



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Cam Tozu ve Uçucu Kül Katkılı Harçların Zamana Bağlı Elektriksel Özdirenç ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

 Behçet DÜNDAR ^{a,*},  Emriye ÇINAR RESULOĞULLARI ^a,  Turhan Can KARCI ^a,  Atahan DÖNMEZ ^a

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: behcetdundar@osmaniye.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1093355

Öz

Mineral katkıları, çimento esaslı kompozitlerin bazı özelliklerini iyileştirmek ve çimento miktarını azaltmak için beton karışımında kullanılmaktadır. Kullanılan çimento miktarının azaltılması ile çevre kirliliğinin ve çimento üretimi sırasındaki yüksek maliyetin önüne geçilmesi sağlanmaktadır. Bu kapsamda çimento ile ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirilerek Cam Tozu (CT) ve Uçucu Kül (UK) karışıma ilave edilmiştir. Harç numunelerinin hazırlanmasında bağlayıcı olarak CEM I 42.5/R tipi Portland çimentosu, agrega olarak ise 0-4 mm boyutlarında kırma kum kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında 40x40x160 mm boyutlarında üretilen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra, standart kür havuzunda 7, 28, 56, 90 ve 180 gün boyunca 20±2 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. Taze haldeki harç numunelerine yayılma, sertleşmiş harç numunelerine ise basınç ve eğilme dayanımı ile elektriksel özdirenç deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler doğrultusunda erken yaşta CT ve UK ilavesinin elektriksel özdirenci düşürdüğünü fakat numune yaşı ilerledikçe artışlar meydana geldiği görülmektedir. 180 günlük elektriksel özdirenç değeri REF numunesinde 0.04223 kΩm iken %30UK numunesinde 0.04755 kΩm, %30 CT numunesinde ise 0,04621 kΩm değerine ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cam Tozu, Elektriksel Özdirenç, Mineral Katkı, Uçucu Kül

Investigation of Time-Dependent Electrical Resistivity and Mechanical Properties of Glass Powder and Fly Ash Additive Mortars

ABSTRACT

Mineral additives are preferred to improve the physical, mechanical and durability properties of cement-based composites and to reduce the amount of cement used. By reducing the use of cement, it is ensured that environmental pollution and the high cost of cement production are prevented. In this context, Glass Powder (CT) and Fly Ash (UK) were added to the mixture by replacing 10%, 20% and 30% by weight of cement. In the production of the mortar samples, CEM I 42.5/R type Portland cement was used as the binder, and 0-4 mm crushed sand was used as the aggregate. After the samples produced in the laboratory with dimensions of 40x40x160 mm were removed from the mold, they were cured in the standard curing pool at 20±2 °C for 7, 28, 56, 90 and 180 days. Flow table test, compressive strength, flexural strength and electrical resistivity tests were performed on hardened mortar samples. According to the data obtained as a result of experimental studies, the addition of CT and UK at an early age decreased the electrical resistivity, but the resistance increased significantly as the age of the sample progressed. While the 180-day electrical resistivity value was 0.04223 kΩm in the REF sample, it reached 0.04755 kΩm in the 30%UK sample and 0.04621 kΩm in the 30% CT sample.

Keywords: Glass Powder, Electrical Resistivity, Mineral Additive, Fly Ash

I. GİRİŞ

Küresel ısınmanın en etkili sebepleri arasında artan sera gazı emisyonlarının etkili olduğu kabul edilmektedir. Karbondioksit gazı, dünya çapında küresel ısınmaya sebep olan gazların yaklaşık olarak %8'sini temsil eden önemli gazlardan biridir [1]. Çimento üretiminde, kalsinasyon işleminden kaynaklanan karbondioksit emisyonları ve hammaddeleri ısıtmak için kullanılan yakıt tüketimi nedeniyle çevre kirliliğine neden olmaktadır [2], [3]. Çimentodan kaynaklı çevre kirliliğini aza indirmek için inşaat endüstrisinde çevreye duyarlı çimento esaslı bağlayıcı maddeler kısmen ya da tamamen atık malzemelerle ve endüstriyel atıklar ile değiştirilerek kullanılmaktadır [4], [5]. Bu atık maddeler arasında kolemanit, silis dumanı, uçucu kül, mermer tozu, yüksek fırın cürufu, cam tozu vb. kullanılmaktadır [6], [7]. Bu mineral katkılar arasında termik santrallerden endüstriyel bir atık olarak ortaya çıkan Uçucu Kül (UK), depolanması ve bertarafı oldukça zordur [8], [9]. Mineral katkı maddesi olarak UK'nın kullanılması, geliştirilmiş reolojik özellikler, aşınma direnci, korozyon, sülfat saldırısı ve donma-çözülme vb. gibi betonun veya harçların diğer özelliklerini de iyi hale getirir [10], [11]. Endüstriyel yan ürün olan UK, mekanik ve dayanıklılık performansına sağladığı faydalardan dolayı harçlarda kullanılan en yaygın atıklar arasında yer alır. Bununla birlikte, UK'nın erken yaş dayanımı genellikle Portland çimentosunununkinden daha düşüktür. UK kullanımı priz gecikmelerine ve daha yavaş dayanım gelişimine neden olur [12], [13], [14], [15], [16]. Diğer bir mineral katkı olan Cam Tozu (CT), sosyo-ekonomik gelişme nedeniyle üretimi hızla artan, bol miktarda üretilen ve atık haline gelen bir atık malzemedir [17]. Depolama alanlarındaki bu büyük atık CT birikimi, sürdürülebilir kalkınmanın gerçekleştirilmesinde engel oluşturabilir [18]. Çimento esaslı malzemelerin üretiminde, CT'nın puzolanik yapısında dolayı çimento yerine tercih edilmesine neden olmaktadır [19], [20]. Bahsi geçen mineral katkılar harç numunelerinin basınç ve eğilme dayanımı, su emme, porozite ve elektriksel özdirenç değerlerini iyileştirmektedir. Sabit su/çimento oranına sahip çimento esaslı malzemeler için, elektriksel özdirenç esas olarak gözenek yapısının doygunluk derecesine bağlıdır [21], [22]. Çimento esaslı malzemeler genellikle doymamış bir durumdadır ve suyun taşınması genellikle kılcal emilim şeklinde oluşur [23], [24]. Çimento esaslı malzeme, kılcal su emilimi nedeniyle yağmurlu veya nemli bir ortama maruz kaldığında elektrik direnci azalır. Bu nedenle, kılcal emme durumu altında çimentolu malzemenin elektrik direncini geliştirmek büyük bir gereklilik ve önceliktir [25], [26]. Gözenek yapısının hem kılcal emme hem de elektriksel özellik için önemli bir etkidir [27], [28], [29]. Elektrik özdirenç, bir malzemenin elektrik akımı akışına karşı koyma yeteneğidir. Numunenin nem muhtevası ve bileşimine göre değişkenlik gösterir [30], [31], [32]. Harç bileşiminde, çimentonun tipi ve inceliği, bileşim içerisindeki çözünür tuz içeriği, su/çimento oranı, agregaların tipi, boyutu ve harç numunesi içerisindeki gözenekler gibi etkiler elektrik akımının engellediğinden elektrik direncini artırırlar [33]. Gözeneklerin hacmi, boyutu ve gözenekler arasındaki bağlantının yanı sıra çimento hamurunun mikro yapısına da bağlıdır [34], [35], [36], [37]. Yüksek doygunluğa sahip betonda su/sıcaklık oranının elektriksel özdirenç üzerindeki etkisi daha az önemlidir. Çünkü nem, betonun elektriksel özelliklerini tanımlamada önemli bir rol oynar [38]. Mineral katkılar (örneğin, yüksek fırın cürufu [39], uçucu kül [40] ve silis dumanı [41], genellikle daha dayanıklı betonlar elde etmek için kullanılır [42]. Diğer yandan, karışım tasarımına iletken dolgu maddeleri eklenirse, elektrik direnci azalır ve malzeme iletimi kısmen elektrolitikten elektriğe doğru hareket eder [43], [44], [45]. Akım esas olarak gözenek çözeltisinden geçtiği için beton bir elektrolitik iletken olarak düşünülebilir [46].

Bu çalışmanın mineral katkı kullanımında harç yaşı ile yalnızca mekanik özelliklerin gelişimi değil aynı zamanda elektriksel olarak gelişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, CT ve UK çimento ile ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirilerek üretilen harçların 180 güne kadar belirli günlerde elektriksel özdirenç ve mekanik özelliklerinin değişimleri incelenmiştir. Taze haldeki harç numunelerine öncelikle yayılma deneyi uygulanmış, ardından numuneler 7, 28, 56, 90 ve 180 gün süre ile 20 ± 2 °C standart kür havuzunda bekletilmiş, belirtilen kür süreleri sonunda basınç ve eğilme dayanımları, ile elektriksel özdirenç değerleri tayin edilmiştir.

II. MATERYAL VE METOT

Araştırmanın bu bölümünde, yapılan çalışmalarda kullanılan çeşitli malzemelerin özellikleri ile üretilen harç numunelerinin karışım oranları ve numuneler üzerinde yapılacak deneyler bulunmaktadır.

A. Materyal

Harç numunelerinin üretiminde standartlara uygun 0-4 mm tane boyutuna sahip kalker esaslı kırma kum agregası kullanılmıştır [47]. Harç üretiminde kullanılan kırma kum Osmaniye il sınırlarında bulunan taş ocağında temin edilmiştir. Kullanılan kırma kumun incelik modülü 3.45 olarak hesaplanmıştır. Kırma kumun su emme yüzdesi % 1.15, yoğunluğu 2.67 gr/cm^3 olarak TS EN 1097-6'ya göre belirlenmiştir [48]. Harç karışımlarının hazırlanmasında, TS EN 1008 standardına uygun olan Osmaniye ili, içilebilir şehir şebeke suyu kullanılmıştır [49].

Deneyel çalışmada bağlayıcı olarak kullanılmak üzere, TS EN 197-1 standardına uygun olarak üretilmiş ÇİMSA fabrikasından temin edilen CEM I-42.5/R tipi Portland Çimento tercih edilmiştir [50]. Osmaniye OYAK Hazır Beton tesisinden temin edilen ASTM C 618 standardına göre F sınıfı düşük kireçli, özgül ağırlığı 2.58 olan UK kullanılmıştır [51]. Mineral katkı olarak kullanılan öğütülmüş CT özgül ağırlığı 2.6 ve 0-63 mikron tane dağılımına sahiptir. Kullanılan Portland Çimentosu, CT ve UK'nın kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Portland çimentosu, CT ve UK'nın kimyasal analiz sonuçları.

Kimyasal Analiz	CEM I 42.5 R (%)	UK (%)	CT (%)
SiO ₂	20.62	60.53	67.33
Al ₂ O ₃	5.75	17.22	2.62
Fe ₂ O ₃	4.05	4.86	1.42
CaO	62.81	5.31	12.45
MgO	2.55	1.91	2.74
Na ₂ O	2.67	0.65	12.05
SO ₃	-	1.36	
K ₂ O	-	2.50	0.64

B. METOT

Çalışmada üretilen harç karışımlarının hazırlanmasında kırma kum/bağlayıcı/karışım suyu oranları TS EN 196-1'e göre 3/1/0.5 olarak belirlenmiştir [52]. UK ve CT çimento ile %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Harç numunelerinde kullanılan malzeme miktarları, Tablo 2'te verilmiştir.

Tablo 2. Harç karışımları için kullanılan malzeme miktarları (gr)

Numune İsmi	Çimento	CT	UK	Kırma Kum	Su
REF	450	0	0	1350	225
CT10	405	45	0	1350	225
CT20	360	90	0	1350	225
CT30	315	135	0	1350	225
UK10	405	0	45	1350	225
UK20	360	0	90	1350	225
UK30	315	0	135	1350	225

B. 1. Yayılma Deneyi

Her bir numuneye karıştırma işlemlerinin sonrasında taze haldeki işlenebilirliğinin belirlenmesi için yayılma tablası deneyi uygulanmıştır. Karıştırılan taze haldeki harç, yayılma değerinin belirlenmesinde kullanılan kesik koniye iki tabakada doldurulmaya başlanmıştır. Kesik koni tamamen dolu hale geldikten sonra koni çıkarılmış ve yayılma tablasının 15 kez düşüş yapılması sağlanmıştır. Düşüşlerin ardından taze haldeki harçta oluşan yayılmayı bulabilmek için yayılan harcın eksenlerinde yayılma çapı değerleri ölçülmüştür [53]. Taze haldeki harçlara uygulanan yayılma tablası deneyi Şekil 1’de gösterilmiştir.



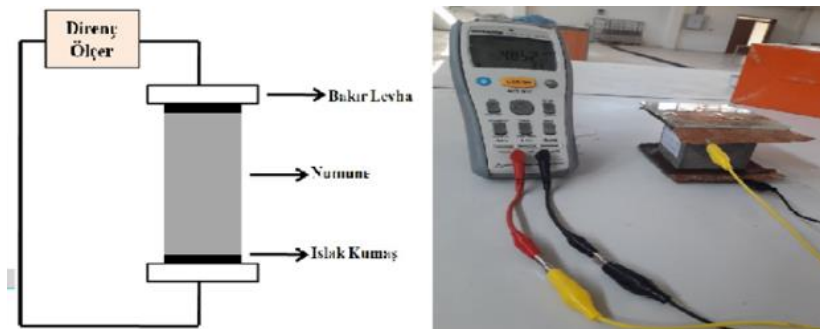
Şekil 1. Yayılma tablası deney düzeneği.

B. 2. Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyi

Harç numuneleri 40x40x160 mm boyutlarındaki standart kalıplara standartlara uygun bir şekilde iki aşamada yerleştirilmiştir. 24 saat kalıpta bekletildikten sonra çıkartılan numuneler 20±2° C sıcaklıktaki standart kür havuzu içerisinde 7, 28, 56 ve 90. 180 günlerin sonunda 200 kN kapasiteli Baz Makine tarafından imal edilen çimento pres cihazı yardımıyla TS EN 12390-4 (2002) standardına uygun eğilme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur [54].

B. 3. Elektriksel Özdirenç Ölçümü

Elektriksel özdirenç değerleri 0.1, 0.12, 1 ve 10 kHz olmak üzere farklı frekans değerleri için elde edilmiştir. Frekans, bir alternatif akım (AC) sinyalinin saniye başına devir sayısıdır. Boşluk çözültisinde oluşan iyon transferi nedeniyle çimento esaslı kompozitlerde elektriksel özdirenç oluşmaktadır. Frekans değerinin artışı ile iyon hareketliliğinde artış meydana gelir ve bu da elektriksel özdirenç değerini arttırmaktadır. Frekans değişikliği ile meydana gelecek olan elektriksel özdirenç değişimin gözlenebilmesi açısından 4 farklı frekans değeri seçilmiştir. Etüv kurusu haline getirilmiş harç numunelerinin üzerinde ASTM C 1760 standardına göre Şekil 2’de gösterilen deney düzeneği ve direnç ölçer (Ohm-metre) ile iki plaka metoduna göre elektriksel direnç değerleri belirlenmiştir.



Şekil 2. Elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan deney düzeneği.

Elektrik özdirenç ölçümleri ASTM C 1760 standardına uygun olarak ölçülmüş ve Denklem (1), aracılığıyla numunelerin özdirenç ve iletkenlik değerleri hesaplanmıştır [55]. Direnç değerleri (R) ölçülen harçların elektriksel özdirenç değerleri Eş. 1 yardımıyla belirlenmiştir.

$$\delta = R * A/L \quad (1)$$

Eşitsizlikte;

δ : Elektriksel özdirenç (k Ω m.m)

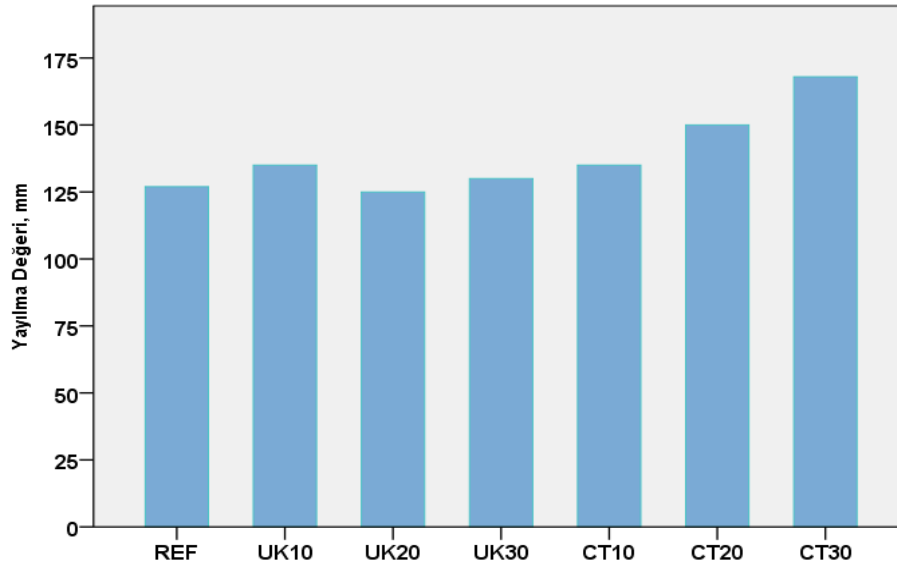
R: Direnç (k Ω m)

A: Numunenin yüzey alanı (m²)

L: Plakaların arasındaki mesafeyi (m) simgelemektedir.

III. DENEYSEL SONUÇLAR

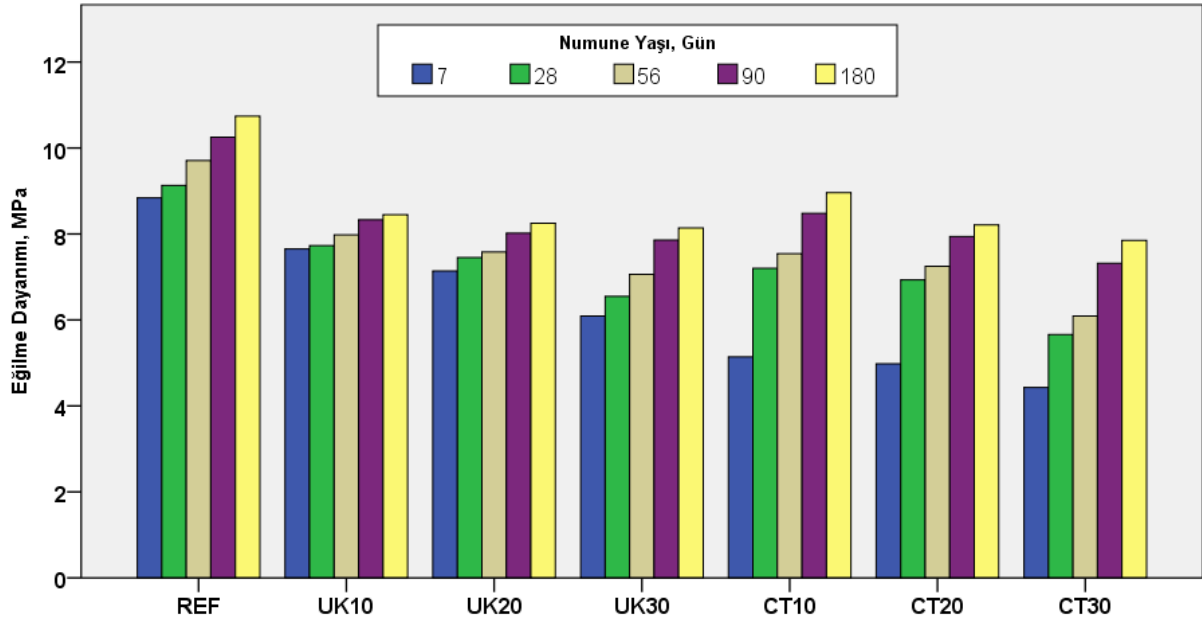
Deneyel çalışma için üretilen harç numunelerin taze haldeki işlenebilirlik özelliklerini belirlemek için uygulanan yayılma tablası deneyine ait sonuçlar Şekil 3'te verilmiştir. Harç numunelerine ait yayılma değerleri incelediğinde, REF numunesinde 130 mm değerini alırken, UK10, UK20 ve UK30 numunelerinde ise sırasıyla 135 mm, 125 mm ve 130 mm, CT10, CT20 ve CT30 numunelerinde ise, 110 mm, 135 mm ve 125 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Harç numunelerin yayılma değerleri.

Tüm numunelere 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük kür süresini takiben eğilme dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Numunelere ait eğilme dayanımı değerleri Şekil 4'te verilmiştir.

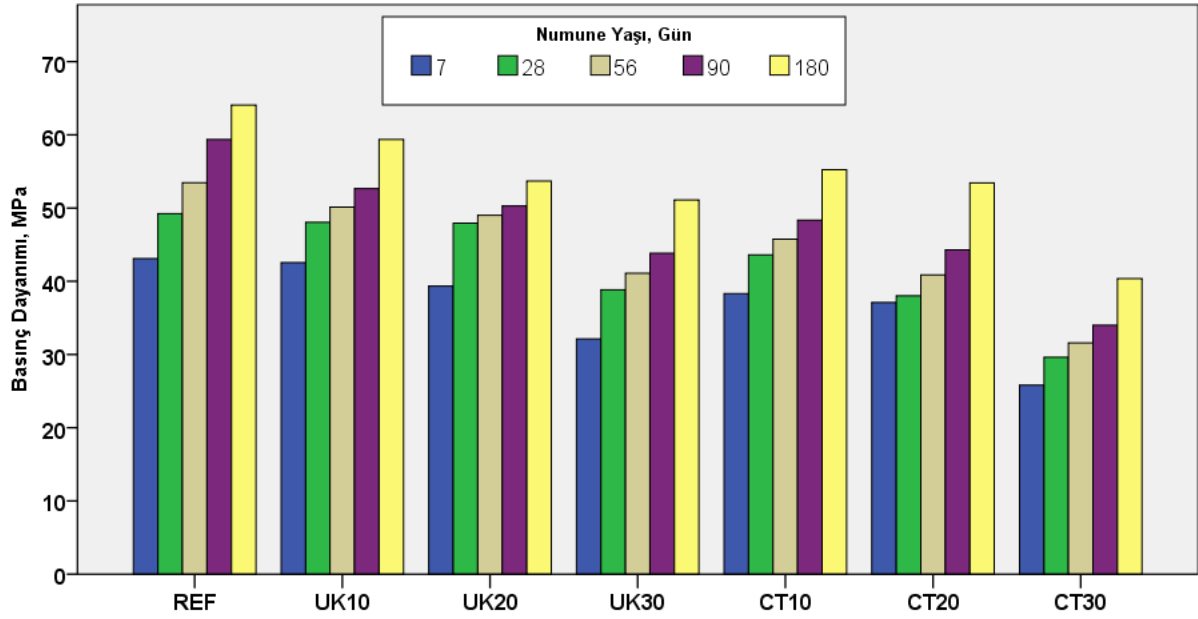
En fazla eğilme dayanımı 180. günde REF numunesinde 10.74 MPa, en az ise 7. günde CT30 numunesinde 4.73 MPa olduğu görülmektedir. UK oranı arttıkça eğilme dayanımında azalmalar olmaktadır. 7. günde en fazla eğilme dayanımı REF numunesinde 8.84 MPa, en az ise CT30 4.43 MPa olarak tespit edilmiştir. 7 günlük veriler incelendiğinde UK katkılı numuneler CT katkılı numuneler göre daha yüksek dayanım değeri almıştır. CT10, CT20 ve CT30 numunelerin 7 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 5.14 MPa, 4.98 MPa ve 4.43MPa olarak görülmektedir.



Şekil 4. Harç numunelerin eğilme dayanımı değerleri.

Tüm numunelere 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük kür süresi sonrasında basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Numunelere ait basınç dayanımı değerleri Şekil 5'te verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde en fazla dayanım 180 günlük REF numunesinde 64.06 MPa, en az ise 7 günlük CT30 numunesinde 25.82 MPa değeri olmuştur. Eğilme dayanımında olduğu gibi UK oranı ve numune yaşı arttıkça basınç dayanımında da düşüşler olmuştur. UK katkılı numunelerde en fazla dayanım 180 günlük UK10 numunesinde 59.36 MPa, en düşük dayanım ise 7 günlük UK30 numunesinde 32.14 MPa olarak görülmektedir. CT katkılı numuneler incelendiğinde ise CT oranı arttıkça basınç dayanımında düşüşler gerçekleşmiştir. Bu düşüşler sonucunda en düşük basınç dayanımı 7 günlük CT30 numunesinde 25.82 MPa, en yüksek dayanım ise 180 günlük CT10 numunesi 55.23 MPa olmuştur. İbrahim'in 2021 yılında yapmış olduğu çalışmada uçucu kül içeren betonlarda çimento yerine cam tozunu kısmen yer değiştirmiştir. Çalışmada basınç dayanımı incelendiğinde CT ve UK oranlarının artmasıyla basınç dayanımında azalma tespit etmiştir [56]. Bu sonuçlar göz önüne alındığında hem UK için hem de CT için katkı oranları arttıkça basınç dayanımlarında bir düşüş gerçekleştiği söylenebilir. En ideal kullanım oranı ise her iki mineral katkı oranı %10'luk değer olmuştur.



Şekil 5. Harç numunelerin basınç dayanım değerleri.

Harç numuneleri üzerinde yapılan elektriksel özdirenç değerleri, 0.1 kHz, 0.12 kHz, 1 kHz ve 10 kHz farklı frekans değerlerine göre belirlenmiştir. Harç numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda 0.1 kHz ölçümlerine göre elde edilen Elektriksel özdirenç değerlerine ait veriler Şekil 6'da verilmiştir.

7 günlük ölçümler sonucunda REF numunesinin özdirenç değeri 0.04084 k Ω m olarak bulunmuştur. UK ile üretilen %10, %20, %30 numunelerin sırayla özdirençleri 0.4066 k Ω m, 0.4079 k Ω m, 0.4072 k Ω m olarak hesaplanmıştır. CT ile üretilen %10, %20, %30 numunelerin sırayla özdirençleri 0.04086 k Ω m, 0.04091 k Ω m, 0.04088 k Ω m olarak ölçülmüştür. CT numuneleri REF numunesine kıyasla daha fazla direnç göstermiştir. UK numunesi için REF numunesinden daha düşük dirence sahiptir. Şekil 5. incelendiğinde hem UK hem de CT numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında en yüksek dirençleri %20 oranında olmuştur. Her ikisi de %30 oranında bir düşüş gerçekleştirmiştir.

14 günlük ölçümlerinde 7 günlük dirençlere göre genel bir artış görülmektedir. 14 günlük yaşların da en yüksek dirence sahip numune 0.04117 k Ω m değeri ile REF olmuştur. REF değerine en yakın 0.04116 k Ω m değeri ile UK30 olmuştur. 14 günlük direnç sonucunda UK kendi aralarında incelendiğinde oran arttıkça direnç de artmıştır. CT numunelerinde ise %20 de düşüş gerçekleşirken %30 da yükselme görülmüştür.

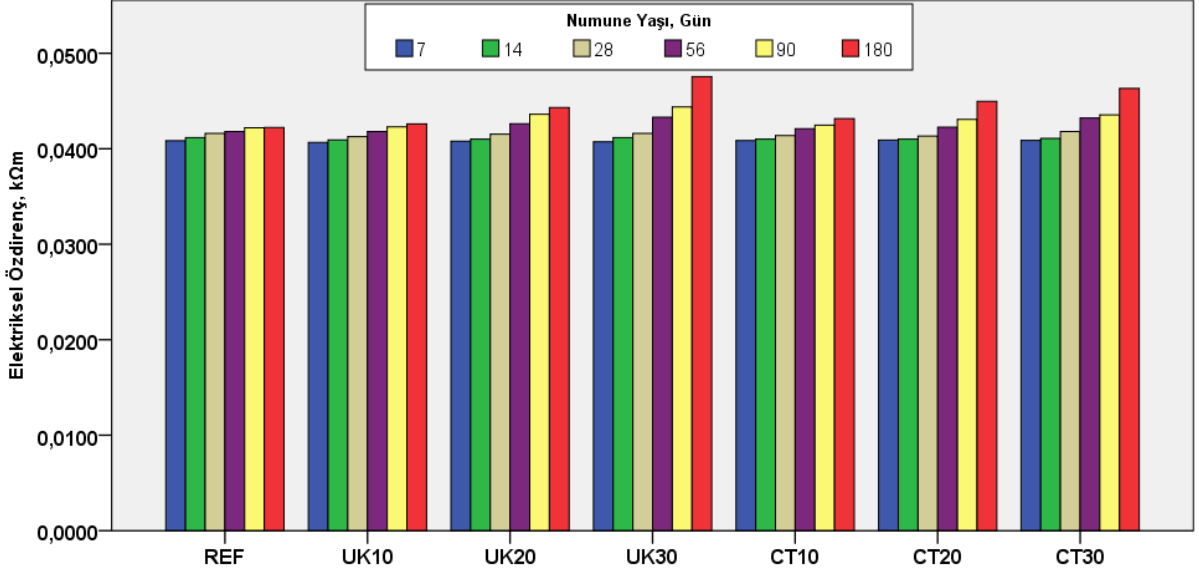
28 günlük ölçümler incelendiğinde ise 14 günlük dirençlere göre tüm numuneler artış göstermektedir. Sonuçlarda en yüksek dirence sahip numune 0.04181 k Ω m değeri ile CT30, en düşük direnç ise 0.04126 k Ω m değeri ile UK10 olmuştur. 14 günlük değer ile benzer özellikler göstermiştir. UK numuneleri oran arttıkça direnç artmıştır ve CT numuneleri ise %20 de düşüş %30 da artış göstermektedir.

56 günlük ölçümlerde, REF numunesi 0.04181 k Ω m direnç ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde tüm numuneler 28 günlük dirençlere kıyasla büyük artışlar gerçekleştirmiştir. 56 günlük dirençler arasında en büyük dirence sahip numune 0.04331 k Ω m değeri ile UK30, en küçük direnç ise 0.04181 k Ω m değeri ile REF ve UK10 olmuştur. CT ve UK numuneleri 56 günlük dirençlerinde oran arttıkça dirençler de artmıştır.

90 günlük ölçümlerde, REF numunesi 0.04219 k Ω m direnç ölçülmüştür. 56 günlük dirençlere kıyasla 90 günlük numuneler daha fazla dirence sahip olduğu görülmektedir. 90 günlük dirençler arasında en fazla dirence sahip numune 0.04437 k Ω m değeri ile UK30, en düşük direnç ise 0.04219 k Ω m değeri ile REF olmuştur. CT ve UK numuneler 56 günlük numunelerde olduğu gibi oran arttıkça direnç artmıştır.

180 günlük ölçümlerde REF numunesi 0.04223 kΩm direnç ölçülmüştür. 90 günlük numunelere kıyasla 180 günlük numuneler daha fazla dirence sahip olduğu ve en fazla artışın gerçekleştiği yaş olmaktadır. 180 günlük numunelerde en fazla dirence sahip numune 0.04755 kΩm değeri ile UK30, en düşük direnç ise 0.04223 kΩm değeri ile REF olmuştur. Numunelerin dirençleri incelendiğinde CT ve UK oranları arttıkça direnç değerleri de artmıştır.

Sonuç olarak, numuneler 56 günlük yaşlarının sonunda REF direncini geçmeyi başarmış ve daha sonraki yaşlarında büyük artışlar gerçekleştirmiştir. Erken yaşlarda CT numuneleri UK numunelere göre daha fazla direnç gösterirken, 56 günlük yaşı ve daha sonrasında UK numuneleri daha fazla direnç göstermeye başlamıştır. Bu durumda numune yaşı arttıkça sahip olduğu direnç de artmış olduğu görülmektedir [57],[58],[59].



Şekil 6. Numunelerin 0.1 kHz frekansına ait elektriksel öz direnç ile numune yaşı arasındaki ilişki.

Harç numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda 0.12 kHz ölçümlerine göre elde edilen Elektriksel öz direnç değerlerine ait veriler Şekil 7’de verilmiştir.

7 günlük ölçümler sonucunda REF numunesinin direnç değeri 0.04084 kΩm olarak bulunmuştur. UK ile üretilen %10, %20, %30 numunelerin sırayla dirençleri 0.4065 kΩm, 0.4079 kΩm, 0.4071 kΩm olarak bulunmuştur. CT ile üretilen %10, %20, %30 numunelerin sırayla dirençleri 0.04086 kΩm, 0.04090 kΩm, 0.04087 kΩm olarak ölçülmüştür. CT numuneleri REF numunesine kıyasla daha fazla direnç göstermiştir. UK numunesi için REF numunesinden daha düşük dirence sahiptir. Hem UK hem de CT incelendiğinde numunelerin en yüksek dirençleri %20 oranında olmuştur. Her ikisi de %30 oranında bir düşüş gerçekleştirmiştir.

14 günlük ölçümlerinde 7 günlük dirençlere göre genel bir artış görülmektedir. 14 günlük yaşların da en yüksek dirence sahip numune 0.04116 kΩm değeri ile UK olmuştur. REF değerine en yakın 0.04115 kΩm değeri ile UK30 olmuştur. 14 günlük direnç sonucunda UK kendi aralarında incelendiğinde oran arttıkça direnç de artmıştır. CT numunelerinde ise %20 de düşüş gerçekleşirken %30 da yükselme görülmüştür.

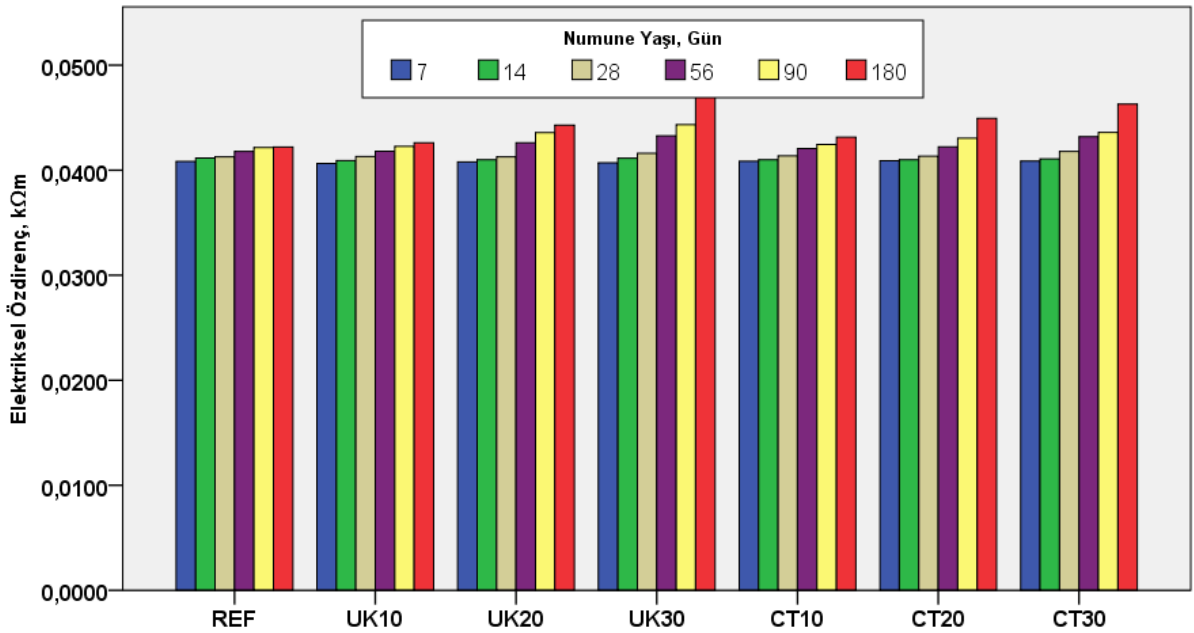
28 günlük ölçümler sonucunda REF numunesinin direnç değeri 0.04128 kΩm olarak bulunmuştur. 28 günlük ölçümler incelendiğinde ise 14 günlük dirençlere göre tüm numuneler artış göstermektedir. Sonuçlarda en yüksek dirence sahip numune 0.04179 kΩm değeri ile CT30, en düşük direnç ise 0.04127 kΩm değeri ile UK20 olmuştur. 14 günlük değer ile benzer özellikler göstermiştir. UK ve CT numunelerinde %20 de düşüş gerçekleşirken %30 da bir artış gerçekleştirmiştir.

56 günlük ölçümler REF numunesi 0.04179 kΩm direnç ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde tüm numuneler 28 günlük dirençlere kıyasla artış gerçekleştirmiştir. 56 günlük dirençler arasında en büyük dirence sahip numune 0.04328 kΩm değeri ile UK30, en küçük direnç ise 0.04179 kΩm değeri ile REF olmuştur. CT ve UK numuneleri 56 günlük dirençlerinde oran arttıkça dirençler de artmıştır ve tüm numuneler REF değerinden daha fazla direnç göstermiştir.

90 günlük ölçümlerde REF numunesi 0.04216 kΩm direnç ölçülmüştür. 56 günlük dirençlere kıyasla 90 günlük numuneler daha fazla dirence sahip olduğu görülmektedir. 90 günlük dirençler arasında en fazla dirence sahip numune 0.04434 kΩm değeri ile UK30, en düşük direnç ise 0.04216 kΩm değeri ile REF olmuştur. CT ve UK numuneler 56 günlük numunelerde olduğu gibi oran arttıkça direnç artmıştır.

180 günlük ölçümlerde REF numunesi 0.04221 kΩm direnç ölçülmüştür. 90 günlük numunelere kıyasla 180 günlük numuneler daha fazla dirence sahip görülmektedir. 180 günlük numunelerde en fazla dirence sahip numune 0.04754 kΩm değeri ile UK30, en düşük direnç ise 0.04221 kΩm değeri ile REF olmuştur. Numunelerin dirençleri incelendiğinde CT ve UK oranları arttıkça direnç değerleri de artmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde numuneler 56 günlük yaşlarının sonunda REF direncini geçmeyi başarmış ve daha sonraki yaşlarında büyük artışlar gerçekleştirmiştir. Erken yaşlarda CT numuneleri UK numunelere göre daha fazla direnç gösterirken, 56 günlük yaşı ve daha sonrasında UK numuneleri daha fazla direnç göstermeye başlamıştır. Bu durum 0.1 kHz frekans da olduğu gibi dirençlerde birbirine oldukça yakın sonuçlar göstermiştir.



Şekil 7. Numunelerin 0.12 kHz frekansına ait elektriksel öz direnç ile numune yaşı arasındaki ilişki.

Harç numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda 1 kHz ölçümlerine göre elde edilen Elektriksel öz direnç değerlerine ait veriler Şekil 8’de verilmiştir.

7 günlük sonuçlar incelendiğinde REF numunesinin direnci 0.04077 kΩm ölçülmüştür. UK numuneleri REF direncinden daha düşükken CT numuneleri daha yüksek sonuçlar alınmıştır. 7 günlük en yüksek dirence sahip CT20 numunesi 0.04083 kΩm, en düşük direnç ise 0.04063 kΩm ile UK30 olmuştur. 0.1 ve 0.12 frekanslarında olduğu gibi UK ve CT numuneleri benzer sonuçlar vermiştir, UK numuneleri %20 de düşüş gerçekleşip %30 da artarken, CT numuneleri %20 de artış %30 da düşüş olmuştur.

14 günlük sonuçlarda REF numunesinin direnci 0.04103 kΩm ölçülmüş ve 7 günlük numuneye göre artış gerçekleşmiştir. En yüksek direnç ise 0.04105 kΩm ile UK30, en düşük direnç ise 0.04083 ile UK10 olmuştur. 0.1 ve 0.12 frekanslarında olduğu gibi benzer sonuçlar göstermiştir ve frekans arttıkça dirençlerde düşüşler olmuştur.

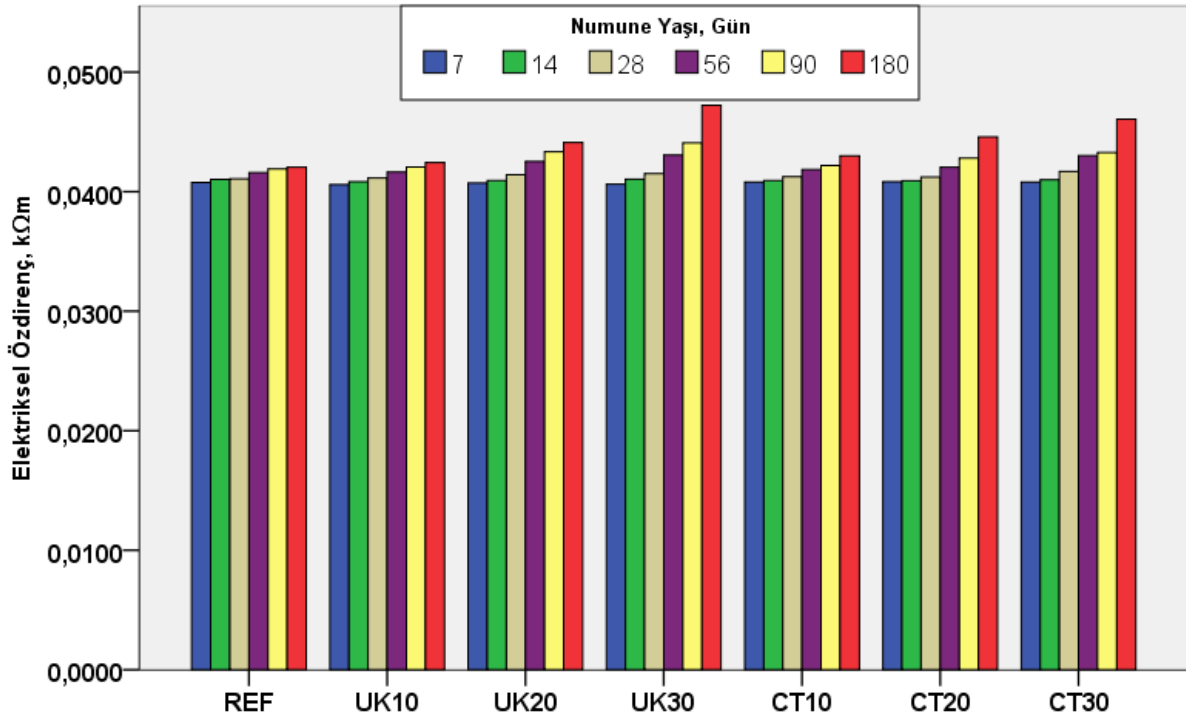
28 günlük sonuçlarda REF numunesinin direnci 0.04108 kΩm ölçülmüştür ve tüm numuneler REF'e oranla daha fazla direnç göstermeye başlamıştır. En yüksek dirence sahip numune 0.04169 kΩm değeri ile CT30, en düşük direnç ise 0.04108 ile REF olmuştur. 0.1 ve 0.12 frekanslarından farklı olarak daha erken REF direncini geçmeye başlamıştır. UK numuneleri oran arttıkça direnci artarken, CT numunelerinde %20 de düşüş gerçekleşip %30 da artış göstermektedir.

56 günlük numunelerde REF 0.04156 kΩm değerini okunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde 28 günlük numunelere kıyasla daha fazla direnç göstermektedir. 56 günlük sonuçlarda en yüksek dirence sahip numune 0.04302 kΩm ile UK30, en düşük direnç ise 0.04156 kΩm ile REF olmuştur. UK ve CT numuneleri oran arttıkça direnç değerleri de artış göstermiştir. Bu durum diğer frekanslarda olduğu gibi 56 günlük yaşından sonra gerçekleşmiştir.

90 günlük numunelerde REF numunesi 0.04190 kΩm değeri göstermektedir. Sonuçlarda 56 günlük numunelere kıyasla daha yüksek direnç sahip oldukları görülmektedir. 90 günlük sonuçlarda en yüksek dirence sahip numune 0.04408 kΩm ile UK30 olurken en düşük direnç ise 0.04190 kΩm ile REF numunesi olmuştur. Diğer frekanslarda olduğu gibi UK ve CT oranları arttıkça direnç değeri de artmıştır.

180 günlük numunelerde REF numunesi 0.04205 kΩm değeri görülmektedir ve bu değer REF numuneleri içerisinde en fazla dirence sahip olmuştur. 180 günlük numune sonuçlar diğer yaşlardaki sonuçlarla kıyaslandığında her oran için en yüksek dirençler bu yaşta görülmektedir. Bu da yaş arttıkça numunelerin göstermiş olduğu dirençte artmış olduğunu göstermektedir. 180 günlük numunelerde en yüksek direnç 0.04723 kΩm ile UK30 olurken en düşük değer ise 0.04205 kΩm değeri ile REF olmuştur. UK ve CT numuneleri oran arttıkça direnç de artmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde numune yaşının artması direnci de arttırmıştır. Diğer frekanslardan farklı olarak REF numunesinin direncinden daha yüksek dirence 28 gün de ulaşmıştır.



Şekil 8. Numunelerin 1 kHz frekansına ait elektriksel özdirenç ile numune yaşı arasındaki ilişki.

Harç numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda 10 kHz ölçümlerine göre elde edilen Elektriksel özdirenç değerlerine ait veriler Şekil 9’de verilmiştir.

7 günlük sonuçlarda REF numunesi 0.04073 kΩm ve UK10, 20, 30 sırayla 0.04056 kΩm, 0.04069 kΩm, 0.04059 kΩm değerini okunmuştur. CT10, 20 ve 30 numuneleri sırayla 0.04077 kΩm, 0.04077 kΩm ve 0.04076 kΩm değeri okunmuştur. 7 günlük değerlerde en yüksek dirence sahip numune 0.04077 kΩm ile CT10 ve CT20 olurken en düşük değer 0.04056 kΩm değeri ile UK10 olmuştur. UK numuneleri %20 de artış göstermiş ama %30 da düşüş gerçekleşmiştir. CT numunelerinin dirençleri birbirlerine çok yakın sonuçlar göstermiştir.

14 günlük sonuçlar incelendiğinde REF numunesi 0.04096 kΩm direnç göstermiştir. 14 günlük yaşında en fazla dirence sahip numune 0.04098 ile UK30, en düşük direnç ise 0.04078 ile UK10 olmuştur. UK numuneleri oran arttıkça direnç de artmıştır. CT numunelerinde ise %20 düşüş gerçekleşirken %30 da artış olmuştur.

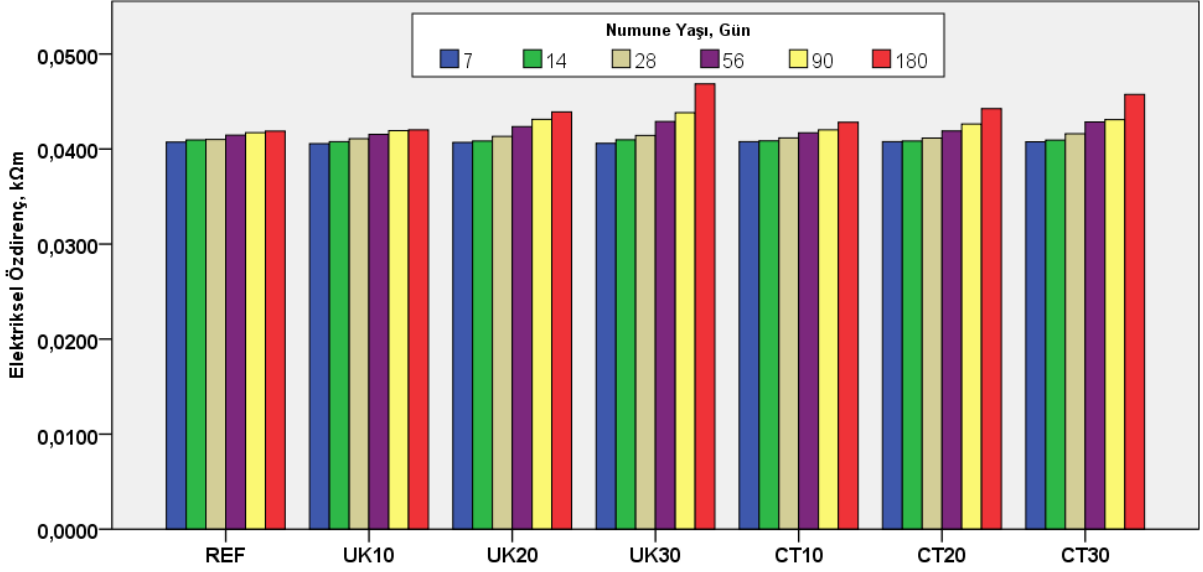
28 günlük sonuçlarda tüm numuneler REF değerini geçmiştir. Bu durum 1 kHz ile benzerlik göstermektedir. 28 günlük değerlerde REF numunesi 0.04100 kΩm okunmuştur. En fazla dirence sahip numune 0.04160 kΩm ile CT30 olurken, en düşük direnç ise REF numunesinde gerçekleşmiştir. UK numunelerinde oran arttıkça direnç artarken, CT numunelerinde %20 küçük bir düşüşün ardından artış gerçekleşmiştir.

56 günlük sonuçlarda 28 günlük sonuçlarda olduğu gibi tüm numuneler REF değerini geçmiştir. 56 günlük sonuçlarda REF değeri 0.04146 kΩm olarak ölçülmüştür. En yüksek direnç 0.04289 kΩm ile UK30 da olurken, en düşük direnç ise REF numunesinde gerçekleşmiştir. Diğer frekanslarda olduğu gibi UK ve CT numuneleri 56 günlük yaşının ardından her ikisinin de oranı arttıkça dirençleri de artmış olduğu görülmektedir.

90 günlük sonuçlarda REF numunesi 0.04173 kΩm değeri okunmuş ve 90 günlük sonuçlar içerisinde en düşük sonuç alınan numune olmuştur. En yüksek direnç ise 0.04383 kΩm ile UK30 göstermektedir. Numunelerde UK ve CT oranları arttıkça direnç değerleri de artış göstermiştir.

180 günlük sonuçlarda REF numunesi 0.04189 k Ω m değeri okunmuş ve 180 günlük sonuçlar içerisinde en düşük sonuç alınan numune olmuştur. En yüksek değer 0.04686 k Ω m ile UK30 olmuştur. Bu aynı zamanda 10 kHz frekansında alınan en yüksek direnç değeridir. CT ve UK numuneleri oran arttıkça direnç değerleri artış göstermiştir.

Elektriksel özdirenç değerleri genel olarak ele alındığında frekanslar da görülen sonuçlara benzer veriler elde edilmiş. Frekansın artmasıyla birlikte dirençlerde azalma meydana gelmiştir. Bilindiği gibi frekans, bir AC sinyalinin saniyedeki devir sayısıdır. Çimento esaslı sistemlerde boşluklu çözeltilerde iyon transferi nedeniyle elektriksel iletkenlik oluşur ve artan frekansla iyon transferi hızlanır. Bu nedenle frekans artışı ile direnç azalmaktadır [59].



Şekil 9. Numunelerin 10 kHz frekansına ait elektriksel özdirenç ile numune yaşı arasındaki ilişki.

IV. SONUÇ

- Numunelere ait yayılma değerleri incelendiğinde, UK eklenmesi ile REF numuneye oranla yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir. CT %10 oranının da kullanıldığında yayılma çapı azalırken oranın artmasıyla birlikte yayılma çaplarında artış gözlemlenmiştir.
- CT ve UK ile üretilen numunelerin 7, 14, 28, 56, 90 ve 180 günlük eğilme dayanım verilerine bakıldığında, tüm yaşlarda CT ve UK ile üretilen numuneler REF değerini geçememiştir. UK ve CT kendi aralarında incelendiğinde ise tüm yaşlarında UK ve CT oranı arttıkça eğilme de düşüşler gerçekleşmiştir. Genel olarak bakıldığında ise yaş arttıkça numunenin eğilme dayanımı da artmıştır. Bu durumda eğilme dayanımı yaş ile doğru orantılı diyebiliriz.
- CT ve UK ile üretilen numunelerin 7, 14, 28, 56, 90 ve 180 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, tüm yaşlarda CT ve UK ile üretilen numuneler REF değerini geçememiştir. UK ve CT numunelerinde ise yaş ilerledikçe numunelerin basınç dayanımlarında artış gerçekleşmiştir. UK ve CT birbirleriyle kıyaslandığında ise tüm yaşlarda UK numuneleri daha fazla dayanım göstermiştir. UK ve CT numunelerinde oran arttıkça numunenin basınç dayanımı tüm yaşlarda azalma göstermektedir.
- 7, 14, 28, 56, 90 ve 180 günlük elektriksel özdirenç verileri incelendiğinde, tüm frekanslarda 180 günlük UK30 numuneleri en yüksek direnci vermiştir. Bunlar sırayla 0.04755 k Ω m, 0.04754 k Ω m, 0.04723 k Ω m, 0.04686 k Ω m özdirençleri olmuştur.

- 0.1 ve 0.12 kHz frekansları benzer özellikler göstermiştir. Her ikisinde de dirençler 56 günlük yaşlarında REF direncini geçmeye başlamıştır. CT numuneleri erken yaşlarda UK'dan daha yüksek direnç gösterirken, orta ve ileri yaşlarda UK numuneleri CT den daha fazla direnç göstermiştir. 1 ve 10 kHz frekansları da benzer özellikler göstermiş ve her ikisinde de 28 günlük yaşlarında REF direncini geçmeye başlamıştır.
- Genel olarak elektriksel özdirenç verileri incelendiğinde ise erken yaşlarda REF direnci daha yüksek olurken ilerleyen yaşlarında UK ve CT numuneleri bu direnci geçebilmiştir. UK ve CT numunelerinde yaş arttıkça gösterilen özdirenç de artmıştır. Bu durumda bize UK ve CT katkılı numuneler de yaş arttıkça elektriksel özdirenç değerlerinin arttığı söylenebilir.

Sonuç olarak CT ve UK ile üretilen numunelerde çimento yerine kullanılan mineral katkıları, çimento miktarını azaltmasıyla daha ekonomik numuneler üretmeye olanak sağlamıştır. Aynı zamanda geri dönüşüm açısından da verimli sonuçlar elde etmiş oluruz. Yapılan deneylerde elde edilen veriler incelendiğinde, UK ve CT ile üretilen numunelerin kullanılabileceğinden bahsedebiliriz. CT kullanılan numunelerde basınç dayanımları ele alındığında 180 günlük verilerde CT30 numunesi %27'lik bir basınç dayanım kaybı olduğu görülmüştür. Bu durumda CT numunesinin %30 için ideal olmadığı sonucuna varılmıştır. CT30 numunesinin eğilme dayanımı da göz önüne alınınca 180 günlük eğilme sonuçlarında en düşük eğilme CT30 numunesinde görülmüştür. Bu durumlar göz önüne alınınca, farklı kimyasal ve mineral katkıları kullanılarak CT ve UK'nın çeşitli mühendislik özelliklerine etkisi araştırılabilir.

V. KAYNAKLAR

- [1] S. Shaikuthali, M. Mannan, E.T. Dawood, D. Teo, R. Ahmadi, I. Ismail, "Workability and compressive strength properties of normal weight concrete using high dosage of fly ash as cement replacement," *J. Build. Pathol. Rehabilitation*, vol. 4 no.1, pp. 26, 2019.
- [2] C. Valderrama, R. Granados, J.L. Cortina, C.M. Gasol, M. Guillem, "Josa Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study," *J Clean Prod*, vol. 25, pp. 60-67, 2012.
- [3] A. Josa, A. Aguado, A. Cardim, E. Byars, "Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU," *Cement Concr Res*, vol. 37 no. 5, pp. 781-788, 2007.
- [4] M. Uysal, M.M. Al-mashhadani, Y. Aygörmez, O. Canpolat, "Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 176, pp. 271-282, 2018.
- [5] X. Liang, C. Wu, Y. Su, Z. Chen, Z. Li, "Development of ultra-high-performance concrete with high fire resistance," *Construction and Building Materials*, vol. 179, pp. 400-412, 2018.
- [6] M. Rafieizonooz, J. Mirza, M.R. Salim, M.W. E. Hussin, "Khankhaje Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement," *Construct Build Mater*, vol. 116, pp. 15-24, 2016.
- [7] A.M. Hakamy, "Microstructural design of high-performance natural fibre-nanoclay-cement nanocomposites," Curtin University, Australia, 2016.
- [8] G.F. Huseien, A. R. M. Sam, K. W. Shah, J. Mirza, M. M. Tahir, "Evaluation of alkaliactivated mortars containing high volume waste ceramic powder and fly ash replacing GBFS," *Construction and Building Materials*, vol. 210, pp. 78-92, 2019.

- [9] J. Temuujin, E. Surenjav, C.H. Ruescher, J. Vahlbruch, “Processing and uses of fly ash addressing radioactivity (critical review),” *Chemosphere*, vol. 216, pp. 866-882, 2019.
- [10] M. Saafi , K. Andrew , PL Tang , D. McGhon , S. Taylor , M. Rahman , S. Yang , X. Zho, “Multifunctional properties of carbon nanotube/fly ash geopolymeric nanocomposites,” *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 46–55, 2013.
- [11] N. Ranjbar , M. Mehrali , M. Mehrali , UJ Alengaram , MZ Jumaat, “Graphene nanoplatelet-fly ash based geopolymer composites,” *Cement and Concrete Research*, vol. 76, pp. 222–231, 2015.
- [12] H. Xiyili , S. Çetintaş , D. “Bingöl, Removal of some heavy metals onto mechanically activated fly ash: Modeling approach for optimization, isotherms, kinetics and thermodynamics” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 109, pp. 288 – 300, 2017.
- [13] Y. Hefni , YAE Zaher , MA Wahab, “Influence of activation of fly ash on the mechanical properties of concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 728–734, 2018.
- [14] D.P. Bentz, J. Tanesi, A. Ardani, “Ternary blends for controlling cost and carbon content,” *Concr. Int.*, vol. 35 no. 8, pp. 51-59, 2013.
- [15] L. Gurney, D.P. Bentz, T. Sato, W.J. Weiss, “Using limestone to reduce set retardation in high volume fly ash mixtures: improving constructability for sustainability” *Concr. Mater.*, Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board No 2290 pp. 139-146, 2012.
- [16] D.P. Bentz, T. de la Sato, I. Varga, W.J. Weiss, “Fine limestone additions to regulate setting in high volume fly ash mixtures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, pp.11-17, 2012.
- [17] R. Yu, D. Van Onna, P. Spiesz, Q. Yu, H. Brouwers, “Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying expanded waste glass,” *J Clean Prod*, vol. 112, pp. 690-701, 2016.
- [18] A. Shayan, A. Xu, “Value-added utilisation of waste glass in concrete,” *Cement Concr Res*, vol. 34 no. 1, pp. 81-89, 2004.
- [19] G. Vijayakumar, H. Vishaliny, D. Govindarajulu, “Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 153-157, 2013.
- [20] G.S. Islam, M. Rahman, N. Kazi, “Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 6 no. 1, pp. 37-44, 2017.
- [21] K. Liang, X. Zeng, X. Zhou, F. Qu, P. Wang, “A new model for the electrical conductivity of cement-based material by considering pore size distribution,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 69 no. 20, pp. 1067-1078, 2017.
- [22] K. Liang, X. Zeng, X. Zhou, C. Ling, P. Wang, K. Li, S. Ya, “Investigation of the capillary rise in cement-based materials by using electrical resistivity measurement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 173, pp. 811-819, 2018.
- [23] R. Masoodi, K.M. Pillai, “Wicking in Porous Materials: Traditional and Modern Modeling Approaches CRC Press”, 2012.
- [24] C. Hall, W.D. HoffWater, “Transport in Brick, Stone and Concrete,” *CRC Press*, 2011.
- [25] L. Zhao, X. Liu, H. Zhao, “The study of influence on track stress caused by the cracking at wide juncture of CRTS II prefabricated slab track” *J Railw Sci Eng.*, vol. 13 no. 1, pp. 9–14, 2016.

- [26] D.A. Whiting, M.A. Nagi, "Electrical resistivity of concrete-a literature review," *R&D Serial*, vol. 2457, 2003.
- [27] F. Rajabipour, J. Weiss, "Electrical conductivity of drying cement paste," *Mater. Struct.*, vol. 40 no. 10, pp. 1143-1160, 2007.
- [28] S. Tang, X. Cai, Z. He, W. Zhou, H. Shao, Z. Li, T. Wu, E. Chen, "The review of pore structure evaluation in cementitious materials by electrical methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 117, pp. 273-284, 2016.
- [29] R. He, H. Ma, R. B. Hafiz, C. Fu, X. Jin, J. He, "Determining porosity and pore network connectivity of cement-based materials by a modified non-contact electrical resistivity measurement: Experiment and theory," *Mater. Des.*, vol. 156, pp. 82-92, 2018.
- [30] O.E. Gjorv, Ø.E. Vennesland, A.H.S. El-Busaidy, "Electrical "Resistivity of Concrete In The Oceans," *Offshore Technology Conference, Houston, TX, ABD*, 05 May. 1977.
- [31] R. Polder, "Test methods for onsite measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation," *Construction and Building Materials*, vol. 15 pp. 125–131, 2001.
- [32] L. Bertolini, B. Elşener, P. Pedferri, R. Polder, "Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, 2nd Edition" *Wiley Blackwell: Weinheim, Almanya*, ISBN 9783527603374, 2005.
- [33] T.C. Hou, V.K. Nguyen, Y.M. Su, Y.R. Chen, P.J. Chen, "Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 133, pp. 397–408, 2017.
- [34] T.K. Simon, V. Vass, "The electrical resistivity of concrete". *Concrete Structures*, pp. 61-65, 2012.
- [35] M. Collepardi, "New Concrete ; Tintoretto: Lancenigo" İtalya, 2010; ISBN 88-903777-2-0.
- [36] B. Dong, J. Zhang, Y. Wang, G. Fang, Y. Liu, F. Xing, "Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method," *Construction and Building Materials*, vol. 119, pp. 16-20, 2016
- [37] W. Lopez, J.A. Gonzalez, C. Andrade, "Influence of temperature on the service life of rebars," *Cement and Concrete Research*, vol. 23, pp. 1130-1140, 1993.
- [38] R.M. Ferreira, S. Jalali, "NDT measurements for the prediction of 28-day compressive strength," *NDT E Int.*, vol. 43, pp. 55–61, 2010.
- [39] B.B. Hope, A.C. Ip, "Corrosion of steel in concrete made with slag cement," *ACI Mater. J.*, vol. 84, pp. 525–531, 1987.
- [40] J. Bijen, "Benefits of slag and fly ash," *Constr. Build. Mater.* Vol 10, pp. 309–314, 1996.
- [41] G. Adil, J.T. Kevern, D. Mann, "Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 247, pp. 118453, 2020.
- [42] T.H. Wee, A.K. Suryavanshi, S.S. Tin, "Evaluation of rapid chloride permeability test (RCPT) results for concrete containing mineral admixtures," *ACI Struct. J.*, vol. 97, pp. 221-232, 2000.

- [43] J. Donnini, T. Bellezze, V. Corinaldesi, “Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers,” *J. Build. Eng.*, vol. 20, pp. 8-14, 2018.
- [44] C.G. Berrocal, K. Hornbostel, M.R. Geiker, I. Löfgren, K. Lundgren, D.G. Bekas, “Electrical resistivity measurements in steel fibre reinforced cementitious materials,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 89, pp. 216-229, 2018.
- [45] M. Chiarello, R. Zinno, “Electrical conductivity of self-monitoring CFRC,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, pp. 463–469, 2005.
- [46] H.W. Whittington, J. McCarter, M.C. Forde, “The conduction of electricity through concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 33, pp. 48–60, 1981.
- [47] *Beton agregaları*, Türk Standartlar Enstitüsü TS 706 EN 12620+A1, 2009.
- [48] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü, TS EN 1097-6, 2013.
- [49] *Beton-Karma Suyu-Numune Alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 1008, 2003.
- [50] *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 197-1, 2012.
- [51] *Standard Specification for Coal Fly Ash And Raw Or Calcined Natural Pozzolan For Use In Concrete*, ASTM International Standard ASTM C 618-19, 2019.
- [52] *Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 196-1, 2016.
- [53] *Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 1015-3, 2000.
- [54] *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 4: Basınç dayanımı - Deney makinelerinin özellikleri*, Türk Standartlar Enstitüsü TS EN 12390-4, 2002.
- [55] *Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete. West Conshohocken (PA)*, ASTM International Standard, ASTM C 1760, 2012.
- [56] K.I.M. Ibrahim, “Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, 2021.
- [57] O. Sengul, “Use of electrical resistivity as an indicator for durability,” *Construction and Building Materials*, vol. 73, pp. 434–441, 2014.
- [58] C.T. Chen, J.J. Chang, W. Yeih, “The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 35–43, 2014.
- [59] K. Güçlüer, “Polimer Katkılı Harçların Mekanik ve Elektriksel Özdirenç Özelliklerinin Araştırılması” *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 9 s. 4 ss.1649-1654, 2020.
- [60] T. Uygunoğlu, İ.B. Topçu, B. Şimşek, E. Çınar, “Kendiliğinden yerleşen harçların elektriksel özdirenç üzerine mineral katkıların etkisi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 22 s. 2, ss. 986-992, 2018.