



Yarı Pul Mika ve Mikronize Magnezyanın Isı Dirençli Hafif Harcın Dayanım Performansına Olan Etkisi

Lütfullah GÜNDÜZ¹ , Şevket Onur KALKAN^{2*} 

Öz

Bu çalışmada, refrakter çimento, beyaz çimento ve anhidrit alçı içeren üçlü bağlayıcı sistemli hafif harçlar mika ve magnezya kullanılarak üretilmiş ve 1050 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra mekanik özellikleri araştırılmıştır. Harç numunelerinin öncelikle yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce sertleşmiş harç birim hacim kütlesi, gözeneklilik ve kür süresine bağlı basınç dayanım değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra yüksek sıcaklığa tabi tutulan numunelerin basınç dayanımları analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, mika ve magnezya kullanım oranı arttıkça harçların sertleşmiş harç birim hacim kütlesi azalmış ve gözeneklilik oranları artmıştır. En yüksek Mika+MgO katkı oranında, kontrol örneğine kıyasla test örneklerinin birim hacim kütle değerinde ortalama %13.9 hafifleme tespit edilmiştir. Gözeneklilik oranları ise mika kullanımına bağlı olarak %5.7 - %52.9 oranında artış göstermiştir. Özellikle mika+MgO toplam oranı %24 olan karışım tasarımına kadar, kontrol harcına göre test örneklerinin 28 günlük dayanım değerleri %71.8 oranlarında artarak gelişim göstermiştir. Kontrol karışımı örneklerinde 400 °C, 550 °C, 800 °C ve 1050 °C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybı sırasıyla %2.3, %5.7, %48.3 ve %63.8 olarak tespit edilmiştir. Mika+MgO oranı %20 olan karışım tasarımında 400 °C, 550 °C, 800 °C ve 1050 °C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybı sırasıyla %1.2, %1.7, %9.7 ve %14.5 olarak tespit edilmiştir. %40 mika+MgO kullanımlı karışım tasarımında ise 1050 °C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybının sadece %2.8 olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, uygulama yerinde yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek harç karışım tasarımında dayanım düşüşüne makul ölçüde izin verebilecek bir miktarda yarı pul boyutlu mika ve toz formda MgO'ün kullanımının uygunluğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mika, Magnezya, Isı direnci, Hafif harç, Dayanım, Performans.

Effect of Semi-Flake Mica and Micronized Magnesia on Strength Performance of Heat Resistant Lightweight Mortar

Abstract

In this study, the effects of high temperatures up to 1050°C on the mechanical properties of ternary binder system containing calcium aluminate cement, white cement and anhydrite gypsum lightweight mortars containing different amounts of mica and magnesia were investigated. Before the mortar samples were exposed to high temperature, the hardened density, porosity, and compressive strength developments related to the curing time were determined. Then, the compressive strengths of the samples subjected to high temperature were analyzed. According to the analysis results, as the mica and magnesia usage rate increased, the hardened mortar unit volume mass decreased, and their porosity ratio increased. At the highest Mica+MgO powder ratio, unit volume mass value decreased by an average of 13.9% compared to the control mortar. Porosity increased by 5.7% - 52.9% depending on the use of mica. Especially until the mixture design with a total mica+MgO ratio of 24%, the strength values of the test samples after 28 days increased by 71.8% compared to the control mortar. In the control mixture samples, the loss of strength after temperature interactions at 400°C, 550°C, 800°C and 1050°C was determined as 2.3%, 5.7%, 48.3% and 63.8%, respectively. In the mixture design with a Mica+MgO ratio of 20%, the loss of strength after temperature interactions was determined as 1.2%, 1.7%, 9.7% and 14.5%, respectively. In the mixture design using 40% mica+MgO, the strength loss after 1050°C temperature interactions were determined to be only 2.8%. In this study, the suitability of using mica in half flake size and MgO in powder form in an amount that can reasonably allow strength reduction in mortar mix design that may be exposed to high temperatures at the application site was determined.

Keywords: Mica, Magnesia, Heat resistant, Lightweight mortar, Strength, Performance.

¹İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr

²İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-2487-467X>

²<https://orcid.org/0000-0003-0250-8134>

1. Giriş

Isı dirençli harçlar genellikle 1000°C veya biraz üzerinde sıcaklığa maruz kalabilecek ortamlarda uygulanacak harçlar olarak kabul edilebilir. Bu uygulama alanları arasında baca içi harç kaplamaları, fırın duvarlarının kaplanması, ateş çukuru halkalarının iç yüzeyleri, pizza fırınları veya kil baca astarları ve bir duman bacası odasının ayrıştırılması gibi baca uygulamaları, barbekü yapımı vb. uygulamalar sayılabilir. Bu uygulama alanlarında harç yüzeyleri değişken yüksek sıcaklık değerlerine maruz kalarak, sıcaklık etkisinde yüksek oranda deformasyon oluşturmayan, ısıya karşı dirençli özel harç tasarımlarına sahiptirler. Dünyada birçok uygulamalarda özellikle fırın duvarlarını kaplamak için en yaygın olarak kullanılan refrakter malzemeler, silika-alümina geomateryallerinden oluşmaktadır (Sadik, 2013).

Son yıllarda beton türevi ürünlere üstün özellikler katma amacı ile üçlü bağlayıcı sistemler üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Masif pelet benzeri kalsiyum alüminat hidratların (Gu ve ark., 1997; Gu ve Beaudoin, 1997; Xu ve ark., 2014) aşırı oluşumu nedeniyle, çoğu durumlarda Portland çimentosu (PC)-kalsiyum alümina çimentosu (CAC) karışımlarının basınç dayanımı CAC ilavesiyle önemli ölçüde azalabilmektedir. Kalsiyum alüminat bazlı çimentoların faz topluluklarını modifiye etmek için, termodinamik olarak kararlı hidratlar elde etmek için normal olarak kalsiyum sülfat (anhidrit, hemihidrat veya jips) üçüncü bağlayıcı olarak ilave edilmektedir (Georgin ve Prud'Homme, 2015; Xu ve ark., 2017). Bu şekilde masif etrenjit matriks içinde hızla oluşur. Bu, CAC, PC ve kalsiyum sülfat içeren üçlü bağlayıcıların, işlenebilirlik, hızlı kürlenme ve sertleşme, büzülme azaltma vb. mükemmel ve kontrol edilebilir performanslar sergilemesini sağlamaktadır. Ayrıca bu yönlerden dolayı, üçlü bağlayıcılar, tekil PC bağlayıcı ürünlere (Bizzozero ve Scrivener, 2015) göre nispeten daha yüksek maliyetlere rağmen, binalarda yapısal olmayan bitirme işlemleri için yaygın olarak uygulanmaktadır (Chang ve ark., 2008; Seifert ve ark., 2009; Onishi ve Bier, 2010) Ek olarak, CAC bazlı formülasyonların PC açısından zengin sistemlere göre daha avantajlı olduğu göz önüne alındığında (De Gasparo ve ark., 2009), kendiliğinden yayılan harç, yüksek teknoloji seramik yapıştırıcıları ve hızlı tamir malzemeleri (Onishi ve Bier, 2010; Torrén-Martín ve ark., 2013) oldukça tercih edilmektedir. Güncel olarak geliştirilen teknolojik malzeme bileşenlerine bakıldığında ısıya dayanıklı malzeme üretimlerinde magnezya-silika-alümina sentezli matris yapıların gelişim gösterdiği de görülmektedir. Isıya dayanıklı beton veya harç malzemelerin gelişiminde refrakter amaçlı çimentoların ana bağlayıcı malzeme olarak kullanımları da yaygın bir uygulamadır. Refrakter çimentolar, ateşe dayanıklı kalsiyum alüminatlı çimentolar olarak da bilinmektedir. Yüksek sıcaklığa, aşınmaya, kimyasal etkilere ve korozyona karşı dirençlidirler. Normal çimentolar ile mukayese edildiğinde benzer sertleşme ve priz süresine sahip olmasına rağmen, daha hızlı bir şekilde

mukavemet kazanır. Bileşimindeki kalsiyum alüminat, uygulama alanında ihtiyaç duyulan ısıya dayanıklı özelliklerin sağlanmasında önemli bir etki sağlar (Pundiene, 2011; El-Leathy, 2016).

Son yıllarda gerek ısı yalıtımı gerekse yüksek ısılara direnç gösterebilen harç malzemelerin geliştirilmesi inşaat endüstrisinde önem kazanmaktadır. Bu refrakter özellikli malzemeler, farklı amaçlar için fırınların ve ısıtım ünitelerinin teknik ve ekonomik performansının iyileştirilmesinde de kullanılmaktadır (Abyzov, 1981; Popov, 1984). Bu malzemeler genellikle metalik olmayan doğal ve insan yapımı malzemelerden veya alümina, ateş killeri, boksit, kromit, dolomit, manyezit, silisyum karbür, zirkonya ve diğer birçok bileşik gibi diğer bileşik ve minerallerin kombinasyonlarından yapılırlar (Anonim, 1987). Refrakter malzemeler 540°C üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre kullanılabilirlerdir.

Isı dirençli harçlar çimento, kum, yüksek alümina içerikli kil ve kalsiyum alüminat gibi diğer özel bileşenlerin bir karışımı olarak yapılabilmektedir. Mika, doğal bir mineral olarak genellikle hidro alüminyum silikat bileşiği formundadır. Yüksek ısıya direnci sebebiyle birçok ev aletlerinin yapımında da yaygın kullanılabilen inorganik bir malzemedir (Dawy, 2002; Zanazzi, 2002; Shikova, 2019; Cai ve ark., 2021). Bununla birlikte doğal bir bileşik şeklinde kristalize formda magnezya da yüksek sıcaklığa dayanım kabiliyeti sebebiyle toz formunda birçok endüstriyel ürünlerin geliştirilmesinde kullanımı bilinmektedir (Mahdi, 2018; Wu ve ark., 2020; Jiang, 2022). Bu makalede, doğal yarı pul mika ve magnezyanın ana katkı materyali olarak ısı dirençli harç üretiminde kullanılmıştır. Ayrıca, özellikle üretilen hafif harçların farklı yüksek sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanımları hakkında kapsamlı bir araştırma çalışmasının özet bulguları sunulmaktadır. Araştırmanın ana odak noktası, mika ve magnezyanın hangi katkı oranlarında harç tasarımlarında kullanılabileceğini incelemek ve uygun oranların belirlenmesini araştırmaktır. Araştırma bulguları karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Test Örneklerinde Kullanılan Malzemeler

Isı dirençli hafif harç (IDHH) örneklerinin hazırlanmasında agrega, dolgu malzemesi, üçlü bağlayıcı ve kimyasal katkı olmak üzere 12 ayrı malzeme türü kullanılmıştır. Bu malzemelere ilişkin özet bilgi aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

IDHH test örneklerinin hazırlanmasında üçlü sistem formatında bağlayıcı bileşimi kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemeler olarak refrakter çimento, anhidrit ve beyaz çimento kullanılmıştır. Refrakter çimento, Çimsa A.Ş. tarafından üretilen ISIDAÇ 40 (Anonim, 2022) kodlu teknik özellikleri TS EN 14647 standardına uygun kalsiyum alümina çimentosu ürünü piyasa

koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. İçeriğindeki yüksek alümina varlığıyla Portland çimentolarının kullanımında sağlanabilen sıcaklık değerlerine rahatlıkla ulaşılabilir. Diğer taraftan, Portland çimentolarının bileşimindeki silikatlar genellikle 600°C ve üzerindeki sıcaklık etkileşimlerinde deforme olarak dağılma eğilimi gösterebilmektedir. Ancak, kalsiyum alüminat çimentosu ürünler, bunun aksine 1200°C'ye kadar sıcaklık etkileşimlerine dağılma göstermeden direnç özelliğine sahiptir. Bu bağlamda, kalsiyum alüminat çimentolu ürünler, uygun karışım tasarımları yapılması durumunda yüksek sıcaklık etkisinde refrakter özellikli ürünler olarak görülebilmektedir (Anonim, 2022). Üçlü sistemde ikinci bağlayıcı malzeme olarak Çimsa Süper Beyaz kodlu CEM 1 52.5R Beyaz Portland çimentosu piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. Beyaz çimento EN 197-1 standardına uygun 28 günlük mukavemeti 52.5 MPa olan çimento türüdür. Beyaz çimento, bünyesinde yüksek oranda C₃S ve C₃A bileşikleri bulundurarak yüksek mukavemet performansı sağlar. Özellikle erken yaş dayanımı çok yüksektir ve hızlı üretime olanak sağlar. Düşük alkali içeriği ile düşük alkali çimento sınıfındadır. Alkali-agrega reaksiyonu riskini en aza indirir ve uzun süreli dayanıklılık sağlar. İnce öğütülmesi nedeniyle düşük geçirgenlik ve düşük su emme gibi üstün özellikler sağlar. Üçüncü bağlayıcı bileşen olarak ise toz formda anhidrit 250 mikron boyutunda piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan mikro silika Antalya Bölgesi'nden temin edilmiştir. Kullanılan mikro silikanın XRF sonucuna göre SiO₂ içeriği % 93.42 olarak tespit edilmiştir. Harcın kıvamının ve işlenebilirliğinin sağlanması amacıyla melamin sülfonat bazlı toz formda bir süper akışkanlaştırıcı, tüm karışımdaki malzeme ağırlığının ağırlıkça %0.30'u kadar kontrol karışımı da dahil tüm karışımlarda sabit oranda kullanılmıştır. Bununla birlikte, harcın yapışma özelliğini geliştirmek amacıyla vinil asetat-Veova-akrilat esaslı ve polivinil alkol koruyuculu bir toz polimer, tüm karışımdaki malzeme ağırlığının ağırlıkça %0,30'u kadar kontrol karışımı da dahil tüm karışımlarda sabit oranda kullanılmıştır. Ayrıca, harcın uygulamada sarkma direncini iyileştirmek amacıyla tüm karışımdaki malzeme ağırlığının ağırlıkça %0,10'u kadar kontrol karışımı da dahil tüm karışımlarda sabit oranda metilhidroksietil selüloz kullanılmıştır. Bu bağlamda, melamin sülfonat bazlı toz akışkanlaştırıcı, vinil asetat-Veova-akrilat esaslı ve polivinil alkol koruyuculu bir toz polimer ve metilhidroksietil selüloz katkı olmak üzere üç kimyasalın miktarları toplamı tüm karışımlarda toz harcın toplam ağırlığının %0,70 olarak kullanılmıştır.

Ege Bölgesi Aydın ilinden maksimum tane boyutu 350 mikron olarak (tane boyutu 0-350 mikron aralığında) sınıflandırılmış şekilde tedarik edilen doğal mika minerali bu çalışmada “*yarı pul mika*” katkısı olarak kullanılmıştır. Mika, magmatik ve metamorfik kayalarda yaygındır ve bazen tortul kayalarda küçük pullar halinde bulunur (Nesse, 2000). Yarı pul mika, farklı fiziksel özelliklere sahip levhamsı bir yapıdadır. Kimyasal olarak kompleks bir bileşime sahip olup, hidro alüminyum silikat minerallerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada kullanılan mikanın kimyasal içeriği XRF

analizine göre %58.18 SiO₂, %24.38 Al₂O₃, %3.24 LOI ve az miktarlarda TiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O içermektedir. Çalışmada kullanılan yarı pul mikanın yığın yoğunluğu ortalama 600 kg/m³'tür. Bir diğer katkı materyali olarak toz formda normal piyasa koşullarından temin edilen magnezyum oksit (MgO) kullanılmıştır. Doğal haliyle beyaz renkli ve kristal şeklinde olup, magnezya olarak da bilinir. Ateşe dayanıklı endüstriyel ürünlerin üretiminde toz formda dolgu veya katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan magnezyum oksit maksimum tane boyutu 125 mikron (tane boyutu 0-125 mikron aralığında) olarak sınıflandırılmış hazır toz formdadır.

2.2. Analizlerde Kullanılan Yöntem

Yarı pul boyutlu mika ve MgO kullanımıyla çimento esaslı ısı dirençli hafif harç (IDHH) örneklerinin hazırlanması amacıyla 9 ayrı karışım tasarımı yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan malzeme ve kullanım miktarları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. IDHH karışım bileşenleri ve kullanım miktarları (ağırlıkça %).

	Refrakter Çimento	Beyaz Çimento	Anhidrit Alçı	Yarı Pul Mika	MgO Tozu	Dolomit	Mikro Silika	Mikronize Kuvarsit	Genleşmiş Perlit	Kimyasal Katkılar	Su/Bağlayıcı
RF0	19	11	6	0	0	46.3	3	10	4	0.7	1.67
RF1	19	11	6	3	3	40.3	3	10	4	0.7	1.67
RF2	19	11	6	5	5	36.3	3	10	4	0.7	1.67
RF3	19	11	6	8	8	30.3	3	10	4	0.7	1.67
RF4	19	11	6	10	10	26.3	3	10	4	0.7	1.67
RF5	19	11	6	12	12	22.3	3	10	4	0.7	1.67
RF6	19	11	6	15	15	16.3	3	10	4	0.7	1.67
RF7	19	11	6	18	18	10.3	3	10	4	0.7	1.67
RF8	19	11	6	20	20	6.3	3	10	4	0.7	1.67

Bu çalışma kapsamında hazırlanan tüm IDHH test örneklerinde refrakter çimentonun baskın olarak uygulandığı üçlü sistem formatında bağlayıcı bileşimi kullanılmıştır. Kalsiyum alümina çimentosu karışımlarda refrakter çimento olarak değerlendirilmiştir. Üçlü sistemin elemanları olarak tüm karışımlarda %19 oranında refrakter çimento, %11 oranında beyaz çimento ve %6 oranında anhidrit alçı sabit oranlarda kullanılmıştır. Burada anhidrit alçı kullanımıyla test örneklerinin erken dayanım noktasına ulaşması amaçlanmıştır. Bu çalışmada beyaz çimento: refrakter çimento: anhidrit alçı oranı üçlü bağlayıcı sistemde ağırlıkça 30.6: 52.8: 16.7 olarak sabitlenmiştir. Literatürde PC-CAC-kalsiyum sülfat üçlü bağlayıcı sistemlerinde kullanım oranları ürünün kullanım amacına göre farklılıklar göstermektedir ve çalışmaların özellikle iki farklı grupta incelendiği görülmektedir (Torréns-Martín ve ark., 2013; Xu ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2017; AzariJafari ve ark., 2019; Rego ve ark., 2021). Bunlar "PC-rich" olarak nitelendirilen Portland çimentosunun ağırlıkça daha yüksek

miktarda yer aldığı ve “CAC-rich” olarak nitelendirilen refrakter (kalsiyum alümina) çimentosunun ağırlıkça daha fazla yer aldığı karışımlardır. Bununla birlikte, kalsiyum sülfat kaynağının her iki tip karışımda da ağırlıkça en az miktarda olduğu görülmektedir. Bu sebeple, bu çalışmanın ana konsepti olan yüksek sıcaklık dayanımı göz önüne alındığında refrakter çimento üçlü bağlayıcı sistemde yüksek oranda kullanılmıştır.

Doğal mika ve MgO partiküllerinin IDHH harcı örneklerinin dayanım performansına etkisinin analizi amacıyla ilk önce içeriğinde doğal mika ve MgO malzeme bileşeni bulunmayan bir kontrol harcı tasarımı yapılmıştır. Kontrol harcı çalışmada “RF0” olarak kodlanmış olup, bileşiminde üçlü sistem bağlayıcının yanı sıra ana agrega materyali olarak 45 mikron boyutunda dolomit kayacı kullanılmıştır. Harç bileşiminde dolgu ve katkı malzemeleri olarak ağırlıkça %3 mikro silika, %4 genişmiş perlit, %10 oranında 250 mikron kuvars kumu kullanılmıştır.

Yarı pul boyutlu doğal mika (350 mikron) ve toz MgO’in IDHH dayanım özelliklerine etkisini analiz etmek amacıyla, kontrol karışımı haricinde 8 ayrı seri karışım tasarımı yapılmıştır. Her bir karışımda mika ve MgO miktarı ağırlıkça eşit olacak şekilde dolomit agrega miktarından düşülerek yeni karışım tasarımları oluşturulmuştur. Bu tasarımlarda mika ve MgO malzemeleri ağırlıkça eşit oranlarda olmak üzere, her bir malzeme %3, %5, %8, %10, %12, %15, %18 ve %20 oranlarında karışımlara ilave edilerek IDHH test örnekleri hazırlanmıştır. Karışım tasarımlarında her bir mika ve MgO varlığının ağırlıkça %20’den daha fazla oranda kullanılması durumunda, diğer katkı bileşenleri de dikkate alındığında karışımdaki toplam ince madde oranlı malzeme miktarı, bağlayıcı miktarı ihtiyacının optimum kullanım oranının çok üzerine çıkması sebebiyle mika+MgO oranı toplamı maksimum ağırlıkça %40 oranında sınırlandırılmıştır. Çalışma kapsamındaki örnekler “RF1” - “RF8” serisi olarak kodlanmış olup, tüm karışımlarda su/üçlü sistem bağlayıcı oranı 1,67’dir.

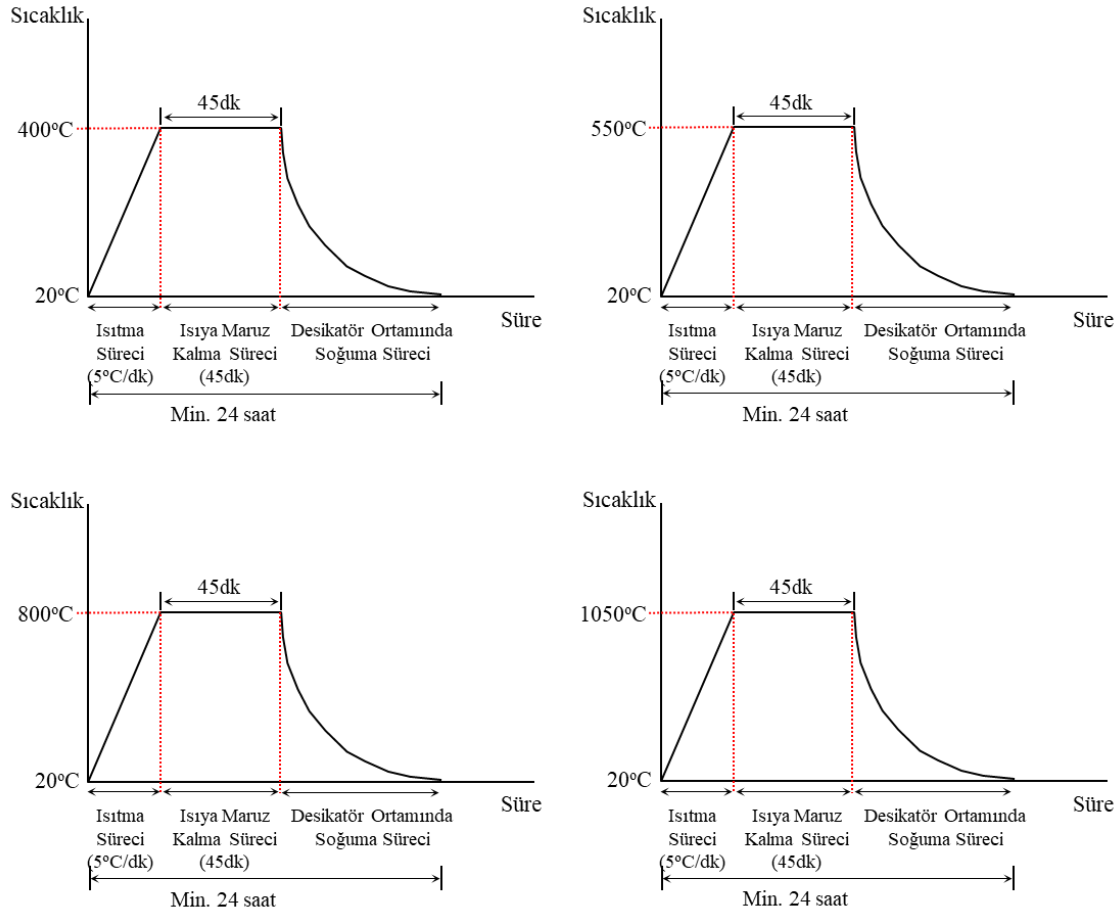
IDHH karışımlarında bulunan bağlayıcı bileşenler dahil tüm malzemeler öncelikle laboratuvar ortamında bulunan bir karıştırıcıda ortalama 3 dakika süreyle karıştırılarak toz formda homojen karışımlar elde edilmiştir. Toz formda her bir karışımın yığın yoğunluk değerleri belirlenerek kaydedilmiştir. İkinci aşamada karışımlar için belirlenmiş sabit su/bağlayıcı oranlarında toz karışıma su ilave edilerek ortalama 3 dakika süreyle karıştırılmıştır. Elde edilen yaş harç 2 dakika kadar dinlendirilerek, IDHH test örneklerinin hazırlanması için 50x50x50 mm boyutlu küp numune kalıplarına dolmaları yapılarak vibrasyon ile kalıp içerisine yerleşmeleri sağlanmıştır. Dökümü yapılmış karışımlar, döküm işleminden hemen sonra bileşiminde anhidrit alçı varlığı sebebiyle gerçekleşen hızlı sertleşme süreci zaman olarak gözlenmiş ve sertleşme periyotları belirlenerek kaydedilmiştir. Dökümden 24 saat sonra tüm test örnekleri kalıptan çıkartılarak %95 bağıl nem ve $21\pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa sahip nemli ve kapalı bir kür ortamında test gününe kadar küremeye bırakılmıştır.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan örnekler test öncesi ortam neminde ve/veya ortam nemine ulaşmasını sağlayacak bir sıcaklığa maruz kalması amacıyla bir etüvde $55\pm 5^{\circ}\text{C}$ ’de 24 saatlik süre ile

kurutulmuştur. Dayanım testlerinin tümü numunelerin etüv kurusu durumları için yapılmıştır. Her bir karışımdan 40 adet 50 mm'lik küp numune dökümü yapılarak, bu numunelerden 7, 14, 21 ve 28 gün kür sonrasında her bir seri karışım için 5'şer adedi basınç dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanım testlerinde ASTM C109 (ASTM, 2020) ve TS EN 1015-11 (TS EN, 2020) standartlarında öngörülen prensipler uygulanmıştır. Ayrıca 28 gün kür sonrası sertleşmiş harç örneklerinin ASTM C642 (ASTM, 2021) standardına göre yığın yoğunluk ve geçirgen gözenek boşluk hacmi oranı değerleri standartta öngörülen yöntemle belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında test örneklerinin kuru yığın yoğunluk değerleri, "sertleşmiş harcın birim hacim kütle değeri" olarak ve geçirgen gözenek boşluk hacmi oranı değerleri ise "gözeneklilik değeri" olarak tanımlanarak irdelenmiştir. Gözeneklilik değeri ilgili standartta anlatıldığı şekilde, etüv kurusu, suya doymuş, suya doymuş ve kaynatılmış, suya doymuş-kaynatılmış-su içerisinde tartılmış numune ağırlıklarının ayrı ayrı tespit edilmesi ve standartta verilen formüllerde yerine koyulması ile tespit edilmektedir. Genellikle beton türevi ürünlerin birim ağırlık yönünden sınıflandırması taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları ile değerlendirilmektedir. Beton karışımları da taze beton birim ağırlık değerleri üzerinden hesaplanmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada da karma suyu sonrası yaş harcın birim hacim kütle ve sertleşmiş harcın birim hacim kütle değerleri tespit edilmiştir. Kompozit formdaki harç karışımları, karışım bileşenlerinin birim ağırlık değerleri bağlamında toz formda karışım işlemi sonrası oluşturduğu birim ağırlık değeri genellikle toz formda yığın yoğunluk değeri olarak tanımlanmaktadır. Bu yığın yoğunluk değeri, genellikle harcın karma suyu ilavesi ve karışım işlemi sonrası, harcın kıvamında oturma (çökme) oluşması sebebiyle genellikle daha yüksek birim hacim ağırlık değerine ulaşmaktadır. Yaş karışımı yapılmış harcın uygulama alanında tüketim miktarı belirlenmek istenildiğinde, karma işlemi sonrası elde edilen bu yaş birim hacim ağırlık değeri genel bir parametre olarak irdelenir. Ayrıca, toz formda yığın yoğunluk değeri ile yaş birim hacim ağırlık arasındaki fark, harcın elde edilmesinde kullanılan tüm malzeme bileşenlerinin tüketim miktarının tespitinde önemli bir faktör olarak ele alınmaktadır. İki yoğunluk değeri arasındaki fark azaldıkça, kullanım yerinde ihtiyaç duyulacak nihai harç miktarı için karışımdaki malzeme tüketim miktarı da azalmaktadır. Bu çalışmada üretilen harçların hafif harç kategorisinde değerlendirilebilmesi için TS EN 998-1 (2011) standardına göre SHBHK değerlerinin 1300 kg/m^3 'ten düşük olması gerekmektedir. Bu amaçla, 1300 kg/m^3 sertleşmiş birim ağırlık değeri üst limit olarak kabul edilmiştir.

Sertleşmiş hafif refrakter harcı örneklerinin sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım değerlerindeki değişim, ayrı bir seri uygulamayla analiz edilmiştir. Sıcaklık etkileşimi için çalışma kapsamında dört ayrı sıcaklık değeri uygulanmış olup sırasıyla 400°C , 550°C , 800°C ve 1050°C 'dir. Yangın esnasında sıcaklığın 1200°C 'ye kadar çıkabileceği bilinmektedir. Ancak, Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan CSH'nin 900°C sıcaklık seviyesinde kimyasal olarak bağlı suyun kaybı ve CSH'nin tamamen ayrışması gerçekleşmektedir (Lin et al., 1996). Bununla birlikte, 800°C civarında alüminli

refrakter beton türevi ürünlerde seramik bağ yapma eğilimi başlamaktadır (Khoury, 1992). Bu sebeple, bu çalışmada en yüksek sıcaklık değeri 800 ve 900 °C'den fazla ve 1200 °C'ye yakın olabilecek şekilde 1050 °C olarak uygulanmıştır. Çimento bağlayıcılı malzemelerin mekanik özelliklerinin, sıcaklık değerinin 300-350°C'nin üzerine çıktığında önemli ölçüde bozulmaya maruz kalabildiği ve sıcaklık değerinin 400°C civarlarına yükseldiğinde ise kırılma hale gelebildikleri rapor edilmiştir (Rambo et al., 2015; Feretti et.al., 2022). Bununla birlikte, çimentolu test örneklerinin yüksek sıcaklıklara maruz kalması şoklama etkisi oluşturabileceği ve böylece örneklerin dış yüzeylerinin yüksek sıcaklıklara ani temas etmesi sebebiyle genişlemeye çalışmasıyla iç gerilmeler oluşturarak mikro çatlakların oluşma ihtimali söz konusudur. Bu nedenle test örnekleri oda sıcaklığından itibaren bir fırın içerisinde 5 °C/dk ısıtma hızı ile deney sıcaklığına kadar ısıtılması sağlandı. Bu sıcaklık değeri fırının pik sıcaklık değeri olarak ele alındı ve fırın pik sıcaklık değerinde sabit tutulması sağlandı. Sonra her bir seri karışımdan 5'şer adet test örneği alınarak, 45 dakika boyunca sabit süreyle ulaşılan bu pik sıcaklığına maruz kalması sağlandı. Bu süre sonunda test örnekleri fırından alınarak bir desikatör ortamında nem almadan soğumaları sağlanarak basınç dayanım analizleri yapılmıştır. Şekil 1 test örnekleri için fırının ısıtma rejimlerini göstermektedir.



Şekil 1. Test edilen örneklerin ısıtma rejimleri.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan tüm test örneklerinin 28 gün kür sonrası dört farklı 400°C, 550°C, 800°C ve 1050°C sıcaklık etkileşimleri sonucu yalnızca basınç dayanım değerlerindeki değişimler açısından analiz edilmiş olup, bu sıcaklık etkileşimlerine bağlı test örneklerinin diğer fiziksel ve yapısal özellik değişimleri ise bu çalışmada irdelenmemiştir. 28 gün kür sonrasında sertleşmiş test örneğinin basınç dayanım değeri ile fırında yüksek sıcaklığa maruz kalmış örneğin basınç dayanımı arasındaki fark, IDHH test örneklerinin dayanım performansı olarak irdelenmiştir. Ayrıca, mika ve MgO kullanımının harç performansına etkisinin sayısal büyüklüğü, sıcaklık etkisi sonrası elde edilen dayanım değerinin eşdeğer koşullarda test edilmiş kontrol harcı test örneklerinin değerleriyle mukayese edilerek tanımlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

IDHH test örneklerinin toz formda karışım öncesi yığın yoğunlukları, karma suyu sonrası yaş harcın birim hacim kütle “YHBHK”, 28 gün kür sonrası sertleşmiş harcın birim hacim kütle “SHBHK” ve gözeneklilik değerleri toplam karışımdaki Mika+MgO kullanım oranına göre Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca, ağırlıkça Mika+MgO miktarının bağlayıcı bileşenler hariç diğer tüm agregaların toplamına oranı (MM/A) Tablo 2’de verilmiştir.

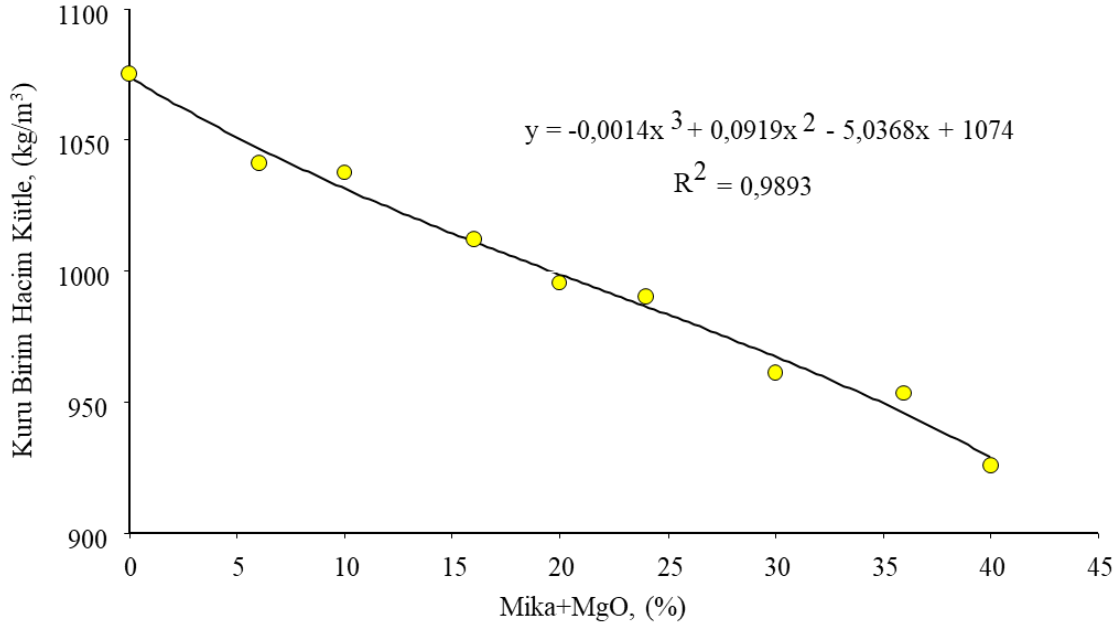
Tablo 2. IDHH test örneklerinin analiz bulguları.

Numune	Mika+MgO (ağırlıkça %)	MM/A	Toz Yığın Yoğunluk (kg/m ³)	Yaş Harç Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Sertleşmiş Harç Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Gözeneklilik Oranı (%)
RF0	0	0.00	778	1502	1075	6.67
RF1	6	0.10	762	1472	1041	7.05
RF2	10	0.19	751	1452	1037	7.15
RF3	16	0.34	736	1423	1012	7.85
RF4	20	0.46	727	1404	995	8.95
RF5	24	0.61	717	1386	990	9.59
RF6	30	0.90	704	1360	961	9.74
RF7	36	1.32	691	1335	953	9.90
RF8	40	1.72	682	1318	926	10.20

3.1. Yoğunluk ve Gözeneklilik

Kontrol harcı olarak tasarlanmış IDHH örneğinin ortalama toz yığın yoğunluğu 778 kg/m³ olup, karma suyu sonrası YHBHK ve SHBHK değerleri sırasıyla 1502 kg/m³ ve 1075 kg/m³’tür. Mika+MgO tozu katkılı IDHH örneklerinin toz yığın yoğunluğu 682 kg/m³ - 762 kg/m³ aralığındadır. Mika+MgO tozu katkı oranı arttıkça toz yığın yoğunluk değeri düşmekte olup, kontrol harcı

tasarımından daha hafif bir karışım oluşmaktadır. Benzer eğilim YHBHK değerleri için de görülmüştür. Mika+MgO tozu katkı oranının artma miktarına bağlı olarak YHBHK değerleri 1472 kg kg/m³'ten 1318 kg/m³ değerine kadar düşmektedir. En yüksek Mika+MgO tozu katkı oranında kontrol harcı tasarımına göre YHBHK değerinde ortalama %12.3'lük bir hafifleme sağlanmıştır. Mika+MgO tozu katkı oranına bağlı tüm IDHH test numunelerinin karışım bileşenlerine bağlı 28 gün kür sonrasında etüv kurusu birim hacim kütle değerleri arasındaki değişim Şekil 2'de analiz edilmiştir.

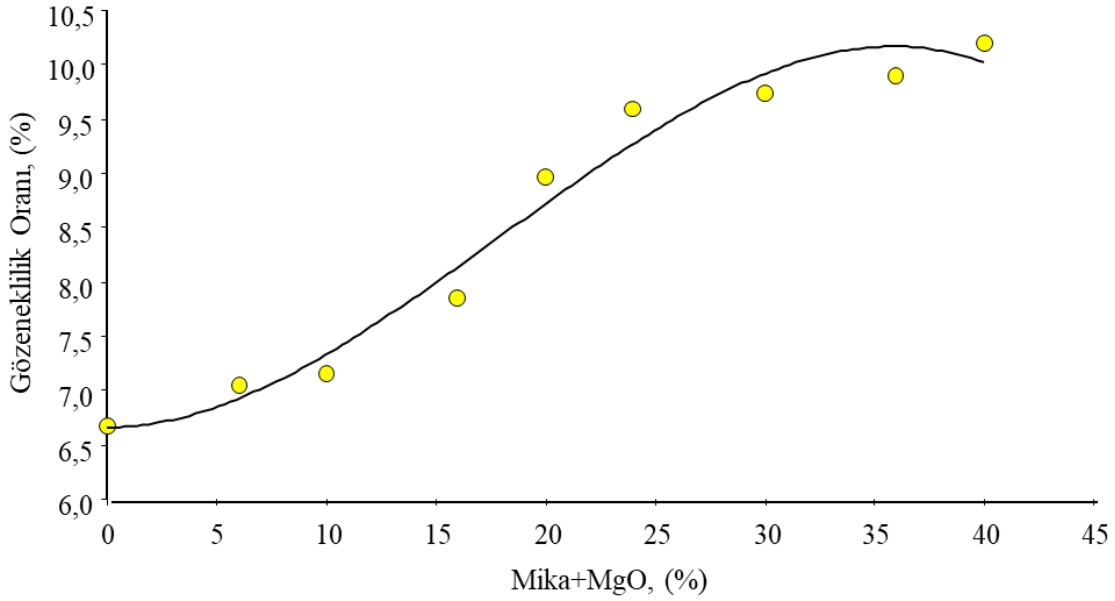


Şekil 2. IDHH test numunelerinin Mika+MgO oranına bağlı birim hacim kütle değişimi.

Mika+MgO tozu katkı oranının artma miktarına bağlı olarak SHBHK değerleri 1041 kg/m³'ten 926 kg/m³ değerine kadar düşmektedir. Karışımda mika oranı arttıkça, mikanın çalışmada kullanılan boyutunun pulsu formu sebebiyle, harç matris yapısında yer yer pullar arası boşlukların oluştuğu düşünülen bir form kazandığı ve bu sebeple test örneğinin birim hacim kütle değerini azaltıcı bir etken oluşturduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda, mika oranı arttıkça, matris yapı daha fazla oranda gözenekli bir form kazandığı ve yığın yoğunluk düşüşüyle birlikte malzemenin hafiflediği düşünülmüştür. MgO tozu boyutunun ise matris yapıda iyi düzeyde değerlendirilebilecek bir dolgu görevi üstlendiği de gözlenmiştir. En yüksek Mika+MgO tozu katkı oranında kontrol harcı tasarımına göre SHBHK değerinde ortalama %13,9 hafiflemiştir. Karışım tasarımlarında mika ve MgO tozu miktarları ağırlıkça eşdeğer oranlarda her bir seride artırımlı olarak kullanılmıştır. Ancak, bu tasarımlarda MgO tozu kullanılmaksızın MgO miktarının yerine de mika kullanımı düşünüldüğünde, boyutlanmış mikanın yığın yoğunluğunun toz MgO yığın yoğunluğundan daha düşük olması

sebebiyle çalışma bulgularında elde edilen SHBHK değerinde yaklaşık %8-%11 oran aralığında bir hafifleme olabileceği öngörülebilir.

Kontrol harcı olarak tasarlanmış sertleşmiş IDHH örneğinin gözeneklilik oranı ortalama %6.67'dir. IDHH test örneklerinin gözeneklilik oranları karışımdaki Mika+MgO kullanım oranına bağlı olarak %7.05 - %10.2 aralığında değişmiştir. Mika oranı arttıkça gözeneklilik oranı da artış eğilimindedir. Tüm test numunelerinin gözeneklilik değişimi ve karışımdaki mika+MgO miktarı ilişkisi Şekil 3'de analiz edilmiştir.

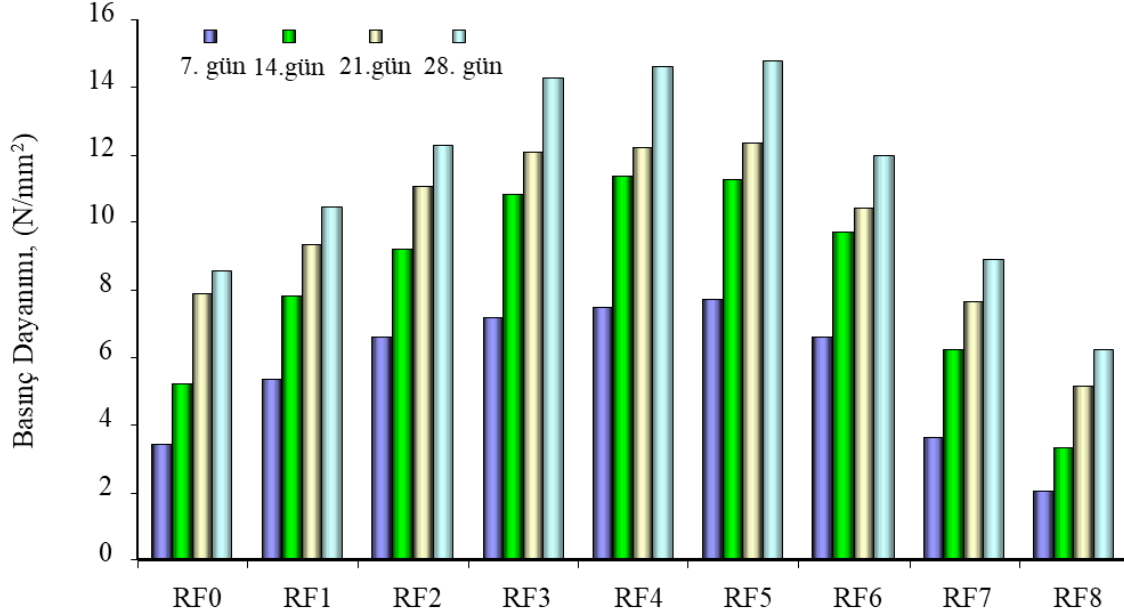


Şekil 3. IDHH test numunelerinin Mika+MgO oranına bağlı gözeneklilik ilişkisi.

Test örneklerinde mika+MgO miktarı arttıkça gözeneklilik oranı artmaktadır. Test örneklerinin analizinde mika içermeyen kontrol örneklerine kıyasla yarı pul boyutlu mika partiküllerinin varlığına bağlı olarak %5.7 - %52.9 oranlarında değişen daha gözenekli matris yapıların oluştuğu belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık ortamına maruz kalacak harç uygulamalarında matris yapıda gözeneklilik miktarının düşük düzeylerde olması arzu edilir. Sıcaklık etkisiyle birlikte gözeneklerde bulunan durağan havanın ısınarak iç basınç artışına sebep olması, matris yapının mukavemetini düşürerek deformasyon oluşturmaktadır. Bu da bu harç ile yapılmış yapı elemanın sıcaklık etkisiyle dayanımının düşmesine neden olur. Ancak, malzeme bileşiminde sıcaklık ortamına direnci yüksek kimyasal bileşenlerin varlığı ve morfolojik yapısına da bağlı olmak koşuluyla, matris yapıdaki gözeneklilikte artış olmasına rağmen sıcaklık etkisi sonucu dayanımın değerlerinde daha düşük oranlarda kayıp oluşmuştur. Harç tasarımlarına bu özelliği kazandıran inorganik materyaller arasında mika ve MgO önemli bir yer tutmaktadır.

3.2. Basınç Dayanımı

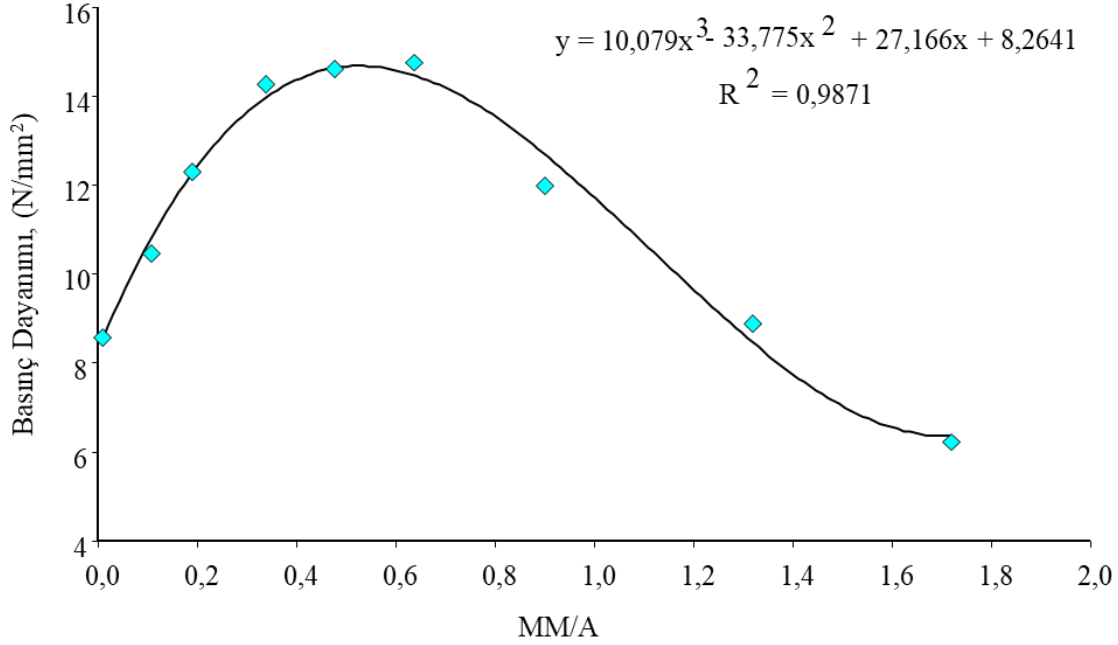
Tüm IDHH test örneklerinin 7, 14, 21 ve 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri Şekil 4'te karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



Şekil 4. IDHH test numunelerinin basınç dayanım analizi.

Tasarımında mika ve MgO bulunmayan kontrol karışımı RF0'ın 7 – 28 günlük basınç dayanım değerleri 3.41 MPa'dan 8.59 MPa'a gelişim göstermiştir. RF0 karışımında bağlayıcı olarak üçlü sistemin kullanımıyla numune dökümlerinden sonra kısa zaman periyodunda erken mukavemet kazandığı gözlenmiş ve numunelerin dayanım kazanma olgusu 28 gün boyunca gelişim göstermiştir. Benzer olgu karışımlara mika ve MgO ilave edildiğinde de gözlenmiştir. Kontrol harcı örneklerinin dayanım değerleriyle mukayese edildiğinde mika ve MgO katkısı belirli orana kadar karışıma ilave edildiğinde dayanım değerlerinde artış olmuş, ancak daha ileri oranlarda mika+MgO kullanımının dayanımı genel bir eğilim olarak azaltmıştır. Özellikle mika+MgO toplam oranı %24 olan RF5 karışım tasarımına kadar, kontrol harcına göre IDHH örneklerinin 28 günlük dayanım değerleri sırasıyla (RF1, RF2, RF3, RF4 ve RF5 için) %21.8, %43.2, %66, %70.1 ve %71.8 oranlarında artarak gelişim göstermiştir. RF5 karışım tasarımından sonraki RF6 ve RF7 karışımlarında dayanımların düştüğü görülmekte olup, kontrol karışımı dayanım değerine göre değişimleri ise sırasıyla %39.7 ve %3.6 olarak belirlenmiştir. Ancak, mika+MgO toplam oranı %40 olan RF8 karışım tasarımında ise 28 gün kür sonrası basınç dayanımının kontrol örneği dayanımına göre %27.4 oranında düşerek, daha zayıf bir mukavemet değeri sağladığı tespit edilmiştir. Bu inceleme bulguları, harç karışım tasarımında mika ve MgO miktarı için optimum kullanım oranının belirlenmesi gerekliliğini

gündeme getirmektedir. Bu bağlamda çalışma kapsamında karışımda MM/A oran değerlerine bağlı 28 günlük basınç dayanım değişimi grafiksel olarak analiz edilmiş olup, elde edilen polinomun dönüm noktası optimum mika+MgO oranı olarak değerlendirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. MM/A oran değerleri - basınç dayanım ilişkisi.

Şekil 5 irdelendiğinde, en yüksek basınç dayanımının RF5 kodlu örneklerde olduğu görülmektedir. Bu sebeple, Tablo 1 ve Şekil 5 birlikte irdelendiğinde, özellikle yarı pul boyutlu mika kullanımında optimum kullanım oranının %12 olduğu tespit edilmiştir. Bu orandan daha yüksek miktarda mika varlığı, harcın matris yapısında gözenek oluşumunu önemli ölçüde arttırdığı ve daha kırılğan bir karakteristik form kazandırdığı belirlenmiştir. Karışımlarda kullanılan MgO'in mikronize boyutta olması, dolgu materyali olarak da görev yapmasını sağlamıştır. Bu incelemede dayanım düşüşlerinin MgO toz katkı kaynaklı değil, mika partikülleri kaynaklı olduğu genel olarak gözlenmiştir. Bununla birlikte, karışım tasarımlarında mika yerine MgO miktarının ikame olarak ilave edilmesi durumu irdelendiğinde, karışımda mika oran artışına bağlı elde edilen dayanım düşüşlerinin giderilebileceği öngörülebilir. Bunda etken olan hususun, MgO miktarı, boyutu gereği daha iyi bir matris dolgusu yapabilmesi ve ayrıca priz sonrası daha yığın yoğunluğun artmasına paralel olarak dayanım değerinin de artma eğilimi gösterebileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, yüksek basınç dayanımı arzu edilen IDHH örneklerinin tasarımında ağırlıkça yüksek oranda mika kullanılmaması ya da tasarım bileşiminin MgO katkısıyla desteklenmesinin önem kazandığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda yapılan teknik bir değerlendirmede mika içermeyen ve mika miktarı yerine MgO katkısıyla destekli IDHH örneğinin basınç dayanımında yaklaşık %5-%8 oran aralığında bir artış eğilimi elde edilebileceği görülmüştür.

TS EN 998-1 standardında (TS EN, 2011) kaba ve ince sıva amaçlı kullanılacak harçlar kullanım amaçlarına göre 6 ayrı gruba ayrılmış olup, harçların TS EN 1015-11 standardına (TS EN, 2020) göre yapılmış 28 günlük basınç dayanım (σ_{28}) sınırları 4 ayrı kategoride sınıflandırılmıştır (Tablo 3):

- Genel amaçlı kaba/ince sıva harcı, “GP”, σ_{28} Sınıfı: CS I – CS IV
- Hafif kaba/ince sıva harcı, “LW”, σ_{28} Sınıfı: CS I – CS III
- Renkli kaba sıva harcı, “CR”, σ_{28} Sınıfı: CS I – CS IV
- Dış kullanım için tek tabaka kaba sıva harcı, “OC”, σ_{28} Sınıfı: CS I – CS IV
- Yenileme harcı, “R”, σ_{28} Sınıfı: CS II
- Isı yalıtımı sağlayan harç, “T”, σ_{28} Sınıfı: CS I – CS II

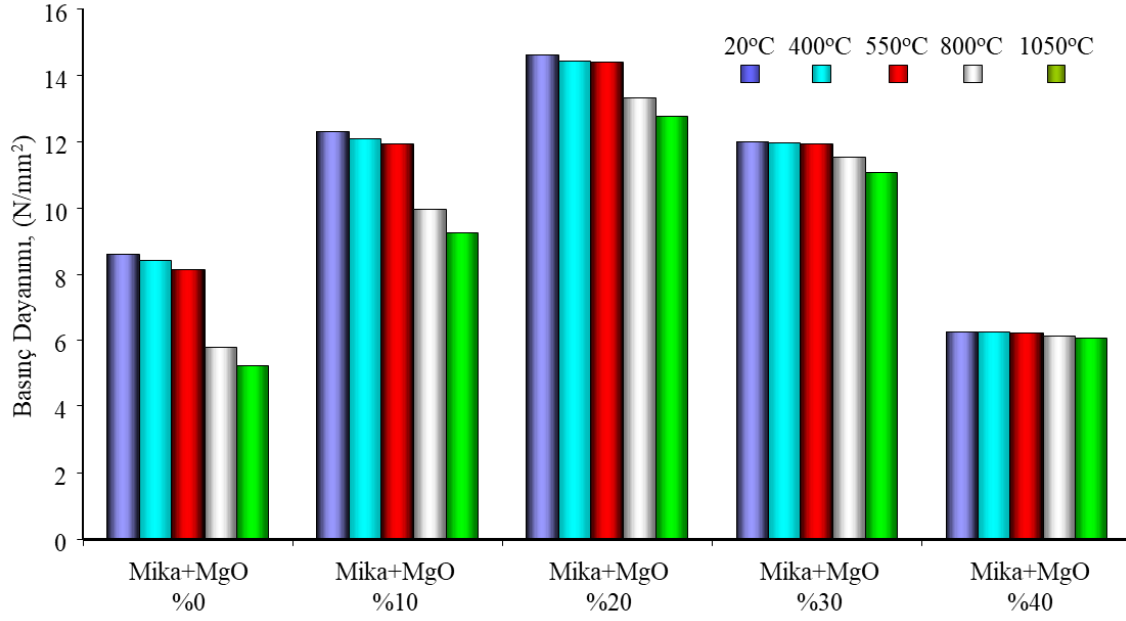
Tablo 3. Basınç dayanım özelliklerine göre sertleşmiş harç sınıfları (TS EN, 2011).

Sınıflar	28 günlük basınç dayanım değeri
CS I	0.4 - 2.5 MPa
CS II	1.5 - 5 MPa
CS III	3.5 – 7.5 MPa
CS IV	≥ 6 MPa

Burada belirtilen basınç dayanım sınıfları dikkate alındığında, IDHH test örneklerinde elde edilen dayanım değerlerinin tamamının CS IV sınıfı için öngörülen ≥ 6 MPa’lık değeri sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte TS EN 998-1 standardı Tablo 2’de belirtilen sertleşmiş harçların sahip olması gerekli özellikler listesinde LW hafif kaba/ince sıva amaçlı harçlar için öngörülen birim hacim kütle değeri ≤ 1300 kg/m³ olması belirtilmiştir. Bu bağlamda, çalışma kapsamındaki harçların basınç dayanımları TS EN 998-1 standardında (TS EN, 2011) kaba ve ince sıva amaçlı kullanılacak harçlar için sınır kabul edilen değerlerin üstündedir.

3.3. Sıcaklık Etkileşimi Sonrası Basınç Dayanımı

Mika ve MgO’in üçlü sistem bağlayıcılı harcın yüksek sıcaklığa karşı dayanımında etkinliğinin analizi amacıyla 4 ayrı sıcaklık değeri çalışma kapsamında analiz edilmiştir. Bu sıcaklık değerleri 400°C, 550°C, 800°C ve 1050°C’dir. Bununla birlikte IDHH test örneklerinin hazırlanmasını müteakip 28 gün kür sonunda test edilen basınç dayanım değerleri de çalışma kapsamında 20 °C’lik sıcaklık ortamında yapılan analiz bulguları, sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım değerlerinin kıyaslamasını yapabilmek amacıyla irdelenmiştir. Kontrol harcı örnekleriyle birlikte mika+MgO oranı %10, %20, %30 ve %40 olan karışımlara ait sıcaklık etkileşimi sonrası numunelerin basınç dayanım değerlerindeki değişim grafiksel olarak Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Sıcaklık etkileşimlerine bağlı basınç dayanım analizi.

Şekil 6 irdelendiğinde görüldüğü üzere tüm test örneklerinin artan sıcaklık değerlerine maruz kaldığında farklılık arz eden değişken oranlarda dayanım değerlerinde azalma görülmektedir. Kontrol karışımı RF0 örneklerinde 400°C sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı %2.3 olup, maruz kalınan sıcaklık değeri arttıkça dayanım kaybı da artmaktadır. 550 °C, 800 °C ve 1050 °C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybı sırasıyla %5.7, %48.3 ve %63.8 olarak tespit edilmiştir. Bu analiz grubunda 550 °C'den sonra kontrol harcı matris yapısının bozunmaya uğrayarak hızla dayanım değerlerinin düştüğü ve özellikle 800 °C ve üzeri sıcaklık değerlerinde dayanım değerinin önemli ölçekte zayıfladığı görülmüştür. Kontrol örnekleri 800 °C ve üzeri sıcaklığa maruz kaldığında yukarıda da değinildiği üzere TS EN 998-1 standardına göre CS IV sınıfı için öngörülen ≥ 6 MPa'lık değer altına gerilediği belirlenmiştir.

Mika+MgO oranı %10 olan karışım tasarımında (RF2) 400°C sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı %2 iken, kontrol karışımına benzer şekilde maruz kalınan sıcaklık değeri arttıkça dayanım kaybı da artmaktadır. Ancak bu karışım tasarımı için elde edilen dayanım kaybı değerleri, kontrol harcı değerlerindeki kayıp değerinden daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir. 550°C, 800°C ve 1050°C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybı sırasıyla %3.2, %23.5 ve %32.7 olarak tespit edilmiştir. Bu analiz grubunda da 550°C'den sonra %10 mika+MgO katkılı harcın matris yapısının bozunmaya uğrayarak görece daha düşük oranlarda dayanım değerlerinin düştüğü ve özellikle 800°C ve üzeri sıcaklık değerlerinde dayanım değeri düşüşünün belirginleştiği görülmüştür. %10 mika+MgO katkılı örneklerin 1050°C'de dahil yüksek sıcaklığa maruz kaldığında TS EN 998-1 standardına göre CS IV sınıfı için öngörülen ≥ 6 MPa'lık değeri sağladığı ve yüksek dayanıklılık özelliğini kaybetmediği belirlenmiştir. 800°C'ye maruz kalmış RF2 örneklerinin basınç dayanımı

eşdeğer sıcaklık için kontrol örneğine göre 1.72 kat dayanımı daha yüksektir. Sıcaklık değeri 1050°C'ye yükseldiğinde ise dayanımdaki bu değişim 1.77 kat olmuştur. %10 mika+MgO katkısıyla birlikte sıcaklık etkileşimi sonrası IDHH test örneklerinin dayanım değerlerinin kayba uğramasına rağmen, nihai dayanımlarının standardın öngördüğü dayanım limitlerini sağladığı açıkça görülmektedir.

Diğer bir grup seride mika+MgO oranı %20 olan karışım tasarımında (RF4) 400°C sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı %1.2 iken, diğer karışımlara benzer şekilde maruz kalınan sıcaklık değeri arttıkça dayanım kaybı da göreceli olarak artmıştır. Ancak bu karışım tasarımı için dayanım kaybı daha düşük bir eğilimle değişmektedir. 550°C, 800°C ve 1050°C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybı sırasıyla %1.7, %9.7 ve %14.5 olarak tespit edilmiştir. Bu analiz grubunda 800°C'den sonra %20 mika+MgO katkılı harcın matris yapısının bozunmaya uğrayarak görece daha düşük oranlarda dayanım değerlerinin düştüğü ve özellikle 1050°C sıcaklık değerlerinde dayanım değeri düşüşünün belirginleştiği görülmüştür. %20 mika+MgO katkılı örneklerin 1050°C'de dâhil yüksek sıcaklığa maruz kaldığında TS EN 998-1 standardına göre CS IV sınıfı için öngörülen ≥ 6 MPa'lık değeri sağladığı ve yüksek dayanıklılık özelliğini kaybetmediği belirlenmiştir. 800°C'ye maruz kalmış RF4 örneklerinin basınç dayanımı eşdeğer sıcaklık için kontrol örneğine göre 2.30 kat dayanımı daha yüksektir. Sıcaklık değeri 1050°C'ye yükseldiğinde ise dayanımdaki bu değişim 2.43 kat olmuştur.

Mika+MgO kullanım oranı %30 ve üzeri değerlere artırıldığında ise sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım düşüşlerinin giderek azaldığı ve katkı miktarına bağlı dayanımı koruyabilen bir karakteristik kazanmaya başladığı görülmüştür. Örneğin %30 mika+MgO kullanımlı karışım tasarımında 400°C, 550°C, 800°C ve 1050°C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybının sırasıyla %0.6, %0.7, %4.1 ve %8.5 olarak değişmiştir. 800°C'ye maruz kalmış RF6 örneklerinin basınç dayanımı eşdeğer sıcaklık için kontrol örneğine göre 1.99 kat, 1050°C'ye yükseldiğinde ise dayanımdaki bu değişim 2.11 kat olmuştur. Bu değişim eğiliminin %40 mika+MgO kullanımlı karışım tasarımında ise 400°C, 550°C, 800°C ve 1050°C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybının sırasıyla %0.1, %0.3, %1.9 ve %2.8 olarak değişmiştir. 800°C'ye maruz kalmış RF8 örneklerinin basınç dayanımı eşdeğer sıcaklık için kontrol örneğine göre 1.06 kat, 1050°C'ye yükseldiğinde ise dayanımdaki bu değişim 1.16 kat olmuştur. Khaliq ve Khan (2015) normal agrega ile üretilen betonlarda Portland çimentosu ve kalsiyum alümina çimentosunu ayrı ayrı kullanarak yüksek sıcaklıklardaki basınç dayanım kayıplarını tespit etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucuna göre kalsiyum alümina çimentolu betonun yüksek sıcaklıktaki basınç dayanımı kaybı Portland çimentosu ile üretilen betondan daha azdır. Ancak, 600 °C'lik sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda her iki beton türünün de benzer büyük dayanım kayıplarıyla karşılaştıklarını belirtmişlerdir. Benzer sonuçlar Abolhasani ve ark. (2021) tarafından da konvansiyonel agrega ve kalsiyum alümina

çimentosu ile üretilen betonlarda tespit edilmiştir. Mika ve magnezya gibi farklı dolgu veya agrega türlerinin önemi bu sonuç ile daha da ortaya çıkmaktadır. Yapılan bu deneysel çalışmada, Mika+MgO kullanım oranı arttıkça 600 °C üzerindeki sıcaklıklarda örneklerin dayanım kaybının azaldığı gözlemlenmiştir. Diğer bir değişle, karışıma ilave edilen mika ve MgO miktarı attıkça, harç matrisinin yüksek sıcaklıklara son derece dayanıklı bir karakteristik özellik kazandığını göstermiştir. Ancak, bu mika katkı oranının artmasına paralel olarak dayanım değerinin sayısal büyüklüğünde bir düşüş olduğu başlangıç test bulgularında tecrübe edinilmiştir. Burada üzerinde durulması önem arz eden husus, harç tasarımında kullanılacak optimum mika + MgO oranının yapılacak bir seri dayanım analizleri ile belirlenmesi ve maruz bırakılan her bir sıcaklık değişimi için dayanımdaki etkileşimin nasıl geliştiği ve standartlarda kullanım yeri açısından uygunluk kriterlerinin etüt edilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu bağlamda çalışma kapsamında bağlayıcı bileşenler hariç mika+MgO kullanım miktarının karışımda yer alan diğer agrega toplamına oranı (MM/A)'na bağlı basınç dayanım değerlerindeki değişim “ $\Delta\sigma$ ”, maruz kalınan 400, 550, 800 ve 1050°C her bir sıcaklık değeri için ayrı ayrı grafiksel olarak analiz edilmiştir. Basınç dayanım değerlerindeki değişim maruz kalınan sıcaklık bağlamında “ $\Delta\sigma_{Ti}$ ”nın belirlenmesi için aşağıdaki eşitlikte belirtilen yaklaşım kullanılmıştır:

$$\Delta\sigma_{Ti} = [(\sigma_{28} - \sigma_{28_Ti}) / \sigma_{28}] * 100$$

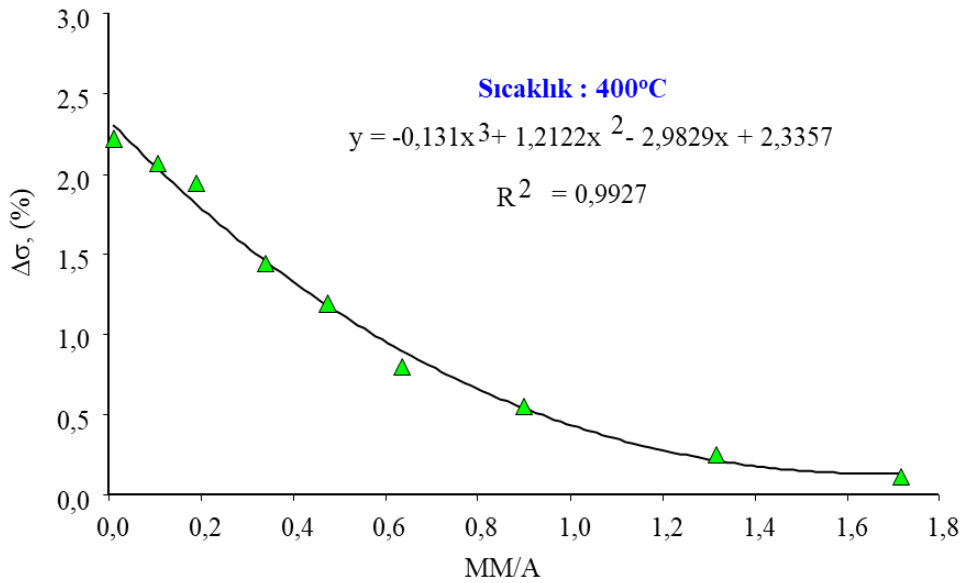
Burada;

$\Delta\sigma_{Ti}$: Maruz kalınan sıcaklık etkisiyle basınç dayanımı değerindeki değişim, %,

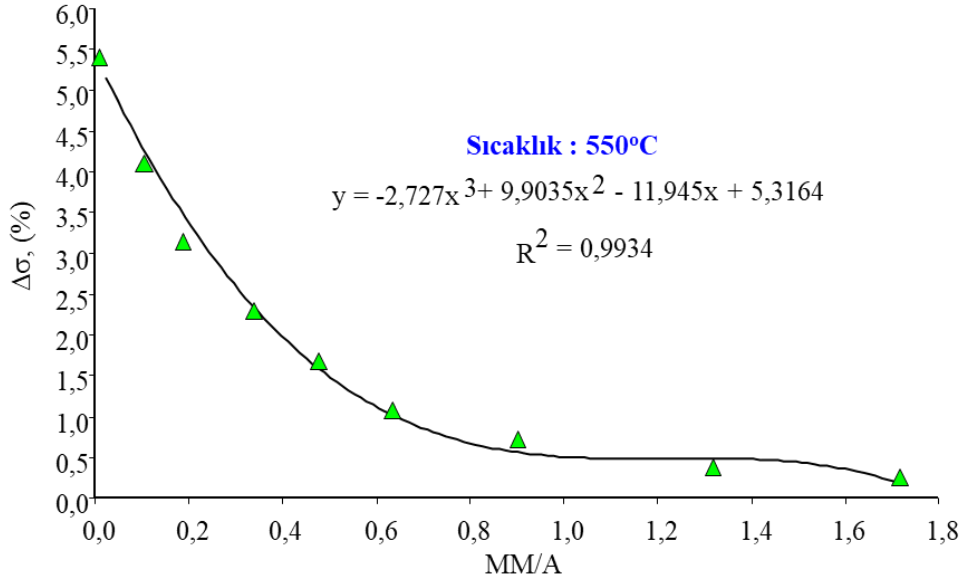
σ_{28} : 28 gün kür sonrası test örneğinin basınç dayanım değeri, N/mm²;

σ_{28_Ti} : Ti °C sıcaklık değerinde etkileşim sonrası test örneğinin basınç dayanım değeri, N/mm².

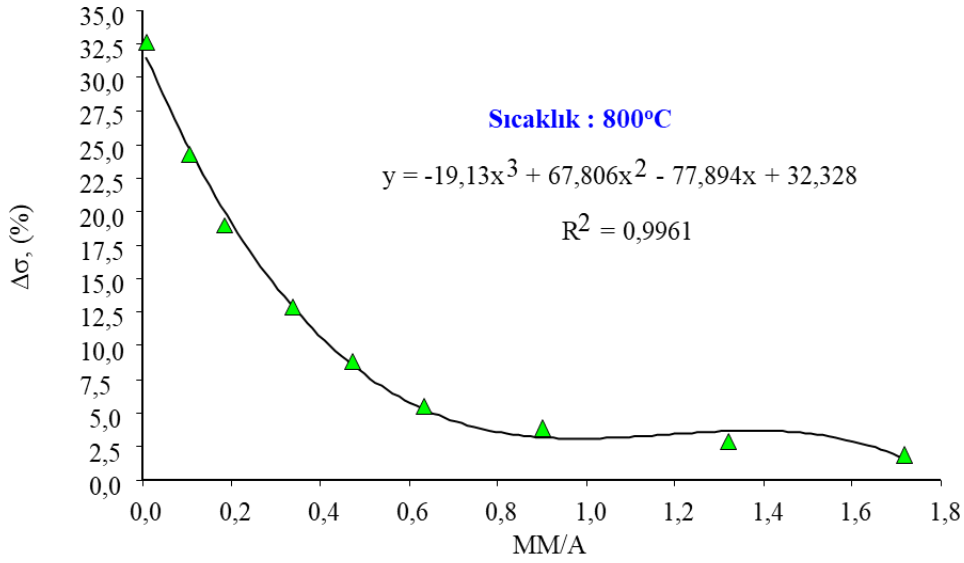
Bulgular Şekil 7 – Şekil 10’da sırasıyla verilmiştir.



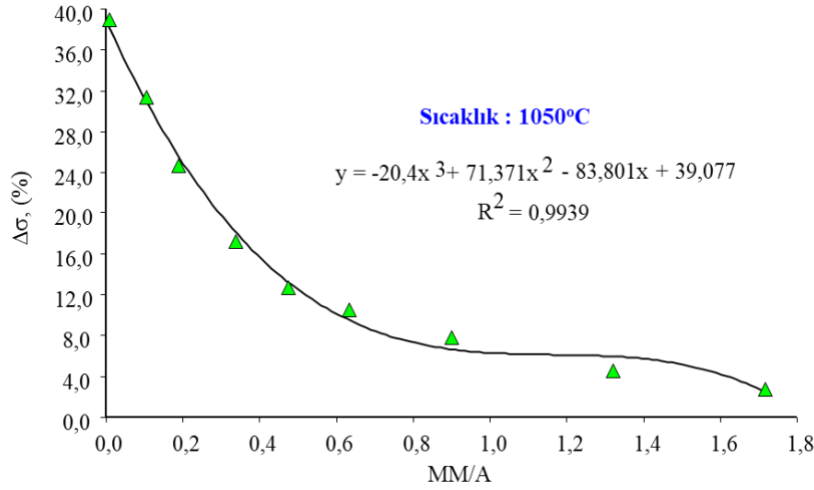
Şekil 7. MM/A ve basınç dayanım değişimi analizi (400°C etkileşiminde)



Şekil 8. MM/A ve basınç dayanım değişimi analizi (550°C etkileşiminde)



Şekil 9. MM/A ve basınç dayanım değişimi analizi (800°C etkileşiminde)



Şekil 10. MM/A ve basınç dayanım değişimi analizi (1050°C etkileşiminde)

Farklı sıcaklıklara maruz kalmış IDHH test örneklerinin MM/A oranına bağlı $\Delta\sigma$ değişimleri incelendiğinde karışım tasarımında mika + MgO oranı arttıkça sıcaklık etkileşimi öncesi ve sonrası numunelerin ortalama dayanım değişimi polinomiyal bir eğilimle azalmaktadır. Yapılan test bulgularından sıcaklık etkileşimleri sonrası basınç dayanım değerlerinde önemli düşüşlerin olduğu ve test örneklerinin matris yapılarında mikro çatlaklar ve yer yer ayrışma şeklinde deformasyonların gelişebildiği de ayrı bir gözlem olmuştur. Bulgular ve deneysel gözlemler irdelendiğinde maksimum 400°C sıcaklığa maruz kalacak IDHH test örnekleri için MM/A kullanım oranının >0.12 olduğu karışımlarda yukarıda söz konusu edilen olumsuzlukların ihmal edilebilecek büyüklüklerde olduğu gözlenmiştir. Bu bağlamda benzer olgu, maksimum 550°C sıcaklığa maruz kalacak IDHH test örneklerde MM/A kullanım oranı için >0.39 olarak belirlenmiştir. Maksimum 800°C veya 1050°C sıcaklıklara maruz kalacak IDHH test örnekleri için ise MM/A kullanım oranlarının sırasıyla >1.69 ve >1.73 olması öngörülebilir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, farklı miktarlarda mika ve magnezya içeren ısıdaç çimento, beyaz çimento ve anhidrit alçı içeren üçlü bağlayıcı sistemli hafif harçlarının mekanik özellikleri üzerine 20 °C'den 1050 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıkların etkileri araştırılmıştır. Deneysel analiz sonuçlarına göre:

1. En yüksek Mika+MgO tozu katkı oranında kontrol harcı tasarımına göre YHBHK değerinde ortalama %12.3'lük bir hafifleme sağlanmıştır. Test örneklerinin analizinde mika içermeyen kontrol örneklerine kıyasla yarı pul boyutlu mika partiküllerinin varlığına bağlı olarak %5.7 - %52.9 oranlarında değişen daha gözenekli matris yapıların olduğu belirlenmiştir.
2. Özellikle mika+MgO toplam oranı %24 olan RF5 karışım tasarımına kadar, kontrol

harcına göre IDHH örneklerinin 28 gün kür sonrası dayanım değerleri sırasıyla (RF1, RF2, RF3, RF4 ve RF5 için) %21.8, %43.2, %66, %70.1 ve %71.8 oranlarında artarak gelişim göstermiştir.

3. Çalışma kapsamında, yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce, normal hafif harç örneklerinde özellikle yarı pul boyutlu mika kullanımında optimum katkı kullanım oranının %12 olduğu tespit edilmiştir.
4. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harç örneklerinde, kontrol karışımı RF0 örneklerinde 400°C sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı %2.3 olup, maruz kalınan sıcaklık değeri arttıkça dayanım kaybı da artmaktadır. 550 °C, 800 °C ve 1050 °C sıcaklık etkileşimleri sonrası dayanım kaybı sırasıyla %5.7, %48.3 ve %63.8 olarak tespit edilmiştir.
5. Mika+MgO oranı %10 olan karışım tasarımında (RF2) sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı sırasıyla %2, %3.2, %23.5 ve %32.7 olarak tespit edilmiştir. Mika+MgO oranı %20 olan karışım tasarımında sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı sırasıyla %1.2, %1.7, %9.7 ve %14.5 olarak tespit edilmiştir. Mika+MgO oranı %30 olan karışım tasarımında sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı sırasıyla %0.6, %0.7, %4.1 ve %8.5 olarak tespit edilmiştir. Mika+MgO oranı %40 olan karışım tasarımında sıcaklık etkileşimi sonrası dayanım kaybı sırasıyla sadece %0.1, %0.3, %1.9 ve %2.8 olarak tespit edilmiştir.

Bu analiz bulguları, karışıma ilave edilen mika ve MgO miktarı attıkça, harç matrisinin yüksek sıcaklıklara son derece dayanıklı bir karakteristik özellik kazandığını göstermiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalabilecek, taşıyıcı olmayan uygulamalarda, beyaz çimento-kalsiyum alümina çimentosu-kalsiyum sülfat üçlü bağlayıcı sistemlerinde yüksek oranda mika+MgO kullanılabileceği bu çalışma çıktılarına göre önerilebilmektedir.

Teşekkür

Bu kısımda çalışmada yardımları ya da destekleri bulunan kişi veya kişilere ya da kurumlara teşekkür edilebilir.

Yazarların Katkısı

Yazarların çalışmaya katkısı: Lütfullah Gündüz %60, Şevket Onur Kalkan %40.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abolhasani, A., Samali, B., & Aslani, F. (2021). Physicochemical, mineralogical, and mechanical properties of calcium aluminate cement concrete exposed to elevated temperatures. *Materials*, 14(14), 3855. <https://doi.org/10.3390/ma14143855>
- Abyzov, A. N. ve Kiryanova, L. A., (1981). Lightweight cellular and porous refractory concrete based on phosphate binding, *Concrete and reinforced concrete*, 12: 15-16.
- Anonim, 2022. Çimsa A.Ş., 2022, “Isıdaç 40 – Refrakter”, Teknik Bilgi dokümanı, Çimsa A.Ş.
- Anonim, 1987. “Refractories”, The Refractories Institute, 301 fifth Avenues Suite 1517.Pittsburgh, PA 15222, <http://www.pqcorp.com/portals/1/lit/Refractoriesbooklet.pdf>, Page 4- 6.
- ASTM, 2020. ASTM C109/C109M-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens, ASTM International.
- ASTM, 2021. ASTM C642-21, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International
- AzariJafari, H., Amiri, M. J. T., Ashrafian, A., Rasekh, H., Barforooshi, M. J., & Berenjjan, J. (2019). Ternary blended cement: An eco-friendly alternative to improve resistivity of high-performance self-consolidating concrete against elevated temperature. *Journal of Cleaner Production*, 223, 575-586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.054>
- Bizzozero, J., & Scrivener, K. L. (2015). Limestone reaction in calcium aluminate cement–calcium sulfate systems. *Cement and Concrete Research*, 76, 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.019>
- Cai, Y., Meng, F., Liu, L., Liu, R., Cui, Y., Zheng, H., and Wang, F., (2021). The Effect of the Modification of Mica by High-Temperature Mechanochemistry on the Anticorrosion Performance of Epoxy Coatings. *Polymers*, 13: 378. <https://doi.org/10.3390/polym13030378>
- Chang, W., Wang, W., Liu, L., Zhang, J., Wang, L., & Pei, M. (2008). Effect of different polymer lattices on performance of their modified rapid hardening sulphoaluminate cement mortars. *Materials Research Innovations*, 12(3), 134-137. <https://doi.org/10.1179/143307508X333640>
- Dawy, M., (2002). Electrical Properties and Infrared Studies of Heated Mica Sheets. *Egypt. J. Sol.*, 25(1):137-152.
- De Gasparo, A., Herwegh, M., Zurbriggen, R., & Scrivener, K. (2009). Quantitative distribution patterns of additives in self-leveling flooring compounds (underlayments) as function of application, formulation and climatic conditions. *Cement and Concrete Research*, 39(4), 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.009>
- El-Leathy, A., Jeter, S., Al-Ansary, H., Abdel- Khalik, S., Golob, M., Danish, S. N., Saeed, N., Djajadiwinata, E., Al-Suhaibani, Z., (2016). Experimental measurements of thermal properties of high-temperature refractory materials used for thermal energy storage. *AIP Conference Proceedings* 1734, 050012 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.4949110>
- Ferretti, F., Tilocca, A. R., Incerti, A., Mazzotti, C., & Savoia, M. (2022). Effects of Thermal Variations on the Tensile Behavior of FRCM Strengthening Systems. *J. Compos. Constr.*, 26, 4022067.
- Georgin, J. F., & Prud'Homme, E. (2015). Hydration modelling of an ettringite-based binder. *Cement and Concrete Research*, 76, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.009>
- Gu, P., Beaudoin, J. J., Quinn, E. G., & Myers, R. E. (1997). Early strength development and hydration of ordinary Portland cement/calcium aluminate cement pastes. *Advanced Cement Based Materials*, 6(2), 53-58. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(97\)00008-4](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)00008-4)

- Gu, P., & Beaudoin, J. J. (1997). Lithium salt-based additives for early strength-enhancement of ordinary Portland cement-high alumina cement paste. *Journal Of Materials Science Letters*, 16(9), 696-698.
- Jiang, T., Zhang, W., Liu, S., (2022). Performance Evaluation of a Full-Scale Fused Magnesia Furnace for MgO Production Based on Energy and Exergy Analysis. *Energies*, 15: 214. <https://doi.org/10.3390/en15010214>
- Khaliq, W., & Khan, H. A. (2015). High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 475-487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.023>
- Khoury, G. A., (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. *Magazine of concrete Research*, 44(161), 291-309.
- Lin, W. M., Lin, T. D., Powers-Couche, L. J., (1996). Microstructures of fire-damaged concrete. *Materials Journal*, 93(3), 199-205.
- Mahdi, Z. H., (2018). Effect the addition of mgo powder on some properties of concrete. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(11): 1819-6608.
- Nesse, W. D., (2000). Introduction to mineralogy. New York: Oxford University Press. pp. 244–249. ISBN 9780195106916.
- Onishi, K., & Bier, T. A. (2010). Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1034-1040. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.004>
- Popov, O. N., Lisovskaya, G. P., Bogomol'nyi, M. Y., Krasnyi, L. E., Senatova, V. A., (1984). Calculation of the optimal variants of thermal insulation for glass-melting furnaces, *Glass and Ceramics*, 41: 113-115.
- Pundiene, I., Antonovich, V., Stonys, R., Demidova-Buiziniene, I., (2011). Development of refractory concrete for extreme conditions. 5th BalticConferenceonSilicateMaterials, IOP Publishing, *IOP Conf.Series:MaterialsScienceandEngineering* 25, 012001, doi:10.1088/1757-899X/25/1/012001
- Rambo, D. S., Silva, F. A., Filho, R. T., & Gomes, O. M. (2015). Effect of elevated temperatures on the mechanical behavior of basalt textile reinforced refractory concrete. *Mater. Des.* 65, 24–33.
- Rego, A. C. D. A., Cardoso, F. A., & Pileggi, R. G. (2021). Ternary system Portland cement-calcium aluminate cement-calcium sulfate applied to self-leveling mortar: a literature review. *Cerâmica*, 67, 65-82. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132021673812929>
- Sadik, C., El Amrani, I. E., Albizane, A., (2013). Composition and refractory properties of Mixtures of Moroccan Silica-Alumina Geo-materials and Alumina. *New Journal of Glass and Ceramics*. Vol.3, Scientific Research, An Academic Publisher, 2013, USA, Page 59.
- Seifert, S., Neubauer, J., Goetz-Neunhoffer, F., & Motzet, H. (2009). Application of two-dimensional XRD for the characterization of the microstructure of self-leveling compounds. *Powder Diffraction*, 24(2), 107-111. <https://doi.org/10.1154/1.3132642>
- Shikova, T., (2019). Adhesive strength in a high voltage mica insulation system. E3S Web of Conferences 140, 11006, EECE-2019 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011006>
- Torréns-Martín, D., Fernández-Carrasco, L., & Blanco-Varela, M. T. (2013). Conduction calorimetric studies of ternary binders based on Portland cement, calcium aluminate cement and calcium sulphate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 114, 799-807. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3003-9>
- TS EN 2011. TS EN 998-1, Kâgir harcı - Özellikler - Bölüm 1: Kaba ve ince sıva harcı, TSE, Ankara, s20.
- TS EN, 2020. TS EN 1015-11, Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, TSE, Ankara, s15.
- Wu, Q., Zou, Y., Gu, J., Xu, J., Ji, R., Wang, G., (2020). The Influence and Action Mechanization of Mineral Mixed Material on High Fluidity Potassium Magnesium Phosphate Cement (MKPC), *Journal of Composites Science*, 4(1): 29. doi:10.3390/jcs4010029
- Xu, L., Wang, P., De Schutter, G., & Wu, G. (2014). Effect of calcium aluminate cement variety on the hydration of portland cement in blended system. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 29, 751-756. DOI 10.1007/s11595-014-0991-7
- Xu, L., Wu, K., Rößler, C., Wang, P., & Ludwig, H. M. (2017). Influence of curing temperatures on the hydration of calcium aluminate cement/Portland cement/calcium sulfate blends. *Cement and Concrete Composites*, 80, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.016>
- Zanazzi, P. F., Pavese, A., (2002). Behavior of Micas at High-Pressure and High-Temperature. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 46(1): 99-116. DOI:10.2138/rmg.2002.46.02.
- Zhang, X., He, Y., Lu, C., & Huang, Z. (2017). Effects of sodium gluconate on early hydration and mortar performance of Portland cement-calcium aluminate cement-anhydrite binder. *Construction and Building Materials*, 157, 1065-1073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.153>