öğütülmüş atık cam içeren numuneler orta derecede klor iyonu geçirimsizliğine sahiptir, bunun nedeni ince öğütülmüş cam parçacıklarının puzolan benzeri davranışı olabilir, bu numunelerde iyon hareketinin daha az olduğunu söylemek mümkündür. Referans ve sodyum silikat esaslı numuneler, ASTM C1202'ye göre değerlendirmede camlı numunelere göre daha yüksek iyon geçirimsizliği değerlerine sahiptir. Bu karışımlar, klor iyonuna maruziyetin olmayacağı ortamlarda kullanılmak üzere tercih

edilebilir. Daha detaylı inceleme için penetrasyon derinliğinin ölçüldüğü yöntemlerle klor geçirimsliliği belirlenebilir.

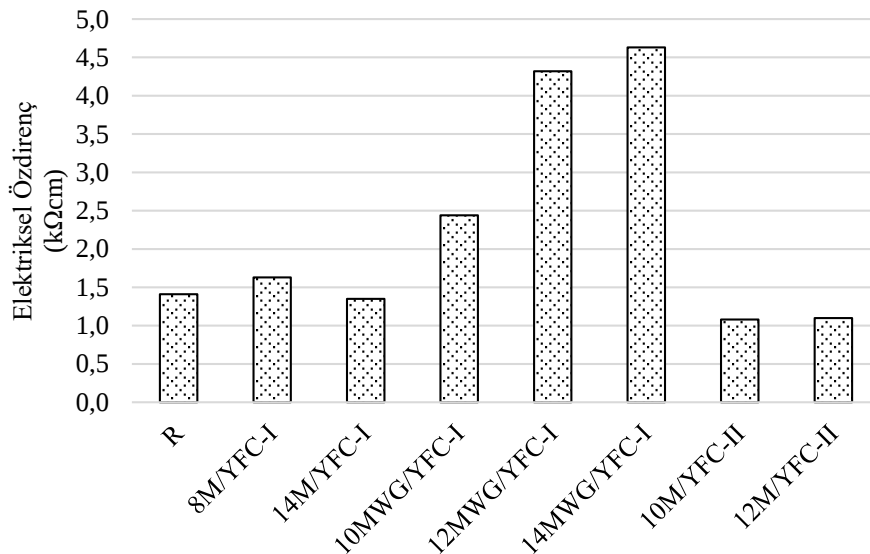
4.1.8 Elektriksel özdirenç

Harç numunelerin elektriksel özdirenç değerleri, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Tahribatsız bir test yöntemi olan elektriksel özdirenç deneyi, hızlı klor geçirimsliliği deneyi sırasında artan sıcaklıkların etkisini ortadan kaldırabilir. Daha yüksek elektriksel direncin daha geçirimsiz betonla ilişkili olması beklenir (Şengül, 2014).

Çizelge 4.9 : Harç numunelerin elektriksel özdirençleri.

Numune	Elektriksel Özdirenç (kΩcm)
R	1,41
8M/YFC-I	1,63
14M/YFC-I	1,35
10MWG/YFC-I	2,44
12MWG/YFC-I	4,32
14MWG/YFC-I	4,63
10M/YFC-II	1,08
12M/YFC-II	1,10

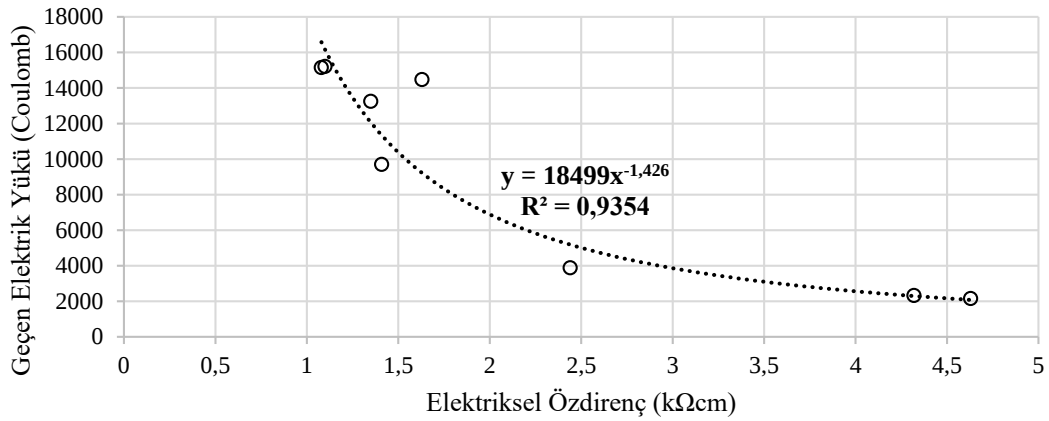
Elektriksel direnç ölçümlerini etkileyen bazı faktörler şu şekilde belirtilmiştir: donatı varlığı, beton örtüsünde çatlakların varlığı, prob aralığı, elektrot teması, numune geometrisi, elektriksel sinyal şekli ve frekansı, sıcaklık ve nem (Azarsa ve Gupta, 2017).



Şekil 4.11 : Harçların elektriksel özdirençleri.

En yüksek elektriksel özdirenç ve en düşük hızlı klor geçirirliiliği sonuçları 14MWG/YFC-I numunesi ile elde edilmiştir.

Beklenildiği üzere, elektriksel özdirenç ve klor geçirirliiliği arasında negatif bir korelasyon vardır, elektriksel özdirenç ve hızlı klor geçirirliiliği deney sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Bu grafikte, işaretlenen her nokta, farklı bir harç karışımına ait ortalama değeri ifade etmektedir. Grafikteki 8 nokta, 8 farklı karışımı göstermektedir. Elektriksel özdirenç ve klor iyonu geçirirliiliği arasında güçlü bir ilişki olduğu söylenebilir. Elektriksel özdirenç ölçümünün çok daha kolay ve hızlı gerçekleştirildiği göz önünde bulundurulduğunda, elektriksel özdirenç, dürabilitenin değerlendirilmesinde ve kalite kontrol uygulamalarında bir gösterge olarak kullanılabilir (Şengül, 2014).



Şekil 4.12 : Harçta elektriksel özdirenç ile klor geçirirliiliği ilişkisi.

Alkali ile aktifleştirilmiş harçlarda öğütülmüş atık cam kullanımı, numunelerin klor geçirirliiliğini azaltmış ve elektriksel özdirenç değerlerinde artış sağlamıştır. Atık cam ve daha yüksek sodyum hidroksit derişimleri kullanılarak hazırlanan aktivatör çözeltileri ile daha iyi elektriksel özdirenç sonuçları elde edilmiştir. Bu sonucun alınmasında, öğütülmüş atık camın puzolan benzeri davranışı etkili olabilir. Malzeme ince öğütülmüşse bu etkinin artması beklenir. Alkali ile aktive edilmiş harçların hızlı klor geçirirliiliği deneyi sonuçları iyon mobilizasyonundan etkilenebilmektedir. Hızlı klor geçirirliiliği deneyi sırasındaki sıcaklık artışları da sonuçlar üzerinde etkili olacağından, bu tür etkileri elimine etmek üzere elektriksel özdirenç değerlerinin belirlenmesi daha uygun olabilir. Klor geçirirliiliği üzerine daha detaylı araştırmalar için klor iyonunun zamana bağlı hareketini incelemek amacıyla klor penetrasyon

derinliği ölçülerek Nordtest NT Build 492 (1999), NT Build 443 (1995) gibi yöntemler kullanılabilir (Tang ve Sørensen, 2001).

4.1.9 Sodyum hidroksit derişimi ve kür koşullarının etkisi

Farklı kür koşullarına maruz kalan alkali ile aktive edilmiş harçların eğilmede çekme dayanımları Çizelge 4.10 ve Şekil 4.13'te verilmiştir. En iyi çekme dayanımı değerleri, 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile üretilen ısıtıl işlem görmüş 90 günlük alkali aktive cüruf harçları ile elde edilmiştir. Beklenildiği üzere ısıtıl işlem, erken yaşlarda aktivasyon reaksiyonunu hızlandırarak alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçlarında hızlı bir mukavemet gelişimi sağlamıştır. Burada, 60°C'ye kadar olan sıcaklıkların silisin reaktivitesini arttırarak agrega-hamur arasında bağ oluşumuna katkı sağlaması, mekanik özellikleri iyileştiren faktör olmuştur (Massazza ve Costa, 1986). Daha yüksek sıcaklıklarda, gecikmiş etrenjit oluşumu bu etkiyi tersine çevirebilir (Taylor ve diğ, 2001). Farklı araştırmacılar, alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde, 60°C'ye kadar olan sıcaklık kürünün dayanımları olumlu yönde etkilediğini ancak 80°C sıcaklıkta dayanımların düştüğünü gözlemiştir (Balçıklanlı ve diğ, 2015).

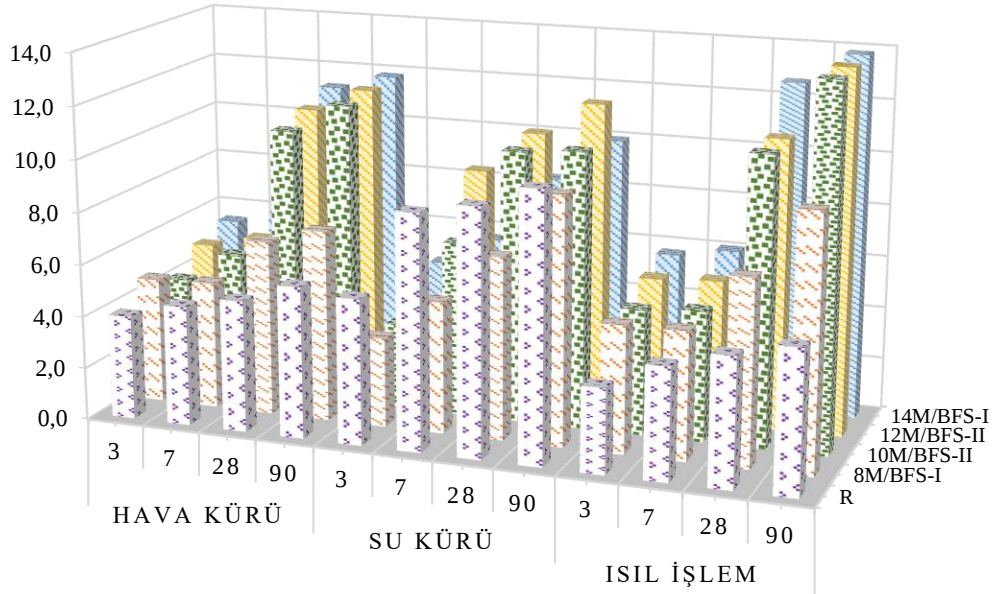
Aktivatör derişiminin etkisi incelendiğinde, harçların eğilmede çekme mukavemeti değerleri, artan sodyum hidroksit konsantrasyonu ile artmıştır. Öte yandan, yüksek seviyelerde sodyum hidroksit konsantrasyonu geopolimer jel oluşumunda bir gecikmeye neden olabilir, eğer cam tozunun sodyum içeriği yüksekse, NaOH konsantrasyonu azaltılabilir (Pascual ve diğ, 2014).

Çizelge 4.10 : Farklı kür koşullarında harçların eğilmede çekme dayanımı.

	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)											
	Laboratuvar açık ortam				Kür havuzu				24 saat 60°C ardından laboratuvar açık ortam			
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
R	4,0	4,6	5,0	5,8	5,6	9,0	9,4	10,2	3,3	4,3	4,9	5,5
8M/YFC-I	4,8	4,9	6,7	7,3	3,4	5,0	7,0	9,5	4,9	4,9	7,1	9,7
10M/YFC-II	4,2	5,4	10,4	11,6	3,3	6,7	10,3	10,5	4,8	5,0	11,0	13,8
12M/YFC-II	5,0	5,5	10,8	11,7	3,5	8,9	10,6	11,8	5,4	5,5	11,0	13,8
14M/YFC-I	5,4	6,0	11,3	11,8	4,5	5,7	8,3	10,0	5,7	6,1	12,7	13,9

Önceki çalışmalar, aktivatördeki daha yüksek sodyum yüzdesinin daha yüksek bir mukavemet oluşturmaya rağmen; işlenebilirlik ve priz sürelerinin, ani reaksiyona

ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen cürufun hızlı sertleşmesine bağlı olarak daha yüksek sodyum konsantrasyonu ile hızla azaldığını göstermiştir (Bilim ve diğ, 2013).



Şekil 4.13 : Harçların eğilmede çekme dayanımları.

Farklı kür koşullarına maruz kalan alkali ile aktive edilmiş harçların basınç dayanımları Çizelge 4.11 ve Şekil 4.14’te verilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerleri, 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile üretilen ısıtılmış işlem görmüş 90 günlük alkali aktive cüruf harçları ile elde edilmiştir. Bu sonuç, eğilme deneyi sonuçları ile uyumludur.

Çimentonun hidratasyon reaksiyonunun puzolanik reaksiyondan daha hızlı olması nedeniyle, erken yaşlarda Portland çimento harçlarının mukavemet kazanma hızının alkali ile aktifleştirilmiş harçlardan daha yüksek olduğu açıktır. Bununla birlikte, ilerleyen yaşlarda, alkali ile aktive edilen malzemeler, Portland çimentosu ile üretilen harçlardan daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahiptir.

Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harçlarının rötre değerleri, Portland çimentosu harçlarından daha yüksek olmaktadır ve kür koşulları, sertleşmiş halde, çimentolu harçlara kıyasla alkali aktifleştirilmiş cüruf harçlarının mekanik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Bilim ve diğ, 2013).

Mineral bileşim, kimyasal bileşim ve kristal yapı gruplarını kapsayan başlangıç malzemelerinin doğası, geopolimer jel fazının oluşumunu etkilemektedir. Ham maddelerin çoğu, zeolit kil minerali içerir ve yüksek kızdırma kaybı değerine sahiptir. En fazla reaktivitenin, en az kızdırma kaybı ve en fazla çözünebilir kalsiyum içeriğine sahip puzolanlarda elde edildiği görülmüştür. Sodyum zeolit klinoptilolit içeren puzolanlar, ısıtılma ile orta ila yüksek mukavemetli bir bağlayıcı hazırlamak için kullanılabilir. Bazik magmatik kayaçların başkalaşımından kaynaklanan montmorillonit gibi daha fazla metamorfik mineraller içeren puzolanlarda kalsinasyon, minerallerin reaktivitesini iyileştirmede etkilidir, ancak amorf fazı deaktifte ederek kristal fraksiyonunu artırır. Kalsinasyon, bu tür puzolanların özelliklerini iyileştirir. Daha az metamorfik mineral içeren puzolan, 60°C kür sıcaklığında daha iyi reaktivite gösterir, ancak bu kür sıcaklığında kalsinasyonun puzolanın reaktivitesini iyileştirmede önemli bir etkisi olmadığından kalsinasyon sonrası uygun değildir (Bondar ve diğ., 2011).

Çizelge 4.11 : Farklı kür koşullarında harçların basınç dayanımı.

	Basınç Dayanımı (MPa)											
	Laboratuvar açık ortam				Kür havuzu				24 saat 60°C ardından laboratuvar açık ortam			
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
R	19,7	27,5	28,1	29,1	28,8	42,7	43,0	54,8	19,7	21,7	23,2	24,3
8M/YFC-I	26,8	43,1	60,8	74,6	19,3	41,5	76,0	88,5	29,9	49,1	65,4	66,6
10M/YFC-II	16,6	39,3	55,0	62,1	20,8	35,7	56,5	68,4	48,2	56,7	66,4	72,6
12M/YFC-II	24,3	45,3	64,8	69,5	22,4	39,7	59,8	68,5	48,2	59,8	67,4	70,2
14M/YFC-I	46,9	76,5	86,5	94,4	46,0	73,4	76,7	91,7	63,9	76,8	78,9	95,7

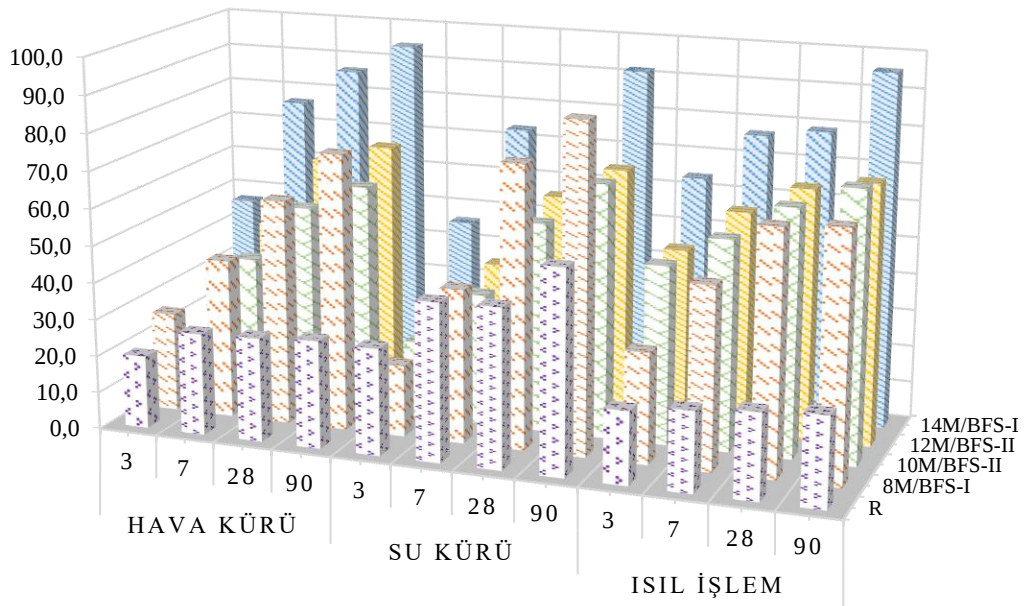
Beklenildiği gibi, ısıtılma işlemi, Portland çimentosu ile üretilen referans numunelerin çekme ve basınç mukavemetlerinde bir azalmaya neden olurken erken yaşlarda, alkali aktive edilmiş harçlar için hızlı bir mukavemet gelişimi sağlamıştır. 28 gün sonra, hızlı hidrasyon nedeniyle gözenekli bir yapıya sahip olması beklenen 8M/YFC-I kodlu ısıtılma işlemi görmüş numuneler, kür havuzunda bekletilenlerden daha düşük mukavemet değerlerine sahiptir.

95,7 MPa olarak elde edilen 90 günlük maksimum basınç dayanımı değeri, 14 M sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak üretilen ısıtılma işlemi görmüş alkali aktive cüruf harcı ile elde edilmiştir.

Alkali ile aktifleştirilen harçların basınç dayanımı değerlerinin artan sodyum hidroksit çözeltisi derişimleri ile erken yaşlarda arttığı gözlenmiştir.

Kür koşullarının erken yaşlarda dayanım özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Bu çalışmada, 24 saat 60°C sıcaklıktaki etüvün ardından deney gününe kadar laboratuvar açık ortamda bekletilen numunelerin, diğer kür koşullarına kıyasla alkali ile aktive edilmiş harçlarda en yüksek dayanım sonuçlarını verdiği görülmüştür. Bu sonucun alınmasında, 60°C sıcaklıkta silisin aktifleşmesi sonucu agrega ile hamur arasındaki bağın kuvvetlenmesi etkili olabilir (Massazza ve Costa, 1986).

Kür koşullarının ilerleyen yaşlarda alkali ile aktive edilmiş harçların mukavemet değerleri üzerindeki etkisi daha az olmuştur. Portland çimentosu kullanılarak yapılan üretimlerde, kür havuzunda bekletilen numuneler en iyi sonuçları vermiştir.



Şekil 4.14 : Harçların basınç dayanımları.

Önceki araştırmalarla, kür sıcaklığının alkali aktifleştirilmiş çüruf betonunun mikro yapısı, rötresi ve basınç dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiş, ısıt işlemin ilk mukavemet gelişimi üzerinde etkili olduğu ancak daha sonraki yaşlarda, oda sıcaklığında kürlen betonla karşılaştırıldığında basınç mukavemetinin önemli ölçüde azaldığı bulunmuştur (Bakharev ve diğ, 1999).

Isı ile kürlenene alkali aktifleştirilmiş cüruf harçlarının mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırmalar, otoklavlanmanın düşük Na_2O konsantrasyonları ve düşük Ms ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) oranlarına sahip aktivatör çözeltileri için uygun bir kür yöntemi olduğunu göstermiştir; buhar kürünün, yüksek Ms ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) oranlarına sahip aktivatörler için tercih edilebilir bir yöntem olduğu ifade edilmiştir (Aydın ve Baradan, 2012).

Chi (2012a), alkali aktifleştirilmiş cüruf betonu üzerinde üç farklı kür koşulunda deneyler gerçekleştirmiş, beton özelliklerinin ve dayanıklılığının büyük ölçüde aktivatör çözeltilisinin dozajına ve kür koşullarına bağlı olduğunu belirtmiştir. Son çalışmalar alkali ile aktifleştirilmiş cüruf özelliklerinin ve dayanıklılığının önemli ölçüde alkali çözelti dozajına bağlı olduğunu göstermektedir, dayanım ve dürabilite özellikleri artan Na_2O dozajı ile iyileşmektedir (Chi, 2012b). Aktivatör konsantrasyonu arttıka alkali aktifleştirilmiş harçların basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir (Atiş ve diğ, 2009; Rashad ve diğ, 2011).

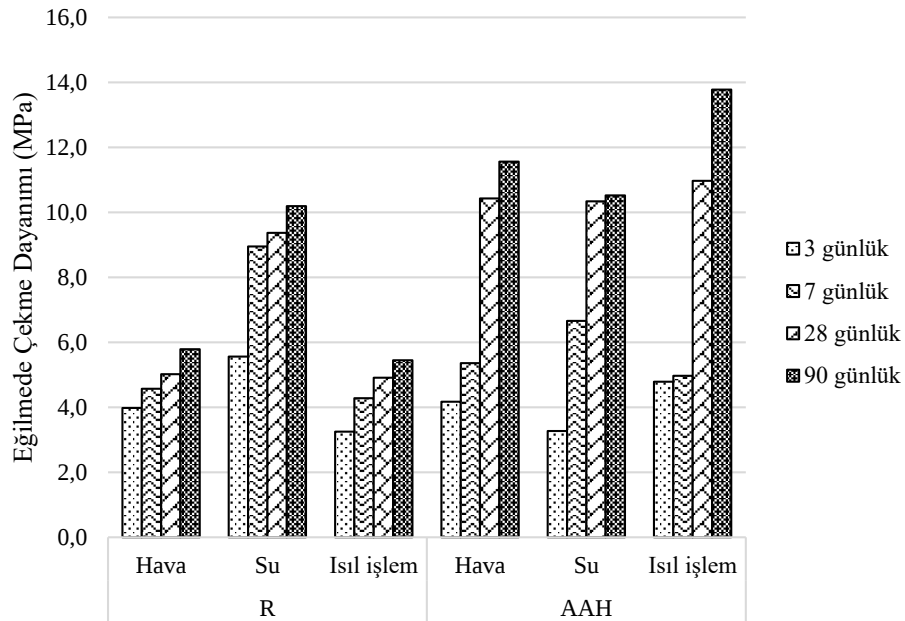
Bilim ve diğ. (2013), en iyi sonuçların deney süresi boyunca $23\pm 2^\circ\text{C}$ 'de ve %95 bağlı nemde kürlenene alkali aktifleştirilmiş cüruf harçlarından elde edildiğini gözlemlemiştir.

Gebregziabiher ve diğ. (2016), oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta kürlenene alkali aktifleştirilmiş cüruf bağlayıcıların basınç mukavemeti gelişimini araştırmış ve yüksek sıcaklıkta, yüksek aktivatör derişimleri ile dayanım gelişiminin iyileştiğini bildirmişlerdir. Alkali aktivatörlerin yüksek fırın cürufu ile beraber kullanıldığı durumlarda, geopolimerizasyon sonucu, ana reaksiyon ürünü olarak C-A-S-H jeli oluşmaktadır. Bu jel, Portland çimentosunun ana hidratasyon ürünü olan C-S-H jeline benzese de yapıları farklılık göstermektedir. Alkali aktivatör kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda oluşan ürünün mikro yapısını ve nihai özelliklerini etkileyen faktörler, Portland çimentosu ile üretilen betonlara göre çok daha fazladır. Bu betonlar üretim koşullarına daha duyarlıdır. Geopolimerizasyon sürecini etkileyen başlıca faktörler; kür koşulları, kalsiyum içeriği, su içeriği, kullanılan bağlayıcının kimyasal bileşimi, kullanılan aktivatörlerin molar derişimi, dozajı, Na_2O /bağlayıcı oranı ve Ms oranı olarak da bilinen $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranı şeklinde sıralanabilir.

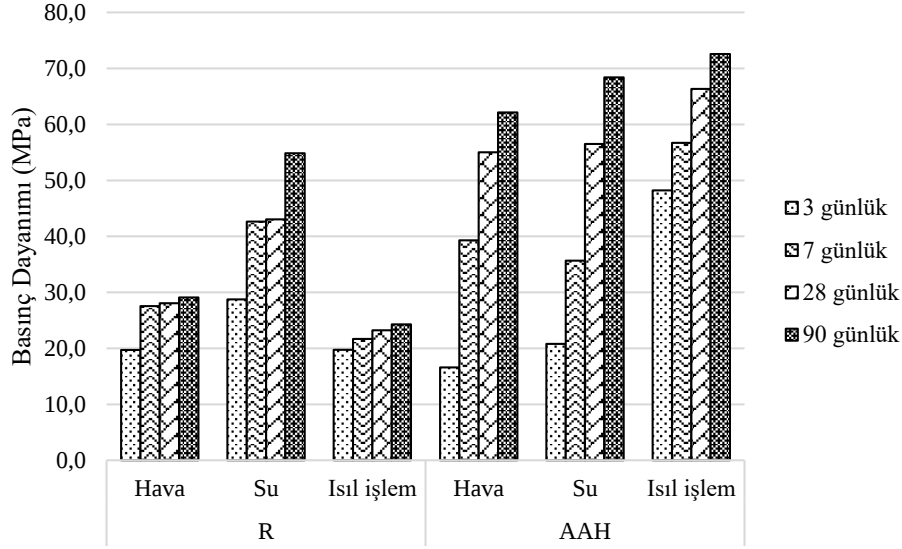
Altan ve Erdoğan (2012), farklı alkali aktivasyon parametrelerinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, cüruf harcı ve hamurunun ısı yayılımı ve dayanım

kazanma gelişiminin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda nasıl değiştiğini incelemişler, sıcaklık kürüne maruz bırakılan numunelerin çok hızlı dayanım kazandığını, oda sıcaklığında bekletilen numunelerin yeterli süre kür uygulandığında dayanım kazandığını ve dayanım değerlerinin hızlı kür edilen numunelere yakın olduğunu gözlemişlerdir. Bununla birlikte, oda sıcaklığında kür uygulanan numuneler için, sodyum hidroksit derişiminin basınç dayanımı üzerinde daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Farklı kür koşullarında, çimento kullanılarak üretilen referans numune (R) ile 10 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilen harcın (AAH) eğilmede çekme dayanımları Şekil 4.15'te grafik olarak verilmiştir. Kür koşullarının bu harçların basınç dayanımı üzerine etkisi ise Şekil 4.16'da görülmektedir. 10 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerin seçilmesinin nedeni, bu karışımın kullanılan cüruf nedeniyle işlenebilirlik açısından daha iyi olmasının yanında, molarite açısından da ortalama bir değer olmasıdır. Bu grafiklerden de görüleceği üzere 60°C sıcaklıkta uygulanan kür, alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde silis aktivitesini artırarak mekanik özellikleri iyileştirirken çimento kullanılarak üretilen numunelerde su kürü dayanımlar açısından daha olumlu sonuçlar alınmasını sağlamıştır.



Şekil 4.15 : Kür koşullarının harçların eğilmede çekme dayanımına etkisi.



Şekil 4.16 : Kür koşullarının harçların basınç dayanımına etkisi.

4.2 Betonlar Üzerinde Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

4.2.1 Kılcallık katsayısı

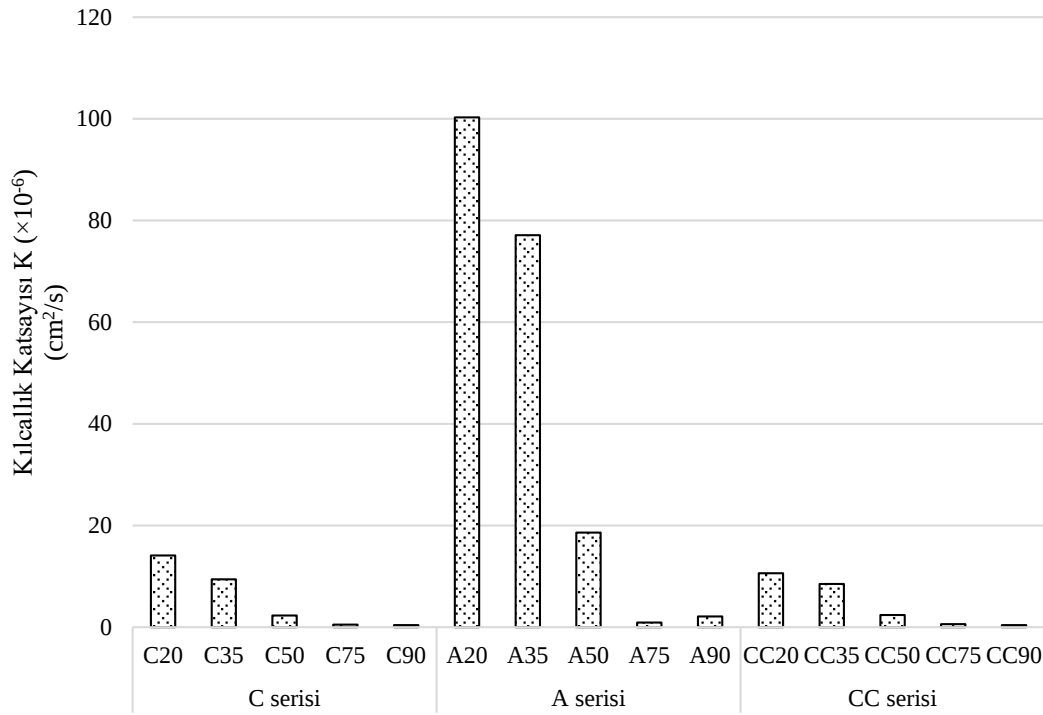
Kapiler su emme deneyi sonucu elde edilen, beton numunelere ait kılcallık katsayısı değerleri Çizelge 4.12 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.

Beton dayanımı arttıkça kılcallık katsayılarında azalma gözlenmiştir. Agrega olarak ferrokrom cürufunun kullanıldığı alkali aktifleştirilmiş harçların kılcallık katsayıları, Portland çimentosu ile üretilen numunelerden yüksektir.

Çizelge 4.12 : Beton numunelerin kılcallık katsayıları.

	Numune	K ($\times 10^{-5}$) (cm^2/s)
Kontrol Grubu	C20	1,41
	C35	0,94
	C50	0,23
Portland Çimentosu+Kırmataş	C75	0,05
	C90	0,04
	A20	10,03
Alkali+Ferrokrom Cürufu	A35	7,71
	A50	1,86
	A75	0,09
Portland Çimentosu+Ferrokrom Cürufu	A90	0,21
	CC20	1,06
	CC35	0,85
Portland Çimentosu+Ferrokrom Cürufu	CC50	0,24
	CC75	0,06
	CC90	0,04

Portland çimentosu ile üretilen 90 MPa basınç dayanımlı numunelerde agreganın değiştirilmesi kılcallık katsayısında değişime neden olmamıştır. A90 numunesinde akışkanlaştırıcı katkı kullanılmasına rağmen uygun işlenebilirlik sağlanamamış, su/bağlayıcı oranı da 0,28 olduğundan çökme değeri sıfır olmuştur, bu da beton özelliklerini olumsuz etkilemiş, kılcallık katsayısı bu numunede A75 numunesinden fazla olmuştur. Su/bağlayıcı oranına bağlı olarak kılcallık katsayılarında meydana gelen değişim, alkali aktive edilmiş numunelerde çimento ile üretilen numunelere kıyasla daha fazla olmuştur.



Şekil 4.17 : Beton numunelerin kılcallık katsayıları.

4.2.2 Su emme yüzdesi

Beton numunelerin su emme yüzdeleri Çizelge 4.13 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.

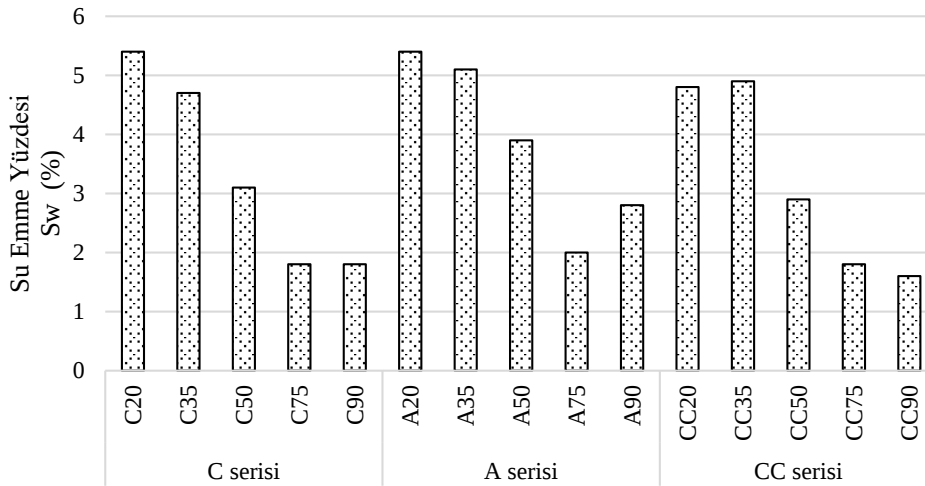
Su/bağlayıcı oranı azalıp basınç dayanımı arttıkça, su emme yüzdelerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, kapiler su emme deneyi sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

Daha az boşluklu bir beton üretildiğinde, basınç dayanımı değerleri iyileşeceği gibi, geçirimsizlik azaldığı için dürabilite performansı da olumlu etkilenecektir.

Çizelge 4.13 : Beton numunelerin su emme yüzdeleri.

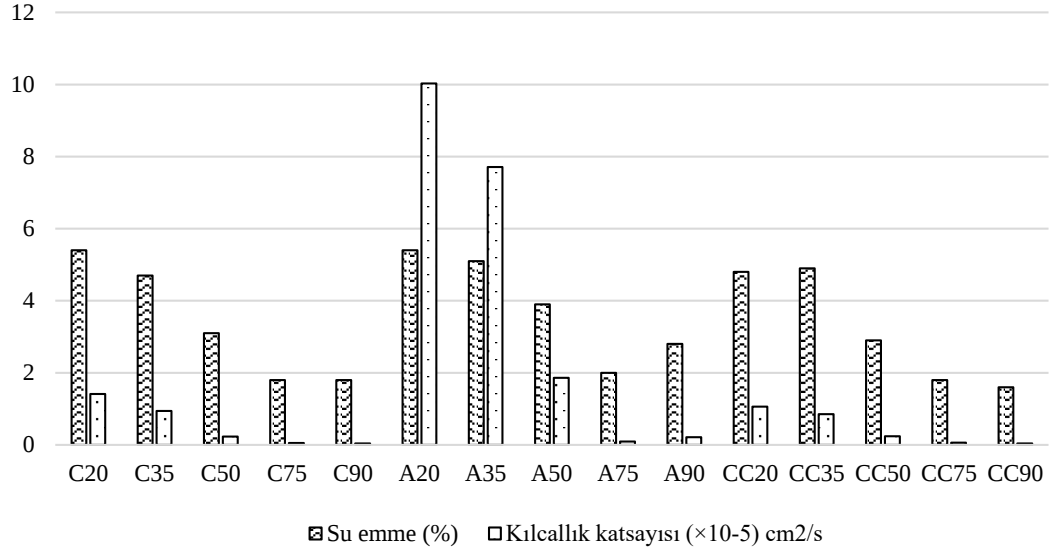
		Su Emme Yüzdesi
Numune		Sw (%)
Kontrol Grubu	C20	5,4
	C35	4,7
	C50	3,1
Portland Çimentosu+Kırmataş	C75	1,8
	C90	1,8
	A20	5,4
Alkali+Ferrokrom Cürufu	A35	5,1
	A50	3,9
	A75	2,0
Portland Çimentosu+Ferrokrom Cürufu	A90	2,8
	CC20	4,8
	CC35	4,9
Portland Çimentosu+Ferrokrom Cürufu	CC50	2,9
	CC75	1,8
	CC90	1,6

Kırmataş yerine ferrokrom cürufu kullanıldığında su emme yüzdeleri bir miktar azalmıştır. Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen betonlarda su emme değerleri, Portland çimentosu ile üretilenlerden yüksektir.



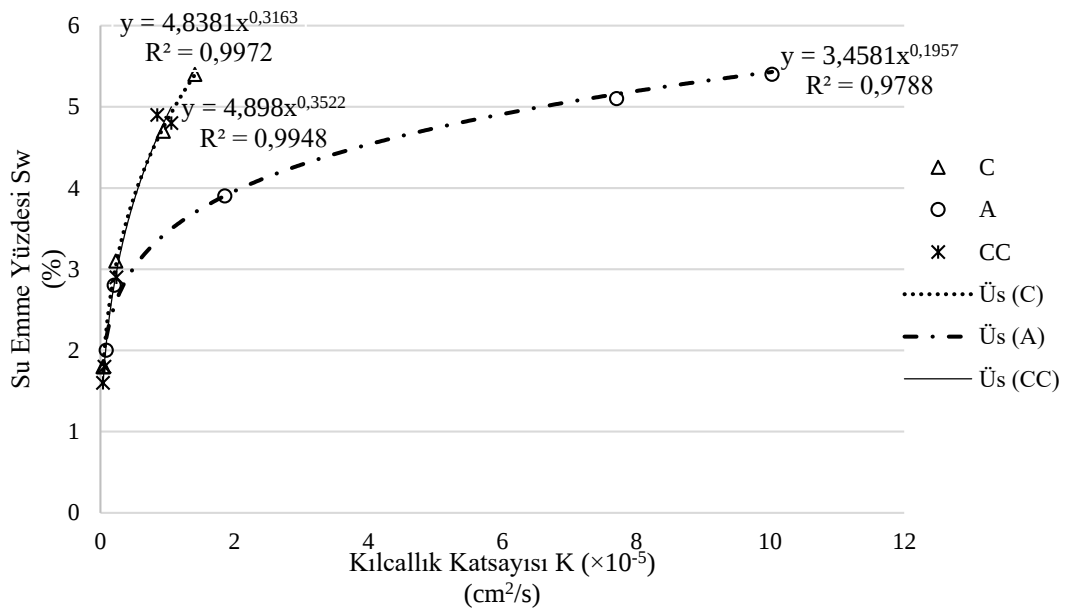
Şekil 4.18 : Beton numunelerin su emme yüzdeleri.

A90 numunesinde akışkanlaştırıcı katkı kullanılmasına rağmen uygun işlenebilirliğin sağlanamamış olması ve çökme değerinin sıfır oluşu, kılcallık katsayısı değerinde olduğu gibi su emme yüzdesi değerini de olumsuz etkilemiş, toplam su emme yüzdesi bu numunede A75 numunesinden fazla olmuştur. Betonlarda kılcallık katsayıları ve su emme yüzdelerinin değişimi bir arada Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19 : Kılcallık katsayıları ve su emme yüzdelerinin değişimi.

Kılcallık katsayıları ile toplam su emme yüzdelerinin değişimi aynı grafikte gösterildiğinde, her iki değerin de benzer eğilimde olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 4.19’da görüldüğü üzere, su emme yüzdeleri ile kılcallık katsayıları arasında pozitif korelasyon bulunmaktadır. Buradan, bu değerlerin benzer mekanizmalardan etkilendiği söylenebilir. Porozite arttıkça su emme miktarı artmaktadır, dolayısıyla su/bağlayıcı oranı arttıkça kılcallık katsayısı ve su emme yüzdesi değerleri artmıştır. Betonlarda kılcallık katsayısı ile toplam su emme arasındaki ilişki Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



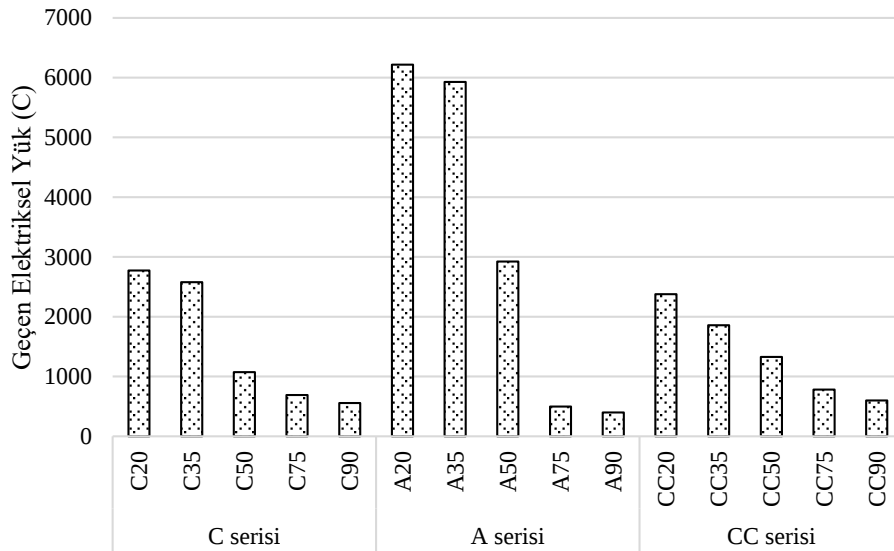
Şekil 4.20 : Betonlarda kılcallık katsayısı-toplam su emme ilişkisi.

4.2.3 Hızlı klor geçirimsliliği

Beton numunelere ait hızlı klor geçirimsliliği deney sonuçları Çizelge 4.14 ve Şekil 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.14 : Beton numunelerde hızlı klor geçirimsliliği deney sonuçları.

	Numune	Geçen Elektriksel Yük Miktarı (Coulomb)	Klor İyonu Geçirimsliliği Yönünden Değerlendirme (ASTM C1202)
Kontrol Grubu	C20	2772	Orta
	C35	2577	Orta
Portland Çimentosu+Kırmataş	C50	1073	Düşük
	C75	690	Çok Düşük
	C90	557	Çok Düşük
	A20	6218	Yüksek
	A35	5929	Yüksek
Alkali+Ferrokrom Cürufu	A50	2923	Orta
	A75	496	Çok Düşük
	A90	397	Çok Düşük
	CC20	2378	Orta
	CC35	1856	Düşük
Portland Çimentosu+Ferrokrom Cürufu	CC50	1327	Düşük
	CC75	781	Çok Düşük
	CC90	599	Çok Düşük



Şekil 4.21 : Beton numunelerde hızlı klor geçirimsliliği deney sonuçları.

Geçen elektriksel yük miktarı arttıkça, numunenin klor iyonu geçirimsliliği de artmaktadır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, beton basınç dayanımı arttıkça numunelerin klor geçirimsliliklerinin azaldığı görülmüştür. Yüksek

su/bağlayıcı oranlarında, alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen numunelerin klor geçirimsizlikleri, diğer numunelere göre daha yüksektir, bu sonucun elde edilmesinde aktivatör kullanımıyla birlikte iyon varlığının artışı, buna bağlı olarak artan elektron hareketi ve deney sırasındaki sıcaklık artışı etkili olabilir. Portland çimentosu ile birlikte agrega olarak ferrokrom cürufu kullanıldığında, daha düşük klor geçirimsizlikleri elde edilmiştir, bu da beton dürabilitesi açısından olumlu bir sonuçtur. Yüksek su/bağlayıcı oranlarında, Portland çimentosu ve kırmataş kullanılarak üretilen kontrol grubunun klor geçirimsizlikleri, ferrokrom cürufu kullanılarak üretilen diğer iki grubun arasındadır. Düşük su/bağlayıcı oranlarında tüm numunelerde klor iyonu geçirimsizliği çok düşük olmuştur. Bu durum, alkalilerle aktive edilen malzemelerde de su/bağlayıcı oranında azalma sağlandığı takdirde, klor iyonu geçirimsizliği açısından dayanıklılığın olumlu etkileneceğine işaret etmektedir.

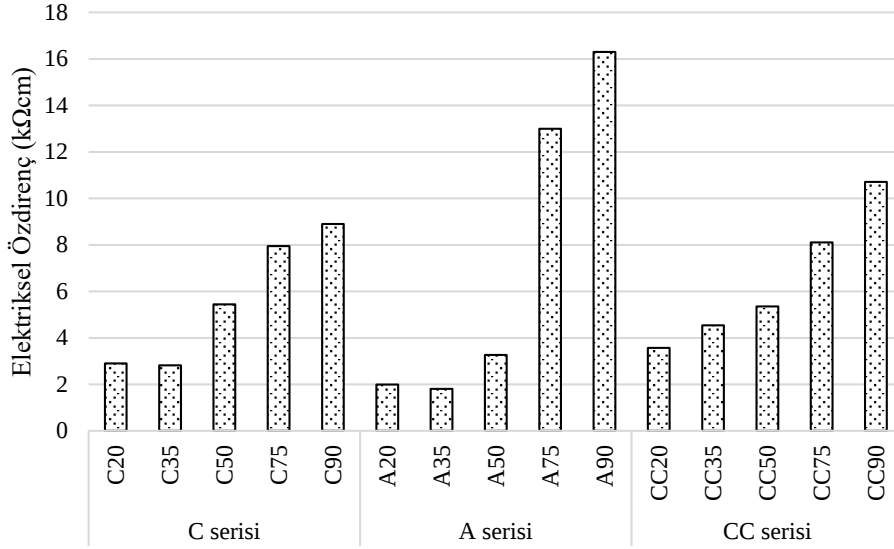
Portland çimentosu ile üretilen numuneler kıyaslandığında, artan su/çimento oranlarında ferrokrom cüruf agregası kullanımının kırmataşa kıyasla daha düşük klor geçirimsizliği sağladığı görülmektedir

4.2.4 Elektriksel özdirenç

Beton numunelerin elektriksel özdirenç değerleri Çizelge 4.15 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.

Çizelge 4.15 : Beton numunelerin elektriksel özdirenç değerleri.

	Numune	Elektriksel Özdirenç (kΩcm)
Kontrol Grubu	C20	2,90
	C35	2,82
Portland Çimentosu+Kırmataş	C50	5,44
	C75	7,95
	C90	8,90
	A20	1,99
	A35	1,81
Alkali+Ferrokrom Cürufu	A50	3,27
	A75	13,00
	A90	16,30
	CC20	3,57
	CC35	4,54
Portland Çimentosu+Ferrokrom Cürufu	CC50	5,35
	CC75	8,11
	CC90	10,71

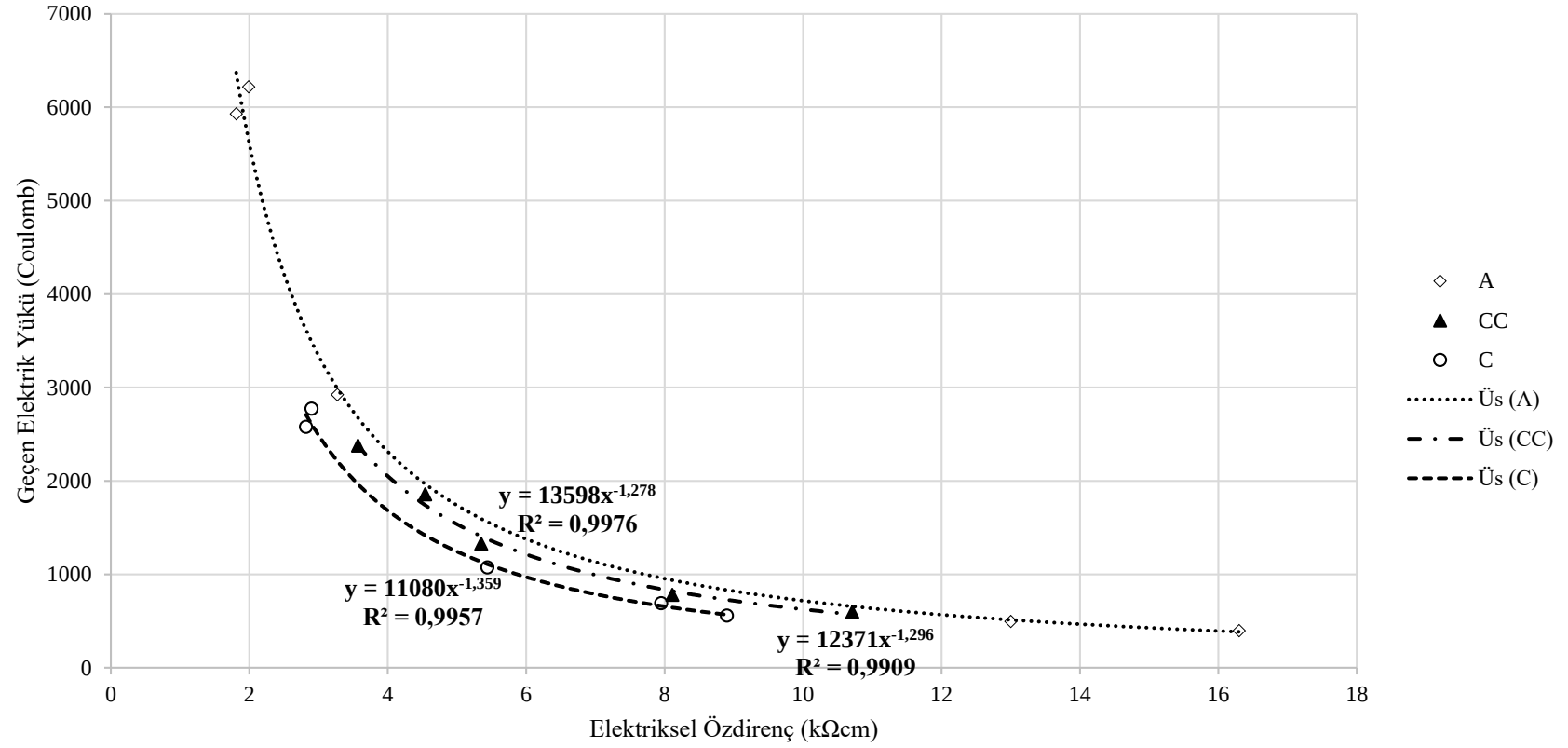


Şekil 4.22 : Beton numunelerin elektriksel özdirenç değerleri.

Beton basınç dayanımı arttıkça elektriksel özdirenç değerleri artmıştır. En yüksek elektriksel özdirenç değerleri alkali aktifleştirilmiş A90 kodlu numune ile elde edilmiştir. Hızlı klor geçirimliliği deney sonuçlarına etki ederek deneyin daha yüksek klor geçirimliliği ile sonuçlanmasına neden olan, deney sırasındaki sıcaklık artışı gibi etkilerin elektriksel özdirenç ölçümünde önemini kaybettiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Düşük su/bağlayıcı oranlarında, elektriksel özdirenç, alkali aktive edilmiş betonlarda en yüksek olmuştur, bu da geçirimlilik açısından olumlu bir sonuçtur.

Betonda elektriksel özdirenç ile klor geçirimliliği arasındaki ilişki, Şekil 4.23'te gösterilmektedir. Elektriksel özdirenç arttıkça, klor geçirimliliğinin azaldığı görülmektedir. Hızlı ve kolay uygulanan bir deney olması nedeniyle elektriksel özdirenç ölçümü, dürabilite açısından betonları kıyaslamada bir yöntem olarak tercih edilebilir.



Şekil 4.23 : Betonda elektriksel özdirenç ile klor geçirimsizliği ilişkisi.

4.3 Çelik Lif Donatılı Betonlar Üzerinde Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

4.3.1 Ön deneyler: Hurda çelik tel içeren SIFCONların yük-sehim grafikleri

Araç lastiklerinden elde edilen atık çelik teller ile SIFCON üretimi gerçekleştirilmiş ve mekanik deneyler yapılmıştır. Ön deneyler için su, çimento, ince kum ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak atık çelik tellerle üretim gerçekleştirilmiştir. Burada su/çimento=0,40 katkı=%1,5, çimento/kum=1 olacak şekilde dizayn yapılmış, 15 kg kum, 15 kg çimento, 6 kg su, 225 gram katkı ile 10 adet 7 cm×7 cm×28 cm boyutlu prizmatik numune üretilmiştir. Lif hacim oranı v_f =%1, 2, 3, 4, 5 için lif ağırlıkları sırasıyla 108, 215, 323, 430, 538 g olarak hesaplanmıştır. Yanak teli ve kırılmış tel olmak üzere iki farklı atık çelik lif kullanılmıştır. Yanak teli Şekil 4.24'te görüldüğü gibi, kalıba sığacak şekilde kesildikten sonra sürekli lif olarak kullanılmıştır. Çimento bulamacı Şekil 4.25'te, SIFCON üretimi Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

Ön deneyler, uygun kıvamın ve lif yerleşiminin sağlanması, daha sonra yapılacak deneylerde cihaz kapasitesinin yeterli olacağının kontrolü amaçlarıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.24 : Yanak teli.



Şekil 4.25 : Çimento bulamacı.



Şekil 4.26 : SIFCON üretimi.

Taze haldeki SIFCON numuneleri Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : Taze haldeki SIFCON numuneleri.

Eğilme deneyi öncesinde çentik açılmış, 7 cm×7 cm×28 cm boyutlu prizmatik çimentolu referans numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları Çizelge 4.16’da verilmiştir. Basınç deneyinde kullanılan presin kapasitesi 300 t olup yükleme hızı 3 kN/s’dir.

Süreksiz lifli numunenin eğilme deneyi sonundaki görüntüsü Şekil 4.28’de, sürekli lifli numuneninki ise Şekil 4.29’da sunulmuştur. Burada gösterilen numunelerin lif hacim oranı %2’dir.

Çizelge 4.16 : 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları.

Lif türü	Lif hacim oranı v_f (%)	Karışım Kodu	Eğilme Deneyi Maksimum Yük (kN)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Kırılma Yüğü (kN)	Basınç Dayanımı (MPa)
Çelik kırılmış tel	1	RK%1	8,1	9,6	386,2	78,8
	2	RK%2	12,1	14,4	352,6	72,0
	3	RK%3	17,5	20,8	387,0	79,0
	4	RK%4	14,5	17,3	301,7	61,6
	5	RK%5	11,9	14,2	286,1	58,4
Çelik yanak teli Φ_{ort} : 1,57 mm L_{ort} : 250 mm	1	RD%1	1,7	2,0	377,5	77,0
	2	RD%2	14,2	16,8	388,6	79,3
	3	RD%3	23,4	27,8	406,6	83,0
	4	RD%4	45,3	54,0	392,2	80,0
	5	RD%5	44,1	52,5	412,6	84,2

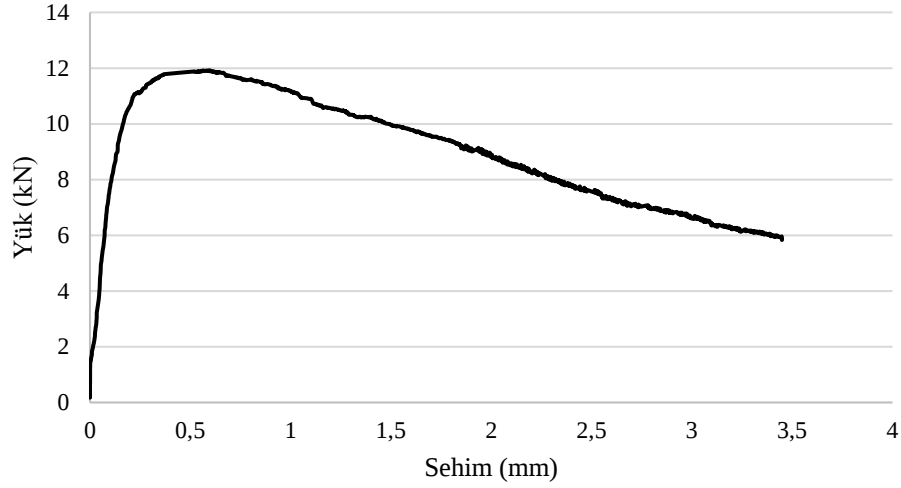


Şekil 4.28 : RK%2 numunesinin eğilme deneyi sonunda durumu.



Şekil 4.29 : RD%2 numunesinin eğilme deneyi sonunda durumu.

Çimento, su ve ince kum kullanılarak üretilen referans karışım için v_f =%5 ve lif türünün kırılmış tel (süreksiz lif) olması durumunda elde edilen yük-sehim grafiği Şekil 4.30'da verilmiştir. Burada, numune yaşı: 28 gün, kür koşulu: kür havuzu, mesnet açıklığı: 20 cm ve yükleme hızı: 0,21 mm/dakika'dır.



Şekil 4.30 : RK%5 numunesinin yük-sehim grafiği.

Deneme üretimlerinde, 8 M NaOH ve öğütülmüş cam kullanılarak yapılan farklı su/bağlayıcı oranına sahip 7 cm×7 cm×28 cm boyutlu lifsiz numunelerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.17’de özetlenmiştir.

Daha akıcı bir kıvam sağlamak için su miktarının artırılmasının mekanik özellikleri olumsuz etkilediği görülmektedir. Numuneler lif içermediklerinden tokluk değerlerinde bir değişim söz konusu olmamakla birlikte su/bağlayıcı oranının artmasıyla eğilmede çekme dayanımında %27, yarmada çekme dayanımında %53, kırılma enerjisinde %11, basınç dayanımında %50 oranında azalma gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.17 : Deneme üretimlerinde elde edilen sonuçlar.

Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Tokluk (J)	Kırılma Enerjisi (J/m ²)	Basınç Dayanımı (MPa)
8MWG-kuru	3,3	5,9	0,3	73,8	42,6
8MWG-akıcı	2,4	2,8	0,3	65,6	21,3

Bu üretimlerde, karışımdaki su miktarının azaltılmasıyla kırılma yükünde artış gerçekleşmiştir. SIFCON üretiminde karışımın liflerin arasından geçmesinde ve yerleştirmede sorun yaşanmaması, işlenebilirliğin olumsuz etkilenmemesi için uygun akıcılığın sağlanması gerekirken mekanik özelliklerin de bu durumdan etkileneceği göz önünde bulundurulmalıdır. Burada, akışkanlaştırıcıların alkali aktive cürufufta etkin olmaması nedeniyle uygun kimyasal katkının kullanılamayışı, dizayn konusunda sınırlayıcı olmuştur.

4.3.2 Eğilmede çekme dayanımı

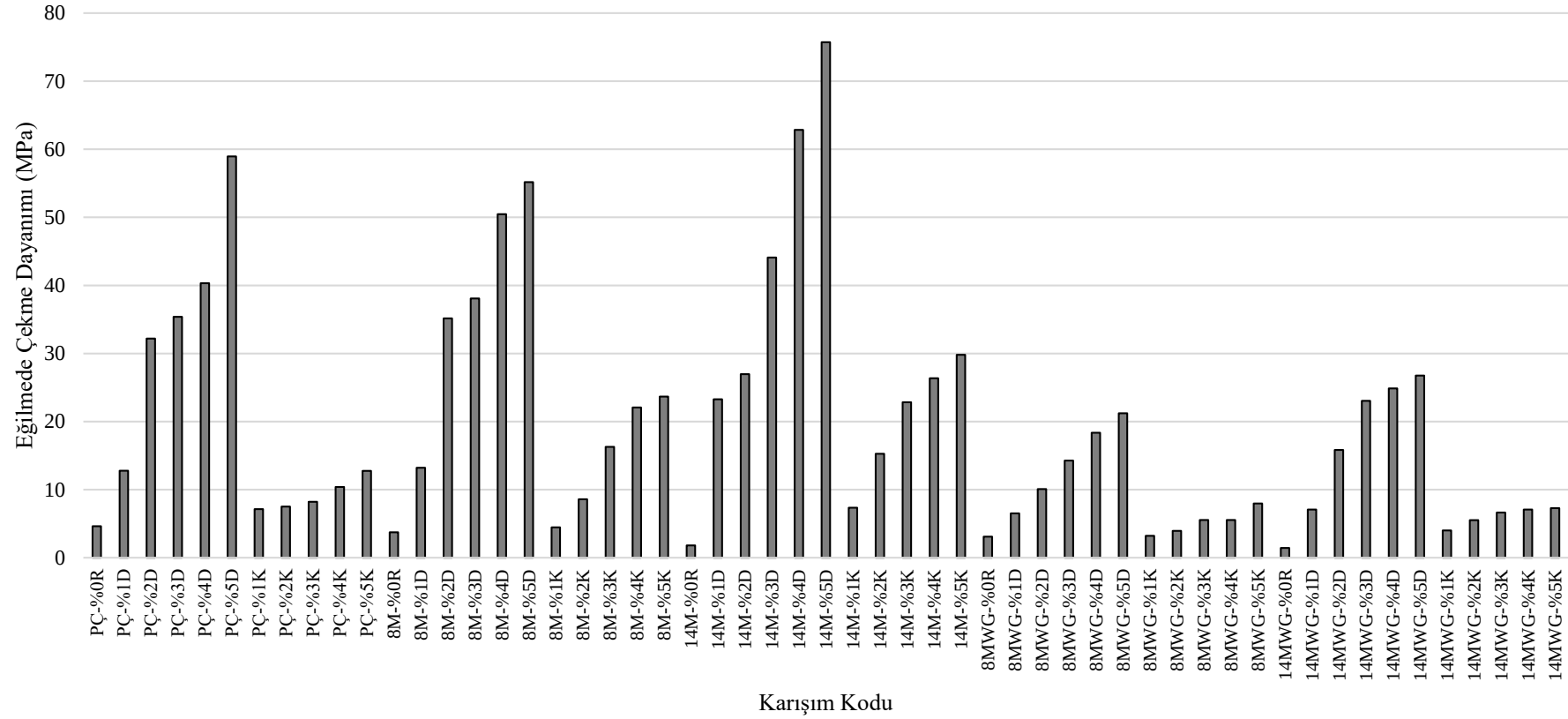
SIFCON numunelere ait yük-sehim grafikleri ekte, Şekil A.1-A.11 arasında verilmiştir. Şekil A.11’de lif hacim oranı %3 olan numunelerin yük-sehim eğrileri gösterilmiştir. %3 lif hacim oranı, üretilen SIFCON numunelerin lif hacim oranları arasındaki orta değer olduğundan grafiksel gösterimde tercih edilmiştir. Bu grafiklerde, örnek grubunu temsil eden birer numune seçilmiştir, kodlamadaki son rakam seçilen örneğin numarasıdır, ortadaki rakam ise lif hacim oranını göstermektedir. Yük-sehim grafiklerinden de görüleceği üzere, lif miktarı arttıkça tokluk ve süneklik artmaktadır. Genel olarak lif miktarı arttıkça, malzemenin elastisite modülü de artmaktadır.

SIFCON numunelere ait ortalama eğilmede çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.18 ve Şekil 4.31’de verilmiştir.

Şekil A.11 incelendiğinde, eğilme dayanımı değerlerinin sürekli lif kullanımında, süreksiz life kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı grafikte, eğilme dayanımı açısından değerlendirme yapıldığında 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikatın aktivatör olarak kullanıldığı numunelerde en iyi sonuçların alındığı görülmektedir. %3 lif hacim oranı için, eğilme dayanımları büyükten küçüğe doğru, 14M-D, 8M-D, PÇ-D, 14M-K, 8M-K, 14MWG-D, 8MWG-D, PÇ-K, 14MWG-K ve 8MWG-K şeklinde sıralanmaktadır. Buradan, sodyum hidroksit derişimi arttıkça mekanik özelliklerde iyileşme görüldüğü söylenebilir. Sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen malzemeler, Portland çimentosu ile üretilen numuneden daha yüksek dayanım değerleri vermektedir. Burada, alkali ile aktifleştirilmiş cüruflarda aderans kuvvetlerinin Portland çimentosuna göre daha fazla oluşu etkili olabilir, lif ile matris arasındaki kuvvetler arttıkça eğilme etkisi altında, mekanik özellikler açısından daha olumlu bir davranış sergilenmektedir (Balçıkanlı ve diğ, 2015).

Çizelge 4.18 : SIFCON numunelerin eğilmede çekme dayanımı.

Karışım Kodu	Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa)
PÇ-%0R	4,6
PÇ-%1D	12,8
PÇ-%2D	32,2
PÇ-%3D	35,4
PÇ-%4D	40,3
PÇ-%5D	59,0
PÇ-%1K	7,2
PÇ-%2K	7,5
PÇ-%3K	8,2
PÇ-%4K	10,4
PÇ-%5K	12,8
8M-%0R	3,7
8M-%1D	13,2
8M-%2D	35,2
8M-%3D	38,1
8M-%4D	50,5
8M-%5D	55,2
8M-%1K	4,5
8M-%2K	8,6
8M-%3K	16,3
8M-%4K	22,1
8M-%5K	23,7
14M-%0R	1,8
14M-%1D	23,3
14M-%2D	27,0
14M-%3D	44,1
14M-%4D	62,9
14M-%5D	75,7
14M-%1K	7,3
14M-%2K	15,3
14M-%3K	22,8
14M-%4K	26,4
14M-%5K	29,8
8MWG-%0R	3,1
8MWG-%1D	6,5
8MWG-%2D	10,1
8MWG-%3D	14,3
8MWG-%4D	18,4
8MWG-%5D	21,2
8MWG-%1K	3,2
8MWG-%2K	4,0
8MWG-%3K	5,5
8MWG-%4K	5,6
8MWG-%5K	8,0
14MWG-%0R	1,4
14MWG-%1D	7,1
14MWG-%2D	15,8
14MWG-%3D	23,0
14MWG-%4D	24,9
14MWG-%5D	26,8
14MWG-%1K	4,0
14MWG-%2K	5,5
14MWG-%3K	6,6
14MWG-%4K	7,1
14MWG-%5K	7,3



Şekil 4.31 : Eğilmede çekme dayanımı.

Lif türünden bağımsız olarak lif miktarı arttıkça, eğilmede çekme dayanımı değerlerinde artış gözlenmiştir.

En yüksek değer 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde %5 sürekli lif kullanımıyla elde edilmiştir. Bu karışımla 75,7 MPa eğilme dayanımına ulaşılabilirken, bu değer, aynı lif türü ve lif miktarında Portland çimentolu karışımla elde edilen değerden %28 daha yüksektir.

Kompozit malzemelerde elde edilen özelliklerin iyileşebilmesi için lif-matris arayüzeyinin kuvvetli olması gerekir. Yüksek fırın cürufunun ince ve yapışkan oluşu, metallerle alkali aktive cürufun adhezyonunun Portland çimentosunda olandan daha fazla olmasını sağlar. Alkali silikatlarla metaller arasında oluşan kuvvetli bağlar, bu arayüzeyi güçlendirmekte, çelik ile harç arasındaki adhezyonu arttırmaktadır, yüksek alkali içeriği de bu durumun oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ticari sodyum silikat ile elde edilebilen bu kuvvetli yapı, sodyum silikat yerine cam ile aktifleştirilen numunelerde yeterince elde edilememekte, adhezyon daha az olmaktadır. Bu durum, eğilmede çekme dayanımı değerlerinin camlı numunelerde daha düşük oluşunu açıklar. Bunun yanı sıra, her ne kadar filtreleme yapıldıysa da çözelti içine karışmış olabilen camın amorf yapısı ve camlı çözeltilerde aktivasyonun yetersiz kalması sonuçlar üzerinde etkili olabilir. Camın yeterince çözünebilmesi için malzemenin çok ince öğütülerek yüzey alanının artırılması, yüksek sıcaklıklarda uzun karıştırma süreleriyle aktivatör hazırlanması gerekmektedir, camın aktifleştirildiği çözeltilerin derişiminin artması aktivasyon sürecine katkı sağlayabilir.

14M%5D karışımı ile elde edilen eğilmede çekme dayanımı değeri, 14M%5K karışımı ile elde edilenden %154 büyüktür. Burada, yanak teli (sürekli lif) kullanımı durumunda, kırılmış tel (süreksiz lif) ile üretilen numunelere kıyasla daha yüksek eğilmede çekme dayanımı değerlerinin sağlandığı görülmektedir. Sürekli lifler beton içerisinde donatı benzeri davranış göstermiştir. Artan lif uzunluğu ve lif çapı ile birlikte lifin yüzey alanı artmakta, matris ile çelik lif birbirine daha iyi bağlanmakta, bu da eğilmede çekme dayanımı değerlerini olumlu yönde etkilemektedir. Alkali silikatların metallerle oluşturduğu kuvvetli bağların da, matris ile lifin bir bütün olarak birlikte çalışmasına olumlu katkı sağladığı ve buna bağlı olarak eğilme dayanımını arttırmada etkili olduğu düşünülmektedir.

En düşük eğilmede çekme dayanımı değeri 14 M sodyum hidroksit ve öğütölmüş atık cam ile aktive edilen lifsiz numunelere aittir ancak bu değer, 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen lifsiz numunelerin eğilmede çekme dayanımına oldukça yakındır.

Lif içeren numuneler arasında bir kıyaslama yapıldığında, cam kullanımının çekme dayanımı değerlerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Torres ve diğ. (2009), çalışmalarında, atık cam içeriği arttıkça hem eğilme dayanımının hem de basınç dayanımının düştüğünü, atık camın kimyasal aktivasyona direnç gösterdiğini ifade etmişlerdir, elde edilen sonuç, bu sonuçlarla uyumludur. Eğilme dayanımını azaltan etkenlerden biri, öğütölmüş atık cam ile hazırlanan çözeltinin aktivasyon konusunda yetersiz kalması olabilir. Cam, aktivasyon reaksiyonuna direnç göstermektedir. Bu konuda, aktivatör çözelti hazırlanırken daha ince öğütölmüş malzeme kullanarak yüzey alanını arttırmak ve daha yüksek sıcaklıklarda, daha uzun karıştırma süreleriyle işlem yapmak bir çözüm olabilir ancak bu işlemlerin üretim maliyetini bir miktar arttıracığı göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmalarda, öğütölmüş atık cam ile aktivatör hazırlanırken her ne kadar filtreleme işlemi yapıldıysa da, filtrelenemeyen ve reaksiyona katılmadan kalan çözünmemiş cam partiküllerinin, sahip oldukları amorf yapı nedeniyle dayanım değerlerini azaltması söz konusu olabilir. Bununla birlikte bu cam partikülleri, çelik lif ile matris arasındaki aderansı azaltabileceğinden, bu durum da öğütölmüş atık cam içeren numunelerin eğilme dayanımı değerlerinde düşüş gözlenmesinde etkili olabilir. Ticari sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde alkali silikatlar ile çelik arasında oluşan kuvvetli bağlar, matrisin çeliğe daha kuvvetli yapışmasını sağlamıştır, bu etki alkali konsantrasyonu arttıkça artmaktadır, bu şekilde lif-matris arayüzeyi kuvvetlenmiş, başka bir ifadeyle lif-matris aderansı artmış, takviye elemanı ile matrisin birlikte çalışması sağlanmış ve böylece mekanik özellikler iyileşmiştir.

Lif içermeyen numuneler incelendiğinde, en yüksek eğilmede çekme dayanımı değerleri Portland çimentosu ile üretilen numunelerde gözlenirken lif kullanımıyla gerçekleşen eğilmede çekme dayanımı artışı, alkali ile aktive edilmiş malzemelerde daha fazla olmuştur.

14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde %5 oranında sürekli lif kullanımıyla eğilmede çekme dayanımında %4084,0 artış sağlanmıştır. Bu numunelerde %5 süresiz lif kullanımında ise artış %1546,4

olmuştur. SIFCON malzeme için %5 lif miktarı düşük bir oran olmasına rağmen bu lif miktarıyla eğilmede çekme dayanımında ciddi artışlar elde edilebilmiştir.

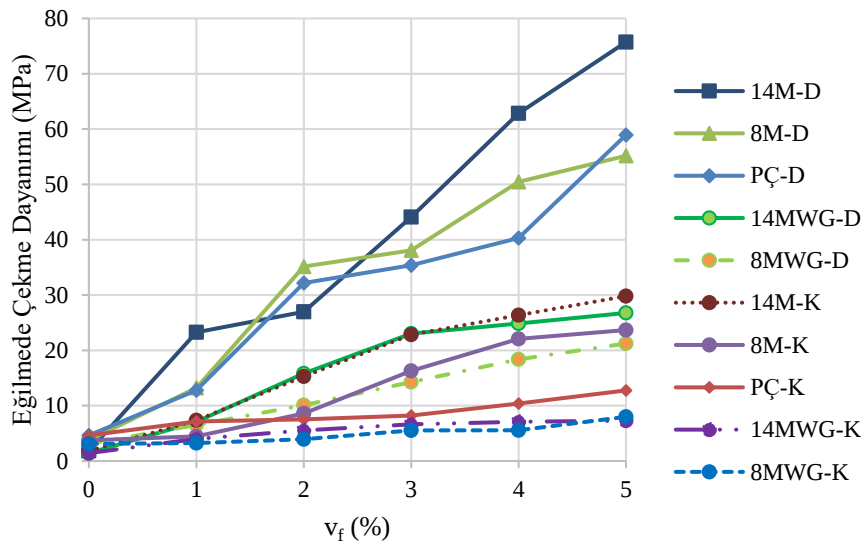
Öğütülmüş atık cam kullanılarak yapılan üretimlerde eğilmede çekme dayanımı değerleri diğer numunelere kıyasla daha düşük seviyelerde kalmasına rağmen lif kullanımıyla birlikte bu değerlerde iyileşme sağlanabilmiştir. 8 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile aktive edilen %5 sürekli lifli numunelerde %587,1, %5 süreksiz lifli numunelerde ise %158,3 eğilmede çekme dayanımı artışı kaydedilmiştir. 14 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile aktive edilen %5 sürekli lifli numunelerde %1771,3, %5 süreksiz lifli numunelerde ise %409,1 eğilmede çekme dayanımı artışı gerçekleşmiştir. Atık cam esaslı alkali ile aktifleştirilmiş harçlarda, çok yüksek konsantrasyon seviyelerinin geopolimer jel oluşumunda bir gecikmeye neden olabileceği ifade edilmiştir (Pascual ve diğ., 2014).

Lif içermeyen numuneler kıyaslandığında 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile üretilen numunelerin eğilme dayanımı değerinin, 8 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile üretilen numunelerinkinden bir miktar daha düşük olduğu görülmektedir, öğütülmüş atık cam ile aktifleştirilen numunelerde de benzer bir durum gözlenmektedir. Bu sonucun elde edilmesinde numuneler arasında malzemenin homojen dağılmaması, değerlerin küçük ve birbirine yakın olması, ya da lifsiz numunelerdeki ani kırılma durumu etkili olabilir, çünkü lifli numunelerde durum genel olarak tersine dönmüştür. Lifli numuneler arasında bir kıyaslama yapıldığında, sıvı sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilen numunelerde, 8 M yerine 14 M sodyum hidroksit kullanımı, dayanım değerlerinde iyileşme sağlamıştır. Reaksiyona katılacak kadar malzeme bulunduğunda, sodyum hidroksit derişiminin artması, alkali ile aktifleştirilmiş malzeme özelliklerini iyileştirmektedir. Bu iyileşme, belirli bir limit derişime kadar geçerlidir, bir noktadan sonra aktivatör derişiminin daha da artması, durumu tersine çevirerek priz, dayanım ve dürabilite özellikleri hususlarında sorunlar ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu durum, reaksiyona katılmayan çözeltinin numune yüzeyine çıkması şeklinde de kendini gösterebilmektedir. Tüm bunların yanında, kullanılan sodyum hidroksit derişimi ne denli yüksek olursa, maliyet artışının yanı sıra çevre ve güvenlik açısından da sorunlar ortaya çıkabileceğinden, üretici ve kullanıcı sağlığı konusunda o derece dikkatli olmak gerekmektedir.

En düşük değerler 14 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile aktive edilen lifsiz numunelerde gözlenmektedir. Bu numunelerin üretim aşamasında da, numunelerin çok geç kuruması ve çözeltinin numune yüzeyine çıkması gibi çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunlar, malzeme özelliklerini etkilemektedir.

Alkali ile aktifleştirilmiş ve atık çelik tel ile üretilmiş numunelerin, yapı elemanı olarak kullanım amacına hizmet edebilecek eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu söylenebilir.

Farklı SIFCON numuneler için eğilmede çekme dayanımının lif miktarına bağlı değişimi Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32 : Eğilmede çekme dayanımının lif miktarına bağlı değişimi.

Lif miktarına bağlı olarak eğilmede çekme dayanımında meydana gelen değişimler incelendiğinde, Portland çimentosu ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %176,2, %595,2, %664,1, %770,8 ve %1173,2 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda ise eğilmede çekme dayanımındaki artışlar daha sınırlı olmuş, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %54,4, %62,4, %77,3, %124,6 ve %175,6 artış gerçekleşmiştir.

8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %253,5, %839,8, %918,2, %1249,5 ve %1375,4

artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda ise eğilmede çekme dayanımındaki artışlar daha az olmuş, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %19,5, %129,9, %335,6, %490,1 ve %532,9 artış gerçekleşmiştir.

14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %1185,6, %1390,1, %2335,9, %3372,4 ve %4084,0 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda eğilmede çekme dayanımındaki artışlar daha kısıtlı kalmış, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %305,5, %744,2, %1161,9, %1356,9 ve %1546,4 artış gerçekleşmiştir.

8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütülmüş atık cam ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %111,0, %226,5, %362,1, %494,5 ve %587,1 artış gerçekleştiği gözlenmiştir. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, eğilmede çekme dayanımındaki artışlar diğer numunelerde olduğu gibi daha az olmuş, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %4,5, %27,8, %79,3, %79,6 ve %158,3 artış gerçekleşmiştir. Lifin süreksiz olmasının yanı sıra, kullanılan süreksiz lif içerisinde lifle birlikte kauçuk, tekstil kalıntısı, toz vs. yabancı madde bulunma olasılığının fazla oluşu ve bunun aderansı olumsuz etkileyecek olması da süreksiz lifli numunelerden alınan dayanım değerlerinin sürekli lif kullanılarak üretilen numunelerinkine kıyasla daha düşük olmasında etkili olabilir.

14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütülmüş atık cam ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla %395,1, %1007,0, %1511,2, %1639,2 ve %1771,3 artış gerçekleştiği gözlenmiştir. 14 M sodyum hidroksit kullanılarak üretilen numunelerde bu artış miktarının çok daha fazla olması üzerinde, söz konusu harçla lif kullanılmadığında elde edilen dayanım değerinin düşük olmasının etkisi bulunmaktadır. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, eğilmede çekme dayanımındaki artışlar, diğer numunelerde süreksiz lif kullanıldığında olduğu gibi daha az olmuş, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla, %179,7, %286,7, %364,3, %395,1 ve %409,1 artış

gözlendi. Genel olarak bakıldığında sürekli lif kullanıldığında, süreksiz life kıyasla çok daha yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilebilmiştir.

Eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde, Şekil 4.32’de görüldüğü üzere, 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde lif miktarına bağlı dayanım artışının diğer numunelere kıyasla daha fazla olmuştur. Bu sonucun elde edilmesinde, bu karışımda aderansın daha fazla olması etkili olabilir. Öğütülmüş atık cam içeren numunelerin haricindeki numunelerde elde edilen dayanım değerleri, Portland çimentosu kullanılarak gerçekleştirilen referans üretimdeki eğilme dayanımı değerlerini aşmıştır. Öğütülmüş atık camın aderansı zayıflattığı düşünülmektedir.

Şengül (2016), atık lastiklerden geri dönüştürülen çelik teller kullanılarak üretilen betonlarda, elde edilen sonuçların ticari çelik lifler ile elde edilmesi beklenen sonuçlara yakın olduğunu ifade etmiştir. Lif şekli, boyu, sürekliliği, yönü ve dağılımı, her kompozit malzemede olduğu gibi burada da elde edilen sonuçlar üzerinde etkili olmuştur. Kullanılan lifin pas, toz, kir, elyaf, kauçuk gibi artıklardan arındırılmış olması; matris ile takviye elemanının birlikte çalışması, aderans ve eğilme dayanımı üzerinde etkilidir.

SIFCON içerisindeki çelik süreksiz lifler Şekil 4.33’te gösterilmiştir. Burada, matrisin lifler arasından geçmesinin ve yerleşmenin sağlandığı görülmektedir. Süreksiz liflerin farklı doğrultularda uzanması, malzeme özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesini engellemesi açısından avantaj sağlayabilir.



Şekil 4.33 : SIFCON içerisindeki süreksiz lifler.

Sürekli lifler, çaplarının da süreksiz liflere kıyasla daha büyük olmasının etkisiyle donatı gibi davranmıştır. Sürekli lifli numunelerde kırılma şekli benzer olup eğilme çatlaklarının yanı sıra kesme çatlakları da belirgin bir şekilde gözlenebilir. Lif

miktarı az olduğunda, eğilme deneyi sonucunda malzemede az sayıda derin çatlaklar meydana gelmektedir. Şekil 4.34-4.36 arasında görüldüğü gibi, lif miktarı arttıkça daha fazla sayıda ancak daha ince çatlaklar meydana gelmesi, mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlamıştır. Lif hacim oranı Şekil 4.34'te %1, Şekil 4.35'te %3, Şekil 4.36'da %5 olan çimentolu numune gösterilmiştir. Malzemenin salt eğilme etkisi halindeki davranışını incelemek üzere dört noktalı eğilme deneyi uygulanması fayda sağlayacaktır, bu deneyde maksimum moment belli bir aralıkta değer alacağından bu bölgede kesme kuvveti oluşmayacaktır. Üç noktalı eğilme deneyinde eğilme etkilerinin yanı sıra kesme etkileri de söz konusu olduğundan elde edilen eğilmede çekme dayanımı değerlerinde, yükleme noktası sayısına bağlı olarak farklar meydana gelecektir. Üç noktalı eğilme deneyi ile elde edilen sonuçlar, dört noktalı eğilme deneyinde elde edilen sonuçlardan büyük olacaktır. Bu nedenle, çekme dayanımının dolaylı olarak belirlenmesini sağlayan yarma deneyiyle, yarmada çekme dayanımı değerleri de elde edilmiştir.



Şekil 4.34 : PÇ-%1D numunesinin kırılma şekli.



Şekil 4.35 : PÇ-%3D numunesinin kırılma şekli.



Şekil 4.36 : PÇ-%5D numunesinin kırılma şekli.

Eğilme deneyinde, SIFCON numunelerde liflerin malzemeyi bir arada tutmaya devam etmesi sayesinde çok büyük şekil değiştirmeler yapılabilmektedir, lifsiz numunelerde ise gevrek kırılma gerçekleşmekte, numune çok daha kısa sürede çentik hizasından ikiye ayrılmaktadır.

4.3.3 Yarmada çekme dayanımı

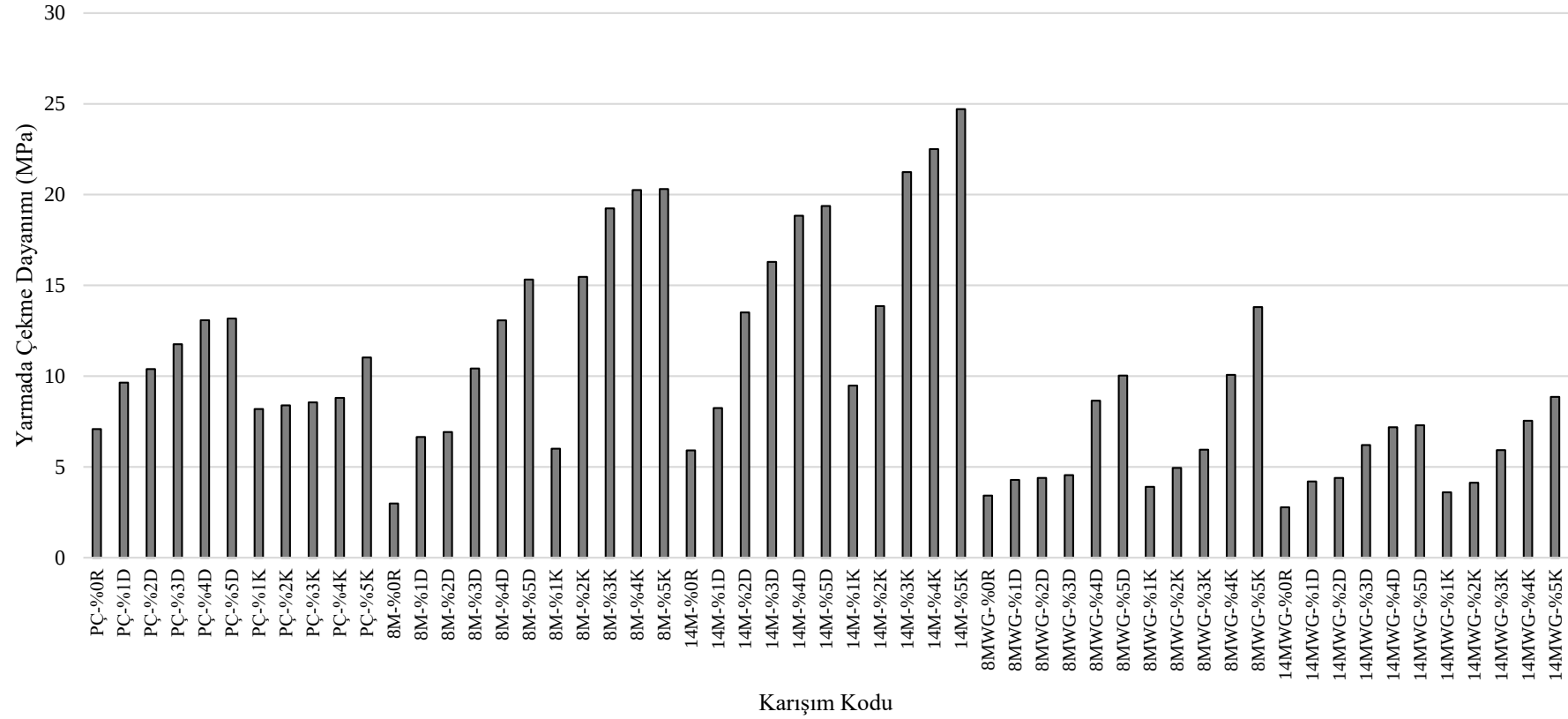
SIFCON numunelere ait ortalama yarmada çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.19 ve Şekil 4.37’de verilmiştir.

Yarma deneyi, çekme dayanımının dolaylı yünden tayinine dayanan bir yöntemdir. Yarma deneyinde, çekme yükleri numuneye dolaylı olarak etkitilmekte ve asıl çekme dayanımından daha büyük çekme dayanımı değerleri elde edilmektedir. Özellikle lifsiz numunelerde, lif yönü, miktarı, dağılımı gibi dayanım değerlerini etkileyebilecek faktörler elimine edildiğinden, bu durum daha açık bir şekilde gözlenebilmiştir. Yarma deneyi, eğilme deneyine nazaran daha hızlı ve kolay bir şekilde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar daha üniform olmuştur. Boyut etkisi göz önünde bulundurulduğunda, numune boyutu arttıkça, numunede bulunan kusurların fazla olma olasılığının da artacağı söylenebilir, daha büyük numunelerle çalışıldığında burada elde edilen dayanım değerlerinden daha düşük değerlerin elde edilmesi beklenmektedir. Numune boyutunun yanı sıra, deney sonuçlarını etkileyebilecek bir diğer faktör ise yarma deneyindeki yükleme şerit genişliğidir. Her ne kadar uygulamada zorluklar içerse de, doğrudan çekme deneyinin uygulanması ile de numunelerin çekme dayanımı değerleri elde edilebilir.

Lif miktarı arttıkça, yarmada çekme dayanımı değerlerinde de eğilmede çekme dayanımı değerlerinde olduğu gibi artış gerçekleşmiştir, ancak artış oranı, eğilmede çekme dayanımındaki artış oranlarına göre düşük olup elde edilen değerler daha dar bir bant aralığında değişmektedir.

Çizelge 4.19 : SIFCON numunelerin yarmada çekme dayanımı.

Karışım Kodu	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)
PÇ-%0R	7,1
PÇ-%1D	9,6
PÇ-%2D	10,4
PÇ-%3D	11,8
PÇ-%4D	13,1
PÇ-%5D	13,2
PÇ-%1K	8,2
PÇ-%2K	8,4
PÇ-%3K	8,6
PÇ-%4K	8,8
PÇ-%5K	11,0
8M-%0R	3,0
8M-%1D	6,7
8M-%2D	6,9
8M-%3D	10,4
8M-%4D	13,1
8M-%5D	15,3
8M-%1K	6,0
8M-%2K	15,5
8M-%3K	19,2
8M-%4K	20,3
8M-%5K	20,3
14M-%0R	5,9
14M-%1D	8,2
14M-%2D	13,5
14M-%3D	16,3
14M-%4D	18,8
14M-%5D	19,4
14M-%1K	9,5
14M-%2K	13,9
14M-%3K	21,2
14M-%4K	22,5
14M-%5K	24,7
8MWG-%0R	3,4
8MWG-%1D	4,3
8MWG-%2D	4,4
8MWG-%3D	4,6
8MWG-%4D	8,7
8MWG-%5D	10,0
8MWG-%1K	3,9
8MWG-%2K	4,9
8MWG-%3K	6,0
8MWG-%4K	10,1
8MWG-%5K	13,8
14MWG-%0R	2,8
14MWG-%1D	4,2
14MWG-%2D	4,4
14MWG-%3D	6,2
14MWG-%4D	7,2
14MWG-%5D	7,3
14MWG-%1K	3,6
14MWG-%2K	4,1
14MWG-%3K	5,9
14MWG-%4K	7,5
14MWG-%5K	8,9

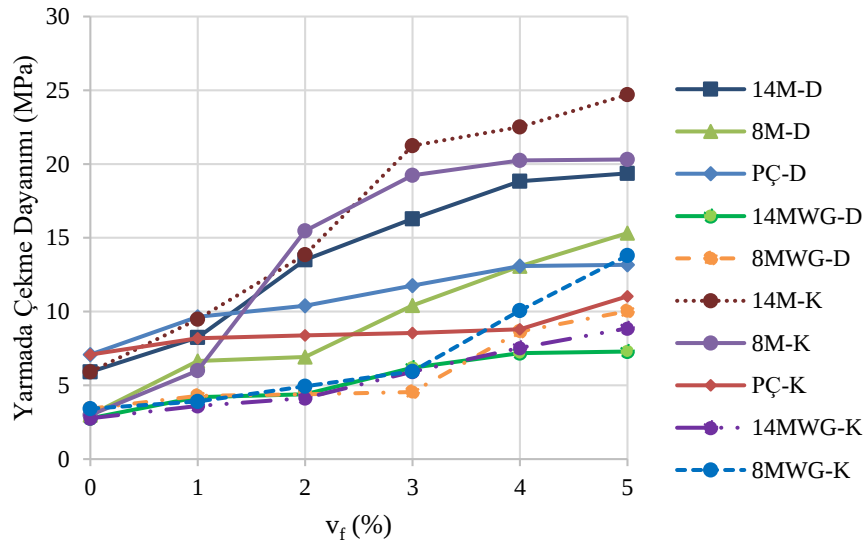


Şekil 4.37 : Yarmada çekme dayanımı.

En büyük yarmada çekme dayanımı değeri, 24,7 MPa ile 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen %5 süreksiz lifli numunelere aittir. Eğilmede çekme dayanımı değerleri incelendiğinde de en yüksek değerlerin bu harç ile elde edildiği görülmektedir. Öte yandan, eğilme dayanımlarının aksine burada farklı olarak süreksiz lif kullanımıyla birlikte daha yüksek çekme dayanımları elde edilmiştir. Bu sonucun elde edilmesinde süreksiz lif dağılımının etkisinin bulunduğu düşünülmektedir.

En düşük yarmada çekme dayanımı değeri, 14 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile aktive edilen lifsiz numunelere aittir. Aktivasyon reaksiyonuna katılmadan kalan camın amorf yapısının dayanım değerlerinde düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Burada da yetersiz aktivasyon, eğilme dayanımı değerlerinde olduğu gibi yarmada çekme dayanımı değerlerinde azalmaya neden olmuş olabilir.

Farklı SIFCON numuneler için yarmada çekme dayanımının lif miktarına bağlı değişimi, Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.38 : Yarmada çekme dayanımının lif miktarına bağlı değişimi.

Yarmada çekme dayanımlarında lif kullanımıyla gerçekleşen artış oranı en fazla 8 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde %5 süreksiz lif kullanımıyla gerçekleşmiştir ve artış oranı %581,5 olmuştur. 8 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde %5 sürekli lif kullanımıyla ise bu artış %414,1 olmuştur. Sıvı sodyum silikatla birlikte 8 M yerine 14 M sodyum hidroksit kullanımı, yarmada çekme dayanımı değerlerini

iyileştirmiştir, aktivatör derişiminin artması aktivasyon reaksiyonunu olumlu etkilemiştir.

Portland çimentosu ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %36,2, %46,8, %66,1, %84,7 ve %86,0 artış gerçekleştiği görülmüştür. Görüldüğü üzere bu artış oranları, eğilmede çekme dayanımındaki artış oranlarından düşüktür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, yarmada çekme dayanımındaki artışlar sürekli liftekine kıyasla daha azdır. %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %15,7, %18,5, %20,8, %24,3 ve %55,8 artış gözlenmiştir.

Aktivatör olarak 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %123,2, %132,2, %249,7, %338,6 ve %414,1 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %101,3, %419,1, %545,6, %579,5 ve %581,5 artış gerçekleşmiştir.

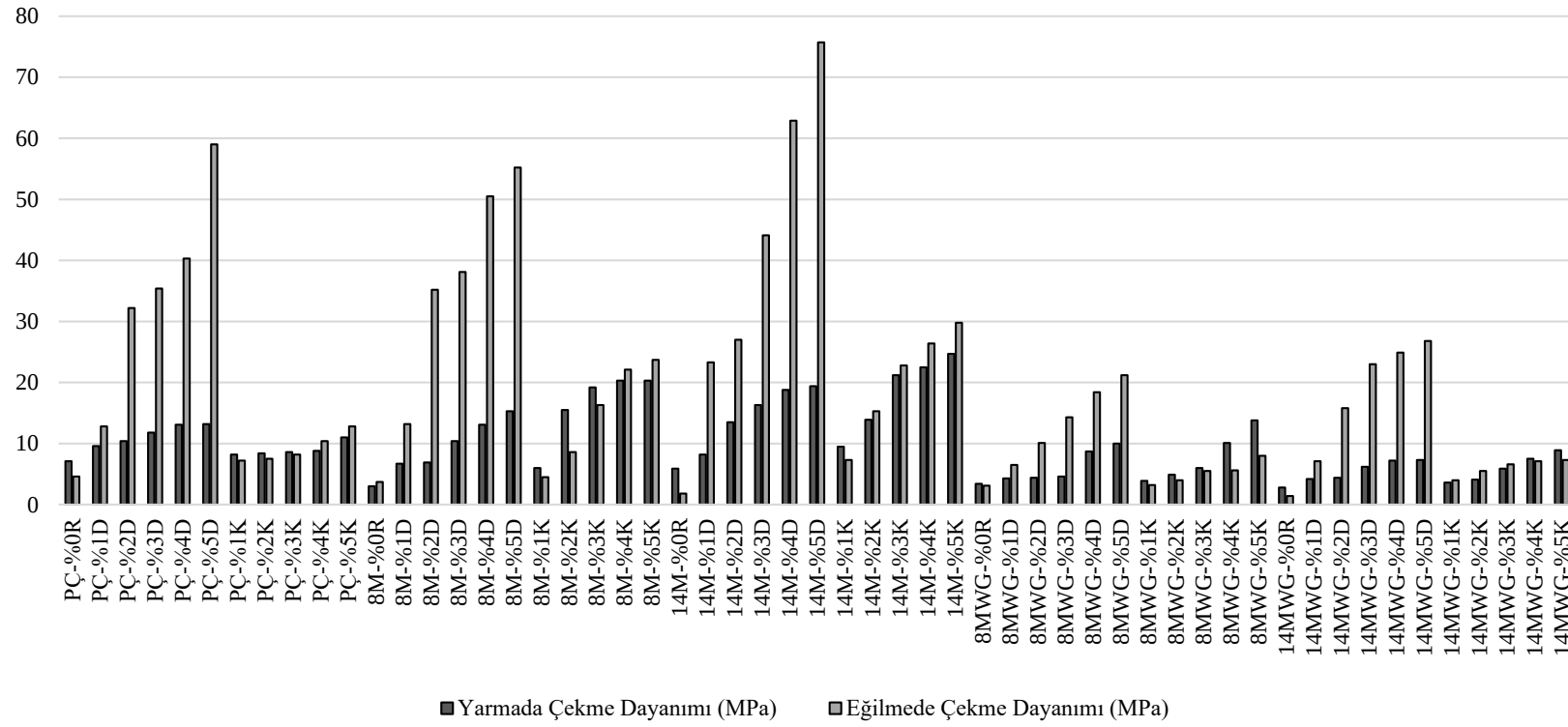
Aktivatör olarak 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %39,4, %128,6, %175,6, %218,8 ve %227,7 artış gerçekleşmiştir. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %60,4, %134,5, %259,4, %280,9 ve %318,1 artış görülmüştür.

Aktivatör olarak 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat yerine öğütölmüş atık cam kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %25,1, %28,4, %33,0, %152,9 ve %193,3 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %14,0, %44,4, %74,0, %194,4 ve %303,5 artış gerçekleşmiştir.

Aktivatör olarak 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütölmüş atık cam kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %51,6, %58,5, %123,8, %159,2 ve %163,2 artış gerçekleşmiştir. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre yarmada çekme dayanımında sırasıyla %30,0, %49,1, %113,7, %172,2 ve %219,9 artış gerçekleştiği görülmüştür.

Öğütölmüş atık cam ile aktive edilen numunelerde yarmada çekme dayanımı değerleri, sıvı sodyum silikat kullanılan numunelere göre düşük kalmıştır. Cam kullanımının mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemesi beklenen bir sonuçtur. Yine de 8 M sodyum hidroksit ve öğütölmüş atık cam ile aktive edilen numunelerde, %5 süreksiz lif kullanımıyla yarmada çekme dayanımında %303,5 artış sağlanmıştır, %5 sürekli lif kullanımında ise bu artış %193,3 olmuştur.

Şekil 4.39’da görüleceği üzere, sürekli lifli numunelerde, eğilmede çekme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki fark süreksiz lifli numunelere kıyasla daha fazla olmuştur. Sürekli lifli numunelerde, lifler daha az sayıda kullanılmıştır, lif uzunluğu ve lif çapı kırılmış tellere göre çok daha büyüktür. Liflerin sayıca az oluşu ve tek bir doğrultuda uzanması sebebiyle yarma dayanımları, sürekli lifli numunelerde daha düşük olarak elde edilmiştir. Yarma deneyinde, SIFCON numunede çatlak oluşuktan sonra deney sonlandırılmış, numunenin ezilmesine izin verilmeden yükleme durdurulmuştur.



Şekil 4.39 : Çekme dayanımı.

4.3.4 Tokluk

SIFCON numunelere ait ortalama tokluk değerleri izelge 4.20 ve ekil 4.40'ta verilmiştir. Araç lastiklerinden elde edilmiş hurda elik tellerin kullanımıyla tokluk değerlerinde önemli bir artış sağlanmıştır. Tokluk değerleri, kullanılan lif miktarı arttıkça artmıştır.

Tokluk, bilindiği üzere, malzemenin plastik deformasyon sınırları içerisinde enerji yutabilme yeteneği olup yük-deplasman eğrisi altında kalan alan kullanılarak hesaplanır.

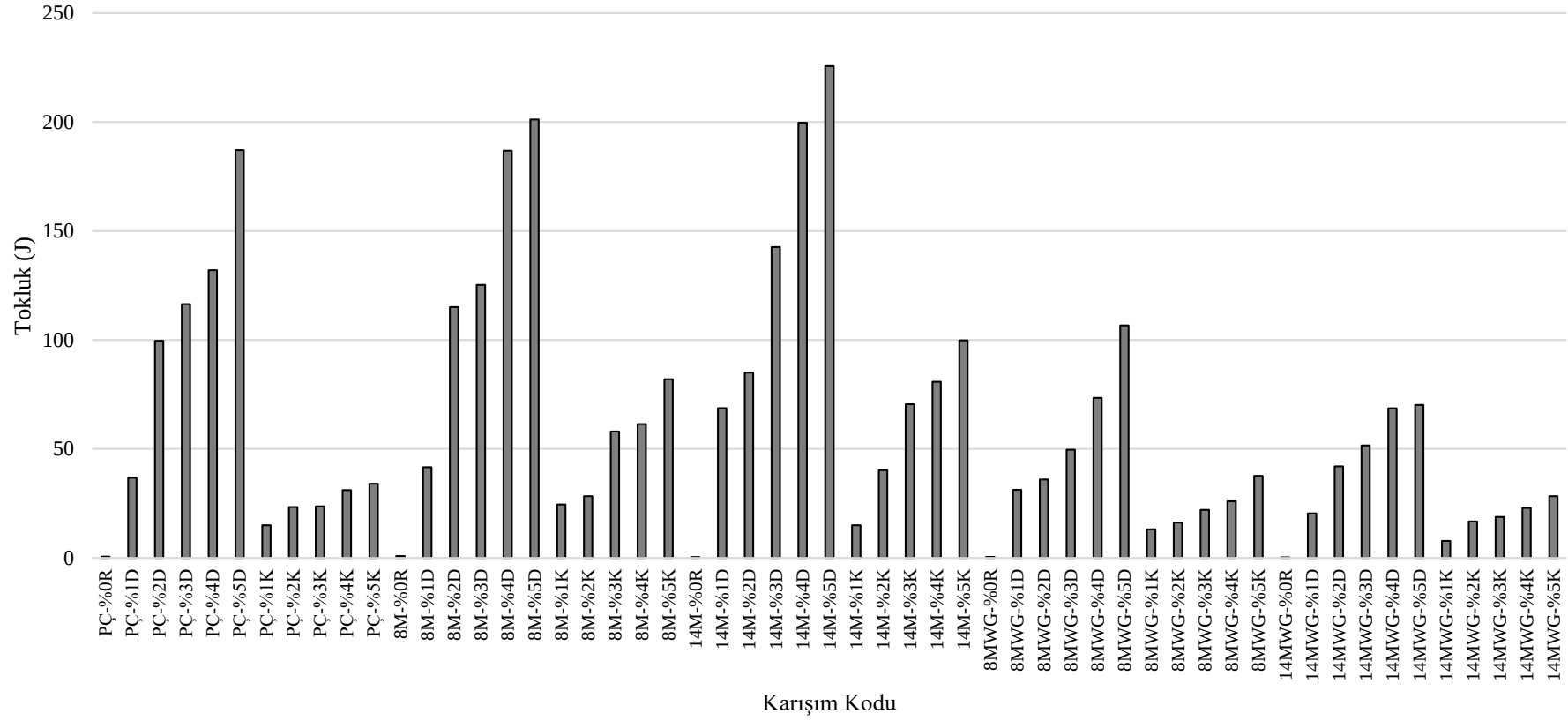
Sünek malzemelerin tokluğunun gevrek malzemelere göre fazla olduğu söylenebilir. Lif kullanımıyla birlikte snekleğin artması beklenen bir durumdur.

Portland imentosu ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %6572,7, %18014,5, %21074,5, %23907,3 ve %33925,5 artış gerçekleştiği grlmştr. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, tokluk değerindeki artışlar sürekli liftekine kıyasla daha azdır. %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %2612,7, %4140,0, %4190,9, %5547,3 ve %6080,0 artış gözlenmiştir.

Aktivatör olarak 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat kullanılarak üretilen numunelerde, sürekli lif ile %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %4850,0, %13601,2, %14811,9, %22144,0 ve %23851,2 artış gerçekleştiği grlmştr. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %2809,5, %3267,9, %6802,4, %7203,6 ve %9654,8 artış gerekleşmiştir. Srekli lif kullanımı, tokluk değerini sreksiz life kıyasla daha fazla arttırmıştır.

Çizelge 4.20 : SIFCON numunelerin tokluğu.

Karışım Kodu	Tokluk (J)
PÇ-%0R	0,6
PÇ-%1D	36,7
PÇ-%2D	99,6
PÇ-%3D	116,5
PÇ-%4D	132,0
PÇ-%5D	187,1
PÇ-%1K	14,9
PÇ-%2K	23,3
PÇ-%3K	23,6
PÇ-%4K	31,1
PÇ-%5K	34,0
8M-%0R	0,8
8M-%1D	41,6
8M-%2D	115,1
8M-%3D	125,3
8M-%4D	186,9
8M-%5D	201,2
8M-%1K	24,4
8M-%2K	28,3
8M-%3K	58,0
8M-%4K	61,4
8M-%5K	81,9
14M-%0R	0,3
14M-%1D	68,7
14M-%2D	85,0
14M-%3D	142,6
14M-%4D	199,7
14M-%5D	225,7
14M-%1K	14,9
14M-%2K	40,3
14M-%3K	70,5
14M-%4K	80,8
14M-%5K	99,8
8MWG-%0R	0,4
8MWG-%1D	31,2
8MWG-%2D	36,0
8MWG-%3D	49,6
8MWG-%4D	73,4
8MWG-%5D	106,7
8MWG-%1K	13,1
8MWG-%2K	16,2
8MWG-%3K	22,0
8MWG-%4K	26,0
8MWG-%5K	37,6
14MWG-%0R	0,2
14MWG-%1D	20,4
14MWG-%2D	42,0
14MWG-%3D	51,5
14MWG-%4D	68,6
14MWG-%5D	70,2
14MWG-%1K	7,7
14MWG-%2K	16,7
14MWG-%3K	18,8
14MWG-%4K	22,9
14MWG-%5K	28,3



Şekil 4.40 : Tokluk.

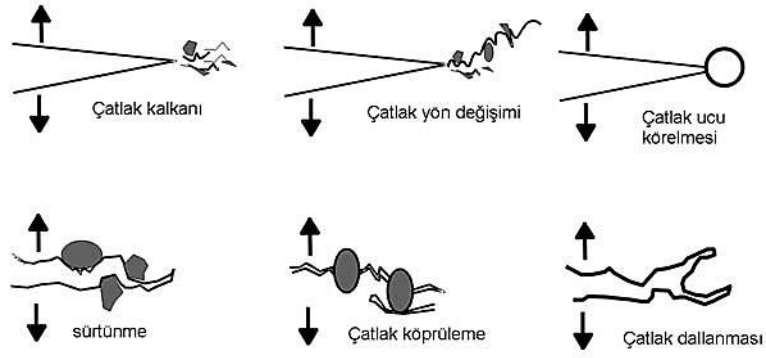
Aktivatör olarak 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %20703,0, %25663,6, %43118,2, %60418,2 ve %68278,8 artış gerçekleşmiştir. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %4421,2 %12097,0, %21263,6, %24387,9 ve %30142,4 artış görülmüştür. %5 süreksiz lif ile tokluk değerinde 301 kat artış sağlanmıştır.

Aktivatör olarak 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat yerine öğütülmüş atık cam ile üretilen numunelerde, sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %7162,8, %8265,1, %11437,2, %16974,4 ve %24704,7 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %2934,9, %3660,5, %5016,3, %5939,5 ve %8648,8 artış gerçekleşmiştir.

Aktivatör olarak 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütülmüş atık cam kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %8773,9, %18143,5, %22308,7, %29734,8 ve %30417,4 artış gerçekleşmiştir. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre tokluk değerinde sırasıyla %3260,9, %7156,5, %8073,9, %9865,2 ve %12191,3 artış gerçekleştiği görülmüştür.

Lif kullanımının tokluk artışına etkisini değerlendirmek üzere, temel tokluk artış mekanizmalarını incelemekte yarar vardır. Malzemede tokluk artışı sağlayan mekanizmalar, Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Bu mekanizmalardan biri, çatlak saptırmadır. Çatlak, matrsten daha yüksek dayanım ve tokluğa sahip takviye elemanları ile karşılaştığında yönünü değiştirmekte, çatlak ilerlemesi engellenmekte, çatlağın yolu uzadıkça ve çatlak hareketi zorlaştıkça absorbe edilen enerji miktarı artmakta ve tokluk değerinde artış gözlenmektedir.

Süreksiz lifli numunelerde yük-sehim grafiğindeki dalgalanmalar, yükü taşıyamayıp kopan lifin ardından, yük taşımaya diğer bir lifin devam etmesinden kaynaklanmaktadır, her bir lif kopuşunda grafikte dalgalanma meydana gelmektedir. Yük, taşınmaya devam ettiği için tokluk artmaktadır.



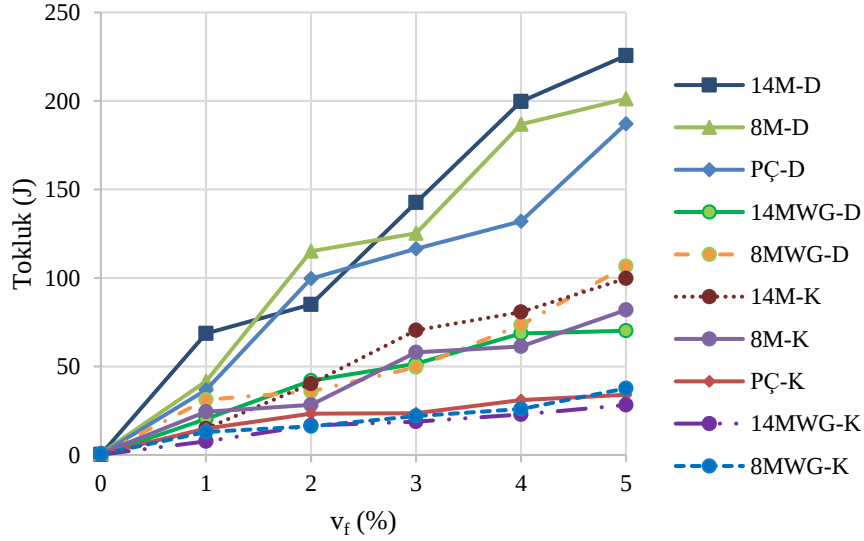
Şekil 4.41 : Betonda toklaşma mekanizmaları (Akkaya ve diğ, 2003).

Çelik liflerin kullanılmasıyla, çatlağın yön değiştirmesi sağlanmış, çatlak ilerlemesi engellenerek tokluğun artmasına katkıda bulunulmuştur. Matris hasara uğradıktan sonra, yük, çelik lifler tarafından taşınmaya devam etmiş, bu da tokluk artışı ile sonuçlanmıştır. Lifler, çatlak yolu üzerinde köprü oluşturarak kompozit malzemeyi bir arada tutmaktadır, köprüleme adı verilen bu mekanizma Şekil 4.42’de gösterilmiştir. Lif miktarı arttıkça tokluk artmaktadır.



Şekil 4.42 : Çelik lifler ile tokluk artışının sağlanması.

Farklı SIFCON numuneler için tokluk değerlerinin lif miktarına bağlı değişimi Şekil 4.43’te verilmiştir.



Şekil 4.43 : Tokluk değerlerinin lif miktarına bağlı değişimi.

Tokluk değeri en yüksek 225,7 J değeri ile 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen, %5 sürekli lif kullanımıyla üretilen numunelerde elde edilmiştir. Bu numunelerde lif kullanımıyla elde edilen tokluk artışı %68278,8 olmuştur. En düşük değer ise tahmin edilebileceği üzere lifsiz numunelerde olup 14 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile aktive edilen numunelerde gözlenmiştir. Süreksiz lif kullanımı durumunda, öğütülmüş atık cam ile aktive edilen numunelerin tokluk değerleri Portland çimentosu kullanılarak üretilen numunelerinkine yakındır. Bu açıdan bakıldığında, öğütülmüş atık cam kullanılarak aktive edilen numuneler, sodyum silikat ile aktive edilen numunelere kıyasla dezavantajlı konumda bulunmalarına rağmen, Portland çimentolu numunelere alternatif olabilir.

Ek bölümünde verilmiş olan Şekil A.11’de, tokluk açısından değerlendirme yapıldığında 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikatın aktivatör olarak kullanıldığı numunelerde en iyi sonuçların alındığı görülmektedir. Aynı lif hacim oranı için, tokluk değerleri büyükten küçüğe doğru, 14M-D, 8M-D, PÇ-D, 8MWG-D, 14M-K, 8M-K, 14MWG-D, PÇ-K, 8MWG-K ve 14MWG-K şeklinde sıralanmaktadır. Genel olarak sodyum hidroksit derişimi arttıkça mekanik özelliklerde iyileşme görüldüğü söylenebilir. Camlı numunelerde tersi bir durum gözlenmesinin sebebi, aktivatör olarak öğütülmüş atık cam kullanıldığında 14 M sodyum hidroksit derişiminin üretimde sorunlara neden olmasıdır. Sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen malzemeler Portland çimentosu ile üretilen

numuneden daha yüksek tokluk sağlamıştır, burada da daha önce bahsedilen adhezyon kuvvetleri etkili olmuş, çelik liflerle daha iyi aderans sağlanmıştır.

Çimento esaslı lifli kompozitlerde, lif-matris aderansı, kompozitin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri olup lif türü ve geometrisi, matris dayanımı, kür koşulları ve lif-matris arayüzey özellikleri gibi birçok etken, lif-matris aderansını etkiler (Yalçınkaya ve diğ, 2013).

4.3.5 Kırılma enerjisi

Denklem 3.2 kullanılarak kırılma enerjisi hesaplanırken, malzeme tokluğunun artmasının kırılma enerjisi değerini arttıracığı görülmektedir. Bu nedenle tokluk artışı sağlayan mekanizmalar, kırılma enerjisinin de artmasını sağlamıştır.

SIFCON numunelere ait ortalama kırılma enerjisi değerleri Çizelge 4.21 ve Şekil 4.44'te verilmiştir.

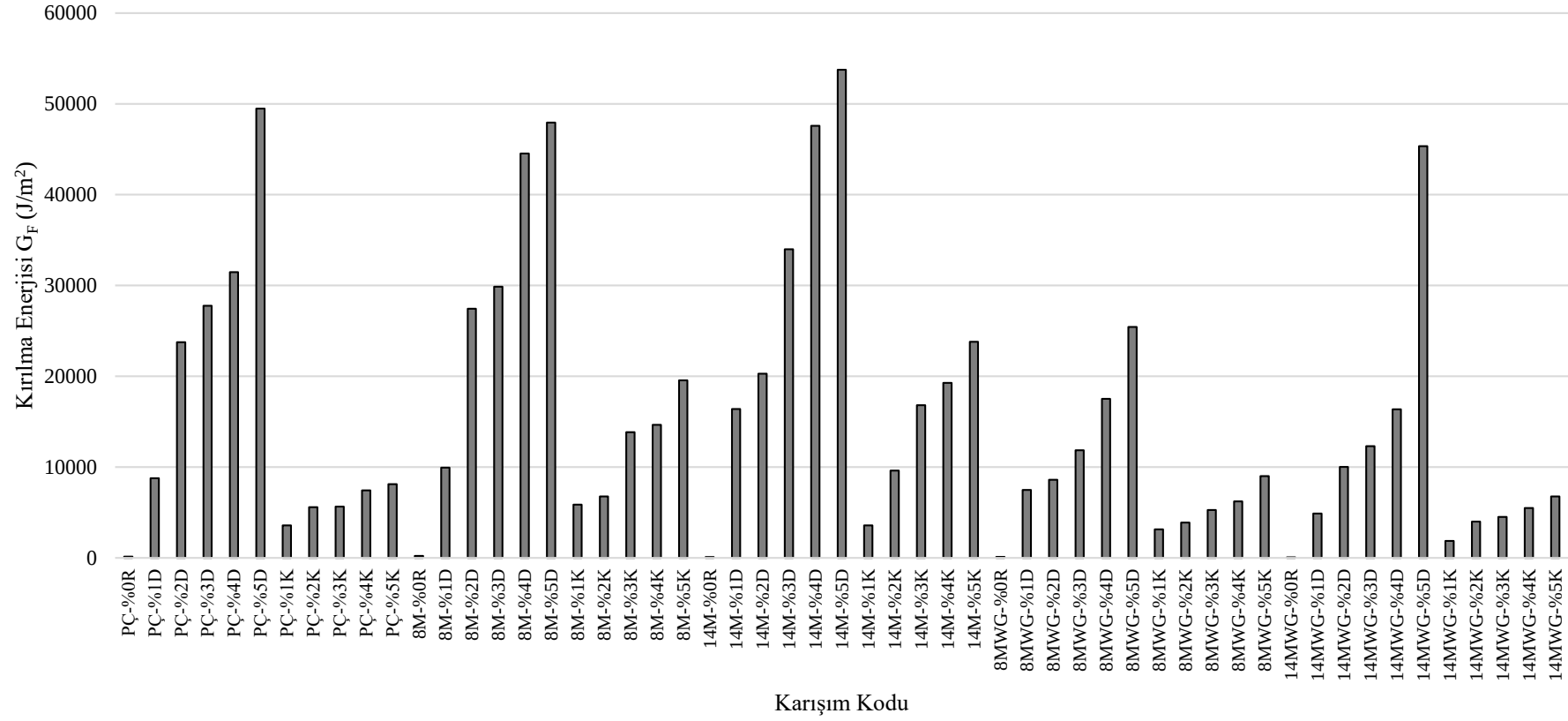
En yüksek kırılma enerjisi değeri 53760,5 J/m² değeriyle 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktive edilen numunelerde %5 sürekli lif kullanımında elde edilmiştir. En düşük değer ise 14MWG-%0R numunesine aittir.

Portland çimentosu ile üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %6571,4, %17978,7, %21027,4, %23851,8 ve %37559,8 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, kırılma enerjisi değerindeki artışlar sürekli liftekine kıyasla daha azdır. %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %2622,9, %4144,8, %4196,3, %5548,8 ve %6080,5 artış gözlenmiştir. Artış oranları, tokluk değerlerindeki artış oranlarıyla uyumludur.

Aktivatör olarak 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat kullanılarak üretilen numunelerde, sürekli lif ile %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %4781,1, %13387,8, %14579,0, %21793,2 ve %23472,1 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %2776,6, %3225,1, %6703,6, %7098,4 ve %9507,4 artış gerçekleşmiştir. Sürekli lif kullanımı, kırılma enerjisi değerini süreksiz life kıyasla daha fazla arttırmıştır.

Çizelge 4.21 : SIFCON numunelerin kırılma enerjisi.

Karışım Kodu	Kırılma Enerjisi G_F (J/m ²)
PÇ-%0R	131,4
PÇ-%1D	8764,9
PÇ-%2D	23751,8
PÇ-%3D	27757,2
PÇ-%4D	31467,8
PÇ-%5D	49477,5
PÇ-%1K	3577,4
PÇ-%2K	5576,9
PÇ-%3K	5644,5
PÇ-%4K	7421,4
PÇ-%5K	8120,0
8M-%0R	203,4
8M-%1D	9927,7
8M-%2D	27432,8
8M-%3D	29855,7
8M-%4D	44528,5
8M-%5D	47943,3
8M-%1K	5850,8
8M-%2K	6763,0
8M-%3K	13837,8
8M-%4K	14640,9
8M-%5K	19540,5
14M-%0R	79,6
14M-%1D	16384,0
14M-%2D	20278,2
14M-%3D	33988,8
14M-%4D	47581,8
14M-%5D	53760,5
14M-%1K	3575,6
14M-%2K	9613,6
14M-%3K	16816,0
14M-%4K	19274,7
14M-%5K	23795,3
8MWG-%0R	103,1
8MWG-%1D	7477,3
8MWG-%2D	8594,6
8MWG-%3D	11842,5
8MWG-%4D	17512,5
8MWG-%5D	25434,8
8MWG-%1K	3133,9
8MWG-%2K	3876,3
8MWG-%3K	5264,5
8MWG-%4K	6217,0
8MWG-%5K	8998,2
14MWG-%0R	56,4
14MWG-%1D	4881,5
14MWG-%2D	10014,4
14MWG-%3D	12291,7
14MWG-%4D	16366,8
14MWG-%5D	45349,8
14MWG-%1K	1854,7
14MWG-%2K	3997,8
14MWG-%3K	4499,3
14MWG-%4K	5486,8
14MWG-%5K	6762,7



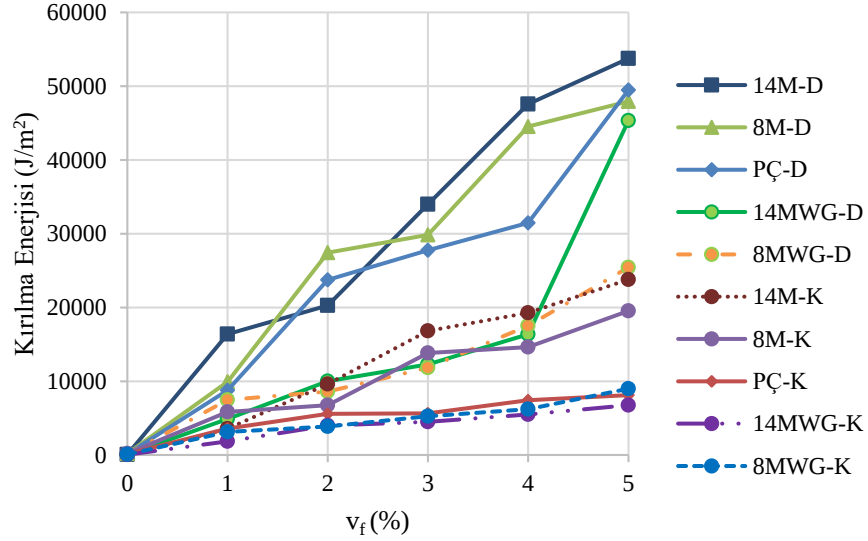
Şekil 4.44 : Kırılma enerjisi.

Aktivatör olarak 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %20475,2, %25365,5, %42583,4, %59653,6 ve %67412,9 artış gerçekleşmiştir. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %4390,2 %11972,9, %21017,7, %24105,3 ve %29782,4 artış görülmüştür. %5 süreksiz lif ile kırılma enerjisi değerinde yaklaşık 298 kat artış sağlanmıştır.

Aktivatör olarak 8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve sıvı sodyum silikat yerine öğütülmüş atık cam ile üretilen numunelerde, sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %7151,8, %8235,4, %11385,3, %16884,3 ve %24567,6 artış gerçekleştiği görülmüştür. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %2939,4, %3659,4, %5005,7, %5929,5 ve %8626,8 artış meydana gelmiştir.

Aktivatör olarak 14 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütülmüş atık cam kullanılarak üretilen numunelerde sürekli lif kullanıldığında, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %8562,8, %17671,7, %21713,1, %28944,8 ve %80378,7 artış gerçekleşmiştir. Aynı karışımla süreksiz lif kullanımı durumunda, %1, 2, 3, 4 ve 5 lif hacim oranlarında, lifsiz numuneye göre kırılma enerjisi değerinde sırasıyla %3191,4, %6994,6, %7884,6, %9637,0 ve %11901,2 artış gerçekleştiği görülmüştür. %5 sürekli lifle kırılma enerjisi değeri yaklaşık 804 kat artarken, %5 süreksiz lif kullanımı durumunda kırılma enerjisi değeri 119 kat artmıştır. Lif miktarının artması özellikleri iyileştirirken kullanılan süreksiz liflerin şekli nedeniyle %5 oranındaki lifin kalıba yerleştirilmesi ve matrisin lif arasına iyice işleyip doluluğu sağlaması zahmetli olmaktadır.

Farklı SIFCON numuneler için kırılma enerjisi değerlerinin lif miktarına bağlı değişimi Şekil 4.45'te verilmiştir. Kullanılan lif miktarı arttıkça kırılma enerjisi değerleri, dolayısıyla malzeme sünekliği artmaktadır (Şengül, 2018).



Şekil 4.45 : Kırılma enerjisinin lif miktarına bağlı değişimi.

Kırılma enerjisinde en fazla artış, 14 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile aktive edilen numunelerde, %5 sürekli lif kullanımıyla gerçekleşmiştir ve lifsiz numuneye kıyasla artış miktarı %80378,7 olmuştur. Bu artış, %5 süreksiz lif kullanıldığında %11901,2 olmuştur.

Öğütülmüş cam ve 8 M sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilen numuneler incelendiğinde 8MWG-%5D numunesinde lifsiz numuneye kıyasla %24567,6 artış, 8MWG-%5K numunesinde lifsiz numuneye kıyasla %8626,8 artış gerçekleştiği görülmektedir. Burada, sürekli lif kullanımının kırılma enerjisi değerlerini süreksiz liften daha fazla arttırdığı görülmüştür. Kullanılan lifin mukavemeti arttıkça kırılma enerjisinin artacağı bilinmektedir.

Süreksiz lif kullanımı durumunda, öğütülmüş atık cam ile aktive edilen numunelerin kırılma enerjisi değerleri Portland çimentosu ile üretilen numunelerinkine yakın olmuştur.

Lifli betonlar, farklı yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betona göre avantajlı konumdadır. Lifli betonlarda, beton içerisinde dağılan lifler, çatlakların ilk oluşum anında, çatlak sonlarındaki gerilmeleri taşıyarak ya da bu gerilmeleri sağlam alanlara ileterek malzemenin işlevini yerine getirebilmesini sağlar. Bu şekilde, betonu göçmeye götürebilecek olan çatlakların oluşumu, büyümesi ve ilerlemesi engellenerek kırılmanın daha büyük yüklerde gerçekleşmesi sağlanır. Lif kullanımıyla, kompozitlerin ani veya tekrarlı yüklemelere karşı yeterli dayanıma sahip olması ve yük altında yutulabilen enerji miktarının

arttırılması sağlanır, böylece darbe dayanımı ve yorulma dayanımı da arttığından lifli betonlar geleneksel betona göre avantajlı duruma gelir.

4.3.6 Basınç dayanımı

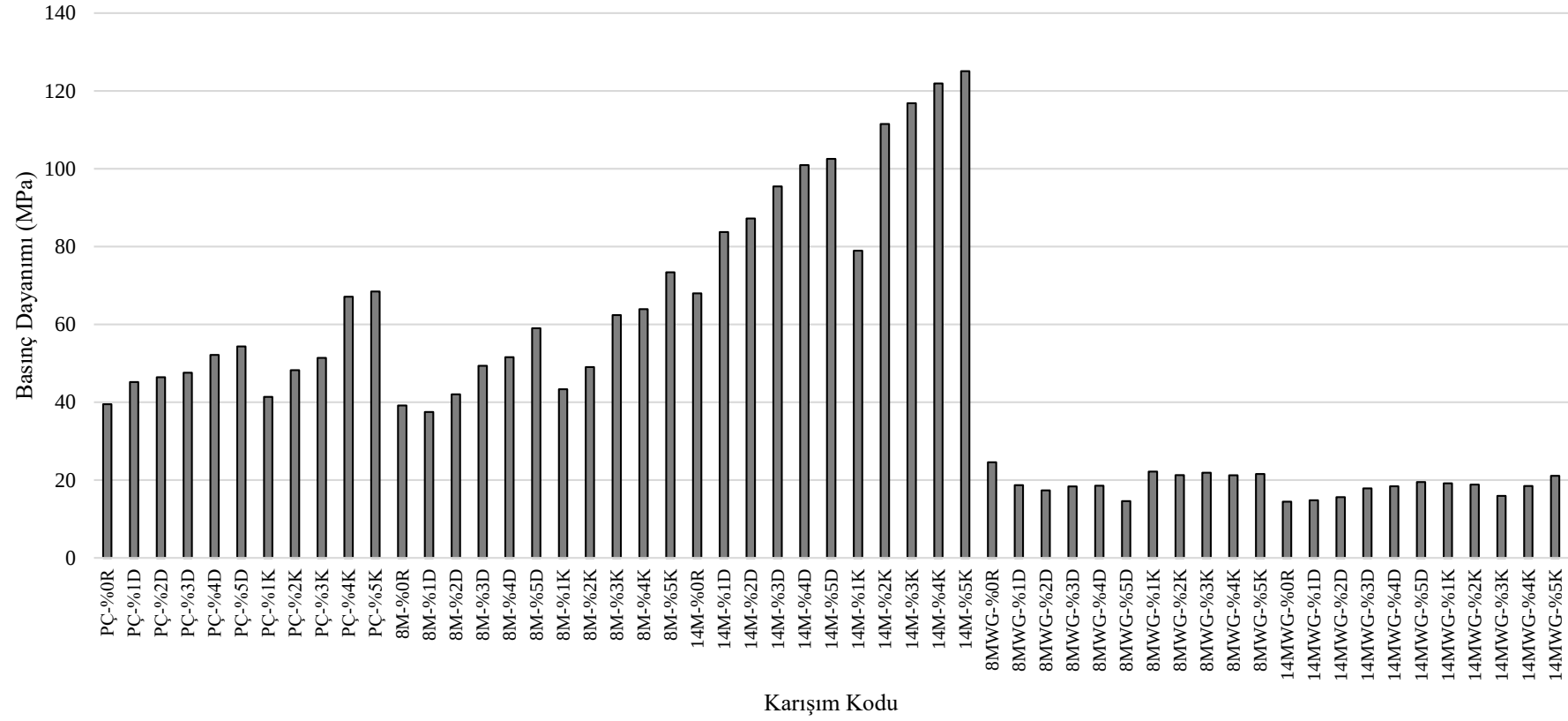
SIFCON numunelere ait ortalama basınç dayanımı değerleri, Çizelge 4.22 ve Şekil 4.46'da verilmiştir.

Kullanılan çelik lif, yüksek dayanımlı bir malzemedir. Kompozit bir malzemede, kompoziti oluşturan bileşenler özelliklerini korumakla birlikte, kompozit özellikleri matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının istenilen şekilde olmasına bağlıdır. Kompozitin özellikleri, bileşenlerin özelliklerinden etkilenir.

Basınç dayanımı açısından değerlendirme yapıldığında 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikatın aktivatör olarak kullanıldığı numunelerde en iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir. Lifsiz numuneler kıyaslandığında, bu numunelerin basınç dayanımının Portland çimentosu ile üretilenlerin basınç dayanımının 1,7 katı olduğu görülmektedir. Oysaki bu harçların eğilme dayanımları, Portland çimentosu ile üretilen numunelere göre düşüktür. Farklı araştırmacılar da benzer sonuçlar elde etmiş olup bu sonucun alınmasına sebep olan mekanizmayı şu şekilde açıklamışlardır: Yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktivasyonu sonucunda üretilen harçların boşluk oranı, çimentolu harçlarla neredeyse aynıdır fakat boşluk çapı daha küçük olup sayıca fazladır, bu durum, yüksek fırın cürufu harçlarda rötre oluşumuna ve mikro çatlaklara neden olur ve elastisite modülü daha düşük olarak elde edilir, yüksek fırın cürufunun bu yapısının lifsiz durumda eğilme dayanımlarının yetersiz kalmasına sebep olduğu düşünülmektedir ve uzun dönemde basınç dayanımlarında düşüşler gözlemlenebilir (Lee ve Lee, 2013; Balçıkanlı ve diğ, 2015).

Çizelge 4.22 : SIFCON numunelerin basınç dayanımı.

Karışım Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)
PÇ-%0R	39,5
PÇ-%1D	45,2
PÇ-%2D	46,4
PÇ-%3D	47,6
PÇ-%4D	52,2
PÇ-%5D	54,3
PÇ-%1K	41,4
PÇ-%2K	48,2
PÇ-%3K	51,4
PÇ-%4K	67,1
PÇ-%5K	68,5
8M-%0R	39,2
8M-%1D	37,5
8M-%2D	42,0
8M-%3D	49,4
8M-%4D	51,6
8M-%5D	59,0
8M-%1K	43,3
8M-%2K	49,0
8M-%3K	62,4
8M-%4K	63,9
8M-%5K	73,4
14M-%0R	68,0
14M-%1D	83,7
14M-%2D	87,2
14M-%3D	95,5
14M-%4D	100,9
14M-%5D	102,5
14M-%1K	78,9
14M-%2K	111,5
14M-%3K	116,8
14M-%4K	121,9
14M-%5K	125,1
8MWG-%0R	24,6
8MWG-%1D	18,7
8MWG-%2D	17,3
8MWG-%3D	18,3
8MWG-%4D	18,6
8MWG-%5D	14,6
8MWG-%1K	22,2
8MWG-%2K	21,2
8MWG-%3K	21,9
8MWG-%4K	21,2
8MWG-%5K	21,5
14MWG-%0R	14,4
14MWG-%1D	14,8
14MWG-%2D	15,6
14MWG-%3D	17,8
14MWG-%4D	18,4
14MWG-%5D	19,5
14MWG-%1K	19,1
14MWG-%2K	18,8
14MWG-%3K	15,9
14MWG-%4K	18,5
14MWG-%5K	21,1



Şekil 4.46 : Basınç dayanımı.

Üretilen SIFCON numunelerde, genel olarak lif miktarı arttıkça basınç dayanımında artış gözlemlendiği söylenebilir ancak bazı numunelerde lif miktarının artması basınç dayanımında önemli bir değişiklik oluşturmamıştır. Örneğin öğütülmüş atık cam ile aktive edilen numunelerde lif miktarının artmasıyla basınç dayanımında artma gibi bir ilişki söz konusu değildir, 8MWG-%5D numunesinde basınç dayanımı lifsiz numuneden %40,7 daha düşüktür. Bazı lif hacim oranlarında numunelerde gözlenen dayanım düşüşünün sebebi lif dağılımının homojen olmayışı, lifin yanı sıra malzeme içerisinde bulunabilen elyaf, tekstil kalıntısı, kauçuk vb. atık maddeler olabilir. Elde edilen dayanım değerlerinin yüksek olabilmesi için, kullanılan lifin mümkün olduğunca temiz olması ve toz, kir, yağ, pas, artık madde gibi kalıntılardan arındırılmış olması gerekir. Kompozit malzemelerde lif yönünün de mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu unutulmamalıdır. Kullanılan lifin karmaşık şekli nedeniyle lif yönünü kontrol etmek zordur, rastgele yerleştirilen lifler her yönde uzanmaktadır, yine de numune uzun kenarı doğrultusunda liflerin daha fazla yer aldığı söylenebilir. Lifin farklı doğrultularda dağılmasının da numune özelliklerinin yönden bağımsız olmasını sağlamaya katkısı bulunmaktadır, bu durum bir avantaj sağlayabilir.

En yüksek basınç dayanımı, 125,1 MPa değeriyle 14M-%5K numunesine aittir, bu değer Portland çimentosu ile üretilen %5 süreksiz lifli numunenin basınç dayanımı değerinden %82,7 büyüktür.

7 cm×7 cm×28 cm boyutlu numuneler yerine daha büyük boyutlu numuneler kullanıldığında boyut etkisi nedeniyle basınç dayanımında düşüşler gerçekleşebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Mahmud ve diğ, 2013; Yool ve diğ, 2016; Yool ve Banthia, 2016; An ve diğ, 2008). Malzeme hacmi arttıkça, malzemede bulunan kusurlar artacağından heterojen malzemelerin basınç dayanımında düşme gerçekleşmesi beklenir.

Öğütülmüş atık cam kullanımı basınç dayanımı değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Bu sonucun elde edilmesinde camın amorf yapısının yanı sıra yetersiz aktivasyon etkili olabilir. Sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen numuneler ise basınç dayanımı açısından Portland çimentolu numunelerden üstün olmuştur.

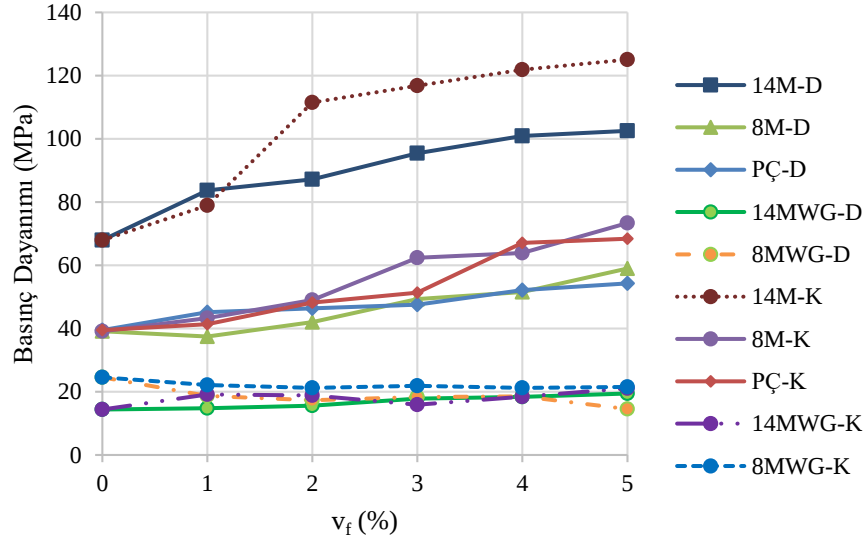
8M-%5K numunesinde lifsiz numuneye kıyasla basınç dayanımı %87,4 fazla olmuştur.

Daha yüksek dayanım değerleri hedeflendiğinde kür koşulları ve kür süresi dikkate alınarak farklı uygulamalar yapılabilir. Yine harç numunelerde elde edilen sonuçlarda olduğu gibi, sonuçlar değerlendirilirken şu hususları göz önünde bulundurmakta fayda vardır: Aşırı sodyum hidroksit içeriği, kimyasal reaksiyonu geciktirerek, özellikle erken yaşlarda mukavemet değerlerinde düşüşe neden olabilir (Pascual ve diğ., 2014). Pascual ve diğ. (2014), sodyum hidroksit çözeltisinin konsantrasyonundaki artışın, yüksek miktarda bağlı olmayan alkali iyonları nedeniyle önemli miktarda karbonatlaşma sonucu heterojen bir jel oluşumuna neden olduğunu, hamur ile agregalar arasındaki kohezyonu ve basınç dayanımını azalttığını belirtmiştir. Alonso ve Palomo (2001), geopolimerizasyon yerine çözünme sürecinin sodyum hidroksit konsantrasyonundaki artışla desteklendiğini gözlemlemişlerdir.

8 M sodyum hidroksit çözeltisi ve öğütülmüş atık camın aktivatör olarak kullanıldığı numunelerde süreksiz lif kullanımı durumunda, kullanılan lif miktarından bağımsız olarak basınç dayanımlarında anlamlı bir değişiklik gözlenmemiştir. Aynı karışımla sürekli lif kullanıldığında elde edilen basınç dayanımları, süreksiz lifli numunelere kıyasla daha düşük olmuştur. Bu sonucun elde edilmesinde, eğilme deneyinden artakalan numuneler üzerinde basınç deneyi yapılmasının etkisi olabileceği, eğilme deneyi sonunda oluşabilecek olan gözle görülemeyen çatlakların sonucu etkileyebileceği düşünülmektedir.

Aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit derişiminin aşırı artmasının maliyet, çevre ve kullanıcı sağlığı gibi durumlardaki olumsuzlukların yanında işlenebilirlik, dayanım ve dürabilite özellikleri üzerinde de sorunlar yaratabileceği dikkate alınmalıdır.

Farklı SIFCON numuneler için basınç dayanımının lif miktarına bağlı değişimi Şekil 4.47’de verilmiştir.



Şekil 4.47 : Basınç dayanımının lif miktarına bağlı değişimi.

Öğütülmüş atık cam kullanılarak aktive edilen numunelerde lif miktarı arttıkça basınç dayanımında önemli bir değişim gerçekleşmemektedir. Tüm bunların haricinde, 14 M sodyum hidroksit ve öğütülmüş atık cam ile gerçekleştirilen üretimde, çözeltinin numune yüzeyine çıkması ve karbonatlaşma ile yüzeyde biriken zayıf tabakanın da basınç dayanımı değerlerini düşürmede etkili olabileceği düşünülmektedir. Öğütülmüş atık cam ile üretilen, lif içermeyen harçlar, taşıyıcı eleman olarak kullanım için düşük basınç dayanım değerleri verse de, yığma yapılarda bağlayıcı olarak kullanılarak değerlendirilebilir.

Çalışmada, basınç dayanımlarının belirlenmesi aşamasında, eğilme deneyinden artakalan numuneler kullanıldığından 70 mm boyutlu küpler üzerinde çalışıldığı söylenebilir. 100 mm veya 150 mm'lik küpler gibi daha büyük numuneler kullanılırsa, boyut etkisine bağlı olarak mukavemette bazı küçük azalmalar olabilir (Mahmud ve diğ, 2013; Yool ve diğ, 2016; Yool ve Banthia, 2016). Benzer dayanım aralıkları için, 70 mm yerine 100 veya 150 mm boyutlu küpler kullanıldığında %3 ila %8 dayanım düşüşü bildirilmiştir (An ve diğ, 2008). Bu nedenle, daha büyük numuneler kullanılmış ve boyut etkisi hesaba katılmış olsa bile, üretilen malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanım potansiyeli olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, boyut etkisi, lif takviyeli karışımlarda daha belirgin olabilir ve bu etki, kullanılan lif miktarı ile artabilir. Önceki bir çalışmada, numune boyutu 70 mm'den 150 mm'ye değiştirildiğinde ve lif hacim oranı %0'dan %2'ye çıkarıldığında, basınç dayanımında yaklaşık %11'lik bir düşüş gerçekleşmiştir (An

ve diğ, 2008). Lif miktarı daha da arttırılırsa, mukavemette daha yüksek düşüşler görülmesi beklenebilir. Maksimum lif hacim oranı, bu çalışmada %5'tir ve literatürdeki verilere göre, boyut etkisine bağlı dayanım düşüşünün %20-%30 mertebelerinde olacağı varsayılabilir (An ve diğ, 2008).

4.3.7 Elde edilen sonuçların literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması

Literatürdeki farklı SIFCON üretimlerinden elde edilmiş sonuçlardan bazıları Çizelge 4.23'te verilmiştir (Wecharatana ve Lin, 1992; Naaman, 1991; Reinhardt ve Fritz, 1989; Tabak, 2004; İpek ve Aksu, 2019; Şengül, 2018; Bulutlar, 2006).

Çizelge 4.23 : Literatürdeki SIFCON numunelerden elde edilmiş veriler.

SIFCON	Lif Hacim Oranı (v_f) (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Kırılma Enerjisi G_F (kJ/m)
Wecharatana ve Lin (1992)	4	6,1	21,0
	6	8,6	31,5
	8	14,2	45,5
	10	16,7	54,0
Naaman (1991)	12	19,4	78,8
	12,6	26,6	100,5
Reinhardt ve Fritz (1989)	8,5	9,2	60,5
	13,5	14,2	134,1
İpek ve Aksu, 2019	3,48	15,9	7,3
	6,66	39,9	54,2
Şengül (2018)	5	63,8	23,7
Bulutlar (2006)	5	16,4	8,4
	5	18,3	9,8

Üretilen SIFCON numuneler ile literatür verileri kıyaslandığında, sürekli lif kullanımıyla %5 lif hacim oranında 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktifleştirilen numunelerde 75,7 MPa eğilme dayanımına ulaşılabildiği ve bu değer in literatürde bulunan, gerek ticari lif gerekse atık çelik lif kullanımıyla elde edilmiş değerlerden yüksek olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, aynı numunede elde edilen 53,8 kN/m kırılma enerjisi değeri de %5 lif hacim oranı için oldukça yüksek bir değer olup literatürdeki %10 lif hacim oranına sahip numunelere yakın bir sonuç vermektedir.

Süreksiz lif kullanımında ise, %5 lif hacim oranında 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktifleştirilen numunelerde 29,8 MPa eğilme dayanımına ulaşılabildiği görülmektedir, elde edilen bu değer de söz konusu lif miktarı için, ticari liflerle elde edilen değerlerden fazladır. Bu numunede elde edilen 23,8 kN/m kırılma

enerjisi değeri, daha önce atık liflerle elde edilmiş sonuçlarla benzerlik göstermekle birlikte, ticari lif kullanımıyla elde edilen değerlerden düşük değildir.

Yan ve diğ. (2002), SIFCON ile yaptıkları çalışmada, lif hacmine bağlı olarak eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve kırılma tokluğunun değişimini incelemiş ve Çizelge 4.24'teki değerleri elde etmişlerdir. Tez çalışmasında elde edilen değerler, bu verilerle kıyaslandığında, %5 sürekli lif kullanımında, 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktifleştirilen numunelerdeki 225,7 Nm kırılma tokluğu değerinin, Yan ve diğ. (2002) çalışmasındaki %5 lif hacmine denk gelen 191,4 Nm kırılma tokluğu değerinden yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.24 : SIFCON numunelerden elde edilen sonuçlar (Yan ve diğ, 2002).

Lif Hacim Oranı (v_f) (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Tokluğu (Nm)
0	9,15	86,6	0,823
4	25,3	94,5	122,9
6	43,6	105,8	259,8
8	66,4	121,2	312,0
10	78,7	127,8	329,9

İpek ve Aksu (2019), farklı uzunluklardaki ve türdeki liflerle yaptıkları çalışmada, %6,66 oranında, 60 mm uzunluğundaki çelik lif kullanımıyla 172,9 Nm kırılma tokluğu elde etmişlerdir. Araştırmacılar, %10,44 oranında, 35 mm uzunluğundaki çelik lif kullanımıyla ise 155,7 Nm kırılma tokluğuna ulaşabilmiş; bu lifleri kullanarak lif miktarını %6,96'ya düşürdüklerinde 78,7 Nm, lif miktarını %3,48'e düşürdüklerinde 22,9 Nm kırılma tokluğu değerini elde etmişlerdir. Elde edilen değerler bu verilerle kıyaslandığında, %5 sürekli lif kullanımında, 14 M sodyum hidroksit ve sıvı sodyum silikat ile aktifleştirilen numunelerdeki 225,7 Nm kırılma tokluğu değerinin bu değerlerden yüksek olduğu görülmektedir. Aynı harç ile %5 süreksiz lif kullanımıyla elde edilen 99,8 Nm değeri de, lif boyu ve lif miktarı dikkate alındığında, söz konusu değerlerden yüksektir. Bu bilgiler doğrultusunda, atık çelik lif kullanımıyla maliyetin düşürülmesine katkı sağlanırken, ticari çelik liflerden daha üstün bir performans alınabileceği de görülmektedir.



5. SONUÇLAR

5.1 Alkali ile Aktive Edilmiş Harçlar

Alkali ile aktive edilmiş harçlar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Harçların işlenebilirliği, yapılan harç tasarımında aktivatör miktarı sabit tutulduğundan artan sodyum hidroksit molariteleri ile azalmıştır, sodyum hidroksit konsantrasyonu arttıkça, katı NaOH miktarı artmış ve su/bağlayıcı oranı azalmıştır.
- Alkali ile aktive edilen harçların erken yaştaki basınç mukavemeti değerleri, sodyum hidroksit çözeltisinin derişimi arttıkça artmıştır.
- Klor iyonu geçirimsizliği, alkali ile aktive edilen cüruf harçlarında öğütölmüş atık cam kullanımıyla, ticari sodyum silikat ile üretilen harçlara kıyasla azalmıştır.
- Aktivatör çözeltisi olarak öğütölmüş atık cam kullanımı ile harçların elektriksel direnci artmıştır.
- Öğütölmüş atık cam ile üretilen harçların kılcallık katsayısı ve toplam su emme değerleri, Portland çimentosu ile üretilen referans numuneden daha azdır.
- Öğütölmüş atık cam kullanımıyla numunenin çekme ve basınç değerlerinde azalma gözlenmesine rağmen, dayanıklılık özellikleri olumlu etkilenmiştir.

Elde edilen sonuçlara dayanarak Portland çimentolu harçlara alternatif malzeme olma konusunda, benzer mekanik ve dırabilite özellikleri sergilemeleri sayesinde, aktivatör olarak öğütölmüş atık cam kullanımının potansiyeli bulunduğu sonucuna varılmıştır. Alkali çözeltilerdeki iyonların hareketliliği, hızlı klor geçirimsizliği deneyi sonuçlarını olumsuz etkileyebilir, alkali aktifleştirilmiş malzemelerin dırabilite özelliklerinin karakterizasyonu için daha fazla araştırmaya ve farklı dırabilite testi yaklaşımlarına ihtiyaç vardır. Atık camdan oluşan aktivatör çözeltisinin hazırlanmasında, yüksek sıcaklıklar, atık camın daha ince parçacıklara öğütölmesi ve daha uzun karıştırma süreleri, alkali-aktivasyon işlemini geliştirebilir. Ekonomik

faktörler göz önünde bulundurularak bu işlemler, atık camın ticari sodyum silikat yerine etkili bir aktivatör olarak kullanılması için uygulanabilir. Uzun vadede etkilerin gözlenebilmesi için bu konu üzerinde daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

5.2 Alkali ile Aktive Edilmiş Betonlar

Alkali ile aktive edilmiş betonlar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Yüksek su/bağlayıcı oranlarında, alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu içeren betonlarda, diğer numunelere kıyasla klor geçirimliliği daha yüksek, elektriksel özdirenç daha düşük olmuştur. Bu sonucun elde edilmesinde, alkali ile aktive edilmiş betonlarda, elektriksel iletkenliği sağlayan iyonların fazla oluşu etkili olabilir.
- Genel bir değerlendirme yapıldığında, elektriksel özdirenç ile klor geçirimliliği arasında negatif korelasyon gözlenmektedir.
- Su/bağlayıcı oranı azaldıkça ve buna bağlı olarak beton basınç dayanımı arttıkça, kılcallık katsayılarında ve su emme yüzdelerinde azalma gözlenmiştir.
- Alkali ile aktifleştirilmiş betonlarda su/bağlayıcı oranının azaltılmasıyla, klor iyonu geçirimliliğinin azalması sağlanabilir.

5.3 Alkali ile Aktive Edilmiş Atık Çelik Lif Donatılı Betonlar

Alkali ile aktive edilmiş atık çelik lif donatılı betonlar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Araç lastiklerinden elde edilmiş hurda çelik lifler, alkali ile aktifleştirilmiş SIFCON üretiminde kullanım potansiyeline sahiptir. Bu liflerin kullanımıyla eğilmede çekme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, süneklik, tokluk ve kırılma enerjisi değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. Özellikle bu liflerin sürekli lif olarak kullanımı, betonun eğilme dayanımını büyük oranda arttırmaktadır. Bu lifler beton içerisinde kullanılırken çelik tellerin temiz olması, kauçuk gibi malzemelerden mümkün olduğunca arındırılması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır. Hurda çelik lifler, ticari çelik liflerden çok daha ucuz olup

mekanik özellikleri iyileştirmede, ticari çelik liflere benzer performans sergilemektedir.

- Kullanılan hurda çelik tellerin şekli sebebiyle kalıba yerleştirilebilen maksimum lif miktarı %5 ile sınırlı kalmış olup lif hacim oranı arttıkça, eğilmede çekme dayanımında artış gözlenmiştir.
- %5 lif hacim oranı SIFCON için çok düşük bir miktar olmasına rağmen, mekanik özellikleri iyileştirmede çok etkili olmuştur.
- Alkali ile aktifleştirilmiş betonlarda su/bağlayıcı oranı azaltıldığında, işlenebilirlik azalmasına rağmen Portland çimentosu ile üretilen betonlarda olduğu gibi, mekanik özellikler iyileşmektedir.
- Öğütülmüş atık cam kullanımının eğilmede çekme dayanımı değerlerini olumsuz etkilediği gözlenmiştir.
- Yarmada çekme dayanımı değerleri lif miktarıyla birlikte artmıştır.
- Atık çelik tel kullanımıyla üretim maliyetinin azaltılmasına katkıda bulunulurken çekme dayanımı, tokluk, kırılma enerjisi ve süneklik konularında iyileşme sağlanmıştır.
- Sürekli lif kullanımı, tokluk ve kırılma enerjisi değerlerini süreksiz life kıyasla daha fazla arttırmıştır.
- Tokluk değerleri açısından bakıldığında, öğütülmüş atık cam kullanılarak aktive edilen numuneler, sodyum silikat ile aktive edilen numunelere kıyasla dezavantajlı konumda bulunmalarına rağmen Portland çimentolu numunelere alternatif olabilir.

Alkali ile aktive edilmiş malzemelerde ısıtma işlemi uygulanmasının mekanik özelliklerin gelişimi üzerinde olumlu etkisi bulunmaktadır. Daha yüksek dayanımlar hedeflendiğinde, ısıtma işlemi uygulamasıyla, kür sıcaklığı ve süresi değiştirilerek bu konu üzerine yapılan çalışmaların artırılması fayda sağlayabilir.

İleri çalışmalar için alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin yalıtım özellikleri incelenebilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde üretim esnasında termokupl ile sıcaklık ölçümü yapılarak taze halde malzemedeki ısınma (sıcaklık gelişimi)-aktivasyon derecesi ilişkisi incelenebilir.

Farklı kaynaklardan temin edilen yüksek fırın cürufu ile çalışmalar genişletilebileceği gibi, bağlayıcı türü kısmen ya da tamamen değiştirilebilir, farklı aktivatörler değişen oranlarda kullanılabilir, bunların taze halde ve sertleşmiş halde malzeme özelliklerine etkisi incelenebilir.

Araç lastiklerinden elde edilen hurda çelik tellerle alkali ile aktifleştirilmiş klasik çelik tel donatılı beton üretilebilir, bu malzemenin dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik özellikleri incelenebilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde işlenebilirlik sorununu çözmek üzere kimyasal katkı geliştirilmesi sağlanabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde priz süresini etkileyen faktörler üzerine çalışmalar arttırılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde rötre konusu üzerine çalışmalar yapılabilir, rötreyi etkileyen faktörler incelenerek hangi kimyasal ya da mineral katkıların rötre azaltıcı etkisinin daha fazla olduğu araştırılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde atık agrega kullanımı konusu incelenebilir.

Atık aktivatörler konusu üzerine çalışmalar genişletilebilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş, farklı lif donatılı beton üretimi yapılarak malzeme özellikleri incelenebilir.

Lif kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş malzemelerde, darbe dayanımı incelenebilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde ASR, asit etkisine karşı direnç gibi dayanıklılık özellikleri incelenebilir, dürabilite özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik araştırmalar yapılabilir, bu malzemedeki korozyon konusu çalışılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin termal özellikleri ve yangına karşı direnci üzerine araştırmalar yapılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş, silindirle sıkıştırılmış beton üretimi konusu üzerine çalışmalar yapılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin iç yapısı üzerinde çalışılabilir, malzemenin kendi kendini iyileştirmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde boyut ve cidar etkisi konusunda araştırmalar yapılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde performans-servis ömrü üzerinde çalışılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerde tekrarlı yükler altında yorulma konusu incelenebilir, snme üzerine araştırmalar yapılabilir.

Alkali ile aktifleştirilmiş malzemelerin özelliklerini belirlemek üzere kullanılan deneylerin standardizasyonu üzerine çalışma yapılabilir.





KAYNAKLAR

- Abdollahi, B., Bakhsi, M., Mirzaee, Z., Shekarchi, M., Motavalli, M.** (2012). SIFCON strengthening of concrete cylinders in comparison with conventional GFRP confinement method, *Construction and Building Materials*, 36, 765–778.
- Abdollahnejad, Z., Kheradmand, M., Pacheco-Torgal, F.** (2017). Short-term compressive strength of fly ash and waste glass alkali-activated cement-based binder mortars with two biopolymers, *J. Mater. Civ. Eng.*, 29, 1–18. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001920
- Afshinnia, K. & Rangaraju, P. R.** (2015). Efficiency of ternary blends containing fine glass powder in mitigating alkali-silica reaction, *Construction and Building Materials*, 100, 234–245. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.043
- Aghaee, K. & Yazdi, M. A.** (2014). Waste steel wires modified structural lightweight concrete, *Materials Research*, 17 (4), 958–966. DOI: 10.1590/1516-1439.257413
- Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G., Maffezzoli, A.** (2009). Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength, *Waste Management*, 29 (6), 1960–1970.
- Akkaya, Y., Bayramov, F., Taşdemir, M. A.** (2003). Betonun kırılma mekaniği: tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağıntılar, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 2003/4 (426), 70–75. <<http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/248.pdf>>
- Akman, S.** (2003). Gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF), 5. *Ulusal Beton Kongresi*, 1-3 Ekim, İstanbul, 9–16. <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/10584.pdf>
- Al-Amoudi, O. S. B.** (1997). Sulfate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments, *Building and Environment*, 33, 53–61.
- Alexander, K. M.** (1955). Activation of pozzolanic material by alkali, *Aust. J. Appl. Sci.*, 6, 224–229.
- Alexander, K. M.** (1960). Reactivity of ultra fine powders produced from silicious rock, *J. Am. Concr. Inst.*, 57 (5), 557–569.
- Alexander, K. M. & Wardlaw, J.** (1955). Limitations of the pozzolana-lime mortar strength test as method of comparing pozzolanic activity, *Australian Journal of Applied Science*, 6, 334–343. <<http://hdl.handle.net/102.100.100/335853?index=1>>

- Ali, M. B., Saidur, R., Hossain, M. S.** (2011). A review on emission analysis in cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2252–2261.
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., Aboshama, A. Y.** (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Construction and Building Materials*, 124, 866–877. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016
- Allahverdi, A. & Ghorbani, J.** (2006). Chemical activation and set acceleration of lime-natural pozzolan cement, *Ceramics – Silikáty*, 50 (4), 193–199.
- Alonso, M. M., Rodríguez, A., Puertas, F.** (2018). Viability of the use of construction and demolition waste aggregates in alkali-activated mortars, *Mater. Construcción*, 68 (331): 164. DOI: 10.3989/mc.2018.07417
- Alonso, S. & Palomo, A.** (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio, *Materials Letters*, 47 (1-2), 55–62.
- Al-Otaibi, S.** (2008). Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass, *Construction and Building Materials*, 22 (10), 2059–2067. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.023
- Altan, E. & Erdoğan, S. T.** (2012). Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 34 (2), 131–139. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.08.003
- Amritphale, S. S., Bhardwaj, P., Gupta, R.** (2019). Advanced Geopolymerization Technology. In *Geopolymer Science and Applications*. DOI: 10.5772/intechopen.87250
- An, M. Z., Zhang, L. J., Yi, Q. X.** (2008). Size effect on compressive strength of reactive powder concrete, *J. China Univ. Min. Technol.*, 18, 279–282.
- Andrew, R. M.** (2018). Global CO₂ emissions from cement production, *Earth System Science Data*, 10 (4), 195–217. DOI: 10.5194/essd-10-2213-2018
- Aramburo, C. H., Pedrajas, C., Talero, R.** (2020). Portland Cements with High Content of Calcined Clay: Mechanical Strength Behaviour and Sulfate Durability, *Materials*, 13, 4206. DOI: 10.3390/ma13184206
- Arioğlu, N., Hatipoğlu, D. D., Arioğlu-Salmona, M. O., Arioğlu, E.** (2002). Sürdürülebilirlik kavramı anlayışında beton endüstrisinin irdelenmesi. Retrieved from <<https://yapimerkezi.com.tr/PdfDosyaları/ebdb652b-b1d9-4d19-af20-c28ded302fbd-7a5c3811-1160-4f5f-8669-beb507c87990.pdf>>, date retrieved 10.02.2020.
- Arslan, M.** (2001). *Beton (Dökümü, Kalıpları, Kusurları ve Dayanıklılığı)*, Atlas Yayın Dağıtım, yayın no: 3, 1. Baskı, 157, İstanbul.
- ASTM.** (2018). *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution* (ASTM C1012/C1012M-18b). ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org

- ASTM. (2019). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration* (ASTM C1202). ASTM Int.
- Atabey, İ. İ., Karahan, O., Bilim, C., Atiş, C. D. (2020). Very high strength Na_2SiO_3 and NaOH activated fly ash based geopolymer mortar, *Cement Wapno Beton*, 25 (4), 292–305. DOI: 10.32047/CWB.2020.25.4.4
- Atiş, C. D., Bilim, C., Celik, O., Karahan, O. (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar, *Construction and Building Materials*, 23 (1), 548–555. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.011
- Aydın, S. & Baradan, B. (2012). Mechanical and microstructural properties of heat cured alkali-activated slag mortars, *Materials and Design*, 35, 374–383. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.10.005
- Azarsa, P. & Gupta, R. (2017). Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1–30. DOI: 10.1155/2017/8453095
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B. (1999). Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 29 (10), 1619–1625. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00143-X
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B. (2000). Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 30 (9), 1367–1374. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00349-5
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y. B. (2002). Sulfate attack on alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 211–216. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00659-7
- Balçıkanlı, M., Özbay, E., Türker, H. T. (2015). Alkalilerle aktive edilmiş harçların çekip çıkarma ve aşınma dirençlerinin belirlenmesi, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4 (2), 87–98.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite)*. DEÜ Müh. Fak. Yayınları, 89–185, İzmir.
- Beghoura, I., Castro-Gomes, J., Ihsan, H., Estrada, N. (2017). Feasibility of alkali-activated mining waste foamed materials incorporating expanded granulated cork, *Min. Sci.*, 24, 7–28. DOI: 10.5277/msc172401
- Behfarnia, K., Shojaei, M., Mohebi, R. (2015). Compressive strength and flexural strength of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method, *Asian Journal of Civil Engineering*, 16 (4), 505–513.
- Bernal, S. A., Mejia de Gutierrez, R., Pedraza, A. L., Provis, J. L., Rodriguez, E. D., Delvasto, S. (2011). Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes, *Cement and Concrete Research*, 41, 1–8.

- Bernal, S. A., Mejia de Gutierrez, R., Provis, J. L., Rose, V.** (2010), Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags, *Cement and Concrete Research*, 40 (6), 898–907. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.003
- Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., Mejia de Gutierrez, R.** (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends, *Cement and Concrete Composites*, 33 (1), 46–54. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.09.004
- Bernal, S. A., Rodríguez, E. D., Kirchheim, A. P., Provis, J. L.** (2016). Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 91, 2365–2388. DOI: 10.1002/jctb.4927
- Bilim, C., Karahan, O., Atis, C. D., Ilkentapar, S.** (2013). Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions, *Materials and Design*, 44, 540–547. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.049
- Bobirică, C., Shim, J. H., Pyeon, J. H., Park, J. Y.** (2015). Influence of waste glass on the microstructure and strength of inorganic polymers, *Ceram. Int.*, 41, 13638–13649. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.160
- Boccalon, E., Nocchetti, M., Pica, M., Romani, A., Casciola, M.** (2019). Composite sodium alginate-ion exchangers as cleaning systems for theremoval of gypsum efflorescences, *Appl. Clay Sci.*, 181, No. 105216.
- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., Ramezani-pour, A. A.** (2011). Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans, *Construction and Building Materials*, 25, 4065–4071.
- Brady, J. E. & Holum, J. R.** (1996). *Chemistry, the study of matter and its changes*, 2nd ed. Wiley.
- Brew, D. & MacKenzie, K.** (2007). Geopolymer synthesis using silica fume and sodium aluminate, *Journal of Materials Science*, 42 (11), 3990–3993.
- Brocken, H. & Nijland, T. G.** (2004). White efflorescence on brick masonry and concrete masonry blocks, with special emphasis on sulfate efflorescence on concrete blocks, *Construction and Building Materials*, 18, 315–323.
- Brylewska, K., Rozek, P., Król, M., Mozgawa, W.** (2018). The influence of dealumination/desilication on structural properties of metakaolin-based geopolymers, *Ceram. Int.*, 44 (11), 12853–12861. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.04.095
- BSI.** (2009). *Testing Hardened Concrete. Compressive Strength of Test Specimens* (EN 12390-3). BSI, London, UK.

- BSI.** (2011). *Methods of Test for Masonry Units Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units* (EN 772-11). BSI Stand. Publ., London, UK.
- Bulutlar, Y. A.** (2006). *Effects of Content and Strength of Steel Fiber on the Mechanical Behaviour of SIFCON* (M.Sc. Thesis). Istanbul Technical University, Institute of Science and Technology, Istanbul, Turkey.
- Cai, Y., Xuan, D., Poon, C. S.** (2019). Effects of nano-SiO₂ and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars, *Construction and Building Materials*, 201, 295–302. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.186
- Campbell, D. H. & Folk, R. L.** (1991). The ancient pyramids-concrete or rock, *Concrete International: Design & Construction*, 13 (8), 28–39.
- Canbaz, M. & Çelikten, S.** (2020). Kırılmış Atık Taşı Lastiklerinin SIFCON Üretiminde Farklı Bağlayıcılarla Değerlendirilmesi, *ESOGÜ Müh Mim Fak Derg*, 28 (1), 9–15.
- CEMBUREAU.** (2017). *Activity Report 2017 of The European Cement Association*. (March), 1–48. Retrieved from <https://www.cembureau.eu>
- Centonze, G., Leone, M., Aiello, M. A.** (2012). Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, *Construction and Building Materials*, 36, 46–57. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088
- Cercel, J., Adesina, A., Das, S.** (2020). Performance of eco-friendly mortars made with alkali-activated slag and glass powder as a binder, *Construction and Building Materials*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121457
- Chatterjee, M. K. & Lahiri, D.** (1967). *Trans. Indian Ceram. Soc.*, 26, p. 65.
- Cheung, J., Roberts, L., Liu, J.** (2018). Admixtures and sustainability, *Cement and Concrete Research*, 114, 79–89. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.04.011
- Chi, M.** (2012a). Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 35, 240–245. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.005
- Chi, M.** (2012b). Effects of dosage and modulus ratio of alkali-activated solution on the properties of slag mortars, *Advanced Science Letters*, 16 (1), 7–12.
- Christiansen, M. U.** (2013). *An Investigation of Waste Glass-Based Geopolymers Supplemented with Alumina*. (Diss.), Michigan Technol. Univ. DOI: 10.1016/0040-1951(74)90006-7
- Clausi, M., Fernández-Jiménez, A. M., Palomo, A., Tarantino, S. C., Zema, M.** (2018). Reuse of waste sandstone sludge via alkali activation in matrices of fly ash and metakaolin, *Constr. Build. Mater.*, 172, 212–223.

- Colleparidi, M., Marcialis, A., Massidda, L., Sanna, U.** (1976). Low pressure steam curing of compacted lime-pozzolana mixtures, *Cement and Concrete Research*, 6 (4), 497–506.
- Costa, U. & Massazza, F.** (1977). Influenza del trattamento termico sulla reattività con la calce di alcune pozzolane naturali, *Il Cemento*, 74, 105–122.
- Davidovits, J.** (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference?, *Concrete International Design & Construction*, 9 (12), 23–35.
- Davidovits, J.** (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
- Davidovits, J.** (1992). Great pyramids debate, *Concrete International*, 14 (2), 17–18.
- Davidovits, J.** (1994). Geopolymers: man-made rocks geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement, *J. Mater. Educ.*, 16, 91–139.
- Davidovits, J.** (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology, *Geopolymer'99 International Conference*, France.
- Davidovits, J.** (2008a). *Geopolymer Chemistry and Applications*, Saint Quentin, France.
- Davidovits, J.** (2008b). *They Built The Pyramids*, Geopolymer Institute, Saint Quentin, France.
- Davidovits, J.** (2018). Why Alkali-Activated Materials (AAM) are Not Geopolymers, *Technical Paper #25, Geopolymer Institute Library*. Retrieved from www.geopolymer.org. DOI: 10.13140/RG.2.2.34337.25441
- Davidovits, J. & Comrie, D. C.** (1988). Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals, *Geopolymer'88 proceedings*, 125–134.
- Davidovits, J. & Davidovits, R.** (2020). Ferro-sialate geopolymers, *Technical papers #27, Geopolymer Institute Library*. Retrieved from www.geopolymer.org. DOI: 10.13140/RG.2.2.25792.89608/2
- Davidovits, J. & Morris, M.** (1988). *The pyramids: An enigma solved*. Hippocrene Books Inc., New York.
- Day, R. L. & Shi, C.** (1994). Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 24 (8), 1485–1491. DOI: 10.1016/0008-8846(94)90162-7
- Dhir, R. K.** (2005). Cement: a question of responsible use, *Proceed. Int. Conference*, University of Dundee, 5–7 July, Scotland, UK, 1–12.
- Ding, Y., Dai, J. G., Shi, C. J.** (2018). Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar, *Construction and Building Materials*, 165, 310–320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.202
- Doğruyol, M. & Karaşin, H.** (2011). Sülfatın beton ve betonarme elemanlara olumsuz etkisi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 2 (2), 79–85.

- Dongxu, L., Zhongzi, X., Zhimin, L., Zhihua, P., Lin, C.** (2002). The activation and hydration of glassy cementitious materials, *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1145–1152.
- Drochytka, R., Dufek, Z., Michalčíková, M., Hodul, J.** (2020). Study of possibilities of using special types of building and demolition waste in civil engineering, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64 (1), pp. 304–314.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., Van Deventer, J. S. J.** (2007). Geopolymer technology: the current state of the art, *J. Mater. Sci.*, 42, 2917–2933.
- Duxson, P. & Provis J. L.** (2005). The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete, *Langmuir*, 21 (7), 3028–3036.
- Duxson, P. & Provis, J. L.** (2008). Designing precursors for geopolymer cements, *J. Am. Ceram. Soc.*, 91, 3864–3869.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., Van Deventer, J. S. J.** (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269 (1–3), 47–58.
- Farnam, Y., Moosavi, M., Shekarchi, M., Babanajad, S. K., Bagherzadeh, A.** (2010). Behaviour of slurry infiltrated fibre concrete (SIFCON) under triaxial compression, *Cement and Concrete Research*, 40, 1571–1581.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, J. G., Puertas, F.** (1999). Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour, *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1313–1321. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00154-4
- Folk, R. L. & Campbell, D. H.** (1992). Are the pyramids built of poured concrete blocks?, *Journal of Geological Education*, 40, 25–34.
- GCP.** (2016). Understanding AASHTO T277 and ASTM C1202 Rapid Chloride Permeability Test, *GCP Applied Technologies Tech Bulletin*, 60–62. Retrieved from https://gcpat.com/sites/gcpat.com/files/2017-06/TB-0100CPT_v2.pdf
- Gebregziabih, B. S., Thomas, R. J., Peethamparan, S.** (2016). Temperature and activator effect on early-age reaction kinetics of alkali-activated slag binders, *Construction and Building Materials*, 113, 783–793. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.098
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H., Makhloufi, A.** (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC), *Construction and Building Materials*, 82, 89–100.
- Gruskovnjak, A., Lothenbach, B., Holzer L., Figi, R., Winnefeld, F.** (2006). Hydration of alkali-activated slag: comparison with ordinary Portland cement, *Advances in Cement Research*, 18 (3), July, 119–128.

- Haha, M. B., Lothenbach, B., Le Saout, G., Winnefeld, F.** (2011). Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag — Part I: Effect of MgO, *Cement and Concrete Research*, 41 (9), 955–963. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.05.002
- Hamzaçebi, D.** (2015). *Atık çelik liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V.** (2004). Brief Review of Development of Geopolymer Concrete, Invited paper, *George Hoff Symposium*, American Concrete Institute, Las Vegas, USA.
- Harrell, J. A. & Penrod, B. E.** (1993). The Great Pyramid Debate-Evidence from the Lauer Sample, *Journal of Geological Education*, 41, 358–363.
- Hashim, A. N., Hussin, K., Begum, N., Al Bakri Abdullah, M. M., Abdul Razak, K., Ekaputri, J. J.** (2015). Effect of sodium hydroxide (NaOH) concentration on compressive strength of alkali-activated slag (AAS) mortars, *Appl. Mech. Mater.* DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.754-755.300
- He, Z., Zhan, P., Du, S., Liu, B., Yuan, W.** (2019). Creep behavior of concrete containing glass powder, *Composites, Part B, Engineering*, 166, 13–20. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.11.133
- Hemmings, R. T., Berry, E. E., Cornelius, B. J., Golden, D. M.** (1989). In: *Materials Research Symposium*, Proc. Mater. Res. Soc., p. 141–161.
- Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G., Djétéli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., Napo, K., Tchangbedji, G., Praisler, M.** (2014). How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers, *Ceram. Int.*, 40, 8953–8962.
- Huizer, A., Day, R. L., Shi, C.** (1992). Activation of natural pozzolans for increased strength of low-cost masonry units, 6th Canadian Masonry Symposium, Saskatoon, Proc., vol. 2, 499–507.
- Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A.** (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials*, 24, 1309–1312. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030
- Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A.** (2011). Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cement and Concrete Composites*, 33, 19–29. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013
- Ivanova, I., Aiello, R., Nagy, J. B.** (1994). Influence of cations on the physicochemical and structural properties of aluminosilicate gel precursors: II. Multinuclear Magnetic Resonance Characterisation, *Microporous Materials*, 3 (3), 245–257.
- İpek, M. & Aksu, M.** (2019). The effect of different types of fiber on flexure strength and fracture toughness in SIFCON, *Construction and Building Materials*, 214, 207–218.

- İpek, M., Aksu, M., Yılmaz, K., Uysal, M.** (2014). The effect of pre-setting pressure on the flexural strength and fracture toughness of SIFCON during the setting phase, *Construction and Building Materials*, 66, 515–521.
- İpek, M., Canbay, M., Yılmaz, K.** (2015). Çelik ve polipropilen liflerin yalın ve kombinasyonlu olarak kullanılmasının SIFCON'un mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi, *SAÜ Fen Bil. Der.*, 19 (1), 41–52.
- Jiang, W., Silsbee, M. R., Roy, D. M.** (1997). Alkali activation reaction mechanism and its influences on microstructure of slag cement, *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Göteborg, Vol. 3, 3ii100, 9 pp.
- Johnson, G. B.** (2007). *U.S. Patent No US 2007/0125272 A1*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kamali, M. & Ghahremaninezhad, A.** (2016). An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders, *Construction and Building Materials*, 112, 915–924. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.085
- Kang, S. P. & Kwon, S. J.** (2017). Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar, *Construction and Building Materials*, 133, 459–467.
- Kani, E. N., Allahverdi, A., Provis, J. L.** (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan, *Cement and Concrete Composites*, 34, 25–33.
- Kastiukas, G. & Zhou, X.** (2017). Effects of waste glass on alkali-activated tungsten mining waste: composition and mechanical properties, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50 (4), 194. DOI: 10.1617/s11527-017-1062-2
- Kastiukas, G., Zhou, X., Castro-Gomes, J.** (2017). Preparation conditions for the synthesis of alkali-activated binders using tungsten mining waste, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (10). DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002029
- Kastiukas, G., Zhou, X., Wan, K. T., Castro-Gomes, J.** (2019). Lightweight alkali-activated material from mining and glass waste by chemical and physical foaming, *Journal of Materials in Civil Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002610
- Kaya, M., Uysal, M., Yılmaz, K.** (2018). Jeopolimer harçlarda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi ile incelenmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 248–256. DOI: 10.16984/saufenbilder.300934
- Kim, D., Petrisor, I. G., Yen, T. F.** (2004). Geopolymerisation of biopolymer a preliminary inquiry, *Carbohydrate Geopolymers*, 56, 213–217.
- Komnitsas, K. & Zaharaki, D.** (2007). Geopolymerisation: a review and prospects for mineral industry, *Minerals Engineering*, 20, 1261–1277.

- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W.C.** (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th ed., Portland Cement Association, Skokie, Illionis.
- Kouassi, S. S., Andji, J., Bonnet, J. P., Rossignol, S.** (2010). Dissolution of waste glasses in high alkaline solutions, *Ceramics – Silikáty*, 54 (3), 235–240.
- Kriven, W. M., Bell, J. L., Gordon, M.** (2003). Microstructure and microchemistry of fully-reacted geopolymers and geopolymer matrix composites, *Ceramic Transactions*, 153, 227–250.
- Lee, N. K. & Lee, H. K.** (2013). Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature, *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107
- Li, G., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Stubblefield, M. A., Pang, S. S.** (2004a). Waste tire fiber modified concrete, *Composites, Part B, Engineering*, 35, 305–312.
- Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B.** (2004b). Development of waste tire modified concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (12), 2283–2289.
- Li, K. L., Huang, G. H., Chen, J.** (2005). Early mechanical property and durability of geopolymer, *Proceedings of World Congress Geopolymer 2005*, France.
- Li, Z., Ding, Z., Zhang, Y.** (2004c). Development of Sustainable Cementitious Materials, *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, 55–76.
- Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N.** (2019). An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials, *Resources, Conservation & Recycling*, 144, 297–309. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.007
- Lloyd, R.** (2009). Accelerated ageing of geopolymers. In J. Provis, J. Van Deventer, (Eds.), *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications*. CRC Press, 139–166.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R. D.** (2011). Supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.*, 41 (12), 1244–1256.
- López, M. & Castro, J. T.** (2010). Effect of natural pozzolans on porosity and pore connectivity of concrete with time, *Revista ingeniería de construcción*, 25 (3), 419–431. DOI: 10.4067/S0718-50732010000300006
- Lu, J., Duan, Z., Poon, C. S.** (2017a). Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar, *Cement and Concrete Composites*, 82, 34–44. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.05.011
- Lu, J. X. & Poon, C. S.** (2018). Use of waste glass in alkali activated cement mortar, *Construction and Building Materials*, 160, 399–407. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.080

- Lu, J. X., Zhan, B. J., Duan, Z. H., Poon, C. S.** (2017b). Improving the performance of architectural mortar containing 100% recycled glass aggregates by using SCMs, *Construction and Building Materials*, 153, 975–985. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.118
- Lu, J. X., Zhan, B. J., Duan, Z. H., Poon, C. S.** (2017c). Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates, *Materials and Design*, 135, 102–111. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.09.016
- Ludwig, H. M.** (2015). *CO₂-arme Zement für nachhaltige Betone*. In: Proceedings of 19. Ibausil, Weimar, pp. 7–32.
- Lv, X., Qin, Y., Lin, Z., Tian, Z, Cui, X.** (2020). Inhibition of efflorescence in Na-based geopolymer inorganic coating, *ACS Omega*, 5 (24), 14822–14830. DOI: 10.1021/acsomega.0c01919
- Lyon, R. E.** (1994). *Technical Report DOT/ FAA/CT-94/60*.
- Mahmud, G. H., Yang, Z., Hassan, A. M. T.** (2013). Experimental and numerical studies of size effects of ultra high performance steel fibre reinforced concrete beams, *Constr. Build. Mater.*, 48, 1027–1034.
- Marcin, M., Sisol, M., Brezani, I.** (2018). Effect of waste glass addition on mechanical properties of slag based geopolymers, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 379 (1), 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/379/1/012013
- Martinez-Lopez, R. & Escalante-Garcia, J. I.** (2016). Alkali activated composite binders of waste silica soda lime glass and blast furnace slag: Strength as a function of the composition, *Construction and Building Materials*, 119, 119–129. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.064
- Massazza, F. & Costa, U.** (1986). Bond: Paste – Aggregate, Paste – Reinforcement and Paste – Fibers, *The 8th International Symposium on Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, 158–180.
- Mckinney, R. G.** (1993). Comments on the work of Harrell and Penrod, *Journal of Geological Education*, 41, 369.
- Meddah, M. S. & Bencheikh, M.** (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials, *Construction and Building Materials*, 23 (10), 3196–3205.
- Mehta, A. & Siddique, R.** (2016). An overview of geopolymers derived from industrial by-products, *Construction and Building Materials*, 127, 183–198.
- Mehta, P. K.** (2000). Reflections on Recent Advancements in Concrete Technology, *Second International Symposium on Cement and Concrete Technology in 2000s*, September 6-10, Istanbul, 43–57.
- Mielenz, R. C., Witte, L. P., Glantz, O. J.** (1950). Effect of Calcination on Natural Pozzolans. In: *Symposium on Use of Pozzolan Materials in Mortars and Concretes*, ed. T. Stanton and R. Blanks, 43–92, West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI: 10.1520/STP39404S

- Mondragon, R.** (1988). SIFCON with Sand, *Air Force Weapons Laboratory Technical Report*, NM 87117-6008, New Mexico Engineering Research Institute-University of New Mexico, Albuquerque.
- Monteiro, P. J. M. & Kurtis, K. E.** (2003). Time to Failure for Concrete Exposed to Severe Sulfate Attack, *Cement and Concrete Research*, 33, 987– 993.
- Morris, M.** (1987). Archaeology and technology, *Concrete International: Design & Construction*, 9 (12), 29–35.
- Morris, M.** (1991). The cast-in-place theory of pyramid construction, *Concrete International: Design & Construction*, 13 (8), 39–44.
- Morris, M.** (1992). Geopolymeric Pyramids: A Rebuttal to R. L. Folk and D. H. Campbell, *Journal of Geological Education*, 40, 28–39.
- Morris, M.** (1993). How not to analyze pyramid stone, *Journal of Geological Education*, 41, 364–369.
- Naaman, A. E.** (1991). *Proceedings of the International Workshop, SIFCON: Tailored Properties for Structural Performance*. Edited by Reinhardt, H. W. and Naaman A. E. RILEM. Published by E. & F. N. Spon, London.
- Nehdi, M. & Hayek, M.** (2005). Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity, *Cement and Concrete Research*, 35, 731–742.
- Neocleous, K., Tlemat, H., Pilakoutas, K.** (2006). Design issues for concrete reinforced with steel fibers, including fibers recovered from used tires, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (5), 677–685.
- Neville, A.** (2004). The confused world of sulfate attack on concrete, *Cement and Concrete Research*, 34 (8), 1275–1296. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.04.004
- Neville, A. M.** (2011). *Properties of Concrete*. 5th Edition, ISBN: 978-0-273-75580-7, Pearson Education Limited, Essex, England.
- Novais, R. M., Ascensão, G., Seabra, M. P., Labrincha, J. A.** (2016). Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers, *Waste Management*, 52, 245–255. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.04.003
- NT BUILD 443.** (1995). *Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration*. Nordtest, Espoo, Finland.
- NT BUILD 492.** (1999). *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments*. Nordtest, Espoo, Finland.
- Olivier, J. G. J. & Peters, J. A. H. W.** (2018). *Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2018 report* | PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. (December). Retrieved from <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2018-report>

- Onuaguluchi, O., Banthia, N.** (2018). Scrap tire steel fiber as a substitute for commercial steel fiber in cement mortar: Engineering properties and cost-benefit analyses, *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 248–256. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.03.014
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., Jalali, S.** (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1305–1314. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasit, P.** (2014). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Elsevier.
- Palomo, A., Fernández-Jimenez, A., Kovalchuck, G.** (2005). Some key factors affecting the alkali activation of fly ash, *2nd International Symposium of Non-Traditional Cement and Concrete*.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T.** (1999). Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement for the Future, *J. Cement Concrete Res.*, 29, 1323–1329.
- Panagiotopoulou, C. H., Kontori, E., Perraki, T. H., Kakali, G.** (2007). Dissolution of aluminosilicate minerals and by products in alkaline media, *Journal of Materials Science*, 42, 2967–2973.
- Papa, E., Medri, V., Amari, S., Manaud, J., Benito, P., Vaccari, A. ve diğ.** (2018). Zeolite–geopolymer composite materials: production and characterization, *J. Clean. Prod.*, 171, 76–84.
- Papakonstantinou, C. G. & Tobolski, M. J.** (2006). Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 36, 1686–1691.
- Pascual, A. B., Tognonvi, M. T., Tagnit-Hamou, A.** (2014). Waste glass powder-based alkali-activated mortar, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 15–19. DOI: 10.15623/ijret.2014.0325006
- Pilakoutas, K., Neocleous, K., Tlemat, H.** (2004). Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement, *Proceedings of the ICE: Engineering Sustainability*, 157 (3), 131–138. DOI: 10.1680/ensu.157.3.131.48644
- Portland Cement Association.** (2016). *USA Cement Industry Annual Yearbook*. 62.
- Prinsse, S.** (2017). *Alkali-activated concrete: development of material properties (strength and stiffness) and flexural behaviour of reinforced beams over time* (Yüksek Lisans Tezi). TU Delft, Hollanda.
- Provis, J. L. & Bernal, S. A.** (2014). Milestones in the analysis of alkali-activated binders, *J. Sust. Cem.-Based Mater.*, 2, 74–84.
- Provis, J. L., Bílek, V., Buchwald, A., Dombrowski-Daube, K., Varela, B.** (2014). Durability and Testing–Physical Processes. In J. L. Provis & J. S. J. Van Deventer (Eds.), *Alkali Activated Materials: State of the Art Report*, RILEM TC 224-AAM (pp. 277–307). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Provis, J. L., Palomo, A., Shi, C.** (2015). Advances in understanding alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*, 78A, 110–125.
- Provis, J. L., Van Deventer, J. S. J.** (2014). Alkali-activated materials: State-of-the-Art report, *RILEM, TC 224-AAM*.
- Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J. S., Rico, A., Rodriguez, J.** (2011). A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements, *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 2043–2056.
- Puertas, F. & Torres-Carrasco, M.** (2014). Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation, *Cem. Concr. Res.*, 57, 95–104. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.12.005
- Puertas, F., Torres-Carrasco, M., Alonso, M. M.** (2015). Reuse of urban and industrial waste glass as novel activator for alkali-activated slag cement pastes: a case study. In: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering (Ed.), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*.
- Rabiaa, E., Mohamed, R. A. S., Sofi, W. H., Tawfik, T. A.** (2020). Developing Geopolymer Concrete Properties by Using Nanomaterials and Steel Fibers, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID: 5186091, 12 pages. DOI: 10.1155/2020/5186091
- Rajamane, N. P., Nataraja, M. C., Lakshmanan, N., Dattatreya, J. K.** (2011). Rapid chloride permeability test on geopolymer and Portland cement concretes, *The Indian Concrete Journal*, 85 (10), 21–26.
- Rakhimov, R. Z., Rakhimova, N. R., Gaifullin, A. R.** (2017) Influence of the addition of dispersed fine polymineral calcined clays on the properties of Portland cement paste, *Adv. Cem. Res.*, 29 (1), 29–32.
- Rakhimova, N. R.** (2015). Properties and microstructural characteristics of alkali-activated slag-blended cements, *Roman J. Mater.*, 45 (2), 105–116.
- Rakhimova, N. R. & Rakhimov, R. Z.** (2014). A review on alkali-activated slag cements incorporated with supplementary materials, *J. Sust. Cem.-Based Mater.*, 3 (1), 61–74.
- Rakhimova, N. R. & Rakhimov, R. Z.** (2019). Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – a review, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (1), 1522–1531.
- Rangan, B. V., Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, M. J.** (2005). Studies on fly ash-based geopolymer concrete, *Proceedings of World Congress, Geopolymer 2005*, France.
- Rao, H. S., Ghorpade, V. G., Ramana, N. V., Ganeswar, K.** (2010). Response of SIFCON two-way slabs under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 37, 452–458.
- Rashad, A. M.** (2013). Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer—an overview, *Construction and Building Materials*, 41, 751–765.

- Rashad, A. M.** (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash, *Mater. Des.*, 53, 1005–1025.
- Rashad, A. M., Zeedan, S. R.** (2011). The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load, *Construction and Building Materials*, 25 (7), 3098–3107. 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.044
- Reinhardt, H. W. & Fritz, C.** (1989). Optimization of SIFCON mix. In R. N. Swamy & B. Barr (Eds.), *Fibre Reinforced Cement and Concretes: Recent developments*, (pp. 11–20). Taylor & Francis Group. ISBN: 1-85166-415-7.
- Reschner, K.** (2008). Scrap Tire Recycling, A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. Retrieved from http://www.entire-engineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf
- RILEM.** (1985). *Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*. In: *Mat. Str.* 18: 287–290.
- Richardson, I. G.** (1999). The nature of C-S-H in hardened cements, *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1131–1147.
- Richardson, I. G., Brough, A. R., Groves, G. W., Dobson, C. M.** (1994). The characterization of hardened alkali-activated blast furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H) phase, *Cement and Concrete Research*, 24 (5), 813–829.
- Robayo-Salazar, R. A., Rivera, J. F., Mejía de Gutiérrez, R.** (2017). Alkali-activated building materials made with recycled construction and demolition wastes, *Construction and Building Materials*, 149, 130–138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.122
- Roller, C., Mayrhofer, C., Riedel, W., Thoma, K.** (2013). Residual load capacity of exposed and hardened concrete columns under explosion loads, *Engineering Structures*, 55, 66–72. DOI: 10.1016/J.Engstruct. 2011.12.004
- Rooholamini, H., Bayat, A., Kazemian, F.** (2020). Mechanical and fracture properties of alkali activated concrete containing different pozzolanic materials, *Road Materials and Pavement Design*. DOI: 10.1080/14680629.2020.1845783
- Rossi, G. & Forchielli, L.** (1976). Struttura porosa ed assorbimento di cake di alcune pozzolane naturali italiane, *Il Cemento*, 73, 215–221.
- Rovnanik, P.** (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 24, 1176–1183.
- Roy, D. M.** (1999). Alkali-Activated Cements, Opportunities and Challenges, *Cement and Concrete Research*, 29 (2), 249–254.

- Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A.** (2012). Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates, *Cement and Concrete Research*, 42 (9), 1242–1251. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.05.019
- Sa Ribeiro, R. A., Sa Ribeiro, M. G., Kriven, W. M.** (2017). A review of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites, *J. Ceram. Sci. Technol.*, 8 (3), 307–322.
- Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., Maallem, M.** (2013). The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 43, 436–442.
- Salihpaşaoğlu, F.** (2017). *Ferrokrom cüruf agregasının betonun mekanik özelliklerine etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sasindran, C. N. & Muñoz-San José, V.** (2017). Effect of glass powder on geopolymer concrete, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8 (3), 1317–1320.
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., Maity, S.** (2018). Calcined clay limestone cements (LC³), *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017
- Sekar, T.** (2004). Fibre reinforced concrete from industrial waste fibres-a feasibility study, *Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division*, 84, 287–290.
- Shi, C.** (2001). An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28 (5), 778–786. DOI: 10.1139/l01-041
- Shi, C. & Day, R. L.** (1993a). Acceleration of strength gain of lime-pozzolan cements by thermal activation, *Cement and Concrete Research*, 23, 824–832.
- Shi, C. & Day, R. L.** (1993b). Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans, *Cement and Concrete Research*, 23 (6), 1389–1396. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90076-L
- Shi, C. & Day, R. L.** (2000a). Pozzolan reaction in the presence of chemical activators: Part I. Reaction kinetics, *Cement and Concrete Research*, 30 (1), 51–58. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00205-7
- Shi, C. & Day, R. L.** (2000b). Pozzolan reaction in the presence of chemical activators: Part II. Reaction products and mechanism, *Cement and Concrete Research*, 30 (4), 607–613. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00214-3
- Shi, C. & Day, R. L.** (2001). Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans, *Cement and Concrete Research*, 31 (5), 813–818. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00481-1
- Shi, C., Roy, D., Krivenko, P.** (2003). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. London: CRC Press. DOI: 10.1201/9781482266900

- Smith, W. F.** (1996). *Principles of materials science and engineering*, 3rd Edition, Chapter 3.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., Rangan, B. V.** (2006). Fly ash-based geopolymer concrete: study of slender reinforced columns, *J. Mater. Sci.* DOI: 10.1007/s10853-006-0523-8.
- Sun, P.** (2005). *Fly ash based inorganic polymeric building material* (Doktora Tezi).
- Swanepoel, J. C. & Strydom, C. A.** (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, *Journal of Applied Geochemistry*, 17, 1143–1148.
- Šimonová, H., Kucharczyková, B., Bílek Jr., V., Topolář, L., Kocáb, D.** (2019). Influence of curing conditions on mechanical and fracture properties of alkali activated slag concrete, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 660 (012004). DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012004
- Šimonová, H., Zahálková, J., Rovnaníková, P., Bayer, P., Keršner, Z., Schmid, P.** (2017). Mechanical fracture parameters of cement based mortars with waste glass powder, *Procedia Engineering*, 190, 86–91. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.311. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817324517>
- Şengül, Ö.** (2014). Use of electrical resistivity as an indicator for durability, *Construction and Building Materials*, 73, December, 434–441. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077
- Şengül, Ö.** (2016). Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires, *Construction and Building Materials*, 122, 649–658. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.113
- Şengül, Ö.** (2018). Mechanical properties of slurry infiltrated fiber concrete produced with waste steel fibers, *Construction and Building Materials*, 186, 1082–1091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.042
- Tabak, V.** (2004). *Çelik Lifli Betonda Lif ve Lif Boy/Çap Oranlarının Değişiminin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Tang, L. & Sørensen, H. E.** (2001). Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete, *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 34 (October 2001), 479–485.
- Tashima, M. M., Reig, L., Santini Jr, M. A., Moraes, J. C. B., Akasaki, J. L., Payá, J., Borrachero, M. V., Soriano, L.** (2016). Compressive strength and microstructure of alkali-activated blast furnace slag/sewage sludge ash (GGBS/SSA) blends cured at room temperature, *Waste and Biomass Valorization*, 8 (5), 1441–1451. DOI: 10.1007/s12649-016-9659-1
- Taylor, H. F. W., Famy, C., Scrivener, K. L.** (2001). Delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, 31 (5), 683–693. DOI: 10.1016/S0008-8846(01)00466-5

- Tänzer, R., Buchwald, A., Stephan, D.** (2015). Effect of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag, *Materials and Structures*, 48, 629–641. DOI: 10.1617/s11527-014-0461-x
- Techner, S. & Pernoux, T.** (1951). *Clay Miner. Bull.*, 1, p. 145.
- Tennakoon, C., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., Sanjayan, J. G.** (2014). Influence and role of feedstock Si and Al content in geopolymer synthesis, *J. Sust. Cem.-Based Mater.*, 4 (2), 129–139.
- Thomas, R. J. & Peethamparan, S.** (2015) Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress–strain behavior, *Construction and Building Materials*, 93, 49–56.
- Tlemat, H., Pilakoutas, K., Neocleous, K.** (2006). Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres, *Materials and Structures*, 39 (3), 365–377.
- Toniolo, N., Rincón, A., Roether, J. A., Ercole, P., Bernardo, E., Boccaccini, A. R.** (2018). Extensive reuse of soda-lime waste glass in fly ash-based geopolymers, *Construction and Building Materials*, 188, 1077–1084. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.096
- Topçu, İ. B. & Canbaz, M.** (2008). Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufllu harçlarda donma çözülme, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21 (2), 1–16.
- Topçu, İ. B. & Karakurt, C.** (2007). Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Çimento Üretiminde Katkı Olarak Kullanımı, 7. *Ulusal Beton Kongresi*, İzmir, Türkiye.
<<http://izmir.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/3166.pdf>>
- Torres-Carrasco, M. & Puertas, F.** (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation, *Journal of Cleaner Production*, 90, 397–408. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.074
- Torres-Carrasco, M. & Puertas, F.** (2017a). Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers, *Revista Ingeniería de Construcción*, 32 (2), 5–12. DOI: 10.4067/S0718-50732017000200001
- Torres-Carrasco, M. & Puertas, F.** (2017b). Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products, *Construction and Building Materials*, 139, 342–354. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.071
- Torres-Carrasco, M., Rodríguez-Puertas, C., Del Mar Alonso, M., Puertas, F.** (2015). Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour, *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54 (2), 45–57. DOI: 10.1016/j.bsecv.2015.03.004
- Torres, J. J., Palacios, M., Hellouin, M., Puertas, F.** (2009). Alkaline chemical activation of urban glass wastes to produce cementitious materials, *1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco – Energy*, 12-13 November, 111–114.

- Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H., Baradan, B.** (2003). Uçucu kül içeren çimento harçlarının sülfat dayanıklılığının incelenmesi, *V. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul.
- TS 3526** (1980). *Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1008** (2003). *Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dâhil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1** (2012). *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1** (2012). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-2** (1996). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler kısım 2: Tane boyutu dağılım tayini-Deney elekleri, elek göz açıklıklarını anma büyüklükleri*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuyan, M. & Yazıcı, H.** (2012). Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix, *Construction and Building Materials*, 35, 571–577.
- Url-1** <http://www.durkutlar.com/upload/lastik_nedir.gif>, erişim tarihi 09.06.2015.
- Url-2** <<https://www.koraykimya.com/sodyum-silikat>>, erişim tarihi 09.07.2020.
- Url-3** <<http://www.perhabbe.com/Teknik-Bilgiler,s11.html>>, erişim tarihi 09.7.2020.
- Url-4** <<http://www.europeanrecycle.com/it/steelwire/steel-tire-wire/>>, erişim tarihi 06.12.2020.
- Url-5** <<https://www.burcmmpc.com/karboncelik.html>>, erişim tarihi 10.12.2020.
- Vafaei, M. & Allahverdi, A.** (2017). High strength geopolymer binder based on waste-glass powder, *Advanced Powder Technology*, 28, 215–222. DOI: 10.1016/j.appt.2016.09.034
- Vaitkevičius, V., Šerelis, E., Hilbig, H.** (2014). The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 68, 102–109. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.101
- Valcke, S. L. A., Polder, R. B., Beijersbergen von Henegouwen, H. J. F.** (2012). Understanding transport properties of geopolymer mortar using polarization and fluorescence microscopy, *International Congress on Durability of Concrete*, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom.
- Van Deventer, J., Provis, J., Duxson, P., Brice, D.** (2010). Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials, *Waste Biomass Valor.*, 1, 145–155.
- Van Deventer, J. S., Provis, J. L., Duxson, P., Lukey, G. C.** (2007). Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products, *Journal of Hazardous Materials*, 139 (3), 506–513.

- Van Deventer, J. S., Van Jaarsveld, J. G. S., Lukey, G. C.** (1989). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinit based geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, 1 (3), 63–73.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Lorenzen, L.** (1998). Factors effecting the immobilisation of metals in geopolymerised fly ash, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 29, 283–291.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Lukey, G. C.** (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers, *J. Chem. Eng.*, 89, 63–73.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Schwartzman, A.** (1999). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics, *J. Mineral. Eng.*, 12 (1), 75–91.
- Vinai, R. & Soutsos, M.** (2019). Production of sodium silicate powder from waste glass cullet for alkali activation of alternative binders, *Cement and Concrete Research*, 116, 45–56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.11.008
- Wang, C. C., Wang, H. Y., Chen, B. T., Peng, Y. C.** (2017). Study on the engineering properties and prediction models of an alkali-activated mortar material containing recycled waste glass, *Construction and Building Materials*, 132, 130–141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.103
- Wang, S. D. & Scrivener, K. L.** (1995). Hydration products of alkali activated slag cement, *Cement and Concrete Research*, 25 (3), 561–571.
- Wang, S. D., Scrivener, K. L., Pratt, P. L.** (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag, *Cement and Concrete Research*, 24 (6), 1033–1043.
- Wang, W. C., Chen, B. T., Wang, H. Y., Chou, H. C.** (2016). A study of the engineering properties of alkali-activated waste glass material (AAWGM), *Construction and Building Materials*, 112, 962–969. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.022
- Wang, Y., Liu, X., Zhang, W., Li, Z., Zhang, Y., Li, Y., Ren, Y.** (2020). Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer, *Journal of Cleaner Production*, 244, No. 118852.
- Wang, Y., Wu, H. C., Li, V. C.** (2000). Concrete reinforcement with recycled fibers, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12 (4), 314–319.
- Wecharatana, M. & Lin, S.** (1992). Tensile Properties of High Performance Fiber Reinforced Concrete, in RILEM Proceedings 15, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, H. W. Reinhardt and A. E. Naaman, Editors, E. & F. N. Spon, London, 248–258.
- Xie, T. & Özbakkaloğlu, T.** (2015). Behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete-filled FRP tube columns under axial compression, *Engineering Structures*, 90, 158–171.

- Xu, H. & Van Deventer, J. S. J.** (2000). The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59 (3), 247–266.
- Xu, H. & Van Deventer, J. S. J.** (2002). Geopolymerisation of Multiple Minerals, *Minerals Engineering*, 15 (12), 1131–1139.
- Yalçınkaya, Ç., Beglarigale, A., Yazıcı, H.** (2013). SIFCON Matrisi - Çelik Lif Aderansına Metakaolinin ve Lif Geometrisinin Etkisi. *II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, (s. 298–308). Kuşadası, Aydın.
- Yan, A., Wu, K., Zhang, X.** (2002). A quantitative study on the surface crack pattern of concrete with high content of steel fiber, *Cement and Concrete Research*, 32, 1371–1375.
- Yang, J., Peng, G., Shui, G.** (2019). Mechanical properties of recycled steel fiber reinforced ultra-high-performance concrete, *AMCS*, 36 (8), 1949–1956.
- Yang, K. H., Song, J. K., Song, K. I.** (2013). Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete, *Journal of Cleaner Production*, 39, 265–272. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.08.001
- Yaşar, H.** (2000). *Plastikler dünyası*, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Yayın No:142-2.
- Yazıcı, H.** (2006). Yüksek fırın cürufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8 (1), 51–58.
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Aydın, S., Baradan, B.** (2005). Autoclaved SIFCON with high volume Class C fly ash binder phase, *Cement and Concrete Research*, 36, 481–486.
- Yerlikaya, M.** (2003). Çelik Tel Donatılı Betonların Deprem Etkisi Altında Davranışları, *Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 302–304.
- Yeşilyurt, E.** (2013). *Isıl işlem görmüş ham perlit ile yeni nesil yapı malzemesi geliştirilmesi* (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yool, D. Y. & Banthia, N.** (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber reinforced concrete: a review, *Cem. Concr. Compos.*, 73, 267–280.
- Yool, D. Y., Banthia, N., Kang, S. T., Yoon, Y. S.** (2016). Size effect in ultra-high-performance concrete beams, *Eng. Fract. Mech.*, 157, 86–106.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Al Bakri, M. M., Hussin, K.** (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review, *Progr. Mater. Sci.*, 83, 595–629.
- Zhang, S., Keulen, A., Arbi, K., Ye, G.** (2017). Waste glass as partial mineral precursor in alkali-activated slag/fly ash system, *Cement and Concrete Research*, 102, 29–40. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.012

- Zhang, Y. & Gao, L.** (2020). Influence of Tire-Recycled Steel Fibers on Strength and Flexural Behavior of Reinforced Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2020, 6363105. DOI: 10.1155/2020/6363105
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H.** (2014). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence, *Cement and Concrete Research*, 64, 30–41.
- Zheng, K.** (2016). Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Composites*, 67, 30–38. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.008



EKLER

EK A: Çelik Tellerin Boy-Çap Ölçümleri ve SIFCONların Yük-Sehim Grafikleri





EK A

Çelik Tellerin Boy-Çap Ölçümleri ve SIFCONların Yük-Sehim Grafikleri

Çizelge A.1 : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (A firması).

#	A Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
1	15,33	47,00	0,291	52,68	161,51
2	12,06	38,00	0,210	57,43	180,95
3	28,20	34,67	0,398	70,85	87,11
4	56,18	59,18	0,349	160,97	169,57
5	116,65	133,16	0,651	179,19	204,55
6	83,62	97,66	0,355	235,55	275,10
7	30,76	51,83	0,330	93,21	157,06
8	40,13	41,57	0,318	126,19	130,72
9	31,95	35,44	0,189	169,05	187,51
10	42,96	45,23	0,192	223,75	235,57
11	38,86	39,88	0,293	132,63	136,11
12	14,72	34,10	0,171	86,08	199,42
13	20,09	35,55	0,277	72,53	128,34
14	27,71	30,00	0,166	166,93	180,72
15	34,22	41,66	0,126	271,59	330,63
16	19,25	20,20	0,248	77,62	81,45
17	36,71	54,48	0,139	264,10	391,94
18	40,54	41,98	0,121	335,04	346,94
19	21,69	41,84	0,090	241,00	464,89
20	25,94	33,18	0,076	341,32	436,58
21	42,04	54,13	0,053	793,21	1021,32
22	40,15	42,67	0,183	219,40	233,17
23	27,66	48,41	0,101	273,86	479,31
24	31,04	32,70	0,080	388,00	408,75
25	12,21	50,47	0,087	140,34	580,11
26	22,77	53,08	0,247	92,19	214,90
27	18,10	31,74	0,047	385,11	675,32
28	25,46	31,04	0,163	156,20	190,43
29	43,38	58,69	0,164	264,51	357,87
30	37,65	38,59	0,149	252,68	258,99
31	39,33	46,32	0,146	269,38	317,26

Çizelge A.1 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (A firması).

#	A Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
32	72,47	94,83	0,132	549,02	718,41
33	49,01	67,17	0,149	328,93	450,81
34	31,05	47,03	0,016	1940,63	2939,38
35	24,54	41,83	0,031	791,61	1349,35
36	4,47	15,57	0,070	63,86	222,43
37	33,15	56,68	0,160	207,19	354,25
38	51,09	61,30	0,052	982,50	1178,85
39	36,04	50,81	0,077	468,05	659,87
40	29,16	32,06	0,081	360,00	395,80
41	31,27	45,13	0,187	167,22	241,34
42	19,54	34,63	0,198	98,69	174,90
43	17,57	19,36	0,161	109,13	120,25
44	51,63	68,78	0,297	173,84	231,58
45	27,99	36,22	0,306	91,47	118,37
46	31,03	38,26	0,187	165,94	204,60
47	28,25	33,42	0,311	90,84	107,46
48	39,79	43,00	0,197	201,98	218,27
49	15,97	34,34	0,207	77,15	165,89
50	34,78	57,89	0,334	104,13	173,32
51	16,11	27,30	0,171	94,21	159,65
52	33,37	35,66	0,156	213,91	228,59
53	20,93	34,38	0,346	60,49	99,36
54	16,76	34,81	0,200	83,80	174,05
55	33,30	39,22	0,342	97,37	114,68
56	13,80	26,10	0,309	44,66	84,47
57	10,59	21,85	0,292	36,27	74,83
58	33,76	35,63	0,232	145,52	153,58
59	50,55	53,34	0,299	169,06	178,39
60	31,54	34,74	0,307	102,74	113,16
61	32,32	41,03	0,218	148,26	188,21
62	33,52	40,36	0,302	110,99	133,64
63	44,00	49,07	0,205	214,63	239,37
64	34,69	35,36	0,323	107,40	109,47
65	20,67	21,16	0,316	65,41	66,96
66	28,82	30,14	0,313	92,08	96,29
67	38,56	47,19	0,327	117,92	144,31
68	46,18	60,01	0,147	314,15	408,23
69	39,41	42,46	0,205	192,24	207,12
70	44,55	51,78	0,312	142,79	165,96
71	38,82	42,18	0,330	117,64	127,82

Çizelge A.1 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (A firması).

#	A Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
72	34,77	36,46	0,310	112,16	117,61
73	41,77	42,20	0,307	136,06	137,46
74	41,38	43,02	0,292	141,71	147,33
75	15,96	28,18	0,316	50,51	89,18
76	32,69	45,14	0,306	106,83	147,52
77	30,79	36,42	0,311	99,00	117,11
78	20,79	26,34	0,310	67,06	84,97
79	20,61	22,65	0,317	65,02	71,45
80	21,26	34,14	0,185	114,92	184,54
81	25,57	30,99	0,271	94,35	114,35
82	34,63	37,66	0,317	109,24	118,80
83	22,17	45,66	0,309	71,75	147,77
84	17,12	19,00	0,160	107,00	118,75
85	24,67	26,17	0,211	116,92	124,03
86	29,21	32,37	0,222	131,58	145,81
87	17,40	24,96	0,193	90,16	129,33
88	10,56	11,93	0,174	60,69	68,56
89	15,74	17,34	0,189	83,28	91,75
90	16,14	28,89	0,125	129,12	231,12
91	15,57	19,22	0,165	94,36	116,48
92	33,31	39,78	0,190	175,32	209,37
93	18,21	18,91	0,284	64,12	66,58
94	35,42	38,07	0,268	132,16	142,05
95	33,30	38,31	0,315	105,71	121,62
96	24,60	26,71	0,172	143,02	155,29
97	12,91	55,58	0,277	46,61	200,65
98	29,54	38,96	0,128	230,78	304,38
99	8,04	21,60	0,234	34,36	92,31
100	17,96	33,59	0,108	166,30	311,02

Çizelge A.2 : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (B firması).

#	B Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
1	73,67	78,10	0,879	83,81	88,85
2	98,76	115,27	1,289	76,62	89,43
3	170,00	190,00	1,250	136,00	152,00
4	32,25	38,03	0,338	95,41	112,51
5	56,74	67,72	0,904	62,77	74,91
6	86,78	111,07	0,948	91,54	117,16
7	92,13	99,37	0,954	96,57	104,16
8	97,34	104,17	1,237	78,69	84,21
9	88,13	88,32	0,940	93,76	93,96
10	63,58	99,56	0,857	74,19	116,17
11	45,27	46,26	0,949	47,70	48,75
12	52,64	69,31	1,219	43,18	56,86
13	62,24	75,20	0,841	74,01	89,42
14	75,62	86,39	1,208	62,60	71,51
15	61,29	83,80	0,914	67,06	91,68
16	58,29	59,10	0,925	63,02	63,89
17	76,77	88,47	1,217	63,08	72,70
18	86,70	101,30	1,188	72,98	85,27
19	62,93	86,87	0,856	73,52	101,48
20	76,52	87,26	0,943	81,15	92,53
21	72,31	88,84	0,834	86,70	106,52
22	46,39	59,95	0,927	50,04	64,67
23	74,57	84,78	0,928	80,36	91,36
24	99,18	131,36	1,201	82,58	109,38
25	68,29	79,58	1,150	59,38	69,20
26	75,33	99,80	0,850	88,62	117,41
27	77,47	90,62	0,944	82,07	96,00
28	74,69	88,94	0,945	79,04	94,12
29	62,05	71,83	1,175	52,81	61,13
30	63,77	73,55	1,147	55,60	64,12
31	76,68	85,95	0,836	91,72	102,81
32	91,69	103,28	1,227	74,73	84,17
33	52,02	68,80	0,978	53,19	70,35
34	143,93	150,90	1,233	116,73	122,38
35	119,43	136,07	0,939	127,19	144,91
36	61,85	80,47	0,858	72,09	93,79
37	76,32	85,21	1,179	64,73	72,27

Çizelge A.2 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (B firması).

#	B firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
38	50,20	63,75	0,932	53,86	68,40
39	126,35	143,63	1,215	103,99	118,21
40	78,57	106,21	0,848	92,65	125,25
41	86,99	93,62	1,228	70,84	76,24
42	66,42	76,76	0,853	77,87	89,99
43	20,30	48,18	0,238	85,29	202,44
44	35,53	45,55	0,321	110,69	141,90
45	19,06	34,94	0,238	80,08	146,81
46	15,27	18,70	0,164	93,11	114,02
47	57,29	79,08	1,012	56,61	78,14
48	51,11	60,55	0,976	52,37	62,04
49	78,84	123,23	1,255	62,82	98,19
50	57,36	83,32	0,934	61,41	89,21
51	56,15	65,99	0,905	62,04	72,92
52	34,38	48,22	0,239	143,85	201,76
53	115,37	129,73	0,886	130,21	146,42
54	105,65	118,21	1,161	91,00	101,82
55	62,87	81,01	0,850	73,96	95,31
56	63,41	71,67	0,979	64,77	73,21
57	43,13	52,77	0,839	51,41	62,90
58	74,37	90,62	1,238	60,07	73,20
59	95,85	105,26	1,174	81,64	89,66
60	74,04	90,23	0,927	79,87	97,34
61	69,79	81,52	0,909	76,78	89,68
62	49,18	56,84	1,270	38,72	44,76
63	69,11	79,55	0,938	73,68	84,81
64	28,44	49,70	0,849	33,50	58,54
65	91,24	98,98	0,908	100,48	109,01
66	96,08	103,21	0,858	111,98	120,29
67	61,58	72,74	0,847	72,70	85,88
68	105,99	128,50	0,908	116,73	141,52
69	82,17	88,38	1,187	69,22	74,46
70	66,23	81,69	0,856	77,37	95,43
71	76,87	81,97	1,241	61,94	66,05
72	102,83	109,29	0,932	110,33	117,26
73	112,12	130,88	1,201	93,36	108,98
74	60,48	69,29	0,919	65,81	75,40
75	37,23	78,29	0,893	41,69	87,67

Çizelge A.2 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (B firması).

#	B firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
76	107,93	123,21	1,289	83,73	95,59
77	77,70	119,09	1,240	62,66	96,04
78	67,73	78,78	0,920	73,62	85,63
79	111,20	125,16	0,885	125,65	141,42
80	43,00	48,23	0,253	169,96	190,63
81	64,21	74,37	0,848	75,72	87,70
82	120,7	137,31	1,125	107,29	122,05
83	85,98	96,47	0,902	95,32	106,95
84	30,22	45,07	0,298	101,41	151,24
85	21,95	38,28	0,234	93,80	163,59
86	102,14	111,79	1,116	91,52	100,17
87	99,50	118,07	1,187	83,82	99,47
88	88,10	101,48	1,193	73,85	85,06
89	82,62	99,53	0,896	92,21	111,08
90	101,95	108,59	0,814	125,25	133,40
91	88,17	95,61	1,658	53,18	57,67
92	24,03	45,52	0,246	97,68	185,04
93	71,43	82,56	1,228	58,17	67,23
94	60,62	69,06	0,874	69,36	79,02
95	61,01	69,51	0,931	65,53	74,66
96	61,56	75,74	0,814	75,63	93,05
97	87,07	95,88	1,260	69,10	76,10
98	70,46	78,05	1,144	61,59	68,23
99	69,27	81,57	0,857	80,83	95,18
100	108,20	120,10	1,151	94,01	104,34

Çizelge A.3 : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (C firması).

#	C Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
1	58,37	71,75	0,347	168,21	206,77
2	53,59	110,33	0,336	159,49	328,36
3	51,85	59,20	0,219	236,76	270,32
4	5,82	11,93	0,306	19,02	38,99
5	20,64	48,93	0,310	66,58	157,84
6	50,84	58,63	0,170	299,06	344,88
7	46,59	48,50	0,310	150,29	156,45
8	26,02	27,89	0,137	189,93	203,58
9	40,32	48,29	0,308	130,91	156,79
10	26,39	43,04	0,178	148,26	241,80
11	38,52	40,54	0,281	137,08	144,27
12	34,62	40,62	0,310	111,68	131,03
13	35,64	52,07	0,302	118,01	172,42
14	8,03	29,04	0,315	25,49	92,19
15	30,63	42,78	0,181	169,23	236,35
16	24,33	62,03	0,311	78,23	199,45
17	11,35	13,04	0,141	80,50	92,48
18	32,28	49,32	0,176	183,41	280,23
19	29,26	45,39	0,299	97,86	151,81
20	15,29	42,13	0,268	57,05	157,20
21	31,32	35,28	0,249	125,78	141,69
22	34,28	39,50	0,279	122,87	141,58
23	12,89	16,88	0,264	48,83	63,94
24	24,83	31,25	0,271	91,62	115,31
25	37,95	38,44	0,168	225,89	228,81
26	48,29	53,66	0,265	182,23	202,49
27	43,52	50,08	0,139	313,09	360,29
28	16,16	24,78	0,276	58,55	89,78
29	36,66	38,41	0,284	129,08	135,25
30	31,82	37,40	0,275	115,71	136,00
31	16,53	20,40	0,280	59,04	72,86
32	13,86	21,14	0,277	50,04	76,32
33	23,02	34,79	0,133	173,08	261,58
34	13,31	16,68	0,141	94,40	118,30
35	8,02	19,06	0,273	29,38	69,82
36	5,82	13,67	0,171	34,04	79,94
37	39,63	49,19	0,143	277,13	343,99

Çizelge A.3 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (C firması).

#	C Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
38	41,05	50,58	0,303	135,48	166,93
39	51,32	70,34	0,138	371,88	509,71
40	41,20	45,43	0,284	145,07	159,96
41	20,15	20,48	0,281	71,71	72,88
42	32,94	39,17	0,138	238,70	283,84
43	45,10	52,46	0,256	176,17	204,92
44	41,22	45,94	0,281	146,69	163,49
45	53,39	56,50	0,182	293,35	310,44
46	5,94	34,40	0,128	46,41	268,75
47	5,67	31,38	0,168	33,75	186,79
48	27,31	32,61	0,295	92,58	110,54
49	24,50	26,67	0,265	92,45	100,64
50	19,24	24,74	0,156	123,33	158,59
51	37,87	39,26	0,276	137,21	142,25
52	48,13	54,21	0,289	166,54	187,58
53	40,56	55,32	0,301	134,75	183,79
54	32,43	35,43	0,282	115,00	125,64
55	42,62	48,69	0,187	227,91	260,37
56	32,81	46,76	0,285	115,12	164,07
57	15,54	25,79	0,279	55,70	92,44
58	49,38	58,55	0,168	293,93	348,51
59	22,06	31,46	0,302	73,05	104,17
60	26,90	35,86	0,147	182,99	243,95
61	21,31	27,41	0,321	66,39	85,39
62	43,32	57,66	0,169	256,33	341,18
63	19,54	52,71	0,185	105,62	284,92
64	38,27	55,05	0,309	123,85	178,16
65	33,20	38,46	0,315	105,40	122,10
66	25,33	32,22	0,158	160,32	203,92
67	38,76	56,25	0,170	228,00	330,88
68	60,33	65,39	0,310	194,61	210,94
69	29,94	32,47	0,308	97,21	105,42
70	20,33	25,37	0,179	113,58	141,73
71	21,87	30,95	0,160	136,69	193,44
72	45,98	48,35	0,296	155,34	163,34
73	51,49	118,60	0,289	178,17	410,38
74	60,64	70,42	0,303	200,13	232,41
75	18,03	68,13	0,182	99,07	374,34

Çizelge A.3 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (C firması).

#	C Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
76	39,30	44,82	0,183	214,75	244,92
77	27,04	31,74	0,300	90,13	105,80
78	43,11	55,55	0,317	135,99	175,24
79	15,47	28,10	0,161	96,09	174,53
80	25,48	32,46	0,294	86,67	110,41
81	60,47	64,64	0,301	200,90	214,75
82	45,14	60,46	0,304	148,49	198,88
83	31,07	45,25	0,271	114,65	166,97
84	31,00	33,51	0,181	171,27	185,14
85	37,46	40,77	0,155	241,68	263,03
86	38,01	42,71	0,322	118,04	132,64
87	29,11	48,05	0,291	100,03	165,12
88	24,92	32,98	0,310	80,39	106,39
89	31,99	34,79	0,181	176,74	192,21
90	45,78	52,18	0,292	156,78	178,70
91	41,83	60,29	0,299	139,90	201,64
92	26,52	27,85	0,182	145,71	153,02
93	33,71	37,47	0,173	194,86	216,59
94	15,83	29,20	0,127	124,65	229,92
95	27,57	31,33	0,188	146,65	166,65
96	27,74	30,73	0,175	158,51	175,60
97	23,36	33,80	0,140	166,86	241,43
98	24,14	26,49	0,298	81,01	88,89
99	19,02	20,26	0,119	159,83	170,25
100	11,92	52,52	0,267	44,64	196,70

Çizelge A.4 : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (D firması).

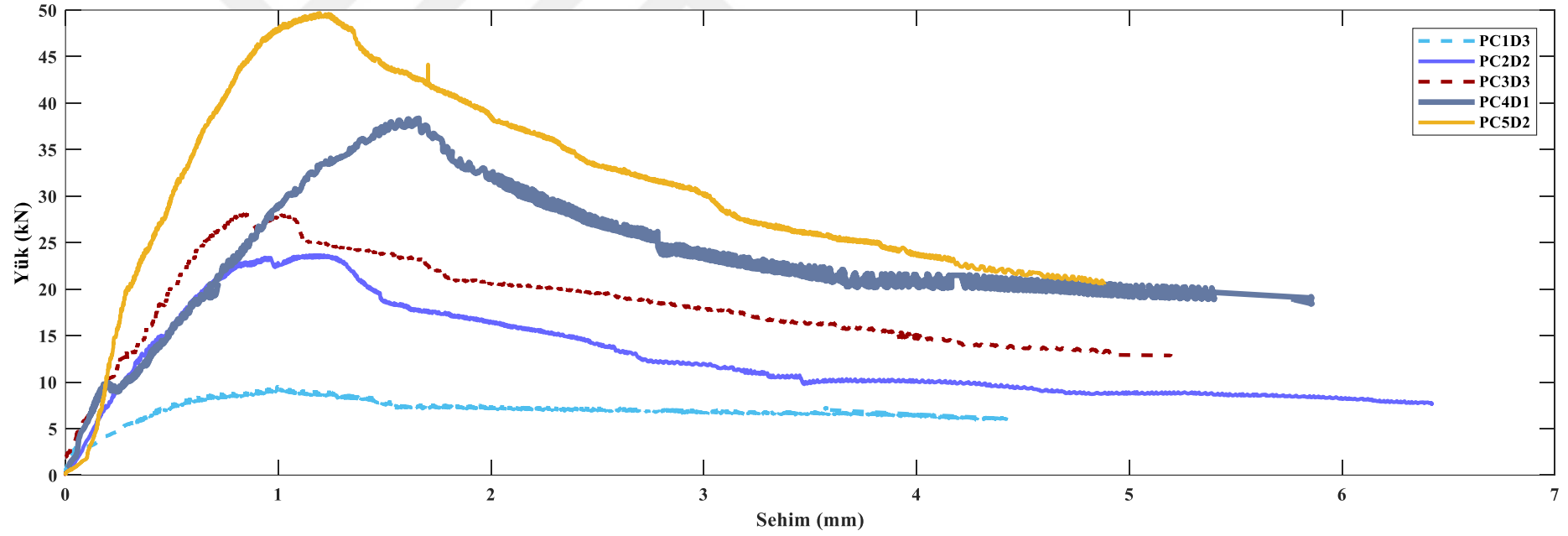
#	D Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
1	29,09	36,61	0,207	140,53	176,86
2	20,19	25,50	0,326	61,93	78,22
3	39,98	45,02	0,322	124,16	139,81
4	25,41	36,94	0,348	73,02	106,15
5	43,81	49,95	0,336	130,39	148,66
6	30,54	38,36	0,283	107,92	135,55
7	21,27	26,06	0,213	99,86	122,35
8	22,83	24,78	0,160	142,69	154,88
9	33,64	37,16	0,337	99,82	110,27
10	34,73	36,93	0,385	90,21	95,92
11	33,57	38,18	0,350	95,91	109,09
12	14,17	26,70	0,227	62,42	117,62
13	24,66	27,19	0,291	84,74	93,44
14	19,84	32,88	0,329	60,30	99,94
15	11,27	15,63	0,232	48,58	67,37
16	26,81	30,06	0,280	95,75	107,36
17	22,20	23,74	0,212	104,72	111,98
18	18,24	27,15	0,359	50,81	75,63
19	42,66	49,07	0,340	125,47	144,32
20	28,27	32,80	0,373	75,79	87,94
21	34,04	55,36	0,301	113,09	183,92
22	39,79	61,80	0,219	181,69	282,19
23	29,63	32,67	0,958	30,93	34,10
24	27,59	35,91	0,331	83,35	108,49
25	37,14	38,24	0,302	122,98	126,62
26	21,83	30,87	0,379	57,60	81,45
27	23,33	28,98	0,317	73,60	91,42
28	30,30	34,63	0,350	86,57	98,94
29	30,35	35,83	0,168	180,65	213,27
30	29,26	32,69	0,233	125,58	140,30
31	42,39	68,22	0,360	117,75	189,50
32	36,00	38,74	0,272	132,35	142,43
33	21,47	24,44	0,357	60,14	68,46
34	34,25	38,61	0,281	121,89	137,40
35	24,16	26,46	0,254	95,12	104,17
36	32,86	37,32	0,223	147,35	167,35
37	46,33	49,90	0,322	143,88	154,97

Çizelge A.4 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (D firması).

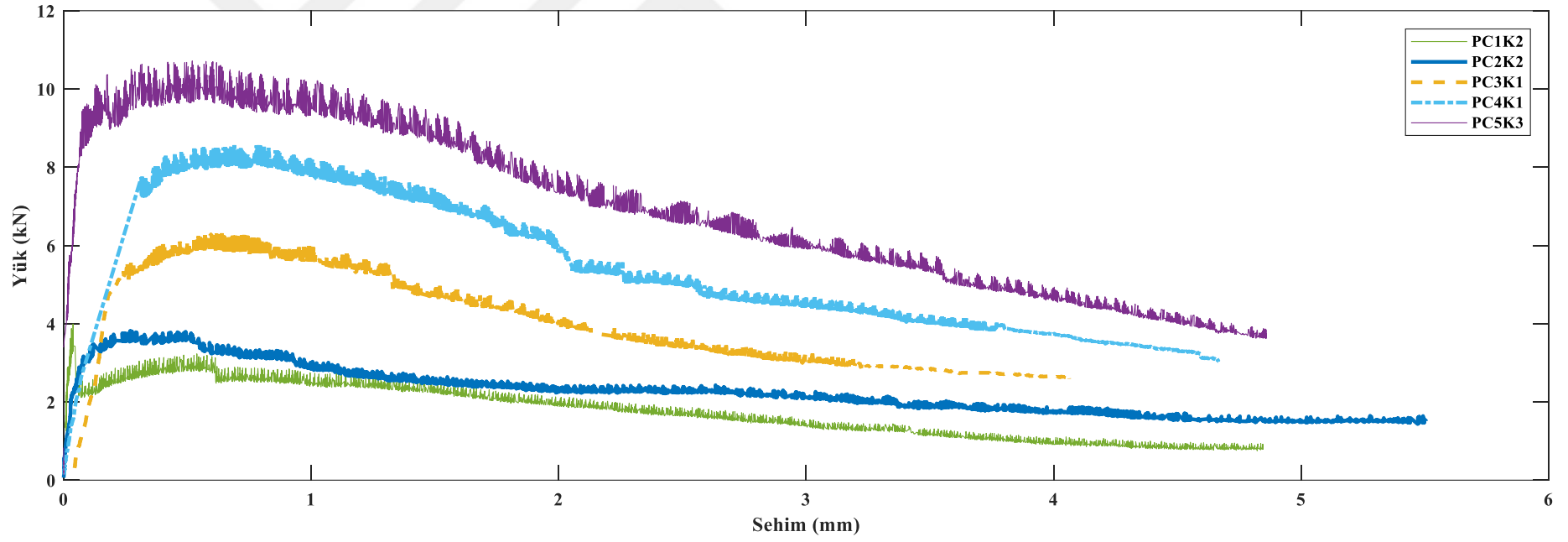
#	D Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
38	15,64	31,62	0,226	69,20	139,91
39	39,65	63,30	0,326	121,63	194,17
40	21,90	44,47	0,304	72,04	146,28
41	34,10	60,92	0,289	117,99	210,80
42	38,52	63,11	0,287	134,22	219,90
43	21,08	27,89	0,256	82,34	108,95
44	51,38	63,36	0,214	240,09	296,07
45	31,26	37,75	0,235	133,02	160,64
46	24,39	27,94	0,248	98,35	112,66
47	45,83	53,65	0,173	264,91	310,12
48	56,47	68,07	0,300	188,23	226,90
49	19,75	22,37	0,278	71,04	80,47
50	29,21	35,64	0,322	90,71	110,68
51	25,46	34,48	0,882	28,87	39,09
52	33,43	43,71	0,219	152,65	199,59
53	27,46	29,99	0,171	160,58	175,38
54	17,14	21,07	0,223	76,86	94,48
55	36,21	39,45	0,268	135,11	147,20
56	18,84	45,41	0,314	60,00	144,62
57	33,49	49,99	0,236	141,91	211,82
58	25,42	30,41	0,298	85,30	102,05
59	25,53	55,86	0,289	88,34	193,29
60	30,46	53,67	0,285	106,88	188,32
61	23,82	29,79	0,320	74,44	93,09
62	40,13	50,53	0,218	184,08	231,79
63	29,96	39,17	0,329	91,06	119,06
64	21,91	24,16	0,315	69,56	76,70
65	15,52	19,62	0,217	71,52	90,41
66	33,37	39,21	0,236	141,40	166,14
67	32,50	35,83	0,301	107,97	119,04
68	21,61	40,33	0,209	103,40	192,97
69	16,50	19,60	0,315	52,38	62,22
70	34,74	36,39	0,174	199,66	209,14
71	32,87	35,78	0,313	105,02	114,31
72	28,88	30,73	0,292	98,90	105,24
73	39,88	54,75	0,288	138,47	190,10
74	25,25	34,70	0,164	153,96	211,59
75	29,61	32,98	0,256	115,66	128,83

Çizelge A.4 (devam) : Çelik tellerin boy-çap ölçümleri (D firması).

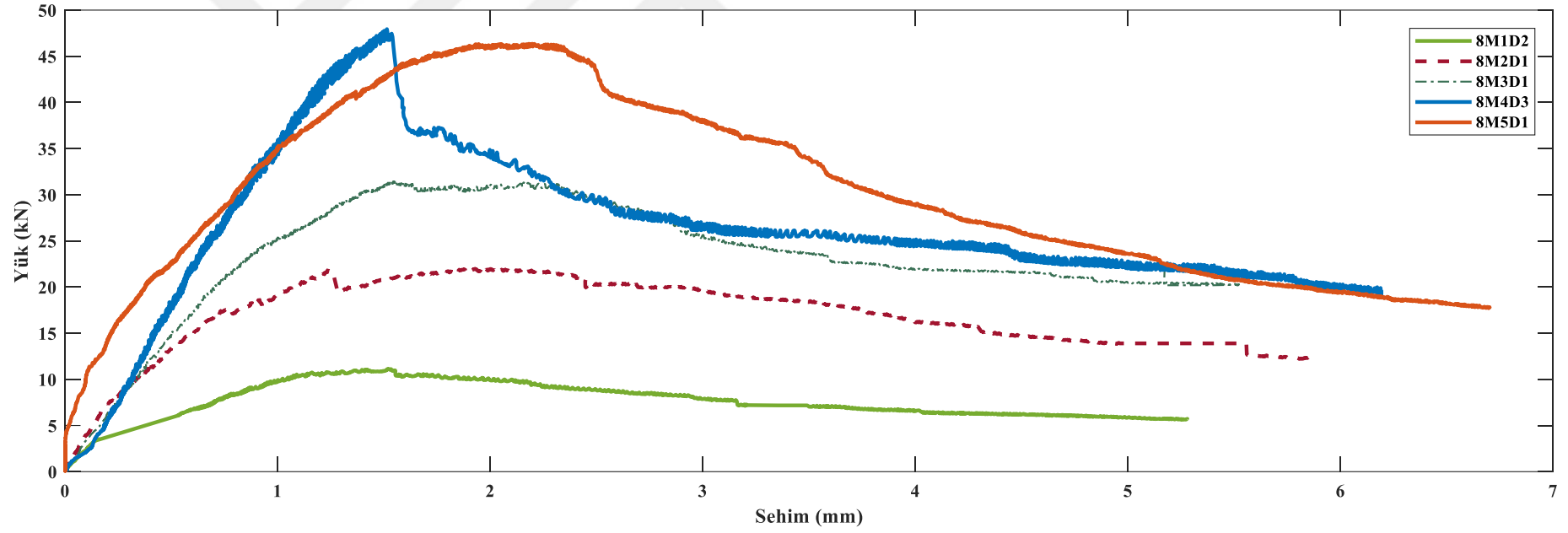
#	D Firması			Narinlik	
	Uzunluk-L ₁ (mm)	Uzunluk-L ₂ (mm)	Çap-D (mm)	L ₁ /D	L ₂ /D
76	18,44	21,87	0,301	61,26	72,66
77	20,64	30,01	0,214	96,45	140,23
78	17,23	42,51	0,256	67,30	166,05
79	28,64	37,87	0,296	96,76	127,94
80	51,55	66,40	0,224	230,13	296,43
81	21,37	27,79	0,304	70,30	91,41
82	18,45	22,11	0,310	59,52	71,32
83	9,42	19,18	0,355	26,54	54,03
84	27,51	34,27	0,290	94,86	118,17
85	15,34	28,69	0,226	67,88	126,95
86	32,06	52,74	0,282	113,69	187,02
87	16,51	20,27	0,274	60,26	73,98
88	26,50	46,06	0,368	72,01	125,16
89	40,89	61,68	0,228	179,34	270,53
90	32,20	34,41	0,188	171,28	183,03
91	30,22	32,21	0,328	92,13	98,20
92	25,62	31,39	0,224	114,38	140,13
93	15,56	19,06	0,307	50,68	62,08
94	12,11	19,33	0,289	41,90	66,89
95	34,90	39,45	0,312	111,86	126,44
96	20,35	22,16	0,223	91,26	99,37
97	19,30	22,35	0,291	66,32	76,80
98	23,99	28,45	0,231	103,85	123,16
99	22,93	41,09	0,216	106,16	190,23
100	29,06	34,10	0,324	89,69	105,25



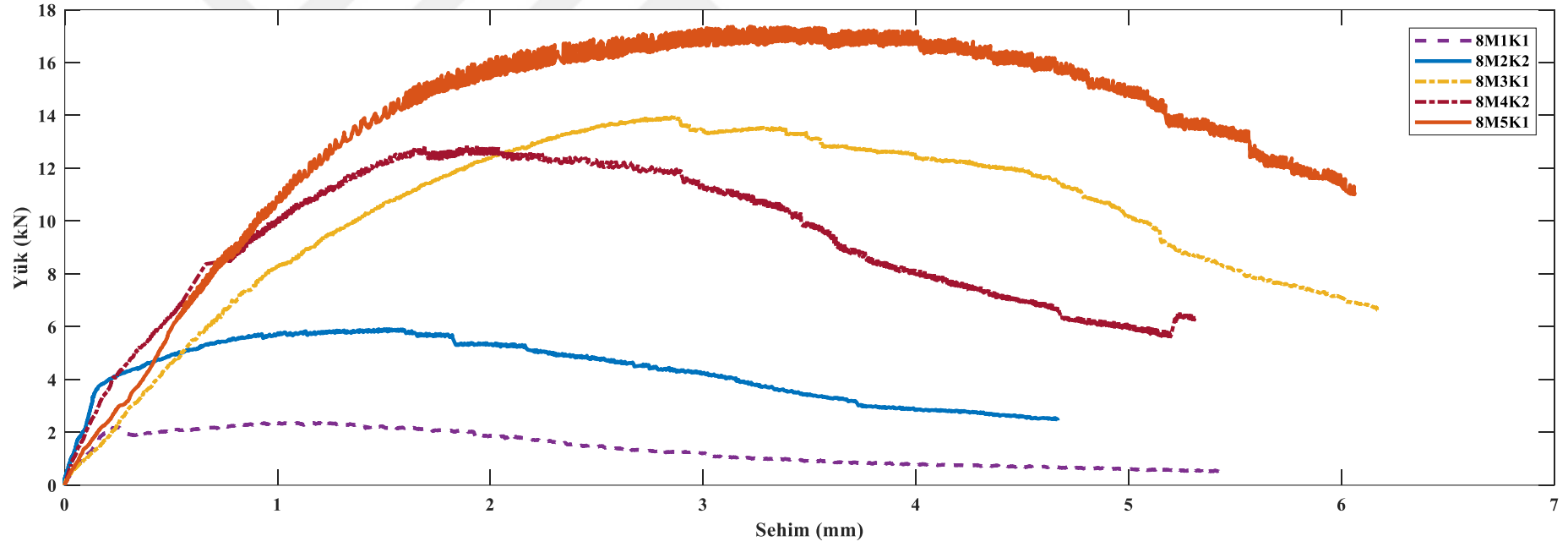
Şekil A.1 : PÇ-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.



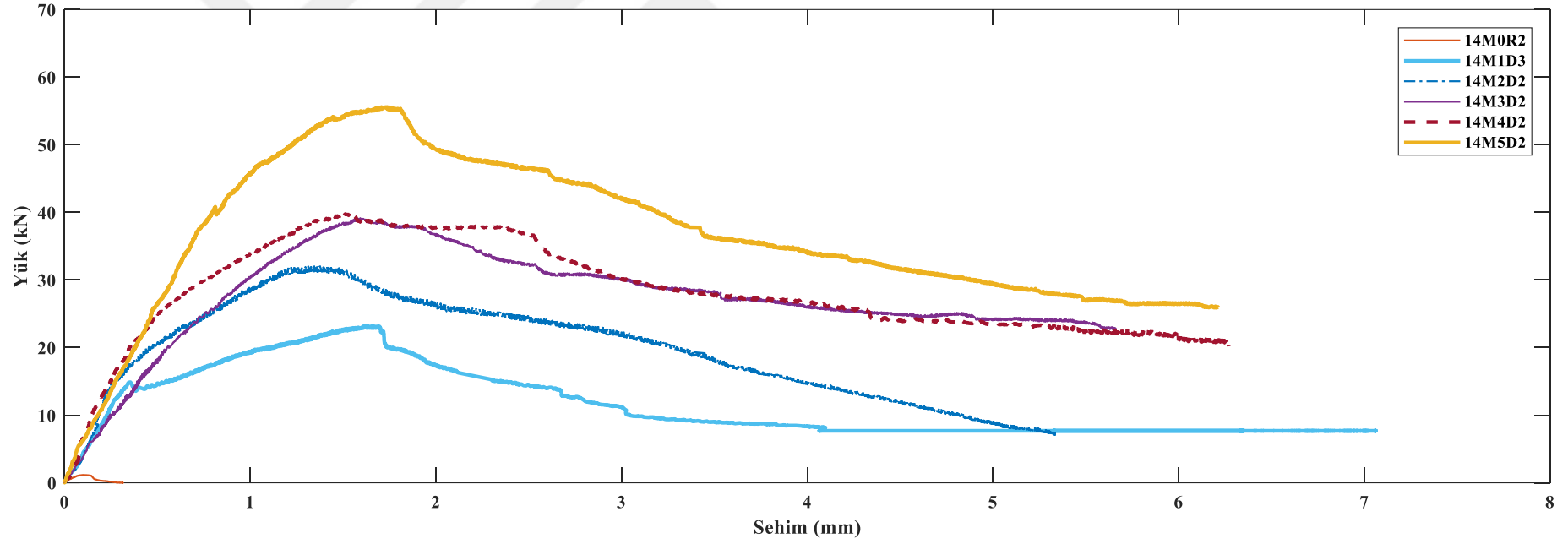
Şekil A.2 : PÇ-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.



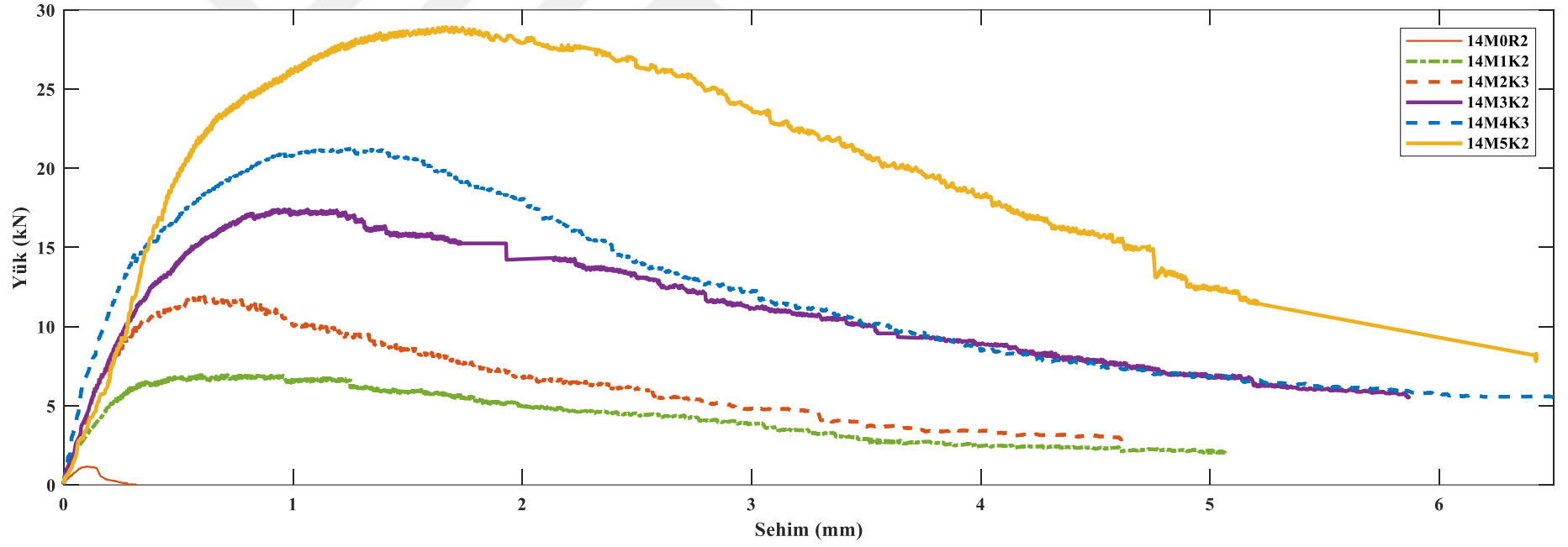
Şekil A.3 : 8M-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.



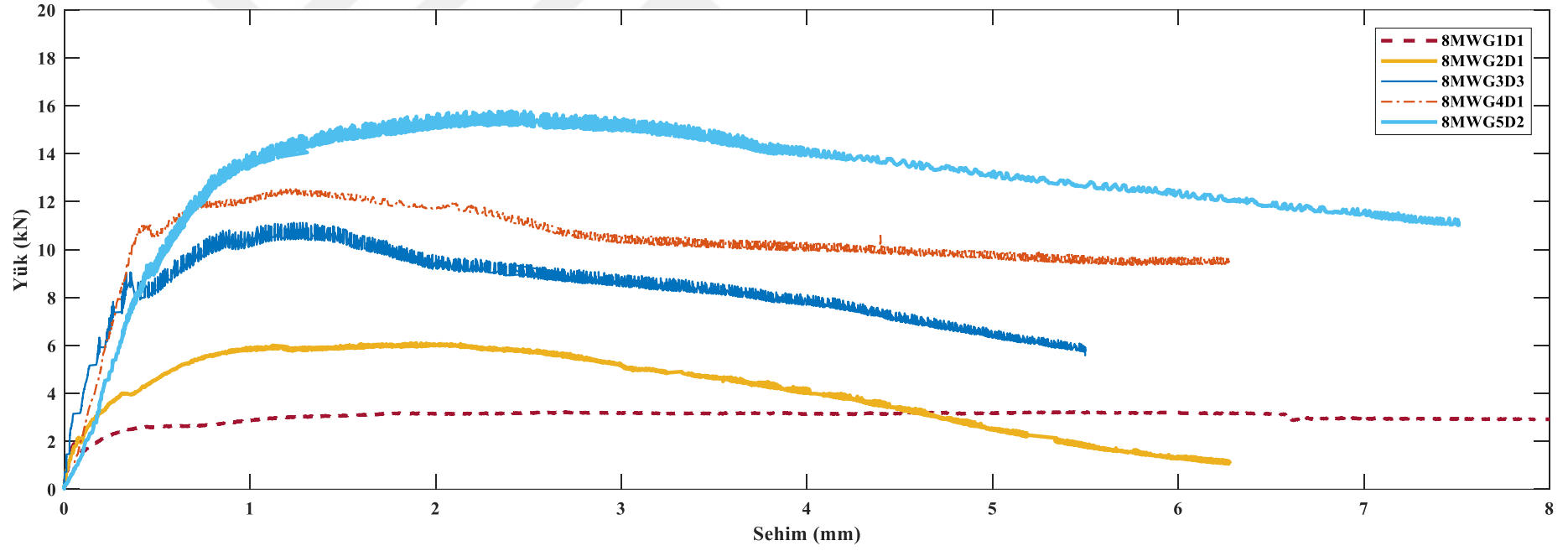
Şekil A.4 : 8M-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.



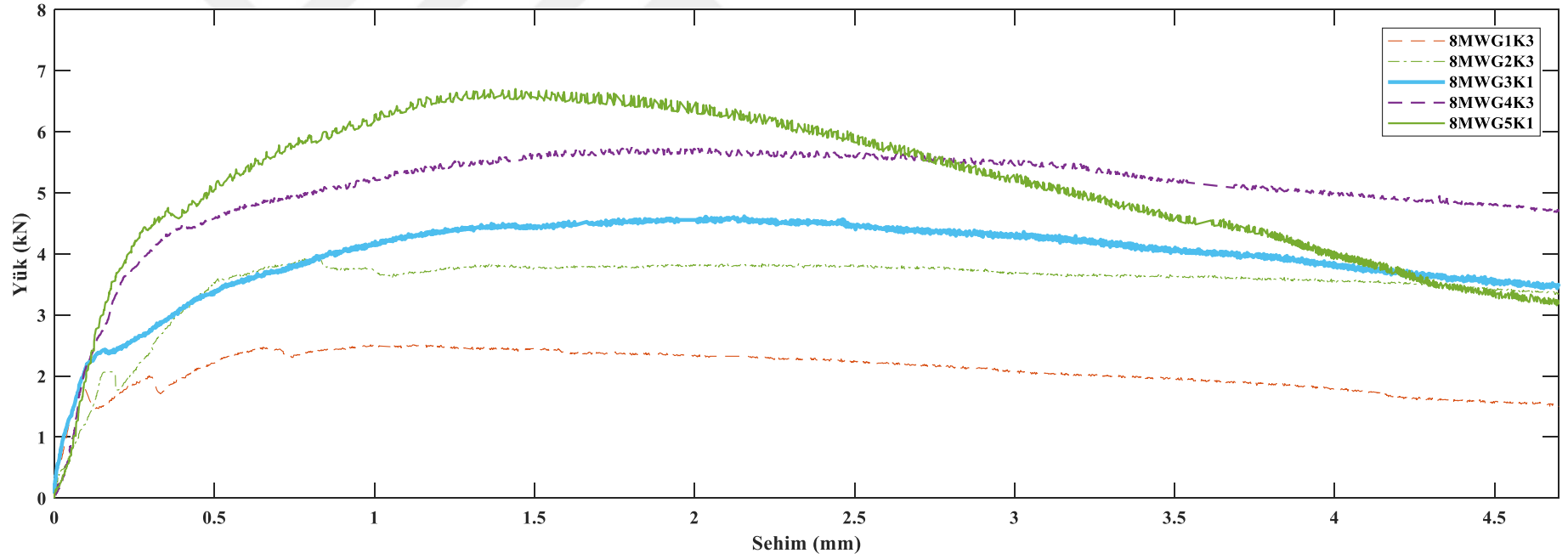
Şekil A.5 : 14M-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.



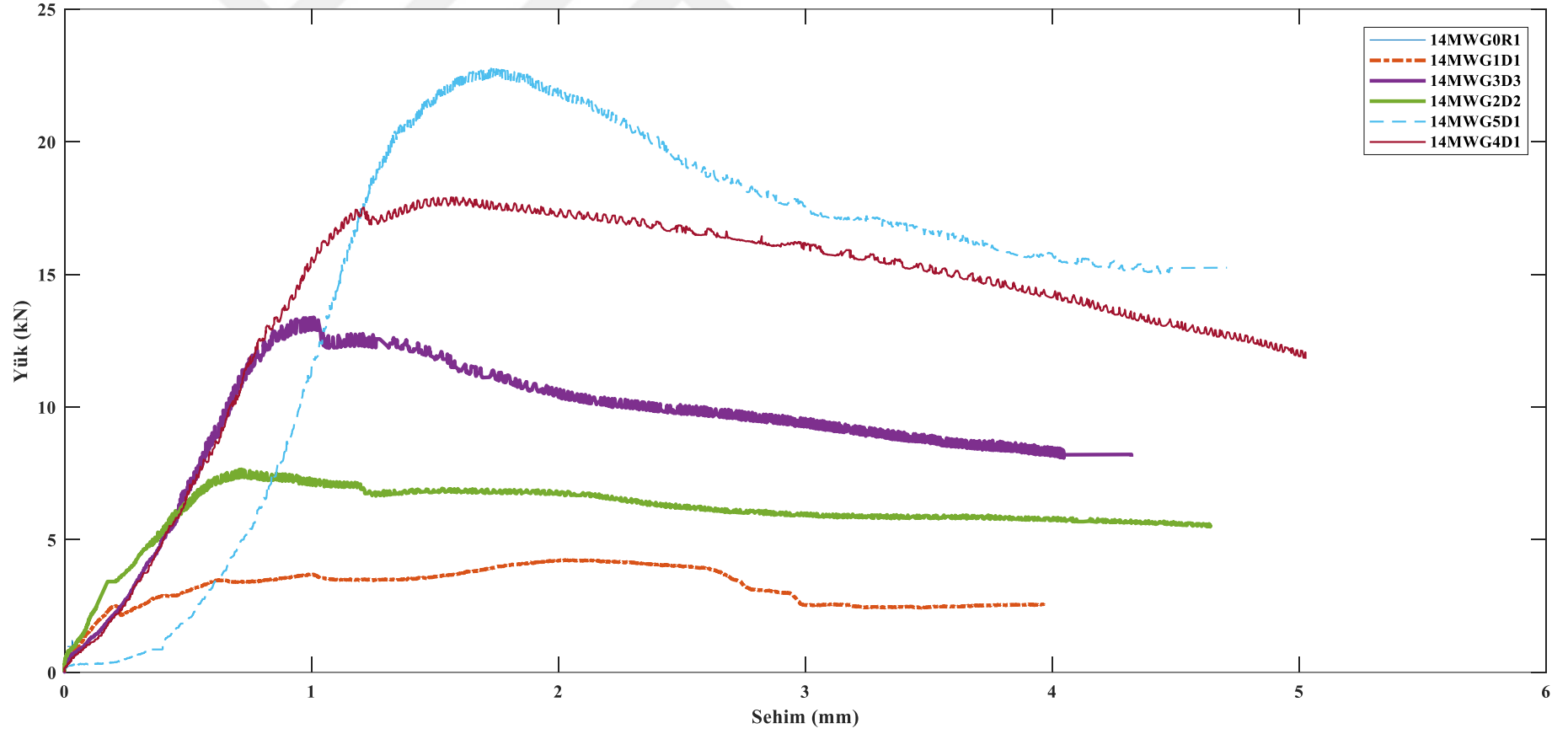
Şekil A.6 : 14M-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.



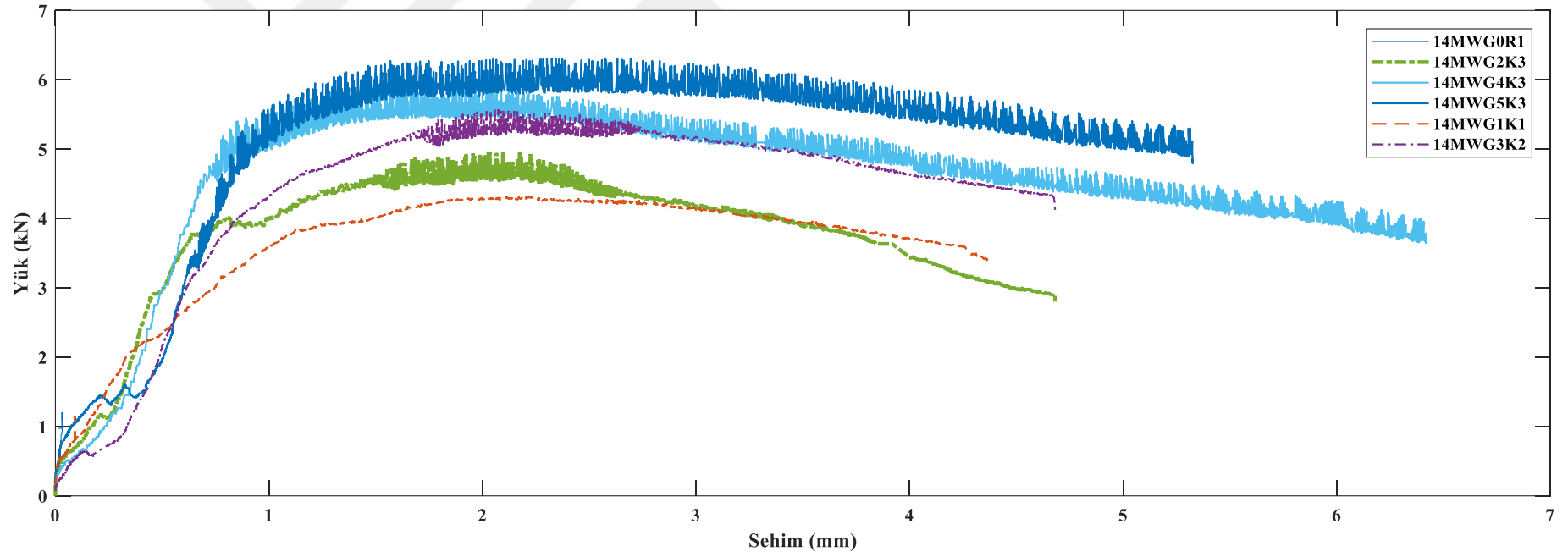
Şekil A.7 : 8MWG-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.



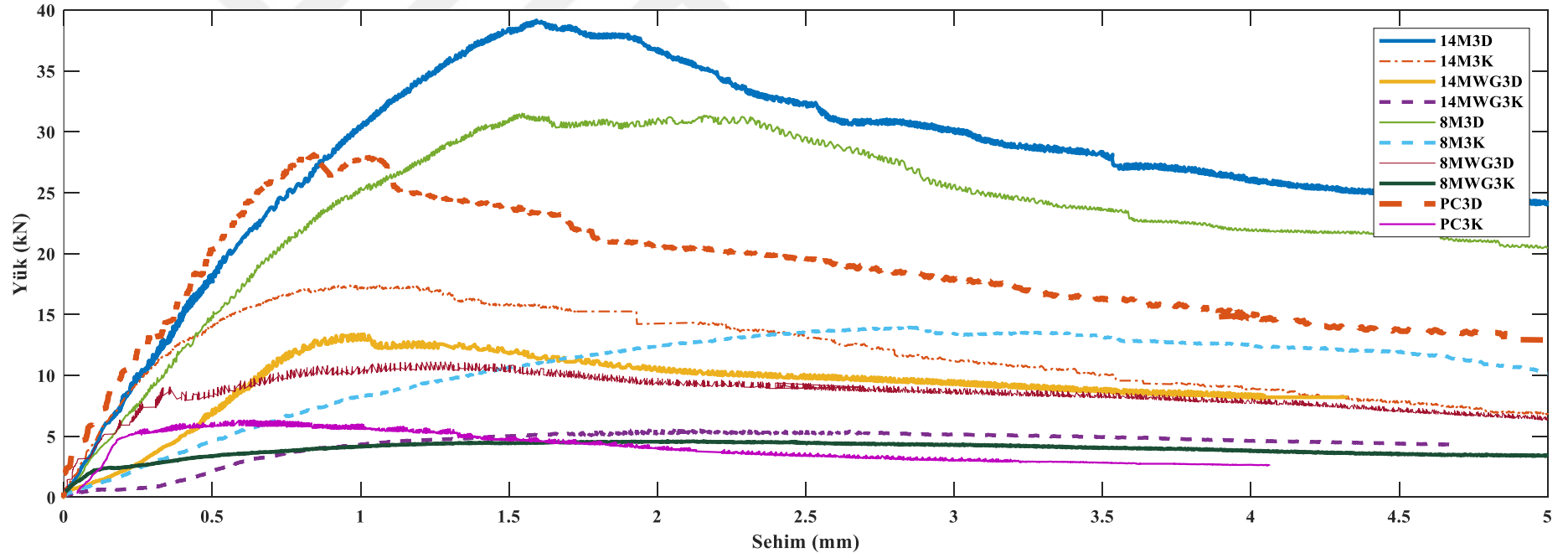
Şekil A.8 : 8MWG-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.



Şekil A.9 : 14MWG-D numuneleri için yük-sehim grafikleri.



Şekil A.10 : 14MWG-K numuneleri için yük-sehim grafikleri.



Şekil A.11 : $v_f=3\%$ için yük-sehim grafikleri.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Saadet Gökçe Gök
Doğum Tarihi ve Yeri : 14.07.1988, İstanbul
E-posta : saadet.gokce.gok@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İTÜ, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
2012, İTÜ, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2013, İTÜ, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,
Yapı Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Şubat 2011’de İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Fakülte ve Bölüm ikinciliği dereceleriyle mezun oldu.
- Şubat 2012’de İTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nde çift anadal programını tamamladı.
- TÜBİTAK-BİDEB 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında burs almaya hak kazandı.
- 2012–2020 yılları arasında Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda araştırma görevlisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gök, S. G. & Şengül, Ö.** 2020. The Use of Waste Glass as an Activator in Alkali-Activated Slag Mortars, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, (kabul edildi). DOI: 10.1680/jensu.19.00070

- **Gök, S. G. & Gündoğan, S.** 2018. The Effect of Curing Conditions on Mechanical Properties of Alkali-Activated Mortars. *3rd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT 2018)*, September 20-22, 2018 Igneada, Kırklareli, Turkey.
- **Gök, S. G. & Gündoğan, S.** 2018. The Influence of Activator Concentration on Strength Characteristics of Alkali-Activated Slag Mortars. *3rd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT 2018)*, September 20-22, 2018 Igneada, Kırklareli, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Kılıç, İ., Bozdoğan, K. B., Aydın, S., **Gök, S. G.**, Gündoğan, S. 2020. Kule Tipi Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii Minaresi Örneği, *Politeknik Dergisi*, 23(1), 19–26. DOI: 10.2339/politeknik.481857
- Kılıç, İ., **Gök, S. G.**, Savaş, A. O. 2019. Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Su/Çimento Oranı Değişiminin Dayanım, Ultrases Geçiş Hızı ve Elastisite Modülü Üzerindeki Etkileri. *1. Beton Yollar Kongresi ve Sergisi (BYK 2019)*, Kasım 13-14, 2019 Ankara, Türkiye.
- Kılıç, İ., **Gök, S. G.**, Savaş, A. O. 2019. The Effect of Water/Cement Ratio on Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete. *International Natural Science, Engineering and Materials Technology Conference (NEM 2019)*, September 09-10, 2019 Istanbul, Turkey.
- Kılıç, İ. & **Gök, S. G.** 2018. The Effect of Binder Ratio on Mechanical Properties of Khorasan Mortar. *3rd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT 2018)*, September 20-22, 2018 Igneada, Kırklareli, Turkey.
- **Gök, S. G. & Kılınç, K.** 2017. Mechanical Properties of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Concrete, *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 3(2), 123–131.
- **Gök, S. G. & Aksu-Özkul, T.** 2017. A Comparative Design of a Multi-story Reinforced Concrete Building with Reentrant Corner Irregularity According to Turkish, Eurocode and ACI 318 Standards. In D. A. Hordijk, M. Luković (Eds.), *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet* (Vol. 1, pp. 1619–1627). Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-59471-2_186
- Kılınç, K., **Gök, S. G.**, Gündoğan, S. 2017. Kirli Agregalar ile Üretilen Betonlarda TİPA İlaveli Akışkanlaştırıcıların Etkisi. *Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyumu ve Sergisi*, Ekim 19-20, 2017 Ankara, Türkiye.

- **Gök, S. G.**, Kılınç, K., Gündoğan, S. 2017. Potasyum Humat İlaveli Kimyasal Katkıların ve Polikarboksilat Esaslı Katkıların Kirli Agregalar ile Kullanımı. *Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyumu ve Sergisi*, Ekim 19-20, 2017 Ankara, Türkiye.
- Kılınç, K., Gündoğan, S., **Gök, S. G.** 2017. TEA ve TİPA İçeren Sıcak Hava Dökümüne Uygun Kimyasal Katkıların Çimento Harcının Basınç Dayanımına Etkisi. *Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyumu ve Sergisi*, Ekim 19-20, 2017 Ankara, Türkiye.
- **Gök, S. G.** & Aksu-Özkul, T. 2017. A Comparative Design of a Multi-story Reinforced Concrete Building with Reentrant Corner Irregularity According to Turkish, Eurocode and ACI 318 Standards. *fib symposium 2017*, June 12-14, 2017 Maastricht, Netherlands.
- Kılınç, K. & **Gök, S. G.** 2016. Influence of Fly Ash and Blast Furnace Slag on Compressive Strength of Alkali Activated Concrete. *1st International Black Sea Congress on Environmental Sciences (IBCESS)*, August 31-September 03, 2016 Giresun, Turkey.
- **Gök, S. G.** & Kılınç, K. 2016. The Effect of Potassium Humate Based Chemical Admixtures on the Compressive Strength of Concrete Produced by Clay Bearing Aggregates with High Methylene Blue Value. *12th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2016)*, September 21-23, 2016 Bogazici University, Istanbul, Turkey.
- Gündoğan, S., Kılınç, K., **Gök, S. G.**, Çelik, A. O. 2016. Systematic Vertical Strength Variation of Small Cores Drilled From Concrete Beams. *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2016)*, April 21-22, 2016 Afyonkarahisar, Turkey.
- **Gök, S. G.** & Kılınç, K. 2016. Effect of Clay Mitigating Chemical Admixtures on Compressive Strength of Concrete. *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2016)*, April 21-22, 2016 Afyonkarahisar, Turkey.
- **Gök, S. G.** & Kılınç, K. 2015. Effect of Calcium Nitrate, Triethanolamine and Triisopropanolamine on Compressive Strength of Mortars, *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, 1(1), 12–19.
- **Gök, S. G.** 2013. *A3 Düzensizliği Olan Çok Katlı Betonarme Bir Yapının Türk, Eurocode ve ACI 318 Yönetmeliklerine Göre Tasarımı*, (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı.

