



Makale / Research Paper

Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi

İlker Bekir TOPÇU*, Taylan SOFUOĞLU

Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480,
Eskişehir /TÜRKİYE
*ilkerbt@ogu.edu.tr

Received/Geliş: 06.03.2020

Accepted/Kabul: 14.05.2020

Öz: Şeker üretim endüstrisinde piyasadan temin edilen kireçtaşından elde edilen kireç söndürülerek, süzülür ve üretimde şerbet artırımında kullanılır. Şerbete ilave edilen fazla kireç ise karbonatlaşma kazanlarında CO₂ yardımı ile şerbetten uzaklaştırılır. Kalan çamurlu şerbetin çamur kısmı ise dekantörlerde çöktürülerek; filtreler yardımı ile süzülür. Filtrelerden çıkan bu atığa “Pres Filtre Atığı (PFA)” adı verilir. Deneysel çalışmada, ön inceleme olarak yapılan literatür taraması doğrultusunda standart kum, su, sodyum silikat (Na₂SiO₃), uçucu kül ve PFA kullanılarak harç numuneler elde edilmiştir. Bu harç numuneler üzerinde farklı elek, kür koşullarına ve su içeriği değişkenlerine bağlı olarak taze ve sertleşmiş harç özellikleri birim ağırlık ve basınç dayanım testleri uygulanarak, değerlendirilmiştir. Harç numuneler ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 3.0 olacak şekilde hazırlanmıştır. 220 ml alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 75 gr su içeriğine ve 75 µm elekten geçen uçucu kül içeriğine sahip olan PFA10T2S2E1 tipi numunelerin basınç dayanımı değerlendirildiğinde; 7 günlük basınç dayanımının 18.53 MPa, 28 günlük 19.58 MPa ve 56 günlük 19.78 MPa olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin sertleştirilmiş birim ağırlığı değerlendirildiğinde (28. gün), en yüksek sertleştirilmiş birim ağırlığa 220 ml Na₂SiO₃ alkali aktivatörü ile aktive edilen, 75 µm elekten geçen uçucu kül ve 75 gr su içeriğine sahip PFA10T2S2E1 tipi numunelerin sahip olduğu tespit edilmiştir (1.934 kg/dm³).

Anahtar kelimeler: Atık; pres filtre atığı; geopolimer harç; birim ağırlık; basınç dayanımı.

Evaluation of Unit Weight and Compressive Strength of Geopolymer Mortars Obtained with Press Filter Waste and Fly Ash under Different Conditions

Abstract: In sugar production industry, the lime obtained from the commercially available limestone is quenched, filtered and used in the production of juice. The excess lime added to the juice is removed from the juice in the carbonation boilers with the help of CO₂. The mud part of the remaining muddy juice was precipitated in decanters; filtered with the help of filters. This waste from the filters is called as “Press Filter Waste (PFA)”. In the experimental study, mortar samples were obtained by using standard sand, water, sodium silicate (Na₂SiO₃), fly ash and PFA in accordance with the literature review performed as preliminary examination. Fresh and hardened mortar properties were evaluated by applying unit weight and compressive strength tests depending on different sieve, curing conditions and water content variables on these mortar samples. Mortar mixtures were prepared with a sand/binder ratio of 3.0. When the compressive strength of PFA10T2S2E1 type samples which are activated with the help of 220 ml alkaline activator and have 75 gr water content and fly ash content passed through 75 µm sieve are evaluated; it has been determined that the compressive strength of 7-day is 18.53 MPa, 28-day is 19.58 MPa and 56-day is 19.78 MPa. When the hardened unit weight of the samples were evaluated (28th day), it was determined that the PFA10T2S2E1 type samples having the highest hardened unit weight were activated with 220 ml Na₂SiO₃ alkali activator and the fly ash was passed through 75 µm sieve and the water content was 75 gr (1.934 kg/dm³).

Keywords: Waste; press filter waste; geopolymer mortar; unit weight; compressive strength.

Bu makaleye atıf yapmak için

Topçu İ. B., Sofuoğlu, T., “Pres Filtre Atığı ve Uçucu Kül ile Elde Edilen Geopolimer Harçların Farklı Koşullar Altında Birim Ağırlığı ve Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7 (2); 806-823.

How to cite this article

Topçu İ. B., Sofuoğlu, T., “Evaluation of Unit Weight and Compressive Strength of Geopolymer Mortars Obtained with Press Filter Waste and Fly Ash under Different Conditions” El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7 (2); 806-823.

1. Giriş

Günümüzde bilim ve teknolojide yaşanan ilerlemeler yaşamın her alanında ve her sektörde gelişmelere neden olduğu gibi inşaat sektöründe de yeniliklere ve ilerlemelere ışık tutmaktadır [1]. Dünyada çimento endüstrisi, betonun inşaat sektöründe çok fazla talep edilmesinin sonucu olarak üretimi en yoğun gerçekleştirilen endüstrilerdendir. Bu denli yoğun üretim nedeniyle çimento, çevreye zarar veren endüstriyel üretimler arasında yer almaktadır [2]. Zamanla endüstriyel faaliyetlerin artış göstermesi nedeni ile birçok farklı özelliğe sahip katı, sıvı veya gaz olmak üzere üretim atığının ortaya çıktığı görülmektedir. Her yıl milyonlarca ton endüstriyel atık üretilmekte olup; bu atıklar depolama tesisi yetersizliği ve güvenli bertaraf edilememesi nedeniyle çevre sorunlarına neden olmaktadır. Bu durum daha sonra fabrikaların çevresinde su ve toprak kirliliğine de yol açabilmektedir [3]. Bu atıkların çevresel etkileri, üretime etkiyen maliyetleri düşünüldüğünde ülke ve dünya ekonomisine ağır bir yük ve sorumluluk getirdiği çok açıktır. Her ne kadar yasal prosedürler çerçevesinde gerekli önlemler alınmaya çalışılsa da üretim süreci kaynaklı bazı olumsuz koşullar çevresel dengeyi bozabilecek niteliktedir. Örnek olarak, çimento üretim sürecinde enerji ihtiyacının fazla olması ile birlikte bu üretim süreci doğadaki önemli miktarda CO₂ emisyonunun da kaynağıdır. Çimento üretim teknolojisine bağlı olarak 1 ton çimento üretiminde 0.73 ton ile 0.99 ton arasında CO₂ emisyonunun açığa çıktığı tespit edilmiştir [4]. Bununla birlikte örneğin inşaat ve yıkıntı atıkları dönüştürülerek yeniden kullanıldığında, tükenme tehlikesi olan doğal hammaddelerin kullanımının, bu hammaddeleri işlemek için gerekli enerji miktarının, insan ve makine gücünün, trafik problemlerinin ve çevreye salınan karbon monoksit miktarının azalmasında önemli katkılar sağlayacaktır [5].

Beton; su, agrega, çimento ve mineral ve/veya kimyasal katkı maddelerinden oluşan bir kompozit malzemedir [6]. Beton bileşeni olan çimentoya su eklendiğinde tepkimeye girerek betonun diğer ana bileşenlerini bir arada tutan bir bağlayıcı ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte yapay puzolanik özelliğe sahip olan uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların betonda kullanımı genellikle çimentonun bir kısmının yerine kullanılması şeklinde gerçekleşir. Endüstriyel atık olan ve yapay puzolanik özelliğe sahip olan bu tip malzemelerin değerlendirilmesi ülkemizde 1990'lı yılların sonlarında başlamıştır. Son yıllarda ise gerek atıkların değerlendirilmesi gerek maliyetlerin düşürülmesi hususunda taze ve sertleşmiş beton standartlarına uygun şekilde puzolanik özelliğe sahip çeşitli malzemelerin alkali aktivatörler yardımı ile geopolimer üretiminde kullanılması üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu nedenle, çevreyi korumak için, CO₂ emisyonunu en aza indirmenin yolu beton yapımında kullanılan çimento yüzdesinin azaltılmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu yüzden, geopolimerler gibi yeni teknoloji malzemelerinin kullanılması önerilmiştir [7]. Geopolimer, inşaat sektöründe portland çimentosunun yerini alma potansiyeline sahiptir. Geopolimer, beton üretiminde portland çimentosunun yerini tamamen almak için bağlayıcı olarak kullanılır [8]. Geopolimer harç; hızlı dayanım kazanması, su kuru ihtiyacının olmaması, iyi mekanik ve dayanım özellikleri sahip olması ile birlikte portland çimentosunun üretimi esnasında atmosfere yaymış olduğu büyük miktarda CO₂ emisyonuna da engel olmaktadır [9]. Ülkemizde ve dünyada mineral katkıların kullanımının, çimento ve beton harçlarının mekanik özelliklerine olumlu etkisi nedeniyle giderek yaygınlaştığı izlenmektedir. Bunun yanı sıra, atıkların değerlendirilmesi sayesinde enerji kaynaklarının korunduğu ve çevresel kirliliğin azaldığı tespit edilmiştir [10].

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve doğal puzolanlar ya portland çimentosu üretiminde klinker aşamasında ya da beton içerisinde portland çimentosu ağırlığının belirli oranlarda kullanılmaktadır. 2003 yılında çimentoda klinker kullanımı %85'lere düşerken bu oran 2010 yılında %77'ye düşmüştür. İleride ise bu oranın %71'e düşeceği tahmin edilmektedir. Amerika'da puzolanik malzemeler klinkerden daha çok hazır betonda kullanılmaktadır. Günümüzde Amerika'da kullanılan hazır betonların %60'ı çimento dışında puzolanik malzeme içermektedir [11].

Bir yapı malzemesi olarak betona talep günden güne artmakta; ancak bir diğer çevre sorunu olarak betonun hammaddesi olan çimentonun üretiminde çevre kirliliği artmakta ve hammadde olan kalker azalmaktadır [12]. Bu bağlamda, çimento dışında bağlayıcılık özelliğine sahip olan çeşitli endüstriyel atıklar belirlenerek beton teknolojisinde kullanılması; bu tip atıkların geri dönüşümü ve maliyet yaklaşımı açısından önemli bir yer tutmaktadır. Ancak sanayinin geniş tabanlı olması ve buna bağlı olarak açığa çıkan atık malzemelerin farklı özelliklere sahip olması önceki araştırmalar dışında kullanılabilecek farklı tipte atıkların varlığı üzerine çalışmaları hızlandırmıştır. Bir gıda imalat endüstrisi olan şeker sanayi bünyesinde şeker üretim dönemlerinde açığa çıkan atıkların değerlendirilmesi kapsamında yapılmış olan araştırma atık yönetimi ve geri dönüşümü açısından büyük bir önem taşımaktadır. Böylelikle bir şeker fabrikası atığı olan PFA, alkali aktivatörler ile birlikte belirli oranlarda harç karışımlarda çimento yerine kullanıldığı takdirde, bu atığın da geri dönüşümü gerçekleştirilmiş olacaktır. Ayrıca hafif beton üretiminde de tarımsal atıkların değerlendirilmesi ile yeni özel betonların üretilebileceği, alternatif agrega ve bağlayıcıların beton üretiminde kullanılabilirliğine yönelik çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmektedir [13].

2. Literatür Özeti

Geopolimer, kireç ve sıradan Portland çimentosundan sonra üçüncü nesil çimento olarak kabul edilir. "Geopolimer" terimi genel olarak "inorganik polimerler", "alkali aktif çimentolar", "geosementler", "alkali bağlı seramikler", "hidroseramikler" vb. olarak da kullanılan amorf bir alkali alüminosilikatı tanımlamak için kullanılır [14]. Geopolimerler, bir alüminosilikat malzemenin (metakaolin, uçucu kül, doğal pozzolan, vb.) bir alkalın çözeltisi ile reaksiyona girmesiyle elde edilen yeni bir üç boyutlu inorganik polimer sınıfıdır. Geopolimer malzemeler, son on yılda, çoğunlukla düşük CO₂ emisyonu nedeniyle ve ayrıca kaliteli fiziksel ve mekanik özellikleri ile mükemmel dayanıklılığı nedeniyle daha fazla dikkat çekmiştir [15]. Geopolimerler, Si-O-Al bağıyla oluşan bir takım amorf yarı kristal fazlar içeren üç boyutlu inorganik polimerlerdir. Bu polimerin yapısı, oksijen bağlantısına sahip Si₄⁺ ve Al₃⁺ katyonlarının tetra-katedral köprüsüyle oluşur. AlO₄⁻ gruplarındaki negatif yükler ise genellikle sodyum (Na⁺) ve/veya potasyum iyonu (K⁺) olan alkali katyon ile dengelenmektedir [16]. Geopolimerler, aşağıdaki ampirik formüle sahiptirler;



M ve n sırasıyla alkali katyonu ve poli-kondansasyon derecesini temsil eder, z ise silisyumun alüminyuma göre mol oranıdır [17].

Jepolimerin avantajı basit hazırlama tekniğine sahip olmasıdır. Geopolimer, basitçe reaktif olan alümino-silikat malzemeler ile güçlü alkali çözeltileri karıştırılarak, daha sonra oda sıcaklığında kürlenerek elde edilebilir. Kısa sürede makul bir dayanım kazanır. Portland çimentosu içeren harcın veya betonun hazırlanma sürecine oldukça benzeyen bir hazırlama sürecine sahiptir [18]. Geopolimerlerin elde edilmesi sürecinde polimerizasyon işlemi, puzolanik materyal ile alkali aktivatör çözeltisinin temas ettirilmesi suretiyle gerçekleştirilir ve bu temas sonucu polimerik zincirler oluşur. Bu reaksiyon bir hidrasyon süreci değil, bir polimerizasyon sürecidir ve ortam sıcaklığı artırılarak polimerizasyon süreci daha kolay gelişir [19]. Geopolimer çimento ile bir harç elde etmek için ince ve kaba agregaları bağlayan bir matris üretmek mümkündür. Beton yapıların tasarımında, mühendisler sertleşmiş betonun bir dizi mekanik veya mühendislik özelliğini kullanırlar, ancak geopolimer çimento olarak aktif doğal puzolanlarla yapılan betonun davranışı hakkında çok az bilgi vardır [20]. Buna göre, son yıllarda portland çimentosu için alternatifler bulmak amacıyla çeşitli araştırmalar yapılmış, bu çalışmalar esas olarak doğal puzolanlar veya uçucu kül ile silis dumanı (yapay puzolanlar) gibi endüstriyel yan ürünleri içeren geopolimerlerin elde edilmesi üzerine odaklanmıştır [21].

Çimento, yüksek fırın cürufu ve üç tip alkali aktivatör ile yapılan bir çalışmada kontrol harçlarının donma çözünme etkisi altında kaldığı süreçte çevrim sayısı arttıkça çatlak miktarı artmış, birim

ağırlık, ultrases geçiş hızı, elastisite modülü ve basınç dayanım değerleri azaldığı görülmüştür. Aktive edilmiş yüksek fırın cürufu içeren harçlarda bu parametrelerin azalma oranı düşmüştür. Birim ağırlıklar ve basınç dayanım deneyleri değerlendirildiğinde, donma çözülme sürecinde en verimli sonuçlar %100 yüksek fırın cürufu içeren sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilen numunelerden elde edilmiştir [22]. Çıkan sonuçlar sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatörlerin harç yapımında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Uçucu kül, öğütülmüş kömürün yanması sonucu oluşan, toz ve gaz halinde atmosfere karışan, mikron boyutundaki taneciklerin termik santral bacalarına ilave edilen elektrostatik çökeltici filtreler veya filtre torbaları tarafından tutulması ve uçucu kül silolarında istiflenmesiyle elde edilen endüstriyel bir atıktır [23]. Sınıfsız uçucu küller çimento ve beton standartlarına uygun olmadığı için kullanılamamakta ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Uçucu küller öğütme ile yüksek sıcaklıkta kür uygulanarak, kireç katılarak veya alkaliler kullanılarak aktive edilebilmektedirler [24]. Uçucu kül, cüruf, kaolin ve metakaolin gibi silika ve alümina açısından zengin malzemeler, mükemmel davranış ve özellikleri barındıran geopolimerlerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, mekanik olarak yüksek performans sahibi olması nedeniyle geopolimerin esas malzemesi olarak kullanılan en önemli malzemelerden biridir [25]. Uçucu kül ve alkali aktivatör içeren geopolimer harçların ısı kur koşulları ve sürecinde basınç dayanım değerleri üzerine yapılan deneysel çalışmada; çimento kullanmaksızın kum/uçucu kül = 3.00, su/uçucu kül = 0.29 ve sodyum/uçucu kül = 0.10 oranlarında numuneler hazırlanarak, 4 saat, 1, 2, 3 ve 7 gün süresince 75⁰C sıcaklıkta kür edilmiştir. Diğer numune grubu ise 4 saat, 1, 2, 3 ve 7 gün süresince 75⁰C sıcaklıkta kür edildikten sonra toplamda 28 gün olacak şekilde laboratuvar ortamında (23±2⁰C ve bağıl nemi %50±5) havada kür edilmiştir. Geopolimer harcının 75⁰C sıcaklıkta 4 saat, 1, 2, 3 ve 7 gün süresince küre tabii tutulup basınç dayanım değerleri ölçülen numuneler, 28 güne kadar bekletilen numuneler ile karşılaştırıldığında, 28 günlük numunelerin basınç dayanım değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Soğumadan sonra toplam 28 güne kadar bekletilen numunelerde geopolimerizasyon reaksiyonunun devam etmediği ve bundan dolayı dayanım artışlarının çok az olduğu ve hatta durduğu sonucuna ulaşılmıştır [26].

Alkali aktivatörler (sodyum silikat ve %98 saflıkta sodyum hidroksit) ile taban külü içeren hafif geopolimerler elde edilmesi üzerine yapılan çalışmada 20 saat 75⁰C'de etüvde ve sonrasında 20⁰C'de havada kür ile yalnız 200C'de havada kür olmak üzere iki tip kürleme uygulanarak numunelerin bazı donma-çözünme, basınç dayanımları gibi bazı mekanik özellikleri incelenmiştir. En iyi numuneler taban külü ile sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren alkali çözeltileri aktivasyonu ile 20⁰C oda sıcaklığı kür koşullarında elde edilen geopolimerler olmuştur. Bu geopolimerlerin birim ağırlığı 1.59 gr/cm³, basınç dayanımı ise 18.51 MPa olarak bulunmuştur. Bu geopolimerlerin 30 ve 80 donma-çözünme çevrimi sonunda kütle kayıplarının sırası ile %3.7, %6.2; basınç dayanım kayıplarının ise sırasıyla %4.3 ve %11.5 olduğu tespit edilmiştir. 400⁰C sıcaklığa kadar termal stabilitenin korunduğu, 600⁰C'de dayanım kayıplarının çok yüksek olduğu görülmüştür [27]. Çalışmada kullanılan agregaların yerine daha hafif ve daha yüksek sıcaklık direncine sahip agregalar kullanıldığında (zeolit, genleştirilmiş kil vb.) ısı yalıtımı ve yangın direnci yüksek geopolimerler elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve palmye yağı yakıtı külü gibi bağlayıcılar ile hazırlanan numunelerin farklı sıcaklıklarda, kalsiyum içeriklerinde ve farklı aktivatör çözeltiler ile davranışlarını irdeleyen çalışmada; kalsiyum oksit oranının artması, işlenebilirliği ve priz süresini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca sadece aktivatör olarak sodyum hidroksit çözeltilisinin kullanımı ile işlenebilirliğin azaldığı, priz süresinin arttığı görülmüştür. Sodyum silikat çözeltisi içeren numunelerde ise 60⁰C'de yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir [28]. Yüksek kalsiyum içeren geopolimerlerin laboratuvar ortam sıcaklığında tamir materyali olarak ta kullanılabileceği görülmüştür.

Beton ve harçlarda çimento yerine kısmi olarak kullanılan puzolanik materyaller betonun durabilitesine olumlu etki yapığı tespit edilmiştir. Puzolanların kimyasal kompozisyonunda önemli miktarda amorf silika olduğu görülmüştür. Çimento ile reaksiyonunda serbest kireç ile puzolan bünyesindeki silikanın etkileşimi sonucu yeni silikatlar ortaya çıkmış ve böylelikle mekanik ve durabilite özellikleri olumlu yönde gelişme gösterdiği belirlenmiştir [29].

3. Materyal ve Metot

3.1. Materyal

Deneysel çalışmada harç üretiminde özellikleri aşağıda verilen harç karma suyu, standart kum, uçucu kül, pres filtre atığı, alkali aktivatör (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Elde edilen harç numuneler farklı kür tiplerine tabi tutulmuş, taze ve sertleşmiş özellikleri çerçevesinde birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri incelenmiştir.

- Pres Filtre Atığı (PFA)

Uygulamada, Eskişehir Şeker Fabrikası'ndan temin edilen pres filtre atığının kimyasal analizi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Pres filtre toprağının kimyasal analizi (PFA)

Bileşenler	Kütlece Oran (%)
MgO	2.0242
Al_2O_3	1.2064
SiO_2	3.7480
P_2O_5	0.1948
SO_3	0.2142
K_2O	0.0910
CaO	56.3714
TiO_2	0.0783
Cr_2O_3	0.0392
Fe_2O_3	1.0255
BaO	0.2331
Kızdırma Kaybı	34.7740

- Uçucu Kül (UK)

Çalışmalarda kullanılmış olan uçucu kül Tunçbilek termik santralinden temin edilmiş olup; deneylere başlamadan önce uçucu külün fiziksel ve kimyasal analizi ve Tablo 2 ve Tablo 3'te görüldüğü üzere tespit edilmiştir.

Tablo 2. Uçucu külün fiziksel analizi (UK) (Tunçbilek)

Fiziksel Özellikler	90 μ (%)	45 μ (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Blaine (cm^2/gr)
-	-	35	2,05	3200

Tablo 3. Uçucu külün kimyasal analizi (UK) (Tunçbilek)

Bileşenler	Bileşenleri Oranı (%)
SiO ₂	52,31
Al ₂ O ₃	16,49
Fe ₂ O ₃	12,38
CaO	5,72
MgO	5,01
SO ₃	1,16
K ₂ O	2,27
Kızdırma Kaybı	1,13
Serbest CaO	0,15
Klorür	0,0106

- Standart Kum

Deneysel çalışmada karışımlar hazırlanırken TSE EN 196-1 standardına uygun olarak Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Örnek standart kumun elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımı ve standart sınır değerleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Örnek standart kumun granülometresi ve sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,50	1,00	1,60	2,00
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır(%)	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0

- Karma Suyu

Harç karma suyu olarak laboratuvarımızda bulunan Eskişehir bölge suyu kullanılmıştır. Harç üretiminde kullanılan karma suyunun kimyasal analizi Tablo 5’te gösterilmiştir. Karma suyunun yapılan kimyasal analizinde suyun TS 1247’deki karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Kullanılan karma suyunun kimyasal analizi

Parametreler	Ölçü Birimi	Değer
pH		7.49 (20 °C)
Klorür (Cl ⁻)	mg/L	6.53
Sülfat (SO ₄)	mg/L	91.5
Magnezyum (Mg)	mg/L	41.5
Kalsiyum (Ca)	mg/L	63.8
Çinko (Zn)	mg/L	0.375
Bakır (Cu)	mg/L	0.092
Demir (Fe)	mg/L	0.074
Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	4.35
Serbest Klor (ClO ₂)	mg/L	< 0.05
Toplam Klor (ClO ₂)	mg/L	< 0.09

- Alkali Aktivatörler (Na_2SiO_3)

Deneysel çalışmada elde edilen karışımlara belirli oranlarda sodyum silikat aktivatör olarak kullanılmıştır. Bu aktivatör çeşitli kimyasal materyal satışı yapan firmalardan temin edilmiştir.

3.2. Metot

Deneysel çalışmalara başlamadan önce standartlar çerçevesinde kontrol harç numuneler elde edilmiştir. Deneysel çalışmada, ön inceleme olarak yapılan literatür taraması doğrultusunda; standart kum, şebeke suyu ile belirlenen oranda sodyum silikat (Na_2SiO_3) alkali aktivatörü, uçucu kül ve pres filtre atığı kullanılarak farklı kür koşulları ile farklı oranda pres filtre atığı ve su içeren numuneler elde edilmiştir. Bu harç numunelere daha sonra taze ve sertleşmiş beton deneyleri kapsamında birim ağırlık ve basınç dayanım deneyleri uygulanarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 6. Numune karışım oranları ve kür tipleri

Numune Kodu	Karışım Oranı (%)	Kür Tipi	Su/ Na_2SiO_3	Kum/ Bağlayıcı	Elekten Geçen (UK)
PFA10T1S1E1	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 0 48 saat 120 C Etüv	0.386	3.0	75 µm
PFA10T1S1E2	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 0 48 saat 120 C Etüv	0.386	3.0	-
PFA10T2S1E1	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 0 72 saat 120 C Etüv	0.386	3.0	75 µm
PFA10T2S2E1	%10PFA%90UK	24 saat Hava Kürü 0 72 saat 120 C Etüv	0.341	3.0	75 µm
PFA20T3S1E2	%20PFA%80UK	24 saat Hava Kürü 0 48 saat 120 C Etüv 0 24 saat 140 C Etüv	0.386	3.0	-

Harç karışımları ağırlıkça kum/bağlayıcı oranı 3.0 olacak şekilde hazırlanmış olup; elde edilen numuneler, 75 µm elekten geçirilen ve geçirilmeyen uçucu kül ile 75 µm elekten geçirilen pres filtre atığı farklı su/sodyum silikat oranları kullanılarak farklı kür tiplerine tabi tutulmuştur. Elde edilen numuneler harç kalıpları ilk dökümden hemen sonra standart olarak 24 saat hava kürüne tabi tutulmuş daha sonra farklı derecelerde (120°C , 140°C) farklı sürelerde (24 saat, 48 saat) kürlere tabi tutulmuşlardır. Bir tip numune 24 saat hava küründen sonra, 48 saat 120°C küre tabi tutulmuş, diğer bir tip numune 24 saat hava küründen sonra 48 saat 120°C küre ve 24 saat 140°C küre tabi tutulurken, başka diğer bir tip numune ise 24 saat hava küründen sonra 72 saat 120°C etüv ortamında küre tabi tutulmuştur.

Tüm numune grupları farklı kürlere tabi tutulmadan önce 24 saat havada kürlenerek kum/bağlayıcı oranları da sabit tutularak deneylere tabi tutulmuştur. Farklı kür koşulları için sodyum silikat (220 mlt Na_2SiO_3), farklı oranlarda pres filtre atığı, farklı oranlarda uçucu kül için $4 \times 4 \times 16$ cm ebatlarında olmak üzere numuneler üretilmiştir. Ön deneylerle belirlenen oranlar sonucunda elde edilen harç karışımlar üzerinde kür koşulları çerçevesinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmış olup; bu deneyler birim ağırlık ve basınç dayanımı deneylerini kapsamaktadır.

Uçucu kül ile PFA içeren ve farklı kür koşulları altında 220 mlt (Na_2SiO_3) alkali aktivatör yardımıyla elde edilen harç numunelerde oluşacak değişimlerin incelenmesi amacıyla karışımlarda

sadece PFA10T2S2E1 numunesinde su miktarı azaltılmış diğer numunelerde su miktarı, su/Na₂SiO₃ ve kum/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Sırasıyla uçucu kül, PFA için uygulanan oranlar Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 7. Numune bileşenleri ağırlıkları

Bileşen	PFA10T1S1E1	PFA10T1S1E2	PFA10T2S1E1	PFA10T2S2E1	PFA20T3S1E2
UK (gr)	405	405	405	405	360
PFA (gr)	45	45	45	45	90
Bağlayıcı (gr)	450	450	450	450	450
Kum (gr)	1350	1350	1350	1350	1350
Su (gr)	85	85	85	75	85
Na ₂ SiO ₃ (mlt)	220	220	220	220	220
Su/Na ₂ SiO ₃	0.386	0.386	0.386	0.341	0.386
Kum/Bağlayıcı	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

Tablo 6 ve Tablo 7’de görüldüğü üzere PFA10T1S1E1 kodu; *PFA10*: 450 gr (405 gr uçucu kül ve 45 gr PFA olmak üzere) bağlayıcı matris içerisinde %10 oranında PFA içerdiğini, *T1*: 24 saat hava kürü, 48 saat 120⁰C etüv kürüne tabi tutulduğunu, *S1*: Su/Na₂SiO₃ (85 gr/220 mlt) oranının 0.386 olduğunu, *E1*: Uçucu külün 75 µm’lik elekten geçirildiğini ifade etmektedir. PFA10T1S1E2 kodu; *PFA10*: 450 gr (405 gr uçucu kül ve 45 gr PFA olmak üzere) bağlayıcı matris içerisinde %10 oranında PFA içerdiğini, *T1*: 24 saat hava kürü, 48 saat 120⁰C etüv kürüne tabi tutulduğunu, *S1*: Su/Na₂SiO₃ (85 gr/220 mlt) oranının 0.386 olduğunu, *E2*: Uçucu külün 75 µm’lik elekten geçirilmediğini ifade etmektedir. PFA10T2S1E1 kodu; *PFA10*: 450 gr (405 gr uçucu kül ve 45 gr PFA olmak üzere) bağlayıcı matris içerisinde %10 oranında PFA içerdiğini, *T2*: 24 saat hava kürü, 72 saat 120⁰C etüv kürüne tabi tutulduğunu, *S1*: Su/Na₂SiO₃ (85 gr/220 mlt) oranının 0.386 olduğunu, *E1*: Uçucu külün 75 µm’lik elekten geçirildiğini ifade etmektedir. PFA10T2S2E1 kodu; *PFA10*: 450 gr (405 gr uçucu kül ve 45 gr PFA olmak üzere) bağlayıcı matris içerisinde %10 oranında PFA içerdiğini, *T2*: 24 saat hava kürü, 72 saat 120⁰C etüv kürüne tabi tutulduğunu, *S2*: Su/Na₂SiO₃ (75 gr/220 mlt) oranının 0.341 olduğunu, *E1*: Uçucu külün 75 µm’lik elekten geçirildiğini ifade etmektedir. PFA20T3S1E2 kodu; *PFA20*: 450 gr (360 gr uçucu kül ve 90 gr PFA olmak üzere) bağlayıcı matris içerisinde %20 oranında PFA içerdiğini, *T3*: 24 saat hava kürü, 48 saat 120⁰C etüv ve 24 saat 140⁰C etüv kürüne tabi tutulduğunu, *S1*: Su/Na₂SiO₃ (85 gr/220 mlt) oranının 0.386 olduğunu, *E2*: Uçucu külün 75 µm’lik elekten geçirilmediğini ifade etmektedir.

4. Bulgular ve Tartışma

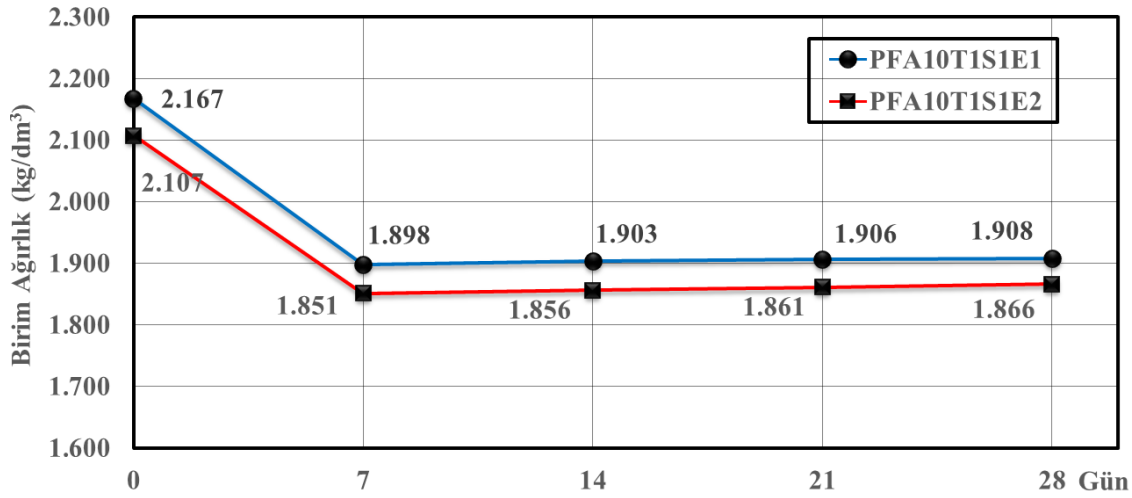
Üretilen harç numunelerinin sertleşmiş haldeki özelliklerini belirlemek amacıyla taze ve sertleşmiş birim ağırlık ile basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık deneyi 4x4x16 cm ebatlarındaki prizmatik numuneler üzerinde yapılmıştır. Birim ağırlığı TS EN 12390-7 (2010)’a göre belirlemek amacı ile tüm numuneler kür edildikten sonra 30 kg kapasiteli 2 gr duyarlıklı terazide tartılmıştır. Ardından tüm numunelerin en, boy ve yükseklikleri kumpas kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür.

Boyutları belirlenen numunelerin hacimleri hesaplanmıştır. Ağırlığın, hacme oranı ile tüm numunelerin birim ağırlıkları (kg/dm³) belirlenmiştir.

4.1. Taze ve Sertleşmiş Birim Ağırlıkların Değerlendirilmesi

PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerinin taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerlendirildiğinde Şekil 1’de görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. günde (taze birim ağırlık) 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numunelerin

birim ağırlıklarının, 75 µm elekten geçirilmeyen uçucu kül içeren numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 1. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2' ye göre değişimi

Numunelerin, 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile numunelerin bünyesindeki nemi hızla kaybettiği görülmüş toplamda 24 saat hava ve 48 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuş numunelerde ağırlık kaybının sırasıyla PFA10T1S1E1 tip numunelerde 68.86 gr, PFA10T1S1E2 tip numunelerde 65.54 gr olduğu tespit edilmiştir. 28. günde (sertleşmiş birim ağırlık) ise yapılan birim ağırlık değerlendirmesinde 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile PFA10T1S1E1 ortamdaki nemi alarak ağırlıkça 7. güne göre 28. gün 2.56 gr değerinde bir artış, PFA10T1S1E2 ise ortamdaki nemi alarak ağırlıkça 7. güne göre 28. gün 3.84 gr değerinde bir artış olduğu saptanmıştır.

Tablo 8. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2'ye göre değişimi

Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	0. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	2.167	1.908
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	2.107	1.866

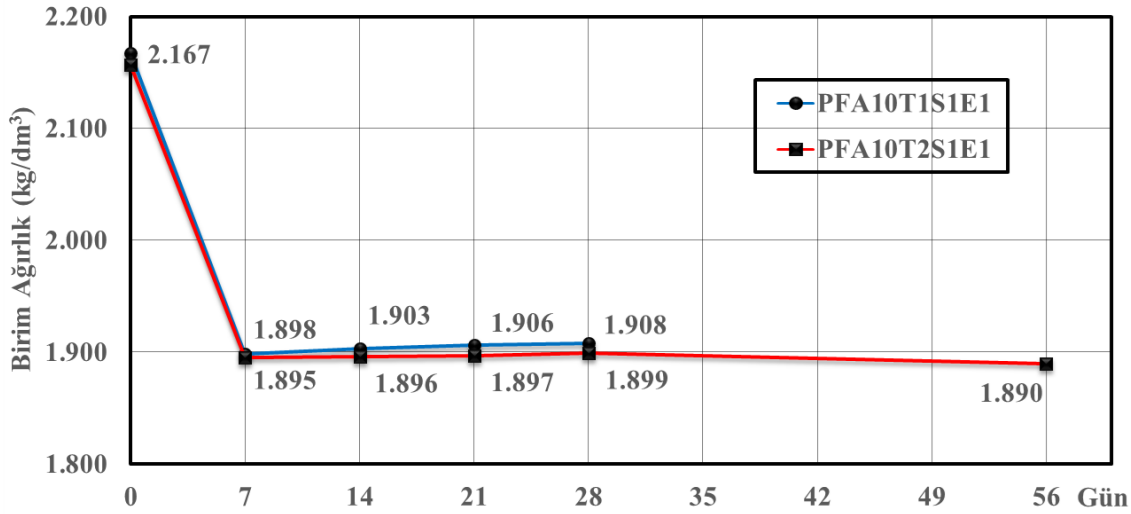
PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerinin 28. gün sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirildiğinde 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numune (PFA10T1S1E1) ağırlıklarının PFA10T1S1E2 tip numunelere göre 10.752 gr daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 9. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1'ye göre değişimi

Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	0. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	2.167	1.908
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	2.157	1.899

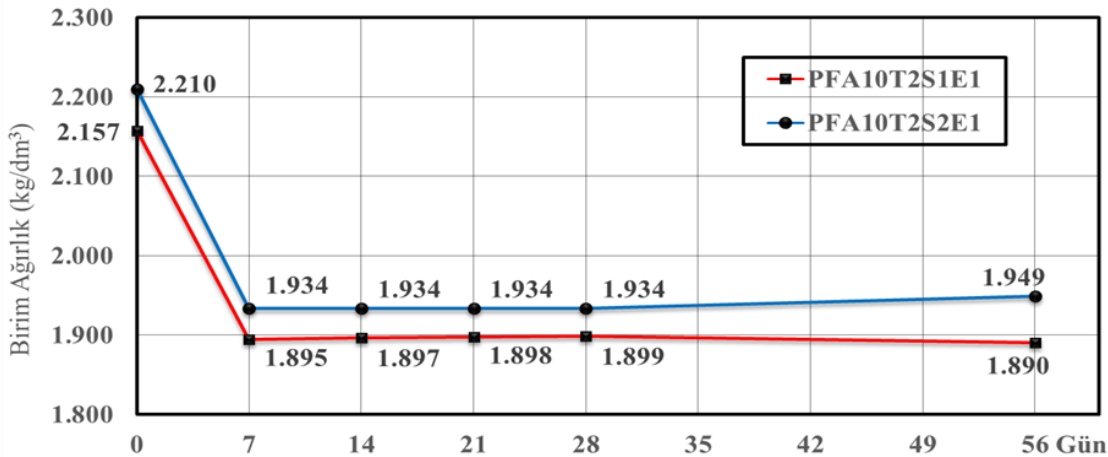
PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerinin taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerlendirildiğinde Şekil 2'de görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. Günde (taze birim ağırlık) 24 saat hava kürü ve 48 saat 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelerin birim ağırlıklarının, 24 saat hava kürü ve 72 saat 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. PFA10T1S1E1 tip numunelerin 24 saat hava ve 48 saat 120⁰C sıcaklıkta küre tabi tutulması ve PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 24 saat hava ve

72 saat 120°C sıcaklıkta küre tabi tutulması ile numunelerin 7 gün sürecinde bünyesindeki nemi hızla kaybettiği görülmüştür.



Şekil 2. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1'ye göre değişimi

28. gün sonunda PFA10T1S1E1 tip numunelerin ağırlık kaybının 66.30 gr olduğu, PFA10T2S1E1 tip numunelerin ağırlık kaybının ise 68.60 gr olduğu tespit edilmiştir. 24 saat hava ve 72 saat 120°C sıcaklık küre tabi tutulan PFA10T2S1E1 numunelerin, 24 saat ve 48 saat 120°C sıcaklık küre tabi tutulan PFA10T1S1E1 numunelere göre 28. günde yaklaşık 2.30 gr kadar daha fazla nem kaybettiği saptanmıştır.



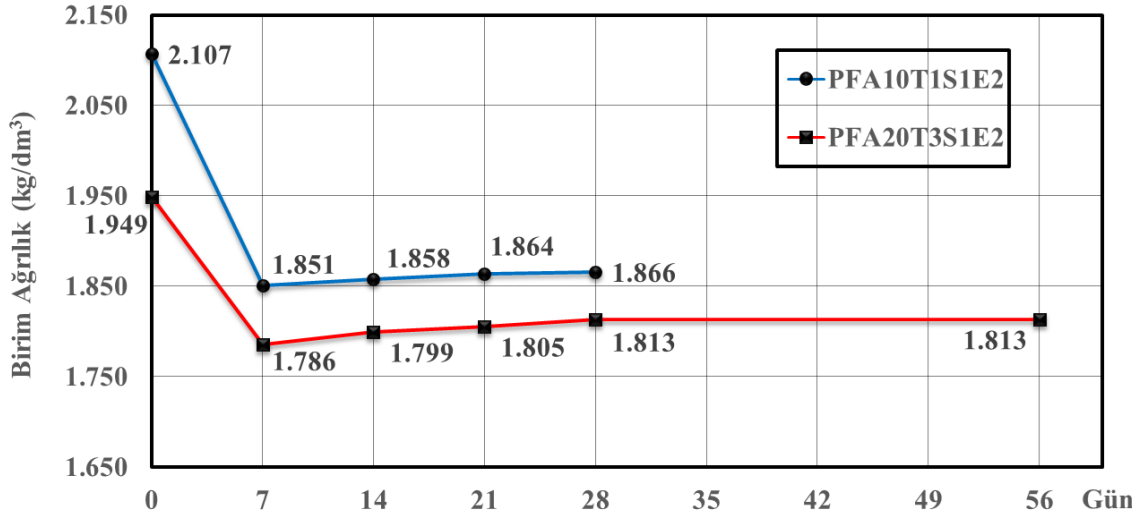
Şekil 3. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1'ye göre değişimi

Şekil 3'te 220 mlt Na₂SiO₃ alkali aktivatörü ile aktive edilen ve farklı miktarda su içeriğine sahip PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerinin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirilmiş olup; görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. günde (taze birim ağırlık) ise PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre nem kaybının fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 10. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1'ye göre değişimi

Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	0. Gün	56. Gün
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	2.157	1.890
PFA10T2S2E1	220 mlt	0.341	2.210	1.949

Numuneler aynı tip kür koşullarına tabi tutulmuş (24 saat hava kürü ve 72 saat 1200C sıcaklık kürü), elde edilen veriler ışığında 7. günde PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre 3.6 gr daha fazla nem kaybettiği, 28. günde 4.35 gr daha fazla nem kaybettiği ve 56. günde ise PFA10T2S1E1 tip numunelerin PFA10T2S2E1 tip numunelere göre 1.54 gr daha fazla ne kaybettiği saptanmıştır. Bu numunelerin içeriği olan uçucu kül 75 µm elekten geçirilmiştir. PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 0. günden 56. güne kadar olan toplam nem kaybı 66.86 gr, PFA10T2S2E1 tip numunelerinde ise toplam nem kaybının 68.35 gr olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 4. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2'ye göre değişimi

Tablo 11. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2'ye göre değişimi

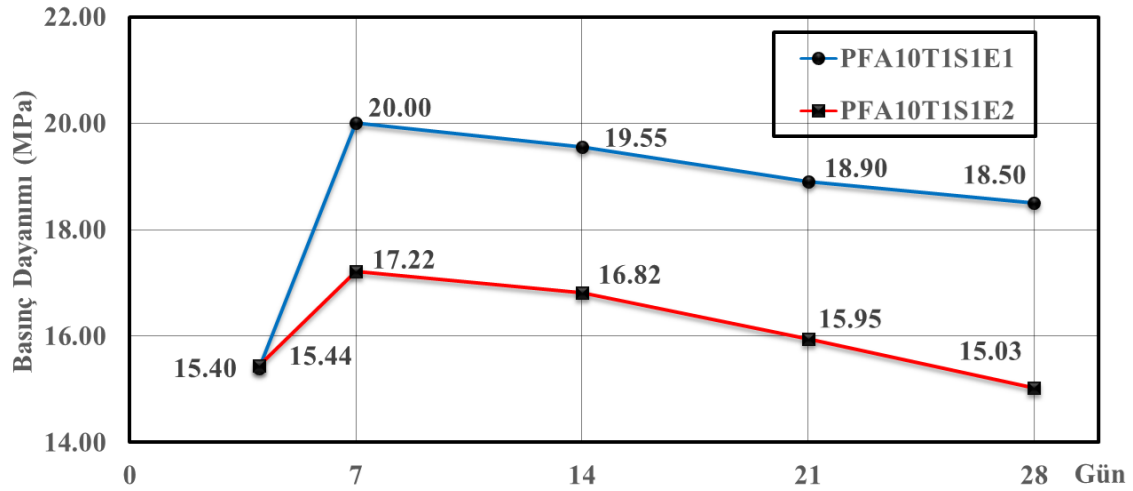
Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	0. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	2.107	1.866
PFA20T3S1E2	220 mlt	0.386	1.949	1.813

Şekil 4'te 220 mlt Na₂SiO₃ alkali aktivatörü ile aktive edilen farklı oranda PFA içeriğine sahip numuneler farklı iki tip kür koşuluna tabi tutulmuştur (PFA10T1S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120⁰C sıcaklık, PFA20T3S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120⁰C sıcaklık-24 saat 140⁰C sıcaklık). Bu numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirilmiş olup, görüldüğü üzere 0. günde (ıslak birim ağırlık) birim ağırlıkların farklı olduğu, 7. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin PFA10T1S1E2 tip numunelere göre nem kaybının daha az olduğu belirlenmiştir. Farklı tip kür koşullarına tabi tutulmuş ve farklı oranda PFA içeren numunelerde 0. gün ve 7. gün aralığında PFA10T1S1E2 tip numunelerde nem kaybının 65.53 gr, PFA20T3S1E2 tip numunelerde ise bu ağırlığın 41.38 gr olduğu tespit edilmiştir. 7. günde PFA10T1S1E2 tip numune PFA20T3S1E2 tip numuneye göre yaklaşık 23 gr daha fazla nem kaybetmiştir. 28. gün ağırlık kayıpları değerlendirildiğinde ise yine PFA10T1S1E2 tip numuneler PFA20T3S1E2 tip numunelere göre yaklaşık 26 gr daha fazla nem kaybı olduğu saptanmıştır. 56. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin 28. güne göre nem kaybı olmadığı tespit edilmiş olup; 7. güne göre ise 7 gr kadar bir ağırlık artışı görülmüştür.

4.2. Basınç Dayanımların Değerlendirilmesi

Şekil 5'te görüldüğü üzere 4. günde basınç dayanımlarının birbirine oldukça yakın olduğu, 7. günde ise 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numunelerin basınç dayanımlarının, 75 µm elekten geçirilmeyen uçucu kül içeren numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerin, 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile 7. günde PFA10T1S1E1 tip

numunede basınç dayanımlarında görülür bir artış sağlanmış 24 saat hava ve 48 saat sıcaklık kürüne tabi tutulmuş numunelerde dayanımda artışın PFA10T1S1E1 tip numunelerde 3.1 MPa, dayanımda azalmanın ise PFA10T1S1E2 tip numunelerde 0.40 MPa gr olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerine göre değişimi

28. günde (sertleşmiş birim ağırlık) ise yapılan birim ağırlık değerlendirmesinde 24 saat süreyle hava ve 48 saat süreyle 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulması ile PFA10T1S1E1 dayanımda azalmanın 7. güne göre 28. gün 21.50 MPa olduğu, PFA10T1S1E2 ise dayanımda 7. güne göre 28. gün 2.19 MPa değerinde bir azalma olduğu saptanmıştır.

Tablo 12. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	7. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	20.00	18.50
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	17.22	15.03

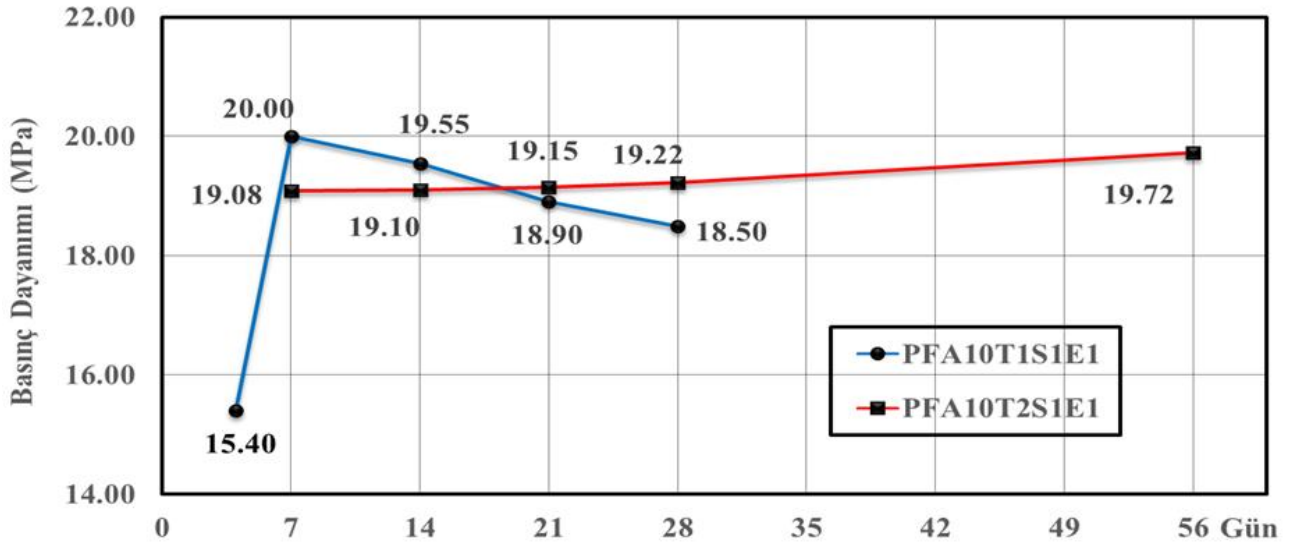
PFA10T1S1E1 ve PFA10T1S1E2 numunelerinin 28. gün dayanım değerleri değerlendirildiğinde 75 µm elekten geçirilen uçucu kül içeren numune (PFA10T1S1E1) dayanımlarının PFA10T1S1E2 tip numunelere göre 3.47 MPa daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 13. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	7. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	20.00	18.50
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	19.08	19.22

PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerinin basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde Şekil 6'da görüldüğü üzere 7. günde 24 saat hava kürü ve 48 saat 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelerin basınç dayanımlarının, 24 saat hava kürü ve 72 saat 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulan numunelere göre yüksek olduğu görülmüştür. PFA10T1S1E1 tip numunelerin 24 saat hava ve 48 saat 120⁰C sıcaklıkta küre tabi tutulması ve PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 24 saat hava ve 72 saat 120⁰C sıcaklıkta küre tabi tutulması ile numunelerin 7 gün sürecinde kazandıkları dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. 28. gün sonunda PFA10T1S1E1 tip numunelerin dayanım kaybının 1.50 MPa olduğu, PFA10T2S1E1 tip numunelerin dayanım kazanımının ise 0.14 MPa olduğu tespit edilmiştir. 24 saat hava ve 72 saat 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T2S1E1 numunelerinin, 24 saat ve 48 saat 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T1S1E1

numunelerine göre 28. günde yaklaşık 0.72 MPa kadar daha fazla dayanıma sahip olduğu saptanmıştır.

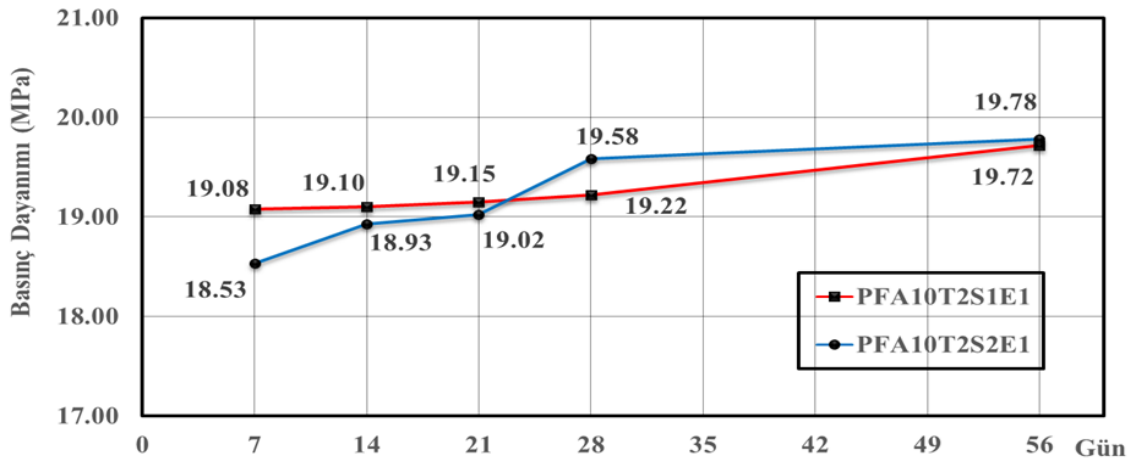


Şekil 6. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E1 ve PFA10T2S1E1 numunelerine göre değişimi

56. gün sonunda 24 saat hava ve 72 saat 120⁰C sıcaklık kürüne tabi tutulan PFA10T2S1E1 tip numunelerin 7. güne göre 0.64 MPa, 28. güne göre ise 0.50 MPa dayanım kazanımı olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 14. Basınç Dayanımının PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerine göre değişimi

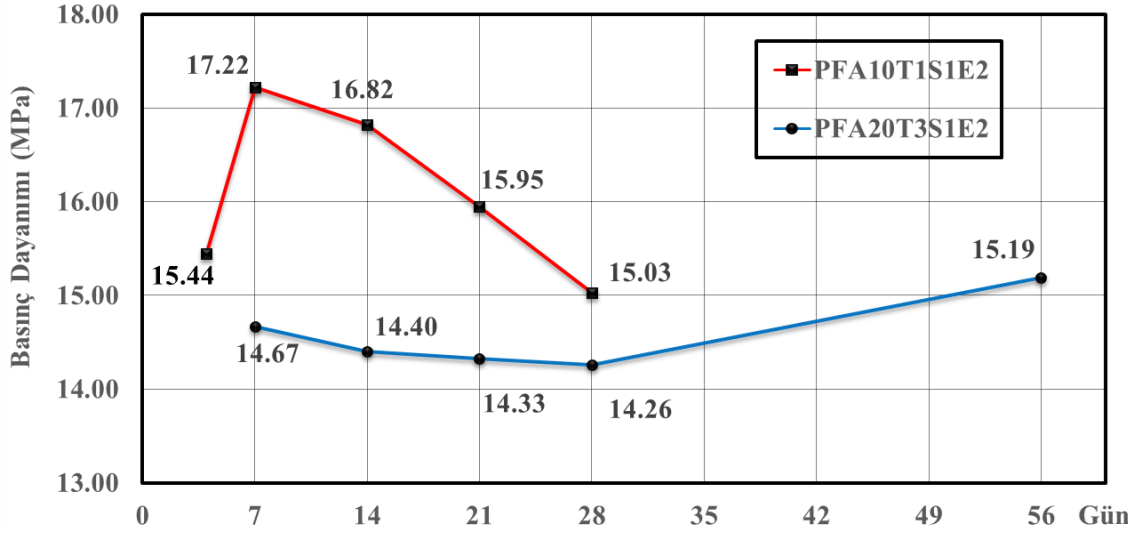
Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	7. Gün	56. Gün
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	19.08	19.72
PFA10T2S2E1	220 mlt	0.341	18.53	19.78



Şekil 7. Basınç Dayanımının PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerine göre değişimi

Şekil 7’de 220 mlt Na₂SiO₃ alkali aktivatörü ile aktive edilen ve farklı miktarda su içeriğine sahip PFA10T2S1E1 ve PFA10T2S2E1 numunelerinin basınç dayanım değerleri değerlendirilmiş olup; görüldüğü üzere 7. günde basınç dayanım değerlerinin farklı olduğu ve yine 7. günde PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre daha az miktarda dayanım kazandığı görülmüştür. Numuneler aynı tip kür koşullarına tabi tutulmuş (24 saat hava kürü ve 72 saat 120⁰C sıcaklık kürü), elde edilen veriler ışığında 7. günde PFA10T2S2E1 tip numunelerin PFA10T2S1E1 tip numunelere göre 0.55 MPa daha az dayanıma sahip olduğu, 28. günde 0.36 MPa daha fazla dayanıma sahip olduğu ve 56. günde ise PFA10T2S1E1 tip numunelerin PFA10T2S2E1

tip numunelere göre 0.06 MPa daha az dayanıma sahip olduğu saptanmıştır. Bu numunelerin içeriği olan su farklı miktarlarda numune karışımlarında kullanılmıştır. PFA10T2S1E1 tip numunelerinde 7. günden 56. güne kadar olan toplam dayanım artışı 0.64 MPa, PFA10T2S2E1 tip numunelerinde ise toplam dayanım artışının 1.25 MPa olduğu hesaplanmıştır. Her iki tip numunede de dayanım artışının fazla olduğu süreç 7. gün ile 56. gün arasında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 8. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2 numunelerine göre değişimi

Şekil 8’te 220 mlt Na_2SiO_3 alkali aktivatörü ile aktive edilen farklı oranda PFA içeriğine sahip numuneler farklı iki tip kür koşuluna tabi tutulmuştur (PFA10T1S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120°C sıcaklık, PFA20T3S1E2: 24 saat hava kürü-48 saat 120°C sıcaklık-24 saat 140°C sıcaklık). Bu numunelerin basınç dayanım değerleri değerlendirilmiş olup, görüldüğü üzere 7. günde basınç dayanım değerlerinin farklı olduğu, 28. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin PFA10T1S1E2 tip numunelere göre daha az basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

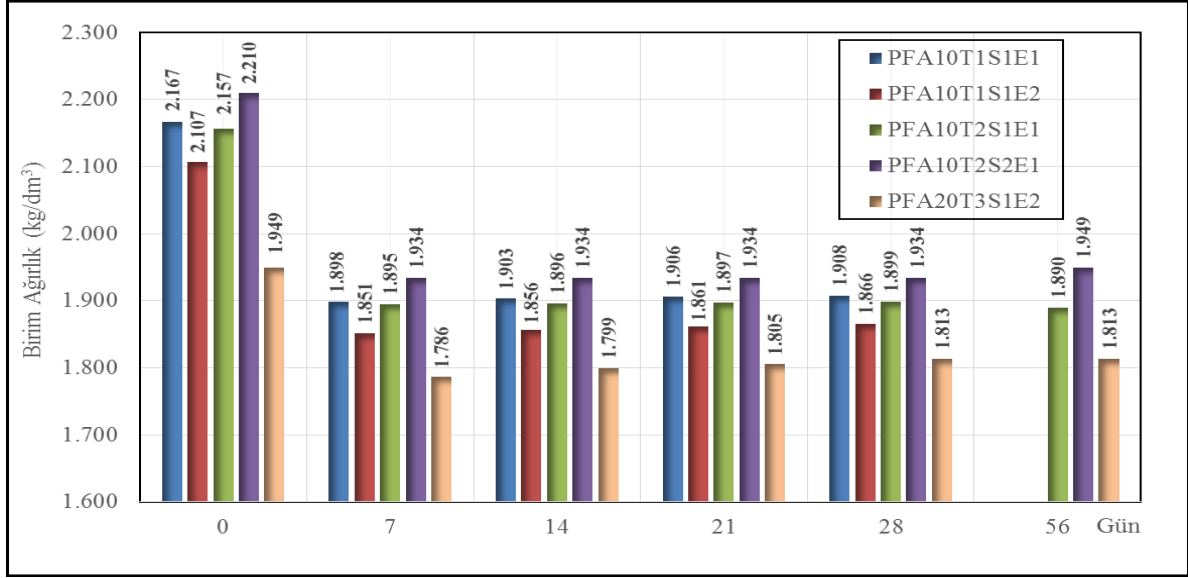
Tablo 15. Basınç Dayanımının PFA10T1S1E2 ve PFA20T3S1E2 numunelerine göre değişimi

Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/ Na_2SiO_3	7. Gün	28. Gün
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	17.22	15.03
PFA20T3S1E2	220 mlt	0.386	14.67	14.26

Farklı tip kür koşullarına tabi tutulmuş ve farklı oranda PFA içeren numunelerde 7. gün ve 28. gün aralığında PFA10T1S1E2 tip numunelerde dayanım kaybının 2.19 MPa, PFA20T3S1E2 tip numunelerde ise bu dayanım 0.41 MPa olduğu tespit edilmiştir. 7. günde PFA10T1S1E2 tip numuneler PFA20T3S1E2 tip numunelere göre yaklaşık 2.55 MPa daha fazla dayanım kazanmıştır. 28. gün basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde ise PFA10T1S1E2 tip numunelerin PFA20T3S1E2 tip numunelere göre yaklaşık 0.77 MPa daha fazla dayanım kazandığı saptanmıştır. 56. günde ise PFA20T3S1E2 tip numunelerin 28. güne göre dayanım kazandığı tespit edilmiş olup; 7. güne göre ise 0.52 MPa kadar bir dayanım artışı görülmüştür.

Tablo 16. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlığın tüm numunelere göre değişimi

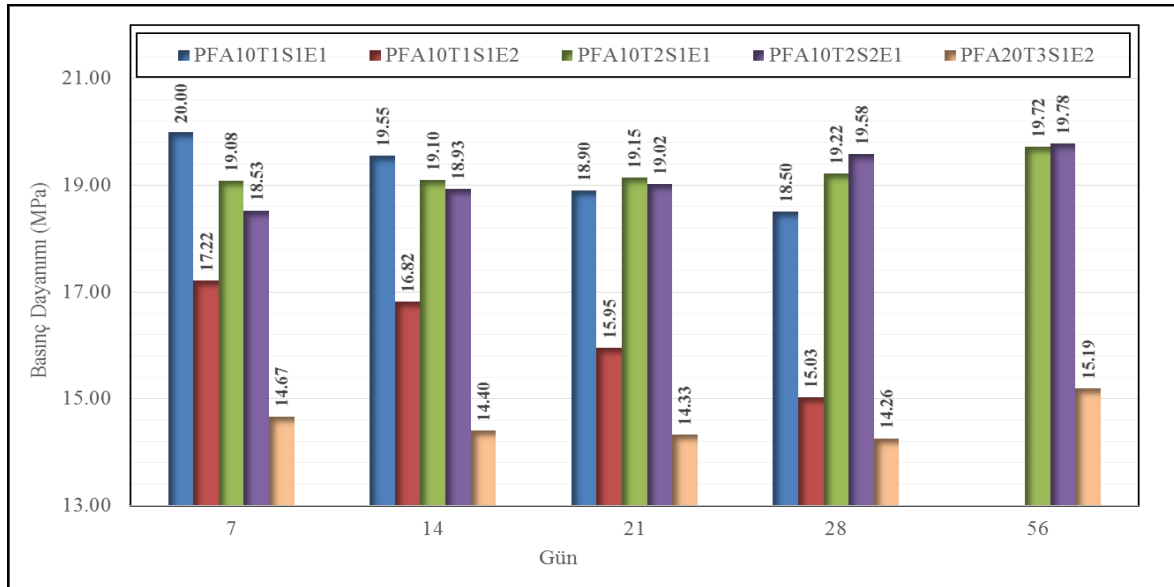
Numune Kodu	Na_2SiO_3	Su/ Na_2SiO_3	0. Gün	28. Gün	56. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	2.167	1.908	
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	2.107	1.866	
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	1.157	1.899	1.890
PFA10T2S2E1	220 mlt	0.341	2.210	1.934	1.949
PFA20T3S1E2	220 mlt	0.386	1.949	1.813	1.813



Şekil 9. Taze ve Sertleşmiş birim ağırlıklarının tüm numunelere göre değişimi

Tablo 17. Basınç Dayanımının tüm numunelere göre değişimi

Numune Kodu	Na ₂ SiO ₃	Su/Na ₂ SiO ₃	7. Gün	28. Gün	56. Gün
PFA10T1S1E1	220 mlt	0.386	20.00	18.50	
PFA10T1S1E2	220 mlt	0.386	17.22	15.03	
PFA10T2S1E1	220 mlt	0.386	19.08	19.22	19.72
PFA10T2S2E1	220 mlt	0.341	18.53	19.58	19.78
PFA20T3S1E2	220 mlt	0.386	14.67	14.26	15.19



Şekil 10. Basınç Dayanımının tüm numunelerine göre değişim

5. Sonuç ve Öneriler

Basınç dayanım değerleri ele alındığında; 28 günlük en yüksek basınç dayanım değerine 220 mlt Na₂SiO₃ alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen PFA10T2S2E1 tip numunelerde görülmüş, 56 günlük en yüksek dayanım değeri yine PFA10T2S2E1 tip numunelerde saptanmıştır.

Basınç dayanım değerlerinin numunelerin farklı sıcaklıklar altında kürlenme yapıldığı dikkate alınacak olursa; 28. gün sonunda 24 saat hava-72 saat 120⁰C kür tipine tabii tutulan ve içerdiği uçucu kül 75 µm elekten geçirilmiş numunelerin diğer tip numunelere göre basınç dayanım değerlerinin genel olarak daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin bünyesindeki su miktarının az bir miktar azaltılması ile dayanımın arttığı, kür tiplerinde sıcaklık artışı ile dayanımın arttığı, numune bünyesindeki PFA oranının artması ile de dayanımın azaldığı tespit edilmiştir.

220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 75 gr su içeriğine sahip olan, 75 µm elekten geçirilmiş uçucu kül içeriği olan PFA10T2S2E1 tip numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirildiğinde; 7 günlük birim ağırlık değerinin 1.934 kg/dm³, 28 günlük birim ağırlık değerinin ise yine 1.934 kg/dm³ olduğu tespit edilmiştir. 220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 85 gr su içeriğine sahip olan, 75 µm elekten geçirilmemiş uçucu kül içeriği olan PFA20T3S2E1 tip numunelerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları değerlendirildiğinde; 7 günlük birim ağırlık değerinin 1.786 kg/dm³, 28 günlük birim ağırlık değerinin ise 1.813 kg/dm³ olduğu tespit edilmiştir.

220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 75 gr su içeriğine sahip olan, 75 µm elekten geçirilmiş uçucu kül içeriği olan PFA10T2S2E1 tip numunelerin basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde; 7 günlük basınç dayanım değerinin 18.53 MPa, 28 günlük basınç dayanım değerinin ise 19.58 MPa, 56 günlük basınç dayanım değerinin 19.78 MPa olduğu tespit edilmiştir. 220 mlt alkali aktivatör yardımı ile aktive edilen ve 85 gr su içeriğine sahip olan, 75 µm elekten geçirilmemiş uçucu kül içeriği olan PFA20T3S2E1 tip numunelerin basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde; 7 günlük basınç dayanım değerinin 14.67 MPa, 28 günlük basınç dayanım değerinin 14.26 MPa, 56 günlük basınç dayanım değerinin ise 15.19 MPa olduğu tespit edilmiştir.

Su ve PFA içeriği diğer numunelere kıyasla az olan, tabii tutulduğu kürlenme tipinde daha fazla ve daha uzun süre sıcaklıkta kalan ve bünyesinde 75 µm elekten geçirilmiş uçucu kül bulduran numunelerin basınç dayanım değerleri genel anlamda diğer tip numunelere nazaran yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

7. gün sonunda en yüksek basınç dayanım değerine PFA10T1S1E1 tip numuneler, 28. gün sonunda en yüksek basınç dayanım değerine PFA10T2S2E1 tip numuneler ve 56. gün sonunda ise en yüksek basınç dayanım değerine yine PFA10T2S2E1 tip numunelerin sahip olduğu saptanmıştır. Numunelerde alkali aktivatör olarak kullanılan 220 mlt sodyum silikat (Na₂SiO₃) varlığı basınç dayanım değerlerine olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Aynı kür tipine tabii tutulmuş, aynı PFA içeriğine sahip ve içeriğinde 75 µm elekten geçmiş uçucu kül içeren tip numunelerde, karışım suyunda kullanılan su miktarının az olduğu tip numunelerde basınç dayanım değerinin 7. günde, 28. günde ve 56. günde dahil olmak üzere daha fazla olduğu saptanmıştır.

Numunelerde PFA oranının artması ile hem birim ağırlık değerlerinde hem de basınç dayanım değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir.

İleri ki aşamalarda yüksek oranda CaO içeren bu endüstriyel atık (pres filtre atığı) üzerine yapılacak çalışmalar da farklı bağlayıcı özellikli malzemeler ile özellikle farklı aktivatör molariteleri ve farklı sıcaklık kürlerinde deneysel gözlemler yapılarak; mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri incelendiği takdirde daha etkin sonuçlara ulaşılması muhtemeldir.

Teşekkür

2017-1578 kodlu bu proje, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği destekten ötürü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1]. Ateşin, Ö., Topçu İ. B., Yüksek dozajda kimyasal katkı kullanımının mikro beton özelliklerine etkisinin analiz ve modellenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi, 2017, 1.
- [2]. Saka R. C., Gökdemir A., Subaşı S., Sepiyolit İkameli Çimentolu Karışımların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018, 5 (2), 682.
- [3]. Bashar I. I., Alengaram U. J., Jumaat M. Z., Islam A., Development of sustainable geopolymer mortar using industrial waste materials, Advances in Functional Materials Conference Proceeding 2016, 3, 125.
- [4]. Vejmelkova, E., Konakova, D., Kulovana, T., Keppert, M., Zumar, J., Rovnanikova, P., Kersner, Z., Sedlmajer, M., Cerny, R., Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance, Cement & Concrete Composites, 2015, 55, 259.
- [5]. Sarıbaş İ., Geri Dönüşümlü Agregat Katkılı Beton için Gerilme-Şekil Değiştirme Modeli, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2019, 6 (1), 157.
- [6]. Teixeira E.R, Mateus R, Camoes A. F, Bragança L, Branco F. G, Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material, Journal of Cleaner Production, 2016, 112, 2222-2224.
- [7]. Mijarsh M.J.A., Megat Johari M.A., Ahmad Z. A., Compressive strength of treated palm oil fuel ash based geopolymer mortar containing calcium hydroxide, aluminum hydroxide and silica fume as mineral additives, Cement & Concrete Composites, 2015, (60), 65.
- [8]. Mallikarjuna Rao G., Gunneswara Rao T.D., Final Setting Time and Compressive Strength of Fly Ash and GGBS-Based Geopolymer Paste and Mortar, Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, (40), 3067.
- [9]. Budh C.D., Warhade N.R., Effect of Molarity on Compressive Strength of Geopolymer Mortar, International Journal of Civil Engineering Research, 2014, (5), 83.
- [10]. Özdemir İ., Koçak Y., Pirinç Kabuğu Külü İkameli Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2020, 7 (1), 160.
- [11]. Juenger Maria C.G, Siddique R, Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, Cement and Concrete Research, 2015, 78, 71.
- [12]. Kürklü G., Oda Sıcaklığında Kür Edilen Granüle Yüksek Fırın Cürufllu Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2016, 16 (025604), 357.
- [13]. Yıldırım K., Sümer M., Subaşı S., Hafif Beton Üretiminde Granüle Edilmiş Fındık Kabuğunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2018, 5 (2), 510.
- [14]. Singh B., Ishwarya G., Gupta M., Bhattacharyya S.K., Geopolymer concrete: A review of some recent developments, Construction and Building Materials, 2015, (85), 79.
- [15]. Djobo J. N. Y., Elimbi A., Tchakouté H. K., Kumar S., Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars, Construction and Building Materials 2016, 124, 606.
- [16]. Izquierdo, M., Querol, X., Davidovits, J., Antenucci, D., Nugteren, H., Fernandez-Perei, C., Coal fly ash-slag-based geopolymers: microstructure and metal leaching, J. Hazard. Mater 2009, 166, 562.
- [17]. Van Deventer, J.S.J., Provis, J.L., Duxson, P., Lukey, G.C., Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products, J. Hazard. Mater 2007, 139, 508.
- [18]. Li Z., Ding Z., Zhang Y., Development of sustainable cementitious materials, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology Conference Proceedings, 2004, 56.

- [19]. Montes C., Allouche E. N., Evaluation of the potential of geopolymer mortar in the rehabilitation of buried infrastructure, *Structure and Infrastructure Engineering, Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance* 2012, 8, (1), 90.
- [20]. Bondar D., Lynsdale C. J., Milestone N. B., Hassani N., Ramezaniyanpour A. A., *Engineering Properties of Alkali-Activated Natural Pozzolan Concrete*, *Acı Materials Journal Technical Paper*, 2011, 108-M08, 1.
- [21]. Ghafouri N., Najimi M., Radke B., *Natural Pozzolan-based geopolymers for sustainable construction*, *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75, (1110), 2.
- [22]. Topçu, İ. B., Canbaz, M., Alkali aktivite edilmiş yüksek fırın cürüflü harçlarda donma çözülme, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2018, 2, 1-16.
- [23]. Görhan G., Kürklü G., Alkali Tuz İçeriğinin Geopolimer Cephe Kaplama Malzemesi Özelliklerine Etkisi, *7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Beşiktaş – İstanbul, 3– 4 Nisan 2014, 2.
- [24]. Binici H., Eken M., Aksoğan O., Cüruf, Uçucu Kül, Silis Kumu ve Pomza Esaslı Geopolimerlerin Fiziksel, Mekanik Ve Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi* 2012, 8 (2), 13.
- [25]. Wazien, A. Z. W., Abdullah M. M. A. B., Razak R. A., Mohd Remy Rozainy M.A.Z., Tahir M. F. M., *Strength and Density of Geopolymer Mortar Cured at Ambient Temperature for Use as Repair Material*, *International Conference on Innovative Research, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2016, 133, 2.
- [26]. Atış, C. D., İlkentapar S., Görür E. B., Karahan, O., Alkali ile aktifleştirilen uçucu kül geopolimer harcın mekanik özellikleri üzerine ısı kür süresinin etkisi, *9. Ulusal Beton Kongresi*, 2015, 273-281.
- [27]. Topçu, İ. B., Toprak M. U., Alkalilerle aktive edilen taban küllü hafif harç üretimi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2009, 2, 153-164.
- [28]. Huseien, G., F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M., W., *Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil*, *Construction and Building Materials*, 2016, 125, 1229-1240.
- [29]. Arenas-Piedrahita J.C., Montes-Garcia P., Mendoza-Randel J.M., Lopez-Calvo H.Z., Valdez Tamez P.L., Martinez-Reyes J., *Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash*, *Construction and Building Materials*, 2016, 105, 69-75.