

Araştırma Makalesi - Research Article

Silika Aerojel katkılı Alkali-Aktive Edilmiş Uçucu Kül Harçlarının Mekanik, Por Yapısı ve Mikro Yapı Özellikleri

Levent Bostancı^{1*}

Geliş / Received: 13/04/2020

Revize / Revised: 16/07/2020

Kabul / Accepted: 17/07/2020

ÖZ

Silika aerojeller, çimento matrisine dâhil edildiklerinde yüksek poroziteleri aracılığıyla çimento esaslı malzemelerin akustik ve termal yalıtım performanslarına katkı sunabilmektedirler. Silika aerojel partikülleri, yüksek porozitelerine rağmen mekanik zorlamalar altında ihmal edilemeyecek düzeyde mekanik özellikler de gösterebilmektedirler. Bu çalışmada çimento ağırlığınca düşük katkı oranlarında (%0.25 ve %0.50) çimento matrisine dâhil edilen silika aerojellerin alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçlarının mekanik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip uçucu kül harçlarının basınç etkisi altındaki tokluk ve pik – sonrası tokluk kapasitelerinin sırasıyla yaklaşık %27 ve %70 düzeylerinde artabileceğini ortaya koymaktadır. Harç numunelerinin por yapısında mikro ve kapiler boyuttaki por çaplarının değişimine bağlı olarak elde edilen tokluk kazancı, gelecekte eşdeğer basınç dayanımları altında deformasyon davranışı geliştirilmiş silika aerojel katkılı blok elemanların üretimi için yenilikçi bir tasarım fikrini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler- *Silika Aerojel, Uçucu Kül, Alkali-Aktive Edilmiş Harç, Tokluk, Porozite*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: leventbostanci@beykent.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4686-9102>)
İnşaat Teknolojisi Programı, Beykent Üniversitesi, İstanbul

Mechanical, Pore Structure and Microstructural Properties of Alkali-Activated Fly Ash Mortars Containing Silica Aerogel

ABSTRACT

Inclusion of silica aerogels in cement matrix can lead to an enhancement in thermal and acoustic properties of cement – based materials due to the high porosity values of silica aerogel particles. Despite their high porosity values, silica aerogel particles can also show sufficient mechanical performance under stress. In this study, mechanical, pore structure and microstructure properties of alkali – activated fly ash mortars containing a small amount of silica aerogel powder (0.25% and 0.50% of binder, by weight) were investigated. The results obtained from the experimental study reveal that the compressive toughness and compressive post-peak toughness capacities of fly ash mortars with an average compressive strength of 20 MPa could increase by about 27% and 70%, respectively. Toughness development obtained via the change in the micro and capillary pore formation in the pore structure of the mortar samples presents an innovative design idea for the production of silica aerogel-incorporated mortar blocks with improved deformation behavior under equivalent compressive stress.

Keywords- *Silica Aerogel, Fly Ash, Alkali-Activated Mortar, Toughness, Porosity*

I.GİRİŞ

A. Arka Plan

Enerjinin ekonomik olarak kullanılması fikri, tüm endüstriyel alanlarda olduğu gibi inşaat sektöründe de uygulanması kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir. İnşaat sektöründe yürütülen faaliyetler yüksek düzeyde enerji tüketimini gerektirmektedir. Artan enerji tüketimi ile global ısınma düzeyi de artmakta ve bu durum gerek ekosistem gerekse ekonomi açısından telafisi mümkün olmayan sonuçlar doğurmaktadır [1]. Çimento teknolojisinde 1 kg çimento üretimi esnasında yaklaşık 1.0 kg CO₂ salınımı gerçekleşmekte ve eş zamanlı olarak da kg başına 1.5 kWh enerji harcanmaktadır [2]. Çimento üretiminin yüksek maliyeti ve CO₂ salınımı göz önüne alınarak günümüzde çimento harçları yerine bağlayıcı malzeme içeriğinde çimento miktarının azaltıldığı çevre-dostu harç tasarımları üzerine sıkça deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir [3,4].

Günümüzde çimento harçlarına alternatif olarak üretilen alkali – aktive edilmiş harçlar aracılığıyla çimento üretimi kaynaklı CO₂ salınımı %80 düzeyinde azaltılabilmektedir. Bu noktada; alkali – aktive edilmiş harçların yaygınlaşması ekosistemin geleceği açısından önem arz etmektedir [5]. Alkali-aktive edilmiş harçlarda toz formdaki alüminosilikat kaynağı değişen küre ve nem koşullarında alkali aktivatör ile kimyasal reaksiyona girerek yüksek dayanımlı, üstün durabilite özelliklerine sahip ve düşük hidrasyon ısılı harç oluşturabilmektedir. Alkali-aktive edilmiş harçlarda alüminosilikat kaynağı olarak ise endüstriyel yan ürün olarak tabir edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu kül sıkça tercih edilmektedir [6].

Uçucu küller, kimyasal kompozisyonlarında yer alan kalsiyum oksit (CaO) miktarına bağlı olarak ASTM C-618 [7]'e göre C ve F sınıfı uçucu küller olmak üzere iki farklı tipte tanımlanmaktadır. C sınıfı uçucu küller, santrallerde linyit kömürünün yakımı ile elde edilmektedir. Kimyasal kompozisyonunda %20'den daha fazla CaO barındıran C sınıfı uçucu küllerde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃'ün toplam miktarı %50-70 aralığında değişmektedir. F sınıfı uçucu küller ise antrasit veya bitümlü kömür yakımı neticesinde elde edildikleri için kimyasal kompozisyonlarında genellikle %10'dan daha düşük seviyede CaO barındırırlar. F sınıfı uçucu küllerde SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃'ün toplam miktarı da %70'ten fazladır [8 -10]. Uçucu küller, kimyasal kompozisyonlarında yüksek düzeyde Al₂O₃ ve SiO₂ içerdiklerinden alkali aktivasyonu için bağlayıcılık potansiyeli açısından oldukça cazip gözükümler [11].

B. Literatür Taraması

Önceki deneysel çalışmalarda, harç karışımlarındaki çimentonun uçucu kül ile yer değişiminin harçın mekanik özelliklerine olan etkisi sıkça incelenmiştir. Literatürde uçucu kül içeren karışım numunelerinde kontrol durumuna kıyasla daha yüksek basınç dayanımlarının elde edilebilmesi için uçucu kül içeriğinin %10 veya %20 gibi düşük düzeylerde kullanılması önerilmiştir [12]. Karahan ve Atis [13] beton karışımlarında ağırlıkça %15 ve %30 düzeylerinde çimento ile uçucu külü yer değiştirerek fiber katkılı beton numunelerinin mekanik ve durabilite özelliklerinin değişimini araştırdılar. Sonuçlar, artan uçucu kül içeriği ile dayanımların düştüğünü ve kontrol numunesine kıyasla %15 ve %30 düzeylerindeki uçucu kül içeriği için dayanımlarda sırasıyla %17 ve %30 düzeylerde kayıpların oluştuğunu göstermiştir. Yerramala vd. [14] ürettikleri harç karışımlarında % 0-25 oranlarında çimento ile uçucu külü yer değiştirerek %25 oranındaki uçucu kül içeriği için basınç dayanımlarını 7. ve 28. günlerde sırasıyla 10.4 ve 19.6 MPa olarak tespit ettiler. Yüksek basınç dayanımı hedefi için optimum uçucu kül içeriğinin %10 olmasını gerektiğini rapor ettiler. Al Zaidi vd. [15] harç karışımlarında bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 düzeyinde uçucu kül içeren harç numuneleri ürettikler. Kullanılan uçucu kül içeriğinin yüksek düzeyine bağlı olarak çimento matrisinde uzun yıllar süreceğini öngördükleri yavaş hidrolik etkileşime dikkat çektiler.

Endüstriyel atık türü bağlayıcıların çimento yerine kısmi düzeyde kullanıldığı harçlarda numunelerin basınç dayanımlarındaki kayıplara ilaveten tokluk kapasitelerinin de azaldığı bilinmektedir [16]. Azalan tokluk davranışının telafi edilmemesi durumu, atık türü bağlayıcı içeren harçların kullanımını kısıtlayarak eko sistem açısından sunduğu avantajlardan yararlanılmasının önünde engel teşkil etmektedir. Küresel formdaki uçucu kül tanecikleri, çimento matrisinde kısmen kimyasal bağ etkileşimini zayıflatabilmektedir [17]. Guades [18] uçucu kül içerikli jeopolimer harçlarının mekanik özelliklerinin kum – uçucu kül oranına bağlı olarak değişimini araştırmıştır. Uçucu kül harçları için 12.4 MPa lık basınç dayanımı değeri altında oldukça gevrek bir kırılma

mekanizması tespit edilmiştir. Bu sebeple uçucu kül harçlarında tokluk özelliklerinin gelişimi için genellikle lif katkısı tercih edilmektedir. Xu vd. [19] uçucu kül esaslı jeopolimer harçlarında 8 ve 12 mm uzunluğundaki PVA lifleri kullanarak eğilme etkisi altındaki tokluk davranışını incelediler. Sonuçlar, tokluk özelliklerinin 12 mm uzunluğundaki PVA lifleri aracılığı ile %1300 düzeyinde gelişebileceğini göstermiştir.

Malzeme biliminde çimento esaslı malzemelerin mekanik ve yalıtım performanslarının geliştirilmesi adına nano boyuttaki malzemelerin çimento matrisine dahil edilmesi üzerine de sıkça çalışılmaktadır. Nano-malzemeler, kalsiyum silikat yapısı içerisinde genellikle boşluk doldurarak mikro yapı özelliklerini geliştirmekte ve kökenlerine bağlı olarak aynı zamanda hidrolik aktiviteyi vasıtasıyla da hidrasyon sürecine ciddi düzeyde etki edebilmektedir [20]. Son yıllarda, nano-malzemeler arasında silika aerojelleri esas alan çalışmalar hızla artmaktadır. Silika aerojeller, hidrolik aktive göstermemekle birlikte kendilerine özgü por yapısı ile yüksek düzeydeki hava içeriğine rağmen katı iskeletlerini koruyacak şekilde üretilmektedir [21]. Dünyanın en hafif katısı olarak kabul edilen silika aerojellerin çimento esaslı karışımlarda kullanılması genellikle malzemelerin termal yalıtım [22-26] veya akustik yalıtım [27] performanslarının artırılması üzerine odaklıdır. Ancak, silika aerojeller %99.8 düzeyine erişebilen por hacmine rağmen kendi kütlelerinin 1600 katı kadar da yük taşıyabilmektedirler [28]. Partikül yoğunluklarının, hava partiküllerine kıyasla 4 -5 kat daha fazla olduğu bilinmektedir [29]. Alkali- aktive edilmiş harçlarda silika aerojellerin düşük katkı oranlarında kullanımına yönelik çalışmalar sınırlı düzeydedir. Yapılan çalışmalar, eşit aktivatör dozajı için karışımlarda optimum düzeyde artan aerjel katkısı ile kısmi olarak dayanım artışının saptanabileceğini göstermektedir [4].

Çimento esaslı malzemelerde silika aerojeller genellikle yüksek yalıtım hedefleri doğrultusunda kum ile yer değiştirilerek yüksek düzeylerde kullanılmakta ve kaçınılmaz olarak eğilme ve basınç dayanımlarında büyük düşüşler saptanmaktadır [15]. Yüksek dayanımlı beton üretiminde %50 düzeyinde kullanılan silika aerjel içeriği sebebiyle basınç dayanımı 20 MPa seviyesine indirgenmektedir [30]. Meydana gelen dayanım düşüşleri esasen silika aerojellerin çimento esaslı malzemelerde hafif agrega olarak fonksiyonel rol üstlenmesi ile alakalıdır. Hanif vd. [23] 28 günlük yaşta yüksek düzeydeki silika aerjel içeriği için 1187 kg/m³'lük birim hacim ağırlığa karşın basınç dayanımını 18.63 MPa olarak tespit etmişlerdir. Aynı kür süresi sonunda ise eğilme dayanımı 3.66 MPa olarak saptanmıştır. Liu vd. [24] ise hacimce %60 oranında aerjel içeren numunelerde 2.15 MPa'lık basınç dayanımı ve 0.45 MPa'lık eğilme dayanımı tespit etmişlerdir. Öte yandan, karışımlarında silika aerjelin çimento katkı maddesi olarak kullanımında ise, silika aerjel katkısının düşük içeriği nedeniyle mekanik dayanımlarda genellikle ciddi düzeyde düşüşler görülmektedir [4]. Bostancı vd. [26] silika aerjel içeriğinin % 0.1 den % 0.7 e kadar olan artışı için basınç dayanımlarında benzer dayanım değerlerini saptarken %1.0 aerjel katkı oranında ise kontrol numunesine kıyasla 56.5 MPa' dan 57.0 MPa' kadar kısmi bir artışında saptanabileceğini ortaya koymuştur.

C. Araştırmanın Önemi

Silika aerojeller üzerine yakın geçmişte yapılan çalışmalar, silika aerojellerin yüksek porozite değerlerini göz önüne alarak genellikle numunelerin akustik, yangın ve ısı yalıtım performanslarına olan katkıları üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada ise silika aerojellerin yüksek porozite değerlerine rağmen sahip oldukları mekanik özellikler göz önüne alınarak alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçlarının basınç etkisi altındaki tokluk özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmanın odak noktası, ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip harç numunelerindeki deformasyon davranışının silika aerjel katkısı ile değişiminin araştırılması üzerinedir. Silika aerjel katkısının eşdeğer basınç dayanımları altında numunelerin deformasyon gelişimine olan etki mekanizmasının anlaşılması özellikle yapı duvarlarında kullanılacak çimento esaslı ve silika aerjel katkılı blok elemanların gelecekteki tasarım girişimleri için önem arz etmektedir.

II.MALZEME VE YÖNTEM

A. Kullanılan Malzemeler

1) *Alkali Aktivatör:* Harç karışımlarında alkali-aktivasyon işlemi sodyum karbonat (Na₂CO₃) ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Na₂CO₃ için kimyasal kompozisyon Tablo 1' de sunulmuştur.

Tablo 1. Kullanılan Na_2CO_3 'ün kimyasal kompozisyonu.

Bileşen	(%)
Na_2CO_3	Min. 99.5
NaCl	Max. 0.1
Na_2SO_4	Max. 0.1
Çözünmeyen kalıntı	Max. 0.05

2) *Bağlayıcı Malzemeler:* Üretilen harç karışımlarından bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R tipi çimento ile uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının (%68.31) %50'nin üzerinde olması dikkate alındığında ASTM C-618 [7] standardına göre C sınıfı uçucu kül olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan çimento ve uçucu küle ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çimento ve uçucu kül için kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler.

	Çimento	Uçucu kül
Kimyasal kompozisyon (wt/wt %)		
SiO_2	19.78	43.56
Al_2O_3	5.13	20.57
Fe_2O_3	3.67	4.18
CaO	63.27	24.54
MgO	2.12	1.76
SO_3	2.94	1.44
K_2O	0.87	1.29
Na_2O	0.22	0.32
Cl^-	0.01	0.007
Fiziksel özellikler		
Yoğunluk (g/cm^3)	3.16	2.4
Özgül yüzey alanı (cm^2/g)	3580	2900

3) *Kum:* Harç karışımlarında ince agrega olarak TS EN 196-1 [31] standardına uygun olarak hazırlanmış Rilem kumu kullanılmıştır.

4) *Silika Aerojel:* Harç karışımlarında Ensate Yalıtım Mühendislik Proje San. Ve Tic. Ltd. Şti tarafından sipariş üzerine üretilmiş olan toz formdaki silika aerojel kullanılmıştır. Kullanılan silika aerojele ait fiziksel özellikler Tablo 3' de görülmektedir.

Tablo 3. Kullanılan silika aerojelin fiziksel özellikleri.

Yüzey alanı (m ² /gr)	790–840
Ortalama por çapı (nm)	8–10
Porozite (%)	>%94
Görünür yoğunluk (kg/m ³)	90–100
Yüzey grubu	– OH

B. Karışım Oranları

DeneySEL çalışmalar kapsamında üretilen harç numunelerinde harç karışımlarına düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının numunelerin mekanik, por yapısı ve mikro yapı özelliklerine olan etkisini araştırmak için 5 farklı katkı oranlarında harç karışımları oluşturulmuştur. Harç karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak çimento ve uçucu külden oluşan hibrit bağlayıcı kullanılmıştır. Ortalama 20 MPa düzeyinde basınç dayanımı hedeflenen deneySEL çalışmalarda uçucu külün çimentoya kıyasla daha düşük hidrolik aktivitesi sebebiyle tüm karışımlarda uçucu kül- çimento yer değişimi %50 düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Silika aerojel katkısı, karışımlara bağlayıcı malzeme ağırlığına %0.25 (1.125 g) ve %0.50 (2.25 g) katkı oranlarında ilave edilmiştir. Literatürdeki deneySEL çalışmalarda karbonat kökenli alkali aktivatörlerin bağlayıcı malzeme içeriğinde yüksek düzeyde atık türü bağlayıcı bulunduran harçlarının mekanik performanslarına katkı sunabildiği bilinmektedir [4]. Bu sebeple, karışımlardaki uçucu külün çimentoya nazaran düşük hidrolik aktivitesini geliştirmek için bağlayıcı malzeme ağırlığına %0.1 (0.45 g) ve %0.2 (0.9 g) dozajlarında sodyum karbonat da alkali aktivatör olarak karışımlarda kullanılmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.50 olarak düzenlenmiş ve karma suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır. Karışımlarda silika aerojel içermeyen K1 numunesi “kontrol numunesi” olarak adlandırılırken rölatif olarak %0.25 aerojel katkılı numuneler “düşük aerojel içerikli numuneler”, %0.50 aerojel katkılı numuneler ise “yüksek aerojel katkılı numuneler” olarak nitelendirilmiştir. Harç karışım oranları Tablo 4’ de görülmektedir.

Tablo 4. Harç karışım oranları.

Karışım numunesi	Aerojel (g)	Na ₂ CO ₃ (g)	Uçucu kül (g)	Çimento (g)	Su/Bağlayıcı	Su (ml)	Kum (g)
K1	0	0.45	225	225	0.50	225	1350
K2	1.125	0.45					
K3	1.125	0.9					
K4	2.25	0.45					
K5	2.25	0.9					

C. Numune Hazırlanması, Kür Koşulları ve Uygulanan Deneyler

DeneySEL çalışmalar kapsamında TS EN 196-1 [31] standardına uygun olarak her bir karışımdan üçer adet olmak üzere 40x40x160 mm ölçülerinde tek tip prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Deneylerde kullanılan silika aerojel partiküllerinin karışımlardaki homojenliğini arttırmak 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 taze harç karışımları kalıp içerisine alındıktan sonra etkin bir vibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. Harç numuneleri laboratuvar koşullarında 24 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve 2,7 ve 28 günlük farklı kür periyotları için 20 ± 2 °C sıcaklığındaki kür havuzuna alınmıştır. Kür süresini tamamlayan harç numuneleri sırasıyla basınç, porozimetre ve mikro yapı analizi testlerine tabi tutulmuşlardır.

Silika aerojel katkılı harç numunelerinin basınç etkisi altındaki mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin ardından harç numunelerine öncelikli olarak deformasyon kontrollü basınç testi uygulanmıştır. Test esnasında deformasyon artış hızı 0.1 mm/dk. olarak ayarlanmış ve numunelerin basınç etkisi altındaki eksenel deformasyonları doğrusal değişken diferansiyel transformatörler (LVDT'ler) aracılığı ile ölçülerek kaydedilmiştir. Bu amaçla test esnasında öncelikle numunelerde oluşan basınç yükü – deformasyon verileri kaydedilmiş ve elde edilen veri okumaları, yük – deformasyon eğrisini çizmek için bilgisayara aktarılmıştır. Karışım numunesinin basınç dayanımı, üç adet test sonucunun ortalaması alınarak TS EN 1015-11[32] standardı esaslarına göre tespit edilmiştir. Deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen test sayesinde numunelerin basınç etkisi altındaki dayanımlarının yanı sıra elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları aracılığı ile basınç modülü, basınç tokluğu, pik – öncesi basınç tokluğu ve pik – sonrası basınç tokluğu özellikleri de 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri için ayrıca saptanabilmiştir.

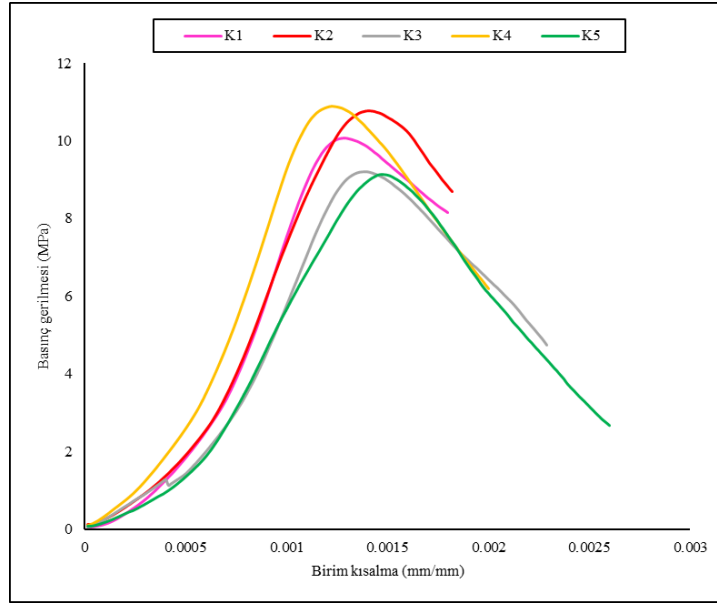
Basınç dayanımı testinden geriye kalan parçalar üzerinden cıva porozimetresi testi gerçekleştirilmiştir. Porozimetre testi 28 günlük numune parçalarına uygulanmış ve Micromeritics marka porozimetre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz 3,0 – 360,000 nanometre (nm) çap aralığındaki por çaplarını tespit edilebilmektedir. Cıva porozimetresi analizi aracılığı numunelerde porozite, ortalama por çapı, kümülatif por hacmi – por çapı ilişkileri ve spesifik çap aralıklarındaki por içeriği dağılımları saptanmıştır.

Cıva porozimetresi analizine benzer şekilde 28 günlük basınç testinden geriye kalan numune parçaları üzerinden harç numunelerinin mikro yapı özelliklerinin tespiti amacıyla SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Basınç testi sonrasında oluşan kırılma yüzeyi üzerinden hassas olarak alınan toz halindeki numune parçaları mikro yapı analizi için kullanılmıştır. SEM analizleri LEO 1430 VP model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

III.BULGULAR VE TARTIŞMALAR

A. Basınç Dayanımı Test Sonuçları

1) 2 Günlük Numunelerde Basınç Dayanımı: Harç numunelerinde 2 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından basınç dayanımları 9.14 – 10.89 MPa aralığında tespit edilmiştir. Numuneler için elde edilen basınç gerilmesi – birim kısalma ilişkisi Şekil 1' de görülmektedir.

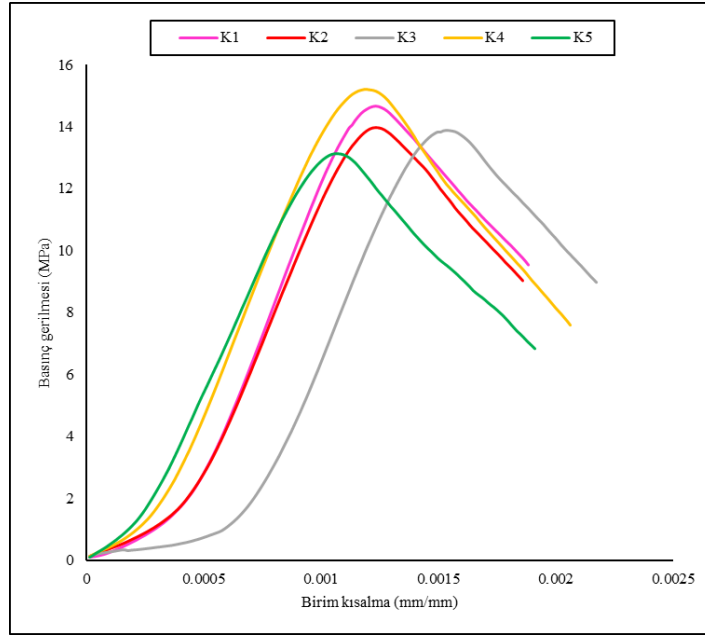


Şekil 1. 2 günlük numunelerde gerilme – birim kısalma ilişkisi.

Aerojel katkısı içermeyen kontrol numunesinde 2 günlük kür süresi sonunda 10.08 MPa'lık basınç dayanımı tespit edilmiştir. Eşit aktivatör dozajında, karışımlara ilave edilen %0.25 ve %0.50 katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı nedeniyle K2 ve K4 numunelerinde kontrol numunesine sırasıyla %6.74 ve %8.03 düzeylerinde dayanım artışları tespit edilmiştir. Öte yandan; eşit aerojel katkı oranlarında artan aktivatör dozajı basınç dayanımlarında kısmi oranda düşümlere sebep olmaktadır. Karışımlarda %0.1'den %0.2'e çıkan aktivatör dozajı nedeniyle K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %14.4 ve K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %16.06 düzeylerinde düşüşler saptanmıştır.

Harç karışımlarına eşit aktivatör dozajında ilave edilen düşük düzeydeki aerojel katkısı, hidrasyonun ilk 2 günlük periyodu sonunda numunelerin dayanım özelliklerinin yanı sıra basınç etkisi altındaki deformasyon kapasitelerine de olumlu yönde etki etmiştir. K1 numunesine kıyasla K4 numunesinde kırılma anında %11.76 seviyesinde daha yüksek deformasyon yeteneği gözlemlenmiştir. K2 numunesinde de K1 numunesi ile eşit düzeyde deformasyon kapasitesi saptanmıştır. Bu noktada; %0.25 katkı oranındaki aerojel içeriğinin dayanım artışına olanak sağlarken deformasyon davranışını değiştirmedeği ancak artan aerojel içeriğinin kırılma anındaki deformasyon kapasitesine dayanıma sunduğu katkıdan daha da fazlasını sunabildiği söylenebilir. Bununla birlikte; eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının 2 günlük kür süresi sonunda numunelerin deformasyon davranışını son derece olumlu etkilediği görülmektedir. Artan aktivatör dozajı sebebiyle kırılma anında, K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %29.41 ve K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %36.84 düzeylerinde daha yüksek deformasyon kapasiteleri tespit edilmiştir. Özellikle K5 numunesi için tespit edilen deformasyon kapasitesindeki artış kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında saptanan %52.94 düzeyindeki deformasyon kapasite gelişimi oldukça değerlidir. 2 günlük kür süresi için tespit edilen sonuçlar, eşit aerojel katkı oranlarında artan aktivatör dozajının numunelerin dayanım değerlerine kıyasla deformasyon kapasitelerine katkı sağladığını işaret etmektedir.

2) 7 günlük numunelerde basınç dayanımı: Şekil 2 'de 7 günlük numunelere ait basınç gerilmesi – birim deformasyon ilişkisi görülmektedir. Numunelerin basınç dayanımları 13.11 – 15.2 MPa aralığında saptanmıştır.

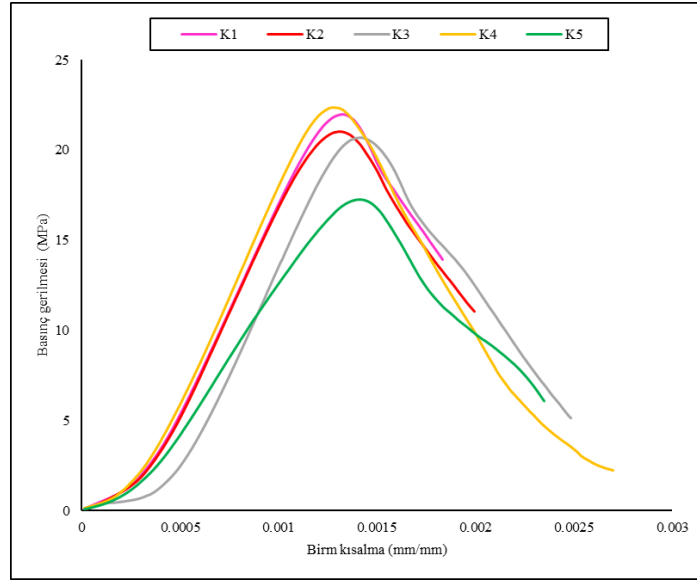


Şekil 2. 7 günlük numunelerde gerilme – birim kısalma ilişkisi.

7 günlük kür süresinin tamamlanması ile K1 kontrol numunesinde 14.65 MPa'lık basınç dayanımı tespit edilmiştir. Karışımlara ilave edilen düşük katkı oranındaki silika aerojel içeriği %0.25 ve %0.50 katkı oranları için dayanım değerleri üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır. K1 numunesine kıyasla K2 numunesinde %4.57 değerinde dayanım düşüşü saptanırken K4 numunesinde ise %3.74 düzeyinde dayanım artışı saptanmıştır. Sonuçlar, 2 günlük kür süresinden farklı olarak %0.25 düzeyindeki aerojel içeriğinin kısmi oranda dayanım düşüşüne sebep olduğunu ancak %0.50 oranındaki aerojel içeriğinin ise 2 günlük kür süresinde olduğu gibi kısmi düzeyde dayanım artışına olanak sağladığını işaret etmektedir. Bununla birlikte eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı numunelerin dayanım değerlerinde kısmi düzeyde düşümlere neden olmaktadır. Tespit edilen düşümler K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %0.78 düzeyinde iken K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %13.75 seviyesindedir. Artan aktivatör dozajı düşük aerojel katkı oranında sınırlı seviyede dayanım düşüşünü işaret ederken daha yüksek aerojel içeriğinde dayanım farkı artmaktadır.

2 günlük kür süresine benzer şekilde eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel içeriği, %0.25 katkı oranı için K1 ve K2 numunelerinin deformasyon yetenekleri arasında bir değişim yaratmamaktadır. Ancak %0.25' den %0.50'e çıkan aerojel içeriği, K1 numunesine kıyasla K4 numunesinde kırılma anı için %11.11 düzeyinde daha yüksek deformasyon kapasitesini işaret etmektedir. Bununla birlikte; K3 numunesinde K2 numunesine kıyasla %0.78 düzeyinde dayanım düşüşü tespit edilmesine rağmen K3 numunesinde eşit aktivatör dozajında artan aktivatör dozajı sebebiyle deformasyon kapasitesi %16.66 seviyesinde gelişmektedir. %0.50 aerojel katkı oranında ise artan aktivatör dozajı dayanım değerlerinde olduğu gibi deformasyon kapasitesinde de düşüme yol açmaktadır. Bu noktada elde edilen sonuçlar, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının dayanım değerlerinden çok deformasyon davranışı üzerinde etkili olduğunu işaret etmektedir. 7 günlük kür süresi için mekanik özellikler üzerinde saptanan olumlu etkiler, düşük aerojel katkı oranı (%0.25) – yüksek aktivatör dozajı (%0.2) ve yüksek aerojel katkı oranı (%0.50) – düşük aktivatör dozajı (%0.1) optimizasyonları ile özetlenebilir.

3) 28 günlük numunelerde basınç dayanımı: Harç numunelerinde 28 günlük kür süresinin tamamlanması ile basınç dayanımları 17.26 – 22.34 MPa aralığında tespit edilmiştir. Şekil 3' de numunelerin gerilme – birim şekil değiştirme ilişkileri görülmektedir.



Şekil 3. 28 günlük numunelerde gerilme – birim kısalma ilişkisi.

Kalsiyum – silikat esaslı blok elemanları için yönetmelikler genellikle minimum 5 MPa basınç dayanımını talep edilmektedir [33]. Bu noktada elde edilen basınç dayanımlarının tamamı blok eleman üretimi için standartlardaki minimum dayanım kriterlerini karşılamaktadır. 28 günlük kontrol numunesinde 21.98 MPa'lık basınç dayanımı tespit edilmiştir. Karışımlara ilave edilen aerojel ve aktivatör içerikleri incelendiğinde 7 günlük kür süresi sonunda maksimum mekanik performans için önerilen düşük aerojel katkı oranı – yüksek aktivatör dozajı ve yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajı optimizasyonlarının 28 günlük kür süresi sonunda da geçerli olduğu görülmektedir. Eşit aktivatör dozajı altında karışımlara ilave edilen %0.25 ve %0.50 katkı oranlarındaki silika aerojel içeriği sırasıyla K1 numunesine kıyasla K2 numunesinde %4.37'lik dayanım düşüşüne neden olurken K4 numunesinde ise %1.64'lük dayanım artışına olanak sağlamaktadır. Bu noktada eşit aktivatör dozajında artan aerojel katkısı ile elde edilen sonuçlar 7 günlük sonuçlar ile uyumludur. Benzer şekilde, yüksek aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde %22.73'lük ciddi düzeyde düşüşe sebep olurken düşük aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı K2 ve K3 numunelerinde benzer dayanımlara olanak sağlamaktadır. 28 günlük kür süresi saptanan dayanım sonuçları, kontrol numunesine kıyasla daha yüksek dayanımın sadece eşit aktivatör dozajında %0.50 aerojel katkı oranında elde edilebilmesi, artan aktivatör dozajının yüksek aerojel katkı oranında ciddi dayanım düşüşüne sebep olması açısından 7 günlük sonuçlar ile tam benzerlik göstermektedir.

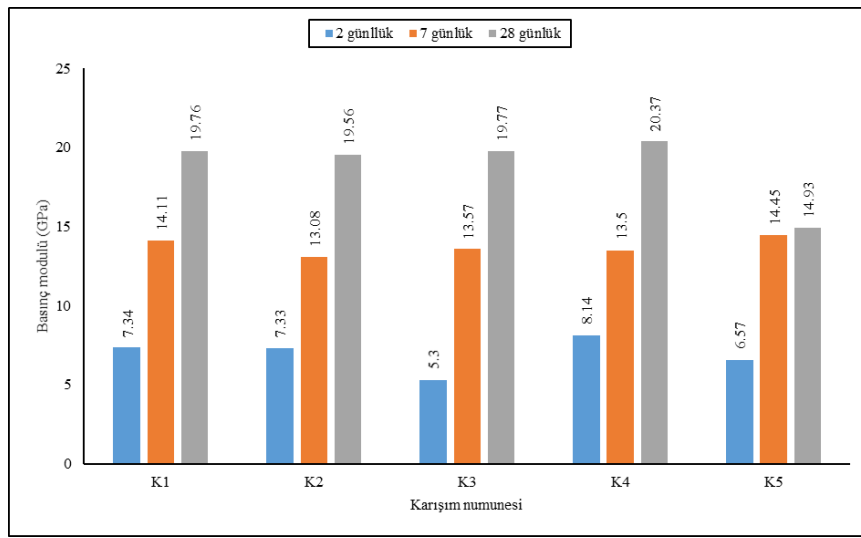
Numunelerin deformasyon davranışları incelendiğinde ise tüm numunelerde kontrol numunesine kıyasla kırılma anında daha yüksek deformasyon kapasiteleri saptanmıştır. Eşit aktivatör dozajı altında artana aerojel içeriği ile K1 numunesine kıyasla K2 ve K4 numunelerinde saptanan deformasyon kapasitesi gelişimi sırasıyla %5.55 ve %50 seviyelerindedir. Tespit edilen sonuçlar %0.25 aerojel katkı oranında kontrol numunesine kıyasla hiçbir kür süresi için daha düşük deformasyon yeteneğinin oluşmadığını ve ciddi düzeydeki deformasyon kapasite artışının hidrasyonun 7 ve 28 günlük periyotları arasında yaşandığını göstermektedir. Benzer şekilde, %0.50 aerojel katkı oranında kontrol numunesine kıyasla tüm kür süreleri için daima daha yüksek deformasyon yetenekleri saptanmıştır. Sonuçlar, alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçlarında artan aktivatör dozajının olumlu etkisinin dayanım özelliklerine kıyasla deformasyon davranışını üzerinde daha etkili olduğunu vurgulamaktadır. Hidrasyonun 7. günü sonunda daha yüksek mekanik performansı işaret eden düşük aerojel katkı oranı – yüksek aktivatör dozajı ve yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajı optimizasyonlarının hidrasyonun 28. günü itibarıyla kalıcı hale geldiği gözlemlenmiştir.

B. Basınç Modülü

Basınç modülleri, numunelerde lineer – elastik davranışın en net olarak gözlemlendiği maksimum gerilmenin % 10 – 40’ı aralığındaki gerilme- deformasyon bölgesi üzerinden aşağıda görülen eşitlik aracılığı ile hesaplanmıştır.

$$E = \Delta\sigma_{40-10} / \Delta\varepsilon_{40-10} \quad (1)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikte “E” basınç modülünü, “ $\Delta\sigma_{40-10}$ ” ve “ $\Delta\varepsilon_{40-10}$ ” değerleri ise basınç modülü için hesaplamanın yapıldığı sırasıyla gerilme ve birim kısalma aralıklarını göstermektedir. Şekil 4’ de saptanan basınç modülleri görülmektedir.



Şekil 4. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde saptanan basınç modülleri.

2 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesinde 7.34 GPa’lık basınç modülü tespit edilmiştir. Karışımlara ilave edilen %0.25 katkı oranındaki aerojel içeriği, dayanım sonuçlarında tartışıldığı gibi 2 günlük kür süresi sonunda birim deformasyon davranışı üzerindeki nötr etkisi sebebiyle K2 numunesinde de 7.33 GPa’lık eşit kabul edilebilecek modül saptanmıştır. Eşit aktivatör dozajında artan aerojel katkısı ise K1 numunesine kıyasla K4 numunesinde %10.89’luk modül artışına olanak sağlamaktadır. Eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının numunelerin deformasyon yeteneklerini artırması neticesinde K2 numunesine kıyasla K3 ve K4 numunesine kıyasla K5 numunelerinde daha düşük modüller tespit edilmiştir.

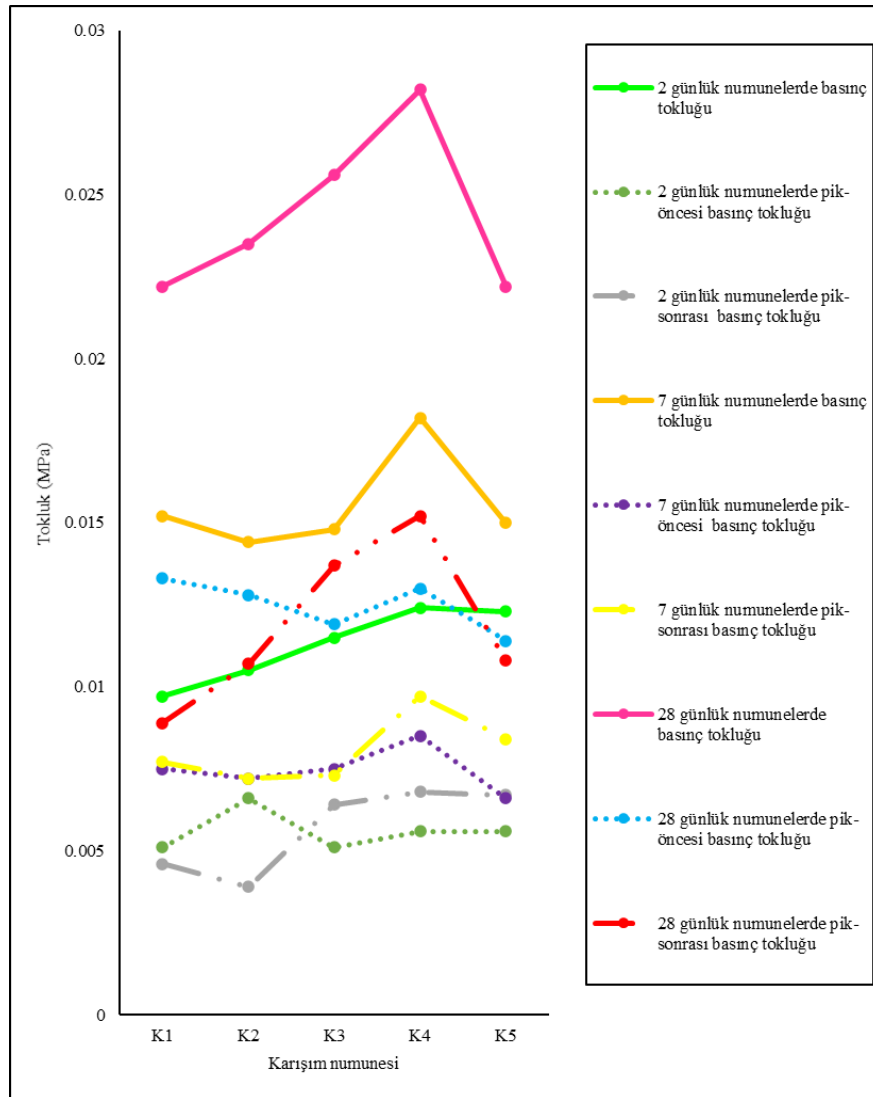
7 günlük numunelerde saptanan modül davranışı incelendiğinde, eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel içeriği daha düşük basınç modüllerine yol açmaktadır. Bununla birlikte eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı modül artışına neden olmaktadır. Özellikle %0.50 aerojel katkı oranında aktivatör dozajına olan hassasiyet artmakta ve maksimum basınç modülü kontrol numunesinin de üzerine çıkarak yüksek aerojel katkı oranı ve yüksek aktivatör dozajında tespit edilmektedir.

Atis ve Karahan [34] deneysel çalışmalarında uçucu kül harçlarında elastisite modülü üzerindeki değişimlerin dayanımdaki değişimlere kıyasla daha sınırlı seviyede olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak elde saptanan elastisite modüllerinin değişimi yukarıdaki tespit ile uyumludur. Hidratasyonun 28. günü itibariyle numunelerde saptanan basınç modülleri özellikle %0.25 aerojel katkı oranında birbirine yakındır. K2 ve K3 numunelerinde K1 kontrol numunesine kıyasla 19.56 – 19.77 GPa aralığında benzer modüller saptanmıştır. Eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen %0.50 katkı oranındaki aerojel içeriği ise basınç modülünün K4 numunesinde kontrol numunesinin üzerinde saptanmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte % 0.50 aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ciddi düzeyde modül düşüşüne sebep olmakta ve hidratasyonun 7 ve 28 inci

günleri arasındaki süreçte K5 numunesi için modül artışı stabil hala gelmektedir. K4 numunesine kıyasla K5 numunesinde kısmi oranda azalan deformasyon yeteneğine karşın ciddi düzeyde azalan dayanım özellikleri de bu duruma yol açmaktadır. Saptanan basınç modülleri, mekanik performans açısından önerilebilecek düşük aerojel katkı oranı – yüksek aktivatör dozajı ve yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajı optimizasyonları ile uyumludur.

C. Basınç Tokluğu

2, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda saptanan basınç gerilmesi – birim deformasyon grafikleri aracılığıyla harç numunelerinin tokluk özellikleri basınç tokluğu, pik-öncesi basınç tokluğu ve pik-sonrası basınç tokluğu olmak üzere üç farklı periyottaki tokluk davranışı için ayrı ayrı saptanmıştır. Basınç tokluğu, gerilme – birim deformasyon grafiğinin altında kalan tüm alanın dikkate alınması ile hesaplanmıştır. Pik – öncesi ve pik – sonrası basınç toklukları ise sırasıyla başlangıç gerilmesi – maksimum gerilme ve maksimum gerilme – kırılma arasındaki gerilme bölgelerinin altında kalan alanlar aracılığı saptanmıştır. Numunelerin tokluk kapasiteleri Şekil 5’ de sunulmuştur.



Şekil 5. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde saptanan tokluk kapasiteleri.

2 günlük kür süresi sonunda, kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde daha yüksek tokluk kapasiteleri saptanmıştır. K1 numunesine kıyasla eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel içeriği ile K2 ve K4 numunelerinde sırasıyla %8.24 ve %27.83 düzeylerinde tokluk artışları tespit edilmiştir. Özellikle %0.25'ten %0.50'e çıkan yüksek aerojel içeriğinde basınç tokluğu %18.09 düzeyinde gelişmektedir. Eşit aerojel içeriğinde artan aktivatör dozajı da düşük aerojel katkı oranında daha yüksek düzeyde tokluk gelişimine olanak sağlamaktadır. K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde artan aktivatör dozajı sayesinde %9.52 düzeyinde tokluk gelişimi saptanmıştır. 2 günlük basınç dayanımlarında tartışıldığı üzere; bu noktada artan aktivatör dozajı dayanım gelişmesine olanak sağlamıyorken esas fonksiyonu artan deformasyon kapasitesi aracılığı ile tokluk davranışı üzerinedir. Öte yandan, değişen aerojel katkı oranı ve aktivatör dozajının basınç tokluğu üzerindeki en önemli etkilerinden biri numunelerin maksimum basınç gerilmesi ile kırılma anı arasındaki süreçte gösterdikleri pik-sonrası tokluk davranışı üzerinedir. K1 kontrol numunesine kıyasla K3, K4 ve K5 numunelerinde sırasıyla %39.13, %47.82 ve %45.65 düzeylerinde pik-sonrası tokluk artışı saptanmıştır.

7 günlük kür süresi sonunda, hidrasyonun 2 ve 7 günlük periyotları arasındaki sürede aerojel katkılı numunelerde tespit edilen kısmi dayanım düşüşleri tokluk davranışı üzerindeki gelişimin de yavaşladığını işaret etmektedir. Bu sebeple, 2 günlük sonuçlardan farklı olarak K2, K3 ve K5 numunelerinde K1 numunesinden sırasıyla %5.26, %2.63 ve %1.31 düzeylerinde daha düşük tokluk kapasiteleri saptanmıştır. Ancak K4 numunesinde, 2 günlük kür süresinde olduğu gibi, K1 numunesinden daha yüksek düzeyde tokluk davranışı görülmektedir. Yüksek aerojel katkı oranı – düşük aktivatör dozajında elde edilen bu davranış, K1 numunesine kıyasla %19.73'lük tokluk iyileşmesini işaret etmektedir. Numunelerin pik – sonrası tokluk kapasiteleri incelendiğinde ise özellikle %0.50 aerojel katkı oranında davranışın oldukça geliştiği görülmektedir. K1 numunesine kıyasla K4 ve K5 numunelerinin pik-sonrası tokluk kapasiteleri sırasıyla %25.97 ve %9.09 düzeylerinde daha yüksektir.

28 günlük numunelerde saptanan basınç tokluğu ve pik-sonrası basınç tokluğu davranışı, alkali-aktifte edilmiş uçucu kül harçlarındaki değişen aerojel içeriği ve aktivatör dozajının önemini net olarak ortaya koymaktadır. Kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde daha yüksek tokluk ve pik – sonrası tokluk kapasiteleri saptanmıştır. Ancak, kapasite değişimi düşük dozajdaki aerojel ve aktivatör içeriğine kıyasla oldukça hassas tepki vermektedir. Eşit aktivatör dozajında karışımlara ilave edilen aerojel katkısı K1 numunesine kıyasla K2 ve K4 numunelerinde sırasıyla %5.85 ve %27.02 düzeylerinde basınç tokluk artışlarına olanak sağlamaktadır. K4 numunesinin, %0.50 aerojel katkı oranı ve düşük aktivatör dozajı ile tüm kür sürelerinde istikrarlı olarak kontrol numunesinden daha yüksek basınç tokluk kapasitesi sergilemesi oldukça dikkat çekicidir. Öte yandan; eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı sadece düşük aerojel katkı oranında tokluk kazancına yol açmaktadır. Bu sebeple K2 numunesine kıyasla K3 numunesinde %8.93 düzeyinde daha yüksek tokluk kapasitesi saptanabilmektedir. Optimum aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajının C – S – H bağ oluşumunu artırma yeteneğinin mekanik özellikleri geliştirmesi beklenen bir durumdur [4]. Yüksek aerojel katkı oranında ise artan aktivatör dozajı, K4 numunesinde tespit edilen kazancı ortadan kaldırarak K1 ve K5 numunelerinde yaklaşık olarak benzer tokluk değerlerine neden olmaktadır.

Basınç tokluk kapasitelerinde, %27 gibi ciddi düzeylerde tokluk kazancı tespit edilmesine rağmen esas mekanik performansın arttığı nokta pik-sonrası basınç tokluğu davranışı ile alakalıdır. K1 numunesine kıyasla K2, K3, K4 ve K5 numunelerinde sırasıyla %20.22, %53.92, %70.78 ve %21.34 düzeylerinde pik-sonrası kapasite artışı kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar, tokluk kazançlarında tespit edilen artışların 3 katından daha fazlasının pik-sonrası basınç tokluğunda tespit edildiğini işaret etmektedir. Kontrol numunesi ile eşit düzeyde basınç tokluğu kapasitesine sahip olan K5 numunesinin %21.34 düzeyinde daha yüksek pik-sonrası tokluk performansı göstermesi dikkat çekicidir.

D. Cıva Porozimetresi Deneyi

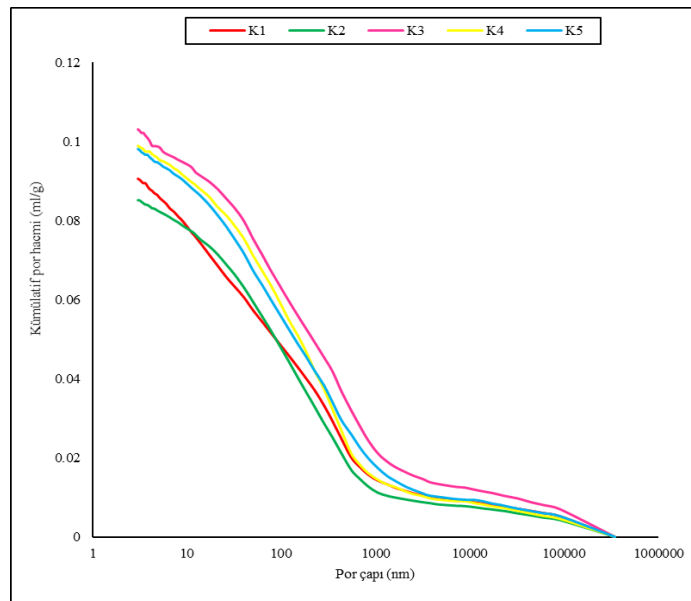
Cıva porozimetresi analizi ile çimento esaslı malzemelerde por yapısı özellikleri geniş bir perspektifte ortaya çıkarılabilmektedir. Analizden elde edilen kümülatif por hacmi – por çapı ilişkileri, spesifik por çapı aralığındaki değişimlerin incelenmesine de olanak tanımaktadır [35]. 28 günlük harç numunelerine uygulanan cıva porozimetresi deneyi sonucunda elde edilen por yapısı parametreleri aşağıda Tablo 5' de görülmektedir.

Tablo 5. Cıva porozimetresi deney sonuçları.

Karışım numunesi	Porozite (%)	Alansal-ortalama por çapı (nm)
K1	18.87	7.1
K2	17.58	8.7
K3	20.51	6
K4	19.79	8.4
K5	19.7	8.2

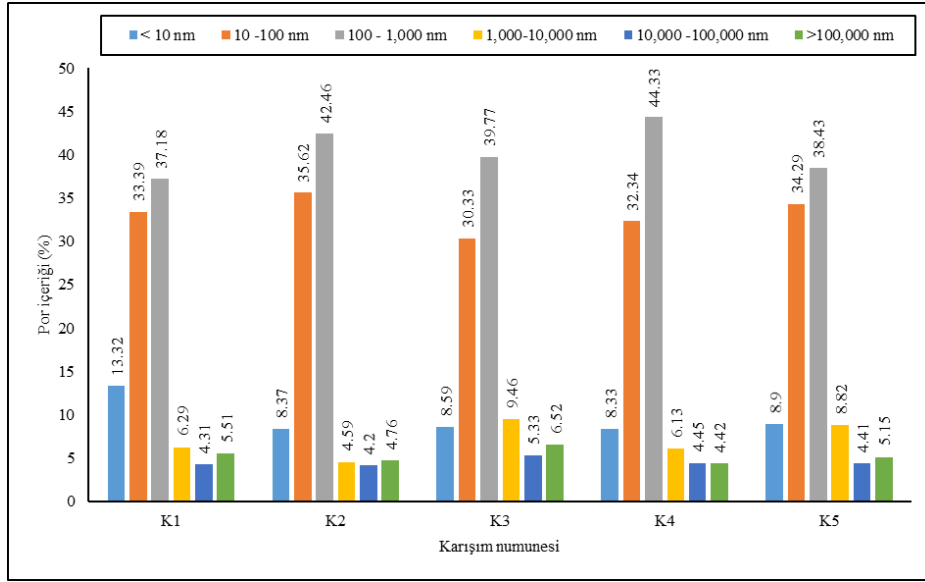
Nano-boyuttaki malzemelerin çimento matrisine dahil edilmesi, numunelerin por yapılarında cıva porozimetresi analizi ile tespit edilebilecek düzeyde belirgin değişiklikler yaratabilmektedir [36]. Kontrol numunesi K1' de %18.87'lik toplam porozite değeri tespit edilmiştir. Karışımlara eşit aktivatör dozajında ilave edilen aerojel katkısı K2 numunesinde toplam porozite değerini düşürücü etki yaratırken K4 numunesinde ise artan aerojel içeriği ile porozite artışı saptanmıştır. Öte yandan eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ise %0.25 aerojel katkı oranında porozite artışına neden olurken %0.50 aerojel katkı oranında porozite düşürücü rol oynamaktadır. Bu noktada saptanan sonuçlar %0.25 ve %0.50 aerojel katkı oranlarında değişen aerojel ve aktivatör dozajlarının numunelerde farklı eğilimde değişebilen toplam porozite değerlerinin tespit edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Numunelerin por yapısı özellikleri ortalama por çapları açısından incelendiğinde ise daha keskin saptamalar ortaya çıkmaktadır. Karışımlara eşit aktivatör dozajında ilave edilen aerojel katkısı gerek K2 gerekse K4 numunelerinde ortalama por çaplarını genişletici bir etki yaratmaktadır. Silika aerojel partikülleri çimento matrisine dahil edildiği zaman partiküllerin matriste konumlandıkları bölgelerin etrafında zayıf adhezyondan dolayı boşlukların oluşması beklenen bir durumdur [30]. Bu sebeple K1 numunesine kıyasla K2 ve K4 numunelerinin alansal-ortalama por çaplarında sırasıyla %22.53 ve %18.3 düzeylerinde artışlar saptanmıştır. Bu durum, silika aerojel katkısı ile por çaplarının artan por hacmi sebebiyle genişleyebileceğini ortaya koyması açısından oldukça makuldür. Benzer şekilde, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ortalama por çaplarını tekrardan daraltan bir etki yaratmaktadır. Bağlayıcı malzeme içeriğinde bulunan uçucu külün artan aktivatör dozajı ile hidrolik aktivitesi artmakta ve düşük dozdaki aktivatör içeriğine kıyasla artan aktivatör dozajı ile ilave C-S-H bağı oluşmaktadır. Bu sebeple, eşit aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı ile tespit edilen ortalama por çaplarındaki düşüş de oldukça makuldür. Burada elde edilen sonuçlar, geleneksel toplam porozite anlayışı ile por yapısı özelliklerinin değerlendirilmesinin yetersiz kaldığını ve ortalama por çapları ile daha sağlıklı değerlendirmelerin yapılabileceğini ortaya koymaktadır.



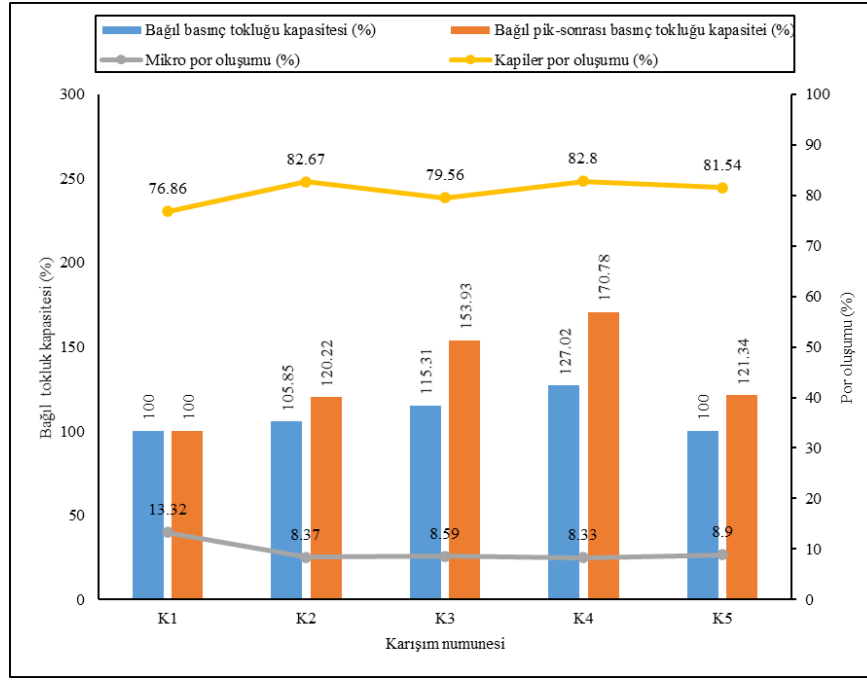
Şekil 6. Harç numunelerinde kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi.

Şekil 6’ da numunelere ait kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi görülmektedir. Birbirine çok yakın toplam porozite (%19.79 ve %19.7) ve alansal-ortalama por çaplarının (8.4 ve 8.2 nm) tespit edildiği %0.50 aerojel katkılı K4 ve K5 numuneleri tüm por çapı aralıkları boyunca birbirine oldukça yakın davranış sergilemektedir. Ancak düşük katkı oranında eşit aerojel içerikli K2 ve K3 numunelerinde gözlemlenen davranış K4 ve K5 numunelerindeki kadar birbirine yakın değildir. Bu durum, numunelerin ölçüm aralığı boyunca birbirine uzak olduğu kabul edilebilecek toplam porozite değerleri (%17.58 ve %20.51) ve alansal-ortalama por çapları (8.7 ve 6.0 nm) ile uyusmaktadır. K3 numunesi maksimum düzeyde tespit edilen toplam porozite değeri ile uyumlu olarak tüm por çap aralıkları boyunca grafiğin en üstünde kalacak şekilde en yüksek por hacmini sergilemektedir. K2 numunesi ise toplam porozite değerinin en yakın olduğu K1 kontrol numunesi ile 3-360,000 nm’ lik por çapı ölçüm aralığında spesifik por çapı aralıkları için kısmen daha düşük veya daha yüksek olacak şekilde geçişken por hacmi sergilemektedir. Bu noktada, detaylı bir değerlendirme için tüm numunelerde spesifik por çapı aralıklarındaki por hacimlerini esas alan por içeriklerinin dağılımının tespit edilmesi önem arz etmektedir.



Şekil 7. Harç numunelerinde por içeriklerinin dağılımı.

Şekil 7 ‘de mikro (<10 nm), kapiler (10-10,000 nm) ve makro (>10,000 nm) boyuttaki por içeriklerinin harç numunelerinin por yapısı içerisindeki dağılımı görülmektedir. Numunelerdeki por içeriklerinin dağılımı incelendiğinde, K1 kontrol numunesinde tespit edilen por içerikleri sırasıyla yaklaşık olarak %13 – %77 – %10 düzeninde mikro-kapiler -makro boyutta boşluklar içeren bir por yapısını işaret etmektedir. Bu düzendeki harç por yapısına dahil edilen silika aerojel katkısı, en belirgin değişikliği mikro düzeydeki çaplarda yaratmaktadır. Aerojel içermeyen K1 kontrol numunesinde %13.32 düzeyinde mikro çap oluşumu tespit edilirken aerojel içeren tüm numunelerde söz konusu çap oluşumu %9 seviyesinin altındadır. Bu durum karışımlarda partikül düzeyinde ortalama por hacmi 8-10 nm olan silika aerojelin kullanılması nedeniyle oldukça mantıklı gözükmektedir. Bir diğer önemli husus da aerojel içerikli numunelerde kontrol numunesine kıyasla azalan mikro por hacminin hangi yönde değişikliğe uğradığı noktasıdır. Kontrol numunesinde %76.86 düzeyinde tespit edilen kapiler por oluşumu, aerojel içeren numunelerde %79.56 – 82.8 aralığında saptanmıştır. Aerojel içeren tüm numunelerde özellikle 100 – 1,000 nm aralığındaki por oluşumu kontrol numunesinde tespit edilenin üzerinde seyretmektedir. Artan aktivatör dozajı, ilave bağ oluşumu ile bu por çapı aralığındaki por oluşumunu sınırlasa da yine de K3 ve K5 numunelerinde K1 numunesinde ölçülen düzeyin üzerinde por oluşumu saptanmaktadır. Özetle elde edilen por yapısı sonuçları, alkali-aktive edilmiş uçucu kül harçlarında karışımlara düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojelin numunelerin por yapısında mikro por oluşumunu azaltıcı ve kapiler por oluşumunu artırıcı yönde değişiklikler yarattığını göstermektedir.

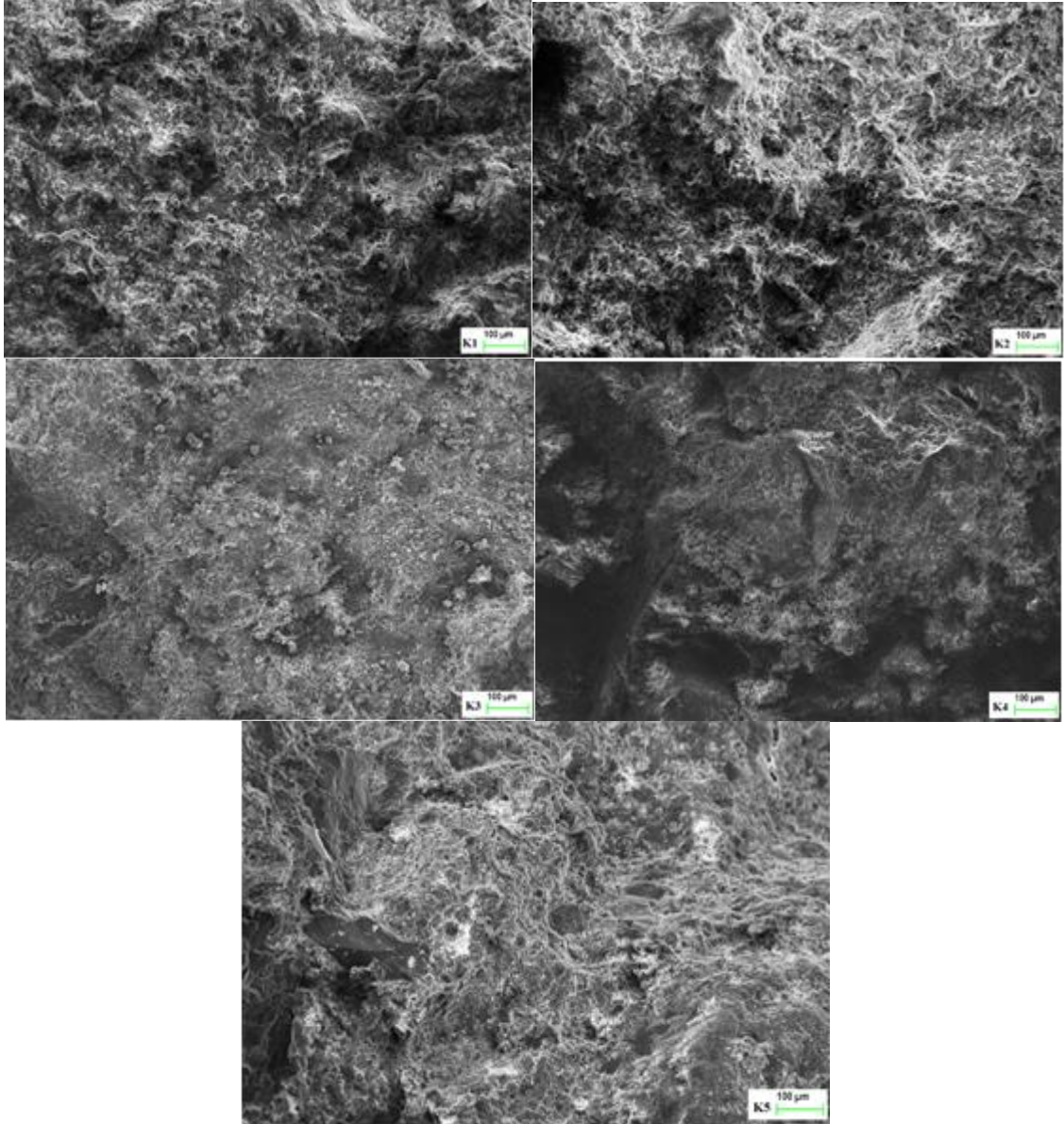


Şekil 8. Harç numunelerinde basınç tokluğu – por içerikleri ilişkisi.

Şekil 8' de 28 günlük harç numunelerinde saptanan basınç tokluğu kapasiteleri ile numunelerdeki por yapısı özellikleri arasındaki ilişki görülmektedir. Grafikte K1 kontrol numunesinde saptanan basınç tokluğu ve pik – sonrası basınç tokluğu kapasiteleri %100 olarak kabul edilmiş ve değişen aerojel katkı oranı ve aktivatör dozajına bağlı olarak K2, K3, K4 ve K5 numunelerinin tokluk kapasiteleri K1 numunesine kıyasla bağlı olarak ifade edilmiştir. Basınç dayanımı test sonuçlarında tartışıldığı üzere, 28 günlük kür süresi sonunda yaklaşık 20 MPa basınç dayanımına sahip alkali- aktive edilmiş cüruf harçlarında, karışımlara düşük katkı oranları ve dozajlarda ilave edilen silika aerojel ve aktivatör esasen etkisini dayanım değerlerinde değil, kırılma anındaki deformasyon kapasiteleri ve tokluk özellikleri üzerine göstermektedir. Karışımlara çimento ağırlığınca dahil edilen aerojel ve aktivatör içerikleri, düşük aerojel katkılı (%0.25) ve yüksek aktivatör dozajlı (%0.2) harç numuneleri ile yüksek aerojel katkılı (%0.50) ve düşük aktivatör dozajlı (%0.1) numuneler için basınç tokluğu esaslı mekanik özellikleri maksimum verimlilikte geliştirmektedir. Elde edilen basınç tokluğu kazanımları numunelerin por yapısındaki değişen mikro ve kapiler düzeydeki geçişkenlik ile yakından alakalıdır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar Lee vd. [37] saptadığı sonuçlar ile uyumludur. Çimento esaslı malzemelerin por yapısında 5 – 10 nm por çapı aralığındaki düşüş alüminosilikat kökenli C–S–H bağ yapısını arttırmakta ve daha yüksek mekanik özelliklerin tespitine yol açabilmektedir. Öte yandan, basınç tokluğu açısından hiçbir değişikliğin saptanmadığı K5 numunesinde dahi düşük dozajdaki aerojel ve aktivatör içerikleri sayesinde pik – sonrası basınç tokluğu davranışı %20'nin üzerindeki bir seviyede gelişebilmektedir. Sonuçlar, ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip alkali – aktive edilmiş uçucu kül harçları için numunelerin basınç etkisi altındaki süneklik özelliklerinin silika aerojel katkısı ile ciddi düzeyde geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Silika aerojel katkısı sayesinde gelişen pik – sonrası basınç tokluğu özellikleri, numunelerin dayanım zorlamasına ulaştığı andan kırılma anına kadar geçen süredeki davranışı iyileştirmektedir. Geçişken mikro – kapiler düzeydeki por yapısı, kalsiyum – silikat yapısında zorlanan liflerin daha az zorlanan liflere gerilme aktarılabilir özelliğini geliştirerek tokluk özelliklerini desteklemektedir.

E. SEM Analizi

Şekil 9' da 28 günlük numune parçalarının basınç dayanımı testinde kırılma yüzeylerinden elde edilen mikro yapı görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 9. Harç numunelerinin SEM görüntüleri.

Harç numunelerine ait mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, tüm numunelerde bağlayıcı malzeme içeriğinde %50 düzeyinde kullanılan uçucu kül içeriği nedeniyle küresel formda taneciklerin yer aldığı görülmektedir. Uçucu kül tanecikleri, hızla soğuma neticesinde diğer atık türü bağlayıcı partiküllerinden farklı olarak küresel formda oluşmaktadırlar [21]. Maksimum düzeyde küresel mikro yapı görüntüsü, diğer numunelere kıyasla K1 kontrol numunesinde görüntülenmiş olup artan aktivatör dozajının ve kısmen silika aerojel katkısının etkisiyle uygulanan alkali-aktivasyonun etkinliği morfolojik görüntü üzerine kısmen yansımıştır. Hidratasyon sürecinde, çimento matrisine dahil edilen silika arojellerin kimyasal reaksiyonlara inert yapıları nedeniyle

doğrudan dahil olmadıkları ancak matriste zayıf kenetlenmeleri sebebiyle por yapısını derinden etkileyebildikleri bilinmektedir [30]. Öte yandan, kalsiyum – silikat yapısının mikro yapı özellikleri ile por yapısı özellikleri arasında güçlü bir etkileşimin olduğu bilinen bir gerçektir [37]. Harç numunelerinde saptanan alansal-ortalama por çaplarının 6 – 8.4 nm aralığında olduğu dikkate alınırsa K1 numunesinde numunenin 7.1 nm' lik ortalama por çapına uygun sıklıkta bir çimento matrisi görülmektedir. K2 numunesinde ise K1 numunesine kıyasla artan ortalama por çapının izleri özellikle çapı 200,000 nm'e varan makro boşluk oluşumu ile görülmektedir. Porozimetre sonuçlarına göre, K3 numunesi tüm numuneler içinde 6 nm' lik ortalama por çapı ile en düşük ortalama por çapına sahip olan numunedir. Numunede tespit edilen por çapı bilgisine uygun olarak tüm numuneler arasındaki en sıkı çimento matrisi görüntüsü elde edilebilmiştir. K4 ve K5 numunelerinde ise ortalama por çapları ile uyumlu olarak K5 numunesinde K4'e kıyasla daha yoğun bir matris gözlemlenmektedir.

IV.SONUÇLAR

Bu çalışmada alkali-aktive edilmiş uçucu kül harç karışımlarına düşük katkı oranlarında ilave edilen silika aerojel katkısının ve aktivatör dozajının numunelerin mekanik, por yapısı ve mikro yapı özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir:

- Yaklaşık 20 MPa düzeyinde basınç dayanımına sahip uçucu kül harçlarında karışımlara çimento ağırlığınca düşük katkı oranlarında ilave edilen silika arojeller, harç por yapısında performans açısından mekanik özelliklere katkı sunabilen nitelikli hava boşlukları olarak katkı sunabilmektedirler.
- Kalsiyum – silikat yapısına ilave edilen silika arojeller, zorlanan kalsiyum-silikat liflerinin daha az zorlanan liflere gerilme aktarabilme özelliğini geliştirebilmektedir.
- Karışımlardaki silika aerojel içeriği ve artan aktivatör dozajı, numunelerin dayanım değerlerine kıyasla deformasyon davranışlarına etki etmektedir. Bu sebeple 28 günlük kür süresi sonunda %0.25 aerojel katkılı numunelerde kırılma anındaki deformasyonlar %50 seviyesinde artabilmektedir.
- Harç karışımlarına ilave edilen düşük katkı oranlarındaki silika aerojel katkısı sayesinde harç numunelerinin basınç etkisi altındaki tokluk kapasiteleri 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri için sırasıyla %29.4, %13.3 ve %27 seviyelerinde artabilmektedir.
- Silika aerojel içeriğinin numunelerin mekanik performansı üzerindeki baskın etkisi, basınç tokluğu özelliklerinden çok pik-sonrası basınç tokluğu davranışı ile alakalıdır. Bu sayede harç numunelerinde 2, 7 ve 28 günlük kür süreleri için sırasıyla %47.82, %26.97 ve %70.78 düzeylerinde pik-sonrası basınç tokluğu gelişimleri saptanmıştır.
- Silika aerojel katkısı harç por yapısındaki mikro çap düzeyini azaltarak kapiler çap oluşumunu arttırmaktadır. Tüm katkılı numunelerde %13 düzeyinden %9 seviyesinin altına inen mikro çap oluşumu tokluk gelişimine katkı sunmaktadır.
- Düşük aerojel katkı oranında artan aktivatör dozajı mekanik özellikleri geliştirirken yüksek aerojel katkı oranında düşük aktivatör dozajı optimum mekanik performans için tercih edilmelidir.

Son yıllarda kalsiyum – silikat esaslı yapı elemanlarının üretimine yönelik çabalar tüm endüstrilerde olduğu gibi malzeme alanında da sürdürülebilirlik politikalarını esas almaktadır. Uçucu kül harçları, kalsiyum – silikat yapısı ile olan adaptasyonları ve mevcut potansiyelleri göz önünde bulundurularak sıkça deneysel çalışmalarda konu edilmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, düşük miktardaki silika aerojel katkısının ortalama 20 MPa tasarım basınç dayanımına sahip alkali-aktive edilmiş uçucu kül harçlarının deformasyon yeteneklerini ciddi düzeyde arttırabildiğini işaret etmektedir. Silika arojeller aracılığı ile elde edilen tokluk kazancı, blok eleman üretimi için silika aerojel katkısını esas alan yenilikçi bir tasarım anlayışını teşvik edici niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1] Karahan, O. (2017). *Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature*, Construction and Building Materials, 152, 898–906.
- [2] .Hwang, C.-L., Huynh, T.-P. (2015). *Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks*, Construction and Building Materials, 93, 335–341.
- [3] Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A. E. M., Aboshama, A.Y. (2016). *Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete*, Construction and Building Materials, 124, 866–877.
- [4] Bostanci, L., Sola, O.C. (2018). *Mechanical properties and thermal conductivity of aerogel incorporated alkali-activated slag mortars*, Advances in Civil Engineering, 2018, 1 – 9.
- [5] Zuo, Y., Nedeljković, M., Ye, G. (2019). *Pore solution composition of alkali-activated slag/fly ash pastes*, Cement and Concrete Research, 115, 230–250.
- [6] Provis, J.L., Bernal, S.A., (2014). *Geopolymers and related alkali-activated materials*, Annual Review of Materials Research, 44, 299–327.
- [7] ASTM C618-01, (2001). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*. American Society for Testing and Materials.
- [8] Bankowski, P., Zou, L., Hodges, R. (2004). *Reduction of metal leaching in brown coal fly ash using geopolymers*, Journal of Hazardous Materials. 114, 59–67.
- [9] Antiohos, S.K., Tsimas, S. (2007). *A novel way to upgrade the coarse part of a high calcium fly ash for reuse into cement systems*, Waste Management, 27, 675–683.
- [10] Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., Wang, H. (2016). *Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications*, Journal of Cleaner Production, 125, 253–267.
- [11] Kaur, M., Singh, J., Kaur, M. (2018). *Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymers mortar: Role of nano-metakaolin*, Construction and Building Materials, 190, 672–679.
- [12] Akçaozoglular, S., Atis, C.D. (2011). *Effect of Granulated Blast Furnace Slag and fly ash addition on the strength properties of lightweight mortars containing waste PET aggregates*, Construction and Building Materials, 25, 4052–4058.
- [13] Karahan, O., Atis, C. D. (2011). *The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete*, Materials and Design, 32, 1044–1049.
- [14] Yerremala, A., Chandurdu, R., Desai, B. (2012). *Influence Of Fly Ash Replacement On Strength Properties Of Cement Mortar*, International Journal of Engineering Science and Technology, 4, 3657–3665.
- [15] 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.
- [16] Farina, I., Modano, M., Zuccaro, G., Goodall, R., Colangelo, F. (2018). *Improving flexural strength and toughness of geopolymer mortars through additively manufactured metallic rebars*, Composites Part B, 145, 155–161.
- [17] Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., Mesbah, H. A., Hossain, K. M. A. (2018). *Use of recycled glass powder to improve the performance properties of high volume fly ash-engineered cementitious composites*, Construction and Building Materials, 163, 53–62.

- [18] Guades, E.J. (2016). *Experimental investigation of the compressive and tensile strengths of geopolymers mortar: The effect of sand/fly ash (S/FA) ratio*, Construction and Building Materials, 127, 484–493.
- [19] Xu, F., Deng, X., Peng, C., Zhu, J., Chen, J. (2017). *Mix design and flexural toughness of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer composites*, Construction and Building Materials, 150, 179–189.
- [20] Morsy, M. S., Shoukry, H., Mokhtar, M. M., Ali, A. M., El-Khodary, S. A. (2018). *Facile production of nano-scale metakaolin: An investigation into its effect on compressive strength, pore structure and microstructural characteristics of mortar*, Construction and Building Materials, 172, 243–250.
- [21] X. Wu, M. Fan, J. F. Mclaughlin, X. Shen, G. Tan, A novel low-cost method of silica aerogel fabrication using fly ash and trona ore with ambient pressure drying technique, Powder Technology 323 (2018) 310–322.
- [22] Ibrahim, M., Biwole, P. H., Wurtz, E., Achard, P. (2014). *A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating*, Building and Environment, 81, 112-122.
- [23] Hanif, A., Diao, S., Lu, Z., Fan, T., Li, Z. (2016). *Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres – Mechanical and thermal insulating properties*, Construction and Building Materials, 116, 422–430.
- [24] 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.
- [25] Garrido, R., Silvestre, J. D., Flores-Colen, I. (2017). *Economic and Energy Life Cycle Assessment of aerogel-based thermal renders*, Journal of Cleaner Production, 151, 537-545.
- [26] Bostanci, L., Ustundag, O., Sola, O.C., Uysal, M. (2019). *Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties*, Gradevinar, 71, 651– 661.
- [27] Cuce, E., Cuce, P.M., Wood, C.J., Riffat, S.B. (2014). *Optimizing insulation thickness and analysing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings*, Construction and Building Materials, 77, 28–39.
- [28] Westgate, P., Paine, K., Ball, R. J. (2018). *Physical and mechanical properties of plasters incorporating aerogel granules and polypropylene monofilament fibres*, Construction and Building Materials, 158, 472–480.
- [29] Haranath, D. (1196). *Aerogel the lightest solid known*, Resonance, 64-68.
- [30] Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., Wallevik, Ó. H. (2015). *Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete*, Construction and Building Materials, 77, 307–316.
- [31] TS EN 196-1, (2016). *Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [32] TS EN 1015-11, (2000). *Kağır harcı- Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [33] TS EN 771-2, (2015). *Kâğır birimler- Özellikler- Bölüm 2: Kireç kumtaşı kâğır birimler*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [34] Atis, C. D., Karahan, O. (2009). *Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete*, Construction and Building Materials, 23, 392–399.

- [35] Zeng, Q.,Mao, T.,Li, H.,Peng, Y. ,(2018).*Thermally insulating lightweight cement-based composites incorporating glass beads and nano-silica aerogels for sustainably energy-saving buildings*, Energy & Buildings, 174, 97–110.
- [36] Oltulu, M.,Sahin, R. (2014).*Pore structure analysis of hardened cement mortars containing silica fume and different nano-powders*, Construction and Building Materials, 53, 658–664.
- [37] Lee, N.K.,Koh, K.T.,An, G.H.,Ryu, G.S. (2017).*Influence of binder composition on the gel structure in alkali activated fly ash/slag pastes exposed to elevated temperatures*, Ceramics International, 43, 2471–2480.