

## UÇUCU KÜL İNCELİĞİNİN BETONUN SÜLFAT DİRENCİ ÜZERİNE ETKİSİ

Demet DEMİR ŞAHİN<sup>1\*</sup>, Hasan EKER<sup>2</sup>, Mustafa ÇULLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane Meslek Yüksekokulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Gümüşhane, Türkiye

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Eskipazar Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik, İSG Pr., Karabük/Türkiye

<sup>3</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane/Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 05.01.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 23.05.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1053376

### ÖZET

Beton bileşiminden biri olan çimentonun hidrasyonu ile sülfat iyonları arasında oluşan kimyasal reaksiyon sonucu sülfat korozyonu oluşmakta ve bu oluşum betonda bozulmalara neden olmaktadır. Sülfatın beton üzerinde oluşturduğu hasarı azaltmak ya da en aza indirmek için çimento yerine uçucu kül gibi puzolanlar kullanılmaktadır. Bu çalışmada betonun ana bileşenlerinden biri olan çimento yerine çimentoya yakın bileşene sahip olan Afşin Elbistan Termik Santralinden temin edilmiş uçucu kül atığı kullanılmıştır. Uçucu külün (UK) bilyalı değirmende 0, 10 ve 20 dk öğütülmesi ile elde edilen farklı inceliklere sahip örnekler % 10 UK ikame oranı ile hazırlanarak uçucu kül katkılı beton örnekleri oluşturulmuştur. Daha sonra bu örnekler; % 5 ve % 10 katkılı sülfat çözeltisine maruz bırakılmış ve beton örneklerinin sülfat direnci üzerine etkisini araştırmak için basınç dayanımı ve ultrasonik dalga hızı ölçümü testlerine tabi tutulmuş, ağırlık kayıpları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uçucu kül öğütme süresine bağlı olarak % 5 ve % 10 sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır ve daha sonra katkılı beton örneklerindeki basınç dayanım değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Sülfat çözeltisi miktarının artmasıyla birlikte beton örneklerinin basınç dayanımının azaldığı ve bu beton örneklerinin referans örneğine göre daha yüksek basınç dayanımı değerine sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte; öğütme süresinin artmasıyla ağırlık kayıplarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca; öğütmenin etkisi ile uçucu külün inceliğinin artması sonucu ultrasonik dalga hızı değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sülfat direnci, incelik, öğütme süresi, uçucu kül, C tipi, beton.

## EFFECT OF FLY ASH FINENESS ON SULFATE RESISTANCE OF CONCRETE

### ABSTRACT

Sulphate corrosion occurs due to a chemical reaction between the hydration of cement, which is a concrete compound, and sulphate ions, resulting in deterioration in concrete. Pozzuolanas such as fly ash are used instead of cement to reduce or minimize damage caused by sulphate on concrete. This study uses fly ash tailings from Afsin Elbistan thermal power plant, which has a component close to cement instead of cement, which is one of the main components of concrete. Examples of different fineness obtained by grinding the fly ash (FA) in the ball mill for 0, 10 and 20 minutes were prepared with a FA substitution rate of 10%, creating examples of fly ash-added concrete. These examples were then exposed to a 10% and 5% additive sulphate solution and tested for compressive strength and ultrasonic pulse velocity measurement tests to investigate the effect of concrete samples on sulphate resistance. According to the results obtained, the fly ash has been exposed to a solution of 5% and 10% sulphate, depending on the grinding time and then the increase in the compressive strength values in these concrete examples was examined. It has been found that the concrete samples added have reduced compressive strength by increasing the amount of sulphate solution and have a higher compressive strength value compared to the reference sample. Besides, weight losses have been reduced as the grinding time increases. It has also been determined that ultrasonic pulse velocity values have increased as a result of the increase in the fineness of the grinding and the fineness of the flying ash.

**Keywords:** Sulfate resistance, fineness, grinding time, fly ash, C type, concrete.

\* 1e-posta: [demetdemir2929@hotmail.com](mailto:demetdemir2929@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0338-6562> (Sorumlu Yazar)

2e-posta: [eker\\_hasan78@hotmail.com](mailto:eker_hasan78@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2644-4681>

3e-posta: [mustafacullu@hotmail.com](mailto:mustafacullu@hotmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0454-7949>

## 1. Giriş

Beton agrega, çimento, su, mineral ve kimyasal katkıların bir araya gelmesinden oluşmaktadır [1, 2]. Beton bileşenleri; her yerde üretilebilen, dayanıklı, ekonomik ve kolay şekil alan, üretim süresi boyunca düşük enerji harcanan, en çok üretilen ve tüketilen yapı malzemesi olarak kullanım alanı bulmaktadır [3]. Özellikle insanların çok fazla kullandıkları okul, hastane, yol, köprü gibi yapıların uzun ömürlü, dış etkilere karşı dayanıklı olarak tasarlanması ve gelecekte oluşabilecek hasarlara karşı uzun ömürlü olması beklenmektedir. Bu yapılar üzerinde yıkıcı etkiler; fiziksel, kimyasal ve mekanik kökenli olmaktadır. İklim değişimi sonucu oluşan donma-çözünme, kış aylarında buz eritici olarak kullanılan çözücü tuzlar ve yüksek sıcaklık, fiziksel olarak etkiyi oluşturan bozulma nedenleri arasında yer almaktadır. Betonun bileşenlerini oluşturan malzemelere ve dışardan betona sızan zararlı maddelere bağlı olarak özellikle alkali-silika reaksiyonu, sülfat etkisi, karbonatlaşma, korozyon, bazı asit ve tuz etkileri kimyasal olarak da betonda hasar oluşturan reaksiyonların başında gelmektedir. Son olarak mekanik yolla betona darbe, aşınma ve erozyon da hasar vermekte dayanım süresini kısaltmaktadır [4].

Betonun direncini ve sülfatın zarar verici etkisi birçok parametre tarafından etkilenmektedir. Bu parametreler iç ve dış faktörler olarak ayrılmaktadır. Betonda sülfatın zarar verici şiddetini belirleyen faktörler; betonun karışım bileşenleri ve oranı, çimento türü, çimento içeriği, su/bağlayıcı oranı, katkılar ve çimento için kullanılan malzemeler, kütleme ve kür durumu, gözenek gibi sertleşmiş beton özellikleri, yapı, geçirgenlik, yayılma ve mekanik özellikler, sülfat tipi, sülfat konsantrasyonuna maruz kalma koşulu, daldırma tipi ve maruz kalma sıcaklığıdır [5]. Betonda sülfatın şiddetini belirleyen dış faktörlerin başında ise çevresel koşullar gelmektedir. Mesela hava değişiklikleri nedeniyle çözünür tuzların lokalize göçü, kuru çevrim sırasında sülfat betonda birikebilir ve böylece konsantrasyonda artışla birlikte betonda bozulmaya yol açabilir [6].

Beton bileşeninin büyük çoğunluğunu oluşturan çimento üretim sürecinde çevreye zarar verici etkisi nedeniyle yüksek oranda karbondioksit üretmekte ve bu durum küresel ısınmanın yaklaşık %65'ini temsil etmektedir. Küresel ısınmanın büyük bir kısmından sorumlu olan çimento üretimi ekolojik olarak enerji tüketimi ve açığa çıkardığı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) miktarı ile çevreye verdiği zararın göstergesidir [7]. Bu nedenle çimento yerine alternatif bağlayıcılara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum; sürdürülebilir ve ekolojik bir betonun gerekli olduğunun bir kanıtıdır. Çimento kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltmak için puzolan gibi bağlayıcılar çimento yerine kullanılmaktadır. Bu sayede; betonun durabilitesinin artması yönünde büyük bir katkı sağlanmaktadır [8].

Çimentonun kimyasal bileşeni ile puzolanik kökenli mineral katkıların kimyasal bileşimi benzer olması nedeniyle çimento yerine puzolanik kökenli mineral katkıların kullanımı mümkündür. Bu katkıları sayesinde betonun sülfat saldırısına karşı direncinin artması ve doğaya bırakılan atık malzemenin geri dönüşüm olarak tekrar kazanımının sağlanması mümkün olabilmektedir [9]. Atık malzemelerin tekrar geri kazanılması ile çevre kirliliği ve bu atıkların çevreye verdiği tahribat da büyük oranda azaltılmaktadır [10-14]. Mineral katkı olarak adlandırılan atık ürünler içerisinde uçucu kül (UK) de yer almaktadır. UK; termik santrallerin enerji üretimi sırasında kömürün yanması ile bacalarda tutularak elde edilmektedir ve kalsiyum, silisyum, alüminyum gibi çimentonun ana bileşenlerinden oluşmaktadır [15]. Betonda çimento yerine kullanılan uçucu kül ile hazırlanan numuneler, normal beton numunesine göre daha az basınç dayanım kayıpları yaşaması sebebiyle tercih edilmektedir [16-18]. Ayrıca ortamda bulunan sülfata karşı betonun daha fazla dayanıklı olması için uçucu külün kullanımı ile ortamdaki Ca(OH)<sub>2</sub>'i bağlayarak sülfatla reaksiyona girmesi engellenmektedir. Böylece bağlayıcı içindeki Ca(OH)<sub>2</sub> ve C3A oranının azaltılması sağlanmaktadır [19-21].

### 1.1. Literatür Özeti

Beton çeşitli nedenlerle bozulabilir ancak sülfata bağlı bozulma betonun özellikle erken dönemde bozulma sebeplerinin başında gelmektedir [3]. Beton içerisinde sülfatın zarar verici etkisinin derecesi; maruz kaldığı yeraltı suyu, yüksek kil içerikli toprakların varlığı, deniz suyu, organik maddeler ve

betonun üretim aşamasında kullanılan karışım suyundan ileri gelmektedir [22-24]. Bu sulardan ileri gelen sülfat iyonları beraberinde potasyum, sodyum, kalsiyum ve magnezyum gibi katyonlarla birlikte bulunmaktadır [25]. Bunların içerisinde zarar verici özelliği en yüksek olan magnezyum sülfat olup daha sonra sodyum sülfat gelmektedir. Bu iki sülfat içeriği kalsiyum, potasyum ve amonyum sülfattan çok daha yıkıcı özelliğe sahiptir [26].

Sülfat tuzları toprakta ve yeraltı suyunda bulunan sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), magnezyum sülfat ( $\text{MgSO}_4$ ) ve kalsiyum sülfat ( $\text{CaSO}_4$ ) şeklinde yer almaktadır [27]. Sülfat içeriklerinden kalsiyum sülfat çok düşük çözünürlüğe sahipken, sülfat atağı ağırlıklı olarak çimento hidratlarının sodyum sülfat ile reaksiyonuna girmesi ve magnezyum sülfat oluşturması ile zarar verici olmaktadır [28]. Sülfat iyonları betonun hidrate olmuş bileşikleriyle reaksiyona girmektedir. Bu beton bileşikleriyle kalsiyum hidroksit (CH) [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], kalsiyum alüminat hidrat, ve türüne bağlı olarak kalsiyum silikat hidrat (C—S—H) gibi çözeltilerdeki sülfat iyonları ile tepkimeye girmektedir [29]. Sodyum sülfatın ve magnezyum sülfatın, hidrate olmuş kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesi sonucu alçı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), sodyum hidroksit (NaOH) ve magnezyum hidroksit [ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ] oluşmaktadır. Alçı taşı betonun genişlemesine neden olan hacim artışına oluşumuna, betonun sertliğinin ve mukavetinin azalmasına neden olmaktadır [30]. Üretilen alçıtaşı hidratlı kalsiyum ile reaksiyona girebilir. sülfalüminatlar ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), hidratlı kalsiyum alüminatlar ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ) veya hidratlanmamış trikalsiyum alüminatlar ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve etrenjit oluşturmaktadır ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Etrenjit oluşması ile betonda zarar verici etkinin artmasına neden olmaktadır. Bu zarar verici etki öncelikle betonun katı hacminin orijinalinkinden daha büyük bir artış (% 227) oluşturmaya sebep vermektedir. Hacimdeki artış genişlemeye neden olur, yani etrenjit kristallerinin büyümesinin uyguladığı strese ve zayıf kristalin tarafından su alınmasından kaynaklanan şişmeyi sağlar [29,30]. Sülfat iyonları sadece geniş etrenjit ve alçıtaşı oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda hidratasyon nedeniyle üretilen kalsiyum silikat hidrat ile reaksiyona girer kalsiyum silikatlar C—S—H'dan kalsiyum kaybına neden olur. Bu etkide beton içerisinde sadece Magnezyum sülfatın bulunmasından kaynaklanır.

Sülfatın beton üzerinde zarar verici etkisinin başında beton içerisinde betonun hacmini arttırmaya neden olan etrenjit ve alçı taşı oluşumundan kaynaklanmaktadır [30]. Ayrıca sülfat iyonları kalsiyum hidroksit ile reaksiyonlarından sonra oluşan alçıtaşının yanı sıra katyon tipine bağlı olarak  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , NaOH gibi hidroksitler oluşmaktadır. Bu hidroksitlerin ortamda bulunması sülfatın zarar verici etkisini arttırmaya ve etrenjit oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Sülfat etkisi ile oluşan zarar verici mekanizmalar beton bünyesinde bulunan çimentonun yumuşamasına ve bozulmasına sebep olmaktadır [31,32]. Bu iki zararlı kimyasal reaksiyon ürünü, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ve kalsiyumlu ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bileşenlerle bir araya gelmesi sonucu oluşmaktadır [31,33,34]. Bu bileşenlerin beton içerisinde genişleme yapması ile çatlakların oluşumuna, geçirimsizliğin artmasına ve agrega-çimento hamuru aderansını etkileyerek betonun tamamen bozulmasına neden olmaktadır [35-37]. Betonda sülfat iyonu kimyasal reaksiyonlu bozulmalara neden olmaktadır. Bu şekilde oluşan bozulmalara karşı çimentonun kimyasal bileşeninin çimento yerine kullanılabilir malzemelerle değiştirmek yada desteklemek ve betonun geçirimsizlik kazandırılması ile hasarları engellemede ya da azaltmada en etkili önleme yöntemlerinin başında gelmektedir [38, 39]. Sülfatın zarar verici etkilerini en aza indirmek ya da ortadan kaldırmak için yıllardır süre gelen çalışmalar yapılmaktadır [40]. Bu çalışmalarda özellikle uçucu kül, silis dumanı, cüruf, metakaolen gibi mineral katkı kullanımı üzerinde yoğunlaşmış ve sülfat direncine karşı betonun direnci arttırılmaya çalışılmıştır [41-44]. Çünkü bu gibi atık malzemeler betonun gözenek yapısının özelliklerini iyileştirmede, kimyasal saldırı sonrası direncini arttırmada, kimyasal çözeltiyi nötralize etmede ve reaksiyona giren ürünleri biriktirme ile zarar verici yapısını pasif hale dönüştürmeyi sağlamaktadır [45]. Sülfata dayanıklı beton üretmek için yapılan çalışmalarda; uçucu kül kullanımının önemini vurgulamakla birlikte özellikle F tipi ya da düşük kalsiyumlu uçucu kül kullanımının betonun sülfat gibi kimyasal saldırısına karşı direncini arttırdığı ortaya konulmuştur [46, 47]. Puzolanların sülfat direnci üzerine etkisi özellikle portland çimentosunun ilk olarak su ile tepkimeye girmesi ve sonuç olarak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve C-S-H jelinin oluşmasına neden olmasıyla ilgilidir [48]. Tamda bu esnada açığa çıkan hidrate olmuş çimento ürünü ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), puzolanların bileşiminde bulunan aktif silis ( $\text{SiO}_2$ ) ya da amorf puzolan taneleriyle tepkimeye girmesi daha çok C-S-H jeli oluşturmaktadır. Bu jel çimento hidratasyonu sonucu oluşan C-S-H ile aynı yapıda olup puzolanik reaksiyon sonucu oluşan

ürünün yoğunluğuna göre daha düşüktür [3,49]. Puzolanların tepkimeye girmesi sonucu serbest kireci bağlaması, alçı taşı oluşumunu ve bu bileşene bağlı olarak devam eden zararlı reaksiyonları azaltarak oluşan sülfat etkisini azaltmaktadır. Çimentonun bir kısmı ile puzolanik malzeme yer değiştirilerek kullanılması ile  $C_3A$  ( $3CaO.SiO_2$ ) bileşeninin azalmasını bağlı olarak alüminat fazları da azalacaktır. Puzolan katkılı çimentolar normal bileşiminde çimentoya kıyasla çimento hidratasyon ürünü olan  $Ca(OH)_2$ 'in büyük bir oranda tükettiği ve pH'ı düşürmesiyle etrenjit gibi şişerek genleşmeye neden olan jelin oluşumunu azaltmaktadır. Ayrıca puzolanların oluşturduğu C-S-H tabakası yüksek alüminat ve reaktif diğer fazların etrafında koruyucu tabaka oluşturması ikincil etrenjit oluşumunu engellemeye neden olur. Puzolanların kimyasal reaksiyonlarla sülfatlara karşı direnci desteklemesinin yanında sertleşmiş çimento hamurunun daha yoğun bir yapı kazanmasına, boşluklarda çökmesi ile de daha geçirimsiz katkılı çimentolar oluşturmaya buna bağlı olarakta sülfat iyonlarının betonun ana fazından içeri nüfuz etmesini engellemektedir [50].

Gözenek yapısı betonun geçirimsizliğini ve buna bağlı olarak kimyasal çözeltinin giriş derecesini etkilemektedir. Tamda bu kısımda uçucu kül inceliği devreye girmesi ile betonun ince gözenek yapısını ve kimyasal saldırı sonrası daha büyük bir direnç kazanmasına katkı sağlamaktadır [51]. Chareerat [52], çalışmada ince uçucu kül katkısı ile üretilen betonların, kalın uçucu kül katkılı betonlara kıyasla gözenek hacmini azalttığı ifade etmektedir. Uçucu kül, yüksek inceliğe sahip olacak şekilde öğütüldüğü zaman beton malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [53, 54]. Freeman ve Carrasquillo [55], çalışmalarında uçucu külü çimento ile öğüterek beton içerisinde kullandıklarında betonun sülfata karşı dayanıklı olduğunu görmüşlerdir. Çalışmalarında F ve C tipi uçucu külü %25 ve %35 oranında çimento içerisine mineral katkı olarak hem de çimento ile öğütülerek bileşen olarak kullanmışlardır. Sonuç olarak; öğütülmüş uçucu kül kullanımının sülfata karşı daha fazla direnç gösterdiğini, sülfata karşı C tipi uçucu külün, F tipi uçucu küle göre daha etkili olduğunu, sülfata bağlı genleşmeye karşı C tipi uçucu külün daha fazla etkili olduğunu ve düşük CaO içeren F sınıfı uçucu küllerin öğütülerek kullanılmasının referans numuneye göre betonun daha az genleşmesini sağladığını belirtmiştir. Yapılan çalışmalarda betonda ince malzeme olarak kullanılan atık ürünün betonun dayanıklılığını arttırmaya, gözenek miktarını azaltmaya ve sonrasında klorür penetrasyon direnci ve artan dirence bağlı sülfat saldırısı azaltmaktadır [56]. Chindaprasirt vd., [57] tarafından yapılan çalışmada, F tipi uçucu kül kullanımı sülfata karşı direnci arttırmaya özellikle uçucu külün inceliğinin artırılması orijinal küle göre daha çok arttırmaya ve genleşmeyi azaltmaya katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

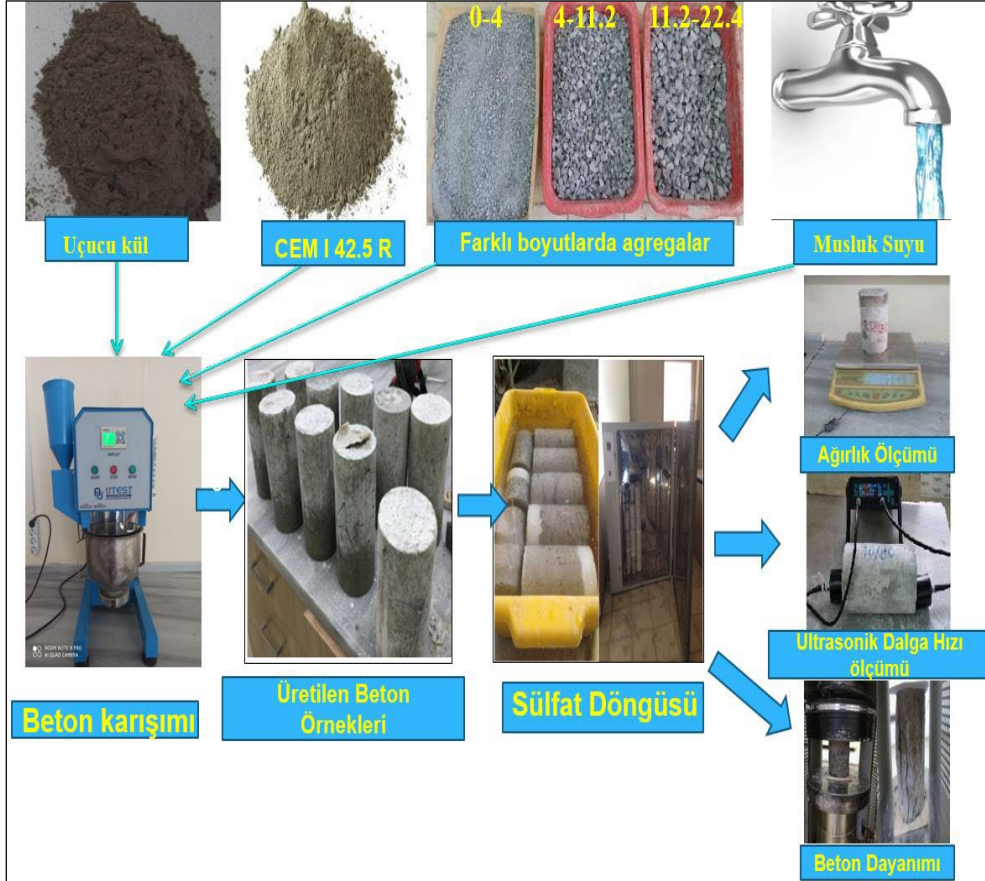
Bu çalışmada C tipi uçucu külün (0, 10 ve 20 dk) farklı öğütme sürelerinin ve çimento içerisinde % 10 oranında ikame edildiğinde elde edilen uçucu kül katkılı betonların sülfat atağına karşı (% 5 ve % 10 sülfatlı suya maruz bırakılmış) betonun performansı ve direnci üzerine etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Bu kapsamda betonların sülfat etkisinde kaldığında basınç dayanımlarındaki değişimleri, ağırlık kaybı ve ultrasonik dalga hızı deneylerine tabi tutulmuş ve sonuçlar belirlenmiştir. Araştırma kapsamında % 5-% 10 konsantrasyona sahip çözeltiler kullanılarak 8 defa ıslanma kuruma çevrimi gerçekleştirilmiştir. Bu konsantrasyona sahip zemin doğada karşılaşılanlardan daha yüksektir. Her döngüden sonra numuneler alınıp ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Son döngüden sonra tahribata uğrayan numuneler kesilerek basınç dayanımları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre uçucu kül öğütme süresine bağlı olarak % 5 ve % 10 sülfat çözeltisine maruz bırakılmış katkılı beton örneklerinin basınç dayanım değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Bununla birlikte; öğütme süresinin artmasıyla ağırlık kayıplarının azaldığı, öğütmenin etkisi ile uçucu külün inceliğinin artması sonucu ultrasonik dalga hızı değerlerinin de arttığı belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Materyal

Bu deneysel çalışmada üretilen beton örneklerinde kullanılan malzemeler; kireçtaşı agregası, çimento, uçucu kül ve Gümüşhane şehir şebeke suyudur. Çalışmada kullanılan agrega Gümüşhane ilinde yer alan taş ocağından alınmış ve bu agreganın türü kireçtaşıdır. Bu agregaya ait farklı tane boyutları beton bileşeni içerisinde kullanılmış ve beton örnekleri üretilmiştir. Kullanılan boyutlar 0-4, 4-11.2,

11.2-22.4 mm olarak Şekil 1'deki deney akım şemasında gösterilmiştir. Beton numunelerin oluşturulmasında kullanılan CEM I 42.5 R çimento, Gümüşhane Aşkale çimento fabrikasından temin edilmiştir. Uçucu kül; Afşin Elbistan termik santralinden temin edilmiştir (Şekil 1). Çizelge 1'de Aşkale çimento fabrikasından alınan çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler verilmiştir.



Şekil 1. Deney akım şeması.

Çizelge 1. CEM I 42.5 R çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler.

Kimyasal Özellikler (%)		Fiziksel Özellikler	
SiO <sub>2</sub>	16.72	İncelik (45 µ elek üstü %)	8.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.27	Özgül Ağırlık ( gr/cm <sup>3</sup> )	3.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.02	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	4099
CaO	60.25	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2saa-45dk
MgO	1.73	Priz Sonu(saat-dk)	3saa-30dk
SO <sub>3</sub>	2.70	Hacim Genişlemesi(mm)	0.9
Kızdırma Kaybı	5.27	Su İhtiyacı %	29.2
Na <sub>2</sub> O	0.12		
K <sub>2</sub> O	0.61		
Cl	0.0171		
Ölçülemeyen	5.7729		
Toplam	100		
s.CaO	0.30		
Katkı%	17.82		
		<b>Mekanik T. Basınç Dayanımı( N/mm<sup>2</sup>)</b>	
		2.Gün	24.0
		28.Gün	51.86

Afşin Elbistan uçucu külüne ait kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için Gümüşhane Aşkale Çimento Fabrikası laboratuvarında yapılan fiziksel, kimyasal ve mekanik testler sonrasında elde edilen değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler

Kimyasal Analiz (%)		Fiziksel Testler	
Bileşen	(%)	Fiziksel Özellikler	
SiO <sub>2</sub>	29.20	İncelik (45 µ elek üstü %)	50.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.52		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.57	Özgül Ağırlık ( gr/cm <sup>3</sup> )	2.63
CaO	37.74		
MgO	1.80	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	1867
Na <sub>2</sub> O	0.42		
K <sub>2</sub> O	0.65	Priz Başlangıcı (saat-dk)	2saat-45 dk
SO <sub>3</sub>	4.55		
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.050	Priz Sonu(saat-dk)	3 saat-20 dk
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.052		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.482	Hacim Genişlemesi(mm)	0
TiO <sub>2</sub>	0.52		
ZnO	0.001	Su İhtiyacı ( %)	27.7
KK	2.25		
Toplam	95.81	Su miktarı (gr)	138.5
SCaO	4.63		

## 2.2. Metot

C25/30 dayanım sınıflarında üretilen betonlar, 28. güne kadar suda kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme sonunda beton numuneleri, % 5 ve % 10 sülfat içerikli suya maruz bırakılmıştır ve ağırlık kaybı, ultrasonik dalga hızı ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

### 2.2.1. Numunelerin hazırlanması

Bu deneysel çalışmada hazırlanan beton örnekleri Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yapı ve Malzemeleri Laboratuvarında Çizelge 3’te belirtilen karışım oranlarına göre hazırlanmıştır. 10 x 20 cm silindirik beton numunelerin TS 802 standardında ifade edilen C25/30 dayanım sınıfına göre tasarımı yapılmıştır.

**Çizelge 3.** Malzeme karışım miktarları.

Öğütme Süresi (dk)	Çimento Kg/m <sup>3</sup>	Su Kg/m <sup>3</sup>	Uçucu Kül Kg/m <sup>3</sup>	Agrega						Hava dm <sup>3</sup>	S/Ç	Teorik Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
				İnce (0-4 mm)		Orta (4-11.2 mm)		Kaba (11.2-22.4 mm)				
				%	Kg/m <sup>3</sup>	%	Kg/m <sup>3</sup>	%	Kg/m <sup>3</sup>			
Referans	348	190	0	38%	686	18%	328	44%	801	20	0.55	2353
0	313.2	190	29.5	38%	686	18%	328	44%	801	20	0.55	2347
10	313.2	190	30.4	38%	686	18%	328	44%	801	20	0.55	2348
20	313.2	190	30.5	38%	686	18%	328	44%	801	20	0.55	2348

### 2.2.2. Sülfat Dayanıklılığı Tayini

Üretilen beton örneklerinin sülfat direncinin belirlenmesi için numuneler ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulmuştur. Deneylerde kullanılan sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) çözeltisi; 100 lt çözelti için 90 lt su ve 10 kg  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kullanılmasıyla ağırlıkça %10'luk çözelti, 100 lt çözelti için 95 lt su ve 5 kg  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  kullanılmasıyla ağırlıkça % 5'lik çözeltiler elde edilmiştir.  $105^\circ\text{C}$ 'de, 2 gün bekletildikten sonra sodyum sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) içeriği % 5 ve % 10 olan solüsyonda içerisinde 2 gün bekletilmiştir. Bu şekilde bir ıslanma-kuruma çevrimi 8 kez yapılmıştır. Her çevrimden sonra beton örneklerin ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Bu şekilde bir ıslanma-kuruma çevrimi yapılmıştır. Her çevrimden sonra beton örneklerin ultrasonik dalga hızları ve ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

### 2.2.3. Ultrasonik Dalga Hızı Ölçümü

Hazırlanan beton numuneleri; Ultrasonik dalga hızı ölçümü ASTM C 597'e göre belirlenmiştir. Numune üzerine gönderilen vibrasyonel enerjinin hızının ölçülmesinden elde edilmektedir. Beton örneğinin yatay tutulması sonrasında bir yüzeyinden içeriye gönderilen ses üstü dalgaların, numunenin diğer bir yüzeye kadar zamanda geçtiği değer ölçülmekte ve denklem (1) kullanılarak belirlenmektedir.

$$V = \left(\frac{S}{t}\right) \times 106 \quad (1)$$

Burada; V = P dalga hızı (metre/saniye),

S= Numunenin ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (metre),

t = Beton yüzeyinden P dalganın gönderilmiş ve alındığı yüzeye kadar geçen zamandır (mikro saniye).

### 2.2.4. Ağırlık Kaybı

Hazırlanan beton örnekleri, 28 gün kür havuzunda bekletildikten sonra çıkarılmış ve numuneler laboratuvar ortamında 1 gün kuruması için bekletilmiştir. Kuruyan numuneler ilk tartımı yapılarak ilk ağırlık değeri not edilmiştir. Daha sonra  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  içeriği % 5 ve % 10 olan solüsyon içerisinde numuneler bekletilmiş ve 8 döngü sonrasında çevrim tamamlanmıştır. Yapılan her çevrim sonrası numunelerin ağırlık değerleri ölçülmüş ve başlangıç ağırlık değerinden çıkarılarak değişim miktarı % olarak denklem 2'de ifade edilmiştir.

$$\% \text{ Ağırlık kaybı} = \frac{(\text{Son ağırlık} - \text{İlk ağırlık})}{\text{İlk ağırlık}} \times 100 \quad (2)$$

### 2.2.5. Basınç Dayanımın Tayini

Bütün çevrimlerin tamamlanmasından sonra numuneler, TS EN 12390-3 standardına göre basınç dayanımına tabi tutulmuştur. Basınç dayanım değerleri belirlenirken her bir öğütme süresinde 3 adet numune kırılmış ve üçünün ortalaması değer olarak alınmıştır. Beton basınç dayanımının hesaplanması denklem 3 kullanılarak yapılmıştır.

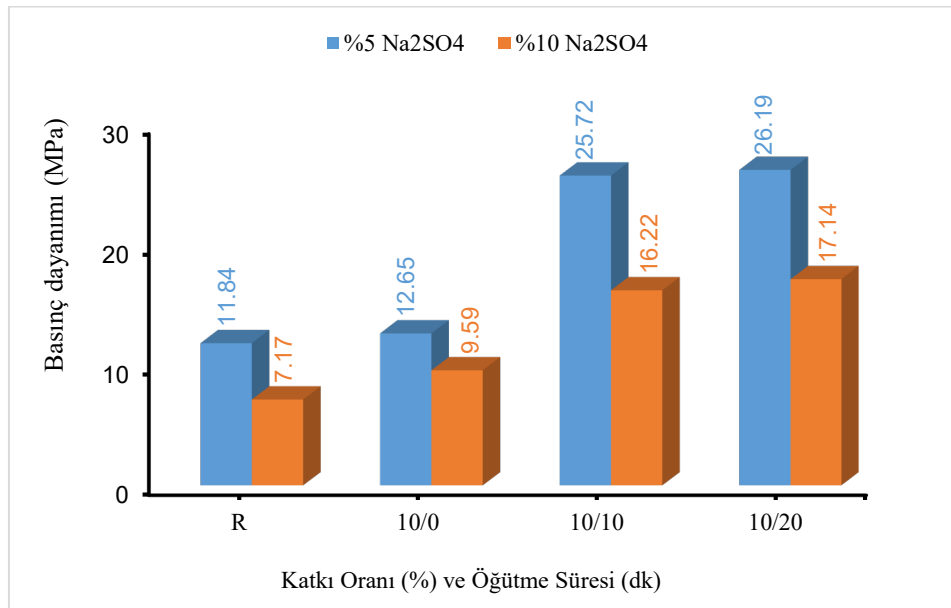
$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Eşitlikte;

$f_c$  = Basınç dayanımı, MPa ( $N/mm^2$ ),  
 $F$  = Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,  
 $A_c$  = Numunenin, üzerine basınç uygulandığı en kesit alanı, ( $mm^2$ ) ifade etmektedir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Uçucu külün 0, 10 ve 20 dk öğütme sonrası farklı incelikte elde edilen uçucu küllerin çimento içerisinde % 10, ikame edilmesi ile katkılı betonlar üretilmiştir. Üretilen betonların 28 günlük kür süresi sonrasında % 5 ve % 10  $Na_2SO_4$  solüsyon içerisinde bekletilmesi ile belirlenen basınç dayanım değerleri Şekil 2’de verilmiştir.



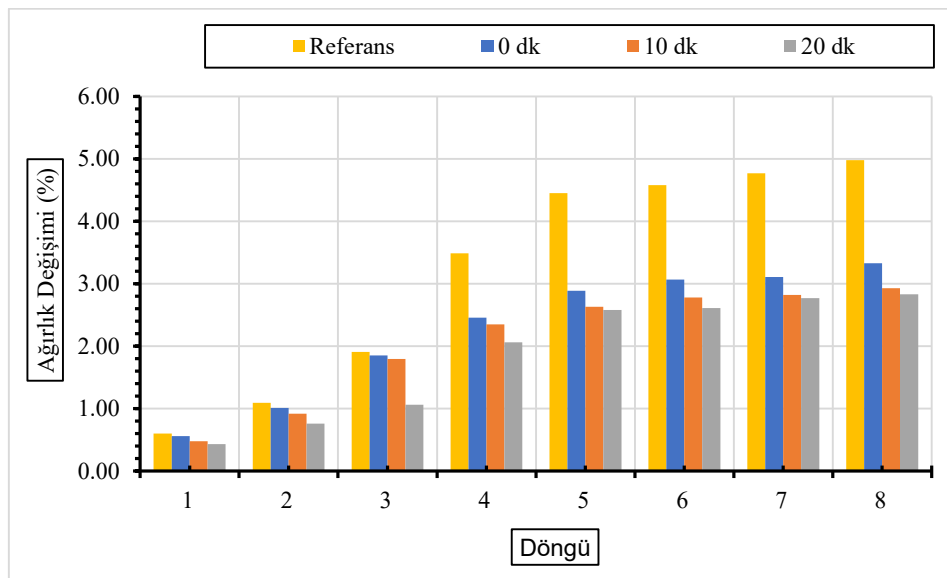
Şekil 2. Farklı incelikli ve % 10 uçucu kül ikameli betonların basınç dayanım değerleri.

Şekil 2’de görüldüğü üzere; % 10 uçucu kül katkılı beton örneklerinin % 5  $Na_2SO_4$  çözeltisi içerisindeki örneklerin basınç dayanım değerleri % 10  $Na_2SO_4$  çözeltisi içerisinde bekletilen örneklerle göre daha yüksek değerler aldığı belirlenmiştir. Her iki çözelti içerisinde bekletilen uçucu küllerin basınç dayanım değerlerinin uçucu kül inceliğinin etkisi ile artış gösterdiği açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca uçucu kül katkılı beton örneklerinin basınç dayanım değerleri referans beton örneğine göre daha yüksek basınç dayanım değerleri almıştır. % 10 uçucu kül katkılı betonların farklı sülfat çözeltisi içerisinde maruz bırakılmasında basınç dayanım farkının öğütme etkisi ile en belirgin artış 10 dk öğütme süresinde yaşanmıştır. Bununla birlikte; en yüksek basınç dayanıma sahip numunenin 20 dk öğütme süresine tabi tutulmuş %10 ikameli uçucu kül numunesinde olduğu görülmüştür. Uçucu külü öğütme etkisi ile inceltmesi ve farklı ikame oranlarında beton bileşiminde çimento yerine kullanılması basınç dayanımını arttırdığı yönünde literatürde destekleyici çalışmalarda mevcuttur. İkame oranının etkisinin optimum karışım oranında maksimum performans veren beton üretmek olduğu birçok çalışmada vurgulanmaktadır. Fournier vd. [58] ve ASTM C 618-05 [59] beton içerisinde çimento bileşiminin yerine % 30 oranında uçucu kül ikamesi puzolanik aktiviteyi arttırdığını ve puzolanik reaksiyon sonucu dayanımı destekleyici hidrasyon ürünlerinin oluşturduğunu ifade etmişler. Farklı ülkelerde yapılan birçok çalışmada yaygın olarak uçucu külün çimento yerine kullanım oranı % 20-30 olarak kabul edilmiştir. Ancak bizim çalışmamızda % 10 ikame oranında da sülfat etkisi altında betonun basınç dayanım değerlerinin referans betona kıyasla daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. İkame oranının etkisi ve yaygın kullanım oranının belli aralıklarda kabul edilmesi uçucu külün küresel şekilde



olması, puzolanik özellik göstermesi, betonun işlenebilirliğini kolaylaştırması, uzun vadede mekanik ve dayanıklılık özelliğini iyileştirmede ideal bir katkı oranı ile durabilitesi yüksek betonlar elde edildiğinin kanıtıdır [60-63]. Bu çalışma da ise literatüre kıyasla daha düşük ikame oranı ile daha yüksek dayanım performansının oluşturulması uçucu külün inceliğinin etkisinin bir göstergesi olarak kabul görmüştür. Çünkü uçucu külde incelik artışı beton içerisinde ikame oranının değiştirilmesinde her zaman olumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. Tkaczewska ve Małolepszy [64] çalışmalarında termik santralden farklı inceliklere sahip uçucu kül toplayarak bu külü çimento yerine % 40 oranında kullanmaları ile hazırladıkları örneklerin farklı kür sürelerinde  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde beklemeye bırakmışlar. Numunelerin basınç dayanım değerlerini kıyasladıklarında tüm kür süreleri içinde en ince uçucu kül katkılı betonda en yüksek basınç dayanım değerlerine rastlamışlar. Arel ve Shaikh [65] ise çalışmalarında 2 farklı blaine incelik değerlerine sahip uçucu kül nano silika (NS) kullanmışlar. Çalışmada çimentonun yerine % 5, % 15 ve % 60 oranında uçucu kül kullanılarak harç örnekleri hazırlamışlar. Bu numuneler farklı kür koşullarında ve sülfat çözeltisine maruz bırakılmıştır. Numunelerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerine uçucu kül inceliğinin etkileri değerlendirmişler. Yüksek inceliğe sahip uçucu küllerin ıslak kür koşullarında iri tane boyutuna sahip uçucu küllere nazaran daha yüksek basınç dayanım değerleri gösterdiği gözlemlenmiştir. Chindaprasirta vd., [66] uçucu külü elek ve hava ayırıcı yöntemle inceliklerine göre ayırmışlar. Bu uçucu külleri çimento yerine % 40 oranında kullanılması ile hazırlanan örneklerin 3, 7, 28 ve 90 gün sonrası basınç dayanım değerlerini belirlemişler. Bu örnekler içerisinde tüm kür süreleri boyunca en yüksek dayanımın, ince uçucu kül karışımlarında olduğu görmüşler. İnce uçucu külün daha reaktif olması ve kullanımının daha yoğun bir çimento matrisi oluşturmasıyla birlikte harcın daha iyi mekanik özelliklere sahip olması, yapılan birçok çalışmada ve bu çalışmada elde edilen sonuçlarla aynı eğilimi gösterdiği görülmüştür.

Çimento içerisinde 0, 10 ve 20 dk öğütme süresine sahip uçucu külü % 10 ikame oranında kullanıldığında oluşturulan beton örneklerinin % 5 ve % 10  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisine maruz bırakılmasıyla numunelerin 8 döngü boyunca ağırlık kayıpları Şekil 3-4'te verilmiştir.

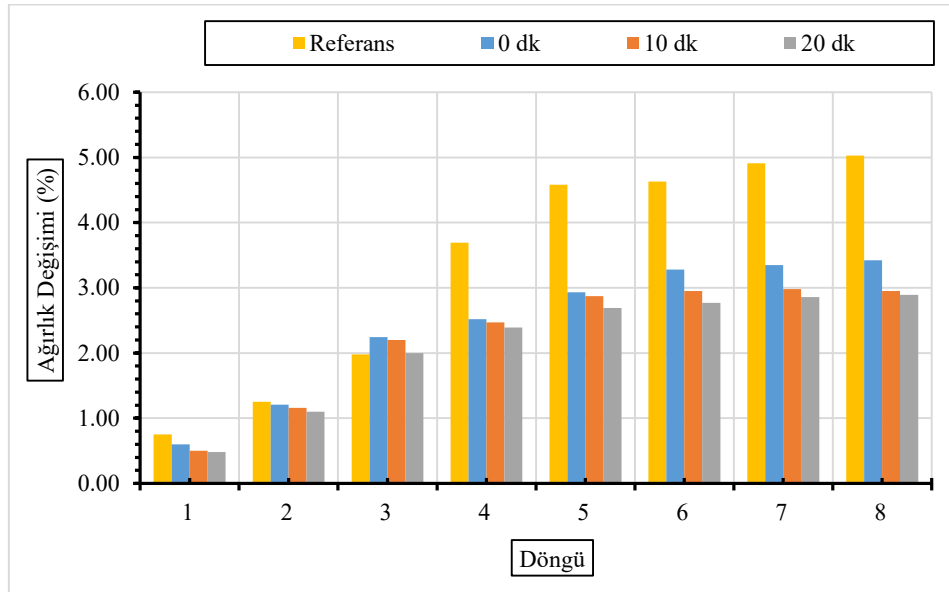


Şekil 3. Farklı incelikli ve % 10 uçucu kül ikameli betonların % 5  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisi içerisinde ağırlık kaybı değerleri.

Şekil 3'te görüldüğü üzere; % 5  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisine maruz bırakılan farklı öğütme süreli betonlarda ağırlık kaybının en çok uçucu kül ikamesiz referans betonda olduğu görülmüştür. Beton

örneklerindeki ağırlık kaybı uçucu kül inceliğinin artışı ile azalma göstermiştir. % 5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakılan betonlarda ağırlık kaybı değerleri basınç dayanım değerleri ile paralellik göstermektedir.

% 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözelti içerisinde bekletilen numunelerde ağırlık kaybı değerleri % 5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen numunelere benzer sonuçlar elde edilmiştir. % 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakılan farklı öğütme süreli betonlarda ağırlık kaybının en çok uçucu kül ikamesiz referans betonda olduğu görülmüştür. Beton örneklerindeki ağırlık kaybı uçucu kül inceliğinin artışı ile genel olarak azalma göstermiştir. % 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakılan betonlarda ağırlık kaybı değerleri basınç dayanım değerleri ile paralellik göstermekte olduğu anlaşılmıştır (Şekil 4).

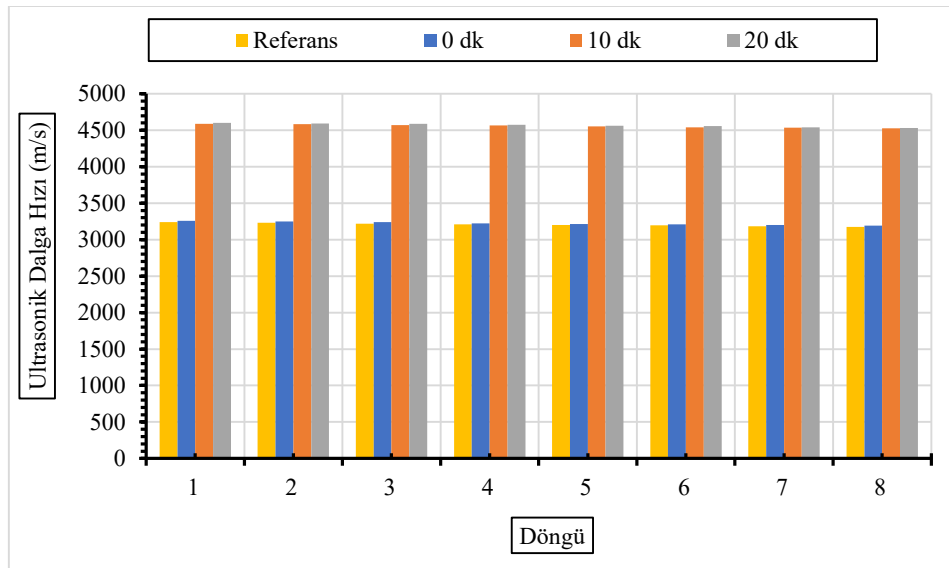


Şekil 4. Farklı incelikli ve % 10 uçucu kül ikameli betonların % 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde ağırlık kaybı değerleri.

Literatürde çimento yerine ince uçucu külün kullanımı ile ağırlık kaybı üzerine etkisini yansıtan çok fazla çalışma mevcut değildir. Ancak elde edilen sonuçlara göre uçucu kül kullanımının ağırlık kaybı üzerinde çok önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada uçucu kül kullanımının ağırlık kaybı üzerine etkisinin değişimi ile kıyaslanarak desteklenmiştir. Alnkaa [67] beton içerisinde % 0, % 5, % 10, % 15 oranlarında çimento yerine uçucu kül ikamesinde en düşük ağırlık kaybının % 15 katkılı betonlarda elde ettiklerini ifade etmişler. Betonun ağırlık kaybının uçucu kül ikamesinin yüksek olmasına bağlı olarak azaldığı ancak maruz bırakılan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözelti miktarının artması ile arttığı, ikame oranını pasifleştirmede çözelti miktarının etkili olduğunu göstermiştir. Balakrishnan ve Awal [68] çalışmalarında en düşük orandan en yüksek orana (% 0, % 40, % 50 ve % 60) kadar uçucu külün beton içerisinde kullanımının fiziksel ve kimyasal saldırılara karşı dayanıklılık performansları üzerine etkisini çalışmışlar. Bunun için farklı zaman süresi boyunca hazırladıkları numuneleri sülfata maruz bıraktıklarında ağırlık kaybının zamanla arttığı ancak uçucu kül ikame oranının artışı ile azaldığını belirlemişler. En düşük ağırlık kaybını % 60 uçucu kül katkılı betonlardan elde ettiklerini ifade etmişler. Uçucu külün beton karışımında yüksek oranda kullanılması boşlukları daha iyi doldurması, boşluklarda var olan suyun kaçışını engellemesi uçucu kül katkılı betonlarda ağırlık kaybı düşüşlerin yaşanmasına neden olmaktadır. Bu düşüşler tıpkı bizim çalışmamızda olduğu gibi ince uçucu kül kullanımı ile daha fazla azaltılabileceğini göstermektedir. Binici vd., [69] ise çalışmalarında silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanarak hazırladıkları betonları % 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde 60 günlük süre zarfında bekletmeye bırakmışlardır. Bu sürenin sonunda katkılı beton numunelerin kütle değişimi

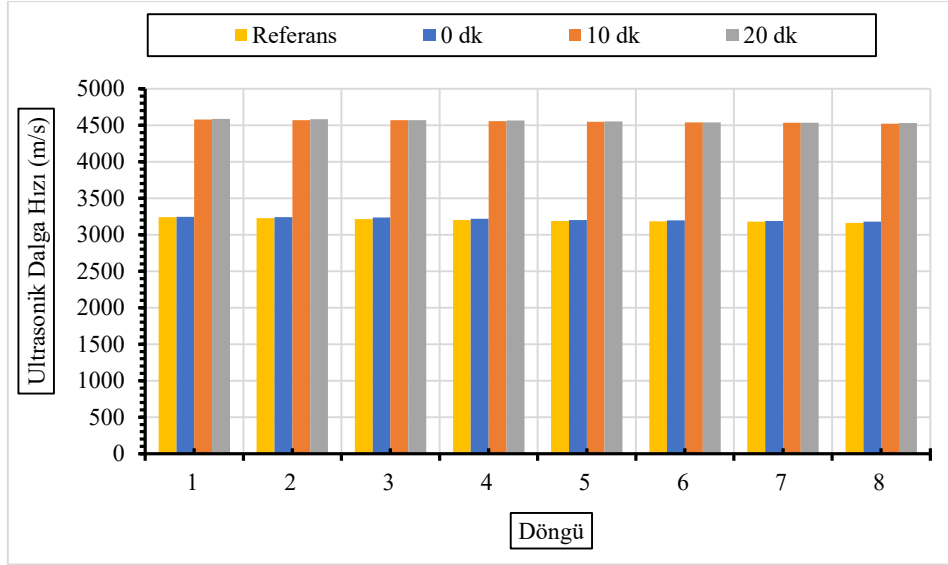
referans betonun kütle değişiminden düşük değerler aldığını, en düşük kütle kaybının ise yüksek fırın cürufu katkılı betonlarda belirlediklerini ifade etmişler. Bunun sebebi olarak yüksek fırın cürufunun sülfat etkisi altında daha dayanıklılık gösterdiğini ve elde edilen sonuçların basınç dayanımı değerleri ile benzerlik gösterdiğine değinmişler. Uçucu külün çimento yerine beton içerisinde kullanıldığında sülfata maruz kaldığında kütle kaybı üzerine olumlu etkisinin, uçucu külün puzolanik özellik göstermesi ve bu özelliğinin incelikte birlikte artması daha çok yararlı hidrasyon ürünlerinin açığa çıkarmasına sebep vermesi elde ettiğimiz deney sonuçlarının bir kanıtı olarakta destek görmektedir. Ayrıca uçucu külde inceliği arttırmanın beton boşluklarını daha iyi doldurması, zararlı hidrasyon ürünlerini bağlaması sonucu oluşabilecek sülfat saldırılarına karşı direnci arttırmayı sağladığı ve bu durumun oluşacak kütle kayıplarının önüne geçmeyi sağladığı anlaşılmıştır [70, 71]. Corral-Higuera vd., [71] çalışmasında % 10 silis dumanı ve % 30 uçucu kül katkılısının her biri ile geri dönüşüm agregası kullanılarak hazırlanan beton örnekleri % 3.5 sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakmışlar. Silis dumanı katkılı betonda ağırlık kaybı normal betona kıyasla 20 kat, uçucu kül katkılı betonlarda ise 8 kat azaldığını belirlemişler. Katkılı betonların üretiminde katkı çimento matrisini yoğunlaştırması ve gözenek yapısını azaltması sonucu yeraltı suyu ve yüksek sülfat içerikli suya maruz kaldığında betonun dayanıklılığını arttırmaya ve beton endüstrisinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunması uçucu külün inceliğinin ve ikame oranının ne derece etkili olduğunu yapılan çalışmada ortaya koymaktadır [71].

Çimento içerisinde 0, 10 ve 20 dk öğütme süresine sahip uçucu külü % 10 ikame oranında kullanıldığında oluşturulan beton örneklerinin % 5 ve % 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakılan örneklerin 8 döngü boyunca ultrasonik dalga hız değerleri Şekil 5-6'da verilmiştir.



**Şekil 5.** Farklı incelikte ve % 10 uçucu kül ikameli betonların % 5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde ultrasonik dalga hızı değerleri

Şekil 5 ve 6'da görüldüğü üzere; uçucu kül öğütme süresinin artmasıyla birlikte ultrasonik dalga hızı değerlerinin genel olarak arttığı, döngü sayısı arttıkça azaldığı belirlenmiştir. Ancak değerlerin birbirine çok yakın olduğu ve basınç dayanımı değerleri ile benzerlik gösterdiği görülmüştür.



**Şekil 6.** Farklı incelikte ve % 10 uçucu kül ikameli betonların % 10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi içerisinde Ultrasonik dalga hızı değerleri.

Bir yapıda ultrasonik dalga boyu değişim değerleri yapısının boşluk yapısını yansıtan ön önemli kıyaslayıcı ölçütlerden biridir. Uçucu külün çimento yerine beton içerisinde kullanımının boşluk yapısı üzerinde tamamlayıcı etkisi alanında çalışmalar mevcuttur. Ancak uçucu külün inceliğinin betonun boşluk yapısı üzerinde oluşturduğu etki tam anlamıyla ortaya koyan çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmada uçucu kül kullanımının yanı sıra inceliğinin de beton yapısının boşluk özelliği üzerinde olumlu etki yarattığı yapılan deney sonuçları ile belirlenmiş ve literatürle sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aydın ve Balkis [72] çalışmalarında çimento yerine % 20, % 40, % 60 ve % 100 oranlarında uçucu kül kullanımı ile üretilen 50, 150 ve 250 mm çökme değerlerine sahip betonların ultrasonik darbe hızı değerlerini belirlemişler. Elde ettikleri sonuçlara göre çimento yerine uçucu kül eklemenin yapının sağlamlığını ve dayanımını artırıcı C-S-H yapısının oluşmasına katkı sağladığını belirtmişler. Tıpkı bizim çalışmamızda da olduğu gibi uçucu külün daha ince boyutta kullanımının ultrasonik darbe hızı değerlerini arttırdığı yönünde destekleyici nitelikte kabul edilmektedir. Çünkü uçucu külde incelik artışı puzolanik reaksiyon gibi tane yüzeyinde başlayan reaksiyonların daha hızlı ortaya çıkarmaya, daha fazla reaksiyon ürünlerinin açığa çıkmasına ve bu ürünlerin boşluklarda daha fazla yer alması sonucu ultrasonik darbe hızını yükselttiği hem bu çalışmada hem de başka çalışmalarda sonuçların doğruluğunu desteklediklerini görmek mümkündür. Rao ve Kumar [73] çalışmalarında % 0, % 20, % 40 ve % 60 ikame oranlarında uçucu külün çimento yerine kullanılması ile hazırlanan betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin belirlenmesi için bir takım testlere tabi tutmuşlar. Bu test sonuçlarında optimum ikame oranının % 40 uçucu kül oranında yakalamışlar ve uçucu kül ikamesinin artması boşluk hacmini düşürdüğünden ultrasonik darbe hızı değerlerinin artmasını sağlamıştır. Çünkü normal uçucu külün betonda kullanıldığında agregalar arasındaki boşlukları doldurması ile porozitenin azalmasını katkı sağlamıştır [74]. Liu vd., [75] çalışmalarında ise uçucu külü beton bileşiminde çimento yerine % 0, % 20 ve % 40 oranında kullanarak hazırladıkları örnekleri, % 5 sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakmışlar. Çalışmada maruz kalan örnekler üzerine çatlak analizi, ultrasonik dalga boyu ve uzunluk değişim değerlerini incelemişler. En yüksek ultrasonik dalga boyunu % 40 uçucu kül ikameli betonda elde etmişlerdir. Boşlukları doldurma ve geçirimsiz bir malzeme oluşturma kabiliyetini % 40 ikame oranında yakalamışlardır. Karışımda uçucu kül miktarının artması gözenekliliğin azalmasına, darbe hızı ve basınç dayanımının arttırdığını görmüşler. İnce tane boyutuna sahip uçucu külün beton içerisinde çimento yerine kullanılması ile çimento taneciklerinin arasındaki boşlukları doldurmaya neden olmuştur. Bu durum tanecikler arasında su geçişini engellemeye sebep vermiştir. Betonda uçucu külün tane yapısının farklı özellikleri iyileştirmesi, destekleyici özellik kazandırması ile dışarıdan gelebilecek asit saldırısına karşı daha dayanıklı yapı kazanmasını elde edilen deney sonuçlarında destekleyici verilerin alınmasının bir kanıtı olarak gösterilebilmektedir [76].

#### 4. Sonuç ve Öneriler

C tipi uçucu külün (0, 10 ve 20 dk) farklı öğütme sürelerinin ve çimento içerisinde % 10 oranında ikame edildiğinde elde edilen uçucu kül katkılı betonların sülfat atağına karşı (% 5 ve % 10 sülfatlı suya maruz bırakılmış) betonun performansı ve direnci üzerine etkisini belirlemek amaçlanmıştır. Bu kapsamda; sülfata maruz kalan beton numunelerinin basınç dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrasonik dalga hızı değişimlerini belirlemek için bir takım deneylere tabi tutulmuştur. Bu bulgulara dayanarak;

- ❖ Uçucu kül katkılı betonlar normal betonlara göre sülfat etkisine karşı daha çok dayanım göstermiştir.
- ❖ En iyi performans ve dayanımın, %10 uçucu kül katkılı ve 20 dakika öğütme işlemine tabi tutulmuş numune de olduğu görülmüştür.
- ❖ Uçucu kül inceliğinin artışı ile sülfata karşı direncin arttırılmasına katkı sağlanmıştır.
- ❖ Beton da katkı olarak kullanılan uçucu kül inceliğinin artışı ile betonun geçirimliliğini azaltılarak agresif suların beton içerisine girişi azaltılmıştır.
- ❖ Uçucu kül gibi puzolanların beton bileşiminde çimento olarak kullanılması hidrasyon sonucu zarar veren kimyasal reaksiyonların oluşmasını engellediği gibi boşlukları doldurarak dayanımı daha yüksek betonlar elde edilmesini sağlamaktadır.
- ❖ Betonda boşlukların uçucu külün ince taneleri ile doldurulması ya da kimyasal reaksiyon sonrası C-S-H yapısı ile daha kompakt hale gelmesi durabilitesi yüksek, uzun ömürlü ve dışarıdan gelebilecek saldırılara karşı dayanıklı betonlar oluşturmaya katkı sağlamaktadır.

İleri de yapılacak çalışmalarda; farklı ikame oranlarının ve daha uzun süreli öğütme sürelerine sahip beton numunelerinin hazırlanması ve basınç dayanımı, ultrasonik dalga hızı ve ağırlık kaybı deneylerinin yapılması gerektiği önerilmektedir.

#### Teşekkür

DeneySEL çalışmalardaki yardımlarında dolayı Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği öğrencilerine teşekkür ederiz.

#### Yazar(lar)ın Katkıları

DDŞ, HE ve MÇ deney ve analiz çalışmalarını yaptı. DDŞ, HE ve MÇ ile birlikte deney sonuçlarını değerlendirip ve makaleyi yazdılar. Her üç yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### Kaynaklar

- [1]. Alişer, B., Mermer Tozu ve Cam Elyaf Katkılı Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının Araştırılması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2013.
- [2]. Gu, G. P., J. J. Beaudoin, and V. S. Ramachandran., Techniques For Corrosion Investigation In Reinforced Concrete. In Handbook Of Analytical Techniques In Concrete Science And Technology: Principles, Techniques And Applications, edited by V. S. Ramachandran and J. J. Beaudoin, 441–501. Norwich, NY: William Andrew/Noyes, 2006.

- [3]. Al-Dulaijan, S.U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Sharif, A.M., Shameem, M., Ibrahim, M., Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulfateauthor Links Open Overlay Panel, Cement and Concrete Composites, May–July 2003. Volume 25, Issues 4–5, Pages 429-437.
- [4]. Baradan B., ve Yazıcı., Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler” Türkiye Mühendislik Haberleri 2003.Sayı 4/ 426.
- [5]. Prasad, M., Palepu, R., Moulik, S. P., Interaction between Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) and Polyvinylpyrrolidone (PVP) investigated with forward and Reverse Component Addition Protocols eemploying Tensiometric, Conductometric, Microcalorimetric, Electrokinetic, and DLS Techniques, Colloid and Polymer Science 2006.volume 284, pages871–878 .
- [6]. M., Karakouzian, N., Ghafoori. Predictive Modeling of Soluble Sulfate Ion Concentration in The Las Vegas Valley. In: Proceeding of the 3rd International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-03), Shunan, Japan, 2005.p. 279–286.
- [7]. McCaffrey, R., Climate Change and the Cement Industry, Global Cement and Lime Magazine, (Environmental Special Issue), 2002.pp. 15–19.
- [8]. Davidovits, J., High-Alkali Cements for 21st Century Concretes, Special Publication, 1994. pp. 383–398.
- [9]. Irassar, E., Di Maio, A., Batic, O., Sulfate Attack On Concrete With Mineral Admixtures. Cem Concr Res; 1996. 26(1):113–123.
- [10]. Senthamarai, R., Devadas Manoharan, P., Gobinath, D., Concrete Made from Ceramic Industry Waste: Durability Properties. Constr Build Mater; 2011.25:2413–2419.
- [11]. Huang, B., Dong, Q., Burdette, E. G., Laboratory Evaluation of Incorporating Waste Ceramic Materials into Portland Cement and Asphaltic Concrete. Constr Build Mater; 2009.23:3451–3456.
- [12]. Pereira, O., Luiz, A.Castro-Gomes Joao P, Santos Pedro MS., The Potential Pozzolanic Activity of Glass and Red-Clay Ceramic Waste As Cement Mortars Components. Constr Build Mater; 2012.31:197–203.
- [13]. Higashiyama, H., Yagishita, F., Sano, M., Takahashi, O., Compressive Strength and Resistance to Chloride Penetration of Mortars Using Ceramic Waste as Fine Aggregate. Constr Build Mater; 2012.26:96–101.
- [14]. Medina, C., Sánchez, R. M., Frías, M., Reuse of Sanitary Ceramic Wastes as Coarse Aggregate in Eco-Efficient Concretes. Cement Concr Compos; 2012.34:48–54.
- [15]. Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş., Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, 2003.426 (4): 115-120.
- [16]. Franus, W., and Dudek, K., Clay Minerals and Cinoptilolite from the Variegated Shales Formation in the Skole Unit, Polish Flysch Carpath., Geologica Carpathica 1999.50, 23–24.
- [17]. Feng, N., and Peng, G., Applications of Natural Zeolite to Construction and Building Materials in China, Construction and Building Materials 2005.19, 579–584.
- [18]. Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M., An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, Construction and Building Materials, 2012.35, 1023–1033.
- [19]. Akman M.S., Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul, 1992.
- [20]. Mehta P.K., Monteiro P.J.M., Concrete Microstructure, Properties and Materials, Indian Edition, India, 1997.
- [21]. Yeğinoğlu A., Betonun Dayanıklılığı II, Kimyasal Etkenler, TCMB Çimento Araştırma Enstitüsü Seminer Notları, Ankara, 1999.
- [22]. Rattanachu, P., Tangchirapat, W. Ve Jaturapitakkul, C., Water Permeability and Sulfate Resistance of Eco-Friendly High-Strength Concrete Composed of Ground Bagasse Ash and Recycled Concrete Aggregate, J. Mater. Civ. Eng., 2019.31(6): 04019093.
- [23]. Hossain, K.M.A. ve Lachemi, M., Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concrete in mixed sulfate environment, Cem. Concr. Res. 2006. 36, 1123–1133.

- [24]. Al-Akhras N.M., Durability of mekketakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 2006.36, 1727–1734.
- [25]. Mathis, RP., Freezing and thawing, deicing salt, and sulfate resistance of concrete pavers. Graduate Thesis, Southern Illinois University; 1991.231 p.
- [26]. Skalny, J., Marchand, J, ve Odler, I., Sulfate attack on concrete. USA and Canada: Spon Press; 2002.240 pp.
- [27]. Shaheen, F., Pradhan, B., Role of Chloride Ion and Cation Type Accompanied by Sulfate Ion on Durability Performance of Concrete in Conjoint Chloride–Sulfate Environment, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020. Volume 32, Issue 9.
- [28]. Hossain, K. M. A., Resistance of scoria-based blended cement concrete against deterioration and corrosion in mixed sulfate environment. *J. Mater. Civ. Eng.* 2009.21 (7): 299–308.
- [29]. Al-Amoudi, O. S. B. Sulfate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments. *Constr. Build. Mater.* 1998.33 (1): 53–61.
- [30]. Cohen, M.D., Bentur, A., Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions. *ACI Mater. J.* 1988. 85 (3): 148–157.
- [31]. Al-Amoudi O.S.B., Sulfate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments. *Building and Environment*, 1997. 33, 53-61.
- [32]. Kılınç K., Uyan M., Beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi. 5. Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, İstanbul, 2003. s. 393-402.
- [33]. Neville, A., The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 2004.34, 1275–1296.
- [34]. Nehdi, M., and Hayek, M., Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity. *Cement and Concrete Research*, 2005.35, 731–742.
- [35]. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul, 2010.
- [36]. Yazıcı, H., Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi, Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2006. Cilt: 8 sayı: 1 s. 51-58 Ocak.
- [37]. Nie, Q.K., Zhou, C.J., Li, H.W., Shu, X., Gong, H.R., Huang, B.S., Numerical simulation of fly ash concrete under sulfate attack, *Constr. Build. Mater.* 2015. 84, 261–268.
- [38]. Enstitüsü, T. S.. TS 802: Beton karışım tasarımı hesap esasları. Ankara: Türk Standardları Enstitüsü 2016.
- [39]. Baradan, B., Yazıcı H, Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No 298, İzmir, 2002.
- [40]. Lee, S.T., Moon, H.Y., Hooton, R.D. and Kim, J.P., Effect of Solution Concentrations and Replacement Levels of Metakaolin on The Resistance of Mortars Exposed To  $MgSO_4$  Solutions. *Cement and Concrete Research*, 2005.35, 1314–1323.
- [41]. Lawrance C.D., The Influence of Binder Type on Sulfate Resistance. *Cement and Concrete Research*, 1992.22, 1047-1058.
- [42]. Bonen, D., A Microstructural Study of The Effect Produced by Magnesium Sulphate on Plain and Silica Fume Bearing Portland Cement Mortars. *Cement and Concrete Research*, 1993. 23, 541-553.
- [43]. Türker, F., Aköz, F., Koral, S., and Yüzer, N., Effects of Magnesium Sulfate Concentration on The Sulfate Resistance of Mortars With and Without Silica Fume. *Cement and Concrete Research*, 1997.27, 205-214.
- [44]. Biricik, H., Aköz, F., Türker, F. and Berktaş, İ., Resistance to Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Attack of Mortars Containing Wheat Straw Ash. *Cement and Concrete Research*, 2000. 30, 1189-1197.
- [45]. Shi, J.A., Stegemann, Acid Corrosion Resistance of Different Cement-Ing Materials, *Cem. Concr. Res.* 30 803–808, 2000.
- [46]. Dikeou, JT., Fly Ash Increase Resistance of Concrete to Sulfate Attack. 1970. Research Report No. 23, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 17 p.

- [47]. Dunstan, ER., Sulfate Resistance of Fly Ash Concrete – The R-Value. In: Bryant and Katherine Mather symposium on concrete durability, SP100. American Concrete Institute; 1987. p. 2027–40.
- [48]. Dodson, V.H., Concrete Admixtures, Structural Engineering Series, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [49]. Manu Santhanam, Menashi D. Cohen, Jan Olek, Mechanism of Sulfate Attack: A Fresh Look Part 2. Proposed Mechanism, Cement and Concrete Research, 2003.33, 341-346.
- [50]. Weiping, Ma, Brown, Paul W., Hydrothermal Reactions of Fly Ash with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Cement and Concrete Research, 1997.27, 1237-1248.
- [51]. Belie, N.D., Verselder, H.J., Blaere, B.D., Nieuwenburg, D.K., Verschoore, R., Influence of The Cement Type on The Resistance of Con-Crete to Feed Acids, Cem. Concr. Res. 1996. 26, 1717–1725.
- [52]. Chareerat, T., A study on pore volume and physical properties of ordinary portland cement containing classified fly ash, M.E. thesis, KhonKaen University, Thailand, 2002.p. 156.
- [53]. Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., and Fairbairn, E. M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in portland cement and lime mortars. Cem. Concr. Compos. 2008. 30 (5): 410–418.
- [54]. Martirena Hernández, J. F., Middendorf, B., Gehrke, M. and Budelmann, H., o aio1998.
- [55]. Freeman, R.B., Carrasquillo, R.L., Effects of Intergrinding Fly Ash on the Sulfate Resistance of Fly Ash Concrete, Supplementary Papers of Fourth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, İstanbul, Turkey, 1992. 281-297.
- [56]. Rerkpiboon, A., Tangchirapat, W., and Jaturapitakkul., C., Strength, chloride resistance, and expansion of concretes containing ground bagasse ash. Constr. Build. Mater. 101 (Part 1): 2015. 983–989.
- [57]. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., Sirivivatnanon, V., Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004.,s. 1087-1092.
- [58]. B. Fournier, A. Bilodeau, N. Bouzoubaa, P.-C. Nkinamubanzi, Field and Laboratory Investigations on the Use of Fly Ash and Li-Based Admixtures to Prevent ASR in Concrete, Sixth International Conference on the Durability of Concrete Structures, 2018.18–20 July 2018, University of Leeds.
- [59]. ASTM C 618-05, 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM (American Society for Testing and Materials), 3, Amerika.
- [60]. Shaikh FUA, Supit S, Sarker P. A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortar and concrete. Mater Des. 2014;60:433-442.
- [61]. Siddique R. Performance Characteristics of High-Volume Class F Fly Ash Concrete. Cem Concr Res. 2004. 34(3):487-93.
- [62]. Naik, T.R., Singh, S.S., Hossain, M.M. Permeability of concrete containing large amounts of fly ash. Cem Concr Res. 1994. 24(5):913-22.
- [63]. Supit, S, Shaikh, FUA. Durability Properties of High Volume Fly Ash Concrete Containing Nano Silica. Mater Struct. 2014. 48:2431-2445.
- [64]. Tkaczewska, E. And Małolepszy, J., Hydration of Coal–Biomass Fly Ash Cement, Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 7, July 2009, Pages 2694-2700.
- [65]. Ş. Arel, H.Ş, Shaikh, F.U.A., Effects of Fly Ash Fineness, Nano Silica, and Curing Types on Mechanical and Durability Properties of Fly Ash Mortars, Structural Concrete Journal Of The Fib, 2017. Volume19, Issue2, April 2018, Pages 597-607.
- [66]. Chindaprasirta,P., Homwuttiwongb, S., Sirivivatnanon, V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkageand sulfate resistance of blended cement mortar, Cement and Concrete Research, 2004. 34, 1087–1092.
- [67]. Alnkaa, A.A., Farklı Kür Koşullarının Geopolimer Harç Özelliklerine Etkisi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora Tezi, Kastamonu, 2019.



- [68]. Balakrishnan, B. And Awal, A.S.M. Durability Properties of Concrete Containing High Volume Malaysian Fly Ash, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, 2014. eISSN: 2319-1163 | pISSN:2321-7308, Volume: 03 Issue: 04.
- [69]. Binici, H., Eken, M., Dinçer, A. Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özellikleri, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2013. 28(1), 11-20 ss.
- [70]. Kanthe, V.N. Effect of Superplasticizer on Strength and Durability of Rice Husk Ash Concrete, Iranian (Iranica) Journal of Energy and Environment, 2021. 12(3): 204-208.
- [71]. Corral-Higuera, R., Arredondo-Rea, S.P., Neri-Flores, M.A., Gómez-Soberón, J.M., Almeraya Calderón, F., Castorena-González, J.H., Almaral-Sánchez, J.L. Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Concrete with Recycled Concrete Aggregates and Supplementary Cementing Materials, Int. J. Electrochem. Sci., 2011 6, 613 – 621.
- [72]. Aydin, E., Balkis , A.P. Preliminary Study on the Durability Properties of High-Volume Fly Ash Mortar Composites, Journal of Testing and Evaluation, 2017. Vol. 45 / No. 6 .
- [73]. Rao, M.K., and Kumar, Ch.S.N. Influence of Fly Ash on Hydration Compounds of High-Volume Fly Ash Concrete, AIMS Materials Science, 2021. 8(2): 301–320.
- [74]. Saha, A.K. Effect of Class F Fly Ash on The Durability Properties of Concrete. Sustainable Environ Res, 2018, 28: 25–31.
- [75]. Liu, K., Deng, M and Mo, L. Effect of Fly Ash on Resistance to Sulfate Attack of Cement-based Materials, Key Engineering Materials , (2013). Vol. 539, 124-129.
- [76]. Wang, A., Zhang, C., Sun, W. Fly ash effects: I. The Morphological Effect of Fly Ash. Cement Concrete Res, 2003. 33: 2023–2029. 2003.