

Mineral Katkı İkamesinin Kalsiyum Alümina Çimentolu Harçların Taze Hal ve Zamana Bağlı Sertleşmiş Hal Özelliklerine Etkileri

Faruk EREN¹

Muhammer KESKİNATES²

Burak FELEKOĞLU³

Kamile TOSUN FELEKOĞLU⁴

ÖZ

Kalsiyum alüminat çimentoları (KAÇ) bir onarım malzemesinden beklenen; hızlı sertleşme, iyi yapışma, mevcut betonla uyumluluk, boyutsal kararlılık ve korozyon direnci gibi özellikleri sağlamaya aday bir alternatif bağlayıcıdır. Hidratasyon ürünleri arasında suda çözünür kireç olmaması da önemli bir avantaj olarak görülebilir. Ancak KAÇ'ın zaman içerisinde ortam koşullarına bağlı olarak faz yapısında meydana gelebilen dönüşüm reaksiyonları, bu çimento ile üretilen betonlarda dayanım kaybına neden olabilmektedir. Bu çalışmada KAÇ'ın hidratasyon sürecindeki dönüşüm reaksiyonlarından kaynaklanan problemlere çözüm sunmak, taze hal özelliklerini geliştirmek ve uzun dönemde dayanım gelişimini kararlı hale getirmek amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak, farklı mineral katkı kaynaklarının (SiO_2 ve CaSO_4), KAÇ ile birlikte kullanımının harç kıvamı, priz süresi ve reolojik özelliklere etkileri incelenmiştir. Sertleşmiş halde aşınma dayanıklılığı ve zamana bağlı basınç ve eğilme dayanımı gelişimleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, %16 SiO_2 katkılı ve %50 CaSO_4 katkılı KAÇ içeren harçların, taze hal özelliklerinde kullanım alanlarına uygun gelişmiş özellikler kazandırabildiği ve hidratasyon sürecinde kararlı ürünler elde ederek zamana bağlı bir mukavemet kaybına uğramadan, 400 günlük periyot sonunda dayanım gelişimi gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kalsiyum alüminat çimentosu, mineral katkı, taze hal özellikleri, reoloji, mekanik dayanım.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 5 Temmuz 2022 günü ulaşılmıştır. 14 Nisan 2023 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1288033>

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Programı, İzmir, Türkiye
farukeren.fe@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-4518-0669>

2 Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye
muhammerkeskinates@hotmail.com - <https://orcid.org/0000-0001-8334-3073>

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
burak.felekoglu@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7426-1698>

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
kamile.tosun@deu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-2191-7793>

ABSTRACT

Effects of Mineral Additive Substitution on the Fresh State and Time-Dependent Hardened State Properties of Calcium Alumina Cement Mortars

Calcium aluminate cements (CAC) are a candidate alternative binder to provide the requirements of a repair material such as accelerated hardening, good adhesion, compatibility with existing concrete, dimensional stability and corrosion resistance. The absence of water-soluble hydrated lime among the hydration products can also be accepted as an important advantage. However, the transformation reactions that may occur in the phase structure of the CAC depending on the ambient conditions over time may cause a loss of strength in the concrete produced with this cement. In this study, it is aimed to provide solutions to the problems arising from the conversion reactions in the hydration process of CAC, to improve the fresh state properties and to stabilize the strength development in the long term. Consequently, the effects of using CAC blended with different mineral additives (SiO_2 and CaSO_4) on the mortar consistency, setting time and rheological properties were investigated. In the hardened state, abrasion resistance and time-dependent compressive and flexural strength developments were determined. As a result of the experimental studies, it was concluded that the CAC mortars containing 16% SiO_2 and 50% CaSO_4 additives can provide improved properties in their fresh state, and they also demonstrate an improvement in strength after 400 days by obtaining stable products during the hydration process without any time-related strength loss.

Keywords: Calcium aluminate cement, mineral additive, fresh state properties, rheology, mechanical strength.

1. GİRİŞ

Kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ) hızlı dayanım gelişimi (tünel kaplaması vb. yerlerde), yüksek sıcaklık direnci [1], karbonatlaşma direnci [2], [3], sülfat ve asit direnci sağlaması nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada (refrakter malzeme üretimi, boru imalatı, kanalizasyon inşaatlarında, endüstriyel zeminlerde, atık su uygulamasında ve aşınmaya karşı direnci nedeniyle baraj dolu savakları vb.) yüksek maliyetine rağmen tercih edilmektedir [1], [3], [4]. KAÇ'ın belirli koşullarda basınç dayanımının 150 MPa'a kadar ulaşabildiği ve yüksek dayanımlı malzeme olarak kullanılabileceği rapor edilmiştir [3], [5]. Ayrıca 0°C 'den daha düşük sıcaklıklarda bile hızlı dayanım kazanma yeteneği, soğuk havada beton dökümünü de mümkün kılmaktadır [6].

Yukarıda bahsedilen birçok avantaja rağmen, sıcak ve nemli koşullar, ilerleyen yaşlardaki faz dönüşümüne bağlı olarak gözenek hacminde artış [3] ve dolayısıyla basınç dayanımında düşümlere neden olabilmektedir [1], [7]–[9]. 20°C 'nin altındaki sıcaklıklarda KAÇ'ın ana hidratasyon ürünü CAH_{10} 'dur. 20°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ana hidratasyon ürünleri ise C_2AH_8 ve AH_3 'dür. KAÇ'ın yüksek erken dayanımı, baskın hidratasyon ürünleri olan altıgen hidratların (CAH_{10} ve C_2AH_8) oluşumuna bağlanmaktadır [8]. Bununla birlikte, CAH_{10} ve C_2AH_8 'in yarı kararlı olduğu ve aşağıdaki Denklem 1 ve 2'ye göre zamana bağlı olarak daha kararlı C_3AH_6 ve AH_3 'e [8]–[10] dönüştüğü bilinmektedir (Denklemlerdeki kısaltmaların çimento terminolojisindeki karşılıkları şu şekildedir; C:CaO, A: Al_2O_3 , H: H_2O).



Kararsız CAH_{10} ve C_2AH_8 'in kararlı C_3AH_6 'ya dönüşümüyle, gözeneklilikte bir artış ve dolayısıyla dayanımda bir azalma meydana gelir [9], [11]. C_3AH_6 ve AH_3 bağlarının, eşit gözeneklilikte bile CAH_{10} ve C_2AH_8 'den daha zayıf olduğu diğer araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir [12], [13]. Dönüşüm reaksiyonları sonucu oluşan basınç dayanımındaki kararsızlık nedeniyle, KAÇ'ın taşıyıcı sistem yapı elemanı olarak kullanımı bazı ülkelerde kısıtlanmıştır [3], [7].

S/Ç oranı 0.4'ün altında olması durumunda, yukarıda belirtilen dönüşüm reaksiyonlarının önemli ölçüde azaldığı ve gözeneklilikteki artışın daha düşük seviyelerde kaldığı bildirilmiş [14], [15] olmasına rağmen; düşük S/Ç oranı da, işlenebilirlik problemlerine yol açabilmektedir. Bu bağlamda KAÇ'ın taze hal davranışlarını inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır [16], [17]. KAÇ'ın, suya ilk temastan sonra yaklaşık 15 dakikada içinde belirgin bir işlenebilirlik kaybına uğradığı rapor edilmiştir [18].

KAÇ'ın dönüşüm reaksiyonları nedeniyle, literatürdeki çalışmalar çoğunlukla sertleşmiş hal davranışlarına yoğunlaşmıştır. KAÇ faz dönüşümünün engellenmesi üzerine yapılan önceki çalışmalar, kütleme sıcaklığını kontrol ederek C_3AH_6 oluşumunu arttırmayı ve silikat kaynağı dahil ederek doğrudan C_2ASH_8 oluşumunu teşvik etmeyi amaçlamaktadırlar [19], [20]. Zaman içinde mekanik performansa ilişkin bu kaygının üstesinden gelmek için kimyasal ve mineral katkıları kullanılarak yarı kararlı hidratların dönüşümünün ortadan kaldırılması için bazı önlemler alınmaya çalışılmıştır [1], [19], [21]–[24].

KAÇ'a cüruf ilavesinin 40 °C'de su altında kürlenmiş hamurlarda dayanım kaybını önlediği belirlenmiştir. Cürufun dönüşüm reaksiyonlarını önleme yeteneği, camsı faz içeriği ve bazik çözeltilerdeki çözünme yeteneğine bağlı olan hidrolik aktivitesi ile ilişkilendirilmiştir [1], [25], [26]. Literatürdeki çalışmalarda [27], [28], C_2ASH_8 hidrat oluşumunun, 20°C ve 40°C'de, %50 oranında cüruf ikamesi ile iki tip ticari KAÇ (Ciment Fondu ve Secar 71) için dayanım gelişimini iyileştirdiği rapor edilmiştir. Kalsiyum alüminatların, nem varlığında, stratlingite olarak bilinen C_2ASH_8 'i oluşturmak üzere cürufun amorf silisi ile reaksiyona girerek yarı kararlı hidrat dönüşümünü engellediği bildirilmiştir [25], [29]. KAÇ'a doğrudan silis dumanı veya nanosilika eklendiğinde, birkaç dakikada çözelti içinde büyük miktarda silikat iyonu çözüldüğü belirtilmiştir [30]. İlerleyen aşamada C_2ASH_8 kararlı fazının oluşumu ile basınç dayanımındaki azalmanın büyük ölçüde önüne geçildiği değerlendirilmiştir [19], [20], [24]. Majumdar ve Singh [31] benzer şekilde KAÇ ile silisli malzemelerin ikamesinin, bağlayıcı türlerine ve ikame oranlarına bağlı olarak dayanım gelişimini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Silikat iyonlarının, uçucu kül veya silis dumanından oluşan KAÇ tabanlı ikili sistemde stratlingite oluşturma yeteneği, başka çalışmalarda da rapor edilmiştir [20], [32], [33].

KAÇ'a $CaSO_4$ eklenmesi ile ilgili, literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır [3]. KAÇ'a eklenen $CaSO_4$ miktarının, hidrat fazlarında farklılıklara yol açmamasına rağmen etrenjit üretim miktarlarını değiştirerek KAÇ bazı çimentolu malzemelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerinde farklılaşmaya neden olduğu vurgulanmıştır [34]. Son ve diğerleri [3] KAÇ'a $CaSO_4$ 'ün eklenmesinin, etrenjitin doğrudan oluşumu ile kararsız CAH_{10} dönüşümünü engellediğini bildirmişlerdir.

Bu çalışmada KAÇ harcına iki tür mineral katkının (SiO_2 ve $CaSO_4$) farklı oranlarda ikame edilmesinin; taze hal, kısa ve uzun dönemli sertleşmiş hal özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda üretilen harçların çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilirlikleri kıvam,

reolojik parametreler, priz süresi parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiş olup, sertleşmiş hal özelliklerini incelemek üzere 400 gün boyunca basınç ve eğilme dayanımı gelişimi analiz edilerek eklenen katkı türü ve oranının KAÇ üzerindeki etkisi tartışılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Amaç ve Kapsam

Çalışmada, katkısız, SiO₂ ve CaSO₄ katkılı KAÇ harçların taze hal özellikleri ve uzun dönem mekanik etkilerinin araştırılması ile KAÇ'ın günümüzdeki kullanımını sınırlayan sebeplerin önüne geçilmesi amaçlanmıştır. KAÇ'a iki farklı mineral katkının iki farklı oranda eklenmesi ile taze hal özelliklerinin geliştirilmesi, buna bağlı olarak sahadaki uygulama alanlarının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılması; aynı zamanda uzun dönemde dayanımda belirsizliğe neden olan hidrasyon sürecinin, iki farklı mineral katkının kullanımıyla yeni stabil fazlar oluşturup bloke edilmesi ve katkı miktarının artırılmasına bağlı olarak uzun dönemli dayanım gelişiminin sağlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda mevcut literatür bilgileri kullanılarak; stratlingite faz oluşumunun en yüksek seviyeye ulaştığı aralık olan %8 ve %16 oranında mikro silis [6], [35]; etrenjit fazının en yoğun hacimde gözlemlendiği %30 ve %50 oranında anhidrit alçı [3], [36]–[38] eklenmesi ile harçlar hazırlanmıştır.

2.2. Kullanılan Malzemeler, Karışım Oranları, Karışımların Hazırlanması ve Kür İşlemi

DeneySEL çalışmalarda yaklaşık %40 Al₂O₃ içeriğine sahip KAÇ kullanılmıştır. Tablo 1'de çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri sunulmuştur. Silika kaynağı olarak; 15 mikron boyutunda, %99 saflık oranına sahip silisyum dioksit (SiO₂) katkısı kullanılmıştır. Özgül yüzey alanı ve gerçek yoğunluk değerleri sırasıyla 400-1000 m²/g, 2400 kg/m³ olduğu üretici firma tarafından beyan edilmiştir. 136.14 g/mol ağırlığında, 2960 kg/m³ yoğunluğunda, 1460 °C erime noktası ve %99 saflık oranına sahip anhidrit kalsiyum sülfat katkısı (CaSO₄) toz halinde temin edilmiştir. Çimento harçlarında en büyük tane boyutu 4 mm olan ince agrega kullanılmıştır. Agrega elek analizi sonuçlarına göre; 4 mm'den %100, 2 mm'den %64, 1 mm'den %32, 0.5 mm'den %16, 0.25 mm'den %12, 0.125 mm'den %8 oranlarında agrega geçişleri belirlenmiştir. Agreganın özgül ağırlık, su emme ve incelik modülü değerleri sırasıyla 2.7, %1.7 (ağırlıkça) ve 3.9'dur.

KAÇ harçlarının karışım oranları Tablo 2'de sunulmuştur. "KAÇ" kodlu karışımda mineral katkı kullanılmazken, SiO₂ katkısı bağlayıcı oranın %8 ve %16'sı oranında, CaSO₄ katkısı ise bağlayıcı oranın %30 ve %50'si oranında kullanılmıştır. Tüm harçlarda KAÇ hidratlarının dönüşüm oranının orta seviyede olmasını sağlamak için su/bağlayıcı oranı 0.5'de [39] ve ince agrega/bağlayıcı oranı 3.0'de sabit tutulmuştur.

Harç karışımları EN 196-1 standardına göre hazırlanmıştır. Harçların taze hal deneyleri bir sonraki bölümde açıklanmıştır. Eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri için her seriden EN 196-1 standardına göre 105 adet 40*40*160 mm³ prizmatik numune ve aşınma deneyi için 71×71×71 mm³ boyutlarında 15 adet küp numune hazırlanmıştır. Numuneler dökümden bir gün sonra kalıptan çıkarılarak, deney gününe kadar 20±5 °C (%60±20 BN) koşulunda bekletilmiştir.

Tablo 1 - KAÇ'ın kimyasal ve fiziksel/mekanik özellikleri

| Kimyasal Özellikler | | Fiziksel ve Mekanik Özellikler | |
|------------------------------------|-------|---|------|
| CaO (%) | 36.20 | Özgül ağırlık | 3.25 |
| Al ₂ O ₃ (%) | 39.80 | Özgül yüzey (Blaine) m ² /kg | 300 |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 17.05 | Priz başlangıcı (dk) | 280 |
| SiO ₂ (%) | 3.60 | Priz sonu (dk) | 295 |
| MgO (%) | 0.65 | Hacim sabitliği (mm) | 1 |
| SO ₃ (%) | 0.04 | 0.045 mm elek bakiyesi (%) | 23 |
| Kızdırma kaybı (%) | 0.30 | 6 saatteki basınç dayanımı (MPa) | 47 |
| Cl ⁻ (%) | 0.009 | 24 saatteki basınç dayanımı (MPa) | 70 |
| S ² (%) | 0.01 | | |

Tablo 2 - Karışım oranları (kg/m³)

| Karışım kodları | Çimento (kg) | Mineral katkı (kg) | Bağlayıcı (kg) | Kum (kg) | Su (kg) | Su/Bağlayıcı ** | Kum/Bağlayıcı ** |
|-----------------------|--------------|--------------------|----------------|----------|---------|-----------------|------------------|
| KAÇ | 521 | 0 | 521 | 1563 | 261 | 0.5 | 3.0 |
| %8 SiO ₂ | 477 | 42 | 519 | 1556 | 259 | 0.5 | 3.0 |
| %16 SiO ₂ | 434 | 83 | 517 | 1549 | 258 | 0.5 | 3.0 |
| %30 CaSO ₄ | 363 | 156 | 519 | 1556 | 259 | 0.5 | 3.0 |
| %50 CaSO ₄ | 259 | 259 | 518 | 1551 | 259 | 0.5 | 3.0 |

*Bağlayıcı= Çimento + Mineral katkı

**Su/Bağlayıcı ve Kum/Bağlayıcı değerleri ağırlıkça oran değerleridir.

2.3. Deney Yöntemleri

Harç karışımlarının işlenebilirliği, ASTM C1437 [40] standardına göre mini çökme konisi ile ölçülmüş olup, detayları yazarların önceki çalışmasında [44] bulunabilir. Harçların kıvam değerleri ve belirlenen kıvamdaki priz süreleri 20°C'de TS EN 196-3'e [41] uygun Vicat sondası ve iğnesi yardımıyla belirlenmiştir.

Reolojik ölçümlerde 8 mm çapında bilyeli ölçüm düzeneğine sahip (Ball measuring system – BMS) Physica MCR 51 reometresi kullanılmış olup, detaylı bilgiler Felekoğlu (2009)'da [42] bulunabilir. Çalışma kapsamındaki taze harçların akma eğrilerini çıkartmak için "Rheoplus" yazılımı ile Şekil 1b'de gösterilen kayma hızı makrosu hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlar içinde bilye, 1. aşamada 5 s⁻¹'lik sabit bir kayma hızında döndürülerek elde edilen akma eğrilerinden, statik (durgun halden ilk harekete geçiş) eşik kayma gerilmeleri ($\tau_{0, \text{statik}}$) belirlenmiştir. Bu makrodaki 4. ve 5. aşamalara kıyasla, 2. ve 3. aşamalarda akış eğrilerindeki değişkenlik daha fazladır. İleride yapılan histerezis alanı hesabında söz konusu değişkenliğin kaynağı değerlendirilecektir. Söz konusu değişkenlik nedeniyle dinamik eşik

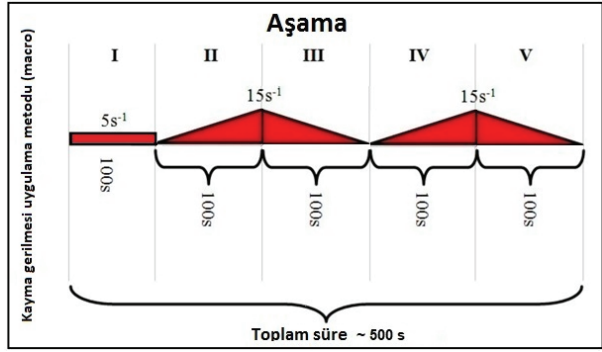
kayma gerilmesi (EKG) ve viskozite değerleri 2. ve 3. aşamalar yerine, 4. ve 5. aşamalardan elde edilmiştir. Bunun sebebi, taze harçların başlangıç ölçümlerinde oluşabilecek değişkenliği azaltmaktır [43]. 4. ve 5. aşamadaki akma eğrisi verileri Herschel Bulkley (HB) modeli yardımıyla analiz edilerek, bir sonraki paragrafta verilen reolojik parametreler hesaplanmıştır. HB bağıntısı Denklem 3’de sunulmuştur.

$$\tau = \tau_{0,dinamik} + b \dot{\gamma}^p \quad (3)$$

burada τ : herhangi bir kayma hızında (Şekil 6’daki y eksenini değişkeni) kayma gerilmesi (Pa), $\tau_{0,dinamik}$: Dinamik eşik kayma gerilmesi (Pa), $\dot{\gamma}$: Kayma hızı (1/s) (Şekil 6’daki x eksenini değişkeni), b ve p, HB modelinin katsayıları olup detaylı bilgiler Keskinateş ve Felekoğlu (2018)’de [44] bulunabilir. Dinamik eşik kayma gerilmesi ($\tau_{0,dinamik}$), sıfır kayma hızında model denkleminin değeridir ve HB modeli analiz sonucu elde edilen eğrinin y-eksenini (τ) kestiği nokta olarak tanımlanmıştır. Bu değer ($\tau_{0,dinamik}$), statik eşik kayma gerilmesi ($\tau_{0,statik}$) değerinden farklı olup, doğrudan verilerden değil, modelden alınan bir büyüklüktür.

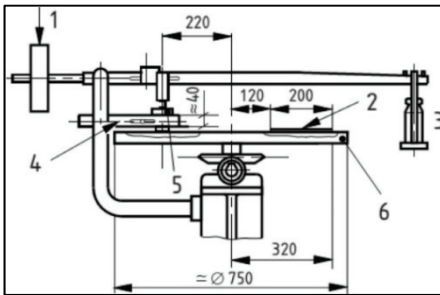


(a)



(b)

Şekil 1 - a) BMS ile donatılmış reometre, b) Uygulanan kayma hızı makrosu ve akış eğrilerini elde etmek için kullanılan adımlar [49].



(a)



(b)

Şekil 2 - (a) Böhme cihazı çizimi (1: Karşı ağırlık, 2: Test hattı, 3: Yükleme ağırlığı, 4: Numune tutucu, 5: Numune, 6: Döner disk, boyutlar mm’dir), (b) Aşınma deneyi için kullanılan Böhme cihazı

40x40x160 mm³ boyutlu prizma numuneler üzerinde eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri; 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 400 günlerin her birinde eğilme deneyi için 3 ve basınç deneyi için 6 numune sonucunun ortalaması alınarak belirlenmiştir. Eğilme dayanımının tespiti 3 noktalı deney ile mesnet açıklığı 100 mm ve yükleme hızı 5 mm/dk olacak şekilde yapılmıştır. Eğilme deneyi sonucu iki parçaya ayrılan numuneler üzerinde 40x40 mm²’lik yüzey alanı ve 244 kgf/s yükleme hızında basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadaki harçlardan 71×71×71 mm³ boyutlarında oluşturulan küp numuneler, dökümden 28 gün sonra aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Yüzeysel aşınma deneyi için Böhme yüzeysel aşınma cihazı kullanılmıştır (Şekil 2). TS EN 14157 (2017)’ye [45] uygun gerçekleştirilen aşınma deneyin detayları literatürde [46]–[48] bulunabilir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Taze Hal Sonuçları

3.1.1. Yayılma Deneyi Sonuçları

Taze harçların yayılma değerleri, hem katkı türünden hem de dozajdan etkilenmiştir (Şekil 3). Sabit su/bağlayıcı oranında, SiO₂ katkılı harçların yayılma çapı değeri referans harç olan %100 KAÇ bağlayıcı harçtan daha yüksek iken (%5-18), CaSO₄ katkılı harçların yayılma çapı değerleri daha düşüktür (%19-21). Ayrıca katkı oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinin bir miktar düştüğü, dolayısıyla işlenebilirliğin azaldığı belirlenmiştir. Özet olarak; SiO₂ katkısının düşük kullanım oranlarında işlenebilirlik üzerinde olumlu etkisi görülmüştür. CaSO₄ katkısının ise daha az yayılma davranışı gerektiren onarım uygulamalarına daha uygun olduğu gözlemlenmiştir.

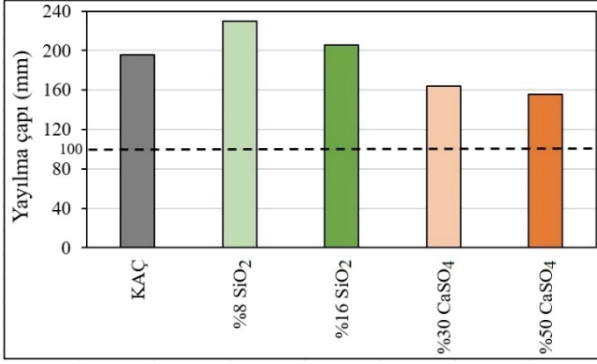
3.1.2. Kıvam Deneyi Sonuçları

Harçların kıvam tayinlerinde Vicat aleti sondasının harç içine batma seviyeleri Şekil 4’de gösterilmiştir. Kesik koni kalıp içinde bulunan harcın toplam yüksekliği 36 mm’dir. Gerek yayılma deneyi gerekse Vicat kıvam deneyi, benzer işlenebilirlik ölçüm teknikleri olduğundan, Şekil 3’deki harçların yayılma çapı değerleri ile Şekil 4’deki batma seviyesi değerleri benzer eğilim göstermektedir. Referans “KAÇ” harcına kıyasla SiO₂ katkılı harçlarda, Vicat sondasının batma seviyesi daha yüksek iken, CaSO₄ katkılı harçlarda sonda batma seviyesi azalmıştır (Şekil 4). Her iki mineral katkı ilavesinde de, katkı oranı arttıkça Vicat sondasının batma seviyesinin düştüğü belirlenmiştir.

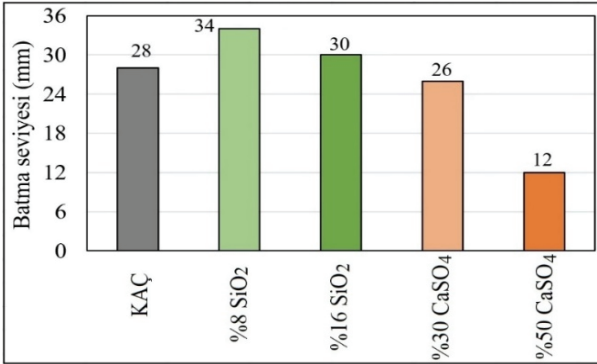
3.1.3. Priz Deneyi Sonuçları

20 °C’de ölçülen priz başlangıç ve bitiş süreleri Şekil 5’de gösterilmiştir. Referans KAÇ harcına kıyasla; SiO₂ katkı ilavesi harçların priz başlangıç ve bitiş sürelerini arttırırken, CaSO₄ katkısı harçların priz başlangıç sürelerini azaltmıştır. Ancak priz bitiş süreleri için CaSO₄ katkı dozajının etkili olduğu görülmüştür. KAÇ bazlı çimentolu malzemelere eklenen nanosilikanın, KAÇ klinkerinin hidrasyonunu bir miktar geciktirebildiği önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir [19], [50]. Deneysel bulgularda, SiO₂ katkısı ilavesi benzer şekilde priz sürelerini arttırmıştır. Referans KAÇ harcına kıyasla, %30 CaSO₄ ikamesi priz bitiş süresini arttırırken, %50 CaSO₄ ikamesi ile priz başlangıç süresi kısalmıştır.

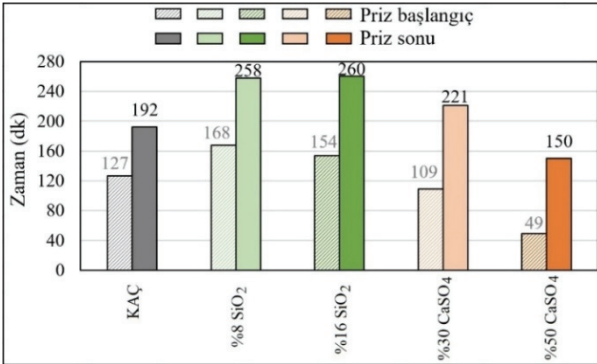
Literatürdeki bir çalışmada [51], KAÇ-CaSO₄'lı sistemlerde normal dönüşüm reaksiyonlarının oluşmadığı ve genellikle oluşan ilk ürünün etrenjit olduğu belirtilmiştir. Bu açıdan düşünüldüğünde etrenjitin büyük miktarlarda suyu bağlama yeteneği, hızlı kuruyan ve hızlı sertleşen betonlar üretmek için avantajlı olabilir. Yapılan başka bir çalışmada ise [52], KAÇ-CaSO₄ ikili sisteminde CaSO₄ miktarı arttıkça, priz süresinin arttığı bildirilmiştir.



Şekil 3 - KAÇ ve mineral katkı harçların yayılma değerleri



Şekil 4 - KAÇ ve mineral katkı harçların kıvam değerleri



Şekil 5 - KAÇ ve mineral katkı harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri

CaSO₄, etrenjit oluşumuna bağlı ani prizi önlemek için genellikle Portland çimentosuna eklenir. Birçok yazar [6], [8], [53] CaSO₄ ilavesi ile bir bariyer, yani bir “etrenjit tabakası” oluştuğunu iddia etmektedir. Portland çimentosunda miktarı görece olarak az olan C₃A'nın yüzeyinde su ve iyonların taşınmasını sınırlayan yarı geçirgen bir etrenjit tabakası oluştururlar. Etrenjit oluşumu, katkılı harçların hidrasyonu ve dolayısıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri ile yakından ilişkilidir [36]. Bu açıdan bakıldığında, KAÇ'lı sistemlerde yüksek alüminat içeriği de dikkate alınarak erken yaşlarda CaSO₄ katkılı harçlarda etrenjit oluşum potansiyelinin çok daha fazla olacağı değerlendirilmiştir. CaSO₄ katkılı harçların priz başlangıç ve bitiş sürelerinin diğer harçlardan (katkısız KAÇ ve SiO₂ katkılı harçlar) daha kısa olmasının bu mekanizma ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Yang ve diğerleri (2019) [21] KAÇ'daki hidrasyon sürecinin, çözeltideki Ca⁺² ve Al(OH)⁻⁴ iyonlarının konsantrasyonu tarafından yönetildiğini bildirmiştir. Bu nedenle söz konusu iyonların konsantrasyonu SiO₂ katkılı harçlarda düşerken, CaSO₄ katkılı harçlarda artış göstermektedir. Dolayısıyla bu iyonlardaki konsantrasyonların düşmesi priz sürelerinin uzamasına neden olurken, iyonların konsantrasyonunun artması priz sürelerinin daha kısa olması şeklinde yorumlanabilir. Sonuç olarak KAÇ harcına kıyasla, SiO₂ katkılı harçlardaki daha uzun priz süreleri ve CaSO₄ katkılı harçlarda daha kısa olan priz süreleri, Ca⁺² ve Al(OH)⁻⁴ iyonlarının konsantrasyonunun priz süreleriyle ters orantılı olması ile açıklanabilir.

3.1.4. Reometre Deney Sonuçları

KAÇ, SiO₂ ve CaSO₄ katkılı harçların Herschel-Bulkley (HB) eğrileri ve model katsayıları sırasıyla Şekil 6 ve Tablo 3'de sunulmuştur. Sadece %50 CaSO₄ katkılı harcın düşük işlenebilirliği nedeniyle (Şekil 4), bu karışıma ait kayma gerilmesi değerleri reometrenin gerilme kapasitesi olan 2850 Pa'ı aşmıştır. Söz konusu harç için akma eğrileri elde edilememiştir (Şekil 6 c ve d). Hem kayma hızı artışının görüldüğü çıkış eğrisi bölümü (Şekil 1b 4. aşama) hem de kayma hızı azalışının görüldüğü iniş eğrisi bölümü (Şekil 1b 5. aşama) HB modeli ile analiz edilmiştir. Tablo 3'de görüldüğü üzere genel olarak 5. aşamaya kıyasla 4. aşamaya ait dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri daha yüksektir. Ancak 4. aşamadaki “KAÇ katkısı” ve “KAÇ-%30 CaSO₄” harçları için R katsayıları oldukça düşüktür (sırasıyla 0.29 ve 0.16). Bu nedenle reolojik parametrelerin kararlı rejime ulaştığı 5. aşamadaki verilerin HB ile modellenmesi daha anlamlı görünmektedir. Tablo 3'deki diğer tüm serilerin 5. aşamadaki HB modeli korelasyon katsayıları (R) 0.85'den büyük olduğundan, HB yönteminin modelleme için uygun bir yöntem olduğu söylenebilir. 5. aşamadaki HB analiz sonuçlarına göre; referans KAÇ harcı ile SiO₂ katkılı harçların dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri birbirine oldukça benzer iken, %30 CaSO₄ katkılı harcın dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri KAÇ harcına kıyasla oldukça yüksektir. Diğer taraftan, SiO₂ katkısı ikame oranının %8'den %16'ya artırılması, dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerlerinin bir miktar yükselmesine neden olmuştur. %16 SiO₂ katkılı harç için p<1 olduğundan psödoplastik davranış sergileme eğiliminde iken, diğer tüm harçlar için p>1 olduğundan dilatant davranış gösterme eğilimindedir.

Statik eşik kayma gerilmesi (durgun halden akışı başlatmak için gerekli olan minimum kayma gerilmesi), genellikle dinamik kayma gerilmesinden (tikotropik yapı bozulduktan sonra akışı korumak için gerekli olan minimum kayma gerilmesi) daha yüksek değerdedir.

Bunun nedeni, statik kayma gerilmesinin bozulmamış, iyi bağlanmış bir mikro yapıya, dinamik kayma gerilmesinin ise örselenmiş taze harç yapısına karşılık gelmesindedir.

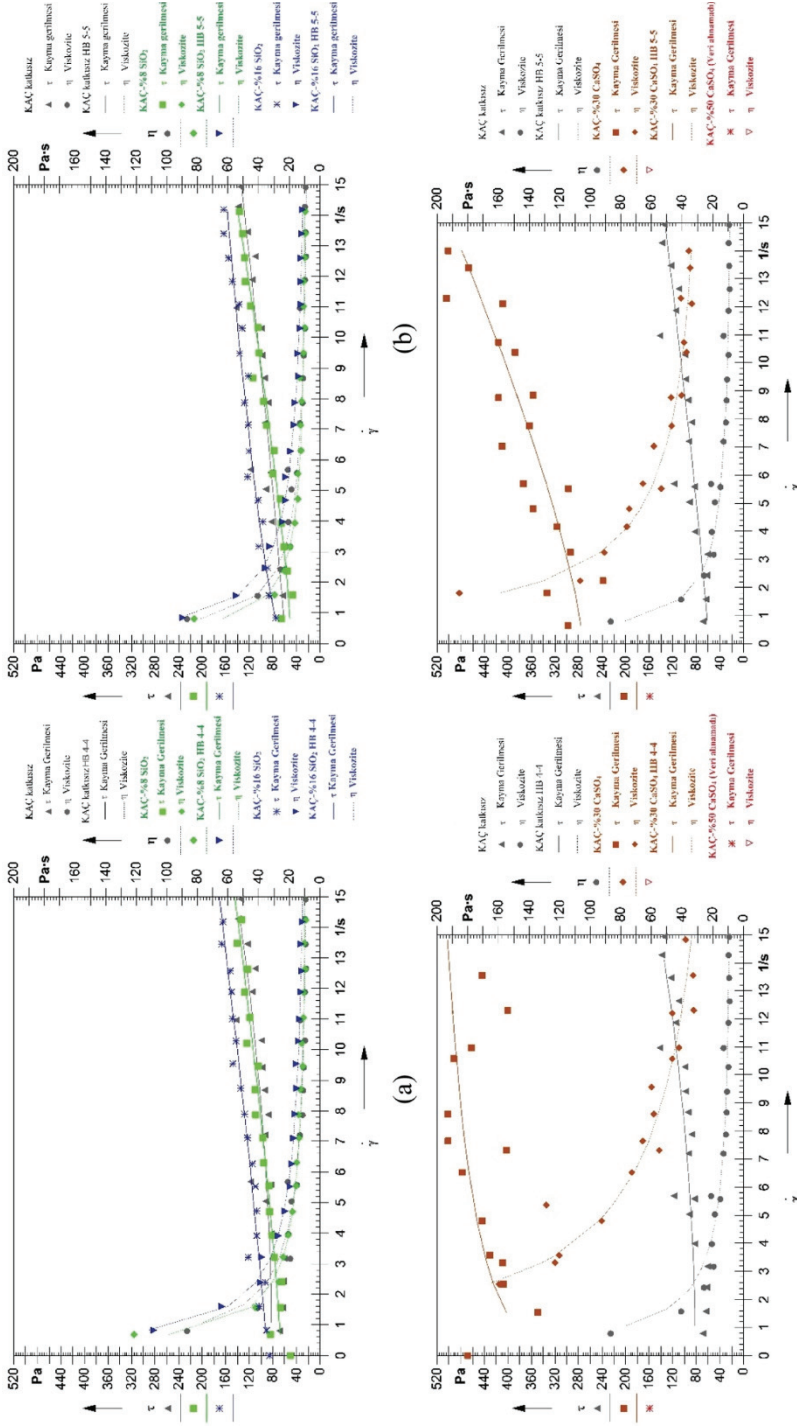
Referans KAÇ harcına kıyasla; SiO₂ katkılı harçların hem statik EKG hem de dinamik EKG değerleri daha düşük iken, CaSO₄ katkılı harçlara ait değerler daha yüksektir. Ayrıca SiO₂ katkı oranı artışı (%8'den %16'ya) statik EKG değerini düşürürken, dinamik EKG değerinin artmasına neden olmuştur. %50 CaSO₄ katkılı harçta reometrenin kayma gerilmesi sınır değerini aştığı için veri alınamaması, %30 CaSO₄ katkılı harçtan daha yüksek statik ve dinamik EKG değerlerine sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bu nedenle CaSO₄ katkı oranının artışıyla, hem statik hem de EKG değerlerinde artışlar olduğu değerlendirilmiştir.

Tablo 3 - KAÇ ve katkılı harçların Herschel Bulkley Modeli ile hesaplanan reolojik parametreleri

| Karışımlar ve analiz aşamaları* | Statik eşik kayma gerilmesi (Pa) (τ_0 , statik) | Dinamik eşik kayma gerilmesi (Pa) (τ_0 , dinamik) | b | p | R | viskozite (Pa.s) (η_{15s}^{-1}) |
|--------------------------------------|--|--|---------|------|------|---|
| KAÇ katkısı (4. aşama) | 2193 | 81.5 | 0.33 | 1.92 | 0.29 | 9.4 |
| KAÇ katkısı (5. aşama) | | 59.2 | 3.30 | 1.15 | 0.87 | 8.9 |
| KAÇ-%8 SiO ₂ (4. aşama) | 1853 | 66.6 | 2.49 | 1.27 | 0.96 | 9.7 |
| KAÇ-%8 SiO ₂ (5. aşama) | | 48.3 | 3.17 | 1.27 | 0.98 | 9.8 |
| KAÇ-%16 SiO ₂ (4. aşama) | 832 | 90.6 | 3.25 | 1.19 | 0.97 | 11.4 |
| KAÇ-%16 SiO ₂ (5. aşama) | | 61.8 | 16.25 | 0.67 | 0.98 | 10.8 |
| KAÇ-%30 CaSO ₄ (4. aşama) | 2850 | -3960.6** | 4344.10 | 0.01 | 0.16 | 33.2 |
| KAÇ-%30 CaSO ₄ (5. aşama) | | 272.1 | 6.34 | 1.32 | 0.89 | 33.2 |
| KAÇ-%50 CaSO ₄ (4. aşama) | x | x | x | x | x | x |
| KAÇ-%50 CaSO ₄ (5. aşama) | | x | x | x | x | x |

* 4. ve 5. aşamalar Şekil 1'den görülebilir. ** Fiziksel olarak anlamsız veri. ***x: Cihaz kapasitesi aşıldığından veri alınamamıştır.

Akma eğrisinin çıkış ve iniş eğrileri arasında kalan alan "histerezis alanı" olarak tanımlanabilir. Histerezis alanı, malzemelerin kayma hızı değişimi karşısında yapısal olarak yumuşama (structural breakdown) veya toparlanma (structural recovery) özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Çalışma kapsamındaki harçların histerezis alanları için kayma gerilmesi-kayma hızı eğrileri Şekil 7'de gösterilmektedir. Verilen grafiklerde kırmızı çizgiler 2. ve 3. aşamalardaki kayma hızı artışı ve azalışını, mavi çizgiler ise 4. ve 5. aşamalardaki kayma hızı artışı ve azalışının görüldüğü çıkış ve iniş eğrilerini göstermektedir. Tüm harçlarda kırmızı çizgi daha yukarıda olduğundan pozitif histerezis alanları yani yapısal yumuşama (structural breakdown) davranışı hakimdir. Bu durum, harçların reometre sondasının ucundaki bilyeye uyguladıkları kayma gerilmelerinin düşmesiyle açıklanabilir ve harçların tiksotropik özellik gösterdiği söylenebilir. Pozitif histerezis alanları, bu harçların kayma hızı artış ve sonrasında azalışı ile bilyeye uyguladıkları kayma gerilmesinin azaldığını göstermektedir.

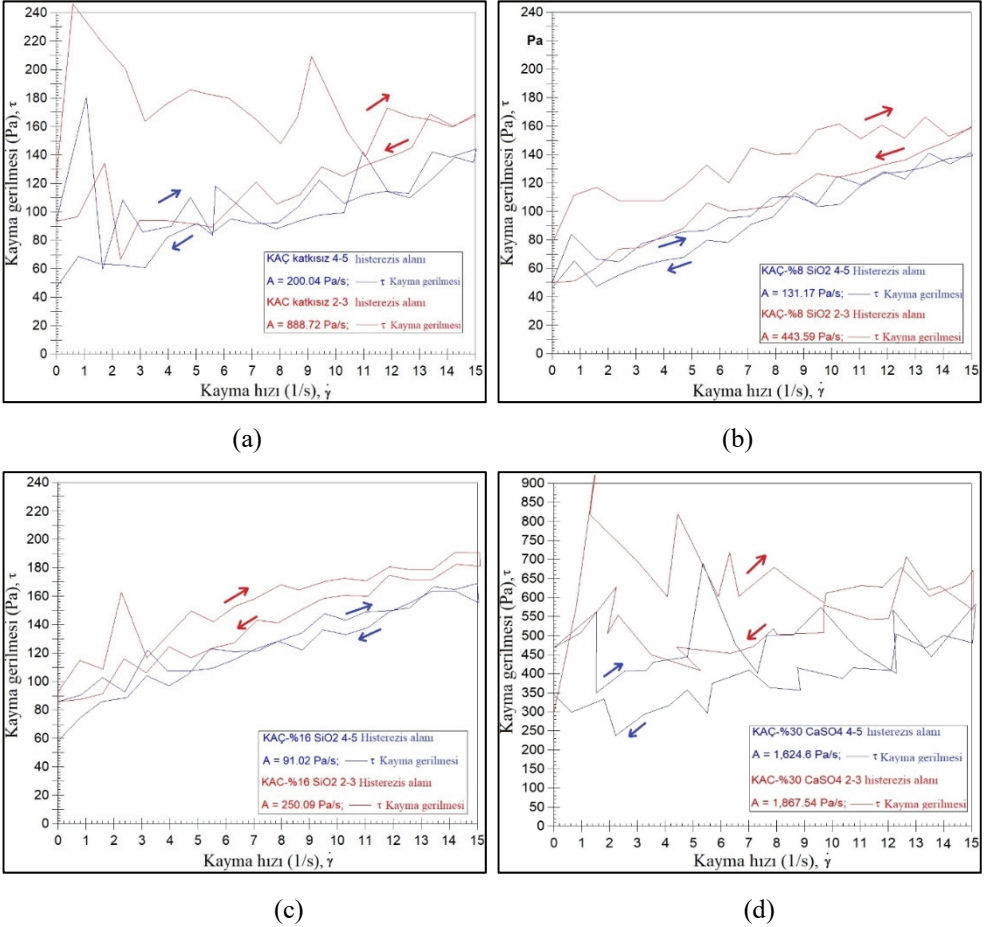


Şekil 6 - KAC ve mineral katkılı harçların akma ve viskozite eğrileri (a) 4-4 aşama KAC, %8 SiO₂ ve %16 SiO₂
 (b) 5-5 aşama KAC, %8 SiO₂ ve %16 SiO₂ (c) 4-4 aşama KAC, %30 CaSO₄ ve %50 CaSO₄
 (d) 5-5 aşama KAC, %30 CaSO₄ ve %50 CaSO₄

* τ: Kayma gerilimi (Pa), η: Kayma hızı (1/s), η: viskozite (Pa.s)

Tiksotropi ile ilişkilendirilebilecek artan ve azalan eğriler arasındaki histerezis alanları hem 2-3 hem de 4-5 aşamaları (Şekil 1) için hesaplanarak Tablo 4’de verilmiştir. KAÇ harcına kıyasla SiO_2 katkılı harcın histerezis alanı daha küçük iken, %30 CaSO_4 katkılı harçta daha büyüktür. Söz konusu durumun, katkıların kullanım oranları arttıkça daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4’deki kıvam performansları göz önüne alındığında, kıvam performansı ile histerezis alanları arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu gözlenmektedir.

Tablo 4’deki ilk gidiş dönüş hareketlerindeki (2. ve 3. aşamalar) histerezis alanları, ikinci gidiş-dönüş hareketinden (4. ve 5. aşamalar) daha büyüktür. Bu durum sürekli kayma hızı etkisi altında kalan harçlarda, gidiş ve dönüş sırasında davranışın birbirine yaklaşması ile açıklanabilir. İlk iniş çıkış aşamaları olan 2-3 aşamalarında, bilye hareketlendikten sonra kum taneciklerinin çimento hamurundaki taneler arası elektrostatik etkileşimi kırdığı düşünülmektedir. Böylece ikinci iniş ve çıkış aşamaları olan 4-5 aşamalarında elde edilen histerezis alanı, 2-3. aşamada elde edilene kıyasla daha küçük olmaktadır.



Şekil 7 - KAÇ ve mineral katkılı harçların histerezis alanları (a) KAÇ, (b) %8 SiO_2 , (c) %16 SiO_2 ve (d) %30 CaSO_4 (kırmızı çizgi 2-3 ve mavi çizgi 4-5 aşama verilerini ifade etmektedir)

Tablo 4 - Taze harçların histerezis alanları (Pa/s)

| Karışım kodu | 2. ve 3. aşamalar arasındaki Histerezis alanı (Pa/s) | 4. ve 5. aşamalar arasındaki Histerezis alanı (Pa/s) |
|---------------------------|--|--|
| KAÇ katkısız | 889 | 200 |
| KAÇ-%8 SiO ₂ | 444 | 131 |
| KAÇ-%16 SiO ₂ | 250 | 91 |
| KAÇ-%30 CaSO ₄ | 1868 | 1625 |
| KAÇ-%50 CaSO ₄ | * | * |

* Veri alınmamıştır.

Tüm taze hal sonuçları için genel bir değerlendirilme yapıldığında, işlenebilirlik özelliği (yayıma ve kıvam) yüksekten düşüğe doğru harçlar sırasıyla; %8 SiO₂, %16 SiO₂, KAÇ, %30 CaSO₄ ve %50 CaSO₄ şeklindedir. Eklenen katkı türü ve oranına bağlı olarak, pratikte kullanılan katkısız kalsiyum alüminat çimentosuna kıyasla, hızlı sertleşmesi istenen veya akıcı kıvam gerektiren tamir ve onarım harcı uygulamalarına uygun malzemeler geliştirilmesi açısından farklı alternatif çözümler kazandırılabilirdiği görülmektedir.

3.2. Sertleşmiş Hal Sonuçları

3.2.1. Basınç Deneyi Sonuçları

Katkısız ve katkılı KAÇ harçlarının zamana göre basınç dayanımı gelişimleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Referans KAÇ harcının basınç dayanımı 3. günde en yüksek değere ulaşmış ve sonrasında 180. güne kadar zamanla kademeli olarak azalarak sabitlenmiştir. Referans KAÇ harcının 400. gündeki basınç dayanımı, 3. gündeki değerine göre %47 oranında düşüktür. Diğer katkılı harçların basınç dayanımları, 28 güne kadar sürekli artış göstererek 62-73 MPa seviyelerine çıkmıştır. Ancak bekleme süresi uzadıkça “%8 SiO₂”, “%16 SiO₂” ve “%30 CaSO₄” katkılı harçların basınç dayanımlarında sırasıyla %27, %12 ve %9 mertebelerinde düşüşler görülmüştür. Diğer taraftan, %50 CaSO₄ katkılı harçların 28 gündeki basınç dayanımı 62 MPa seviyesine ulaşmış ve bekleme süresinin daha da artmasıyla düşüş olmadığı tespit edilmiştir. 400. gündeki katkılı harçların basınç dayanımları dikkate alındığında, yüksek oranda mineral katkı kullanılan harçların (%16 SiO₂ ve %50 CaSO₄) düşük oranda mineral katkı kullanılan harçlara (%8 SiO₂ ve %30 CaSO₄) kıyasla, basınç dayanımı değerlerinin %8-9 seviyesinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Katkısız referans KAÇ ve katkılı harçların (%8 SiO₂, %16 SiO₂, %30 CaSO₄ ve %50 CaSO₄) 400. gündeki basınç dayanımı kıyaslandığında, katkısız harca göre katkılı harçların sırasıyla %35, %46, %44 ve %57 mertebelerinde daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir.

Yukarıdaki paragrafta ayrıntılı şekilde incelenen basınç dayanım gelişim verilerinden şu genel sonucun çıkartılması mümkündür: Mineral katkı türünden bağımsız olarak erken dönemde (28. güne kadar) düşük katkı oranlı harçların basınç dayanımları daha yüksek iken, uzun dönemde (180. gün ve sonrası) yüksek katkı oranlı harçların basınç dayanımları daha yüksektir. Literatürdeki bir çalışmada KAÇ'a %2, %4, %6 ve %8 oranlarında CaSO₄ eklenmesiyle ve oranın artışıyla, 3. ve 7. gündeki basınç dayanımlarının azaldığı rapor edilmiştir [3]. KAÇ ile yapılan başka bir çalışmada ise [54], 28. gün sonuçlarına göre,

kalsiyum sülfat içeriği arttıkça gözenekliliğin düşmesiyle basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir.

KAÇ'ın SiO₂ ve CaSO₄ eklenmesinin, yarı kararlı fazlardan (CAH₁₀ ve C₂AH₈) kararlı fazlara (C₃AH₆ ve AH₃) dönüşüm oranını azalttığı değerlendirilmiştir. Ayrıca sırasıyla strätlingite (C₂ASH₈) ve etrenjit fazlarını oluşturarak KAÇ'ın uzun vadeli dayanımını ve yapısal bütünlüğünü koruması açısından etkili olduğu söylenebilir. Bu konuda yapılan ayrıntılı mikroyapı incelemeleri yazarların önceki çalışmasında [55] sunulmuştur. Sonuç olarak, uzun dönemde (400. gün) özellikle %8 SiO₂ ve %50 CaSO₄ ilavesi ile oluşturulan katkılı harçlarda, strätlingite ve etrenjit oluşumuyla basınç dayanımı kaybının mertebesini önemli ölçüde azalttığı düşünülmektedir. Bir başka deneysel çalışmada, KAÇ bazlı çimentolu malzemelere eklenen nanosilikanın, C₂ASH₈ oluşmasına neden olarak C₃AH₆'ya faz geçişini engellemede önemli bir rol oynadığı rapor edilmiştir [19], [50]. C₂ASH₈'in, C₃AH₆'dan daha düşük bir yoğunluğa sahip olduğu ve iç gözenekleri doldurduğu belirtilmiştir. Bu da nanosilikanın KAÇ bazlı çimentolu malzemelere dahil edilmesinin yüksek dayanıma katkıda bulunacağı şeklinde yorumlanmıştır [52].

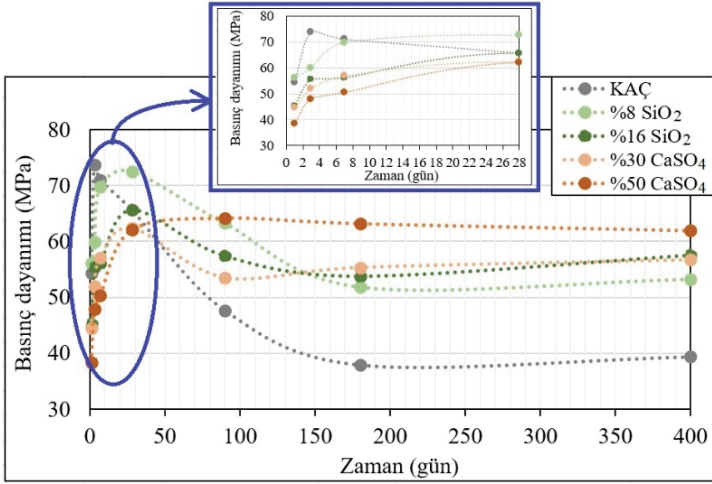
3.2.2. Eğilme Deneyi Sonuçları

KAÇ harçlarının eğilme dayanımları, 3. güne kadar zamanla artmış ve sonrasında 28. günde azalarak sonraki yaşlar için yaklaşık olarak sabitlenmiştir (Şekil 9). KAÇ harçlarının 400. gündeki eğilme dayanımı, 3. gündeki değerinden %33 oranında daha düşüktür.

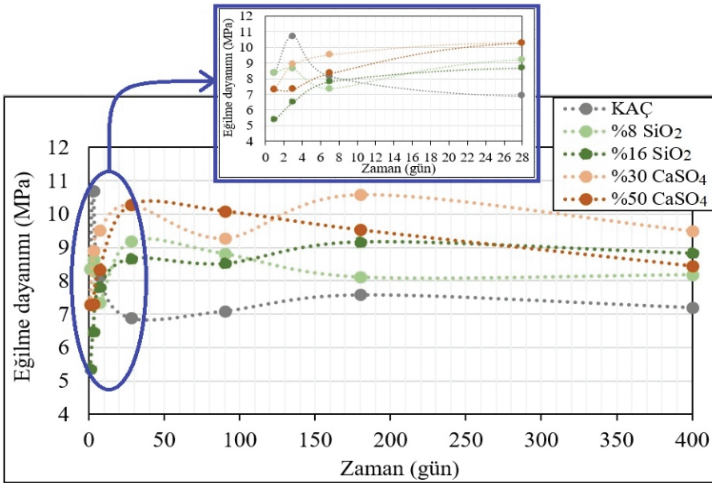
Katkılı harçların eğilme dayanımları, 28 güne kadar artış göstererek maksimum seviyelerine ulaşmıştır (9.2-10.3 MPa). Ancak bekleme süresi uzadıkça (28. günden 400. güne) “%8 SiO₂”, “%30 CaSO₄” ve “%50 CaSO₄” katkılı harçların eğilme dayanımlarında sırasıyla %11, %8 ve %18 mertebelerinde düşüşler görülmüştür. Diğer taraftan, %16 SiO₂ katkılı harcın 28 gündeki eğilme dayanımı 8.7 MPa seviyesine ulaşmış ve bekleme süresinin daha da artmasıyla (400. günde) düşüş olmadığı tespit edilmiştir.

400. gündeki sonuçlarda katkı dozajının etkisi incelendiğinde; SiO₂ katkı oranı arttıkça (%8'den %16'ya) eğilme dayanımı %8 oranında artarken, CaSO₄ katkı oranı arttıkça (%30'dan %50'ye) eğilme dayanımı %11 oranında düştüğü belirlenmiştir. Katkısız (KAÇ) ve katkılı harçların (%8 SiO₂, %16 SiO₂, %30 CaSO₄ ve %50 CaSO₄) 400. gündeki eğilme dayanımları kıyaslandığında, katkısız harca göre katkılı harçların sırasıyla %14, %23, %32 ve %17 mertebelerinde daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 90. güne kadar düşük katkılı SiO₂ harçların (%8 SiO₂) eğilme dayanımı daha yüksek iken, 180. gün ve sonrasında yüksek oranda SiO₂ katkılı harçların (%16 SiO₂) eğilme dayanımının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, genel olarak düşük oranda CaSO₄ katkılı harçların (%30 CaSO₄) eğilme dayanımlarının, yüksek oranda CaSO₄ katkılı harçlara (%50 CaSO₄) kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bir malzemenin mekanik özellikleri, gözenekliliği ile doğrudan ilişkilidir. Gözeneklilik arttığında basınç dayanımı azalır [56]. Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi KAÇ harçların basınç ve eğilme dayanımlarını azaltan en önemli etkenin, gerçekte engellenemeyen dönüşüm reaksiyonları sonucu gözeneklilik artışı olduğu değerlendirilmiştir. Bu çalışmadaki karışımlara ait porozite analizi ile ilgili detaylı bilgiler yazarların önceki çalışmasından [55] bulunabilir.



Şekil 8 - KAÇ ve mineral katkıli harçların zamana bağlı basınç dayanımı gelişimleri



Şekil 9 - KAÇ ve mineral katkıli harçların zamana bağlı eğilme dayanımı gelişimleri

KAÇ harcında mekanik dayanımların düşmesine neden olan bu yüksek gözenekliliğin nedeninin; KAÇ'ın iki ana hidrasyon ürünü, altıgen faz olan CAH₁₀ ve C₂AH₈'in uzun süreler boyunca kübik hidrogarnet fazına (C₃AH₆) [57] dönüşüm reaksiyonlarının olabileceği düşünülmektedir. Ding, Fu ve Beaudoin [58], fazların görece hacimlerdeki farklılıklarından yola çıkarak gözeneklilikteki artışı açıklamıştır. Buna göre; CAH₁₀'un C₃AH₆'ya dönüştürülmesi, hacmin yaklaşık %50'ye düşmesiyle sonuçlanırken, C₂AH₈'in kübik faza dönüştürülmesi, reaksiyona giren ürünlerin orijinal hacminin yaklaşık %65 oranında azalması ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle, dönüşüm olayının en büyük etkisi, gözeneklilikteki

artış ve bunun sonucu olarak dayanımdaki azalmadır. Silika (SiO₂), yarı kararlı hidrat fazlarla (CAH₁₀ & C₂AH₈) aşağıdaki Denklem 4 ve 5'de gösterildiği gibi strätlingite bileşimi (C₂ASH₈) oluşturma potansiyeline sahiptir:



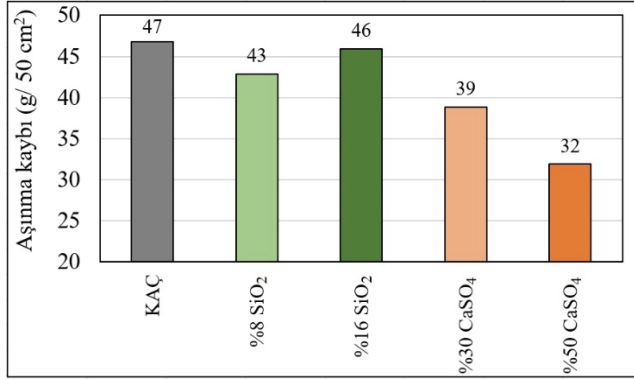
Bu çalışmadaki SiO₂ katkısı, uzun dönemde referans KAÇ harcında meydana gelen dönüşüm reaksiyonlarını strätlingite oluşumu ile engellediği için gözeneklilik artışının meydana gelmediği ve böylece SiO₂ katkılı harçlarda dayanım kayıplarının referans KAÇ harcına kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığı değerlendirilmiştir.

3.2.3. Aşınma Deneyi Sonuçları

28 günlük katkısız ve katkılı KAÇ harçlarının aşınma kaybı değerleri Şekil 10'da sunulmuştur. Mineral katkı türü ve oranlarının sonuçlar üzerinde etkisi şu şekilde değerlendirilmiştir: %30 ve %50 oranlarında CaSO₄ katkısı içeren harçlar, %8 ve %16 SiO₂ kullanılarak oluşturulan harçlardan daha düşük aşınma kaybı değerlerine sahiptir. Katkı dozajı etkisinin aşınma üzerindeki etkisi incelendiğinde; SiO₂ katkı oranının %8'den %16'ya artışıyla aşınma artarken, CaSO₄ katkı oranının %30'dan %50'ye artışıyla aşınma miktarı azalmıştır. KAÇ harcına kıyasla, %8 SiO₂ ve %50 CaSO₄ katkılı harçların aşınma kaybı değerlerinin sırasıyla, %9 ve %32 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Yukarıdaki sonuçlar iki mekanizma ile açıklanabilir: 1) Atış [59], mineral katkı kullanımı ile çimento matrisi-agrega geçiş bölgesinin güçlendiğini ve böylece daha iyi aşınma direncinin oluştuğunu bildirmiştir. Buna göre, bu çalışmadaki referans KAÇ harcına kıyasla katkılı harçların, daha iyi agregabağlayıcı ara yüzey özellikleri oluşmasını sağlayarak aşınma direncini geliştirdiği söylenebilir. 2) Literatürde [60] geçirimsizlikteki düşüşle aşınma direncinde artış olduğu belirtilmiştir. KAÇ'a kıyasla, SiO₂ ve CaSO₄ katkılarının daha küçük tane boyutlu olmasının (daha yüksek özgül yüzey alanı (Bölüm 2.2)), boşluklar için dolgu etkisi oluşturduğu ve böylece gözenekliliği düşürerek katkılı harçların aşınma direncinin arttığı düşünülmektedir.

Bu çalışmadaki ile aynı aşınma deneyi standardı (TS 699 [61], TS 2824 [62], TS EN 1338 [63]) ve Portland çimentosu (PÇ) kullanılarak aynı karışım oranları ile gerçekleştirilen çalışmalarda; aşınma kaybı değerlerinin 23 g/50 cm² (basınç dayanımı 49 MPa) [64] ve 35 g/50 cm² (basınç dayanımı 61 MPa) [65] aralığında olduğu bildirilmiştir. Ayrıca Felekoğlu ve diğerleri [66] tarafından benzer karışım oranlarında PÇ ve %2 çelik lifli kendiliğinden yerleşen harcın (basınç dayanımı 48 MPa) aşınma kaybı değeri 37 g/50 cm² olarak bildirilmiştir. PÇ ve iri agregada kullanılarak beton karışımlarda aşınma kaybı 27 g/50 cm² (basınç dayanımı 37 MPa) [67] ve 57 g/50 cm² (basınç dayanımı 65 MPa) [68] olarak raporlanmıştır. Bu çalışmadaki aşınma kaybı değerlerinin 32-47 g/50 cm² aralığında olduğu dikkate alınır, bu sonuçların literatürdeki değerlere yakın, hatta bazılarında daha iyi olduğu söylenebilir. Ayrıca aşınma direncinin; su/çimento oranı, agregada tipi ve özellikleri, hava sürüklenme, kür yöntemi gibi faktörlerden etkilendiği [60] ve bu nedenlerle sonuçlarda farklılıklar olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 10 - KAÇ ve mineral katkı harçların aşınma kaybı değerleri

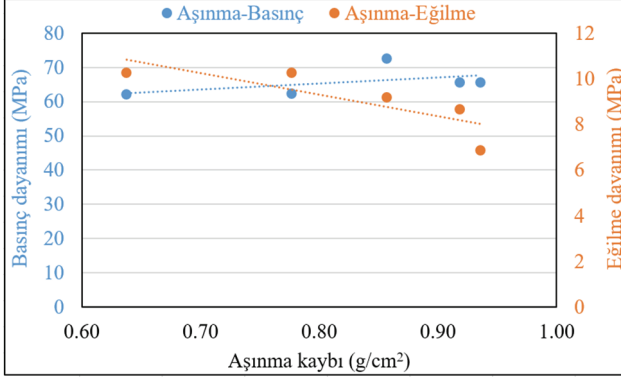
3.2.4. Basınç - Eğilme - Aşınma Dayanımları Arasındaki İlişkiler

KAÇ, %8 SiO₂, %16 SiO₂, %30 CaSO₄ ve %50 CaSO₄ harçlarına ait eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranları sırasıyla; 0.10-0.20, 0.11-0.16, 0.12-0.17, 0.16-0.19, 0.14-0.19 aralığındadır. Bu sonuçlar mineral katkı ikamesinin eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranlarındaki değişkenliği azalttığını göstermektedir. Portland çimentosu ile üretilen beton için eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranının yaklaşık 0.11-0.23 arasında değiştiği bilinmektedir [69]. Çalışma kapsamındaki KAÇ ve mineral katkı harçların tüm eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranlarının 0.10-0.20 arasında kaldığı ve Portland çimentosu ile üretilen betonlarla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Aşınma kaybı ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki 28. gün sonuçlarına göre elde edilen ilişkiler Şekil 11’de verilmiştir. Beklendiği üzere aşınma kaybı ile eğilme dayanımı arasında güçlü negatif bir korelasyon söz konusudur. Ancak bazı araştırmacılar [59], [70], [71] basınç dayanımı yüksek olan Portland çimentolu beton karışımlarının aşınma dayanımının da yüksek olduğunu bildirmelerine rağmen, bu çalışmada aşınma kaybı ile basınç dayanımı arasında herhangi bir ilişki tespit edilememiştir. Bu sonuç, ilk 28 günde KAÇ’da meydana gelen faz değişimlerinin eğilme dayanımından ziyade basınç dayanımında daha etkili olduğunu göstermektedir. Basınç dayanımı numunenin tüm kesitine etki eden gerilme üzerinden belirlenirken, eğilme dayanımı numunede tek bir noktada oluşan gerilme üzerinden hesaplanmakta (üç noktalı eğilme deneyi için) ve bu nedenle faz dönüşümlerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin daha baskın olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca numunelerdeki oluşabilecek mikro çatlaklar; basınç gerilmeleri etkisinde kapanma eğiliminde olduğundan, basınç dayanımı üzerindeki etkisinin, eğilme dayanımı ve aşınma kaybına kıyasla daha az olduğu değerlendirilebilir. Diğer bir ifadeyle; mikro çatlakların eğilme dayanımında oluşacak çekme gerilmesinin büyüklüğüne ve aşınmada oluşacak parça kopmalarına etkileri nedeniyle, basınç dayanımına kıyasla eğilme dayanımı ve aşınma kaybı üzerinde daha etkili olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Bir başka çalışmada yukarıdaki hipotezi güçlendirecek bulgular şu şekilde sunulmuştur: Aşınma-eğilme dayanımı ilişkisinin, eğilme-basınç dayanımı ilişkisinden daha kuvvetli olduğu bildirilmiştir [65]. Bu sonuç yazarlar tarafından şu şekilde açıklanmıştır: Malzemede oluşan parça kopmalarının (aşınma) genellikle çekme dayanımının ya da çekme birim uzama

kapasitesinin aşılmasından dolayı olduğu, ancak basınç durumunda ise böyle bir durum söz konusu olmadığı ve bu durumun aşınma ile eğilme dayanımı arasında daha kuvvetli bir ilişkinin elde edilmesini sağladığı değerlendirilmiştir.

Özet olarak, eğilme dayanımı ve aşınma kaybı benzer davranış gösterirken basınç dayanımı ile aşınma kaybı arasında net bir ilişki elde edilememiştir. Ancak söz konusu hipotezleri güçlendirmek için daha geniş kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır.



Şekil 11 - KAÇ ve mineral katkılı harçların aşınma kaybı ile basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki

4. SONUÇLAR

1) Taze hal deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde;

- SiO₂ katkılı harçların diğer harçlara kıyasla daha fazla yayılma davranışı gösterdiği, daha akıcı kıvama sahip olduğu ve prize daha geç başlayıp daha geç bitirdiği belirlenmiştir. Bu bulgular dikkate alındığında, SiO₂ katkılı kalsiyum alüminat çimentolu harçların saha uygulamalarında, zemin tesviye betonu olarak kullanımı bağlamında diğer harçlara kıyasla en elverişli yapıda olduğu düşünülmektedir.

- CaSO₄ katkılı harçların ise daha yoğun ve viskoz yapıya sahip olması, aynı zamanda prize daha erken başlayıp daha erken bitirmesi göz önüne alındığında; tamir, onarım harcı, yapıstırıcı gibi hızlı servise sokulması gereken uygulamalarda en etkili seçenek olduğu sonucuna varılmıştır.

2) Katkı türü, katkı dozajı ve zaman etkileri altında basınç dayanımlarında aşağıdaki gibi sonuçlar elde edilmiştir.

- Referans KAÇ harcının basınç dayanımı 3. günde en yüksek değere ulaşmıştır, ancak 400. gündeki basınç dayanımı, 3. gündeki değerine göre %47 oranında düşüktür.

- Katkılı harçların basınç dayanımları, 28 güne kadar sürekli artış göstererek 62-73 MPa seviyelerine ulaşmasına rağmen, bekleme süresi uzadıkça “%8 SiO₂”, “%16 SiO₂” ve “%30 CaSO₄” katkılı harçların basınç dayanımlarında sırasıyla %27, %12 ve %9 mertebelerinde azalma meydana gelmiştir. Ancak %50 CaSO₄ içeren harcın basınç dayanımında bekleme süresinin daha da artmasıyla düşüş olmadığı tespit edilmiştir (62 MPa).

- 400. günde yüksek mineral katkılı harçların (%16 SiO₂ ve %50 CaSO₄) düşük mineral katkılı harçlara (%8 SiO₂ ve %30 CaSO₄) kıyasla, basınç dayanımı değerleri %8-9 daha yüksektir. Katkılı harçların (%8 SiO₂, %16 SiO₂, %30 CaSO₄ ve %50 CaSO₄) 400. gündeki basınç dayanımları, katkısız referans KAÇ harcına göre sırasıyla %35, %46, %44 ve %57 mertebelerinde daha yüksektir. Her iki katkının da uzun vadeli basınç dayanımında (bu çalışma için 400 güne kadar) dönüşüm kaynaklı basınç dayanımı kaybını önlemede etkili olduğu sonucu elde edilmiştir.

3) Aşınma deneyi sonuçlarına göre; referans KAÇ harcına kıyasla, %8 SiO₂ ve %50 CaSO₄ katkılı harçların aşınma kaybı değerlerinin sırasıyla, %9 ve %32 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. CaSO₄ katkılı harçlar, SiO₂ katkılı harçlardan daha düşük aşınma kaybı değerlerine sahiptir. Öte yandan katkı dozajı artışıyla; SiO₂ katkılı harçlarda aşınma kaybı artarken, CaSO₄ katkılı harçlarda azalmaktadır.

4) Aşınma kaybı ile eğilme dayanımı arasında güçlü negatif korelasyon tespit edilmiş, ancak aşınma kaybı ile basınç dayanımı arasında belirgin bir ilişki gözlenmemiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021.KB.FEN.018 numaralı proje hibesi kapsamında maddi olarak desteklenen, ilk yazarın doktora tezinin bir parçasını oluşturmaktadır. Desteklerinden dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] N. Y. Mostafa, Z. I. Zaki, and O. H. Abd Elkader, "Chemical activation of calcium aluminate cement composites cured at elevated temperature," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 10, pp. 1187–1193, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.002.
- [2] A. Macias, A. Kindness, and F. P. Glasser, "Corrosion behaviour of steel in high alumina cement mortar cured at 5, 25 and 55°C: Chemical and physical factors," *J. Mater. Sci.*, vol. 31, no. 9, pp. 2279–2289, 1996, doi: 10.1007/BF01152936.
- [3] H. M. Son, S. Park, H. Y. Kim, J. H. Seo, and H. K. Lee, "Effect of CaSO₄ on hydration and phase conversion of calcium aluminate cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 224, pp. 40–47, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.004.
- [4] S. Moehmel, W. Gessner, T. A. Bier, and C. Parr, "The influence of microsilica on the course of hydration of monocalcium aluminate," in *In International conference on calcium aluminate cements*, 2001, pp. 319–330.
- [5] J. D. Birchall, A. J. Howard, and K. Kendall, "Flexural strength and porosity of cements," *Nature*, vol. 289, no. 5796, pp. 388–390, 1981, doi: 10.1038/289388a0.
- [6] K. L. Scrivener and A. Capmas, *Calcium Aluminate Cements BT - Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fourth Edition)*. 2003.

- [7] K. L. Scrivener, J. L. Cabiron, and R. Letourneux, “High-performance concretes from calcium aluminate cements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1215–1223, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00103-9.
- [8] H. F. Taylor, *Cement chemistry*. London: Thomas Telford, 1997.
- [9] J. Matusinovic, T., Vrbos, N., and Sipusic, “Rapid setting and hardening calcium aluminate cement materials,” *Zement-Kalk-Gips International*, vol. 58, no. 5, pp. 72–79, 2005.
- [10] E. Sakai, T. Sugiyama, T. Saito, and M. Daimon, “Mechanical properties and microstructures of calcium aluminate based ultra high strength cement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 966–970, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.01.001.
- [11] H. Fryda, K. L. Scrivener, G. Chanvillard, and C. Feron, “Relevance of laboratory tests to field applications of calcium aluminate cement concretes,” in *In International conference on calcium aluminate cements*, 2001, pp. 227–246.
- [12] L. G. Andiön, P. Garcés, F. Cases, C. García-Andreu, and J. L. Vazquez, “Metallic corrosion of steels embedded in calcium aluminate cement mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 9, pp. 1263–1269, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00572-5.
- [13] H. Lamour, V. H. R., Monteiro, P. J. M., Scrivener, K. L., and Fryda, “Mechanical properties of calcium aluminate cement concretes,” in *In International conference on calcium aluminate cements*, 2001, pp. 199–213.
- [14] L. Scheinherrová and A. Trník, “Hydration of calcium aluminate cement determined by thermal analysis,” in *AIP Conference Proceedings*, 2017, doi: 10.1063/1.4994514.
- [15] M. D. M. Alonso, M. Palacios, and F. Puertas, “Effect of polycarboxylate-ether admixtures on calcium aluminate cement pastes. Part 2: Hydration studies,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 52, no. 49, pp. 17330–1734, 2013, doi: 10.1021/ie401616f.
- [16] Ş. Alpaslan and K. Tosun-Felekoğlu, “Polikarboksilat Bazlı Süperakışkanlaştırıcıların Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Kıvam Koruma Performansı Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim. Derg.*, pp. 140–154, 2019.
- [17] G. Türedi, Ö. Kasap Keskin, and S. B. Keskin, “Self-compacting mortar production by using calcium aluminate cement,” *Mugla J. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 18–27, 2020, doi: 10.22531/muglajsci.686144.
- [18] O. Akhlaghi, Y. Z. Menciloglu, and O. Akbulut, “Poly(carboxylate ether)-based superplasticizer achieves workability retention in calcium aluminate cement,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1038/srep41743.
- [19] H. M. Son, S. M. Park, J. G. Jang, and H. K. Lee, “Effect of nano-silica on hydration and conversion of calcium aluminate cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 169, pp. 819–825, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.011.
- [20] J. Ding, Y. Fu, and J. J. Beaudoin, “Strätlingite formation in high alumina cement - silica fume systems: Significance of sodium ions,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 6, pp. 1311–1319, 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00124-U.

- [21] H. J. Yang, K. Y. Ann, and M. S. Jung, "Development of strength for calcium aluminate cement mortars blended with GGBS," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2019, doi: 10.1155/2019/9896012.
- [22] B. Majumdar, A. J., Edmonds, R. N., ve Singh, "Hydration of calcium aluminates in presence of granulated blast furnace slag," in *Calcium Aluminate Cements*, 1990, pp. 259–271.
- [23] Ö. Kirca, I. Özgür Yaman, and M. Tokyay, "Compressive strength development of calcium aluminate cement-GGBFS blends," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 163–170, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.016.
- [24] J. F. Zapata, H. A. Colorado, and M. A. Gomez, "Effect of high temperature and additions of silica on the microstructure and properties of calcium aluminate cement pastes," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 9, no. 6, pp. 323–349, 2020, doi: 10.1080/21650373.2020.1737593.
- [25] M. Heikal, M. S. Morsy, and M. M. Radwan, "Electrical conductivity and phase composition of calcium aluminate cement containing air-cooled and water-cooled slag at 20, 40 and 60 °c," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 7, pp. 1438–1446, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.027.
- [26] M. Heikal and M. M. Radwan, "Physico-chemical properties and microstructure of some blended systems," *Silic. Ind.*, vol. 71, no. 9, pp. 161–166, 2006.
- [27] A. J. Majumdar, R. N. Edmonds, and B. Singh, "Hydration of Secar 71 aluminous cement in presence of granulated blast furnace slag," *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 7–14, 1990, doi: 10.1016/0008-8846(90)90111-A.
- [28] A. J. Majumdar, B. Singh, and R. N. Edmonds, "Hydration of mixtures of 'Ciment Fondu' aluminous cement and granulated blast furnace slag," *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 197–208, 1990, doi: 10.1016/0008-8846(90)90072-6.
- [29] M. Heikal, M. M. Radwan, and M. S. Morsy, "Influence of curing temperature on the physicochemical, characteristics of calcium aluminate cement with air-cooled slag or water-cooled slag," *Ceram. - Silikaty*, vol. 48, no. 4, pp. 185–196, 2004.
- [30] N. Y. Mostafa and P. W. Brown, "Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: Isothermal conduction calorimetry," *Thermochim. Acta*, vol. 435, no. 12, pp. 162–167, 2005, doi: 10.1016/j.tca.2005.05.014.
- [31] A. J. Majumdar and B. Singh, "Properties of some blended high-alumina cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 22, no. 6, pp. 1101–1114, 1992, doi: 10.1016/0008-8846(92)90040-3.
- [32] M. Collepardi, S. Monosi, and P. Piccioli, "The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of aluminous cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 5, pp. 961–968, 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00091-P.
- [33] C. Gosselin, E. Gallucci, and K. Scrivener, "Influence of self heating and Li₂SO₄ addition on the microstructural development of calcium aluminate cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 10, pp. 1555–1570, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.06.012.

- [34] D. Torrén-Martín, L. Fernández-Carrasco, and M. T. Blanco-Varela, “Conduction calorimetric studies of ternary binders based on Portland cement, calcium aluminate cement and calcium sulphate,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 114, no. 2, pp. 799–807, 2013, doi: 10.1007/s10973-013-3003-9.
- [35] I. Santacruz *et al.*, “Structure of stratlingite and effect of hydration methodology on microstructure,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 28, no. 1, pp. 13–22, 2016, doi: 10.1680/adcr.14.00104.
- [36] L. Xu, P. Wang, and G. Zhang, “Formation of ettringite in Portland cement/calcium aluminate cement/calcium sulfate ternary system hydrates at lower temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 347–352, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.078.
- [37] F. Song, Z. Yu, F. Yang, Y. Liu, and Y. Lu, “Strätlingite and calcium hemicarboaluminate hydrate in belite-calcium sulphoaluminate cement,” *Ceram. - Silikaty*, vol. 58, pp. 269–274, 2014.
- [38] J. F. Georgin and E. Prud’Homme, “Hydration modelling of an ettringite-based binder,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 76, pp. 51–61, 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.009.
- [39] M. P. Adams, R. D. Lute, E. G. Moffatt, and J. H. Ideker, “Evaluation of a procedure for determining the converted strength of calcium aluminate cement concrete,” *J. Test. Eval.*, vol. 46, no. 4, pp. 1659–1672, 2018, doi: 10.1520/JTE20160277.
- [40] ASTM, “ASTM C1437 - Standard test method for flow of hydraulic cement mortar,” 2013.
- [41] “TS EN 196-3 : Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genişleme tayini,” Ankara, 2017.
- [42] B. Felekoğlu, “Yüksek performanslı mikro beton tasarımı,” Dokuz Eylül Üniversitesi, 2009.
- [43] M. Westerholm, B. Lagerblad, and E. Forssberg, “Rheological properties of micromortars containing fines from manufactured aggregates,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, no. 6, pp. 615–625, 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9173-1.
- [44] M. Keskinatış and B. Felekoğlu, “The influence of mineral additive type and water/binder ratio on matrix phase rheology and multiple cracking potential of HTPP-ECC,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 173, pp. 508–519, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.038.
- [45] TS EN14157, “TS EN 14157. Doğal taşlar - Deney yöntemleri - Aşınma direncinin tayini,” Ankara, 2017.
- [46] F. Eren, “Kalsiyum alüminat çimentolu harçların reolojik davranışlarının ve uzun dönemli dayanım-dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi,” Dokuz Eylül Üniversitesi, 2022.
- [47] C. Atış, “Yüksek oranda uçucu kül kullanımı ile üretilen betonun aşınma direnci,” *Tek. Dergi*, vol. 11, no. 4, pp. 2217–2230, 2000.

- [48] C. Atiş, “Uçucu kül içeren beton için aşınma-boşluk oranı-dayanım modeli,” *Tek. Dergi*, vol. 14, no. 4, pp. 3035–3040, 2003.
- [49] M. Keskinateş, “Çoklu çatlak davranışı gösteren farklı polimerik lifli çimento esaslı kompozitlerin mikromekanik tabanlı tasarımları ve kıyaslanması,” Dokuz Eylül Üniversitesi, 2022.
- [50] G. Land and D. Stephan, “The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement,” *J. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 2, pp. 1011–1017, 2012, doi: 10.1007/s10853-011-5881-1.
- [51] J. H. Ideker, “Early-Age Behavior of Calcium Aluminate Cement Systems,” The University of Texas at Austin, 2008.
- [52] H. Kim, H. M. Son, and H. K. Lee, “Review on recent advances in securing the long-term durability of calcium aluminate cement (cac)-based systems,” *Functional Composites and Structures*. 2021, doi: 10.1088/2631-6331/ac1913.
- [53] J. Skalny, I. Jawed, and H. F. W. Taylor, “Studies on hydration of cement-recent developments,” *World Cem Technol*, vol. 9, no. 6, pp. 183–6, 1978.
- [54] J. Bizzozero and K. L. Scrivener, “Limestone reaction in calcium aluminate cement-calcium sulfate systems,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 76, pp. 159–169, 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.05.019.
- [55] F. Eren, M. Keskinateş, B. Felekoğlu, and K. Tosun-Felekoğlu, “The role of Pre-Heating and mineral additive modification on Long-Term strength development of calcium aluminate cement mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 340, no. 127720, 2022.
- [56] M. Röbber and I. Odler, “Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes I. Effect of porosity,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 15, no. 2, pp. 320–330, 1985, doi: 10.1016/0008-8846(85)90044-4.
- [57] N. Ukrainczyk, T. Matusinovic, S. Kurajica, B. Zimmermann, and J. Sipusic, “Dehydration of a layered double hydroxide-C₂AH₈,” *Thermochim. Acta*, vol. 464, no. 1–2, pp. 7–15, 2007, doi: 10.1016/j.tca.2007.07.022.
- [58] J. Ding, Y. Fu, and J. J. Beaudoin, “Study of hydration mechanisms in the high alumina cement - Sodium silicate system,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 5, pp. 799–804, 1996, doi: 10.1016/S0008-8846(96)85017-4.
- [59] C. D. Atiş, “High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 274–277, 2002, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2002)14:3(274).
- [60] G. K. Febin *et al.*, “Strength and durability properties of quarry dust powder incorporated concrete blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 228, no. 116793, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116793.
- [61] “TS 699: Doğal yapı taşları - İnceleme ve laboratuvar deney yöntemleri,” Ankara, 2009.
- [62] “TS 2824 EN 1338/AC: Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları,” Ankara, 2009.

- [63] “TS EN 1338/AC: Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları,” Ankara, 2006.
- [64] O. Karahan, C. D. Atış, and K. Arı, “Metakaolin ve silis dumanı içeren harçların aşınma direncinin karşılaştırılması,” Kayseri, 2011.
- [65] C. D. Atış, O. Karahan, and K. Arı, “Alkali ile aktifleştirilmiş cüruf harcının aşınma direncinin araştırılması,” Kayseri, 2010.
- [66] B. Felekoğlu, S. Türkel, and Y. Altuntaş, “Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 9, pp. 391–396, 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.010.
- [67] A. Kandemir, “Kendiliğinden yerleşen betonun kalıcılık özelliklerinin incelenmesi,” Dokuz Eylül Üniversitesi, 2005.
- [68] O. Karpuz and M. V. Akpınar, “İnce Agregalı Türevli Kaplama Betonunun Aşınma Direncine Etkisi,” *Yapı Teknol. Elektron. Derg.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–8, 2009.
- [69] D. Mindess, S. Young, F. J., & Darwin, *Concrete 2nd Editio.* 2003.
- [70] Ş. E. Güldür, “Mikronize kalsit katkısının beton özelliklerine etkisinin araştırılması,” Niğde Üniversitesi, 2013.
- [71] A. Mardani-Aghabaglou, H. Hosseinnezhad, O. C. Boyacı, Ö. Arıöz, İ. Ö. Yaman, and K. Ramyar, “Abrasion resistance and transport properties of road concrete,” in *12th International Symposium on Concrete Roads*, 2014, pp. 23–26.