



Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer SIFCON'ların Eğilme Dayanımı ve Tokluk Özelliklerinin İncelenmesi

Adil GÜLTEKİN^{1a*}, Kambiz RAMYAR^{1b}

¹Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir/TÜRKİYE
adilgultekin05@gmail.com

Received/Geliş: 21.07.2021

Accepted/Kabul: 04.10.2021

Öz: Geopolimerler silis ve alümina bakımından zengin toz malzemelerin yüksek alkaliniteye sahip çözeltilerle birlikte kullanılması ile üretilen çevre dostu yapı malzemeleridir. Farklı uygulamalar için geliştirilen kompozit malzemelerin çekme dayanımları ve enerji yutma kapasitelerini arttırmak için sürekli veya süreksiz liflerle matris fazının takviye edilmesi uzun yıllardır uygulanmaktadır. SIFCON kompozitler de bunlardan biri olup liflerin kalıba yerleştirilmesi ve devamında çok akıcı matris fazının lifler arasındaki boşluğu doldurması yöntemi ile üretilmektedir. Ancak geopolimer matrisin, SIFCON üretiminde kullanımı hakkında araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada hacimce %5 çelik lif içeren uçucu kül tabanlı geopolimer SIFCON kompozitler üretilmiş ve bunların eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve tokluk özellikleri hem yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış, hem de 900°C etkisine maruz bırakılmış numuneler üzerinde incelenmiştir. Ayrıca, geopolimer SIFCON ile benzer eğilme dayanımına sahip çimento tabanlı geleneksel SIFCON kompozitler kıyaslama amacı ile kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda uçucu kül tabanlı geopolimer SIFCON'ların yüksek sıcaklık etkisi sonrasında çimento tabanlı SIFCON'lardan daha yüksek eğilme dayanımı ve tokluk değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca benzer eğilme dayanımlarında, geopolimer SIFCON'ların daha yüksek basınç dayanımına ulaştıkları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer; SIFCON; tokluk; yüksek sıcaklık.

Investigation of Flexural Strength and Toughness of Fly Ash Based Geopolymer SIFCON

Abstract: Geopolymers are environmentally friendly construction materials produced by the use of silica and alumina-rich powder materials with high alkaline solutions. Reinforcing the matrix phase with continuous or discontinuous fibers has been applied for many years to increase the tensile strength and energy absorption capacity of composite materials developed for different applications. SIFCON composites are one of them, and they are produced by placing the fibers in the mold and then filling the mold with very fluid matrix phase. However, there is a need for research on the use of geopolymer matrix in SIFCON production. In this study, fly ash-based geopolymer SIFCON composites containing 5% by volume steel fibers were produced and their flexural strength, compressive strength and toughness properties were investigated on both samples that were not exposed to high temperature and exposed to 900°C. In addition, cement-based conventional SIFCON composites with similar flexural strengths with the geopolymer SIFCON were used for comparison. It was determined that the fly ash-based geopolymer SIFCON had higher flexural strength and toughness values than that of the cement-based SIFCON after exposing to high temperature. In addition, for a given flexural strength, geopolymer SIFCON showed a higher compressive strength than that of conventional SIFCON.

Keywords: Geopolymer; SIFCON; toughness; high temperature.

1. Giriş

Beton, dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ancak çimentonun üretimi sırasında hem yüksek miktarda doğal kaynak ve enerji tüketilmekte hem de ciddi miktarda CO₂ salınımı

Bu makaleye atf yapmak için

Gültekin, A., Ramyar, K., "Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer SIFCON'ların Eğilme Dayanımı ve Tokluk Özelliklerinin İncelenmesi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2022, 9 (1); 311-324.

How to cite this article

Gültekin, A., Ramyar, K., "Investigation of Flexural Strength and Toughness of Fly Ash Based Geopolymer SIFCON" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2022, 9 (1); 311-324.

ORCID ID: ^a0000-0002-5267-5312; ^b0000-0003-2200-2691

yapılmaktadır [1]. Yapılan araştırmalara göre 1 ton portland çimentosunun üretimi için doğaya yaklaşık olarak 1 ton CO₂ salınmaktadır [2]. Çimento üretiminden kaynaklanan çevresel zararların ve enerji sarfiyatının azaltılması için çevre dostu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Geopolimerler hem CO₂ salınımını ciddi biçimde azaltması hem enerji sarfiyatını düşürmesi hem de atık alüminosilikat malzemelerin bertaraf edilmesini sağladığı için çimentoya iyi bir alternatif olma potansiyeli taşımaktadır [3].

Geopolimer üretiminde metakaolin, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, pirinç kabuğu külü ve kırmızı çamur gibi farklı malzemelerin kullanılması mümkündür [4]. En yaygın kullanılan malzemelerden birisi ise uçucu küldür [5]. Yapılan araştırmalara göre uçucu kül tabanlı geopolimer beton üretiminin, geleneksel betona kıyasla %10-30 oranlarında daha az maliyetli olacağı tespit edilmiştir [6]. Geopolimer üretiminde yüksek alkali ortam sağlayacak malzemelere ihtiyaç bulunmaktadır. Aktivatör olarak en yaygın kullanılan maddeler NaOH (sodyum hidroksit) ve Na₂SiO₃ (sodyum silikat)'tir [7].

Geopolimerler erken yüksek dayanım, düşük geçirimsizlik, yangın ve asit etkilerine karşı yüksek direnç, düşük rötre gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler de geopolimerleri, köprü, kaplama, hidrolik ve askeri yapılar gibi alanlarda çimentoya alternatif bir malzeme haline getirmektedir [8]. Ancak geopolimer betonlar gevrek doğası nedeniyle zayıf çekme ve eğilme mukavemeti sergilemektedir. Geopolimerlerin çekme dayanımını arttırmak ve kırılma davranışını geliştirmek için kullanılabilir en etkili ve ekonomik yöntemlerden birisi matrisin lifler ile takviye edilmesidir [9]. Liflerin, gevrek matrise dahil edilmesi, yükleme veya rötre gibi etkenler altında eğilme dayanımının artmasını; çatlak yayılmasının kontrol edilmesini ve çatlak sonrası davranışın gelişmesini sağlar [10]. Lifler, çatlaklar üzerinde köprüleme veya çatlak yönünü değiştirme gibi etkiler göstererek çatlakların büyümesini sınırlar ve çatlak ilerlemesi sürecinde kompozitin enerji yutma miktarını artırır. Ayrıca liflerin kopması veya matristen sıyrılması için ilave enerji gerekmekte olup bu da çatlak ilerlemesini engelleyen ve geopolimer kompozitin tokluğunu arttıran başka bir etkendir [7]. Lifli geopolimer üretiminde pamuk, karbon, çelik, PVA ve polipropilen gibi farklı doğal veya yapay liflerin kullanılması mümkündür. Araştırmalar liflerin, geopolimerlerin eğilme tokluğu üzerindeki etkisinin, portland çimentolu kompozitlerden daha yüksek olduğunu göstermiştir [10].

Lifli geopolimer kompozit üretiminde farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlardan en yaygın olanı süreksiz liflerin karışıma eklenerek diğer malzemeler ile birlikte karıştırılmasıdır. Lif demeti veya lif kumaşı gibi sürekli liflerin bir kalıba sarılması veya yerleştirilmesi, devamında geopolimer bağlayıcının kalıba sızdırılması/dökülmesi uygulamada başvurulan başka bir yöntemdir. Diğer bir yöntem ise elyaf demetlerinin geopolimer reçine banyosundan geçirilerek ön emdirme yapılması, lif demetlerinin bir mil ile sarılması veya istenilen uzunluklarda plaka şeklinde kesilmesi, bu tabakaların kalıplara yerleştirilip sıkıştırılması işlemlerini içeren pultrüzyon yöntemidir [11].

Geopolimer kompozitler, termoset reçinelere benzer şekilde işlenebilmesinin yanı sıra metal matrisli veya seramik matrisli kompozit gibi rakiplerinin üretimi için gereken yüksek sıcaklık veya karmaşık prosedürlere ihtiyaç duymazlar. Geopolimerlerin 800°C gibi yüksek sıcaklıklara uzun süre maruziyet durumunda bile bozulmamaları, geopolimer lifli kompozitleri, polimer matrisli kompozitlerin kullanılmadığı sıcaklık aralığındaki uygulamalar için de uygun hale getirmektedir. Ayrıca geopolimerlerin hafif ve kimyasal olarak inert olmaları da geopolimer kompozitleri havacılık ve otomobil endüstrisi gibi alanlarda ön plana çıkarmaktadır [12].

Sukontasukkul vd. (2018) uçucu kül ve silis dumanı tabanlı çelik lifli geopolimer harçların eğilme performansı ve tokluğunu incelemiştir. Çalışmada lif hacmi %0.5 ve %1 iken lifler diğer malzemelerle birlikte, mikserde karıştırma safhasında harçlara eklenmiştir. Lif ilavesinin eğilme

dayanımı ve tokluğu arttırdığı, %1 çelik lif ilavesinde tokluktaki artışın L/600 ve L/150 sehimleri için sırasıyla 18.3 ve 146 kat olduğu görülmüştür [13]. Çelik liflerin diğer malzemeler ile birlikte karıştırılarak geopolimer kompozit üretiminde kullanıldığı bir başka çalışma da Gao vd. (2017) tarafından yürütülmüştür. 6 ve 13 mm uzunluklardaki düz çelik liflerin hacimce %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.0 oranlarında kullanıldığı uçucu kül/yüksek fırın cürufu temelli geopolimer kompozitlerde, sadece kısa liflerin kullanılmasının eğilme dayanımlarını arttırdığı ancak kompozitlerin gevrek kırılma gösterdiği; 13 mm uzunluğundaki liflerin kullanılması ile kırılma modunun değiştiği, %0.50, %0.75 ve %1 lif içeriklerinde kompozitte sünek kırılma gözlemlendiği, eğilme dayanımlarının ise %58.5'e varan oranlarda yükseldiği tespit edilmiştir [14]. Midhun vd. (2018) ise cam lifinin geopolimer çentikli beton numunelerinin eğilme etkisi altındaki davranışına etkisini incelemiştir. Çalışmada lifler 6 ve 13 mm olmak üzere iki farklı uzunlukta ve %0.1, %0.2, %0.3 ve %0.4 olmak üzere 4 farklı hacim içeriğinde kullanılmıştır. Lif kullanılan tüm numunelerde eğilme dayanımında artış olduğu, bu artışın 6 mm liflerde %52.4, 13 mm uzunlukta liflerde ise %57.1'e kadar yükseldiği görülmüştür. Ayrıca lif ilavesi ile tepe yüküne karşılık gelen sehim ve kırılma enerjisi değerlerinin de arttığı görülmüştür [9]. Chi vd. (2018) ise metakaolin, Na_2SiO_3 ve en büyük tane boyutu 1.25 mm olan silis kumu ile üretilen geopolimer harcı reçine olarak kullanmış, bazalt süreksiz lif ve karbon dokuma lifi kullanarak geopolimer lifli kompozit numuneler elde etmiştir. Çalışmanın sonucuna göre hem sürekli hem de süreksiz liflerin eğilme dayanımı ve tokluk üzerinde olumlu etkisi olduğu görülmüştür [15]. Yan vd. (2016) metakaolin tabanlı karbon lif keçeli geopolimer kompozitleri incelemiştir. Çalışmada üretilen kompozitler pres ve vakumlama ile üretilmiş olup karbon lif keçelerinin ilavesi ile yük-sehim eğrisinde hem tepe yükünün hem de tepe yüküne karşılık gelen sehimlerin arttığı görülmüştür. Eğilme dayanımındaki artışın %38-%222, kırılma tokluğundaki artışın ise %68-%310 aralıklarında olduğu tespit edilmiştir [16].

Görüldüğü üzere literatürde farklı temel malzemeler; farklı tip, geometri ve boyuttaki lifler ve farklı yöntemlerle üretilen lifli geopolimer kompozitler hakkında birçok çalışma bulunmaktadır. Lif içeren ve uzun yıllardır kullanılan kompozit malzemelerden biri de süreksiz liflerin kalıba yerleştirilmesi ve devamında matris fazını oluşturacak bulamacın kalıba dökülmesi işlemleri ile üretilen SIFCON'lardır. Geopolimerlerin, gerek çimento ile rekabet edecek derecede mekanik özelliklere sahip olması gerekse de yüksek sıcaklığa çimento bağlayıcılardan daha fazla dirençli olmasına rağmen SIFCON üretiminde yeteri kadar kullanılmadıkları görülmüştür. Bu çalışmada, çelik lifler kullanılarak geopolimer SIFCON'lar üretilmiş ve üretilen uçucu kül tabanlı geopolimer SIFCON'ların toklukları, eğilme ve basınç dayanımları benzer eğilme dayanımına sahip çimento SIFCON'lar ile kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırma hem yüksek sıcaklık etkisi öncesi hem de 900°C etkisine maruziyet sonrasında gerçekleştirilerek geopolimer SIFCON'ların hem oda sıcaklığı hem de yüksek sıcaklıklardaki davranışları, çimento SIFCON'lar ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma iki adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, geopolimer SIFCON üretiminde kullanılacak optimum Ms oranı (aktivatör çözeltisindeki SiO_2 'nin Na_2O 'ya ağırlıkça oranı) ve Na_2O yüzdesinin (aktivatör çözeltisindeki toplam Na_2O 'nun uçucu küle ağırlıkça oranı) tespit edilebilmesi amacı ile geopolimer harçlar üretilmiş ve en yüksek basınç dayanımının elde edildiği karışım belirlenmiştir. Devamında bu bilgiler kullanılarak geopolimer ve çimentolu SIFCON'lar üretilmiştir. Üretilen SIFCON'ların basınç ve eğilme dayanımları ile tokluk özellikleri incelenmiştir.

2.1. Malzeme

2.1.1. Uçucu Kül

Geopolimer harçların ve geopolimer SIFCON'un üretilmesinde İzmir'de faaliyet gösteren İzdemir

Enerji Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal bileşim ile bazı fiziksel özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Uçucu küle ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler.

Bileşen	(%)	Özellik	
SiO ₂	44.23	Blaine yüzey alanı	3506 cm ² /g
Al ₂ O ₃	19.6	Özgül ağırlık	2.35
Fe ₂ O ₃	7.79	32 µm elek bakiyesi	40.1
CaO	4.81	45 µm elek bakiyesi	29.9
MgO	2.00	Puzolanik akt. (7 gün)	%81.5
Na ₂ O	1.17	Puzolanik akt.(28 gün)	%98.0
K ₂ O	1.70		
TiO ₂	0.44		
P ₂ O ₅	0.67		
SO ₃	0.14		
Kızdırma kaybı	17.36		

2.1.2. Çimento

Çimentolu SIFCON'ların üretilmesinde CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler üretici firmadan temin edilmiş olup Tablo 2'de gösterilmiştir. Ayrıca çimentonun 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının sırası ile 20.1, 40.1 ve 48.5 MPa olduğu yapılan laboratuvar çalışmasında tespit edilmiştir.

Tablo 2. Çimentoya ait kimyasal bileşim ve çimentonun bazı özellikleri.

Bileşen	(%)	Özellik	
CaO	63.17	Özgül yüzey alanı	3220 cm ² /g
SiO ₂	18.18	32 µm elek bakiyesi	% 19.7
Al ₂ O ₃	4.7	90 µm elek bakiyesi	% 0.5
Fe ₂ O ₃	3.41	Priz başlangıcı	230 dakika
MgO	1.22	Priz bitişi	320 dakika
Na ₂ O	0.58	Özgül ağırlık	3.14
K ₂ O	0.74	Standart kıvam	%28.2
SO ₃	3.57		
Cl ⁻	0.006		
Serbest CaO	0.94		
Kızdırma kaybı	3.28		
Çözünmeyen kalıntı	0.03		

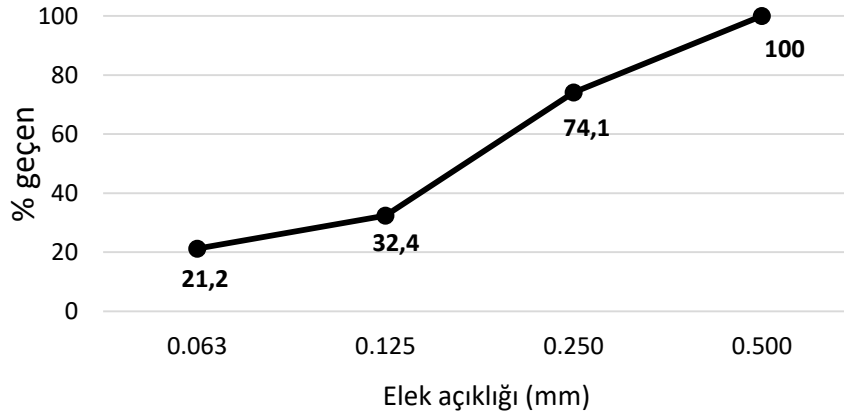
2.1.3. Su

Çalışmada kullanılan su İzmir ili, Bornova ilçesi şehir şebekesi suyudur.

2.1.4. Kum

Geopolimer harçların hazırlanmasında standart CEN kumu kullanılmıştır. Geopolimer ve çimentolu SIFCON'ların üretilmesinde ise özgül ağırlığı 2.65, su emme kapasitesi %0.8 olan kireçtaşı kırma kum kullanılmıştır. Kum, 0.5 mm'lik elekten elenmiş olup elek altında kalan kısım üretimde

değerlendirilmiştir. Bu kuma ait gradasyon Şekil 1’de gösterilmiştir. Ayrıca SIFCON’ların üretiminde filler malzeme olarak 0-0.063 μm aralığındaki kireçtaşı tozu kullanılmıştır.



Şekil 1. SIFCON üretiminde kullanılan kuma ait gradasyon

2.1.5. Aktivatör Çözeltisi

Üretilen geopolimerlerde alkali aktivasyonu sağlamak amacı ile %23.2 SiO_2 , %10.0 Na_2O ve %66.8 H_2O içeren çözelti şeklindeki Na_2SiO_3 ve %98 oranında saf, pelet şeklindeki NaOH beraber kullanılmıştır. İstenilen Ms oranını elde edebilmek için NaOH peletleri, Na_2SiO_3 çözeltisinin içinde karıştırma yöntemi ile çözdürülmüş ve oluşan çözelti 24 saat dinlenmeye bırakıldıktan sonra kullanılmıştır.

2.1.6. Lif

SIFCON’ların üretilmesinde 0.55 mm çapa ve 35 mm uzunluğa sahip, kancalı uçlu çelik lifler kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen bazı lif özellikleri Tablo 3’te, liflere ait görsel ise Şekil 2’de sunulmuştur.

Tablo 3. Çelik life ait bazı özellikler.

Özellik	Değer
Narinlik	65
Nominal çekme dayanımı	1345 MPa
Elastisite modülü	200 GPa
Kopma uzaması	%0.8



Şekil 2. SIFCON üretiminde kullanılan çelik lifler

2.1.7. Akışkanlaştırıcı Katkı

Çimentolu SIFCON'ların üretilmesinde akışkanlığı sağlamak amacıyla polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

2.2. Metot

2.2.1. Geopolimer Harç Karışımlarının Hazırlanması

Geopolimer harçların dayanımlarının Ms oranı ve Na₂O yüzdesinden etkilendiği bilindiğinden en yüksek basınç dayanımının elde edildiği parametrelerin tespiti için dört farklı Ms oranı (1.0, 1.2, 1.6, 2.0) ve üç farklı Na₂O yüzdesi (%4, %8, %12) kullanılarak 12 farklı geopolimer harç hazırlanmıştır. Kütleme, laboratuvar tipi hava dolaşımli etüv kullanılarak 60°C'de 72 saat boyunca yapılmıştır.

Geopolimer harç karışımları hazırlanırken sırası ile kum, uçucu kül, aktivatör çözeltisi ve karışımda var ise su, 0.1 g hassasiyete sahip tartı ile tartılmış ve mikserde koyulmuştur. Mikser 90 saniye düşük hızda çalıştırıldıktan sonra durdurulmuş, kabın çeperine yapışan malzemeler bir spatula yardımı ile sıyrılmış ve mikser 90 saniye daha düşük hızda çalıştırılmıştır. Geopolimer harç karışımlarının yayılma çapları TS EN 459-2 [17] Standardı'na göre belirlenmiş olup 15.5±0.5 cm'lik hedef yayılma seçilmiş ve bu değer sağlanabilmesi için harçlara farklı oranlarda su eklenmiştir. (Ancak bazı harç karışımlarında aktivatör miktarı fazla olduğundan su eklenmeden hedef yayılma çapının dışına çıkmıştır.) Harçlara ait karışım oranları Tablo 4'te sunulmuştur. Harçlar 50 mm ayrıtlı küp kalıplara 2 tabakada yerleştirilmiş ve her tabaka sarsma tablasında 25 defa düşürülerek sıkıştırılmıştır. Numuneler, termal şoka uğramamaları için oda sıcaklığındaki etüve kalıpları ile birlikte koyulmuş ve etüv numunelerin koyulmasından sonra çalıştırılmıştır. Etüvün sıcaklık artış hızı yaklaşık olarak 10°C/dak olup kür süresi, kür sıcaklığına ulaşıldıktan sonra başlatılmıştır.

Tablo 4. Geopolimer harçlara ait karışım oranları.

Ms	Na ₂ O (%)	Uçucu kül (g)	Aktivatör (g)	Kum (g)	Su (g)	Yayılma çapı (cm)	Taze BHA (kg/m ³)
1.0	4	450	91.4	1215	180	16.0	2190.4
	8	450	182.8	1215	60	15.9	2239.5
	12	450	274.2	1215	15	15.3	2252.5
1.2	4	450	104.7	1215	150	15.0	2184.5
	8	450	209.4	1215	40.5	15.3	2228.8
	12	450	314.1	1215	5.5	15.7	2219.7
1.6	4	450	133.1	1215	140	15.8	2165.9
	8	450	266.2	1215	12	15.3	2190.4
	12	450	399.3	1215	0	20+	2190.9
2.0	4	450	160	1215	124	15.2	2160.3
	8	450	320	1215	7	15.3	2186.1
	12	450	480	1215	0	20+	2173.1

2.2.2. SIFCON Üretimi

Hem çimento hem de geopolimer SIFCON bulamaçlar hazırlanırken karışımların yeteri kadar akıcı olup olmadığı ve kuma yapıp yapmadıkları ön denemeler ile incelenmiş, kuma yapmayan ve liflerin arasını boşluksuz dolduran karışımlarla numuneler hazırlanmıştır. Üretilen geopolimer ve çimento SIFCON bulamaçlarının benzer yayılma çaplarına sahip olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda TS EN 459-2 [17] Standardı'nda, harçların yayılma çapının tespitinde kullanılan kesik koni, akıcı

bulamaç ile sıkıştırma yapılmaksızın doldurulmuş, kesik koni çekilerek bulamaçların 30 saniye içindeki yayılma çapları tespit edilmiştir. Yayılma çapı hedefi olarak 30 ± 1 cm hedeflenmiştir. Çalışmadaki amaç, benzer eğilme dayanımlarına sahip çimento ve geopolimer SIFCON'ların incelenmesi olduğu için farklı S/Ç oranları ile 5 farklı bulamaç hazırlanmış ve bunların eğilme dayanımları tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan tüm SIFCON'lara ait karışım tasarımları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Lifler herhangi bir yönlendirme yapılmaksızın kalıbın içine serpiştirme yöntemi ile yerleştirilmiş, bu işlem sırasında liflerin düşey olarak konumlanmalarına dikkat edilmiştir. Liflerin belli noktalarda kümelenmesini engellemek adına el ile müdahale edilerek lifler homojen şekilde dağıtılmıştır. Liflerin son yerleşimine ait bir fotoğraf Şekil 3'te paylaşılmıştır. Bulamaçlar hazırlanırken tüm malzemeler mikser kabına koyulmuş ve mikser 3 dakika düşük hızda çalıştırılmıştır. 3 dakikanın sonunda kabın çeperine yapışan malzemeler bir spatula yardımı ile sıyrılmış ve 3 dakika daha düşük devirde karıştırma yapılmıştır. Bulamaç hazırlandıktan sonra kalıplara dökülmüş, herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmamıştır. Eğilme dayanımı ve tokluk deneyi için $37.5 \times 75 \times 285$ mm prizma, basınç dayanımı deneyleri için ise 71 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. Çalışmada geopolimer SIFCON "Geo" kısaltması ile çimentolu SIFCON'lar ise içerdikleri S/Ç oranına göre kodlanmıştır.

Tablo 5. SIFCON üretiminde kullanılan karışım tasarımları.

Numune	Malzeme miktarı (kg/m ³)							Lif	Bulamaçın yayılma çapı (cm)
	Çimento	UK	Filler	Kum	Su	SA	Aktivatör		
0.35*	894.0	-	178.8	715.2	312.9	15.1	-	393.5	30.7
0.60*	562.0	-	238.7	885.3	337.2	9.8	-	393.5	29.9
0.75*	429.0	-	257.4	1029.6	321.8	7.0	-	393.5	30.5
1.05*	290.2	-	362.8	1088.3	304.7	4.8	-	393.5	30.4
1.45*	206.0	-	494.4	1050.6	298.7	3.2	-	393.5	30.6
Geo**	-	694.1	-	694.1	92.5	-	420.3	393.5	29.6

*: Çimentolu SIFCON'lar, **: Geopolimer SIFCON, SA: Süperakışkanlaştırıcı katkı, UK: Uçucu kül

Geopolimer SIFCON'lar 15 dakika laboratuvar ortamında bekletildikten sonra etüve yerleştirilmiş ve kalıpları ile birlikte 72 saat 60°C 'de kürlenmiştir.



Şekil 3. Liflerin kalıba yerleşimi

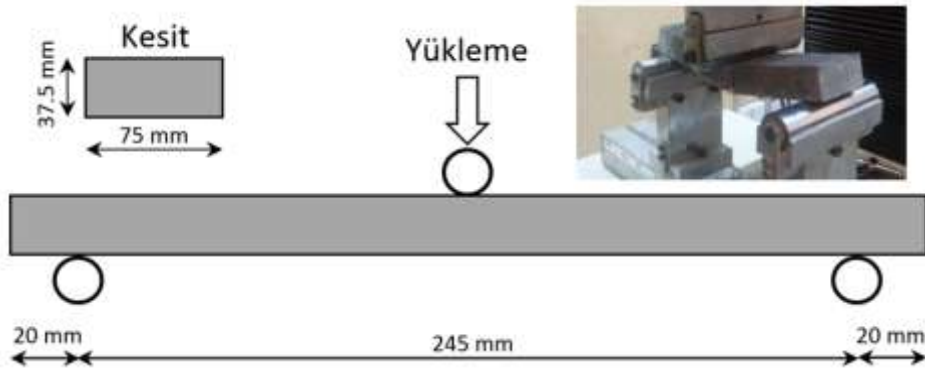
Kür tamamlandıktan sonra numuneler etüvden alınmış, oda sıcaklığına soğuyan numuneler kalıplarından çıkarılarak mekanik deneylere geçilmiştir. Çimentolu SIFCON'lar ise dökümden sonra laboratuvar ortamında 24 saat bekletilmiş, devamında kalıptan çıkarılarak kür havuzuna yerleştirilmiş ve 27 gün kürlenmiştir.

2.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri 200 ton kapasiteli beton presinde gerçekleştirilmiş olup 50 mm ayrıtlı harç numuneler için yükleme hızı 0.9 kN/s, 71 mm ayrıtlı SIFCON numuneler için ise 3.0 kN/s olarak seçilmiştir. 3 deney numunesinin ortalama değeri, basınç dayanımı olarak kaydedilmiştir.

2.4. Eğilme Dayanımı ve Tokluk Deneyi

Eğilme dayanımı ve tokluk deneyleri deplasman kontrollü yükleme cihazında, 3 noktalı eğilme deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiş olup yükleme hızı olarak 0.5 mm/dakika seçilmiştir. Kullanılan deney düzeneği ve numuneye ait görseller Şekil 4'te sunulmuştur. Farklı numunelerin birbiri ile kıyaslanabilmesi için bir referans seçilmesi gerektiğinden tüm numunelerde ulaşılan tepe yükü %90 oranında azalana kadar beklenmiş ve bu noktada deney sonlandırılmıştır. Deneylerde 3'er adet numune kullanılmış olup 3 numunenin ortalaması eğilme dayanımı ve tokluk olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4. Tokluk deneyinde kullanılan numune ve deneyin uygulandığı

2.5. Yüksek Sıcaklık Direnci Deneyleri

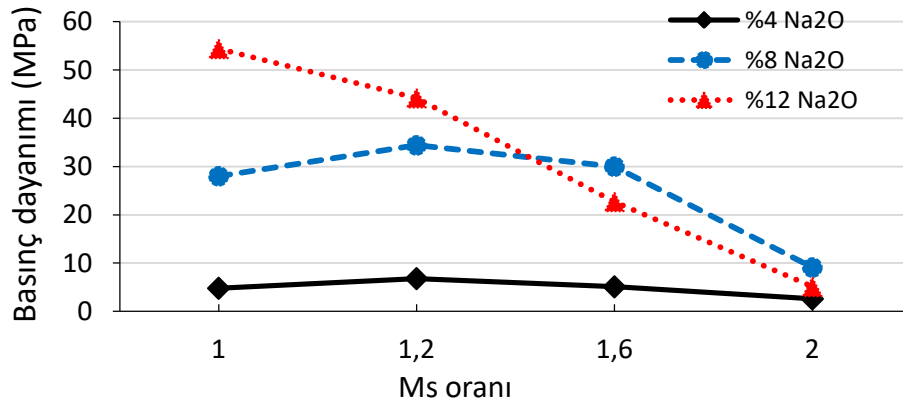
Geopolimer ve çimentolu SIFCON'ların yüksek sıcaklık direnci deneyleri, yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç/eğilme dayanımı ve tokluk kayıpları ile tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınına girecek çimentolu SIFCON'lar kür sürelerinin ardından 72 saat boyunca etüvde 60°C'de kurutulmuşken, geopolimer numuneler zaten etüvde külendiği için kurutma işlemi yapılmamıştır. Kullanılan yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık artış hızı 10°C/dakika iken numuneler 900°C'de 3 saat yakılmış, fırın içerisinde soğuyan numuneler oda sıcaklığına gelince bekletilmeden deneyler gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Geopolimer Harç Basınç Dayanımları

Farklı Ms oranları ve Na₂O yüzdeleri ile üretilen geopolimer harçlara ait basınç dayanımları Şekil 5'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere %4 Na₂O yüzdesinde tüm Ms oranlarında 10 MPa'dan daha düşük basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Na₂O oranının %8'e çıkması ile basınç

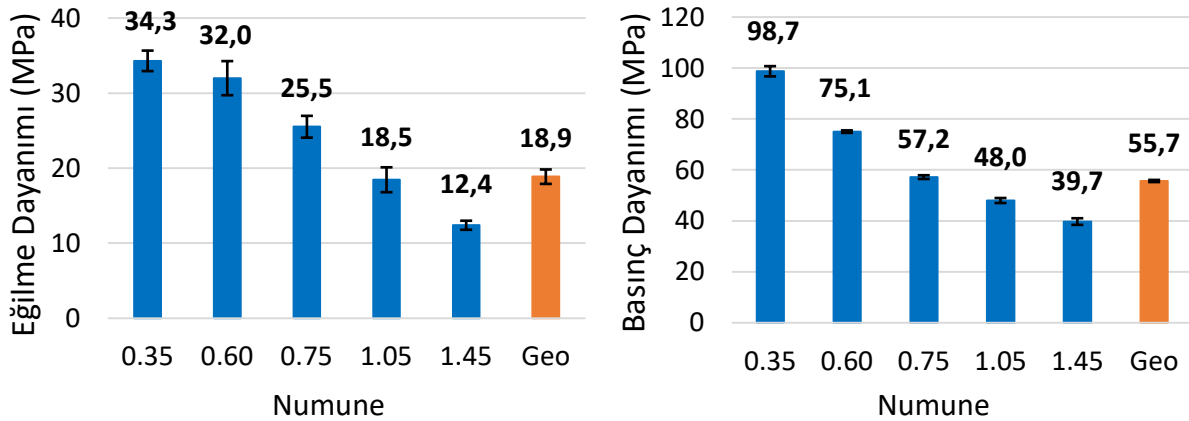
dayanımlarının da yükseldiği tespit edilmiştir. Benzer bir sonuç Cho vd. (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada da görülmüş olup araştırmacılar Na_2O miktarındaki artış ile uçucu küldeki amorf silika ve alüminanın çözünürlüğünün de yükseldiğini, bu sebeple basınç dayanımlarının arttığını belirtmiştir [18]. En yüksek basınç dayanımının 1.0 Ms oranı ve %12 Na_2O yüzdesine sahip aktivatör ile üretilen harçta görüldüğü tespit edilmiştir. Bu sebeple geopolimer SIFCON üretiminde kullanılacak aktivatörün 1.0 Ms oranı ve %12 Na_2O içeriğine sahip olması kararlaştırılmıştır. Ancak %12 Na_2O yüzdesinde Ms oranı arttıkça basınç dayanımlarının kademeli olarak azaldığı da tespit edilmiştir. Duxson vd. (2005) aktivatör çözeltisindeki çözünebilir silikat derişiminin artması ile jelin reorganizasyonunun engellendiğini, ayrıca Si/Al oranının yükselmesi nedeniyle temel malzemenin çözünürlüğünün de azaldığını, çözünmeyen temel malzemenin matris içerisinde noktasal bir kusur yarattığını ve bu noktaların gerilme yığılmalarına neden olarak matrisi zayıflattığını belirtmiştir [19]. Bunların, artan Ms oranı ile basınç dayanımının azalmasının muhtemel sebepleri olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5. Geopolimer harçlara ait basınç dayanımları

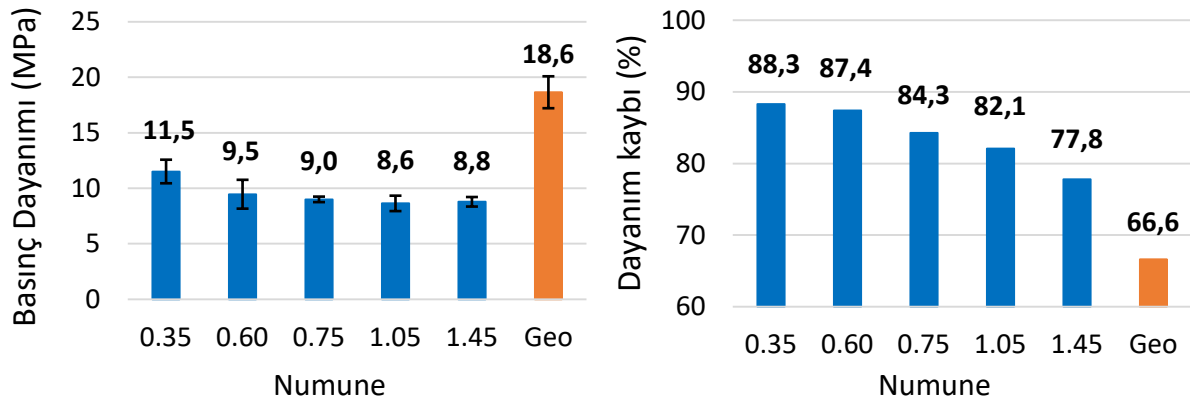
3.2. SIFCON Deney Sonuçları

Üretilen çimentolu ve geopolimer SIFCON numunelere ait eğilme ve basınç dayanımı değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Beklenildiği üzere farklı S/Ç oranları ile hazırlanan çimentolu SIFCON'larda S/Ç oranı arttıkça eğilme ve basınç dayanımlarında azalma yaşanmıştır. Aynı eğilme dayanımındaki geopolimer ve çimentolu SIFCON'lar, deneysel çalışmanın devamında kıyaslanacağı için çimentolu SIFCON olarak S/Ç oranı 1.05 olan karışım seçilmiştir. Birbirine çok yakın eğilme dayanımına sahip geopolimer ve çimentolu SIFCON'ların basınç dayanımları incelendiğinde, geopolimer SIFCON'un benzer eğilme dayanımı için daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 6. SIFCON numunelerin eğilme ve basınç dayanımları

71 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde uygulanan yüksek sıcaklık deneyi sonrasındaki basınç dayanımları ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan numunelere göre basınç dayanım kayıpları Şekil 7'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere çimentolu SIFCON'lar yüksek sıcaklık etkisi ile dayanımlarının çok büyük bir bölümünü kaybetmiştir. En az dayanım kaybı yaşayan karışım ise geopolimer SIFCON olup hala 20 MPa'a yakın bir basınç dayanımı bulunmaktadır. Çimentolu SIFCON'larda S/Ç oranı arttıkça dayanım kayıplarının azaldığı görülmüştür. Numune bünyesinde bulunan su, yüksek sıcaklık deneyi boyunca buhar basıncı yaratmakta ve patlatıcı etkisi ile matrise zarar vermektedir. Ancak S/Ç oranı yükseldikçe numunedeki boşluklar da arttığından su buharının dışarıya tahliyesi kolaylaşmakta ve dayanım kayıpları S/Ç oranı arttıkça azalmaktadır. Ayrıca 0.60, 0.75, 1.05 ve 1.45 S/Ç oranına sahip çimentolu SIFCON'lar incelendiğinde, yüksek lif içeriğinin bir sonucu olarak basınç dayanımının bir kısmının, sadece liflerin katkısından ortaya çıktığı da düşünülmektedir. Şekil 8'de 0.60 ve 1.05 S/Ç oranına sahip çimentolu ve geopolimer SIFCON numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki fotoğrafları gösterilmiştir. Görüldüğü üzere geopolimer SIFCON numunede daha az çatlak bulunmaktadır.



Şekil 7. Yüksek sıcaklık sonrasındaki SIFCON basınç dayanımları ve basınç dayanım kayıpları



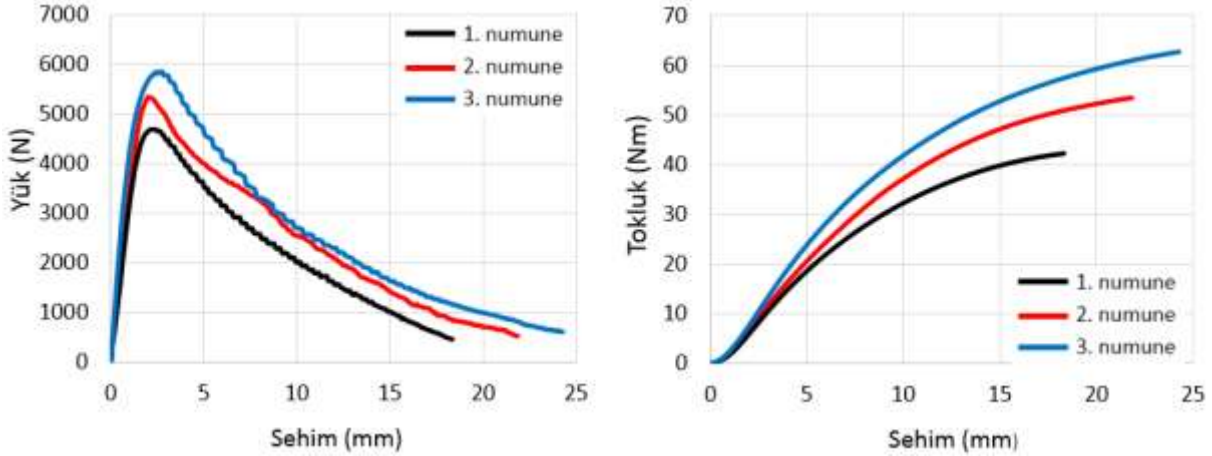
Şekil 8. Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında SIFCON numuneler

Tablo 6. SIFCON numunelere ait eğilme dayanımları, kuvvet ve tokluk değerleri.

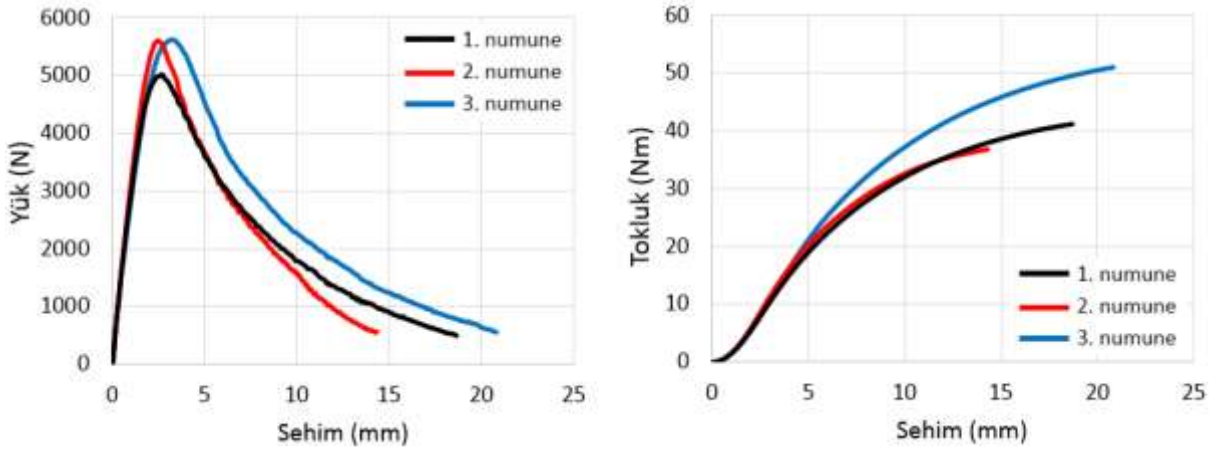
Numune	Tepe Yüğü (N)	Tepe yüküne karşılık gelen sehim (mm)	Eğilme dayanımı (MPa)	Tokluk (Nm)	Tepe yüküne karşılık gelen tokluk (Nm)
1.05	5297	2.17	18.5	51.1	8.5
Geo	5415	2.88	18.9	43.0	10.1
1.05-900°C	1387	3.35	4.8	10.5	3.2
Geo-900°C	2014	5.25	7.0	22.8	8.2

Çimentolu ve geopolimer SIFCON numunelere ait yük-sehim ve tokluk-sehim eğrileri Şekil 9 ve Şekil 10'da, 900°C sıcaklığa maruz bırakılan SIFCON numunelere ait yük-sehim ve tokluk-sehim

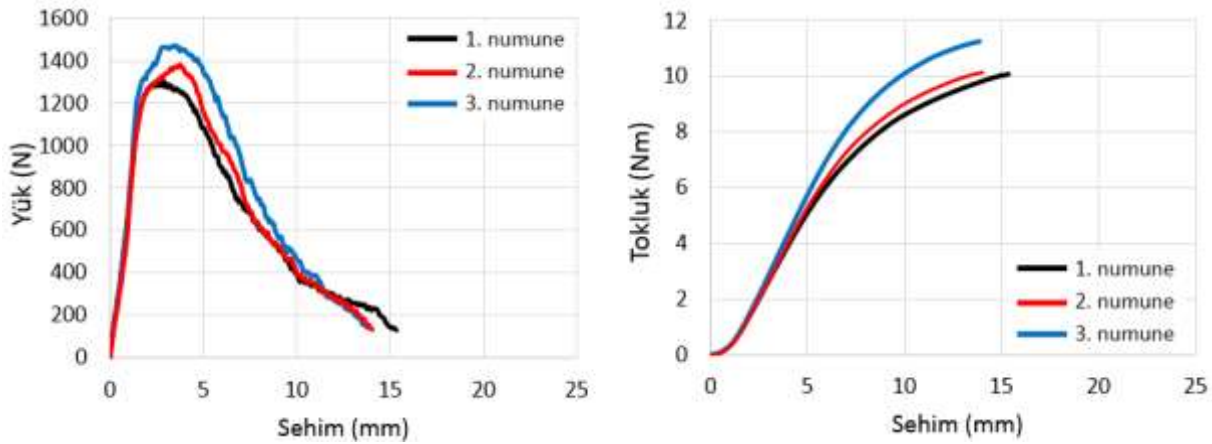
eğrileri ise Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Ayrıca numunelere ait ortalama tepe yükleri, ortalama tepe yüküne karşılık gelen sehim ve tokluk değerleri Tablo 6’da sunulmuştur.



Şekil 9. Çimentolu SIFCON'ların yük-sehim ve tokluk-sehim grafikleri



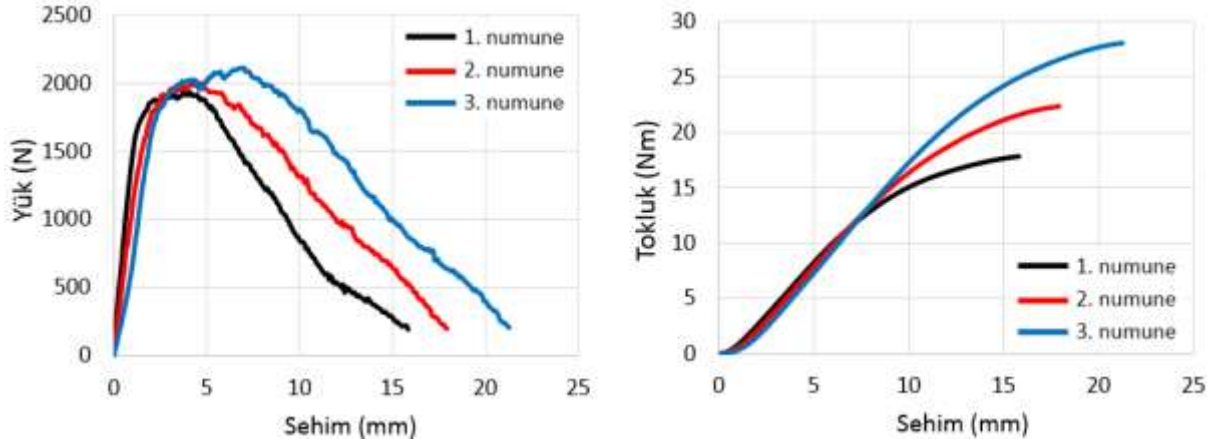
Şekil 10. Geopolimer tabanlı SIFCON'ların yük-sehim ve tokluk-sehim grafikleri



Şekil 11. 900°C'ye maruz kalan çimentolu SIFCON'ların yük-sehim ve tokluk-sehim grafikleri

Tablo 6’da da görüldüğü üzere yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayan numunelerden geopolimer SIFCON, çimentolu SIFCON’dan bir miktar daha yüksek eğilme dayanımına sahiptir. Ayrıca

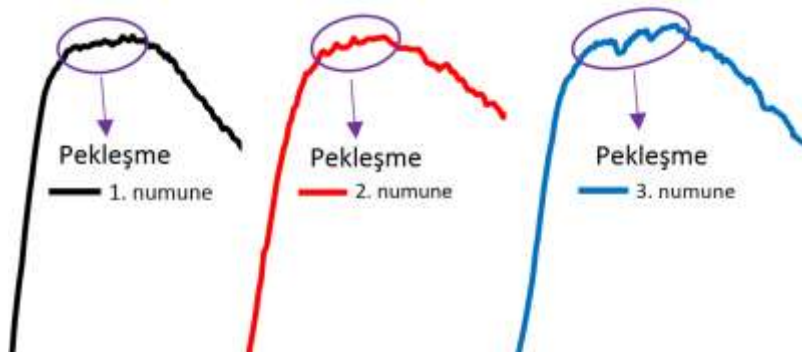
ortalama tepe yükü ve ortalama tepe yüküne karşılık gelen sehim değerleri de bir miktar daha yüksektir.



Şekil 12. 900°C'ye maruz kalan geopolimer SIFCON'ların yük-sehim ve tokluk-sehim grafikleri

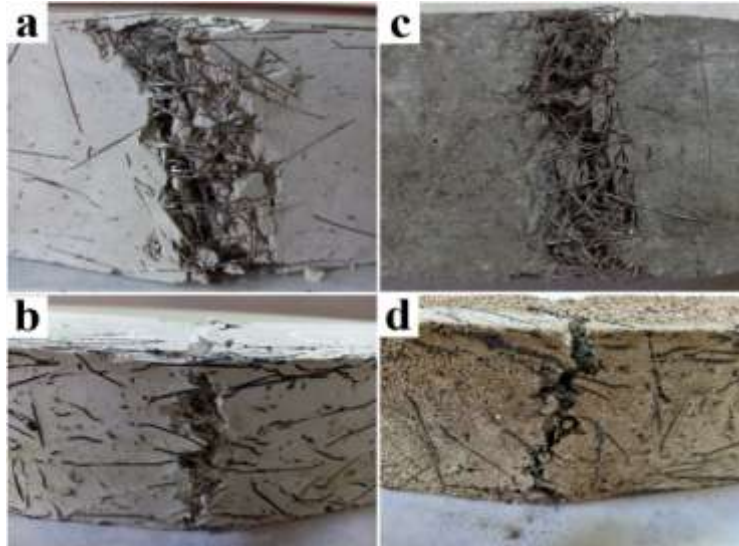
Geopolimer SIFCON'ların aynı sehim değerinde daha fazla yük taşıdığı ve aynı sehimde sönümlendiği enerjinin bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. 900°C'ye maruz bırakılan numunelerde beklenildiği üzere eğilme dayanımları, tepe yükleri ve tokluk değerlerinde azalış gözlemlenmiştir. Ancak geopolimer SIFCON'ların yüksek sıcaklık direncinin çimentolu SIFCON'lardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Çimento tabanlı numunelerde yüksek sıcaklığın etkisi ile eğilme dayanımında %74.1'lik bir azalış görülürken bu değer geopolimer SIFCON'larda %63 olarak tespit edilmiştir.

900°C'ye maruz bırakılan geopolimer SIFCON'un ortalama tepe yükü ve ortalama tokluk değerlerinin çimentolu SIFCON'dan %45.2 ve %117.1 oranlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Geopolimer SIFCON'ların yüksek sıcaklık altında çimentolu SIFCON'lardan çok daha fazla enerji sönümlendiği ve yüksek sıcaklıklarda çok daha avantajlı oldukları görülmüştür. Ayrıca yüksek sıcaklığa maruz bırakılan çimento ve geopolimer SIFCON numunelerde bir miktar pekleşme de görülmüş olup bu pekleşme geopolimer SIFCON'larda çok daha net şekilde gözlemlenmiştir. Geopolimer SIFCON numunelerinin her birindeki pekleşme ayrı ayrı olmak üzere Şekil 13'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ilk çatlaktan sonra sehim arttıkça yük de yükselmekte olup numunelerde pekleşme görülmektedir.



Şekil 13. 900°C'ye maruz bırakılan geopolimer SIFCON'larda pekleşme

Tokluk deneyleri sonrasındaki numunelere ait fotoğraflar Şekil 14'te gösterilmiştir. Liflerin köprüleme etkisi nedeniyle numuneler deneyden sonra hala tek parça şeklinde olup, kırılma noktasındaki liflerin bir kısmının matristen sıyrıldığı, bir kısmının ise şekil değişikliği yaşadığı görülmüştür.



Şekil 14. Tokluk deneyi sonrasında SIFCON numuneler (a: çimentolu, b: çimentolu-900°C sonrası, c: geopolimer, d: geopolimer-900°C sonrası)

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada hacimce %5 oranında çelik lif kullanılarak üretilen geopolimer ve çimento matrisli SIFCON kompozitlerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve toklukları incelenmiş, devamında 900°C sıcaklığın bu özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan malzeme ve yöntemler göz önüne alındığında:

- Geopolimer bağlayıcılar kullanılarak geopolimer SIFCON üretiminin mümkün olduğu, aynı eğilme dayanımına sahip geopolimer ve çimentolu SIFCON'lar kıyaslandığında çimentolu SIFCON'ların tokluklarının geopolimer eşdeğerlerinden daha yüksek olduğu,
- Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında çimentolu ve geopolimer SIFCON'ların eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinde düşüşler olduğu ancak geopolimer SIFCON'ların yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinin çimentolu SIFCON'lardan %45 ve %117 oranında daha fazla olduğu, yüksek sıcaklığa maruz kalacak elemanlarda geopolimer SIFCON'ların kullanılmasının avantajlı olabileceği,
- Geopolimer SIFCON'ların benzer eğilme dayanımındaki çimentolu SIFCON'dan %16 daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Geopolimer SIFCON üretimi konusunda farklı geometri ve farklı uzunluktaki lifler ile farklı temel malzemelerden oluşan bulamaçların kullanılmasının bu konudaki araştırma eksikliğini tamamlamak adına fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın uçucu kül tabanlı geopolimer harçlar bölümü "119M950" proje numarası ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Yazarların Katkıları

AG ve KR karışım ve deney tasarımı yaptı. AG laboratuvar çalışmasını gerçekleştirdi. AG ve KR deney verilerini işleyerek yorumladı, makalenin yazımını gerçekleştirdi. Her iki yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Izumi, Y., Iizuka, A., Ho, H. J., Calculation of Greenhouse Gas Emissions for a Carbon Recycling System Using Mineral Carbon Capture and Utilization Technology in the Cement Industry, *J. Clean. Prod.*, 2021, 312: 127618.
- [2]. Vikas, G., Rao, T. D. G., Setting Time, Workability and Strength Properties of Alkali Activated Fly Ash and Slag Based Geopolymer Concrete Activated With High Silica Modulus Water Glass, *Iran J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, 2021, 45: 1483-1492.
- [3]. Gülşan, M. E., Alzebaree, R., Rasheed, A. A., Niş, A., Kurtoğlu, A. E., Development of Fly Ash/Slag Based Self-Compacting Geopolymer Concrete Using Nano-silica and Steel Fiber, *Constr. Build. Mater.*, 2019, 211: 271–283.
- [4]. Görhan, G., Geopolimer Harç Özelliklerine Metakaolin Kalsinasyon Sıcaklığının Etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2020, 20: 83-89.
- [5]. Zhang, Z. , Wang, H., Provis, J. L., Quantitative Study of the Reactivity of Fly Ash in Geopolymerization by FTIR, *J. Sustain. Cem.-Based Mater.*, 2012, 1 (4): 154-166.
- [6]. Lloyd, N. A., Rangan, B. V., Geopolymer Concrete With Fly Ash, *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Ancona, Italy, (2010).
- [7]. Zhao, J., Tong, L., Li, B., Chen, T., Wang, C., Yang, G., Zheng, Y., Eco-friendly Geopolymer Materials: A Review of Performance Improvement, Potential Application and Sustainability Assessment, *J. Clean. Prod.*, 2021, 307: 127085.
- [8]. Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L., Impact Behavior and Microstructural Characteristics of PVA Fiber Reinforced Fly Ash-geopolymer Boards Prepared by Extrusion Technique, *J. Mater. Sci.*, 2006, 41: 2787–2794.
- [9]. Midhun, M. S., Rao, T. D. G., Srikrishna, T. C., Mechanical and Fracture Properties of Glass Fiber Reinforced Geopolymer Concrete, *Adv. Concr. Constr.*, 2018, 6 (1): 29-45.
- [10]. Ranjbar, N., Mehrali, M., Mehrali, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., High Tensile Strength Fly Ash Based Geopolymer Composite Using Copper Coated Micro Steel Fiber, *Constr. Build. Mater.*, 2016, 112: 629–638.
- [11]. Mackenzie, K. J. D., Welter, M., Geopolymer (Aluminosilicate) Composites: Synthesis, Properties and Applications, *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 2014, Woodhead Publishing, United Kingdom.
- [12]. Rahman, A. S., Jackson, P., Radford, D. W., Improved Toughness and Delamination Resistance in Continuous Fiber Reinforced Geopolymer Composites via Incorporation of Nano-fillers, *Cem. Concr. Compos.*, 2020, 108: 103496.
- [13]. Sukontasukkul, P., Pongsopha, P., Chindaprasirt, P., Songpiriyakij, S., Flexural Performance and Toughness of Hybrid Steel and Polypropylene Fibre Reinforced Geopolymer, *Constr. Build. Mater.*, 2018, 161: 37–44.
- [14]. Gao, X., Yu, Q. L., Yu, R., Brouwers, H. J. H., Evaluation of Hybrid Steel Fiber Reinforcement in High Performance Geopolymer Composites, *Mater. Struct.*, 2017, 50: 165
- [15]. Chi, H. L., Louda, P., Periyasamy, A. P., Bakalova, T., Kovacic, V., Flexural Behavior of Carbon Textile-reinforced Geopolymer Composite Thin Plate, *Fibers*, 2018, 6 (4).
- [16]. Yan, S., He, P., Jia, D., Yang, Z., Duan, X., Wang, S., Zhou, Y., Effect of Fiber Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Carbon Fiber Felt Reinforced Geopolymer Composites, *Ceram. Int.*, 2016, 42: 7837–7843.
- [17]. TS EN 459-2, Yapı kireci - Bölüm 2: Deney yöntemleri, (2012).
- [18]. Cho, Y. K., Yoo, S. W., Jung, S. H., Lee, K. M., Kwon, S. J., Effect of Na₂O Content, SiO₂/Na₂O Molar Ratio, and Curing Conditions on the Compressive Strength of FA-Based Geopolymer, *Constr. Build. Mater.*, 2017, 145: 253–260.
- [19]. Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., van Deventer, J. S. J., Understanding the Relationship Between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2005, 269: 47–58.