

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALARININ GEOPOLİMER SIFCON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

TEVFİK HAKAN BOZKURT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

OCAK - 2023
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Tevfik Hakan BOZKURT tarafından hazırlanan “**GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALARININ GEOPOLİMER SIFCON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **13.01.2023** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Hasbi YAPRAK Kastamonu Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü V.

Doç. Dr. Osman ÇİÇEK

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Tevfik Hakan BOZKURT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALARININ GEOPOLİMER SIFCON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

TEVFİK HAKAN BOZKURT

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

En son oluşturulan inşaat malzemelerinden biri olan bulamaç sızdırılmış lif takviyeli beton veya kompozit (SIFCON), daha fazla lif içeriğine sahip benzersiz bir yüksek performanslı lif takviyeli beton türü olarak görülebilir. Bu çalışma, sürdürülebilir öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC)/uçucu kül (UK) tek bileşenli alkali aktif bulamaç sızmış lif kompozitlerin (SIFCON) basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, eğilme dayanımı, gözeneklilik, kapilerite ve su emme açısından çeşitli geri dönüştürülmüş agregalarla karıştırılmış ve yüksek sıcaklıklarda (200; 400; 600 ve 800°C) ve donma-çözülme 40; 80 ve 120 D-Ç döngüsü döngülerinde etkinliğini araştırmıştır. %5, %10 ve %15'lik çeşitli çelik lif oranları ile 80°C'de 6; 24 ve 48 saat ısıl kürlenir. Dokuzu %100 cüruf ve diğer dokuzu %50 cüruf ve %50 UK olmak üzere toplam on sekiz SIFCON karışımı üretilmiştir. SIFCON karışımlarının üretiminde silis kumu (SK), geri dönüşümlü beton kumu (ABK) geri dönüşümlü tuğla kumu (ATK) geri dönüşümlü seramik kumu (ASK) olmak üzere dört farklı agrega kullanılmıştır. Sonuçlar, 24 saat ısıl kürlenmiş B25L15 karışımının tüm karışımlar arasında sırasıyla 7; 28 ve 91 günde sırasıyla 68,49 MPa, 74,53 MPa ve 79,93 MPa ile en yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğunu gösterdi. Sonuçlar ayrıca, %100 YFC ve %50 UK içeren karışımların 6 saat süreyle ısıyla sertleştirildiğini, yüksek sıcaklık ve D-Ç döngülerine karşı en iyi basınç dayanımı direncini gösterdiğini gösterdi. En yüksek eğilme tokluğu, 6 saat boyunca ısıyla kürlenmiş T50L15 karışımı için de değerlendirildi.

ANAHTAR KELİMELER: SIFCON, Geri dönüşüm agregası, Eğilme tokluğu, Durabilite, Taguchi tasarımı

Ocak 2023, 95 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE EFFECT OF GEOPOLYMER SIFCON PROPERTIES OF RECYCLING AGGREGATES

TEVFİK HAKAN BOZKURT

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

One of the most recently created building materials, slurry infiltrated lif reinforced Beton or composite (SIFCON), can be viewed as a unique kind of high performance lif reinforced Beton with a greater lif content. This study presents the findings of an experimental investigation that aims to clarify the mechanical performance, flexural toughness, durability and microstructure of sustainable ground blast furnace slag/fly ash one-part alkali activated slurry infiltrated lif composites (SIFCON) with various recycled sands in terms of compreSKive strength, dry unit weight, flexural strength, porosity, sorptivity and water absorption and investigate its effectiveness at high temperatures (200; 400; 600 and 800°C) and freeze-thaw cycles (40; 80; 120 F-T cycles) with various steel lif ratios of 5%, 10%, and 15% heat cured for 6; 24 and 48 hours at 80°C. A total of eighteen SIFCON mixtures were generated, nine of which were 100 % slag, and the other nine mixtures were 50% slag and 50% UK. In the production of SIFCON mixtures, four different aggregates consisting of silica sand (SK), recycled Beton sand (ABK) recycled Tuğla sand (ATK) recycled Seramik sand (ASK) were used. The results showed that 24 h heat-cured B25L15 mixture had the greatest compreSKive strengths of 68,49 MPa, 74,53 MPa and 79,93 MPa at 7; 28; and 91 days, reSAectively among all mixtures. The results also indicated that the mixtures containing 100% GFBS and 50%UK heat cured for 6 h demonstrated the best compreSKive strength resistance to elevated temperature and F-T cycles. The greatest flexural toughness was also assessed for the mixture T50L15 heat-cured for 6 hour.

KEYWORDS: SIFCON, Geri dönüşüm agregası, Eğilme tokluğu, Durabilite, Taguchi dizaynı

January 2023, 95 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini hiç esirgememiş danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a, diğer çok saygıdeğer Doç. Dr. Gökhan KAPLAN'a, Prof. Dr. Hasbi YAPRAK'a, Doç. Dr. Ahmet BENLİ'ye ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Fuat KÖKSAL'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca hayatım boyunca yanımda olan ve daima olacağını bildiğim, çok sevdiğim eşim Dt. Ayşen BOZKURT'a ve tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

Tevfik Hakan BOZKURT

Kastamonu, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1 SIFCON (Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lif Donatılı Beton)	5
2.1.1 SIFCON’u Oluşturan Malzemeler	5
2.1.2 SIFCON’un Kullanıldığı Alanlar.....	6
2.1.3 SIFCON’un Avantaj ve Dezavantajları	7
2.1.3.1 Avantajları.....	8
2.1.3.2 Dezavantajları	8
2.2 Geopolimer	9
2.2.1.1 Geopolimer betonun avantajları	11
2.2.1.2 Geopolimer betonun dezavantajları	12
2.2.2 Geopolimerlerin Kullanım Alanları.....	13
2.3 Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı ve Sınıflandırılması.....	14
2.4 Uçucu Küllerin Tanımı ve Sınıflandırılması	15
2.5 Geri Dönüşüm Agregası	16
2.5.1 Geri Dönüşüm Agregasının Kullanım Amacı	17
2.5.2 Geri Dönüşüm Agregasının Kullanım Alanları	17
2.6 Atık Tuğla.....	18
2.6.1 Tuğla Atığının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	18
2.7 Atık Seramik.....	20
3. MATERYAL VE METOD	24
3.1 Materyal.....	24
3.2 Karışım Dizaynı	28
3.3 SIFCON Karışımlarının Dökümü ve Kurlenmesi	28
3.4 Test Prosedürü	30
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	31
4.1 SIFCON Karışımlarında Kullanılan Harcın Kıvamı	31
4.2 Basınç Dayanımı	33
4.3 Eğilme Basıncı	37
4.4 Birim Ağırlık	40
4.5 Porozite ve Su Emmesi.....	41
4.6 Kapilerite	43
4.7 Mikroyapı	45
4.7.1 Normal Kür	45
4.8 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı.....	48

4.8.1	Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı	48
4.8.2	Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı.....	53
4.8.3	Yüksek Sıcaklık Sonrası Ağırlık Kaybı.....	57
4.8.4	Yüksek Sıcaklık Sonrası Mikroyapı	59
4.9	SIFCON Karışımlarının Donma-Çözülme Durabilitesi	61
4.9.1	D-Ç Sonrası Basınç Dayanımı.....	62
4.9.2	D-Ç Sonrası Eğilme Dayanımı	66
4.9.3	D-Ç Sonrası Ağırlık Kaybı	70
4.10	Yük-Sehim Eğrileri	72
4.10.1	Tokluk.....	77
4.11	Taguchi Optimizasyonu	78
4.11.1	Optimum SIFCON'un Doğrulanması.....	80
5.	SONUÇLAR.....	82
	KAYNAKLAR	84
	ÖZGEÇMİŞ.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 SIFCON ile güçlendirme uygulaması	7
Şekil 2.2 SIFCON'da bulamaç enjekte işleminin uygulanması	7
Şekil 2.3 Atık seramik.....	21
Şekil 3.1 Bağlayıcıların ve geri dönüştürülmüş agregaların X-ışını kırınımı (XRD) modelleri (Q: Kuvars, Cl: Klinoklor, S: Sanidin, M: Muskovit, D: Dolomit, C: Kalsit, Al: Alüminyum minerali)	25
Şekil 3.2 Atık agregaların genel görünümü	26
Şekil 3.3 Atık agregaların SEM görüntüleri	26
Şekil 3.4 Çelik lifin genel görünümü	27
Şekil 4.1 a) SIFCON karışımlarının yayılma değerleri b) Yayılma test sonuçları	33
Şekil 4.2 SIFCON karışımlarının basınç dayanımı a) UK=0 b) UK=50	37
Şekil 4.3 SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı a) UK=0 b) UK=50.....	40
Şekil 4.4 Kuru birim ağırlıkları	41
Şekil 4.5 SIFCON karışımlarının porozitesi ve su emmesi	43
Şekil 4.6 SIFCON karışımlarının kapilerite sonuçları a) UK=0 b) UK=50.....	45
Şekil 4.7 S10L5 karışımının mikro yapısı (28 günlük).....	46
Şekil 4.8 UKT50L5 karışımının mikro yapısı (28 günlük).....	47
Şekil 4.9 UKT25L5 karışımının mikro yapısı (28 günlük).....	48
Şekil 4.10 Yüksek sıcaklık sonrası a, b) SIFCON karışımlarının basınç dayanımı c, d) dayanım değişimleri	52
Şekil 4.11 Yüksek sıcaklık sonrası a, b) SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı c, d) eğilme dayanımı değişimleri	56
Şekil 4.12 Yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı a) UK=0, b) UK=50	58
Şekil 4.13 800°C'ye maruz kalan S10L5 karışımının mikro yapısı	59
Şekil 4.14 800°C'ye maruz kalan UKT10L5 karışımının mikro yapısı	60
Şekil 4.15 800°C'ye maruz kalan UKT10L5 karışımının mikro yapısı	61
Şekil 4.16 Donma çözülme sonrası a,b) SIFCON karışımlarının basınç dayanımı, c,d) dayanım değişimleri	65
Şekil 4.17 Donma çözülme sonrası a, b) SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı, c, d) dayanım değişimleri	69
Şekil 4.18 Donma çözülme sonrası ağırlık kaybı	71
Şekil 4.19 Yük-sehim eğrilerinin elde edilmesi	72
Şekil 4.20 UK içermeyen karışımların 91 gün sonra yük-sehim eğrileri.....	74
Şekil 4.21 a, b, c, d) Karışımların 800 °C sonrası yük-sehim eğrileri.....	76
Şekil 4.22 SIFCON karışımlarının 91 gün ve 800°C sonrasında eğilme tokluğu.....	78
Şekil 4.23 Eğilme dayanımının S/G oranı (91 gün).....	80
Şekil 4.24 Optimum karışımın yük-sehim eğrisi	81

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 YFC ve UK'nın kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)	24
Tablo 3.2 Silis kumu ve geri dönüştürülmüş agregaların fiziksel özellikleri	27
Tablo 3.3 Çelîf liflerin özellikleri	28
Tablo 3.4 Taguchi L18 dikey dizi	29
Tablo 3.5 SIFCON için tasarlanan karışımlar (kg/m^3)	29
Tablo 3.6 Gerçekleştirilen tesler, numunelerin boyutu ve test standartları	30
Tablo 4.1 ANOVA analizi ve etki değerleri	79
Tablo 4.2 Faktörlerin S/G oranları ve seviyeleri	79
Tablo 4.3 Deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	80

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al_2O_3	: Alüminyum Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
Fe_2O_3	: Demir Oksit
K_2O	: Potasyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
MgSO_4	: Magnezyum Sülfat
Na_2O	: Sodyum Oksit
SiO_2	: Silisyum Dioksit
SO_3	: Kükürt Trioksit

Kısaltmalar

AACK	: Alkali ile Aktive Edilmiş Cüruf Kompoziti
ASR	: Alkali-Silika Reaksiyonu
ASTM	: American Society for Testing and Materials
D-Ç	: Donma-Çözülme
HCl	: Hidroklorik Asit
MPa	: Megapascal
NaCl	: Sodyum Klorür
SMT	: Sodyum Metasilikat Tozu
UK	: Uçucu Kül
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Lif takviyeli yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler, nispeten yüksek maliyetlerine rağmen, özellikle sismik güçlendirme tasarımında ve patlayıcı ve darbe etkilerine maruz kalan yapılarda dünya çapında daha sık kullanılmaktadır. Yüksek veya çok yüksek dayanımlı ve son derece yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip beton yine de öncelikle kırılmandır. Yeterli miktarda lif katılarak çekme dayanımı artırılır ve süneklik sağlanır. Sıradan lif takviyeli betonun (FRC) ve ultra yüksek dayanımlı FRC'nin lif içeriği tipik olarak %1-3'te sabitlenir, çünkü liflerin yüksek hacim yüzdesinin topaklanma ve kenetlenme üzerindeki etkisinin getirdiği karıştırma ve yerleştirme zorlukları nedeniyle (Balaji ve Thirugnanam, 2018; Gao vd., 1997; Nataraja vd., 2000; Yazıcı vd., 2006). %3 ile %20 arasındaki lif hacmi değerlerinin yüzdeleri, birkaç benzersiz kompozit oluşturmak için kullanılır (Hashim ve Kadhum, 2021; Naaman vd., 1992). Bu kompozitler, güçlü bir çimentolu matrisi mükemmel süneklik ve çekme dayanımı ile birleştiren SIFCON veya SIFCON (bulamaçla sızmış lif beton veya kompozitler) kategorisine girer. Tipik olarak, SIFCON veya SIFCON, çimento, su, puzolanik malzemeler, ince kum ve kimyasal katkı maddelerinin lif içeren bir kalıba dökülmesiyle yapılan bir çimento harcı veya akan harçtan yapılır (Salih vd., 2018). SIFCON, mekanik özelliklerine ilişkin çok sayıda araştırmaya göre, matristen birkaç kat daha fazla güç sağlayabilir. Ek olarak, eğilme tokluğunu daha da güçlendirebilir (Ipek ve Aksu, 2019; Wu vd., 2010). SIFCON'u standart karıştırma teknikleri kullanarak yapmak, çok büyük hacimli çelik liflerin birbirine kenetlenme etkisinden dolayı mümkün değildir. Kalıp kalıpları bu sorunu çözmek için maksimum kapasiteye kadar lifle doldurulur. Çimento veya alkali ile aktive edilmiş kompozit bazlı bir bulamaç daha sonra kurulan lif ağına nüfuz eder.

En yaygın olarak kullanılan iki sızma tekniği, basınçlı enjeksiyon ve hafif titreşimle birlikte yerçekimi yayılmasıdır (Ali vd., 2022). SIFCON ve FRC arasındaki fark üç faktöre dayanmaktadır: lif hacmi oranı, agrega ve çimentolu malzemelerin özellikleri ve imalat süreci (Hashim ve Kadhum, 2020; Khamees vd., 2020). SIFCON, olağanüstü mekanik nitelikleri ve yüksek performansı nedeniyle büyük süneklik, tokluk ve darbe direnci gerektiren durumlarda değerli bir malzemedir (Ipek ve Aksu, 2019). SIFCON

ile endüstriyel zeminler, güçlendirme görevleri, ısı direnci uygulamaları, boşlukların patlamaya karşı korunması ve yapısal eleman restorasyonu etkili bir şekilde gerçekleştirilebilir. SIFCON'un çeşitli faydaları vardır, ancak oldukça lifli ve oldukça dayanıklı çimento bazlı matris nedeniyle başlangıç maliyeti geleneksel betonla karşılaştırıldığında oldukça maliyetlidir (Beglarigale vd., 2016). Son 20 yıllık literatür taraması boyunca yüksek performanslı SIFCON'un oluşturulmasına ilişkin çok sayıda araştırma yapılmıştır. (Canbaz ve Ünüvar, 2016) çeşitli lif ve bağlayıcılardan yapılan SIFCON'un mekanik özelliklerine incelemiştir. Çelik ve polipropilen lifler iki uzunlukta kullanılmıştır. Bağlayıcı fazda uçucu kül, puzolanik çimento, kalsiyum alüminat çimentosu ve Portland çimentosu kullanılmıştır. Çalışmanın bulguları, SIFCON özelliklerinin bağlayıcı türünden etkilendiğini göstermektedir. Çelik lif, özellikleri arttırdığı için daha uygundur. SIFCON kompozitlerinin yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında eğilme davranışı, Beglarigale ve ark.(Beglarigale vd., 2016) tarafından incelenmiştir. Geleneksel veya buharla kürlenmiş SIFCON numuneleri, 300 ila 900°C arasındaki sıcaklıklara tabi tutuldu. Bu nedenle, numuneleri 300°C'ye ısıtmak mekanik performanslarını iyileştirse de, özellikle C-S-H yapısının bozulmasına neden oldukları için yüksek sıcaklıklar SIFCON için sorunludur. Çimento, SIFCON veya SIFCON'daki birincil bağlayıcıdır. Ancak, çimento endüstrisinin yarattığı CO₂'nin dünyadaki tüm insan yapımı CO₂'nin %7'sine kadar katkıda bulunduğu iyi bilinmektedir. Sonuç olarak, sıradan Portland çimentosu (PÇ) üretiminin küresel ısınmaya en çok katkıda bulunanlardan biri olduğuna inanılmaktadır (Karatas, Dener, Mohabbi, vd., 2019; Koksall vd., 2022). Azaltılmış karbon ayak izi ve iyileştirilmiş erken yaşlanma dayanımı nedeniyle, alkaliyle aktive edilen malzeme (AAM), PÇ'nin olası bir ikamesi olarak ortaya çıkmıştır. AAM genellikle alkali çözeltiler (Na₂CO₃, NaOH ve Na₂SiO₃ vb.) ve UK, YFC ve metakaolin gibi alüminosilikat tozları kullanılarak hazırlanır. Son 40 yılda, inşaat endüstrisinde çimento kullanımını azaltmak için AAM'nin reaksiyon mekanizması, mikro yapı oluşumu ve dayanıklılıkla ilgili yönleri hakkında birçok araştırma yapılmıştır (Collins ve Sanjayan, 1999; Ma vd., 2020; Oh vd., 2010; Palomo vd., 1999). Alkali ile aktive edilmiş betonun, hem erken hem de zamanla dayanım geliştirmesi, donma-çözülme döngülerine ve kimyasal saldırılara karşı yüksek dirençli olması ve karbonatlaşma oranlarını düşürmesi bakımından PÇ betondan üstün olduğu söylenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2008). Bununla birlikte, daha önceki

araştırmalar, alkali ile aktive edilmiş beton veya harcın, PÇ beton veya harcına benzer şekilde kırılğan özellikler gösterdiğini ve çatlamaya karşı savunmasız olduğunu belirtmişti (Dias ve Thaumaturgo, 2005). Literatür çalışması, alkali ile aktive edilmiş yüksek dayanımlı betonun, alkali ile aktive edilmiş betonun ve alkali ile aktive edilmiş yüksek dayanımlı lif takviyeli betonun (Abdollahnejad vd., 2020; Cai vd., 2022; Cai ve Ye, 2021; Huang vd., 2021) davranışı üzerine çeşitli araştırmalar yapılmış olmasına rağmen ortaya koymuştur. Alkali ile aktive edilmiş bulamaç sızmiş lif kompozitlerin (SIFCON) davranışı hakkında kapsamlı bir araştırma yapılmamıştır. İki bileşenli alkali ile aktifleşen bağlayıcılara göre avantajları nedeniyle, tek bileşenli alkali ile aktifleşen bağlayıcılar - "sadece su ekleyin" konsepti olarak da anılır - çok ilgi görmüştür. Potansiyel olarak zararlı alkali çözeltiler kullanmadıkları için bu bağlayıcılar hafif ve taşınabilir. Toz haline getirilmiş yüksek fırın cürufu, erken dönemde yüksek basınç dayanımı geliştirmek için tek bileşenli alkali aktif bağlayıcılarda kullanılabilen yan akımlardan biridir. Bununla birlikte, cürufun tek başına kullanılması, hızlı bir sertleşme süresi ve bu karışık bileşimlerin uygulanmasını kısıtlayan ve sonuç olarak çatlak oluşumuna yol aarak hizmet ömrünü kısaltan önemli bir kuruma büzölmesi dahil olmak üzere bir takım dezavantajlara sahiptir. Tek bileşenli alkali ile aktive edilmiş malzemeler, kuruma büzölmesini önlemek için uçucu kül eklenerek güçlendirilebilir. Alkali ile aktifleştirilen bağlayıcıların temel amacı, yapı malzemelerinin üretiminde geri dönüştürölmüş malzemelerin kullanımını en üst düzeye çıkarmaktır. Bunu başarmak için, birkaç araştırma, geri dönüştürölmüş agreganın potansiyel olarak alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılarda doğal agregaların yerini alabileceğini öne sürdü. Literatürde, çeşitli geri dönüştürölmüş kumlarla birlikte sürdürülebilir cüruf/uçucu kül tek bileşenli SIFCON'un eğilme tokluğu, dayanıklılığı ve mikro yapısı üzerinde ısıyla kürlenme süresinin ve lif hacminin etkisine dair bir araştırma bulunmamaktadır. Bu çalışma, çeşitli geri dönüştürölmüş kumlarla sürdürülebilir YFC/UK tek parçalı SIFCON'un mekanik performansını, eğilme tokluğunu, dayanıklılığını ve mikro yapısını basınç dayanımı, kuru birim ağırlık, eğilme açısından netleştirmeyi amaçlayan deneysel bir araştırmanın bulgularına odaklanmaktadır. %5, %10 ve 15'lik çeşitli çelik lif oranlarıyla yüksek sıcaklıklarda (200, 400, 600 ve 800°C) ve donma-çözölme döngülerinde (40, 80, 120 D-Ç döngüsü) etkinliğini araştırın. % 6,24 ve 48 saat ısıl kürlenir. Dokuzu %100 cüruf ve diğer dokuzu %50 cüruf ve %50 UK olmak üzere toplam 18 SIFCON karışımı üretilmiştir.

SIFCON karışımlarının üretiminde silis kumu (SK), geri dönüşümlü beton kumu (ABK) geri dönüşümlü tuğla kumu (ATK) geri dönüşümlü seramik kumu (ASK) olmak üzere dört Farklı agregada kullanılmıştır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 SIFCON (Çimento Bulamacı Emdirilmiş Lif Donatılı Beton)

SIFCON yüksek oranlarda süreksiz ve dağınık çelik lifler kullanılarak üretilen çimento esaslı bir yapı malzemesidir. SIFCON içerisinde çimento, puzolan, su, süper yayılmakanlaştırıcı ve ince agrega kullanılarak hazırlanan bulamaç ile %5-20 oranında çelik lif kullanılarak oluşturulmaktadır. Lifli betonlarda %1-3 olan çelik lif oranından 10 kat fazla çelik lif konulması yüksek performans göstermesini sağlar (Taşdemir ve Bayramov, 2010). SIFCON üretiminde ilk olarak lifler kalıba yerleştirilmekte daha sonra hazırlanan akıcı kıvamlı bulamaç kalıba dökülerek yapılmaktadır. SIFCON 4 temel özellik dikkate alınarak yapılır. Bunlar bulamacın dayanımı, liflerin homojen dağılımı, lif türü ve kullanılacak lif hacmidir. Özel olarak tasarlanan bulamaçların basınç ve eğilme dayanımları SIFCON'un dayanıklılığını etkilemektedir. SIFCON'da kullanılan lif türü ve lif oranı eğilme dayanımı, enerji yutma kapasitesi ve darbe dayanımı özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir (Dogan, 1998). SIFCON'da dayanım özelliğinde en fazla etkiyi gösteren çelik lifler daha çok kullanılmaktadır. Farklı (boy/çap) narinlik oranında ve şekillerde olan çelik liflerden daha çok uçları kancalı olan lifler tercih edilir (Baradan vd., 2015).

İnşaat sektöründe yeni nesil bir malzeme türü olan SIFCON'un kullanımının 1983 yılında ilk olarak, New Mexico Engineering Research Institute (NMERI) de Lankard tarafından yapılmıştır (Lankard ve Newell, 1984). Bu çalışmadan sonra birçok özelliği daha üstün olan SIFCON ile ilgili çalışmalar dünya üzerinde hızla devam etmektedir.

2.1.1 SIFCON'u Oluşturan Malzemeler

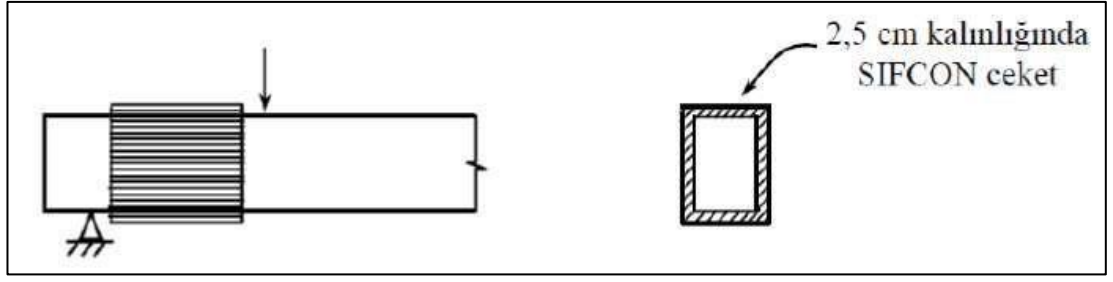
SIFCON numunelerinde kullanılan malzemeler çimento, silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül, ince agrega, çelik lif, su ve süper yayılma akışkanlaştırıcıdır. Bu malzemelerin teknik özelliklerinin yüksek ve her zaman bulunabilecek olmasına dikkat edilmelidir. Farklı bir üretim metodu gereken SIFCON'da kullanılacak malzemelerin maliyet açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir.

SIFCON’da bulunan yüksek orandaki liflerin arasından geçebilecek kıvamda ve homojen olarak dağılabilecek bir bulamaç hazırlanması önemlidir. SIFCON’da kullanılacak agrega boyutu ve türü geleneksel beton da kullanılan agrega türü ve boyutundan farklı olarak seçilir. SIFCON bulamacında kullanılacak ince agreganın en büyük tane boyutu seçimi çok önemlidir. Bunun nedeni kalıplara rastgele konulan liflerin arasındaki mesafenin belirsiz bir şekilde olmasıdır. Kullanılacak lif boyu ve şekline göre agrega tercih edilmelidir. Yapılan SIFCON çalışmalarında agrega boyutu ile ilgili bir kural olmamakla birlikte genel olarak en büyük tane boyutu 250-600 mikron arasında olan silis kumu kullanılmaktadır. Yüksek dayanım istenilen SIFCON’da oluşacak kusurlar minimuma indirilmeli ve çok iyi bir homojen yapı oluşturulmalıdır. Bulamaçların matris kısmında bütün boşluklarının tamamen doldurulması ve kompakt bir yapı oluşturmak için silis dumanı gibi çok ince taneli puzolan kullanmak gerekir. Özel üretim gereken yerlerde kullanılan reaktif pudra betonunda kullanılan malzemelerden beklenen performans SIFCON’da kullanılan malzemelerden de beklenmektedir (Svermova ve Bartos, 2002).

SIFCON’da eğilme dayanımı ve tokluk özelliğini etkileyen en önemli malzemelerden birisi kullanılacak lif türünün yapısı ve şeklidir. Genel olarak yapılan çalışmalarda çelik lif türü kullanılmıştır. Çelik liflerin içerisinde de en iyi özelliği ucu kancalı çelik lifler göstermektedir. SIFCON üretimin de kullanılacak malzemelerin normal betondan çok farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle kullanılacak malzemelerin seçiminde SIFCON’un lif ve matris yapısı düşünülerek çok dikkat edilmelidir. Teknik özellikleri yüksek homojen bir yapı oluşturan malzemeler kullanmaya dikkat edilmelidir.

2.1.2 SIFCON’un Kullanıldığı Alanlar

SIFCON daha çok yapıların tamiri, güçlendirilmesi ve dayanım bakımından iyileştirme gereken yerlerde kullanılır. Bu gibi onarım işlerinde kullanılmak üzere ince plaklar Şekil 2.1’de görüldüğü gibi uygulanarak hasarlı kırımların çevresi kaplanarak dayanım sağlanır (Yerlikaya, 2003). Askeri depolarda ve özel kısımları ayırmak için kullanılan panel ve duvarların üretiminde kullanılmaktadır. SIFCON’un parçalanmaya, patlama yüklerine ve kurşun etkisine karşı yüksek performans göstermekte bu nedenle askeri alanda da çok tercih edilir.



Şekil 2.1 SIFCON ile güçlendirme uygulaması (Yerlikaya, 2003)

Havaalanı pistleri ve çok ağır yükler bulunan depolama alanlarında iyi bir çözüm sağlar. Bu yerlerde uygulama Şekil 2.2’de görüldüğü gibi çelik liflerin zemin tabakasına gelişigüzel olarak istenilen oranda serilmekte ve akıcı kıvamdaki bulamaç enjekte edilmektedir (Canbay, 2014). Ağır hasar gören köprü, viyadük elemanlarında kısa sürede tamir ve kullanım imkanı sağlar (Naaman ve Baccouche, 1995). SIFCON yüksek enerji yutma ve darbe etkisine karşı direnci hidrolik yapılarda da tercih edilmesine sebep olmaktadır. İnce plakalar şeklinde üretilen SIFCON numuneler su yapılarında kaplama olarak kullanılabilir (Güngör, 2013).



Şekil 2.2 SIFCON'da bulamaç enjekte işleminin uygulanması (Canbay, 2014)

2.1.3 SIFCON’un Avantaj ve Dezavantajları

Son dönemde yüksek süneklik ve dayanım gereken işlerde SIFCON tercih edilmektedir. Dünya da son 50 yıllık dönemde yoğun çalışmalar yapılan SIFCON’un

aslında çok eski zamanlarda kullanılan bir teknik olduğu bilinmektedir. Eski zamanlarda horasan harcı içerisine saman, keçi kılı, vb. malzemeler katılarak oluşturulan yapı malzemesi, artık SIFCON olarak çalışılmaktadır. İnşaat sektöründe yeni nesil bir malzeme türü olan SIFCON'un kullanımının oluşturduğu birçok avantaj ve dezavantaj durumu da vardır. SIFCON'un önemli olan avantajları ve dezavantajları aşağıda verilmiştir.

2.1.3.1 Avantajları

- SIFCON'da kullanılan liflerin etkisiyle eğilme dayanımı yüksek bir yapıya sahip beton oluşmaktadır.
- Darbe dayanımının yüksek olması ve patlama etkilerine dayanıklı olması koruma duvarların da ve askeri binalarda kullanıma uygundur.
- Hasarlı yapıların (köprü, konut, hastane vb.) güçlendirilerek kısa sürede kullanıma hazır hale gelmesinde kullanılmaktadır.
- Düşük su/bağlayıcı oranı sayesinde sahip olduğu geçirimsiz yapısı SIFCON'un dayanıklılığını artırmaktadır.
- Donatı işçiliğinde azalma ve kolaylık sağlanır.
- SIFCON'da bulunan yüksek orandaki lifler ile etkin çatlak kontrolü sağlamaktadır. SIFCON sistemli bir çalışma ile seri üretim imkânı sunar.

2.1.3.2 Dezavantajları

- SIFCON'un üretim tekniği ve uygulaması özel bir yöntem gerektirdiği için üretimi zordur.
- SIFCON'da kullanılan malzemeler farklı özelliklerde olduğu için normal betona göre yüksek maliyet oluşmaktadır.

- SIFCON numunelerini oluşturmak için özel sızdırmazlık sağlayacak kalıplar gerekmektedir.
- Bulamaç yapısının yoğun lifler arasına girebilmesi için akıcı kıvamda dayanım özellikleri yüksek bulamaç tasarımı gerekir.
- SIFCON elemanları onarım güçlendirme işlemlerinde taşıyıcı eleman ile bütünlüğünü sağlamak için özel yapıştırıcı malzemeler gerektirmesi ve yüksek maliyet oluşmasına neden olur.

2.2 Geopolimer

Geopolimer, kireç ve sıradan Portland imentosunun ardından üçüncü nesil imento olarak kabul görmektedir. Geopolimerlerin genellikle "inorganik polimerler", "alkali ile aktive edilmiş çimentolar", "geocementler", "alkali- bağlı seramikler", "hidroseramik" şeklinde çeşitli isimleri vardır. Bu çeşitli adlandırmalara rağmen, bu terimlerin tümü benzer kimyasal maddelerden sentezlenen malzemeleri tanımlar (Singh vd., 2013).

Geopolimer 1970'lerin başında Davidovits tarafından tanıtılmıştır. Geopolimer genellikle katı olan alüminosilikat tozunun alkali bir metal silikat yada hidroksit çözeltisi ile tepkimeye giren ve ortam sıcaklığında yada bir dereceye kadar artırılmış sıcaklıklarda meydana gelen malzeme sınıflarıdır. P ile kıyaslandığında geopolimer daha az enerji tüketime, daha az CO₂ yayılımı, yüksek erken dayanıma, daha az bzlmeye, daha düşük geçirgenliğe, yangın ve asit dayanımına sahiptir. Bu zellikler, malzemelerin türü, alüminosilikat kaynaklarındaki mineralojik ve kimyasal bileşim gibi pek çok etkene bağlıdır (Kouamo vd., 2012).

CO₂ salınımı temel olarak imento üretimi esnasında fosil yakıtların yakılması ve kireçtaşının ayrışmasından ötürü meydana gelmektedir. Ayrıca ğtme ve taşıma da imento endüstrisinin çevresel zararlarında önemli sebeplerdendir. Çimento endüstrisi kısıtlanmış karbon endüstrisinde alternatif bağlayıcı olmasının doğruluğunu kabul etmeye başlamaktadır. CO₂ emisyonunu düşüren ve ayrıca bazı avantajları olan alternatif bağlayıcı malzemeler mevcuttur (Van Deventer vd., 2012).

Geopolimerler bir yapı malzemesi olarak son zamanlarda dikkat çekmektedir. Artan çevresel kaygılar ve azalan doğal kaynaklar nedeniyle geopolimerler, PÇ için değerli bir alternatif olarak görülmektedir. Geopolimerler, PÇ ile benzer özelliklere sahip olabilir, ancak diğer endüstrilerin yan ürünlerinden (örneğin UK, YFC) veya daha az enerji isteyen ve CO₂ yayan malzemelerden (örneğin kalsine kil, alkali aktivatörler) üretilirler (De Weerd, 2011).

Geopolimer üretmek için iki cins malzemeye ihtiyaç duyulur. Biri alümina ve silika bulunduran kaynak malzeme ve diğeri polimerizasyon tepkimesini aktive eden bir alkalidir. Kaynak malzemeler (alümino-silikat), kaolinit, kalsine kaolinit ve killer gibi doğal mineraller olabilir. Bunların yerine, UK, cüruf, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı gibi endüstri atıkları, geopolimerlerin bileşimi için kaynak malzeme olarak kullanılabilir. Kaynak malzeme amorf olmalıdır ve polimerizasyon derecesi çoğunlukla alümino silikat malzemelerin amorflik ve incelik derecesine bağlıdır (Ganesh ve Muthukannan, 2018).

Geopolimer; UK, metakaolin, cüruf vb. gibi katı alüminosilikat bazlı malzemelerin bir alkali metal hidroksit ve silikat çözeltisinin termal aktivasyonu ile sentezlenen bir alüminosilikat bağlayıcı malzeme sınıfıdır. Bu bağlayıcılar, Portland çimentosuna göre yüksek performanslı, çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif olarak potansiyel kullanımları nedeniyle şu anda yaygın ilgi görmektedir (Thakur vd., 2019). Davidovits'e göre geopolimerik malzemeler, otomobil ve havacılık, demir dışı dökümhaneler ve metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik endüstrileri gibi endüstriler alanında geniş bir uygulama alanına sahiptir (Rangan, 2014).

2.2.1 Geopolimer Beton

İnsan nüfusunun aşırı artması ve endüstrilerin yenilikçi gelişimi sonucu konut ve altyapılar için büyük bir ihtiyaca gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle, giderek daha fazla inşaat ve altyapı geliştirmesi önemli hale gelmiştir. Bu da, Romalılardan beri yaygın olarak kullanılan temel bir yapı malzemesi olan betona olan talebi arttırmıştır. Bunun sonucunda beton üretimi için temel bileşenlere yani ince ve kaba doğal malzemelerle birlikte bağlayıcı olarak PÇ'nin kullanımı da arttırmıştır. PÇ'nin mevcut

Üretim sürecinde daha yüksek enerji elde etmek için doğal malzemelerin yanı sıra hammadde olarak kireçtaşı gerektirmektedir. Bu süreç sadece doğal kaynakları yok etmekle kalmaz, aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda kireçtaşından dolayı CO₂ de yayar. Bu doğa ve küresel ısınma için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, bir yandan, doğal agregaların kullanımının azaltılması son derece arzu edilirken, diğer yandan çeşitli atık malzemelerin, P veya doğal agrega için bir ikame malzemesi olarak uygulanmaları amacıyla geopolimer beton geliştirilmiştir (Luhar vd., 2020).

Uçucu kül, metakaolin, crf, pirinç kabuğu külü ve yüksek kalsiyumlu odun külü gibi alminosilikatların alkali çözelti kullanılarak aktivasyon yoluyla polimerize edilmesiyle geopolimer beton üretilir. Bu nedenle geopolimer beton üretimindeki verimlilik, aktivatörlerin yanı sıra alüminosilikat kaynaklarının türlerine de büyük ölçüde bağlıdır. Geopolimer beton yan ürün atıklarını imento yerine kullanma ve üretimi sırasında sera gazı emisyonunu azaltmadaki avantajı nedeniyle, araştırmaı bilim adamları ve inşaat uygulayıcıları arasında önemli bir ilgi görmeye başlamıştır. Ayrıca geleneksel betona göre daha iyi mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahiptir (Chau-Khun vd., 2018).

2.2.1.1 Geopolimer betonun avantajları

P ile karşılaştırıldığında, geopolimerler aşağıdaki özelliklere sahiptir;

- Bol hammadde kaynakları: Alkali zeltide kolayca zlen herhangi bir puzolanik bileşik veya almino-silikat kaynağı, geopolimer üretimi kaynağı olarak yeterlidir.
- Enerji tasarrufu ve evre koruma: Geopolimerler büyük enerji tüketimi gerektirmez. Nispeten düşük sıcaklıkta doğal alümino-silikatların ısıl işlemi, uygun geopolimerik hammaddeler sağlayarak portland çimentosundan %60 daha az enerji tüketir.
- Basit hazırlama tekniği: Geopolimer, alümino-silikat reaktif malzemelerle kuvvetli alkali çözeltilerin karıştırılması ve ardından oda sıcaklığında krlenmesiyle basitçe sentezlenebilir. kısa sürede yeterli dayanım gösterir.

- İyi hacim kararlılığı: Geopolimerler, portland çimentosundan %80 daha düşük büzülme özelliğine sahiptir.
- Kısa sürede yeterli dayanım kazanımı: Geopolimer, prizin ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının %70'ini elde edebilir.
- Ultra-mükemmel dayanıklılık: Geopolimer beton veya harç, çok fazla fonksiyon kaybına uğramadan binlerce yıllık hava koşullarına karşı koruma sağlayabilir.
- Yüksek yangın direnci ve düşük ısı iletkenliği: Geopolimer 1200°C'ye yapısında bozulma olmadan dayanabilir. Geopolimerin ısı iletkenliği 0,24- 0,3 W/m.K arasındadır ve bu yönüyle hafif tuğlaların ısı iletkenliğinden daha azdır (Z. Li vd., 2004).

2.2.1.2 Geopolimer betonun dezavantajları

Geopolimer betonun dezavantajları şöyledir (Zerfu ve Ekaputri, 2016):

- Geopolimer üretiminde kullanılan alkali çözeltisi pahalıdır. UK çimentoya göre daha ekonomik olsa da, alkali çözeltinin maliyeti toplam maliyetin %60'dan daha fazladır.
- Geopolimer betonlar kırılgan yapıya sahip olduğu için yüksek darbe yükü sonucu geniş yayılma çatlakları oluşabilir. Bu durum maksimum yüke vardığında herhangi bir uyarı vermeden kırılabileceğini gösterir. Bu nedenle pratik yapıda uygun olamayabilir.
- Erken yaşlarda dayanım en çok kürlenme şartlarına bağlıdır. Geopolimer betonun dayanım kazanması için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulur. Bu nedenle yüksek sıcaklığın ve stabil nem durumunun olmadığı ülkelerde yerinde beton dökülmesini engelleyebilir. Ancak tropikal ülkelerde bu engel olmayabilir ve tabi olarak kür edilebilir.

2.2.2 Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimerler yüksek dayanım özelliği, yüksek sıcaklıklara direnç göstermesi, maksimum dayanımı ve hızlı priz yapması gibi özelliklerinin olmasından dolayı atık arıtmada, yangın dayanıklılığında, inşaat ve askeri mühendislikte ve ayrıca biyomalzemelerde kullanılmaktadır (Yao vd., 2009).

Geopolimer teknolojisi için yüksek performans uygulama alanları şunlardır (Vickers vd., 2015);

İnşaat kullanım alanları;

- Tünel kaplaması
- Kanalizasyon arıtması, setler için kimyasal direnç, döşeme kaplaması
- Güneş enerjili ısı transfer elementleri
- Lağım suyu, kanalizasyon boruları
- Gaz ve petrol kuyu dibi çimentolaması
- Mevcut geleneksel portland çimentolu yapılar, ahşap ve çelik için ısı dayanım kaplamaları
- Demiryolu traversleri

Askeri kullanım alanları;

- Yangına dayanıklı yakıt depolama
- Cephane depolama yerleri

- Egzoz gazı termal yalıtımı, düşey kalkış ve iniş rampaları, zırhlanmış araçlar, askeri gemilerin türbin motor egzozu
- Askeri denizcilik: yangına dayanımlı bileşenler

Zararlı atık yönetimi;

- Su saflaştırması
- Toksik metal enkapsülasyonu
- Nükleer atık depolaması

2.3 Yüksek Fırın Cürufunun Tanımı ve Sınıflandırılması

Üretim endüstrisinin önemli yapı taşlarından birisi olan demir-çelik tesislerinde yer alan yüksek fırınlar vasıtasıyla demir üretimi gerçekleştirilir. Demir üretimi esnasında endüstriyel atık olarak değerlendirilebilmesi mümkün olan yüksek fırın cürufu (YFC) olarak adlandırılan bir endüstriyel alanlarda tekrar kullanımı mümkün olan bir yan ürün ortaya çıkmaktadır. Temel olarak demir eldesinde tercih edilen hammaddeler kireç taşı, demir cevheri ve kok kömürüdür. Genellikle cevherler yapılarında çeşitli safsızlıklar barındırabilmektedir. Örneğin demir üretiminin temel hammaddesi olan demir cevheri yapısında demir oksit, silisyum, alüminyum oksit gibi bileşimler içermektedir. Demir üretiminde gerekli prosesler uygulandığında yüksek fırında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucunda bu maddeler yapıdan uzaklaştırılmaktadır. Kalsiyum karbonat bu işlemlerin gerçekleşmesinde yardımcı görev üstlenen bir hammaddedir. Yakıt ihtiyacı ise kok kömüründen sağlanır.

Dışarıdan sürekli hammadde ilavesi gerçekleştirilen yüksek fırınların hazne kısmındaki sıcaklık 1850°C civarlarına çıkmaktadır. Kimyasal reaksiyonların gerçekleşip metalin ergiyik hale gelmesi için gereken yüksek sıcaklık değerlerine çıkıldığında ergimiş metalin üst kısmında kaymak tabakasına benzer bir tabakada cürufklar toplanırken altta ise pik demir oluşur. Oluşan bu yapı fırının alt haznesinde toplanır. Pik demir ve cüruf yüksek fırının hazne kısmından ayrı ayrı boşaltılır.

Sonrasında soğutma işleminin gerçekleştirilmesi gerekir. Tercih edilen soğutma yöntemi nihai ürünün niteliklerini ve kullanılacağı alanı belirlemektedir. Cürufkların kimyasal yapıları değişmekte olup genel olarak yüksek oranda CaO, MgO, Al₂O₃ ve SiO₂ gibi cam yapıcı oksitleri içermektedir (Erdoğan, 2004).

2.4 Uçucu Küllerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Günümüzde enerji üretimi tüketime bağlı olarak artmaktadır. Artan tüketim ile birlikte gereken enerji ihtiyacı çeşitli enerji santralleri tarafından karşılanmaktadır. Termik santraller ülkemiz nezdinde gerekli enerjinin tüketime oranla büyük çoğunluğunu gıdermektedir. Termik santrallerde kullanılan fosil katı yakıtların yanma işlemlerinin gerçekleştirilmesi sonucunda malzeme üretiminde değerdendirilebilecek atık statüsünde olan uçucu küller meydana gelmektedir (Kaya, 2016). En önemli katı yakıt kaynaklarından birisi olan kömürler değirmenler vasıtasıyla öğütme işlemine tabi tutulup toz hale getirildikten sonra sıcak hava yardımıyla yanma fırınlarına püskürtmek suretiyle aktarılır. Aktarılan kömür tozlarının verimli bir şekilde yanması için gereken sıcaklık 1500-1700°C aralığındadır (Jambhulkar vd., 2018; Mo vd., 2017; Yılmaz, 1992). Yakılan kömür tozlarından meydana gelen uçucu küllerin %15-20 aralığındaki kısmı kazanların alt kısımlarında birikerek su yardımıyla uzaklaştırılır. Geriye kalan %75-80 oranındaki küller bacalarda oluşan gazlar yardımıyla taşınırken çeşitli filtreler ve filtreleme yöntemleriyle uçucu küllerin açık atmosfere karışmaları engellenir ve tesis dışında yer alan özel depolarda saklanır. Tane yapısı küresel olan uçucu küllerin tane boyutu 0,5-100 µm aralığındadır. Termik santrallerde kullanılan kömürlerin yakımı sonrasında meydana gelen uçucu küller %15-25 taş kömürlerinin, %25-45 ise linyit kömürlerinin yanması sonucu elde edilmektedir. Uçucu küller iki başlıkta kategorize edilmektedir:

- a) Linyit (kahverengi kömür) kömürü yakımı sonrası elde edilen uçucu küller
- b) Taş kömürü yakımı sonrası elde edilen uçucu küller (Yılmaz, 1992).

Uçucu küller tane yapıları, soğutma türleri gibi değişkenlere dayanarak üç ayrı biçimde oluşmaktadır:

- 1) Bacalardaki gazlar vasıtasıyla taşınımı mümkün olan ince tane yapısına sahip uçucu küller,
- 2) Baca gazları vasıtasıyla taşınımı mümkün olmayan ve kazan bölümünün taban kısmına düşen iri tane yapısına sahip uçucu küller,
- 3) Yakımı gerçekleştirilen kömürlerin su yardımıyla soğutulması sonucunda oluşan ham küller (Kaya, 2016).

Kimyasal olarak incelendiğinde uçucu küller yapılarında Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 ve CaO gibi bileşikler içermektedir, bu nedenle atıkların değerlendirilmesi aşamasında kullanılabilir. Uçucu küller genellikle içerdikleri kimyasal bileşiklere göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Genel olarak kimyasal yapısı, bulundurduğu sodyum trioksit (SO_3) ve kireç miktarına göre üç şekilde sınıflandırılabilir:

- Genellikle taş kömürlerinin yakımı sonucunda oluşan, SiO_2 ve Al_2O_3 bakımından zengin silikoalüminat yapıları silikoalüminoz olarak adlandırılan uçucu küller,
- Linyit kömürünün yakımı sonucunda meydana gelen ve diğer türlerine nazaran CaO ve SO_3 miktarının yüksek olduğu, sülfokalsik olarak adlandırılan uçucu küller,
- Yine linyit kömürünün yakımı sonucunda oluşan, yapısında bulunan silika ve kireç miktarı yüksek, silikokalsik olarak adlandırılan uçucu küller (Çelik, 2004; Kaya, 2016).

2.5 Geri Dönüşüm Agregası

Normal beton kütlece yaklaşık olarak %12 çimento, %80 agrega ve %8 karışım suyu içermektedir. Dünya çapında yılda yaklaşık 10 milyar ton betonun büyük bölümünü oluşturan agrega kullanılmaktadır (Mehta, 2002).

İnşaat ve beton endüstrisi için kullanılan agrega miktarının çok olması ve bunun ekolojik dengeye zararları göz önünde bulundurulduğunda agregaların geri dönüştürülmesi büyük önem kazanmaktadır.

2.5.1 Geri Dönüşüm Agregasının Kullanım Amacı

Sürdürülebilirlik açısından enerji ve doğal hammadde tüketiminin ve atık madde miktarının azaltılması çevrenin korunması ve ekolojik denge için büyük önem taşımaktadır. Artan nüfus artışı inşaat sektörünün de hızla gelişmesine ve bu da atık maddelerin oluşmasına, enerji ve doğal hammadde sarfiyatına sebep olmaktadır. Agrega kaynaklarının her geçen gün azalması, çevre kirliliğinin artması ve maliyet yeni araştırmaların yapılmasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, atık betonların kırılarak agregasının geri dönüşüm agregası olarak kullanımı ekolojik dengenin korunması açısından son derece önemlidir. Yapı sektöründe kullanılan malzemelerin yaklaşık %50'sinin doğal kaynaklardan karşılandığı araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır. Bu çerçevede, beton için çimento yerine mineral katkıları, agrega için ise atık betonlardan elde edilen agregaların kullanımı araştırılmalıdır (Demirel ve Şimşek, 2014).

2.5.2 Geri Dönüşüm Agregasının Kullanım Alanları

Ekonomik ömrünü tamamlamış, doğal afet sonucunda veya olası afet sonrası ağır hasar görmesi ilmi ve teknik verilere göre tespit edilmiş yapılar yıktırdıktan sonra oluşan atıklar ayrıştırıldıktan sonra temizlenip, onarılan agregalar çeşitli deneylere tabii tutularak yeni yapıların inşasında kullanılabilir. İnşaat yıkıntısında oluşan malzemeler geri dönüştürülebilir ve kullanılabilir. İnşaat teknolojisinde kullanılan hammaddelerin birçoğu bu şekilde karşılanabilmektedir. Ancak, bu geri dönüşüm ve kullanılabilirlik belirli kurallara bağlanmalıdır. İnşaat yıkıntı atıkları ayrıştırılıp, temizlendikten sonra örneğin dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Ayrıca, inşaat donatısı diğer malzemelerden ayrıştırılıp temizlendikten sonra altyapı malzemesi olarak kullanılabilir. Benzer şekilde, ayrıştırılıp, kırılarak elde edilen betonlar kaldırım yapımında, drenaj sistemlerinde, su, kanalizasyon inşaatında, çakıl yollarda, açık garaj

yapımında kullanılabilir. Agregaların geri dönüştürülmesi ile enerji ve hammadde tasarrufu yapılmış olur (Tüfekçi, 2011).

2.6 Atık Tuğla

Atık kil tuğla (AKT) silikat içerikli katı bir atıktır. Geri dönüşümü büyük çevresel ve sosyal öneme sahiptir. AKT'nin betonda, harçta, duvar malzemelerinde geri dönüştürülerek, kaba ve ince agrega olarak kullanılabilmektedir. Çimento üretiminde de hammadde veya katkı maddesi olabilir.

Tuğlalar küresel olarak tüketilen en baskın yığma birimleridir. Tuğla üretimi enerji tüketen bir süreçtir ve büyük miktarda hava kirliliğine sebep olmaktadır. Tuğlalar milattan önce 1400'den kalma geleneksel bir yapı malzemesidir ve şimdiye kadar inşaatta kullanılan yaygın duvar malzemesidir. Kil tuğlalar, fırın içinde yüksek sıcaklıklarda (800-1400°C) pişirilerek üretilir. Ciddi hava kirliliği sorunlarına neden olan tuğla fırınları atmosfere zehirli maddeler saldığından ciddi sağlık sorunları oluşturmaktadır. Sürdürülebilir bir gelişme için tuğla üretiminin, enerji verimli bir yolla yapılması gerekir (Ganesh vd., 2020).

2.6.1 Tuğla Atığının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Atık tuğla tozu PÇ esaslı betonda tamamlayıcı bir çimentolama malzemesi olarak veya geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanılacak yeterli puzolanik özelliklere sahip bir malzemedir. Puzolanlılık ana özellikleri amorf faz miktarı, parçacık boyutu dağılımı ve Spesifik yüzey alanı olan birkaç özelliğe bağlıdır. Atık tuğla tozu alkali aktif materyallerde veya geopolimerlerde başarıyla kullanılabilmektedir (Rovnaník vd., 2018).

Atık tuğla tozunun puzolanik özelliklerinden dolayı beton üretiminde çimentonun yerini almak için uygun bir adaydır. Kil tuğla üretimi silikatlarının yapısında oda sıcaklığında kireçle reaksiyona giren amorf bir bileşiğe dönüşmesine neden olan 600 ile 1000°C arasında değişen yüksek sıcaklıklara maruz kalmayı ifade etmektedir. Buna ek olarak çimento veya harç tuğlalarından elde edilen tozun yeniden kullanımının çalışıldığı birçok çalışmanın olduğunu belirtmek önemlidir. Bu bağlamda atık tuğla

tozu ile karşılaştırıldığında temel fark, çimento tuğla tozunun yeniden kullanılması için, çimento parçacıklarının hidrolik ve puzolanik özelliklerini kısmen geri kazanmak için yeniden hidrate edilmesi amacıyla kırıldıktan sonra bir ısı işlem yapılmasının gerekli olmasıdır. Atık tuğla tozunun morfolojik olarak düzensiz parçacıklardan oluştuğu söylenebilir (Letelier vd., 2018).

Atık tuğla tozu, yüzeyinin çimento harcı ile yapılıp yapılmadığına göre çoğunluğu SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşan tipik silikat katı atıklardır. İkisinin miktarı toplam en az %80'ni oluşturmaktadır. Diğer bileşikler Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO vb.'dir. Mineral bileşenler esas olarak kuvars, feldispat ve hematittir. Ancak tamamen sinterlenmemişse kil madenleri ve karbonat da vardır. Atık tuğla tozu yüzeyinin pürüzlü gözenekli olması köşe açılarının çok olması ve üzerinde parçalanma ve ezilmeden kaynaklanan mikro çatlakların olması nedeniyle doğal agregaya göre düşük dayanım ve yüksek higroskopiklik özelliklerine sahiptir (Cheng, 2016).

Değişken miktarlarda yapısal su içeren silisyum ve alüminyum oksitler ve hidroksitler açısından zengin çeşitli fillosilikat minerallerinden oluşmaktadır. Atık tuğlalar yapay bir puzolandır ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ varlığında hidratlanabilmektedir. Serbest kirecin (CaO) puzolan katkısıyla (AlO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3) su varlığında reaksiyona girmesiyle çimentolu malzeme oluşumu hidrasyon olarak bilinmektedir. Hidratlı kalsiyum silikat jeli veya kalsiyum alüminat jeli (çimentolu malzeme) atıl malzemeyi birbirine bağlayabilmektedir. Kalsine kilin kireç içeriği nispeten düşük olduğundan atık tuğlanın puzolanı ile hidrasyon reaksiyonu için kireç ilavesi gerekmektedir. Yukarıdaki reaksiyon hızının sıcaklıkla artması $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin daha fazla Ca^{++} ve OH^- iyonu veren çözeltide çözünmesinin artmasından kaynaklanabilmektedir. Kalsine kilde trikalsiyum alüminatın hidrasyonu birçok killerde birincil çimentolu ürünlerden birini sağlamaktadır. Kalsine kilin hidrasyon kimyası çok karmaşıktır. Matriste atık tuğla bulunması harcın erken basınç dayanımını arttırmakta ve artan atık tuğla içeriği ile harcın direnci azalmaktadır. Harcın erken ve uzun vadeli dayanımı matrise cüruf ve uçucu kül eklenmesiyle iyileştirilebilmektedir (Naceri ve Hamina, 2009).

Pişmiş kilin rengi kimyasal bileşimine, pişirme sıcaklıklarına ve pişirme kontrol yöntemine bağlıdır. Killerde yaygın olarak bulunan tüm oksitlerden demir muhtemelen renk üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Doğal renginden bağımsız olarak pratik olarak herhangi bir biçimde demir içeren kil demir oksit oluşumu nedeniyle oksitleyici bir ateşe maruz kaldığında kırmızı bir ton sergileyecektir. İndirgeyici bir atmosferde pişirildiğinde aynı kil koyu veya siyah bir renk alacaktır. Fırında indirgeyici bir atmosfer yaratmak yanıp sönme veya indirgenmiş ateşleme olarak bilinir. Aynı hammadde ve üretim yöntemi göz önüne alındığında daha koyu renkler daha yüksek pişirme sıcaklıkları daha düşük absorpsiyon değerleri ve daha yüksek basınç dayanımı değerleri ile ilişkilendirilir. Ancak farklı hammaddelerden yapılan ürünlerde dayanım ile renk veya absorpsiyon ile renk arasında doğrudan bir ilişki yoktur (BIA, 2006).

2.7 Atık Seramik

Endüstri sanayisinin gelişmesine paralel olarak üretilen malzemelerden çıkan atık maddeler gün geçtikçe artış göstermekte ve bu maddelerin yeniden değerlendirilmesi için çalışmalar yapılmadığı takdirde birçok endüstri sektörü atığı çevre kirliliği açısından insanlık için büyük sorun teşkil etmektedir. Günümüzde bu endüstriyel atıklardan yüksek verim elde etmek amacıyla çeşitli alanlarda kullanılması ile ilgili çalışmalar gittikçe yaygınlaşmıştır. Bu endüstriyel atıklar içerisinde en önemli olanları inşaat sektöründe olup bu atıkların arasından; seramik, cam, refrakterler ve kompozitler üzerine atık yönetimine yönelik geniş çaplı çalışmalar mevcuttur. Çevre kirliliğine neden olan bu malzemeler doğru bir şekilde kullanıldığında istenilen ekonomiklik elde edilmiş olunacaktır (Mırdalı ve Çetin 2005).

Bu endüstriyel atıklardan biri de seramik atıklardır. Seramik kaplamalarının üretimindeki farklı aşamalarda (sır işlemleri, şekil verme işlemleri, pişirme aşaması, parlaklık katma aşaması ve taşlama) meydana gelen kırıklar, çatlıklar veya düşük standartta üretim nedeniyle çok yüksek miktarlarda atık malzeme ortaya çıkabilmektedir. Bu durum seramik endüstrisindeki üretim sırasında her aşamada oluşan atıkların neden olduğu çevresel sorunlara ek olarak depolama sebebiyle yüksek maliyetlerin oluşmasına da neden olmaktadır (Poyraz ve Yılmaz, 2018). Dünya

seramik üretim sanayisi 11 milyar m² ile inşaat sektöründe önemli yere sahiptir. Bu sektörde yapılan üretimler sonucunda minimum %5 oranı kadar atık seramik (Şekil 2.3) meydana gelmekte ve bu miktar dünyada yaklaşık olarak 550 milyon m² gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 2.3 Atık seramik (Poyraz ve Yılmaz, 2018)

Atık madde olarak dünyada yüksek miktarlara ulaşan seramik malzemesi sahip olduğu yüksek sertlik ve dayanıklılık sayesinde beton endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır.

Betonun mekanik özellikleri üzerinde seramik atıkların etkisinin incelendiği çalışmalar irdelendiğinde;

Seramik atıkları ince agregaya yerine %40; 50; 60 oranlarında katılması ile elde edilen betonda 7; 28; 90 ve 365 gün standart kür sonunda yapılan mekanik testler sonucunda tüm kür sürelerinde en iyi basınç dayanımı %60 oranında seramik atık kullanılması sonucunda elde edilmiştir (Binici, 2007).

Porselen seramik atığı ve daha düşük sıcaklıklarda üretilen kırmızı seramik atıklarının beton üretiminde iri agregaya yerine %25; 50; 75 ve 100 oranında kullanılması ile elde

edilen betonların basınç dayanımları incelendiğinde iki atık maddenin %100 oranında kullanılması ile dayanımda artış olduğu gözlemlenmiştir. Artış oranının porselen seramik atık ile %41'e kadar iken kırmızı atık seramikte ise %29 olduğu belirlenmiştir (Keshavarz ve Mostofinejad, 2019).

Geleneksel betonda kullanılan iri agrega yerine %10; 20 ve 30 oranında seramik atık ikame edilerek oluşturulan betonların 7; 28 ve 63 günlük kür sonundaki basınç dayanımlarında artış olduğu ve en iyi sonucun %30 oranında iri agrega yerine seramik atık kullanılması ile elde edildiği görülmüştür. Kür süresinin artışı ile seramik atık agregalı betonların basınç dayanımları ile geleneksel betonların basınç dayanımları arasındaki farkın açıldığı belirlenmiştir. Ayrıca seramik atık agregasının miktarının artışı ile betonun birim hacim ağırlığının azaldığı gözlemlenmiştir (Rashid vd., 2017).

Seramik atığın ince ve iri agrega yerine kullanılması ve çimento olarak alüminli çimento tercih edilmesi sonucunda seramik atığın her iki agreganın yerine kullanımı ile yüksek dayanım sağladığı belirlenmiştir (Halicka vd., 2013).

Seramik kırıklarının agrega (iri ve ince) yerine %33; 67 ve 100 oranlarında katılması ile elde edilen betonlarda en iyi basınç dayanımının %33 ince %67 iri agrega yerine kullanılan seramik atıklı betonlardan elde edildiği görülmüştür (Correia vd., 2006).

İnce agrega yerine %20; 40; 60; 80 ve 100 oranlarında seramik atık kullanılması ve su/bağlayıcı oranının 0,35; 0,45; 0,55 oranlarında tutulması ile elde edilen beton numunelerde 28 gün standart kür sonunda basınç dayanımında en iyi sonuç %60 oranında seramik atık kullanımı ve su/bağlayıcı oranının 0,35 seviyesinde iken elde edilmiştir (Siddique vd., 2019).

Seramik endüstrisinde açığa çıkan seramik tozunun (ST) çimento yerine kullanılabilirliği araştırıldığında, %10 seramik atık tozu katkısının 28 günlük eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve asitlere dayanıklılığını arttırdığı belirlenmiştir (Kalinçimen vd., 2015).

Seramik atığın iri agregaya yerine %15; 20 ve 25 oranında kullanılması ile oluşturulan beton gruplarında, %25 oranında kullanılması sonucunda basınç ile çekme dayanımlarında %12 ile %25 oranlarında artış sağlandığı ve seramik atık agregasının çimento hidratasyonuna olumsuz etkisinin olmadığı belirlenmiştir (Medina vd., 2012).

Seramik atık agregasının beton karışımlarında ince agregaya yerine %10; 20; 30; 40; 50 ve 100 oranında kullanılmasıyla birlikte elde edilen beton gruplarının 7; 14 ve 28 gün kür sonunda; seramik atığın ince agregaya yerine %50 oranına kadar katılması ile basınç dayanımının arttığı ve bütün oranlardaki basınç dayanımının geleneksel betonun basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür (Torkittikul ve Chaipanich, 2010).

Doğal agregalar ve seramik atığın iri agregaya yerine kullanılması ile 6 farklı su/çimento oranında üretilen betonlarda gerçekleştirilen mekanik deneylere göre; s/ç oranı azaldıkça basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı artarken, bu deney sonuçları incelendiğinde geleneksel beton agregası ile üretilen betonların seramik atıklı betonlara göre ortalama %9 daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Senthamarai ve Manoharan, 2005).

Seramik atıkların beton performansına etkisinin incelendiği literatür çalışmaları özetlenirse; seramik atık malzemelerinin betonda kullanılmasının son zamanlarda çok yaygınlaştığı, farklı atıkların oranlarına ve kimyasal özelliklerine göre betonda performans artışı sağladığı görülmektedir.

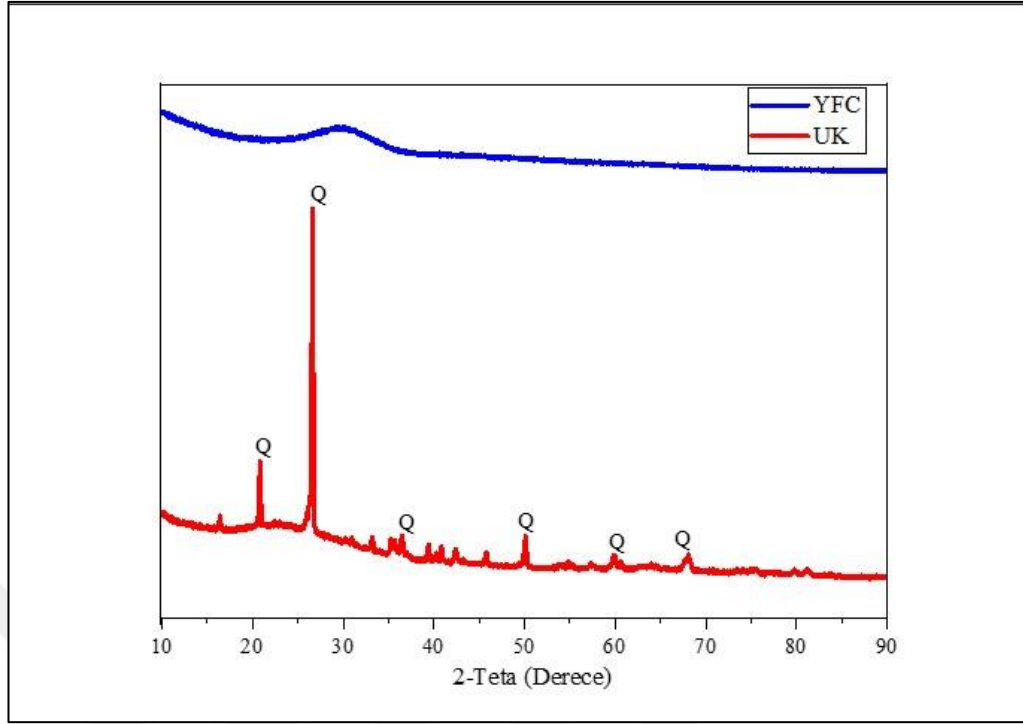
3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

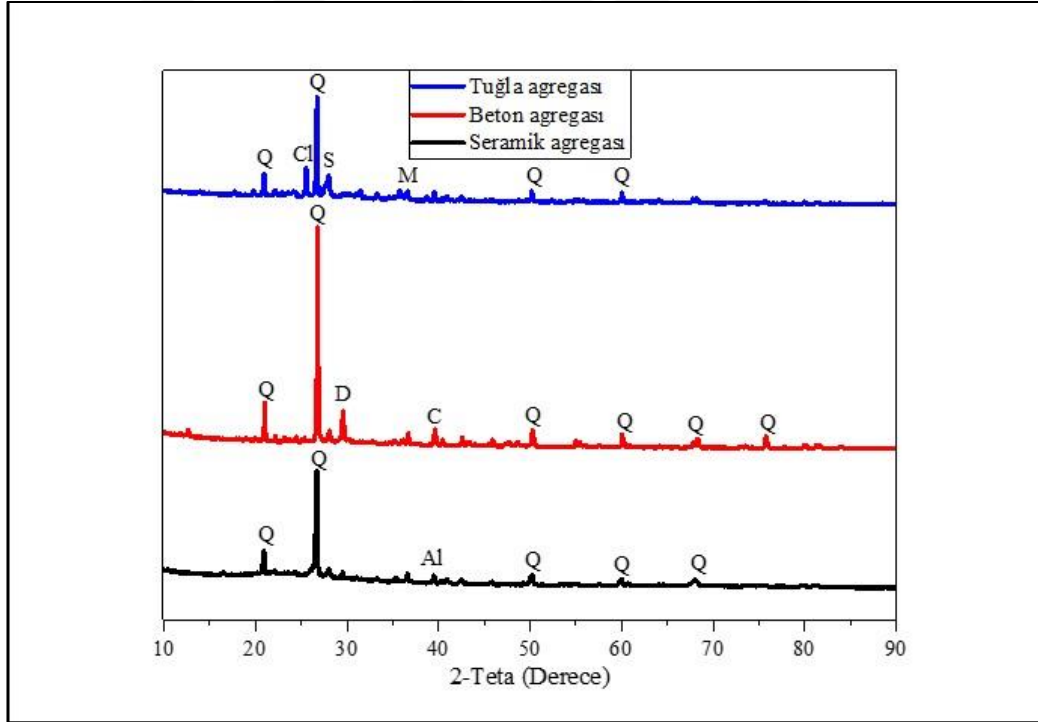
SIFCON karışımlarını üretmek için, bu çalışmada alüminosilikat bağlayıcıların ana kaynakları olarak YFC ve uçucu kül UK kullanılmıştır. UK, ASTM C618 standardına göre F sınıfındadır. YFC ve UK'nın özgül ağırlığı sırasıyla 2,85 ve 2,43'tür. UK ve YFC'nin spesifik yüzey alanları, Blaine yöntemi ile sırasıyla 3600 ve 5900 cm²/g olarak ölçülmüştür. Tablo 3.1, YFC ve UK'nın kimyasal özelliklerini gösterir. Dokuzu %100 cüruf ve diğer dokuzu %50 cüruf ve %50 UK olmak üzere toplam on sekiz SIFCON karışımı üretilmiştir. SIFCON karışımlarının üretiminde silis kumu (SK), geri dönüşümlü beton agregası (ABK) geri dönüşümlü tuğla agregası (ATK) geri dönüşümlü seramik agregası (ASK) olmak üzere dört farklı agregası kullanılmıştır (Şekil 3.2). XRD analizlerinde görüldüğü gibi, YFC'nin camı faz içeriği yüksek görünmektedir (Şekil 3.1). UK'da çok sayıda kuvars zirvesi de görülmüştür. Atık agregalar da kuvars pikleri göstermiştir. Atık seramik agregası içerisinde çoğunlukla kil esaslı bileşenler gözlenmiştir. Şekil 3.3'deki SEM görüntülerinde görüldüğü gibi, tüm atık agregaların köşeli ve pürüzlü bir parçacık şekline sahip olduğu görülmektedir. Agregası yüzeylerinde çatlaklar görülmüştür. Bu çatlakların agregaların parçalanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca atık beton agregası içerisinde C-S-H jellerinin varlığı belirlenmiştir.

Tablo 3.1 YFC ve UK'nın kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)

Oksit	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
YFC	50,3	30,1	11,1	1,1	5,3	0,3	0,3	0,1	0,2
UK	5,4	59,4	26,6	4,8	1,9	0,2	1,2	0,2	0,2



a)

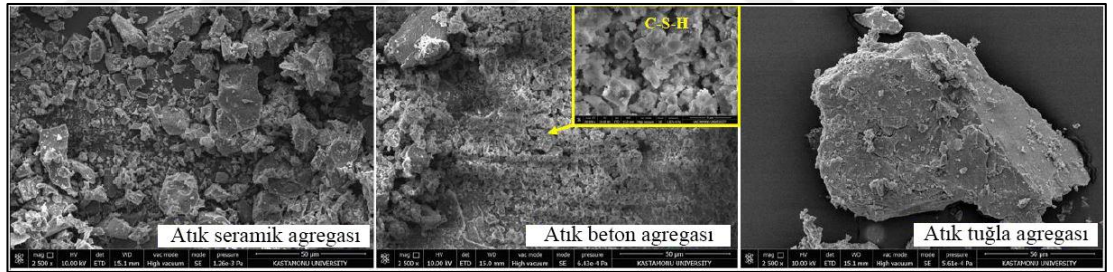


b)

Şekil 3.1 Bağlayıcıların ve geri dönüştürülmüş agregaların X-ışını kırınımı (XRD) modelleri (Q: Kuvars, Cl: Klinoklor, S: Sanidin, M: Muskovit, D: Dolomit, C: Kalsit, Al: Alüminyum minerali)



Şekil 3.2 Atık agregaların genel görünümü



Şekil 3.3 Atık agregaların SEM görüntüleri

SIFCON karışımlarının üretiminde silis kumu (SK), geri dönüşümlü beton kumu (ABK) geri dönüşümlü tuğla kumu (ATK) geri dönüşümlü seramik kumu (ASK) olmak üzere dört farklı agrega kullanılmıştır. Tüm agregaların boyutu 600 μm 'den küçüktür. Kentsel geri dönüşüm atıklarından agrega elde edilmiştir. Bu agregalar kırıcı ile kırıldıktan sonra elekler yardımıyla sınıflandırılmıştır. Ek olarak, agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir. Kullanılan agregaların isimleri, silis kumu (SK), ve geri dönüşümlü tuğla agregası (ATK), geri dönüşümlü seramik agregası (ASK), ve geri dönüştürülmüş beton agregası (ABK) için kullanılan kısaltma

yöntemine benzer şekilde geri dönüşüm notasyonu ile isimlerinin ilk harfi kullanılarak başlangıçta kısaltılmıştır.

Tablo 3.2 Silis kumu ve geri dönüştürülmüş agregaların fiziksel özellikleri

Agregalar	Özgül ağırlık	Su emme (%)
Silis Kumu(SK)	2,67	2,56
Geri dönüştürülmüş beton agregası (ABK)	2,33	6,32
Geri dönüştürülmüş tuğla agregası(ATK)	2,28	7,23
Geri dönüştürülmüş seramik agregası(ASK)	2,36	6,78

SIFCON karışımlarının üretiminde kullanılan YFC ve UK'nın aktivasyonu için toz halindeki sodyum metasilikat kullanılmıştır. Sodyum metasilikatın (susuz) kimyasal yapısı %51,7 Na₂O, %45,5 SiO₂ (Ms=0,91) içermektedir. Karışımların hazırlanmasında işlenebilirliği artırmak için yeni nesil bir polikarboksilat bazlı süper yayılma akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. SA'nin özgül ağırlığı 1,07 ve katı içeriği %37'dir. Karışımlar ayrıca içilebilir şehir suyundan imal edilmiştir. SIFCON, yüksek derecede tokluk elde etmek için çelik lifler kullanılarak yapılmıştır. SIFCON karışımlarında kullanılan çelik liflerin genel görünümü Şekil 3.4'de ve mekanik özellikleri de Tablo 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Çelik lifin genel görünümü

Tablo 3.3 Çelif liflerin özellikleri

Uzunluk (mm)	Çap (mm)	En boy oranı (l/d)	Gerilme dayanımı (MPa)	Özgöl ağırlık	Young katsayısı (GPa)	Uzama (%)
30	0,75	40	2400	7,85	210	25

3.2 Karışım Dizaynı

Doğal veya geri dönüştürülmüş agregalar içeren alkali ile aktive edilmiş SIFCON'da ağırlıkça %100:0 ve %50:50 dahil olmak üzere iki YFC/UK oranı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan her bir değişken, etkilerinin belirlenmesi için ayrı ayrı incelendi. Çalışmada karışım sayısının fazla olması nedeniyle malzeme ve zamandan tasarruf sağlamak amacıyla Kısmi Faktöriyel deney tasarımı kullanıldı. Bu amaçla Taguchi Optimizasyon yöntemi tercih edildi. Bu çalışmada Taguchi L18 otogonal deney matrisi kullanıldı. Ayrıca Taguchi matrisi için kullanılan değişkenlerin anlamlılık düzeylerinin belirlemek için ANOVA analizi yapıldı. Bu bağlamda %5, %10 ve %15'lik üç lif hacmi içeren ve 80°C'de üç ısı kürleme süresine maruz bırakılan on sekiz farklı karışım bileşimi hazırlandı ve analiz edildi. Tablo 3.4, Taguchi L18 dikey dizisini göstermektedir ve Tablo 3.5, oluşturulan karışımların bir listesini içerir.

3.3 SIFCON Karışımlarının Dökümü ve Kürlenmesi

İlk olarak, YFC ve UK başlangıçta birleştirildi ve karıştırıcıda 145 rpm gibi düşük hızda 1 dakika karıştırıldı ardından agregalar ilave edilerek tekrar 145 rpm hızla 1 dakika karıştırılmıştır. İkinci aşamada, su ve yayılmakanlaştırıcının yarısı ilave edilir ve düşük hızda 1 dakika karıştırılır ve ardından 1 dakika boyunca yüksek hızda karıştırılır. Daha sonra karışım 1 dakika dinlenmeye bırakıldı. Yayılma akışkanlaştırıcının geri kalanı ilave edildi ve 280 rpm'lik yüksek hızda 2 dakika çalıştırıldı. Metasilikat eklendi ve düşük hızda 1 dakika ve 5 yüksek hızda dakika karıştırıldı. Taze harç daha sonra döküldü ve sertleşmiş halin özelliklerini değerlendirmek için kalıplara döküldü. Numuneler 80°C'de 6; 24 ve 48 saat olmak üzere üç ısı kürüne tabi tutulmuş ve deney saatine kadar laboratuvar şartlarında bırakılmıştır.

Tablo 3.4 Taguchi L18 dikey dizi

Karışım Numaraları	UK (%)	Kür süresi (saat)	Geri dönüşüm agregası tipi	Geri dönüşüm agregası miktarı(%)	Lif Hacmi (%)
S10L5	0	6	Seramik	10	5
B25L10	0	6	Beton	25	10
T50L15	0	6	Tuğla	50	15
S10L10	0	24	Seramik	10	10
B25L15	0	24	Beton	25	15
T50L5	0	24	Tuğla	50	5
S25L5	0	48	Seramik	25	5
T50L10	0	48	Beton	50	10
T10L15	0	48	Tuğla	10	15
UKS50L15	50	6	Seramik	50	15
UKT10L5	50	6	Beton	10	5
UKT25L10	50	6	Tuğla	25	10
UKS25L15	50	24	Seramik	25	15
UKT50L5	50	24	Beton	50	5
UKT10L10	50	24	Tuğla	10	10
UKS50L10	50	48	Seramik	50	10
UKT10L15	50	48	Beton	10	15
UKT25L5	50	48	Tuğla	25	5

Tablo 3.5 SIFCON için tasarlanan karışımlar (kg/m³)

Karışımlar	YFC	UK	Lif Hacmi (%)	Kür Süresi (saat)	Su	SA	Na ₂ SiO ₃	SK	ATK	ASK	ABK
S10L5	900	-	5	6	315	45	135	613	-	62	-
B25L10	900	-	10	6	315	45	135	513	-	-	174
T50L15	900	-	15	6	315	45	135	342	339	-	-
S10L10	900	-	10	24	315	45	135	615	-	62	-
B25L15	900	-	15	24	315	45	135	513	-	-	174
T50L5	900	-	5	24	315	45	135	342	339	-	-
S25L5	900	-	5	48	315	45	135	513	-	156	-
T50L10	900	-	10	48	315	45	135	342	-	-	347
T10L15	900	-	15	48	315	45	135	615	68	-	-
UKS50L15	450	450	15	6	315	45	135	303	-	276	-
UKT10L5	450	450	5	6	315	45	135	546	-	-	62
UKT25L10	450	450	10	6	315	45	135	455	151	-	-
UKS25L15	450	450	15	24	315	45	135	455	-	138	-
UKT50L5	450	450	5	24	315	45	135	303	-	-	308
UKT10L10	450	450	10	24	315	45	135	546	60	-	-
UKS50L10	450	450	10	48	315	45	135	303	-	277	-
UKT10L15	450	450	15	48	315	45	135	546	-	-	62
UKT25L5	450	450	5	48	315	45	135	455	151	-	-

*Karışım Numara Örneği: S10L10= S10: ASK %10, L10: lif hacmi %10

3.4 Test Prosedürü

Bu çalışmada, karışımların taze, dayanıklılık, fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemek için bir dizi test kullanılmıştır. Tablo 3.6, gerçekleştirilen testleri, her test için hazırlanan numune büyüklüklerini ve test standartlarını listeler. Betonun eğilme dayanımı ve tokluğu, 300 mm uzunluğunda, 60 mm genişliğinde ve 25 mm yüksekliğinde (25x60x300) prizmatik numuneler kullanılarak değerlendirildi. Yük ve açıklık ortası sapma arasındaki ilişki, tepe yük başlangıç değerinden %10 düşene kadar kuruldu. Üç noktalı yükleme eğilme testinde, orta açıklık sapma değerlerini ölçmek için komparatör kullanıldı. Numune açıklığının ortasında bulunan komparatör, doğrudan test aparatına bağlıydı ve verileri bilgisayara aktarabiliyordu. Üç noktalı eğilme testi, yükleme hızını 0,1 mm/dk olarak belirledi.

Tablo 3.6 Gerçekleştirilen tesler, numunelerin boyutu ve test standartları

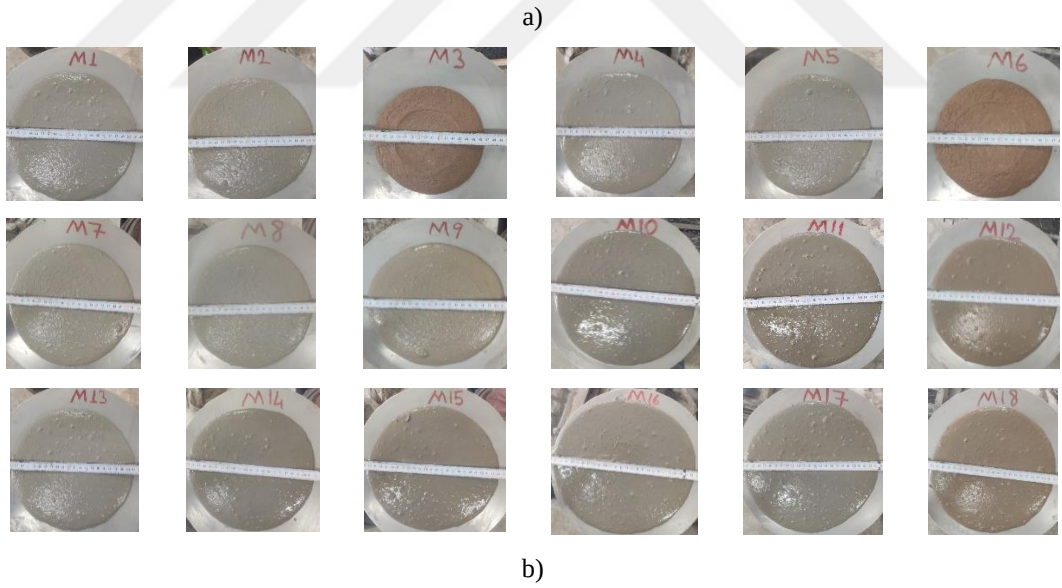
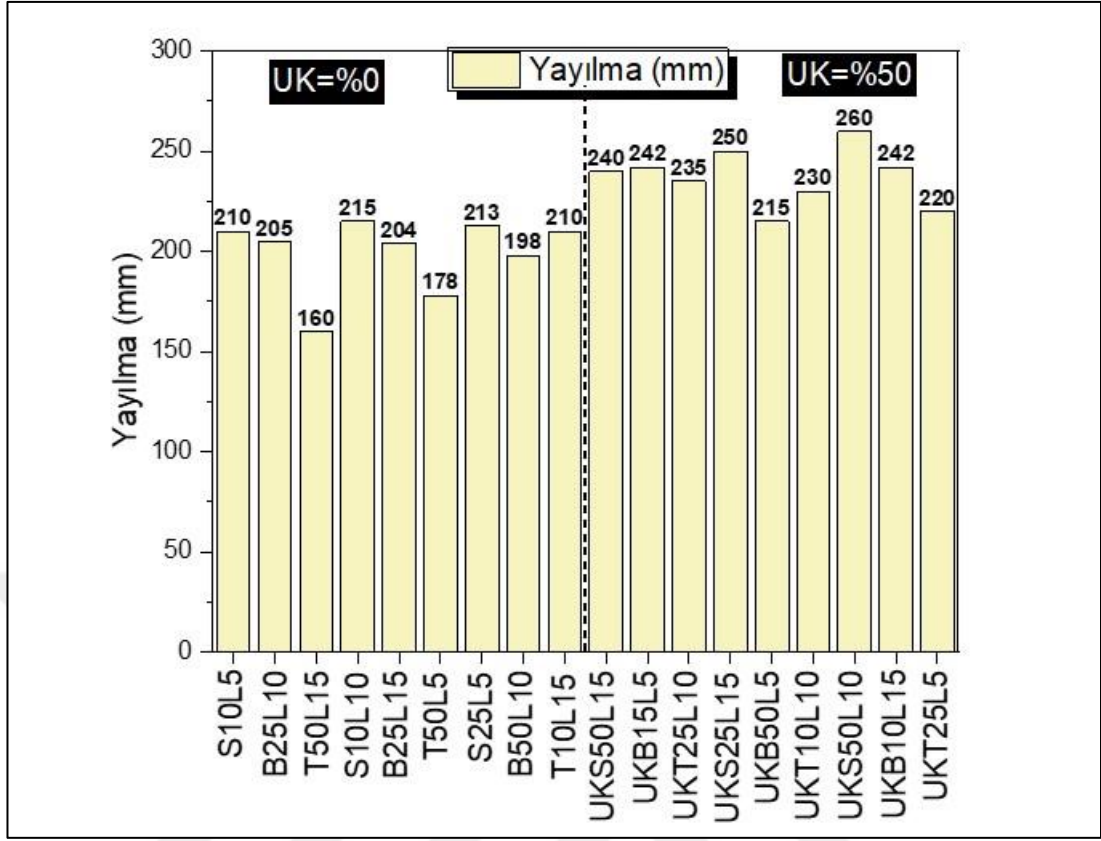
Test	Standard	Numune boyutu (mm)	Zaman (Gün)
Yayılma	ASTM C1437	Taze harç	
Porozite			
Su emme	ASTM C642	50x50x50	28 gün
Birim hacim ağırlık			
Basınç dayanımı	ASTM C349	40x40x160	3; 7; 28 and 91 gün
Eğilme dayanımı	ASTM C348	40x40x160	
Donma-çözülme direnci	ASTM C666	40x40x160	40; 80 and 120 döngü
Kapilerite	ASTM C1585	50x50x50	28 güne kadar
Yüksek sıcaklık direnci		40x40x160	200-400-600-800°C

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

4.1 SIFCON Karışımlarında Kullanılan Harcın Kıvamı

Şekil 4.1a, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kumların, alkali ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül SIFCON karışımlarının kıvamı (yayılma) üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.1b, yayılma test sonuçlarını göstermektedir. UK içermeyen SIFCON karışımları için yayılma değerleri 160 mm ile 215 mm arasında değişmektedir. YFC'nin %50 UK ile değiştirilmesi, Şekil 4a'da gösterildiği gibi yayılma değerlerini önemli ölçüde artırdı ve 215 mm'den 260 mm'ye çıktı. Yalnızca YFC içeren SIFCON karışımlarının daha düşük yayılma değerleri, YFC'nin geopolimerlerin reaksiyon sürecini hızlandıran amorf bir Ca-Al-Si jeli oluşturan yüksek kalsiyum içeriğine sahip olması olabilir (Zhang vd., 2020). Cheah ve ark. (Cheah vd., 2017), YFC'nin tam öncü olarak kullanılması, pasta matrisindeki açısız parçacıkların sayısını da arttırdı. YFC parçacıkları, pastaun hareketliliğini azaltan parçacıklar arası sürtünmeyi arttırdı. Aksine, küresel UK partiküllerinin bilyeli yatak mekanizması, UK içeren alkali aktifleştirilmiş SIFCON karışımlarının viskozitelerinin düşmesine neden olmuş ve sonuç olarak UK SIFCON karışımlarının yayılma değeri artmıştır. UK, taze özelliklerin kaybını azaltan YFC partiküllerinden daha az reaktiftir (Sun vd., 2022). Ayrıca, YFC'nin daha hızlı reaktivitesi, işlenebilirliğin azalmasına neden olmuş olabilir. Ayrıca, YFC, UK'dan daha yüksek bir özgül yüzey alanına sahip olduğu için daha fazla sıvı gerektirir ve daha kötü bir işlenebilirliğe sahiptir (Kuri vd., 2021). Şekil 4a'da görüldüğü gibi, yayılma çaplarını etkileyen ana faktörler, lif hacmi ve geri dönüştürülmüş kum tipidir. Lif miktarı arttıkça yayılma akışkanlığının azaldığı iyi bilinmektedir (Meng vd., 2022). Geri kazanılan kumların cinsi de geri kazanılan kumların özelliklerine bağlı olarak yayılma çaplarını olumlu ya da olumsuz etkiler. Geri kazanılan kumların suyu emme kapasitesi, ardından tane morfolojileri ve özgül ağırlık, yayılma akışkanlığı doğrudan etkiler (İpek, 2022). UK içermeyen SIFCON karışımlarının en düşük yayılma değeri %50 tuğla kumu ve %15 lif hacmi içeren T50L15 karışımı için 160 mm olarak ölçülmüştür. ATK, Şekil 4'te görülebileceği gibi, kullanılan tüm kumlar arasında en yüksek su emme kapasitesine ve en düşük özgül ağırlığa sahiptir. Sonuç olarak, SK'nin daha yüksek su emme kapasitesine sahip ATK

ile ikame edilmesi şüphesiz daha az yayılma akışkan SIFCON kompozitleri ile sonuçlanacaktır. Sonuç olarak, su emilimi ne kadar yüksek olursa, yayılma akışkanlığı daha az olacaktır. Kompozitin kendi ağırlığı altındaki darbe yayılması bu testle doğrudan ilişkili olduğundan, kumun özgül ağırlığının da kompozitin yayılma akışkanlığını etkilediği varsayılmaktadır. ATK içeriğindeki artışın, lif hacmindeki artışa göre yayılma çapında daha büyük bir düşüşe neden olduğu gösterilmiştir. Bu, ATK'nin daha yüksek su emmesinin, T50L15, T50L5 ve T10L15 karışımları için açıkça görüldüğü gibi %15 lif hacmine göre yayılma değerlerini azaltmada daha etkili olduğu anlamına gelir. UK içermeyen karışımlar için en yüksek yayılma değerleri ASK (geri dönüştürülmüş seramik agregası) içeren karışımlar için belirlenmiştir. Buna karşılık, ABK'li SIFCON karışımları ikinci daha büyük yayılma çaplarını sergiledi, ancak daha yüksek ABK içeriğine sahip karışım aynı zamanda daha düşük ATK içeriğine sahip karışıma göre daha düşük yayılma ile sonuçlandı. UK'lı SIFCON karışımlarının yayılmaklanlığı göz önüne alındığında, açıkça görüldüğü gibi, YFC'nin %50 UK ile değiştirilmesi, SIFCON karışımlarının yayılma akışkanlığını UK'sız karışımlara göre daha fazla artırmıştır. Bu sonuç, UK'nın daha düşük aktivasyon mekanizmasından ve UK parçacıklarının küresel şeklinden kaynaklanmıştır. Bu SIFCON karışım serilerinde, ABK dahil edilmiş karışımlar ayrıca ABK ve ASK dahil edilmiş karışımlara göre daha büyük yayılma çaplarına sahipti. Lif hacminin yayılmaklanlık üzerinde ikincil bir etkisi olmuştur. En yüksek yayılma değeri 260 mm ile UKS50L10 karışımı için belirlenmiş ve ikinci en büyük yayılma değeri 250 mm ile en yüksek lif hacim içeriği %15 olmasına rağmen ASK (UKS25L15) ile üretilmiş karışım için de ölçülmüştür. En düşük yayılma değeri 215 mm ile ABK (UKT50L5) ile üretilen karışım için ölçülmüştür.



Şekil 4.1 a) SIFCON karışımlarının yayılma değerleri b) Yayılma test sonuçları

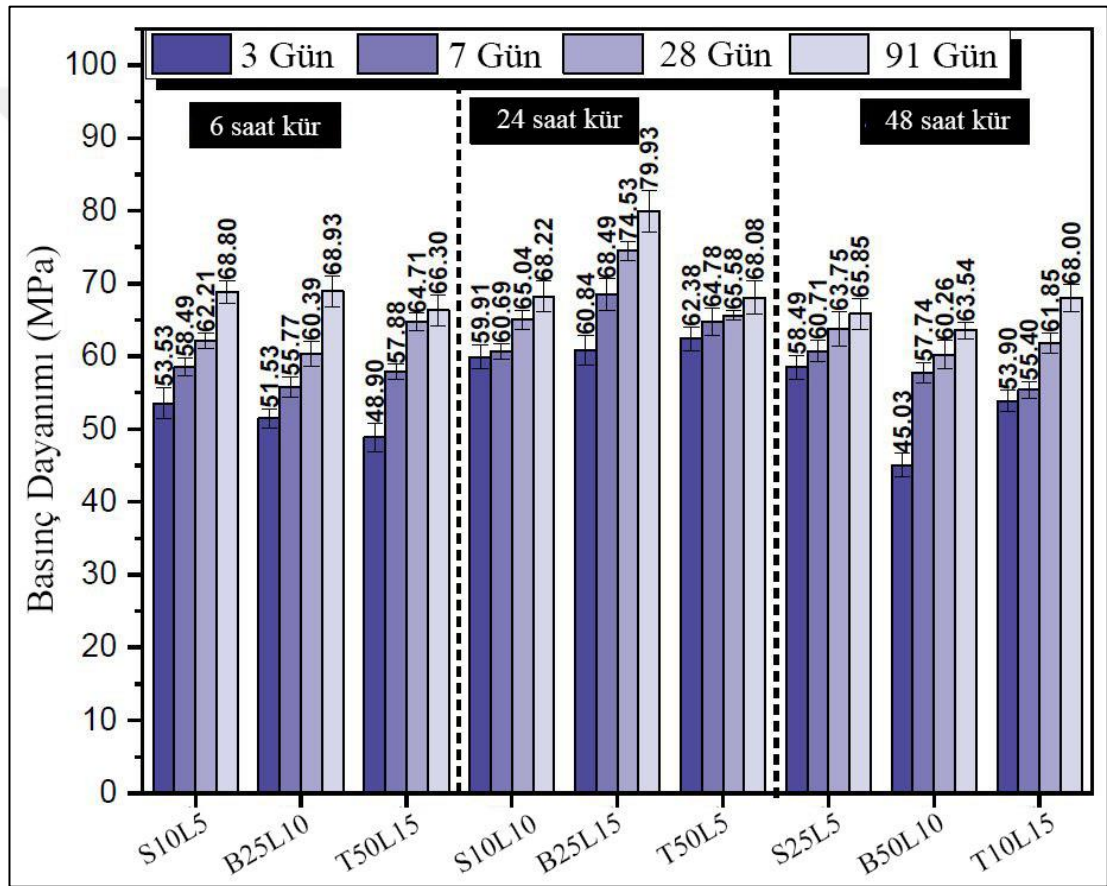
4.2 Basınç Dayanımı

Alkali ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül SIFCON karışımlarının basınç dayanımı sonuçları üzerinde ısıyla sertleşme süresinin, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kum türünün etkisi, Şekil 4.2a'da gösterilmektedir. UK içermeyen karışımlar için basınç

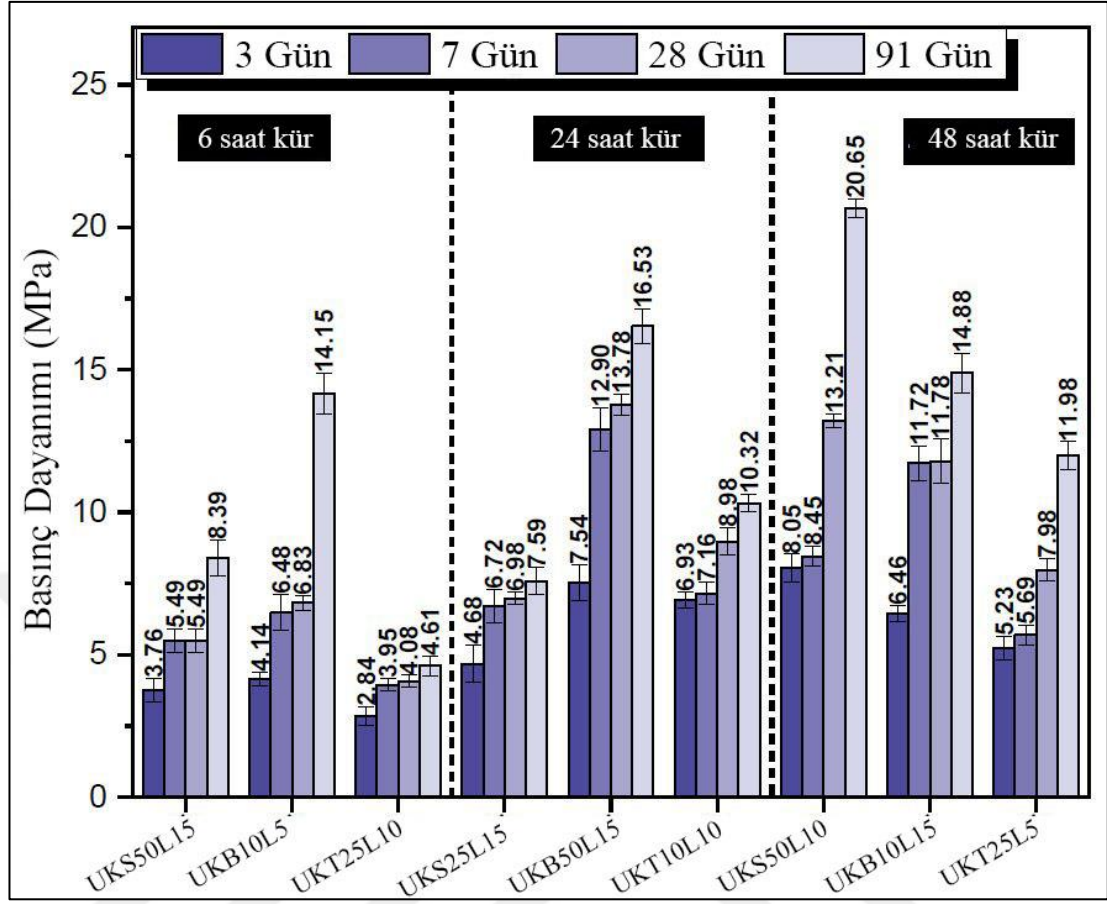
dayanımı sonuçları Şekil 4.2b'de gösterilmektedir. SIFCON karışımlarının sertleşmiş hal özellikleri, ön maddenin türü (cüruf ve uçucu kül), sertleştirme işleminin süresi, geri dönüştürülmüş kumun türü ve lifin hacmi dahil olmak üzere dört temel faktörden etkilenir. Açıkça görüldüğü gibi, UK içermeyen SIFCON karışımlarının basınç dayanımı 3 günde 43,03 ila 62,38 MPa; 7 günde 55,40 ila 68,49 MPa; 28 günde 60,26 ila 74,53 MPa ve 90 günde 63,54 ila 79,93 MPa arasında değişmiştir. 3; 7; 28 ve 90 günlük basınç dayanımı gelişimi üzerindeki ısıl kürlenme süresinin etkisi analiz edildiğinde, 80°C'de 24 saatlik ısıl kürlemeden sonra basınç dayanımı tipik olarak 6 ve 48 saat sonraki karışımlara göre daha fazla gelişmiştir. kür süresi. 24 saat ısı kürüne tabi tutulduktan sonra T50L5 (%50 ATK ve %5 lif hacmi) karışımı için en yüksek olarak 62,38 MPa'lık 3 günlük basınç dayanımı elde edildi. 24 saat ısıyla sertleşen B25L15 karışımı, tüm karışımlar arasında sırasıyla 7; 28 ve 91 günde sırasıyla 68,49 MPa, 74,53 MPa ve 79,93 MPa ile en yüksek basınç dayanımlarına sahipti. Bu dayanım gelişimi, Abdollahnejad vd., 2019; Ouda, 2021 tarafından belirtildiği gibi, ABK'nin geopolimer betonda sertleşme sürecini hızlandıran ve yayılma akışkanlığı azaltan yüksek kalsiyum içeriğine sahip olmasına da dayanabilir. UK içermeyen SIFCON karışımlarının özellikle 3; 7 ve 28 gün erken dayanım gelişiminde 80°C'de 24 saat ısı kürünün daha etkili olduğu görülmektedir. B25L15 karışımı ayrı tutulduğunda, karışımların 91 günlük dayanımları 63 MPa ile 69 MPa aralığındaydı, çoğu karışımın yaklaşık 68 MPa basınç dayanımı vardı ve büyük bir fark yoktu. ATK katkılı SIFCON karışımları göz önüne alındığında, 6 saatlik termal kürlemeye tabi tutulan T50L5 karışımı, tüm kürleme aralıklarında en iyi basınç dayanımını sergiledi. Öte yandan, 48 saat ısıl kür uygulanan T10L15 karışımında 3; 7 ve 28 günlük kür yaşlarında daha düşük dayanım gelişimi elde edilmiş ancak bu iki ATK katkılı karışımın 91 günlük nihai dayanımları hemen hemen birbirine eşit olmuştur. ASK katkılı SIFCON karışımları ile ilgili olarak, 24 saatlik termal kürleme uygulanan S10L10 karışımı, 3 kürleme aralığında 6 ve 48 saatlik termal kürlemeden sonra diğer ASK katkılı SIFCON karışımlarından marjinal olarak daha yüksek, en yüksek basınç dayanımını üretti, 7 ve 28 gün. Genel olarak 6 ve 24 saatlik ısıl kürün tüm SIFCON karışımlarının basınç dayanımını 48 saatlik ısıl kürden daha olumlu etkilediği görülmektedir. Şekil 4.2b, UK içeren karışımlar için basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Pek çok çalışmada da belirtildiği gibi, YFC yerine %50 uçucu külün dahil edilmesi, dayanımda dikkate değer bir düşüşe neden olacaktır (Abdalqader vd.,

2016; Marjanović vd., 2015). Cürufun uçucu kül ile değiştirilmesi genel CaO konsantrasyonunu etkileyerek C-(A)-S-H jellerinin üretimini sınırladı ve basınç dayanımının azalmasına neden oldu (Abdollahnejad vd., 2020; Huseien vd., 2019). %50UK katkılı SIFCON karışımlarının termal kürlenme süresi arttıkça dayanım gelişimi gösterdiği ve genel olarak 48 saatlik ısı kürlenmede daha yüksek dayanım kazandığı fark edilebilir. UK'nın düşük reaktivitesinin, ortam sıcaklığında sertleşirken yavaş bir reaksiyon hızına ve minimum dayanım gelişimine neden olduğundan, geopolimerlerin sentezinde kullanımını kısıtladığı yaygın olarak bilinmektedir (Kovalchuk vd., 2007; Winnefeld vd., 2010). UK'yı mekanik olarak aktive etmenin yanı sıra, kürlenme sıcaklığının en önemlilerinden biri olduğu reaksiyon parametrelerini dikkatlice seçerek, alkali aktivasyon reaksiyonunda UK'nın reaktivitesini arttırmak mümkündür. Alkali aktivasyon işlemi sırasında yüksek kürlenme sıcaklıkları (60°C'nin üzerinde) reaksiyonu hızlandırır ve UK geopolimerlerinin daha hızlı dayanım kazanmasına yardımcı olur (Kovalchuk vd., 2007; Kumar ve Kumar, 2011; Puertas vd., 2000). UK içeren SIFCON karışımlarının 3 günde 2,84 ila 8,05 MPa, 7 günde 3,95 ila 12,90 MPa, 28 günde 4,08 ila 13,78 MPa ve 90 günde 4,61 ila 20,65 MPa arasında değişen basınç dayanımlarına sahip olduğu açıktır. UK'nın basınç dayanımı, termal kür süresindeki artışla artan SIFCON karışımlarını içeriyordu. 80°C'de 48 saat ısı kürlenme, basınç dayanımını 6 ve 24 saatlik kürlenme süresinden daha iyi iyileştirmiştir. 6 saatlik ısı kürüne maruz bırakılan UKT25L10 karışımı (%25 ATK ve %10 lif hacmi), tüm kürlenme yaşlarında en düşük dayanım gelişimini sergiledi. Bu bulgular, UK'nın alkali aktivasyon sürecini hızlandırmak için yeterli olmayan kısa kürlenme süresine ve ayrıca ATK'nin keskin kenarlı tanelerinin daha az kompakt ve daha gözenekli yapısına bağlanabilir (Rovnaník vd., 2016). 6 saat ısı kür uygulanan UKB10L5 karışımı ise tüm kürlenme yaşlarında en iyi dayanım performansını sergilemiş ve 91 günlük uzun yaş kürlenmede 14,15 MPa dayanım kazanmıştır. Dayanımdaki bu artış muhtemelen sertleşme sürecini hızlandıran ABK'nin yüksek kalsiyum konsantrasyonuna bağlanabilir. Benzer şekilde, 80°C'de 24 saat ısı kürüne maruz bırakılan karışımlarda, %50 ABK katkılı karışım (UKT50L5), 3; 7; 28 ve 91 günlük tüm kürlemelerde en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. İkinci en iyi basınç dayanımı performansı, 24 saatlik ısı kürlenmede %25 ATK eklenmiş karışıma (UKT25L10) kıyasla daha fazla dayanım artışı sergileyen %10 ATK eklenmiş karışım (UKT10L10) için belirlendi. %50 ASK eklenmiş karışım (UKS50L10), 80°C'de 48 saatlik ısı kürlenmeden sonra,

özellikle 3; 28 ve 91 günlük kürleme yaşlarında en iyi basınç dayanımını göstermiştir. Alüminyum ve silis açısından zengin seramik agregalar, alkali aktivasyonunda önemli bir rol oynar, karışımın artan basınç dayanımına katkıda bulunur ve mevcut suyu emer. Sonuç olarak, karışımın pH değeri yükselir, sıvı-bağlayıcı oranı düşer ve seramik agregaların daha küçük tane boyutu iç kürleşmeyi olumlu etkiler (Abdollahnejad vd., 2020; Ariffin vd., 2015). %10 ABK katkılı karışım (UKB10L15) 24 saat ısıyla sertleştirmeye maruz bırakılan %50 ABK katkılı karışıma (UKB50L5) kıyasla ikinci en iyi basınç dayanımı performansı.



a)



b)

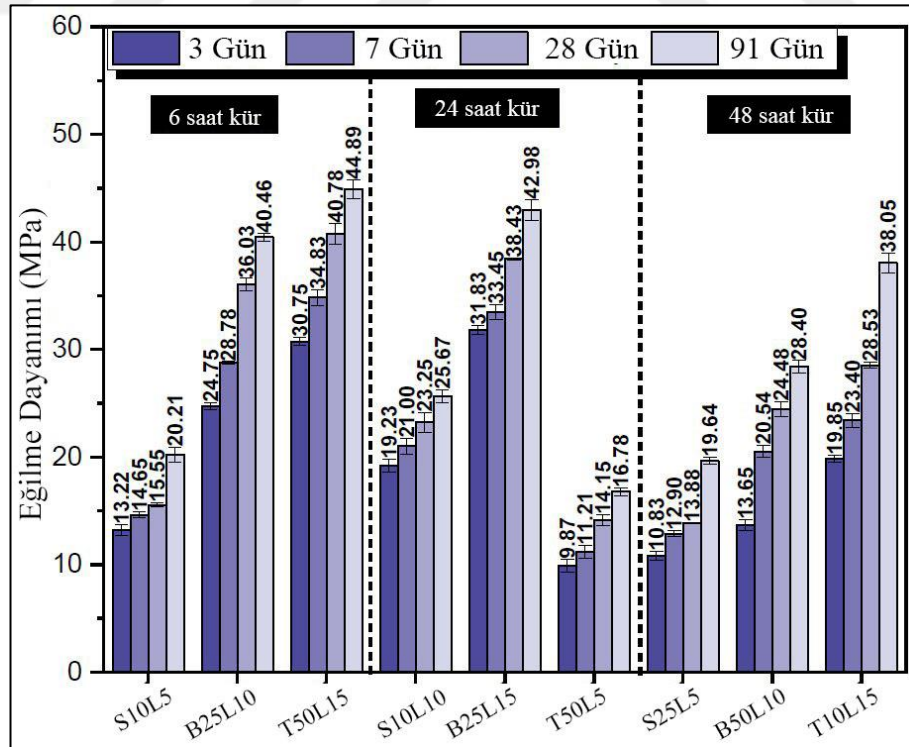
Şekil 4.2 SIFCON karışımlarının basınç dayanımı a) UK=0 b) UK=50

4.3 Eğilme Basıncı

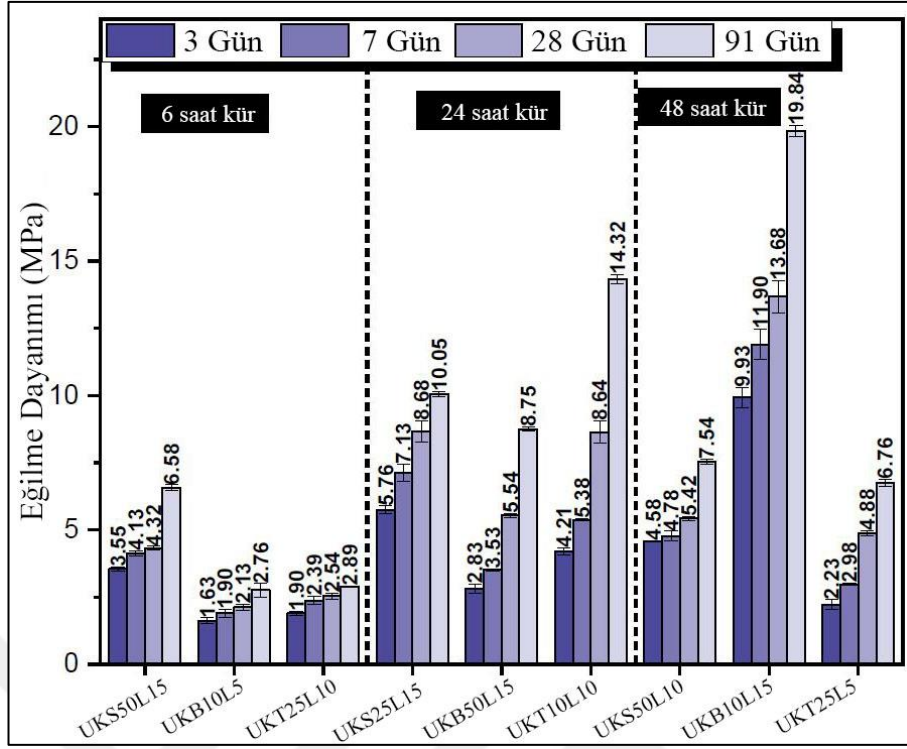
Şekil 4.3a, YFC/UK bazlı SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı sonuçları üzerindeki ısıyla sertleşme süresinin, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kum tipinin etkisini göstermektedir. UK içermeyen karışımlar için bükülme dayanımı bulguları Şekil 4.3b'de gösterilmektedir. SIFCON karışımları yüksek hacimde lif içeriğine sahip olduğundan, lif hacmi eğilme dayanımı sonuçları üzerinde baskın etki göstermiştir. Açıkça görüldüğü gibi, UK içermeyen SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı 3 gün sonra 9,87 ila 30,75 MPa, 7 gün sonra 11,21 ila 34,83 MPa, 28 gün sonra 13,88 ila 40,78 MPa ve 90 gün sonra 16,78 ila 44,89 MPa arasında değişmektedir. Isıl kür süresinin 3 günlük eğilme dayanımı gelişimi üzerindeki etkisi incelendiğinde, normalde 80°C'de 24 saat ısıl kürlemeden sonra eğilme dayanımı, 6 ve 48 saat sonra karışımlara göre daha hızlı gelişmiştir. 7; 28 ve 91 gün sonra, 80°C'de 6 saat termal kürlemeye maruz bırakılan T50L15 karışımı, 80°C'de 24 saat termal kürlemeye maruz

bırakan B25L15 karışımından biraz daha yüksek eğilme dayanımı sergiledi. %15'lik aynı lif hacmine sahip iki karışımın eğilme dayanımındaki bu küçük fark, geri dönüştürülen kumun türüne ve termal kürlenme süresine bağlıdır. Geopolimer betonun dayanımından temel olarak sorumlu olan C-S-H, N-A-S-H ve C-A-S-H jelleri, NaOH çözeltisindeki alkali ile YFC'deki Al_2O_3 ve SiO_2 arasındaki reaksiyonla üretildi. Daha yüksek bir erken yaş dayanımı, yüksek YFC içeriğine sahip geopolimer betonun hidratasyonunu hızlandıran Ca^{2+} 'nın çekirdeklenme etkisinin bir sonucu (Xie vd., 2019; Yip vd., 2005). 24 saat ısı kürüne maruz bırakılan T50L5 (%50 ATK ve %5 lif hacmi) karışımı ve 6 saat ısı kürüne maruz bırakılan T50L15 (%50 ATK ve %15 lif hacmi) karışımı kürlenmede en düşük ve en yüksek eğilme dayanımını sergiledi. 7; 28 ve 91 günlük periyotlar. 91 günlük eğilme dayanımı sonuçları karşılaştırıldığında, önceki karışım ikinci karışımından 2,67 kat daha düşüktü. ATK'nin kristal yapısı nedeniyle, parçacıklar alkali aktivasyon reaksiyonunda tamamen çözünmez, bu da daha az yoğun çapraz bağlı jeller ile sonuçlanır (Hwang vd., 2019). %5 lif hacmine sahip karışımlar arasında en iyi performans S10L5 (%10 ASK ve %5 lif hacmi) karışımında gözlenmiştir, çünkü ASK'in yüksek açısallığı ve sertliği ASK ile alkali aktif cüruf SIFCON karışımı arasındaki aderans kuvvetini artırır, SIFCON karışımlarının belirgin bir basınç dayanımı gelişimine yol açar (Hwang vd., 2019). 48 saat kürleme için %10 lif hacmine sahip ABK katkılı SIFCON karışımı, özellikle 28 ve 91 günlük geç yaşlandırma kürü için 24 saat kürleme için %10 lif hacmine sahip ASK birleştirilmiş SIFCON karışımından daha iyi basınç dayanımı performansı gösterdi. ABK'deki daha yüksek CaO içeriği, bu daha iyi performansla sonuçlanabilir. Şekil 4b, UK içeren karışımlar için eğilme dayanımı bulgularını göstermektedir. Pek çok araştırma (Abdalqader vd., 2016; Marjanović vd., 2015), bunun yerine %50 uçucu kül kullanmanın, dayanımda büyük bir kayba yol açtığını bulmuştur. Cüruf yerine uçucu kül kullanılması, toplam CaO konsantrasyonunu düşürerek C-(A)-S-H jellerinin sentezini kısıtlar ve daha düşük eğilme dayanımı ile sonuçlanır. Uçucu külün alkali ortamda cüruftan daha düşük reaktiviteye sahip olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir (Hu vd., 2019), bu da %50 UK içeriğine sahip SIFCON kombinasyonlarındaki dayanım düşüşünden sorumlu olabilir (Ismail vd., 2014). Şekil 4b'den elde edilen bulgu, sertleşme süresindeki ve sertleşme yaşlarındaki artışın eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırdığını ve en yüksek eğilme dayanımının 48 saatlik termal kürlemeye maruz kalan SIFCON karışımları için hesaplandığını

gösterdi. İyi bilindiği gibi, uçucu külün alkali ortamda çözünürlüğü ve reaktivitesi için 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklar özellikle elverişlidir (Pan vd., 2018). Bu gerçeğin bir sonucu olarak en düşük eğilme dayanımı 6 saat ısıtılma kürlenmeye maruz bırakılan karışımlar için kaydedilmiştir. Joseph ve Mathew'un (Joseph ve Mathew, 2012) bulgularına göre, alkali ile aktive edilmiş UK betonunun basınç dayanımı 100°C'ye kadar önemli ölçüde arttı. Daha uzun kürlenme süreleri ile daha yüksek basınç dayanımı elde edildi, ancak bu iyileşme 48 saat sonra azaldı (Ding vd., 2016). Her ısıtılma kürlenme periyodunda, %15 lif hacmine sahip karışımlar, 91 günlük dayanımın geç yaşı dikkate alındığında, 24 saatlik ısıtılma kürlenilen karışımlar dışında en iyi performansı sergiledi, 24 saatlik ısıtılma kürlenilen karışım UKT10L10, 91 günlük daha yüksek eğilme dayanımı gösterdi. %15 lif içeren karışımdan daha fazla. Öte yandan, 91 günlük geç yaşlardaki eğilme dayanımı dikkate alındığında, 24 saat ısıtılma kürlenilen karışımlar, aynı miktarda lif içeren benzer kombinasyonlara kıyasla genel olarak daha yüksek dayanım sergilemiştir. UKB10L15 karışımı, 48 saat ısıtılma kürlenmeye tabi tutuldu ve termal kürlenme süresinin kayda değer etkisini kanıtlayan kürlenme için 3; 7; 28 ve 91 günlük tüm yaşlarda en iyi eğilme dayanımını sergiledi.



a)



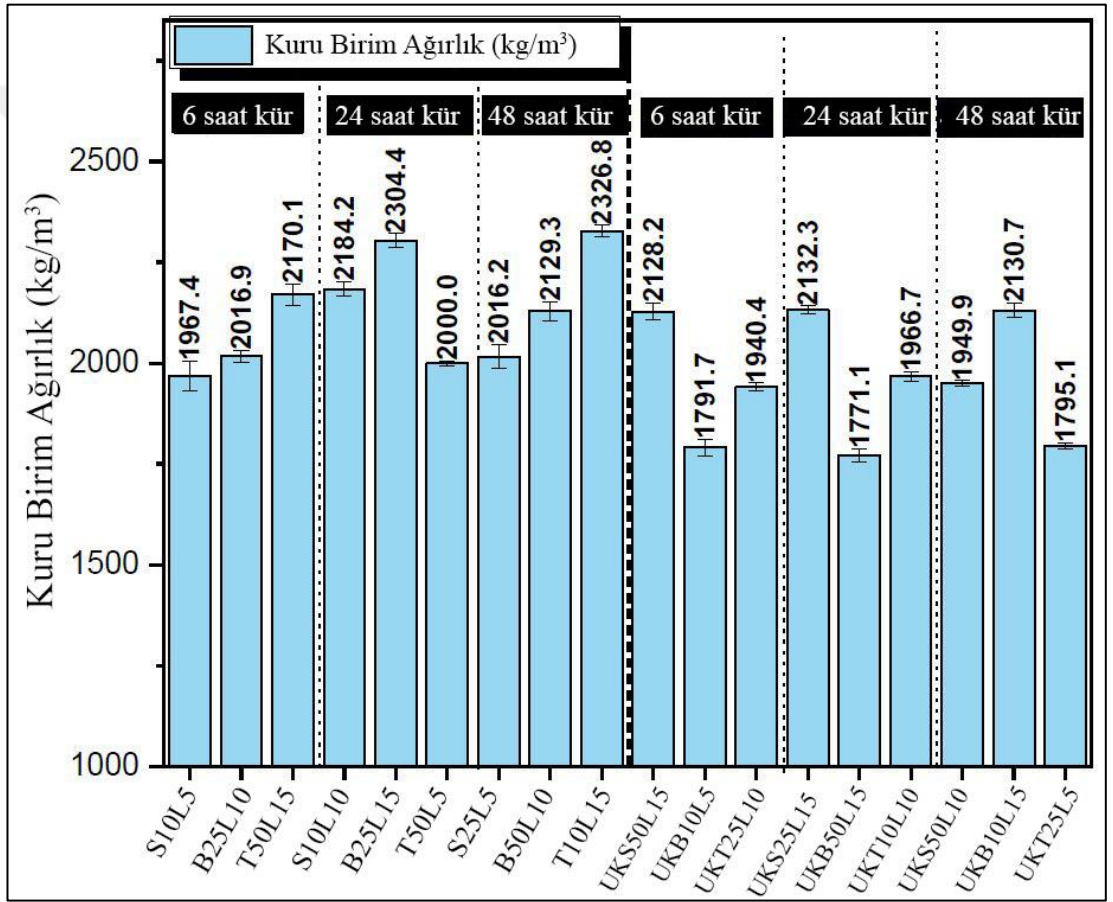
b)

Şekil 4.3 SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı a) UK=0 b) UK=50

4.4 Birim Ağırlık

Şekil 4.4, 91 gün sonra cüruf/uçucu kül bazlı SIFCON karışımlarının kuru birim ağırlık bulguları üzerindeki ısıyla sertleşme süresinin, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kum tipinin etkisini göstermektedir. SIFCON karışımlarında bulunan önemli miktarda lif nedeniyle, lif hacmi kuru birim ağırlığın büyümesi üzerinde önemli bir etkiye sahipti. UK'nın daha düşük özgül ağırlığı nedeniyle, %50 UK içeren SIFCON karışımları, aynı lif hacminde UK içermeyen karışımlara göre daha düşük kuru birim ağırlık göstermiştir. Kuru birim ağırlık, artan lif hacmi ile artmış ve her kür süresi için %15 lif hacminde en yüksek değeri kazanmıştır. Daha yüksek termal kür süresine maruz kalan karışımlar için daha yüksek kuru birim ağırlığın ölçüldüğü görülmektedir. Açıkça görüldüğü gibi UK içermeyen SIFCON karışımlarının kuru birim ağırlığı 1967,4 ile 2326,8 kg/m³ arasında değişmektedir. 6 saat ısıl kürlemeye maruz bırakılan S10L5 karışımı en düşük kuru birim ağırlığa sahipti ve 48 saat ısıl kürlenmeye maruz bırakılan T10L15 karışımı, özgül ağırlığı SK'den daha düşük olan %10 ATK içeriğinin daha düşük olması nedeniyle en yüksek kuru birim ağırlığa sahipti. %5 lif hacmine

sahip tüm karışımlar hemen hemen aynı birim ağırlığa sahipti. Geri dönüştürülmüş kumun türü de, geri dönüştürülmüş kumun içeriğine ve daha yüksek lif hacimli birleştirilmiş karışımlardaki özgül ağırlığa bağlı olarak birim ağırlığı biraz etkiledi. UK içeren SIFCON karışımlarının kuru birim ağırlıkları şekilde görüldüğü gibi 1771,1 ile 2132,3 kg/m³ arasında değişmektedir. Aynı lif hacmine sahip karışımlar için birim ağırlıkta büyük bir fark görülmemiştir. UKS25L15 ve UKB50L5 karışımları sırasıyla en büyük ve en düşük kuru birim ağırlıklara sahipti. Her iki karışım da 24 saat termal kürlemeye maruz bırakıldı.

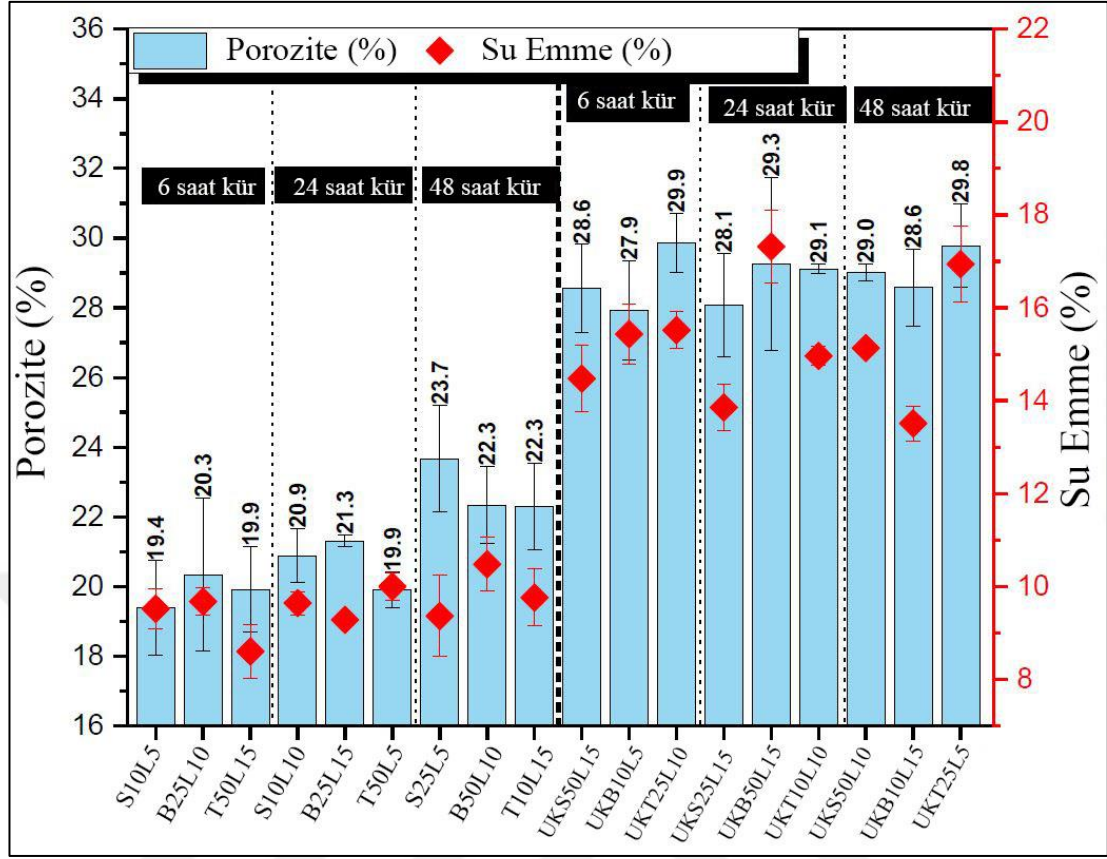


Şekil 4.4 Kuru birim ağırlıkları

4.5 Porozite ve Su Emmesi

Şekil 4.5, 91 günlük kürleme süresinden sonra alkali ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül SIFCON karışımlarının gözeneklilik ve su emme bulguları üzerindeki ısıl kür süresinin, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kum tipinin etkisini göstermektedir. Harç numunelerinin gözenekliliği ve emiciliğinin, mikro yapılarındaki gözeneklere

bağlı olan ve beklendiği gibi aynı özellikleri sergileyen geçirgenliklerinden kaynaklandığı varsayılmaktadır (Sasui vd., 2021). Hidrasyon ürünü ile kum parçacıkları arasındaki bağ da dahil olmak üzere bir dizi parametre, genel olarak açık gözeneklerin oluşumunu etkiler. Bununla birlikte, matristeki hidrasyon ürününün türü ve miktarı aderans kuvvetini etkiler (Yip vd., 2005). %50 UK içeren numuneler, maksimum gözeneklilik ve su emilimi göstermiştir. Bu, matrisin azalmış UK reaktivitesinden kaynaklanır, bu da daha az hidrasyon ürünü ve reaksiyona girmemiş UK ve agrega partiküllerini bağlayamama ve kalıntı gözeneklere yol açmasıyla sonuçlanır (Tracz ve Zdeb, 2019). Artan kür süresi ile gözenekliliğin arttığı görülmektedir. Açıkça görüldüğü gibi, UK içermeyen SIFCON karışımlarının gözenekliliği %19,4 ile %23,7 arasında değişmektedir. Görüldüğü gibi, aslında gözeneklilik ve su emmede büyük bir fark gözlemlenmemiştir. Termal kür süresinden kaynaklanan gözeneklilik farkı, 48 saatlik uzun termal süreden kaynaklanan buharlaşan suya bağlanabilir. 6 saat termal kürlemeye maruz bırakılan S10L5 karışımı en düşük gözenekliliğe sahipti ve 48 saat termal kürlemeye maruz bırakılan S25L5 karışımı en yüksek gözenekliliği sergiledi. Öte yandan, UK içeren SIFCON karışımlarının gözenekliliği %27,9 ile %29,9 arasında değişmektedir. 6 saatlik termal kürleme altındaki UKB10L5 karışımı en düşük gözenekliliğe sahipken, 6 saatlik termal kürlemeye tabi tutulan UKT25L10 karışımı en yüksek gözenekliliği sergiledi. Gözeneklilik ve absorpsiyon sonuçlarının termal kürleme süresinden önemli ölçüde etkilenmediği açıktır.

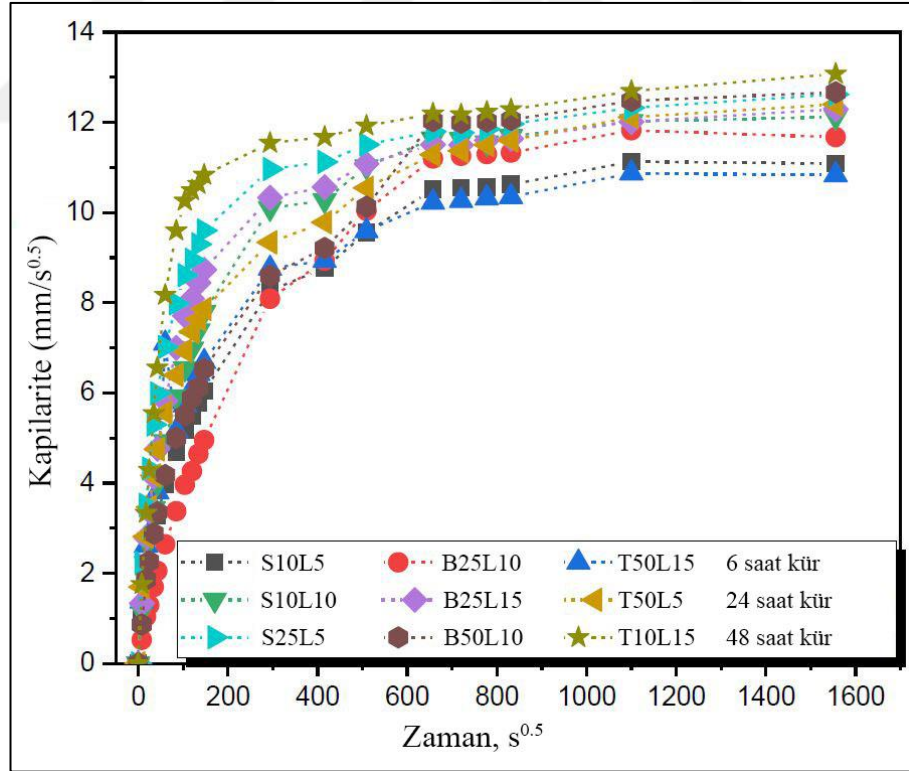


Şekil 4.5 SIFCON karışımlarının porozitesi ve su emmesi

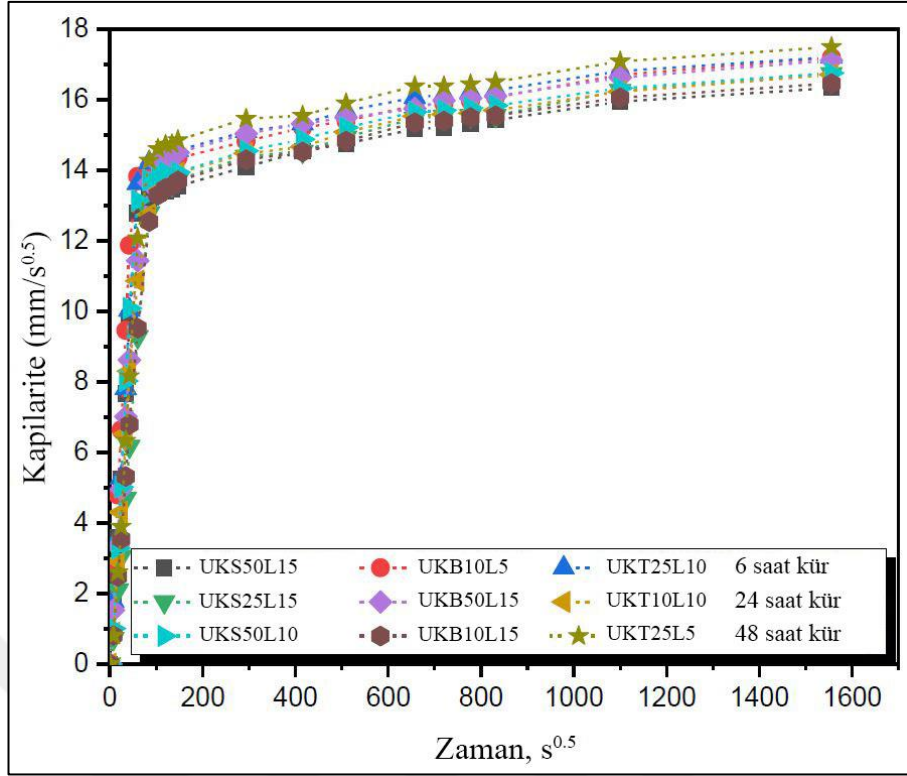
4.6 Kapilerite

Kapilerite, AAM ve geopolimer bağlayıcıların dayanıklılığını değerlendirirken dikkate alınması gereken çok önemli bir faktördür. Kılcal gözeneklerden betona giren sülfatlar ve karbonatlar betonun zamanla bozulmasının ana sebebidir. Betonun geçirgenlik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan çeşitli tekniklerden biri kapilerite testidir. Şekil 4.6, 91 günlük kürlenme süresinden sonra cüruf/uçucu kül bazlı SIFCON karışımlarının kapilerite bulguları üzerindeki ısıtılma süresinin, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kum tipinin etkisini göstermektedir. Şekil 8'de görülebileceği gibi, SIFCON karışımlarının kapileritesi, sabit bir seviyeye ulaşmadan ve sabit kalmadan önce ilk dönemde önemli ölçüde artmıştır. Sadece YFC içeren SIFCON karışımları, cürufun geopolimerizasyonu nedeniyle suyun harca erişmesini engelleyebilen yoğun bir C-A-S-H yapısı oluşturması nedeniyle %50 UK içeren karışımlardan daha düşük kapilerite sergiledi (Mohamed vd., 2022). Ayrıca YFC, UK'dan üretilen N-A-S-H'ye göre daha yüksek boşluk doldurma özelliğine sahiptir (Bakharev, 2005). Açıkça görüldüğü gibi, UK içermeyen SIFCON karışımlarının

kapileritesi $10,83 \text{ mm/s}^{0.5}$ ile $13,07 \text{ mm/s}^{0.5}$ arasında değişmektedir. En düşük kapilerite, 6 saat ısıtılan T50L15 karışımı için ölçüldü ve en yüksek, 48 saat ısıtılan T10L15 karışımı için belirlendi. Şekil 7a'da gözlemlendiği gibi, test süresi boyunca termal sertleşme süresindeki bir artış, UK içermeyen SIFCON numunelerinin kapileritesinde hafif bir artışa neden oldu. Görüldüğü gibi %50 UK'lı SIFCON karışımlarının kapileritesi $16,34 \text{ mm/s}^{0.5}$ ile $17,50 \text{ mm/s}^{0.5}$ arasında değişmiştir. 6 saat ısıtılan UKS50L15 karışımı en düşük kapileriteye sahipken, 48 saat ısıtılan UKT25L5 karışımı en yüksek kapileriteye sahipti. Şekil 8b'de gösterildiği gibi, UK içermeyen karışımlara benzer şekilde, UK içeren SIFCON numunelerinin kapileritesi, test süresi boyunca termal kürleme süresi uzadığında biraz arttı. UK katkılı SIFCON karışımlarının nihai kapilerite değerlerinin birbirine çok yakın olduğu açıkça görülmektedir. UK ilavesini takip eden kapilerite artışı, UK'nın doğal olarak yavaş çözünmesinin bir sonucu olabilir, bu da polimerizasyon ürünlerinin büyümesini ve gelişmesini engeller ve sonuç olarak gözenek yapısı bağlantısını optimize eder.



a)



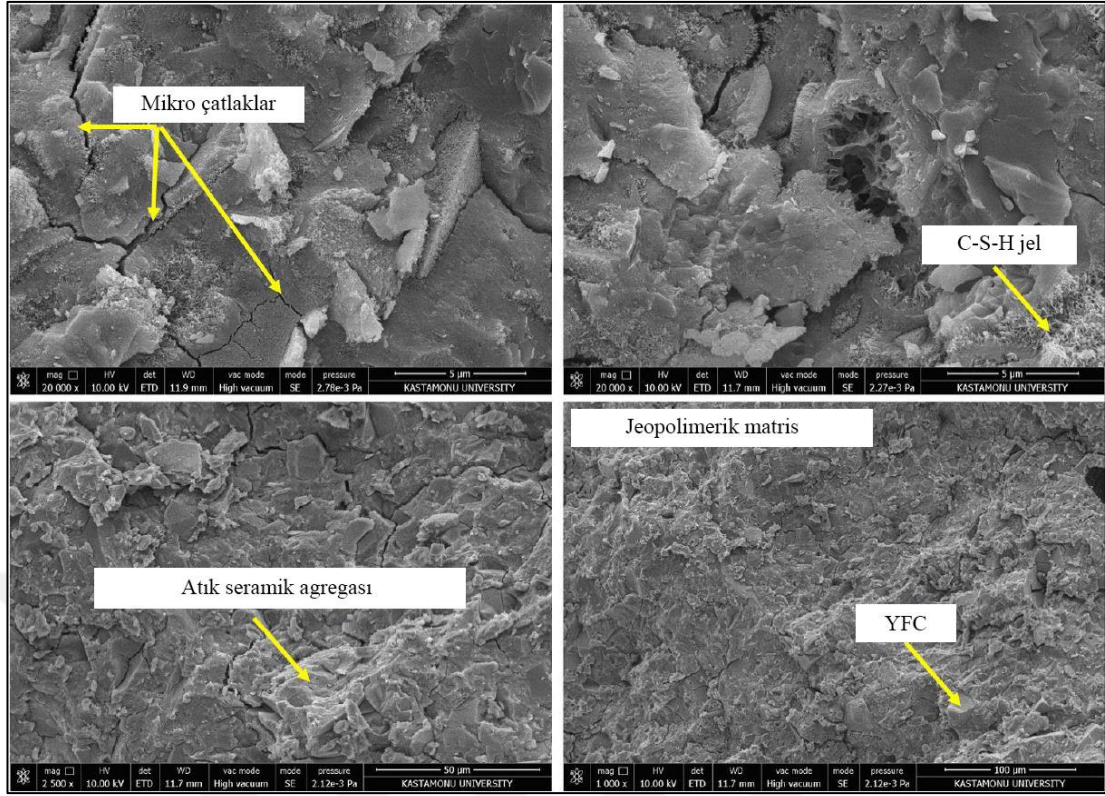
b)

Şekil 4.6 SIFCON karışımlarının kapilerite sonuçları a) UK=0 b) UK=50

4.7 Mikroyapı

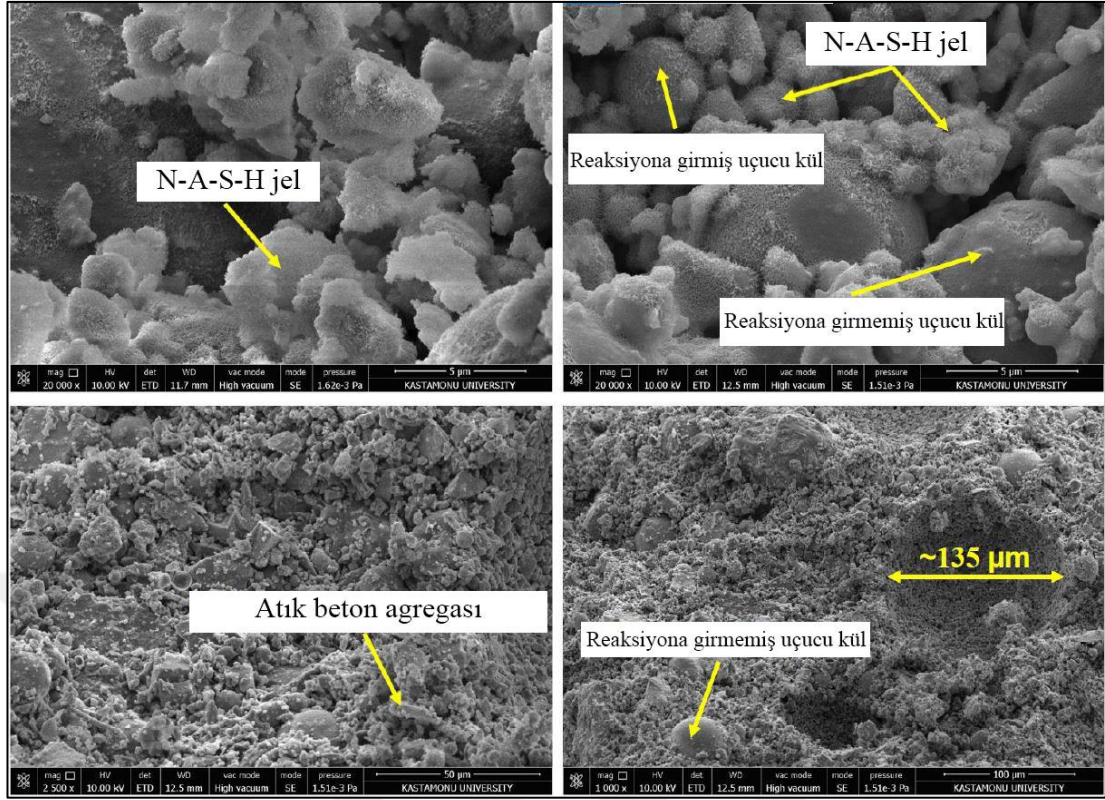
4.7.1 Normal Kür

Şekil 4.7, S10L5 karışımının 28 günlük SEM görüntüsünü göstermektedir. Hamurda yoğun bir mikro çatlak ağı gözlemlendi. Bu çatlak ağı, basınç dayanımı testinden sonra oluşturulmuştur. S10L5 karışımı %100 YFC ile üretildiğinden pastada C-S-H jelleri gözlemlendi. C-S-H jellerinin varlığı, S10L5 karışımının basınç dayanımının 60 MPa'nın üzerine çıkmasına yardımcı oldu. YFC'nin kimyasal içeriğindeki yüksek CaO nedeniyle C-S-H jelleri oluşmuştur. Matris içerisine gömülmüş atık seramik agregaları gözlemlendi. Kumlar ve pasta arasındaki ITZ'nin oldukça konsantre olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, agrega parçacıklarının etrafındaki alanların mikro çatlaklar geliştirdiği bulunmuştur. Geopolimer matrisinin veya pastaunun oldukça yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, yaklaşık 10 um büyüklüğünde hidratlanmamış YFC partikülleri görülmüştür. S10L5 karışımında kür süresi 6 saat olduğu için hidrate olmayan partiküller gözlemlendi.



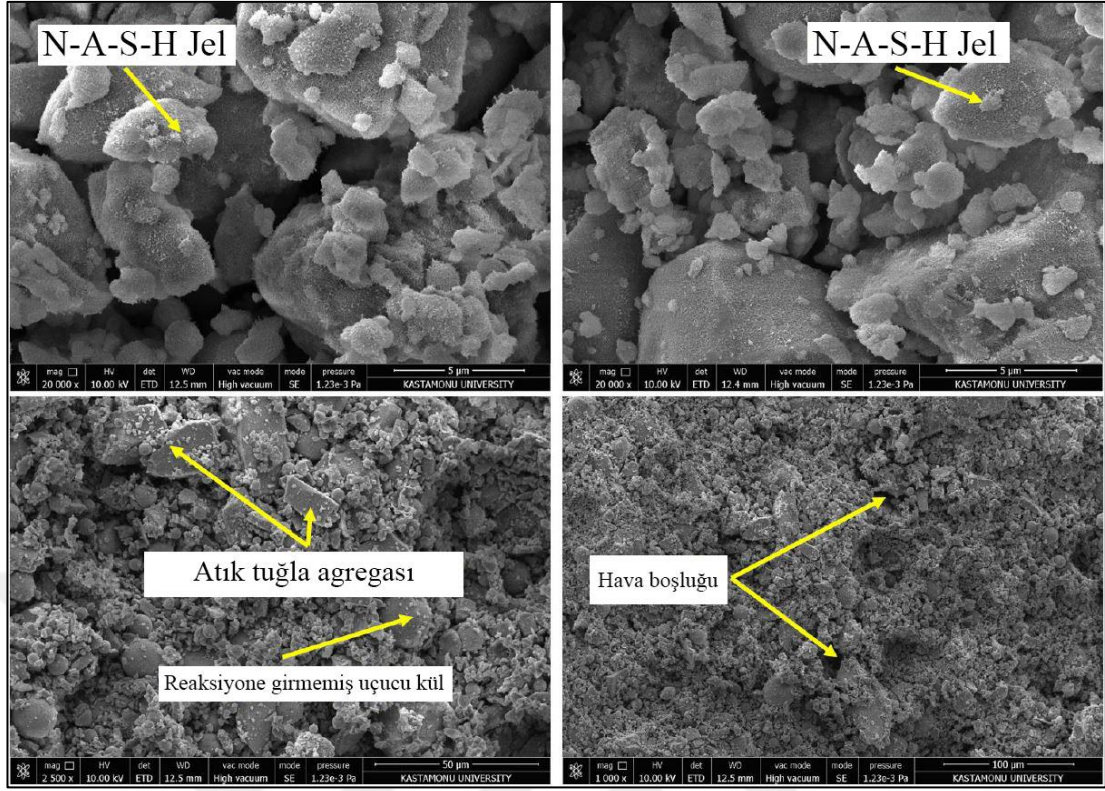
Şekil 4.7 S10L5 karışımının mikro yapısı (28 günlük)

Şekil 4.8'de verilen %50 UK içeriğine sahip UKB50L5 karışımı 24 saat kürlendi. UK'nın varlığından dolayı UKB50L5 karışımının basınç dayanımı 13,8 MPa olarak elde edilmiştir. Geopolimerlerin büyümesinde UK'nın kullanılması ile pastada N-A-S-H jelleri belirlendi. Pastaun hidratlı UK partiküllerine ek olarak, birçok hidratlı UK partikülü de gözlemlendi. Kür süresi 24 saat olmasına rağmen UK partiküllerinin hidrate olmadığı gözlemlendi. Bunun nedeni alkali aktivatörün olmamasıydı. Mikroyapı görüntüleri, UK hacmi yüksek olduğunda alkali aktivatör içeriğinin de yüksek olması gerektiğini belirlemiştir. Hidratlanmamış UK partiküllerinin yüzeyi pürüzsüz olduğu için kompresif etki ile hamurdan kolayca ayrılırlar. Hamurdaki küresel boşlukların genellikle hamurdan ayrılan UK partikülleri olduğu belirlenmiştir. Bu küresel parçacıkların çapı 135 μm 'ye kadar olabilir. Hamura gömülü atık beton agregaları da gözlemlendi. UKB50L5 karışımında geopolimerik reaksiyonun bir ürünü olarak daha fazla N-A-S-H jelinin oluştuğu gözlemlendi.



Şekil 4.8 UKT50L5 karışımının mikro yapısı (28 günlük)

Yaklaşık 8 MPa'lık bir sıkıştırma dayanımına sahip UKT25L5 karışımının mikro yapısı, Şekil 4.9'da verilmiştir. UKB50L5 ve UKT25L5 karışımlarının benzer mikroyapılara sahip olduğu gözlemlendi. Pasta içerisinde ana reaksiyon ürünü N-A-S-H jelinin bulunduğu gözlemlendi. Pastada çok sayıda hidratlanmamış UK partikülü belirlendi. Diğer karışımlarda olduğu gibi hamura gömülü atık tuğla agregaları da tespit edilmiştir. UKB50L5 ve UKT25L5 karışımlarındaki dayanım kaybının ana nedeni UK partikülleridir. Hidratlanmamış UK partikülleri de yapışma sorunlarına neden oldu. Hamurdan kolayca ayrılan UK partikülleri geride 150 µm'ye kadar boşluklar bıraktığından basınç dayanımı azalır. UK gibi yüksek SiO₂ içeriğine sahip alüminosilikat öncü malzemeleri kullanılırken alkali aktivatör için optimum oran belirlenmelidir. Ek olarak, nispeten büyük UK parçacıkları bir güç kaybına neden oldu.



Şekil 4.9 UKT25L5 karışımının mikro yapısı (28 günlük)

4.8 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı

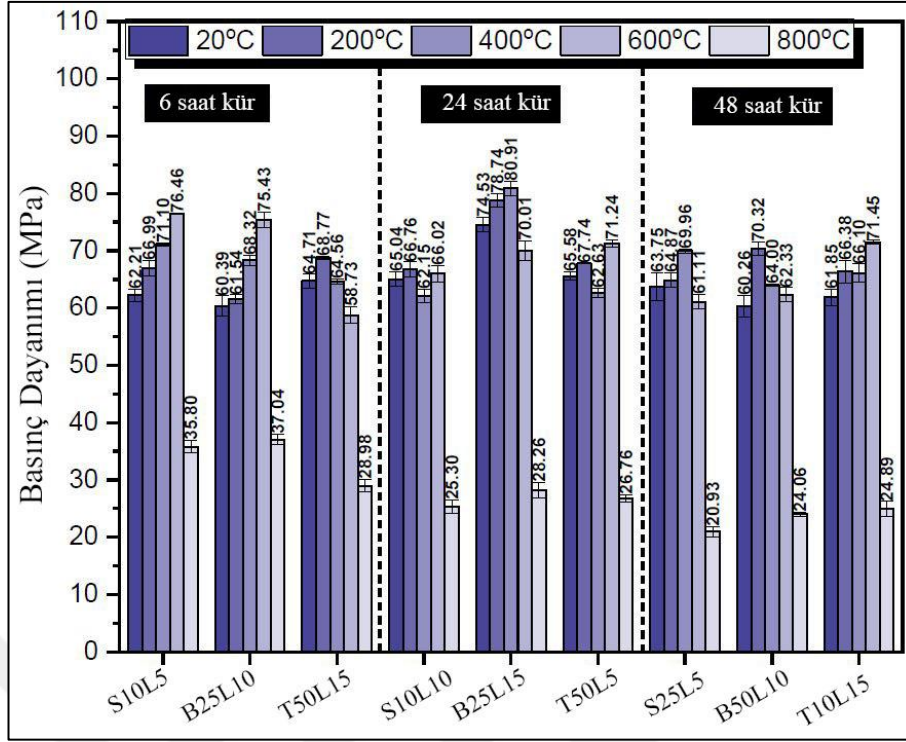
AAM karışımlarının yüksek sıcaklık dayanıklılığı 200; 400; 600 ve 800°C'de değerlendirildi. Bunun için 5°C ısıtma hızı uygulanmıştır. Numuneleri sıcak bir ortamda tutmak için iki saat harcandı. Numuneler daha sonra yavaş yavaş oda sıcaklığına soğutuldu. Yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik özellikler ve kütle kaybı kullanılarak yorumlanacaktır.

4.8.1 Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

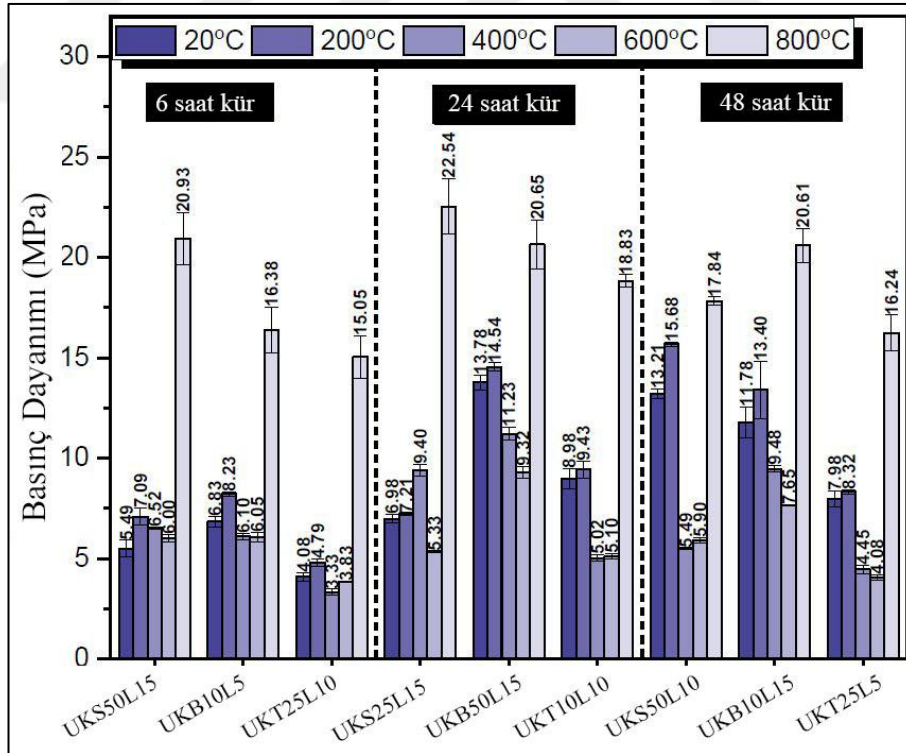
Şekil 4.10a, b, yüksek sıcaklıklara maruz 28 günde kürlenmiş cüruf/UK SIFCON karışımlarının basınç dayanımı bulguları üzerindeki ısıtma süresinin, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kum tipinin etkisini göstermektedir. Şekil 4.10c, d, yüksek sıcaklığa maruz kalma ile basınç dayanımı değişimini göstermektedir. Şekil 4.10a ve c'de görüldüğü gibi bağlayıcı olarak sadece YFC içeren SIFCON karışımları üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi dikkate alındığında, 60°C sıcaklığa maruz kalana kadar SIFCON karışımları genel olarak yüksek sıcaklığa karşı iyi direnç göstermiş ve

en yüksek dayanım kaybı 9,2 olarak ölçülmüştür. 600°C'den 680°C'ye kadar olan sıcaklıkların, sıcaklıklara maruz kaldıklarında geopolimerlerin sıcak dayanımını (sıcak durumda değerlendirilen) arttırdığı keşfedilmiştir. Karışımların çoğu ayrıca 200, 400 ve 600°C'de dayanım artışları gösterdi. Geopolimerlerin iyi bağlanma özelliğinin, paylaşılan O atomları ile bağlanan alternatif SiO₄ ve AlO₄ tetrahedradan oluşan bir ağ olan üç boyutlu N-A-S-H tipi bir jelin oluşumundan kaynaklandığı varsayılmaktadır. Bu 3 boyutlu yapı, yüksek sıcaklıklara maruz kalmaya karşı oldukça dirençlidir. XRD ve nükleer manyetik rezonans (NMR) çalışmaları, 600°C'ye kadar yapısal bir değişikliğin fark edilmediğini göstermektedir (Dombrowski vd., 2007; C. Li vd., 2010). Buna karşılık, 800°C'den sonra, UK içermeyen karışımların basınç dayanımı kaybı %38,7 ile %67,2 arasında değişmektedir ve ayrıca 800°C'den sonra termal kür süresinin artmasının genel olarak gözenekliliğe bağlanabilecek basınç dayanımı düşüşünü arttırdığı gözlemlenebilir. artırma. Ancak 200, 400 ve 600°C'de 48 saat ısıl kür süresi uygulandığında, diğer 6 ve 24 saat ısıl kür süresine göre nispeten daha düşük dayanım kaybı gözlemlendiği görülmektedir. Rovnaník ve arkadaşlarına (Rovnaník vd., 2013) göre, C-A-S-H fazının dehidrasyonu tamamlandı ve yeni akermanit baskın fazlar, alkali ile aktive olan cürufun mikro yapılarında en önemli değişikliklerin meydana geldiği 600°C ile 800°C arasında kristalleşmeye başladı. 600°C'nin altındaki yüksek sıcaklıklarda SIFCON karışımlarının mekanik bozunmasının başlıca nedenleri arasında dehidrasyon, faz ayrımı ve artan gözeneklilik ve kaba gözenek yapısı ile müteakip termal çatlama yer alır. SIFCON karışımlarının mekanik bozunması, sıcaklığın 800°C'ye yükselmesi, kristalleşme ve faz geçişi ve gözenekli mikro yapının oluşturulması (Cai ve Ye, 2021) ile önemli ölçüde hızlanır. 200°C'de, yedi karışım dayanım azalması sergiledi. 200°C'de, suyun buharlaşması yoluyla dehidrasyonun getirdiği ilk mikroyapısal değişiklikler, önemli ölçüde doğrusal büzülme ile sonuçlanır (Dias ve Thaumaturgo, 2005). Numunelerin iç kısımlarına uygulanan genleşme ve büzülme kuvvetlerinin etkisi altında, suyun buharlaşmasından sonra kalan hacim, boşluklar, çatlaklar ve gözenekler gibi çeşitli mikroyapısal özelliklere kalıplanır (Burciaga-Díaz ve Escalante-García, 2017; Duxson vd., 2006). T50L15 ve T50L10 olmak üzere iki karışım, %50 geri dönüştürülmüş kum içermesi ve %10'un üzerinde lif hacmi içermesi nedeniyle dayanım artışı gösterdi. Çünkü ATK, alkali ile aktifleştirilen bileşikler için düşük amorf bir öncü malzemedir. ATK'nin düşük amorf alümina ve silika içeriği, yüksek sıcaklıkta kürlenmenin ardından aktive edildi (Reig

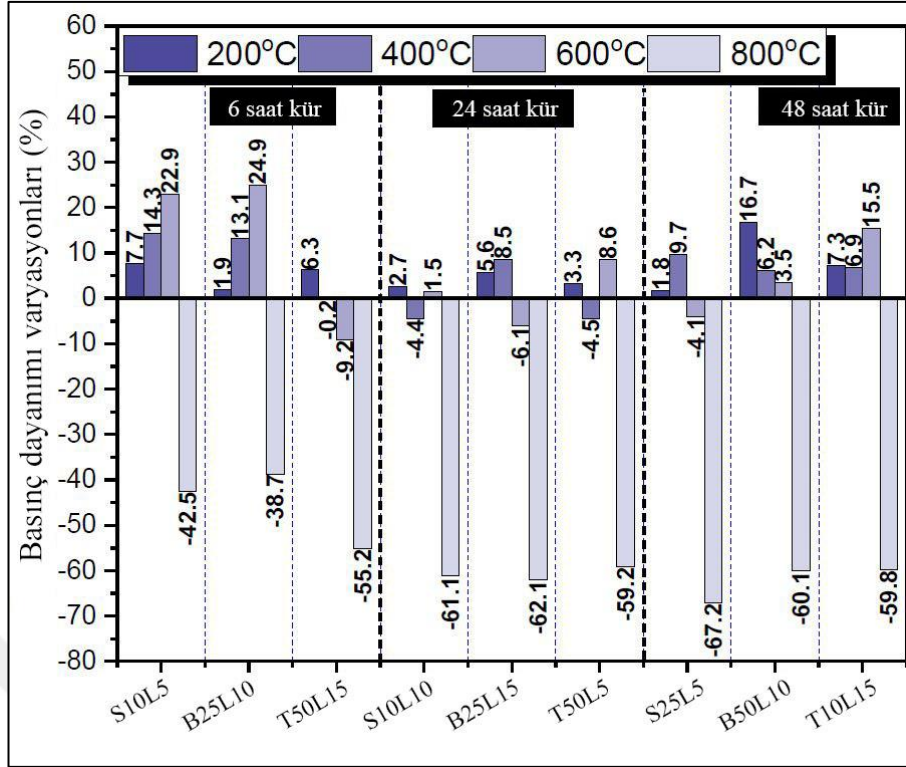
vd., 2013). Bu aktivasyon gücü arttırdı. Artan lif hacmi, 600°C'nin üzerinde özellikle 6 ve 24 saatlik termal kür sürelerinde SIFCON karışımlarının dayanım kaybını artırmıştır. Şekil 12b ve d'de gösterildiği gibi, %50 UK öncüsü içeren SIFCON karışımları üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi dikkate alındığında, UK içeren SIFCON karışımları 600°C'nin altında ve 800°C'nin üzerinde neredeyse tamamen farklı davrandı. 48 saat termal kürlenene UKS50L10 karışımı hariç tüm karışımlar 800°C'nin üzerinde dayanım artışı sergiledi. 600°C'nin altında, ATK ve ASK içeren iki karışım dışında tüm karışımlar dayanım kaybı göstermiştir. Artan ısıl kür süresi tüm sıcaklık aralıklarında dayanımı olumsuz etkilemiştir. 600°C'nin altında daha fazla dayanım düşüşü ölçülmüş ve artan ısıl kürlenme süresi ile daha düşük dayanım artışı gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, alkali ile aktive edilmiş UK/YFC karışımlarının termal kararlılığı, tek alkali ile aktive edilmiş UK'ye kıyasla oldukça düşüktür ve kaçınılmaz parçalanma ve dayanım bozulması meydana gelir (Lee vd., 2017; Luo, vd., 2022; Luo, vd., 2022; Pan vd., 2018). 800°C'nin üzerinde, Dayanım kazanımları, daha yüksek sıcaklıklarda ve/veya sinterlemede artan geopolimerizasyondan kaynaklanabilirken, dayanım kayıpları, 600°C'nin altındaki tek tip olmayan termal gradyanlar tarafından üretilen termal uyumsuzluktan kaynaklanabilir (Pan vd., 2009). Özellikle 6 ve 24 saatlik ısıl sürelerde, %10 ve 15 lif hacminde daha fazla dayanım artışı ölçüldüğü ancak bu artışın ısıl kür süresi arttıkça azaldığı görülmektedir. 48 saat ısıl kürlenene karışımlar için en yüksek dayanım düşüşü 600°C'nin altında, en düşük dayanım artışı ise 800°C'de gözlenmiştir. 600°C'nin altında 48 saat ısıl kür süresinde daha fazla dayanım azalması ölçüldüğü ve UKS50L10 karışımının en yüksek dayanım kaybını 400 ve 600°C sıcaklık aralığında gösterdiği söylenebilir.



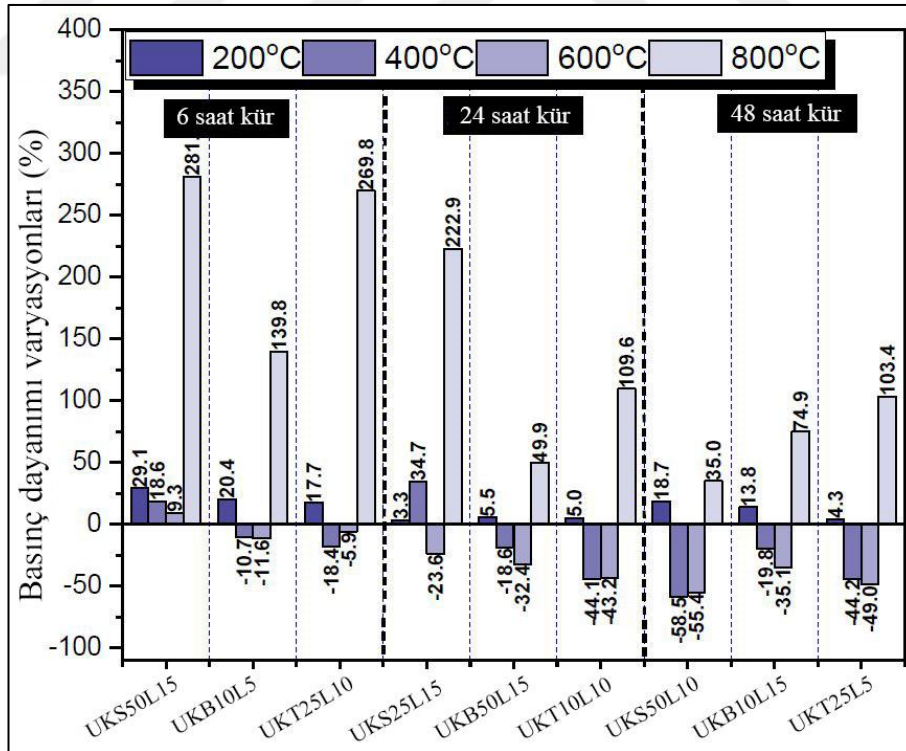
a)



b)



c)



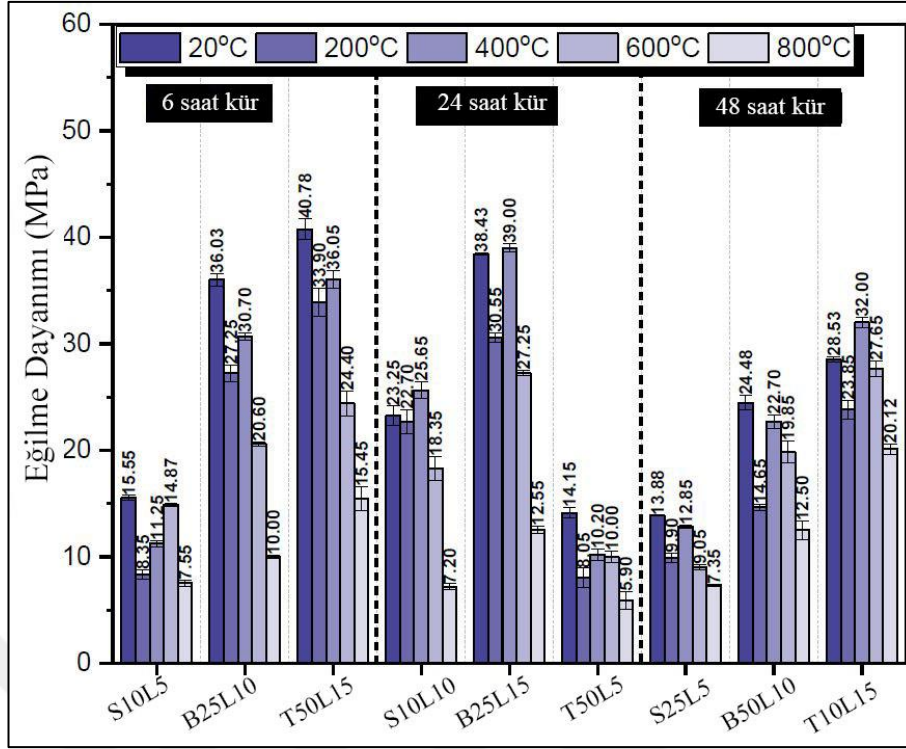
d)

Şekil 4.10 Yüksek sıcaklık sonrası a, b) SIFCON karışımlarının basınç dayanımı c, d) dayanım değişimleri

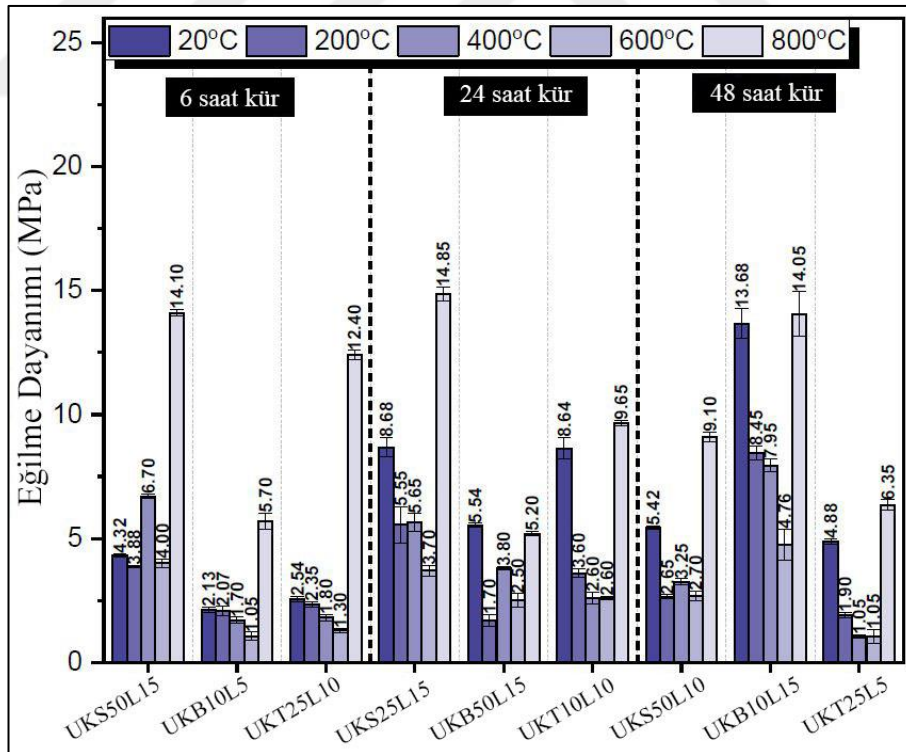
4.8.2 Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı

Şekil 4.11a, b, yüksek sıcaklıklara tabi tutularak 91 günde kürlenene cüruf/uçucu kül SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı sonuçları üzerinde ısı k r süresinin, lif içeriğinin ve geri d n şt r lm   kum tipinin etkisini göstermektedir. Şekil 4.11c, d, yüksek sıcaklığa maruz kalma ile basınç dayanımı değişimini göstermektedir. Şekil 4.11a ve c'de g r ld ğu gibi  nc  olarak sadece YFC içeren SIFCON karışımları üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi dikkate alındığında, tüm SIFCON karışımları tüm sıcaklık aralıklarında eğilme dayanımı kaybı sergiledi. Şekil 4.11a ve c'de g r ld ğu gibi, %5 lif içeriği içeren tek YFC bazlı SIFCON karışımları ile tüm karışımlar, 200 C'de 400 ve 600 C'de meydana gelene göre daha fazla eğilme dayanımı kaybı sergilemiştir. Reaksiyona girmemiş parçacıkların yaklaşık 300 C'deki geopolimerik reaksiyonu, 400 ve 600 C'de gözlemlenen daha yüksek performansın yanı sıra basınç dayanımı durumunda olanları açıklar. Rovnank ve arkadaşlarına göre, 600 C ile 800 C arasında, C-A-S-H fazı tamamen kuruduğunda ve akermanitin hakim olduğu yeni fazlar kristalle meye başladığında, alkaliyle aktive olan cürufun mikro yapısında en dikkate değer değişiklikler yaşandı (Rovnan k vd., 2013). 600 C'nin altındaki sıcaklıklarda, dehidrasyon, faz ayrımı ve ardından artan gözeneklilik ve kaba gözenek yapısı ile termal  atlama, SIFCON karışımlarının mekanik bozunmasına katkıda bulunan başlıca unsurlardır. Sıcaklığın 800 C'ye yükselmesi, kristalleşme ve faz değişimi ve gözenekli mikro yapının oluşumu, SIFCON karışımlarının mekanik bozunmasını önemli ölçüde hızlandırır (Cai ve Ye, 2021). Basınç dayanımı davranışının aksine, artan termal k r süresi ile eğilme dayanımı kaybı azalmış ve en düşük dayanım d      48 saatlik termal k r süresinde belirlenmiştir. 800 C'de en düşük dayanım kaybı, 48 saat ısı k r ne maruz bırakılan T10L15 karışımı için  l  lm   tir. Şekil 4.11a ve c'de g r ld ğu gibi, lif hacminin etkisi, artan ısı k r süresi ile eğilme dayanımı performansı üzerinde daha fazla etkiye sahipti ve 48 saatlik ısı k rde, dayanım performansı artan lif hacmi ile arttı, ancak 6 ve 24 saatlik ısı k rde, yüksek sıcaklıkta eğilme dayanımı performansı %5 lif hacmi içeren karışım için daha iyi olmuştur. 6 ve 24 saatlik ısı kürlenmede, %10 lif hacmine sahip karışım en k    performans 800 C'de göstermiştir. Şekil 13b ve d'de gösterildiği gibi, %50 UK  nc    içeren SIFCON karışımları üzerindeki yüksek sıcaklığın etkisi dikkate alındığında, UK ile SIFCON karışımları neredeyse tamamen farklı davranışlar sergiledi. UK

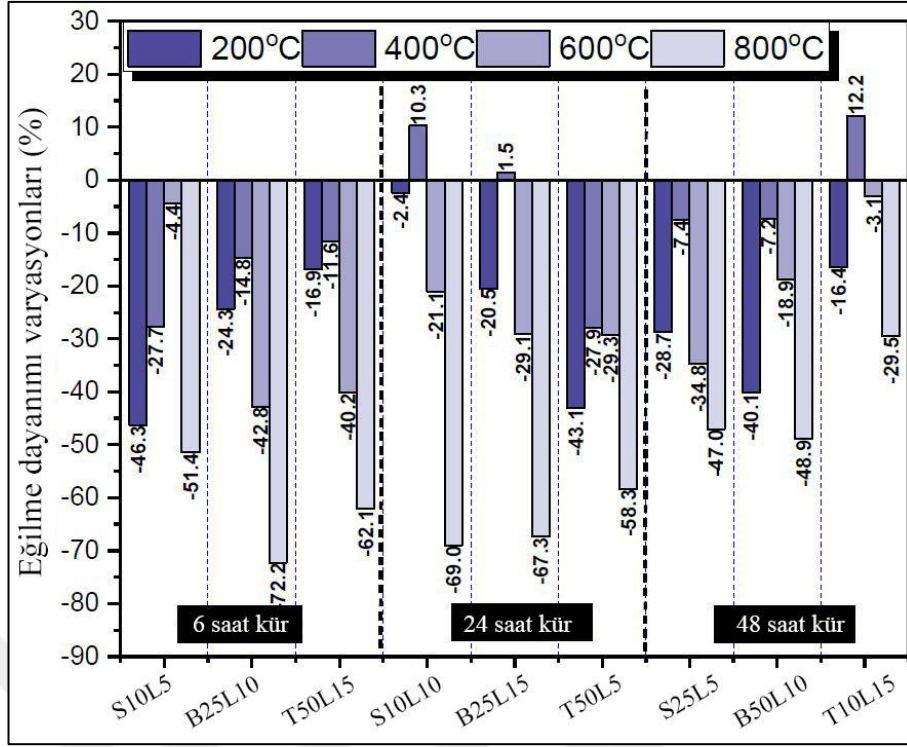
içermeyen karışımlardan elde edilen sonuçların aksine, ısıl kür süresi arttıkça eğilme dayanımındaki azalma önemli ölçüde artmış ve en kötü performans 48 saat ısıl kürlenen karışımlarda görülmüş, ancak basınç dayanımı performansında görüldüğü gibi en iyi performans 48 saat ısıl kürlenen karışımlarda görülmüştür. tüm karışımlar için 800°C'de ölçülmüştür. 6 saatlik ısıl kürlemede, tüm karışımların eğilme dayanımı arttı, ancak diğer 24 ve 48 saatlik ısıl kürlenme süreleri, sırasıyla sadece %15 ve 10 lif hacmine sahip karışımlar 800°C'de dayanım artışı gösterdi. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, alkali ile aktive edilmiş UK/YFC karışımlarının termal kararlılığı, tek alkali ile aktive edilmiş UK'ye kıyasla oldukça düşüktür ve kaçınılmaz parçalanma ve dayanım bozulması meydana gelir (Lee vd., 2017; Luo, vd., 2022; Luo, vd., 2022; Pan vd., 2018). 800°C'nin üzerinde, Dayanım kazanımları, daha yüksek sıcaklıklarda ve/veya sinterlemede artan geopolimerizasyondan kaynaklanabilirken, dayanım kayıpları, 600°C'nin altındaki tek tip olmayan termal gradyanlar tarafından üretilen termal uyumsuzluktan kaynaklanabilir (Pan vd., 2009). Numunelerin ilk dayanımları, 800°C'de artık basınç dayanımındaki performansları üzerinde bir etkiye sahiptir. Nispeten düşük başlangıç dayanımlarına (<7,6MPa) sahip numuneler, 800°C'ye maruz kaldıktan sonra %90'a kadar artık dayanım artışı gösterdi. Bunun sinterleme ve ardından reaksiyona girmemiş bileşiklerin hidrasyonu ile sağlandığı düşünülmektedir. Başlangıç dayanımları 28 MPa civarında olan numuneler, 800°C'ye maruz kaldıktan sonra yaklaşık %70'lik kalıntı dayanım kayıpları yaşarken, başlangıç değerleri bundan daha yüksek, yaklaşık 83 MPa olan numuneler, yaklaşık %90'lık kalıntı dayanım kayıpları yaşadı (Guerrieri ve Sanjayan, 2010).



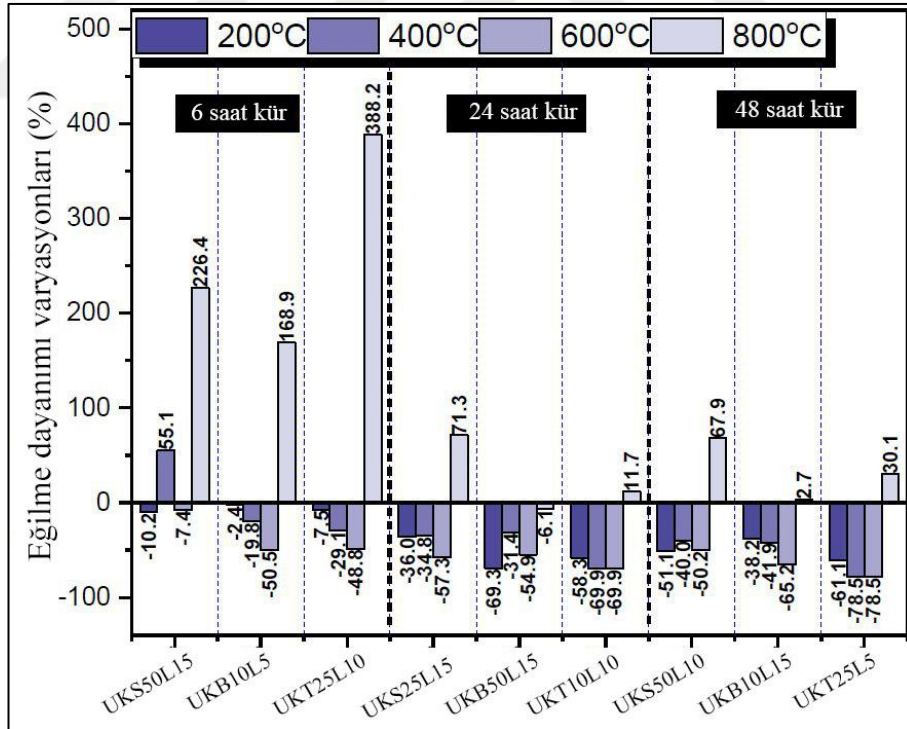
a)



b)



c)

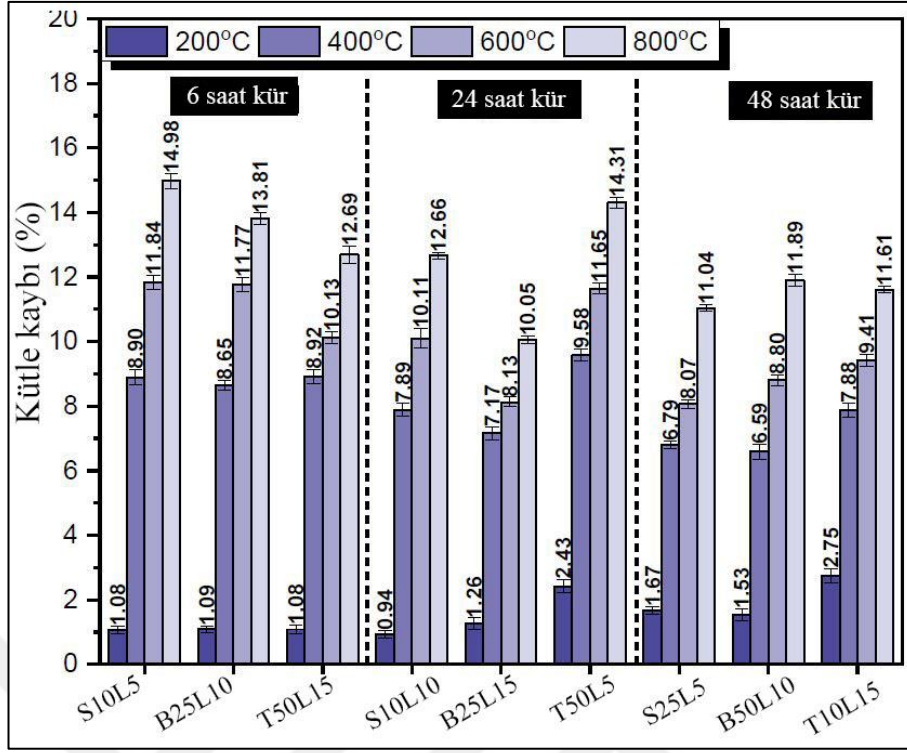


d)

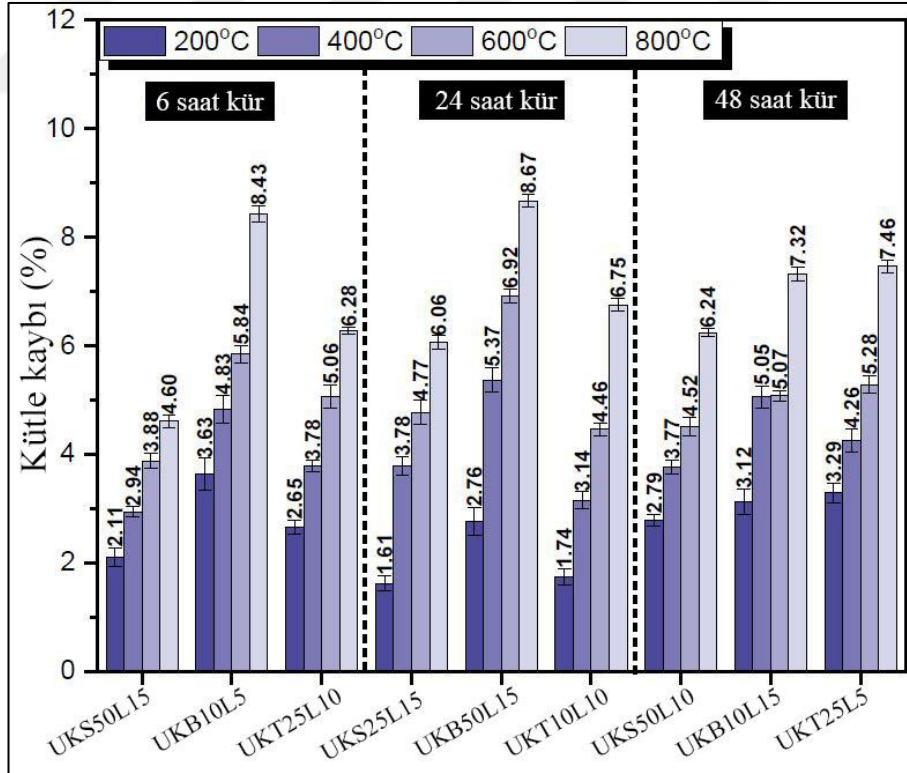
Şekil 4.11 Yüksek sıcaklık sonrası a, b) SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı c, d) eğilme dayanımı değişimleri

4.8.3 Yüksek Sıcaklık Sonrası Ağırlık Kaybı

Şekil 4.12a, b, yüksek sıcaklıklara maruz 28 günde kürlenmiş cüruf/uçucu kül bazlı alkali aktifleştirilmiş SIFCON karışımlarının ağırlık kaybı üzerindeki ısıyla sertleşme süresinin, lif içeriğinin ve geri dönüştürülmüş kum tipinin etkisini göstermektedir. Tüm SIFCON karışımları, sıcaklık yükseldikçe ağırlık kaybında bir artış yaşadı. Sıcaklık yükseldikçe, SIFCON kompozitleri, malzemelerdeki nemin numunenin yüzeyine doğru yayıldığı ve kaçtığı, dahili mikroyapı hasarına ve nihayetinde ağırlık kaybı açısından geopolimerlerin bozulmasına neden olan bir dehidrasyon reaksiyonuna girer (Kong vd., 2007). 600°C'den önce, SIFCON kompozitleri, hem serbest suyun hem de yoğunlaştırılmış hidroksil gruplarının buharlaşmasından kaynaklanan su kaybı nedeniyle ağırlıklarının çoğunu kaybetti. 600°C'nin üzerinde, lif-matris arayüzündeki reaksiyondan kaynaklanmış olabilecek ikinci bir hızlı kilo kaybı aşaması vardı. SIFCON kompozitleri yaklaşık 800°C'ye ısıtıldığında liflerin güçlendirici etkisi büyük ölçüde azalır. Şiddetli lif bozulmasından ve lif/matris temasındaki son derece yüksek bağlanma dayanımından kaynaklanır. Sonuç olarak, geopolimer kompozit, önemli ölçüde azaltılmış mekanik özellikler sergiler ve çok kırılgan bir şekilde kırılır (He vd., 2010). Şekil 4.12a'da görüldüğü gibi bağlayıcı olarak sadece YFC içeren SIFCON karışımları üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi düşünüldüğünde, 200°C'de kütle kaybı %0,94 ila %2,75 arasında değişmiştir. 24 saat ısıtılan kürlenmiş S10L10 karışımı en düşük ağırlık düşüşünü gösterirken, en fazla ağırlık kaybı 48 saat ısıtılan kürlenmiş T10L15 karışımında bulundu. Isıl kütleme süresi arttıkça ağırlık kaybı oranının genel olarak azaldığı görülmektedir. YFC bağlayıcının başka hiçbir bileşeninin 600°C'nin altında parçalanmadığı göz önüne alındığında, kalsit dekarbonizasyonu için gerekenden daha düşük sıcaklıklarda ağırlık kaybının su kaybına karşılık geldiğine inanılıyordu. Yaklaşık 150°C'de emilen su buharlaşır, yaklaşık 300°C'de kimyasal olarak bağlı su da buharlaşır ve OH grupları 700°C'ye kadar kalabilir (Duxson vd., 2007; Perez-Cortes vd., 2021). %15 lif hacmine sahip karışımların özellikle 6 ve 24 saatlik ısıtılan kütle süresinde daha düşük kütle kaybına sahip olduğu görülmektedir. %50 UK öncülü içeren SIFCON karışımlarında yüksek sıcaklığın etkisi dikkate alındığında, Şekil 4.12b'de görüldüğü gibi, 400 ve 800°C sıcaklık aralığında tüm karışımlarda UK içermeyen karışımlara göre daha düşük ağırlık kaybı ölçülmüştür.



a)

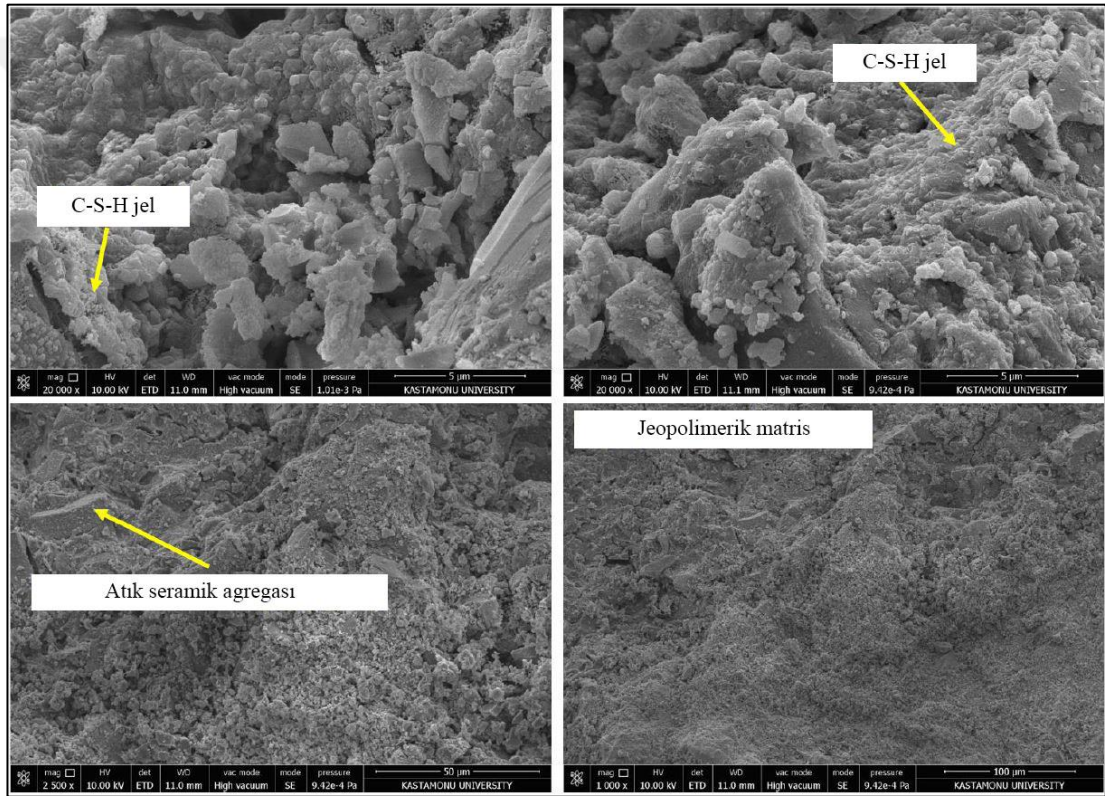


b)

Şekil 4.12 Yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı a) UK=0, b) UK=50

4.8.4 Yüksek Sıcaklık Sonrası Mikroyapı

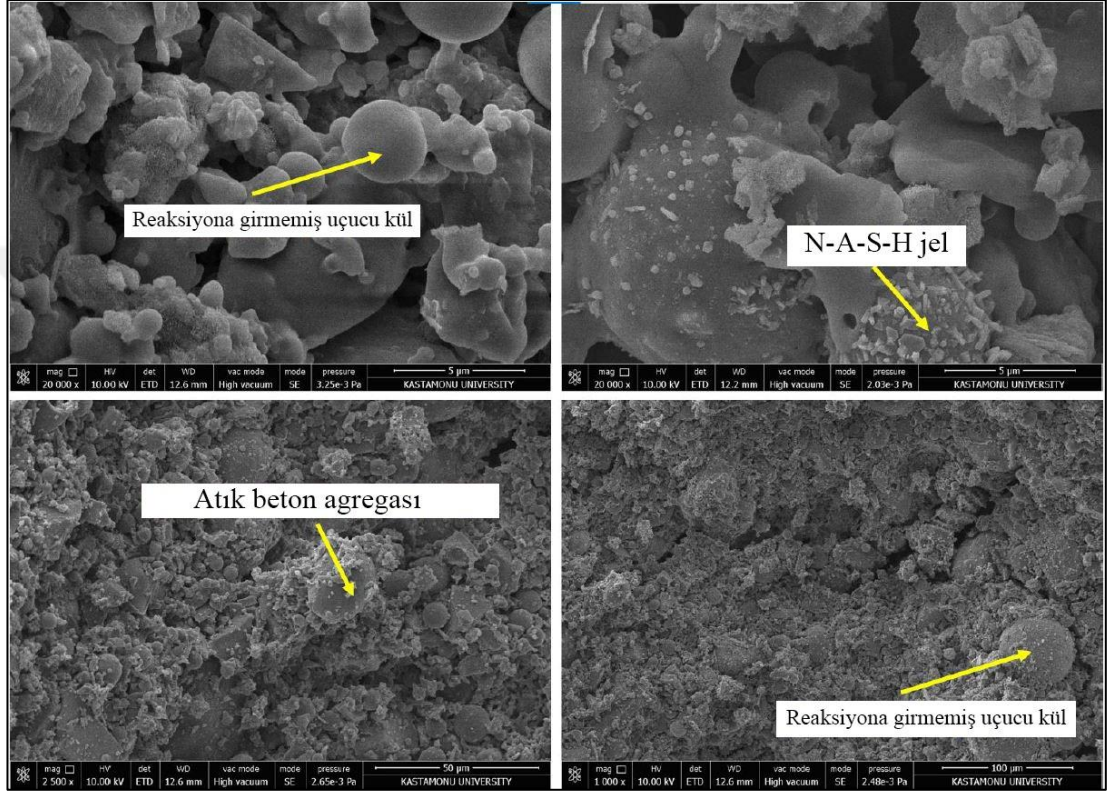
800°C'ye maruz bırakılan S10L5 karışımının mikro yapısı Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi S10L5 numunesi 800°C'ye maruz bırakılmasına rağmen pastada C-S-H jelleri gözlemlendi. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisine rağmen matriste yoğun bir çatlak ağı gözlenmemiştir. Hamurda gömülü atık beton agregalarının varlığı belirlendi. 800°C'den sonra, S10L5 karışımı kabaca 35 MPa'lık bir basınç dayanımına sahip olmuştur. C-S-H jellerinin kalıcılığı, oldukça yüksek bir basınç dayanımının gözlemlenmesine yol açtı.



Şekil 4.13 800°C'ye maruz kalan S10L5 karışımının mikro yapısı

Şekil 4.14'de UKB50L5 karışımının 800°C sonrası mikroyapı görüntüsü verilmektedir. Yüksek sıcaklık etkisine rağmen UKB50L5 karışımında olduğu gibi UKT50L5 karışımında da N-A-S-H jelleri gözlemlendi. Ek olarak, pasta içinde hidratlanmamış UK parçacıkları hala bulunabilir. UKB50L5 karışımında 800°C'lik yüksek bir sıcaklığın ardından kabaca 20 MPa'lık bir basınç dayanımı elde edildi. UK partiküllerine yakın bölgelerde N-A-S-H jelleri görüldü. Yüksek sıcaklığın etkisinin hidratlanmamış bazı UK partiküllerini hidratladığı düşünülmektedir. 800°C'den sonra

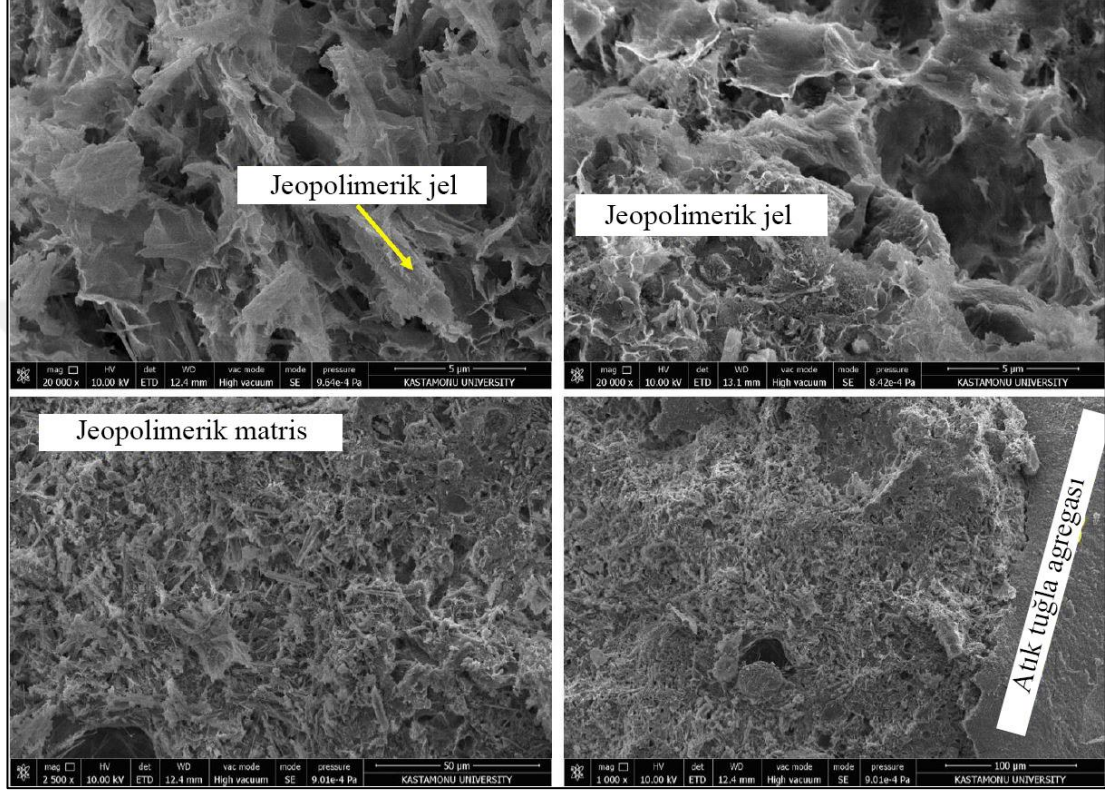
basınç dayanımının arttığı gösterilmiştir. Ayrıca hamurda UK kaynaklı küresel boşlukların azaldığı tespit edilmiştir. UK parçacıklarının yapışması da yüksek sıcaklıklarla nispeten iyileştirildi. Hidratlanmamış UK partiküllerinin aderansı arttığından, dolgu maddesi görevi görerek basınç dayanımını etkili bir şekilde arttırmıştır.



Şekil 4.14 800°C'ye maruz kalan UKT10L5 karışımının mikro yapısı

Şekil 4.15'de görüldüğü gibi UKT25L5 karışımının yüksek sıcaklıktan sonraki SEM görüntüsü UKB50L5 karışımına çok yakındır. Çünkü 800°C'ye maruz kalmalarına rağmen geopolimerik jeller hala mevcuttur. Ayrıca geopolimerik matriste mikro çatlak ağı gözlenmemiştir. Ayrıca, UKT25L5 karışımı suda soğutulmasına rağmen belirgin mikro çatlaklar gözlenmedi. Özellikle hamur ile agrega arasındaki ITZ'de çatlak oluşumu tespit edilmemiştir. UKT25L5 kombinasyonu, 800°C'den sonra yaklaşık 16 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaştı. Geopolimerlerin basınç dayanımı, yüksek sıcaklıklardan sonra reaksiyon ürünleri varlığını koruduğu için artmıştır. Çelik liflerin ısı iletkenlik katsayısı ve ısı depolama özelliği yüksek olduğu için zarar görmeyeceği düşünülmektedir. Yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan ısı ilk önce çelik lifler üzerinde tutuldu. Ayrıca geopolimerlerde kullanılan agregalar nispeten daha yüksek

gözenekliliğe sahip olduklarından hamurdaki ısı iletimini yavaşlatmışlardır. Bu iki faktör pastayı yüksek sıcaklığın etkilerine karşı korumuştur. Ayrıca 1 saat süreyle yüksek sıcaklık uygulamasının uygulanması da bu süreçte etkili olmuştur. Çünkü hedeflenen sıcaklık tüm hamura kısa sürede yayılamaz.



Şekil 4.15 800°C'ye maruz kalan UKT10L5 karışımının mikro yapısı

4.9 SIFCON Karışımlarının Donma-Çözülme Durabilitesi

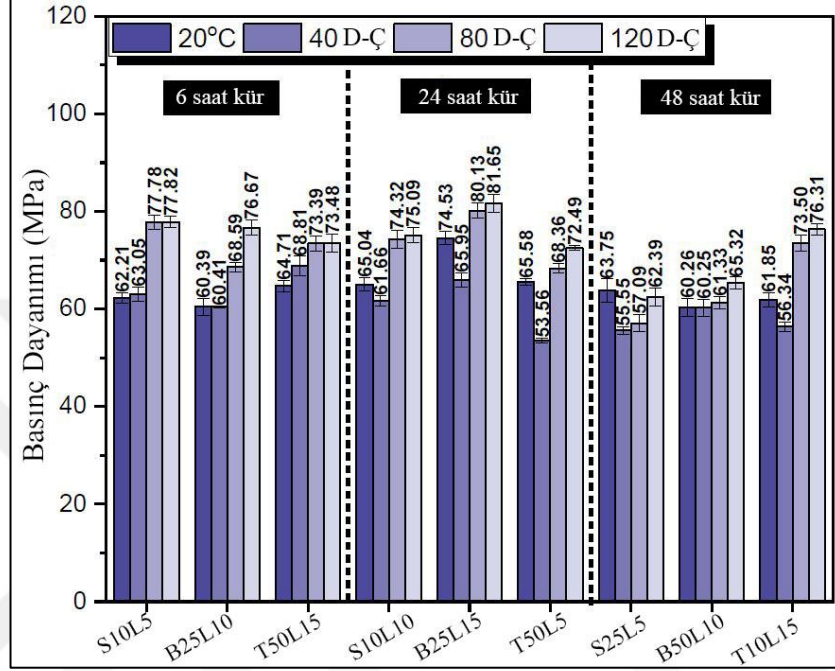
40; 80 ve 120 donma-çözülme (D-Ç) döngüsüne tabi tutulan SIFCON karışımlarının mekanik özellikleri ile ilgili olarak ısıl kür süresi, lif içeriği ve geri dönüştürülmüş kum türlerinin etkileri incelenmiştir. ASTM C666-97'e göre, SIFCON karışımlarının örnekleri havada 7 saat süreyle $-20 \pm 4^\circ\text{C}$ 'de donma döngülerine ve suda 5 saat çözölmeye maruz bırakıldı. Bu, 28 gün $20 \pm 3^\circ\text{C}$ su kürünün ardından tamamlandı. 40; 80 ve 120 D-Ç döngüsü gerçekleştirildikten sonra, her karışımdan üç numune üzerinde Basınç, eğilme ve kütle kaybı testleri yapılmıştır.

4.9.1 D-Ç Sonrası Basınç Dayanımı

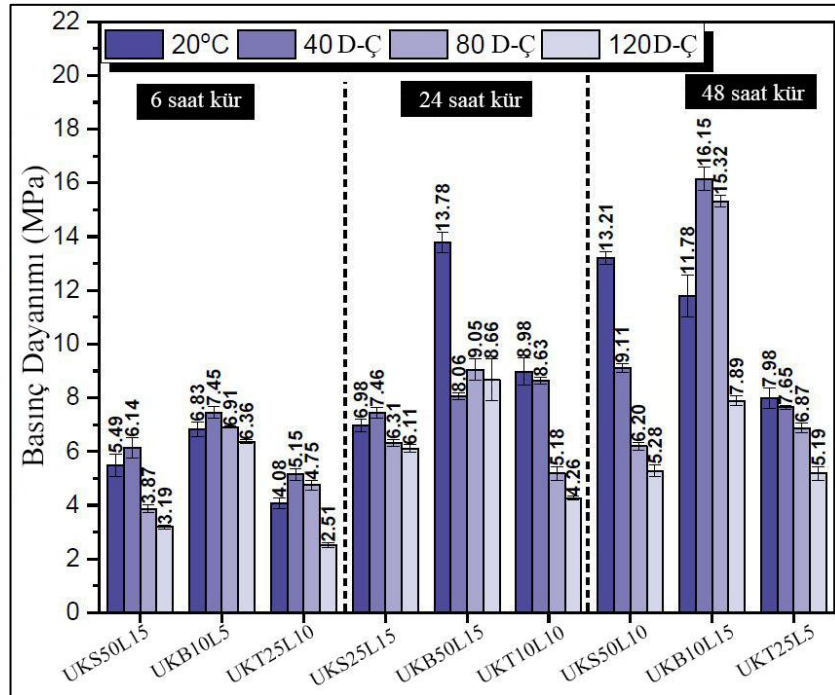
Bir malzemenin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek şiddetli sıcaklık değişimlerine dayanma kabiliyeti, donma-çözülme direnci olarak adlandırılır. SIFCON karışımlarının gözenek boyutu hacmi, gözenek dağılımı ve kıvrımlılığının tümü donma-çözülme direncini etkiler. Artan su emme, gözeneklerin içinde daha fazla buz birikmesine neden olur ve bu, matris duvarlarındaki sıkıştırma gerilimini karşılamak için genişler. Buz eridikçe, uygulanan iç gerilimi serbest bırakır ve gözeneklerin hacmini azaltır. Bu testi yaptıktan sonra gözenek çaplarının büyümesine ve toplam gözenekliliğin artmasına rağmen, matrisin elastik/plastik gerilmeleri (kalıcı/geri kazanılmış deformasyonlar) gözeneklerin nihai hacim değişimini belirler. Genişleyen veya büzülen hacmin getirdiği bu tür yükleme/boşaltma, yorulma yüklemesi olarak temsil edilebilir (Abdollahnejad vd., 2020, 2021). Donma-çözülme direnci açısından, liflerin varlığı ayrıca aşağıdaki iki sonuçtan biriyle sonuçlanabilir: gelişmiş gözeneklilik ve artan lif köprüleme etkisi. Ayrıca, lif ve matrisin ITZ'sindeki gözeneklerin, liflerin ne kadar etkili bir şekilde köprülendiği üzerinde bir etkiye sahip olduğu da belirtilmelidir. Lif ve matrisin ITZ'sinin bağlanma yetenekleri, bu gözenekler suyla dolduğunda ve donma-çözülme ve yükleme/boşaltma döngülerine maruz kaldığında zayıflar. Ayrıca, liflerin türü, dağılımı ve bileşiminin, matris içindeki gözeneklerin nasıl dağıldığı ve boyutlandırıldığı üzerinde bir etkisi olabileceğine dikkat edilmelidir. Hacim genişlemesi ve büzülmesi nedeniyle, SIFCON karışımları yükleme ve boşaltmadan ve su emmeden Farklı etkilere maruz kalabilir. 0; 40; 80 ve 120 D-Ç döngüsüne tabi tutulurken 28 günde kürlenmiş cüruf/uçucu kül SIFCON karışımlarının basınç dayanımı sonuçları üzerindeki ısı kurusu süresi, lif içeriği ve geri dönüştürülmüş kum tipinin etkisi Şekil 4.16a ve b'de gösterilmektedir. D-Ç döngülerinden sonra basınç dayanımındaki değişim, Şekil 4.16c, d'de gösterilmektedir. 6 saatlik ısı kurusu maruz bırakılan UK içermeyen SIFCON karışımları için, tüm karışımlar 40; 80 ve 120 D-Ç döngüsü altında dayanım artışı gösterdi ve bu dayanım artışı, Şekil 4.16a,c'de görüldüğü gibi D-Ç döngüsü sayısı arttıkça devam etti. Bu bulgular, YFC'nin aktivasyonunun yüksek nem varlığında devam ettiğini, önemli sayıda reaksiyon ürünü verdiğini ve nihai dayanımları geliştirdiğini göstermektedir (Puertas vd., 2003). %5 lif hacmine sahip karışım (S10L5), özellikle daha yüksek 80 ve 120 D-Ç döngülerinde en iyi donma-

çözülme performansını sergiledi. 40 D-Ç'nin etkisi dikkate alındığında, en iyi dayanım artışı %15 lif hacmine sahip karışımda (T50L15) elde edilmiştir. 6 saat ısı kürüne maruz kalan SIFCON karışımları için, daha düşük ısıl kür süresi nedeniyle daha düşük gözeneklilik ve gözeneklerde kalan su, bu dayanım artışına neden olmuştur. 24 saat ısı kürüne maruz bırakılan SIFCON karışımları için, bu termal kür süresindeki tüm karışımlar 40 D-Ç döngüsünde dayanım kaybı sergiledi ancak 80 ve 120 D-Ç döngülerinde dayanım artışı sağlandı. %10 lif hacminde, daha az dayanım kaybı oldu düşük ASK içeriği ile benzer şekilde ilişkilidir. Artan geri dönüştürülmüş kum içeriği, ABK ve ATK'nin daha yüksek su emme oranları nedeniyle 40 D-Ç'de dayanım kaybını artırdı. Aslında lif hacmi, SIFCON karışımlarının D-Ç direnci üzerinde en büyük etkiye sahipti ve bu, daha yüksek ısıl sertleşme süresine maruz kalan karışımlar için daha belirgindir. 48 saat ısı kürüne maruz bırakılan SIFCON karışımları için, %15 lif hacmine (T10L15) sahip karışım, özellikle 80 ve 120 D-Ç döngülerinde donma ve çözölmeye karşı en iyi performansı göstermiştir. Bu performans, liflerin, donma eyleminin yarattığı iç basınç tarafından üretilen matristeki mikro çatlakları önleme işlevi görmesiyle açıklanabilir. Lif eklemenin mikro çatlakların yayılmasını bastırmaya yardımcı olduğu ancak bunların başlamasını engellemediği keşfedildi. Cıva girişi porozimetri testi ve su penetrasyon derinliği testinin sonuçları, betonun donma direncini büyük ölçüde artıran uygulanan sıkıştırma gerilimi ile daha da sıkıştırıldığını doğruladı (Yuan vd., 2020). Öte yandan, %5 lif hacmine sahip (S25L5) ve 48 saat ısıl kürlenmiş karışım, en kötü D-Ç direncini sergilemiş ve UK içermeyen tüm karışımlar benzer dayanım davranışı gösterdiğinden, artan D-Ç döngüleri ile azalan dayanım kaybına sahip olmuştur. 6 saatlik ısı kürüne maruz bırakılan UK'lı SIFCON karışımları için, her bir karışımın dayanımı 40 D-Ç döngüsü sırasında arttı ve 120 D-Ç döngüsünden sonra azaldı. UK içermeyen karışımların aksine artan lif hacmi D-Ç direncini olumsuz yönde etkilemiş ve en büyük dayanım kaybı 120 D-Ç çevrimde %10 ve %15 lif hacmine sahip karışımlarda ölçülmüştür. Bu sonuçlar ayrıca, daha yüksek su emme özelliklerine sahip geri dönüştürülmüş kumların daha büyük yüzdesine bağlanabilir. D-Ç'nin 24 saat ısıl kürlenmiş SIFCON karışımlarının basınç dayanımı üzerindeki etkisi dikkate alındığında, yalnızca %15 lif hacmine sahip karışım 40 D-Ç döngüsünde dayanım artışına ve 80 ve 120 D-Ç döngüsünde en düşük dayanım kaybına sahipti. Diğer tüm karışımlar, 40 ve 120 D-Ç döngüsünden sonra dayanım azalmasına sahipti. D-Ç'nin 48 saat ısıl kürlenmiş SIFCON kombinasyonları üzerindeki

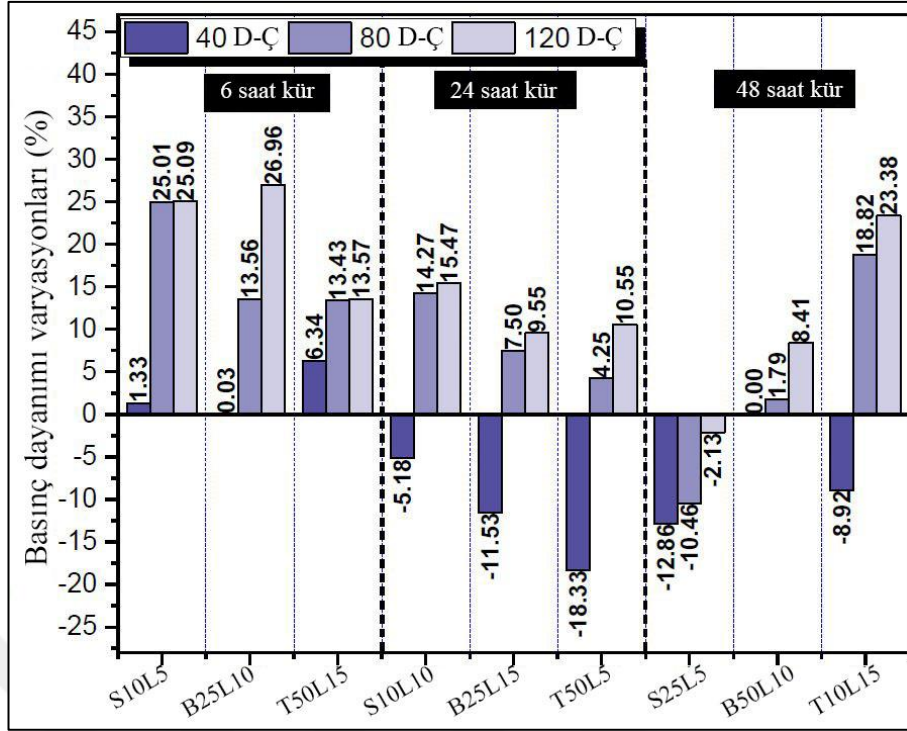
etkisi dikkate alındığında, en iyi D-Ç direnci, 40 ve 80 D-Ç döngüsünde dayanım artışı ve 33,02 dayanım düşüşü ile %15 lif hacmine sahip karışım için ölçülmüştür. %120 D-Ç döngüsünde ise %10 lif hacmi ve %50 ABK içeren karışım D-Ç döngülerine karşı en kötü direnci göstermiştir.



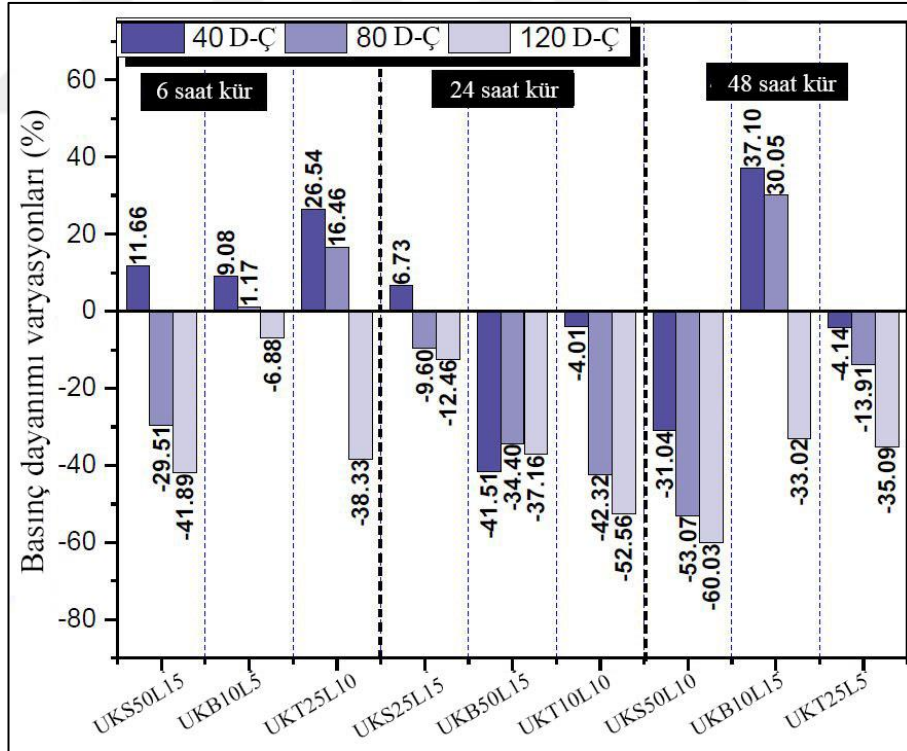
a)



b)



c)



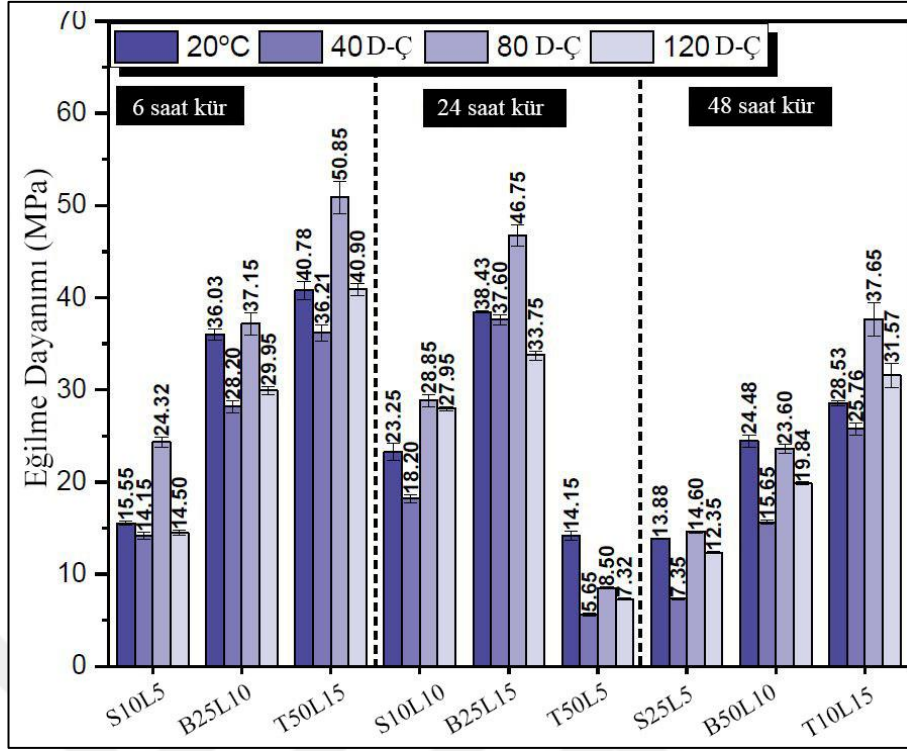
d)

Şekil 4.16 Donma çözülme sonrası a,b) SIFCON karışımlarının basınç dayanımı, c,d) dayanım değişimleri

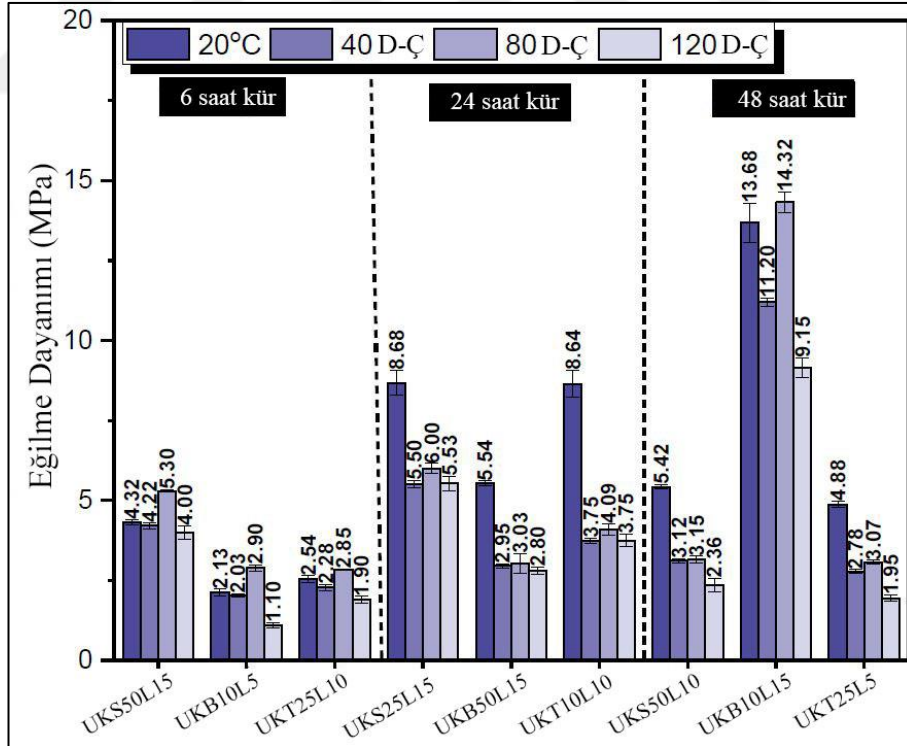
4.9.2 D-Ç Sonrası Eğilme Dayanımı

0; 40; 80 ve 120 D-Ç döngüsüne maruz bırakılarak 28 günde kürlenene alkali aktif cüruf/uçucu kül SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı sonuçları üzerinde ısı kütür süresi, lif içeriğı ve geri dönüştürölmüş kum tipinin etkisi Şekil 4.17a, b'de gösterilmektedir. Şekil 4.17c, d, D-Ç döngüleri ile eğilme dayanımındaki değışimleri göstermektedir. Daha önceki çalışmalarda belirtildiğı gibi, lif kullanmak, D-Ç döngülerinin verdiğı hasarı azaltmıştır. Bu nedenle, lifin dahil edilmesinin, geopolimer harcın donma-çözölme döngülerine karşı direncini büyük ölçüde artırabileceğı tespit edilmiştir (Mermerdaş vd., 2021). 6 saatlik ısı kütürüne maruz bırakılan UK içermeyen SIFCON karışımları için ilginç bir sonuç, tüm karışımların 80 D-Ç çevrimi altında eğilme dayanım artışı göstermesi, ancak Şekil 4.17a, c'de gösterildiğı gibi 40 ve 120 D-Ç'de dayanım kaybının gözlemlenmesidir. %15 lif hacmine sahip karışım (T50 L15), daha yüksek D-Ç döngülerinde en iyi direnci göstermiştir, çünkü 120 D-Ç döngüsünde güç kaybı görülmemiştir. En kötü donma-çözölme performansı, 40 ve 120 D-Ç çevrimlerinde en yüksek dayanım kaybı ile %10 lif hacmine ve %25 ABK'ye sahip karışımında gözlenmiştir. UK içermeyen SIFCON kombinasyonları durumunda, 24 saatlik bir ısı kütürleme işlemine tabi tutulmuşsa, lif içeriğinin olumlu etkisi ve geri dönüştürölmüş kumun olumsuz etkisi de bu ısı kütürleme periyodunda görölmüştür. %10 lif hacmine ve %10 ASK'e sahip karışım, 80 ve 120 D-Ç döngüsünde en iyi eğilme dayanımı performansını gösterirken, diğeryandan, %15 lif hacmine sahip karışım, 40 ve 80 D-Ç döngüsünde D-Ç döngüsüne karşı daha iyi direnç göstermiştir. D-Ç çevrimlerinin tüm aralıklarından sonra, hasar görmüş sayılabilecek %5 lif hacmi ve %50 ATK (T50L5) içeren karışım için eğilme dayanımı kaybı yaklaşık %40'ın üzerine çıkmıştır. Lif içeriğinin yararlı etkisi ve geri dönüştürölmüş kumun olumsuz etkisi, 48 saatlik ısı kütürleme işlemine tabi tutulmuş UK içermeyen SIFCON kombinasyonları için de gözlemlendi. Yine en iyi donma ve çözölme direnci, 40 D-Ç döngüsünde %9,71 dayanım kaybı ve 80 ve 120 D-Ç döngüsünde sırasıyla %31,97 ve %10,66 güç artışı olan %15 lif hacimli karışım (T10L15) için ölçölmüştür. 40 ve 120 D-Ç çevrimlerinde daha fazla dayanım kaybı gösteren T50L10 karışımı için %50 ABK içeriğı dayanımı daha olumsuz etkilemiş ve %10 lif hacminin pozitif etkisini azaltmıştır. D-Ç döngülerinin %50 UK içeren SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.17b, d'de görölmektedir. 6 saatlik ısı kütürüne maruz

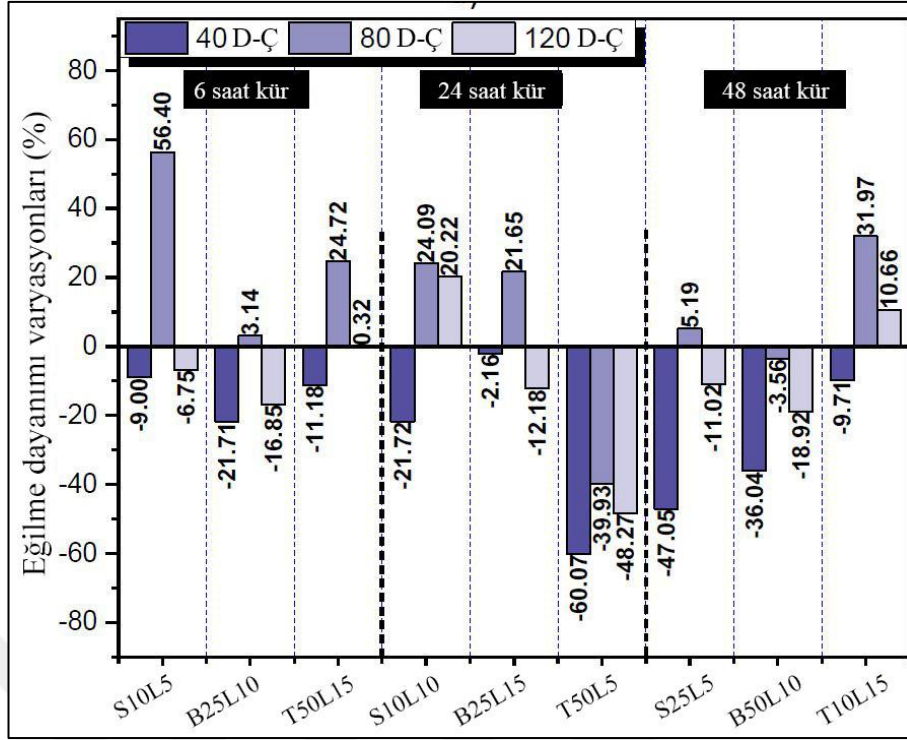
bırakılan UK'lı SIFCON karışımları için, D-Ç döngülerinden dolayı en az etkilenen karışım, 120 D-Ç döngüsünde en düşük dayanım kaybı sergileyen %15 lif hacmine sahip karışımdı. Bu ısı kürü periyodundaki her üç karışım da 80 D-Ç döngüsünde dayanım artışı göstermiş ve 120 D-Ç döngüsünde en büyük dayanım kaybı %5 lif hacmine sahip karışım için belirlenmiştir. 24 saat ısı kürüne maruz bırakılan UK'lı SIFCON karışımları için, bu ısı kür süresindeki tüm karışımlar tüm D-Ç çevrim aralıklarında dayanım kaybına sahip olmuş ve her bir karışımın dayanım kaybı 40, 80 ve 120 D-Ç'de birbirine çok yakın olmuştur. %15 lif hacmine sahip karışım, bu ısı kürlenme süresinde en düşük dayanım kaybına sahip olmuştur. 48 saat ısı kürüne maruz bırakılan UK içeren SIFCON karışımları için, %50 UK içeren karışımlar arasında en yüksek eğilme dayanımı kaybı %5 lif hacmine sahip karışımda ölçülmüştür. Yüksek içerikli lifler, %50 UK entegre SIFCON matrisinde gerinim sertleştirilmesi ve tekrarlanan çatlama işlemleri sırasında bağ kuvvetini arttırdığı ve bükülme davranışlarını güçlendirdiği için, %15 lif hacmine sahip karışım en iyi D-Ç direncini gösterdi ve 80 D-Ç döngüsünden sonra kaybederken dayanımı artırdı. ek D-Ç döngülerinden sonra güç (Shaikh, 2013). Şekil 4.17, 24 saatlik bir ısıyla kürleme süresine tabi tutulmuş UK içeren ve içermeyen kombinasyonların en kötü D-Ç direncine sahip olduğunu açıkça göstermektedir.



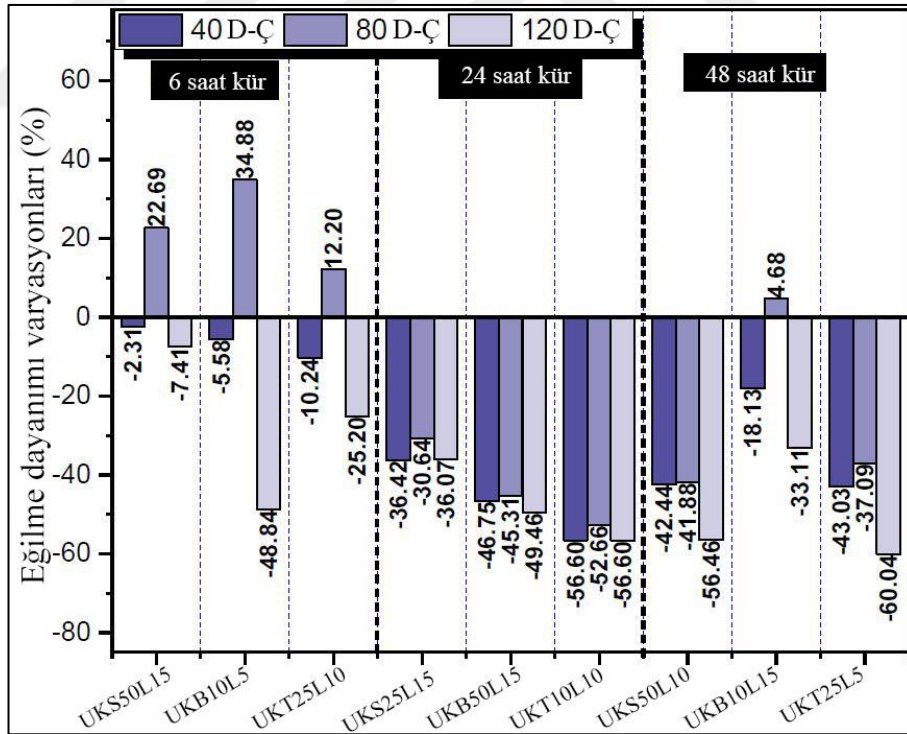
a)



b)



c)

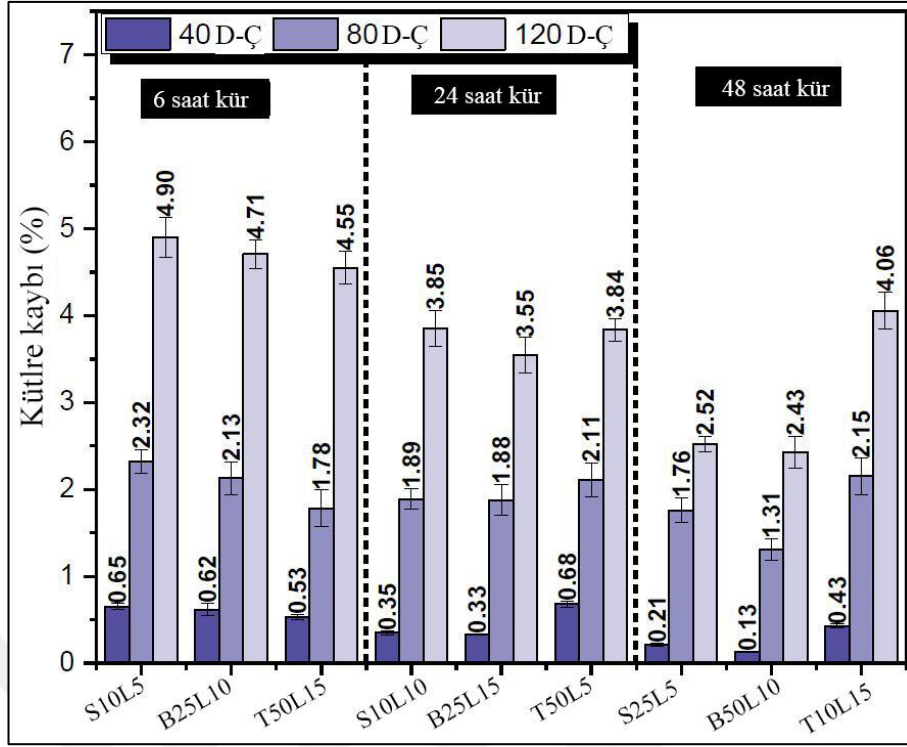


d)

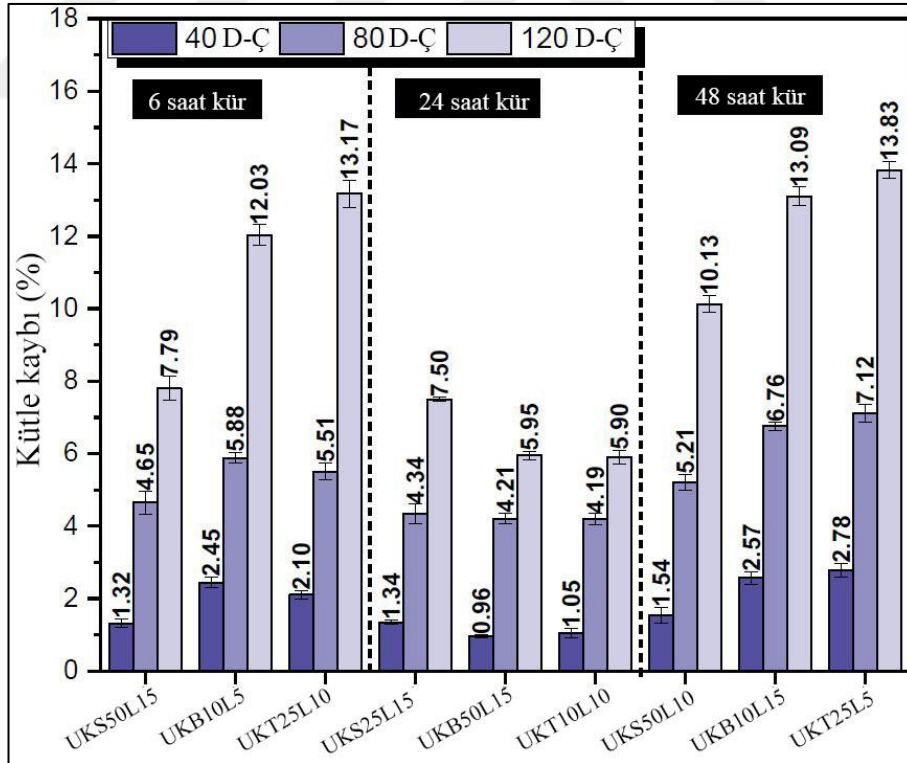
Şekil 4.17 Donma çözülme sonrası a, b) SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı, c, d) dayanım değişimleri

4.9.3 D-Ç Sonrası Ağırlık Kaybı

0; 40; 80 ve 120 donma-çözülme (D-Ç) döngüsüne maruz kalırken 28 günde kürlenene cüruf/uçucu kül SIFCON karışımlarının ağırlık kaybı sonuçlarına ısı kütür süresi, lif içeriğı ve geri dönüştürölmüş kum tipinin etkisi Şekil 4.18a, b'de gösterilmiştir. D-Ç döngülerinin artması veya donma sıcaklığındaki düşüşün bir sonucu olarak numunedeki pH değeri düşer, bu da karışımların basınç dayanımını azaltır. Yukarıda belirtilen koşullar, numunenin yüzeyinin açıkça soyulmasının yanı sıra birçok çatlak ve gözenek gelişimi ile karakterize edilen kütle kaybı ve gözeneklilikte bir artışa neden olur (Min vd., 2022). Tüm SIFCON karışımları, donma ve çözölme arttıkça ağırlık kaybında bir artış yaşadı. Şekil 4.18a'da göröldüğü gibi öncü olarak sadece YFC içeren SIFCON karışımları üzerindeki donma ve çözölme etkisi dikkate alındığında, 40 D-Ç döngüsünde %0,13 ila %0,68 arasında değışen çok düşük ağırlık kaybı ölçölmüştür. Ağırlıktaki en düşük düşüş, 48 saat ısı kütürlenen T50L10 karışımı için belirlenirken, aynı zamanda en düşük ağırlık kaybı 80 ve 120 D-Ç döngüsünde gösterilirken, en büyük ağırlık kaybı 24 saat ısı kütürlenen T50L5 karışımında bulundu. Beklendiğı gibi ısı kütür süresinin artmasının genel olarak ağırlık kaybı oranını düşürdüğü fark edilebilir. 6 ve 24 saat boyunca ısıyla sertleştirmeye maruz bırakılan %15 lif hacimli karışımlar, tüm D-Ç döngü aralıklarında en düşük ağırlık kaybını sergiledi. Öte yandan, 48 saat ısı kütürüne maruz bırakılan %15 lif hacmi katkılı karışım en yüksek ağırlık kaybını göstermiştir. Şekil 20b'de gösterildiğı gibi, %50 UK öncölü içeren SIFCON karışımlarında donma ve çözölmenin etkisi dikkate alındığında, ağırlık kaybı %0,96 ile %13,83 aralığında olmuştur. 40 ve 120 D-Ç çevriminin donma ve çözölme aralığında tüm karışımlarda UK içermeyen karışımlara göre daha yüksek ağırlık kaybı ölçölmüştür. D-Ç döngüsüne tabi tutulan karışımların ağırlık kaybı üzerinde ısı kütür süresi dikkate alındığında, 24 saat ısı kütür uygulanmış karışımların tüm D-Ç döngü aralıklarında en düşük ağırlık kaybına sahip olduğı görölmüştür.



a)



b)

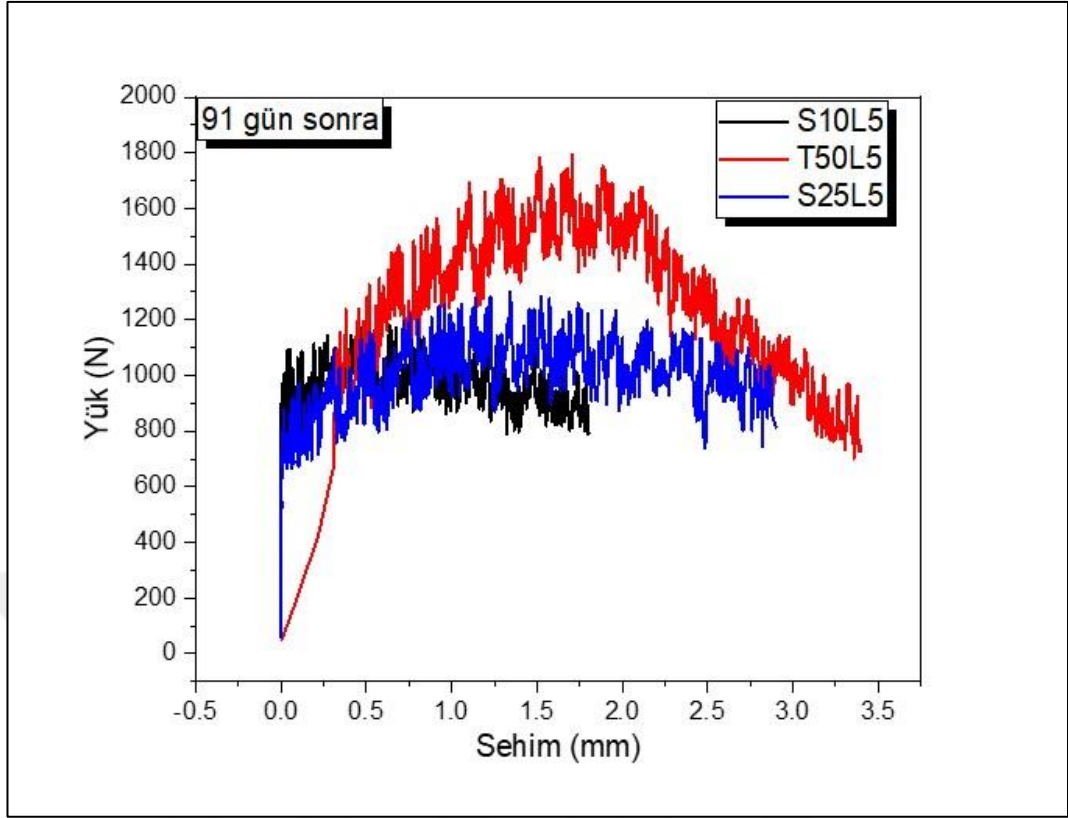
Şekil 4.18 Donma çözülme sonrası ağırlık kaybı

4.10 Yük-Sehim Eğrileri

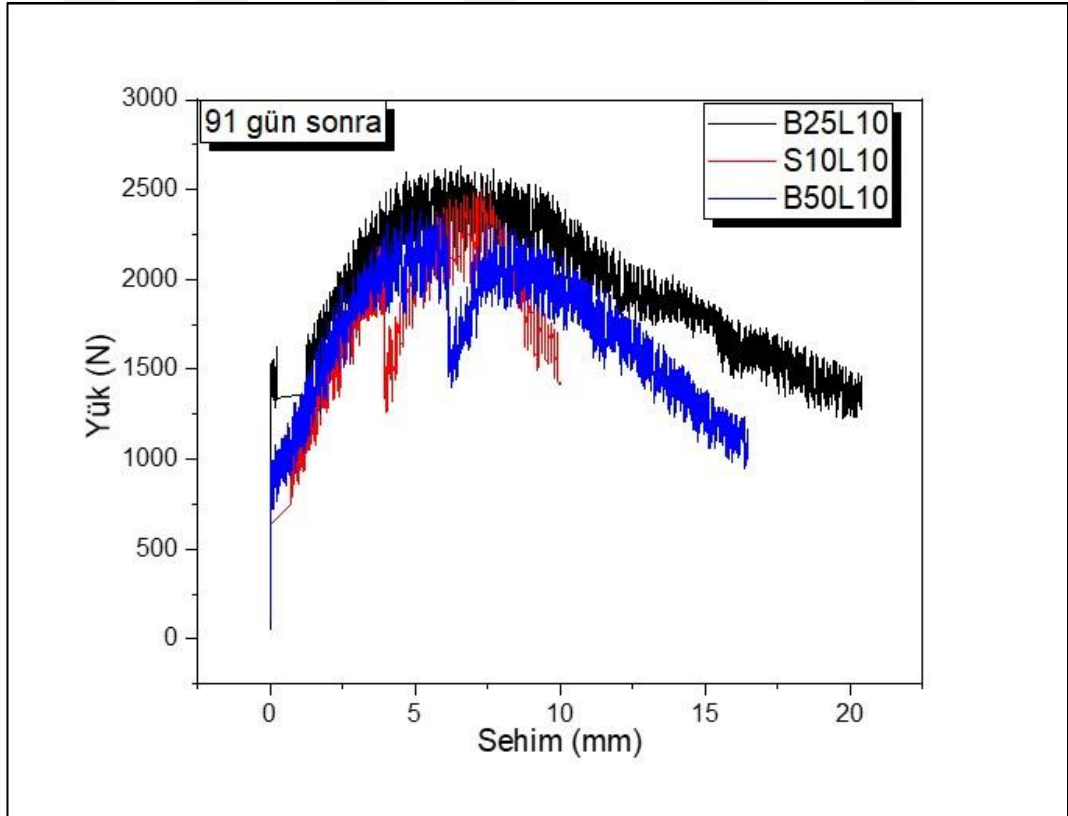
Ŗekil 4.19’da gösterildiği gibi betonun eğilme dayanımı ve tokluğu, 305 mm uzunluğunda, 60 mm genişliğinde ve 25 mm yüksekliğinde (25x60x305 mm) prizmatik numuneler kullanılarak değerlendirildi. Yük ve açıklık ortası sapma arasındaki ilişki, tepe yük başlangıç değerinden %10 düşene kadar kuruldu. Üç nokta yükleme eğilme testinde, orta açıklık sapma değerlerini değerlendirmek için komparatör kullanıldı. Numune açıklığının ortasında bulunan komparatör, doğrudan test aparatına bağlıydı ve verileri bilgisayara aktarabiliyordu. Üç noktalı eğilme testi, yükleme hızını 0,1 mm/dk olarak belirledi. Ŗekil 4.20’de gösterildiği gibi, lif içeriğinin etkisi ve geri dnştrlmş kumların türü, tek bileşenli alkali ile etkinleştirilen SIFCON uçucu kül/cüruf bazlı kompozitlerin 91 gün sonra eğilme davranışını önemli ölçüde etkiler. Ŗekil 4.20, UK içermeyen SIFCON karışımlarının yk-sapma eğrilerini göstermektedir. Karışımların davranışı, lif içeriklerindeki değişikliklerden önemli ölçüde etkilenmiştir. İlk çatlamadan sonra, tüm SIFCON serileri, daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi ile sonuçlanan bir sapma-sertleşme tepkisi sergiledi. Lif hacmindeki artış, SIFCON karışımlarının nihai sapma değerlerini ve yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Artan elik lif içeriği ile hem eğrilerin altındaki alan hem de tepe yükü artar, bu da çatlaktaki yükü destekleyen daha fazla lifin bir sonucudur.



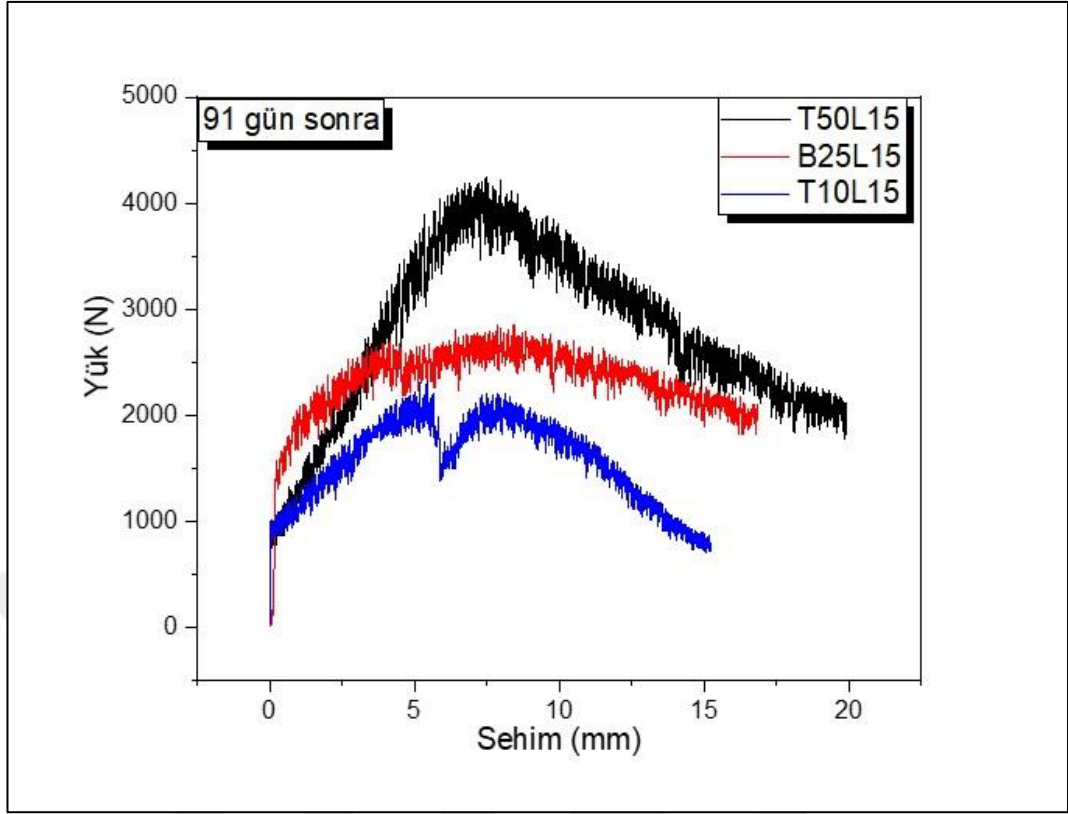
Ŗekil 4.19 Yük-sehim eğrilerinin elde edilmesi



a)



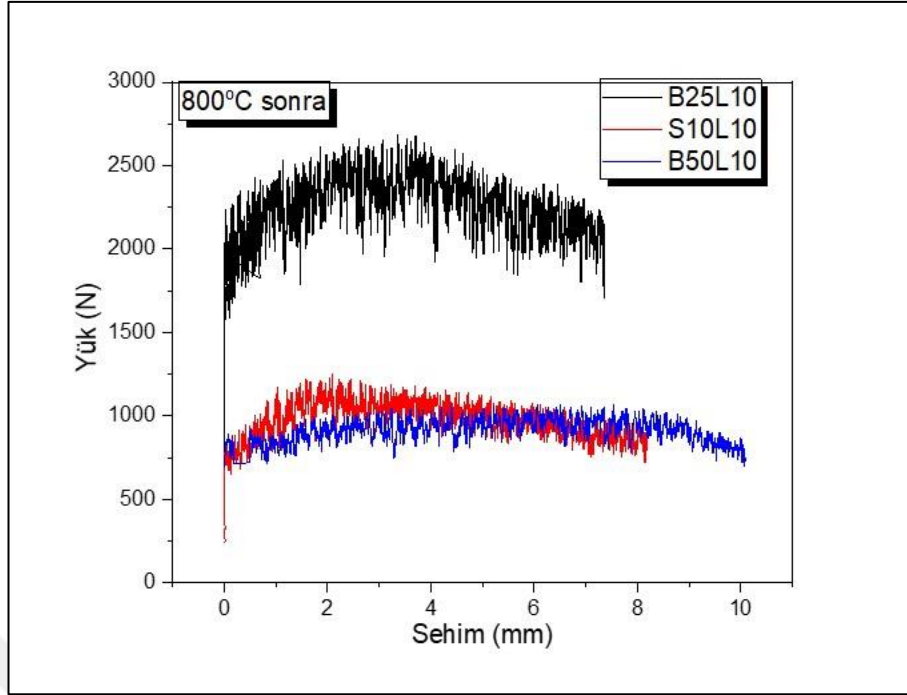
b)



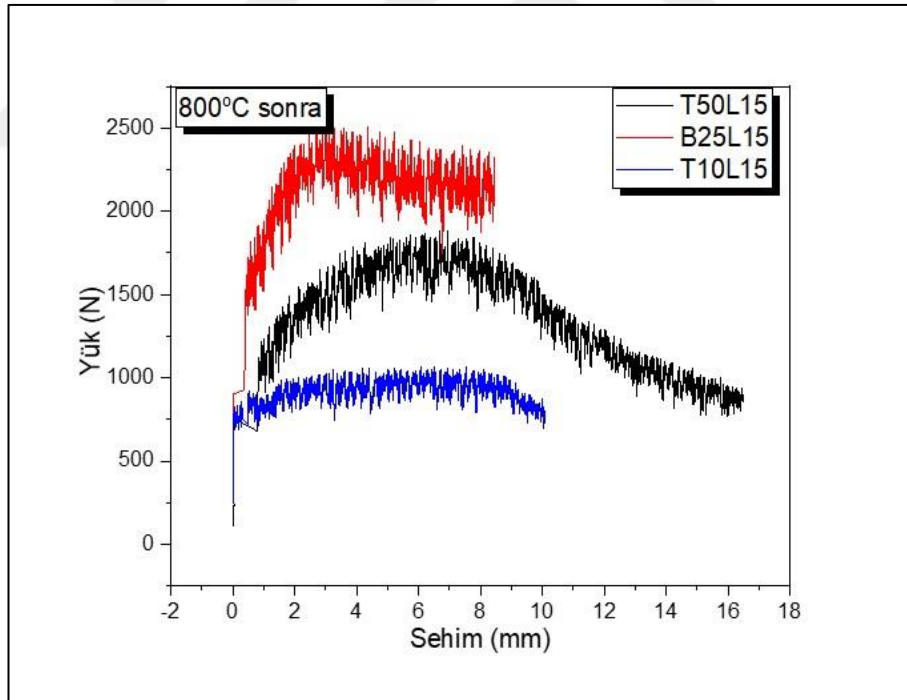
c)

Şekil 4.20 UK içermeyen karışımların 91 gün sonra yük-sehim eğrileri

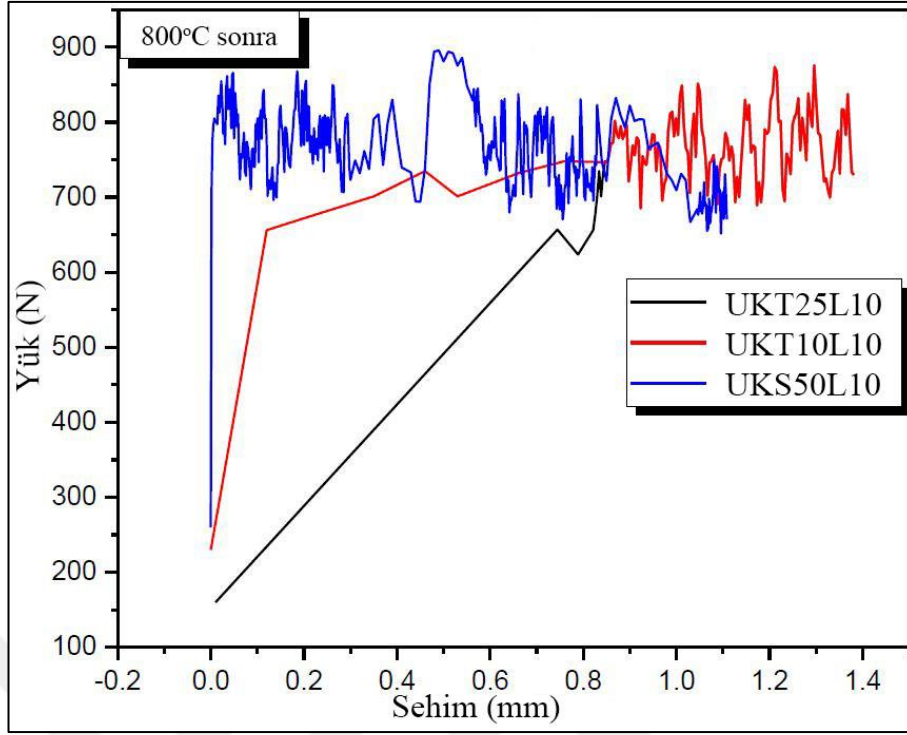
Şekil 4.21'e göre, 800°C'den sonra, tek parçalı alkali ile aktive edilmiş SIFCON UK/YFC kompozitlerinin eğilme davranışı, lif oranından ve kullanılan geri dönüştürülmüş kum türünden büyük ölçüde etkilenir. UK içeren ve içermeyen SIFCON karışımlarının yük sapma eğrileri Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Şekil 4.21a, 800°C'ye maruz kalan %10 lif hacimli karışımları göstermektedir, görüldüğü gibi, B25L10 karışımı karışımlardan daha yüksek tepe yükü sergilemiştir. %10 ASK ve %50 ABK ile, bu ise daha yüksek orta açıklık sapması gösterir. Şekil 4.21b, 800°C'ye maruz kalan %15 lif hacmine sahip karışımları göstermektedir, görüldüğü gibi, yine B25L15 karışımı, %50 ATK ve %10 ATK içeren karışımlara göre daha yüksek tepe yükü, ancak daha az sapma sergilemiştir. daha yüksek orta açıklık sapması. Şekil 4.21c ve d, 800°C'ye maruz kalan %10 ve %15 lif hacimlerine sahip UK katkılı karışımları verir. %100 cüruf içeren SIFCON karışımlarına kıyasla daha düşük tepe yükleri ve sapma değerleri. Beklendiği gibi, %15 lif hacimli karışımlar, %10 lif hacimli karışımlara göre daha yüksek pik yük ve sapma değerleri göstermiştir. Geri dönüştürülmüş kumların, UK katkılı karışımlar için yük sapma eğrileri üzerindeki etkisi, cüruf katkılı karışımlar için gösterildiği gibi büyük bir fark göstermedi.



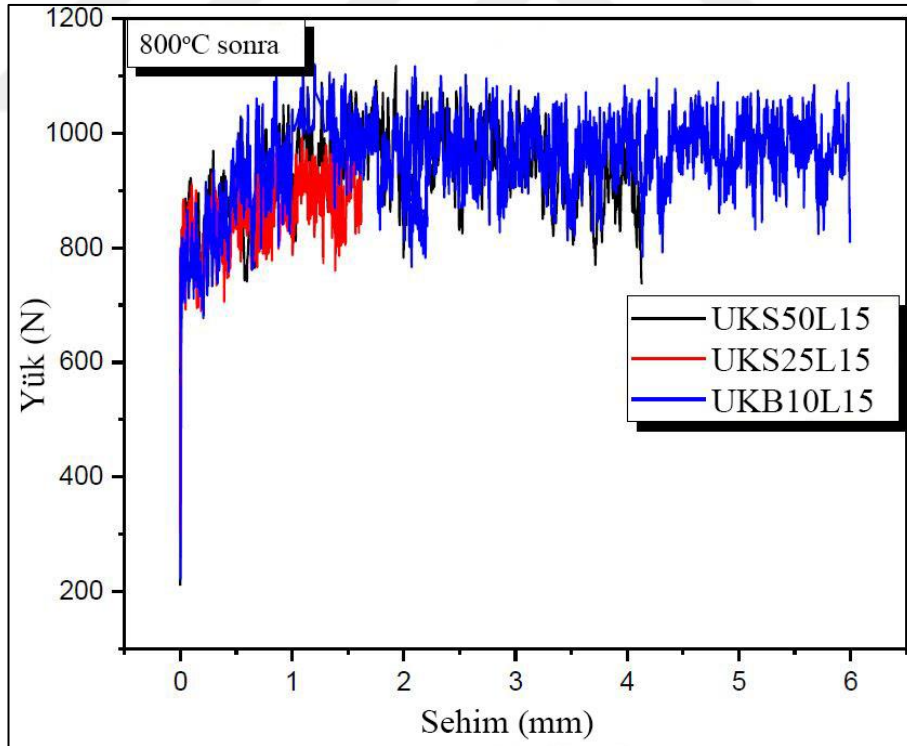
a)



b)



c)



d)

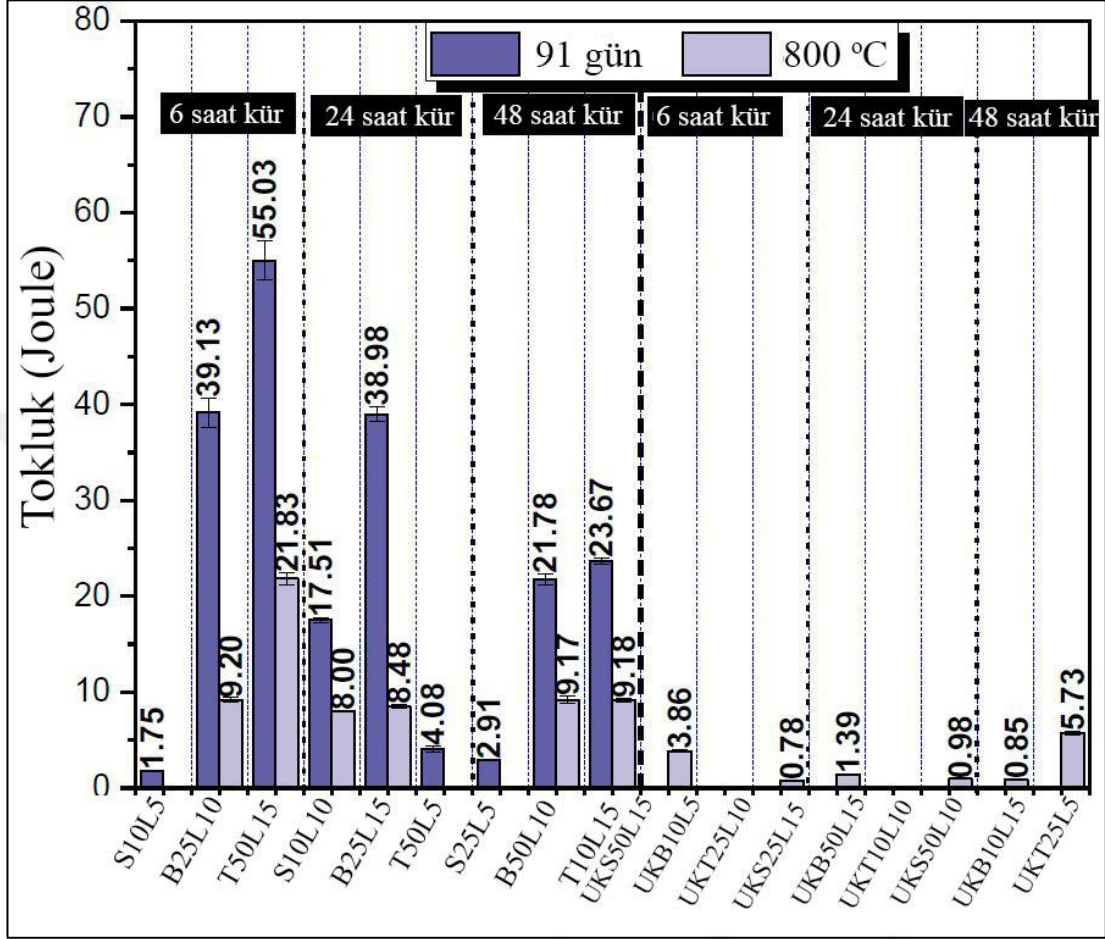
Şekil 4.21 a, b, c, d) Karışımların 800 °C sonrası yük-sehim eğrileri

4.10.1 Tokluk

Deprem, darbe ve patlama gibi dinamik yüklere maruz kalan yapılarda riskleri azaltmak için yüksek enerji emici malzemelere acilen ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, potansiyel kompozitlerin enerji emme kapasitesinin ölçülmesi, bu uygulamalar için değerli bilgiler sunar. Şekil 4.22, 91 gün ve 800°C'den sonra lif hacimlerinin SIFCON karışımlarının enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisini göstermek için tokluk değerlerini kullanır. Şekil 4.20 ve 4.21'deki yük sapma eğrilerinin altındaki bölgeler bu değerlerle temsil edilmektedir. Enerji emme kapasitesinin, lif yerleştirmenin gerçek ve en önemli sonucu olduğu bulunmuştur (Aydın ve Baradan, 2013; Joo Kim vd., 2008). %5 lif hacmine sahip SIFCON karışımları ile %10 ve %15 lif katkılı karışımlar karşılaştırıldığında, tokluğun önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Tokluktaki bu dikkate değer gelişme, çelik liflerin hem 91 gün hem de 800°C'den sonra hem makro hem de mikro ölçekteki çatlakları durdurma kapasitesinden kaynaklanıyor olabilir. Lifler, mikro düzeyde çatlakların başlamasını engellerken, makro düzeyde gerilimleri etkili bir şekilde köprüler. Artan tokluk ve süneklik bu davranıştan kaynaklanır (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007; Bayraktar vd., 2022; Kaplan vd., 2021; Karatas, vd., 2019; Koksall vd., 2021; Bayraktar vd., 2021). Isıl kür süresinin UK içermeyen karışımların tokluğuna etkisi değerlendirildiğinde, 6 saat ısıl kür uygulanan karışımlar, 91 gün sonra 24 ve 48 saat ısıl kür uygulanan karışımlara göre daha yüksek tokluk sergilemiştir. Bu sonuç, çelik liflerin matrise daha yüksek yapışmasının 6 saatlik kürlenme süresinde daha fazla eğilme tokluğuna yol açmasından kaynaklanmaktadır. En yüksek eğilme tokluğu, 6 saat boyunca ısıyla kürlenmiş T50L15 karışımı için de değerlendirildi. 800°C'den sonraki tokluk değerlerinde de benzer sonuçlar gözlemlendi ancak 48 saat ısıl kürlenmiş karışımlar, 24 saat ısıl kürlenmiş karışımlara göre daha iyi performans gösterdi.

Isıl kür süresinin UK içeren karışımların tokluğuna etkisi değerlendirildiğinde 91 günden sonra tüm ısıl kür sürelerinde tokluk sonuçları elde edilememiştir. Sadece %10 ve %15 lif hacimli karışımlar, 800°C'den sonra 48 saat ısıl kürüne maruz bırakılan %15 lif hacimli karışım için en yüksek tokluk değerlerine sahipti. Liflerin güçlendirici etkisi, SIFCON kompozitlerinin yaklaşık 800°C'de ısıl işleminden sonra büyük ölçüde bozulur. Bu, şiddetli lif bozulmasının ve son derece güçlü lif/matris arayüz bağının bir

sonucu olarak gerçekleşir. Bu nedenle SIFCON kompoziti, önemli ölçüde azaltılmış mekanik özellikler ve çok kırılğan bir şekilde kırılmalar sergiler (Celik vd., 2018).



Şekil 4.22 SIFCON karışımlarının 91 gün ve 800°C sonrasında eğilme tokluğu

4.11 Taguchi Optimizasyonu

Karışımlarda %50 UK kullanıldığında eğilme tokluğu elde edilemediği için optimizasyonda 91 günlük eğilme dayanımları kullanılmıştır. Eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu arasında güçlü bir korelasyon olduğundan, optimum parametreleri belirlemek için 91 günlük eğilme dayanımı maksimize etme fonksiyonuna göre tasarlanmıştır. Taguchi optimizasyonu sonucunda elde edilen ANOVA analizi ve etki değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. ANOVA analizine göre sadece UK ve çelik lif miktarının eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Kür süresi ve atık agrega özelliklerindeki değişimler eğilme dayanımını fazla etkilememiştir. UK oranındaki değişim eğilme dayanımını %82,9; çelik lif oranındaki değişimi ise %12,2

oranında etkilemektedir. UK oranındaki bir artış eğilme dayanımını önemli ölçüde azaltırken, daha büyük bir çelik lif oranı bükülme dayanımını artırır. Atık agregası oranı ve kürlenme süresinin eğilme dayanımı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır.

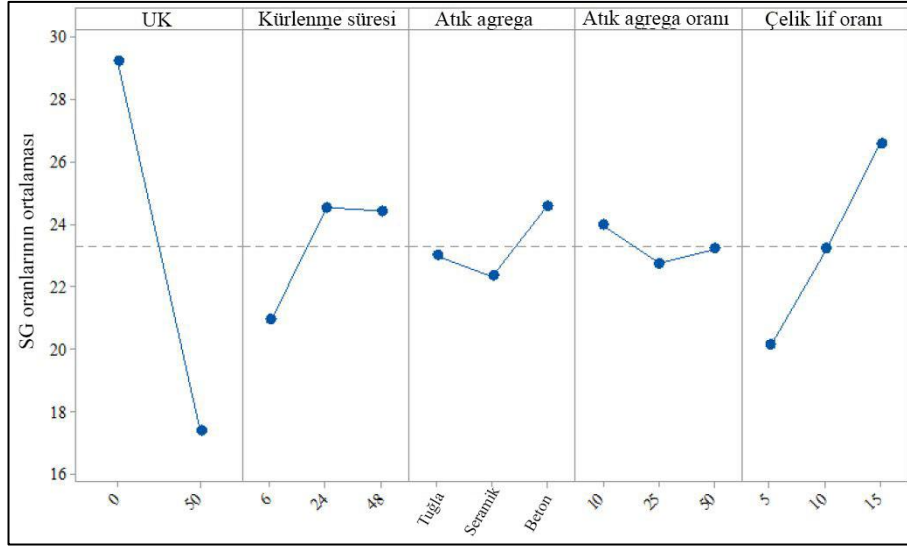
Tablo 4.1 ANOVA analizi ve etki değerleri

Kaynak	DF	Adj SK	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri	Etki (%)
UK	1	2168,99	2168,99	57,41	0,000	82,9
Kür süresi	2	0,52	0,26	0,01	0,993	0,0
Atık agregası	2	244,37	122,18	3,23	0,093	4,7
Atık agregası oranı	2	9,07	4,53	0,12	0,889	0,2
Çelik lif oranı	2	637,77	318,89	8,44	0,011	12,2
Hata	8	302,25	37,78			
Toplam	17	3362,97				

Tablo 4.2'de optimum tasarımın sinyal-gürültü (S/G) oranları verilmiştir. "Daha büyük daha iyidir" temel ilkesine göre S/G oranı en yüksek olan karışım en iyi tasarım olarak kabul edildi. Bu kapsamda UK oranı %0, kür süresi 24 saat, atık agregalı tip beton, atık agregası oranı %10 ve çelik lif içeriği %15 olarak belirlenmiştir. Ayrıca faktörlerin S/G oranları ve seviyeleri Şekil 4.23'te verilmiştir.

Tablo 4.2 Faktörlerin S/G oranları ve seviyeleri

Level	UK	Kür süresi	Atık agregası	Atık agregası oranı	Çelik lif oranı
1	29,24	20,95	23,01	23,97	20,12
2	17,39	24,56	22,35	22,75	23,21
3		24,44	24,58	23,23	26,61
Delta	11,85	3,61	2,23	1,21	6,49
Sıra	1	3	4	5	2



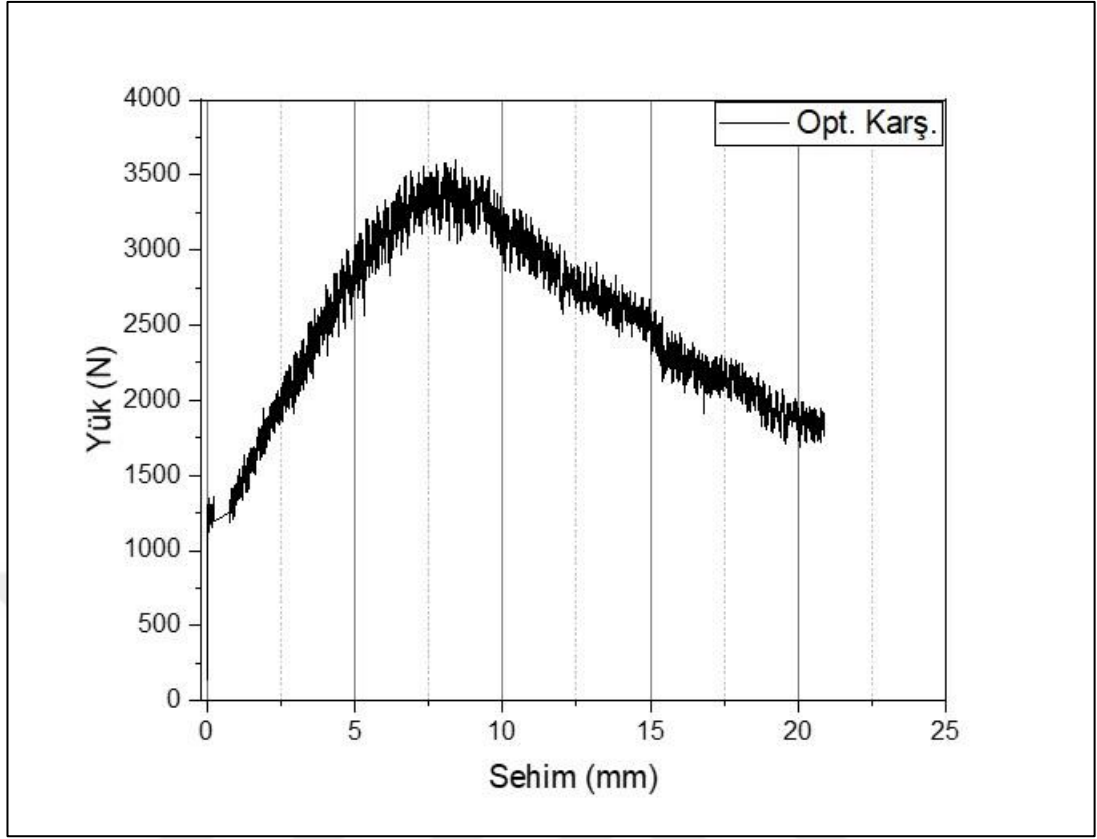
Şekil 4.23 Eğilme dayanımının S/G oranı (91 gün)

4.11.1 Optimum SIFCON'un Doğrulanması

Deney ve simülasyon sonuçlarının bir karşılaştırması Tablo 4.3'de verilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar sadece basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk açısından karşılaştırılmıştır. Belirtilen testlerin tümü 91. günde gerçekleştirilmiştir. Tablo, deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın %5'ten az olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Taguchi tasarımı ile atık agregaları kullanarak yüksek eğilme tokluğuna sahip geopolimer üretmek mümkündür. Ayrıca, Şekil 4.24'te gösterildiği gibi, atık agregası oranı artırılabilirse eğilme tokluğu biraz azalır. Şekil 4.24, optimum karışımın yük-sapma eğrisini göstermektedir. Optimum karışım için pik yük yaklaşık 3200 N'dir ve pik yükte karşılık gelen orta açıklık sapma değeri yaklaşık 10 mm'dir.

Tablo 4.3 Deney ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Sonuçlar	Basınç dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme tokluğu (Joule)
Simülasyon	73,1	42,4	51,1
Deneysel	77,9	45,2	52,9
Fark (%)	6,5	6,6	3,5



Şekil 4.24 Optimum karışımın yük-sehim eğrisi

5. SONUÇLAR

Bu deneysel araştırmada, ısıyla sertleşme süresinin ve lif hacminin, sürdürülebilir cüruf/uçucu kül tek bileşenli SIFCON'un eğilme tokluğu, dayanıklılığı ve mikro yapısı üzerindeki etkileri, çeşitli geri dönüştürölmüş kumlarla incelenmiştir. Cüruf/uçucu kül tek bileşenli SIFCON karışımlarının eğilme tokluğu, dayanıklılığı ve mikro yapısı çeşitli deneysel prosedürlerle incelenmiştir. Mevcut deneysel bulgular aşğıdaki sonuçları desteklemektedir:

- UK içermeyen SIFCON karışımları için yayılma değerleri 160 mm ile 215 mm arasındadır. YFC'nin %50 UK ile değıştirilmesi yayılma değerlerini önemli ölçüde artırdı ve 215 mm'den 260 mm'ye çıktı.
- 24 saat ısı kürüne tabi tutulduktan sonra T50L5 (%50 ATK ve %5 lif hacmi) karışımı için en yüksek olarak 62,38 MPa'lık 3 günlük basınç dayanımı elde edildi. 24 saat ısıyla sertleşen B25L15 karışımı, tüm karışımlar arasında sırasıyla 7, 28 ve 91 günde sırasıyla 68,49 MPa, 74,53 MPa ve 79,93 MPa ile en yüksek basınç dayanımlarına sahipti.
- Dayanımda kayda değer bir düşüş, YFC yerine %50 uçucu külün dahil edilmesinden kaynaklanacaktır. UK içeren SIFCON karışımları, 3 günde 2,84 ila 8,05 MPa, 7 günde 3,95 ila 12,90 MPa, 28 günde 4,08 ila 13,78 MPa ve 90 günde 4,61 ila 20,65 MPa arasında değışen basınç dayanımlarına sahipti. UK'nın basınç dayanımı, termal kür süresindeki artışla artan SIFCON karışımlarını içeriyordu.
- UK içermeyen SIFCON karışımlarının eğilme dayanımı 3 gün sonra 9,87 ila 30,75 MPa, 7 gün sonra 11,21 ila 34,83 MPa, 28 gün sonra 13,88 ila 40,78 MPa ve 90 gün sonra 16,78 ila 44,89 MPa arasında değışmiştir.
- 7; 28 ve 91 günlük periyotlarda 24 saat ısı kürüne maruz bırakılan T50L5 (%50 ATK ve %5 lif hacmi) karışımı ve 6 saat ısı kürüne maruz bırakılan T50L15 (%50 ATK ve %15 lif hacmi) karışımı kürlenmede en düşük ve en yüksek eğilme dayanımını sergiledi.

- UKB10L15 karışımı, 48 saat ısıl kürlemeye tabi tutuldu ve termal kürlenme süresinin kayda değer etkisini kanıtlayan kürleme için 3, 7, 28 ve 91 günlük tüm yaşlarda en iyi eğilme dayanımını sergiledi.
- 6 saat termal kürlemeye maruz bırakılan S10L5 karışımı en düşük gözenekliliğe sahipti ve 48 saat termal kürlemeye maruz bırakılan S25L5 karışımı en yüksek gözenekliliği sergiledi.
- 6 saatlik termal kürleme altındaki UKB10L5 karışımı en düşük gözenekliliğe sahipken, 6 saatlik termal kürlemeye tabi tutulan UKT25L10 karışımı en yüksek gözenekliliği sergiledi.
- Sonuçlar ayrıca, %100 YFC ve %50 UK içeren karışımların 6 saat süreyle ısıyla sertleştirildiğini, yüksek sıcaklık ve D-Ç döngülerine karşı en iyi basınç dayanımı direncini gösterdiğini gösterdi.
- En yüksek eğilme tokluğu, 6 saat boyunca ısıyla kürlenmiş T50L15 karışımı için değerlendirildi.

KAYNAKLAR

- Abdalqader, A. F., Jin, F., ve Al-Tabbaa, A. (2016). Development of greener alkali-activated cement: Utilisation of sodium carbonate for activating slag and fly ash mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 113, 66-75.
- Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Falah, M., Luukkonen, T., Mazari, M., ve Illikainen, M. (2019). Construction and demolition waste as recycled aggregates in alkali-activated concretes. *Materials*, 12(23), 4016.
- Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Falah, M., Shaad, K. M., Luukkonen, T., ve Illikainen, M. (2021). Durability of the reinforced one-part alkali-activated slag mortars with different lifs. *Waste and Biomass Valorization*, 12(1), 487-501.
- Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Woof, B., ve Illikainen, M. (2020). High strength lif reinforced one-part alkali activated slag/fly ash binders with ceramic aggregates: Microscopic analysis, mechanical properties, drying shrinkage, and freeze-thaw resistance. *Construction and building materials*, 241, 118129.
- Ali, M. H., Atiş, C. D., ve Al-Kamaki, Y. S. S. (2022). Mechanical properties and efficiency of SIFCON samples at elevated temperature cured with standard and accelerated method. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01281.
- Ariffin, M. A., Hussin, M. W., Samadi, M., Lim, N. H. A. S., Mirza, J., Awalluddin, D., ve Othman, N. (2015). Effect of ceramic aggregate on high strength multi blended ash geopolymer mortar. *Jurnal Teknologi*, 77(16).
- Aydın, S., ve Baradan, B. (2013). The effect of lif properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 63-69.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670.
- Balaji, S., ve Thirugnanam, G. S. (2018). Behaviour of reinforced concrete beams with SIFCON at various locations in the beam. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(1), 161-166.
- Banthia, N., ve Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel lif reinforced concrete through lif hybridization. *Cement and concrete research*, 37(9), 1366-1372.
- Baradan, B., Yazici, H., ve Aydın, S. (2015). Beton (ikinci baskı). *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, Türkiye*.
- Bayraktar, O. Y., Yazar, G., Benli, A., Kaplan, G., Gencel, O., Sutcu, M., Kozłowski, M., ve Kadela, M. (2022). Basalt lif reinforced foam concrete with marble waste and calcium aluminate cement. *Structural Concrete*.

- Beglarigale, A., Yalçinkaya, Ç., Yiğiter, H., ve Yazıcı, H. (2016). Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature. *Construction and Building Materials*, 104, 99-108.
- BIA. (2006). Manufacturing of brick, Technical Notes on Brick Construction. İçinde *Brick Industry Association* (ss. 1-7). Reston Virginia.
- Binici, H. (2007). Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and building materials*, 21(6), 1191-1197.
- Burciaga-Díaz, O., ve Escalante-García, J. I. (2017). Comparative performance of alkali activated slag/metakaolin cement pastes exposed to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 84, 157-166.
- Cai, R., Tian, Z., ve Ye, H. (2022). Durability characteristics and quantification of ultra-high strength alkali-activated concrete. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104743.
- Cai, R., ve Ye, H. (2021). Clinkerless ultra-high strength concrete based on alkali-activated slag at high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 145, 106465.
- Canbay, M. (2014). *Çelik ve polipropilen liflerin yalın ve kombinasyonlu olarak SIFCON'da kullanılması*.
- Canbaz, M., ve Ünüvar, C. (2016). *Effect of lif and cement type on sifcon properties*.
- Celik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M. M., Aygörmmez, Y., ve Uysal, M. (2018). High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic lifs. *Construction and Building Materials*, 187, 1190-1203.
- Chau-Khun, M., Zawawi, A. A., ve Wahid, O. (2018). *Structural and material performance of geopolymer concrete 2018*. Elsevier.
- Cheah, C. B., Samsudin, M. H., Ramli, M., Part, W. K., ve Tan, L. E. (2017). The use of high calcium wood ash in the preparation of Ground Granulated Blast Furnace Slag and Pulverized Fly Ash geopolymers: A complete microstructural and mechanical characterization. *Journal of Cleaner Production*, 156, 114-123.
- Cheng, H. (2016). Reuse research progress on waste clay brick. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 218-226.
- Collins, F. G., ve Sanjayan, J. G. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and concrete research*, 29(3), 455-458.
- Correia, J. R., de Brito, J., ve Pereira, A. S. (2006). Effects on concrete durability of using recycled ceramic aggregates. *Materials and structures*, 39(2), 169-177.
- Çelik, Ö. (2004). *Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi*.

- De Weerdt, K. (2011). Geopolymers—State of the art. Oslo: SINTEF Building and Infrastructure, Consortium Concrete Innovation Centre.
- Demirel, C., ve Şimşek, O. (2014). C30 Sınıfı Atık Betonun Geridönüşüm Agregası Olarak Beton Üretiminde Kullanılabilirliği. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2(2), 45-54.
- Dias, D. P., ve Thaumaturgo, C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt lifs. *Cement and concrete composites*, 27(1), 49-54.
- Ding, Y., Dai, J.-G., ve Shi, C.-J. (2016). Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 127, 68-79.
- Dogan, E. (1998). *Retrofit of nonductile reinforced concrete frames using high performance lif-reinforced composites*. North Carolina State University.
- Dombrowski, K., Buchwald, A., ve Weil, M. (2007). The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3033-3043.
- Duxson, P., Lukey, G. C., ve van Deventer, J. S. (2006). Evolution of gel structure during thermal processing of Na-geopolymer gels. *Langmuir*, 22(21), 8750-8757.
- Duxson, P., Lukey, G. C., ve van Deventer, J. S. (2007). Physical evolution of Na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 C. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3044-3054.
- Erdoğan, T. Y. (2004). Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri. *Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul*, 975-92122.
- Ganesh, A. C., ve Muthukannan, M. (2018). A review of recent developments in geopolymer concrete. *International Journal of Engineering ve Technology*, 7(4.5), 696-699.
- Ganesh, A. C., Muthukannan, M., Aakassh, S., ve Subramanaian, B. (2020). Energy efficient production of geopolymer bricks using industrial waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872(1), 012154.
- Gao, J., Sun, W., ve Morino, K. (1997). Mechanical properties of steel lif-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 19(4), 307-313.
- Guerrieri, M., ve Sanjayan, J. G. (2010). Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures. *Fire and Materials: An International Journal*, 34(4), 163-175.
- Güngör, E. (2013). *Karma lifli betonların özelliklerinin deneysel irdelenmesi* [Master's Thesis]. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Halicka, A., Ogrodnik, P., ve Zegardlo, B. (2013). Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 48, 295-305.
- Hashim, A. M., ve Kadhum, M. M. (2020). Compressive strength and elastic modulus of slurry infiltrated lif concrete (SIFCON) at high temperature. *Civil Engineering Journal*, 6(2), 265-275.
- Hashim, A. M., ve Kadhum, M. M. (2021). Numerical and experimental study of postfire behavior of concentrically loaded SIFCON columns. *ACI Structural Journal*, 118(1), 73-86.
- He, P., Jia, D., Lin, T., Wang, M., ve Zhou, Y. (2010). Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon lif reinforced geopolymer composites. *Ceramics International*, 36(4), 1447-1453.
- Hu, X., Shi, C., Shi, Z., ve Zhang, L. (2019). Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103392.
- Huang, L., Liu, J.-C., Cai, R., ve Ye, H. (2021). Mechanical degradation of ultra-high strength alkali-activated concrete subjected to repeated loading and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104083.
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Shah, K. W., Mirza, J., ve Tahir, M. M. (2019). Evaluation of alkali-activated mortars containing high volume waste ceramic powder and fly ash replacing GBFS. *Construction and Building Materials*, 210, 78-92.
- Hwang, C.-L., Yehualaw, M. D., Vo, D.-H., Huynh, T.-P., ve Largo, A. (2019). Performance evaluation of alkali activated mortar containing high volume of waste brick powder blended with ground granulated blast furnace slag cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 223, 657-667.
- Ipek, M., ve Aksu, M. (2019). The effect of different types of lif on flexure strength and fracture toughness in SIFCON. *Construction and Building Materials*, 214, 207-218.
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., ve van Deventer, J. S. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135.
- İpek, S. (2022). Macro and micro characteristics of eco-friendly fly ash-based geopolymer composites made of different types of recycled sand. *Journal of Building Engineering*, 52, 104431.
- Jambhulkar, H. P., Shaikh, S. M. S., ve Kumar, M. S. (2018). Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review. *Chemosphere*, 213, 333-344.

- Joo Kim, D., Naaman, A. E., ve El-Tawil, S. (2008). Comparative flexural behavior of four lif reinforced cementitious composites. *Cement and concrete Composites*, 30(10), 917-928.
- Joseph, B., ve Mathew, G. (2012). Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Scientia Iranica*, 19(5), 1188-1194.
- Kalınçimen, G., Öztürk, A., Kaplan, G., ve Yıldız, S. (2015). Seramik atıklarının çimento ikame malzemesi olarak kullanılması ve asit dayanıklılığının incelenmesi. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, 1(1), 9-16.
- Kaplan, G., Coskan, U., Benli, A., Bayraktar, O. Y., ve Kucukbaltacı, A. B. (2021). The impact of natural and calcined zeolites on the mechanical and durability characteristics of glass lif reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 311, 125336.
- Karatas, M., Dener, M., Benli, A., ve Mohabbi, M. (2019). High temperature effect on the mechanical behavior of steel lif reinforced self-compacting concrete containing ground pumice powder. *Structural Concrete*, 20(5), 1734-1749.
- Karatas, M., Dener, M., Mohabbi, M., ve Benli, A. (2019). A study on the compressive strength and microstructure characteristic of alkali-activated metakaolin cement. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24.
- Kaya, M. (2016). *Farklı tür uçucu küller kullanılarak üretilen alkali aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi*.
- Keshavarz, Z., ve Mostofinejad, D. (2019). Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 218-230.
- Khamees, S. S., Kadhum, M. M., ve Nameer, A. A. (2020). Effects of steel lifs geometry on the mechanical properties of SIFCON concrete. *Civil Engineering Journal*, 6(1), 21-33.
- Koksal, F., Bayraktar, O. Y., Bodur, B., Benli, A., ve Kaplan, G. (2022). Insulating and fire-resistant performance of slag and brick powder based one-part alkali-activated lightweight mortars. *Structural Concrete*.
- Koksal, F., Kocabeyoglu, E. T., Gencel, O., ve Benli, A. (2021). The effects of high temperature and cooling regimes on the mechanical and durability properties of basalt lif reinforced mortars with silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104107.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., ve Sagoe-Crentsil, K. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and concrete research*, 37(12), 1583-1589.
- Kouamo, H. T., Elimbi, A., Mbey, J. A., Sabouang, C. N., ve Njopwouo, D. (2012). The effect of adding alumina-oxide to metakaolin and volcanic ash on

- geopolymer products: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 35, 960-969.
- Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., ve Palomo, A. (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development–Part II. *Fuel*, 86(3), 315-322.
- Kumar, S., ve Kumar, R. (2011). Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. *Ceramics International*, 37(2), 533-541.
- Kuri, J. C., Khan, M. N. N., ve Sarker, P. K. (2021). Fresh and hardened properties of geopolymer binder using ground high magnesium ferronickel slag with fly ash. *Construction and Building Materials*, 272, 121877.
- Lankard, D. R., ve Newell, J. K. (1984). Preparation of highly reinforced steel lif reinforced concrete composites. *Special Publication*, 81, 287-306.
- Lee, N. K., Koh, K. T., An, G. H., ve Ryu, G. S. (2017). Influence of binder composition on the gel structure in alkali activated fly ash/slag pastes exposed to elevated temperatures. *Ceramics International*, 43(2), 2471-2480.
- Letelier, V., Ortega, J. M., Muñoz, P., Tarela, E., ve Moriconi, G. (2018). Influence of waste brick powder in the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Sustainability*, 10(4), 1037.
- Li, C., Sun, H., ve Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. *Cement and concrete research*, 40(9), 1341-1349.
- Li, Z., Ding, Z., ve Zhang, Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials. *Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China*, 55-76.
- Luhar, S., Luhar, I., ve Gupta, R. (2020). Durability performance evaluation of green geopolymer concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-49.
- Luo, Y., Klima, K. M., Brouwers, H. J. H., ve Yu, Q. (2022). Effects of ladle slag on Class F fly ash geopolymer: Reaction mechanism and high temperature behavior. *Cement and Concrete Composites*, 129, 104468.
- Luo, Y., Li, S. H., Klima, K. M., Brouwers, H. J. H., ve Yu, Q. (2022). Degradation mechanism of hybrid fly ash/slag based geopolymers exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 151, 106649.
- Ma, Y., Liu, W., Hu, J., Fu, J., Zhang, Z., ve Wang, H. (2020). Optimization on the piezoresistivity of alkali-activated fly ash/slag mortar by using conductive aggregates and carbon lifs. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103735.

- Marjanović, N., Komljenović, M., Baščarević, Z., Nikolić, V., ve Petrović, R. (2015). Physical–mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends. *Ceramics International*, 41(1), 1421-1435.
- Medina, C., De Rojas, M. S., ve Frías, M. (2012). Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and concrete composites*, 34(1), 48-54.
- Mehta, P. K. (2002). Greening of the concrete industry for sustainable development. *Concrete international*, 24(7), 23-28.
- Meng, Z., Li, L., Farooqi, M. U., Feng, L., ve Wang, L. (2022). Lif factor for fresh and hardened properties of polyethylene lif-reinforced geopolymer mortar. *Journal of Building Engineering*, 53, 104556.
- Mermerdaş, K., İpek, S., ve Mahmood, Z. (2021). Visual inspection and mechanical testing of fly ash-based fibrous geopolymer composites under freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 283, 122756.
- Min, Y., Wu, J., Li, B., Zhang, M., ve Zhang, J. (2022). Experimental study of freeze–thaw resistance of a one-part geopolymer paste. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01269.
- Mo, K. H., Ling, T.-C., Alengaram, U. J., Yap, S. P., ve Yuen, C. W. (2017). Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 139, 403-418.
- Mohamed, O. A., Al-Khattab, R., ve Al-Hawat, W. (2022). Resistance to acid degradation, sorptivity, and setting time of geopolymer mortars. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(6), 781-791.
- Naaman, A. E., ve Baccouche, M. R. (1995). Shear response of dowel reinforced SIFCON. *Structural Journal*, 92(5), 587-596.
- Naaman, A. E., Otter, D., ve Najm, H. (1992). Elastic modulus of SIFCON in tension and compression. *Materials Journal*, 88(6), 603-613.
- Naceri, A., ve Hamina, M. C. (2009). Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste management*, 29(8), 2378-2384.
- Nataraja, M. C., Dhang, N., ve Gupta, A. P. (2000). Toughness characterization of steel lif-reinforced concrete by JSCE approach. *Cement and concrete research*, 30(4), 593-597.
- Oh, J. E., Monteiro, P. J., Jun, S. S., Choi, S., ve Clark, S. M. (2010). The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 40(2), 189-196.
- Ouda, A. S. (2021). A preliminary investigation on gamma-rayattenuation of alkali-activated concrete waste based-geopolymer modified with pozzocrete-fly ash. *Progress in Nuclear Energy*, 134, 103681.

- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., ve Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and building materials*, 22(7), 1315-1322.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., ve Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, 29(8), 1323-1329.
- Pan, Z., Sanjayan, J. G., ve Rangan, B. V. (2009). An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science*, 44(7), 1873-1880.
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y. F., Wuhner, R., ve Murphy, T. (2018). Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature. *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18.
- Perez-Cortes, P., Cabrera-Luna, K., ve Escalante-Garcia, J. I. (2021). Alkali-activated limestone/metakaolin cements exposed to high temperatures: Structural changes. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104147.
- Poyraz, M., ve Yılmaz, Z. (2018). Seramik Karo Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 256-270.
- Puertas, F., Amat, T., Fernández-Jiménez, A., ve Vázquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and concrete research*, 33(12), 2031-2036.
- Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., ve Vázquez, T. (2000). Alkali-activated fly ash/slag cements: Strength behaviour and hydration products. *Cement and concrete research*, 30(10), 1625-1632.
- Rangan, B. V. (2014). Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian concrete journal*, 88(4), 41-59.
- Rashid, K., Razzaq, A., Ahmad, M., Rashid, T., ve Tariq, S. (2017). Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, 154, 829-840.
- Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R., ve Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106.
- Rovnaník, P., Bayer, P., ve Rovnaníková, P. (2013). Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 47, 1479-1487.
- Rovnaník, P., Řezník, B., ve Rovnaníková, P. (2016). Blended alkali-activated fly ash/brick powder materials. *Procedia Engineering*, 151, 108-113.
- Rovnaník, P., Rovnanikova, P., Vyšvařil, M., Grzeszczyk, S., ve Janowska-Renkas, E. (2018). Rheological properties and microstructure of binary waste red brick

- powder/metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 188, 924-933.
- Salih, S., Frayyeh, Q., ve Ali, M. (2018). Fresh and some mechanical properties of sifcon containing silica fume. *MATEC Web of Conferences*, 162, 02003.
- Sasui, S., Kim, G., Nam, J., van Riessen, A., ve Hadzima-Nyarko, M. (2021). Effects of waste glass as a sand replacement on the strength and durability of fly ash/GGBS based alkali activated mortar. *Ceramics International*, 47(15), 21175-21196.
- Senthamarai, R. M., ve Manoharan, P. D. (2005). Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and concrete composites*, 27(9-10), 910-913.
- Shaikh, F. U. A. (2013). Deflection hardening behaviour of short fibre reinforced fly ash based geopolymer composites. *Materials ve Design*, 50, 674-682.
- Siddique, S., Chaudhary, S., Shrivastava, S., ve Gupta, T. (2019). Sustainable utilisation of ceramic waste in concrete: Exposure to adverse conditions. *Journal of cleaner production*, 210, 246-255.
- Singh, B., Gupta, M., Chauhan, M., ve Bhattacharyya, S. K. (2013). Lightweight geopolymer concrete with EPS beads. *Proc., 19th CIB world Building Congress. Brisbane, Australia: Queensland Univ. of Technology*.
- Sun, Y., Liu, Z., Ghorbani, S., Ye, G., ve De Schutter, G. (2022). Fresh and hardened properties of alkali-activated slag concrete: The effect of fly ash as a supplementary precursor. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133362.
- Svermova, L., ve Bartos, P. J. M. (2002). Development of insitu SIFCON for connections in precast concrete and seismic resistant structures. *27th Conference on Our World in Concrete ve Structures*, 553-559.
- TAŞDEMİR, M. A., ve Bayramov, F. (2010). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜDERGİSİ/d*, 1(2).
- Thakur, A. K., Pappu, A., ve Thakur, V. K. (2019). Synthesis and characterization of new class of geopolymer hybrid composite materials from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 230, 11-20.
- Torkittikul, P., ve Chaipanich, A. (2010). Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *cement and concrete composites*, 32(6), 440-449.
- Tracz, T., ve Zdeb, T. (2019). Effect of hydration and carbonation progress on the porosity and permeability of cement pastes. *Materials*, 12(1), 192.
- Tüfekçi, M. M. (2011). Geri kazanılmış agregaların beton üretiminde yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması. *Graduate school of natural and applied science*.

- Van Deventer, J. S., Provis, J. L., ve Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89-104.
- Vickers, L., Van Riessen, A., ve Rickard, W. D. (2015). *Fire-resistant geopolymers: Role of fibres and fillers to enhance thermal properties*. Springer.
- Winnefeld, F., Leemann, A., Lucuk, M., Svoboda, P., ve Neuroth, M. (2010). Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials. *Construction and building materials*, 24(6), 1086-1093.
- Wu, Y.-F., Jiang, J.-F., ve Liu, K. (2010). Perforated SIFCON blocks—An extraordinarily ductile material ideal for use in compression yielding structural systems. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2454-2465.
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., ve Fang, C. (2019). Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Composites Part B: Engineering*, 164, 179-190.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., ve Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 49-54.
- Yavuz Bayraktar, O., Kaplan, G., Gencel, O., Benli, A., ve Sutcu, M. (2021). Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt lif reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials*, 288, 123128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123128>
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Aydın, S., ve Baradan, B. (2006). Autoclaved SIFCON with high volume Class C fly ash binder phase. *Cement and concrete research*, 36(3), 481-486.
- Yerlikaya, M. (2003). Çelik tel donatılı betonların deprem etkisi altında davranışları. *Kocaeli Deprem Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Sf, 302, 304.
- Yılmaz, Ş. (1992). *Seyitömer Termik Santralı atık uçucu küllerinin yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi* [PhD Thesis].
- Yip, C. K., Lukey, G. C., ve Van Deventer, J. S. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and concrete research*, 35(9), 1688-1697.
- Yuan, Y., Zhao, R., Li, R., Wang, Y., Cheng, Z., Li, F., ve Ma, Z. J. (2020). Frost resistance of lif-reinforced blended slag and Class F fly ash-based geopolymer concrete under the coupling effect of freeze-thaw cycling and axial compressive loading. *Construction and Building Materials*, 250, 118831.
- Zerfu, K., ve Ekaputri, J. J. (2016). Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. *Materials Science Forum*, 841, 162-169.

Zhang, P., Gao, Z., Wang, J., Guo, J., Hu, S., ve Ling, Y. (2020). Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122389.

