

Silika Aerojel Katkılı Hibrit Silis Dumanı Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal İletkenlik ve Mikro Yapı Özellikleri

Mechanical, Pore Structure, Thermal Conductivity and Microstructure Properties of Silica Aerogel-Incorporated Hybrid Silica Fume Mortars

Levent Bostancı^{1*}

¹ Beykent Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi Programı, İstanbul, leventbostanci@beykent.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 18 Haziran 2020
Düzeltilme: 10 Ocak 2021
Kabul: 11 Ocak 2021

Anahtar kelimeler:

Hibrit harç, silika aerojel, termal iletkenlik, silis dumanı, por yapısı.

ÖZET

Çimento esaslı karışımlarda yüksek miktarda silika aerojel kullanımının çimento esaslı malzemelerin termal yalıtım özelliklerine üstün düzeyde katkı sunduğu iyi bilinen bir gerçektir. Bununla birlikte, günümüz koşullarında silika arojellerin üretim maliyeti geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla oldukça yüksektir. Bu çalışma, düşük katkı oranlarında silika aerojel tozu içeren alkali-aktive edilmiş hibrit silis dumanı harç özelliklerine odaklanmaktadır. Bu amaçla aerojel katkı oranları çimento ağırlığına %0, %0.25 ve %0.5 düzeylerinde tasarlandı ve harç karışımlarının alkali aktivasyonu çimento ağırlığına %0.1 ve %0.2 dozajlarındaki sodyum karbonat (Na_2CO_3) ile gerçekleştirildi. 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin tamamlanmasından sonra, az miktardaki silika aerojel ilavesinin hibrit harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, por yapısı özellikleri ve mikro yapı morfolojisi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, % 0.25 aerojel katkılı numunelerde maksimum % 2.4'lük basınç dayanımı düşüşüne karşın numunelerin termal yalıtım özelliklerinin % 28 düzeyinde gelişebildiğini göstermektedir. Hibrit silis dumanı harçlarında jel gözenek oluşumunun yüksek seviyesine (≈ 40) bağlı olarak, silika aerojel ilavesinin harç numunelerinin mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisi sınırlanmaktadır. Bu çalışma hibrit silis dumanı harç karışımlarında silika arojellerin kullanımı hakkında yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Doi: 10.24012/dumf.754876

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 June 2020
Revised: 10 January 2021
Accepted: 11 January 2021

Keywords:

Hybrid mortar, silica aerogel, thermal conductivity, silica fume, pore structure.

ABSTRACT

It is a well-known fact that the use of a high amount of silica aerogel in cement-based mixtures contributes significantly to the thermal insulation properties of cement-based materials. However, the current manufacturing cost of silica aerogels is quite expensive compared to traditional insulating materials. This study focuses on the properties of alkali-activated hybrid silica fume mixtures containing silica aerogel powder at a low content rate. For this purpose, aerogel inclusion ratios were designed at 0%, 0.25% and 0.5% by weight of binder and the alkaline activation of the mortar mixtures was carried out with sodium carbonate (Na_2CO_3) at dosage rates of 0.1% and 0.2%, by weight of binder. After 2, 7 and 28 days of curing, the effect of the inclusion of a small amount of silica aerogel powder on the mechanical, thermal conductivity, pore structure properties and microstructure morphology of the hybrid silica fume mortar samples were investigated in detail. Experimental results show that the thermal insulation properties of the samples can be improved by 28% with a maximum compressive strength reduction of 2.4% in 0.25% aerogel-incorporated samples. Due to the high level of gel pore formation (≈ 40) in hybrid silica fume mortars, the negative effect of silica aerogel addition on the mechanical properties of the samples is limited. This study provides a new perspective on the use of silica aerogels in hybrid silica fume mortar mixtures.

* Sorumlu yazar / Correspondence

Levent BOSTANCI

✉ leventbostanci@beykent.du.tr

Giriş

Çimento üretimi için kil ve kireçtaşının temel hammadeler olarak kalsinasyonu zorunlu olmakla birlikte kalsinasyon işlemi önemli miktarda karbondioksit (CO₂) salınımına yol açmaktadır. Son yıllarda, CO₂ salınımını azaltan teknolojiler geliştirilmesine rağmen, çimento üretimi hala dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının tek başına %6'sından sorumludur [1]. Bununla birlikte, doğadaki mevcut kil ve kireçtaşı stoğu da klinker üretimi için çimento endüstrisi tarafından her geçen gün tüketilmektedir [2-4]. Günümüzdeki enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik politikaları, bağlayıcı malzeme endüstrisinde geleneksel bağlayıcı malzeme olan çimentoya kıyasla endüstriyel bağlayıcı malzemelerin kullanımını teşvik etmektedir. Yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül, çimento endüstrisinde endüstriyel yan ürün kökenli atık türü bağlayıcılar olarak yaygın olarak kullanılabilir. Atık türü bağlayıcılar arasında silis dumanı kalsiyum-silikat yapısına olan üstün katkıları nedeniyle diğer atık türü bağlayıcılara kıyasla oldukça dikkat çekicidir [5].

Silis dumanının, kalsiyum - silikat yapısındaki mikro dolgu özelliği sayesinde, özellikle hidrasyonun ilk günlerinde daha düşük gözenekliliğe sahip bir mikro yapı elde edilebilmektedir. Genel olarak, silis dumanı partikülleri çimento partiküllerine kıyasla 10 kat daha ince parçacıklardan oluşmaktadır, bu da daha hızlı kimyasal reaksiyona ve daha yüksek düzeyde mekanik özelliklere olanak sağlar [6,7]. Hidratasyon esnasındaki kalsiyum hidroksit (CH) tüketimi genellikle silis dumanının kimyasal reaksiyonlardaki aktivasyon yeteneğini göstermektedir. Zelic ve ark.[8] hibrit bağlayıcı karışımlarda silis dumanının hidrasyon kinetiği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, silis dumanının puzzolanik aktivitesinin özellikle ilk 3 günlük kür süresinin tamamlanmasından sonra dikkat çekici olduğunu göstermiştir. Hidratasyon ilerledikçe, silis dumanının CH ile olan aktivasyonu neticesinde dayanıma katkı sunan ilave kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli oluşabilmektedir [9].

Enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik politikaları ile uyumlu olarak çimento matrisinde atık türü bağlayıcıların kısmi olarak çimento ile birlikte kullanımı önem arz etmekle birlikte enerji verimliliği açısından dikkate alınması gereken hususlardan biri de yapılarda mevcut ısı yalıtım özelliklerinin geliştirilmesidir [10]. Binalar, dünya genelinde toplam yıllık enerji tüketiminin %40'ından tek başına sorumludur ve pratik olarak malzemelerde ısı yalıtım özelliklerinin geliştirilmesi için önemli bir çaba harcanması gerektiği açıktır [11].Günümüzdeki mevcut çalışmalar, alkali-aktive edilmiş karışımlar ile ısı yalıtım özelliği yüksek malzemelerin bir araya getirildiği kompozitler üzerine odaklanmaktadır [12].Yakın geçmişte yapılan deneysel çalışmalar nano-teknolojik ısı yalıtım malzemelerinin çimento matrisinde kullanımının potansiyelini işaret etmekle birlikte silika aerojeller üstün yalıtım özellikleri ve çimento matrisi ile olan uyumları dikkate alındığında çimento esaslı malzemeler ile birlikte kullanım açısından oldukça dikkat çekmektedir [13,14].

Silika aerojeller, ilk kez 1930'larda S. Kistler tarafından üretilmiştir [15]. Başlangıçta otomotiv, elektronik, giyim, kimya gibi farklı sektörlerde kullanılan silika aerojeller sonraki dönemlerde üstün yalıtım özellikleri nedeniyle çimento esaslı yapı malzemesi üretiminde de kullanım alanı bulmaya başlamışlardır [16,17]. Silika aerojeller, 500-1200 m²/g'lik yüksek yüzey alanları, 0.003 g/cm³'lük düşük yoğunlukları, %99.8' varan yüksek poroziteleri ve 0.005 W/(m.K)'lık oldukça düşük termal iletkenlik katsayıları ile dünyanın en hafif katısı olarak tanımlanabilmektedir [18,19].

Literatürde yer alan çalışmalar, yüksek üretim maliyetlerine karşın çimento esaslı malzemelerde genellikle yüksek katkı oranlarında silika aerojel kullanımına odaklanıldığını göstermektedir. Ayrıca, silika aerojel katkılı- çimento esaslı malzemelerin ısı yalıtım performansı ile ilgili çalışmaların çoğu yüksek ısı yalıtımı-düşük basınç dayanımı ilişkisine odaklanmıştır. Ng ve diğ. [20] hacimce %80'e kadar aerjel içeren harç karışımları hazırladılar. Deneysel sonuçlar, hacimce %50 aerjel içeren karışımlarda 20 MPa'lık bir basınç

dayanımı ile 0.55 W/(m.K) termal iletkenlik değerinin saptanabileceğini göstermiştir. Aerojel partikülleri ve çimento matrisi arasındaki ara yüzey geçiş bölgesindeki zayıf etkileşimi arttırmak için yeni bir karıştırma prosedürü geliştirilmesi önerilmiştir. Liu ve diğ. [21] harç karışımlarındaki standart kumu %60 seviyesine kadar silika aerojel ile yer değiştirmiştir. %60 aerojel içeriğinde, numunelerde 0.1524 W/(m.K)'lık termal iletkenlik katsayısına karşın 2.15 MPa'lık basınç dayanımı saptanmıştır. Yapılan deneylerde, modifiye edilmiş SiO₂ aerojel partiküllerinin, modifiye edilmemiş SiO₂ aerojel partiküllerine kıyasla çimento matrisi ile daha iyi bir bağlanma mekanizması gösterdiği vurgulanmıştır. Wang ve diğ. [19] oluşturdukları karışımlardaki kumu %100'e kadar bir düzeyde agrega olarak aerojel ile doldurulmuş perlit ile değiştirmiştir. Agrega olarak %100 aerojel içeren karışım numunelerinde, 0.071 W / (mK) termal iletkenlik değeri ve 3.71 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, aerojel etkisinin 0.5 su/bağlayıcı oranında dikkat çekici olduğunu göstermiştir. Silika aerوجلlerin çimento içeriği azaltılmış hibrit bağlayıcı harçlarda kullanımı da oldukça başarılı sonuçlar verebilmektedir. Harç karışımlarına %60 düzeyinde kum ile yer değiştirilmek suretiyle eklenen silika aerوجلler vasıtasıyla uçucu kül içerikli hibrit harç numunelerinde 26.78 MPa'lık basınç dayanımı ve 5.48 MPa'lık eğilme dayanımı değerlerine karşın 0.918 W/(m.K) düzeyinde termal iletkenlik katsayısı elde edilebilmektedir [22].

Öte yandan, sınırlı sayıdaki deneysel çalışmada düşük miktardaki silika aerojel içeriğinin numunelerin mekanik ve termal yalıtım performanslarına olan etkisi araştırılmıştır. Kim ve diğ. [16] %2.0 düzeyine kadar silika aerojel içeren çimento karışımları hazırladılar. %0.5 silika aerojel katkılı numunelerde, 0.4 W/(m.K) termal iletkenlik değeri ile birlikte 13.1 MPa düzeyinde basınç dayanımı saptanmıştır. Çalışmanın sonuçları, aerojel içeriği ile termal yalıtım özellikleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bostancı ve Sola [12] bağlayıcı malzeme ağırlığınca %0.75 ve %1.0 düzeylerinde silika aerojel içeren cüruf harcı karışımları hazırladılar. %0.75 aerojel katkılı

alkali-aktive edilmiş cüruf harcı numunelerinde 34.1 MPa basınç dayanımı değerine karşın termal iletkenlik katsayısı değeri 1.32 W/(m.K) düzeyinde tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, silika aerojel katkısı aracılığı ile gözenekliliği artan por yapısı nedeniyle termal iletkenlik katsayısında önemli bir azalmanın elde edilebileceğini göstermiştir.

Bu araştırmanın odak noktası, düşük katkı oranlarındaki silika aerojel ilavesinin harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, por yapısı özellikleri ve mikro yapı morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmaktır. Literatür, yüksek düzeyde silika aerojel içeren karışımlara kıyasla düşük katkı oranlarında silika aerojel içeren karışımların özellikleri hakkında çok az veri bulunduğunu göstermektedir. Silika aerوجلlerin karışımlarda kum ile yer değiştirilerek kullanıldığı durumlarda meydana gelen yüksek düzeydeki termal yalıtkanlık artışının dramatik düzeyde mekanik dayanım düşüşlerine yol açtığı bilinmektedir. Bununla birlikte, silika aerوجلün çimento katkı maddesi olarak kullanımı için mekanik özellikler ile termal iletkenlik katsayısının değişimi yeterince araştırılmamıştır. Araştırmanın bir diğer yenilikçi yönü, silika aerojel kullanımının çimento karışımları yerine hibrit harç karışımlarında incelenmesidir.

Malzeme ve Yöntem

Kullanılan Malzemeler

Bağlayıcı Malzemeler

Deneysel çalışmalar kapsamında bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197 – 1[23] standardı esaslarına uygun olarak üretilmiş CEM I 42.5 R tipi çimento ve silis dumanından oluşan karma bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Tablo 1'de kullanılan çimento ve silis dumanına ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler görülmektedir.

Tablo 1. Kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

	Çimento	Silis dumanı
Kimyasal kompozisyon (%)		
SiO ₂	20.14	93.29
Al ₂ O ₃	4.92	0.48
Fe ₂ O ₃	3.04	1.27
CaO	63.03	0.54
MgO	1.18	0.32
SO ₃	2.94	0.1
K ₂ O	0.73	0.89
Na ₂ O	0.16	0.27
Cl ⁻	0.01	-
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık	3.12	2.31
Yüzey alanı (m ² /kg)	380,4	23,336

Kum

Harç karışımlarında TS-EN 196-1 [24] standardı esaslarına uygun olarak Limak Trakya çimento fabrikasında üretilmiş olan standart Rilem kumu kullanılmıştır. Kullanılan kum için saptanan yoğunluk ve doymun-yüzey kuru özgül ağırlık değerleri sırasıyla 1.35 kg/dm³ ve 2.63'tür.

Alkali Aktivatör

Harç karışımlarında alkali aktivatör olarak sodyum karbonat (Na₂CO₃) kullanılmıştır. Tablo 2'de kullanılan Na₂CO₃'e ait kimyasal kompozisyon görülmektedir.

Tablo 2. Na₂CO₃ kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal kompozisyon	
Na ₂ CO ₃ (%)	>99.5
NaCl (%)	<0.1
Na ₂ SO ₄ (%)	<0.1

Silika Aerojel

Harç karışımlarında toz formda silika aerojel kullanılmıştır. Silika aerojel sipariş üzerine ENSATE Yalıtım Teknolojileri tarafından hazırlanmıştır. Tablo 3'de kullanılan silika aerojel'e ait özellikler görülmektedir.

Tablo 3. Kullanılan silika aerojelin özellikleri.

Yüzey alanı (m ² /g)	790-840
Por çapı (nm)	8-10
Porozite (%)	>%94
Görünür yoğunluk (kg/m ³)	90-100
Yüzey grubu	- OH

Karışım Oranları

Hibrit silis dumanı harç karışımlarına düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerine olan etkisini araştırmak amacıyla 5 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Her karışımdan üçer adet harç numunesi üretilmiştir. Karışımlar, su/bağlayıcı oranları 0.5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Oluşturulan harç karışımlarında iki farklı dozajda alkali aktivatör ve iki farklı katkı oranında silika aerojel katkısı bağlayıcı malzeme ağırlığınca karışımlara ilave edilmiştir. Harç karışımları oluşturulurken gerek silika aerojel katkısının gerekse aktivatör dozajının düşük oranlarda kullanılması planlanmıştır. Tablo 4' de üretilen harç numunelerine ait karışım oranları görülmektedir.

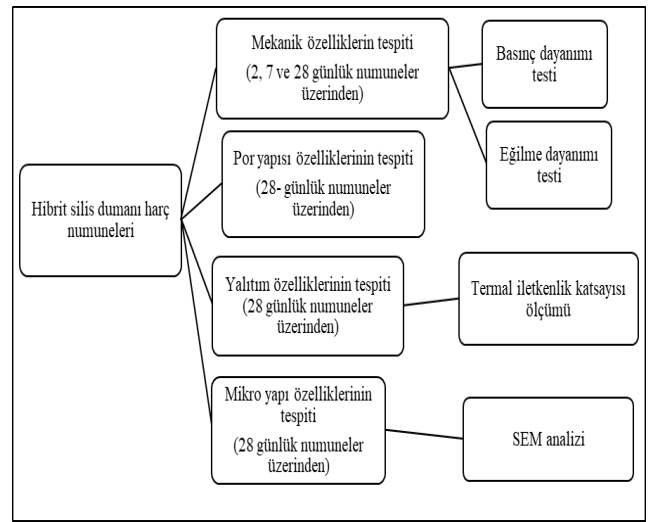
Tablo 4. Karışım oranları.

Karışım	Aerojel (g)	Na ₂ CO ₃ (g)	Silis dumanı (g)	Çimento (g)	Su/bağlayıcı	Su (ml)	Kum (g)
S1	0	0.45	225	225	0.5	225	1350
S2	1.125	0.45					
S3	1.125	0.9					
S4	2.25	0.45					
S5	2.25	0.9					

Numune Hazırlanması, Kür Koşulları Ve Uygulanan Testler

DeneySEL çalışmalar kapsamında 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Deneylerde kullanılan silika aerojel partiküllerinin karışımlardaki homojenliğini sağlamak amacıyla başlangıçta kuru bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımlara su ilavesi azar azar yapılmış ve aerojel partiküllerinin bağlayıcı malzeme ile tamamen kaplanmasına özellikle dikkat edilmiştir.

Üretilen harç numuneleri oda sıcaklığında 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve 2,7 ve 28 günlük farklı kür süreleri için laboratuvar ortamında (20 ± 3 C°) sıcaklığındaki kür havuzunda daldırılmak suretiyle tutulmuştur. Kür süresi gelen harç numuneleri sırasıyla eğilme dayanımı, basınç dayanımı, termal iletkenlik katsayısı ölçümü, mikro yapı analizi ve por yapısı analizi testlerine tabi tutulmuşlardır. Mekanik dayanım testleri 2,7 ve 28 günlük kür süresini tamamlayan tüm numunelere uygulanırken termal iletkenlik katsayısı ölçümü, mikro yapı analizi ve por yapısı analizi testleri sadece 28 günlük harç numunelerine uygulanmıştır. Şekil 1'de uygulanan test programı görülmektedir.



Şekil 1. Test programı

Kür süresini tamamlayan harç numunelerine ilk olarak 3 noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testi TS EN 1015-11 [25] standardı esaslarına göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme testinin uygulanması esnasında yükleme hızı 50 ± 10 N/s ayarlanmış ve yükleme esnasında orta açıklık 100 mm olacak şekilde eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Her bir karışıma ait 3 farklı numuneye eğilme testi ayrı ayrı uygulanmış ve üç farklı numune için aritmetik ortalama alınarak karışımın eğilme dayanımı tespit edilmiştir.

Eğilme dayanımı testi sonrasında ikiye ayrılan numuneler muhafaza edilerek her bir karışıma ait 3 farklı numunedan elde edilmiş 6 farklı numune parçasına basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Bu sayede karışımın basınç dayanımı, toplam 6 adet test sonucunun ortalaması olarak tespit

edilebilmiştir. Basınç dayanımı testi, 40x40 mm yüzey alanlı numune parçaları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Mekanik dayanım testlerinin tamamlanmasının ardından geriye kalan numune parçaları üzerinden termal iletkenlik katsayısı ölçümü, mikro yapı analizi ve por yapısı analizi testleri gerçekleştirilebilmiştir.

Termal iletkenlik katsayısı ölçümü TCI- Thermal Conductivity Analyzer model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz hassas sensörü sayesinde minimum 3 cm çapa sahip numunelerin termal iletkenlik katsayılarını ölçebilmektedir. Termal iletkenlik testi esnasında ölçüm işleminin hassasiyeti için numune parçalarının yüzey düzgünlüğü ve pürüzsüzlüğüne özellikle dikkat edilmiştir. İletkenlik katsayısı ölçümü, numunelerin farklı bölgeleri için 5 kez tekrarlanmış ve farklı bölgelerden elde edilen ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak harç numunelerinin termal iletkenlik katsayıları tespit edilmiştir.

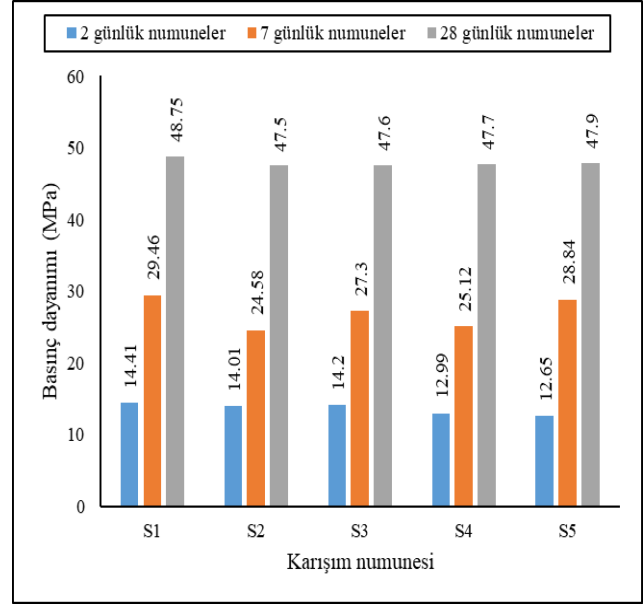
Numune parçaları üzerinden hasarsız olarak gerçekleştirilen termal iletkenlik katsayısı ölçümünün ardından aynı numune parçalarına por yapısı özelliklerinin tespiti için cıva porozimetresi testi uygulanmıştır. Cıva porozimetresi testi ile harç numunelerine ait toplam porozite, por çapı boyutları ve çap dağılımları gibi por yapısı özellikleri tespit edilebilmiştir. Cıva Porozimetresi deneyi, Micromeritics marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz ile 3 – 360,000 nanometre (nm) aralığındaki por çapları tespit edilebilmektedir.

Cıva porozimetresi analizine benzer şekilde 28 günlük basınç dayanımı testinden geriye kalan numune parçaları üzerinden mikro yapı özelliklerinin tespiti amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı testinde oluşan kırılma yüzeyi üzerinden hassas olarak alınan toz halindeki numune parçaları karbon ile kaplanarak mikro yapı analizine uygun hale getirilmiştir. SEM analizleri LEO 1430 VP model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Deneyel Bulgular ve Tartışmalar

Basınç Dayanımı Test Sonuçları

Şekil 2’de 2, 7 ve 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından hibrit harç numunelerinde saptanan basınç dayanımı sonuçları görülmektedir.



Şekil 2. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde basınç dayanımı test sonuçları

Şekil 2’de görüldüğü gibi, kontrol harcı 2 günlükken 14.41 MPa’lık basınç dayanımına ulaşmıştır. Genel olarak, harç karışımlarındaki aerjel miktarı arttıkça harç numunelerinin basınç dayanımları azalmıştır. Karışımlara ilave edilen %0.25’lik aerjel katkısı nedeniyle S2 ve S3 harç örneklerinin 2 günlük basınç dayanımları kontrol örneğinden sırasıyla %2.77 ve %1.45 daha düşüktür. Karışımlara %0.5 oranında aerjel eklendiğinde de harç numunelerinin basınç dayanımlarında benzer eğilimler gözlenmiştir. S4 ve S5 numunelerinin basınç dayanımlarında, S1 örneğine kıyasla, sırasıyla %9.85 ve %12.21 düzeyinde düşüşler tespit edilmiştir. Aerjel parçacıklarının çimentonun hidrasyonu esnasında stabil kaldığı iyi bilinen bir gerçektir [21]. Bu noktada, kimyasal reaksiyonlara katılmayan serbest aerjel partiküllerinin harç por yapısı özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği söylenebilir. Por yapısında yer alan boşluklar, hidrasyon ürünleri yeterince doldurulmadığında dayanımlarda düşüşlere neden olabilmektedir. Öte yandan, aerjel içeriği

kontrol durumuna kıyasla daha düşük basınç dayanımlarına yol açmış olsa da %0.5 aerojel içeriğine kıyasla %0.25'lik aerojel içeriğinde dayanım düşüşleri oldukça sınırlı düzeydedir.

Alkali-aktive edilen kalsiyum-silikat yapısında, aktivatör dozajındaki artış nedeniyle basınç dayanımları da genellikle artış eğilimindedir [26]. 2 günlük kür süresinin tamamlanması ile elde edilen sonuçlar, aktivatör dozajındaki artış nedeniyle gelişen basınç dayanımlarının, özellikle sınırlı dayanım düşüşlerinin saptandığı % 0.25 aerojel içeriğinde saptanabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple; S3 numunesinde, S2 numunesine kıyasla kısmi bir dayanım artışı elde edilirken daha yüksek aerojel içeriğinde, artan aktivatör dozajının basınç mukavemeti üzerindeki olası pozitif etkisi tespit edilememiştir (S4 ve S5 numuneleri). Ayrıca, artan aerojel içeriğinin basınç mukavemeti üzerindeki negatif etkisi, artan aktivatör dozajının dayanım üzerindeki pozitif etkisine kıyasla daha baskındır. Bu nedenle, S4-S5 numunelerinde dayanım artışı gözlemlenmemiştir. Buradaki en olası mekanizma, artan aerojel katkısı nedeniyle hidrasyonun ilk günlerinde daha yavaş hızda seyreden reaksiyonlar neticesinde harç gözenek yapısında oluşan ve hidrasyon ürünleri ile doldurulamayan aşırı por içeriğine atfedilebilir.

7 günlük numunelerde, 2 günlük kür süresi sonunda tespit edilen dayanım sonuçları ile uyumlu olarak silika aerojel içeren tüm numunelerin 7 günlük basınç dayanımları, kontrol örneğinden daha düşük seviyede tespit edilmiştir. S2 ve S3 harç numunelerinin basınç mukavemetleri, kontrol numunesinden sırasıyla %16.56 ve %7.33 düzeylerinde daha düşüktü. Bununla birlikte, aerojel katkı oranındaki %0.25'ten % 0.5'e olan artış, eşit aktivatör dozajı altında S4 ve S5 numunelerinin dayanımlarında S2 ve S3 numunelerine kıyasla sırasıyla %2.2 ve %5.64 düzeylerinde artışlara neden olmuştur. Dayanım artışları sınırlı düzeyde olsa da deneysel sonuçlar, artan aktivatör dozajına kıyasla artan silika aerojel katkısının dayanım üzerindeki negatif etkisinin, hidrasyonun ilk günleri ile sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, daha yüksek aerojel içeriğine rağmen, artan aktivatör dozajı sayesinde daha yüksek basınç mukavemetleri elde edilebilmiştir. Öte yandan, 2

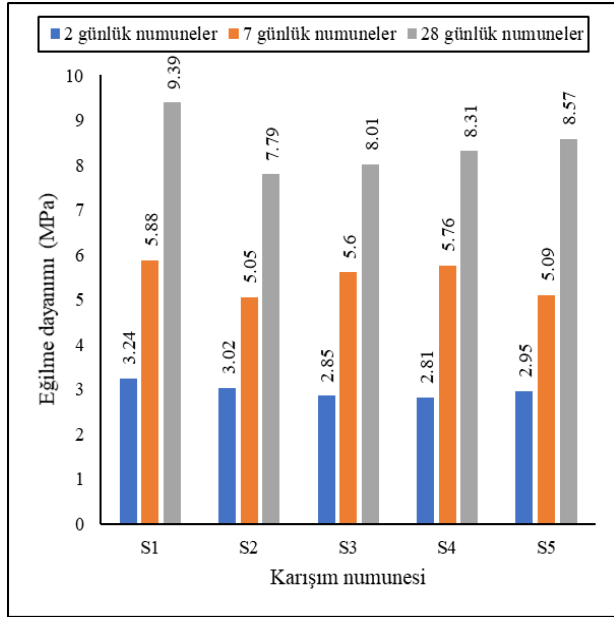
günlük numunelerde gözlemlenen belirsiz eğilimin aksine, 7 günlük basınç dayanımı sonuçları artan aktivatör dozajları ile uyum içindedir. Aktivatör dozajındaki artış, harç numunelerinin basınç dayanımlarında artışlara olanak sağlayabilmektedir. Eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı sayesinde S3 ve S5 numunelerinin basınç dayanımlarında S2 ve S4 numunelerine kıyasla sırasıyla %11.06 ve %14.8 düzeylerinde artışlar saptanmıştır. Buradaki en olası mekanizma, artan aktivatör dozajının dayanım üzerinde olumlu etki gösteren ilave C-S-H bağları oluşturma potansiyeline atfedilebilir [12].

28 günlük numunelerdeki basınç dayanımları incelendiğinde ise, aerojel içeren tüm numunelerin dayanım gelişiminin 28 günlük kontrol örneğine benzer düzeyde olduğu gözlenmiştir. Kontrol harcında 48.75 MPa'lık bir basınç dayanımı saptanırken S2 ve S3 harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları, kontrol numunesinden sırasıyla %2.56 ve %2.35 düzeylerinde daha düşüktür. %0.5 aerojel katkısı içeren numunelerde de benzer eğilimler gözlenmektedir. S1 numunesine kıyasla S4 ve S5 numunelerinin basınç dayanımlarında %2.15 ve %1.74 düzeylerinde kısmi düşüşler tespit edilmiştir. Daha önce tartışıldığı gibi, hidrasyonun ilk günlerinde özellikle %0.5 aerojel katkılı numunelerde %12 düzeyinde bir basınç mukavemeti düşüşüne neden olan silika aerojel içeriği, 28 günlük numunelerde hidrasyonun ilk günlerine kıyasla önemli ölçüde bir mukavemet azalmasına yol açmamaktadır. Bu, kalsiyum-silikat yapısına ilave edilen silika aerojel partiküllerinin kimyasal olarak inaktif özellikleri nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. Öte yandan, silika aerjellerin çimento matrisi ile olan zayıf etkileşimleri ve suyun aerojel partikül yapısında kolayca hareket edebilmesine olanak sağlayan yüksek boşluklu aerojel por yapısı, tespit edildiği gibi sınırlı düzeyde mukavemet azalmasına yol açabilmektedir [27-29]. Diğer taraftan, hidrasyon ilerledikçe, 28 günlük numunelerinin basınç dayanımlarındaki değişiklikler 7 günlük numunelerde tespit edilen eğilime oldukça benzer eğilim göstermektedir. Eşit aerojel içeriğinde, artan aktivatör dozajının numunelerin basınç mukavemeti üzerindeki pozitif etkisi belirgin bir

şekilde görülebilmektedir. Bu sayede S3 ve S5 numunelerinde S2 ve S4 numunelerinin dayanımlarına kıyasla artan aktivatör dozajı nedeniyle kısmi bir mukavemet artışı saptanabilmektedir. Artan aktivatör miktarı, çimento matrisindeki gözenekleri hidrasyon ürünleri ile doldurur ve daha yoğun yapıdaki çimento matrisi daha yüksek basınç mukavemetleri elde edilmesine yol açar [12]. Tüm kür süreleri sonunda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, arojel ilavesi nedeniyle basınç dayanımlarında yaşanan düşüşlerin artan kür süresi ile minimum düzeye indiğini ve 28 günlük kür süresi sonunda arojel içeren tüm numunelerde maksimum %2.56 düzeyinde dayanım düşüşü saptanabileceğini ortaya koymaktadır.

Eğilme Dayanımı Test Sonuçları

Şekil 3'te 2,7 ve 28 günlük numunelerde tespit edilen eğilme dayanımı sonuçları görülmektedir.



Şekil 3. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde eğilme dayanımı test sonuçları

Şekil 3'te görüldüğü üzere tüm kür süreleri sonunda elde edilen sonuçlar, düşük katkı oranlarındaki silika arojel ilavesinin, kontrol karışımına kıyasla tüm arojel içeren numunelerde daha düşük eğilme dayanımlarının saptanmasına yol açtığını göstermektedir. 2 günlük kür süresi sonunda eşit aktivatör dozajında artan arojel içeriğine bağlı olarak S1 numunesine kıyasla S3 ve S5 numunelerinin

eğilme dayanımlarında düşüşler tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarındaki eğilime benzer yönde, artan aktivatör dozajının eğilme mukavemeti gelişimi üzerindeki olumlu etkisi düşük arojel katkısı içeren S2 ve S3 örnekleri numunelerinde tespit edilememiştir. Ayrıca, eşit arojel katkı oranında artan aktivatör dozajının, 2 ve 7 günlük numunelerde aktivatör dozajının bir fonksiyonu olarak sürekli mukavemet gelişimi için mutlak faydalı olmadığı görülmektedir. Ancak yine de 2 günlük kür süresi sonunda eşit arojel katkı oranında artan aktivatör dozajı sayesinde S4 numunesine kıyasla S5 numunesinde %4.98 düzeyinde eğilme dayanımı artışı saptanırken 7 günlük numunelerde S2 numunesine kıyasla S3 numunesinin dayanımındaki artış %10.89 düzeyindedir.

Hidrasyonun ilerlemesi ile 28 günlük kür süresi sonunda, 2 ve 7 günlük numunelerden farklı olarak artan arojel içeriğinin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisi dikkat çekiciydi. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, sonuçların 28 günlük basınç dayanım sonuçları ile uyumlu son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Daha önce tartışıldığı gibi, kontrol numunesinin eğilme mukavemeti basınç mukavemetine benzer şekilde arojel içeren tüm numunelerden biraz daha yüksektir. Ancak, karışımlarda aktivatör ve arojel içeriklerinin artan dozajı, numunelerin eğilme mukavemetini de basınç dayanımında olduğu gibi olumlu yönde etkileyebilmektedir. Eşit aktivatör dozajında artan arojel içeriği sebebiyle S4 ve S5 numunelerinin eğilme mukavemetlerinde S2 ve S3 numunelerine kıyasla sırasıyla %6.67 ve %6.99 düzeylerinde artışlar tespit edilmiştir. Aktivatör dozajı S2-S4 ve S3-S5 karışımlarında sabit tutulduğundan, eğilme mukavemetini arttıran tek parametre artan arojel içeriğidir. Benzer şekilde eşit arojel içeriğinde artan aktivatör dozajı sayesinde, S3 ve S5 numunelerinin eğilme mukavemetlerinde S2 ve S4 numunelerine kıyasla %3'e kadar kısmi artışlar saptanmıştır. Bu açıdan; eğilme dayanımı testinden elde edilen sonuçlar, basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlarla uyum içindedir. Bu noktada, 28 günlük arojel içeren numunelerde artan arojel içeriğinin ve aktivatör dozajının hem basınç hem de eğilme

dayanımlarını kısmi olarak geliştirdiği net olarak söylenebilir.

Cıva Porozimetresi Test Sonuçları

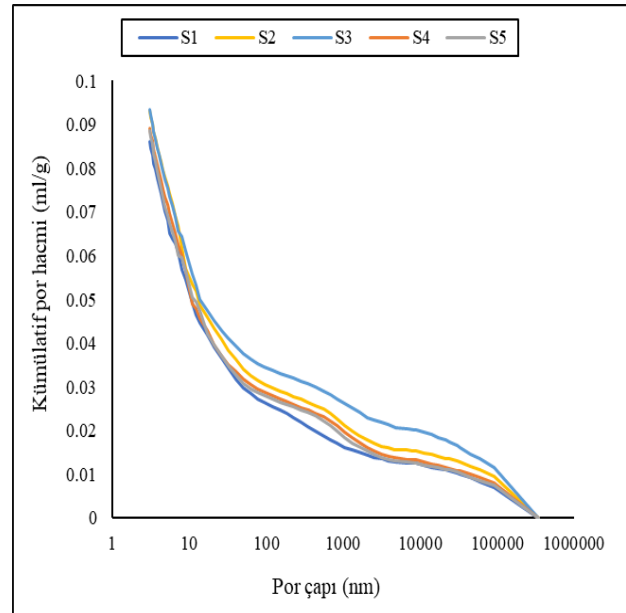
Cıva porozimetresi analizi, çimento esaslı malzemelerde por yapısı özelliklerinin gelişimini anlamak için sıkça tercih edilen temel ve güvenilir bir tekniktir. Numunelerin toplam porozite, ortalama por çapı ve por boyutu dağılımları gibi por yapısı özellikleri bu yöntemle ölçülebilir [30,31]. Bu çalışmada, por yapısının değerlendirilmesi boşlukların silindirik olduğu ve temas açısının 140° olduğu olağan cıva porozimetresi varsayımına göre gerçekleştirilmiştir [32,33]. Cıva porozimetresi analiz sonuçları Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Cıva porozimetresi analiz sonuçları

Numune	Toplam porozite (%)	Alansal ortalama por çapı (nm)	Hacimsel ortalama por çapı (nm)
S1	16.74	4.8	10.4
S2	18.14	5	10.8
S3	18.04	4.7	11.1
S4	17.5	4.8	10.5
S5	17.34	4.6	10.3

S1 kontrol örneğinde toplam porozite değeri %16.74 olarak ölçülmüş olup tüm numuneler arasında minimum seviyededir. %0.25 ve %0.5 katkı oranlarındaki aerojel içerikleri nedeniyle aerojel içeren tüm karışımlarda kontrol numunesine kıyasla daha yüksek düzeyde porozite değerleri saptanmıştır. Bu durum, harç karışımlarına ilave edilen düşük miktardaki silika aerojel katkısının daha yüksek por yapısı karakteristiklerinin ölçülmesine yol açtığını ve aerojel ilavesinin harç por yapısında açık gözeneklerin oluşumunu teşvik ettiğini işaret etmektedir. Beklenildiği gibi, artan aerojel içeriği toplam porozitenin yanı sıra ortalama por çapları üzerinde de genişletici etki yaratmaktadır. S1 kontrol numunesine kıyasla aerojel içerikli numunelerinin hacimsel ortalama por çapı ve

alansal ortalama por çapı değerlerinde sırasıyla % 6.73 ve %4.16'a varan kısmi artışlar ölçülmüştür. Bununla birlikte, eşit aerojel katkı oranında aktivatör dozajındaki % 0.1'den %0.2'ye olan artış, S2 ve S4 numunelerine kıyasla S3 ve S5 numunelerinin alansal ortalama por çapı değerlerinde sırasıyla %6 ve %4.16 düzeylerinde düşümlere neden olmaktadır. Buradaki en olası mekanizma, artan aktivatör dozajı ile hızlanan puzolanik reaksiyonun olumlu etkisine atfedilebilir. Daha önce tartışıldığı gibi, artan aktivatör dozajı hidrasyon ürünleri ile yeterince dolmamış olan gözenekleri doldurmakta ve gözenek yapısı karakteristiklerinde daha düşük değerlere yol açabilmektedir [12].

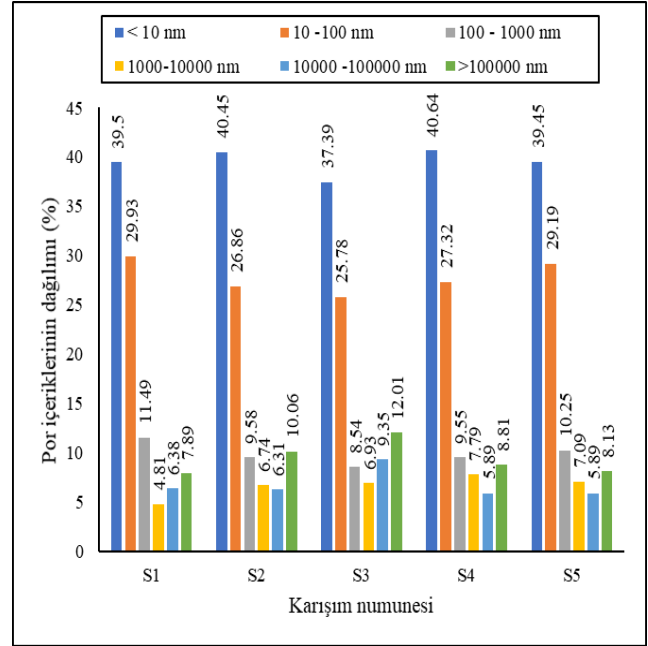


Şekil 4. Hibrit harç numunelerinde kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi

Şekil 4, 28 günlük kür süresinin tamamlanması ile tüm numuneler için kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisini ifade eden eğrilerin gelişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, aerojel katkısı içermeyen kontrol numunesi aerojel katkılı numunelere kıyasla ölçüm işleminin gerçekleştirildiği 3 ila 350,000 nm arasındaki tüm gözenek boyutlarında daha düşük kümülatif por hacmi sergilemiştir. Bu nedenle, numunelerin por yapısındaki toplam por hacminin porozite sonuçlarına da yansıtıldığı gibi düşük katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı vasıtasıyla kolayca arttırılabileceği görülmektedir. Kontrol numunesi için tespit edilen davranış ile uyumlu

olarak poroziteleri \approx %18 olan S2-S3 numuneleri, poroziteleri \approx %17 olan S4-S5 numunelerine kıyasla 3 ve 350,000 nm arasındaki por çapı aralığı boyunca daha yüksek por hacmi sergilemiştir. Bu nedenle, aerojel içeren numunelerin por hacmindeki artışın, numunelerin toplam porozite değerleri ile uyumlu olduğu net olarak gözükmemektedir. Öte yandan, toplam porozite değerindeki artış ile uyumlu olarak S4 örneğinin kümülatif por hacmi – por çapı eğrisinin tüm por çapı aralıkları boyunca S5 örneğine kıyasla yukarıda seyretmesi oldukça makuldür. Bununla birlikte, beklenenin aksine, S3 numunesinin kümülatif por hacmi eğrisi, daha düşük porozite değerine rağmen 20 ve 350,000 nm arasındaki por boyutlarında S2 örneğine kıyasla daha üst seviyede seyretmektedir. Marjinal davranışa yol açan esas faktör, ilgili numunelerin hacimsel ortalama por çapı değerlerinden görülebilmektedir. Eşit aerojel içeriğinde artan aktivatör dozajı sebebiyle toplam porozite ve alansal ortalama por çapı karakteristiklerindeki düşümlere rağmen, hacimsel ortalama por çapında ölçülen artış, por yapısının gelişimi üzerinden baskın etki yaratabilmektedir.

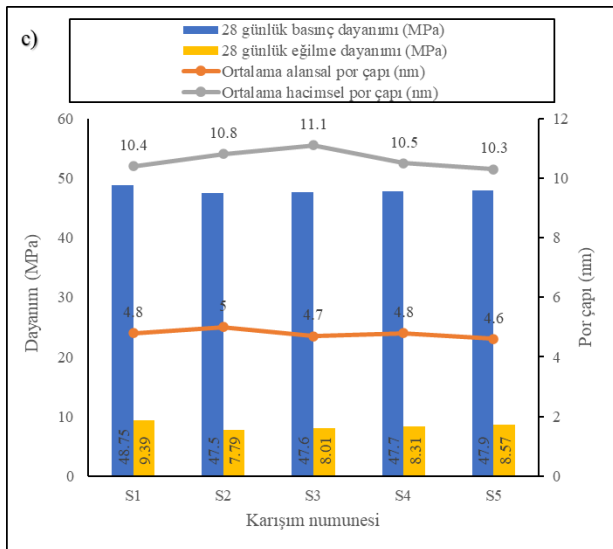
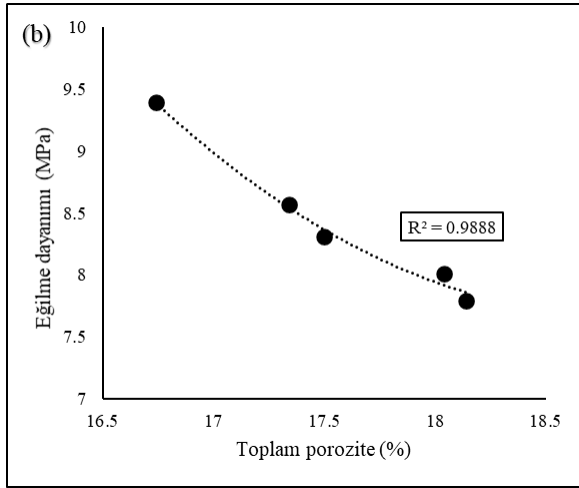
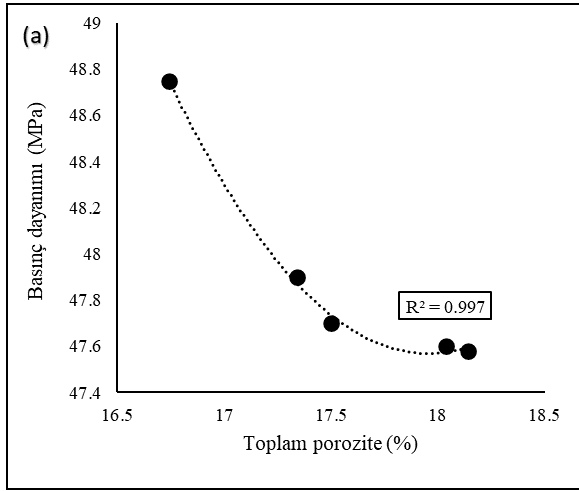
Çimento esaslı malzemelerin por yapılarının değerlendirilmesinde pek çok por yapısı sınıflandırması önerisi mevcut olmasına rağmen boşluklar genel olarak jel boşlukları (<10 nm), kapiler boşluklar (10 – 10,000 nm) ve makro boşluklar (>10,000 nm) olmak üzere üç ana kategoride değerlendirilebilmektedir [34]. Farklı aerojel katkı oranlarındaki harç numunelerinin por yapısı gelişimleri yukarıda belirtilen sınıflandırma esasına göre Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Harç por yapısında por içeriklerinin dağılımı (%)

Şekil 5'te görüldüğü gibi, hibrit karışımlarda kullanılan silis dumanının gözenek doldurma etkisine bağlı olarak, 10 nm ve altındaki boyutlardaki gözeneklerin hacmi, değişen aerojel içeriği ve aktivatör dozajına rağmen toplam por hacminin %37.39 ile %40.64'ü arasında değişmektedir. Bu durum, alkali-aktif edilmiş hibrit harç karışımlarında bağlayıcı malzeme içeriğinde silis dumanının kullanılmasının geleneksel çimento karışımlarına kıyasla daha yüksek jel boşluk oluşumuna yol açtığını işaret etmektedir. Öte yandan, 100,000 nm'den büyük çaplı boşluk oluşumlarındaki değişim incelendiğinde por yapısı gelişimi aerojel ilavesinden güçlü bir şekilde etkilenmiştir. Bu nedenle, kontrol numunesinde ölçülen 100,000 nm'den büyük por çaplarının oluşturduğu makro gözenek oluşumu %7.89 düzeyinde iken S2, S3, S4 ve S5 örneklerinde daha yüksek bir makro gözenek içeriği (sırasıyla %10.06, %12.01, %8.81 ve %8.13 düzeylerinde) tespit edilmiştir. Beklendiği gibi, %0.25 aerojel ilavesi için S2-S3 numunelerinde %0.5 aerojel içerikli numunelere kıyasla numunelerin daha yüksek toplam porozite değerleri ile uyumlu olarak daha yüksek makro gözenek oluşumları tespit edilmiştir. Bu nedenle, makro gözenek oluşumlarının numunelerin toplam porozite değerleri üzerinde belirleyici faktör olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca, partikül boyutu 8-10 nm arasında olan silika

aerojel partikülleri, karışımlara ilave edildiklerinde kendi jel boşluk düzeyindeki por çaplarına rağmen harç por yapısında makro gözenek oluşumunu tetikleyebilmektedir.



Şekil 6. Dayanım değerleri ile por yapısı parametreleri arasındaki ilişkiler

Şekil 6'da harç numunelerinde tespit edilen mekanik özellikler ile por yapısı karakteristikleri arasındaki ilişkiler görülmektedir. Mevcut ilişkiler, karışımlara düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının mekanik özellikler üzerindeki etkisinin anlaşılmasına katkı sunabilecek düzeydedir. Elde edilen sonuçlar, por yapısı karakteristiklerinin, harç numunelerinin basınç ve eğilme mukavemetlerini önemli ölçüde etkileyebildiğini işaret etmektedir. Harç numunelerinin porozite değerlerindeki artış, alkali-aktivasyonu ile oluşturulan C-S-H jeli ile yeterince doldurulamayan büyük gözenekleri işaret etmektedir. Ek olarak, daha yüksek porozite değerlerinde saptanan daha yüksek ortalama çap değerlerinin varlığı boşluklu yapıyı doğrulamaktadır. Bu nedenle, porozite ve alansal ortalama por çapı değerleri arttığında, harçların hem basınç hem de eğilme mukavemetleri azalmaktadır. Eşit aerojel katkısında aktivatörün artan dozajı, daha önce tartışıldığı gibi, porozite ve ortalama por çapı değerlerinde düşüşlerle sonuçlanmıştır. Cıva porozimetresi sonuçlarına göre artan aktivatör dozu ilave C-S-H jeli oluşumuna katkıda bulunabilir. Gözeneklerde ilave C-S-H jelinin bulunması, daha az boşluklu ve daha yoğun boşluk yapısı elde edilmesine yol açar ve daha az boşluklu yapı numunelerin dayanım değerlerini olumlu yönde etkiler. Deneysel sonuçlar, harç karışımlarına ilave edilen düşük katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı ile harç numunelerinin toplam porozite değerlerinde maksimum %1.4'lük bir artışın gözlenebileceğini ve artan porozite sebebiyle de basınç mukavemetinde maksimum %2.56'lık bir azalmanın oluşabileceğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, basınç dayanımındaki sınırlı düşüşe karşın eğilme mukavemetinde %17'ye kadar saptanan kayıplar dikkat çekicidir. Tespit edilen mukavemet düşüşü esasen alansal ortalama por çapı değerinde ölçülen %4.16'a kadar olan artışla ilişkiliydi. Bu noktada, aerojel katkılı numunelerin eğilme performanslarının, basınç etkisi altındaki performanslarına kıyasla por yapısı karakteristiklerindeki bir artışa daha duyarlı olduğu sonucuna varılabilir. İlâveten, mekanik özellikler ile por yapısı karakteristikleri arasında saptanan ilişkiler alkali-aktive edilmiş hibrit silis dumanı harçlarında 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının numunelerin toplam

porozite değerleri aracılığı ile sırasıyla $R^2=0.99$ ve 0.98 korelasyon katsayısı ile tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır. Tespit edilen yüksek korelasyon, hibrit silis dumanı harçlarının tasarımı için por yapısı karakteristiklerinin esas alınmasını teşvik edici olmaktadır.

Termal İletkenlik Katsayısı Sonuçları

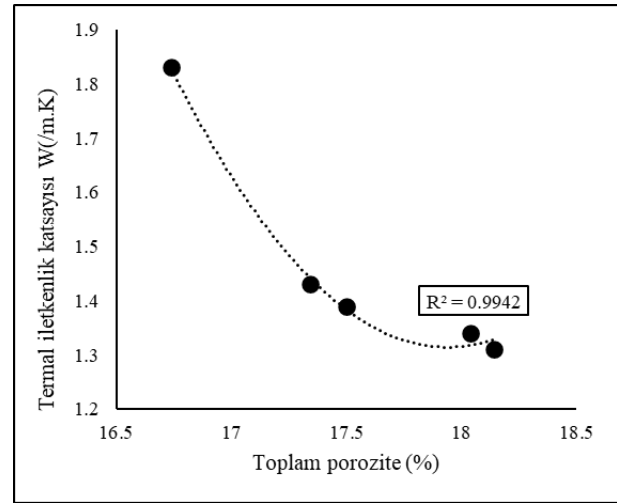
Tablo 6'da hibrit harç numunelerinin termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları görülmektedir. Harç örneklerinde saptanan termal iletkenlik katsayıları 1.31 ile 1.83 W/(m.K) aralığında değişmektedir.

Tablo 6. Termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçları

Termal iletkenlik katsayısı W/(m.K)	
S1	1.83
S2	1.31
S3	1.34
S4	1.39
S5	1.43

Tablo 6'da görüldüğü gibi, termal iletkenlik katsayısı ölçüm sonuçlarına dayanarak karışımlara ilave edilen düşük miktardaki silika aerojel katkısı sayesinde hibrit harç numunelerinin termal yalıtkanlık özelliklerinin önemli ölçüde gelişebileceği görülmektedir. Kontrol numunesinde termal iletkenlik katsayısı 1.83 W/(m.K) olarak saptanmıştır. Harç karışımlarına ilave edilen %0.25 oranındaki aerojel katkısı sayesinde S2 ve S3 harç numunelerinin termal iletkenlik katsayıları kontrol örneğinden sırasıyla %28.41 ve %26.77 düzeylerinde daha düşüktür. Termal iletkenlik katsayılarındaki düşüşler esas olarak aerojel partiküllerinin üstün ısıl yalıtım özelliklerinden kaynaklanmaktadır [30,31]. Harç karışımlarına % 0.5 katkı oranında aerojel dahil edilmesi durumunda da numunelerin yalıtkanlık performanslarında benzer eğilimler gözlenmiştir. Kontrol numunesine kıyasla S4 ve S5 numunelerinin ısıl iletkenliklerinde sırasıyla %24.04 ve %21.85 düzeylerinde düşüşler olduğu saptanmıştır. Öte yandan, hem %0.25 hem de %

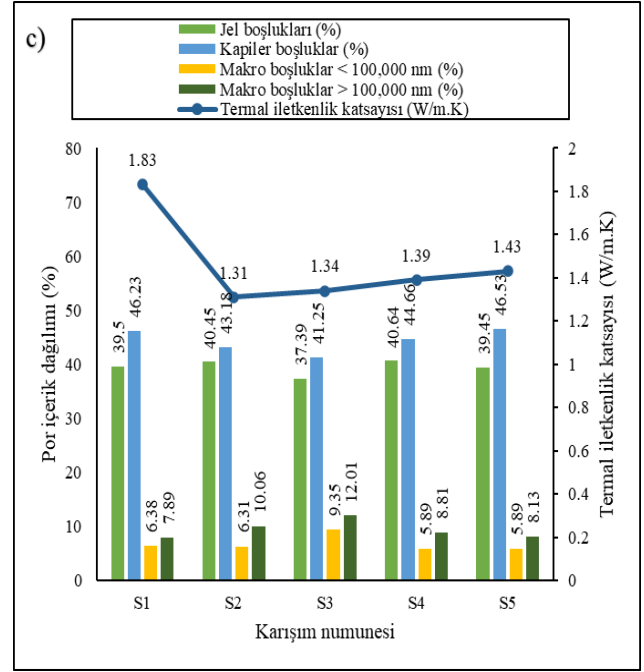
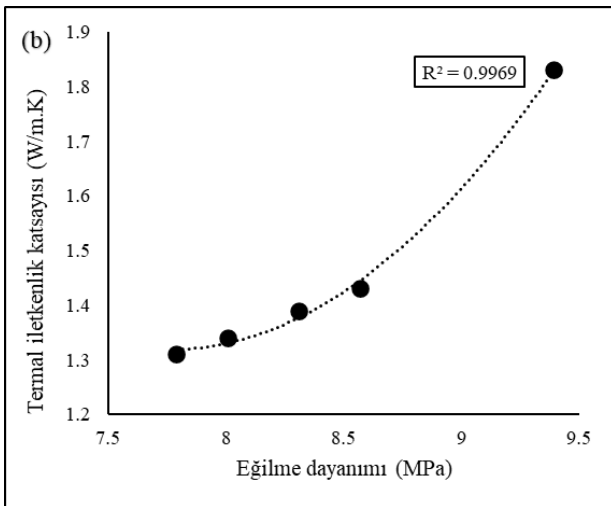
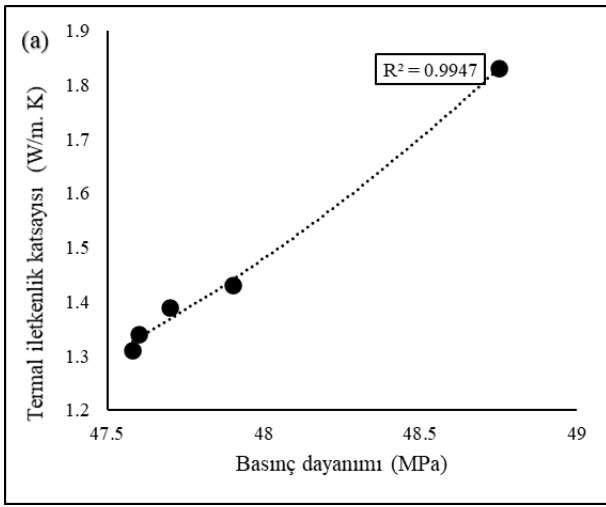
0.5 aerojel katkı oranlarında artan aktivatör dozajı ile termal iletkenlik katsayılarında kısmi düzeyde artışlar ölçülmüştür. Daha önce tartışıldığı gibi, aktivatör dozajının artırılması, daha az gözenekli yapıya sahip daha yoğun çimento matrisine yol açabilmektedir. Bu nedenle, ısı transferi için katı parçacıklar arasında kolaylaşan etkileşim, yukarıda gösterilen iletkenlik katsayılarındaki artışı açıklayabilir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar harç karışımlarında düşük miktardaki aerojel ilavesinde dahi numunelerin ısı yalıtım özelliklerinin %28 düzeyinde geliştiğini işaret etmektedir.



Şekil 7. Toplam porozite – termal iletkenlik katsayısı ilişkisi

Şekil 7, harç numunelerinde ölçülen toplam porozite-termal iletkenlik katsayısı değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Silika aerojel partiküllerinin üstün ısı yalıtım özelliklerine ek olarak, aerojel katkılı çimento esaslı malzemelerde por yapısının gelişimi, numunelerde daha düşük iletkenlik katsayılarının ölçülmesine katkıda bulunabilmektedir. Sonuçlardan, bağlayıcı malzeme içeriğine az miktarda silika aerojel tozu ilave edildiğinde ısıl muhafaza performansında önemli bir artış olduğu görülebilir. Hibrit silis dumanı harçlarında yüksek düzeydeki jel oluşumundan kaynaklı kararlı por yapısı nedeniyle numunelerin toplam porozite ve termal iletkenlik katsayıları arasında $R^2=0.99$ değeri ile anlaşılabilir üzere güçlü bir etkileşim bulunmaktadır. Kontrol numunesine kıyasla, S2 numunesinin toplam porozite değerinde maksimum %1.4'lük bir artış numunenin termal iletkenlik katsayısında

%28.41'lik düşüğe olanak sağlayabilmektedir. Gözenek yapısı ayrıca diğer numunelerin iletkenlik katsayıları üzerinde de bağlayıcı olmuştur. Eşit aktivatör dozajında aerojel içeriğinde %0.25'ten %0.5'e olan artış S2 ve S3 numunelerine kıyasla S4 ve S5 numunelerinin toplam porozite değerlerinde 0.64% ve 0.7% düzeylerinde düşümlere neden olmaktadır. Bu nedenle, daha yüksek aerojel içeriğinde por yapısı özelliklerinde tespit edilen düşüşler oluşan daha yoğun matrisi işaret etmekte ve bu durum artan partikül etkileşimi ile daha iyi ısı iletkenliğine yol açmaktadır.



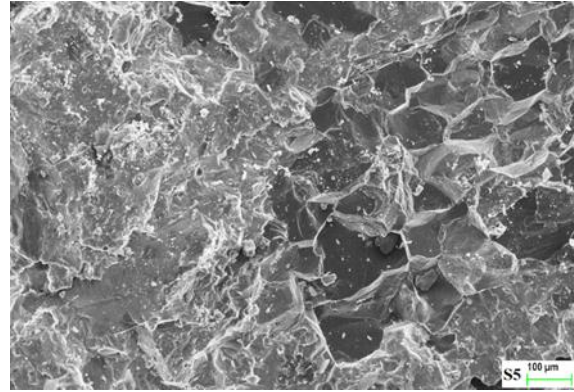
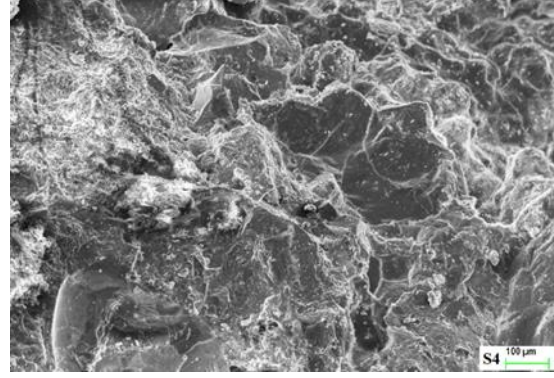
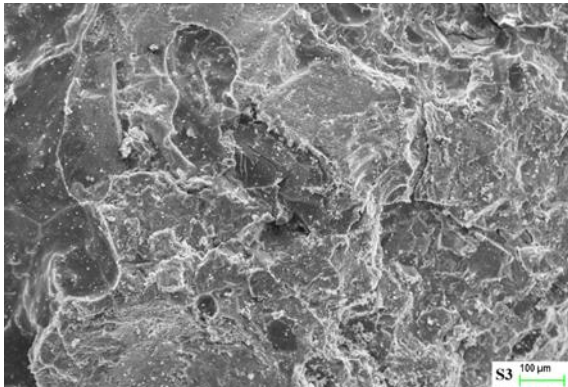
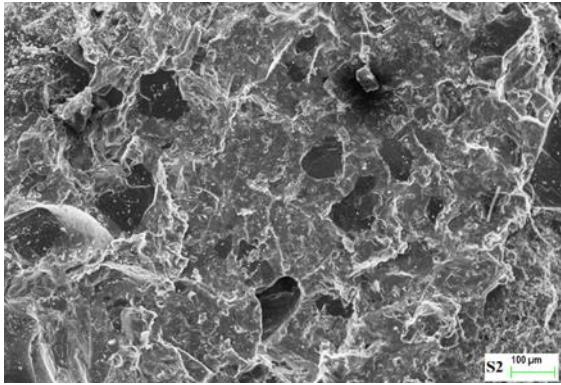
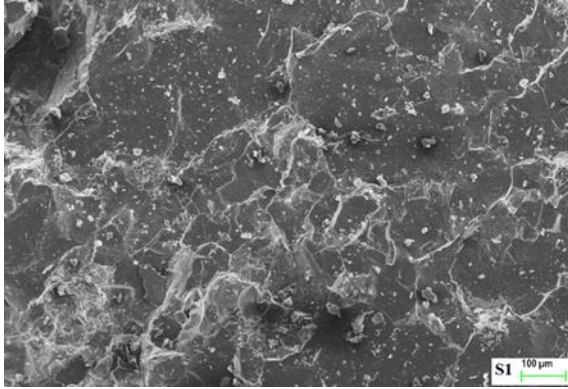
Şekil 8. Harç numunelerinin mekanik, por yapısı özellikleri ve termal iletkenlik katsayıları arasındaki ilişkiler

Şekil 8, harç numunelerinde tespit edilen mekanik özellikler, por yapısı özellikleri ve termal iletkenlik katsayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Beklendiği gibi, por yapısı karakteristikleri ile olan uyum göz önüne alındığında, dayanım sonuçları termal iletkenlik test sonuçları ile uyum içerisindedir. Numunelerde eşzamanlı olarak saptanan iletkenlik ve mukavemet düşüşleri, aerojel içeriğinde harç gözenek yapısındaki meydana gelen ilave gözenek oluşumuna bağlanabilir. Öte yandan, 100.000 ile 350.000 nm arasındaki por çapı aralıklarında saptanan por içerikleri, %0.5'lik aerojel katkılı numunelere kıyasla daha düşük aerojel içeriğine rağmen %0.25 aerojel katkılı numunelerde saptanan daha düşük termal iletkenlik katsayısı değerlerinin sebeplerini ortaya koymaktadır. S2 ve S3 numunelerinde 100.000 ve 350.000 nm arasındaki por içeriği, toplam por içeriğinin %10.06 ve %12.01'si kadardır. Bununla birlikte, % 0.5 aerojel katkısı durumunda, aynı çap aralığındaki por içeriği S4 ve S5 numunelerinde sırasıyla %8.81 ve %8.13 düzeylerinde saptanmıştır. Ayrıca, söz konusu gözenek boyutlarındaki por içeriği kontrol numunesinde minimum seviyededir (%7.89). Deneysel sonuçlar, numunelerdeki makro gözenek oluşumunun numunelerin termal

iletkenlik davranışı üzerindeki etkinliğini işaret etmektedir. Ayrıca, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı, numunelerin toplam porozite ve alansal ortalama por çapı gibi por yapısı özelliklerinde dramatik düşümlere neden olmaktadır, bu durum da artan aktivatör dozajının numunelerin termal iletkenlik katsayısında yol açtığı artışı desteklemektedir.

SEM Analizi

Taramalı elektron mikroskobu aracılığı ile harç numunelerinin mikro yapı özelliklerini tespit etmek amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Mekanik testlerden geriye kalan parçaların kırılma yüzeyinden hassas olarak alınan örnekler SEM analizine tabi tutulmuş ve elde edilen mikro yapı görüntülemeleri Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. 200x büyütmede harç örneklerinin SEM mikrografları

SEM mikro yapı görüntülemelerinde ayırt edilebileceği üzere düzgün olarak dağılmış aerojel partiküllerini içeren faz mikro yapı görüntülemelerinde açık gri renkte ve aerojel içermeyen homojen çimento matrisi ise koyu gri renkte belirginleşerek ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, aerojel içerik oranında %0.25'ten %0.5'e olan artış, S4 ve S5 numunelerinde S2 ve S3 numunelerine kıyasla daha belirgin ve daha açık gri tonlarda görsel olarak artan aerojel içeriğinin gözlemlenmesine olanak sağlamaktadır. Silika aerojel partiküllerinin kalsiyum-silikat yapısındaki inert özelliklerinin bir sonucu olarak, yüzeyde aerojel toz parçacıklarının izleri belirgindir. Bu özellik, iyi hidrate olmuş çimento matrisinde aerojel partiküllerinin belirgin şekilde ayırt edilmesine olanak sağlar. S1 numunesinin SEM görüntülemesinde, diğer örneklerle karşılaştırıldığında, çimento matrisi en düşük seviyede ölçülen toplam porozite değeri ile uyumlu olarak oldukça yoğun formda görünmektedir. Düzgün yüzey dokusuna sahip olan yoğun matris yapısı, ısı transferi için katı parçacıklar arasındaki etkileşimi kolaylaştırmakta ve bu nedenle bu örnekte en

yüksek termal iletkenlik katsayısı kontrol numunesinde saptanmaktadır. Diğer yandan, aerjel katkılı numunelerin mikro yapı görüntülemeleri, aerjel partiküllerinin çimento matrisine dahil edilmesinin aerjel partikülleri ile çimento matrisinin etkileşim bölgelerinde gözenekli bir etkileşim mekanizmasına yol açtığını göstermektedir. Bu mekanizma sadece ısı transfer seviyesini güçlendirmekle kalmaz, aynı zamanda ısı transferini de büyük ölçüde engeller. Ayrıca, aerjel parçacıklarının hidrofobik yapısı, partiküllerin matris ile olan birleşim bölgelerinde su emilimini azaltarak ısı yalıtım hedefine katkı sunmaktadır [27].

Sonuçlar

Bu çalışmada, çimento katkı maddesi olarak düşük içerikteki silika aerjel ilavesinin hibrit harç numunelerinin mekanik, termal iletkenlik, gözenek yapısı özellikleri ve mikro yapı morfolojisi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Harç karışımlarına çimento ağırlığınca düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerjel katkısı numunelerin termal yalıtkanlık performansı üzerinde oldukça etkilidir.
- %0.25 aerjel katkılı numunelerde sadece %2.56 düzeyindeki basınç dayanımı düşüşüne karşın termal yalıtkanlık performansı %28 seviyesine kadar gelişebilmektedir.
- Geleneksel çimento harçlarından farklı olarak alkali-aktif edilmiş hibrit silis dumanı harçlarında jel gözenek oluşumu toplam por hacminin yaklaşık %40'ı düzeyindedir.
- Jel gözenek oluşumunun yüksek seviyesine bağlı olarak, kapiler gözeneklerin oluşumu sınırlanmakta ve böylece karışımlara ilave edilen silika aerjel katkısının harç numunelerinin basınç mukavemeti üzerindeki olumsuz etkisi sınırlanabilmektedir.
- Harç karışımlarına ilave edilen düşük katkı oranındaki silika aerjel içeriğinin numunelerin termal yalıtkanlık

performansı üzerindeki pozitif etkisi numunelerin por yapısı özellikleri gelişimi üzerindeki baskın etkisi nedeniyle oluşmaktadır. Bu sebeple numunelerin porozite değerleri ile termal iletkenlikleri arasında yüksek korelasyon saptanabilmektedir ($R^2 > 0.99$).

- Alkali-aktif edilmiş hibrit silis dumanı harçlarında numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ile termal iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki de oldukça güçlüdür ($R^2 > 0.99$).
- Harç numunelerinin termal yalıtkanlık performansı artan por hacmi ile orantılı olup toplam porozite ve alansal ortalama por çapı değerlerinde eş zamanlı artış olması durumunda, ısı iletkenlik katsayısındaki azalma maksimum düzeyde seyretmektedir.
- Harç karışımlarına ilave edilen silika aerjel katkısının numunelerin mekanik performansı üzerindeki olumsuz etkisi basınç dayanımlarına kıyasla daha çok eğilme performansı üzerindedir. Yine de eğilme dayanımlarında tespit edilen maksimum %17 düzeyindeki düşüşe karşın saptanan minimum 7.79 MPa'lık eğilme dayanımı değeri mekanik performans açısından oldukça yeterli seviyededir.
- Aerjel partiküllerinin çimento matrisine dahil edilmesi, çimento matrisinde aerjel partiküllerinin çevresinde gözenekli ve zayıf bir katı-katı etkileşim mekanizmasına yol açmaktadır. Bu mekanizma mekanik dayanımlarda kısmi düzeyde düşüslere sebep olsa da ısı transfer oranının düşürülmesinde oldukça önemli bir rol oynamaktadır.

Özetle bu çalışma, aerjel partiküllerinin harç karışımlarında yüksek katkı oranlarında yer almasını öngören aerjel-kum yer değişimi esaslı tasarım tercihlerine alternatif olarak, harç karışımlarına çimento katkı maddesi olarak aerjel ilavesinin numunelerin mekanik, por yapısı, termal iletkenlik ve mikro yapı özellikleri üzerindeki etkisini detaylı olarak göstermiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar,

çimento katkı maddesi olarak silika aerojel ilavesi durumunda, harç numunelerinin mekanik özelliklerinde sınırlı düzeydeki düşümlere karşın numunelerin termal yalıtkanlığında dikkate değer bir artışın mümkün olabileceğini ortaya koymaktadır. Karışımın homojenliği ve aerojel partiküllerinin çimento matrisinde iyi dağılımı, gelişmiş ısı yalıtımı ile mekanik özelliklerin saptanmasında önemli bir faktör gibi görünmektedir. Son olarak, bu çalışma alkali-aktif edilmiş hibrit silika aerojel içerikli harçların tasarımı hakkında yeni bir perspektif açarak sürdürülebilirlik politikaları ile uyumlu harç tasarımı gelişimine katkı sunmaktadır.

Kaynaklar

- [1]. Arbi, K., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A. (2013). Alkali-activated blends of calcium aluminate cement and slag/diatomite, *Ceramics International*, **39**, 9237–9245.
- [2]. Cheah, C. B., Tan, L. E., Ramli, M. (2019). The engineering properties and microstructure of sodium carbonate activated fly ash/ slag blended mortars with silica fume, *Composites Part B*, **160**, 558–572.
- [3]. Madani, H., Norouzfard, M. N., Rostami, J. (2018). The synergistic effect of pumice and silica fume on the durability and mechanical characteristics of eco-friendly concrete, *Construction and Building Materials*, **174**, 356–368.
- [4]. Imbabi, M. S., Carrigan, C., McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology, *International Journal of Sustainable Built Environment*, **1**, 194–216.
- [5]. Liu, Y., Shi, C., Zhang, Z., Li, N. (2019). An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials, *Resources, Conservation and Recycling*, **144**, 297–309.
- [6]. Schröfl, C., Gruber, M., Plank, J. (2012). Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC), *Cement and Concrete Research*, **42**, 1401–1408.
- [7]. Gesoglu, M., Guneyisi, E., Asaad, D.S., Muhyaddin, G.F. (2016). Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica, *Construction and Building Materials*, **102**, 706–713.
- [8]. Zelic, J., Rusic, D., Veza, D., Krstulovic, R. (2000). The role of silica fume in the kinetics and mechanisms during the early stage of cement hydration, *Cement and Concrete Research*, **30**, 655–1662.
- [9]. Rossen, J.E., Lothenbach, B., Scrivener, K. L. (2015). Composition of C–S–H in pastes with increasing levels of silica fume addition, *Cement and Concrete Research*, **75**, 14–22.
- [10]. Ng, S., Jelle, B. P., Stæhli, T. (2016). Calcined clays as binder for thermal insulating and structural aerogel incorporated mortar, *Cement and Concrete Composites*, **72**, 213–221.
- [11]. Luo, Y., Jiang, Y., Feng, J. (2019). Synthesis of white cement bonded porous fumed silica-based composite for thermal insulation with low thermal conductivity via a facile cast-in-place approach, *Construction and Building Materials*, **206**, 620–629.
- [12]. Bostancı, L., Sola, O.C. (2018). Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Aerogel-Incorporated Alkali-Activated Slag Mortars, *Advances in Civil Engineering*, **2018**, 1-9.
- [13]. Szodrai, F., Lakatos, Á., Kalmár, F. (2016). Analysis of the change of the specific heat loss coefficient of buildings resulted by the variation of the geometry and the moisture load, *Energy*, **115**, 820–829.
- [14]. Lakatos, Á. (2019). Stability investigations of the thermal insulating performance of aerogel blanket, *Energy and Buildings*, **185**, 103–111.
- [15]. Huang, Y., Niu, J.-l. (2015). Energy and visual performance of the silica aerogel glazing system in commercial buildings of Hong Kong, *Construction and Building Materials*, **94**, 57–72.
- [16]. Kim, S., Seo, J., Cha, J., Kim, S. (2013). Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel, *Construction and Building Materials*, **40**, 501–505.
- [17]. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., Riffat, S.B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **34**, 273–299.
- [18]. Dorcheh, A.S., Abbasi, M.H. (2008). Silica aerogel; synthesis, properties and characterization, *Journal of Materials Processing Technology*, **199**, 10–26.
- [19]. Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wang, W., Zhang, Y., Li, Z. (2018). Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel, *Construction and Building Materials*, **188**, 747–757.
- [20]. Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., Wallevik, O. H. (2015). Experimental investigations

- of aerogel-incorporated ultra-high-performance concrete, *Construction and Building Materials*, **77**, 307–316.
- [21]. Liu, Z. H., Ding, Y.D., Wang, F., Deng, Z.P. (2016). Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel, *Construction and Building Materials*, **122**, 548–555.
- [22]. Al Zaidi, A. K. A., Demirel, B. , Atis, C.D. (2019). Effect of different storage methods on thermal and mechanical properties of mortar containing aerogel, fly ash and nano-silica, *Construction and Building Materials*, **199**, 501–507.
- [23]. TSI, TS EN 197-1. Cement-Part 1: Compositions and conformity criteria for common cements. Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute; 2002.
- [24]. TSE, TS EN 196-1. Methods of testing cement-Part 1: Determination of strength. Ankara, Turkey: Turkish Standard Institute; 2009 [in Turkish].
- [25]. TS EN 1015-11 Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar.
- [26]. Bilim, C. , Atis, C.D. (2012). Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, **28**, pp. 708–712.
- [27]. Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., Jacobsen, S. (2014). Aerogel-incorporated concrete: An experimental study, *Construction and Building Materials*, **52**, 130–136.
- [28]. Woignier, T., Phalippou, J. (1988). Mechanical strength of silica aerogels, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **10**, 404–408.
- [29]. Júlio, M.F., Soares, A., Ilharco, L. M., Flores-Colen, I., de Bito, J. (2016). Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders, *Cement and Concrete Composites*, **72**, 309–318.
- [30]. Bostanci, L., Ustundag, O., Sola, O. C., Uysal, M., (2020). Effect of curing methods and scrap tyre addition on properties of mortars, *Gradevinar*, **72**, 4, 311-322.
- [31]. Bostanci, L., Ustundag, O., Sola, O., Uysal, M., (2019). Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties, *Gradevinar*, **71**, 8, 651-661.
- [32]. Hanif, A., Lu, Z., Cheng, Y., Diao, S., Li, Z. (2017). Effects of different lightweight functional fillers for use in cementitious composites, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **11**, 99–113.
- [33]. Lu, J.-X. , Poon, C.S. (2018). Improvement of early-age properties for glass-cement mortar by adding nanosilica, *Cement and Concrete Composites*, **89**, 18–30.
- [34]. Wyrzykowski, M., Kiesewetter, R., Kaufmann, J., Baumann, R., Lura, P. (2014). Pore structure of mortars with cellulose ether additions – Mercury intrusion porosimetry study, *Cement and Concrete Composites*, **53**, 25–34.