

# NANOTEKNOLOJİNİN BETONUN GELECEĞİNDEKİ ROLÜ

## THE ROLE OF NANOTECHNOLOGY IN THE FUTURE OF CONCRETE

**A. Aslı Özbora**

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi,  
İstanbul

**Muhittin Tarhan, Yasin Engin**

Akçansa Çimento San. ve Tic. A.Ş.,  
İstanbul

### Özet

Bağlayıcı malzemelerin kullanımı tarihsel olarak çok eski zamanlara kadar uzansa da günümüzde üretilen çimento ve hazır beton özellikleri, standartları ve deney yöntemleri ile yeni denebilecek yapı malzemeleridir. Araştırmacılar ve uygulayıcılar şimdiye kadar betonu ve beton bileşenlerini mikro, mezo ve makro ölçekte incelemiştir. Belki de bu nedenle bazı temel sorulara henüz net cevaplar bulunamamıştır. Günümüzde birçok alanda olduğu gibi nanoteknoloji hem beton hem de beton bileşenleri alanında uygulanmaya başlanmış ve belirli bir aşama kaydedilmiştir. Şimdiye dek devrim yaratacak bir gelişme olmasa da nanoteknolojinin betonun geleceğinde önemli bir yeri olacağı kesindir. İlk olarak beton kimyasallarında başlayan bu eğilim sayesinde beton uygulamalarında belirgin kolaylıklar elde edilmiştir. Nano-fiber ve nano-silika gibi malzemeler kullanılmaya başlanmış ve son yıllarda kendiliğinden sıkışan beton, ışık geçiren beton, kendini temizleyen beton, kendi kendini onaran beton gibi yeni ürünler meydana gelmiştir. Karbon nano-tüpler, sentetik C-S-H jelleri ve nano-kil gibi konular üzerinde araştırmalar devam etmektedir. Bu yazıda güncel gelişmeler ışığında nanoteknolojinin betonun geleceğindeki rolü ile ilgili genel bir bakış açısının oluşturulması amaçlanmıştır.

### Abstract

The historical use of cementitious materials reaches very ancient times but taking into consideration the properties, standards and testing methods of cement and ready mixed concrete produced nowadays, they can be qualified as new building materials. Researchers and practitioners have examined concrete and concrete constituents at micro, meso and macro scale. Perhaps for this reason no clear answers to some basic questions were found. Today, nanotechnology is implemented to both concrete and concrete constituents as in many areas and gets some specific steps. Up to now, there is no revolutionary development of nanotechnology but it is clear that it is bound to be an important role in the future of the concrete. Thanks to Nano technological researches that started first in chemical concrete

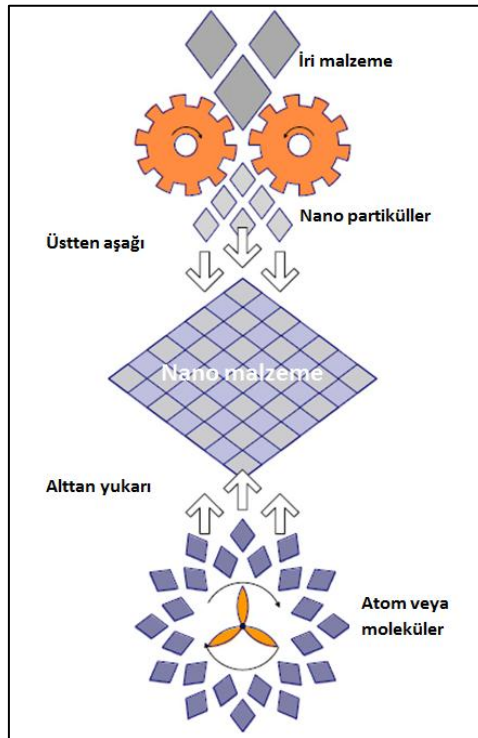
admixtures were obtained some conveniences. New products like self-compacting concrete, light transmitting concrete, self-cleaning concrete, self-healing concrete, etc. have been developed as a result of using nano-fiber and nano-silica in the concrete production. Researches on carbon nanotubes, synthetic C-S-H gels, nano-clay and these kinds of materials have been continued. The future of nanotechnology and its effects on concrete technology are overviewed in this paper.

## 1.GİRİŞ

Nanoteknoloji, nano ölçekteki maddelerin anlaşılmasını ve kontrol edilmesini inceleyen ve bu kapsamda ürün özelliklerinin gelişmesini amaçlayan bir bilim alanı olarak ifade edilebilir [1]. Son yıllarda tıp, tekstil, kimya, elektronik, biyomekanik, ilaç ve inşaat gibi birçok sektörde nanoteknoloji kavramı giderek yaygınlaşmaktadır [1-2].

Nano ölçeği daha iyi anlamak için verilecek en iyi örneklerden birisi insan saçının kalınlığının yaklaşık 80 bin nanometre olmasıdır. Bir diğer örnekte bir bilya ile dünya çapı arasındaki oranın bir nanometre ile bir metre ile aynı olmasıdır. Nano ölçekteki maddelere “nanomalzeme” veya “nanopartikül” denmektedir [1]. Maddeler nano ölçekte genel özelliklerinden farklı özellikler taşıyabilir. Bu duruma örnek olarak manyetik özellik, yalıtım özelliği, iletkenlik, kimyasal reaktiflik, optik özellik vb. verilebilir.

Nanoteknoloji, “üstten aşağı(top down)” ve “alttan yukarı(bottom up)” olarak ifade edilen iki yaklaşımı dikkate alır. Şekil 1’de görüldüğü gibi “üstten aşağı” yaklaşım büyük ebatlarındaki maddelerin nano ölçek seviyesine getirilmesidir. “Altan yukarı” yaklaşım ise atomik veya moleküler seviyeden nano ölçek seviyesine çıkılmasıdır. Bu yaklaşım “moleküler teknoloji” ya da “moleküler üretim” olarak da bilinmektedir [1].



Şekil 1- Nanoteknoloji yaklaşımları [1]

İnşaat sektöründe, diğer bilim ve mühendislik dallarında olduğu gibi nanoteknolojideki gelişmeler yakından takip edilmekte ve olası yeni uygulama alanları belirlenmeye çalışılmaktadır. Nanopartiküllerin yapı malzemelerinde kullanımı her geçen gün daha da ilgi çekmektedir. Nanopartiküllerin kullanımıyla malzemelerin sadece mukavemet, dürabilite gibi özellikleri iyileştirilmekle kalmamakta, aynı zamanda fotokatalitik [3], basınç algılama [4] gibi yeni fonksiyonlar kazanması mümkün olmaktadır [5].

Nanomalzemelerin ve nanoteknolojilerin gelişmesine katkı sağlamak amacıyla Avrupa Birliği kapsamında veya Amerika, Kanada, Japonya, Çin gibi ülkelerde çok sayıda ulusal projeler devreye sokulmuştur. Farklı uluslararası profesyonel örgütler tarafından çalışma komiteleri, komisyonları ve grupları kurulmuştur. Bu komitelerden birine örnek olarak RILEM tarafından kurulmuş TC 197-NCM verilebilir [6].

Son yıllarda yapı malzemesi alanında, özellikle de çimento esaslı malzemelerde nanoteknolojinin farklı uygulamalarıyla ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır [7].

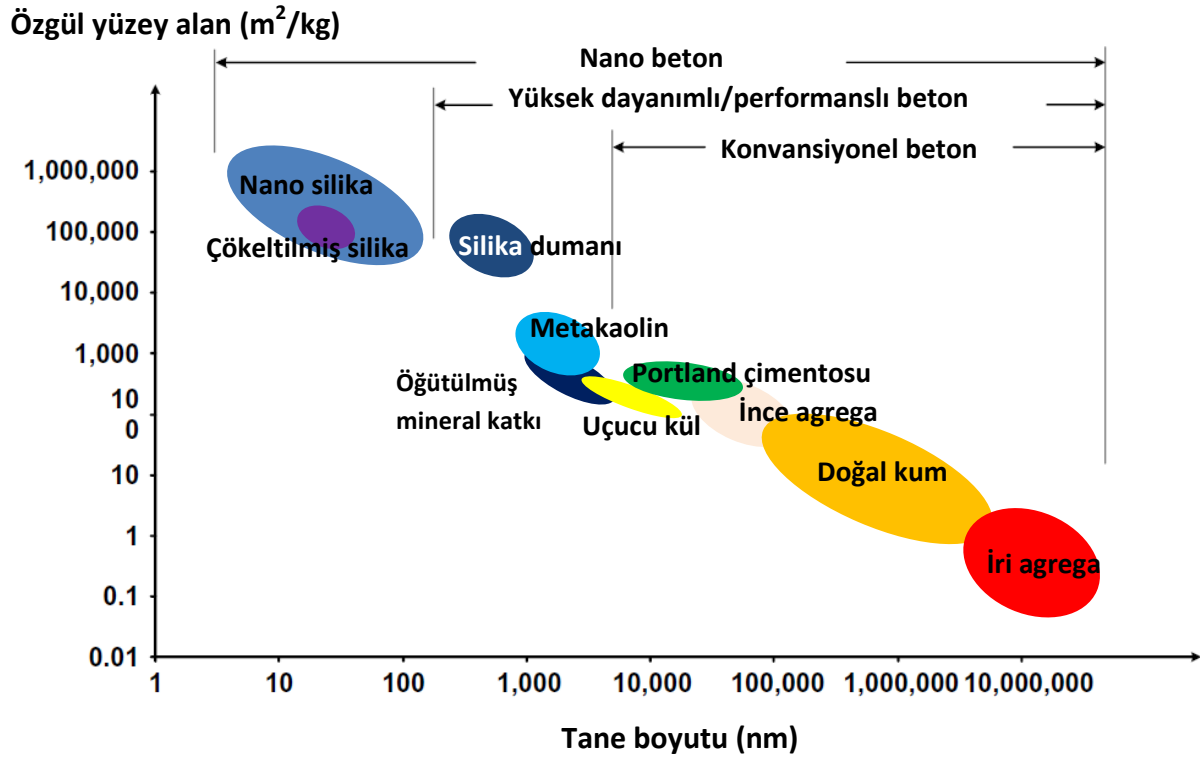
Nanoteknoloji, çok disiplinli beton biliminin betonun davranışını tüm detaylarıyla açıklamasını, özelliklerini tasarlamasını, yapı malzemelerinin üretim ve ekolojik maliyetlerini düşürmesini mümkün kılmaktadır.

Beton, nano boyutta tasarlanırken nanopartikül veya nanotüp gibi malzemeler ilave edilerek malzeme davranışı kontrol edilebilirken yeni özellikler kazanması da sağlanabilir. Nano boyutta yapılan değişiklikler kapsamında çimento tanelerine, çimento fazlarına, agregalara veya katkılara (nano boyuta sahip olanlar da dahil olmak üzere) molekül aşılması söz konusu olabilir.

Çimento esaslı malzemeler için büyük önem teşkil eden, aynı zamanda kendisi de bir nanomalzeme olarak nitelendirilebilecek C-S-H jelinin ve diğer hidratasyon ürünlerinin nano ve mikro ölçekteki fiziksel ve kimyasal özelliklerinin anlaşılabilmesiyle malzemelerin makro boyuttaki özellik ve performansları kontrol edilebilir hale gelebilir. Nano ölçekte yapılan araştırmalar da nano boyuttaki nükleer manyetik rezonans, nanoindentasyon, atomik kuvvet mikroskopu gibi ileri karakterizasyon tekniklerinin gelişmesi sayesinde olmaktadır.

## **2. BETON VE NANOTEKNOLOJİ**

Beton çok fazlı kompozit bir malzemedir. Amorf faz yapısında olan beton nano ve mikro ölçekte hidratasyon ürünleri içermektedir [1]. Şekil 2'de beton bileşenlerinin tane boyutları ve özgül yüzey alanları görülmektedir. Şekil 2'den konvansiyonel betonun nanopartikül içermediği sonucu çıksa da hidratasyon ürünü olan C-S-H jelleri, jel boşluklarındaki su ve kimyasal katkılar aslında nano ölçekteki maddeledir. Günümüzde beton ve çimentoda nanoteknoloji konusunda araştırma yapan bilim insanları daha çok hidratasyon reaksiyonuna ve nanopartiküllerin beton özellikleri üzerindeki etkilerine yoğunlaşmıştır [2].



Şekil 2- Beton bileşenlerinin tane boyutu ve özgül yüzey alanı[8]

## 2.1. Nanopartiküller

Çimento esaslı malzemelere ilave edilen nanopartiküllerle çimentonun erken yaş hidrasyon reaksiyonları sırasında gerçekleşen çekirdeklenme sürecini hızlandırmak mümkün olmaktadır.

Hidrasyonu hızlandırmak için tercih edilen yöntemlerden biri Nano-SiO<sub>2</sub>, Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nano-TiO<sub>2</sub> veya Nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi nanopartiküllerin kullanımınıdır. Boyutları nanometrelerle ifade edilebilen bu nanopartiküller çok geniş reaktif yüzey alanları oluştururken, ortamda çok sayıda çekirdeklenme noktasının mevcut olmasını sağlar ve çekirdeklenme reaksiyonları hızlı bir şekilde bu noktalarda başlayabilir. Nano-SiO<sub>2</sub> gibi partiküllerin puzolanik reaksiyonla C-S-H jeli oluşumuna katkıda bulunmasında olduğu gibi, bu nanopartiküllerin çimento hamurunun bileşenleriyle reaksiyona girme potansiyelleri yüksek olduğu için ilave çekirdek oluşumu da söz konusu olur.

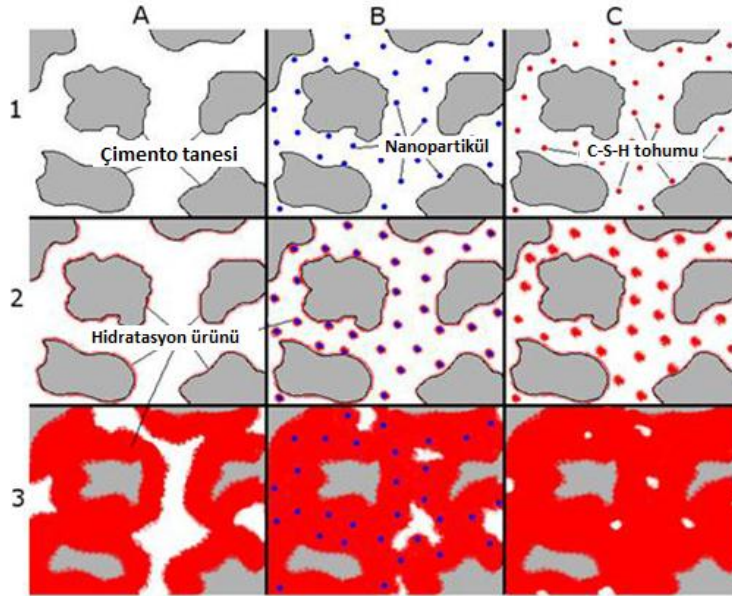
Yapılan bir çalışmada bağlayıcı oranı olarak %10 Nano-SiO<sub>2</sub> içeren betonlarda 28 günlük basınç dayanımında %26 artış olduğu ve bu artışın %15 silis dumanı kullanımında ise %10 mertebesinde olduğu tespit edilmiştir [1]. Bağlayıcı oranı olarak %5 Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'in kullanıldığı bir çalışmada elastisite modülünün 28 gün sonunda %143 arttığı ve basınç dayanımında kayda değer bir artış olmadığı tespit edilmiştir. Çimento harcına sentetik toz Nano-ZrO<sub>2</sub> ilavesi sonucu geçirimsizliğin azaldığı, basınç dayanımında ve harcın mikro yapısında iyileşme olduğu tespit edilmiştir [1]. Nano ölçekteki kil partiküllerinin betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği, klorür geçirimsizliğini ve rötresini azalttığı yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bulunmuştur [8].

Hidratasyon sürecinin hızlanması nanopartiküllerin reaktif yüzeylerinde gerçekleşen reaksiyonlarla ilgili olduğu için bu partiküllerin yüzey alanları veya boyutları çimento hidratasyon kinetiği açısından önem teşkil etmektedir [9].

Çimento hidratasyonunu hızlandırmak için sentetik C-S-H tohumu gibi nanopartiküllerden de faydalanılmaktadır. Bu yöntemle, normal şartlarda kristal gelişimi için gerekli ama zaman kaybına sebep olan çekirdeklenme reaksiyonlarına ihtiyaç kalmamakta, çimento hidratasyonunun ölü evresi kısalmaktadır [10-13].

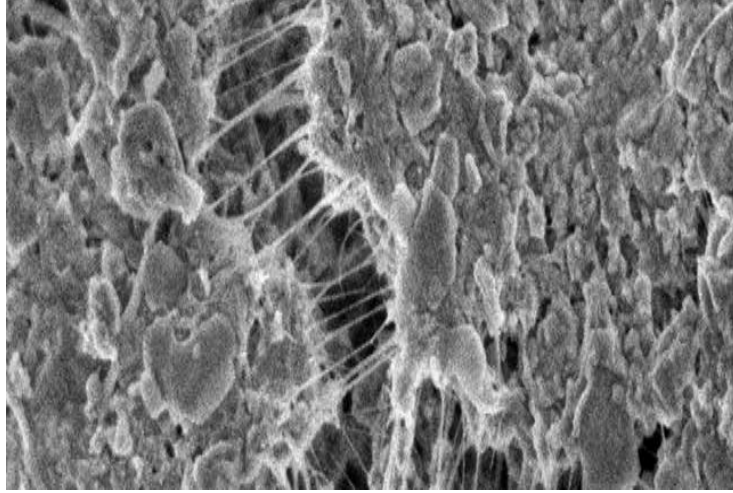
Nanopartikül ilavesiyle hidratasyon kinetiğinin iyileştirilmesine çalışılan her iki yöntemde de, hidratasyon ürünlerinin çekirdekleri sadece çimento tanelerinin üzerinde değil aynı zamanda bu nanopartiküllerin üzerinde, çimento taneleri arasında da Şekil 3'de belirtildiği gibi oluşmaktadır.

Sonrasında çimento hidratasyon ürünleri bu çekirdekler sayesinde kristal büyüme mekanizmasıyla oluşur. Nanopartiküllerin ilavesi sayesinde, hidratasyon ürünleri çimento tanelerinin arasında da oluşmaya başladığı için nanopartikül içermeyen bir referans karışıma göre çok daha boşluksuz bir içyapının oluşumu kısa sürede gerçekleşir. Bu şekilde, daha boşluksuz, erken yaşta yüksek basınç mukavemetine sahip çimento esaslı malzemelerin elde edilmesi mümkün olabilir [14-16].



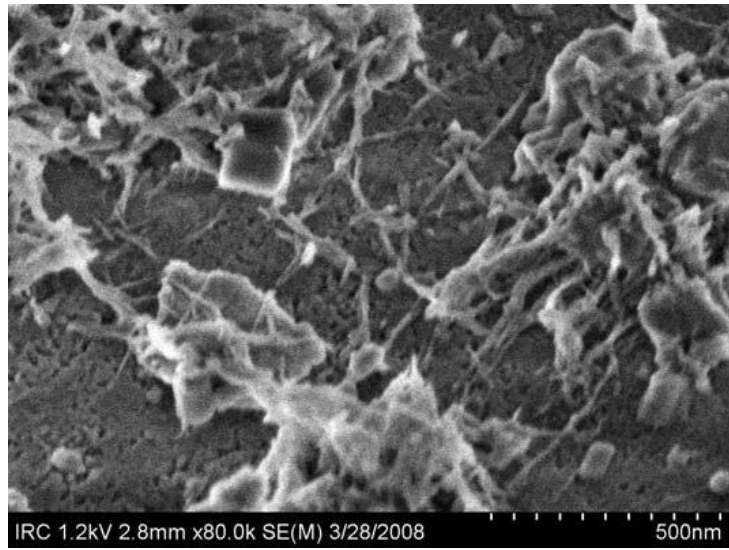
**Şekil 3-** Saf çimento hamurunun (A), nanosilika ihtiva eden çimento hamurunun (B) ve sentetik C-S-H ihtiva eden çimento hamurunun (C) şematik hidratasyon gelişimi [9]

Çok yüksek mukavemet ve elastisite modülü değerlerine, elastik davranışına, elektriksel ve termal özelliklerine ek olarak nanotüpler filler malzeme özeliği göstererek daha boşluksuz malzemeler elde edilmesine imkan verir. Çatlak oluşumunu ve yayılmasını engelleyici yönde fayda sağlarken (Şekil 4), çimento hamuru-agrega arayüzünün kalitesini artırır. Sonuçta, çok daha dayanıklı ve enerji yutma kapasitesi yüksek karbon nanotüplü kompozitler elde edilebilir.



**Şekil 4-** Tek duvarlı karbon nanotüp içeren hidrate olmuş Portland çimentolu kompozit malzemedeki çatlağın nanotüplerle engellenmesi [17]

Tek duvarlı karbon nanotüplerle yapılan bir çalışmada [18], karbon nanotüplerin C-S-H jeli için çekirdeklenme noktası oluşturduğu ve C-S-H'ların nanotüpler üzerinde de olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5). Neticede tek duvarlı karbon nanotüplere sağlam bir şekilde bağlanmış, yoğun C-S-H jeli elde edilmiştir. Benzer durum çoklu duvarlı (katmanlı) nanotüplerle de elde edilmiştir [19].



**Şekil 5-** C-S-H'ların tek duvarlı karbon nanotüp demetleri üzerindeki gelişimi (Portland çimentolu kompozit malzemenin hidrasyonunun 135. dakikası) [17]

### 3. SONUÇLAR

Nanoteknolojinin betona uygulanmasıyla ilgili araştırmalar devam etmekte olup büyük ölçekteki uygulamalar çok sınırlıdır. Ancak nanoteknolojinin çimento esaslı malzemelerin performansını ve dırabilite özelliklerini iyileştireceği řu ana kadar elde edilen sonuçlar çerçevesinde kesindir. Yapılan birçok araştırma sonucu nano-partiküllerin aşağıda belirtilen hususlarda önemli iyileşmelere neden olabileceği tespit edilmiştir [1,8]:

- Agreg-açimento hamuru arasında aderansın kuvvetlenmesi,
- Mikro çatlak oluşumunu azalması ve bu çatlakların kendiliğinden iyileşmesi,
- Beton geçirimsizliğinin azalması,
- Rötire oluşumunun azalması,
- Kil içeren agregaların olumsuz etkisinin azalması,
- Elastisite modülünün artması,
- Betonun sıcaklığa direncinin artması,
- Alkali-silika reaksiyonu, korozyon, donma-çözülme gibi dırabilite özelliklerinin iyileşmesi.

Beton biliminin, her geçen gün gelişmekte olan nanoteknolojiden zaman içinde elde edeceği yarar artacaktır. Betonun nano boyutta tasarlanması konusunda yeni gelişmeler devam etmektedir [20]. Bunlara örnek olarak;

- Nanopartikül veya nanotüplerle güçlendirilmiş yüksek performanslı bağlayıcılar, nanoçimento,
- Sıcaklık, nem veya gerilme algılayabilen akıllı beton,
- Deforme olabilen, büzülmeyen, düşük termal genleşmeli beton,
- Az miktarda Portland çimentosu içeren, nanopartikül ihtiva eden modifiye eko-bağlayıcılar,
- MgO, fosfat, jeopolimer, alçıtaşı gibi alternatif nanopartiküller ihtiva eden eko-bağlayıcılar,
- Fotokatalitik teknoloji bazlı kendi kendini temizleyebilme özeliđine sahip beton,
- Kendi kendini onarabilen beton gösterilebilir.

Türkiye'de aktif biçimde nanoteknolojiden yararlanan kuruluşların sayısı bir hayli azdır. Nanoteknoloji ile ilgili kuruluşlar, genellikle; enerji, otomotiv, savunma, havacılık, tekstil, kimya ve inşaat sanayi ile ilgili çalışmalara odaklanmakta ve bu alanlarda nanoteknolojiyi kullanmaya çalışmaktadır. Üniversitelerimizde de nano teknoloji araştırma merkezleri kurulmakta ve araştırma etkinlikleri devam etmektedir.

Nanoteknolojinin yapı malzemelerine özellikle de çimento esaslı malzemelere adaptasyonu ile beton biliminin daha da ileri gideceği aşıkardır. Bu çalışmaların devamında endüstriyel uygulamalara odaklanarak, temel araştırmaları daha da ilerletip sanayinin kullanabileceği düzeye gelmesini sağlamak en önemli hedeflerden biri olmalıdır.

## Kaynaklar

1. Birgisson, B., et al., *Nanotechnology in Concrete Materials*, Transportation Research Board, 2012
2. Balaguru, P., Chong, K., “Nanotechnology and Concrete: Research Opportunities”, *Proceedings of ACI Session on Nanotechnology of Concrete*, 2006, pp.15-28
3. Lackhoff, M., et al., Photocatalytic Activity of Semiconductor-Modified Cement-Influence of Semiconductor Type and cement Ageing. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2003, No.43(3), pp.205-216.
4. Hui L., Xiao H.G. and Ou J.P., “A Study on Mechanical and Pressure-Sensitive Properties of Cement Mortar with Nanophase Materials”, *Cement and Concrete Research*, 2004, No.34(3), pp.435-438.
5. Jayapalan A.R., Lee B.Y. and Kurtis K.E., “Can nanotechnology be ‘green’? Comparing efficacy of nano and microparticles in cementitious materials”, *Cement & Concrete Composites*, 2012, article in press.
6. Falikman V.R., Petushkov A.V., “Development of Russian Market of Nanotechnology Construction Products till 2020”, *NICOM 4: 4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Agios Nikolaos, Crete, Greece, May 20-22, 2012, proceedings CD-ROM.
7. Kawashima S., Pengkun H., David J. Corr D.J., and Surendra P. Shah S.P., “Modification of Cement-Based Materials with Nanoparticles”, *Cement & Concrete Composites*, 2012, article in press.
8. Sanchez, F., Sobolev, K., “Nanotechnology in Concrete-A Review”, *Construction and Building Materials*, 2010, No.24, pp.2060-2071
9. Land G., Stephan D., “The Influence of Nano-silica on the Hydration of Ordinary Portland Cement”, *J Mater Sci.*, 2012, No.47(2), pp.1011–1017.
10. Thomas J.J., Jennings H.M., Chen J.J., “Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement”, *J. Phys. Chem. C.*, 2009, No.113(11), pp.4327–4334.
11. Alizadeh R., Beaudoin J., Raki L., Rakar J., Moudrakovski I., “C-S-H Seeding: An Approach for the Nanostructural Tailoring of Cement-Based Materials”, *Conference Proceedings: 13th International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, Spain*; 2011.
12. Nicoleau L., “New Calcium Silicate Hydrate Network”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2142, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010, pp. 42–51.



13. Nicoleau L., “Accelerated Growth of Calcium Silicate Hydrates: Experiments and simulations”, *Cement and Concrete Research*, 2011, No.41, pp.1339–1348.
14. Porro A., Dolado J. S., Campillo I., Erkizia E., De Miguel Y., De Ibarra Y., Ayuela A., “Effects of Nanosilica Additions on Cement Pastes”, *Applications of Nanotechnology in Concrete Design*, 2005, pp.87-96.
15. Qing Y., Zenan Z., Deyu K., Rongshen C., “Influence of Nano-SiO<sub>2</sub> Addition on Properties of Hardened Cement Paste as Compared with Silica Fume”, *Construction and Building Materials*, 2007, No.21(3), pp.539–545.
16. Björnström J., Martinelli A., Matic A., Börjesson L., Panas I., “Accelerating Effects of Colloidal Nano-silica for Beneficial Calcium–silicate–hydrate Formation in Cement”, *Chemical Physics Letters*, 2004, No.392(1-3), pp.242–248.
17. Raki L., Beaudoin J., Alizadeh R., Makar J. and Sato T., “Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology”, *Materials 2010*, No.3, pp.918-942.
18. Makar, J.M.; Chan, G.W. Growth of cement hydration products on single walled carbon nanotubes. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009, No.92, 1303–1310.
19. Li, G.Y., Wang, P.M., Zhao, X., “Pressure-Sensitive Properties and Microstructure of Carbon Nanotube Reinforced Cement Composites”, *Cem. Concr. Comp.* 2007, No.29, pp.377–382.
20. Sobolev K. and Sanchez F., “The Application of Nanoparticles to Improve the Performance of Concrete”, *NICOM 4: 4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Agios Nikolaos, Crete, Greece, May 20-22, 2012, proceedings CD-ROM.