



GELENEKSEL YÖNTEMLERLE ÜRETİLEN KAPASİTANS TABANLI KENDİNDEN SENSÖRLÜ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT

Murat ÖZTÜRK 

İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay,
TÜRKİYE

murat.ozturk@iste.edu.tr

(Geliş/Received: 07.01.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.04.2022)

ÖZ: Bu çalışmada, çimento hamurunun kapasitans tabanlı kendiliğinden algılama özelliği incelenmiştir. Çimento hamurlarına sürekli ve süreksiz yükleme döngüleri (minimum gerilme 6 kPa, maksimum gerilme 36 kPa) uygulanmıştır. Gerilme ve kapasitans arasında bir ilişki gözlemlenmiştir. Çimento hamuru üzerindeki basınç gerilmesinin artırılmasıyla, kapasitans değerinde düşüşler ölçülmüştür. Kapasitans değişikliği tüm gerilme aralığı için geri dönüşlüdür. Çimento hamurunun başlangıç kapasitans değeri (yüksüz hali) 119.51 pF iken numunenin 36 kPa basınç gerilmesi altındaki kapasitans değeri 119.41 pF'dir. En yüksek gerilmede kapasitansta fraksiyonel değişim 9.2×10^{-4} 'tür.

Anahtar Kelimeler: Kendinden sensörlü, Kapasitans, Çimento hamuru, Basınç

Capacitance-Based Self-Sensing Cement-Based Composite Produced by Traditional Methods

ABSTRACT: In this study, capacitance based self-sensing properties of the cement paste is investigated. Continuous and discontinuous loading cycles (minimum stress is 6 kPa, maximum stress is 36 kPa) are applied to the cement pastes. A correlation between stress and capacitance is observed. The greater the compressive stress on the cement paste, the lower the capacitance. Capacitance change is irreversible for the entire stress regime. Initial capacitance value (un-loaded state) of the cement paste is 119.51 pF, whereas capacitance value of the specimen under 36 kPa compressive stress is 119.41 pF. Fractional change in capacitance at the highest stress is 9.2×10^{-4} .

Keywords: Self-sensing, Capacitance, Cement paste, Compression

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çimentolu kompozitler dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemelerindedir. Çimento esaslı kompozit, inşaat sektöründe yüksek mukavemet, dayanıklılık ve kolay uygulama gibi avantajlar sağlar. Yapısal özelliklere ek olarak, çimento esaslı kompozitlerden bazı ek işlevler de beklenir. Akıllı olan çok işlevli yapı malzemeleri, yapısal sağlık izleme (Yan ve diğ., 2017), kendi kendini sönmleme (Ruan ve diğ., 2017), kendi kendini iyileştirme (Shah ve Huseien, 2020), kendi kendine güç üretme (Xi ve Chung, 2020), elektromanyetik ekranlama (Jung ve diğ., 2020), akıllı yol (Saleem ve diğ., 2016) ve kendini algılama (Han ve diğ., 2020) gibi uygulamalar için kullanılır. Kendi kendine algılama, yapı malzemelerinin herhangi bir cihaza (bağlı veya gömülü) ihtiyaç duymadan kendi durumunu algılama yeteneğini ifade eder.

Kendi kendine algılama, bir yapı malzemesine gerilme uygulanması ve bunun sonucu malzemede meydana gelen elektriksel tepkilerin ölçülmesi esasına dayanır (Xi ve Chung, 2019). Malzemenin elektriksel tepkilerindeki değişim, malzemedeki gerilme değişimlerinin algılanabilmesini sağlar.

Yaygın olan direnç tabanlı kendi kendine algılama, malzemedeki öz direnç değişiminin gerilme uygulamasıyla ilişkilendirilmesine dayanır (Bekzhanova ve diğ., 2021). Direnç öz dirençle, gerilme ise şekil değiştirme ile ilgilidir. Direnç bazlı kendi kendini algılayan malzemenin test edilmesi için bu malzemenin iletken olması gerekir. Bu amaçla yarı iletken veya iletken olmayan malzemeler iletken olacak şekilde iletken dolgu maddeleriyle ile modifiye edilir. Karbon lif (Han ve diğ., 2021), karbon siyahı (Monteiro ve diğ., 2017), grafen (Papanikolaou ve diğ., 2019), grafit (Rovnanik ve diğ., 2019) ve çelik lif (Wang ve diğ., 2021), direnç tabanlı kendi kendini algılama uygulamaları için en yaygın kullanılan iletken dolgu malzemeleridir. İletkenlik ihtiyacı, direnç tabanlı kendi kendine algılama uygulamasını sınırlar. Bu yöntem mevcut yapılarda kullanılamaz. Ayrıca iletken dolgular ek maliyete neden olurlar.

Daha az yaygın olan kapasitans tabanlı kendi kendine algılama, malzemedeki kapasitans değişiminin gerilme uygulamasıyla ilişkilendirilmesidir (Chung, 2021). Kapasitans, malzeme özelliği olan elektriksel geçirgenlik ile ilgilidir. Kapasitans tabanlı kendinden algılama uygulamalarında iletkenliğe gerek yoktur. Kapasitans tabanlı öz algılama, hem mevcut hem de yeni yapılar için uygulanabilmektedir.

Direnç tabanlı kendini algılayan yapı malzemeleri üzerine birçok çalışma olmasına rağmen, çimento esaslı kompozitlerin kapasitif kendini algılama özellikleri üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, farklı yükleme koşulları altında çimento hamurunun kapasitif kendini algılama özellikleri incelenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalardan ((Chung ve Wang, 2018) ve (Ozturk ve Chung, 2021)) farklı olarak yüksek frekans ayarı ve değişik gerilme değerleri kullanılmıştır. Yüksek frekans, elektrot-malzeme arayüzeyin etkisini azaltmak için tercih edilmiştir. Ayrıca farklı gerilme değerlerinin kullanılması uygulamada bu yöntemin etkinliğinin ortaya çıkarılması içindir.

YÖNTEM (METHOD)

Malzemeler (Materials)

Çimento hamurunun hazırlanmasında CEM I 42,5 R Portland çimentosu (Oyak Çimento, Ankara, Türkiye) ve şebeke suyu kullanılmıştır. Çimento hamuru karışımı için su:çimento oranı 0,30 olarak sabit tutulmuştur. Çimento ve su karıştırıcıda bir süre karıştırıldıktan sonra homojen taze karışım yağlı ahşap kalıba dökülmüştür. 24 saat sonra çimento hamuru kalıptan çıkarılmış ve 28 gün süreyle su tankında kürlenmiştir. 28 günlük su küründen sonra test numuneleri 5 gün süreyle oda sıcaklığında (23 °C ve 70 bağıl nem) kurumaya bırakılmıştır.

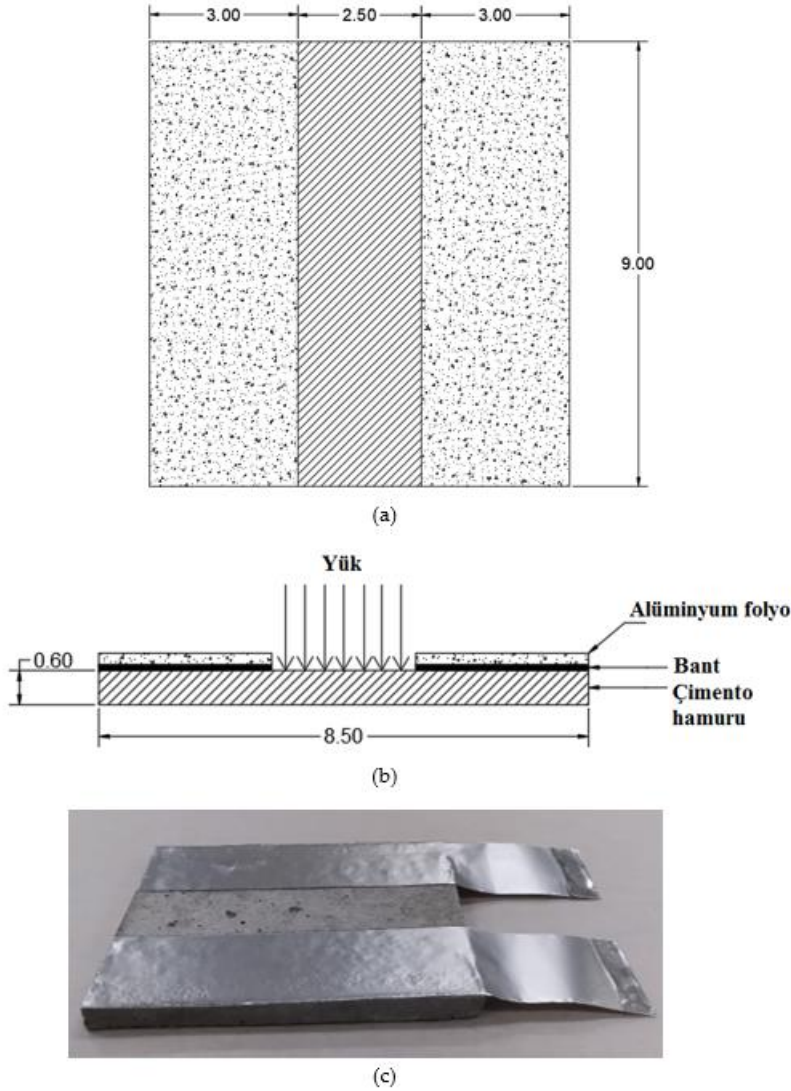
Test yöntemi (Test method)

9,0 cm x 8,5 cm x 0,6 cm (uzunluk x genişlik x kalınlık) boyutlarındaki çimento hamurunun düzlemsel kapasitans değeri, numune yüzeyine çift taraflı yapışkan bant ile yapıştırılan iki eş düzlemsel elektrot (Alüminyum folyo) ile ölçülmüştür. Test numunesi Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapışkan bant, dielektrik film görevi görür. Numune yüzeyindeki her elektrot 9,0 cm x 2,5 cm boyutlarındadır. Elektrotların en yakın kenarları arasındaki mesafe 2,5 cm'dir.

Gerilme algılaması için elektrot kaplanmayan numune yüzeyine çimento hamuru numunesinin düzlemine dik doğrultuda yük uygulanmıştır. Yük uygulama alanı 9,0 cm x 2,5 cm'dir. Numune üzerindeki gerilme, kuvvetin alana bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yükleme için bilinen ağırlıklar kullanılmıştır. Uygulanan maksimum gerilme 36 kPa'dır (rastgele seçilmiştir). Maksimum gerilmenin, numunenin elastik sınırlarını aşmamasına özen gösterilmiştir.

Kapasitans ölçümleri için LCR metre (LCR-6000, GW Instek, New Taipei City, Tayvan) kullanılmıştır. Frekans ve voltaj değerleri 100 kHz ve 1 V (AC voltaj) olarak ayarlanmıştır. Sayaç ayarı, seri olarak kapasitansa karşılık ayarlanmıştır.

Ölçümler üç farklı numune üzerinde yapılmıştır. Her numunede gerilme ile birlikte kapasitans değerindeki fraksiyonel değişim birbirine çok yakın olarak gözlemlenmiştir. Sunulan değerler test edilen üç numuneden birine aittir.



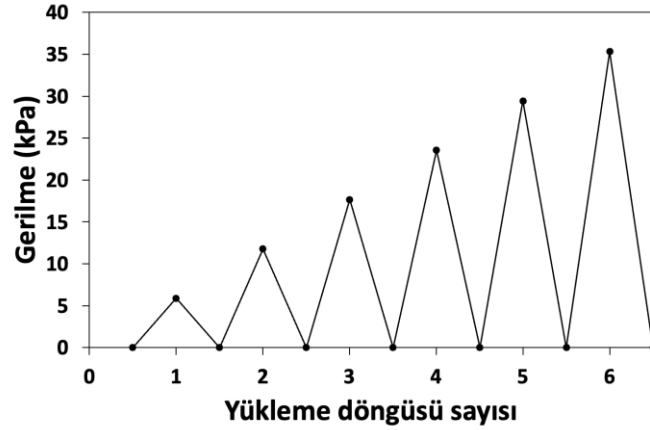
Şekil 1. Elektrotlu çimento pastası numunesi a) şematik üstten görünüm. b) şematik yandan görünüm. c) perspektif fotoğraf

Figure 1. Cement paste sample with electrode a) schematic top view. b) schematic side view. c) perspective photography

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Şekil 2, kademeli olarak artan gerilme genliğinde yükleme ve ardından boşaltma ile değişen çimento hamurunun kapasitans değerlerini göstermektedir. Artan gerilme genliği ile kapasitans azalmıştır. Basınç gerilmesi ne kadar yüksek olursa kapasitans düşüşü de o kadar yüksek olmuştur (Chung ve Wang, 2018). Çimento hamurunun başlangıç (yüksüz durumda) kapasitans değeri 119,51 pF olarak ölçülmüştür. Bu değer, numuneye uygulanan maksimum gerilme (36 kPa) ile 119,41 pF'ye düşmüştür. Kapasitif kendini algılamının, 12 kPa gerilme seviyesinin altında etkin olmadığı tespit edilmiştir. Yükleme ve boşaltma sırasındaki kapasitans değişimi, tüm gerilme seviyeleri için tamamen tersine çevrilebilir durumdadır. Şekil 3, artan gerilme genliği ile kapasitansta kısmi azalmadaki değişimi göstermektedir. Eğri, 6 kPa ile 36 kPa arasında neredeyse doğrusaldır. En yüksek gerilme seviyesinde kapasitansta fraksiyonel azalma %0.09'dur.

Şekil 4, kademeli olarak artan gerilme genliğinde yükleme ve ardından boşaltma ile değişen çimento hamurunun kapasitans değerlerini göstermektedir. Ancak, bu kurulum için önerilen test yönteminin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini test etmek için tekrar tekrar üç farklı gerilme seviyesi (12 kPa, 24 kPa ve 36 kPa) uygulanmıştır. Her üç gerilme rejimi için kapasitans değerlerindeki değişiklik tamamen tersine çevrilebilir durumdadır.



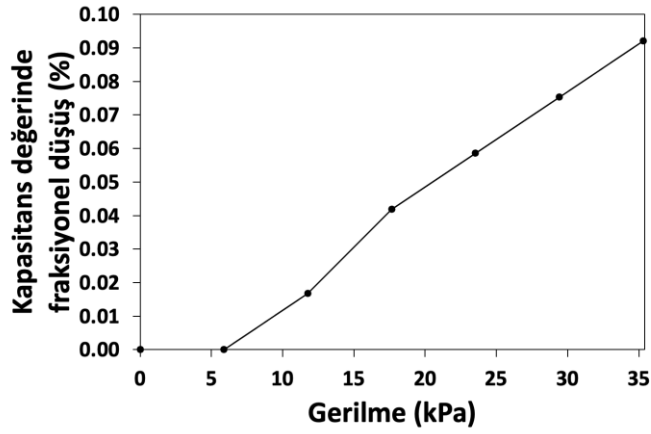
(a)



(b)

Şekil 2. a) Yükleme ve sonraki boşaltma döngüleri. b) Aşamalı artan gerilme genliğinde yükleme ve ardından boşaltma ile kapasitans değişimi

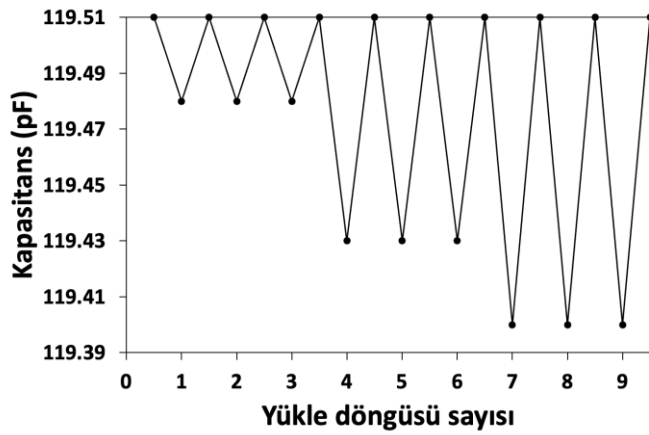
Figure 2. a) Loading and subsequent unloading cycles. b) Capacitance change with loading and subsequent unloading at progressively increasing stress amplitude



Şekil 3. Gerilmeye karşı kapasitansta fraksiyonel düşüş
Figure 3. Stress versus Fractional decrease in capacitance



(a)



(b)

Şekil 4. a) Tekrarlanan yükleme döngüleri. b) Aşamalı artan gerilme genliğinde tekrarlanan yükleme ve ardından boşaltma ile kapasitans değişimi

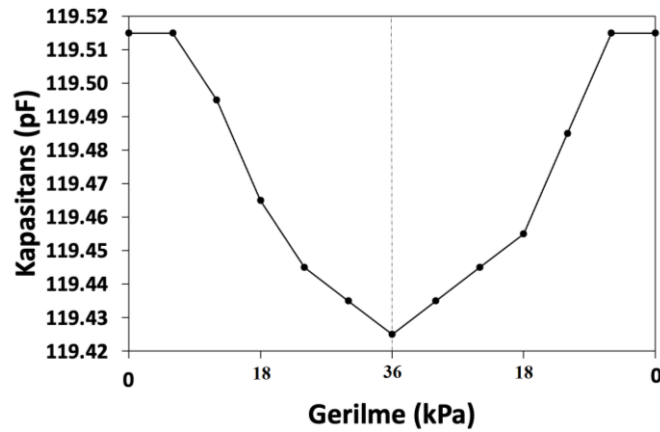
Figure 4. a) Repeated loading cycles. b) Capacitance change with repeated loading and subsequent unloading at progressively increasing stress amplitude

Şekil 5, her bir gerilme seviyesinde boşaltma olmaksızın, kademeli olarak artan gerilmede yükleme ve ardından kademeli olarak azalan gerilmede boşaltma ile değişen çimento hamurunun kapasitans değerlerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi numune üzerindeki gerilme arttıkça kapasitans değeri

düşmektedir. Kapasitans değerindeki değişikliğin tamamen tersine çevrilebilir olduğu görülmektedir. Algılama, 12 kPa altında etkisizdir.

Numuneye uygulanan yük numunenin yüzeyine normaldir ayrıca yük uygulama yönü de kapasitans ölçüm yönüne dik konumdadır. Poisson etkisinden dolayı yük yönünde basınç gerilmesi, kapasitans ölçüm yönünde ise çekme gerilmesi oluşur. Kapasitans ölçüm yönündeki çekme gerilme nedeniyle elektrotlar arasındaki mesafe artar ve kapasitans değeri azalır (Chung ve Wang, 2018).

Kapasitans değişikliklerinin çimento hamuru ile olan şekil değişikliklerini temsil ettiği varsayılır, böylece kapasitif kendi kendine algılama sağlanır (Ozturk ve Chung, 2021). Kapasitanstaki fraksiyonel azalma, çimento hamurundaki elastik deformasyona eşit olduğu söylenebilir. Elastik deformasyon birim şekil değişikliğidir. En yüksek gerilmeye kapasitansta fraksiyonel değişim 9.2×10^{-4} olarak ölçülmüştür. Bu değişim makul olan 33 MPa'lık bir elastik modüle karşılık gelir (Chung ve Wang, 2018).



Şekil 5. Kademeli olarak artan gerilme ve ardından kademeli olarak azalan gerilme ile değişen çimento hamurunun kapasitansı

Figure 5. Capacitance of cement paste changed by progressively increasing and decreasing stress

Mevcut çalışmadaki tüm deneyler, çimento hamuru üzerindeki gerilme değişiminin, kapasitans değeri açısından malzemenin elektriksel tepkisinde değişikliklere yol açtığını göstermiştir (Tian ve diğ., 2019). Bu davranış, çimento hamuruna uygulanan gerilmenin düzlemsel kapasitör alanında azalmaya ve dolayısıyla düzlem içi kapasitansta azalma olmasıyla açıklanabilir (Chung ve Wang, 2018). Kapasitans değerindeki değişikliklerin gözlemlenmesi malzeme üzerindeki gerilmenin tespit edilmesini sağlar. Gerilme tespiti aynı zamanda elastik bölgedeki birim şekil değişikliklerinin tespitini de mümkün kılar (Chung ve Xi, 2021).

SONUÇ (CONCLUSION)

Çimento esaslı malzemeler en çok kullanılan yapı malzemeleridir. Kendiliğinden algılama, hareketli yük algılama (ev ve sınır güvenliği, trafik izleme vb.) uygulamaları için değerlidir. Bu doğrultuda çimento hamurunun kapasitans bazlı kendini algılama özellikleri araştırılmıştır.

Bu çalışma, herhangi bir iletken dolgu maddesi içermeyen çimento hamurunun kapasitans tabanlı kendini algılama özelliklerini sunmaktadır. Düzlem içi kapasitans ile basınç gerilmesi arasında bir korelasyon gözlenmiştir. Bu ilişki ile kapasitif kendini algılama sağlanmıştır. Çimento hamurunun düzlem içi kapasitans değeri yük uygulaması ile azalmıştır. Çimento hamuru numunesi üzerindeki basınç gerilme ne kadar yüksek olursa kapasitans o kadar düşük olmuştur.

Kapasitif kendinden algılama, önerilen ölçüm düzeneği için 12 kPa'nın altında etkisizdir. Kapasitans düşüşü, 36 kPa basınç dayanımına kadar tamamen tersine çevrilebilir durumdadır. Çimento hamurunun başlangıç kapasitans değeri (yüksüz durumda) 119.51 pF iken, 36 kPa basınç altında 119.41 pF'ye düşmüştür. En yüksek gerilmeye kapasitansta fraksiyonel değişim 9.2×10^{-4} olarak ölçülmüştür.

ÇATIŞAN ÇIKARLARIN BEYANI (CONFLICT of INTEREST)

Yazar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanmasıyla ilgili olarak herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan etmemiştir.

SPONSOR (FUND)

Yazar bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması için herhangi bir mali destek almamıştır.

KAYNAKÇA (REFERENCE)

- Bekzhanova, Z., Memon, S. A., Kim, J. R., 2021, "Self-Sensing Cementitious Composites: Review and Perspective", *Nanomaterials*, Cilt 11, Sayı 9, ss. 2355, <https://doi.org/10.3390/NANO11092355>.
- Chung, D. D. L., 2021, "Self-sensing concrete: from resistance-based sensing to capacitance-based sensing", *International Journal of Smart and Nano Materials*, Cilt 12, Sayı 1, ss. 1–19, Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/19475411.2020.1843560>.
- Chung, D. D. L., Wang, Y., 2018, "Capacitance-based stress self-sensing in cement paste without requiring any admixture", *Cement and Concrete Composites*, Cilt 94, ss. 255–263, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.09.017>.
- Chung, D. D. L., Xi, X., 2021, "Piezopermittivity for capacitance-based strain/stress sensing", *Sensors and Actuators A: Physical*, Cilt 332, ss. 113028, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113028>.
- Han, J., Cai, J., Pan, J., Sun, Y., 2021, "Study on the conductivity of carbon fiber self-sensing high ductility cementitious composite", *Journal of Building Engineering*, Cilt 43, ss. 103125, <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103125>.
- Han, J., Pan, J., Cai, J., Li, X., 2020, "A review on carbon-based self-sensing cementitious composites", *Construction and Building Materials*, Cilt 265, ss. 120764, <https://doi.org/10.1016/j.CONBUILDMAT.2020.120764>.
- Jung, M., Lee, Y. soon, Hong, S. G., Moon, J., 2020, "Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high performance concrete (UHPC): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE)", *Cement and Concrete Research*, Cilt 131, ss. 106017, <https://doi.org/10.1016/j.CEMCONRES.2020.106017>.
- Monteiro, A. O., Cachim, P. B., Costa, P. M. F. J., 2017, "Self-sensing piezoresistive cement composite loaded with carbon black particles", *Cement and Concrete Composites*, Cilt 81, ss. 59–65, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.009>.
- Ozturk, M., Chung, D. D. L., 2021, "Capacitance-based stress self-sensing effectiveness of a model asphalt without functional component", *Construction and Building Materials*, Cilt 294, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123591>.
- Papanikolaou, I., Arena, N., Al-Tabbaa, A., 2019, "Graphene nanoplatelet reinforced concrete for self-sensing structures – A lifecycle assessment perspective", *Journal of Cleaner Production*, Cilt 240, ss. 118202, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118202>.
- Rovnaník, P., Kusák, I., Bayer, P., Schmid, P., Fiala, L., 2019, "Electrical and self-sensing properties of alkali-activated slag composite with graphite filler", *Materials*, Cilt 12, Sayı 10, ss. 1616, <https://doi.org/10.3390/ma12101616>.
- Ruan, Y., Zhou, D., Sun, S., Wu, X., Yu, X., Hou, J., Dong, X., Han, B., 2017, "Self-damping cementitious composites with multi-layer graphene", *Materials Research Express*, Cilt 4, Sayı 7, ss. 075605, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AA78E4>.
- Saleem, M., Elshami, M. M., Asce, M., Najjar, M., 2016, "Development, Testing, and Implementation Strategy of a Translucent Concrete-Based Smart Lane Separator for Increased Traffic Safety", *Journal of Construction Engineering and Management*, Cilt 143, Sayı 5, ss. 04016129, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001240).

- Shah, K. W., Huseien, G. F., 2020, "Biomimetic Self-Healing Cementitious Construction Materials for Smart Buildings", *Biomimetics* 2020, Cilt 5, Sayı 4, ss. 47, <https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS5040047>.
- Tian, Z., Li, Y., Zheng, J., Wang, S., 2019, "A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties", *Composites Part B: Engineering*, Cilt 177, ss. 107437, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107437>.
- Wang, H., Shi, F., Shen, J., Zhang, A., Zhang, L., Huang, H., Liu, J., Jin, K., Feng, L., Tang, Z., 2021, "Research on the self-sensing and mechanical properties of aligned stainless steel fiber-reinforced reactive powder concrete", *Cement and Concrete Composites*, Cilt 119, ss. 104001, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104001>.
- Xi, X., Chung, D. D. L., 2019, "Electret, piezoelectret, dielectricity and piezoresistivity discovered in exfoliated-graphite-based flexible graphite, with applications in mechanical sensing and electric powering", *Carbon*, Cilt 150, ss. 531–548, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.05.040>.
- Xi, X., Chung, D. D. L., 2020, "Deviceless cement-based structures as energy sources that enable structural self-powering", *Applied Energy*, Cilt 280, ss. 115916, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115916>.
- Yan, S., Ma, H., Li, P., Song, G., Wu, J., 2017, "Development and Application of a Structural Health Monitoring System Based on Wireless Smart Aggregates", *Sensors*, Cilt 17, Sayı 7, ss. 1641, <https://doi.org/10.3390/S17071641>.