

## Experimental Investigation of the Production of Smart Concrete with Piezoelectric Quartz

Savas Erdem

School of Civil Engineering, Istanbul University  
Avcilar Campus, Avcilar-Istanbul, Turkey  
E-mail: savas.erdem@istanbul.edu.tr

### Abstract

Smart concrete which has been emerged with developing construction technology is a designed smart material for building industry and has appeared owing to the need to monitor the concrete. There are two ways for making smart concrete. By attaching or embedding piezoelectric materials – which have the ability to transform mechanical strain into electrical charge or convert an applied electrical potential into mechanical strain energy when subjected to mechanical stress- in concrete or by adding small amount of microscopic fiber into concrete. The existed studies in the literature are about to expand smart concrete that is a very new material. However, there is no study with regard to the use of piezoelectric natural material in concrete. In this study, the fine aggregate in the mixtures will be partially and totally replaced with piezoelectric quartz crystals, and then the electrical changes on the specimens will be monitored under compression by means of the two copper electrodes. In general, there was a significant increase in compressive strength with increased quartz content. In addition, an increase in the strength resulted in an increase in the voltage values generated. Findings from this study will provide significant contributions to the design engineers and the researchers.

**Keywords:** Piezoelectric material, Smart concrete, Quartz.

## Piezoelektrik Kuvars Katkılı Akıllı Beton Üretimine Deneysel Olarak Araştırılması

### Özet

Gelişen inşaat teknolojisiyle ortaya çıkan akıllı beton, yapı sektöründe kullanılabilecek şekilde tasarlanmış bir akıllı malzeme olup, betonu izleme ihtiyacından ortaya çıkmıştır. Beton, içine veya yüzeyine piezoelektrik malzemeler (üzerlerine uygulanan mekanik basınçla voltaj üreten veya voltaj verildiğinde mekanik titreşim elde edilen elemanlar olarak tanımlanabilir) gömülerek veya yapıştırılarak akıllı hale getirebilir veya içerisinde mikroskobik fiber parçacıkları kullanarak beton içinde elektrik iletimi ve oluşan direnç yardımıyla betona akıllılık vasfı kazandırılabilir. Literatürde mevcut çalışmalar daha ziyade çok yeni bir malzeme olan akıllı betonun genişletilmesi dönük çalışmalardır. Ancak piezoelektrik doğal malzemenin beton içerisinde kullanımı ile ilgili doğrudan bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada, beton içerisinde kullanılacak ince agrega belli oranlarda (% 0, % 25, % 50 ve %100) piezoelektrik kuvars kristali ile değiştirilerek basınç deneyi altında numune üzerinde bırakılan diyetlere bağlanarak akım ölçer ile kontrol edilerek voltaj değişimi gözlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, artan kuvars içeriği ile betonun basınç dayanımında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Dayanımdaki artış bir sonucu olarak elde edilen volt değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma konuyla ilgili teorik ve deneysel araştırma yapan akademik çevrelerin çalışmalarına yol gösterebilecek, tasarım mühendislerine önemli katkılar sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Piezoelektrik malzeme, Akıllı beton, Kuvars

## 1. Giriş

Beton günlük hayatımızın her safhasına girmiş önemli ve popüler bir yapı malzemesidir. Konutlar, işyerleri, okullar, enerji üretim tesisleri ve alışveriş merkezleri gibi günlük hayatımızın büyük bir bölümünün geçtiği yapıların inşasında beton kullanılmaktadır.

Çok geniş bir alanda kullanılmasına ve fayda sağlamasına rağmen beton hakkında bilgilerimiz halen yeterli olgunluğa ulaşmamıştır. Özellikle son zamanlarda çalışılmaya başlanan çarpma etkisi [1-3] beton malzeme için yepyeni bir araştırma konusu ve çalışma alanı oluşturmuştur. Taşıyıcı betonlar kullanım ömürleri boyunca statik yüklemelerin haricinde dinamik yüklemelerine de maruz kalabilmektedir. Dinamik kökenli yüklemeler içerisinde literatürde az incelenmiş ve beton üzerindeki etkileri bilinen yüklemelerden biri bahsedildiği üzere çarpma yüklemesidir [4]. Bu tarz dinamik yüklemeler; betonarme yapılara otomobil, uçak vb. araç çarpması, askeri tesisler içerisinde bulunan cephanelik vb. yerlerde patlayıcı maddelerin patlaması sonucu ortaya çıkan etkiler, nükleer santrallerde meydana gelen kazaların oluşturduğu etkiler ve petrol platformlarının ve köprülerin betonarme ayaklarına gemi çarpması ve benzeri olarak düşünülebilir ve örneklemeler artırılabilir [5-7]. Bu çalışmaya konu oluşturan çarpma etkisi ise iki farklı nesnenin çarpışması anında meydana gelen temasla oluşan dinamik etkiler sonucunda nesnelere üzerinde ortaya çıkan yüksek gerilmelerin, malzemenin mekanik özellikleri üzerinde oluşturduğu değişimlerdir.

Akıllı beton, yapı sektöründe kullanılabilecek şekilde tasarlanmış bir akıllı malzeme olup, betonu izleme ihtiyacından hareketle ortaya çıkmıştır. SUNY (State University of New York)/ Buffalo profesörlerinden D.D.L Chung tarafından keşfedilip, geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. D.D.L Chung'a göre [8] akıllı beton, mikroskobik kısa karbon fiberlerle içeriği değiştirilmiş betondur. Karbon fiberin elektrik iletkenliği betondan daha fazla olduğu için fiberli beton kendi kendine bir sensör gibi davranır. Bu yüzden, artık içine optik fiber, strain gage, şekil hafızalı alaşımlar gömmeye gerek kalmamaktadır [9]. Beton deforme olduğunda ya da gerildiğinde, fiber ile çimento matrisi arasındaki temas etkilenir. Ayrıca, hacimsel elektrik öz direnci de etkilenir ve deformasyon, elektrik direncindeki değişimin ölçülmesi yoluyla sezilmiştir olur. Yani küçük yapısal çatlaklar büyük boyutlara ulaşmadan akıllı beton kullanarak hasarı izlemek mümkün olabilmektedir. Bu kabiliyet, depremi takip etme ve yapının iç şartlarını izlemekte kullanılabilir [10].

Buna paralel olarak, piezoelektrik malzemeler ise üzerlerine uygulanan mekanik basınçla voltaj üreten veya voltaj verildiğinde mekanik titreşim elde edilen elemanlar olarak tanımlanabilir. Piezoelektrik malzemeler, kutuplanma sonrası piezoelektrik etki gösteren ferroelektrik malzemeler ile kuvars gibi doğal piezoelektrik etki gösteren kristaller olmak üzere iki gruptan oluşmaktadır. Piezoelektrik kristaller; günlük yaşamımızda elektronik donanımlarda, masa ve kol saatlerinde, ultrasonik aygıtlarda ve pek çok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, kol saatleri içerisinde bulunan kuvars kristaline kol hareketimiz sayesinde basınç uygulayarak, saatin belli bir miktar enerji ihtiyacını karşılamış oluruz [11-12].

Literatürde mevcut çalışmalar [13-15] daha ziyade çok yeni bir yapı olan akıllı yapıların genişletilmesi dönük çalışmalardır. Bu yönde çalışmalara yön veren Prof. Chung çalışmalarına kompozit malzeme teknolojisi üzerinde devam etmektedir. Ancak piezoelektrik doğal malzemenin beton içerisinde kullanımı ile ilgili doğrudan bir çalışma mevcut değildir. Piezoelektrik yapay seramikler, ivme ölçer olarak gömülü elektronik sistemler şeklinde beton içerisinde zaman zaman kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, akıllı malzemelerin bir çeşidi olan piezoelektrik malzemelerden kuvars kristali entegrasyonu ile betona uygulanan yük altında beton içerisinde elektriksel alan oluşturarak betonun akıllı hale getirilebilirliği deneysel olarak incelenmiştir.

## 2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalarda basınç deneyleri için standart 150 mm küp ve voltaj ölçümleri için de 70\*70\*280 mm boyutlarında 28 günlük küre tabii tutulmuş 4 farklı tip beton numunesi hazırlanmıştır. Karışımlarda CEM 1 42.5N çimento kullanılmıştır. Piezoelektrik özellik taşıyan kuvars, ağırlıkça değişik oranlarda (% 0, %25, % 50 ve %100) ince agrega yer değiştirilerek kullanılmıştır. Her bir karışım için en az 3 numune hazırlanarak ortalama sonuçlar rapor edilmiştir. Her numunenin 1m<sup>3</sup>'ü için kullanılan yaklaşık karışım miktarları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: 1m<sup>3</sup> beton için kullanılan yaklaşık karışım miktarları

Seriler	Su (ml)	Çimento (gr)	Agrega (gr)	Kuvars (gr)
Kontrol	400	1000	882	-
%25 Kuvars	400	1000	661.5	220.5
%50 Kuvars	400	1000	441	441
%100 Kuvars	400	1000	-	882

Hazırlanan beton karışımları kalıpların yarısı dolacak şekilde konulduktan sonra boşluksuz yerleşmesi için sıkıştırma uygulandı. Karışımın arasına voltaj gözlenebilmesi için bir uçtan diğerine uzun kenara paralel dört adet bakır tel yerleştirilmiştir. Bu bakır teller ikişerli olarak multimetre cihazının her bir kısıcına tutturulmuştur. Basınç deneyi gerçekleştirilirken bir taraftan da micrometre ile voltaj ölçümü yapılmıştır ve ölçülen değerler ve değerlerin yüke göre değişimleri grafikleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Elektrik Ölçüm Deneyi Düzeneği

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1 Basınç Dayanımı

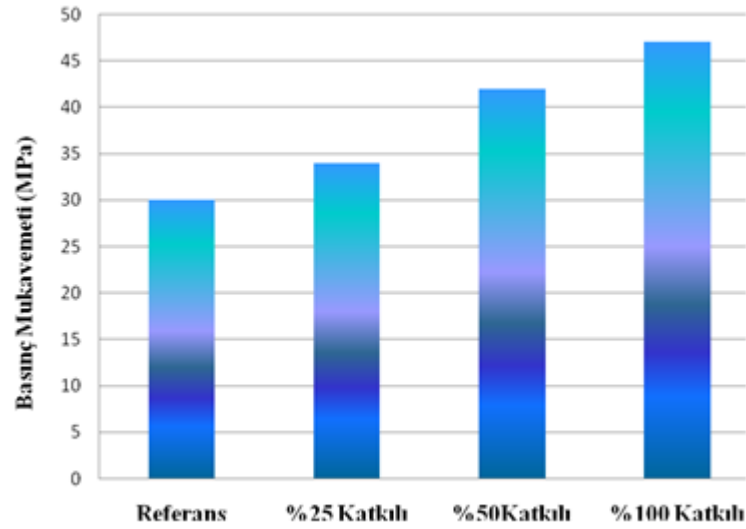
Deney numuneleri üzerinde 28. gün sonunda gerçekleştirilen basınç deneyi sonuçları standart sapma değerleri ile birlikte Tablo 2' de verilmiştir. Bunun yanı sıra, kuvars katkısının dayanım üzerindeki etkilerini daha net görmek amacıyla elde edilen değerlere ait grafik Şekil 2'te verilmiştir.

Sonuçlar incelediğinde; kuvars katkısının genel olarak betonun dayanımında önemli bir iyileştirme sağladığı görülmektedir. Referans betonu ile kuvars katkılı betonlar karşılaştırıldığında, kontrol betonuna göre % 25, % 50 ve % 100 kuvars katkısına sahip betonların basınç dayanımlarında sırasıyla % 7, % 14 ve % 25 oranında artış olduğu görülmüştür. Yüksek mukavemetinin; normal agrega partikülleri ile karşılaştırıldığında kuvars tanelerinin daha yüksek parçacık mukavemetinin ve kuvarsın içerdiği yüksek silika nedeniyle beton içerisinde oluşabilecek ilave puzzolanik reaksiyonlarının bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2: Beton basınç dayanımı deneyi sonuçları

Seriler	Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	30 (0.44*)
%25 Katkılı	34 (0.39*)
%50Katkılı	42 (0.53*)
%100 Katkılı	47 (0.74*)

\* : Standart Sapma



Şekil 2: Basınç değerlerinin grafiksel gösterimi

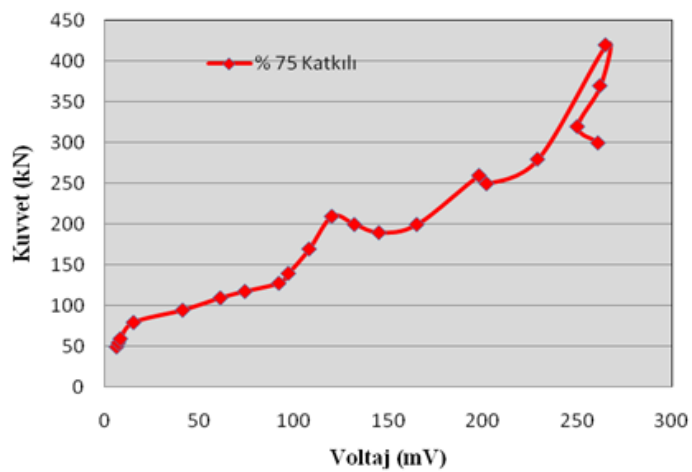
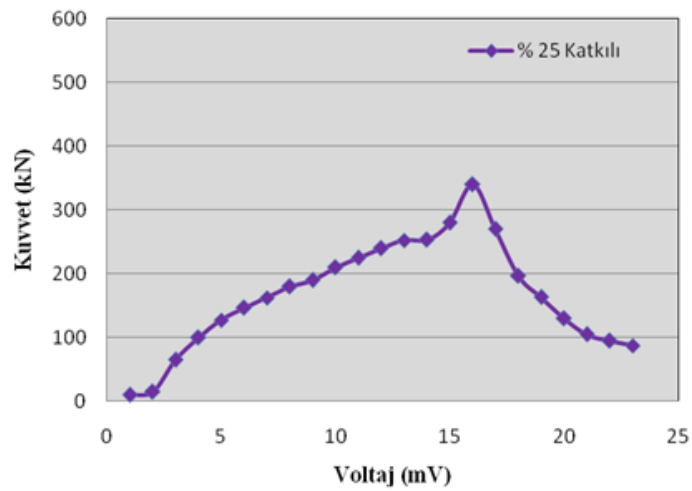
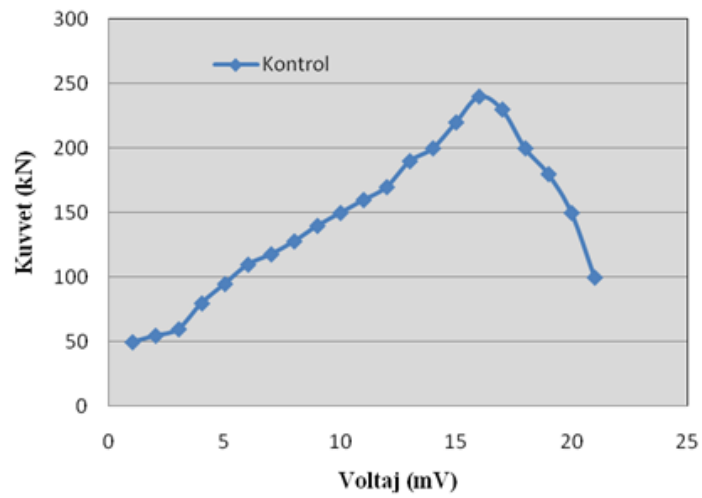
### 3.2 Voltaj Ölçümleri

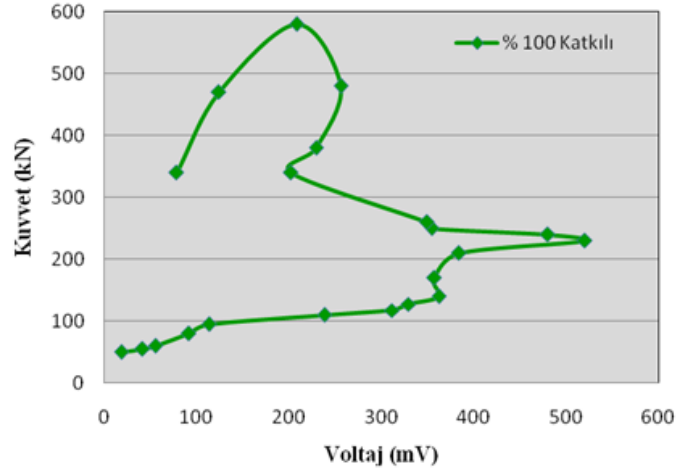
Yapılan deney sonucunda basınç etkisi altında voltaj değerleri ölçülmüştür. Ölçülen voltaj değerlerinin yüke bağlı değişimi grafik olarak Şekil 3 de sunulmuştur.

Genel olarak grafiklerden görüldüğü üzere, beton gerilme aldıkça multimetredeki değerler artmıştır. Beton göçme anına ulaştığında multimetredeki değerlerde azalmaya başlamıştır. Kontrol numunesinde, basınç etkisiyle voltaj değerinde kayda değer bir artış gözlenmemiştir ve grafikten de görüleceği üzere malzeme yenildikten sonra anlık bir pik değer okunmuştur. Ölçülen voltaj değerlerinin miktar olarak küçük değerde oldukları da görülmektedir.

Buna karşın karışımdaki kuvars miktarı artıkça elde edilen volt değerlerinin de arttığı görülmüştür. Bunun da gerilme altında kuvars taneciklerinin piezoelektrik özellikleri dolayısıyla volt farkı oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bunlara ek olarak, basınç yükü altında sıkışan kuvars moleküllerinin teması artacak ve artan bu temas yüzeyi de daha fazla elektrik alan yaratmaya yol açacaktır. Kontrol numunesi ile kıyaslandığında % 100 kuvars içeren numunede yaklaşık 25 kat daha fazla voltaj üretimi de bu savı destekler niteliktedir.





Şekil 3: Voltaj ölçüm değerlerinin grafiksel gösterimi

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında doğal piezoelektrik özelliğe sahip bir malzeme olan kuvars parçacıklarının beton içerisinde kullanımı araştırılmış ve basınç deneyi altında numune üzerinde bırakılan diyotlara bağlanan akım ölçer vasıtasıyla voltaj değişimi gözlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın olumlu sonuçlanması ile inşaat mühendisliğinin pek çok alanında birçok yeniliğin ortaya çıkması mümkündür. Özellikle deney sonrası numunelerin iç yapısını incelemeye olanak verecek ileri analiz teknikleriyle yapılacak mikroskobik çalışmalar genel davranış hakkında çok faydalı bilgilerin sağlanması hususunda kilit rol oynayacaktır. Bu çalışmanın geleceği ile ilgili öngörülerimiz;

- 1) Ters piezoelektrik yardımıyla çarpma anından hemen önce malzemeye akım vererek oluşan şekil değiştirme yardımıyla çarpma etkisinin numune üzerinde ki değişimi gözlemlenebilir.
- 2) Basınç etkisine çalışan yapısal elemanlarda (kolonlar gibi) kullanılmak suretiyle enerji üretimi gerçekleştirilebilir.
- 3) Düz piezoelektrik etki kullanılarak deprem anındaki sarsıntının miktarı tahminlenebilir.

#### Kaynaklar

- [1] Ozbolt, J., Sharma, A., İrhan, B., Sola, E., Tensile behavior of concrete under high loading rates, International Journal of Impact Engineering, 69, 55-68, (2014).
- [2] Abdel-Kader, M., Fouda, A., Effect of the reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles, International Journal of Impact Engineering, 63, 1-17, (2014).
- [3] Erdem, S., Blankson, M.A., Fractal-fracture analysis and characterization of impact-fractured surfaces in different types of concrete using digital image analysis and 3D nanomap laser profilometry, Construction and Building Materials, 40, 70-76, (2013).
- [4] Erkan, K., Arslan, A., Anıl, Ö., Beton Dayanımındaki Değişimin Çarpma Davranışına Etkisi, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 26, 115-123, (2011).
- [5] Zhang, X.X., Abd Elazim, A.M., Ruiz, G., Yu, R.C., Fracture behaviour of steel fibre-reinforced

- concrete at a wide range of loading rates, *Journal of Impact Engineering*, 71, 89-96, (2014).
- [6] Brara, A., Klepaczko, J.R., Fracture energy of concrete at high loading rates in tension, *Journal of Impact Engineering*, 34, 424-435, (2007).
- [7] Erdem, S., Dawson, A.R., Thom, N.H., Micromechanical structure-property relationships for the damage analysis of impact-loaded sustainable concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25, 597-609, (2013).
- [8] Chung, D.D.L., Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material, *Composites Part B: Engineering*, 31, 511-526, (2000).
- [9] Mingqing, S., Zhuoqiu, L., Qizhao, M., Darong, S., A study on thermal self-monitoring of carbon fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 769-771, (1999).
- [10] Chung, D.D.L., Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing, *Carbon*, 50, 3342-3353, (2012).
- [11] Polla, D.L., Francis, L.F., Processing and characterization of piezoelectric materials and integration into microelectrochemical systems, *Annual Review of Materials Science*, 28, 563-597, (1998).
- [12] Kansal, A., Srivastava, M.B., Distributed energy harvesting for energy-neutral sensor networks, *Pervasive Computing, IEEE*, 4, 69-71, (2005).
- [13] Wen, S., Chung, D.D.L., Uniaxial compression in carbon-fiber reinforced cement, sensed by electrical resistivity measurement in longitudinal and transverse directions, *Cement and Concrete Research*, 31, 297-301, (2001).
- [14] Chung, D.D.L., Piezoresistive cement-based materials for strain sensing, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 13, 599-609, (2002).
- [15] Shin, S.W., Qureshi, A.R., Lee, J.Y., Yun, C.B., Piezoelectric sensor based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete, *Smart Materials and Structures*, 17, 1-8, (2008).