

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇİMENTOLU KOMPOZİTLERDE MİKRO VE NANO MİNERAL
KATKILARIN PERFORMASYONLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

Nanh Ridha Faisal FAİSAL

**Danışman
Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**



© 2019 [Nanh Ridha Faisal FAISAL]

TEZ ONAYI

Nanah Ridha FAİSAL tarafından hazırlanan " Çimentolu Kompozitlerde Mikro Ve Nano Mineral Katkıların Performanslarının Karşılaştırılması" adlı tez çalışması Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ başarı ile hazırlanmıştır.

Danışman

Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Celalettin BAŞYİĞİT
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Metin DAVRAZ
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR



TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek projede yer aldığını beyan ederim.

Nanh Ridha Faisal FAİSAL



İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| İÇİNDEKİLER..... | i |
| ÖZET..... | iii |
| ABSTRACT | iv |
| TEŞEKKÜR..... | v |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | vi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | viii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Nano Yapıtaşları – Nano Yapılı Malzemeler | 2 |
| 1.2. Beton ve Nanopartikülleri..... | 5 |
| 1.3. Nanomalzemelerin İnşaat Sektöründe Uygulama Alanları..... | 9 |
| 1.4.2. Silis dumanı | 11 |
| 1.5. Nanopartiküller..... | 13 |
| 1.5.1. Fumed silika | 13 |
| 1.5.2. Çökeltilmiş silika | 15 |
| 1.6. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı | 15 |
| 1.7. İnce Agrega | 17 |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ..... | 18 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 25 |
| 3.1. Materyal..... | 25 |
| 3.1.1. Fumed silika | 25 |
| 3.1.2. Çökeltilmiş silika | 26 |
| 3.1.3. Uçucu kül | 27 |
| 3.1.4 Silis Dumanı..... | 27 |
| 3.1.5. Portland Çimentosu | 29 |
| 3.1.6. Akışkanlaştırıcı | 29 |
| 3.1.7. İnce agrega..... | 30 |
| 3.1.8. Su..... | 31 |
| 3.2. Yöntem | 31 |
| 3.2.1 Kıvam Tayini | 31 |
| 3.2.2. Priz Süreleri..... | 32 |
| 3.2.3. Harç karışımları..... | 35 |
| 3.2.4. Fiziksel özellikleri (Tahribatsız yöntemler)..... | 38 |
| 3.2.4.1. Su emme oranının belirlenmesi | 38 |
| 3.2.4.2. Kapilarite katsayısının belirlenmesi | 38 |
| 3.2.4.3. Ultrasonik dalga hızı | 39 |
| 3.2.5. Mekanik özellikler | 40 |
| 3.2.5.1. Eğilme dayanımı deneyi | 40 |
| 3.2.5.2. Basınç dayanımı deneyi..... | 41 |
| 3.2.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinin elde edilmesi..... | 42 |
| 3.2.7. Aktivite İndeksi Hesaplamaları..... | 43 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI | 44 |
| 4.1. Fiziksel özelliklerin sonuçları..... | 44 |
| 4.2. Mekanik özelliklerin sonuçları..... | 46 |
| 4.3. Taramalı Elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri | 50 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 4.4. Aktivite indeksi..... | 51 |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR | 52 |
| KAYNAKLAR | 55 |
| EKLER..... | 59 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 60 |



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİMENTOLU KOMPOZİTLERDE MİKRO VE NANO MİNERAL KATKILARIN PERFORMASYONLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Nanh Ridha Faisal FAISAL

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN

İnşaat mühendisliğinde 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 yapı malzemelerinin mukavemet ve durabilite özellikleri iyileştirilerek yeni fonksiyonlar kazanabilmektedir.

Bu çalışmanın öncelikli amacı; farklı oranlarda nano malzemeler kullanılarak elde edilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımı özelliklerini incelemek ve nano mineraller kullanarak agrega-çimento hamuru arasında aderansın kuvvetlenmesini sağlamaktır. Nano malzemelerin kullanımı ile reaktif silisin çimento yapısında oluşan C-S-H jelleri artarak aderansın artması sağlanmaktadır. Bununla birlikte nano-partikül katkılı beton üretimi konusunda yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Yapılan çalışma ile bu konuda ülkemiz literatürüne katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu tez kapsamında çimento harcının kıvam tayini, priz başlangıç ve bitiş sürelerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada %1, %2 ve 3% oranlarında nano katkıları kullanılarak 9 farklı karışım yapılmıştır. Bu karışımlarda su-bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Numunelerde basınç dayanımı ve eğilme testleri için 40×40×160 mm prizma harçları hazırlanmış ve 7, 28 ve 90' ıncı günlerde fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre mikro ve nano içeren çimento harcının karıştırma süresine bağlı olarak mineral katkı maddesi içermeyenlere kıyasla farklılık gösterdiği ve buna bağlı olarak kıvam tayini ile priz süresini iyileştirmek için kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarının da değiştiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çimento, kompozit, nano, fumed silika, çökeltmiş silika.

2019, 60 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

COMPARISON OF PERFORMATIONS OF MICRO AND NANO MINERAL ADDITIVES IN COMPOSITES WITH CEMENT

Nanh Ridha Faisal FAISAL

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Department**

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN

Developments in nanotechnology and special in civil engineering are closely followed and possible new areas of application are tried to be determined. The use of nanoparticles in building materials is getting more and more interesting every day. With the use of nanoparticles, it is possible to gain new functions in materials not only to improve properties such as strength, durability.

The primary purpose of this study is; to examine the bending and compressive strength properties of the samples obtained by using nano materials at different ratios and to strengthen the adherence between sand and cement-mortar by using nano minerals. Nano materials and reactive silica increase the adherence by increasing the C-S-H gellies formed in the cement structure. However, studies on the production of nano-particle reinforced concrete are limited and it is aimed to contribute to our country literature in this regard.

In this thesis, the effect of cement mortar on the determination of the consistency and the start and end times of the cement mortar were investigated. This thesis is 9 a mixture of different mixtures. In these mixses, Nano admixtures were used with 1%, 2% and 3% ratios, increased by mortar cement. The consistency determination, settling time, pressure and bending behaviors of the nano admixtures which are substituted under the influence of high volume of micro admixtures are investigated in the prepared samples with low water content. The water-binder is kept constant. In the samples, 40×40×160 mm prismatic slurry were prepared for compressive and bending strength tests and subjected to experiments on days 7, 28 and 90.

According to the results, it was seen that the amount of superplasticizer used for improving the consistency determination and setting time varies depended on the mixing time of the micro and nano-containing cement mortar.

Keywords: Cement, composite, nano, fumed silica, precipitated silica.

2019, 60 page

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimi yapabilmem için gerekli desteği sağlayan Süleyman Demirel Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Bu çalışmada beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN'a tezimin hazırlık aşamasından sonuçlanmasına kadar her aşamasında tüm bilgi ve tecrübesiyle ışık tutan ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli hocam Prof. Dr. Metin DAVRAZ'a ve Türkçe düzenlemesinde değerli hocam Prof. Dr. Ayşen DAVRAZ en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca, tezimin deneysel çalışmaları için SDÜ Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma Uygulama Merkezi imkanlarını kullanmama izin veren saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN ve Prof. Dr. Metin DAVRAZ'a tekrar teşekkür ederim. Tezimin deneysel çalışmalarında yardımlarını benden esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Ali Ekrem AKDAĞ ve merkez çalışanlara teşekkürü borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem, babam, kardeşlerime şükranlarımı sunarım.

Bütün çalışmam boyunca bana destek veren burada isimlerini yazamadığım arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Nanh Ridha Faisal FAİSAL
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Nanoteknoloji yaklaşımları..... | 2 |
| Şekil 1.2. Beton bileşenlerinin tane boyutu ve özgül yüzey alanı..... | 5 |
| Şekil 1.3. Betonun performansını belirleyen nanoyapılar | 7 |
| Şekil 1.4. Saf çimento harcının (A), nanosilika içeren çimento harcının (B) ve sentetik C-S-H içeren eden çimento harcının (C) şematik hidrasyon gelişimi..... | 8 |
| Şekil 1.5. Nanoteknolojinin kullanım alanlarına örnekler | 9 |
| Şekil 1.6. Fumed silika üretiminin akış şeması..... | 14 |
| Şekil 3.1. Çimento harcı bileşenlerinin tane boyutu ölçeği | 25 |
| Şekil 3.2. Fumed silika görüntüsü..... | 26 |
| Şekil 3.3. Çökeltmiş silika görüntüsü..... | 26 |
| Şekil 3.4. Soma termik santrali | 27 |
| Şekil 3.5. Eti Elektrometalarji A.Ş.'ne ait fabrika..... | 28 |
| Şekil 3.6. GÖLTAŞ –Isparta çimento fabrikası | 29 |
| Şekil 3.7. Akışkanlaştırıcı Master Rheobuild 1000T..... | 30 |
| Şekil 3.8. Kıvam tayini (Vicat cihazı) | 32 |
| Şekil 3.9. Priz süresinin belirlenmesinde kullanılan Vikat cihazı | 32 |
| Şekil 3.10. Çimento harcının priz sonu görüntüsü | 34 |
| Şekil 3.11. Kullanılan kontrol karışımlarının görüntüsü..... | 36 |
| Şekil 3.12. Kullanılan nano (%2FS+%1PP) karışımlarının görüntüsü..... | 36 |
| Şekil 3.13. Prizma kalıpları ve üretilen numuneler | 37 |
| Şekil 3.14. Numunelerin kür havuzu içindeki görüntüsü..... | 37 |
| Şekil 3.15. Kapilarite deney görüntü..... | 39 |
| Şekil 3.16. Ultrasonik dalga hızı (V_p) numunesi ölçüm görüntüsü. | 39 |
| Şekil 3.17. Eğilme numunesi görüntüsü | 41 |
| Şekil 3.18. Basınç dayanımı testi..... | 42 |
| Şekil 3.19. QUANTA FEG 50 SEM cihazı görüntüsü | 43 |
| Şekil 4.1. Su emme testi sonuçları | 45 |
| Şekil 4.2. Kapilarite katsayısı sonuçları | 45 |
| Şekil 4.3. Ultrasonik test sonuçları..... | 46 |
| Şekil 4.4. Eğilme dayanımı sonuçları..... | 48 |
| Şekil 4.5. Basınç mukavemeti dayanımı testi | 48 |
| Şekil 4.6. Basınç (fc) ve eğilme (fcf) dayanımları (28 günlük)..... | 49 |
| Şekil 4.7. Basınç dayanımı (fc) ve ultrasonik dalga hızı (V) (28 günlük) | 49 |
| Şekil 4.8. Örneklerin SEM görüntüleri (a): Kontrol örneği (b):2. grup 25UK (c):6. grup %12UK-%10SD-%3PS (d): 8.grup %12UK-%10SD-%1PS-%2FS | 50 |
| Şekil 4.9. Basınç dayanımı ve aktivite indeksi (28 günlük)..... | 51 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 1.1. Yapılarda kullanılan nanomalzemeler | 6 |
| Çizelge 1.2. Yapılarda nanoteknoloji uygulamaları..... | 10 |
| Çizelge 1.3. Fumed silika malzemesinin fiziksel özellikleri..... | 14 |
| Çizelge 1.4. Çökeltilmiş silika malzemesinin fiziksel özellikleri..... | 15 |
| Çizelge 3.1. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri | 27 |
| Çizelge 3.2. Silis dumanı kimyasal kompozisyonu | 28 |
| Çizelge 3.3. Silis dumanı fiziksel özellikler | 28 |
| Çizelge 3.4. Isparta Göлтаş çimento A.Ş. Portland çimentosu özellikleri..... | 29 |
| Çizelge 3.5. Akışkanlaştırıcı teknik özellikleri..... | 30 |
| Çizelge 3.6. Silis kumunun (standart kum) tane büyüklüğü dağılımı | 31 |
| Çizelge 3.7. Süleyman Demirel Üniversitesi içme-kullanma suyu analizleri | 31 |
| Çizelge 3.8. Kıvam tayini için kullanılan çimento harçlarının karışım oranları .. | 33 |
| Çizelge 3.9. Priz süresinin belirlenmesi için kullanılan harcın karışım oranı | 34 |
| Çizelge 3.10. Karışım miktarları (1 m ³ için)..... | 35 |
| Çizelge 3.11. Dalga hızına bağlı beton kalite sınıflaması | 40 |
| Çizelge 4.1. Karışımların su emme ve kapilarite katsayısı değerleri..... | 44 |
| Çizelge 4.2. Ultrasonik dalga hızı bulguları 28 ve 90 günlük..... | 46 |
| Çizelge 4.3. Basınç mukavemeti (f _c) ve Eğilme dayanımı(f _{cf}) ve test değerleri ... | 47 |
| Çizelge 4.4. 28 ve 90 günlük aktivite indeksi değerleri..... | 51 |
| Çizelge A.1. Kıvam tayini karışımının miktarları (mm) | 59 |
| Çizelge A.2. Priz başlangıcı ve sonu değerleri | 59 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| A _i | Aktivite indeksi |
| C _A | Kapilarite katsayısı |
| C-S-H | Kalsiyum-silika-hidrat |
| f _{c28} | Basınç dayanımı 28 günlük |
| f _{c7} | Basınç dayanımı 7 günlük |
| f _{c90} | Basınç dayanımı 90 günlük |
| f _{cf28} | Eğilme dayanımı 28 günlük |
| f _{cf7} | Eğilme dayanımı 7 günlük |
| f _{cf90} | Eğilme dayanımı 90 günlük |
| FS | Fumed silika |
| MPa | Megapaskal |
| N | Newton |
| N/mm ² | Newton/milimetrekare |
| Nm | Nano meter |
| PÇ | Portland çimentosu |
| PP | Çökeltmiş silika |
| SA | Süper akışkanlaştırıcı |
| SD | Silis dumani |
| SEM | Taramalı elektron mikroskop |
| UK | Uçucu kül |
| V _p | Ultrasonik ses dalgası |
| WA | Su emme |
| µm | Mikro meter |

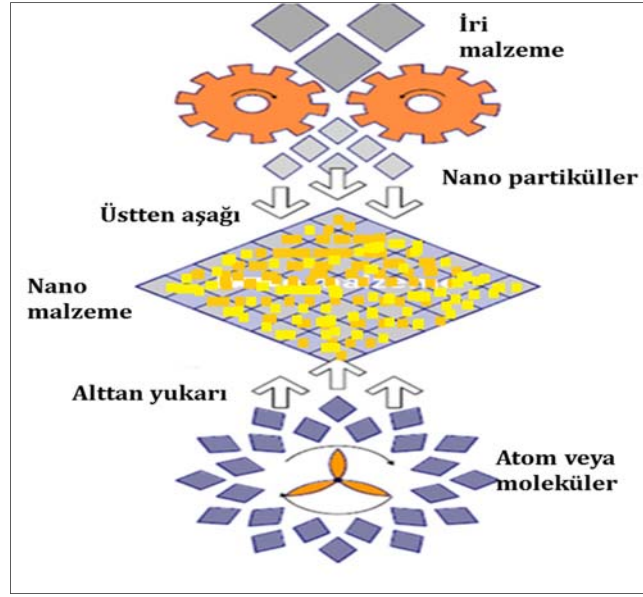
1. GİRİŞ

Nanoteknoloji endüstrideki gelişmelerle birlikte pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanoteknoloji, nano ölçekteki maddelerin anlaşılmasını, modellenmesini, kontrol edilmesini araştıran ve bu kapsamda ürün özelliklerinin gelişmesini amaçlayan bir bilim alanı olarak ifade edilebilir (Birgisson vd., 2012). Nanoteknolojinin amaçları aşağıda verilmiştir (Duran, 2015).

- ✓ Nanometre ölçekli yapıların analizi,
- ✓ Yeni nano ölçekli fonksiyonel malzemeler oluşturulması,
- ✓ Nanometre boyutundaki yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması,
- ✓ Nano hassasiyetli cihazların geliştirilmesi,
- ✓ Nano ölçekli cihazların geliştirilmesi,
- ✓ Nano boyuttaki maddenin kontrol edilmesi,
- ✓ Uygun yöntemler ile nanoskopik ve mikroskopik dünya arasındaki bağın kurulmasıdır.

Nanoteknoloji, nano ölçeğinde atom üstüne atom koyarak cisimler yaratmayı, elmas benzeri karbon kristalleriyle, bilye yatakları ve eksenler oluşturmayı amaçlar. Bu sayede çok hafif, yüksek mukavemetli, akıllı, çok ucuz ve temiz materyaller elde edilebilir.

Nanoteknoloji, “üstten aşağı (top down)” ve “alttan yukarı (bottom up)” olarak ifade edilen iki yaklaşımı dikkate alır. Şekil 1.1’de görüldüğü gibi “üstten aşağı” yaklaşım büyük ebatlarıdaki maddelerin nano ölçek seviyesine getirilmesidir. “Alttan yukarı” yaklaşım ise atomik veya moleküler seviyeden nano ölçek seviyesine çıkılmasıdır. Bu yaklaşım “moleküler teknoloji” yada “moleküler üretim” olarak da bilinmektedir (Birgisson vd., 2012).



Şekil 1.1. Nanoteknoloji yaklaşımları (Birgisson vd., 2012)

Partikül üretiminde kullanılan yöntemlerin yukarıda açıklanan ayırım dışında fiziksel veya kimyasal temelli olarak da iki ayrı sınıflandırılması mümkündür. Mekanik enerjinin kullanıldığı gibi fiziksel özelliklerin ön plana çıktığı yöntemler fiziksel temelli ve kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yöntemler ise kimyasal temelli olarak kabul edilmektedir (Wolfgang, 2007).

Türkiye'de aktif biçimde nanoteknolojiden yararlanan kuruluşların sayısı çok azdır. Nanoteknoloji ile ilgili kuruluşlar, genellikle enerji, otomotiv, savunma, havacılık, tekstil, kimya ve inşaat ile ilgili çalışmalara odaklanmakta ve bu alanlarda nanoteknolojiyi kullanmaya çalışmaktadırlar. Nanoteknoloji araştırma merkezleri kurulmakta ve araştırma etkinlikleri devam etmektedir. Nanoteknolojinin yapı malzemelerine özellikle de çimento esaslı malzemelere adaptasyonu ile beton biliminin daha da ileri gideceği aşikardır (Özbora vd., 2014).

1.1. Nano Yapıtaşları – Nano Yapılı Malzemeler

Nanoyapıtaşları, moleküler düzeyde malzeme davranışını, makro-işlevsel düzeyde ise binaların, altyapı tesislerinin ve mühendislik yapılarının performansını iyileştiren değişikliklere olanak tanır. Nano-değişime uğrayan

yüksek performanslı yapı malzemeleri ve sistemleri, mukavemeti daha yüksek, daha dayanıklı, daha kalıcı, daha hızlı inşa edilebilen ve çevresel etkisi azaltılmış olarak nitelendirilir (Yeğınobalı, 2007). Nano yapıtaşları, tuğla ve harcın yüksek binalar inşa etmek için kullanıldığı gibi, nano yapılar ve cihazlar oluşturmak amacıyla da kullanılır. Nanoteknolojiyi kontrollü ve yararlı uygulamalara yerleştirebilmek için iyi tanımlanmış yapı taşlarının oluşturulması ve bunların fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklerinin anlaşılması gerekmektedir (Duran, 2015). Nanoteknolojinin önümüzdeki yıllar içerisinde farklı sektörlerde etkili olabileceği değerlendirilen uygulama alanlarından bazıları:

- ✓ Nanoyapılı düzenlenmiş malzemeler,
- ✓ Yüksek performanslı yapısal malzemeler,
- ✓ Özel kaplamalar, boyalar ve ince filmler,
- ✓ Çok fonksiyonlu malzemeler ve bileşenler,
- ✓ Yeni üretim teknikleri, cihazlar ve kontrolleri,
- ✓ Akıllı yapılar ve mikro/nano sensörlerin kullanımı,
- ✓ Entegre monitörleme (gözleme) ve tanıma sistemleri,
- ✓ Yakıt pilleri, iletişim ve bilgisayar cihazları olarak sınıflandırılmaktadır.

Nanoteknolojinin inşaat sektöründeki uygulamaları çok sınırlı olsa da, günümüzde bazı alanlarda uygulamalara başlanmıştır. Son zamanlarda bazı nano malzemeler ve ürünler kullanılmakta veya endüstriye adapte edilmek üzere hazır bekletilmektedir. İnşaat sektöründe nanoteknolojinin uygulanamaması yönünde en büyük engel olarak, sektör içerisinde çalışanların nanoteknoloji uygulamalarının farkında olmaması gösterilmektedir. İnsan saçının kalınlığının yaklaşık 80 bin nanometredir. Bir bilya ile dünya çapı arasındaki oran bir nanometre ile bir metre arasındaki oran ile aynıdır. Nano ölçekteki maddelere “nanomalzeme” veya “nanopartikül” denilmektedir. Maddeler nano ölçekte genel özelliklerinden farklı özellikler taşıyabilir. Bu özellikler manyetik özellik, yalıtım özelliği, iletkenlik, kimyasal reaktivite, optik özellik vb. olabilmektedir (Birgisson vd., 2012).

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, durabilite gibi özellikleri iyileştirilmekle kalmamakta, aynı zamanda fotokatalitik basınç algılama gibi yeni fonksiyonlar kazanması mümkün olmaktadır (Jayapalan vd., 2012; Lackhoff, 2003; Hui vd., 2004).

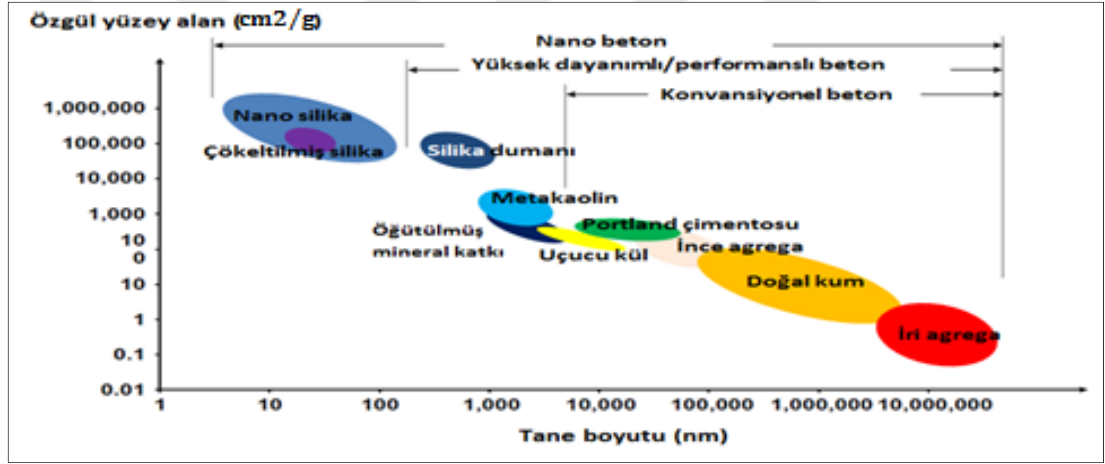
Son yıllarda yapı malzemesi alanında, özellikle de çimento esaslı malzemelerde nanoteknolojinin farklı uygulamalarıyla ilgili çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Nanoteknoloji, çok disiplinli beton biliminin betonun davranışını tüm detaylarıyla açıklamasını, özelliklerini tasarlamasını, yapı malzemelerinin üretim ve ekolojik maliyetlerini düşürmesini mümkün kılmaktadır (Kawashima, 2012).

Nanomalzemesinin 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 (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) tarafından kurulmuş TC 197-NCM verilebilir (Falikman ve Petushkov, 2012).

Betona nanopartikül veya nanotüp gibi malzemeler ilave edilerek, malzeme davranışı kontrol edilebilirken yeni özellikler kazanması da sağlanmaktadır. Nano boyutta yapılan değişiklikler kapsamında çimento tanelerine, çimento fazlarına, agregalara veya katkılara (nano boyuta sahip olanlar da dahil olmak üzere) molekül aşılması söz konusu olabilmektedir. 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 anlaşılmasıyla malzemelerin makro boyuttaki özellik ve performansları kontrol edilebilir.

1.2. Beton ve Nanopartikülleri

Beton, çok fazlı kompozit bir malzemedir. Amorf faz yapısında olan beton, nano ve mikro ölçekte hidrasyon ürünleri içermektedir. Şekil 1.2'de beton bileşenlerinin tane boyutları ve özgül yüzey alanları görülmektedir. Şekilden konvansiyonel betonun nanopartikül içermediği sonucu çıksa da hidrasyon ürünü olan C-S-H jelleri, jel boşluklarındaki su ve kimyasal katkıların aslında nano ölçekteki maddeler olduğu bilinmektedir. Günümüzde beton ve çimentoda nanoteknoloji konusunda araştırma yapan bilim insanları daha çok hidrasyon reaksiyonuna ve nanopartiküllerin beton özellikleri üzerindeki etkilerine yoğunlaşmıştır (Birgisson vd., 2012).



Şekil 1.2. Beton bileşenlerinin tane boyutu ve özgül yüzey alanı (Sanchez ve Sobolev, 2010)

Diğer sektörlere göre nanoteknolojik gelişmelerin betonda geri kalmasının ve yavaş ilerlemesinin başlıca nedenleri:

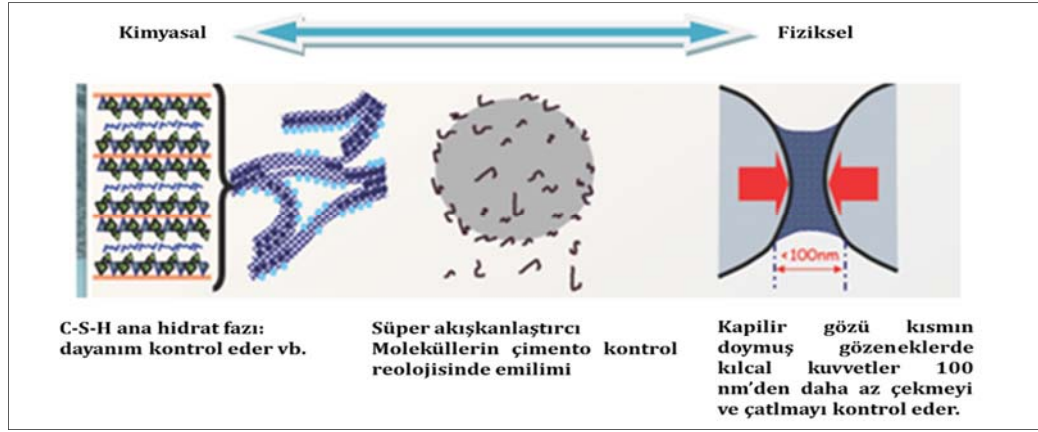
- ✓ Beton özelliklerinin nano ölçekte yeterince anlaşılması ve araştırılması olmaması,
- ✓ Nano gelişmelerin ve potansiyel modifikasyonların beton üzerinde olası etkilerinin anlaşılması olmaması,
- ✓ Çok disiplinli çalışmaların yetersizliği,
- ✓ Ar-Ge çalışmalarının masraflı olması ve ürün bazında maliyet getireceğinin düşünülmesidir.

Yapılarda kullanılan nanomalzemeler Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Yapılarda kullanılan nanomalzemeler (Birgisson vd., 2012)

| Nanomalzeme | Yapı Malzemeleri | Beklenen Faydalar |
|---|-------------------------|---|
| Karbon nanotüpler CNT | Beton Seramik | Sağlamlık, Çatlama önleme Geliştirilmiş mekanik ve termal özellikler Etkili elektron iletimi |
| SiO ₂ Silisyum dioksit nano parçacıklar | Beton Seramik Cam | Mekanik mukavemete katkı Soğutma Ateşe dayanıklılık ve tutuşmazlık Yansıma önleme |
| TiO ₂ Titanyum dioksit nano parçacıklar | Beton Cam | Hızlı hidrasyon Hidrasyon düzeyini artırma Kendi kendini temizleme Süper su emicilik Buğulanma önleme |
| Fe ₂ O ₃ Demir III oksit nano parçacıklar | Beton | Dayanım gücü artırma Aşınmaya dayanıklılık |

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-SiO₂, Nano-Al₂O₃, Nano-TiO₂ veya Nano-Fe₂O₃ gibi nanopartiküllerin kullanımınıdır. Hidrasyon sürecinin hızlanması nanopartiküllerin reaktif yüzeylerinde gerçekleşen reaksiyonlarla ilgili olduğu için bu partiküllerin yüzey alanları veya boyutları çimento hidrasyon kinetiği açısından önem teşkil etmektedir (Thomas vd., 2009). Şekil 1.3'de betonun performansını belirleyen nanoyapılar verilmiştir.



Şekil 1.3. Betonun performansını belirleyen nanoyapılar (Birgisson vd., 2012)

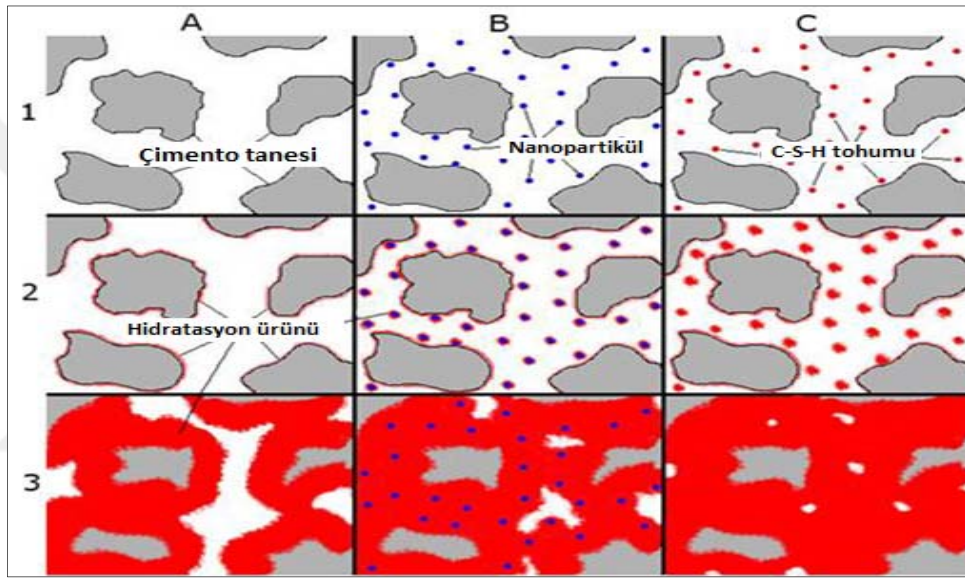
Boyutları nanometrelerle ifade edilebilen bu nanopartiküller çok geniş reaktif yüzey alanları oluştururken, ortamda çok sayıda taneciklenme noktasının mevcut olmasını sağlar ve taneciklenme reaksiyonları hızlı bir şekilde bu noktalarda başlayabilir. Nano-SiO₂ gibi partiküllerin puzolanik reaksiyonla C-S-H jeli oluşumuna katkıda bulunmasında olduğu gibi, bu nanopartiküllerin çimento hamurunun bileşenleriyle reaksiyona girme potansiyelleri yüksek olduğu için ilave tanecik oluşumu da söz konusu olmaktadır (Land ve Stephan, 2012). 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 taneciklenme reaksiyonlarına ihtiyaç kalmamakta, böylece çimentonun hidratasyon süresi kısalmaktadır (Nicoleau, 2011; Porro vd., 2005).

Nanopartikül ilavesiyle hidratasyon kinetiğinin iyileştirilmesine çalışılan her iki yöntemde de, hidratasyon ürünlerinin tanecikleri sadece çimento tanelerinin üzerinde değil aynı zamanda bu nanopartiküllerin üzerinde ve çimento taneleri arasında da oluşmaktadır (Şekil 1.4). Çimento hidratasyon ürünleri bu tanecikler 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 iç yapının oluşumu kısa sürede gerçekleşir. Bu şekilde, daha

boşluksuz, erken yaşta yüksek basınç mukavemetine sahip çimento esaslı malzemelerin elde edilmesi mümkün olabilir (Björnström vd., 2004; Raki vd., 2010).

Portland çimentosunda dört ana bileşen mevcuttur :

- 1- Trikalsiyum silikat (C_3S)
- 2- Dikalsiyum silikat (C_2S)
- 3- Trikalsiyum alüminat (C_3A)
- 4- Tetrakalsiyum alüminoferrit (C_4AF)



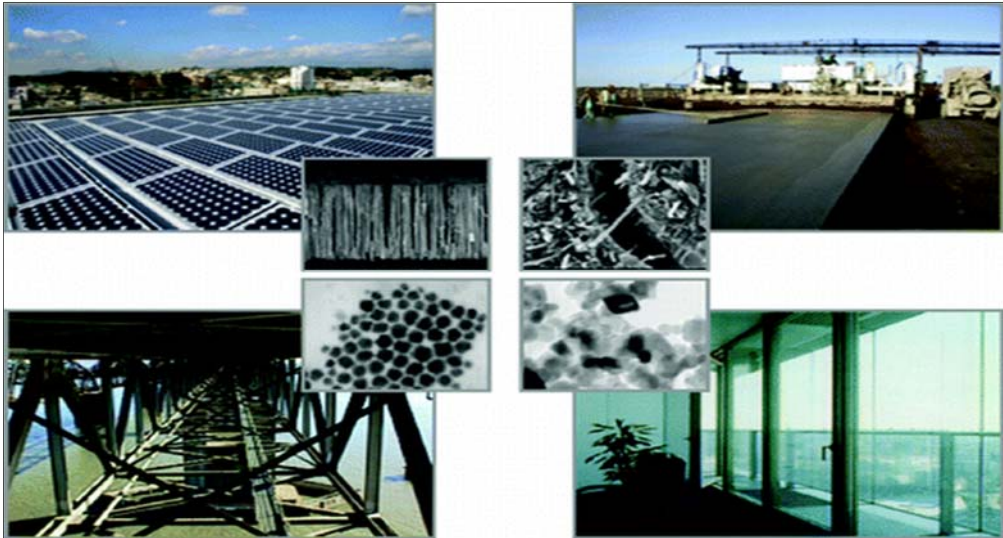
Şekil 1.4. Saf çimento harcının (A), nanosilika içeren çimento harcının (B) ve sentetik C-S-H içeren eden çimento harcının (C) şematik hidratasyon gelişimi (Thomas vd., 2009)

Bu bileşenler, çimento kimyasında kullanılan kısaltmalarla, sırasıyla C_3S ($3CaO.SiO_2$), C_2S ($2CaOSiO_2$), C_3A ($3CaO,Al_2O_3$) ve C_4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) olarak gösterilir. Çimento bileşenleri, basit oksitler halinde bulunmamakla birlikte, kimyasal analiz sonuçları oksit miktarları olarak verilir. Bu oksit analizinden elde edilen değerler, bir çimentodaki ana bileşenlerin miktarlarını, "Bogue Denklemleri" adı verilen formüller vasıtasıyla hesaplamakta kullanılır (Neville, 1981).

1.3. Nanomalzemelerin İnşaat Sektöründe Uygulama Alanları

Beton, dünyada en yaygın kullanılan inşaat malzemesidir. Nanomalzemeler beton sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin köprüler, barajlar, prefabrik elemanlar ile temel ve duvar malzemeleri vb. alanlarda kullanılmaktadır (Şekil 1.5).

İnşaat sektöründe kullanılan inşaat malzemeleri yerine, yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesi, farklı boyutta malzemelerin modellenip üretilmesi, çok fonksiyonlu malzemeler, aktif, kendini adapte eden malzemeler, polimerik malzemeler, çimento nanokompozitleri gibi akıllı inşaat malzemelerinin hayatımıza girmesi nanoteknoloji kullanımıyla mümkün olacaktır. Beton ürünlerinin genellikle uzun ömürlü olması amaçlanmaktadır. Ancak, yapıların da belirli bir servis ömrü bulunmaktadır. Bu servis ömrü sonunda yapılarda kullanılan malzemelerin geri dönüştürülebilir olması arzu edilmektedir. Nano malzeme kullanımı ile birlikte geri dönüşüm noktasında daha başarılı olunacağı belirtilmektedir (Yeğinobalı, 2007). Yapılarda kullanılan nanoteknoloji uygulamaları Çizelge 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.5. Nanoteknolojinin kullanım alanlarına örnekler (Lee vd., 2010)

1.4. Mikropartiküller

1.4.1. Uçucu kül

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık ürünüdür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Uçucu kül rutubetli ortamlarda kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek silikat hidrat oluşturan yarı kararlı alümin silikatlar içerir (Yılmaz, 1992). Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur. Ancak, toplam uçucu kül miktarının sadece %6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de kömür yakan 11 enerji santrali bulunmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton civarındadır. Betonda uçucu kül kullanımının iki ana nedeni vardır:

- 1-Beton maliyetlerini düşürmek,
- 2-Taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini iyileştirmek.

Çizelge 1.2. Yapılarda nanoteknoloji uygulamaları (Birgisson vd., 2012)

| Yapı ve Tasarım Uygulamaları | Sürdürülebilirlik Uygulamaları | Bilişim Uygulamaları |
|---|--|---|
| -Bina uygulamaları Yeni malzemeler cam, ahşap, çelik kompozitler seramik, beton, çelik yalıtım | Çevre uygulamaları CO ₂ salınımı İşlenmemiş maddeler Geri dönüşüm Beton Kirlilik önleme Bina yüzeyi | Bilgi entegrasyonuna yönelik uygulamalar Sanal tasarım ve inşaat artırılmış gerçeklik durum izleme Yapı bilgi modelleme görsel takip bina otomasyonu Akıllı binalar |
| -Altyapı uygulamaları Gelişmiş malzemeler ile yüksek performanslı yapılar (otoyol ve köprü) -Kompozitler beton/çimento, çelik yeni malzemeler ve cihazlar ile akıllı yapılar (yük akışı izleme) betona gömülü/sabitlenmiş cihazlar akıllı malzemeler beton, çelik | Enerji Uygulamaları Enerji depolama Kağıt pil Enerji üretme Güneş pili | Teknoloji entegrasyonuna yönelik uygulamalar Sensör RFID-radyo frekans tanımlama GIS-coğrafi bilgi sistemi GPS- küresel konumlandırma sistemi Wi-fi- kablosuz ağ |

Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilmesi, kullanılabilir miktarda, gerekli nakliye miktarına ve istenilen tasarıma bağlıdır (Yeğinoğlu, 2007). Uçucu kül hidratasyon ısısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar. Uçucu külün kimyasal bileşimi, tane boyut dağılımı, inceliği, puzolanik aktivitesi ve betonun kür koşulları, uçucu küllü betonun mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir. ASTM-C 618'e göre uçucu kül, iki ana kategoriye ayrılmaktadır; Bunlar F ve C tipidir. F tipi uçucu kül genellikle %10'dan daha az CaO içerir. Buna karşın C tipi uçucu kül, %15'ten %35'e kadar CaO içerir. Diğer yandan F tipi uçucu kül antrasit ve bitümlü kömürün yanmasından üretilir, bu da düşük kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılır. C tipi uçucu kül ise diğer linyit ve bitümlü olmayan kömürün yanmasından elde edilir. Yüksek kalsiyum içeriğine bağlı olarak C tipi uçucu küller puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcı özelliğe de sahiptir. Betonda uçucu kül kullanımının erken yaşlarda yavaş dayanım kazanmasına yol açtığı iyi bilinmektedir. Betonda uçucu kül kullanılma sebepleri aşağıda sıralanmıştır;

- ✓ Termik santrallerin atığıdır.
- ✓ Küresel yapısı ile betonun işlenebilirliğine olumlu etkisi vardır.
- ✓ Su ihtiyacını azaltır.
- ✓ Su/Çimento oranının yükselmesi halinde kömür tanecikleri üst tabakaya çıkabilir (Yılmaz, 1992).

1.4.2. Silis dumanı

Silikon elementinin üretiminde, yüksek saflıktaki kuvars, elektrik fırınlarında yaklaşık 2000°C sıcaklıkta kömür yardımıyla indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Üretim işleminde çok büyük miktarı SiO'den oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO fırının soğuk bölgelerinde havayla temas etmesiyle çok çabuk yoğunlaşarak gazın içerisindeki SiO amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşür (Erdoğan, 2003).

Silis dumanı katkısı diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri agrega-hamur ara yüzey bölgesini sıkılaştırıp kuvvetlendirerek beton dayanımını arttırlar. Buna karşın belli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırması gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısıyla betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir (Yeğınobalı, 2007).

Silis dumanı katkısının beton dayanımına olan olumlu etkisi agrega hamur ara yüzeyini kuvvetlendirmesinden dolayıdır. Diğer taraftan en önemli faktörün daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşması olduğu da öne sürülmektedir. Önceki yapılan çalışmalara göre silis dumanının basınç dayanımını artırma etkisi 3 günde kendini göstermemekte, 28 gün sonra belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, akışkanlaştırıcıların birlikte kullanıldığı tüm harçlar, kontrol harçlarına göre daha iyi basınç dayanımı göstermişlerdir. Silis dumanının olumlu etkileri aşağıda verilmiştir (Khedr ve Abou-Zeid, 1994).

- ✓ Betonda yüksek basınç dayanımı elde edilmesini sağlamak,
- ✓ Taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azaltmak,
- ✓ Betonun hidratasyon ısısını azaltmak,
- ✓ Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmak,
- ✓ Sertleşmiş betondaki alkali-silika reaksiyonunu azaltmak,
- ✓ Sertleşmiş betonun sülfatlara karşı dayanıklılığını artırmaktır.

Silis dumanının olumsuz etkileri aşağıdaki verilmiştir (Breitenbiicher, 1999).

- ✓ Silis dumanı kullanılarak üretilen betonların yüksek miktarda karışım suyu ihtiyacı vardır. Bunu telafi edebilmek için su azaltıcı katkılarla birlikte kullanılmaları gerekmektedir.
- ✓ Silis dumanı çok ince taneli olduğundan ve terlemeyi azalttığından, beton yüzeyinin düzeltilmesi işlemi daha zor olabilmektedir.

- ✓ Silis dumanı kullanılması durumunda, daha çok miktarda plastik büzülme çatlağına yol açabilmektedir.
- ✓ Silis dumanı, nispeten daha koyu renkli beton elde edilmesine neden olmaktadır.

Silis dumanı kullanımının bazı avantajları ise

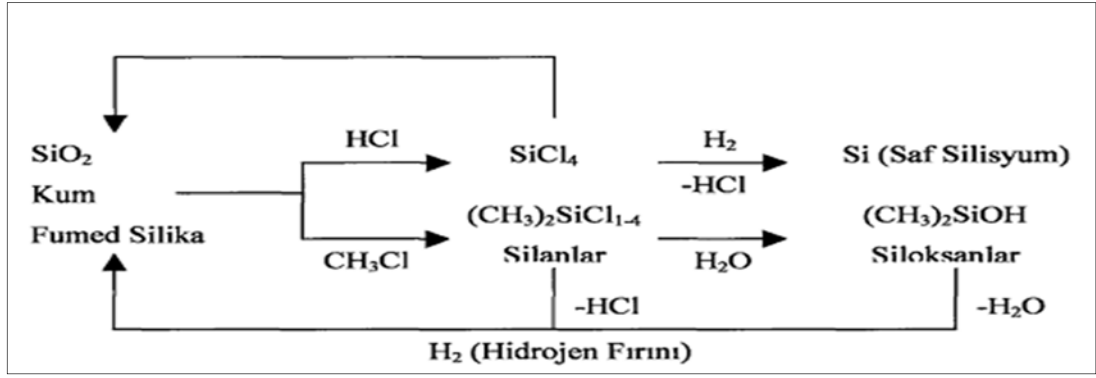
- ✓ Betonun dayanıklılığını artırması,
- ✓ Betonun basınç dayanımını artırması,
- ✓ Betonda kullanımı için öğütülmesine gerek olmaması,
- ✓ Daha az sera gazı emisyonu salınımı,
- ✓ Atık ürün olduğu için doğanın daha az kirlenmesi,
- ✓ Atıkların değerlendirilmesinde kullanılan enerjinin tasarrufudur (Khedr ve Abou-Zeid, 1994).

1.5. Nanopartiküller

Boyutu 100 nanometrenin (nm) altında olan nanopartiküller, hacimsel yapı malzemelerden çok daha farklı ve üstün olarak kabul edilen özellikler sergilemektedirler. Nanoyapılı partiküller gösterdikleri üstün özellikler sayesinde elektrik-elektronik, biyomedikal, inşaat, otomotiv ve kimya sektörleri başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır (Yeğinoğlu, 2007).

1.5.1. Fumed silika

Fumed silika, silan ve siloksan üretiminden sonra esasen bir yan ürün olarak, silan ve siloksanın yakılmasıyla elde edilmektedir. Yanma ürünü olarak elde edilen fumed silika bu hali ile endüstride kullanılabildiği gibi, hammaddeyi oluşturan kumla birlikte saf silisyum, silan veya siloksan eldesinde de kullanılabilmektedir. Fumed silikanın üretimine yönelik akış şeması Şekil 1.6'daki gibidir (Taşkın, 2003).



Şekil 1.6. Fumed silika üretiminin akış şeması (Taşkın, 2003)

Silikon tetrakloridin (SiCl_4) hidrojen fırınında $1200\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta yakılması sırasında öncelikle 10-30 nm boyutlarındaki SiO_2 parçacıkları oluşur. Fumed silika üretiminin akış şeması Çizgele 1.3'de verilmiştir (Soysal, 2002).

Çizgele 1.3. Fumed silika malzemesinin fiziksel özellikleri (Soysal, 2002)

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| Bileşim | ~%99.8 SiO_2 |
| Porozite | %85 - 90 |
| Yoğunluk | 90 - 200 kg/m^3 |
| Tanecik büyüklüğü | 5-20 nm |
| Yüzey alanı | 200-300 m^2/g |
| Gözenek çapı | 100 x 10^{-4} nm |
| Kritik basınç | 10 m bar |
| Kritik basınçta ısı iletim katsayısı | 5 mW/m.K |

Fumed silikanın endüstrideki kullanım alanları; doymamış polyesterler, kaplamalar, bilgisayar mürekkepleri ve yapıştırıcılar gibi organik ürünlerde koyulaştırıcı özellikle silikon elastomerlerden oluşan bir çok elastomerde kuvvetlendirici dolgu, kozmetik, yem ve yemek endüstrisinde kullanılan toz malzemelerde akış kolaylaştırıcı, ses ve ısı yalıtım malzemeleri olarak sıralanabilir (Soysal, 2002).

1.5.2. Çökeltmiş silika

Çökeltmiş silika, cam suyu olarak bilinen alkalin yapıdaki sıvı sodyum silikatın, bir mineral asidi (genellikle sülfirik asit) ile reaksiyonu sonucu elde edilir. Reaksiyon sonucu oluşan beyaz çökelti, filtreleme, yıkama ve kurutma işlemlerinden sonra öğütülür ve bu sayede son ürün elde edilir. Bu ürün içerisinde %86 - 88 oranında SiO₂ bulunmaktadır. Geri kalan kısım sudur. Bu suyun içerisinde reaksiyon sırasında oluşan tuzların kalıntıları ve bazı meta ksitler bulunur. Filtrasyon ve kurutma işlemlerinde uygulanan değişik yöntemler ve öğütme işlemleri sonucunda değişik malzeme özellikleri elde edilmektedir (Taşkın, 2003). Çökeltmiş silika malzemesinin fiziksel özellikleri Çizelge 1.4'de verilmiştir (Soysal, 2002).

Çizelge 1.4. Çökeltmiş silika malzemesinin fiziksel özellikleri (Soysal, 2002)

| Bileşim | ~%86-88 SiO ₂ , su, tuzlar ve metal oksitler |
|--------------------------------------|---|
| Porozite | >% 85 |
| Yığın Yoğunluğu | 160 - 320 kg/m ³ |
| Tanecik büyüklüğü | 100-500 nm |
| Yüzey alanı | 50 - 150 m ² /g |
| Gözenek çapı | 2 x 10 ⁻⁴ µm |
| Kritik basınç | 5 m bar |
| Kritik basınçta ısı iletim katsayısı | 5 mW/m.K |

1.6. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı

Akışkanlaştırıcı katkılar taze beton ve harçların işlenebilirliğini etkiler. Etkinlik derecelerine göre normal akışkanlaştırıcı (veya su azaltıcı), orta derecede su azaltıcı (mid-range) ve süper akışkanlaştırıcı (üstün akışkanlaştırıcı) olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür. Süper akışkanlaştırıcı katkı sayesinde doğru tasarlanmış beton ile kalıp kolaylıkla doldurulabilir ve zor yüzeyler düzgün olarak tamamlanabilir. Süper

akışkanlaştırıcı katkıları betona düşük su-çimento oranlarında bile yeterli işlenebilirlik kazandıran ve ayrıca çimentonun priz ve sertleşme davranışlarına önemli etki yapmayan kimyasal katkılarıdır. Süper akışkanlaştırıcı taze betonda su gereksinimini %30 oranında azaltabilmektedir (Neville, 2004). Süper akışkanlaştırıcı beton üretiminde,

- ✓ Çok düşük su/çimento oranına sahip betonlar üretmek,
- ✓ Düşük çimento dozajlı betonlar üretmek,
- ✓ Yüksek akışkanlığa sahip betonlar üretmek için kullanılabilir.

Betonun üç temel özelliği olan dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik özellikle yüksek performanslı betonlarda geliştirilmelidir. Bundan dolayı yüksek performanslı beton elde etmek için öncelikli hedef su/çimento oranını mümkün olan en düşük seviyeye azaltmak olmalıdır. İkinci şart ise betonun olabildiğince boşluksuz ve ayrışmaksızın kolayca yerleştirilebilmesidir. Bu iki şart yıllardan beri klasik beton teknolojisi için geçerli olsa da ancak süper akışkanlaştırıcının bulunmasıyla uygulanabilmiştir. Yüksek performanslı betonların gelişimi için ilave özellikler veren başka kimyasal katkı ve bağlayıcı malzemeler bulunmaktadır. Süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılan kimyasal katkıları; priz geciktiriciler, hava sürükleyiciler, viskozite arttırıcı bileşikler, pompalanabilirlik için yardımcı kimyasallar, su altı betonu üretiminde kullanılan katkıları ve korozyon önleyicilerdir. Ayrıca silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları da kullanılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcılar ile tüm bu mineral ve kimyasal katkıların uyumu, taze beton özelliklerine etkileri halen araştırılmaktadır. Çimentonun priz sürelerini fazla uzatmaması ve taze betonun sertleşmesini geciktirmemesi bakımından süper akışkanlaştırıcıların kimyasal bileşimlerinin sıradan akışkanlaştırıcılarındakinden farklı olduğu anlaşılmaktadır. Hatta bir miktar hızlandırdığı bile gözlemlenmiştir (Demirtaş, 2001).

1.7. İnce Agregada

İnce agregada (kum) miktarının ve tane boyutunun betonun işlenebilirliği üzerindeki etkisi çok önemlidir. Sabit bir çökme değeri elde etmek için ince agregada miktarı fazla olan beton karışımları daha çok karışım suyuna ihtiyaç duyarlar. Agregada irileştikçe taneciklerin toplam yüzey alanları azalır. Bunun sonucunda ise tanelerin yüzey alanını ıslatmak için ihtiyaç duyulan su miktarı da azalır. Agregada/çimento oranı arttıkça betonun işlenebilirliği azalmakta ve üstelik ince agregada miktarı arttığı için çimento ihtiyacı artmaktadır (Mindess ve Young, 1981).



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kocataşkın (1987), uçucu küller (UK) betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sönmüş kireçle hidratasyona girerek suda sertleşirler. UK'ler elektrik üreten termik santrallerden elde edilir. Genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin çok ince öğütülerek termik santral fırınında yakılması sırasında yukarıya yükselen UK'ler, bacanın üst kısmında elektrofiltreler veya siklon adı verilen toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutularak depolanırlar. Küllerin parçacıkları küresel olup çapları 1-300 µm mertebesindedir.

Topçu ve Canbaz (2001), yapmış olduğu çalışmada, PKÇ/B 32.5R çimentosu kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Numuneler 300, 350, 400 kg/m³ dozaj ve bu dozajların her biri için çimento yerine % 20 ve % 40 oranında uçucu kül katılarak elde edilmiştir. Üretim sırasında taze betonlarda çökme, ve Be, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. 7, 28 ve 60 günün sonunda yapılan deneylerle uçucu külün beton üzerindeki fiziksel ve mekanik etkileri belirlenmiştir. Sonuçları göre, UK kullanımının beton basınç dayanımını azalttığı ve UK miktarının artırılması durumunda dayanımın daha da geç kazanıldığı anlaşılmıştır.

Erdoğan (2003), çalışmasında mikro ve nano silika bileşimi malzemelerin yüksek yüzey alanı nedeniyle betonun işlenebilirliğini azalttığını söylemiştir (> 15000 m²/kg mikro silika için ve yaklaşık 100000 m²/kg veya daha fazla nano silika için yaklaşık 400 m² /kg). Yüksek inceliğin ıslanması için yüksek miktarda su gerekir, bu nedenle işlenebilirliği azaltır. İşlenebilirlik akışkanlaştırıcılar kullanılarak ayarlanabilir. Basınç mukavemeti için, mikro ve nano silika kombinasyonu betonun basınç dayanımını arttırır. Bununla birlikte, artış, pozolanik aktivite, incelik gibi birçok parametreden etkilenir. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça, sesüstü dalganın hızı daha az olmaktadır. Bilindiği gibi, betonun yoğunluğu ile basınç dayanımı arasında

belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu yüksek olan betonların basınç dayanımları da genellikle yüksek olur. Su/çimento oranı yüksek olan betonlar daha çok kapiler boşluk içerdiğinden, bu betonların yoğunluğu ve basınçları da yüksek değildir.

Lackhoff (2003), çalışmasında inşaat sektöründe, diğer bilim ve mühendislik dallarında olduğu gibi nanoteknolojideki gelişmeleri yakından takip etmekte ve olası yeni uygulama alanları belirlenmeye çalışılmaktadır. Nanopartiküllerin yapı malzemelerinde kullanımı her geçen gün daha da ilgi çekmektedir. Nanopartiküllerin kullanımıyla malzemelerin sadece mukavemet, durabilite gibi özellikleri iyileştirilmekle kalmamakta, aynı zamanda fotokatalitik, basınç algılama gibi yeni fonksiyonlar kazanması mümkün olmaktadır.

Mazloom vd., (2004), çalışmasında farklı oranlarda silis dumanı içeren bağlayıcı sistemlerin betonun taze ve mekanik özelliklerine (basınç dayanımı, elastisite modülü vb.) etkilerini incelenmiştir. Çalışmada su/bağlayıcı oranı sabit tutulup (0.35), toplam bağlayıcı içeriği 500 kg/m^3 olan beton numuneleri üretmişlerdir. Çalışmada % 0, % 6, % 10 ve % 15 oranında silis dumanı kullanılmıştır. Çalışma sonunda, silika dumanının oranı arttıkça betonun işlenebilirliğinin azaldığını, ancak 28 günlük basınç dayanımı ve sekant modülü gibi kısa vadeli mekanik özelliklerinin iyileştiğini belirlemişlerdir.

Aruntaş (2006), yapmış olduğu çalışmada, termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli incelenmiştir. UK'lerin inşaat sektöründe çok büyük kullanım potansiyelinin bulunduğunu göstermektedir. UK kullanımının özellikle çimento, beton ve yapı malzemelerinin üretiminde daha yaygın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte UK'ün zararlı ortamlara dayanıklılık, ekonomi ve çevreye etkisini inceleyen uzun süreli daha çok araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır. Türkiye'de ve Dünyada bu atığın değerlendirilmesi durumunda, enerji tasarrufu sağlanması, daha ucuz ve kaliteli malzeme üretilmesi, atık malzemenin geri dönüştürülmesiyle ülke ekonomisine katkı sağlanmasının yanı sıra hem doğal hammadde ile ekolojik

dengeinin korunması hem de çevre kirliliğinin önlenmesi mümkün görünmektedir.

Li vd., (2006), yapmış olduğu çalışmada, nano-TiO₂ ve nano-SiO₂ katkılı betonun basınç ve eğilme dayanım özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Basınç ve eğilme dayanım deneyleri için 4x4x4 cm ve 4x4x16 cm boyutlarında örnekler hazırlamış ve hazırlanan örnekler 24 saat sonunda 7-28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. 28 günün sonunda mekanik özellikleri incelenen örneklerin SEM görüntüleri çekilmiştir. Çalışma sonunda, nano-TiO₂ ve nano-SiO₂ katkılı betonun basınç ve eğilme dayanımının normal betona göre daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Elde edilen SEM görüntüleri nanopartiküllerin yalnızca dolgu maddesi olarak değil aynı zamanda aktivatör görevi yaptığını tespit etmişlerdir.

Türk vd., (2006), yapmış olduğu çalışmada çimento yerine kullanılan F sınıfı uçucu kül (UK) miktarının kendiliğinden sıkışan betonun (KSB) özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çimento yerine kullanılan farklı oranlarda F sınıfı uçucu kül miktarına (%25, 30, 35 ve 40) sahip KSB karışımları (sırasıyla KSB-I, KSB-II, KSB-III ve KSB-IV) için çökme-yayılma, t₅₀₀, L-kutusu ve V-hunisi işlenebilirlik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, karışıma giren agregalardan doğal kum ve çakıl oranları ile özel süper akışkanlaştırıcı (Viscocrete 3075) miktarı sabit, çimento yerine kullanılan uçucu kül oranlarını değiştirmişlerdir. Karışımlar için optimum işlenebilirliği, su/(çimento+uçucu kül) oranını değiştirilerek sağlanmışlardır. Üretilen numuneleri kalıptan alındıktan sonra 3, 7, 14 ve 28 gün süreyle 20 °C suda kür etmişlerdir. Numuneler üzerinde, ultra ses geçiş süresi, basınç ve yarmada çekme mukavemeti deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarının analizinden, karışımda çimento yerine kullanılan uçucu kül miktarının KSB'un dayanım özellikleri üzerine etkisinin olduğunu belirlemiştir. Sonuçta, uçucu külün maliyet ve hidratasyona olumlu etkisi gibi avantajları da dikkate alındığında, kendiliğinden sıkışan beton karışımlarında çimento yerine %30 ve/veya %40 oranlarında

uçucu kül kullanılmasının, dayanım özellikleri bakımından daha iyi olacağını tespit etmişlerdir.

Coşkun vd., (2007), yaptıkları çalışmada, agrega olarak pomza taşı, mineral katkı olarak ise silis dumanı kullanılarak elde edilen taşıyıcı hafif betonun basınç dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenliği arasındaki ilişkiye kür şartlarının etkisi araştırılmıştır. Mineral katkı olarak çimento ağırlığının %10'u oranında silis dumanı katılmıştır. 3, 7, 14 ve 28 gün 20 ± 2 °C de su kürü, hava kürü ve torba küründe bekletilen numunelerin ultrasonik ses geçirgenliği ve basınç dayanımı değerleri incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre en yüksek ultrasonik ses geçirgenliği ve basınç dayanımı değerleri, suda kür edilen numunelerde ve kür ortamları dikkate alınarak verilere lineer regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon analizi sonucunda, yüksek korelasyon katsayısı değerleri elde edilmiştir.

Dorum vd., (2010), çalışmasında referans (PÇ) ve uçucu kül katkılı çimentonun (UKKÇ) yüzey etkileşim mekanizmaları araştırılmıştır. PÇ, uçucu kül (UK) ve UKKÇ'nin fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özelliklerinin yanı sıra UK-PÇ tanelerinin elektrokinetik potansiyelleri (zeta potansiyel) belirlenmiştir. PÇ ve UK ile hazırlanan çimento pastaları 2, 7 ve 28 gün küre tabi tutulmuştur. Bu pastaların, hidrasyon sırasında mineralojik yapısını ve faz gelişimini belirlemek için termal analiz (DTA ve TG), X-ışınları difraksiyonu (XRD) ve fourier transformlu kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri yapılmıştır. Ayrıca 28 günlük mikro yapıları taramalı elektron mikroskop (SEM) ile belirlenmiş ve harç numuneleri, dayanım testleri yapılarak incelenmiştir. UK; su ihtiyacını ve priz süresini arttırırken, hidrasyon süresince açığa çıkan portlandit (Ca(OH)_2) miktarını azaltmıştır. Ayrıca UK, PÇ'ye göre farklı elektrokinetik davranışlar ve yüzey özellikleri göstermiştir. Bu farklılıklar harç örneklerinin dayanımlarını etkilemiştir.

Özbora vd., (2014), 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.

Land vd., (2012), nano teknolojiden faydalanılarak üretilen bazı nano malzemeler de beton teknolojisinin gelişmesindeki etkin rolünü edinmişlerdir. Magnetic nano-particles nano ölçek viskozite düzenleyiciler Nano TiO₂ çimento esaslı malzemeler için kullanılması planlanan veya kullanılan, araştırmacıların üzerinde zaman harcadıkları nano taneciklerin bazılarıdır. Nano tanecikler, çimento hidrasyonu ile birlikte anıldığında genellikle hidrasyon kinetiklerini hızlandırıcı bir etki olarak akla gelmektedirler. Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂, Fe₂O₃, C-S-H fazı, amorf SiO₂ gibi farklı nano tanecikler akla gelmektedir. Bahsedilen nano taneciklerin bir kısmı, hidrasyonun üzerinde devam edeceği çekirdekler meydana getirerek reaksiyonun hızlanmasına yardımcı olurken (C-S-H), SiO₂ gibi bazıları ise puzolanik reaksiyon yardımıyla hidrasyon kinetiklerinin hızlanmasına yardım ederler.

Land ve Stephan (2012), yapılan araştırmada bağlayıcı oranı olarak %10 Nano-SiO₂ içeren betonlarda 28 günlük basınç dayanımında %26 artış olduğu ve bu artışın %15 silis dumanı kullanımında ise %10 mertebesinde olduğu tespit edilmiştir. Bağlayıcı oranı olarak %5 Nano-Al₂O₃'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-ZrO₂ ilavesi sonucu geçirimsizliğin azaldığı, basınç dayanımında ve harcın mikro yapısında iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Nano ölçekteki kil partiküllerinin betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiği, klorür geçirimsizliğini ve rötresini azalttığı yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bulunmuştur.

Pekmezci ve Atahan (2014), nano bilim ışığında yaptıkları çalışmalar neticesinde beton ve yapı teknolojisindeki ilerlemeleri dört ayrı kategoride incelemişlerdir. 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 hidrasyon gelişimini ve çıkan ürünleri daha rahat gözlemleyebilme ve irdeleyebilme fırsatı doğmuştur. Bunun yanında betonun tüm fazlarının nano boyuttaki özelliklerini tayin etmek mümkün olmaktadır.

Akın ve Zia (2017), yapmış olduğu çalışmada, farklı oranlarda nano silika içeren solüsyonlarda kür edilen çimento bağlayıcılı kompozitlerin farklı yaşlarda basınç dayanımına tabi tutulması sonucu su içerisinde kür edilen numunelere göre dayanım artışının ne oranda olduğu test etmişlerdir. Geliştirilen yeni nesil kür solüsyonunda %0.5, %1, %2 ve %3 oranlarında nano silika kullanılmıştır. Üretilen bir seri numune kontrol amacıyla sadece su içerisinde kür edilmiştir. Çimento bağlayıcılı kompozitlerin üretiminde ASTM standartlarına göre F ve C sınıfı özellikler gösteren uçucu küller kullanılmıştır. Buna göre farklı özellikte uçucu kül içeren çimento bağlayıcılı kompozitlerin farklı oranlarda nano silika solüsyonu içerisinde kür edilmesi ve su içerisinde kür edilmesi sonucu gelişen dayanım artışları ortaya konmuştur. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre en yüksek dayanım değerleri %2' lik orana sahip solüsyon içerisinde kür edilen numunelerden elde etmişlerdir.

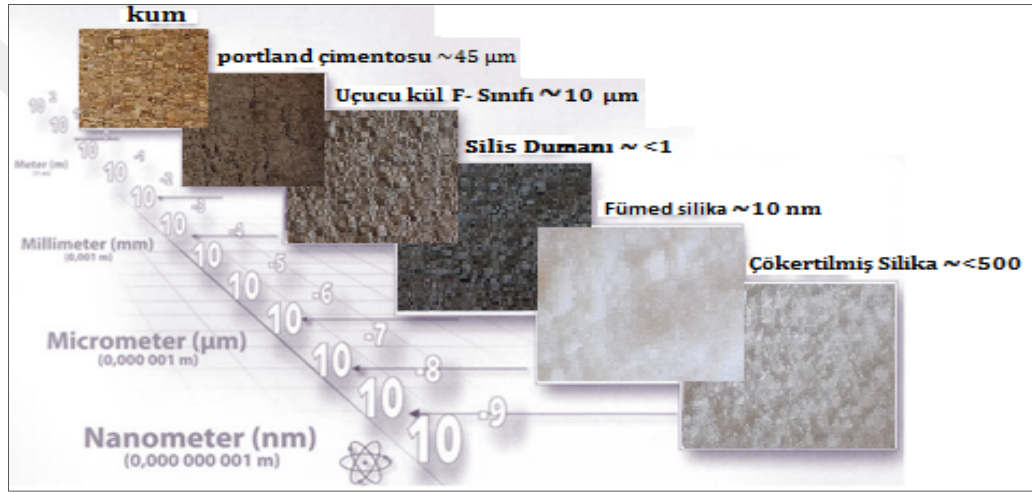
Toklu vd., (2017), yapmış olduğu çalışmada, nano silika oranını % 0'dan % 2' ye kadar % 0.25 artırarak 8 farklı numune elde etmişlerdir. Hazırlanan numunelerde su oranı düşük tutulup yüksek hacimde kullanılan uçucu külün etkisi altında nano silikatlı karışımların basınç ve eğilme altındaki davranışlarını araştırmışlardır. Numunelerde basınç dayanımı testi için 5×5×5 cm küp prizma betonlar hazırlanmış ve 1, 3 ve 7 günlerde deneylere tabi tutulmuştur. Nano silikatın değişik oranlarda ilave edildiği numunelerde tüm yaşlarda %1.5 oranında ilave edilmiş nano silikatın verdiğini belirlemişlerdir. Nano silikat oranının %1.5 dan fazla olduğu durumda karışım üzerinde olumsuz etki ettiğini belirlemişlerdir.

Yaltay (2017), çalışmasında Nano SiO₂'nin betonların basınç dayanımına olan etkisi çok yönlü olarak incelenmiştir. Nano silika (SiO₂) betonun çeşitli özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton bünyesinde çimentoyla ikame edilerek denenmekte, özellikle yüksek dayanımlı betonlarda matris özellikleri üzerinde çeşitli etkiler yapmaktadır. Nano SiO₂ çimentoyla çeşitli çalışmalarda %0-5 aralığında ikame edilerek çimento ve beton basınç dayanım değerlerini özellikle erken yaşlarda iyileştirmektedir. Nano Silikanın erken yaş dayanımına olumlu etkisi puzolanik ve filler etkisine bağlıdır ve yüksek spesifik alanının bu iki özelliği arttırmaktadır. Yaklaşık boyutu 10 nm olan C-S-H jelinin boşlukları nano silika ile daha iyi dolmaktadır. Bu da matrisin daha yoğun hale gelmesini sağlamaktadır. Nano boyutta SiO₂ C-S-H jeli içinde tanecik oluşturarak C-S-H jel tanecikleriyle sıkı bağ oluşturmakta ve böylece hidrasyon ürün yapısının entegrasyon ve stabilitesinin iyileşmektedir. Bu da uzun vadede mekanik özelliklerin ve durabilitenin artması beklentisini doğurmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada farklı oranlarda nano ve mikro katkı malzemeler kullanılmıştır. Nano katkı olarak fumed silika ve çökeltilmiş silika, mikro katkı olarak F- sınıfı uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Ayrıca çimento olarak CEM I 42,5 R, ince agrega, süper akışkanlaştırıcı ve su kullanılmıştır. Çimento harcı bileşenlerinin tane boyutu ölçeği Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çimento harcı bileşenlerinin tane boyutu ölçeği

3.1.1. Fumed silika

Çalışmada fumed silika Almanya-Cabosil Fumed silika fabrikasından temin edilmiştir. Temin edilen fumed silika tanecikleri ~10 nm boyutundadır. Çalışmada kullanılan fumed silika görüntüsü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Fumed silika görüntüsü

3.1.2. Çökeltilmiş silika

Çalışmada çökeltilmiş silika Türkiye- İzmir Egesil silika fabrikasından temin edilmiştir. Temin edilen çökertilmiş silika tanecikleri $\sim < 500$ nm boyutundadır. Şekil 3.3'de çalışmada kullanılan çökeltilmiş silika görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.3. Çökeltilmiş silika görüntüsü

3.1.3. Uçucu kül

Uçucu küllerin temin edildiği Türkiye-Manisa Soma Termik Santrali Şekil 3.4'te göstermiştir.



Şekil 3.4. Soma termik santrali

Uçucu kül tanecikleri 1-30 μm ~10 μm boyutundadır. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri (Türker ve Erdoğan,2004)

| Bağlayıcılar | Uçucu kül F-sınıfı |
|--|--------------------|
| SiO ₂ (%) | 58.82 |
| Al ₂ O ₃ (%) | 19.65 |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 10.67 |
| CaO (%) | 2.18 |
| MgO (%) | 3.92 |
| SO ₃ (%) | 0.48 |
| Kızdırma kaybı KK (%) | 0.91 |
| Özgül yüzey alanı ÖYA (cm ² /g) | 3812 |
| Özgül ağırlık ÖA (g/cm ³) | 2.08 |

3.1.4 Silis Dumanı

Silis Dumanları temin edildiği Türkiye-Antalya Eti Elektrometalarji A.Ş. fabrikası Şekil 3.5'te göstermiştir.



Şekil 3.5. Eti Elektrometalarji A.Ş.'ne ait fabrika (Etimet, 2018)

Silis dumanı tanecikleri $\sim <1 \mu\text{m}$ boyutundadır. Silis dumanı kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2.'de ve 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Silis dumanı kimyasal kompozisyonu (Etimet, 2018)

| | |
|------------------------------------|------|
| SiO ₂ (%) | 91 |
| Al ₂ O ₃ (%) | 0,58 |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 0,24 |
| CaO (%) | 0.71 |
| MgO (%) | 0,33 |
| SO ₃ (%) | 1.06 |

Çizelge 3.3. Silis dumanı fiziksel özellikler (Etimet, 2018)

| Parçacık boyutu (tipik) Kütle yoğunluğu | $<4 \times 10^{-6} \text{ in.}$ | $< 1 \mu\text{m}$ |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|
| (Üretilen) | 8- 27 lb/ft ³ | 130 - 430 kg/m ³ |
| (Çamur) | 11 - 12 lb/gal | 1320 - 1440 kg/m ³ |
| (Yoğunlaştırılmış) | 30 - 45 lb/ft ³ | 480 - 720 kg/m ³ |
| Spesifik yer çekimi | 2.2 | 2.2 |
| Yüzey alanı | 60,000 - 150,000 ft ² /lb | 13,000 - 30,000 m ² /kg |

3.1.5. Portland Çimentosu

Çalışmada GÖLTAŞ –Isparta çimento fabrikasından temin edilen Portland çimentosu (CEM I 42,5 R) kullanılmıştır (Şekil 3.6). Çimentonun özgül ağırlığı 3.10 g/cm^3 ve tanecikleri $\sim 45 \mu\text{m}$ boyutundadır.



Şekil 3.6. GÖLTAŞ –Isparta çimento fabrikası (Göltaş, 2018)

Isparta Göltaş çimento A.Ş. portland çimentosu özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir (Göltaş, 2018).

Çizelge 3.4. Isparta Göltaş çimento A.Ş. Portland çimentosu özellikleri (Göltaş, 2018)

| Klinkerin Kimyasal Özellikleri (%) | | Çimento Fiziksel Özellikleri | |
|------------------------------------|-------|--|------|
| SiO ₂ | 20.52 | Hacimsel Genleşme (mm) | ≤ |
| Al ₂ O ₃ | 4.00 | İncelik (90 μ , %) | 0.10 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.45 | İncelik (200 μ , %) | 1.10 |
| CaO | 64.28 | Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g) | 3340 |
| MgO | 1.63 | Priz Başlangıcı (dak) | 18 |
| SO ₃ | 2.53 | Priz Sonu (dak) | 24 |
| Na ₂ O+K ₂ O | 1.35 | Özkütle (g/cm ³) | 3.12 |
| Çimento Mekanik Özellikleri (MPa) | | | |
| 7 günlük Eğilme Dayanımı | 5.8 | Basınç Dayanımı | 39.3 |
| 28 günlük Eğilme Dayanımı | 7.2 | Basınç Dayanımı | 51.0 |

3.1.6. Akışkanlaştırıcı

Çalışmada betona reoplastik özellik vererek betonun erken ve nihai dayanımlarını artıran, yüksek oranda su azaltıcı/akışkanlaştırıcı Master

Rheobuild 1000T, naftalin sülfonat esaslı katkı malzemesi kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Akışkanlaştırıcı Master Rheobuild 1000T

Çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcının teknik özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Akışkanlaştırıcı teknik özellikleri (Teknoyalitim, 2018)

| Malzemenin Yapısı | Naftalin Sülfonat Esaslı |
|------------------------------|--------------------------|
| Renk | Kahverengi |
| Yoğunluk | 1,205-1,225 kg/litre |
| Klor İçeriği %(EN 480-10) | <0,1 |
| Alkali İçeriği %(EN 480-12) | <5 |

3.1.7. İnce agrega

Çimento harcı üretiminde, ince agrega olarak en büyük tane boyutu yaklaşık >2 µm olan ince agregalar (slis kumu) kullanılmıştır. İnce agregalar Limak Batı Çimento San. ve Tic. A.Ş. Trakya çimento fabrikası'ndan temin edilmiş ve TS EN 196-1 standardına göre kullanılmıştır. Agregaların kumunun tane büyüklüğü dağılımı Çizelge 3.6' da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Silis kumunun (standart kum) tane büyüklüğü dağılımı

| Kare göz açıklığı (mm) | 2,00 | 1,60 | 1,00 | 0,50 | 0,16 | 0,08 |
|----------------------------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Elekte kalan yığılımlı (%) | 0 | 7 ± 5 | 33 ± 5 | 67 ± 5 | 87 ± 5 | 99 ± 1 |

3.1.8. Su

Çalışma için Süleyman Demirel Üniversitesi şebeke suyu kullanılmıştır. Süleyman Demirel Üniversitesi içme-kullanma amacıyla açılan kuyu suyundan alınan örneklerin in-situ analizleri sonuçları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Süleyman Demirel Üniversitesi içme-kullanma suyu analizleri (SDÜ, Müh. Fak. Jeoloji Müh. Böl. Jeotermal Lab., 2013)

| Lokasyon | Yükseklik (m) | T (°C) | PH | O ₂ (mg/l) |
|-------------------|---------------|--------|------|-----------------------|
| Üniversite kuyusu | 1051 | 19,5 | 7,22 | 6,92 |

3.2. Yöntem

Bu çalışma SDÜ Doğal Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma ve Uygulama Merkez’inde yürütülmüştür. Çalışmada öncelikle kıvam tayini yapılmış ve priz süreleri belirlenmiştir.

3.2.1 Kıvam Tayini

Kıvam tayini deneyleri için vicat cihazı kullanılmıştır. Kıvam deneyi görüntüsü Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Kıvam tayini (Vicat cihazı)

Çimento harcı üretimi TS EN 196-3 standardına göre üretilmiştir. Çalışmada 22 farklı karışım oranı hazırlanmıştır. Karışımlar farklı oranlarda mikro (Uçucu kül-UK + silis dumanı-SD) ve nano (fumed silika-FS + Çökertilmiş silika-PP) malzemeler eklenerek oluşturulmuştur. Kıvam tayini için kullanılan çimento harçlarının karışım oranları Çizelge 3.8.'de verilmiştir.

3.2.2. Priz Süreleri

Priz başlangıç süresinin saptanması TS EN 196-3 standardına göre yapılmıştır. Priz süresinin belirlenmesinde kullanılan vikat cihazı Şekil 3.9'de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Priz süresinin belirlenmesinde kullanılan Vikat cihazı.

Çizelge 3.8. Kıvam tayini için kullanılan çimento harçlarının karışım oranları

| Karışım Türü | PÇ g | UK g | SD g | PS g | FS g | SA ₁ g | Su ₁ g | SA ₂ g | Su ₂ g | SA ₃ g | Su ₃ g |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| K | 500 | | | | | | 150 | 5 | 135 | | |
| %5 UK | 475 | 25 | | | | 5 | 135 | | | | |
| %10 UK | 450 | 50 | | | | 5 | 135 | | | | |
| %15 UK | 425 | 75 | | | | 5 | 135 | | | | |
| %20 UK | 400 | 100 | | | | 5 | 135 | | | | |
| %25 UK | 375 | 125 | | | | 5 | 135 | | | | |
| %5 SD | 475 | | 25 | | | 5 | 145 | 7.50 | 135 | 10 | 135 |
| %10 SD | 450 | | 50 | | | 15 | 135 | 15 | 132 | | |
| %15 SD | 425 | | 75 | | | 22.50 | 135 | 20 | 130 | | |
| %1 PS | 495 | | | 5 | | 12.50 | 133 | | | | |
| %2 PS | 490 | | | 10 | | 20 | 130 | | | | |
| %3 PS | 485 | | | 15 | | 27.50 | 126 | | | | |
| %1 FS | 495 | | | | 5 | 12.50 | 132 | 27.50 | 126 | | |
| %2 FS | 490 | | | | 10 | 20 | 130 | | | | |
| %3 FS | 485 | | | | 15 | 25 | 127.50 | | | | |
| %20UK %5 SD | 375 | 100 | 25 | | | 15 | 132.50 | | | | |
| %15UK %10 SD | 375 | 75 | 50 | | | 20 | 130 | | | | |
| %10UK %15 SD | 375 | 50 | 75 | | | 25 | 127.50 | | | | |
| %12UK %10SD %3 PS | 375 | 60 | 50 | 15 | | 27.50 | 126 | | | | |
| %12UK %10SD %2 PS %1 FS | 375 | 60 | 50 | 10 | 5 | 27.50 | 126 | | | | |
| %12UK %10SD %1 PS %2 FS | 375 | 62 | 37 | 5 | 10 | 27.50 | 126 | | | | |
| %12UK %10SD %3 FS | 375 | 62 | 37 | | 15 | 27.50 | 126 | | | | |

Priz süresinin belirlenmesi için kullanılan harcın karışım oranı Çizelge 3.9'da verilmiştir. Harçlar için su/bağlayıcı oranı %28 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı madde hamurlarının normal kıvam suyu ve priz süresi ölçümleri, iğne, pasta ile temas edinceye kadar yavaşca indirilmiş hareket eden parçaların hızla inmesini önlemek için iğne bu durumda 1-2 saniye tutulmuştur. Batırma işlemi pasta kenarından 0.05 mm kadar içeriden yapılmıştır. Çimento harcının içine batırılan iğne yaklaşık 3-5 mm uzaklıkta kaldığı an, priz başladığı kabul edilmiştir. Priz süresi için her 30 dakikada bir iğne harç içine batırılmıştır. Çimentonun suyla karıştırıldığı andan prizin başladığı ana kadar geçen zaman priz başlangıç süresi olarak alınmıştır.

Çizelge 3.9. Priz süresinin belirlenmesi için kullanılan harcın karışım oranı

| Karışım Türü | PÇ (g) | UK (g) | SD (g) | FS (g) | SA (g) | Su (g) | s/b |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| %12 UK %10 SD %3 FS | 375 | 62 | 37 | 15 | 27.50 | 126 | 0.280 |

Ölçümlerde kullanılacak prizma numuneler, sıcaklığı 22°C olan %95 bağıl nemli kür iklimlendirme kabini cihazına yerleştirilmiştir. Batırma sonucunda pasta kenarında çatlaklar meydana geldiği zamanı priz (katılaşma) başlangıcı olarak kabul edilmiş ve bundan sonra batırma işlemine 15 dakikada bir devam edilmiştir. Çubuğun batmadığı sadece çok hafif bir iz bıraktığı zamanı priz (katılaşma) sonu olarak kabul edilmiştir. Prizi tamamlanmış numunenin fotoğrafı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Çimento harcının priz sonu görüntüsü

3.2.3. Harç karışımları

Çalışmada 9 grup toplam 27 adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelerin hacmi 1 m³ alınmıştır. Bu numunelerin harç karışım oranları Çizelge 3.10'da verilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında su/bağlayıcı oranı 0,47 olarak sabit tutulmuştur. Harç karışımlarının tamamı için toplam 9450 g PÇ, 1593 g UK, 945 g SD, 81 g FS, 81 g PP, 486 g SP ve 36450 g ince agrega kullanılmıştır.

Çizelge 3.10. Karışım miktarları (1 m³ için)

| s/b=0.47 | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Karışım Türü | PÇ (g) | Kum (g) | UK (g) | SD (g) | PS (g) | FS (g) | SA (g) | Su (g) |
| Kontrol | 450 | 1350 | | | | | 4.5 | 211.5 |
| %25 UK | 337.5 | 1350 | 112.5 | | | | 4.5 | 211.5 |
| %20UK+ %5 SD | 337.5 | 1350 | 90 | 22.5 | | | 13.5 | 211.3 |
| %15UK %10SD | 337.5 | 1350 | 67.5 | 45 | | | 18 | 211.0 |
| %10UK %15 SD | 337.5 | 1350 | 45 | 67.5 | | | 22.5 | 211.8 |
| %12UK %10SD %3PS | 337.5 | 1350 | 54 | 45 | 13.5 | | 24.75 | 211.4 |
| %12UK %10SD %2PS %1FS | 337.5 | 1350 | 54 | 45 | 9 | 4.5 | 24.75 | 211.4 |
| %12UK %10SD %1PS %2FS | 337.5 | 1350 | 54 | 45 | 4.5 | 9 | 24.75 | 211.4 |
| %12UK %10SD %3FS | 337.5 | 1350 | 54 | 45 | | 3.5 | 24.75 | 211.4 |

Kullanılan kontrol karışımlarının görüntüsü Şekil 3.11' de verilmiştir.



Şekil 3.11. Kullanılan kontrol karışımlarının görüntüsü

%1, %2 ve %3 oranlarında nano katkıli 4 grup harç karışımı hazırlanmıştır. Harç hazırlandıktan hemen sonra numune kalıplarına yerleştirilmiştir. Kullanılan nano ve mikro malzemelerin görüntüsü Şekil 3.12' de verilmiştir.



Şekil 3.12. Kullanılan nano (%2FS+%1PP) karışımlarının görüntüsü

Şekil 3.11 ve 3.12'de gösterilen numuneler el ile karıştırılmıştır. Deney numuneleri, sıcaklığı (20 ± 2) °C ve bağıl nem oranı en az % 50 değerlerinde sabit tutulan laboratuvarında hazırlanmıştır. Harç karışımları tamamlandıktan sonra en kesitleri 40 mm x 40 mm ve uzunlukları 160 mm olan kalıplara dökülmüştür. Kalıplar ve elde edilen numune görüntüleri Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13. Prizma kalıpları ve üretilen numuneler

Numuneler bir gün bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve kirece doymun su havuzunda sıcaklığı 20 ± 1 °C ve bağıl nem oranı % 90 olan kür odasında tutulmuştur. Kirece doymun su havuzunun içerisinde 7, 28 ve 90 gün kür edilmiştir. Suyun sıcaklığı 20 ± 1 °C'ta sabit tutulup, test gününe kadar numuneler havuzdan çıkarılmamıştır. Şekil 3.14.'te numunelerin kür havuzu içindeki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.14. Numunelerin kür havuzu içindeki görüntüsü

3.2.4. Fiziksel özellikleri (Tahribatsız yöntemler)

3.2.4.1. Su emme oranının belirlenmesi

Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 7, 28 ve 90 güne kadar laboratuvar ortamında saklanmıştır. Numuneler TS-EN 480-5'e göre su emme testi yapılmadan önce havuzdan çıkartılıp hassas teraziyle tartılmış ve ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra numuneler 105 °C sıcaklıktaki etüvde yaklaşık 12 saat boyunca bekletilerek her saat başı ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Su emme, malzemenin birim ağırlık veya hacminin emmiş olduğu su yüzdesi olarak belirtilmektedir. Su emme oranı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (3.1).

$$WA = \frac{-W_2 - W_1}{W_1} \%100 \quad (3.1)$$

Burada;

WA: Su emme yüzdesi, **W₂:** Numunenin sudaki ağırlığı (g), **W₁:** Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g).

3.2.4.2. Kapilarite katsayısının belirlenmesi

TS EN 480-5'e göre harç numuneleri üzerinde kılcal su emme veya kapilarite tayini yapılmıştır. Malzemenin suya değen yüzünden zamanla emilen su miktarı (kg/m²dak^{0,5}) kapilarite veya kılcal su emme miktarı olarak belirlenmiştir. Kapilarite testi için su emme testi yapılmış numuneler hazırlanan tepsi içerisinde suya batırılmıştır (Şekil 3.15). Numunelerin ağırlıkları (**M₀**) 10 dakikada ve (**M₁**) 90 dakikada ölçülmüştür. Kılcal su emme değeri Eşitlik 3.2 ile elde edilmiştir.

$$C_A = 0,1x(M_1 - M_0) \quad (3.2)$$

Burada; **C_A:** Kapilarite (kg/m²dak 0,5), **M₁:** 90. dakikadaki ağırlık (g), **M₀:** 10. dakikadaki ağırlık (g)



Şekil 3.15. Kapilarite deney görüntü.

3.2.4.3. Ultrasonik dalga hızı

Ultrasonik yöntem beton uygulamalarında uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Ultrasonik yöntem, kolaylıkla taşınabilir ultrasonik ölçüm cihazı ile laboratuvarında ve arazide ölçüm kolaylığı sağlamaktadır. Bu çalışmada farklı harç oranlarıyla hazırlanan numunelerin, ASTM C597-09 standardına göre V_p dalga hızları ölçülmüştür (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Ultrasonik dalga hızı (V_p) numunesi ölçüm görüntüsü.

Ultrasonik dalga hızı Eşitlik 3.3'de verilen formül ile elde edilmiştir.

$$V = \frac{d}{t} \quad (3.3)$$

Burada;

V_P: Ultrasonik dalga hızı (m/s), **d**: Numune kalınlığı = 0.04 (m), **t**: zaman (s)'dir.

Dalga hızına bağlı beton kalite sınıflaması Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Dalga hızına bağlı beton kalite sınıflaması (Özçelik ve Gelişli , 2018)

| Beton Kalitesi | V (m/s) |
|----------------|-----------|
| Çok İyi | > 4565 |
| İyi | 3515-4565 |
| Orta | 2930-3515 |
| Zayıf | 2110-2930 |
| Çok Zayıf | <2110 |

3.2.5. Mekanik özellikler

3.2.5.1. Eğilme dayanımı deneyi

Betonun eğilme dayanımı tayini deneyi (TS EN 196-1) standardına göre yapılmıştır. Eğilme dayanımları tayini için 40x40x160 mm'lik numuneler hazırlanmıştır. Bu deney metodunda 3 noktadan yükleme yöntemine göre numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları ölçülmüştür. Eğilme dayanımı deneyi Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Eğilme numunesi görüntüsü

Eğilme dayanımı hesabı R_f , Eşitlik 3.4’de verilmiştir.

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (3.4)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı (MPa). **b** : Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu (mm), **F_f** : Prizma şekilli numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük (N), **l** : Mesnet silindirleri arasındaki mesafe (mm)’ dir.

3.2.5.2. Basınç dayanımı deneyi

Numuneler üzerinde TS EN 196-1 standardına göre basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Bu deney için eğilme deneyinden çıkan 2 parça kullanılmıştır. Prizma numunelere 2400 N/saniye yükleme hızı ile otomatik yükleme yapılmıştır. Şekil 3.18’te basınç dayanımı deneyi görüntüsü verilmiştir. Basınç dayanımı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$R_c = \frac{f_c}{1600} \quad (3.5)$$

Burada;

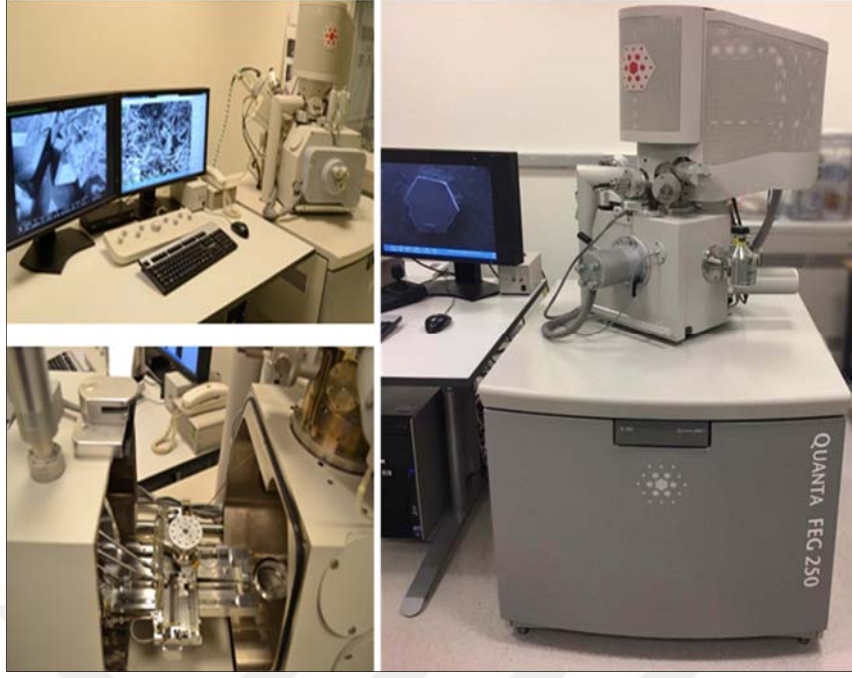
R_c : Basınç dayanımı (MPa), **f_c** : Kırılmadaki en büyük yük (N), **1600** : Yükleme plakalarının alanı (40 mm × 40 mm; mm²) dir.



Şekil 3.18.Basınç dayanımı testi

3.2.6. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinin elde edilmesi

Çalışmada SEM görüntülerini elde etmek için QUANTA FEG 50 SEM cihazı kullanılmıştır. FEI Quanta serisi, altı değişken basınçlı ve çevresel taramalı elektron mikroskobu (ESEM™) içerir. Bunların her biri endüstriyel üretim kontrol laboratuvarları, malzeme bilimi laboratuvarları ve yaşambilimi laboratuvarları için gerekli farklı görüntüleme ve çeşitli örnek gereksinimlerini karşılamaktadır. Şekil 3.19'da QUANTA FEG 50 sem cihazı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.19. QUANTA FEG 50 SEM cihazı görüntüsü

Quanta serisi taramalı elektron mikroskopları üç vakum modu (yüksek vakum, düşük vakum ve ESEM) ile herhangi bir SEM sistemine göre en yüksek çeşitlilikte örneklerle çalışılabilen, esnek, yüksek performanslı cihazlardır. Tüm Quanta SEM sistemleri EDS, WDS, EBSD gibi analitik sistemlerle donatılmıştır. Çalışmada numunelerden alınan örnekler SEM cihazına yerleştirilmiş ve SEM görüntüleri alınmıştır.

3.2.7. Aktivite İndeksi Hesaplamaları

Çalışmada aktivite indeks hesapları TS EN 450-1 standardında belirtilen esaslara göre yapılmıştır. Aktivite indeksi hesaplamasına ilişkin eşitlik 3.6' de verilmiştir.

$$A_i = \frac{\text{Katkılı ND}}{\text{Kontrol ND}} \times 100 \quad (3.6)$$

Burada; **A_i**: Aktivite indeksi, **ND**: Numune dayanımı 28 ve 90 günlük (MPa)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Fiziksel özelliklerin sonuçları

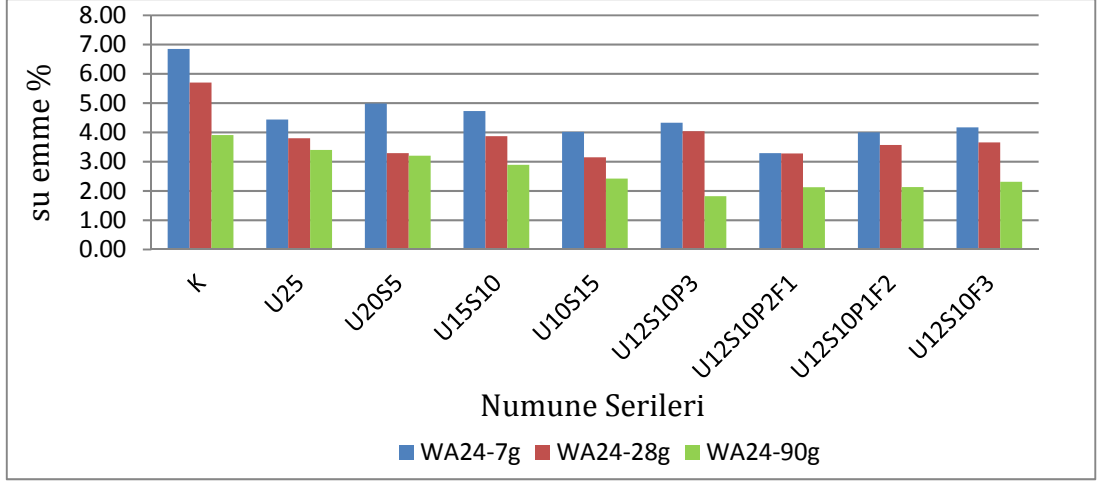
Tahribatsız yöntemlerin kullanılması pratik olsa da elde edilen sonuçlar sadece fikir sahibi olmamızı sağlamaktadır. Kısaca sonuçların yorumlanmasında yeterli değildir. Dolayısıyla doğru sonuçlar elde edebilmek için tahribatlı yöntemlere de ihtiyaç duyulmuştur. Çalışmada 9 farklı grup hazırlanmıştır. Karışımların 7, 28, 90 günlük su emme ve kapilarite bulguları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Karışımların su emme ve kapilarite katsayısı değerleri

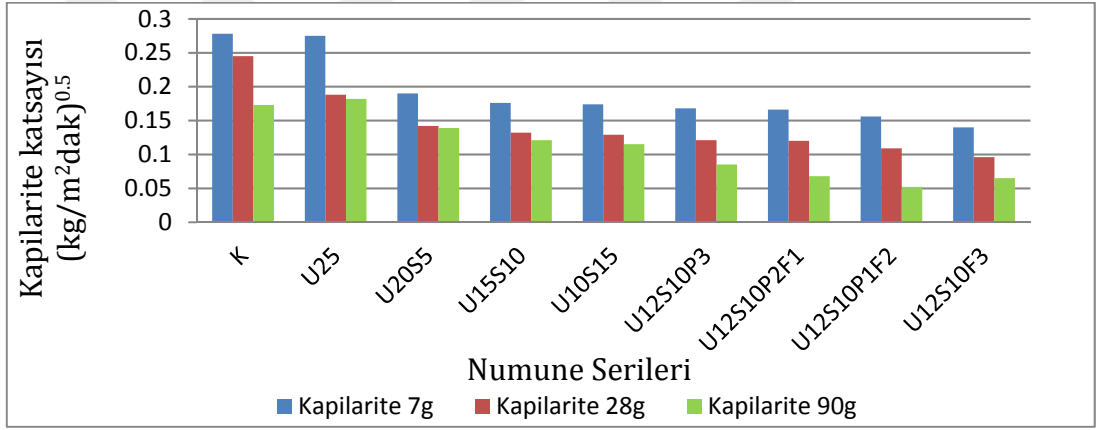
| G | Karışım Türü | C _{A 7g} | C _{A 28g} | C _{A 90g} | WA _{7g} | WA _{28g} | WA _{90g} |
|---|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | K | 0,278 | 0,245 | 0,182 | 6,85 | 5,70 | 3,91 |
| 2 | %25UK | 0,275 | 0,188 | 0,173 | 4,44 | 3,80 | 3,40 |
| 3 | %20UK-%5SD | 0,190 | 0,142 | 0,139 | 4,99 | 3,29 | 3,20 |
| 4 | %15UK-%10SD | 0,176 | 0,132 | 0,121 | 4,73 | 3,87 | 2,89 |
| 5 | %10UK-%15SD | 0,174 | 0,129 | 0,115 | 4,02 | 3,15 | 2,42 |
| 6 | %12UK-%10SD %3PP | 0,168 | 0,121 | 0,085 | 4,33 | 4,04 | 1,82 |
| 7 | %12UK-%10SD %2PP %1FS | 0,166 | 0,120 | 0,068 | 3,29 | 3,28 | 2,13 |
| 8 | %12UK-%10SD %1PP-%2FS | 0,156 | 0,109 | 0,052 | 4,00 | 3,57 | 2,13 |
| 9 | %12U-%10SD %3FS | 0,140 | 0,096 | 0,065 | 4,17 | 3,66 | 2,31 |

C_{A 7g, 28g, 90g} : Kür süresine bağlı kapilarite katsayısı (kg/m² dak0,5)
WA_{7g, 28g, 90g} : Kür süresine kütlece su emme katsayısı (%)

Yapılan deney sonuçlarına göre farklı karışım oranları uygulanan nano ve mikro katkıli harçların 7, 28, 90 günlük su emme ve kapilarite katsayısı değerleri kontrol örneğine göre azalmaktadır (Çizelge 4.1, Şekil 4.1; 4.2). Bununla birlikte nano katkıli malzemelerin kapilarite katsayısı değerlerinin katkısız ve mikro katkıli malzemelere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Su emme testi sonuçları

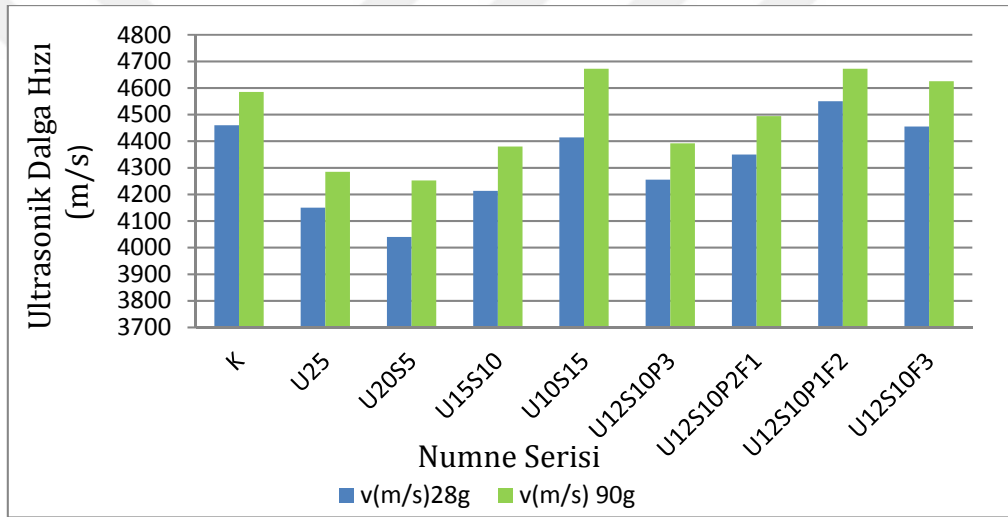


Şekil 4.2. Kapilarite katsayısı sonuçları

Çalışmada yapılan ultrasonik test sonuçları Çizelge 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 2., 3., 4., 6., 7. ve 8. Grup örneklerin 28, 90 V_p değerleri kontrol örneğine göre azalmıştır. 5. ve 9. gruptaki örneklerin 28 günlük V_p değerleri kontrol örneğine göre azalırken, 90 günlük değerleri artmıştır. Ayrıca, nano katkılı malzemelerin V_p değerlerinin mikro katkılı malzemelere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Ultrasonik dalga hızı bulguları 28 ve 90 günlük

| Grup | Karışım Türü | V _p (m/s) 28g | V _p (m/s) 90g |
|------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | K | 4460 | 4585 |
| 2 | %25UK | 4150 | 4285 |
| 3 | %20UK-%5SD | 4040 | 4252 |
| 4 | %15UK-%10SD | 4213 | 4380 |
| 5 | %10UK-%15SD | 4414 | 4672 |
| 6 | %12UK-%10SD-%3PP | 4255 | 4392 |
| 7 | %12UK-%10SD-%2PP-%1FS | 4350 | 4494 |
| 8 | %12UK-%10SD-%1PP-%2FS | 4550 | 4672 |
| 9 | %12UK-%10SD-%3FS | 4455 | 4625 |



Şekil 4.3. Ultrasonik test sonuçları

4.2. Mekanik özelliklerin sonuçları

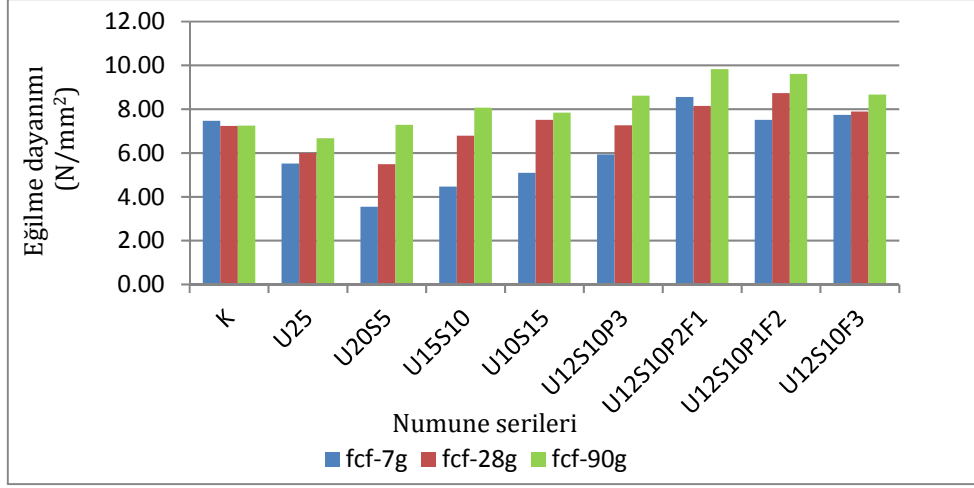
Çalışmada 9 grup için farklı karışım oranları ile elde edilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4, 4.5'te sırasıyla eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen verilere göre 2. ve 3. grup örneklerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı ve basınç mukavemeti değerleri kontrol örneğine göre azalmaktadır.

Çizelge 4.3. Basınç mukavemeti (f_c) ve Eğilme dayanımı(f_{cf}) ve test değerleri

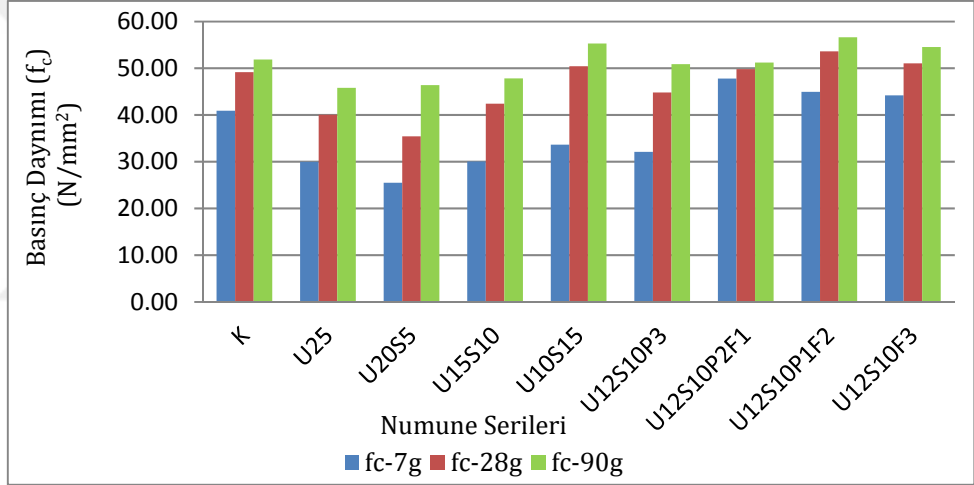
| Grup | Karışım Türü | f_{c-7g} MPa | f_{c-28g} MPa | f_{c-90g} MPa | f_{cf-7g} MPa | f_{cf-28g} MPa | f_{cf-90g} MPa |
|------|---------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | K | 40.90 | 49.16 | 51.87 | 7,47 | 7,23 | 7,24 |
| 2 | %25UK | 29.99 | 40.06 | 45.80 | 5,52 | 6 | 6,67 |
| 3 | %20UK-%5SD | 25.48 | 35.44 | 46.38 | 3,55 | 5,49 | 7,28 |
| 4 | %15UK-%10SD | 30.05 | 42.4 | 47.84 | 4,46 | 6,79 | 8,07 |
| 5 | %10UK-%15SD | 33.65 | 50.42 | 55.30 | 5,09 | 7,51 | 7,84 |
| 6 | %12UK-%10SD-%3PP | 32.10 | 42.50 | 44.81 | 5,94 | 7,26 | 8,61 |
| 7 | %12UK-%10SD-%2PP- %1FS | 47.78 | 49.81 | 51.21 | 8,55 | 8,15 | 9,83 |
| 8 | %12UK-%10SD-%1PP- %2FS | 44.95 | 53.62 | 56.61 | 7,51 | 8,73 | 9,60 |
| 9 | %12UK-%10SD-%3FS | 44.19 | 51.06 | 54.55 | 7,74 | 7,89 | 8,66 |

4. gruba ait numunelerin 7, 28 günlük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri kontrol örneğine göre azalmıştır. Aynı grupta, 90 numunelerin günlük numunele basınç dayanımı azalırken eğilme dayanımı değerleri artmıştır. 5. grup örneklerin ise 7 günlük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerleri kontrol örneğine göre azalırken 28, 90 günlük basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri artmıştır.

6. gruba ait numunelerin 7 günlük eğilme dayanımı ve basınç mukavemeti değerleri azalmıştır. Benzer şekilde 28 ve 90 günlük basınç mukavemeti değerleri azalırken eğilme dayanımı değerleri artmaktadır. 7. grupta ise 7, 28 günlük eğilme dayanımı ve basınç mukavemeti değerleri kontrol örneğine göre artmıştır. Bu grubun 90 günlük eğilme dayanımı değerleri artarken basınç mukavemeti değerleri azalmıştır. 8. ve 9. gruplara ait numunelerin 7, 28, 90 günlük eğilme dayanımı ve basınç mukavemeti değerleri kontrol örneğine göre artmıştır.



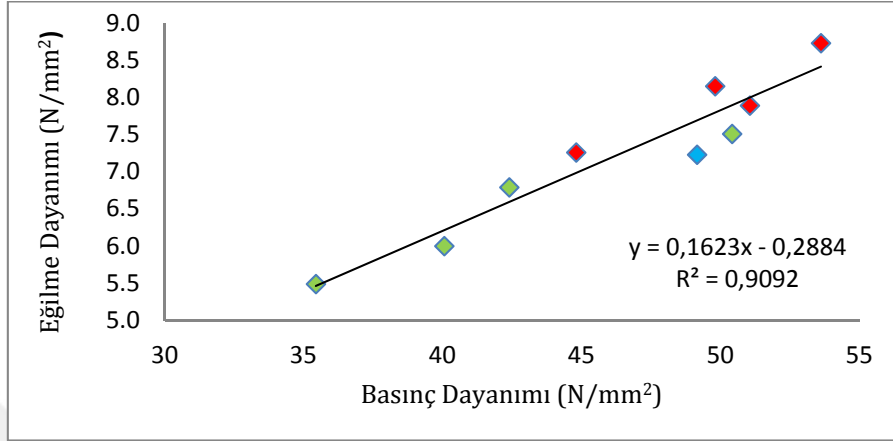
Şekil 4.4. Eğilme dayanımı sonuçları



Şekil 4.5. Basınç mukavemeti dayanımı testi

Yapılan çalışmada mikro katkılı malzemeler ile üretilen numunelerin eğilme dayanımı değerlerinin nano katkılı malzemeler ile üretilen numunelere göre önemli oranda artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Ancak, basınç dayanımı değerleri incelendiğinde mikro katkılı malzemeler ile üretilen numunelere göre nano katkılı malzemeler kullanılan numunelerin çok az bir oranda artış gösterdiği belirlenmiştir.

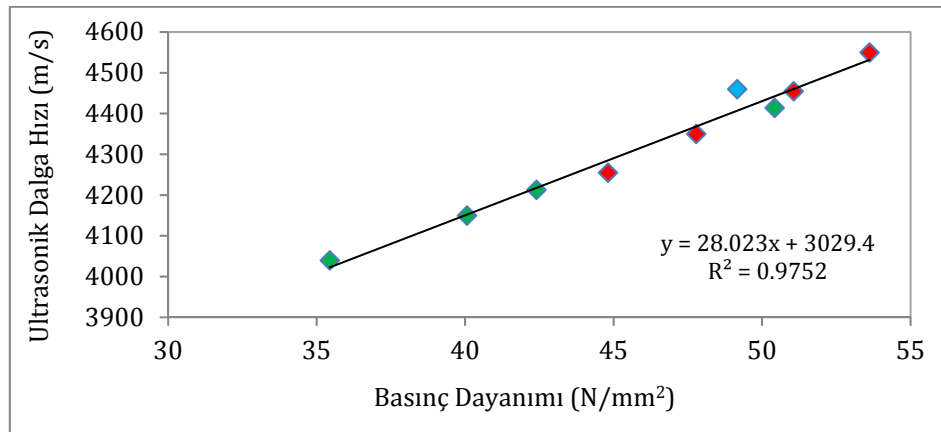
Şekil 4.6'da 9 gruba ait bütün örneklerin 28 günlük basınç (f_c) ve eğilme (f_{cf}) dayanımı değerleri grafik üzerinde verilmiştir. Şekilde numunelerin basınç dayanımı değerleri artarken, eğilme dayanımı değerlerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 4.6. Basınç (f_c) ve eğilme (f_{cf}) dayanımları (28 günlük)

◆: Nano katkı numunesi; ◆: Mikro katkı numunesi; ◆: Kontrol numunesi

Şekil 4.7'de 28 günlük basınç dayanımı (f_c) ve ultrases dalga hızı (V) değerleri grafik üzerinde gösterilmiştir. Basınç dayanımı ve ultrases hızı değerleri arasındaki korelasyon irdelendiğinde, basınç dayanım değerleri artarken, ultrases hızı değerlerinin de arttığı görülmüştür.

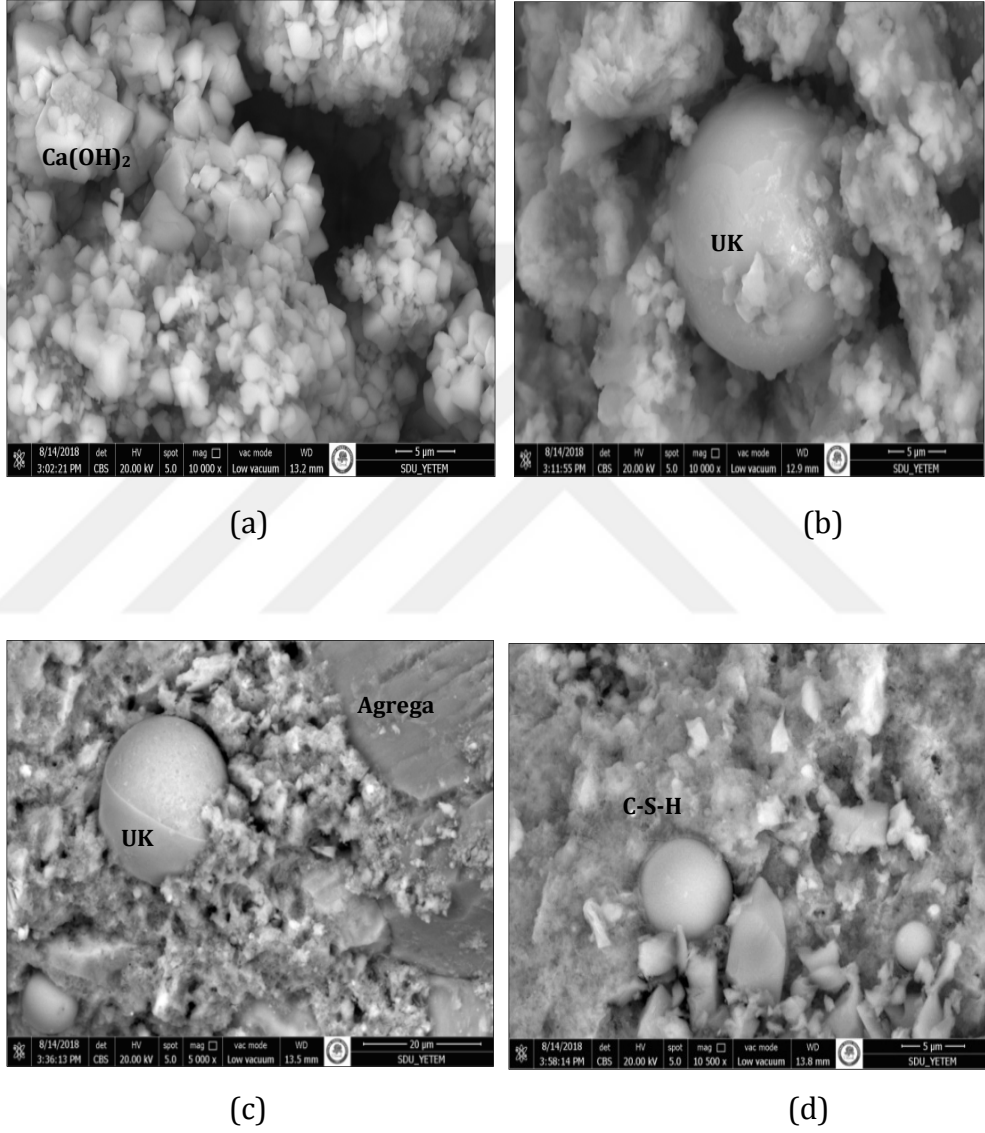


Şekil 4.7. Basınç dayanımı (f_c) ve ultrasonik dalga hızı (V) (28 günlük)

◆: Nano katkı numunesi; ◆: Mikro katkı numunesi; ◆: Kontrol numunesi

4.3. Taramalı Elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri

Çalışmada farklı mineral oranına sahip harçlardan alınan kırık yüzeyli numuneler üzerinde sem görüntüsü çekilmiştir. Şekil 4.8'de 2, 6 ve 8. gruplar ile kontrol örneğine ait SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.8. Örneklerin SEM görüntüleri (a): Kontrol örneği (b):2. grup %25UK (c):6. grup %12UK-%10SD-%3PS (d): 8.grup %12UK %10SD-%1PS-%2FS

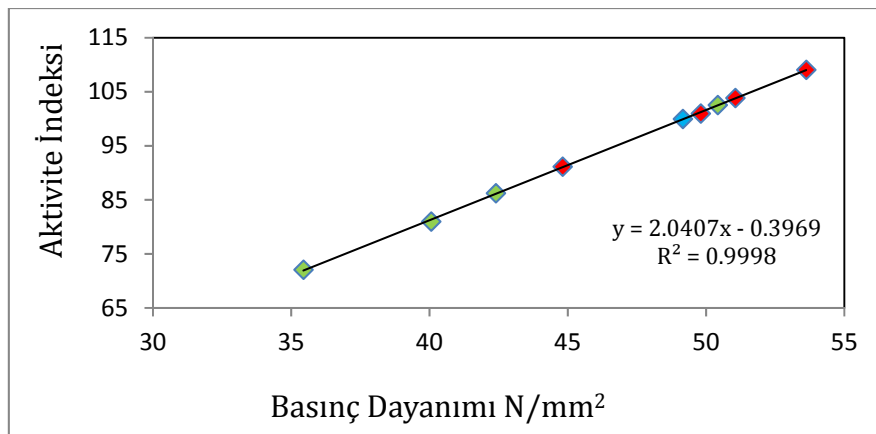
4.4. Aktivite indeksi

TS EN 450-1 standardına göre çimento dayanımı değerlerinden aktivite indeksi belirlenmiştir. Çizelge 4.4.'de 28 ve 90 günlük aktivite indeksi değerleri verilmiştir. Elde edilen aktivite indeksi değerleri incelendiğinde; 8. gruba ait %12UK-%10SD-%1PP-%2FS karışımından oluşan nano içeren numunelerin 28 ve 90 günlük değerlerinin tüm numune grupları içerisinde en yüksek sonuçları sağladığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. 28 ve 90 günlük aktivite indeksi değerleri

| Grup | Karışım Türü | A _i 28g (%) | A _i 90g (%) |
|------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | K | 100 | 100 |
| 2 | %25UK | 81 | 88 |
| 3 | %20UK-%5SD | 72 | 89 |
| 4 | %15UK-%10SD | 86 | 92 |
| 5 | %10UK-%15SD | 103 | 107 |
| 6 | %12UK-%10SD-%3PP | 91 | 98 |
| 7 | %12UK-%10SD-%2PP-%1FS | 101 | 99 |
| 8 | %12UK-%10SD-%1PP-%2FS | 109 | 109 |
| 9 | %12UK-%10SD-%3FS | 104 | 105 |

9 gruba ait örneklerin 28 günlük basınç dayanımı (f_c) ve aktivite indeksi (A_i) grafiği Şekil 4.9'da verilmiştir. Grafiğe göre numunelerin basınç dayanımı değerleri arttıkça aktivite indeksi değerleri de artmıştır.



Şekil .4.9. Basınç dayanımı ve aktivite indeksi (28 günlük)

◆: Nano katkılı numunesi; ◆: Mikro katkılı numunesi; ◆: Kontrol numunesi

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmektedir.

Çimento harcında süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılması, sabit kıvamda su ihtiyacını azaltmaktadır. Bu nedenle, çimento harçlarına ilave edilen su oranı azaltılmıştır. Düşük su oranı sayesinde yüksek basınç ve eğilme dayanımı elde edilebilmektedir. Ancak, silis dumanının yüzey alanının çok yüksek olması karışımdaki su ihtiyacı artıran bir unsurdur. Silis dumanı ve nano katkı kullanılarak üretilen harçlarda su azaltıcı katkıları kullanılmalıdır. Çalışma da süper akışkanlaştırıcıların, çimento harçlarının su ihtiyacını %15'den fazla azalttığı gözlenmiştir. %12UK-%10SD-%3FS karışımından oluşan 9. grup numunelerde en az su ilavesi ile en uygun işlenebilirliğin sağlandığı tespit edilmiştir. Bu numunelerde priz başlangıç süreleri 90 dakika ve priz bitiş süresi de 275 dakikadır.

Harçların içerisindeki çatlak ve boşluk miktarı arttıkça ses dalga hızı azalmaktadır. Ultrasonik dalga hızı değerleri değerlendirildiğinde, %12UK-%10SD-%1PP-%2FS (8. grup) numunelerinde 28 ve 90 günlük V_p hızları en yüksektir (4550-4672 m/s). Bu gruptaki örneklerin 28 günlük basınç dayanımı 53.62 MPa, 90 günlük basınç dayanımı 56.61 MPa olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı ve ultra ses hızları uyumludur. Bu numunelerin basınç dayanımı ve aktivite indeksi değerleri diğer gruplara göre yüksektir. Bütün numunelerin basınç dayanımı ve ultrases hızı değerleri arasındaki korelasyon irdelendiğinde, basınç dayanım değerleri artarken, ultrases hızı değerlerinin de arttığı görülmüştür. %12UK-%10SD-%2PP-%1FS (7. grup) numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri en yüksektir (47.78 MPa). Aynı karışımda eğilme dayanımı değerleri zamana bağlı olarak artmıştır (7 günde 8,55 MPa ve 90 günde 9,83 MPa).

Kompozit (nano+mikro) mineral katkıları ve süper akışkanlaştırıcıların birlikte kullanıldığı tüm harçlarda, kontrol örneğine göre daha yüksek basınç dayanımı

elde edilmiştir. Farklı oranlarda nano malzemelerin harca eklenmesi ile puzolanik reaksiyonlarda iyileşmeler gözlenmiştir. Uygun oranlarda nano minerallerin mikro katkıları ile birlikte çimento harcına eklenmesi özellikle mekanik dayanımlarda artışa neden olmuştur.

Mikro katkıların ilavesi genelde harçların puzolanik aktivite ve boşluk doldurma özelliğini artırmaktadır. Bununla birlikte mikro ve nano katkıların çimentoyla yer değiştirme oranları da önemlidir. Çimentoyla %25 yer değişimi oranında yüksek oranda uçucu kül + düşük oranda silis dumanı kullanımında puzolanik aktivite, tersi duruma göre daha düşük sonuçlar vermiştir. Silis dumanı oranı arttıkça puzolanik aktivite de artmıştır. Mikro katılarda en yüksek aktivite indeksi %10 UK + %15 silis dumanı kullanımında gözlenmiştir (28 günde %103, 90 günde % 107). Benzer bir durum aktivite indeksindeki artışlar kadar olmamakla birlikte basınç dayanımındaki artışlar için de söz konusudur.

Mikro katılara göre, kompozit katkıların %25 oranındaki ilavesi aktivite indeksi ve basınç dayanımı artışı açısından daha olumlu sonuçlar sunmuştur. %12 UK, %10 SD, %1 PS, %2 FS karışımından oluşan kompozit katılarda en yüksek aktivite indeksi bulguları elde edilmiştir (28 günde %109, 90 günde % 109). Bu grupta, basınç dayanımları da aktivite indeksi ile orantılı olarak 53,6 ve 56,6 MPa olarak belirlenmiştir. Her ne kadar kontrol numunelerine göre bu artışlar %10 oranı gibi çok yüksek olmayan artışlar olarak görülse de, %25 gibi çimento ile yüksek oranda yer değiştirmesi dikkate alınmalıdır.

Tüm gruplarda su emme oranları incelendiğinde; 7, 28 ve 90 günde mineral katılı tüm numunelerin su emmeleri kontrol numunesine göre azalmıştır. %12 UK, %10 SD, %1 PS, %2 FS katılı numunede, kontrol numunesine göre su emme oranındaki azalma , 7 günde %52, 28 günde %42 ve 90 günde %46 mertebesindedir.

Kapilarite analiz bulguları değerlendirildiğinde, su emme bulgularına benzer sonuçlar elde edilmiştir. 2. Grup numuneler hariç, diğer tüm mineral katılı

numunelerde kontrol numunesine göre kapilarite katsayısı azalmıştır. %12 UK, %10 SD, %1 PS, %2 FS katkılı numunede (8. grup), kontrol numunesine göre kapilarite katsayısındaki iyileşme, 7 günde %40, 28 günde %51 ve 90 günde %61 seviyesindedir.

Su emme ve kapilaritedeki iyileşme, mikro katkılar ve özellikle kompozit katkıların kontrol numunesine daha düşük poroziteye sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla mikro ve kompozit katkılı numunelerin dayanıklılık özellikleri kontrol numunesine göre daha iyidir.

Elde edilen tüm bulgular (aktivite indeksi, dayanım ve dayanıklılık özellikleri) değerlendirildiğinde, nano katkıların belirli oranda (%1-3) mikro katkılar ile birlikte kullanımı, sadece mikro katkı kullanımından daha elverişlidir.

Tez kapsamında, nano ve mikro mineral katkılar TS EN 450-1 standardı çerçevesinde incelenmiştir. Dolayısıyla, mineral katkı kullanımı %25 gibi yüksek bir oranda tutulmuştur. Ekonomiklikten daha çok, yüksek dayanım değerleri amaçlandığında, kompozit katkıların %10-%15 gibi daha düşük oranlarda kullanımı karışımların su ihtiyacını düşürecek, dolayısıyla daha yüksek dayanım değerleri elde edilebilecektir. Bu doğrultuda, tez bulguları da dikkate alınarak mikro-nano katkıların birlikte kullanımına yönelik yeni çalışmaların yapılması ve daha ayrıntılı test ve analizlerin yapılması önemlidir. Bu sayede, nano katkıların kullanımı, beton teknolojisi alanında önemli gelişmelere kapı açabilecektir.

KAYNAKLAR

- Akın, A., Zia, A. J. 2017. Investigation of the Effect of Curing Applications Containing Different Nano Silica on the Strength of Cementitious Composites, Bilge International Journal of Science and Technology Research, 1(Special Issue), 47-51.
- Alizadeh, R., Beaudoin, J.J., ve Raki, L., 2009. Mechanical Properties of Calcium Silicate Hydrates. Mater. Struct. Submit.
- Alizadeh, R.; Beaudoin, J.J., Ramachandran, V.S.; ve Raki, L., 2009. Applicability of The Hedvall Effect To Study The Reactivity Of Calcium Silicate Hydrates. Adv. Cem. Res. 21, 59–66.
- Anatek, 2013. www.anatek.com. Scanning Electron Microscopy (SEM) QUANTA FEG 50.
- Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Teknikokullar, 06500 Ankara, Türkiye.
- Birgisson, B., vd , 2012. Nanotechnology İn Concrete Materials, Transportation Research Board.
- Björnström, J., Martinelli A., Matic A., Börjesson L., ve Panas I., 2004. Accelerating Effects Of Colloidal Nano-Silica For Beneficial Calcium-Silicate- Hydrate Formation İn Cement, Chemical Physics Letters, No.392(1-3), Pp.242–248.
- Breitenbiicher, R., 1999. High Performance Fibre Concrete SIFCON For Repairing Environmental Structures, İn High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC3), İn: H.W. Reinhardt, A.E. Naaman (Eds.), Proceedings Of The 3rd International Workshop, R1LEM Publications Sarl, Cachan, Pp. 585–594.
- Cassar, L., 13–16 November 2007. Nanotechnology And Photocalatalysis İn Cementitious Materials. In Proceedings Of 2nd International Symposium On Nanotechnology İn Construction, Nicom2; Pp. 277–283. Bilbao, Spain.
- Coşkun, A., Tanyıldızı, H., 2007. Effect Of Different Curing Conditions On Ultrasonic Pulse Velocity And Compressive Strength Of Lightweight Concrete Fırat Üniversitesi Tek. Eğt. Fak. Yapı Eğitimi Bölümü 23119/Elazığ/Türkiye.
- Demirtaş, M., 2001. Yüksek Akışkanlığa Sahip Betonlarda (Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda) Bileşimin Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B., Uçar, A., 2010. Uçucu Kül Katkılı Çimento Hidratasyonuna Elektrokinetik Özelliklerin Etkisi Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.
- Duran, T., 2015. Nanoteknoloji ve Uygulama Alanları.
- Erdoğan, T.Y., 2003. Beton, 1.Baskı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Etimet, 2018. Eti elektrometalurji a.ş. [http://www.etimet.com/tr/ferrosiliko-krom-fesicr Türkiye-Antalya](http://www.etimet.com/tr/ferrosiliko-krom-fesicr-Türkiye-Antalya)
- Falikman, V.R., Petushkov, A.V., May 20-22, 2012. Development Of Russian Market Of Nanotechnology Construction Products Till 2020, NICOM 4: 4th International Symposium On Nanotechnology İn Construction, Agios Nikolaos, Proceedings CD-ROM. Crete, Greece.
- Göлтаş, 2018. Isparta Göлтаş Çimento A.Ş., Portland Çimentosu Standart.
- Jayapalan, A.R., Lee, B.Y., Kurtis K.E., 2012. Can Nanotechnology Be Green? Comparing Efficacy of Nano and Microparticles in Cementitious Materials, Cement & Concrete Composites, Article in Press.
- SDÜ, Mart 2013. Müh. Fak. Jeoloji Müh. Böl. Jeotermal Lab., Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi Müdürlüğü/ Isparta <http://jeotermal.sdu.edu.tr/tr/sdu-su-analizleri-sonuclari/2013-analiz-sonuclari-4860s.html>.
- Kawashima, S., Pengkun, H., David, J., Corr, D.J., Surendra, P., Shah, S.P., 2012. Modification of Cement-Based Materials With Nanoparticles, Cement & Concrete Composites, Article in Press.
- Khedr, S., Abou-Zeid, M., 1994. Characteristics of Silica-Fume Concrete Journal of Materials in Civil Engineering, The American Univ. in Cairo, P.O. Box 2511, ve Univ. of Kansas, Lawrence, KS 66045 . Cairo, Egypt.
- Kocataşkın, F., 1987. Yeni Gelişen Beton Malzemeleri”, İleri Beton Teknolojisi Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Lackhoff, M. 2003. Photocatalytic Activity of Semiconductor-Modified Cement-Influence of Semiconductor Type and Cement Ageing. Applied Catalysis B-Environmentalno.43(3), Pp.205-216.
- Land, G., Stephan, D., 2012. The Influence of Nano-Silica on The Hydration of Ordinary Portland Cement, J Mater Sci., No.47(2), Pp.1011–1017
- Lee, A., Mahendra, S.H., Alvarez, P.J.J., 2010. Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations ACS Nano, 4 (7), pp 3580–3590 Publication Date (Web): (Review) DOI: 10.1021/nn100866w.

- Lee, B.Y., Thomas, J.J., Treager, M.; ve Kurtis, K.E., 8–12 November 2009. Influence of Tio₂ Nanoparticles on Early C₃S Hydration. Nanotechnology Of Concrete: The Next Big Thing Is Small. In Acı Convention, New Orleans, La, Usa, Cd-Rom (Sp-267), Pp. 35–44.
- Li H., Zhang, M., Ou, J. 2006. Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement. Science direct, Wear 260, 1262–1266.
- Mazloom M., Ramezaniapour, A.A. ve Brooks, J.J. 2004. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, Cement & Concrete Composites 26 (2004) 347–3572004.
- Mindess, S., ve Young, J. F., 1981. Concrete, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Neville A.M., 1981. Properties of Concrete, Longman Scientific & Technical, , 36 – 115. İngiltere.
- Neville A.M. 2004. Properties of Concrete, Pearson Education Limited, Fourth Edition, England.
- Nicoleau L., 2011. Accelerated Growth of Calcium Silicate Hydrates: Experiments And Simulations, Cement And Concrete Research, No.41, Pp.1339–1348.
- Özbora A., Tarhan, M., ve Engin, Y. 2014. Nanoteknolojinin Betonun Geleceğindeki Rolü, Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi. İstanbul
- Özçelik E. ve Gelişli K ., 2018. Betonarme yapılarda jeofizik yöntemlerle beton kalitesi ve yapı donatı durumunun araştırılması Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi Cilt: 17, No: 1, 2018 (1-11)
- Pekmezci B.Y., Atahan, H.N., 2014. Kimyasal ve Nano Katkılar Betonda Kullanımı ve Beton Performansına Etkileri, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.
- Porro A., Dolado J. S., Campillo I., Erkizia E., De Miguel Y., De Ibarra Y., ve Ayuela A., 2005. Effects of Nanosilica Additions on Cement Pastes, Applications of Nanotechnology in Concrete Design, Pp.87-96.
- Raki L., Beaudoin J., Alizadeh R., Makar J. ve Sato T., 2010. Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology, Materials No.3, Pp.918-942.
- Richardson I.G., 1999. The Nature of C-S-H İn Hardened Cements. Cem. Concr. Res. 29,1131–1147.
- Sanchez, F. ve Sobolev, K., 2010. Nanotechnology in Concrete-A Review, Construction And Building Materials, No.24, Pp.2060-2071
- Soysal A., 2002. Arçelik A.ş. Arastirma - Teknoloji Geliştirme Merkezi Araşnrma Notu, ANN - 365, istanbul.

- Taşkın D., 2003. Toz malzeme bazlı vakumlu yalıtım teknolojisinin buzzdolaplarının yalıtım performansına olan etkisinin incelenmesi istanbul teknik üniversitesi, fen bilimleri enstitüsü, istanbul.
- Teknoyalitim 2018. Naftalin Sülfonat Esaslı, Yüksek Oranda Su Azaltıcı/ Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkısı, RHEOBUILD 1000 T.
- Thomas J.J., Jennings H.M., ve Chen J.J., 2009. Influence Of Nucleation Seeding On The Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement, J. Phys. Chem. C., No.113(11), Pp.4327-4334. Tmmob Türkiye İnşaat Mühendisliği X1. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, Torbası.
- Toklu K., Baharavar, S., Şimşek, O. 2017. Uçucu Kül İçeren Yüksek Performanslı Güçlendirme Harcında Nano Silikatin Etkisi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Sijest, c.5, s.1.
- Topçu İ. B., Canbaz M., 2001. Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIV, S.2, 2001 Eng.&Arch.Fac.Osmangazi University, Vol.XIV, No: 2 .
- Türk K., Karataş, M. 2006. Farklı Oranlarda F Sınıfı Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Sıkışan Betonun Dayanım Özellikleri. Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi Science and Eng. J of Fırat Univ. 18 (4), 513-520.
- Türker P., Erdoğan B., 2004. Türkiyede ki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, AR-GE TCMA, Ankara.
- Vanoss H.G., 2008. Cement, Minerals Commodity Survey; United States Geological Survey: Washington, D.C., Usa, Pp. 44-45 [Http://Minerals.Usgs.Gov/Minerals Pubs/Commodity](http://Minerals.Usgs.Gov/Minerals/Pubs/Commodity) Ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, Tmmob İnşaat Mühendisleri Odası.
- wolfgang L., 22 Ekim 2007. Bottom-up methods for making nanotechnology products. <<http://www.azonano.com/details.asp?ArticleID=1079>>.Eri"im.
- Xie Y., Liu, B., Yin, J. Ve Zhou, S. 2002. "Optimum Mix Parameters Of High Strength Selfcompacting Concrete With Ultrapulverized Fly Ash, Cem". Conc. Res., 32, 477-480.
- Yaltay N., 2017. Nano Silika'nın Beton Basınç Dayanımına Etkisinin İncelenmesi Yüzüncü Yıl University, namikyaltay@yyu.edu.tr, Van-Turkey Engineering Sciences, Status : Review, ISSN: 1308 7231 (NWSAENS), Received: May 2017 ID: 2017.12.4.1A0388, Accepted: October 2017 Yayını, Ankara,.
- Yeğınobalı A. 2007. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Çimento Müstahsilleri Birliği, Ar - Ge Türkiye, Ankara.
- Yılmaz Ş. , 1992. Seyitömer Termik Santrali Atık Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi , Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, [Http://Www.Ppgsilica.Com/Faqs.aspx](http://Www.Ppgsilica.Com/Faqs.aspx)

EKLER

Çizelge 0.1. Kıvam tayini karışımının miktarları (mm)

| Karışım Türü | Kıvam1 | Kıvam2 | Kıvam3 |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| K | 4 | 6 | |
| %5 UK | 5 | | |
| %10 UK | 0 | | |
| %15 UK | 0 | | |
| %20 UK | 0 | | |
| %25 UK | 0 | | |
| %5 SD | 1 | 7 | 1 |
| %10 SD | 0 | 1 | |
| %15 SD | 0 | 0 | |
| %1 PS | 1 | | |
| %2 PS | 2 | | |
| %3 PS | 4 | | |
| %1 FS | 3.50 | | |
| %2 FS | 2.50 | | |
| %3 FS | 18 | 1 | |
| %20 UK+%5 SD | 0.50 | | |
| %15 UK+%10 SD | 0 | | |
| %10 UK+%15 SD | 0 | | |
| %12 UK+%10 SD+%3 PS | 1 | | |
| %12 UK+%10 SD+%2 PS+%1 FS | 1 | | |
| %12 UK+%10 SD+%1 PS+%2 FS | 0.50 | | |
| %12 UK+%10 SD+%3 FS | 1 | | |

Çizelge 0.2. Priz başlangıcı ve sonu değerleri

| Çimento harcanını | Priz Başlama | | Priz Sonu | |
|-------------------|--------------|------|-----------|------|
| | (s:dak) | | (s:dak) | |
| | zaman | ölçü | zaman | ölçü |
| UK%12+SD%10+FS%3 | 11:45 | | 14:15 | 10 |
| | 12:15 | 0 | 14:30 | 14 |
| | 12:45 | 2 | 14:45 | 14 |
| | 13:15 | 3 | 15:00 | 16 |
| | - | - | 15:15 | 17 |
| | - | - | 15:30 | 19 |
| | - | - | 15:45 | 23 |
| | - | - | 16:00 | 23 |
| | - | - | 16:15 | 31 |
| | - | - | 16:30 | 39 |

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nanh Rıdha FAİSAL

Doğum Yeri ve Yılı : Bağdat 1992

Medeni Hali : Bakar

Yabancı Dili : Arabça, İngilizce ve Türkçe

E-posta : nanh.r@yahoo.com

Taranmış
Fotoğraf
(3.5cm x 3cm)

Eğitim Durumu

Lise : Bağdat Menhel Lisesi, 2010

Lisans : Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Malzeme

Mesleki Deneyim

Sanayi ve Madencilik Bakanlığı, Bilimsel Araştırma Bölümü, (2015-2016), Bağdat- IRAK

Yayınlar

Çimentolu Kompozitlerde Mikro Ve Nano Mineral Katkıların Performanslarının Karşılaştırılması, SDÜ, 2019, Isparta, Türkiye.

Investigation of the effects of nano and micro mineral additives on strength of cement mortar, 14th Nanoscience and Nanotechnology Conference, 2018, İzmir, Turkey.