

Metakaolin ve Kolemanit Atığı İçeren Harç Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Performansının İncelenmesi

Arif Benlioğlu¹, Musa Yıldırım¹, Süleyman Özen^{1*} ve Muhammet Gökhan Altun²

¹İnşaat Mühendisliği, Bursa Teknik Üniversitesi, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye

*(suleyman.ozen@btu.edu.tr)

Özet – Hızla artan nüfus ve beraberinde gelişen sanayi atık içeriğinin çeşitliliğinin ve hacminin artmasına sebep olmaktadır. Atıkların çevre üzerindeki olumsuz etkisi, geri kazanılmasını zorunlu hale getirmektedir. Beton üretiminde bazı atıklar agrega ve çimento yerine kullanılabilir. Bu çalışmada, kolemanit üretimi sırasında ortaya çıkan atık malzemenin yeniden kullanımı değerlendirilmiş olup metakaolin ve kolemanit atık kullanımının çimentolu sistemlerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki performansları ile basınç dayanımı, su emme ve ultrases geçiş hızı (UPV) özelliklerine karma etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda çimento ağırlığının %5, 10 ve 15 oranlarında metakaolin, %1, 3, 5 ve 7 oranlarında ise kolemanit atığı ikame edilmiştir. Hazırlanan karışımların yayılma, 1, 28, 63 ve 90 günlük basınç dayanımı, 63 ve 90 günlük su emme kapasiteleri ve UPV değerleri, 28 ve 90 günlük yüksek sıcaklık altındaki dayanımları belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, mineral katkı kullanımını işlenebilirliği azaltmış dolayısıyla akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacını arttırmıştır. Kolemanit atığı ve metakaolin miktarları arttıkça su emme oranlarının azaldığı ve ultra ses geçiş hızı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Metakaolin içeren numunelerde kolemanit atığı miktarının artması ile numunelerin 1 günlük basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Numunelerde kür süresi arttıkça kolemanit atığının olumsuz etkisinin azaldığı ve metakaolinin dayanım üzerine olumlu etkisi görülmüştür. Karışımlarda kolemanit atığı içeriğinin artmasıyla numunelerin yüksek sıcaklığa karşı direncinde artış olmuştur. Yüksek sıcaklıkla dayanımdaki azalma oranlarının düştüğü tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Kolemanit Atığı, Metakaolin, Yüksek Sıcaklık, Basınç Dayanımı, Su Emme

I. GİRİŞ

Dayanımı ve dayanıklılığı yüksek yapı malzemelerinin kullanımı ile ekonomik ömrü yüksek sürdürülebilir yapılar inşa edilebilmekte ve iklim değişikliğine karşı dirençli kentler oluşturulmasına katkı sağlanabilmektedir. Betonun servis ömrü ile korozyon, karbonatlaşma, sülfat etkisi, donma çözülme gibi birçok çevresel etkiye karşı dayanıklılığı arasında paralel bir ilişki söz konusudur [1], [2], [3]. İklim değişikliği ile birlikte yangınların oluşma olasılığı da giderek artmaktadır. Yangın tehlikesi, insan güvenliği haricinde yapıların stabilitesini ve servis ömrünü de doğrudan etkileyen risklerden birisidir. Buna ilaveten yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan fırınlar, bacalar,

termik santraller, nükleer santraller gibi yapılar göz önüne alındığında betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki performansı önem arz etmektedir [4], [5].

Öte yandan sürdürülebilir yapılar için atık malzemelerin geri kazanımı günümüzde artık zorunluluk haline gelmiştir. Doğal kaynak tüketiminin çok fazla olduğu beton üretiminde atık malzemelerin geri kazanımı çevre ve ülke ekonomileri açısından oldukça önemlidir. Halihazırda beton üretiminde yaygın olarak kullanılan uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünlerin haricinde atık betonlar, tarımsal atıklar, plastik atıkları, cam atıkları, çeşitli maden atıkları gibi birçok atık malzemenin beton teknolojisinde geri kazanımı üzerine çalışmalar ve

araştırmalar sürdürölmektedir [6], [7]. Ölkemiz, Dünya bor rezervlerinin büyük çoğunluğuna sahiptir. Kolemanit kaynakları açısından zengin olan ölkemizde kolemanitin işlenmesi sırasında oluşan atık hacmi ve bu atıkların yeraltı suyunu kirletme potansiyeli beraberinde birçok çevresel riski oluşturmaktadır. Dolayısıyla son yıllarda bu atıkların değerlendirilmesi amacıyla çimentolu sistemlerde kullanımına yönelik çalışmalar yaygınlaşmaktadır [8], [9].

Durgun ve Sevinç (2019) [10] betonda kolemanit atığı, cam tozu ve cüruf kullanımının yüksek sıcaklık etkisi altındaki performansını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, kolemanit atığı kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Aksoğan ve arkadaşları (2016) [11] tarafından yapılan çalışmada kolemanit ve barit ince agrega yerine, bazı tarımsal atıklar ise çimento yerine ikame edilmiş olup söz konusu malzemelerin dayanım, sülfat etkisi, aşınma, donma çözölme ve radyasyon engelleme açısından etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, kolemanit, barit ve diğer tarımsal atıkların beton üretiminde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Uçar ve arkadaşları (2021) [12] kolemanit ve üleksitin betonda kullanımının dayanım ve radyasyon engelleme performansı bakımından avantaj sağladığını tespit etmişlerdir. Kula ve arkadaşları (2001), (2002) [13], [14] tarafından yapılan çalışmalarda, kolemanit ve tinkal atıkları ile uçucu kül ve dip külü kullanımının betonun dayanım ve priz süresine etkileri belirlenmiş olup kolemanit atığının çimentolu sistemlerde kullanılabileceği bildirilmiştir. Bu çalışmada ise metekaolin ve kolemanit atığı kullanımının harç karışımlarının su emme, UPV ve basınç dayanımı ile yüksek sıcaklık altındaki performansına etkileri incelenmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

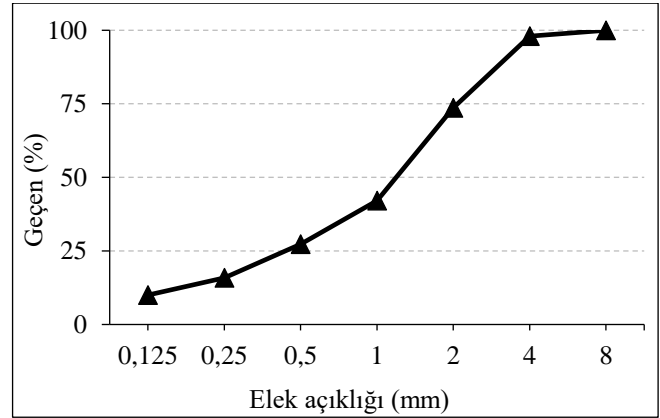
A. Malzemeler ve Karışım Oranları

Harç üretiminde CEM-I 42,5R Portland Çimentosu, tane büyüklüğü 0-5 mm olan kırma kum, şebeke suyu, metekaolin ve kolemanit atığı kullanılmıştır. Tablo 1'de karışımlarda kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları verilmiştir. Ayrıca karışımlarda hedef yayılmayı sağlamak için TS EN 934-2 standardına uygun süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. Katkı, 1,097 g/cm³ yoğunlukta, %36,35 katı madde içermekte ve pH seviyesi 3,82'dir. Kullanılan kırma

kumun özgül ağırlığı 2,65 g/cm³ olup, elek analizi sonuçları şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

Bileşen (%)	Çimento	Metakaolin	Kolemanit Atığı
SiO ₂	18,86	50,15	18,03
Al ₂ O ₃	5,71	41,68	7,23
Fe ₂ O ₃	3,09	0,97	0,337
CaO	62,7	0,31	23,45
MgO	1,16	0,32	19,98
SO ₃	2,39	0,04	0,40
Na ₂ O+0,658K ₂ O	0,92	0,38	0,32
B ₂ O ₃	-	-	2,30
Cl-	0,01	-	-
Çözölmez kalıntı	0,32	-	-
Kızdırma kaybı	3,2	2,32	16,83
Serbest CaO	1,26	-	-
Özgöl ağırlık	3,15	2,62	2,42
Blain inceliği (cm ² /gr)	3530	31210	-
45 µm kalan (%)	7,6	10,4	0



Şekil 1. Kum elek analizi sonuçları

Çalışma kapsamında 5 cm boyutlarında küp numuneler ASTM C109 standardına uygun olarak üretilmiştir. Su/bağlayıcı, kum/bağlayıcı ve yayılma değerleri sırasıyla 0,485, 2,75 ve 22,5±1,5 cm olarak belirlenmiştir. Karışımlarda metekaolin %5, 10 ve 15 ve kolemanit atığı ise %1, 3, 5 ve 7 oranlarında çimento yerine ikame edilmiştir. Üretilen harç karışım oranları ve yayılma değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Deneysel çalışmalar için 12 farklı karışım üretilmiş, 24 saat kalıpta bekletildikten sonra deney gününe kadar 20±2°C kirece doğgun suda kür uygulanmıştır.

Tablo 2. Harç karışım miktarları (g)

Numune Adı	Çimento	Metakaolin	Kolemanit Atığı	Kum	Su	Süper Akışkanlaştırıcı	Yayılma (mm)
MK5-KA1	470	25	5	1375	242,5	4,1	235
MK10-KA1	445	50	5	1375	242,5	4,4	225
MK15-KA1	420	75	5	1375	242,5	4,8	220
MK5-KA3	460	25	15	1375	242,5	6,7	235
MK10-KA3	435	50	15	1375	242,5	7,1	240
MK15-KA3	410	75	15	1375	242,5	7,8	225
MK5-KA5	450	25	25	1375	242,5	8,8	210
MK10-KA5	425	50	25	1375	242,5	9,3	225
MK15-KA5	400	75	25	1375	242,5	10,1	235
MK5-KA7	440	25	35	1375	242,5	12	215
MK10-KA7	415	50	35	1375	242,5	12,6	220
MK15-KA7	390	75	35	1375	242,5	13,2	235

B. Deneysel Metotlar

B.1. Su Emme ve Ultra Ses Geçiş Hızı Deneyleri

63 ve 90 günlük 50 mm küp numuneler üzerinde ASTM C642 standardına göre su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlgili karışımlardan üçer numune üretilerek ortalama değerleri hesaplanmıştır. Aynı numuneler üzerinde ASTM C597 standardına göre ultra ses geçiş hızı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ultra ses geçiş hızı deneyleri, küp numunelerin kalıba temas eden yüzeylerinden iki farklı yönde gerçekleştirilmiş ve her numunenin ultra ses geçiş hızı, bu iki farklı ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.

B.2. Basınç Deneyi

ASTM C109 standardına göre üretilen 50 mm boyutlarında 1, 28, 63 ve 90 günlük küp harç numuneler üzerinde basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımdan üçer numune üretilerek deney sonrası ortalama değerleri kaydedilmiştir.

B.3. Yüksek Sıcaklık Deneyi

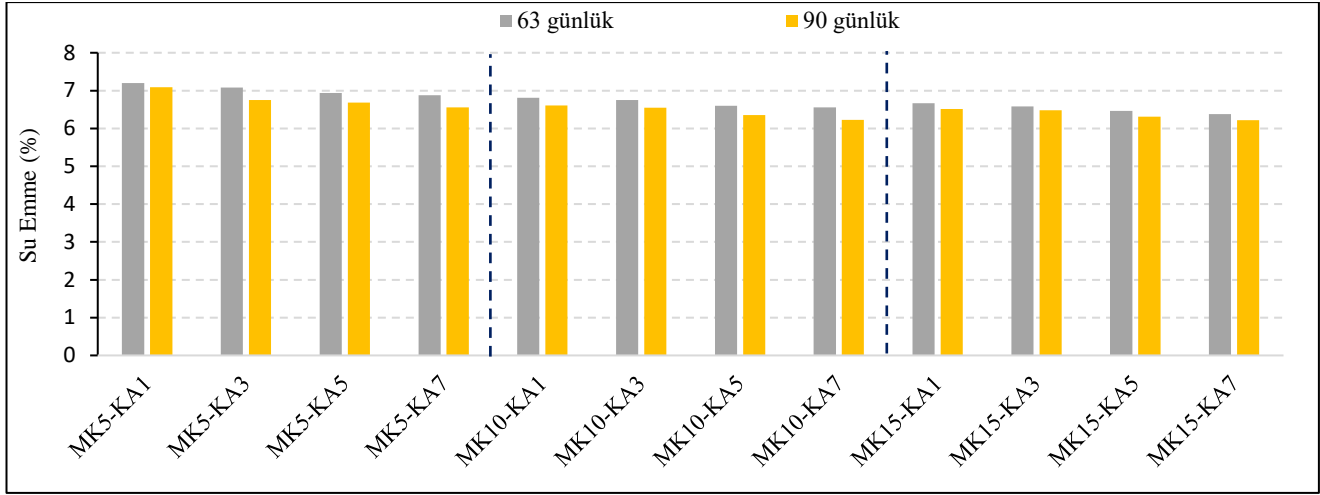
28 ve 90 günlük 50 mm boyutlarında küp harç numuneler kül fırınında ortam sıcaklığından itibaren 5°C/dk ısıtma hızıyla 300°C ve 600°C sıcaklıklara kadar çıkarılmıştır. Bu sıcaklıklarda 3 saat boyunca bekletildikten sonra fırın kapatılıp numuneler ortam sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış ve ortam sıcaklığına ulaşan numunelerin basınç dayanımları tespit edilmiştir.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. Su Emme Kapasitesi

Harç karışımların su emme deney sonuçları Şekil 2'de gösterilmektedir. Deney sonuçlarına bakıldığında karışımlardaki metakaolin ve kolemanit atığı ilavesinin artması sonucu su emme yüzdelерinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm karışımlardaki 90 günlük su emme kapasitesinin 63 günlük numunelere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 2 incelendiğinde en yüksek su emme miktarı MK5-KA1 karışımında %7,2 olarak tespit edilirken en düşük su emme miktarı ise MK15-KA7 karışımında %6,22 olarak tespit edilmiştir. %5, %10, %15 metakaolin ilave edilen 63 günlük harç karışımların su emme oranlarının ortalama değerleri sırasıyla %7,03, %6,68, %6,52 olarak elde edilirken 90 günlük ortalama su emme oranları sırasıyla %6,77, %6,44, %6,38 olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma çerçevesinde, farklı oranlarda metakaolin (%5, 10, 15) ve kolemanit atığı (%1, 3, 5, 7) kullanılarak harç karışımları hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda metakaolin ve kolemanit atığının karışımlara ilave edilmesiyle birlikte boşluk yapısının önemli ölçüde değiştiği düşünülmektedir. Metakaolin ilavesi harçlardaki boşluk oranını büyük ölçüde azaltmaktadır [15]. Tablo 1'den de görüldüğü üzere çimentodan daha ince olmasından dolayı metakaolinin dolgu malzemesi olmasının yanında puzolanik reaksiyonundan dolayı fark edilebilir düzeyde su emme değerlerini düşürmüştür [16].



Şekil 2. Farklı oranlarda metakaolin ve kolemanit atığı içeren karışımların 63 ve 90 günlük su emme kapasiteleri

B. Ultra Ses Geçiş Hızı

Şekil 3’de 63 ve 90 günlük küp numunelerin ultra ses geçiş hızı deney sonuçları verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde ultra ses geçiş hızları, harçlarda kullanılan metakaolin ve kolemanit atığı oranının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Bunun başlıca nedeni, ultra ses geçiş hızının metakaolin ve kolemanit atığı artışıyla birlikte daha kısa sürede geçmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, harç içerisinde metakaolin ve kolemanit atığı kullanım oranına bağlı olarak boşluk oranı azalmaktadır. Tüm karışım serilerindeki 90 günlük numunelerin ultra ses geçiş hızlarının 60 günlük numunelere kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Puzolanik reaksiyonun etkisiyle birlikte ileri yaşlardaki karışımların boşluk oranının azaldığı ve ultra ses geçiş hızlarının arttığı görülmektedir [17]. En yüksek ultrases geçiş hızı %15 metakaolin ve %7 kolemanit atığı içeren karışımda gözlemlenmiştir.

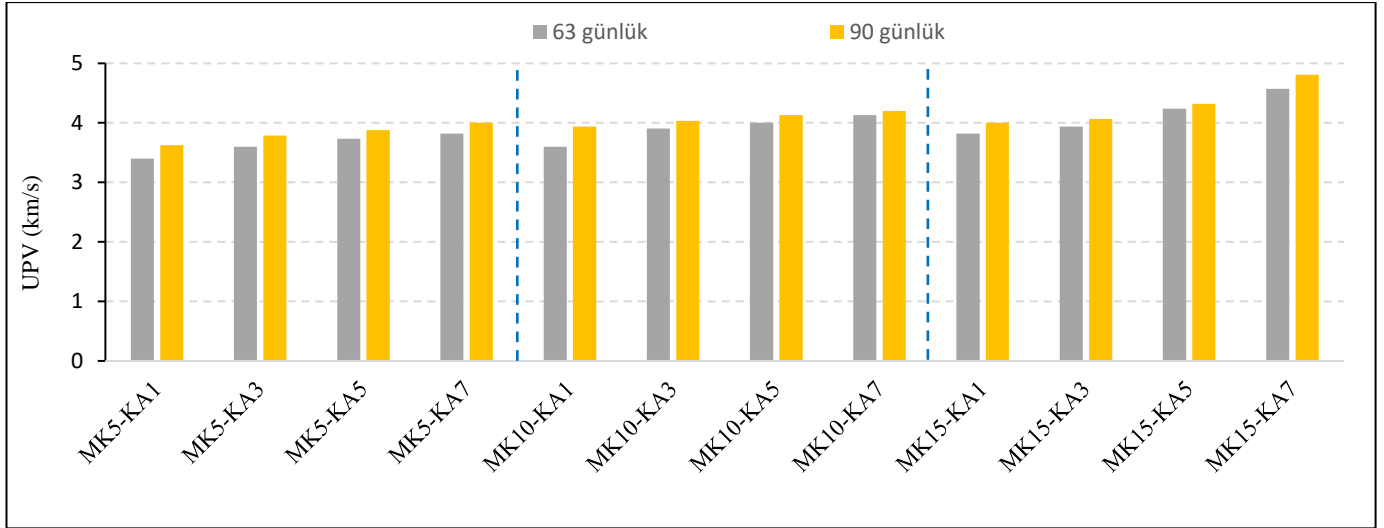
B. Basınç Dayanımı

Metakaolin ve kolemanit atığı içeren karışımların 1, 28, 63 ve 90 günlük basınç deneyi sonuçları Şekil 4’te verilmiştir. %5, %10, %15 metakaolin ilave edilen karışımlarda kolemanit atığı arttıkça 1 günlük basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Kolemanit atığı, belirli bir değerden sonra baskın bir etki göstererek, 1 günlük basınç dayanımlarında büyük düşümlere neden olmuştur. Aynı oranda kolemanit atığı

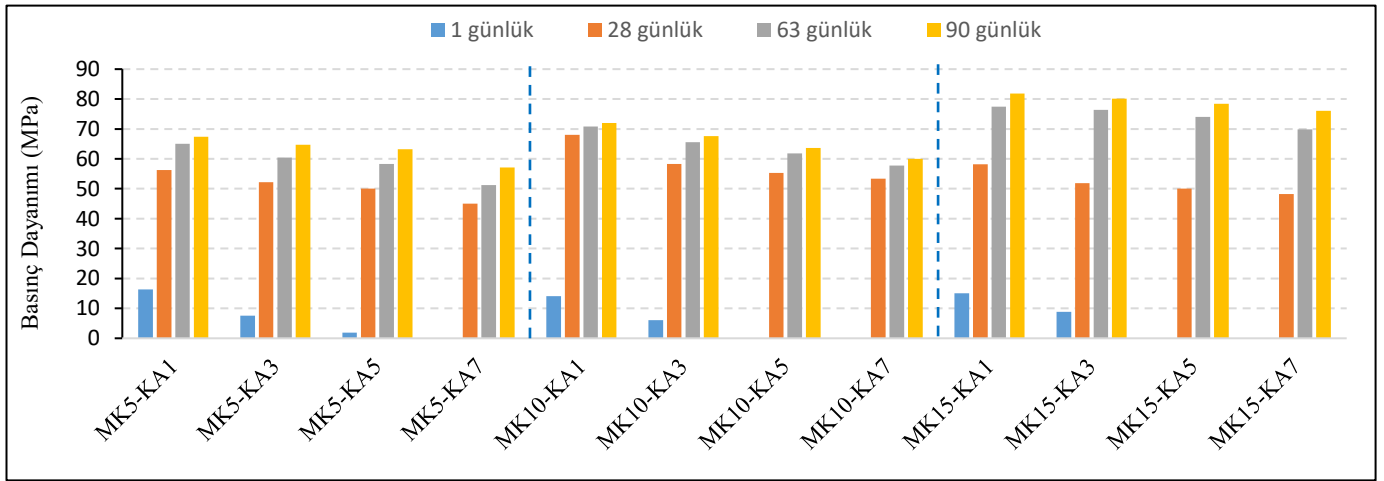
kullanılan karışımlardaki metakaolin miktarının artması ile birlikte 1 günlük numunelerin basınç dayanımının etkilenmediği tespit edilmiştir. %5 metakaolin ilave edilen karışım haricindeki tüm %5 ve %7 kolemanit atığı içeren karışımların 1 günlük basınç dayanımları numunelerin priz alamadığı gerekçesiyle ölçülememiştir. Erken yaşlarda dayanım değerlerinin düşmesinin ana nedeni, karışımlarda ortaya çıkan kalsiyum borat bileşenlerinin hidrasyon reaksiyonlarını yavaşlatması ve priz süresini uzatmasıdır [18].

Numunelerin 28 günlük dayanımları incelendiğinde aynı oranlarda kolemanit atığı kullanılan karışımlardaki metakaolin ilavesinin %5’ten %10’a çıkması durumunda dayanımlarda artış meydana gelmiştir. Metakaolin ilavesinin %15 olması durumunda ise dayanımlar %5 metakaolin ilave edilen karışımlar ile benzerlik göstermektedir. Dayanımlarda artış olmaması, çimento yerine kullanılan metakaolinin puzolanik etkisinden kaynaklı dayanım gelişimini geciktirmesine dayanmaktadır. Farklı oranlarda metakaolin ilave edilen karışımlardaki kolemanit atığı ilavesi arttıkça 28 günlük basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür.

56 ve 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde metakaolin ilavesinin dayanımları önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Özellikle en yüksek basınç dayanımları %15 metakaolin ilave edilen karışımlarda görülmüştür.



Şekil 3. Farklı oranlarda metakaolin ve kolemanit atığı içeren karışımların 63 ve 90 günlük ultra ses geçiş hızı değerleri



Şekil 4. Farklı oranlarda metakaolin ve kolemanit atığı içeren karışımların 1, 28, 63 ve 90 günlük basınç dayanımları

Bu artışın nedeni, metakaolinin çimento ile karşılaştırıldığında çok daha ince olmasından dolayı dolgu etkisi göstermesi ve ayrıca puzolanik reaksiyonun ileri yaşlarda basınç dayanımını arttırdığı söylenebilir [17]. Ayrıca karışımlarda metakaolin oranının %15 seviyesinde olması ileri yaş dayanımlarında kolemanit atığının olumsuz etkisini azaltmaktadır.

En yüksek basınç dayanımı MK15-KA1 karışımında 81,88 MPa olarak görülmüştür. 56 ve 90 günlük numunelere bakıldığında aynı metakaolin ilavesindeki kolemanit atığı oranının artması durumunda dayanımlarda düşüş görülmektedir. %15 metakaolin ilave edilen 90 günlük karışımlarda kolemanit atığı ilavesinin %1'den %7 ye çıkması durumunda dayanımlar %7,07 azalmıştır.

C. Yüksek Sıcaklık Dayanımı

63 günlük harç numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önceki ve sonraki basınç dayanımını değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir. 90 günlük harç numunelerinin değerleri ise Şekil 6'da gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık öncesi değerleri incelendiğinde karışımlarda metakaolin kullanım miktarı arttıkça basınç değerlerini arttırdığı görülmektedir. Metakaolin kimyasal içeriğinde bulundurduğu yüksek orandaki SiO₂ ve Al₂O₃ sayesinde daha fazla CaO ile birleşerek yeni dayanım bileşenleri oluşturmaktadır [18]. Bu bileşenler sayesinde basınç dayanımları artmıştır. Ancak bu bileşenlerin harç içyapısında içerisinde daha boşluksuz bir hacim oluşturması yüksek sıcaklık etkisi karşısında daha yüksek basınç

kayıpları yarattığı Yıldırım ve Özhan (2023) [19] tarafından yapılan çalışmada gösterilmiştir. Çimento kompozitlerde 300°C den sonra basınç dayanımında düşüşler başlar. Bunun başlıca sebebi CSH jelindeki kimyasal bağlı suyun buharlaşması, demir oksit ve alüminli bileşenlerdeki dehidratasyondur [20]. Önceki çalışmalara paralel olarak bu çalışmada da metakaolin miktarı arttıkça yüksek sıcaklık karşısındaki dayanıklılığın azaldığı görülmüştür. Jel boşluklarında meydana gelen serbest su, metakaolinin yarattığı az boşluklu içyapıda daha fazla gerilime sebep olduğu için 300°C sonrası dahi metakaolin içeren numunelerde daha fazla basınç dayanımı kaybına sebebiyet vermiştir. Örneğin 63 günlük MK5-KA1, MK10-KA1 ve MK15-KA1 serilerinde 300°C sıcaklığa maruz kalması sonrası sırasıyla yaklaşık %8, %20 ve %45 oranlarında basınç dayanımlarında kayıp belirlenmiştir. 90 günlük serilerinde bu değerler metakaolinin geç hidratasyonu nedeniyle yükselen ilk basınç dayanımlarına bağlı olarak bir miktar azalsa da yine de oldukça benzer bir azalış miktarı göstermiştir. 600°C mertebesinde bir sıcaklık ise çimento harçlarında daha ağır hasarlara sebebiyet verdiği bilinmektedir. Özellikle bu sıcaklık mertebesinde meydana gelen $Ca(OH)_2$ bileşiğinin ayrışması, kalsiyum karbonatın ve silika jellerinin zarar görmesi nedeniyle harç yapısı geri dönüşü olmayan bir hasara neden olur [21]. Bu bilgiye uygun olarak bu çalışmada da sıcaklık 600°C'ye ulaşıncaya tüm serilerde ciddi basınç kayıpları oluşmuştur. 300°C de olduğu gibi metakaolin kullanımı arttıkça, basınç dayanımı kayıpları artmıştır. 600°C sonrasında, 63 günlük MK5-KA1, MK10-KA1 ve MK15-KA1 serilerinde sırasıyla yaklaşık %28, %44 ve %64 oranında basınç dayanımlarında düşüş belirlenmiştir. Bu serilerin 90 günlük basınç dayanımı azalış oranları ise sırasıyla yaklaşık %20, %32 ve %58 olarak tespit edilmiştir.

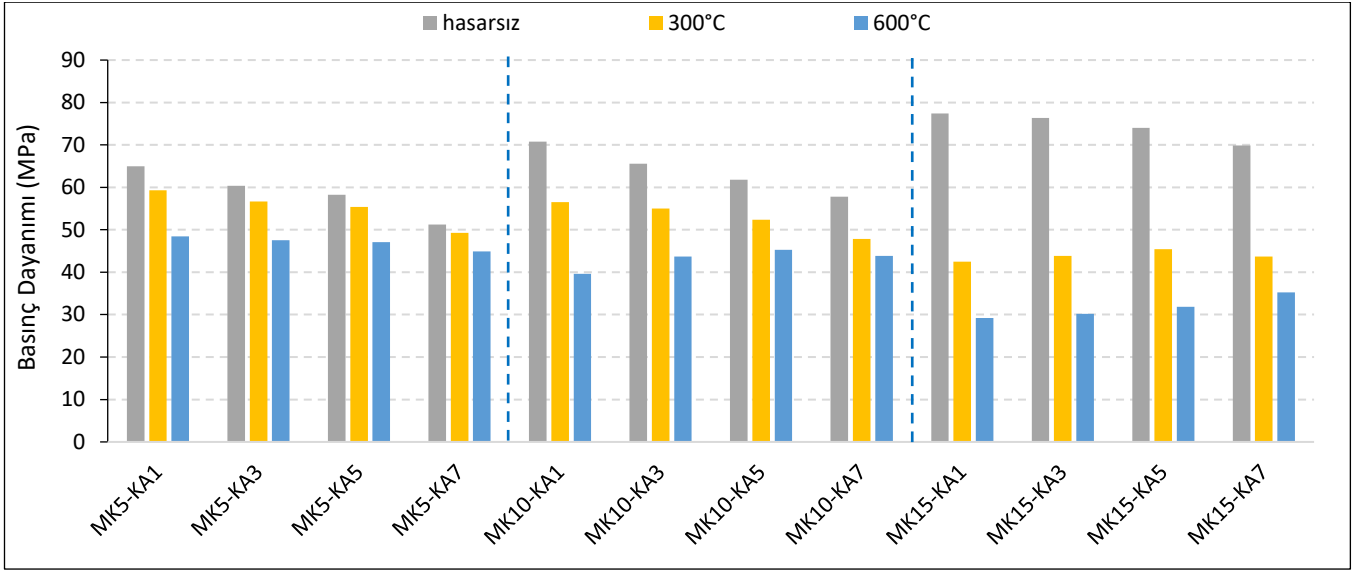
Metakaolinli karışımlara kolemanit atığı eklendiğinde ise yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımlarının azaldığı saptanmıştır. Bu durum Erdoğmuş (2014) [22] ve Özen ve arkadaşları (2023) [23] çalışmalarında da belirttiği gibi kolemanit atıklarının puzolanik etkisinin görülmemesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklık sonrası artık basınç dayanımları incelendiğinde ise kolemanit atıklarının dayanıklılık özelliğine katkı sağladığı saptanmıştır. Bunun yanı sıra kullanılan atık miktarı arttıkça yüksek sıcaklığa

karşı korunumda yükselmiştir. Kolemanit atıklarının bu olumlu etkisi Durgun ve arkadaşları (2022) [24] çalışmasında da bu çalışmaya paralel şekilde saptanmıştır. Deney sonuçlarında 300°C sonrasında M5-M10-M15 serilerinde, en düşük basınç dayanımı kaybı oranlarının kolemanit atığının en yüksek oranda ilave edildiği KA7'li serilerde belirlenmiştir. Örneğin 90 günlük MK5-KA1 serisinin basınç dayanımı değeri 300°C sıcaklık etkisi sonrası 67,42 MPa'dan 63,52'ye düşmüştür. Ancak MK5-KA7 serisinde 57,12 MPa'dan yalnızca 56,02'ye düşmüştür. Böylelikle yüksek sıcaklık öncesi dayanım kaybına sebebiyet veren kolemanit atığının, yüksek sıcaklık etkisi karşısında mevcut basınç dayanımı korunmasında oldukça etkin olduğu saptanmıştır. 600°C sonrası ise bu pozitif katkı daha da artmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası en çok hasar alan M15 serisinde bu durum Şekil 6'da açıkça görülmektedir. M15-KA1 serisi 600°C sıcaklığın yarattığı yıkıcı etki yüzünden basınç dayanımının %58,72'sini kaybederken, M15-KA7 serisi %44,43'lük bir kayıp göstermiştir. Böylelikle bu çalışma kolemanit atığının metakaolinin yüksek sıcaklığa karşı olan zayıflığını elimine ettiğini kanıtlamıştır.

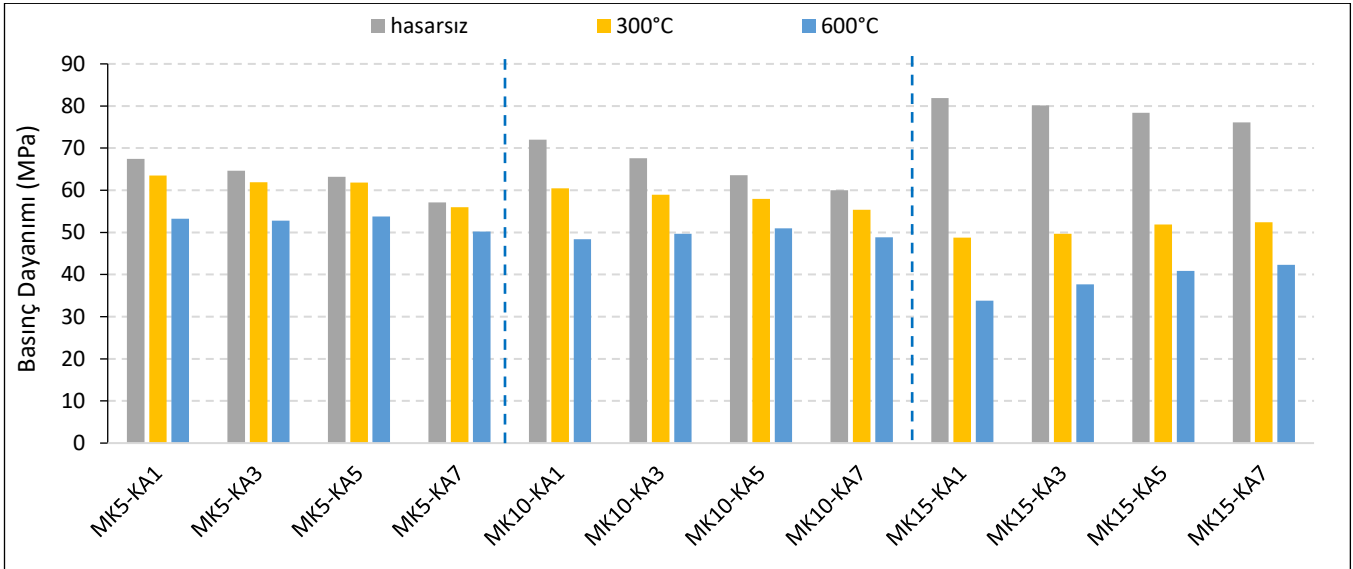
63 ve 90 günlük değerler arasındaki farklar incelendiğinde ise kolemanit atığının 90 gün sonunda yüksek sıcaklık karşısında daha yüksek direnç sağladığı görülmüştür. Ancak bu etkinin kolemanit atığının puzolanik etkisi olmaması göz önüne alındığında metakaolinle ilişkilendirilmiştir. Metakaolinin artan hidratasyonu sebebiyle 90 gün sonunda daha da dolu bir hacim oluşturduğu ve dolayısıyla yüksek sıcaklık etkisine karşı daha dayanıksız bir yapı meydana geldiği saptanmıştır. Kolemanit atığı yüksek sıcaklığa karşı daha hassas hale gelen bu yüksek dayanımı daha yüksek oranda korumayı başarmıştır. Böylelikle bu çalışma, yüksek dayanımlı ve performanslı kompozitlerde kolemanit atığı kullanımının özellikle yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığını oldukça olumlu etkilediğini göstermiştir.

IV. SONUÇLAR

- 63 ve 90 günlük harç numunelerde kolemanit atığı ve metakaolin miktarları arttıkça su emme oranlarının azaldığı ve ultra ses geçiş hızı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. 63 günlük harç numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımları



Şekil 6. 90 günlük harç numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki basınç dayanımları

Söz konusu iyileşmenin metakaolin ve kolemanit atığının inceliğine bağlı numunelerde boşlukların azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Metakaolin içeren harç numunelerde kolemanit atığı içeriğinin artması ile numunelerin 1 günlük basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Karışımların metakaolin miktarındaki değişimin numunelerin 1 günlük basınç dayanımları üzerine önemli bir etkisi olmamıştır. Numunelerde kür süresi arttıkça kolemanit atığının olumsuz etkisinin azaldığı ve metakaolinin dayanım üzerine olumlu etkisi görülmüştür. Özellikle 63 ve 90 günlük numunelerde incelik ve puzolanik etkiye bağlı

olarak metakaolin miktarı arttıkça dayanımlarda artış olmuştur.

- Harç numunelerinin 300°C ve 600°C yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması basınç dayanımlarında azalmaya sebep olmuştur. Karışımlarda kolemanit atığı içeriğinin artmasıyla numunelerin yüksek sıcaklığa karşı direncinde artış olmuştur. Yüksek sıcaklıkla dayanımdaki azalma oranlarının düştüğü tespit edilmiştir. Ancak metakaolin içeriğinin artması ise tersi bir durum sergilemiştir. Metakaolin içeriğindeki artış numunelerde boşluk oranlarını düşürmüş ve sıcaklık artışı sırasında buharlaşan jel suyunun matrise daha fazla hasar

vermesinden kaynaklı olarak dayanımlarda daha fazla düşüşe neden olmuştur. Ancak bu dayanım üzerindeki olumsuz etkiler karışımlara kolemanit atığı ilave edilmesiyle bir miktar azalmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar kolemanit ve kolemanit atığı temini için Eti Maden İşletmelerine, süperakışkanlaştırıcı katkı için Polisan Kimya A.Ş.'ye teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

- [1] B. Baradan, S. Türkel, H. Yazıcı, H. Ün, H. Yiğiter, B. Felekoğlu, K. Tosun, S. Aydın, M. Y. Yardımcı, A. Topal and A. U. Öztürk, "Beton.", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi* No:334, İzmir, Türkiye, 825 s, 2012.
- [2] B. Baradan, H. Yazıcı and H. Ün "Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık.", *THBB*, İstanbul, Türkiye, 318 s, 2010.
- [3] P. K. Mehta and P. Monteiro, "Concrete: microstructure, properties, and materials." *McGraw-Hill Publishing*, 1997.
- [4] A. Nadeem, S. A. Memon and T. Y. Lo, "The performance of fly ash and metakaolin concrete at elevated temperatures." *Construction and Building Materials*, 62, 67-76, 2014, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.073
- [5] N. Abdelmelek, N. S. Alimrani, N. Krelias and E. Lubloy "Effect of elevated temperatures on microstructure of high strength concrete based-metakaolin.", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2021, doi:10.1016/j.jksues.2021.08.001
- [6] T. Gönen, O. Onat, S. Cemalgil, B. Yilmazer and Y. T. Altuncu, "Beton teknolojisi için yeni atık malzemeler üzerine bir inceleme.", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 36-43, 2012.
- [7] M. Tokyay, "Cement and concrete mineral admixtures.", *CRC Press*, 2016.
- [8] U. K. Sevim, M. Ozturk, M. B. Bankir, and U. Aydin, "Utilization of Colemanite waste in Concrete Design," *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 4, no. 12, pp. 172–175, 2017, doi: 10.22161/ijaers.4.12.25.
- [9] Ü. Gemici, G. Tarcan, C. Helvacı, and A. M. Somay, "High arsenic and boron concentrations in groundwaters related to mining activity in the Bigadiç borate deposits (Western Turkey)," *Appl. Geochemistry*, vol. 23, no. 8, pp. 2462–2476, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.apgeochem.2008.02.013.
- [10] M. Y. Durgun and A. H. Sevinç, "High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 196, pp. 66–81, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.087.
- [11] O. Aksoğan, H. Binici and E. Ortlek, "Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes.", *Construction and Building Materials*, 106, 253-263, 2016.
- [12] N. Uçar, A. Çalık, M. Emre, I. Akkurt, "Physical-radiation shielding properties of concrete contains colemanite and ulexite", *Indoor and Built Environment*, No. 30(10), pp. 1827-1834, 2021.
- [13] I. Kula, A. Olgun, Y. Erdogan and V. Sevinc, "Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement", *Cement and concrete research*, No.31(3), pp. 491-494, 2001.
- [14] I. Kula, A. Olgun, V. Sevinc and Y. Erdogan, "An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash, and coal bottom ash as Portland cement replacement materials", *Cement and Concrete Research*, No. 32(2), pp. 227-232, 2002.
- [15] B. B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, "Metakaolim and calcined clays as pozzolans for concrete: a review.", *Cem. Concr. Compos.*, 23:441-54, 2001.
- [16] E. Güneyisi, M. Gesoğlu and K. Mermerdaş "Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin.", *Mater. Struct.*, 41:937-49, 2008.
- [17] E. Erdogmus, Y. Erdoğan, O. Gencel, S. Targan, and U. Avcıata, "Influence of colemanite admixture on Portland cement durability," *Advances in Cement Research*, vol. 24, no. 3, pp. 155-164, 2012, doi: 10.1680/adcr.10.00043.
- [18] C. S. Poon, Z. H. Shui, and L. Lam "Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures.", *Cement and concrete Research*, 34(12), 2215-2222, 2004.
- [19] M. Yıldırım and H. B. Özhan, "Durability properties of basalt fiber-reinforced mortars with different mineral admixtures exposed to high temperatures." *Construction and Building Materials*, 400, 132574, 2023.
- [20] A. Uysal "Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [21] G. F. Peng and Z. S. Huang "Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures.", *Construction and Building materials*, 22(4), 593-599, 2008.
- [22] E. Erdogmus, "Combined effect of waste colemanite and silica fume on properties of cement mortar.", *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(3), 369-375, 2014.
- [23] S. Özen, M. Yıldırım, M. G. Altun and M. Y. Durgun, "Silis Dumanı Kullanımının Kolemanit ve Kolemanit Atığı İçeren Harç Karışımların Dayanımına Etkisi.", *In International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (Vol. 1, No. 1, pp. 996-1004)*, 2023.
- [24] M. Y. Durgun, S. Özen, K. Karakuzu, V. Kobya, S. H. Bayqra and A. Mardani-Aghabaglou, "Effect of high temperature on polypropylene fiber-reinforced mortars containing colemanite wastes.", *Constr. and Build. Mater.*, 316, 125827, 2022.