



Nano SiO₂ Katkılı Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi

Cuma Kara^{1*}

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Artvin, Türkiye (ORCID: 0000-0003-2905-4515)

(İlk Geliş Tarihi 18 Nisan 2020 ve Kabul Tarihi 23 Mayıs 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.722814)

ATIF/REFERENCE: Kara, C. (2020). Nano SiO₂ Katkılı Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 247-253.

Öz

Nano malzemelerin çimentolu kompozitlerde kullanımına yönelik çalışmalar her geçen gün artmaktadır. Özellikle nano SiO₂ üstün pozolanik özelliği ve boşluk doldurma yeteneği sebebiyle en fazla kullanılan malzemelerden biridir. Yalnızca harç ya da betonun dayanım özelliklerini değil dayanıklılık özelliklerini de nasıl etkilediğinin irdelenmesine yönelik araştırmalar sürmektedir. Yüksek sıcaklık yapıların doğrudan ya da dolaylı olarak maruz kaldığı etkilerden biridir. Yapı malzemelerinin yüksek sıcaklık altındaki davranışlarının bilinmesi dayanıklılık açısından önemli bir husustur. Bu çalışmanın amacı nano SiO₂'in çimento harçlarının yüksek sıcaklık direncine etkilerini belirlemektir. Bu amaca yönelik olarak %0, 1, 2 ve 3 oranlarında nano SiO₂ çimento ile ikame edilerek dört farklı harç karışımı hazırlanmıştır. 7, 28 ve 90. günlerde harç karışımları üzerinde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Nano SiO₂'in harçların yüksek sıcaklık direncine etkilerini belirlemek amacıyla, 50x50x50 mm³ boyutlarında üretilen örnekler 90 günlük kürün ardından 3 saat süresince 300 ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılarak fırın içinde kendiliğinden soğutulmuştur. Referans sıcaklık olarak 20 °C kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulaması sonrasında sertleşmiş harç örneklerinin ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı kaybı ve basınç dayanımları incelenmiştir. Ayrıca, 600 °C sıcaklık sonrası mikro yapı incelemesi amacıyla örneklerin SEM görüntüleri alınmıştır. Sonuç olarak, 7. günde %2 nano SiO₂ ikamesinin eğilme dayanımını %20.0, basınç dayanımını ise referans karışıma göre %24.25 arttırdığı, özellikle erken yaştaki dayanıma olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık arttıkça ağırlık kaybının arttığı ve ultrases geçiş hızının azaldığı, yüksek sıcaklık direnci için optimum nano SiO₂ oranının %2 olduğu, ancak çalışmanın maksimum sıcaklığı olan 600 °C'de nano malzeme ikameli ve ikamesiz tüm karışımların kalan basınç dayanımı sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu ve SEM görüntülerinde tüm örneklerde çatlaklar meydana geldiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harç, Nano SiO₂, Yüksek sıcaklık, Dayanım.

Effect of High Temperature on Mechanical Properties of Cement Mortar with Nano SiO₂

Abstract

Studies for the use of nano materials in cementitious composites are increasing day by day. Especially nano SiO₂ is one of the most used materials due to its superior pozzolanic feature and space filling ability. Researchs continue to examine how nano SiO₂ affects not only the strength properties of mortar or concrete, but also its durability properties. High temperature is one of the effects that structures are exposed to directly or indirectly. Knowing the behavior of building materials under high temperature is an important issue in terms of durability. The aim of this study is to determine the effects of nano SiO₂ on the high temperature resistance of cement mortars. For

* Sorumlu Yazar: Artvin Çoruh Üniversitesi, Borçka Acarlar Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Artvin, Türkiye, ORCID: 0000-0003-2905-4515, cumakara@yandex.com

this purpose, four different mortar mixes were prepared by 0, 1, 2 and 3% nano SiO₂ substituting cement. On the 7th, 28th and 90th days, flexural and compressive strength tests were carried out on the mortar mixtures. In order to determine the effects of nano SiO₂ on the high temperature resistance of mortars, the samples produced in the dimensions of 50x50x50 mm³ were exposed to 300 and 600 °C for 3 hours after 90 days of curing. The samples were then self-cooled in the oven. 20 °C was used as reference temperature. After high temperature application, weight loss, loss of ultrasonic pulse velocity and compressive strength of hardened mortar samples were examined. In addition, SEM images of the samples were taken for microstructure analysis after 600 °C temperature. As a result, it was determined that on the 7th day, 2% nano SiO₂ substitution increased the flexural strength by 20.0% and compressive strength by 24.25% compared to the reference mixture and had a positive effect especially on early age strength. It was determined that as the temperature increases, the weight loss increases and the ultrasonic pulse velocity decreases, the optimum nano SiO₂ ratio for high temperature resistance is 2%, but the residual compressive strength results of all mixtures with and without nano material substitution at 600 °C are very close to each other. In SEM images, cracks occurred in all samples.

Keywords: Mortar, Nano SiO₂, High temperature, Strength.

1. Giriş

Çimentolu kompozitlerin üretiminde silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanların kullanımı klinker tüketimi ve buna bağlı olarak CO₂ emisyonlarının azaltımı açısından önemlidir. Kullanılan mineral katkıları ile betonun özellikleri iyileştirilmekte ve geliştirilmektedir. Böylelikle yapıların dayanım ve dayanıklılık özellikleri olumlu yönde artmaktadır. Son yıllarda ise nano malzemelerin çimento harçları ve betonda kullanımı üzerine çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir. Araştırmaya konu malzemelere bakıldığında ilk sırada nano SiO₂'in yer aldığı görülmektedir (García-Taengua et al., 2015). Nano SiO₂ küçük partikül boyutu (10-150 nm), yüksek özgül yüzey alanı (>80 000 m²/kg) ve çok fazla SiO₂ (>99.0%) içermektedir. Bu nedenle nano SiO₂ silis dumanı ya da diğer puzolanlara göre daha fazla boşluk doldurma yeteneğine sahip olup, üstün puzolanik etki göstermektedir (Huang et al., 2020). Li ve ark.'na (2017) göre %1 nano SiO₂ ilavesi %10 silis dumanı ilavesi kadar iyi performans göstermektedir (Li et al., 2017).

Nano SiO₂ ilavesinin çimento pastasının mikroyapısını geliştirdiği (Haruehansapong et al., 2014), eğilme ve basınç dayanımlarını arttırdığı bilinmektedir. Ayrıca yapılan dayanıklılık çalışmalarında, sülfat direncini arttırdığı, klor geçirirliliğini azalttığı (Kong et al., 2012), yüksek sıcaklıklarda çatlak oluşumunu azalttığı (Horszczaruk et al., 2017) görülmüştür.

Nano SiO₂ yüksek yüzey enerjisine sahiptir. Bu nedenle parçacıklar topaklanma oluşturmada kısacası aglomerasyon sorunu meydana gelmektedir (Rong et al., 2020). Bu bağlamda nano SiO₂'in çalışmalarda düşük oranlarda kullanıldığı görülmüştür. El-Didamony Ahmed ve ark (2017)'na göre %1'e kadar nano SiO₂ kullanımı portland çimentosunun kimyasal ve mühendislik özelliklerini geliştirmektedir (El-Didamony Ahmed, 2017).

Sonebi ve arkadaşlarına (2015) göre taze harçların yoğunluğuna bakıldığında en uygun nano SiO₂ oranının %1.7 olduğu tespit edilmiştir (Sonebi et al., 2015).

Literatürde nano SiO₂'in farklı puzolan/endüstriyel atık veya nano malzemelerle birlikte kullanıldığına ilişkin çalışmalar da mevcuttur. Örnek olarak, farklı oranlarda atık mermer tozu ve nano SiO₂ kombinasyonları üretilen harçların sertleşmiş özelliklerinin incelendiği bir çalışmada %10 atık mermer tozu ve %3 nano SiO₂ kullanımı en iyi sonucu vermiştir (Ma et al., 2019).

Newell ve Taengua (2019) Grafenoksit ve nano SiO₂ birlikte kullanımı için çimento pastalarında en uygun oranların sırasıyla %0.018 ve %2.2 olduğunu belirlemişlerdir (Newell & Garcia-Taengua, 2019).

Bekem Kara (2019), mikro ve nano SiO₂ birlikte kullanarak ürettiği harçların artan sıcaklıklardaki dayanımını incelediği çalışmada, en iyi yüksek sıcaklık dayanımının %5 mikro silika + %2 nano SiO₂ ikame edilen harç karışımlarına ait olduğunu tespit etmiştir (Bekem Kara, 2019).

Bu çalışmada ise nano SiO₂ %3'e kadar çimento ile ikame edilerek harç karışımları üretilmiş, harçların sertleşmiş hal ve yüksek sıcaklık sonrası özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R Portland çimentosu, puzolan olarak nano SiO₂, Kırklareli Limak çimento fabrikasından temin edilen TS EN 196-1 standardına göre CEN standart kum ve şebeke suyu kullanılmıştır (TS EN 196-1, 2016; TS EN 197-1, 2012). Çimentonun yoğunluğu 3.09 g/cm³, hava geçirgenlik (Blaine) yöntemi ile ölçülen özgül yüzey alanı ise 3716 cm²/g'dır. Bağlayıcı malzemenin kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. CEM I 42.5 R Portland çimentosuna ait kimyasal özellikler

Oksit	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Kızdırma kaybı
%	61.91	19.95	5.34	3.22	1.01	3.24	0.30	0.94	0.0144	2.25

Nano SiO₂ 30 nm partikül boyutuna sahip olup, BET (Brunauer-Emmett-Teller) yöntemi ile ölçülen özgül yüzey alanı 440 m²/g'dır. Yoğunluğu 2.40 g/m³ olarak ölçülmüştür. Küresel yapıda olan malzeme %99.9 saflığa sahiptir.

2.2. Metot

Çalışmada %, 1, 2 ve 3 oranlarında nano SiO₂ çimento yerine ikame edilerek S/Ç oranı 0.50 olan 4 farklı tür harç üretimi TS EN 196-1'e göre gerçekleştirilmiştir (TS EN 196-1, 2016). Harç karışımlarına giren malzeme miktarları Tablo 2'de verilmiştir. Taze harçlar 40x40x160 mm³ prizmatik ve 50x50x50 mm³ küp kalıplara dökülmüştür.

Tablo 2. Harç karışımlarına ait malzeme miktarları

Kodlama	Çimento, g	Nano SiO ₂ , g	CEN standart kum, g	Su, g
N0	450.0	0	1350	225
N1	445.5	4.5	1350	225
N2	441.0	9.0	1350	225
N3	436.5	13.5	1350	225

24 saat sonra kalıptan çıkarılan harç örnekleri test günlerine kadar su küründe 20±2 °C'de bekletilmiştir. 7, 28 ve 90. günlerde 40x40x160 mm³ prizmatik örnekler üzerinde 3 noktali eğilme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyi sonrasında elde edilen 6'şar örnek üzerinde tek noktali basınç dayanımı deneyi yapılmıştır (TS EN 196-1, 2016).

90. güne kadar standart su kürü uygulanan 50x50x50 mm³ boyutlarındaki küp örnekler yüksek sıcaklık uygulamasından önce 24 saat 100±5 °C'de bekletilmiştir. Etüv kurusu haline gelen harç örnekleri 3 saat süresince 300 ve 600 °C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığın etkilerinin belirlenmesi amacıyla 55 litre kapasiteli iç ölçüleri 35 cm x 35 cm x 38 cm, dış ölçüleri 77 cm x 79 cm x 78 cm ve ağırlığı 190 kg olan yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır. Hafif refrakter tuğla ve seramik elyaf kullanılarak üretilen fırının yan tuğla duvarları içerisinde açılan kanallara yerleştirilmiş spiral formulu rezistans telleri bulunmaktadır. Referans sıcaklık olan 20 °C için küp örnekler laboratuvar şartlarında desikatör içinde tutulmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harç örneklerine fırın içinde kendiliğinden soğutma uygulanmıştır.

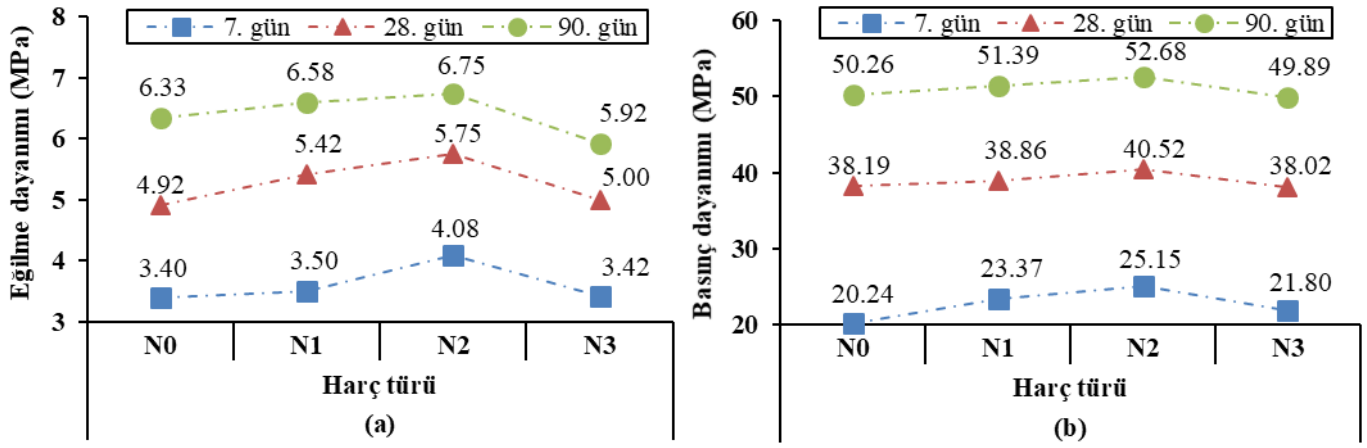
Yüksek sıcaklık ve soğutma uygulaması sonrasında küp örnekler üzerinde ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir (TS EN 12504-4, 2012; TS EN 196-1, 2016). Harç karışımlarına uygulanan 600 °C yüksek sıcaklık ve fırın içinde kendiliğinden soğutma sonrası fiziksel ve mekanik testler ardından sertleşmiş harçların içyapıları hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. SEM görüntüleri Artvin Çoruh Üniversitesi Bilim-Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde, Carl Zeiss marka EVO L10 model cihaz ile x5000 büyütme ile alınmıştır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Hazırlanan harç karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanım sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Deney sonuçlarına göre 7 ve 28. günlerde nano malzeme ikamesi yapılan tüm harç karışımlarının eğilme dayanımları N0 harç karışımından daha yüksek çıkmıştır. Özellikle erken dayanımda nano SiO₂'in %2 oranında kullanımı N0 harç karışımına göre eğilme dayanımını %20 arttırmıştır. 90. gün eğilme deneyi sonuçlarına göre %1 ve %2 nano malzeme kullanımı referans harç karışımına göre dayanımı arttırırken, %3 nano SiO₂ ikamesinin eğilme dayanımını azalttığı görülmektedir.

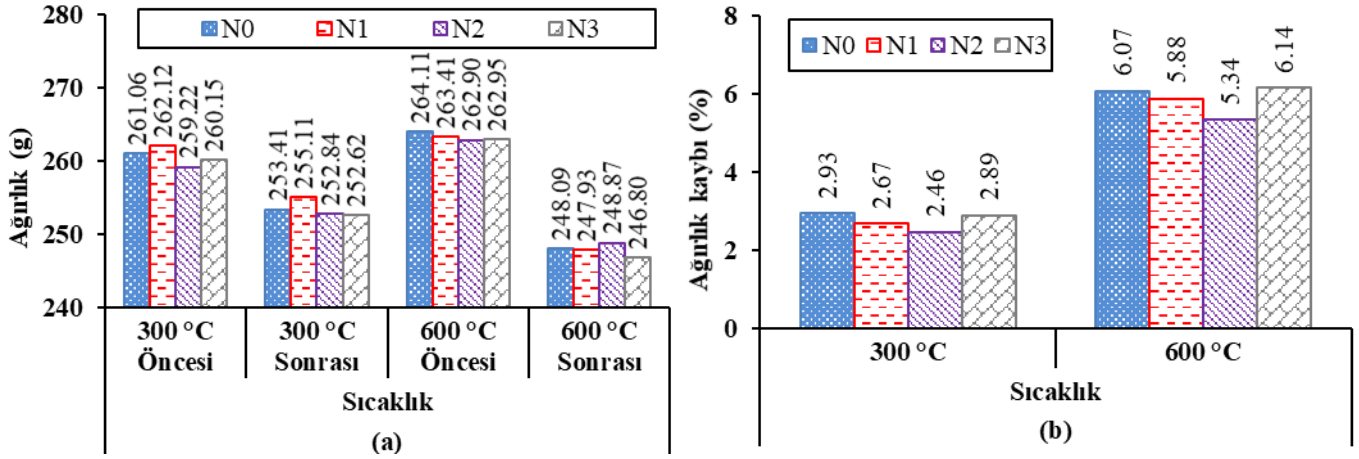
Harç karışımlarında nano SiO₂ kullanımının 7, 28 ve 90. gün koşullarında basınç dayanımına etkileri incelendiğinde, %1 ve %2 ikame oranlarının referansa göre olumlu sonuç verdiği görülmüştür. Erken dayanımlarda %1 nano SiO₂ kullanımı basınç dayanımını %15.45 arttırırken, %2 nano SiO₂ kullanımında artış oranı %24.25, %3 ikamede ise dayanım artışı %7.72 olarak ölçülmüştür. Nano SiO₂'in erken yaş dayanımını arttırdığı daha önceki çalışmalardan da bilinmektedir (Feng et al., 2020). Naji Givi ve ark (2010) çimento ikamesi ile %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında Nano SiO₂ ile beton üretimi yapmış ve en yüksek dayanımı %1.5 oranında elde etmiştir. Ayrıca, aynı çalışmada 7. gün nano SiO₂ ikamesi betonun basınç dayanımını %16-25 arasında arttırırken, 28. günde %12-17 oranlarında arttırdığı görülmüştür (Naji Givi et al., 2010).

Deney yaşı ilerledikçe bu oranların azaldığı ve sonuçların referans basınç dayanımına yaklaştığı görülmektedir. 90. günde %3 nano SiO₂ kullanımı ise N0 harç karışımına göre olumsuz sonuç vermiştir. Nano SiO₂ ikamesi ile yapılan çalışmalarda malzemenin aglomerasyon eğiliminde olduğu bilinmektedir (Rong et al., 2020; Sadeghi Nik & Lotfi Omran, 2013; Wu et al., 2016). Bu çalışma için referansa göre düşük dayanıma sahip %3 ikame oranının ile aglomerasyon başlangıcı olduğu söylenebilir.



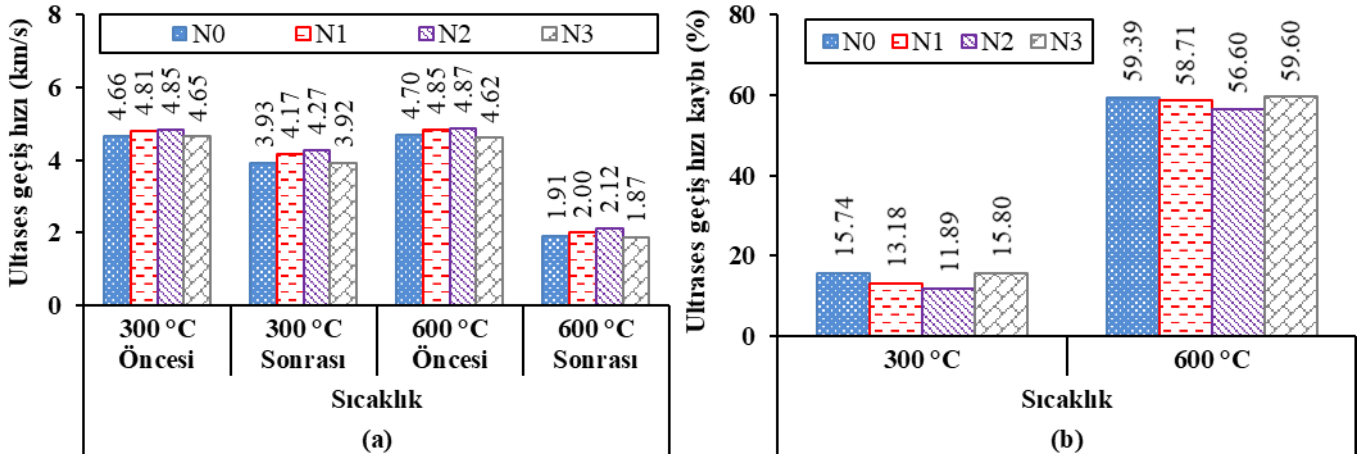
Şekil 1. Nano SiO₂ (a) eğilme ve (b) basınç dayanımına etkisi

Yüksek sıcaklık uygulaması ile harç karışımlarında meydana gelen ağırlık ve ağırlık kayıpları Şekil 2’de görülmektedir. Sıcaklık arttıkça tüm harç karışımlarında ağırlık kayıplarında artış meydana gelmiştir. Çimento hamurunda bağlı bulunan suyun sıcaklık artışı ile serbest kalması ile boşluklar oluştuğu ve ağırlığın azaldığı daha önceki çalışmalardan bilinmektedir (Demirel & Keleştemur, 2010). 300 °C’de nano SiO₂ kullanımının N0 harç karışımına göre daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. En az ağırlık kaybı N2 harç karışımına aittir. Sıcaklık 600 °C’ye yükseldiğinde ağırlık kayıplarının %5’in üzerine çıktığı görülmektedir. En fazla ağırlık kaybı N3 karışımına ait olup referans karışıma göre daha fazla ağırlık kaybına uğradığı tespit edilmiştir.



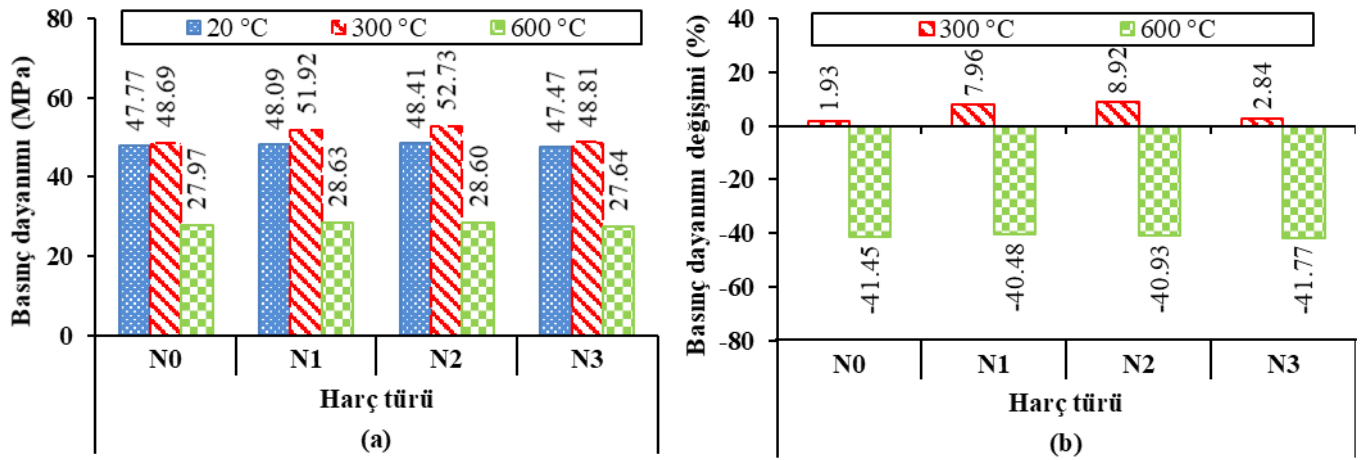
Şekil 2. Harç türlerinin yüksek sıcaklıklardaki (a) ağırlık ve (b) ağırlık kayıpları

Tahribatsız testlerden biri olan ultrases geçiş hızı pek çok yüksek sıcaklık-çimentolu kompozit ilişkisinin incelendiği çalışmada yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Sıcaklık artışı ile harç karışımlarının ultrases geçiş hızı değerlerinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 3). 300 °C sıcaklıktan olumsuz yönde en az etkilenen harç karışımı N1 iken, en fazla etkilenen harç karışımı N3 olmuştur. Sıcaklık 600 °C’ye çıktığında ultrases geçiş hızı kayıpları tüm harç karışımlarında %50’nin üzerindedir. Bu durum sıcaklık arttıkça, çimento bünyesinde bulunan CSH ve portlanditin bozunması sonucu mikro çatlakların indüksiyonu ile mikroyapıda boşluklar oluşması ile açıklanabilmektedir (Bekem Kara & Arslan, 2017; Farzadnia et al., 2013). Ayrıca silisli agregalarda 570 °C’de hacimsel genişleme sonucunda hasarlar meydana gelmektedir. Çalışmada kullanılan agreganın da elde edilen sonuçlarda etkisinin olduğu düşünülmektedir (Arioz, 2007; Durmuş & Bekem, 2010). Tüm karışımlarda aynı agregaların kullanılması neticesinde %1 ve %2 nano SiO₂ ikamesi ile üretilen harç karışımları, referans harç karışımı ile kıyaslandığında daha az ultrases geçiş hızı kaybına uğramıştır.



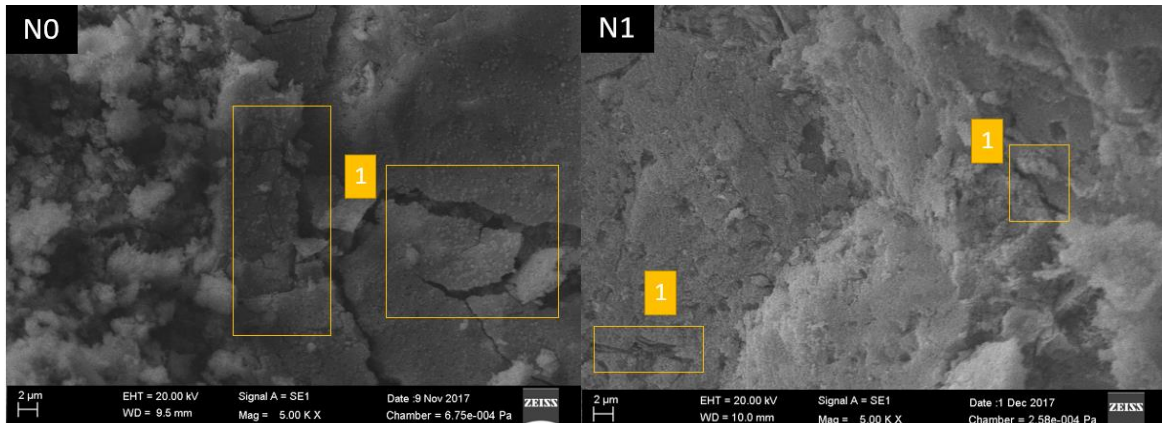
Şekil 3. Harç türlerinin yüksek sıcaklıklardaki (a) ultrases geçiş hızı ve (b) ultrases geçiş hızı kayıpları

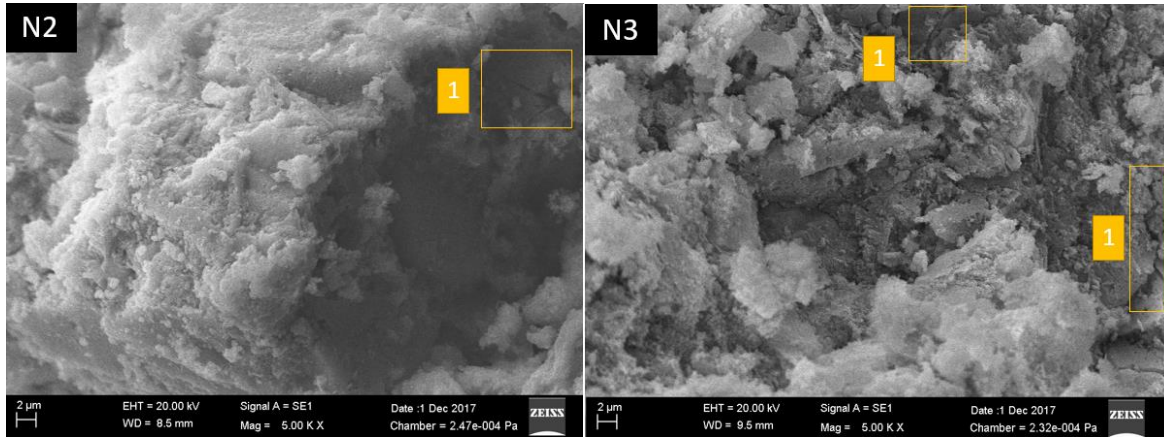
Yüksek sıcaklıklardaki harç karışımlarının basınç dayanımı ve basınç dayanımı değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Tüm karışımlarda 300 °C sıcaklık etkisi ile basınç dayanımlarında bir miktar artış meydana gelmiştir. Sıcaklık-dayanım artışı, nem içeriğinin uzaklaştırılması nedeniyle jel parçacıkları arasındaki yüzey kuvvetlerindeki artışa bağlanmıştır. Literatürde bu durum fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşmasıyla oluşan ve biriken buhar basıncı ile sonuçlanan kompakt mikro yapı meydana gelmesi olarak açıklanabilmektedir (Pathak & Siddique, 2012). En belirgin artış N2 harç karışımına ait olup, 20 °C'ye göre artış miktarı %8.92'dir. 600 °C'de ise harç karışımlarının basınç dayanımlarında ani bir düşüş olduğu görülmektedir. Ancak harç türlerinin kalan basınç dayanımı değerleri birbirine oldukça yakındır. Nano SiO₂ ikamesinin olumlu ya da olumsuz belirgin etkisi 600 °C'de görülmemiştir. Bu durumun çalışmada kullanılan nano SiO₂ miktarlarının oldukça düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nano malzemelerin yüksek maliyeti, topaklaşma olasılığı ve işlenebilirliğe etkileri nedeniyle genellikle çimentolu kompozitlerde yüksek oranlarda kullanımını engellemektedir (Berra et al., 2012; Rechtes et al., 2018). Referans harcın basınç dayanımı kaybı %41.45 olarak hesaplanırken; N1, N2 ve N3 harç türlerinin yüksek sıcaklıkta basınç dayanımı kayıpları sırasıyla %40.48, %40.93 ve %41.77 olarak hesaplanmıştır. Çimentolu kompozitlerde 400 °C sıcaklık ve üzerinde hidrasyon ürünlerinin önemli ölçüde ayrışmasına neden olarak malzemenin mukavemetinin aşırı derecede bozulmasına neden olduğu bilinmektedir (Ibrahim et al., 2012).



Şekil 4. Yüksek sıcaklıklardaki harç türlerine ait (a) basınç dayanımları ve (b) basınç dayanımı değişimleri

Harç karışımlarının 600 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki SEM görüntüleri Şekil 5'te verilmiştir. İkamesiz ve nano ikameli tüm karışımlarda sıcaklığa bağlı olarak gelişen çatlaklar görülmektedir.





Şekil 5. 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan harç karışımlarının SEM görüntüleri (1: çatlak)

4. Sonuç

Farklı oranlarda Nano SiO₂'in çimento harçlarının sertleşmiş hal özelliklerine ve yüksek sıcaklık direncine etkilerinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır:

Nano SiO₂'in %1, %2 ve %3 oranlarında ikame edilmesi 7 ve 28. günlerde ikamesiz referans harç karışımına göre eğilme dayanımını arttırmıştır. 90. günde %3 ikame yapılan harç örneklerinin eğilme dayanımı referans örnekten daha düşük çıkmıştır.

Basınç dayanımı sonuçlarına göre, erken yaşta referans harç karışımı 20.25 MPa iken, %2 nano SiO₂ ikamesi basınç dayanımını %24.25 oranında arttırmıştır. İleriki yaşlarda referans ve nano SiO₂ ikameli harç karışımlarına ait basınç dayanımlarının birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür.

Sıcaklık arttıkça tüm harç karışımlarının ağırlık kayıpları artmış, ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Ağırlık ve ultrases geçiş hızı kayıpları 300 ve 600 °C'lerde en az %2 nano SiO₂ içeren harç karışımlarından elde edilmiştir. 600 °C'de tüm harç karışımlarının ultrases geçiş hızı kaybı %55'in üzerindedir.

300 °C'de sıcaklık etkisi ile tüm harç karışımlarının basınç dayanımlarında artış meydana gelmiştir. 600 °C'de referans harç örnekleri basınç dayanımının %41.45'ini kaybetmiştir. Nano SiO₂ ikameli örneklerin basınç dayanımı kayıplarının da birbirine oldukça yakın değerlerde oldukları belirlenmiştir. %1, %2 ve %3 nano SiO₂ ikame oranları için yüksek sıcaklıkta dayanım kayıpları sırasıyla %40.48, %40.93 ve %41.77'dir. Çalışmada harçların maruz kaldığı maksimum sıcaklıkta tüm karışımlarda çatlaklar olduğu SEM görüntüleri ile desteklenmektedir.

Nano SiO₂ yüksek maliyeti ve çok ince yapısından dolayı meydana gelen aglomerasyon sebebiyle harç karışımlarında düşük oranlarda kullanılmaktadır. Bundan sonraki çalışmalarda yine düşük oranlarda nano SiO₂ ile yüksek oranlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanların beraber kullanılarak harç üretilmesi önerilmektedir. Böylelikle çimentolu kompozitlerin hem erken dayanım özelliklerinin gelişeceği hem de klinker tüketiminin azalacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

- Arioz, O. (2007). Effects of elevated temperatures on properties of concrete. *Fire Safety Journal*, 42(8), 516–522. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.01.003>
- Bekem Kara, I. (2019). The effect of nano silica on the properties of cement mortars containing micro silica at elevated temperatures. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials*, 4, 518–526.
- Bekem Kara, I. & Arslan, M. (2017). Investigation of High Temperature Effects on Concrete Additive Antifreeze. *Aksaray University Journal of Science and Engineering*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.29002/asujse.319487>
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E., & Sebastiani, M. (2012). Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 35, 666–675. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132>
- Demirel, B., & Keleştemur, O. (2010). Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal*, 45(6–8), 385–391. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.08.002>
- Durmuş, G., & Bekem, I. (2010). Investigation of the effect of high temperatures and different cooling conditions on the concrete with calcereous aggregates. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 25(4), 741–748.
- El-Didamony Ahmed, H. (2017). Chemical and Engineering Properties of Blended Cement Containing Micro- and Nano-silica. *American Journal of Chemical Engineering*, 5(5), 111. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170505.13>
- Farzadnia, N., Abang Ali, A. A., Demirboga, R., & Anwar, M. P. (2013). Characterization of high strength mortars with nano Titania at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 43, 469–479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.044>
- Feng, P., Chang, H., Liu, X., Ye, S., Shu, X., & Ran, Q. (2020). The significance of dispersion of nano-SiO₂ on early age hydration of cement pastes. *Materials and Design*, 186, 108320. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108320>
- García-Taengua, E., Sonebi, M., Hossain, K. M. A., Lachemi, M., & Khatib, J. (2015). Effects of the addition of nanosilica on the

- rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, 81, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.009>
- Haruehansapong, S., Pulngern, T., & Chucheepsakul, S. (2014). Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂. *Construction and Building Materials*, 50, 471–477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.002>
- Horszczaruk, E., Sikora, P., Cendrowski, K., & Mijowska, E. (2017). The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 137, 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.003>
- Huang, Q., Zhu, X., Zhao, L., Zhao, M., Liu, Y., & Zeng, X. (2020). Effect of nanosilica on sulfate resistance of cement mortar under partial immersion. *Construction and Building Materials*, 231, 117180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117180>
- Ibrahim, R. K., Hamid, R., & Taha, M. R. (2012). Fire resistance of high-volume fly ash mortars with nanosilica addition. *Construction and Building Materials*, 36, 779–786. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.028>
- Kong, D., Du, X., Wei, S., Zhang, H., Yang, Y., & Shah, S. P. (2012). Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 37, 707–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.006>
- Li, L. G., Zhu, J., Huang, Z. H., Kwan, A. K. H., & Li, L. J. (2017). Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar. *Construction and Building Materials*, 157, 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.105>
- Ma, B., Wang, J., Tan, H., Li, X., Cai, L., Zhou, Y., & Chu, Z. (2019). Utilization of waste marble powder in cement-based materials by incorporating nano silica. *Construction and Building Materials*, 211, 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.248>
- Naji Givi, A., Abdul Rashid, S., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*, 41(8), 673–677. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.08.003>
- Newell, M., & Garcia-Taengua, E. (2019). Fresh and hardened state properties of hybrid graphene oxide/nanosilica cement composites. *Construction and Building Materials*, 221, 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.066>
- Pathak, N., & Siddique, R. (2012). Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 30, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.010>
- Reches, Y., Thomson, K., Helbing, M., Kosson, D. S., & Sanchez, F. (2018). Agglomeration and reactivity of nanoparticles of SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, and clays in cement pastes and effects on compressive strength at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 167, 860–873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.032>
- Rong, Z., Zhao, M., & Wang, Y. (2020). Effects of modified nano-SiO₂ particles on properties of high-performance cement-based composites. *Materials*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/ma13030646>
- Sadeghi Nik, A., & Lotfi Omran, O. (2013). Estimation of compressive strength of self-compacted concrete with fibers consisting nano-SiO₂ using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 44, 654–662. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.082>
- Sonebi, M., Garcia-Taengua, E., Hossain, K. M. A., Khatib, J., & Lachemi, M. (2015). Effect of nanosilica addition on the fresh properties and shrinkage of mortars with fly ash and superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 84, 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.064>
- TS EN 12504-4. (2012). *Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.
- TS EN 196-1. (2016). *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength*. Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.
- TS EN 197-1. (2012). *Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H., & Wan, S. (2016). Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, 70, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.003>