

## Grafenin Betonda Kullanımı Hakkında İnceleme

### A Review on the Use of Graphen in Concrete

Muhammed YILMAZ

\*1 Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kırşehir

Doi: 10.51764 -smutgd.945447

Geliş Tarihi : 31.05.2021

Kabul Tarihi : 17.06.2021

#### ÖZET

Bu çalışmada geleceğin maddesi olan grafenin yapısı, özellikleri ve kullanım alanları ile ilgili bir genel araştırma yapılmıştır. Elektronik cihazları, optik ekipmanları, tıp ve sağlık, sporculuk ve güneş pilleri gibi geniş alanlarda kullanılan grafenin yüksek seviyelerde sentezlenmesi durumunda, çimento esaslı inşaat malzemelerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Grafen, karbon atomlarının altıgen dizilişi ile bal peteğine benzer yapısı olan iki boyutlu bir levhadır. Bu iki boyutlu malzemeyi değerli kılan belli başlı etkenler vardır. Bunlardan en önemlisi elmasın daha sert bir malzeme olan grafeni çizmek kolay değildir. Tek sıra molekülden oluştuğu için çok ince, esnek ve hafiftir. Grafenin yapısında her bir karbon atomu üç diğer karbon atomu ile bağ oluşturduğu zaman, karbonun serbest elektronlarından bir tanesi kullanılamıyor ve serbest kalıyor bu da grafenin iyi bir iletken malzeme olmasını sağlıyor. Betonun dayanıklılığını arttırmak ve kullanım miktarını azaltmak için çimentoya eklenen grafen bizlere daha güvenli ve dayanıklı yapılar sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Grafen, Çimento, Beton, Karbon

#### ABSTRACT

In this study, a general research has been made about the structure, properties and usage areas of graphene, which is the material of the future. Graphene, which is used in wide areas such as electronic devices, optical equipment, medicine and health, sports and solar cells, has been investigated for its usability in cement-based construction materials when synthesized at high levels. Graphene is a two-dimensional sheet with a hexagonal arrangement of carbon atoms and a honeycomb-like structure. There are certain factors that make this two-dimensional material valuable. Most importantly, graphene, which is a harder material than diamond, is not easy to draw. It is very thin, flexible and light because it consists of a single row of molecules. When each carbon atom forms bonds with three other carbon atoms in the structure of graphene, one of the carbon's free electrons cannot be used and becomes free, making graphene a good conductor material. Graphene added to cement to increase the durability of concrete and reduce the amount of use offers us safer and more durable structures.

**Keywords:** Graphene, Cement, Concrete, Carbon

## GİRİŞ

Beton özelliklerini iyileştirmek için yeni nesil katkı malzemelerinin kullanımı inşaat mühendisliğinin güncel konuları arasındadır (Doğan vd. 2016). Andre Geim ve Konstantin Novoselov grafen üzerine yaptıkları çalışmalardan dolayı 2010 yılında Nobel fizik ödülüne layık görülmüştür. Bunun üzerine “mucize materyal” olarak da bilinen grafen dikkatleri üzerine çekmiştir (Bedeloğlu & Taş, 2016).

Grafen ise; keşfedildiğinden beri fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle oldukça dikkat çekmiştir. Grafitin tek bir katmanından oluşur ve çelikten yaklaşık 30 kat daha güçlüdür. Kalınlığının yalnızca 0,42 nm olduğu düşünüldüğünde bu oldukça şaşırtıcı gelmektedir (Erikli & Hasanoğlu, 2018). Altıgen yapı içerisinde düzenli karbon atomlarının hibritleşmesiyle oluşan grafen; tek katmanlı, tek atom kalınlığında nano ölçekli bir parçacıktır ve yapıdaki tüm karbon allotroplarının temel yapı taşıdır. (Keskin, 2019).

Grafen, elmaştan daha sert ancak esnek, dayanıklı ve hafif çok işlevli bir karbon bileşiğidir. Şeffaflığı, durağanlığı, yoğunluğu, yüksek elektriksel iletkenliği ve ısı iletkenliği nedeniyle de önemli bir molekül olarak kabul edilir (Uygunoğlu & Şimşek, 2019). Yani kısaca grafen, karbon atomlarının altıgen dizilişi ile bal peteğine benzer yapısı olan iki boyutlu bir levhadır (Denghanpour & Yılmaz, 2018). Grafitin potasyum permanganat, sülfirik asit ve sodyum nitrat gibi oksidanlar ile oksidasyonu ve arındırılmış su içerisinde parçalanması ile elde edilir. Grafen benzersiz bir moleküler yapıya sahiptir. İki boyutlu yapısı bir atom kalınlığındadır, moleküller arasında güçlü bir bağ yapısı vardır ve elektrokimyasal, mekanik, termal ve optik özelliklere sahiptir. (Topçu, 2019).

İndirgenmiş grafen oksit daha sonra grafen oksidin kimyasallarla (hidrazin veya sodyum bor hidrür gibi) termal olarak indirgenmesi veya yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmasıyla elde edilir. Novoselov ve arkadaşları, grafeni tek bir katmanda başarıyla sentezlediler, elektronik ve fiziksel özelliklerinin beklentilerden çok farklı olduğunu kanıtladılar (Uygunoğlu & Şimşek, 2019).

Mekanik özelliklerine ve moleküler yapısına baktığımızda grafen, içeriğinde nano tabakalar bulundurduğundan dolayı çimento esaslı kompozitlerde katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Betonda nano ölçekli katkı maddeleri olarak grafen bazlı malzemelerin kullanımını üzerine incelemeler devam etmektedir (Uygunoğlu & Şimşek, 2019).

### Grafenin Yapısı

Grafen, karbon atomlarının altıgen dizilişi ile bal peteğine benzer yapısı olan iki boyutlu bir levhadır (Geim, 2009). Grafendeki karbon atomları SP<sup>2</sup> hibridi ile birbirine bağlanmaktadır (Geim & Novoselov, 2007). Bu iki boyutlu levha, karbon ailesinden olan çok boyutlu grafitin en yeni üyesidir. Bu aile sıfır boyutlu nano malzemesi olan fulleren, tek boyutlu nano malzemesi olan carbon nanotüp ve üç boyutlu malzeme olan grafit'i içermektedir (Pumera vd. 2010). Bir grafen levhasında her bir karbon atomu üç diğer karbon atomu ile bağ oluşturur. Her üç bağ aynı düzlemde eşit açılarda (120) oluşmaktadır. Bu durumda, karbon atomları ideal olarak altıgen şeklinde dizilişleri ile ağ oluştururlar. Grafendeki karbon-karbon bağ türü kovalenttir bu yüzden grafen çok mukavemetli bir malzemedir, ayrıca bağ uzunluğu yaklaşık olarak 0.142nm'dir. Grafen levhalarından oluşan grafitin yumuşak olması nedeni grafen levhalarının van der waals bağı ile bağlanmasıdır (Heyrovska, 2008).

### Grafenin özellikleri

Grafen üzerindeki deneysel araştırmaların çoğu, grafenin iyi bir iletken malzemesi olduğu için, elektriksel özelliklere odaklanmaktadır. Grafenin iletkenliği, yapısındaki karbon atomları arasındaki bağ ile ilişkilidir. Bu yapıda her bir karbon atomu üç diğer karbon atomu ile bağ oluşturduğu zaman, karbonun serbest elektronlarından bir tanesi kullanılmıyor ve bağ dışında serbest kalıyor. Grafeni en ünlü kılan diğer bir faktör mekanik özellikleridir. Grafenin elastik modülü 1.05 TPa ve çekme mukavemeti 110-130 GPa aralığında ölçülmüştür. Yanısıra normal bir yapısal çeliğin çekme dayanımının 200 katı kadar da ifade edilebilir. Grafenin yüksek mukavemetli olması nedeni yine de atomlar arası en güçlü bağ türlerinden olan kovalent bağıdır. Kalınlığı tek karbon atom çapına eşit olan iki boyutlu grafen levhası, ince kalınlığından dolayı (0.335 nm) ışığı kolayca iletir ve şeffaflık derecesi yüksektir. Dolayısıyla güneş pilleri için şeffaf elektrot üretiminde kullanılması idealdir (Denghanpour & Yılmaz, 2018).

## Grafen Özelliklerinin İnceleme Teknikleri

Grafen ve türevlerinin özelliklerini belirlemek için çeşitli teknikler kullanılabilir. Genel olarak, çözünürlüğü yüksek tünelleme elektron mikroskobu (HRTEM), elektron difraksiyonu (ED), taramalı elektron mikroskobu (SEM), tünelleme elektron mikroskobu (TEM), taramalı tünelleme mikroskobu (STM), X-ışını difraksiyonu (XRD), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), Raman spektroskopisi ve Fourier dönüşüm enfraruj (FT-IR), gibi karakterizasyon yöntemleri kullanılır (Denghanpour & Yılmaz, 2018).

## Grafenin Üretim Metodları

Grafen birden fazla farklı yöntemlerle sentezlenebilir. Bunların önde gelenleri grafen oksitin indirgenmesi, kimyasal buhar biriktirme yöntemi, epitaksiyel büyütme, mikromekaniksel olarak grafitin tabakalarının ayrılması (Eksfoliasyon) olarak sıralanabilir (Denghanpour & Yılmaz, 2018).

Grafen oksitin indirgenmesi: Grafit tabakalarının oksitlenmesi ile birbirinden ayrılarak elde edilen tek katlı haline grafen oksit denir. Grafenin büyük hacimlerde üretilebilmesi için önerilen yöntemlerden biri grafitten, çeşitli yöntemler ile elde edilen grafen oksitin farklı metotlar kullanarak indirgenmesidir. Bu yöntemin diğer yöntemlere kıyasla iki temel avantajı, üretilen grafitin hidrofilik olması nedeniyle çözeltilerde dengeli olarak çözülebilmesi ve düşük fiyatlı grafit hammaddesi harcanarak daha bol grafen elde etmektir (Bedeloğlu & Taş, 2016).

Kimyasal buhar biriktirme metodu (CVD): Grafen istihsalı için diğer yöntemlere kıyasla, kaliteli, uygun, verimli ve yinelenebilir bir sentezleme metodu olarak kabul edilebilir. Fakat üretim için ihtiyaç duyulan alet ve cihazlar kullanılan diğer yöntemlere kıyasla daha maliyetlidir. Yöntem temel olarak karbon atomlarının gaz fazında geçiş metalleri üzerinde biriktirilmesi ve daha sonra bir ayırıcı madde ile yüzeyden uzaklaştırılmasına dayanmaktadır. (Bedeloğlu & Taş, 2016).

Epitaksiyel büyütme: Epitaksiyel büyüme, SiC (Grafenin Silisyum Karbür) üzerinde büyütülmesine denir. Bu metotta büyütme olanaklarına uygun bir biçimde SiC alttaşı 1150-2000 derece arasında ısıtılır. Bu işlem neticesiyle silisyum desorpsiyonuna rastlanır ve kalan karbonlar epitaksiyel olarak bir araya gelmesiyle grafen oluşur. Karbon kaynağı SiC alttaşı olmasından dolayı oluşan yeni tabakalar, ilk tabakanın altında oluşur ve yüksek tabakalı grafenler üretilir. Elde edilen grafenin tabaka sayısı SiC alttaşı genişliğine bağlıdır (Bedeloğlu & Taş, 2016).

Eksfoliasyon yöntemi: Grafit, grafen katmanlarının van der Waals bağlarıyla karşılıklı olarak bir arada bulunduğu ve bağlanmış olma durumudur. Dolayısıyla saflığı yüksek grafit harcanarak arasındaki zayıf bağların, kimyasal veya mekanik kimyasal enerjiler kullanarak, kırılmasıyla grafen üretilebilir (Choi vd. 2010).

Grafen üretim yöntemleri sadece bu dört yöntem ile sınırlı değil, Karbon nanotüplerin aksel açılması ve güncel bir yöntem olarak Arc-discharge Metodu gibi diğer yöntemler ile de grafen üretilebilir. Bu araştırmada ön planda görülen yöntemler ile ilgili genel açıklamalar özetlenmiştir.

## Grafenin Kullanım Alanları

Tek katlı, çift katlı ve çok katlı grafen türleri farklı alanlarda uygulama potansiyeline sahiptirler. Bu malzeme ışığı iyi ilettiği için ayrıca elektriksel ve termal iletkenliğinden dolayı bilgisayar ve dijital cihazlardaki optik levhaların üretilmesinde kullanılmaktadır. Grafenin kullanım alanı sadece elektronik endüstrisinde sınırlanmamıştır. Grafen çok hafif, esnek ve mukavemetli bir malzeme olduğundan dolayı aşağıdaki belirtilen bazı alanlarda kullanılması uygun görülmektedir:

- Kompozitlerdeki karbon fiber yerine kullanarak daha hafif uçak ve uyduların üretilmesi,
- Mukavemetli ve hafif polimerlerin üretimi,
- Grafen kullanarak pillerin dayanıklılığını artırma imkanı,
- Güneş pilleri ve ekranlar için iletken şeffaf kaplama olarak uygulamaları,
- Daha verimli rüzgar türbinlerinin elde edilmesi,
- Daha sağlam implantlar üretmek (sağlık),
- Spor ekipmanlarının üretilmesinde kullanılması,
- Süper kapasitlerin üretilmesi,

- Esnek dokunmatik ekranların ve ekranların geliştirilmesi için kullanılması,
- Elektriksel iletken plastiklerin üretimi,

Günümüzde, grafenin üretimi mevcut teknoloji ile sınırlı olduğu için, bu değerli malzeme yalnızca elektronik, fizik, kimya, sağlık, enerji ve sporculuk gibi alanlarda kullanılabilir denilmesi doğru değildir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, mukavemeti çelikten yaklaşık 200 kat daha yüksek olan grafenin büyük hacimlerde üretilmesi ve inşaat sektöründe özellikle betonda katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi hiç şaşırtıcı değildir (Denghanpour & Yılmaz, 2018).

### **Grafen-Çimento Kompozitlerin FE Modellenmesi**

Bilgisayar ve program bilimlerinin gelişmesi ile birlikte, ANSYS ve ABAQUS programları gibi ticari programlarla materyallerin sonlu elemanlar (FE) yöntemi olarak modellenmesi mümkün olmuştur (Weber vd. 2016). FE modelleme yöntemi, diğer teorik ve deneysel yöntemlerle karşılaştırıldığında, zaman ve maliyet açısından uygun bir yöntem sayılabilir. Malzemelerin 2D ve 3D olarak modellenmesi bu yöntemle mümkündür, ancak bazı durumlarda çok karmaşık sistemlerin 3D modellenmesi ve sonuçları elde edilmesi çok zor ve zaman alıcıdır. Dolayısıyla, bu tip problemlerle karşılaşmamak ve kolaylık sağlanabilmesi için 2D modelleme tercih edilebilir (Yazdi & Alimohammadi, 2012).

### **GRAFEN VE BETON İLİŞKİSİ**

Grafenin çalışma prensibi, iki boyutlu ince bir karbon yapısı oluşturmak için tek bir bağlı karbon atomu katmanıdır. Moleküler yapısı ve mekanik özellikleri nedeniyle, grafen, çimento esaslı malzemelerde nano-takviye malzemeleri olarak kullanılması amaçlanan nanolevhalar şeklinde bulunur. Grafen miktarı arttıkça kompozit malzemenin iletkenliği 10-8S/m'den 10-2S/m'ye yükselir. %10 grafen kullanılarak, ortam sıcaklığındaki termal performansı ve difüzyon katsayısı %75 artar. (Sedaghat vd. 2014).

Çimento yerine %0, %2, %4 ve %6 grafen oksit kullanılarak üretilen betonun eğilme ve basınç dayanımını incelendiğinde, eğilme mukavemetindeki grafen oksit içeriği %4 olduğunda maksimum eğilme mukavemetinin elde edildiği ve grafen oksit miktarı arttıkça mukavemetin azalmaya başladığı gözlemlenir. Basınç dayanımı açısından ise %2 kullanım oranında %54'lük bir artış gözlemlenmekte ve daha fazla grafen oksit kullanıldıkça dayanım azalma eğilimi göstermektedir (Antonio vd. 2016). Çalışmada, lifleri betona sabitleyerek, yüksek mukavemetli kendiliğinden yerleşen çimento bağlayıcı ile grafen oksit ekleyerek ve lifli betonu yüksek sıcaklıklara maruz bırakarak ve sıcaklık altındaki davranışını kontrol ederek lifli beton oluşturulur. Uygulanan test sonuçları, çimento ve grafen oksit katkılarından yapılan fiber betonun sıcaklıktan daha az etkilendiğini ve yapışma mukavemetini büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir (Mohammed vd. 2016). Beton içerisine değişik oranlarda grafen nanoplateletinin ilave etmişlerdir ve betonun klor ve su geçirgenliği incelenmesinin sonucunda %1.5 grafen nanoplateletinin %80 oranından daha az klor ve su geçişine direndiği saptanmıştır (Du vd. 2016). Bilyalı öğütme ve grafen oksit nanoplateletler kullanılması sonucunda oluşan grafen oksitle karışık çimento nanokompozitlerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan 7, 14, 28 ve 90 günlük deneyler sonucunda çimento nanokompozitlerinin doğru akım (DC) elektrik dirençlerini ölçerek ve basınç dayanımı incelenerek grafenin tesiri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda basınç dayanımının arttığı, elektrik direncinin azaldığını saptanmıştır (Sharma & Kothiyal 2016). Grafenin çimento tutarına %0.05 oranında ilave edilmesi ile basınç mukavemetinin %33- %15, çekme mukavemetinin ise %49-%41 oranında yükseldiği saptanmıştır (Pan vd. 2015). Yapılan çeşitli tahliller sonucunda çimentonun hidrasyon ürünü Ca(OH)<sub>2</sub> ile beraber grafen oksitteki COOH'nin reaksiyona girdiği gözlemlenmiştir. (Wang vd. 2016). Grafen oksidin tesirinin daha iyi anlaşılması amacıyla alkali ile aktif olan cürufu çimento kullanılmıştır. Ağırlıkça %0.01 grafen oksit ilavesi ile 7 günlük mukavemetlerde %20 artış sağlamışlardır (Zhu vd. 2017). Grafen oksit ilavesiyle çimento kompozitlerinin geçirimsizlik özellikleri incelenmiştir. Geçirgenliği ölçmek için civa tutma porozimetre, klorür penetrasyonu ve su emme gibi deneyler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda az miktarda grafen oksit ilave edilse bile klor iyonlarının penetrasyonu önlediği geçirimsizliklerin iyileştirildiğini ve mukavemetin arttığı görülebilir (Mohammed vd. 2015).

## SONUÇ

Bu araştırmada grafenin yapısı, özellikleri ve üretim yöntemleri ile ilgili genel bir bilgi verilmiştir. Yirminci yüzyıl, plastiğin büyük keşfi ve gelişmesi nedeniyle plastik çağı olarak adlandırıldığı gibi yirmi birinci yüzyılında, son yıllardaki grafen ile ilgili yapılan yoğun araştırmalara göre grafen çağı olarak adlandırılacağı düşünülmektedir. Hafif ve mukavemetli oluşu, elektriksel ve termal iletkenliği ile ışık geçirgenliğinin iyi olması sonucu bu üstün nitelikli malzemenin günümüzde bilgisayar, dijital cihazları, tıp ve sağlık, sporculuk ve güneş pilleri gibi önemli alanlarda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Yalnız, bugünkü teknoloji ile grafenin sınırlı miktarda üretilmesi ve maliyetinin yüksek olması nedeniyle bu malzemenin daha büyük alanlarda kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, mukavemeti çelikten yaklaşık 200 kat daha yüksek olan grafenin büyük hacimlerde üretilmesi ve inşaat sektöründe, özellikle beton katkı malzemesi olarak kullanılmasını mümkün kılacaktır. 2010 Nobel Ödülü'nden bu yana, grafen bugün birçok ticari ürüne dahil edildi ve bu konudaki araştırmalara ağırlık verildi. Kür sürelerinin artmasıyla basınç ve eğilme dayanımları artış gösterir. Grafen katkısının bazı numuneleri olumsuz etkileme sebeplerinden biri; katkıda belirli bir oran üzerine çıkıldığı zaman olumlu özelliklerin ortadan kalkarak harç matrisi içerisinde dayanım düşürücü özellikte etki edebilir. Harçta çimento yerine grafen oksidin kullanıldığı uygulamalar alanında karıştırma sırasında agregasyon gözlenir. Harcın karıştırıldıktan sonra suyla karıştırılması bu sorunu ortadan kaldırmak ve gerekli homojenlik derecesini elde etmek için daha verimli olacaktır. Çimentoya az miktarda grafen eklemek, az miktarda beton ile daha dayanıklı bir yapı oluşturmaya yardımcı olur ve birçok işlem sonucunda betona karbondioksit olarak çok miktarda karbon karışarak atmosfere karışır. Daha önce, grafen içeren çimento üretiminin önündeki en büyük engel, grafen üretiminin maliyetiydi. Ancak yeni yöntem, grafenin düşük maliyetle ve çok hızlı üretilmesini sağlıyor.

## KAYNAKÇA

- Doğan, M., Bideci, A., Çomak, B., Sallı, Ö., Besli, E., (2016). Stiren-Bütadien Kopolimer Katkısının Çimento Harçlarına Etkisi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi (4), 1.67-76.
- Erikli, E., Hasanoğlu, A., (2018).Grafen Oksit/Aramid Ve Grafen/Aramid Kompozitlerinin Geliştirilmesi, Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt: 35-6, 2018.
- Topçu, H. M., (2019). Grafen oksit içeren aerojellerin hazırlanması ve karakterizasyonu, Master of Thesis, Marmara Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dal.
- Keskin, T., (2019).Grafen Katkılı Harçların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Sciennovation, 1(1), 20-25.
- Uygunoğlu, T., Şimşek, B., (2019). Grafen Oksit Katkılı Harçların Mekanik, Fiziksel ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması, Journal of Engineering Sciences and Design, 7(1), 196 – 204.
- Denghanpour, H., & Yılmaz, K., (2018).Grafen Özelliklerinin Araştırılması ve Çimento Esaslı Malzemelerde Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilmesinin İncelenmesi.
- Bedeloğlu, A., & Mahmut, T. A. Ş. (2016). Grafen ve grafen üretim yöntemleri. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(3), 544-554.
- Choi, W., Lahiri, I., Seelaboyina, R., & Kang, Y. S. (2010). Synthesis of Graphene and Its Applications: A Review. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 35(1), 52-71. doi: 10.1080/10408430903505036.
- Geim, A. K., "Graphene: Status and Prospects", Science, Vol.324, pp.1530–1534 (2009)
- Geim, a K., Novoselov, K. S., "The Rise of Graphene", Nature Materials, Vol.6, pp.183–191 (2007).
- Weber, J., E. Kjølsrud, and K.U. Schober, Kraftflussoptimierte Verbindungen im Ingenieurbau. Bautechnik, 2016. 93(11): p.834-838.
- Yazdi, S. and S. Alimohammadi, Analysis of a Plane-Stress Problems using Matrix Free Galerkin Explicit Finite Volume Method for Unstructured Triangular Mesh. 2012. Gao, Y. and P. Hao, Mechanical properties of monolayer graphene under tensile and compressive.
- Pumera, M., Ambrosi, A., Bonanni, A., Chng, E. L. K., Poh, H. L., "Graphene for Electrochemical. Sensing and Biosensing", TrAC, Trends in Analytical Chemistry, Vol.29, pp.954–965 (2010).
- Heyrovská, R., "Atomic Structures of Graphene, Benzene and Methane with Bond Lengths as Sums of the Single, Double and Resonance Bond Radii of Carbon", (2008).
- Sedaghat, A., Ram, M. K., Zayed, A., Kamal, R., & Shanahan, N. (2014). Investigation of physical properties of graphene-cement composite for structural applications. Open journal of composite materials, 2014.
- Antonio, V. R. J., German, C. S., & Raymundo, M. M. E. (2016). Optimizing content graphene oxide in high strength concrete. International Journal of scientific research and management, 4(6).

- Du, Y., & Guo, S. (2016). Chemically doped fluorescent carbon and graphene quantum dots for bioimaging, sensor, catalytic and photoelectronic applications. *Nanoscale*, 8(5), 2532-2543.
- Sharma, S., & Kothiyal, N. C. (2016). Comparative effects of pristine and ball-milled graphene oxide on physico-chemical characteristics of cement mortar nanocomposites. *Construction and Building Materials*, 115, 256-268.
- Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A. H., Li, G., Zhu, J. W., ... & Wang, M. C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. *Cement and Concrete Composites*, 58, 140-147.
- Wang, B., Jiang, R., & Wu, Z. (2016). Investigation of the mechanical properties and microstructure of graphene nanoplatelet-cement composite. *Nanomaterials*, 6(11), 200.
- Zhu, X. H., Kang, X. J., Yang, K., & Yang, C. H. (2017). Effect of graphene oxide on the mechanical properties and the formation of layered double hydroxides (LDHs) in alkali-activated slag cement. *Construction and Building Materials*, 132, 290-295.
- Mohammed, A., Sanjayan, J. G., Duan, W. H., & Nazari, A. (2016). Graphene oxide impact on hardened cement expressed in enhanced freeze–thaw resistance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9), 04016072.