

Kimyasal ve Nano Katkılar: Betonda Kullanımı ve Beton Performansına Etkileri*

Bekir Yılmaz Pekmezci¹,

Hakan Nuri Atahan²

Özet

Betonun taze ve sertleşmiş durumdaki performansına önemli derecede yön veren kimyasal katkı maddeleri günümüz betonlarının vazgeçilmez bileşenlerindendir. Taze beton özelliklerinin iyileştirilmesi ve aynı zamanda sertleşmiş betondan servis ömrü boyunca karşılaması beklenen mekanik ve çevresel etkilere karşı performansa destek kimyasal katkı maddeleri ile sağlanabilmektedir. Pek çok farklı amaçla kullanılan kimyasal katkı maddelerinin betonun hem taze ve hem de sertleşmiş haldeki performansına nasıl etki ettiğinin anlaşılması, yakın geçmişteki teknolojik gelişmelerin sunduğu makro ve mikro inceleme teknikleri sayesinde daha mümkün olmuştur. Diğer taraftan bu gelişmeler, bilim insanlarına malzemeleri en küçük boyutlarda inceleme, irdeleme ve üretme imkanı da vermiştir. Dolayısıyla, nano-bilimdeki gelişmeler yapı malzemesi alanında önemli etkiler yaratmıştır. Bunlardan biri de nano malzemelerin beton teknolojisi üzerindeki etkileridir. Hazırlanan bu çalışmanın ilk bölümünde, günümüz beton uygulamalarında kullanılan kimyasal katkı maddeleri kullanım amaçları doğrultusunda sınıflandırılmış ve beton özellikleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır. İkinci bölümde ise, beton teknolojisinde kullanılan nano-katkıların beton performansı üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

1. KİMYASAL KATKILAR VE ÖNEMİ

İnşaat sektöründe Portland Çimentolu (PÇ) ürünler ve betonun en çok kullanılan malzemelerden biri olarak kabul görmesinde en önemli etkenlerden biri; beton teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile beton kalitesinin çok yüksek mertebelere ulaşmasıdır. Beton kalitesindeki bu yükseliş büyük oranda, betonu oluşturan temel malzemeler olan çimento, agrega, su ve mineral katkıların yanında katılan kimyasal katkı maddeleri ile sağlanmıştır. Katkı tanımı, “betonun veya harcın ana bileşenlerini oluşturan su, agrega, hidrolik çimento ve fiber takviye malzemeleri haricinde betonun üretim aşamasında veya öncesinde katılan malzemeler” [1] olarak yapılmaktadır. Kimyasal katkılar esas olarak betonun veya harcın taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini iyileştiren, suda çözünebilen maddelerdir. Farklı özelliklerdeki kimyasal katkıların beton özellikleri üzerinde sağladığı iyileştirmelere örnek olarak, basınç ve eğilme dayanımları üzerinde artış, geçirimsizlik özellikleri ve buna bağlı olarak dürabilite özellikleri üzerindeki iyileştirmeler, korozyon önleme, rötre azaltma, ayrışmadan yüksek kıvam artırma gibi işlenebilirlik özellikleri üzerindeki iyileştirmeler, priz süresinin ayarlanması, yüksek pompalabilirlik, amaca yönelik düzenlenebilir reolojik özellikler, çimento etkinliğinin artırılması ve alkali silika reaksiyon riskinin azaltılması gibi performans artırıcı etkiler sayılabilir [2].

Chemical and Nano Concrete Admixtures: Utilization in Concrete and Effects on Concrete Performance *

Chemical admixtures for concrete, which significantly influence the fresh and hardened concrete properties, are indispensable elements of contemporary concrete mixtures. The improvement in fresh properties and, at the same time, the support on mechanical and durability performance of hardened concrete which is expected during its service life, can be satisfied by the use of chemical concrete admixtures. Understanding the mechanisms how chemical admixtures, which are used for many different purposes, effect the fresh and hardened properties of concrete is now possible by using the micro and macro investigation techniques which the recent technological developments has offered us. On the other hand, these technological developments has also provided science people to investigate, analyze and generate materials at atomic scale.

* Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

⁽¹⁾ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, pekmezci@itu.edu.tr | ⁽²⁾ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, atahanh@itu.edu.tr

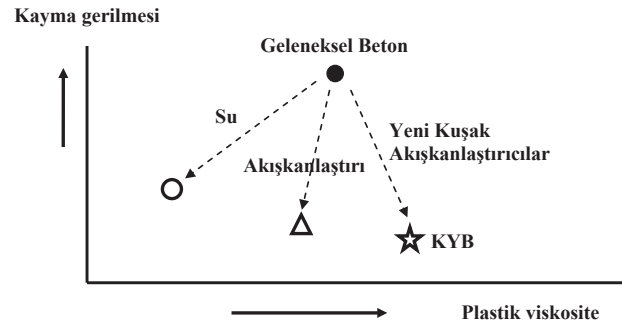
Kimyasal katkı maddeleri arzu edilen beton özelliklerinin elde edilebilmesi amacıyla tek başlarına veya birkaç katkı maddesi- nin birlikte kullanımı şeklinde betona veya harca katılabilirler. Kullanım dozajları ise yine arzu edilen performans kriterlerini sağlayabilecek ve aynı zamanda betonun taze ve sertleşmiş durumdaki niteliklerini bozmayacak şekilde seçilir. Nitelikli bir betonun sağlaması gereken 3 temel özellik vardır. Bunlardan birincisi işlenebilirlik, ikincisi istenen dayanım özelliklerini karşılayabilmesi ve üçüncüsü ise servis ömrü boyunca bütünlüğünü kaybetmeden dayanım özelliğini ve aynı zamanda içindeki çelik donatıyı koruyabilmesidir (kalıcılık). Katkı tipleri ve kullanım dozajları seçilirken bu üç temel özelliğin sağlanması amaçlanır. Bu noktada dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus da katkı maddeleri ile betonda kullanılan diğer malzemeler arasındaki uyumdur. Çimento ve mineral katkı maddelerinin kimyasal özellikleri, kullanılan agregaların fiziksel, kimyasal ve geometrik özellikleri katkıların etkinliğini belirleyen önemli parametrelerdir. Dolayısıyla katkı uyumu ve dozajının belirlenmesi amacı ile yapılacak laboratuvar deneylerinin önemi büyüktür.

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan kimyasal beton katkıları “akışkanlaştırıcı” katkılardır. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımının taze betonun işlenebilirliği üzerinde sağladığı etki, sertleşmiş beton performansını en üst düzeyde etkileyebilmektedir. Genel olarak bu katkılar sayesinde yüksek işlenebilirlik değerlerine sahip çok düşük su/çimento oranlı betonlar üretilemek mümkün hale gelmiş, taze beton içerisine katılan çimento ve mineral katkı maddeleri gibi yüksek incelikli malzemelerin beton içinde flokülleşmeden dağılması ve bu sayede daha yüksek hidratasyon derecelerine ulaşılabilmesi sağlanmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıların taze beton ve harç karışımlarında sağladığı bu iki önemli iyileştirme sayesinde ise sertleşmiş betonların dayanım ve dürabilite özelliklerinin neredeyse tek bir katkı tipi ile kayda değer biçimde iyileştirilebilmesi mümkün olmuştur. Bu durum günümüzde, dayanımları 100MPa değerinin üzerinde olan ve neredeyse sıfır geçirimsizliğe sahip betonların üretilebilmesini mümkün kılmıştır. Diğer taraftan, teknolojiye gelişmeler ışığı ve uygulamada duyulan ihtiyaçlar karşısında bilim insanları, “yeni kuşak” adı verilen ve özellikle betonların taze haldeki işlenebilirlik özelliklerini geleneksel akışkanlaştırıcılara göre daha da geliştiren katkılar üretebilmişlerdir. Özellikle kendiliğinden yerleşen beton (KYB) teknolojisinde kullanılan bu polimer esaslı katkılar sayesinde herhangi bir yerleştirme işlemine gerek kalmadan, kendi ağırlığı etkisinde akan, yüksek plastik vis-

koziteye ve düşük eşik gerilmelerine sahip betonların üretilebilmesi ve uygulanması mümkün olmuştur (Şekil 1). Bu tür

katkıların taze betonun tiksotropik özelliklerini de değiştirebildiği bilinmektedir. Tiksotropi, taze beton üzerinde kayma gerilmelerinin etkin olmadığı durumda, diğer bir deyişle statik (durağan) haldeyken, partiküller arası çekim kuvvetlerini yeniden kurabilmesi ve bu halde viskozitesini yükseltebilmesi halidir. Pratik olarak tiksotropik bir akışkan sabit kayma gerilmesi etkisi altında zamanla viskozitesini düşürecek, veya bu durumun tam tersi, durağan durumda partiküller arası çekme kuvvetlerinin yeniden oluşmasına bağlı olarak viskozitesini artıracaktır. Aynı kayma gerilmesi etkisinde ve aynı

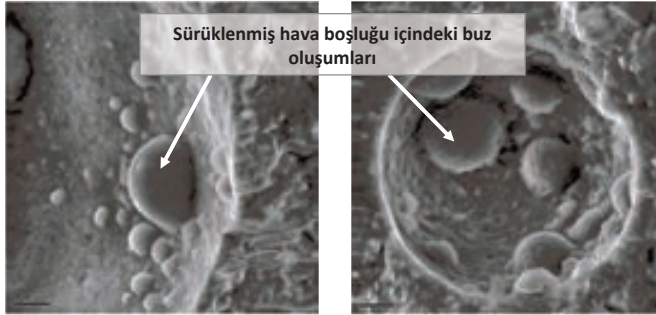
plastik viskoziteye sahip iki KYB karışımından yüksek tiksotropik özelliğe sahip olanda durağan durumdaki segregasyon riski daha düşük olacak ve aynı zamanda yüksek tiksotropik özelliğe sahip olan karışımla yapılan bir uygulamada kalıp basınçları daha kısa sürede azalacaktır. Bu konular üzerindeki araştırmalar günümüzde de yoğun bir şekilde devam etmektedir [3-6].



Şekil 1. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımının taze betonun plastik viskozite - kayma gerilmesi ilişkisi üzerindeki etkisi.

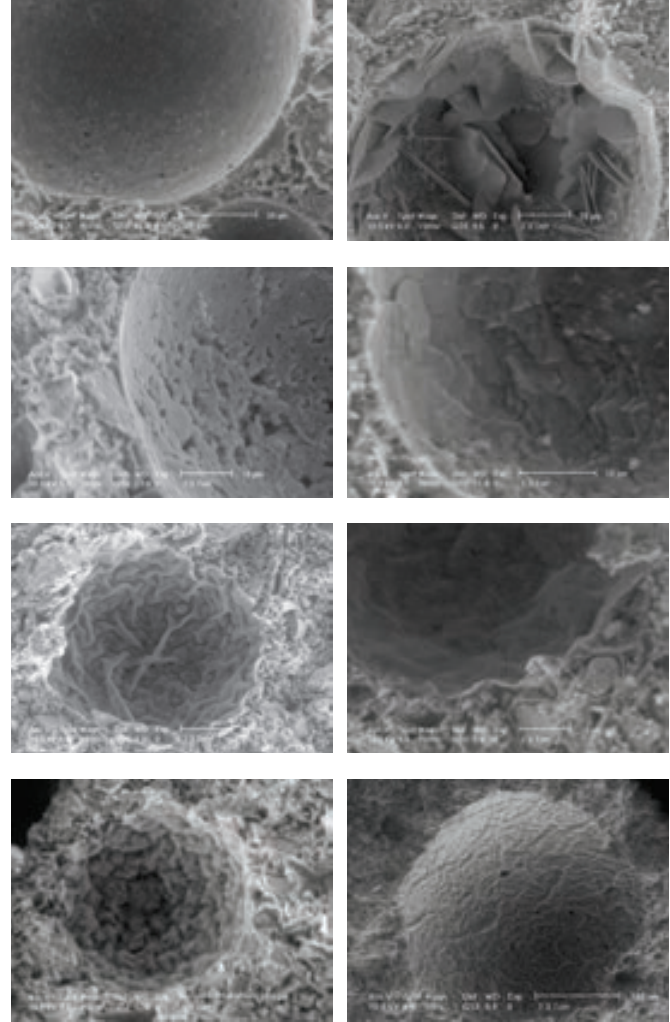
Beton ve betonarme yapıların sülfat etkisi, donatı korozyonu, donma çözünme etkisi gibi sebeplerden hasar görerek işlevini yitirmesi, gerek yapıların güvenliği ve gerekse yapı ömrünün sürdürülebilirliği bakımından önemlidir. Çevre koşullarından kaynaklanan bu tür hasarların gerek ülke ekonomisi ve gerekse küresel ekonomi üzerindeki etkileri oldukça büyüktür. Yeni yapı malzemeleri üretilebilmek ve üretilen malzemelerin özelliklerini geliştirebilmek malzemenin iç yapısını iyi anlayabilmek ile doğru orantılıdır. Hem ekonomik hem de uygulaması kolay bir yapı malzemesi olan betonun da performansını artırabilmek bu malzemenin içinde meydana gelen

hasar mekanizmalarını anlayabilmek ve bunlara bağlı olarak da iç yapıda yapılabilecek iyileştirmelere bağlıdır. Günümüz teknolojisindeki hızlı gelişmeler bilimin her alanında kendini göstermektedir. Özellikle mikroskop ile görüntüleme tekniklerindeki gelişmeler betonun iç yapısının ve hasar mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını sağlamış ve bu sayede de etkin malzemelerin geliştirilmesine ve/veya mevcut malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesinde öncü olmuştur (Şekil 2). Özellikle açık hava koşullarına direkt maruz olan beton yollar, yaya yolları ve geniş yüzeyli beton/betonarme yapı elemanlarında, donma-çözünme etkisinden dolayı onarılması güç ve maliyetli problemlerin ortaya çıkması, beton iç yapısına gerekli müdahalelerin yapılmaması durumunda olasıdır. Bu problemin önlenmesinin veya minimuma indirilmesinin en etkin yolu, beton karışımına tansiyoaktif katkı maddelerinin katılarak içerisine hava sürüklenmesidir fakat, sürüklenen havanın miktarı ve niteliği önemlidir.



Şekil 2. Çimento hamuru içine sürüklenmiş hava boşlukları ve boşluk içine açılan kaçış bölgelerinde buz oluşumunu gösteren düşük sıcaklık taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş mikro-fotoğraflar [7,8].

Son yıllarda elektron mikroskobu ile yapılan iç yapı incelemeleri sürüklenmiş hava boşluklarının yüzeylerinde farklı bir tabakanın oluştuğunu net bir şekilde göstermektedir (Şekil 3). Özellikle sürüklenen hava boşlukları etrafında oluşan kabuktaki tabakanın geçirimsizlik özellikleri bunların performansını etkileyecektir. Bu oldukça önemli kabul edilebilecek etkinin yanında, betonun donma - çözünme performansına sürüklenen hava boşluklarının boyutları ve beton içindeki dağılımının da önemi açıktır. Beton içine sürüklenen hava boşluklarının taze beton içindeki stabilitesi de önemlidir. Aksi takdirde, istenilen miktardan daha az hava sürüklenabilir ve bu da betonun performansını etkileyebilir. Yapılan çalışmalar, bazı katkı maddelerinin kullanılan diğer malzemelerle de etkileşerek, hava boşluklarını stabilize etme yeteneklerini yokedebildiğini de göstermiştir.



Şekil 3. Sertleşmiş çimento hamurunda sürüklenmiş hava boşluğu yüzeyinde oluşabilen farklı morfolojiye sahip yapılar örnekleri [9].

Kimyasal beton katkıları, betonda kullanım oranlarının düşük olmasına rağmen beton maliyetini bir miktar artıran maddelerdir. Ancak, kimyasal katkı maddelerinin beton maliyeti üzerindeki etkinliği betonun tek başına maliyeti olarak değil, yerine yerleştirilmiş betonun maliyeti olarak dikkate alınması ve hesaplanması gereken bir husustur. Betonun yerindeki maliyeti denildiğinde, betonun sahaya iletilmesi, yerleştirilmesi ve bitirilmesi sırasındaki işçilik harcamaları da işin içine girmekte ve yapı sahibini ilgilendiren maliyet bu toplam maliyeti içermektedir. Örneğin kendiliğinden yerleşen beton uygulamaları sayesinde işçilik önemli derecede azalmakta, döküm hızı artmakta, özellikle ön dökümlü uygulamalarda birim zamanda ortaya çıkarılabilecek ürün sayısı artmaktadır. Yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri sayesinde ulaşılabilen yüksek da-

yanımlı beton uygulamaları sayesinde taşıyıcı eleman kesitleri yapısal olarak izin verilebilen oranlarda azaltılabilmekte ve bu sayede bir yandan toplam beton hacmi azalırken bir yandan da yapı içerisindeki efektif kullanım alanları artırılabilir. İnşa edilen yapının sadece yapımı sırasındaki maliyeti değil, aynı zamanda servis ömrü boyunca ihtiyaç duyulabilecek onarım maliyetleri de önemlidir. Örneğin, hava sürükleyici bir katkının donma ve çözünme çevrimlerinin etkili olduğu bir uygulamaya ait betonda kullanılmasının beton maliyetine getireceği küçük bir artış, bu katkının kullanılmaması durumunda ortaya çıkabilecek onarım masraflarının yanında ihmal edilebilecek düzeylerde olacaktır.

Kimyasal beton katkı maddeleri ile ilgili olarak Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde yürürlükte olan ve katkı maddelerine ait standart belirlenimlerin yapıldığı doküman isimleri aşağıda verilmiştir. İlgili standartlarda katkılara ait performans kriterleri belirtilmekte ve bu kriterlerin belirlenmesinde izlenmesi gereken standart deney yöntemleri açıklanmaktadır.

- ASTM C494/C494M, 2012, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete (Kimyasal Beton Katkıları için Standart Belirtilimler),
- ASTM C260/C260M, 2010, Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete (Hava Sürükleyici Beton Katkıları için Standart Belirtilimler),
- ASTM C1017/C1017M, 2007, Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete (Akıcı Beton Üretimi için Kimyasal Katkılara ait Standart Belirtilimler),
- TS EN 934-1, 2010, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 1: Katkılara ait ortak gerekler.
- TS EN 934-2, 2011, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.
- TS EN 934-3, 2011, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 3: Kagir harcı için kimyasal katkılar - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.
- TS EN 934-4, 2011, Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 4: Öngerme tendonları için şerbette kullanılan kimyasal katkılar - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.
- TS EN 934-5, 2008, Kimyasal Katkılar- Beton, Harç ve Şerbet İçin- Bölüm 5: Püskürtülmüş Beton Katkıları- Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme.

Betonun mekanik, fiziksel, dürabilite ve işlenebilirlik özellikleri üzerinde olumlu etkiler sağlayan kimyasal katkı maddeleri, betonun taze, sertleşen ve sertleşmiş özellikleri üzerinde sağladıkları iyileştirmeler doğrultusunda sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırmayı yapmadan önce nitelikli bir betonun veya harcın sahip olması gereken taze ve sertleşmiş özelliklerinin neler olması gerektiğine bakılması gerekir. Bu özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir [2]:

I. İyileştirilmesi arzu edilen taze beton ve harç özellikleri:

- Su miktarını artırmadan işlenebilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi veya işlenebilirlik özelliklerini değiştirmeden su miktarının azaltılabilmesi,
- Su içeriğini artırmadan çökme ve yayılma özelliklerinin artırılabilmesi,
- Priz süresinde gecikme veya hızlanma sağlanabilmesi,
- Taze betonda oturmanın azaltılması veya önlenmesi, yada bir miktar şişme yapmasının sağlanabilmesi,
- Terleme karakteristiklerinin düzenlenmesi,
- Segregasyonun azaltılması,
- Yerine yerleştirilmiş beton veya harcın bitirme işlemi sırasında yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Pompalanabilirlik özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Reolojik özelliklerin ayarlanabilmesi,
- Kıvam kayıplarının engellenebilmesi,
- Döküm hızının artırılabilmesi.

II. İyileştirilmesi arzu edilen sertleşen ve sertleşmiş beton ve harç özellikleri:

- Sertleşen üründe çimento hidratasyonu sırasında yayılan ısıнын azaltılması,
- Erken yaş dayanımının artırılması,
- Nihai basınç, eğilme ve çekme dayanımlarının iyileştirilmesi,
- Donma ve çözünme etkilerine karşı yeterli direncin sağlanabilmesi,
- Buz çözücü tuzların neden olduğu pullanma ve kabarmaların önlenmesi,
- Geçirimsizlik özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Alkali-agrega reaksiyonu neticesinde oluşabilecek şişmelerin azaltılabilmesi veya tamamen elimine edilebilmesi,

- Çelik donatı ile beton arasındaki aderansın artırılabilmesi veya eski ve yeni betonun temas yüzeyindeki aderansın güçlendirilebilmesi,
- Darbe ve aşınma direncinin artırılabilmesi,
- Beton veya harç içine gömülü metallerin korozyonunun engellenebilmesi,
- Renkli beton veya harç üretilebilmesi,
- Rötire, sünme ve kıvrılmaların minimize edilebilmesi.

Yukarıda belirtilen ve nitelikli bir betonun veya harcın sahip olması gereken taze ve sertleşmiş özelliklerin sağlanabilmesi amacıyla kullanılan kimyasal beton katkılarını aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkün olabilir [2]:

- I. Hava sürükleyici katkılar,
- II. Piriz hızlandırıcı katkılar,
- III. Su azaltıcı katkılar,
- IV. Priz geciktirici katkılar,
- V. Akıcı beton üretimi için katkılar,
- VI. Kendiliğinden yerleşen beton katkıları,
- VII. Soğuk hava beton katkıları,
- VIII. Erken dayanımı yüksek beton katkıları,
- IX. Çimento hidratasyonunu kontrol eden katkılar,
- X. Rötire azaltıcı katkılar,
- XI. Korozyon önleyici katkılar,
- XII. Alkali silika reaksiyonu sonucu şişmeyi azaltıcı katkılar,
- XIII. Geçirimlilik azaltıcı katkılar,
- XIV. Diğer katkı sistemleri:
 - a. Bağ dayanımını iyileştiren katkılar,
 - b. Renklendirici katkılar,
 - c. Mantar, mikrop, haşere yok eden katkılar,
 - d. Kıvam düzenleyici katkılar,
 - e. Hava içeriğini azaltan katkılar.

2. NANO TEKNOLOJİ VE NANO KATKILAR

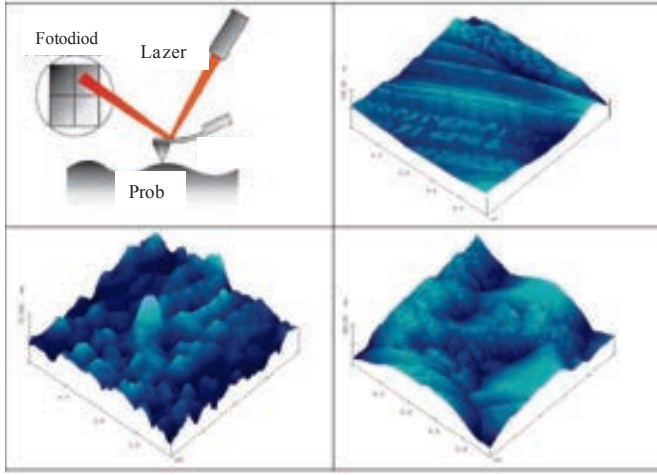
Son 25 yıl içerisindeki gelişmeler, malzemeleri en küçük boyutlarda irdeleme ve kullanma imkanı vermiştir. Nanoteknoloji bu gelişmenin sonucudur. Nano-bilimdeki gelişmeler yapı malzemesi alanında önemli etkiler yaratmıştır. Bunların başında beton teknolojisi üzerindeki etkileri gelmektedir.

İnşaat alanında Portland Çimentolu (PÇ) ürünler ve beton en çok kullanılan malzemelerden biri olarak kabul görmesinde en önemli etkenlerden biri; beton teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile beton kalitesinin çok yüksek mertebelere ulaşmasıdır. Kimyasal katkıların kullanılmaya başlanmasıyla, su/çimento oranları oldukça düşük betonlar üretmek mümkün olmuş, buna bağlı olarak yüksek performanslı betonlar üretilebilmiştir. Günümüzde 100 N/mm²'ye kadar basınç dayanımına sahip betonlar beton santrallerinde rutin olarak üretilip yapılarda kullanılabilmektedir [10-11].

Nano bilim ışığında yapılan çalışmalar neticesinde beton ve yapı teknolojisindeki ilerlemeler dört ayrı kategoride incelenebilir. Bunlar çimento esaslı malzemelerin nano mekanik modellenmesi, nano partiküller, nano film kaplamalar ve nano teknoloji ile üretilmiş teknolojilere dayanan ekipmanlar ile elde edilen sonuçlar olarak özetlenebilir. Nano bilim ışığında yapılan çalışmalar ve gelişen teknolojik ekipmanlar sayesinde, çimentolu ürünlerin özellikleri üzerinde en etkin parametre olan hidratasyon gelişimini ve çıkan ürünleri daha rahat gözlemleyebilme ve irdeleyebilme fırsatı doğmuştur. Bunun yanında betonun tüm fazlarının nano boyuttaki özelliklerini tayin etmek mümkün olmaktadır.

Çimento esaslı malzemelerin birkaç nano metreye kadar düşen alanlardaki mekanik özellikleri de bazı yenilikçi deney teknikleri ile belirlenebilmektedir. Temel olarak, nano indantasyon, atomik kuvvet mikroskobu ve bu tabanda çalışan Peak Force QNM, çok kısa zamanda çok fazla sayıda deney noktasını tarayarak nano boyutta malzeme özelliklerini elde etme olanağını bize sunmaktadır. Bu sayede farklı C-S-H fazlarının mekanik özelliklerini elde etmek olanağı nano teknoloji ürünleri tarafından bize sunulmaktadır [12-14].

Lateral force mikroskobu da atomik kütle mikroskobunun bir türevi olup topografik değişimlerin ortaya çıkarılmasında daha hassas bir metod olarak kullanılmaktadır. Nano ölçekte yüzey topografyası, hamur fazının boşlukluluğu ile değişmektedir. Elde edilen topografya sonuçlarına dayanarak, su/çimento oranı, kür zamanı gibi parametrelerin etkisi hamur agrega ara yüzeyi gibi nano ölçekli bölgelerde elde edilebilmektedir [15]. Atomik kütle mikroskobu ile yapılan bir çalışma sonucunda elde edilen yüzey topografyası örnek olarak Şekil 4'de gösterilmektedir.



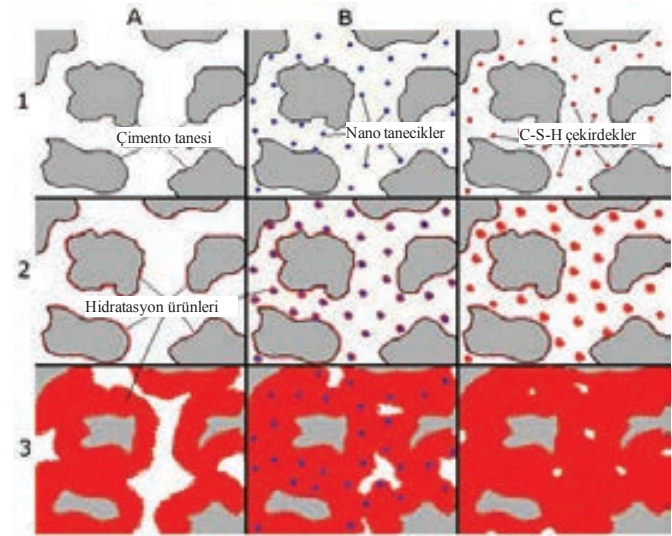
Şekil 4. Atomik kuvvet mikroskobu ile çimentonun erken yaşlardaki hidratasyonunun elde edilmesi [16].

Nano mekanik yaklaşımlarla betonların ve çimentolu kompozitlerin modellenmesi de yapılmaktadır. Bu kapsamda kırılma mekaniği konseptleri, nano mekanik yaklaşımlarla değerlendirilebilmektedir [17]. Nano ölçekteki C-S-H kristallerinin viskoelastik özellikleri, AFM kullanılarak elde edilen büyüklükler kullanılarak elde edilmekte, bu özelliklerin belirlenmesinde nano indenter de kullanılabilmektedir. Nano ölçekteki bileşenlerin visko elastik özellikleri kullanılarak nano modellemeler yapılmakta ve makro ölçekteki özellikler üzerine etkileri belirlenmektedir [18]. Mikro ve nano mekanik modellemelerde, mikro ve nano ölçekteki elemanların homojenizasyonu yapılarak tüm yapıya uygulanmakta ve homojenizasyona dayanarak sonuçlar elde edilmektedir [18,19].

Nano teknolojiden faydalanılarak üretilen bazı nano malzemeler de beton teknolojisine gelişmesindeki etkin rolünü edinmişlerdir. Magnetic nano-particles [20,21], nano ölçek viskozite düzenleyiciler [22], Nano TiO_2 [23] çimento esaslı malzemeler için kullanılması planlanan veya kullanılan, araştırmacıların üzerinde zaman harcadıkları nano taneciklerin bazılarıdır. Nano tanecikler, çimento hidratasyonu ile birlikte anıldığında genellikle hidratasyon kinetiklerini hızlandırıcı bir etki olarak akla gelmektedirler. Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , Fe_2O_3 , C-S-H fazı, amorf SiO_2 gibi farklı nano tanecikler akla gelmektedir. Bahsedilen nano taneciklerin bir kısmı, hidratasyonun üzerinde devam edeceği çekirdekler meydana getirerek reaksiyonun hızlanmasına yardımcı olurken (C-S-H), SiO_2 gibi bazıları ise pozolanik reaksiyon yardımıyla hidratasyon kinetiklerinin hızlanmasına yardım ederler [24,25]. Özellikle ultra yüksek dayanımlı betonlarda, daha yüksek performans için daha ince taneciklere ihtiyaç duyulmaktadır. Mikro silikadan daha ince tanecikler gerek particle packing, gerekse

puzolanik aktivite açısından ultra yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılabilmektedir. Bu ince taneciklerin kullanılmasıyla daha yüksek dayanımlar elde edilebilmektedir [26]. Çok ince taneciklerin kullanımı, kendiliğinden yerleşen betonun reolojik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır [27].

Şekil 5'de nano tanecik ve nano C-S-H çekirdeklerinin bulunduğu ortamda çimentonun hidratasyonu şematik olarak gösterilmektedir.

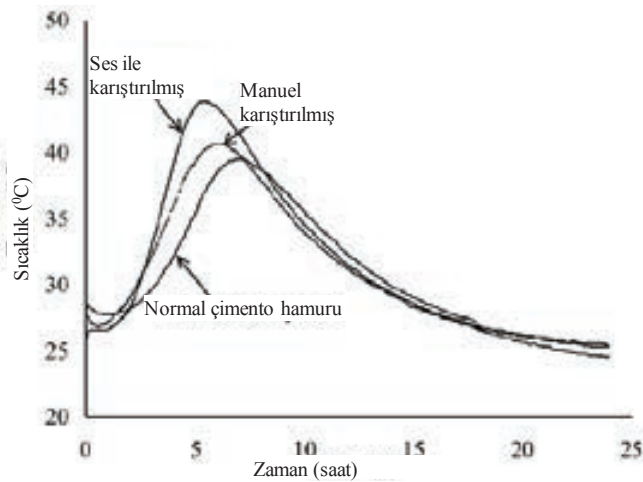


Şekil 5. (a) çimento hidratasyonu (b) nano tanecik katkılı (c) C-S-H nano tanecikler [24,25].

Beton özellikleri ve hidratasyon mekanizması üzerindeki etkileri en yaygın olarak araştırılmış olan nano malzemelerden bir tanesi de sentetik olarak üretilen nano malzeme Nano silika (kolloid silika) dır. Kolloid silika yayılmış taneciklere sahiptir ve yoğun olarak 5- 100 nm arasında değişen ayırık küresel şekillidir. Maksimum konsantrasyonu tanecik ebatlarına bağlıdır. 5nm tanecikler ağırlıkça %15 ini, 8nm tanecikler ağırlıkça %30 unu, ve son olarak 100 nm lik tanecikler %50 sini oluşturur. Kolloid silikanın görünümü de tanelerin ebatlarına ve konsantrasyonuna bağlıdır. Eğer tanecik ebadı büyükse ve konsantrasyonu yüksekse süt renginde, eğer tanecikler orta büyüklükte ise opak, ve tanecikler en küçük halde ise renksiz bir görünümü vardır [28-30]. Nano silika, çok ince yapısına bağlı olarak taze betonun işlenebilmesi üzerinde bazı olumsuz etkilere sahiptir. Nano SiO_2 kullanımı, kayma eşiği ve plastik viskoziteyi yükseltirken marsh konisi sürelerini uzatmaktadır. Bu problemin üstesinden, süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı artırılarak gelinebilmektedir [31]. Nano silika-

nin hidrasyonun erken aşamaların Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek daha yoğun C-S-H jelleri oluşturduğu belirtilmektedir. Araştırmada, silika nano partiküllerin bulunduğu çimento hamurunda Ca(OH)_2 miktarında, 1 günde %90, 28 günde %59'a varan düşüşler olduğu belirtilmektedir [32]. Nano silika kullanılması durumunda, daha fazla C-S-H jeli şekillenmekte, ve beton içindeki portlandit miktarında dikkate değer düşüşler meydana gelmektedir. Bu sonuçlar XRD ve FTIR analizleri ile desteklenmektedir [33]. Mineral katkı içeren çimento hamurlarının priz süreleri nano SiO_2 kullanımı ile azalmaktadır [34]. Nano silikanın kullanımı çimento hamurunun yüksek sıcaklık altında termal stabilitesinin iyileştiği de vurgulanmaktadır [35].

Nano CaCO_3 parçacıklarının hidrasyon oranları, priz süreleri ve erken yaş basınç dayanım gelişimi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar yapılmıştır. Nano CaCO_3 parçacıkları, daha iyi bir dağılım için 30 dakika süresince ultrases ile muamele edilmiş ve %15 lik bir çözelti hazırlanmıştır. Bunun yanında sıradan bir karıştırıcıyla yapılan bir karışım da ayrı bir deney serisi olarak hazırlanmıştır. Hidrasyon oranlarını elde edebilmek için yarı adiabatik bir ortamda sıcaklık gelişimleri takip edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilde nano CaCO_3 içeren numunelerin ulaştıkları en yüksek sıcaklık değerlerinin Portland çimentosu hamuruna göre daha yüksek olduğu, bu sıcaklıklara ulaşma sürelerinin ise nano CaCO_3 içeren numunelerde daha kısa olduğu anlaşılmaktadır. Grafikte ayrıca CaCO_3 ün dağıtılması için uygulanan ultrasonik yöntemin etkinliği de açıkça anlaşılmaktadır [36].

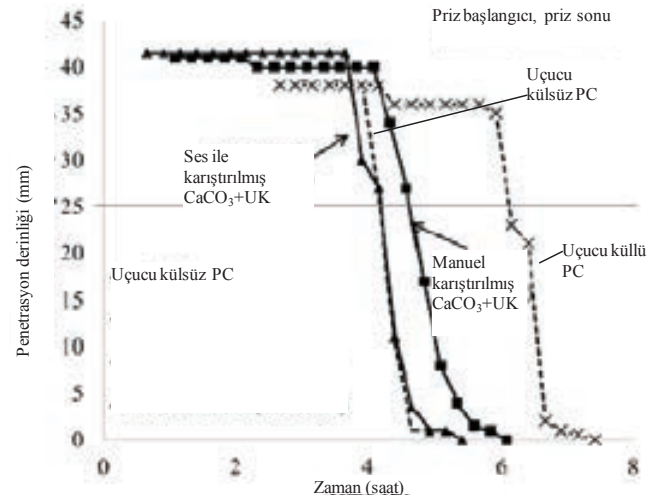


Şekil 6. Nano CaCO_3 kullanılması durumunda hidrasyon gelişimi [36].

Nano CaCO_3 , priz süreleri üzerinde de etkili olmuş ve uçucu küllü hamurların priz sürelerini kısaltmıştır (Şekil 7). Bunun yanında, Nano CaCO_3 'ün özellikle uçucu küllü harçların erken yaş basınç dayanımları üzerinde de etkili bir parametre olduğu belirtilmektedir [36].

Karbon nano fiberler ve nano tüpler, çimento esaslı kompozitlerde kullanılmaya başlanan nano donatılardır. Karbon nano fiberler donatı olarak kullanılmanın dışında bazı amaçlarla da kullanılabilirler.

Garces ve arkadaşları [37] karbon nano fiberleri beton içinde bulunan klorür iyonlarının temizlenmesi amacıyla kullanmışlar, betonda korozyon sınırına gelmiş olan klorür miktar ve derinliğini düşürmeyi başarmışlardır. Galao ve arkadaşları [38] betona karbon nano fiber katmışlardır. Sertleşmiş betona elektrik akımı uygulayarak betonun ısısını yükseltmeyi başarmışlar ve nano fiberlerin bu amaçla kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Nano partiküler kullanılarak, özellikle binaların yapısal olarak sürekli izlenmesi için sensörler üretilmektedir. Çimento esaslı piezoelektrik sensörler beton ile yüksek uyum göstererek yapısal açıdan bir problem yaratmamakta ve yaygınlıkla kullanılmaktadır. Bu tip çimento esaslı sensörlerde 30-40 nm boyutlarındaki karbon nano tanecikler iletken faz olarak çalışmaktadır. Bunun yanında çinko oksit gibi diğer oksitler de yan oksitler olarak kullanılmaktadır [39]. Karbon nano fiberlerin, çimento esaslı kompozitlerin dürabilitesini de iyileştirdiği belirtilmektedir [40].

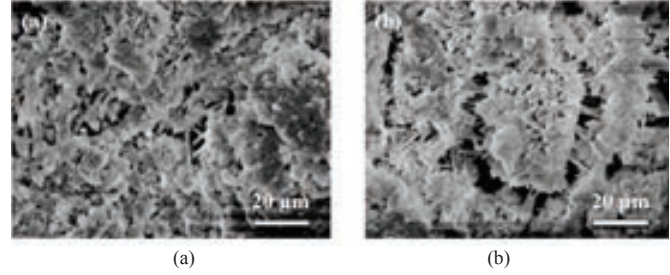


Şekil 7. Nano CaCO_3 kullanılması durumunda priz süreleri [36]

Karbon nano tüpler de karbon nano fiberler gibi devrimsel nitelikte kompozitler üretmek için kullanılmıştır. Karbon nano tüplerin kullanımında en büyük problemi bu malzemenin topraklaşmadan kompozit içinde yayılmasını sağlayabilmektir. Bunu gerçekleştirmek oldukça zor bir süreçtir. Normal bir beton karışımı gibi tüm bileşenlerin karıştırılarak, karbon nano tüplü bir kompozitin üretilmesi imkansızdır. Uygun karışmamış bir nano tüplü çimentolu kompozit, yeterli işlenebilirliğe sahip olamamakla birlikte tatminkar dayanıma da sahip değildir [41,42]. Uygun karışımı sağlayabilmek için farklı yöntemler önerilmektedir. Karbon nano tüplerin çimento esaslı malzemeler içinde dağıtılması büyük bir problemdir. Uygun bir şekilde dağıtılamaması durumunda aderans özellikleri kötüleşmekte, bu da kompozitin performansını olumsuz etkilemektedir. Bu malzemenin uygun ve homojen bir şekilde çimentolu malzeme içinde dağılmasını sağlamak için yöntemler geliştirilmiştir [43].

Graphene'nin nano donatı olarak betonda kullanılması üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Graphene, bir tabakalı birleşmiş karbon atomlarının iki boyutlu ince karbon yapılar oluşturması şeklinde teşekkül eder. Moleküler yapısına ve mekanik özelliklerine bağlı olarak graphene nano- yapraklar şeklinde bulunur ve çimento esaslı kompozitlerde nano donatı olarak gelecek vaat eder. Diğer nano donatılara göre göreceli olarak ucuz denebilecek bir teknik olan exfolitasyon yöntemiyle üretilir. Portland çimentosu karışımlarına su içinde seyreltik süspansiyolar halinde katılır. Portland çimentosuna göre ağırlıkça yüzdesi 0.01% ile 0.1% arasında değişir. Şekil 8 (a) da graphene nano donatıların çimento matris içinde dağılımı gösterilmektedir. Şekil 8 (b) de ise graphene nano donatıların çatlak köprüleme özelliği gösterilmektedir [44].

Bazı nano taneciklerin, çimento esaslı malzemelerin mekanik performansı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında nano tanecik olarak Nano SiO₂ kullanılmıştır. Nano SiO₂ nin hidratasyon kinetiği üzerindeki etkileri de deneysel olarak araştırılmıştır.



Şekil 8. Çimento matris içinde dağılmış graphene nano donatılar

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Malzemeler ve Deney Metodları

Bu çalışmada CEM I 42,5 çimento kullanıldı. Mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Çizelge 1,2 ve 3 de verilmektedir. Kullanılan uçucu külün kimyasal özellikleri Çizelge 4'de gösterilmektedir. Nano silikanın özellikleri ise Çizelge 5'de verilmektedir.

Yaş (gün)	Basınç dayanımı (N/mm ²)
2	28.5
7	42.0
28	55.6

Çizelge 1.Çimentonun mekanik özellikleri

Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,17
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3390
Priz başlangıcı (hour: minutes)	02:30
Priz sonu (hour: minutes)	04:50
Le Chatelier açılması(mm)	1
200µm üzerinde kalan (%)	0,4
90µm üzerinde kalan(%)	1,6

Çizelge 2. Portland çimentosunun fiziksel özellikleri.

Kimyasal bileşim	Çözünen SiO ₂	Çözünmeyen kalıntı	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	K ₂ O	Na ₂ O
(%)	20,42	1,22	4,82	3,39	63,5	1,2	3	0	0,89	0,24

Çizelge 3. Çimentonun kimyasal özellikleri.

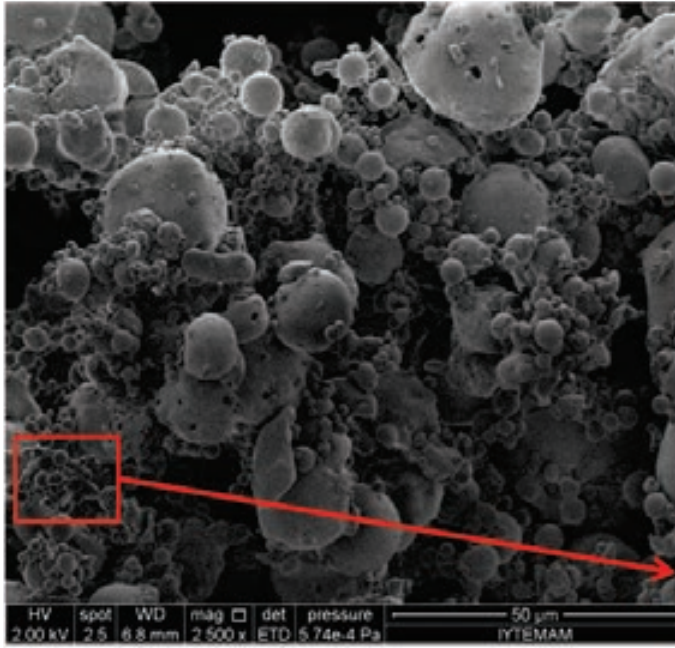
	Kimyasal bileşim	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Kızdırma kaybı
FA	(%)	58,82	2,18	19,6	10,6	3,92	0,5	1,9	0,9

Çizelge 4. Uçucu külün özellikleri.

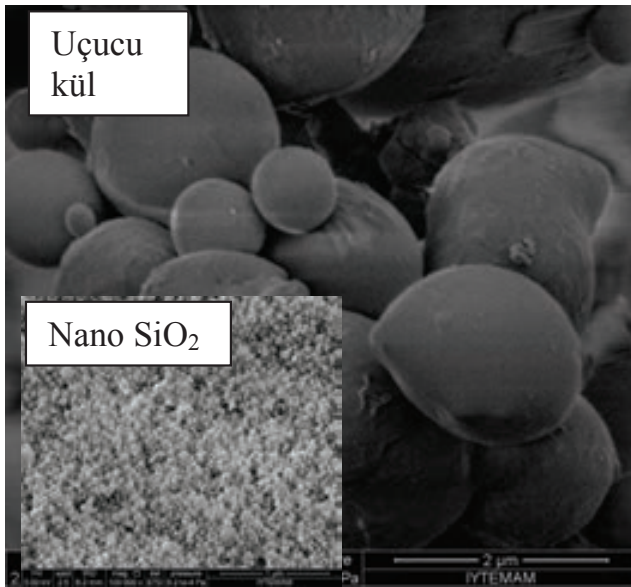
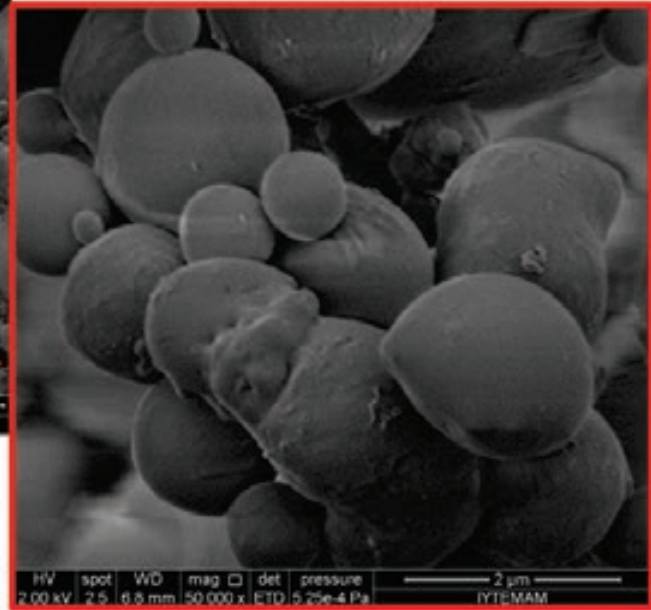
Yoğunluk (sıvı karışım) (g/cm ³)	1,40
Kuru yoğunluk (g/cm ³)	2,33
pH	9,5
Viskozite (cPS)	<15
Su miktarı (%)	50

Çizelge 5. Nano SiO₂ 'nin özellikleri.

Nano SiO₂ ve uçucu kül üzerinde taramalı elektron mikroskobu görüntülemesi (SEM) yapılmış ve elde edilen görüntüler Şekil 9'da verilmiştir. Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1-50 mikron arasında değişirken nano-silika taneciklerinin boyutları 1-2 mikron civarındadır.



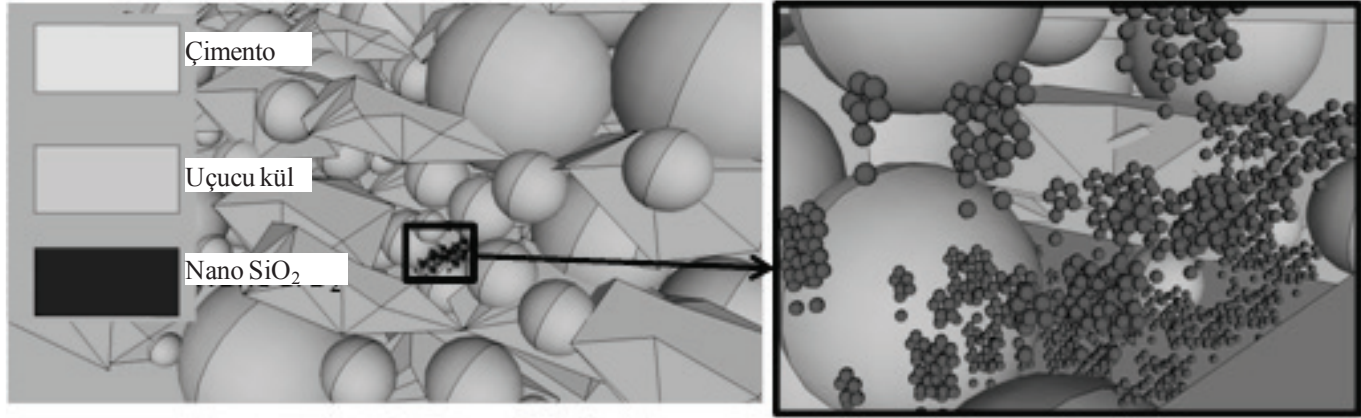
Şekil 9. Uçucu külün elektron mikroskobu görüntüsü.



Şekil 10. Uçucu kül ve nano SiO₂ tanecikleri.

Uçucu külün en ince taneciklerinin bulunduğu kısım ile Nano SiO₂ taneciklerinin elektron mikroskobu görüntüleri, boyutları arasındaki farkın daha iyi anlaşılabilmesi açısından aynı ölçekte Şekil 10'da gösterilmektedir. Şekil 10 incelendiğinde, nano SiO₂ parçacıklarının çok ince yapısına bağlı olarak üstün doldurma yeteneğiyle, 1-2 mikron boyutundaki çok ince uçucu kül parçacıkları arasındaki boşlukları dahi doldurma yeteneğine sahip olabilecekleri anlaşılmaktadır.

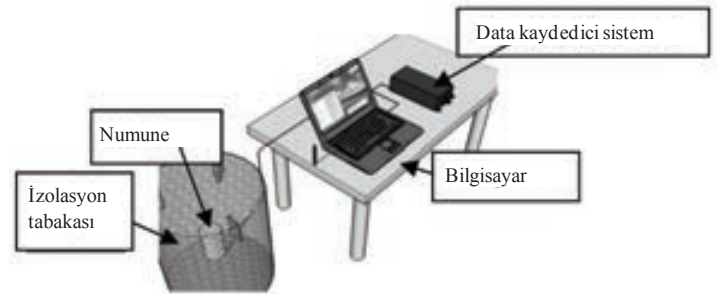
Çimento ve uçucu kül tanecikleri ile nano SiO₂, tanecik boyutlarının birbirlerine göre durumlarının daha iyi anlaşılabilmesi için şematik olarak bir arada Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Taneciklerin karışım içindeki durumlarının şematik gösterimi.

Nano taneciklerin çimento esaslı malzemeler içinde kullanımı-
nın çimento esaslı malzeme performansına etkilerini araştı-
mak amacıyla planlanan deneysel çalışmada, basınç dayanımı
üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için harç numuneler üretil-
miştir. Harç numuneler üretilirken, tipik 350 dozlu betonun
harç fazını temsil edebilmek amacıyla hamur miktarının, kum
miktarına oranı 0,68 olarak kullanılmıştır. Agregat konsan-
trasyonuna bağlı oluşabilecek dayanım farklılıklarının önüne
geçebilmek amacıyla, numuneler üretilirken hamur miktarının
kum miktarına oranı sabit tutulmuştur. Deneysel çalışma kap-
samında dört grup numune üretilmiştir. Birinci grup numune
grubunda herhangi bir mineral ve nano katkı maddesi kullanı-
lmamış, bu gruba ait numuneler, sadece Portland çimentosu
kullanılarak üretilmiştir. İkinci grup numunede, Portland çim-
entosu ile üretilen numune grubunda %2,5 oranında Nano
SiO₂ eklenmiştir. Üçüncü grup numuneler uçucu küllü numu-
nelerdir. Bu numunelerde, uçucu külün yer değiştirme oranı
%20, %40 ve %60 olarak seçilmiştir. Nano SiO₂ oranı, nano
SiO₂'nin çimento miktarına ağırlıkça oranı olarak tanımlanmış-
tır. Tüm karışımlarda su/çimento oranı 0,35 olarak seçilmiştir.
Tüm numunelerde işlenebilirlik sabit tutulmuş, ASTM C1437-
07 standardı esaslarına göre yapılan deneylerde, 25 düşüşten
sonra 15 cm yayılma elde edecek şekilde ayarlanmıştır. İşlene-
bilirlik ayarlanırken süper akışkanlaştırıcı oranı değiştirilmiştir.
4x4x16 cm ebatlarında harç numuneler üretilmiş, 1, 3, 7 ve 28.
gün süresince kirece doygun suda saklanarak kür süresinin son-
unda basınç deneyleri uygulanmıştır.

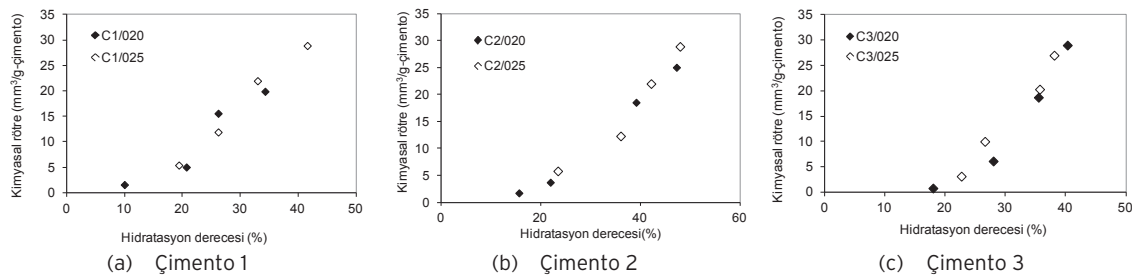
Erken yaştaki hidratasyon gelişimini incelemek amacıyla, ilk
24 saat süresince yarı adiabatik kalorimetre içindeki sıcaklık
artışları izlenmiştir. Erken yaştaki sıcaklık artışlarını izlemek
için kullanılan yarı adiabatik kalorimetre sistemi Şekil 12'de
gösterilmektedir. Kullanılan sistemde 50 cm çapındaki ve 50
cm yüksekliğindeki taş yünü blok kullanılmıştır. Sistemde kul-
lanılan taş yünü'nün ısı iletkenlik katsayısı 0,043 W/mK dir.
Ölçümler 100 çimento hamuru üzerinde yapılmıştır. Sıcaklık
değişimleri bir bilgisayar yardımı ile kaydedilmiştir.



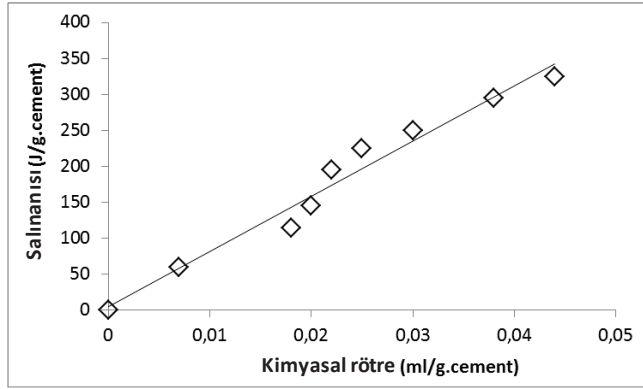
Şekil 12. Kalorimetre ile ısı artışının ölçümü.

Kalorimetreden elde edilen sonuçların doğrulanması için
hidratasyonun doğrudan bir göstergesi olan kimyasal rötre
ölçümleri yapılmıştır. Kimyasal rötrenin hidratasyonun doğru-
dan göstergesi olduğu, üç farklı çimento kullanılarak yapılan
deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarda açıkça görülmek-
tedir. Üç farklı çimento kullanılarak elde edilen kimyasal rötre-
hidratasyon derecesi ilişkileri Şekil 13'de gösterilmektedir.

Şekil 13. Kimyasal rötre - hidratasyon derecesi ilişkisi.

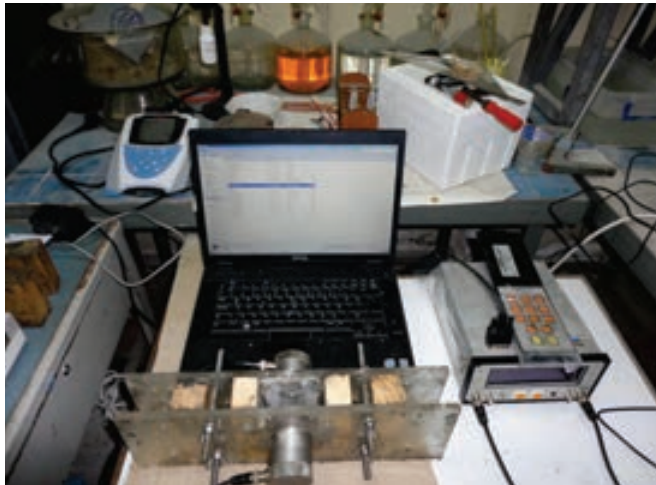


Kimyasal rötre ölçümleri hamur numuneler üzerinde yapılmıştır. Elde edilen kimyasal rötre sonuçlarının hidratasyon sırasında salınan ısı miktarı ile ilişkisi Şekil 14'de gösterilmektedir. Ölçümler yarı adiabatik kalorimetreden elde edilen ısı değerlerinin kimyasal rötre değerleri ile doğrusal ilişki içinde olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar literatürde [22,45] de elde edilmiştir. Kalorimetre içindeki sıcaklık değeri, hidratasyon süresince salınan ısı ve hidratasyon kinetiğinin göstergesidir.



Şekil 14. Hidratasyon sırasında salınan ısı ve kimyasal rötre arasındaki ilişki.

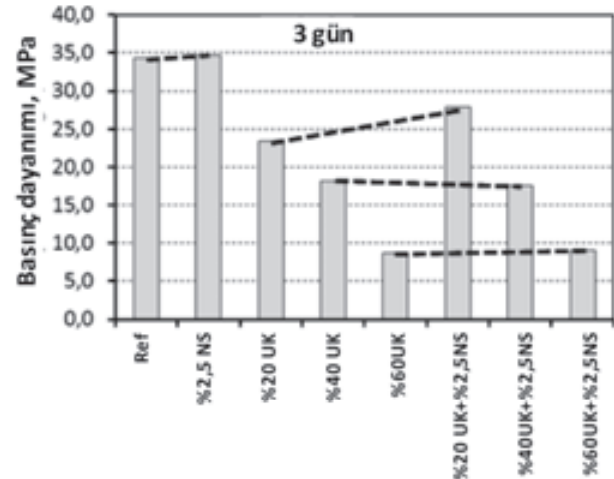
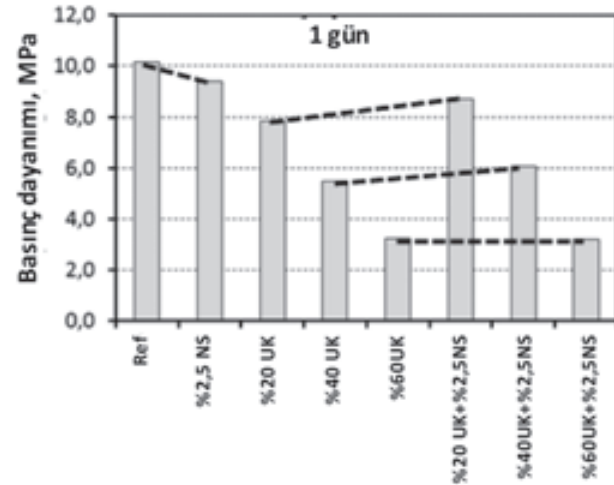
Reinhard ve Grosse [46], çimento esaslı bir malzemenin sertleşmesinin malzemeden geçen ultrasonik dalgaların kaydedilmesi ile elde edilebileceğini belirtmektedir. Çalışmanın bu kısmında, ilk 24 saatteki hidratasyon gelişiminin takip edilmesi için, hamur numunelerde ultrasonik geçiş hızı ölçülmüştür. Geçiş hızları ve zaman ilişkileri elde edilirken p-dalgalarından faydalanılmıştır. Kayıt aralığı 5 dakika olarak ayarlanmıştır. Deneylerde 54 kHz frekansa sahip probalar kullanılmıştır. Ultrasonik geçiş hızı deney sistemi Şekil 15'de gösterilmektedir.

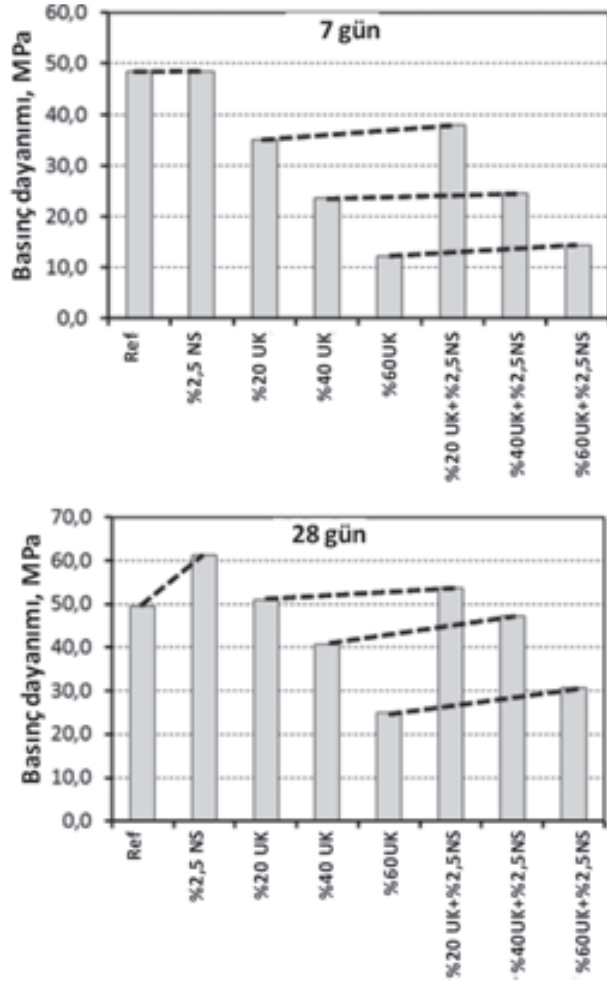


Şekil 15. Ultrasonik geçiş hızı sistemi.

3.2 Deney Sonuçları ve Değerlendirme

Şekil 16'da basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Tüm numunelerde, kür süresinin artmasıyla birlikte basınç dayanımları beklendiği gibi yükselmiştir. Nano silikanın varlığı, uçucu kül kullanılması ya da kullanılmaması durumuna göre farklı etkiler göstermektedir. Sadece Portland çimentosu kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımları değerlendirildiğinde, nano silikanın suda kürlenmiş bu harçların erken yaş basınç dayanımları üzerinde dikkate değer bir etkisi olmadığı söylenebilir. Nano silika kullanımı bu harçların 28. gündeki basınç dayanımları üzerinde %20 artışa neden olmaktadır. Uçucu küllü harçlarda ise %20 uçucu kül kullanılması durumunda %2,5 nano silika, ilk 7 gün basınç dayanımlarında, nano silika içermeyen uçucu küllü harç dayanımlarına göre dikkate değer bir artışa neden olmaktadır. Uçucu küllü harçların basınç dayanımlarında benzer artışlar 28. gün sonuçlarında elde edilememiştir. %40 ve %60 uçucu kül kullanılması durumunda ise, erken yaşlarda çok az bir artışa karşın ileri yaşlarda daha yüksek mertebelerde artışlar elde edilmiştir.



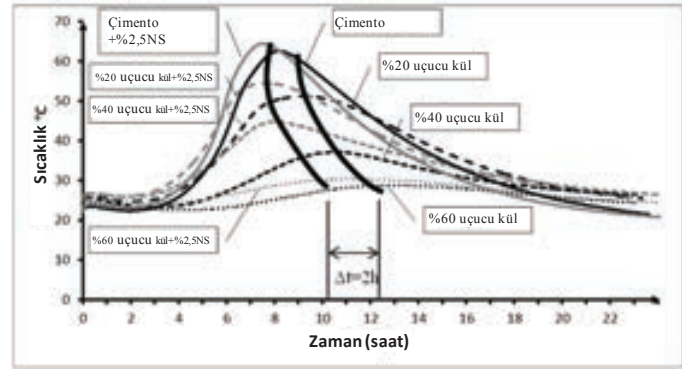


Şekil 16. Basınç dayanımları.

Sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, uçucu kül içermeyen karışımlarda %2,5 oranında nano SiO₂ kullanımının erken yaş dayanımı üzerinde önemli bir etki göstermediği anlaşılmaktadır. Ancak, aynı miktarda nano SiO₂, uçucu kül içeren harçlarda kullanıldığında, farklı oranlarda etkiler göstermiştir. Özellikle %20 uçucu kül oranlı karışımlarda erken yaşlardaki dayanım kayıpları nano SiO₂ kullanımı ile bir miktar önlenmiştir.

Şekil 17'de erken yaşlardaki hidratasyon kinetiklerini takip edebilmek amacıyla kalorimetre ölçümlerinden elde edilen sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Çalışmanın bu kısmında deneyler, hamur numuneler üzerinde yürütülmüştür. Hamur numuneler üretilirken, basınç dayanımı deneylerinde kullanılan numunelerin hamur fazları olacak şekilde üretim yapılmıştır. Referans numuneleri, uçucu külün çimento ile yer değiştirmesiyle üretilen numuneler ve %2,5 oranında nano SiO₂ içeren numunelere ait sonuçlar Şekil 17'de gösterilmektedir. Referans numunelere nano SiO₂ eklenmesiyle üretilen

numuneler en yüksek sıcaklığa erişmişlerdir. Bu numunelerin eriştiği en yüksek sıcaklık değeri kontrol numunesinden 3°C daha yüksektir. Referans karışımına nano SiO₂ eklenmesi durumunda, en yüksek sıcaklığa ulaşma süresi de kısalmıştır. Uçucu kül yer değiştirmesiyle üretilen numunelerin kalorimetre ölçümlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, uçucu küllü hamurlarda nano SiO₂ kullanıldığında elde edilen en yüksek sıcaklık değerlerinin 6°C yükseldiği anlaşılmaktadır. Uçucu küllü hamurlarda, nano SiO₂ kullanılması durumunda en yüksek sıcaklığa yaklaşık olarak 2 saat daha erken ulaşıldığı tespit edilmiştir. Bu davranış, nano SiO₂'nin uçucu kül içeren çimentolu hamurların hidratasyon kinetiği üzerinde etkili bir parametre olduğunun göstergesidir.



Şekil 17. Klorimetrede sıcaklık artışları.

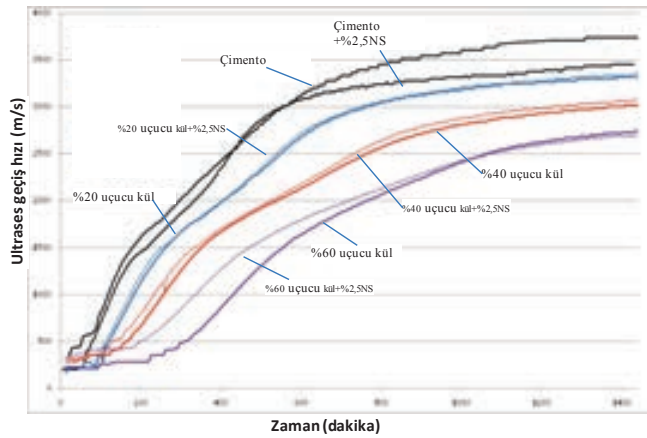
Şekil 17'ye göre, nano SiO₂ kullanılması durumunda en yüksek sıcaklık dereceleri artmaktadır. Bununla birlikte en yüksek sıcaklıklara ulaşma süreleri kısalmaktadır. Bu iki parametre, nano SiO₂ nin özellikle uçucu kül içeren çimentolu karışımlarda kullanılması durumunda erken hidratasyon oranının arttığını göstermektedir.

Basınç dayanımı deneyi sonuçları ve sıcaklık gelişimi sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, sonuçların birbiriyle tutarlı olduğu, nano SiO₂ kullanımının, düşük uçucu kül yer değiştirme oranı içeren karışımların erken yaştaki dayanım kayıplarını gidermede olumlu etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Nano SiO₂ kullanılması durumunda dayanımda meydana gelen artışların, erken yaş hidratasyon gelişiminde meydana gelen olumlu etkilere bağlı olduğu söylenebilir.

Çimento esaslı malzemelerin sertleşmesi sırasında meydana gelen değişikliklerin ultrasonik dalgaların malzeme içinden geçiş özelliklerinin değişimiyle izlenebileceği daha önce belirtilmişti. Ultrases geçiş hızı, malzeme içinden geçen dalgaların geçiş süresi ile tayin edilmektedir. Ultrases geçiş hızı proplar arasındaki mesafenin ultrases geçiş süresine bölünmesiyle hesaplanabilir ve sonuçta S şekilli birbiri ile karşılaştırılabilir

ve çimentonun hidratasyonu ve prizi hakkında değerlendirmeler yapmaya imkan veren eğriler elde edilebilir [46]. Serleşmekte olan karışımların P dalgası ultrases geçiş hızlarını gösteren sonuçlar Şekil 18'de gösterilmektedir.

P-dalgası ultrases geçiş hızları sonuçları kalorimetre sıcaklık artışı sonuçları ile paralellik göstermektedir. Nano SiO_2 nin karışımlara eklenmesi uçucu kül içermeyen referans karışımlarında, Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında daha erken sertleşmeye yol açmaktadır. Hiçbir katkı maddesi içermeyen Portland çimentolu referans karışımı 24 saatin sonunda en yüksek ultrases geçiş hızına sahip olmuştur. Bu sonuç %2,5 oranında nano SiO_2 kullanımı durumunda 24 saatte Portland çimentolu karışımlarda meydana gelen basınç dayanım kayıpları ile de paralellik göstermektedir.



Şekil 18. P-dalgası ultrases geçiş hızları.

Portland çimentolu karışımlardan elde edilen ultrases geçiş hızlarının, ilk 24 saat içinde uçucu kül yer değiştirmesiyle üretilen karışımların ultrases geçiş hızlarından daha yüksek olması, çimentonun %40 ve %60 oranında uçucu kül ile yer değiştirmesi ile priz ve hidratasyon kinetiklerinin önemli oranda geciktiğinin bir göstergesidir. Diğer yandan uçucu küllü karışımlara, nano SiO_2 eklenmesi ile ilk 24 saat süresince hidratasyon kinetikleri önemli derecede hızlanmaktadır. Nano SiO_2 içeren ve içermeyen uçucu küllü karışımların ultrases geçiş hızı eğrileri 24 saat sonunda çakışmaktadır. Sonuç olarak nano SiO_2 nin uçucu kül içeren ve içermeyen karışımlarda kullanılması, karışım oranlarına da bağlı olarak ilk 13 saat içindeki hidratasyon kinetiklerinde hızlanmaya neden olmaktadır. İlk 24 saat sonundaki etkisi ilk 13 saat sonundaki etkisi ile direkt olarak ilgili olduğu ve 24 saatin sonunda 13 saat sonundakine benzer davranış sergilediği gözlenmemiştir.

4. GENEL SONUÇLAR

İnşaat sektöründe Portland Çimentolu (PÇ) ürünler ve betonun en çok kullanılan malzemelerden biri olarak kabul görmesinde en önemli etkenlerden biri; beton teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile beton kalitesinin çok yüksek mertebelere ulaşmasıdır. Beton kalitesindeki bu yükseliş büyük oranda, betonu oluşturan temel malzemeler olan çimento, agrega, su ve mineral katkıların yanında katılan kimyasal katkı maddeleri ile sağlanmaktadır. Nitelikli bir betondan beklenen 3 temel özellik vardır. Bunlar, işlenebilirlik, istenen dayanım özelliklerini karşılayabilmesi ve servis ömrü boyunca bütünlüğünü kaybetmeden dayanım özelliğini ve aynı zamanda içindeki çelik donatıyı koruyabilmesidir (kalıcılık). Bağlayıcı madde (çimento ve puzolanlar) dozajının yanında, katkı tipleri ve kullanım dozajları da seçilirken bu üç temel özelliğin sağlanması amaçlanır. Beton katkı teknolojisindeki gelişmeler, günümüz betonlarının gerek taze gerekse sertleşmiş özellikleri bakımından üstün özelliklere sahip olmasını sağlamıştır.

Günümüzde, beton genel olarak yapısal bir malzeme olarak öngörülmektedir. Nano teknoloji, çok amaçlı akıllı malzemelerin üretilmesi için bize yardımcı olmaktadır. Genel olarak düşünüldüğünde farklı mikro ve nano malzemelerin uygulanmasıyla son yıllarda beton performansı dikkate değer bir biçimde arttırılabilmektedir. Nano mikro malzemelerin yanında atomik kütle mikroskobu gibi nano görüntüleme teknikleri sayesinde nano ölçekte özellikler ortaya çıkarılmakta, malzemeler bu ölçekte yönetilerek, malzemelerin daha da gelişmiş performansa sahip olması sağlanmaktadır.

Nano katkıların özellikle hidratasyon kinetiği üzerindeki etkileri halen araştırılmaya devam etmektedir. Bu konuda araştırmalar Nano SiO_2 üzerinde yoğunlaşmıştır. Buna bağlı olarak Nano SiO_2 nin hidratasyon mekanizması üzerindeki etkileri ile betonun mekanik ve reolojik özellikleri üzerindeki etkileri daha sarıh bir şekilde ortaya koyulmuştur. Nano SiO_2 özellikle ilk 24 saatteki hidratasyon mekanizması üzerinde etki göstererek, harç ve betonların mekanik özelliklerini genellikle olumlu yönde etkilemektedir. Bu olumlu etkinin mertebesi, mineral katkılı harç ve betonlarda daha yüksek olmaktadır.

Kaynaklar

1. ASTM C125-12, "Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates", **ASTM International**, 2012.
2. ACI 212.3R-10, "Report on Chemical Admixtures for Concrete", **American Concrete Institute**, 65p., 2010.
3. Talesnic, M., and Katz, A., "Measuring Lateral Pressure of Concrete: From Casting Through Hardening", **Construction and Building Materials**, V.34, pp. 211-217, 2012.
4. Assaad, J., Khayat, K.H., "Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Lateral Pressure Exerted by Self-Consolidating Concrete", **ACI Materials Journal**, 102 (3), pp. 145-153, 2005.

5. Assaad, J., Khayat, K.H., "Measureable Systems for Determining Formwork Pressure of Highly-Flowable Concrete", **Materials and Structures**, V.41, pp. 37-46, 2005.
6. Gregori, A., Ferron, R.P., Sun, Z. and Shah, S.P., "Experimental Simulation of Self-Consolidating Concrete Formwork Pressure", **ACI Materials Journal**, 105 (1), pp. 97-104, 2008.
7. Corr, D.J., Monteiro, P.J.M., Bastacky, S.J. and Gartner, E.M., "Air Void Morphology in Fresh Pastes", **Cement and Concrete Research**, Vol.32, No.7, pp. 1025-1031, 2002.
8. Corr, D.J., **A Microscopic Study of Ice Formation and Propagation in Concrete**, PhD Dissertation, Berkeley: University of California, 169p., 2001.
9. Atahan, H.N., Carlos, C., Chae, S.R., Monteiro, P.J.M., and Bastacky, J., "The Morphology of Entrained Air Voids Generated with Different Anionic Surfactants", **Cement and Concrete Composites**, Vol. 30, pp.566-575, 2008.
10. Pekmezci, B.Y., **Yüksek performanslı çimentolu ürünlerin otojen rötre özellikleri**, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
11. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., Rongshen, C., "Influence of Nano-SiO₂ Addition on Properties of Hardened Cement Paste as Compared with Silica Fume", **Construction and Building Materials**, V. 21, pp. 539-545, 2007.
12. Zhu, W., Howind, T., Stark, R., Kümmerling, B., Dolado, J.S., Nanomechanical Study of C-S-H by PeakForce QNM", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
13. Howind, T., Zhu, W., Villmann, B., Dolado J.S., Nanoindentation on Cement Paste - Challenges in Sample Preparation and Result Analysis", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
14. Grasley, Z.C., Jones, C.A., Li, X., Garboczi, E.J., Bullard, J.W., "Elastic and Viscoelastic Properties of Calcium Silicate Hydrate", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
15. Peled, A., Castro, J., Weiss, J., "Atomic Force and Lateral Force Microscopy (AFM and LFM) Examinations of Cementitious Materials", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
16. Schmidt, M., Amrhein, K., Braun, T., Glotzbach C., Kamaruddin, S., Tanzer, R., "Nanotechnological Improvement of Structural Materials - Impact on Material Performance and Structural Design", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
17. Sumarac, D., Lukic, I., Radonjanin, V., Malesev M., Lukic, I., "Steel Fiber Reinforced Concrete with Natural and Recycled Aggregate - Nanomechanics Approach", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
18. Grasley, Z.C., Jones, C.A., Benhalima, M., "Extracting Viscoelastic Properties of Nanometric Phases using Atomic Force Microscopy", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
19. Nemecek, J., Kralik, V., Vondrej, J., "Micromechanical Analysis of Heterogeneous Structural Materials", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
20. Blyszko, J., et.al., J. Blyszko, J., Kiernozyski, W., Guskos, N., Zolnierkiewicz, G., Typek, J., Narkiewicz, U., Podsiadly, M., "Study of Mechanical Properties of Concrete with Low Concentration of Magnetic Nanoparticles" **Journal of Non-Crystalline Solids**, V.354, pp. 4515-4518, 2008.
21. Li, H., Xiao, H., Yuan, J., Ou, J., "Microstructure of Cement Mortar with Nano- Particles", **Composites: Part B: Engineering**, V.35, pp. 185-189, 2004.
22. Bentz, D.P., "Blending Different Fineness Cements to Engineer the Properties of Cement-Based Materials", **Magazine of Concrete Research**, No. 5, pp. 327-33, 2010.
23. Li, H., Zhang, M., Ou, J., "Flexural Fatigue Performance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement", **International Journal of Fatigue**, V.29, pp. 1292-1301, 2007.
24. Land, G., Stephan, D., "The influence of Nano-Silica on the Hydration of Ordinary Portland Cement", **Journal of Material Science**, No. 47, pp. 1011-7, 2012.
25. Land, G., Stephan, D., "Controlling Cement Hydration with Nanoparticles", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
26. Korpa, A., Kowald, T., Trettin R., Kota, T., Xhaxhiu, K., Mele, A., "Pyrogenic Tiny Particles for Large Contributions on the Properties of Advanced Ultra High Performance Cement-Based Composites", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
27. Collerparadi, S., Borsoi, A., Olagot, J.J.O., Troli, R., Collerparadi, M., Curzio, A.Q., "Influence of Nano-Sized Mineral Additions on Performance of SCC", **6. International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities**, Dundee, U.K., 2012.
28. Otterstedtand, J.E., Greenwood, P., "Some Important, Fairly New Uses of Colloidal Silica/Silica Sol, Colloidal Silica Cement and Concrete, Colloidal silica fundamentals and applications", CRC Press, pp.738-741, 2006.
29. Gundogdu, D., Pekmezci, B.Y., Atahan, H. N., "Influence of nano SiO₂ on mechanical properties of mortars containing fly ash", **Proc. of International Conference on Material Science and 64th RILEM Annual Week**, 2010.
30. Gundogdu, D., "Influence of nano SiO₂ on Mechanical Properties of Mortars Containing Fly Ash", MSc Thesis, Istanbul Technical University, 2010.
31. Sonebi, M., Bassouni, M.T., Kwasny, J., Amanuddin, A.K., "Effect of Nano-Silica on Fresh Properties and Rheology of Cement-Based Grouts", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
32. Singh, L.P., Bhattacharyya, S.K., Ahalawat, S., "Comparative Mineralogical and Morphological Aspects of C-S-H Using Silica Nanoparticles", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
33. Guerrero, A., Gaitero, J.J., Perez, G., Goni, S., "Meso-Micro-Nano-Scale Modifications in Cement Paste by Additions of Nanosilica Particles", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
34. Zhang, M.h., Islam, J., "Use of Nano-Silica to Increase Early Strength and Reduce Setting Time of Concretes with High Volumes of Fly Ash or Slag", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
35. Lim, S., Mondal, P., Cohn, I., "Effects of Nanosilica on Thermal Degradation of Cement Paste", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
36. Kawashima, S., Hou, P., Corr, D.J., Shah, S.P., "Modifications of Cement-based Materials with Nanoparticles", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
37. Garces, P., Carmona, J., Galao, O., Zornoza, E., Climent, M.A., "Carbon Nanofibre Cement Paste as Anode for Electrochemical Chloride Removal", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
38. Galao, O., Gomis, J., Zornoza, E., Baeza, F.J., Garces, P., "Heating Function of Carbon Nanofibre Cement Pastes", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
39. Irene, Y. Y. C., Zonglin, L. "Influence of Nanoparticles on the Properties of 0-3 Cement-Based Piezoelectric Composites", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
40. Brown, L., Sanchez, F., "Durability of Carbon Nanofiber/Cement Composites in Aggressive Environments", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
41. Metaxa, Z.S., Konsta-Gdoutos, M.S., Shah S.P., "Carbon Nanofiber Cementitious Composites: Effect of Debulking Procedure on Dispersion and Reinforcing Efficiency", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
42. Manzur, T., Yazdani, N., "Importance of Flow Values In Quality Evaluation of Surface Treated Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Cementitious Mix", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
43. Stynoski, P., Mondal, P., Marsh, C., "Novel Processes to Improve CNT Utility in Cement", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
44. Zohhadi, N., Aich, N., Khan, I.A., Matta F., Saleh, N.B., Ziehl P., "Graphene Nanoreinforcement for Cement-Based Composites", **4th International Symposium on Nanotechnology in Construction**, 2012.
45. Lura, P., Winnefeld, F., Klemm, S., "Simultaneous Measurements Of Heat Of Hydration And Chemical Shrinkage On Hardening Cement Pastes", **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, No. 101, pp. 925-932, 2010.
46. Reinhardt, H.W., Grosse, C.U., "Advanced Testing of Cement-Based Materials during Setting and Hardening", Final Report of RILEM TC 185-ATC, 2005.