

ATIK KARTON KATKILI YENİ NESİL ÇİMENTOLU HARÇ ÜRETİMİNDE CAM LİFİ KULLANIMININ YÜKSEK SICAKLIK ETKİLEŞİM DİRENCİNE ETKİSİ

Sevket Onur KALKAN^{1,a,*}, Lütfullah GÜNDÜZ^{2,b}

¹İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi MMF İnşaat Mühendisliği Bölümü,

²İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi MMF İnşaat Mühendisliği Bölümü

^a sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-0250-8134

^b lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-2487-467X

ÖZET

Yangın, insan hayatı ve mühendislik yapıları için önemli bir tehdittir. İnşaat mühendisleri ve mimarlar, tasarım amaçlarından ve yangın güvenliği gerekliliklerinden ödün vermeden, daha güvenli ve sürdürülebilir ürün arayışı içerisinde olmaktadır. Bu sebeple, yapılarda çok yoğun bir şekilde kullanılan beton ve çimentolu diğer ürünlerin yangına karşı direncinin artırılması araştırmacılar tarafından geliştirilen önemli bir konudur. Bu amaçla, bu çalışmada, 3 mm uzunluğunda fiziksel geri dönüşümle elde edilmiş tekstil tipi cam lifi kullanılarak üretilen çimentolu hafif kompozit harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında harçların doğrudan alev maruz bırakılması sonucu taşıyabildiği en büyük sıcaklıklar ve bu sıcaklıklara karşılık gelen ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Bu çalışmada, atık karton harçlarda çimento, agrega ve dolgu malzemeleri ile birlikte kompozit harç hazırlanmasında kullanılan ana bileşendir. Ayrıca, yüksek sıcaklık etkisinde yanmayı geciktirme ve duman oluşumunu engellemek amacıyla toz formda alüminyum trihidrat (ATH) kullanılmıştır. Cam liflerin çimentolu kompozit harçların yüksek sıcaklık dayanıklılığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla atık karton yerine ağırlıkça %0, %0,25, %0,50, %0,75, %1,00, %1,50, %2,00, %3,00, %4,00 ve %6,00 oranlarında cam lifi kullanılarak 10 farklı kompozit harç karışımı üretilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, lif oranı arttıkça harçların su emme ve görünür gözeneklilikleri azalmış, eğilme dayanımları beklendiği üzere artmıştır. Lif kullanımının artması, alev maruz kalan yüzeyde oluşabilecek en büyük sıcaklık değerini 902 °C'den 1088 °C'ye kadar çıkarabilmiştir. Bunun yanında, malzemenin yüzey sıcaklığındaki artışa rağmen lif kullanımı ile doğrudan alev maruziyet sonrası harçların ağırlık kaybı azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğrudan alev, yüksek sıcaklık, kompozit harç, cam lif, ağırlık kaybı.

***Sorumlu Yazar (Corresponding Author)**

Atıf (Citation): Kalkan, Ş.O., Gündüz, L., "Atık Karton Katkılı Yeni Nesil Çimentolu Harç Üretiminde Cam Lifi Kullanımının Yüksek Sıcaklık Etkileşim Direncine Etkisi", UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 7(1): 1-30, 2025.

Geliş (Received): 28/09/2024

Kabul (Accepted): 17/07/2025

Yayın (Published): 18/07/2025

Effect of Glass Fiber Use on High Temperature Interaction Resistance in the Production of New Generation Cement Mortar with Waste Cardboard Additive

ABSTRACT

Fire is a significant threat to human life and engineering structures. Civil engineers and architects are in search of safer and more sustainable products without compromising design objectives and fire safety requirements. For this reason, increasing the fire resistance of concrete and other cementitious products, which are used intensively in structures, is an important issue developed by researchers. For this purpose, in this study, the physical and mechanical properties of lightweight cementitious composite mortars produced using 3 mm long physically recycled textile type glass fiber, as well as the maximum temperatures that the mortars can withstand when exposed directly to flame and the weight losses corresponding to these temperatures were determined. In this study, waste cardboard is the main component used in the preparation of composite mortar together with cement, aggregate and filler materials. Additionally, aluminum trihydrate (ATH) was used in powder form to delay combustion and prevent smoke formation under high temperature conditions. In order to determine the effect of glass fibers on the high temperature resistance of cementitious composite mortars, ten different composite mortar mixtures were produced by using glass fibers at the rates of 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.50%, 2.00%, 3.00%, 4.00% and 6.00% by weight instead of waste cardboard. According to the study results, as the fiber ratio increased, the water absorption and apparent porosity of the mortars decreased, and their flexural strength increased as expected. The increase in the use of fibers increased the maximum temperature value that could occur on the surface exposed to flame from 902 °C to 1088 °C. In addition, despite the increase in the surface temperature of the material, the weight loss of the mortars directly after exposure to flame decreased with the use of fibers.

Keywords: Direct flame, high temperature, composite mortar, glass fiber, weight loss.

1. GİRİŞ

Cam elyafı, yüksek çekme mukavemeti, mükemmel elastisite, iyi termal performans, mükemmel su direnci, iyi elektrik yalıtımı, iyi ısı yalıtımı, iyi ses yalıtımı ve büzölmeye karşı direnç kabiliyeti ile karakterize edilmektedir [1]. Lif kullanımının çimentolu ürönlere ilave ettiğı avantajın genellikle mekanik özellikler üzerinde olması beklenmektedir [2–5]. Literatüre göre, cam elyaf takviyeli betonunun basınç ve eğilme dayanımı lif hacmi oranı ile artarken, optimal miktar aşıldığında dayanım azalmaktadır [6,7]. Çankal ve arkadaşları [8],

%1 cam elyaf takviyesinin çimento harcının eğilme dayanımını referans harca göre %21,22 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Kısa boyutlu cam elyaflar öncelikle mikro çatlakların yayılmasını kontrol ederken ve nihai mukavemeti artırırken, uzun cam elyaflar ise makro çatlakları durdurur ve betonun çatlak sonrası deformasyonunu iyileştirir. Cam elyaf takviyeli kompozitin çekme mukavemeti elyaf karakteristik özelliklerine (elyaf uzunluğu, elyaf dağılımı, elyaf yönelimi) bağlıdır [9]. Kolon-kiriş birleşimlerine cam elyafların dahil edilmesi sertliklerini, sünekliklerini ve mukavemetlerini iyileştirmiştir [10]. Atık cam elyaflarının %2 oranında kullanılması, silindire sıkıştırılmış beton karışımlarının aşınma direncini önemli ölçüde artırmıştır [11]. Cam elyaf takviyeli beton, köprü döşemeleri gibi geniş yüzeylerde erken yaşta oluşan mikro çatlakları azaltmak için uygundur [12]. Ancak, cam elyaf katkılı çimentolu ürünlerin özellikleri sadece mekanik açıdan beklentileri karşılaması değil cam elyafı kullanılarak üretilen çimentolu ürünlerin, zorlu çevre koşullarına maruz kaldığında daha uzun bir hizmet ömrüne sahip olması beklenmektedir [6].

Çimentolu ürünler kullanım yerine göre yüksek sıcaklığa maruz kalabilirler. Yüksek sıcaklığa maruz kalan beton veya çimento bağlayıcılı ürünler yüksek sıcaklıktan olumsuz yönde etkilenirler. Sıcaklık ortalama 105 °C olduğunda, standart formülasyonda üretilen çimentolu ürün içerisindeki kılcal su ve adsorbe edilen su buharlaşır. Sıcaklık 200 °C olduğunda, C-S-H koloidi bağ kuvvetini kaybeder. Sıcaklık 250 - 300 °C aralığına ulaştığında, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'ün hidratlarının çoğu veya C-S-H koloidinin bağlı suyu kaybolur. Sıcaklık 400 - 700 °C aralığında, C-S-H koloidinin kalan bağlı suyu tamamen ayrışır. Sıcaklık 500 °C olduğunda, hidrate çimentodaki suyun çoğu kaybolur. Sıcaklık 440 - 580 °C olduğunda, hidrate çimentodaki $Ca(OH)_2$ ayrışır [7]. 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, çimento pastası büzülmeye başlar ve agregalar genleşmeye başlar, bu da matriste önemli termal gerilmelerine neden olur [13]. Bu da matristeki çatlakları artırır ve çimento pastası ile agregalar arasındaki bağ azaltır, bunun sonucunda da mukavemet daha da bozulur [14]. Cam lifi takviyeli çimentolu kompozit harçların iyi derecede yangın direncine sahip olabileceği literatürde belirtilmektedir [13,15]. Liflerin kullanımı, termal kaynaklı çatlakların oluşumunu ve yayılmasını azaltarak betonun yangına karşı dayanıklılığını artırabilir [16,17]. Ayrıca, cam elyaf yüksek ısı ve yangın dayanımına sahip oksitlerin bir karışımını içerdiğinden kolaylıkla yanmaz, ancak yüksek sıcaklıklarda yumuşayabilir ve eriyebilir. Bu da cam elyafın yangına karşı dirençli ürün üretiminde kullanılabilmesine olanak tanımaktadır.

Literatürde polipropilen ve çelik lifleri kullanılarak üretilen çimentolu ürünlerin yüksek sıcaklık özelliklerinin incelendiği geniş miktarda çalışma bulunmaktadır. Serrano ve arkadaşları [18], 400°C sıcaklıkta açık aleve maruz bırakılan betonun basınç ve çekme davranışını incelemişlerdir. Polipropilen lif ile güçlendirilmiş betonun, çelik lif ile güçlendirilmiş muadilinden yangına karşı daha dayanıklı olduğu ve %2 polipropilen lif eklenmesinin betonun yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımını kontrol karışımına göre %68 oranında artırdığını tespit etmişlerdir. Lee ve arkadaşları [19], yüksek polipropilen lif içeriğinin kullanılmasının 400 °C'ye maruz kalan betonda mikro çatlakların oluşmasına yol açtığını bildirmiştir. Yermak ve arkadaşları [20] tarafından da benzer bulgular rapor edilmiştir; polipropilen lif ile güçlendirilmiş beton karışımlarının çelik lif ile güçlendirilmiş muadillerine göre yüksek sıcaklık etkileşimi sonrası daha gözenekli olduğu belirtilmiştir. Jameran ve arkadaşları [21], çelik lif ve polipropilen lif içeren betonun yangın davranışını incelemişlerdir. Toplam lif içeriği %1,5'ta sabit tutulmuş ve betona farklı oranlarda çelik lif ve polipropilen lif eklenmiştir. Yangına maruz kaldıktan sonra en yüksek mukavemet %100 çelik lif ve %0 polipropilen lif içeriklerinde elde edilmiştir. Doğrudan alev etkisi testi, bir numunenin aleve veya ateşe doğrudan maruz bırakılması sırasında alev direncini belirlemek için, yarı nitel bir yöntemdir [22,23]. Bu yöntemde, belli periyotta sıcaklık farkı kaydedilir ve zaman-sıcaklık korelasyonu olarak değerlendirilir ve ayrıca fiziksel değişiklikler de tespit edilir. Yayınlanmış literatürde, doğrudan alev uygulamaları [24], doğrudan alev direnci testleri [25], yangına dayanıklılık testleri [26,27], yangın geciktirici testleri [28] ve çok sayıda farklı malzeme için çok sayıda yangın/alev performansı araştırması, yangın davranışı ve yangın performansı üzerine kapsamlı bir şekilde incelenmektedir [29].

Son yıllarda ise çimentolu ürünlerde cam lifi yüksek yangın direnci özelliklerinin artırılması bağlamında araştırmalara konu olmaktadır. Moghadam ve Izadifard [30], betonun yangına dayanıklılığını iyileştirmede çelik lif ve cam elyafın performansını karşılaştırmıştır. %0,25 cam elyaf ile takviye edilmiş karışımın, kontrol karışımından %213 daha yüksek olan en yüksek çekme mukavemetini gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca cam elyafları 500 °C'de kayma direncini artırmada etkili olarak bulunmuştur. Wang ve arkadaşları [7] Farklı uzunluk ve oranlarda kullanılan cam elyafların betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımına olan etkilerini ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası betonu test etmişlerdir. Cam elyafların eklenmesinin, yüksek sıcaklık etkisinden sonra betonun basınç dayanımını artırabildiğini ve bu artışın elyaf uzunluğu ve miktarıyla arttığını tespit etmişlerdir.

Ravikumar ve Thandavamoorthy [31] yaptıkları çalışmalarında cam elyaf eklenmeden üretilen beton örneklerinin 300°C sıcaklığa 2 saat maruz bırakıldıklarında basınç dayanımındaki değişim yüksek sıcaklık etkisi olmadan normal dayanımına göre %32 daha azdır. %0,5 cam elyaf eklenmesiyle, basınç dayanımındaki azalma orijinal dayanımına göre %25'tir. Benzer şekilde, %1 elyaf eklenmesiyle, basınç dayanımındaki azalma orijinal dayanımına göre %10'dur. Bu çalışmada, normal betonla karşılaştırıldığında elyaf takviyeli betonun yangına karşı daha yüksek bir dirence sahip olduğunu tespit edilmiştir. Moosaei ve arkadaşları [14] %0,5, %1, %1,5 ve %2 olmak üzere dört farklı lif içeriğine sahip çelik lif, polipropilen lif ve cam lif olmak üzere üç farklı lif türüyle güçlendirilmiş betonun yangına dayanıklılığını araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, yüksek sıcaklık etkileşimi sonrası en büyük basınç ve eğilme dayanımları, %0,5 cam lif içeren karışımlar için elde edilmiş ve bunlar kontrol karışımından sırasıyla %117 ve %145 daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Keykha [32] cam elyaf takviyeli betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımları üzerinde yüksek sıcaklığın etkilerinin incelenmesi amacıyla betona %1, %2 ve %3 oranlarında cam elyaf ilave etmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, cam elyaf 600 °C'de erimemiş ve bu sıcaklıkta ısıtıldığında özellikleri azalsa da beton numunelerin çekme ve eğilme dayanımlarını iyileştirmede etkililiğini koruduğu tespit edilmiştir. Wu ve arkadaşları [33] cam elyafı ve yüksek sıcaklığın geri dönüştürülmüş agregalı betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası cam elyaflı betonun basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının cam elyafsız kontrol betonununkinden daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

İnşaat ve yapı sektörü, teknolojilerdeki sürekli yenilikler ve ilerlemelerle yönlendirilen sürekli bir gelişme yaşamaktadır. Bu ilerlemelerin önemli bir alanı, yaygın kullanılan inşaat malzemelerinin sürdürülebilirliğini artırmak için yeni hammaddelerin kullanılmasıdır. Atık malzemelerin ve katkı maddelerinin çimentolu ürün imalatına entegrasyonu, atıkların zararlı çevresel etkisini azaltmayı amaçlayan bir stratejidir. Bu çalışmada kolaylıkla yanabilen karton atıkları üretilen çimento harcında dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Verimli ve doğa dostu ürünlerin geliştirilmesinde geri dönüştürülmüş malzemelerin çimentolu bileşenlerde kullanımı önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yangına dayanıklı yapılar üzerindeki etkileri incelenmek üzere iki farklı atık malzeme değerlendirilmiştir: atık karton ve tekstil çamuru. İzmir'deki geri dönüşüm firmalarından temin edilen karton, öğütülerek 1 mm'nin altındaki boyutlara getirilmiş; tekstil çamuru ise kot kumaşların yıkama işlemi sırasında oluşan

atıklardan elde edilip kurutularak kullanılmıştır. Bu malzemeler, sürdürülebilirlik ve atık yönetimi açısından alternatif lifli katkıları olarak ele alınmıştır. Haigh ve arkadaşları [34] çalışmalarında, atık kartondan elde edilen kraft liflerinin (KF) çimentolu kompozitlerdeki mekanik performansa etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Beton örneklerinde çimento yerine kısmen metakaolin (MK) ve kraft lifleri kullanılmış; ayrıca liflerin çimento matrisindeki alkali ortamdan daha az etkilenmesi için yüzeyleri silika dumanı (SF) ile kaplanmıştır. Üç farklı karışım tasarımı değerlendirilmiş: %5 ham KF içeren, %5 yüzey modifiye edilmiş KF içeren ve matris modifiye edilmiş örnekler. Tüm KF içeren karışımların basınç dayanımı kontrol örneğine göre düşük olmakla birlikte, MK modifikasyonu uygulanan numuneler en yüksek çekme dayanımını (11 MPa) göstermiştir. Lif modifikasyonu yapılan numunelerde ise 20 MPa basınç ve 9 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Ham KF'li örnekler ise 2.5 MPa ile en yüksek eğilme dayanımına sahip olmuştur. Kontrol örneğinin dayanımları sırasıyla 25 MPa (basınç), 10 MPa (çekme) ve 2.6 MPa (eğilme) olarak ölçülmüştür. Ahmad ve arkadaşları [35] çalışmalarında atık kartonun agrega yerine kısmen kullanımıyla düşük maliyetli, hafif ve çevre dostu beton tuğlalar üretme potansiyeli incelemişlerdir. Standart bir karışım oranı bulunmadığından, deneysel olarak 1:1:1.5, 1:1:2 ve 1:2:4 (çimento: karton: kum) oranlarında üç farklı karışım tasarımı denenmiştir. Hazırlanan küp numuneler 7, 14 ve 28 gün kür edilerek basınç dayanımı test edilmiştir. Sonuçlar, karton katkısının dayanımı düşürdüğünü ortaya koymuş; bu nedenle bu tür tuğlaların sadece yük taşımayan duvarlarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Çalışma, atık kartonun sürdürülebilir yapı malzemesi olarak kullanımına katkı sağlamaktadır.

Yüksek sıcaklığa dirençli harçlar çimento, kum, yüksek alümina içerikli kil ve kalsiyum alüminat gibi diğer özel bileşenlerin bir karışımı olarak yapılabilir. Mika, doğal bir mineral olarak genellikle hidro alüminyum silikat bileşiği formundadır. Yüksek ısıya direnci sebebiyle birçok ev aletlerinin yapımında da yaygın kullanılabilecek inorganik bir malzemedir [36]. Bu makalede, doğal mika ve kıyılmış atık karton ana dolgu materyali olarak kullanılmış ve cam elyaf ilavesiyle ısı dirençli çimento harçları üretilmiştir. Harçların doğrudan alev maruz kalmadan önceki fiziksel ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, özellikle üretilen hafif harçların yüzeylerine doğrudan alev uygulanmış ve harçların ulaşabileceği en büyük sıcak değerleri tespit edilmiştir. Araştırmanın ana odak noktası olarak, cam lif miktarındaki değişim ile malzemelerin yüzeylerinde taşıyabilecekleri en yüksek sıcaklık değerlerindeki değişimi tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Harç Tasarımlarında Kullanılan Malzemeler

Çalışma kapsamında üretilen kompozit harçlarda bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Harç üretiminde ana agrega olarak tane boyutu 1/2 mm olacak şekilde Nevşehir bölgesinden temin edilen pomza kullanılmıştır. Karışım tasarımında Aydın ilinden en büyük tane boyutu 350 µm olarak (tane boyutu 0/350 µm aralığında) sınıflandırılmış şekilde tedarik edilen doğal mika minerali bu çalışmada yüksek sıcaklığa dayanıklılığı iyileştirmek için dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır.

Verimli bir ürün, yüksek performans, verimlilik, ekonomiklik ve doğa dostu özelliklere sahip olmalıdır. Bu bağlamda, geri dönüşüm ilkesini benimseyen ürünlerin çimentolu bileşenlerde kullanılabilirliği önemlidir. Bu sebeple, geri dönüştürülmüş malzemelerin değerlendirilmesi ve yangına dayanıklı yapılar üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar giderek önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, atık karton, çimento, agrega ve dolgu malzemeleri ile birlikte kompozit harç hazırlanmasında kullanılan ana bileşendir. Karton esas olarak odun selülozundan oluşur ve kayadan sonra dünyada en bol bulunan ikinci malzeme olarak kabul edilen lifli bir malzeme olarak kabul edilir [37]. Atık karton, İzmir ilindeki geri dönüşüm firmalarından tedarik edilmiştir. Mukavva ve ambalaj sanayi üretiminde kullanılan karton kağıtların, üretim artıkları öncelikle kıyılmış ve en büyük boyutu 1 mm altında olacak şekilde sınıflandırılarak karışımlarda kullanılmıştır. Çalışma kapsamında atık değerlendirme ve sürdürülebilirlik açısından kullanılan bir diğer lifli malzeme ise tekstil çamurudur. Bu malzeme, kot kumaşların yıkama işleminde proseste oluşan tekstil partiküllerinin yoğun olarak yer aldığı bir atıktır. Tekstil çamuru öncelikle susuzlaştırılmış ve daha sonra etüvde kurutularak kullanılmıştır. Karışımların viskozitesinin kontrolü için 150000 mPa.s viskoziteli selüloz eter kullanılmıştır.

Karışım tasarımlarında, yüksek sıcaklık etkisinde yanmayı geciktirme ve duman oluşumunu engellemek amacıyla toz formda alüminyum trihidrat (ATH) kullanılmıştır.

Bu deneysel çalışmada, cam liflerinin kompozit harçlarda değerlendirilmesi ile harcın doğrudana alev kaynağı altındaki performansını incelemek için, ortalama 3 mm uzunluğunda fiziksel geri dönüşümle elde edilmiş tekstil tipi cam lif kullanılmıştır. Cam lifinin özgül ağırlık ağırlığı 2,60 gr/cm³, lif çapı 11-16 (±%18) µm, çekme dayanımı >3000 MPa, Elastisite Modülü ≥62 GPa, nem oranı <%0,12 ve iplik oranı <%0,10'dur.

Çalışmada kullanılan çimento, mika ve pomzanın kimyasal içeriği Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Karışımlarda kullanılan bazı malzemelerin kimyasal bileşenleri

Bileşen	CEM I-42.5R (%)	Mika (%)	Pomza (%)
SiO ₂	20,26	54,15	74,10
Al ₂ O ₃	3,65	28,56	13,45
Fe ₂ O ₃	4,38	1,01	1,40
TiO ₂	-	0,333	-
CaO	64,37	0,19	1,17
MgO	1,37	1,65	0,35
Na ₂ O	0,25	0,99	3,70
K ₂ O	0,49	9,01	4,10
P ₂ O ₅	-	0,09	-
Kızdırma Kaybı	-	3,54	1,34

2.2. Kompozit Harç Tasarımları ve Deneysel Metotlar

Bu deneysel çalışmada, cam liflerinin çimento esaslı kompozit harçların yüksek sıcaklık dayanıklılığı üzerindeki etkisini araştırmak için 10 farklı harç karışım oranı tasarlanmıştır. Cam lifi içermeyen referans karışımı, cam lifi kullanımından kaynaklanabilecek etkileri doğru bir şekilde incelemek için bir referans çimentolu kompozit harç karışımı olarak tasarlanmıştır. Çimentolu kompozit harç karışım tasarımı Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Çimentolu kompozit harç örneklerinin hazırlanmasında kullanılan karışım tasarımı (ağırlıkça %)

Karışım	Çimento	ATH	Tekstil Çamuru	Selüloz Eter	Pomza	Mika	Atık Karton	Cam Lifi	Su/katı
R	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	17,85	0,00	1,20
CL0,25	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	17,60	0,25	1,20
CL0,50	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	17,35	0,50	1,20
CL0,75	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	17,10	0,75	1,20
CL1,00	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	16,85	1,00	1,20
CL1,50	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	16,35	1,50	1,20
CL2,00	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	15,85	2,00	1,20
CL3,00	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	14,85	3,00	1,20
CL4,00	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	13,85	4,00	1,20
CL6,00	30,00	1,20	3,50	0,45	21,00	26,00	11,85	6,00	1,20

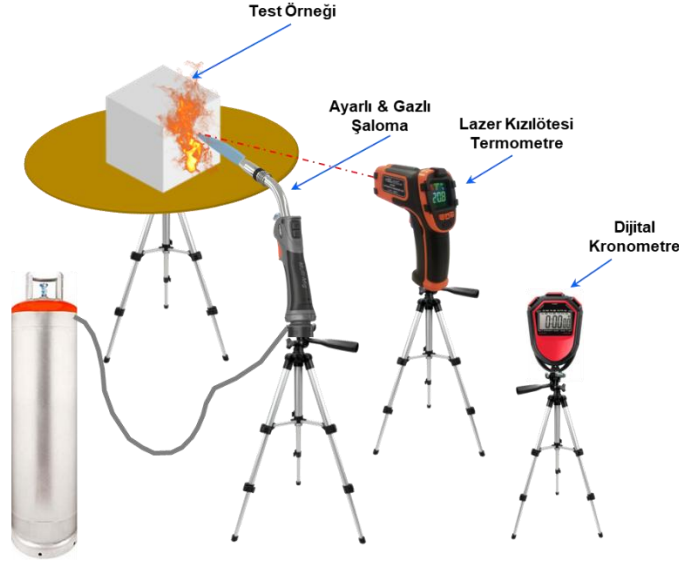
Tablo 2’den de rahatlıkla görülebileceği gibi, cam liflerin çimentolu kompozit harçların yüksek sıcaklık dayanıklılığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla atık karton

yerine ağırlıkça %0, %0,25, %0,50, %0,75, %1,00, %1,50, %2,00, %3,00, %4,00 ve %6,00 oranlarında cam lifi kullanılarak 10 farklı kompozit harç karışımı üretilmiştir. Tüm karışım tasarımında uygun bir karşılaştırma yapabilmek için çimento (ağırlıkça %30), ATH (ağırlıkça %1,20), tekstil çamuru (ağırlıkça %3,50), selüloz eter (alırılıkça %0,45), pomza (ağırlıkça %21,00) ve mika (ağırlıkça %26,00) oranı sabit tutulmuştur. Ayrıca, tüm on karışım için yeterli işlenebilirliği sağlamak amacıyla su/katı oranı 1,20 olarak sabitlenmiştir. Karıştırma aşamasında, önce tüm katı formdaki bileşenler miksera konulmuş ve homojen kuru karışım elde etmek için 2 dakika karıştırılmıştır. Taze çimento esaslı kompozit karışımları üretmek için miksera uygun olarak tespit edilen su miktarı eklenmiş ve karışım 2 dakika daha karıştırılmıştır. Su, normal musluk suyu olup sıcaklığı $20 \pm 2^\circ \text{C}$ olarak saptanmıştır. Numuneler, sıcaklığı $21 \pm 1^\circ \text{C}$ ve bağıl nemin %95 olduğu bir kür tankında kürlenmiştir.

Taze ve sertleştirilmiş harç birim ağırlıklarının tespiti, taze ve sertleştirilmiş kompozit numuneler üzerinde sırasıyla TS EN 1015-6 [38] ve TS EN 1015-10 [39] standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Görünür gözeneklilik ve kütlece su emme testleri ASTM C642-13 [40] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit harçların eğilme ve basınç dayanımları TS EN 1015-11 [41] standardına uygun olarak saptanmıştır.

Doğrudan alev tutularak yüksek sıcaklık altında kompozit harçların davranışını incelemek için, Tablo 2’de verilen karışım tasarımı kullanılarak on seri $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Üretilen bu numuneler diğer testler için kullanılacak numuneler ile aynı şartlarda kür edilmiştir. Bu deneysel çalışmada, cam lifi içeren kompozit harçların yüksek sıcaklıktaki aleve maruz kaldığında doğrudan alev davranışı araştırılmıştır. Her bir seri için harç yüzeyleri, bir ayarlı ve gazlı şaloma kullanılarak ulaşabileceği en büyük sıcaklık değerine kadar ısıtılmıştır. Kullanılan şalomanın ucu ile numune yüzeyi arasındaki mesafe ortalama 2 cm olarak tutulmuştur. Çalışmada, numunelerin doğrudan aleve temas eden yüzeylerinin sıcaklığını ölçmek için profesyonel lazer tipi termometreler kullanılmıştır. Şalomanın açık alevi, test edilen her bir numunede ısıya maruz bırakılan numune yüzeyinin merkez noktasına denk gelecek şekilde konumlandırılmış olup, ortalama 1 cm çapında dairesel bir alanda yakma etkisi oluşturabilecek sıcaklık bölümü meydana getirilmiştir. Bu sıcaklık numune yüzeyi merkez noktasından başlayarak kenar bölümlerine doğru ısı akışı şeklinde azalan sıcaklık dağılımı sergilemektedir. Sıcaklık ölçümlerinde açık alev üreten şalomanın kızılötesi termometre üzerinde oluşturabileceği olası sıcaklık etkileşiminden etkilenmemesi için, tüm sıcaklık değerleri numune yüzeyinde merkezden 3 cm uzaklıkta

önceden işaretlenmiş noktasal bir konumdan alınmıştır. Bu noktasal konumda, şalomanın açık alev etkisinin oluşmadığı belirlenmiştir. Kompozit harçlar ortalama 7,50 dakika doğrudan aleve maruz bırakılmıştır. Bu süre içerisinde, aleve maruz kalan yüzeyden belli periyodik sıcaklık okumaları alınmıştır. Alev kaynağı, lazer sıcaklık ölçüm cihazı ve test numunesini içeren deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Sıcaklık etkisi analizi ölçüm düzeneğinin sembolik gösterimi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

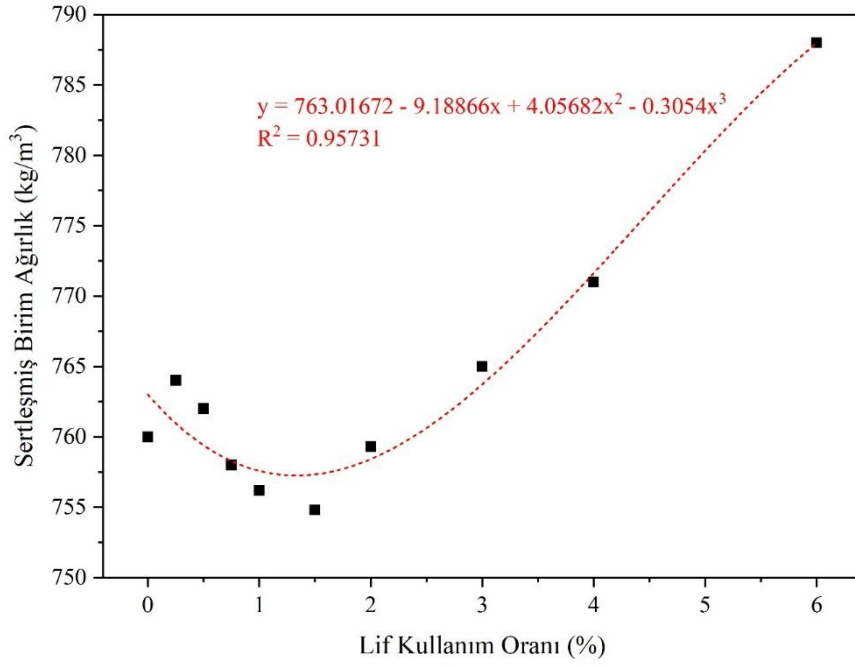
3.1. Harç Karışımlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Farklı karışım tasarımlarında hazırlanan çimentolu kompozit harç örneklerinin bazı teknik bulguları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Çimentolu kompozit harç örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

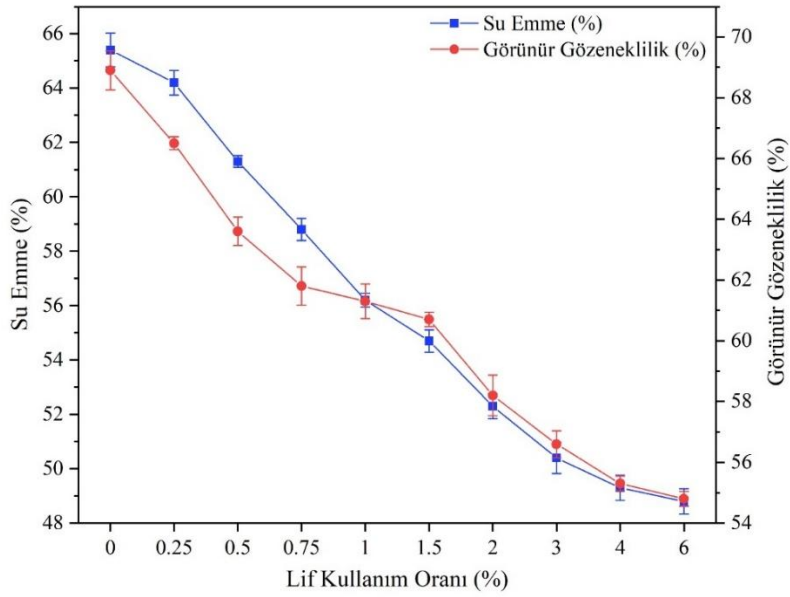
Karışım	Yaş Birim Ağırlık (kg/m ³)	Sertleşmiş Birim Ağırlık (kg/m ³)	Gözeneklilik Oranı (%)	Su Emme Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
R	1389	760	68,9	65,4	8,67	1,35
CL0,25	1393	764	66,5	64,2	8,80	1,72
CL0,50	1395	762	63,6	61,3	8,63	1,99
CL0,75	1400	758	61,8	58,8	8,28	2,24
CL1,00	1339	756	61,3	56,2	8,25	2,52
CL1,50	1403	755	60,7	54,7	7,67	2,80
CL2,00	1407	759	58,2	52,3	8,33	3,12
CL3,00	1426	765	56,6	50,4	8,81	3,57
CL4,00	1442	771	55,3	49,3	9,03	3,71
CL6,00	1481	788	54,8	48,8	9,65	3,88

Çimentolu kompozit harç örneklerinin taze ve sertleştirilmiş yoğunlukları Tablo 3'te verilmiştir. Harçların taze birim ağırlıkları incelendiğinde, harçlarda atık karton çıkarılıp yerine cam lifi kullanıldığında, artan cam lifi miktarı ile taze birim ağırlıkların artma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, sertleşmiş birim ağırlıklarda, cam lif miktarının %1,50 kullanım oranına kadar harçların sertleşmiş birim ağırlıkları çok az da olsa düşmekte, bu değerden sonra sertleşmiş birim ağırlıklar artma eğiliminde olarak saptanmıştır (Şekil 2). Sertleşmiş harçlardaki bu birim ağırlık değişimleri atık kartonun ve cam liflerinin harçta hava sürüklemeye etkisinin farklılığından kaynaklanabilir. Literatürde hem lif kullanımının hava sürüklemeye etkisi olduğu yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [33]. Benzer şekilde, atık karton kullanımının da gerek hafif bir malzeme olması gerekse selüloz içeriğinden dolayı hava sürüklemeye etkisi ile ürünleri hafifleten bir etkisi bulunmaktadır [37]. Bu çalışmada da nispeten daha hafif olan atık kartonun yerine cam liflerinin kullanılması harçlarda birim ağırlıkları belli bir orandan sonra artırmıştır. Ayrıca, TS EN 998-1 [42] standardına göre hafif harçların sertleşmiş yoğunlukları 1300 kg/m^3 'ten düşük olmalıdır. Bu çalışmada üretilen tüm kompozit harçlar bu koşula göre hafif harç kategorisinde değerlendirilebilmektedir. Bu deneysel çalışmada, çimentolu kompozit harçların sertleşmiş yoğunlukları 760 ile 788 kg/m^3 arasında değişmektedir. Literatürde, sertleşmiş yoğunluk aralığı $700-800 \text{ kg/m}^3$ olan harçlar/betonlar hafif/ultra hafif harç/beton olarak tanımlanmaktadır [43]. Bu bağlamda, bu çalışmada $700-800 \text{ kg/m}^3$ sertleşmiş birim ağırlıkta harçlar üretildiğinden bu harçlar ultra hafif harç olarak tanımlanabilir. Slosarczyk ve arkadaşlarının çalışmalarının sonuçlarına göre [44], silika aerojel içeren çimento esaslı kompozit ürünlerin sertleştirilmiş yoğunlukları $1,78$ ile $0,70 \text{ g/cm}^3$ arasında değişebilirken, geleneksel betonlar/çimento harçları $2,40$ ile $2,70 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen yoğunluklara sahiptir. Öte yandan, 500 kg/m^3 gibi çok düşük yoğunluk değerine sahip aerojel kullanılarak üretilen ve ısı yalıtım özellikleri ultra yüksek olabilen ürünler olsa bile [45], bu ürünlerde mekanik özellikler açısından gerekli koşulları sağlayamama gibi bir sorun ortaya çıkabilir.



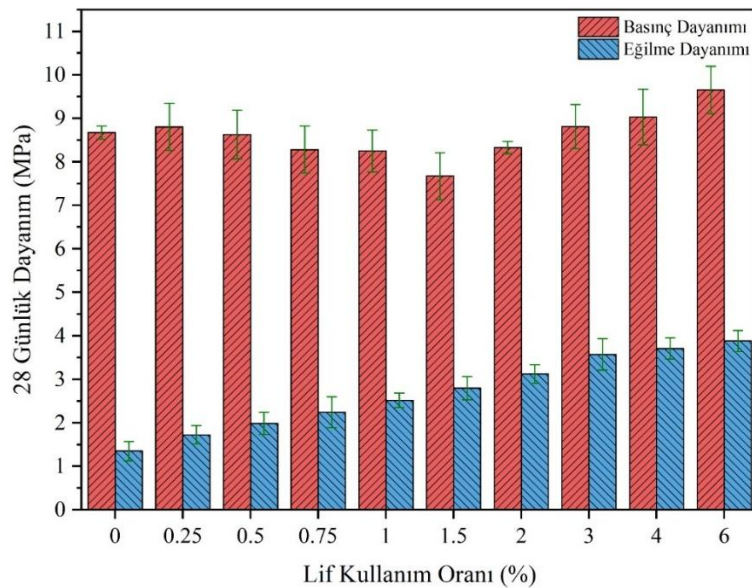
Şekil 2. Çimentolu kompozit harçların sertleşmiş birim ağırlıkları

Çimentolu kompozit harçların görünür gözeneklilik ve su emme değerleri Tablo 3 ve Şekil 3'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre kompozit harçların hem su emmesi hem de görünür gözenekliliği cam lif kullanımındaki artışla azalmaktadır. Referans harçta görünür gözeneklilik %68,9 iken, harçtaki cam lif oranı arttıkça görünür gözeneklilik %54,8'e kadar (CL6,00 karışımı) azalmıştır. Bu çalışma kapsamında, atık karton ile cam lifleri yer değiştirilerek kullanılmıştır. Azalan atık karton ile artan cam lifi oranıyla birlikte harçların görünür gözenekliliğinin azaldığı gözlemlenmektedir. Literatürde hem cam lifinin hem de atık kartonun çimento bağlayıcılı ürünlerde hava sürüklediği ve/veya boşluk oluşturduğu belirtilmektedir [33,46]. Ancak, bu çalışmada büyük oranda selülozdan oluşan atık kartonların cam liflerine oranla harçlarda daha fazla hava sürükleyerek daha çok boşluk oluşturduğu sonucuna varılabilir. Böylece, azalan atık karton miktarı ile daha az boşluk harçta yer almış ve harçların görünür gözenekliliği azalmıştır. Benzer şekilde, yüksek su emme özelliğine sahip atık karton miktarı harçta azaldıkça harcın su emme değerlerinde de azalma olduğu gözlemlenmiştir. Referans karışımının su emme oranı %65,4 iken, cam lifi içeren harçların en düşük su emme oranı %48,8 olarak CL6,00 karışımında belirlenmiştir. Ayrıca cam liflerinin su emme kapasitesinin oldukça düşük olması nedeniyle harçların daha az su emdiği söylenebilir.



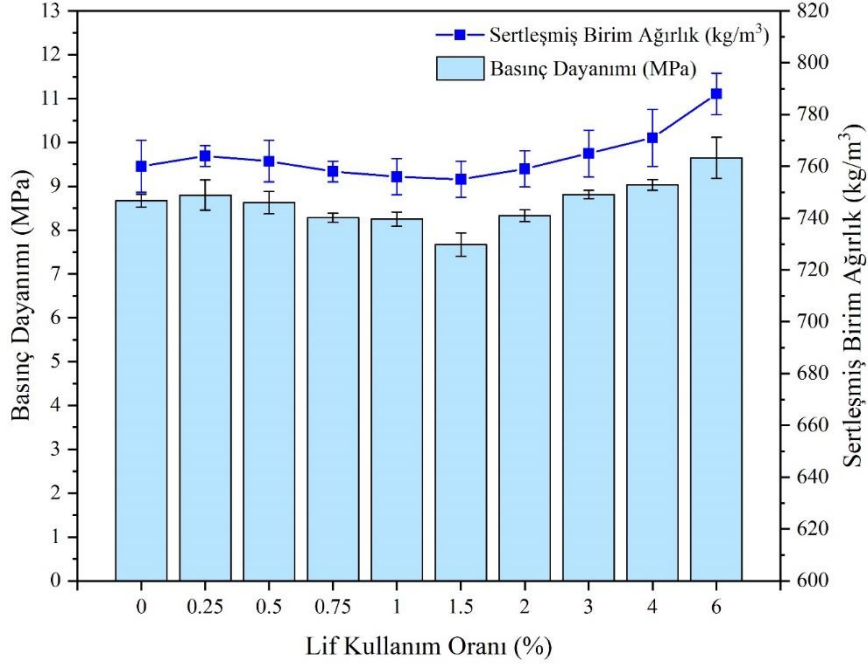
Şekil 3. Çimentolu kompozit harçların su emme ve görünür gözeneklilikleri

Çimentolu kompozit harçların 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerleri Tablo 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Cam lifi ile üretilen kompozit harçların %1,50 cam lifi kullanım oranına kadar basınç dayanımlarının referans harcının basınç dayanımına göre bir miktar da olsa azaldığı, bu oranın üzerinde cam lifi kullanımı ile harçların basınç dayanımlarının tekrar arttığı gözlemlenmektedir. Matris yapısının gözenekliliğinin azalması ve numunelerdeki sertleşmiş yoğunluğunun artması bu olgunun başlıca nedenidir. Ayrıca, yük altında liflerin harçta çatak gelişimini azaltması da çimentolu kompozit harçların dayanımını olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 4. Çimentolu kompozit harçların basınç ve eğilme dayanımları

Çimentolu malzemelerin sertleşmiş birim ağırlığı ile basınç dayanımının doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Kompozit harçların lif kullanım oranına bağlı sertleşmiş birim ağırlığı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Çimentolu kompozit harçların lif kullanım oranına bağlı basınç dayanımı ile sertleşmiş birim ağırlık ilişkisi

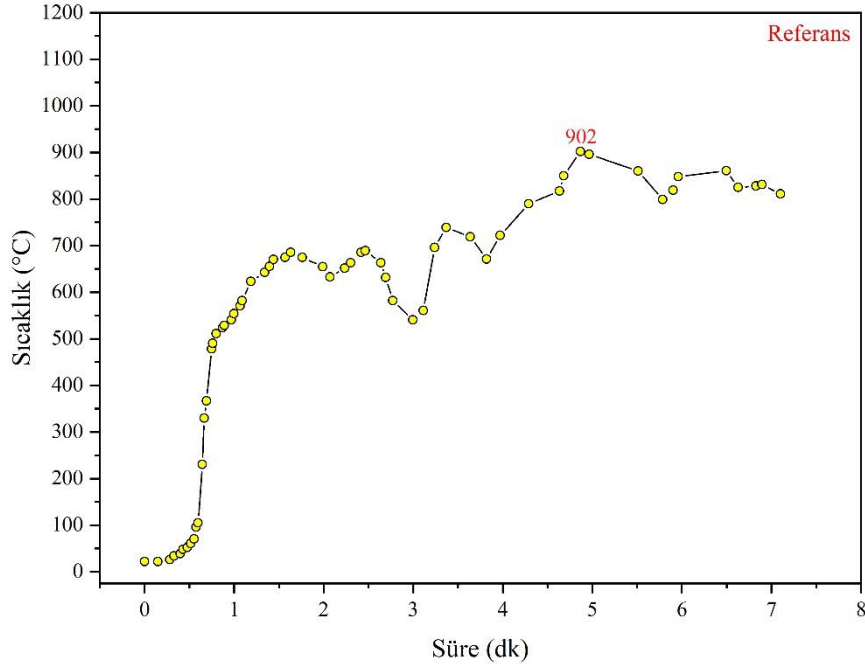
DeneySEL test sonuçlarına göre, çimento harçlarının sertleşmiş birim ağırlıkları ile basınç dayanımının doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. %1,50 lif kullanım oranına kadar harçların birim ağırlıklarının azaldığı, aynı şekilde basınç dayanımlarının da azaldığı, bu lif oranının üzerinde lif kullanıldığında birim ağırlığın arttığı ve basınç dayanımının da tekrar arttığı gözlemlenmiştir. Daha hafif formda olan karton atığının harç tasarımından çıkarılıp aynı oranda cam lifi katılması ile harçların birim ağırlığı artmış ve basınç dayanımları da benzer şekilde iyileşmiştir. Öte yandan bu çalışmada üretilen tüm numunelerin basınç dayanımı değerleri TS EN 998-1 [68] standardında belirtilen sınır değerler içerisinde kalmaktadır. Standartta göre 28 günlük basınç dayanımı aralığı dört sınıfa ayrılmaktadır; CS I kategorisi basınç dayanımı 0,4-2,5 MPa; CS II 1,5-5,0 MPa; CS III 3,5-7,5 MPa; CS IV kategorisi 6 MPa'dan büyük olanları kapsamaktadır. Ayrıca bu standartta ısı yalıtım harçlarının basınç dayanımının CS I veya CS II kategorisinde olması gerektiği belirtilmektedir. Deney numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre tüm sertleşmiş çimento harcı numuneleri CS IV sınıfı değer aralığında yer almaktadır. Sertleşmiş

çimento harcı numunelerinin basınç dayanımları 8,637-9,05 MPa aralığında değişmektedir. Bu değerler TS EN 998-1 [42] standardındaki mekanik şartları sağlayabilen iç ve dış mekân uygulamaları için uygun olabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 3 ve Şekil 4 incelendiğinde, R kodlu referans harcı örneğinin 28 günlük eğilme dayanımının ortalama 1,35 MPa olarak tespit edildiği görülmektedir. Test örneklerinde en yüksek eğilme dayanımı değeri ise %6 cam lifi kullanılan CL6,00 kodlu karışımlarda ortalama 3,88 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu mukavemet artışı, ilave yük taşıma kapasitesi sağlayan ve yapıyı mikro çatlaklardan koruyan lif/matris yapısının oluşumu ile ilişkilendirilebilir [5,47]. Cam liflerinin harçlarda eğilme dayanımını arttırdığı literatür çalışmalarında da tespit edilmiştir [13,31,46]. Çimento harçlarının eğilme dayanımları ile birim ağırlıkları karşılaştırıldığında, test örneklerinin basınç dayanımı ve birim ağırlık ilişkisine benzer şekilde, birim ağırlıklar arttıkça eğilme dayanımları da artmıştır.

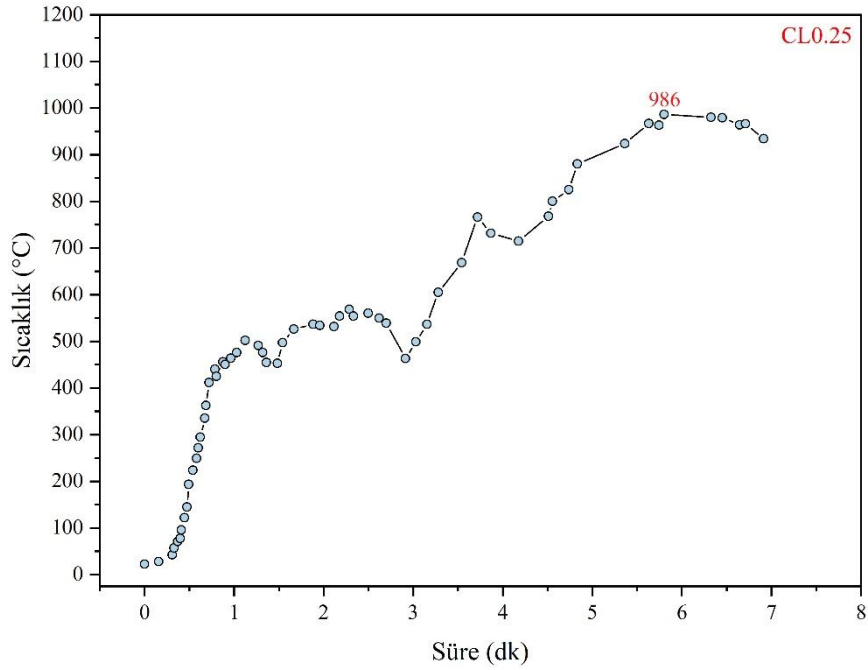
3.2. Doğrudan Alev Testi

Doğrudan aleve maruz kalan referans ve test harçları için kaydedilen yüzey sıcaklıkları Şekil 6 ile Şekil 15 arasında verilmiştir. Referans çimento harcı örneği ve belli oranlarda cam lif içeren test örnekleri için, sıcaklıklar testin tüm süresi boyunca kaydedilebilmiştir. Test süresince cam liflerinde önemli bir bozunma olmadığı gözlemlenmiştir. Lazer termometre ile ölçülen sıcaklık eğrilerinin her birinde maksimum sıcaklık T_{maks} (°C), maksimum sıcaklığa alev etkisinin başlangıcından itibaren ne zaman (dakika) ulaşıldığıyla birlikte belirtilmiştir. Çalışma kapsamında uygulanan alev testi yönteminde çimento esaslı harç örneklerinin yüzeyinden ölçülen sıcaklık değerlerinin artışı, harcın doğrudan sıcaklığa karşı dayanımının artması ve/veya iyileşmesi bağlamında değerlendirilmemektedir. Numune yüzeyinde artan ısı akısı sebebiyle, numune yüzeyinde gözlemlenebilen deformasyonlara bağlı kütle kaybı değerleri bazında bir değerlendirme yapılmıştır.

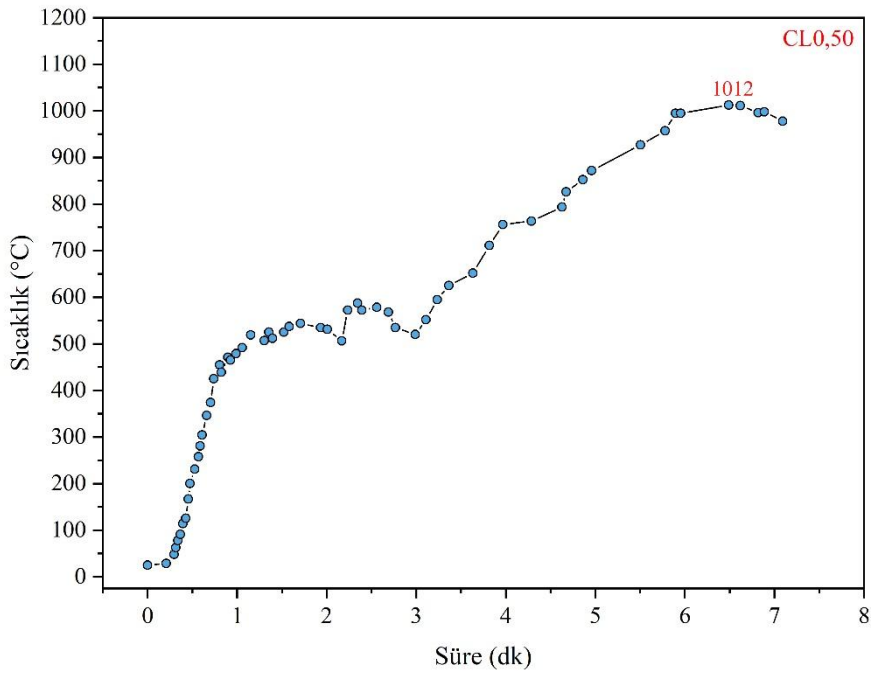


Şekil 6. Referans örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki

Şekil 6’da gösterilen referans örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre ilişkisi incelendiğinde, ilk 1 dakika içerisinde yüzey sıcaklığı aniden yükselerek ortalama 500 °C sıcaklığa kadar ulaşmakta, süre ilerledikçe yüzey sıcaklığındaki artışın ivmesi azalmaktadır. Ortalama 2. dakikada yüzey sıcaklığı ortalama 700 °C civarına yükselmiştir. Deneyin devam ettiği daha sonraki sürelerde yüzey sıcaklığında iniş çıkışlar olsa da ortalama 5. Dakikaya kadar yüzey ısınmaya devam etmiştir. Bu süreden sonra yüzeye alev tutulmasına rağmen yaklaşık 8. dakikaya kadar yüzey ısı artmamış aksine azalmaya başlamıştır. Referans örneği için kaydedilen maksimum sıcaklığın 902 °C olduğu gözlemlenmiştir. Referans örneğinin yüzey sıcaklığındaki dalgalanma harç örneği içerisinde bulunan atık kağıt ve selüloz eterin yanması ve geride boşluk bırakması şeklinde açıklanabilir.



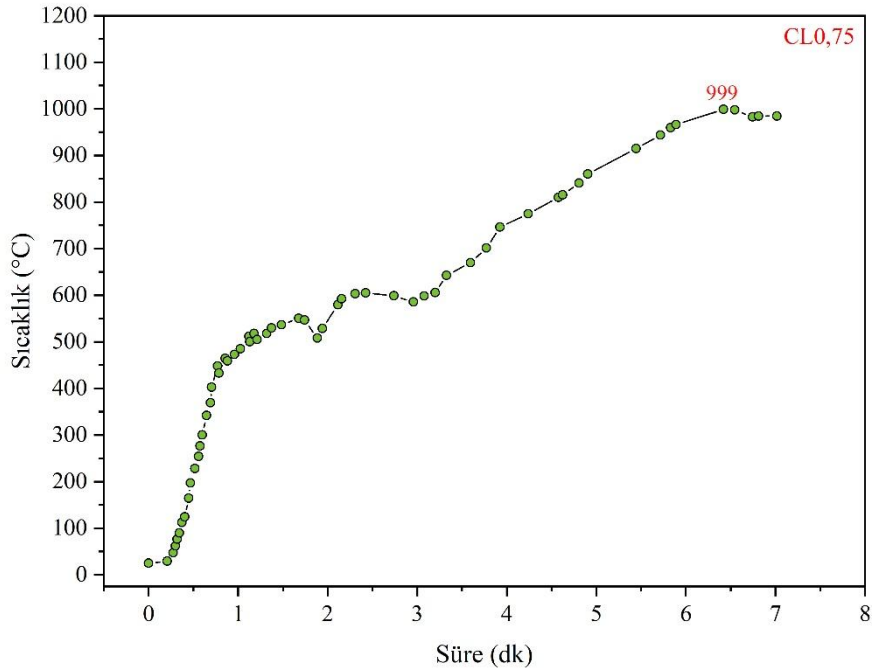
Şekil 7. CL0,25 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki



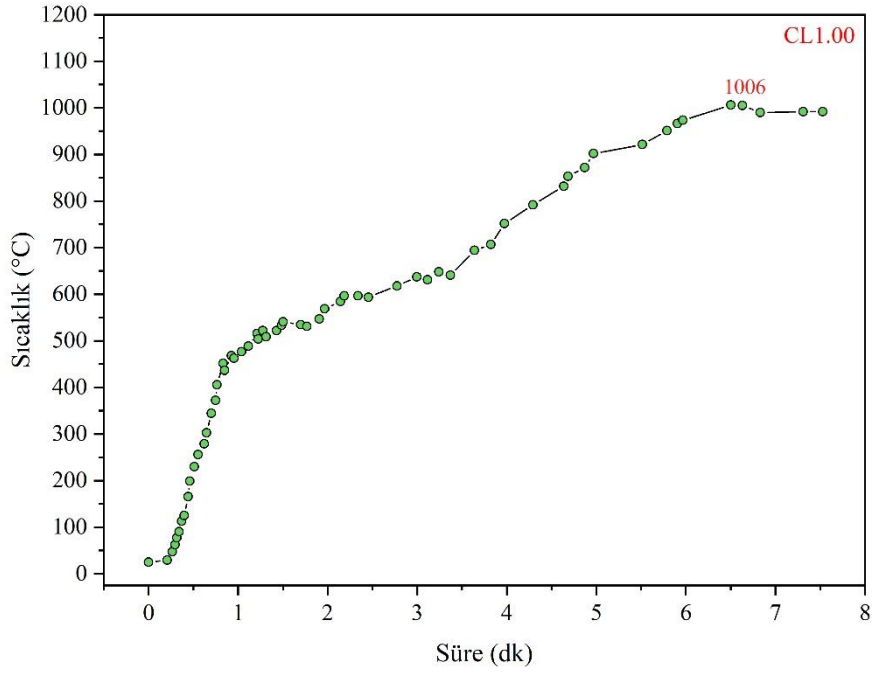
Şekil 8. CL0,50 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki

Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde, %0,25 ve %0,50 oranında atık kağıt ile cam lifinin yer değiştirmesi harçların yüzey sıcaklığı ile süre grafiğindeki sıcaklık dalgalanmalarını azaltmış olarak gözlemlenmiştir. Atık kartonun harç tasarımlarında azalması ve yerine cam

lifi eklenmesi harç içerisinde daha az yanıcı malzeme olmasına ve böylece yüzey sıcaklığındaki artışın daha dengeli bir ivme ile ilerlemesine neden olduğu tespit edilmiştir. %0,25 cam lifi kullanılan örneklerin (Şekil 7) sıcaklık-süre grafiği her ne kadar referans harcının sıcaklık-süre grafine (Şekil 6) benzer çıksa da özellikle %0,25 cam lifi kullanıldığında yüzey sıcaklığındaki artma eğilimi 6 dakikaya kadar gelebilmektedir. Referans harcının yüzey sıcaklığı ise 5 dakika artmış, en büyük değere ulaşmış ve ardından düşmüştür. %0,25 lif kullanılan harcın yüzey sıcaklığı ise 6 dakika boyunca artmış, en büyük değere ulaşmış ve ardından düşmeye başlamıştır. Bu da cam liflerinin eklenmesi ile harcın daha uzun süre ve daha yüksek sıcaklıklarda durabilitesinin arttığını göstermektedir. %0,50 cam lifi kullanımında ise (Şekil 8) referans harcına kıyasla hala sıcaklık dalgalanmaları olsa da grafiğin daha düzgün olduğu gözlemlenmiştir. İlk 1 dakikalık sürede referans harcında olduğu gibi yüzey sıcaklığı ortalama 500 °C dolaylarını ulaşmış, bu andan itibaren 3. dakikanın sonuna kadar ortalama 600 °C civarında seyretmiş ve 3. dakikanın sonundan itibaren en büyük dereceye ulaşana kadar lineer bir şekilde artış göstermiştir. Yüzey sıcaklığı ortalama 7. dakikada en büyük değere ulaşmıştır (1012 °C) ve bu süreden sonra yüzey sıcaklığı azalma eğilimine girmiştir.

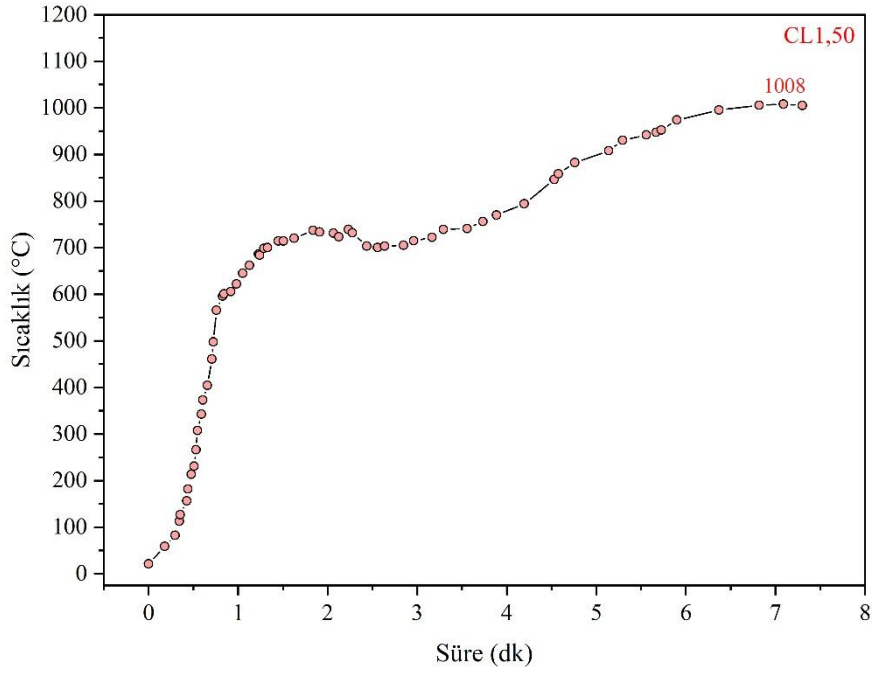


Şekil 9. CL0,75 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki

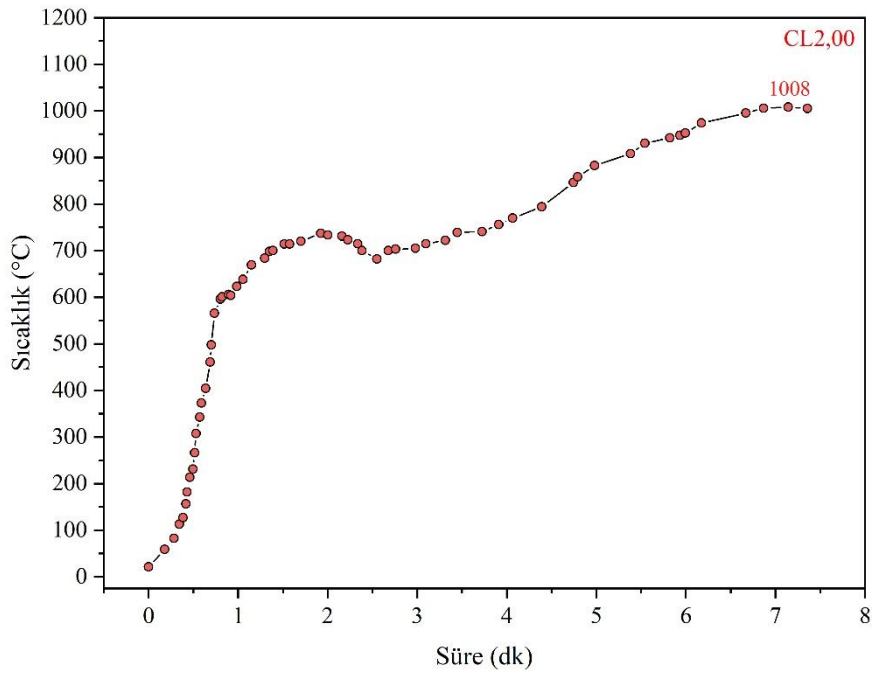


Şekil 10. CL1,00 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki

Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde, cam lif kullanımının artması ile birlikte yüzey sıcaklığı-süre grafiğinin sabit bir form almaya başladığı gözlemlenmektedir. Azalan karton atık miktarı ile birlikte yüzey sıcaklığındaki dalgalanma oldukça azalmış ve artan cam lif oranı ile birlikte de yüzey sıcaklığı daha homojen bir dağılım göstermeye başlamıştır. Her ne kadar bu durum %0,75 cam lifi kullanım oranında bariz bir şekilde gözükme de %1,00 oranında cam lifi kullanımı ile birlikte sıcaklık-süre grafiği düzgün bir şekilde seyretmeye başlamıştır. %1,00 cam lifi kullanılan harçların yüzey sıcaklığı yine ilk 1 dakika hızlı artarak 500 °C'ye kadar ulaşmış, bu süreden sonra sıcaklık dalgalanması en aza indirgenerek sıcaklık artışı lineer seyretmeye başlamıştır. Yaklaşık 6,5 dakika sıcaklık artmış ve 1006 °C ile en büyük değere ulaşmıştır. Bu süreden sonra yüzey sıcaklığında azalma başlamıştır.



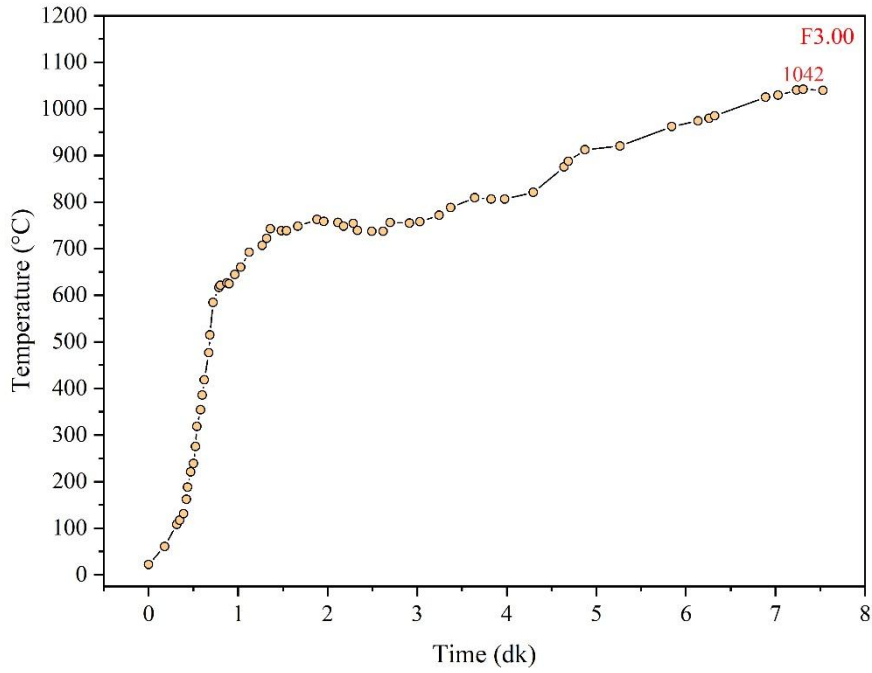
Şekil 11. CL1,50 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki



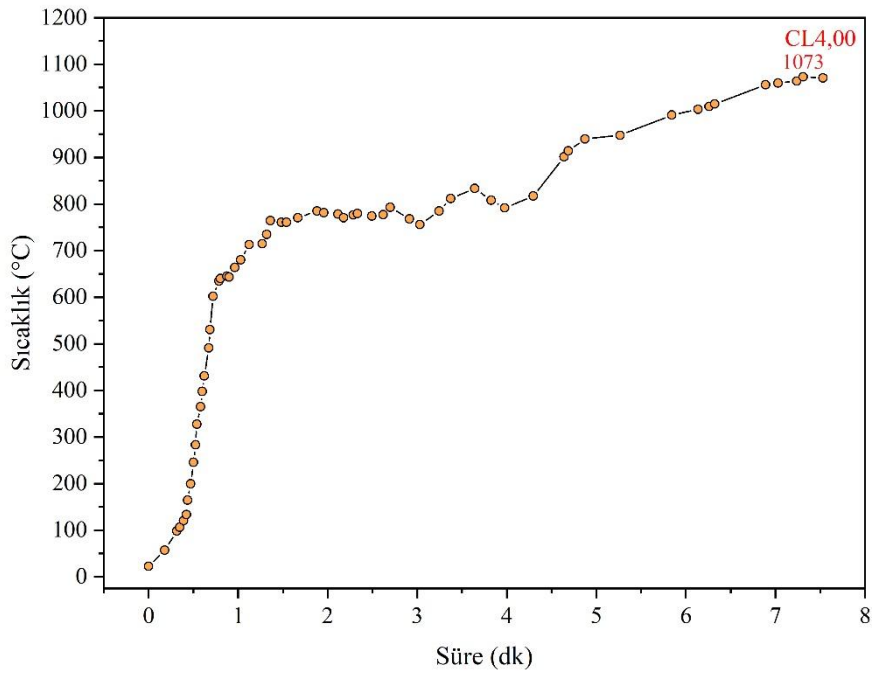
Şekil 12. CL2,00 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki

Şekil 11 ve Şekil 12 incelendiğinde, referans harcından ve nispeten daha az cam lifi kullanılan harçlardan %1,50 ve %2,00 oranında cam lifi kullanılan harcı ayıran en bariz özelliklerden birinin ilk 1 dakikalık süre içerisinde artık harcın 500 °C değil 600 °C civarında yüzey sıcaklığını taşıyabilmesidir. Bu süreden itibaren yüzey sıcaklığı en yüksek değere

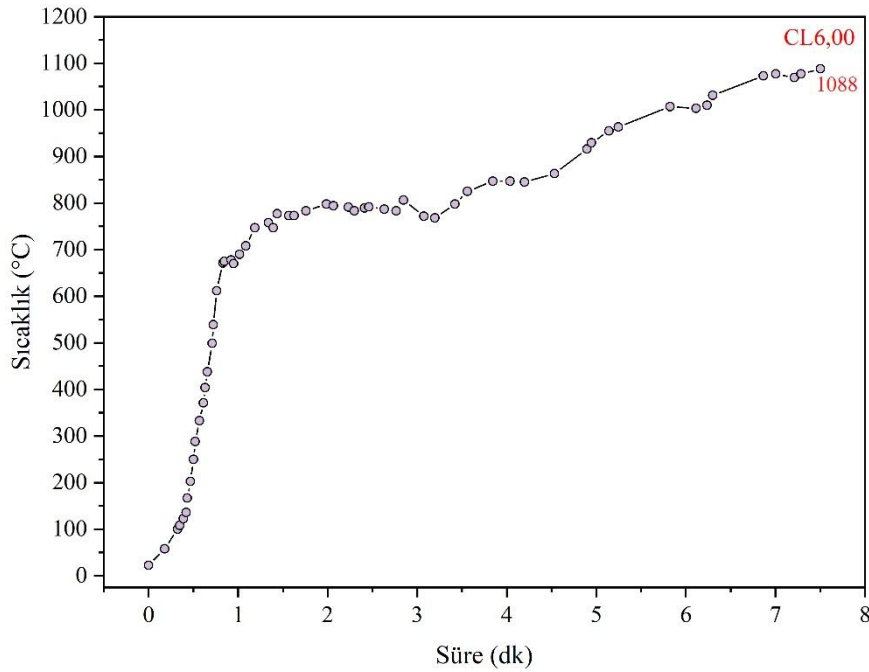
ulaşana kadar lineere yakın bir artış seyri izlemektedir. CL1,00 ve CL2,00 kodlu örnekleri referans ve nispeten düşük cam lifi kullanılan örneklerden ayıran bir diğer özellik ise en büyük sıcaklık değerinden sonra artık yüzey sıcaklığının düşmüyor olması olarak tespit edilmiştir.



Şekil 13. CL3,00 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki

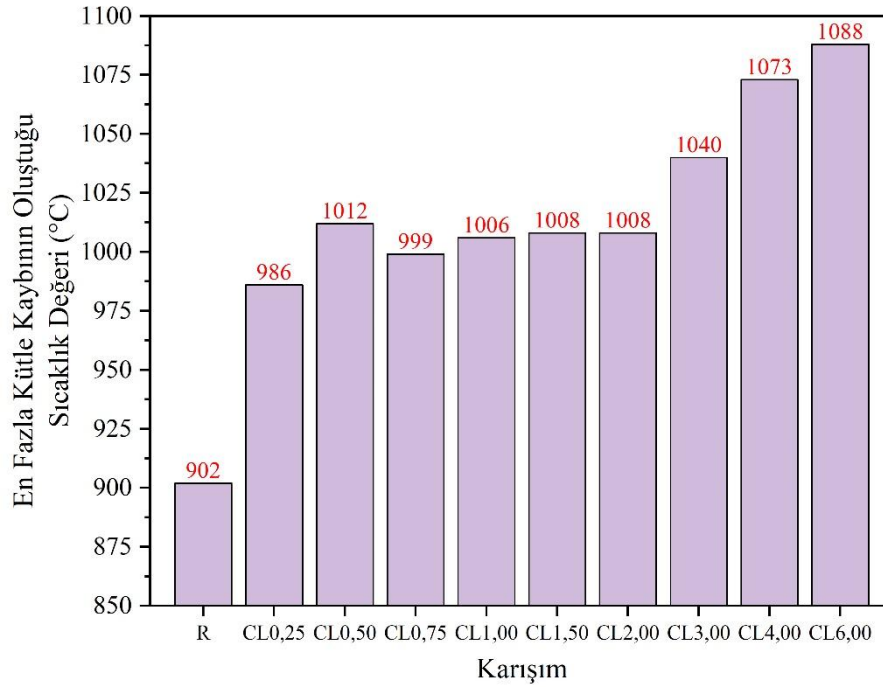


Şekil 14. CL4,00 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki



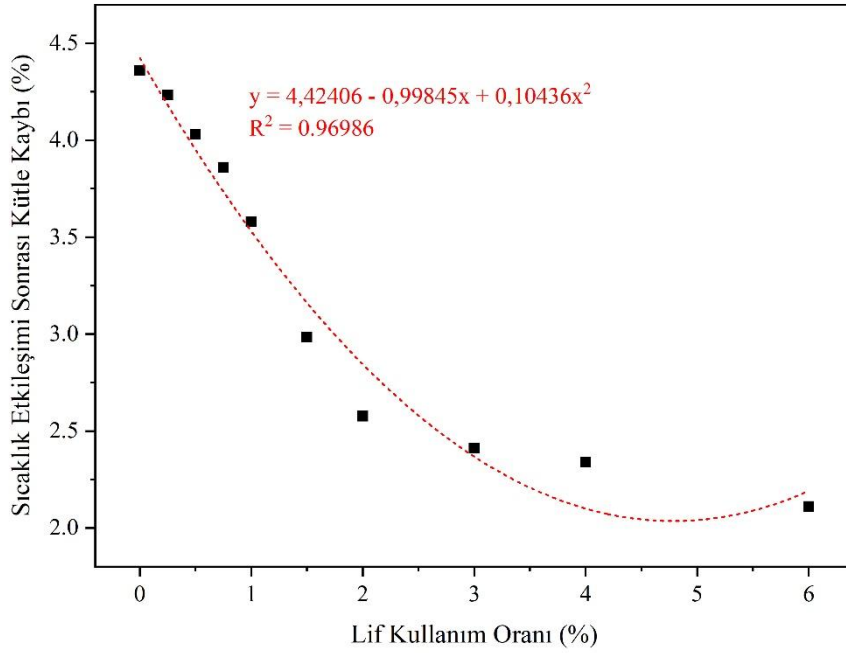
Şekil 15. CL06,00 örneğinin yüzey sıcaklığı ile süre arasındaki ilişki

Şekil 13-Şekil 15 arasındaki şekiller incelendiğinde, ilk 1 dakika için 600 °C ve daha üstündeki sıcaklıkları örneklerin taşıyabildikleri gözlemlenmiştir. Cam liflerinin doğrudan aleve karşı olan dayanıklılığı ve kullanıldığı harcı da bu konuda iyileştirebildiği açıkça görülebilmektedir. %3,00, %4,00 ve %6,00 cam lifi kullanılan harçların en büyük yüzey sıcaklıkları her üçü içinde testin sonunda ve sırasıyla 1042 °C, 1073 °C ve 1088 °C olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, referans harcının ve nispeten düşük cam lifi kullanılan harçların 8. dakikadan sonra majör bozulmalara uğradıkları için deney süresi ortalama 7,5 dakika olarak sabitlenmiştir. Ancak, CL3,00, CL4,00 ve CL6,00 örneklerinin bu süre sonunda hala yüzeyinde sıcaklık taşıyabilecekleri gözlemlenmiştir. Bu sebeple ileriki çalışmalar için, benzer harç ürünlerinde alev kaynağının daha uzun sürelerde numune yüzeyine sıcaklık vermesi sağlanabilir. Bu koşullarda, numunelerin yüzey sıcaklıkları en büyük değere ulaştığında en fazla kütle kaybının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Harçlarda en fazla kütle kaybının meydana geldiği (T_{maks}) sıcaklıkların grafiksel gösterimi Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 16. En fazla kütle kaybının meydana geldiği (T_{maks}) sıcaklar

Şekil 17 doğrudan aleve maruz bırakılan harç örneklerinin ağırlık kaybının karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 17. Harçların doğrudan alev testinden sonraki kütle kayıpları

Şekil 17 incelendiğinde, kartonla ikame bir şekilde cam lifi kullanımının yüksek sıcaklığa maruz kalan harçlar üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gözlemlenmektedir. Cam lifi kullanılmayan referans örneğinin çıkabildiği en büyük yüzey sıcaklık değeri 902 °C iken, bu örneğin bu sıcaklıkta kütle kaybı %4,36 olarak tespit edilmiştir. Şekil 16'dan da görülebileceği gibi, harçlarda cam lif oranı arttıkça harcın ulaşabildiği en büyük yüzey sıcaklık değerleri 902 °C'den 1088 °C'ye kadar artmaktadır. Benzer şekilde, numune içerisinde bulunan cam lifi oranı da arttıkça harcın bu en büyük sıcaklık değerlerindeki ağırlık kayıpları azalmaktadır. CL6,00 örneğinin yüzeyde oluşabilen en büyük sıcaklık değeri 1088 °C ile referans örneğinden 186 °C daha fazladır. Buna rağmen, CL6,00 örneği sadece %2,11 ağırlık kaybına uğramıştır. Bu da cam liflerinin doğrudan aleve karşı harçları ne kadar dayanıklı bir forma kavuşturabildiğini gösterebilmektedir. Moghadam ve Izadifad [30] lifsiz betonun 800 °C sıcaklıktaki fırın içerisinde %10,78 ağırlık kaybederken hacmen %0,25 cam lif katkılı betonun aynı sıcaklık altında %10,50 ağırlık kaybettiğini tespit etmişlerdir. Böylece, yüksek sıcaklıklarda cam lifinin harcın doğrudan aleve karşı dayanıklılığına etkisinin daha iyi olduğu söylenebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, cam lifle güçlendirilmiş çimentolu hafif kompozit harçlar üretilmiştir. Bu harçların fiziksel ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, harçların doğrudan aleve maruz kaldığında sergilediği özelliklerini tespit etmek amacıyla, harçlara doğrudan alev uygulanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre:

1. Bu çalışmada, cam lif kullanımı ile birim ağırlıklar bir miktar artsa da 700-800 kg/m³ sertleşmiş birim ağırlıkta harçlar üretildiğinden bu harçlar ultra hafif harç olarak tanımlanabilir.
2. Artan miktarda cam lif kullanımı ile harçların su emme ve görünür gözeneklilikleri azalmıştır. Referans harçta görünür gözeneklilik %68,9 iken, harçtaki cam lif oranı arttıkça görünür gözeneklilik %54,8'e kadar (CL6,00 karışımı) azalmıştır. Referans karışımının su emme oranı %65,4 iken, cam lifi içeren harçların en düşük su emme oranı %48,8 olarak CL6,00 karışımında belirlenmiştir.

3. %1,50 lif kullanım oranına kadar harçların birim ağırlıklarının azaldığı, aynı şekilde basınç dayanımlarının da azaldığı, bu lif oranının üzerinde lif kullanıldığında birim ağırlığın arttığı ve basınç dayanımının da tekrar arttığı gözlemlenmiştir. Sertleşmiş çimento harcı numunelerinin basınç dayanımları 8,637-9,05 MPa aralığında değişmektedir.
4. R kodlu referans harcı örneğinin 28 günlük eğilme dayanımının ortalama 1,35 MPa olarak tespit edildiği görülmektedir. Test örneklerinde en yüksek eğilme dayanımı değeri ise %6 cam lifi kullanılan CL6,00 kodlu karışımlarda ortalama 3,88 MPa olarak tespit edilmiştir.
5. Doğrudan alev testi sonuçlarına göre, cam lifi kullanımı süreye yüzey sıcaklığındaki dalgalanmayı azaltarak daha homojen bir grafik sergilemektedir.
6. Cam lifi kullanımının artması ile birlikte numunelerin yüzeyinin ulaşabildiği en yüksek sıcaklık değeri artmaktadır. Bu da cam lifi kullanımı ile birlikte daha yüksek sıcaklıklardaki yangınlara malzemelerin daha dayanıklı olabileceğini gösterebilmektedir.
7. Referans harcının yüzeyinin ulaşabildiği en büyük sıcaklık değeri 902 °C iken, cam lifi oranının artması ile birlikte bu değer 986 °C (CL0,25)'den 1088 °C (CL6,00)'ye kadar ulaşabilmektedir.
8. Cam lifi arttıkça örneklerin yüzey sıcaklığında önemli artış olsa da numuneler doğrudan aleve maruz kaldığında daha düşük ağırlık kaybı sergilemişlerdir. Referans örneğinin yüzey sıcaklığı 902 °C iken ağırlık kaybı %4,36'dır. En düşük cam lifli örneğin yüzey sıcaklığı 986 °C iken, ağırlık kaybı %4,23'e, en çok cam lifi kullanılan örneğin yüzey sıcaklığı 1088 °C'ye çıktığında ağırlık kaybı %2,11'dir.

Cam lifi kullanım yüzdesi arttıkça sertleşmiş harç örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri gelişmiştir. Bununla birlikte, doğrudan aleve maruz kaldığında, cam lifi kullanım oranı en yüksek olan örneklerin en iyi performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Yangına karşı dirençli malzemelerin üretiminde cam liflerinin çimentolu hafif kompozit harçlarda değerlendirilebileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Johnston CD. Fiber-Reinforced Cements and Concretes. Crc Press 2014.
- [2] Kalkan ŞO, Yavaş A, Güler S, Kayalar MT, Sütçü M, Gündüz L. An experimental approach to a cementitious lightweight composite mortar using synthetic wollastonite. *Construction and Building Materials* 2022; 341: 127911.
- [3] KALKAN ŞO, GÜNDÜZ L. Structural strength properties of waste textile fiber reinforced cementitious lightweight composite mortars. *Sakarya University Journal of Science* 2022; 26(6): 1180–1195.
- [4] Uğurer O, Kalkan ŞO, Gündüz L. Poli vinil alkol (pva) lif boyutunun çimento esaslı hafif harcın özelliklerine etkisi üzerine bir inceleme. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2023; 25(2): 543–563.
- [5] Kalkan ŞO, Öcal Hİ, Gündüz L. Effect of denim waste fibres on technical properties of cementitious lightweight composite mortars. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology* 2023; 5(2): 71–90.
- [6] Anandaraj S, Rooby J, Awoyera PO, Gobinath R. Structural distress in glass fibre-reinforced concrete under loading and exposure to aggressive environments. *Construction and Building Materials* 2019; 197: 862–870.
- [7] Wang W-C, Wang H-Y, Chang K-H, Wang S-Y. Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete. *Construction and Building Materials* 2020; 245: 118387.
- [8] Çankal D, Kalkan ŞO, Öztürk AU, Gündüz L. An investigation of the usage of glass wastes in cement mortars using full factorial design. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2023; 25(74): 405–416.
- [9] Kasagani H, Rao CBK. Effect of graded fibers on stress strain behaviour of glass fiber reinforced concrete in tension. *Construction and Building Materials* 2018; 183: 592–604.
- [10] Qureshi LA, Muhammad U. Effects of incorporating steel and glass fibers on shear behavior of concrete column-beam joints. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2018; 22: 2970–2981.

- [11] Yildizel SA, Timur O, Ozturk AU. Abrasion resistance and mechanical properties of waste-glass-fiber-reinforced roller-compacted concrete. *Mechanics of Composite Materials* 2018; 54: 251–256.
- [12] Khan M, Ali M. Use of glass and nylon fibers in concrete for controlling early age micro cracking in bridge decks. *Construction and Building Materials* 2016; 125: 800–808.
- [13] Fang Y, Chen B, Oderji SY. Experimental research on magnesium phosphate cement mortar reinforced by glass fiber. *Construction and Building Materials* 2018; 188: 729–736.
- [14] Moosaei HR, Zareei AR, Salemi N. Elevated temperature performance of concrete reinforced with steel, glass, and polypropylene fibers and fire-proofed with coating. *International Journal of Engineering* 2022; 35(5): 917–930.
- [15] Choi Y, Yuan RL. Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of gfrc and pfrc. *Cement and Concrete Research* 2005; 35(8): 1587–1591.
- [16] Al Qadi ANS, Al-Zaidyeen SM. Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 2014; 26(1): 33–39.
- [17] Novák J, Kohoutková A. Fibre Reinforced Concrete Exposed to Elevated Temperature. In: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 246. IOP Publishing 2017; 12045.
- [18] Serrano R, Cobo A, Prieto MI, de las Nieves González M. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Construction and Building Materials* 2016; 122: 302–309.
- [19] Lee J, Terada K, Yamazaki M, Harada K. Impact of melting and burnout of polypropylene fibre on air permeability and mechanical properties of high-strength concrete. *Fire Safety Journal* 2017; 91: 553–560.
- [20] Yermak N, Pliya P, Beaucour A-L, Simon A, Noumowé A. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties. *Construction and Building Materials* 2017; 132:

240–250.

- [21] Jameran A, Ibrahim IS, Yazan SHS, Rahim SNAA. Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature. *Procedia Engineering* 2015; 125: 818–824.
- [22] Abdul Rashid MK, Ramli Sulong NH, Alengaram UJ. Fire resistance performance of composite coating with geopolymers-based bio-fillers for lightweight panel application. *Journal of Applied Polymer Science* 2020; 137(47): 49558.
- [23] Mo KH, Hussin MN, Ling T-C, Sulong NHR, Lee FW, Yuen CW. Development of lightweight aggregate mortar skin layer for an innovative sandwich concrete composite. *Journal of Building Engineering* 2020; 27: 100941.
- [24] de Sá Teles e Lima G, Torres SM, Gomes KC, de Barros SR, Leal AF, Lima Filho MRF. Behavior of sisal fiber mat reinforced alkaline activated metakaolin matrix under direct flame. *Key Engineering Materials* 2014; 600: 433–441.
- [25] Vásquez-Molina D, Mejía-Arcila JM, Gutiérrez RM. Mechanical and thermal performance of a geopolymeric and hybrid material based on fly ash. *Dyna* 2016; 83(195): 216–223.
- [26] Salahuddin MBM, Mazlan N, Mustapha F, Ishak MR, Saprudin AA. Factorial design approach to investigate the significance of factors on the fire resistant, compression and adhesion properties of geopolymer binder. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences* 2020; 14(3): 7191–7204.
- [27] Basri MSM, Mazlan N, Mustapha F, Ishak MR. Correlation between Compressive Strength and Fire Resistant Performance of Rice Husk Ash-Based Geopolymer Binder for Panel Applications. In: *MATEC Web Conf.*, vol. 97. EDP Sciences 2017; 1025.
- [28] Mohd Basri MS, Mustapha F, Mazlan N, Ishak MR. Rice husk ash-based geopolymer binder: compressive strength, optimize composition, ftir spectroscopy, microstructural, and potential as fire-retardant material. *Polymers* 2021; 13(24): 4373.
- [29] Kalkan M, Erenson C. Direct flame test performance of boards containing waste undersized pumice materials. *Journal of Engineering Research* 2023.
- [30] Moghadam MA, Izadifard RA. Effects of steel and glass fibers on mechanical and

- durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal* 2020; 113: 102978.
- [31] Ravikumar CS, Thandavamoorthy TS. Glass fibre concrete: investigation on strength and fire resistant properties. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 2013; 9(3): 2320–2334.
- [32] Keykha AH. Experimental investigation of the strength of glass fiber-reinforced concrete exposed to high temperature. *Mechanics of Advanced Composite Structures* 2018; 5(2): 103–113.
- [33] Wu C-H, Chi J-H, Wang W-C, Chien C-C. Effect of glass fiber and high temperature on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2023; 148(11): 4655–4668.
- [34] Haigh R, Bouras Y, Sandanayake M, Vrcelj Z. The mechanical performance of recycled cardboard kraft fibres within cement and concrete composites. *Construction and Building Materials* 2022; 317: 125920.
- [35] Ahmad A, Rahman M, Khalil A, Adil M, Khan M. Efficient Use of Waste Cardboard in Construction Material. In: 4th Conf. Sustain. Process Ind. 2018; 23–27.
- [36] Gündüz L, Kalkan ŞO. Yarı pul mika ve mikronize magnezyanın ısı dirençli hafif harcın dayanım performansına olan etkisi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 2023; 13(2): 288–309.
- [37] Ahmad A, Adil M, Khalil A, Rahman M. Mechanical properties and durability of boardcrete blocks prepared from recycled cardboard. *Journal of Building Engineering* 2021; 33: 101644.
- [38] Turkish Standards Institution. TS EN 1015-6, Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 7: Determination of Air Content of Fresh Mortar. Ankara: 2000.
- [39] Turkish Standards Institution. TS EN 1015-10, Methods of Test for Mortar for Masonry- Part 10: Determination of Dry Bulk Density of Hardened Mortar. Ankara: 2001.
- [40] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, PA: 2013.

- [41] TS EN 1015-11 Kagir Harcı - Deney Yöntemleri - Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımının Tayini. n.d.
- [42] TS EN 998-1, Specification for Mortar for Masonry — Part 1: Rendering and Plastering Mortar. 2017.
- [43] Adhikary SK, Rudžionis Ž, Vaičiukynienė D. Development of flowable ultra-lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. *Journal of Building Engineering* 2020; 31: 101399.
- [44] Ślosarczyk A, Vashchuk A, Klapiszewski Ł. Research development in silica aerogel incorporated cementitious composites—a review. *Polymers* 2022; 14(7): 1456.
- [45] Ng S, Jelle BP, Sandberg LIC, Gao T, Wallevik ÓH. Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials* 2015; 77: 307–316.
- [46] Khorami M, Ganjian E, Mortazavi A, Saidani M, Olubanwo A, Gand A. Utilisation of waste cardboard and nano silica fume in the production of fibre cement board reinforced by glass fibres. *Construction and Building Materials* 2017; 152: 746–755.
- [47] Banthia N, Sheng J. Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites* 1996; 18(4): 251–269.