



**HALLOYSİT NANO-KİL, NANO-SiO₂
VE NANO-CaO'İN ÇİMENTO ESASLI
HARÇLAR ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Abdul Wakil QARLUQ

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Rıza POLAT
2017**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HALLOYSİT NANO-KİL, NANO-SiO₂ VE NANO-CaO'İN
ÇİMENTO ESASLI HARÇLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Abdul Wakil QARLUQ

**İNŞAAT MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

HALLOYSİT NANO-KİL, NANO-SiO₂ VE NANO-CaO'İN ÇİMENTO ESASLI HARÇLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Yrd. Doç. Dr. Rıza POLAT'ın danışmanlığında, Abdul Wakil QARLUQ tarafından hazırlanan bu çalışma 07./11./2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oyçokluğu** ile kabul edilmiştir.


Başkan : Doç. Dr. İlker KAZAZ

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Rıza POLAT

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fatma KARAGÖL

İmza : 

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 16./11./2017 tarih ve 45./10 nolu kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HALLOYSİT NANO-KİL, NANO-SiO₂ VE NANO-CaO'İN ÇİMENTO ESASLI HARÇLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Abdul Wakil QARLUQ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimler Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Rıza POLAT

Nano malzemeler çimento esaslı malzemelerde kullanılması durumunda makro boyuttaki özelliklerine göre daha üstün mekanik, fiziksel ve mikroyapı özellik göstermektedirler ve bu konuda son yıllarda yoğun olarak araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışmada ise, halloysit nano-kil, nano-SiO₂ ve nano-CaO tekli ve ikili kullanarak üretilen çimento esaslı harçların özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla literatür çalışmaları dikkate alınarak ve ön deneylerle, nano malzeme miktarı bağlayıcı ağırlığının %1, %3, ve %5 oranlarında ve su/bağlayıcı oranı ise 0.38 oranında seçilmiştir. Üretilen harç numuneler üzerinde, basınç dayanımı (7, 28 ve 60 günlük), yüksek sıcaklık (250, 500 ve 750°C) ve donma-çözülme etkisi, hidrasyon ısı ve ultrasonik hız değerleri araştırılmıştır. Sonuç olarak, nano malzeme kullanılması durumunda basınç dayanımı tüm karışım oranlarında artmıştır. En yüksek dayanım %3HNC ve %5NC karışımlarında tespit edilmiştir. İkili kullanımlarda basınç dayanımlarındaki artış tekli kullanılan karışımlara göre daha az olduğu ve ultrasonik hız değerlerinin basınç dayanımı sonuçlarına paralellik gösterdiği, genelde nano malzeme kullanılması durumunda hidrasyon ısısında önemli bir değişiklik olmadığı sadece CaO içeren numunelerde arttığı tespit edilmiştir. Donma-çözülme çevrimlerine maruz kalan numunelerde kontrol numunelerine göre nano malzeme içeren numuneler daha yüksek direnç göstermiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan harç numunelerin deney sonuçlarına göre, 250°C'ye kadar numunelerin fazla etkilenmediği, 500°C'den sonra 750°C'ye kadar tekli ve ikili numunelerin UPV değerlerinde ve basınç dayanımlarında ciddi azalmalar meydana geldiği ve numunelerde çatlaklar oluştuğu ve 750°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde en fazla dayanım azalması CaO içeren numunelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

2017, 100 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Halloysit nano-kil, nano-CaO, nano-SiO₂, basınç dayanımı, donma-çözülme, yüksek sıcaklık

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF HALLOYSITE NANO CLAY, NANO-SiO₂ AND NANO-CaO ON CEMENT-BASED MORTARS

Abdul Wakil QARLUQ

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Department of Construction Materials

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Rıza POLAT

Nanomaterials have various super structural, physical and microstructure properties according to their macro dimensions when used in cementitious material. Nanomaterials have been extensively researched since the last few decades. In this study, the properties of cementitious mortars produced by using halloysite nano-clay, nano-SiO₂ and nano-CaO (single and binary) were investigated. For this purpose, by considering previous literatures studies and previously done experiments; the amount of nanomaterial was selected as 1%, 3%, and 5% of the binder weight. The water/binder ratio was 0.38. The compressive strength (7, 28 and 60 days), high temperature (250, 500 and 750°C) and freezing-thawing cycles effect, hydration heat and ultrasonic velocity values were investigated on the mortar samples. The results show that the compressive strength increases at all mixing ratios when using nanomaterials. The highest strength was detected in mixtures of 3% HNK and 5% NC. It was found that the increase in compressive strengths in binary mixtures is less than in single mixtures. Also, the ultrasonic velocity values are in accordance with the results of compressive strength and the use of nanomaterial does not cause a significant change in the hydration heat and it is increased only in samples containing CaO. The samples containing nanomaterials exposed to freeze-thaw cycles and high temperatures were found to show higher resistance than the control group. According to the test results of mortar samples exposed to high temperatures, it was observed that the samples are not affected much up to 250°C, the compressive strength and UPV values of the single and binary samples decrease from 500°C to 750°C and that the cracks and fractures formed and, the maximum strength reduction was detected in samples containing CaO exposed to 750°C.

2017, 100 pages

Keywords: Halloysite nano-clay, nano-CaO, nano-SiO₂, compressive strength, freeze-thaw, high temperature

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışmanın her aşamasında göstermiş olduğu ilgi, destek, öneri ve yardımlarından dolayı Danışman Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Rıza POLAT'a içtenlikle teőekkürlerimi sunarım.

Çalışma sırasında her türlü desteğini esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Fatma KARAGÖL, Sayın Araş. Gör. Yeşim TARHAN'a,

Tez alışması sürecinde sağladığı olanaklardan ve bu çalışmaya verdikleri desteklerden ötürü Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederim.

Ayrıca, İnşaat Mühendisliği Bölümünde görev yapmakta olan ve her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen Sayın Öğretim Üyelerine, Araştırma Görevlilerine ve çalışmada emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Abdul Wakil QARLUQ

Ekim, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	2
1.2. Kaynak Özetleri.....	4
2. KURAMSAL TEMELLER.....	12
2.1. Çimento Esaslı Kompozitler	12
2.2. Nanoteknoloji	14
2.3. Çimento Esaslı Malzemelerde Nanoteknoloji	17
2.4. Çimento Esaslı Malzemelerde Kullanılan Nano Malzemeler	18
2.4.1. Nano-SiO ₂ (NS).....	21
2.4.2. Halloisit nano-kil	25
2.4.3. Nano-CaO (NC)	28
2.5. Diğer Nano Malzemeler	29
2.5.1. Nano-Al ₂ O ₃ (NA).....	29
2.5.2. Nano-CaCO ₃ (NCC).....	30
2.5.3. Nano-TiO ₂ (NT).....	30
2.5.4. Nano Fe ₂ O ₃ (NF).....	31
2.5.5. Karbon nano-tüpler/ fiberler (CNT, CNF)	32
2.6. Hidratasyon Isısı.....	34
2.7. Basınç Dayanımı	37
2.8. Yüksek Sıcaklık.....	40
2.9. Donma-Çözülme	42
2.9.1. Taze betonda donma-çözülme etkisi	42
2.9.2. Sertleşmiş betonda donma-çözülme etkisi	43

3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	48
3.1. Materyal.....	48
3.1.1. Deneylerde kullanılan Malzemeler	48
3.1.1.a. Çimento	48
3.1.1.b. Agregas	49
3.1.1.c. Karışım suyu.....	50
3.1.1.d. Kimyasal katkı maddesi	50
3.1.1.e. Nano malzemeler.....	51
3.1.1.f. Diğer malzemeler.....	53
3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler.....	54
3.1.2.a. Harç karıştırıcı	54
3.1.2.b. Numune kalıpları.....	54
3.1.2.c. Vibrasyon masası.....	55
3.1.2.d. Press.....	55
3.1.2.e. Ultrasonik hız ölçüm cihazı.....	56
3.1.2.f. Fırın.....	57
3.1.2.g. Donma-çözülme cihazı.....	58
3.1.2.h. İzotermal kalorimetre	58
3.2. Yöntem	59
3.2.1. Akışkanlaştırıcı türü ve miktarı.....	59
3.2.2. Karışım tipleri ve numune kodlama	59
3.2.3. Seçilen parametreler ve seviyeler.....	60
3.2.4. Harçların karışım miktarları ve hazırlanması	61
3.2.5. Üretilen harçların yerleştirme yöntemi ve kürü	62
3.2.6. Deneylerde uygulanan yöntemler.....	63
3.2.6.a. Hidratasyon ısısı	63
3.2.6.b. Basınç dayanımı	64
3.2.6.c. Ultrases hız ölçüm cihazı (UPV).....	65
3.2.6.d. Donma-çözülme	65
3.2.6.e. Yüksek sıcaklık.....	66
3.2.6.f. Su emme tayini.....	66
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	67

4.1. Hidratasyon ısısı	67
4.2. Basınç Dayanımı Nano malzeme İçeren Harçların Özelliklerine Etkisi	72
4.2.1.a. Nano malzemelerin tekli kullanımı	72
4.2.1.b. Nano malzemelerin ikili kullanımı.....	74
4.2.2. UPV	76
4.3. Donma-Çözülmenin Nano Malzeme İçeren Harçların Özelliklerine Etkisi	79
4.3.1. Basınç dayanımı	79
4.3.2. UPV	81
4.3.3. Su emme	83
4.4. Yüksek Sıcaklıkların Nano Malzeme İçeren Harçların Özelliklerine Etkisi	85
4.4.1. Basınç dayanımı	85
4.4.2. UPV	91
4.4.3. Su emme	92
5. SONUÇLAR.....	95
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μm	Mikrometre
kgf/sn	Kilogram.kuvvet/saniye
MPa	Megapaskal
nm	Nanometre

Kısaltmalar

Al_2O_3	Aluminyum oksit
ASTM	American Society for Testing and Meterials
C_2S	Dikalsiyum silikat, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$
C_3A	Trikalsiyum alüminat, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$,
C_3S	Trikalsiyum silikat, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$,
C_4AF	Tetreakalsiyum alüminoferrit, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$,
C-A-H	Kalsiyum alüminat hidrat
CEM 1 42.5	Normal Portland Çimento
CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
CNF	Karbon nano-Fiber
CNT	Karbon nano-Tüp
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
D-Ç	Donma-çözülme
Fe_2O_3	Demir oksit
HNK	Halloysit nano-Kil
KNK	Kalsit nano-Kil
NA	Nano- Al_2O_3
NC	Nano-CaO
NCC	Nano- CaCO_3
NCKK	Nano-kalsinit kaolinit kil

NF	Nano- Fe ₂ O ₃
NK	Nano-kil
NKK	Nano-kaolinit kil
NS	Nano-SiO ₂
NT	Nano-TiO ₂
SAK	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UPV	Ultrasonik Pluse Velocity



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. 1 Metre =10 ³ Milimetre =10 ⁶ Mikrometre =10 ⁹ Nanometre	14
Şekil 2.2. Nanoteknolojide “Top-down” ve “Bottom-up” yaklaşımlarının illüstrasyonu	16
Şeki 2.3. (a) Çimento hidratasyonu (b) Nano tanecik katkılı (c) C-S-H nano tanecikler	20
Şekil 2.4. Farklı dozajlardaki nano-SiO ₂ oranları ile üretilen çimento harçların basınç dayanımı değerleri.....	23
Şekil 2.5. Farklı oranlarda (%1, %2 ve %3) HNK ile üretilen çimento harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri.....	27
Şekil 2.6. Portland çimentosu ve silis dumanı harçlarına karşılık farklı dozajlardaki nano-SiO ₂ ve nano-Fe ₂ O ₃ oranları ile üretilen çimento harçların basınç dayanımı değerleri	32
Şekil 2.7. Tek duvarlı karbon nanotüp içeren hidrate olmuş Portland çimentolu kompozit malzemelerdeki çatlağın nanotüplerle engellenmesi.....	33
Şekil 2.8. Çimento bileşenlerin hidratasyonlarının zamana bağlı gelişimi.....	35
Şekil 2.9. Donma-çözülmede hidrolik basınç teorisi.....	45
Şekil 2.10. Donma-çözülmede osmatik basınç teorisi	46
Şekil 3.1. Standart kumu	50
Şekil 3.2. Nano-CaO	52
Şekil 3.3. Nano-SiO ₂	53
Şekil 3.4. Halloysit nano-kil	53
Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan harç karıştırıcı mikseri.....	54
Şekil 3.6. 5x5x5 cm’lik numune kalıpları.....	55
Şekil 3.7. Vibrasyon masası.....	55
Şekil 3.8. Basınç dayanımı deney aleti	56
Şekil 3.9. Ultrases hız cihazının blok şeması.....	56
Şekil 3.10. Ultrases hız ölçüm cihazı.....	57
Şekil 3.11. Yüksek sıcaklık fırını.....	57
Şekil 3.12. Donma-çözülme cihazı	58

Şekil 3.13. İzotermal kalorimetre deney düzeneği	58
Şekil 4.1. HNK'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.2. NC'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.3. NS'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması.....	69
Şekil 4.4. NC+HNK'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması.....	70
Şekil 4.5. NC+NS'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.6. Tekli karışımlara ait 7, 28 ve 60 günlük harç numunelerin basınç dayanımı değerleri	73
Şekil 4.7. İkili karışımlara ait 7, 28 ve 60 günlük harç numunelerin basınç dayanımı değerleri	75
Şekil 4.8. Tekli karışımlara ait 28 ve 60 günlük numunelerin UPV değişimi	77
Şekil 4.9. İkili karışımlara ait 28 ve 60 günlük numunelerin UPV değişimi.....	78
Şekil 4.10. 0 - 30 Donma-çözülme çevrimine maruz kalan tekli nano malzeme içeren numunelerin basınç dayanımı değerleri	80
Şekil 4.11. 0-30 donma-çözülme çevrimine maruz kalan ikili nano malzeme içeren numunelerin basınç dayanımı değerleri	81
Şekil 4.12. Tekli ve ikili nano malzeme içeren numunelerin 0-30 donma-çözülme çevrim sonrasındaki UPV değerlerinin değişimi	82
Şekil 4.13. Tekli nano malzeme içeren numunelerin 250, 500 ve 750°C sıcaklıklardaki basınç dayanımı değişimi	86
Şekil 4.14. İkili nano malzeme içeren numunelerin 250, 500 ve 750°C sıcaklıklardaki basınç dayanımı değişimi	87
Şekil 4.15. 500°C den sonra numuneler üzerinde görülen beyazlaşmalar.....	88
Şekil 4.16. 750°C den sonra numuneler üzerinde görülen çatlaklar.....	89

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	48
Çizelge 3.2. Çimentosunun kimyasal özellikleri	49
Çizelge 3.3. CEN Standart kumunun tane büyüklüğün dağılımı.....	49
Çizelge 3.4. SAK maddesinin özellikleri.....	51
Çizelge 3.5. Nano-CaO'in özellikleri	51
Çizelge 3.6. Nano-SiO ₂ 'in özellikleri.....	52
Çizelge 3.7. Halloysit nano-kil'in özellikleri.....	52
Çizelge 3.8. Deneysel çalışmada kullanılan karışımlar ve karışımların kodlanması.....	59
Çizelge 3.9. Harç numunelerin karışım miktarları.....	62
Çizelge 4.1. Karışım tiplerine göre 0-30 donma-çözülme çevrimi sonrası su emme değerleri	84
Çizelge 4.2. 250, 500 ve 750°C yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin UPV değerleri	92
Çizelge 4.3. 250, 500 ve 750°C yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin su emme değerleri	93

1. GİRİŞ

Nanoteknolojinin hemen hemen tüm sektörlere getirdiği olanaklar doğrultusunda yaşanan dönüşüm ve yenilikler bir devrim niteliği taşımaktadır. Bu devrim, küresel boyutta yaşanan rekabet ortamında bu boyuttaki malzemeyi kullananların bir dönem öne geçmesini sağlayacak etkiye sahiptir. Nanoteknoloji, maddeleri nano ölçekte kontrol ederek, atom ve molekül seviyesinde çalışarak, gelişmiş ve/veya tamamen yeni fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip malzemeler elde edilmesine imkan sağlamaktadır.

Dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi çimento esaslı malzemelerde nano malzemelerin kullanımının araştırılması son yıllarda yoğun olarak devam etmektedir. Çimento esaslı malzemelerin fiziksel ve mekanik davranışları, bileşenlerinin mikro ve nano boyuttaki özelliklerine, oluşan fiziksel ve kimyasal değişikliklerine bağlıdır. Çimento içerisindeki bileşenlerinden C_3S ve C_2S 'in su ile reaksiyonu sonucu oluşan ve çimento hamurunun hemen hemen tüm özelliklerini etkileyen C-S-H jeli, doğal bir nano boyutlu bir malzemedir. Dolayısıyla, çimento hamurunun iç yapısında nano boyutta meydana gelen her türlü değişim, bağlayıcı fazın özelliklerini değiştirmektedir.

Nano malzemeler, çapları 100 nm'den küçük olan nanoparçacıklardır. Nano malzemeler, çimento hamuru ve harç üretiminde kullanılarak, çimento kompozitlerinin mekanik, fiziksel, kimyasal ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmektedir. Çimento esaslı malzemelerde en çok araştırılan nano malzemeler, nano- SiO_2 , nano- Cu_2O_3 , nano- TiO , nano- Al_2O_3 , nano- $CaCO_3$, nano- Fe_2O_3 , nano Fe_3O_4 , nano- ZrO_2 , nano- ZnO_2 , nano- CaO , nano-kil ve nano-pratiküllerdir. Kullanılan bu nano boyutta malzemelerle dayanım, durabilite ve performansı daha yüksek, boşluk oranı ve geçirimsizliği daha az yeni ürünler elde edilmektedir. Bu malzemelerin davranışı esas olarak arayüzeydeki kimyasal reaksiyonlardan etkilenmektedir.

İnşaat sektöründe yapılan araştırmalarda çimento esaslı kompozit malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için, katkı malzemesi olarak farklı özellikteki lifler, çeşitli atık malzemeler, uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanik malzemeler ve nano boyutta katkı malzemeleri kullanılarak araştırmalar devam etmektedir. Bu katkılar harç ve beton özelliklerini iyileştirdiği, çimento hamuru ve agrega arasındaki geçiş bölgesini güçlendirdiği ve mikro düzeydeki boşlukları doldurduğundan performans açısından çok önemli olduğu bilinmektedir.

Günümüzde, oldukça yaygınlaşan yüksek performanslı beton üretiminde puzolanik malzemeler sıklıkla kullanılmaktadır. Çimento esaslı malzemelerin üretiminde kullanılan puzolanların çoğu endüstriyel atık malzemeler veya yan ürünlerdir. Puzolanik malzemeler genellikle SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içermektedirler. Bu kimyasal oksitler puzolanik özellik göstererek çimento esaslı malzemelerin özelliklerini iyileştirmektedir. Puzolanik malzemelerin kullanılması, uzun dönem durabilitesi (dayanıklılık) iyi olan yüksek performanslı betonların elde edilmesinde etkili bir yöntemdir. Bu malzemeler, bir miktar çimentonun yerine kullanıldıkları için çimento tüketimini azaltmakta, aynı zamanda da çimento esaslı malzemelerin taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirmektedirler. Diğer taraftan puzolanik malzemelerin kimyasal kompozisyonu, inceliği, puzolanik aktifliği ve tane boyut dağılımı çimento esaslı kompozitin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerdir. Dolayısıyla, SiO_2 - Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi oksitlerin nano boyutta kullanımı hakkında çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada ise, çimento esaslı harçlarda, halloysit nano-kil, nano- SiO_2 ve nano- CaO 'in tekli kullanımı, nano- CaO -halloysit nano-kil ve nano- CaO +nano- SiO_2 karışımların birlikte kullanımının etkisi araştırılarak değerlendirilecektir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı; nano boyutta kullanılan malzemelerin çimento esaslı harçların özelliklerine etkisi ve nano malzemelerin birlikte kullanımının etkisini araştırmaktır. Farklı oranlarda halloysit nano-kil, nano- SiO_2 ve nano- CaO 'in tekil ve ikili kullanılarak

üretileen harçların hidratasyon ısısı, 7, 28 ve 60 günlük basınç dayanımı, yüksek sıcaklık ve 30 donma-çözölme öncesi ve sonrası basınç dayanımları, UPV ve su emme değeri araştırılmıştır.

Bu kapsamda;

- Çimento esaslı kompozit olarak “harç”, kum olarak CEN standart kumu, bağlayıcı olarak çimento+nano malzemeler ve nano malzeme olarak ise halloysit nano-kil, nano-SiO₂ ve nano-CaO tekli ve ikili kullanılmıştır.
- Bağlayıcı ağırlığının %1, %3 ve %5 oranlarında tekli HNK, NC, ve NS, %0.5+0.5, %1.5+1.5 ve %2.5+2.5 oranlarında NC+HNK ve NC+NS birlikte kullanılmıştır.
- Harç numunelerin UPV, su emme ve 7, 28 ve 60 günlük basınç dayanımı araştırılmıştır.
- TS EN 196-9’a göre hazırlanan harçların Yarı Adayabatik Metodu ile hidratasyon ısıları, nano malzemelerin etkilerini değeriendirmek için araştırılmıştır.
- 20±2°C’de kirece doygun suda 60 günlük kür süresini tamamlandıktan sonra 30 donma-çözölme çevrimine maruz kalan harç numunelerin, basınç dayanımı, UPV ve su emme değeri araştırılmıştır ve donma-çözölmeye maruz kalmayan numunelerle kıyaslanmıştır.
- 20±2°C’de kirece doygun suda 60 günlük kür süresini tamamlandıktan sonra 250, 500 ve 750°C’de yüksek sıcaklığa maruz kalan harç numunelerin, basınç dayanımı, UVP ve su emme değeri araştırılmıştır ve yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numunelerle kıyaslanmıştır.
- Nano-CaO ile halloysit nano-kil ve nano-CaO ile nano-SiO₂’in beraber kullanıldığı karışımlarda puzolanik etki değeriendirilerek tekli kullanımlarıyla karşılaştırılmıştır.
- Harç numunelerde tekli ve ikili nano malzeme kullanarak, numuneler üzerinde en fazla etkisi olan nano malzeme oranlarının belirlenmesi ise tezin bir başka amacıdır.

1.2. Kaynak Özetleri

Nanoteknoloji son yıllarda çok ilgi çeken bir konudur. Nano boyutlu malzemelerin çimento kompozitelerinde kullanımı 21. yüzyılın ilk yıllarından itibaren başlamıştır. Bazı nano malzemelerin (halloysit nano-kil, nano-SiO₂ ve nano-CaO) kullanıldığı çimento hamuru ve harçlar üzerinde yapılan çalışmalara ait sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Givi *et al.* (2010a), iki farklı boyutta (15 nm ve 80 nm) NS içeren, çimento ağırlığının %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında çimento ile yer değiştirmesi sonucunda betonun basınç, eğilme ve çekme dayanımlarını araştırmışlardır. Sonuç olarak, erken yaşlarda 15 nm boyutlu tozların kullanılmasına göre, ileri yaşlarda 80 nm boyutlu tozların kullanılması neticesinde, betonun dayanımlarının arttığını belirlemişlerdir.

Morsy *et al.* (2011), çimento ağırlığının farklı oranlarında nano metakaolin (NMK) ve karbon nano-tüp (CNT) kullanarak, nano malzemelerin fiziko-mekanik davranışlarını araştırmışlardır. Sonuç olarak %6 orandaki nano kil içeren harcın basınç dayanımının %18 oranında arttığı, %6 oranda NMK ve %2 oranda CNT içeren harçların basınç dayanımının ise kontrol numunesine göre %29 arttığını ifade etmişlerdir.

Givi *et al.* (2011b), çimento ağırlığının %0.5, %1, %1.5 ve %2'si kadar nano-SiO₂ kullanarak, farklı kür ortamlarında (suda ve kireçli suda) ve farklı kür süreleri için, (7, 28 ve 90 gün) betonun fiziksel özellikleri (su geçirgenliği, işlenebilirlik ve priz süresi) ve mekanik özellikleri (basınç, çekme, ve eğilme dayanımı) üzerinde nano-SiO₂ partiküllerin etkisini incelemişlerdir. Hazırlanan numuneler kirece doymuş suda kür edildiğinde, nano-SiO₂ parçacıkları filler etkisi ve çok yüksek puzolanik aktivitesi ile C-S-H jelinin oluşumuna katkıda bulunmuştur. %1 oranında nano-SiO₂ kullanılması ve suda kür edilmesi durumunda betonun basınç dayanımının arttığı, %2 oranında kullanılması ve kirece doymuş suda kür edilmesiyle betonun basınç dayanımının azaldığı ifade edilmiştir.

Senff *et al.* (2012a), 0.5 su/çimento oranında, çimento ağırlığının %0-3'ü kadar NS ve %0-12'si kadar NT kullanarak çimento hamuru ve harcın reolojik özelliği, hidrasyon ısısı ve 28 günlük basınç dayanımını araştırmışlardır. Sonuç olarak %1.3 oranında NS karışımına göre, %5.2 oranında NT kullanılması durumunda çimento harcın hidrasyon ısısını artırmış ve akışkanlığını azaltmıştır. %1.3 oranında NS ve NT kullanılması durumunda sonuçlarda önemli bir değişiklik göstermemiştir.

Stefanidou *et al.* (2012b), tarafından özgül yüzey alanı 200 m²/gr olan NS, yüksek dayanımlı çimento hamuru elde etmek için farklı oranlarda (%0, %0.5, %1, %2 ve %3) kullanılarak, çimento hamurunun mekanik ve mikroyapı özellikleri farklı yaşlarda araştırılmıştır. %0.5 ve %2 oranlarında NS ilavesiyle taze haldeki harcın su ihtiyacı artışına rağmen basınç dayanımında %20-25 oranında artış gözlenirken, %1 NS ve SAK ilavesiyle su ihtiyacı azaltmış ve basınç dayanımında %30-35 oranında artış gözlenmiştir. Ayrıca, karışımda %0.5 oranında NS kullanmasıyla 28 günlük basınç dayanımında 50 MPa gözlenirken, %1 ve %2 oranlarında NS ve SAK kullandığında aynı yaşta 62 MPa'a kadar çıktığı gözlenmiştir. Karışımda %1 ve %2 oranlarında NS kullanıldığında eğilme dayanımında 8 MPa artış gösterirken, %5 oranında NS kullanılması durumunda eğilme dayanımını düşürdüğü meydana gelmektedir.

Heidari *et al.* (2013), ilk fazda %10-40 oranlarında seramik tozu, ikinci fazda ise %0.5-1 NS ve %10-25 oranında seramik tozu kullanarak, tüm karışımlarda betonun basınç dayanımı ve su emme oranını araştırmışlardır. Sonuç olarak %20 oranında seramik tozu kullanılması durumunda betonun basınç dayanımını olumsuz etkilediği ve tüm karışımlarda su emme kapasitesinin azaldığı tespit edilmiştir. NS ve puzolanik katkının birlikte kullanılması neticesinde karışımların basınç dayanımlarında artış, su emmesinde düşüş gösterirken, puzolanik malzeme miktarı arttıkça betonun mekanik özelliğini arttırdığı ifade etmişlerdir.

Oltulu *et al.* (2013), nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ ve nano-Fe₂O₃'ün kullanıldığı tekli, ikili ve üçlü kombinasyonların uçucu kül içeren çimento harçlarının basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, çimento ağırlığının

%1.25'i kadar tekli (nano-SiO₂) ve ikili (nano-Al₂O₃) kombinasyonların kullanmasıyla çimento harçlarının basınç dayanımlarında, %7 ile %32 arasında artış gözlenmiş olduğu ve kılcal boşluklarında ise %14 oranında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Farzadnia *et al.* (2013), çimento ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranlarında halloysit nano kil kullanarak, çimento harcının mekanik özelliklerini, akışkanlığını, termal davranışını ve durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak %2 oranında nano kil (NK) kullanmasıyla kontrol mumunelere göre basınç dayanımı ve gaz geçirimsizliğinde sırasıyla %24 ve %56 artış, %3 oranda NK kullanmasıyla akışkanlıkta %65 ve gaz geçirimsizliğinde ise %56 düşüş meydana gelmiştir.

Al-Salami *et al.* (2013), çimento ağırlığının %2, %4, %6, %8, %10 %12 ve %14'ü kadar nano metakaolin kullanarak sertleşmiş çimento hamurunun 3, 7 ve 28 günlük mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. NMK kullanımı ile çimento esaslı malzemelerin mikroyapısı, normal çimentoya kıyasla daha yoğun, kompakt ve uniform olduğu ifade edilmiştir. %10 oranında NMK kullanımı ile basınç dayanımında %50 ve eğilme dayanımında %36 artış meydana gelmiştir.

Nadeem *et al.* (2013), yaptıkları çalışmalarında farklı oranlarda metakaolin (MK) kullanılmasının yüksek sıcaklıklarda çimento harcının özelliklerine nasıl etki ettiğini araştırmışlardır. Sonuç olarak, sıcaklık artışıyla çimento harcının basınç dayanımı azalmakta olup; 200°C'de %8-9, 400°C'de %16 ve 600°C -800°C arasında %46-%80 arasında basınç dayanımında düşüşler meydana gelmiştir.

Du *et al.* (2014), yaptıkları çalışmalarında, farklı oranlarda (%3 ve %0.9) NS kullanarak betonun durabilite özellikleri ve mikro yapısını araştırmışlardır. SEM görüntüleri sonucunda NS içeren betonun arayüzey geçiş bölgesinin çok homojen bir yapıda olduğu, MIP çalışmalarında ise boşluk boyut dağılımının iyileştiği su ve klorür iyon geçirimsizliğinin azaldığı görülmüştür. Sonuçta %0.3 oranında NS kullanmasıyla betonun su ve klorür iyonlarına karşı geçirimsizliği ve basınç dayanımı artış göstermiş,

ancak betonun su emme derinliği, klorür taşınma katsayısı ve difüzyon katsayısı sırasıyla, %45, %28.7 ve %31 oranlarında düşüş göstermiştir.

Fan *et al.* (2014), çimento ağırlığının %0, %1, %3, %5, %7 ve %9 oranlarda kaolinit kil kullanarak çimento hamuru, harç ve betonun mekanik özelliklerini ve klorür difüzyonunu araştırmışlardır. Sonuç olarak %1 oranında kaolinit kil kullanmasıyla çimento hamurunun 1, 3, 7 ve 90 günlük eğilme dayanımlarında sırasıyla %30.41, %39.04, %36.27 ve %38.32 oranlarında artış gözlenmiştir. %1, %3 ve %5 oranlarında kil kullanılması sonucunda karışımların basınç dayanımları, kontrol numunesine göre sırasıyla %12, %13.5 ve %28.4 oranlarında artış göstermiştir. %1 ve %5 oranlarında kil kullanmasıyla klorür difüzyon katsayısı %8.68 ve %18.87 oranlarında düşüş göstermiştir.

Shaikh *et al.* (2014), %40-70 oranlarda yüksek hacimli uçucu kül (YHUK) kullanarak, harcın 7 ve 28 günlük, betonun 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımını araştırmışlardır. Bu amaçla YHUK içeren harçların mikroyapısı ve puzolanik reaksiyonlar SEM, XRD, ve BSE görüntüleri ile analiz edilmiştir. Harçlarda %2 oranında NS kullanmasıyla 7 ve 28 günlük basınç dayanımında %1-6 oranında artış, %2 oranında NS, %40 ve %50 oranında YHUK kullanması durumunda, harçların erken 7 günlük basınç dayanımında sırasıyla %5 ve %7 oranlarda artış gözlenmiştir. %2 oranda NS, %60 ve %70 oranlarda YHUK kullanılması durumunda betonun 28 günlük basınç dayanımında sırasıyla %33 ve %48 oranında artış gösterirken, %2 oranda NS ve %60 oranda YHUK ilavesiyle erken (3 gün) yaşta betonun basınç dayanımını %95 artış göstermiştir.

Mukharjee *et al.* (2014), iki tür (doğal ve geri dönüşümlü) agrega ve çimento ağırlığının %0.75, %1.5 ve %3 oranlarında NS kullanarak üretilen betonun 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, çekme dayanımı ve tahribatsız deney yöntemini araştırmışlardır. Sonuçta olarak geri dönüşümlü agrega yerine, %3 oranında NS ile doğal agrega kullanması durumunda 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında sırasıyla %12 ve %22 oranlarda, çekme dayanımında ise %4.33-4.97 oranlarda artış göstermiştir.

Phoo-ngernkham *et al.* (2014), çimento ağırlığının %0, %1, %2 ve %3 oranlarında nano-SiO₂ ve nano-Al₂O₃, yüksek kalsiyum içeren uçucu kül esaslı geopolimer kullanarak üretilen numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülünü araştırmışlardır. Sonuç olarak, %2 oranında nano-SiO₂ ve %1 oranında ise nano-Al₂O₃ kullanılması durumunda 90 günlük numunelerin basınç dayanımı sırasıyla 51.8 ve 56.4 MPa olduğu belirlenmiştir.

Heikal *et al.* (2014), çimento ağırlığının %0, %1, %2, %4 ve %6'sı kadar NS, %30-60 oranlarında ise yüksek fırın curufu (YFC) kullanarak, çimento esaslı kompozit malzemelerin basınç dayanımı ve 250, 450, 600, 800 ve 1000°C'ye kadar yangın direncini araştırmışlardır. %4 oranında NS ve %30-60 oranında ise YFC kullanılmasıyla yangına karşı önemli derecede direnç gösterdiği ve basınç dayanımında artış olduğu, %6 oranında kullanılması durumunda basınç dayanımında düşüş olduğu görülmüştür. Sonuçta, %30-60 oranlarında YFC ve %4 oranında NS kullanılmasıyla diğer kompozitlere göre yangın direncinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Polat *et al.* (2015), çimento ağırlığının %1.5, %3 ve %4.5 oranlarında suya doymun nano-kil, %2.5, %5 ve %7.5 oranlarında ise mikro ve nano boyutta CaO ve MgO kullanarak çimento hamuru, harç ve betonun otojen rötresini araştırmışlardır. Sonuç olarak çimentonun %1.5, %3 ve %7.5 oranlarında nano-kil kullanılmasıyla kontrol numunelerine göre 28 günlük otojen rötrede %43, %40 ve %1.5 düşüş gözlenmiştir.

Fan *et al.* (2015), çimento ağırlığının %0, %1, %3 ve %5'i kadar nano-kaolinit kil (NKK) kullanarak, betonun basınç dayanımı, donma-çözölmeye karşı direnci, klorür difüzyon katsayısı, elektrik direnci ve dinamik elastisite modülünü araştırmışlardır. Sonuç olarak, %5 oranında NKK kullanılmasıyla 125 D-Ç'den sonra kontrol numunelerine göre basınç dayanımında %34 artış, elektrik direncinde 75 D-Ç'den sonra %64 düşüş göstermiştir.

Hakamy *et al.* (2015b), çimento ağırlığının %1, %2 ve %3 oranlarında kalsinit nano kil kullanarak çimento esaslı kompozitlerin mikroyapısı, mekanik ve termal özellikleri

araştırılmıştır. Sonuç olarak çimento ağırlığının %1 oranda kalsinit nano kil kullanılması durumunda, kontrol numunesine göre porozitede %12.4 düşüş, eğilme dayanımında ise %4.5, %38.8 ve %38.1 oranlarda artış olduğunu belirtmiştir.

Zahedi *et al.* (2015), tarafından çimento ağırlığının %2.5, %5 ve %20'si oranlarında NS ve pirinç kabuğu külü birlikte ve tek tek kullanılarak, çimento harcının basınç dayanımı, klorür geçirimsizliği, elektrik direnci ve kılcal su emme özelliği incelenmiştir. Pirinç kabuğu külü tek kullanıldığında erken yaşlarda (3 ve 7. gün) basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir. Sonuç olarak, pirinç kabuğu külü ve NS beraber kullandığında harcın performansını iyileşmiş ancak karışımda %20'den fazla pirinç kabuğu külü kullandığında kademeli olarak basınç dayanımında düşüş gözlenmiştir. En iyi sonuç birleşik karışımda 28. ve 90. günlük numunelerde elde edilmiştir.

Rong *et al.* (2015), çimento ağırlığının %0, %1, %3 ve %5'i oranlarında NS tozları kullanarak, ultra yüksek performanslı çimento harçların mekanik performansı, hidrasyon ısı ve mikroyapı özelliklerini araştırmışlardır. Sonuçta %3 oranda NS kullanmasıyla harcın basınç ve eğilme dayanımında ciddi bir artış gözlenmiştir. 3, 7, 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarında sırasıyla, %11.5, %17.4, %23.1 ve %27.7 artış elde edilmiştir. Ayrıca, hidrasyon sürecinde hızlanma ve porozitede azalma gözlenirken, daha homojen ve yoğun bir mikroyapı oluşmuştur. NS tozu %5 oranından fazla kullandığında kontrol numunelerine göre aynı harcın basınç dayanımında az bir düşüş meydana gelmiş ve harcın mikroyapısının olumsuz etkilendiği gözlenmiştir.

Heikal *et al.* (2016), normal Portland çimentosunun nano-kil ile yer değiştirmesi ve YFC eklenmesiyle harçların priz süresi, basınç dayanımı, su içeriği ve jel boşluk oranını araştırmışlardır. Sonuç olarak, %1 oranında NK kullanılması durumunda 1 günlük numunelerin basınç dayanımı 25.2 MPa ile 48.5 MPa arasında değişirken, 90 günlük numunelerde ise 79.8 MPa ile 97.9 MPa arasında değişmektedir.

Jankovic *et al.* (2016), çimento ağırlığının %2 ve %5'i oranında NS, toplam agrega hacminin %50'si oranında farklı agrega türleri (kuvars, barit ve kombinasyon halinde kullanımı 50:50 hacimce) kullanarak ultra yüksek performanslı betonun (UYPB) basınç ve eğilme dayanımı araştırmışlardır. NS oranı %2'den %5'e yükselince basınç ve eğilme dayanımında düşüş görülmüştür. %2 oranında NS ve %50 oranında barit agregası kullanılmasıyla UYPB'nin basınç dayanımında artış oluşmuştur. %3 oranında NS ilavesiyle eğilme dayanımında artış görülürken %3'ten fazla kullanılıncaya betonun mekanik özelliklerinde düşüş görülmüştür. Kuvars ile barit birlikte kullanıldığında betonun eğilme dayanımında %32 oranında artış, kuvars tek başına kullanıldığında ise beton basınç dayanımında %3 ve eğilme dayanımında %4 düşüş gözlenmiştir.

Assaedi *et al.* (2016), çimento ağırlığının %1, %2, ve %3'ü oranlarında NK kullanarak uçucu kül esaslı geopolimerin mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda %2 oranında NK ilavesiyle geopolimer esaslı kompozitin eğilme dayanımında %20 ve basınç dayanımında %23 artış gözlenmiştir. Mikroyapı analizi sonucunda, NK'in çimento esaslı malzemelerin sadece mikroyapısını iyileştirmek için değil, aynı zamanda geopolimer reaksiyonu kolaylaştırmak için de etkili bir malzeme sonucuna varılmıştır.

Shehu. *et al.* (2016), %90-%10, %80-20, %70-30 ve %60-40 oranlarında pişirilmiş kil ile CaO kullanarak taze ve sertleşmiş haldeki betonun 7, 14, 21 ve 28 günlük basınç dayanımı, çökme değeri ve akışkanlığını araştırmışlardır. Sonuç olarak, %70-30 oranında pişirilmiş kil ile CaO kombinasyonu kullandığında, betonun çökme değeri ve akışkanlığı en fazla etkilenmiş ve 28 günlük basınç dayanımında 21 N/mm² artış meydana gelmiştir.

Mohammed *et al.* (2017), CEM I ve CEM II çimento ve çimento ağırlığının %10, %15 ve %20'si oranlarında kalsinit kil (KK) kullanarak 300 donma-çözülme çevrim sonrası, harcın fiziksel, mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, harcın termal özelliği ve basınç dayanımında düşüş gözlenirken, porozitesi, su emme oranı ve hidrasyon sürecinde artış gözlenmiştir. CEM I ve CEM II içeren karışımlarda %10

oranında kil kullandığında 300 D-Ç'den sonra harcın basınç dayanımında sırasıyla %15.93 ve %17.41 oranlarında düşüş gözlenmiştir. En yüksek sonuç ise %10 oranındaki kil içeren karışımlarda görülmüştür.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Çimento Esaslı Kompozitler

Çimento esaslı malzemeler, en genel olarak çimento hamuru, harç ve beton olarak sıralanabilir ve genellikle bağlayıcı olarak çimento, dolgu malzemesi olarak agrega, karışımlarda çimentonun hidrasyonu ve işlenebilirliği için su kullanılmaktadır. Gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı malzemeleri de kullanılmaktadır.

Hidrolik bağlayıcı olan çimento, TS EN 206 (2014), standardına göre “Su ile karıştırıldığında, hidrasyon reaksiyonları ve işlemleriyle priz alarak sertleşebilen hamur meydana getiren ve sertleştikten sonra dayanım ve kararlılığını su içerisinde bile sürdürebilen öğütülmüş inorganik malzeme” olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, bu standarda uygun çimento, CEM çimentosu olarak adlandırılır. Agregaya ve su uygun şekilde harmanlanıp karıştırıldığında, yeterli süre işlenebilirliğini muhafaza eden ve belirlenmiş periyotlarda belirli dayanım seviyelerini kazanan ve uzun süre hacim sabitliği gösteren, beton veya harç üretebilen çimentodur.

Çimento esaslı malzemelerin bileşenlerinden biri olan agreganın kalitesi beton dayanımını etkilemektedir. Değişik boyutlardaki mineral kökenli sert tanelerden oluşan agregalar, betonun hacim olarak %75’ini oluşturur. Beton agregaları standardında (TS 706 EN 12620+A1) agregaya “yapılarda kullanılan taneli malzeme” olarak tanımlanmaktadır. Agregaya, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımıyla bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı taneli malzemedir. Beton hacminin yaklaşık %75’i agregaya tarafından oluşturulmaktadır (Erdoğan 2010).

Çimento esaslı malzemelerde başka bir bileşim ise karışım suyudur. Çimento hamurunun ve taze betonun hazırlanmasında kullanılan suyun kalitesi, çimento ile su arasındaki hidrasyon reaksiyonlarının oluşmasını, gelişme hızını ve buna bağlı olarak

priz süresini etkileyen önemli bir faktördür. İçilebilir nitelikte, temiz, berrak ve kokusuz sular çimento kompozit üretiminde rahatlıkla kullanılabilir ve karışım suyun iki önemli görevi bulunmaktadır. Bunlar,

- Çimento ile birleşerek hidrasyonun yer almasını sağlamak,
- Betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak üretilen taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır (Erdoğan 2010; Baradan 2015).

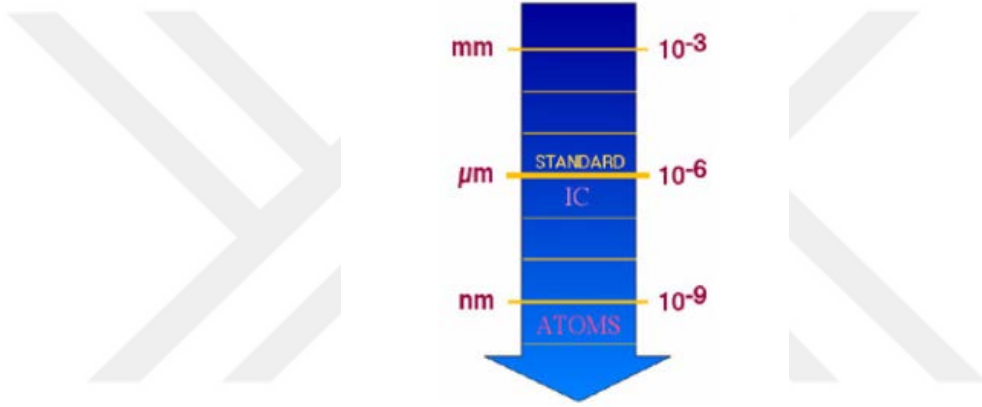
Çimento esaslı malzemeler üretilmesi için çimento, agrega ve su kullanılması yeterlidir. Ancak günümüzde kaliteli, güvenilir, yüksek dayanımlı, iyi performanslı ve ekonomik beton üretimi için katkı maddeleri temel malzeme olarak kullanılmaktadır. Çimentonun sahip olduğu özellikleri, iyi yönde ve belirli bir ölçüde değiştirmek amacı ile beton üretilirken veya üretildikten sonra katılarak taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini geliştirir (Erdoğan 2010). Katkı maddeleri, mineral ve kimyasal olarak iki guruba ayrılır.

Kimyasal katkıları, TS EN 934-2+A1'ye göre; sıvı halde olan bu katkıları organik ya da inorganik esaslı olup beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcının %5'ini aşmayacak oranlarda katılan maddelerdir. Beton katkı maddeleri; su, agrega ve çimento dışında betonlara çok düşük miktarda katılan organik ve inorganik kimyasal maddelerdir. Kimyasal katkıları; betonun akışkanlığının artırılması, erken ve yüksek dayanıma ulaşılması, geçirimsizliği ve dona dayanımının sağlanması yanında priz sürelerini değiştirmek gibi amaçlarla kullanılmaktadırlar.

Mineral katkıları betonunda kullanım amacı, yüksek dayanım ve durabilite taleplerini karşılamak ve atık-yan ürün olan puzolanları değerlendirmektir. Diğer taraftan, ince taneli mineral katkıları çimento esaslı malzemelerin özelliklerini geliştirmek, malzeme iç özelliklerini iyileştirilerek elde edileceği ve dolayısıyla iç yapıdaki değişikliklerin nano boyutta malzemeler kullanımı ile betonun işlenebilirliğini, dayanımı, dayanıklılığını ve ekonomiliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Erdoğan 2010).

2.2. Nanoteknoloji

“Nano” kelimesi, Yunanca’da cüce anlamına gelen “nanos” sözcüğünden türetilmiştir. Nano bir fiziksel büyüklüğün milyarda biri anlamına gelmekte ve nanometre ise metrenin milyarda biri olup kısaca “nm” ile gösterilmektedir. Bir nano metrenin içine yan yana ancak 2-3 atom dizilebilir, yaklaşık 100-1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. 1 Metre = 10^3 Milimetre = 10^6 Mikrometre = 10^9 Nanometre (Bozkaya 2013)

Nanoteknoloji; nanometre ölçeğindeki malzemelerin tasarımı, üretimi, montajı, karakterizasyonu ve bu malzemelerden elde edilmiş minyatür fonksiyonel sistemlerin uygulamalarını inceleyen ve hızla gelişen disiplinler arası araştırma-geliştirme faaliyetlerinin tümünü temsil etmektedir. Başka bir deyişle, nano ölçekteki maddelerin anlaşılmasını, kontrol edilmesini inceleyen ve bu kapsamda ürün özelliklerinin gelişmesini amaçlayan bir bilim alanı olarak ifade edilebilir (Birgisson *et al.* 2010; Bozkaya 2013).

Nanoteknoloji, maddenin atomik-moleküler boyutta mühendisliğinin yapılarak yeni özelliklerinin açığa çıkarılması, nanometre ölçeğindeki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olayların anlaşılması, kontrolü ve üretimi amacıyla işlevsel malzemelerin, yapıların ve sistemlerin geliştirmesidir. Nanoteknoloji, atom ve molekül yapılarını tek tek

değiştirerek, istenilen yapının oluşturulması ilkesine dayanmaktadır. Bu teknoloji ile aşından bilgisayar ve otomobil lastiğine, hatta bugün düşünemediğimiz maddelere kadar, hemen her şeyi değiştirmenin mümkün olduğu ifade edilmektedir (Elvin *et al.* 2005).

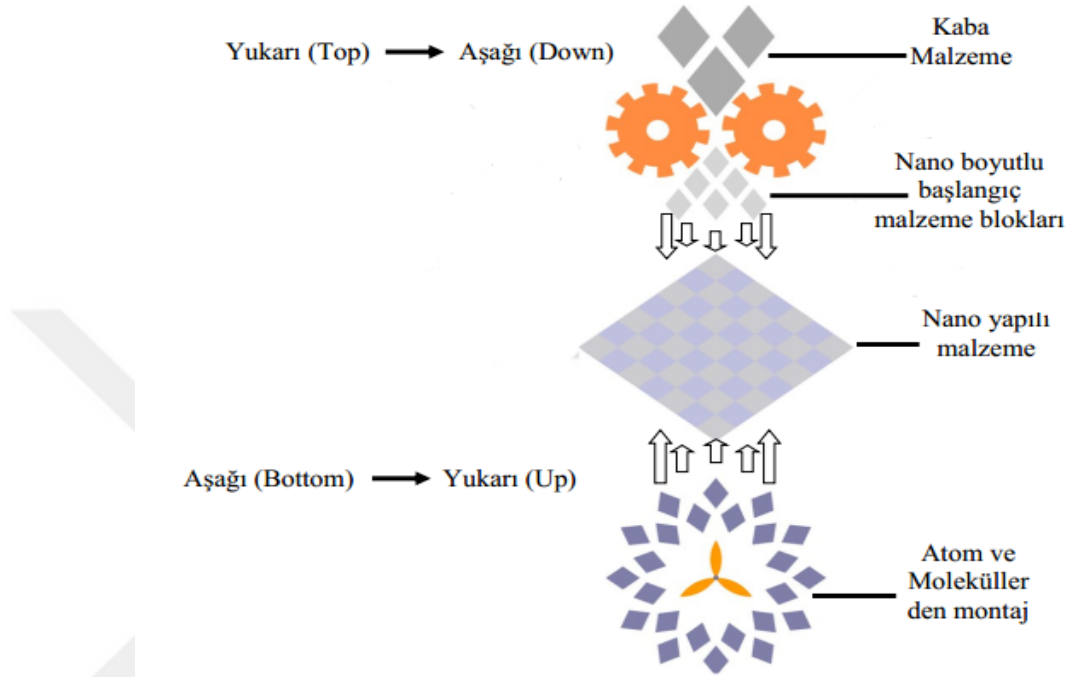
Nanoteknoloji, çeşitli araçların, malzemelerin ve yapıların moleküller düzeyde işlenmesi ve yaratılması olarak tanımlanabilir. Nanoteknoloji maddeyi oluşturan atomları kontrol ederek, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine ve yeni ürünlerin geliştirilebilmesine olanak sağlayan bir teknolojidir. Nanoteknoloji, maddelerin nanoboyutlarda sahip oldukları üstün fiziksel özelliklerini kullanarak farklı alanlarda teknolojiye devrim niteliğinde yeni ürünler elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Nanoteknoloji ile çok fonksiyonlu ve yüksek performanslı inşaat malzemeleri üretilebilmekte, yapı endüstrisinde de çelik, polimer, beton ve çimento gibi malzemelerde potansiyel etkisini göstermektedir.

Nanoteknolojide, nano boyutta malzeme üretimi için iki tür yaklaşım bulunmaktadır; (a) "Bottom-up" aşağıdan yukarı ve (b) "Top down" yukarıdan aşağıya yaklaşımı olarak tasarımıdır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi, "Bottom-up" yaklaşımı aşağıdan yukarıya doğru olan yaklaşım, atomla atom veya molekülle molekülün birleştirerek organik veya inorganik yapıların oluşturulmasıdır. "Top down" yaklaşımında, malzemeye dışarıdan mekanik ve kimyasal işlemler ile enerji verilmesi sonucunda malzemenin nano boyuta kadar inebilecek küçük parçalara ayrılması esas alınmaktadır. Başka bir deyişle; katı bir maddenin aşındırma veya oyma gibi mekanik etkilerle bölünerek oluşturulması esasına dayanır.

Çoğu çağdaş teknolojiler "Top-down" yaklaşımına dayanırken, moleküller nano-teknoloji ile malzeme üretimlerinde, elektronik, tıp ve sağlık, enerji, biyoteknoloji, bilgi teknolojisi ve ulusal güvenlikte inanılmaz imkanlar vaat etmektedir (Sanchez *et al.* 2010).

Nano boyutlarda gerçekleşen değişimler, makro boyutlardaki malzeme özelliklerini etkilemekte, nanoteknoloji ile geleneksel malzemelere oranla oldukça düşük enerjili,

uzun ömürlü, sürdürülebilir, çok daha yüksek fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip çimento esaslı malzemeler üretilebilmektedir.



Şekil 2.2. Nanoteknolojide “Top-down” ve “Bottom-up” yaklaşımlarının illüstrasyonu (Sanchez *et al.* 2010)

Ayrıca, nanoteknoloji kullanarak geleneksel yöntemler ile üretilenlere oranla daha sağlam, daha kaliteli, daha uzun ömürlü, daha ucuz, daha hafif ve daha küçük yapılar geliştirebilmektedir. Nanoteknoloji ile durabilite, termal, elektrik ve magnetik iletkenlik/yalıtım gibi özellikleri gelişmiş, performansı daha yüksek olan akıllı malzemeler üretebilmesini mümkün kılmaktadır (Andereson *et al.* 2007). Nanoteknolojinin amaçları kısaca,

- Nanometre ölçekli yapıların analizi,
- Nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması,
- Nano ölçekli cihazların geliştirilmesi,
- Nanometre ölçekli yapıların üretimi,
- Daha az malzeme ve enerji kullanarak, daha dayanıklı, daha hafif ve daha hızlı yapılar elde edilmesi şeklinde özetlenebilir (Seventekin, 2006; Bozkaya 2013).

Son yıllarda tıp, tekstil, kimya, elektronik, biyomekanik, ilaç ve inşaat gibi bir çok sektörde nanoteknoloji kavramı giderek yaygınlaşmaktadır (Balaguru *et al.* 2006).

2.3. Çimento Esaslı Malzemelerde Nanoteknoloji

Yapı malzemesi alanında, özellikle de çimento esaslı malzemelerde nano malzemelerin farklı uygulamalarıyla ilgili çok sayıda araştırma yapılmaktadır (Kawashima *et al.* 2013). Nanoteknoloji hemen hemen tüm alanlarda (enerji, savunma, bilgi ve teknoloji, ziraat, çevre kuruma ve sağlık) geniş bir uygulama alanına sahip en aktif araştırma alanlarından biridir (Sanchez *et al.* 2010).

Beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan malzeme olduğundan nanoteknoloji ile kalitesi arttırılmaya çalışılmış ve geleneksel betonlardan çok daha üstün özellikler elde edilmiştir. İnşaat sektöründe, diğer bilim ve mühendislik dallarında olduğu gibi nanoteknolojideki gelişmeler yakından takip edilmekte ve olası yeni uygulama alanları belirlenmeye çalışmaktadır. Nanopartiküllerin yapı malzemelerinde kullanımı her geçen gün daha da ilgi çekmektedir. Nanoteknolojinin inşaat sektöründe yaygın olan uygulama alanları;

- Yeni üretim teknikleri, cihazlar ve kontrolleri,
- Nanoyapılı düzenlenmiş malzemeler,
- Yüksek performanslı yapısal malzemeler,
- Akıllı yapılar ve mikro/nano sensörlerin kullanımı,
- Özel kaplamalar, boyalar ve ince filmler,
- Çok fonksiyonlu malzemeler ve bileşenler,
- Enerji tasarruf yapan ışıklar, yakıt pilleri, iletişim ve bilgisayar cihazları olarak sınıflandırılmaktadır (Zhu *et al.* 2004).

Son yıllarda yapı malzemesi alanında, çimento esaslı malzemeler, özellikle, nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nano-CaCO₃, nano-partiküller, nano-kil vb içeren malzemelerde nanoteknolojinin farklı uygulamalarıyla ilgili çok sayıda araştırma

yapılmaktadır. Bu malzemelerin davranışı esas olarak arayüzeydeki kimyasal reaksiyonlardan etkilenir. Bu nedenle, çimento esaslı malzemelerde nano parçacıkların kullanılması taze ve sertleşmiş koşullardaki davranışlarını değiştirerek daha iyi sonuçlar vermektedir (Sanchez *et al.* 2010; Senff *et al.* 2012).

2.4. Çimento Esaslı Malzemelerde Kullanılan Nano Malzemeler

Nano malzemeler yapı alanında giderek artan bir oranda kullanılmakta ve bir çok yapı için faydalı ve hedeflenen özellikleri sunmaktadır (Teiaer *et al.* 2011). Örneğin, nano malzemelerin betona eklenmesi durumunda basınç dayanımı, aşınma direnci ve eğilmede çekme dayanımını geliştirmektedir. Buna bağlı olarak, enerji ve çevresel faydalar da göz önünde bulundurularak dünyadaki çimento tüketiminin azaltılması en önemli amaçlardandır (Raki *et al.* 2010).

Nano malzemeler çimento esaslı kompozitlerde kullanıldığında, örneğin, NS beton ve harçların işlenebilirlik, dayanım ve durabilitesini geliştirir, su geçirimsizliğini, priz süresini düşürür ve hidrasyonu hızlandırır (Zahedi *et al.* 2015; Rong *et al.* 2015). NS, erken yaşlarda çimento harcın basınç dayanımı ve elektrik direncini artırarak, (Mohseni *et al.* 2015) yüksek sıcaklığa karşı iyi direnç gösterir (Lim *et al.* 2012; Heikal *et al.* 2013; Heikal *et al.* 2014). NS, mikro yapıyı geliştirmek için sadece bir filler/dolgu malzemesi gibi davranmayıp aynı zamanda bir aktivator gibi puzolanik reaksiyonları ilerletmektedir (Rong *et al.* 2015; Patil *et al.* 2016). NS kullanması durumunda, daha fazla C-S-H jeli şekillenmekte olup, beton içindeki portlandit miktarına dikkate değer düşüşler meydana gelmekte (Zhang *et al.* 2012; Heikal *et al.* 2014), kalsiyum hidroksit (C-H) ile reaksiyona girince, C-H' i tüketip, C-S-H miktarını artırarak kompakt bir mikroyapı oluşturmaktadır. NA, çimento esaslı malzemelerde kullanılması durumunda, elastisite modülü, basınç dayanımı, mekanik özelliği ve hidrasyon ısısını artırır (Phoongernkham *et al.* 2014; Heikal *et al.* 2015), priz süresini hızlandırır (Nazari *et al.* 2011), kapiler boşlukları doldurarak, çimento ve agrega arasındaki (ITZ) geçiş bölgesini homojen ve kompakt bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır (Barbhuiya *et al.* 2014; Heikal *et al.* 2015). Nano-CaCO₃, çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımı, eğilme

dayanımını ve hidrasyon ısını artırarak, priz süresi, boşluk oranı, klorür geçirimsizlik ve akışkanlığını azaltmaktadır (Liu *et al.* 2012; Kawashima *et al.* 2013; Shaikh *et al.* 2014). NT, çimento esaslı malzemelerde kullandığında, erken yaştaki hidrasyonu hızlandırır (Zhang *et al.* 2015), basınç dayanımı, elektrik direnci, performans ve aşınmaya karşı direncini artırarak (Essawy *et al.* 2014), su adsorpsiyunu düşürür, eğilmede çekme dayanımlarını ve gözeneklerini iyileştirmektedir (Li *et al.* 2007).

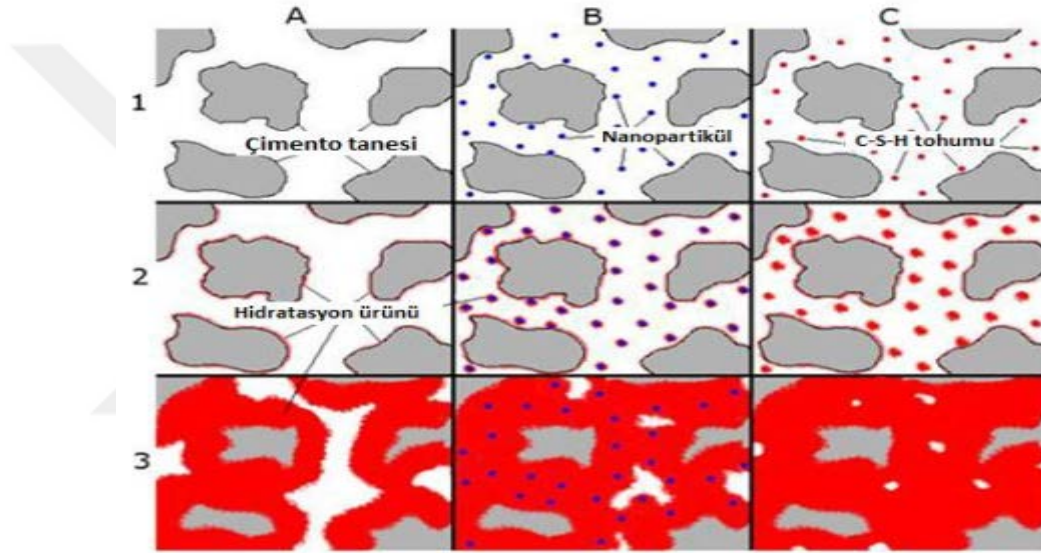
Nano parçacıklar, portlanditin küçük ölçekli kristallerinin oluşmasına ve C-S-H'in uniform dağılım göstermesine neden olmaktadır. Nano malzemeler, çimento esaslı kompozitlerde kullanılması durumunda, yüksek yüzey alanları ve daha güçlü elektrostatik kuvvetlere sahip olduklarından dolayı (Singh *et al.* 2012), çimento kinetiğini etkileyip hidrasyonun önemli bir biçimde hızlanmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, nanobeton üretimi ve kullanımı üzerine yapılacak araştırmalar önem kazanmaktadır. Hidrasyon sürecinin hızlanması nanopartiküllerin reaktif yüzeylerinde gerçekleşen reaksiyonlarla ilgili olduğu için bu partiküllerin yüzey alanları veya boyutları çimento hidrasyon kinetiği açısından önem kazanmaktadır (Land *et al.* 2012).

Nano malzemeler yüksek yüzey alanlarından dolayı agrega ve çimento ara yüzeyini (ITZ) güçlendirmektedir. Hidratlı çimento harçların açık gözenek sistemindeki nano gözenekleri etkin bir şekilde doldurarak, harç parçacıklarının mukavemetini artırır, harç-elyaf arayüzleri, temas alanının yapısal özelliklerini geliştirmektedir (Heikal *et al.* 2014). Nano malzemeler, sadece çekirdekleştirici, dolgu maddesi, çimento matrisinin gözenek boyutu ve gözenekliliğini azaltıcı olarak değil, aynı zamanda çimento fazlarının hidrasyonunu artırarak çimento hamuru ve agrega arasındaki arayüzeyi (ITZ) geçiş bölgesini güçlendiren ve çimento matrisinin mukavemetini arttıran bir nano takviye olarak de kullanılmaktadır (Wei *et al.* 2014).

Nano partiküllerin ilavesi sayesinde, hidrasyon ürünleri çimento tanelerinin arasında da oluşmaya başladığı için nanopartikül içermeyen bir referans karışıma göre çok daha boşluksuz bir içyapının oluşumu kısa sürede gerçekleşir. Bu şekilde, daha boşluksuz,

erken yaşta yüksek basınç dayanımına sahip çimento esaslı kompozit malzemelerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Nano partiküller ilavesiyle hidrasyon kinetiğinin iyileştirmesine çalışılan her iki yöntemde de, hidrasyon ürünlerinin çekirdekleri sadece çimento tanelerinin üzerinde değil aynı zamanda bu nano partiküllerin üzerinde, çimento tanelerinin arasında da Şekil 2.3'de belirtildiği gibi oluşmaktadır.



Şeki 2.3. (a) Çimento hidrasyonu (b) Nano tanecik katkılı (c) C-S-H nano tanecikler (Land *et al.* 2012)

Nano malzemeler, çimento hidrasyonu ile birlikte anıldığında genellikle hidrasyon kinetiklerini hızlandırıcı bir etki olarak Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , Fe_2O_3 , CSH fazı, amorf nano- SiO_2 gibi farklı nano tanecikler akla gelmektedir. Bu nano malzemelerin bir kısmı, hidrasyonun üzerinde devam edeceği çekirdekler meydana getirerek reaksiyonun hızlanmasına yardımcı olurken, CSH ve nano- SiO_2 gibi bazıları ise puzolanik reaksiyon yardımıyla hidrasyon kinetiklerinin hızlanmasına yardım etmektedir (Land *et al.* 2015).

Son 25 yıllık gelişmelerde, malzemeleri en küçük boyutlarda incelemesi ve kullanım imkanı ile nano-bilimdeki gelişmeler yapı malzemesi alanında önemli etkiler

oluşturmaktadır. Bunların başında beton teknolojisi üzerindeki etkileri gelmektedir. Çimento esaslı malzemelerde kullanılan nano malzemeler hakkında ayrı ayrı başlık altında bilgi verilmektedir.

2.4.1. Nano-SiO₂ (NS)

NS, taneciklerinin boyutu 5 ile 100 nanometre arasında, ağırlıkça %15'i 5 nm, %30'u 8 nm ve en az %50'si ise 100 nm boyutundadır (Patil *et al.* 2016). NS, çimento esaslı kompozitlerde kullanıldığında, beton ve harçların, işlenebilirlik, dayanım ve durabilitesini geliştirir, su geçirimsizliğini ve priz süresini düşürür. Erken yaşlarda çimento harcın basınç dayanımı ve elektrik direncini artırarak, yüksek sıcaklık altında termal stabilitesinin iyileştirir (Heikal *et al.* 2014; Zaheddi *et al.* 2015; Rong *et al.* 2015; Mohseni *et al.* 2015; Patil *et al.* 2016). Ayrıca, çimento esaslı malzemelerin hidrasyonunu hızlandırdığı bilinmektedir.

NS kullanması durumunda, beton içindeki portlandit miktarında dikkate değer düşüşler meydana gelmekte olup, kalsiyum hidroksit (C-H) ile reaksiyona girince, C-H' i tüketip, C-S-H miktarını artırarak kompakt bir mikroyapıya neden olmaktadır. NS mikro yapıyı geliştirmek için sadece bir filler/dolgu malzemesi gibi davranmayıp aynı zamanda bir aktivator gibi puzolanik reaksiyonları ilerletmektedir. Diğer kür yaşlarına kıyasla nano taneciklerin etkisi erken yaşlarda, özellikle ilk üç günde, daha çok belirgindir. NS, taneciklerinin çok üstün reaktiflerinden dolayı hidrasyon reaksiyonlarını sürdürmekte ve puzolanik reaksiyonları hızlandırmaktadır.

NS tanecikleri çimento harcının ara yüzeyini aşağıdaki dört şekilde modifiye etmektedir (Sobolev *et al.* 2009; Hosseini *et al.* 2010).

- Puzolanik reaksiyonla C-H' i tüketip, daha çok C-S-H oluşturma,
- Çekirdekleşme yeri olarak hareket etme,
- Kristalizasyonu kontrol etme,
- Mikro düzeyde dolgu etkisini geliştirmektedir.

a. Çimento hamuru taze şekil verilebilir kıvamda iken: Çimento esaslı malzemede NS ilavesiyle çimento hamurunun başlangıç ve bitiş priz süresini su ihtiyacını artırarak, akışkanlığını düşürmektedir. Ayrıca, hamurun işlenebilirliğini zorlaştırır, viskozitesini ve çekme dayanımını iyileştirmektedir.

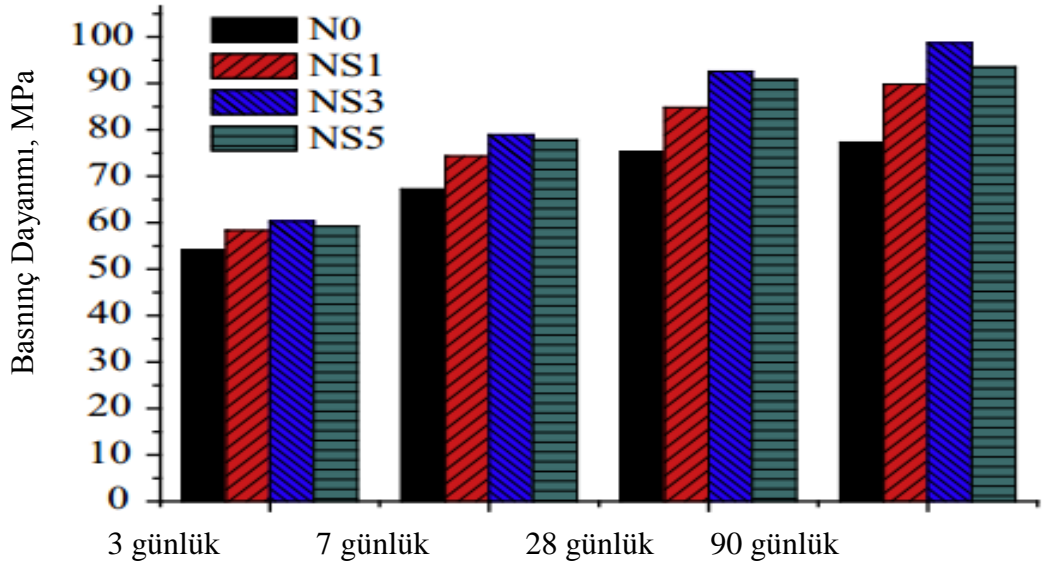
Heikal *et al.* (2014), yaptığı çalışmada, Portland çimentosu harcında süper akışkanlaştırıcı ve kimyasal katkısız harçların, başlangıç ve bitiş priz süresinde, NS ilavesiyle kısıalma olduğunu belirtmişlerdir. Supit *et al.* (2015), %2 ve %4 oranında NS parçacıkları kullanması durumunda çimento esaslı malzemelerin akışkanlığını %40 ve %60 oranlarda düşürdüğünü ifade etmiştir. Pourjavadi *et al.* (2012), farklı oranlarda NS parçacıkları ilavesi ile, betonun başlangıç ve bitiş priz süresini azalttığını, viskozitesini ve çekme dayanımını artırdığını belirtmiştir. İtim *et al.* (2011), yaptıkları çalışmada çimentoya kalker tozu veya doğal puzolan ile ilavesi ile erken yaşta çimento hidrasyonunu hızlandırarak otojen rötresini artırmıştır, çimento içerisindeki kalker tozu, doğal puzolan ve cüruf miktarı artırıldığında otojen rötresinde de artış meydana geldiğini rapor etmiştir.

NS eklenmesiyle hem hidrasyon kinetiğinde hem de hamurun mikro yapısında başlangıç hidrasyon oranında, puzolanik reaksiyon sonucunda hamur içinde oluşan C-S-H jelleri miktarına artış, porozitede azalma, ve C-S-H jelinin mekanik özelliklerinde meydana gelen iyileşmeler gibi önemli gelişmeler meydana gelmektedir (Gaitero *et al.* 2010). Kür yaşlarına kıyasen nano malzemelerin etkisi erken yaşlarda, özellikle ilk üç günde, daha çok belirgindir. NS içeren malzemelerin çok yüksek reaktifliklerinden dolayı hidrasyon reaksiyonlarını sürdürmekte ve puzolanik reaksiyonlarını hızlandırmaktadır. Shih *et al.* (2006), tarafından BET ve MIP deneyler ile yapılan çalışmada, NS ile üretilen Portland çimentosu kompozitleri daha sağlam, yoğun ve stabil bir yapıya sahip olduğunu ifade etmiştir.

b. Çimento hamuru sertleşmiş halde iken:

NS'in basınç dayanımı üzerine etkisi: Beton ve harçlarda nanoparçacıkların kullanılması ile taze ve sertleştirilmiş koşullardaki davranışlarını hem fiziksel hem de mekanik ve mikroyapı artmasını önemli ölçüde etkilemektedir (Senff *et al.* 2012). NS ilavesiyle, çimento hamurunun NS'in miktarı, su/çimento oranı ve kür şartlarına bağlı olarak basınç dayanımı arttırmaktadır. Erken yaşlarda NS'in oranı arttıkça puzolanik davranışından dolayı dayanımı artmaktadır (Qing *et al.* 2007).

Rong *et al.* (2015), %3 oranında NS kullanmasıyla harç numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımlarını sırasıyla, %111.5, %117.4, %123.1 ve %127.7 oranlarda artış gösterdiğini ifade etmiştir. NS oranı %5'ten fazla kullandığında kontrol numunelerine göre aynı harcın basınç dayanımında az bir düşüş meydana geldiği de Şeikl 2.4'ten görülmektedir.



Şeikl 2.4. Farklı dozajlardaki nano-SiO₂ oranları ile üretilen çimento harçların basınç dayanımı değerleri (Rong *et al.* 2015)

Berra *et al.* (2012), yaptıkları çalışmada NS eklenmesiyle çimento hamurunun basınç dayanımı 3 ve 28 günlük numunelerde yaklaşık olarak %17-41 ve %20-25 oranlara kadar artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Sobolev *et al.* (2009) tarafından yapılan çalışmada %0.25 oranında NS kullanmasıyla 28 günlük numunelerin basınç

dayanımında %10, eğilmeye çekme dayanımında ise %25 oranda bir artış gözlemlendiği belirtilmiştir.

c. NS'in yüksek sıcaklıklara maruz kalan çimento esaslı malzemeler üzerindeki etkisi: Çimento esaslı malzemeler, bir çok yapı malzemesine kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan çimento esaslı malzemeler belirli bir süre için önemli bir zarar görmez ve zehirleyici gaz çıkarmaz. Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir.

Çimento esaslı malzemelerde NS kullanılması durumunda, kullanılan nano malzemelerin tipine ve oranına bağlı olarak yüksek sıcaklığa karşı direnç göstermektedir. Yapılan çalışmalarda farklı oranlarda NS ve diğer katkı maddeleri kullanarak 1000°C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda NS'in davranışı araştırılmıştır. Heikal *et al.* (2013), yaptıkları çalışmalarında, çimento esaslı kompozitlerde %10 oranda uçucu kül ve silis dumanı kullanarak 450°C sıcaklıklarda yangına karşı yüksek direnç gösterdiği belirtilmiştir. Heikal *et al.* (2014), %30 oranında YFC ve %4 oranında NS kullanılması ile diğer kompozitlere göre yangına karşı direncinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

d. Donma-çözölmeye maruz kalan çimento esaslı malzemeler üzerine NS'in etkisi : Çimento esaslı malzemeler taze haldeyken don etkisine maruz kalınca, su donarak hacmi artar. Buz oluşumu sonucunda taze beton bünyesinde katı taneciklerin hareketi ile kütle transferi meydana gelmekte olup, su beton bünyesinde yeniden dağılıp, buz kütlelerinin büyümesini neden olmaktadır. Taze beton donduğunda iri agrega taneler ve çimento harcı ara yüzeyi bağlayan kütle transferi nedeniyle bozulur. İri agrega taneciklerinin özgül ağırlıkları betona kıyasla büyük olduğundan, ısıyı çimento harcından daha iyi iletirler. Beton donmaya başlayınca, agregalar daha çabuk soğur ve sonuçta taze betonda bozulma meydana gelmektedir.

Sertleşmiş ve suya doygun haldeki bir beton don etkisinde kalınca, çimento harcının içindeki kapılar boşluklardaki su donar ve genişir. Genleşme sonucu oluşan

gerilmelerin betonun çekme dayanımını aşması halinde betonda; kabuk atma, çatlama, ufalanma şeklinde bozulmalar meydana gelmektedir.

Çimento esaslı malzemelerin donma çözülme etkisine karşı direnç göstermesi, malzemelerin dayanımı, doyma derecesi ve gözenek sistemi gibi bir çok parametrelere bağlıdır. Çünkü, çimento ürünlerinin performansını etkileyen parametrenin başında Ca(OH)_2 olduğu bilinmektedir (Çolak, 2003). Tuyan *et al.* (2014), yaptıkları çalışmada çimento ağırlığının %10'u oranında farklı puzolanik (uçucu kül $4040 \text{ cm}^2/\text{g}$, metakaolin $11768 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve silis duman $18000 \text{ cm}^2/\text{g}$) malzemeler kullanarak 300 donma-çözülme çevrim sonrası harç numunelerin basınç dayanımlarında sırasıyla %18, %11 ve % 7 oranlarında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Dursun (2005), yaptıkları çalışmada, farklı tür puzolan kullanarak beton ve harç numunelerinin dayanımı ve donma dayanıklılıklarını incelemişlerdir. Çimento yerine %6 oranında cüruf, %8 oranında tras kullanması durumunda, numunelerin daha yüksek basınç ve çekme dayanımına sahip oldukları ve donma-çözülmeye karşı daha iyi dayanıklılık gösterdikleri ifade edilmiştir. Nano malzeme içermeyen harç numunelere kıyasen, nano malzeme içeren numunelerin D-Ç'ye karşı iyi direnç gösterdiği, özellikle NS taneciklerinin çok üstün reaktiflerinden dolayı iç yapısındaki boşlukları doldurarak geçirimsizliği daha az dayanım ve dayanıklılığını daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

2.4.2. Halloysit nano-kil

Kil, kristal yapıları birbirinden farklı olan bir kaç mineralin oluşturduğu mineral karışımının genel adıdır. Doğada bol miktarda bulunmaktadır ve saf olarak bulunması son derece zordur. Yapısındaki kil mineralleri dışında en çok kalker, silis, mika ve demir oksit bulunmaktadır.

Nanokil, nano metre aralığında, en az tek boyutlu olan aynı zamanda boy-en oranları son derece yüksek olan partiküllerdir. Tabakalı yapılar ve zengin iç kimyasına sahip olduğu, aynı zamanda kolay temin edildiği, her bölgede bulunduğundan dolayı hafif ve

yüksek performanslı nano kompozit üretimi konusunda umut vermektedir (Zeng *et al.* 2005). Nano kil, çok çeşitli, yüksek performanslı nano-kompozit, çimento için yeni nesil bir malzemedir. Modifiye edilmiş nano-kil ve nano-simektit, hidratlı ürünlerin oluşumu için çekirdeklenme yüzeylerini arttırmakta ve çimento hamurun mikro yapısını geliştirmektedir (Heikal *et al.* 2016). Killer, kimyasal bileşimlerine ve buldukları ortamlara göre çeşitli yazarlar tarafından sınıflandırılmıştır. Aşağıda bazı kil türleri gösterilmektedir

- Kaolin grubu; kaolinit, halloysit, diksit
- Simektit grubu; montmorillonit, biedelit, nontronit
- Illit grubu, ve
- Klorit, grubu

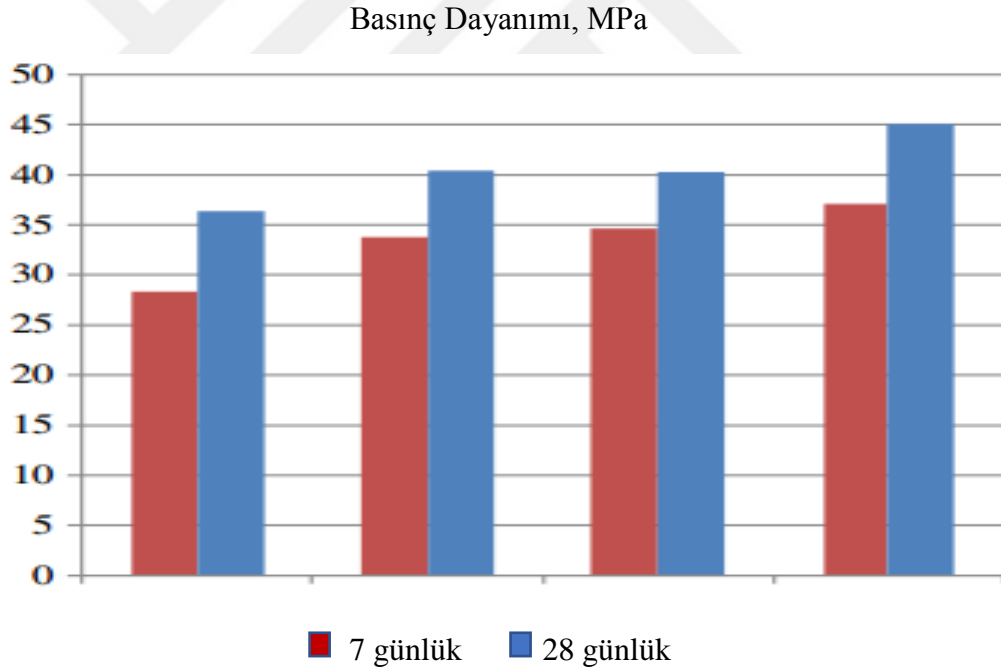
Çalışmada yukarıdaki kil türlerinden kaolin grubu içerisinde yer alan halloysit kil çeşidi kullanılmıştır.

Halloysit nano-kil (HNK), içi boş nanotüp yapıya sahip, kimyasal olarak dış yüzeyi SiO_2 'ye iç silindir göbeği ise Al_2O_3 'e benzer özelliklere sahiptir. Hidratlı alüminyum oksit ve silikon oksitten oluşan iki katmanlı (tabakalı) bir alüminosilikat kildir (Farzadnia *et al.* 2013). HNK'in kimyasal bileşimi $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ şeklindedir. İki kat alüminosilikat tabakasından oluşmakta ve 60°C 'de suyunu kaybederek metahalloyisite dönüşür (İbrahim *et al.* 2012).

HNK; ucuz, dayanıklı, bol miktarda bulunur ve ekonomik olarak uygulanabilir bir malzemedir. Parçacıklarının boyutu 1-15 mikron uzunluk ve 10-150 nm iç çap arasında değişir (Kamble *et al.* 2012). HNK'in yüksek yüzey alanı ve büyük miktarda SiO_2 içermesi nedeniyle, harçlarda dozajı arttıkça karışımların akışkanlığını düşürür. Bunun nedeni ise, çok miktarda C-S-H oluşturan, fazla C-H tüketen, yüksek yüzey alanı ile açıklanabilen ve daha yoğun mikro yapıya sahip nanoparçacıklardır. HNK çimento esaslı malzemelerde kullanılması durumunda akışkanlığını düşürür, basınç dayanımını artırır ve çok küçük boyutlarda olduğu için çimento esaslı kompozitlerin mikroyapısını

yoğunlaştırır, gözeneklerini doldurur ve şişme özelliği nedeniyle betonun permeabilitesini azalttığını ifade etmişlerdir.

Al-Salami *et al.* (2013), çimento ağırlığının %2, %4, %6, %8, %10 %12 ve %14'ü kadar nano metakaolin kullanarak sertleşmiş çimento hamurunun 3, 7 ve 28 günlük mekanik ve fiziksel özelliklerini incelenmesi sonucunda, NMK kullanımı ile kontrol numunesine göre, çimento esaslı malzemelerin mikroyapısı, normal çimentoya kıyasla daha yoğun, kompakt ve uniform olduğunu ifade edilmiştir. Farzadnia *et al.* (2013), yaptıkları çalışma sonucunda, %3 oranında halloysit nano-kil kullanmasıyla kontrol numunelerine göre basınç dayanıma %24 artış, akışkanlığına %65 düşüş gösterdiğini belirtmişlerdir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Farklı oranlarda (%1, %2 ve %3) HNK ile üretilen çimento harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri (Farzadnia *et al.* 2013)

Nadeem *et al.* (2013), yüksek sıcaklıklara maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin sıcaklık artışıyla kontrol numunelerine göre çimento harcının basınç dayanımı azaldığı; 200°C'de %8-9, 400°C'de %16 ve 600-800°C arasında %46-%80 arasında basınç dayanımlarında düşüşler meydana geldiğini rapor etmişlerdir. Morsy *et al.* (2011),

yaptıkları çalışmasında %6 orandaki nano kil içeren harcın basınç dayanımının %18 oranında arttığını, %6 oranda NMK ve %2 oranda CNT içeren harcın basınç dayanımının ise kontrol numunesine göre %29 arttığını ifade etmişlerdir. Fan *et al.* (2015), çimento ağırlığının %3 ve %5 oranında NKK kullanması durumunda, kontrol numunelerine göre basınç dayanımı, donma-çözülme davranışı, ve elektrik direnci çok daha etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Heikal *et al.* (2016) çimento ağırlığının %6 oranda NMK ve %0.02 oranda ise KNT kullanması ile kontrol numunelerine göre çimento harcın basınç dayanımında %29 artış gösterdiğini tespit etmişlerdir.

2.4.3. Nano-CaO (NC)

CaO genel olarak genleşen katkı olarak rötire azaltılmasında kullanılmaktadır. CaO esaslı katkıları, çimento esaslı malzemelerle kullandığında basınç dayanımında artış meydana getirdiği, betonun çökme değeri ve akışkanlığını etkilediğini belirtmektedir (Shehu *et al.* 2016).

Çimento esaslı kompozitlerde rötire, çatlak ve diğer problemlerin iyileştirilmesi gereksinimlerinden dolayı genleşen çimentolar kullanımının yanı sıra karışım esnasında çimentoya eklenen katkıları ile genleşme üretilmektedir. Bu katkıları genelde MgO ve CaO esaslı katkılarıdır (Ali *et al.* 1998). Bu katkıları su ile reaksiyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ve Mg(OH)_2 'in hacimleri çok büyük olduğu için genleşme göstermektedirler. Beton içerisine kalsiyum oksit ve magnezyum oksit eklenerek betonda genleşme meydana getirip betondaki bozulmaları azaltarak çatlakları önleyebilmektedir

Schwartzentruber *et al.* (2004), yüksek dayanımlı harçların çatlakları üzerinde genleşen katkı, polivinli fiber, cam fiber ve metal fiberlerin etkisini araştırdığı çalışmasında CaO genleşen katkı, çimento ağırlığının %1 ve %3'u kadar kullanılmıştır. Neticede, kısıtlanmamış otojen rötrenin önemli derecede azaldığını ifade etmiştir. Shehu. *et al.* (2016), pişirilmiş kil ile CaO birlikte kullanılması durumunda, betonun çökme değeri ve akışkanlığına iyi sonuç verdiği, ve 28 günlük basınç dayanımında 21 N/mm^2 'a kadar artış gösterdiğini belirtmiştir. Polat (2013, 2015), çimento ağırlığının %2.5, %5 ve %7.5

oranlarında mikro ve nano boyutta CaO ve MgO kullanarak, otojen rötredeki değişimi araştırdıkları çalışma sonucunda, nano-CaO kullanmasıyla kontrol numunelerine göre 28 günlük otojen rötrede %43, %40 ve %1.5 düşüş gözlemlendiği ifade etmiştir.

2.5. Diğer Nano Malzemeler

2.5.1. Nano- Al_2O_3 (NA)

Alüminyum oksit (Al_2O_3) nanoparçacıklar; doğada korondum (az miktarda demir, magnezyum silis içeren ve oldukça sert olan doğal alüminyum oksit) olarak bulunan, alüminyumun oksijenle yakılması veya hidroksit, nitrat veya sülfatın ısıtılmasıyla elde edilen maddedir. Suda hemen hemen hiç çözünmeyen Al_2O_3 , yüksek sertlik, düşük yoğunluk, ısı kararlılık ve korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptir.

Al_2O_3 nanoparçacıklar, çimento esaslı malzemelerin eğilme ve çekme dayanımını güçlendirmek, seramik ve kaplamalarda yangın dayanımını arttırmak, yüksek ısı ve ışık yansıtma değerleri ile aydınlatma elemanları gibi alanlarda kullanılmaktadır. NA içeren çimento hamuru, harç ve betonun elastisite modülü (Barbhuiya *et al.* 2014), mekanik özellikleri, hidrasyon ısı (Nazari *et al.* 2011; Heikal *et al.* 2015) ve ileri yaşlardaki basınç dayanımları artmakta, priz süresi hızlanmakta (Nazari *et al.* 2011), çimento ve agrega arasındaki (ITZ) geçiş bölgesi daha homojen ve kompakt olmaktadır.

Bağlayıcı oranının %5'i kadar nano- Al_2O_3 'in kullanıldığı bir çalışmada elastisite modülünün 28 gün sonunda %143 oranında arttığı ve basınç dayanımında kayda değer bir artış olmadığı tespit edilmiştir (Barbhuiya *et al.* 2014). Oltulu *et al.* (2013), nano- SiO_2 , nano- Al_2O_3 ve Fe_2O_3 kullanarak uçucu kül içeren harçların basınç dayanımı ve kapiler su emme özelliklerini araştırmış ve sonucunda, nano malzeme kullanılması ile basınç dayanımında %32 oranında artış, kılcal boşluklarında ise %14 oranında düşüş olduğunu belirtmiştir. Heikal *et al.* (2015), %6 oranında NA kullanılmasıyla hidrasyon reaksiyonunda artış meydana geldiğini, prizin hızlandığını ve basınç dayanımının %27.22 oranında arttığını belirtmişlerdir. NA kullanması ile çimentoda hızlı priz

özellikleri verir, akışkanlığını artırır ve klinker sıcaklığını düşürmektedir. NS ve NA, betonun basınç ve eğilme dayanımlarını arttırmak için puzolanik ve dolgu maddesi gibi yaygın olarak kullanılmaktadır (Phoo-ngernkham *et al.* 2014).

Genel olarak, Al_2O_3 nanoparçacıklar, çimento esaslı malzemelerin eğilme ve çekme dayanımını güçlendirerek, elastisite modülünü artırmaktadır. Ayrıca, kaplamalar ve seramiklerde dayanım ve yangına karşı direncini artırmak amacıyla da kullanılmaktadır.

2.5.2. Nano- $CaCO_3$ (NCC)

Nano- $CaCO_3$, çimento esaslı malzemelerin priz süresini ve hidrasyonunu hızlandırır. Ayrıca uçucu kül içeren harçların erken yaştaki basınç dayanımları üzerinde de etkili olduğu bilinmektedir (Kawashima *et al.* 2013; Shaikh *et al.* 2014). Ayrıca betonun durabilitesini artırarak, C-S-H jelinin şekillenmesiyle mikroyapısını yoğunlaştırıp, çimento esaslı malzemelerin bünyesindeki boşlukların azalmasına neden olmaktadır (Shaikh *et al.* 2014). NCC kullanılması hidrasyon ısısının gelişimini önemli ölçüde hızlandırmakta ve C_3S hidrasyonunun indüksiyon periyodunu kısaltmaktadır.

Liu *et al.* (2012), yaptıkları çalışmada, %1 oranında NCC kullanılması durumunda erken yaşta (12 saatte) çimento hamurunun çatlak gelişiminde azalma olduğu, NCC miktarı arttıkça akışkanlığının azaldığı, priz süresinin kısaldığı ve çimentonun erken yaş hidrasyonunun hızlandığını ifade etmiştir.

2.5.3. Nano- TiO_2 (NT)

NT, ortalama parçacık boyutu 50 nm, yüzey alanı ise $\sim 50 m^2/g$, beyaz bir pigment ve iyi bir yüzey kaplama malzemesidir. Beton yüzeyi TiO_2 ile kaplanarak kendi kendini temizleme özelliğine sahiptir. TiO_2 ; fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri açısından üstün yapıları beton malzemeler geliştirmek, su tutucu (hidrofilik) özellikleri ile kendi

kendini temizleyen yüzeyler oluşturmak, üstün yansıtıcı özelliklere sahip kaplamalar elde edilmek gibi amaçlara yönelik kullanılmaktadır (Leydecker *et al.* 2008).

NT, beton ve çimento esaslı malzemelerde kullandığında, Portland çimentosunun erken yaş hidrasyonunu hızlandırdığı (Rong *et al.* 2015), betonun basınç dayanımı, performans ve aşınmaya karşı direncini arttırdığı (Noorvand *et al.* 2013; Essawy *et al.* 2014; Rong *et al.* 2015), eğilmede çekme dayanımlarını ve gözenek yapısını iyileştirdiği ifade edilmiştir. Mohseni *et al.* (2015), %5 oranında NT kullanmasıyla kontrol numunelere göre betonun elektrik direncinin arttığını, kendiliğinden yerleşen harç ve betonun su emme oranının düştüğünü ve kendi kendini temizleme özellikleri nedeniyle binalarda kaplama malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Senff *et al.* (2012), %5.2 oranda NT kullanması ile çimento harcın basınç dayanımı ve hidrasyon ısısının arttığını ifade etmiştir.

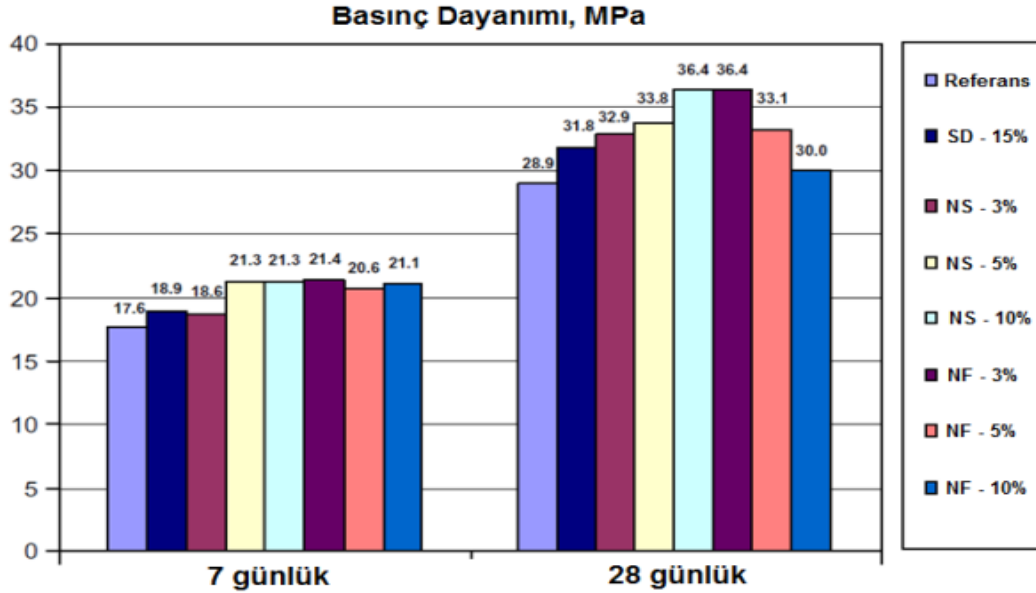
Genel olarak, NT çimento esaslı malzemelerde kullanıldığında, hidrasyonu hızlandırır, basınç dayanımı ve aşınmaya karşı direncini artırmaktadır. Ayrıca, kendi kendini temizleme özelliğe sahip, dış cephe ürünleri, camlar ve çadırlar dahil olmak üzere, güneş ışığı ve yağmur suyunun etkisiyle temiz kalabilme özelliklerine sahiptir.

2.5.4. Nano Fe₂O₃ (NF)

Çimento esaslı malzemelerde kullanılan NF, çimento hamurunun hidrasyonu hızlandırır, kapiler permeabilitesini, işlenebilirliğini ve priz süresini düşürür ve su emme oranını artırarak, basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımını iyileştirmektedir (Oltulu *et al.* 2013; Nazar *et al.* 2010). NS ve NF taneciklerinin birlikte kullanılması durumunda, modifiye edilmemiş çimento harcına kıyasen, daha yüksek basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı değerleri elde edilmektedir (Şekil 2.6).

Oltulu *et al.* (2013), yaptıkları çalışmada, nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ ve Fe₂O₃ kullanarak uçucu kül içeren harçların basınç dayanımı ve kapiler su emme özelliklerini araştırması sonucunda, nano malzemelerin kullanılması durumunda basınç dayanımını arttırdığını

belirtmişlerdir. Khoshakhalgh *et al.* (2012), %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında NF kullanılması durumunda kontrol numunesine göre çimento hamurunun hidrasyonunun hızlandığını belirtmiştir. Yazdi *et al.* (2011), %1 ve %3 oranlarında NF kullanılması



durumunda kontrol numunelerine göre, çimento hamurunun basınç ve eğilme dayanımlarının arttığını, %5 oranında ise dayanımların azaldığını ifade etmişlerdir.

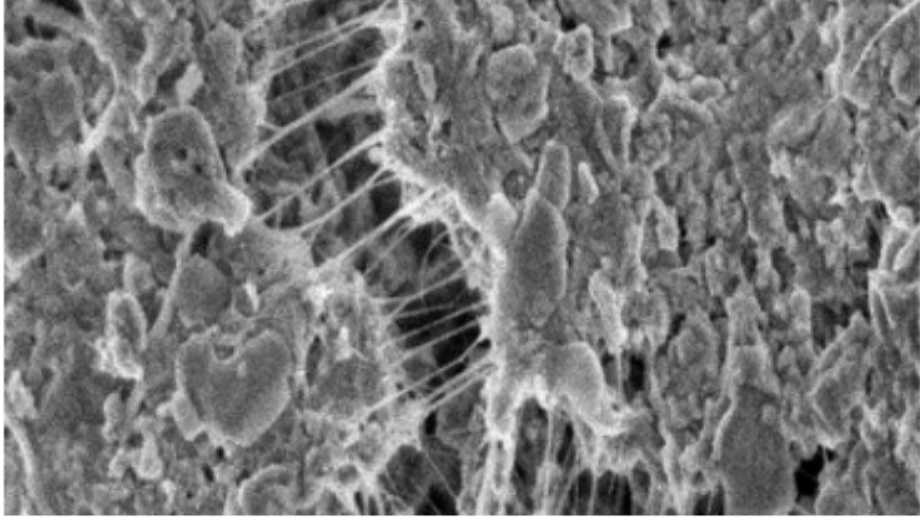
Şekil 2.6. Portland çimentosu ve silis dumanı harçlarına karşılık farklı dozajlardaki nano-SiO₂ ve nano-Fe₂O₃ oranları ile üretilen çimento harçların basınç dayanımı değerleri (Li *et al.* 2004)

2.5.5. Karbon nano-tüpler/ fiberler (CNT, CNF)

Karbon nanotüpler, en basit şekilde, nanometre çaplı, mikrometre boylu, içi boş bir silindir gibi düşünülebilir nano parçacıklardır (Maan *et al.* 2003). Karbon nanotüpler, tüp ekseninde çekmeye karşı çok sağlamdır. Hasar görmeden dayanımı gösterebilirler. Küçük çaplı (yaklaşık 1-2 nm) CNT'lerden oluşturulmuş bir demeti koparabilmek için uygulanan çekme kuvvetinin büyüklüğü yaklaşık 36 GPa ölçüsündedir.

CNT'ler ve CNF'ler, çimento esaslı malzemelerde nano donatı olarak kullanılmak için potansiyel adaydır. Çimento esaslı malzemeler yapısı gereğince gevrek bir malzeme gibi davranmakta olup, düşük çekme dayanımına sahiptir ve çatlamaya eğilimlidir. Çekme dayanımı, sünekliği artırmak ve dayanıklılığı iyileştirmek için bağlayıcı malzemeler içine fiberlerin eklenmesi alışılmış bir metottür. CNT ve çimento hidratasyonu ürünleri ara yüzeyinde yüksek bir bağ oluşturmaktadır. CNT'ler, çekmede yüklerini aktarması ile neticelenen çatlak ve boşluklar boyunca bir köprü gibi davranmaktadır (Makar *et al.* 2005; Li *et al.* 2005).

Çok yüksek dayanım ve elastisite modülü değerlerine, elastik davranışına, elektriksel ve termal özelliklerine ek olarak nanotüpler filler malzeme özelliği göstererek daha boşluksuz malzemeler elde edilmesine imkan vermektedir. Ayrıca, çatlak oluşumunu ve yayılmasını engelliyici yönde fayda sağlarken (Şekil 2.7) çimento hamuru-agrega arayüzünün kalitesini artırarak, neticede çok daha dayanıklı, enerji yutma kapasiteli kompozitler elde edilmesini sağlamaktadır (Raki *et al.* 2010).



Şekil 2.7. Tek duvarlı karbon nanotüp içeren hidrate olmuş Portland çimentolu kompozit malzemelerdeki çatlağın nanotüplerle engellenmesi (Raki *et al.* 2010)

Çimento esaslı malzemelerde CNT'ler kullanılmasıyla hem nano çatlaklar ile gözenekler arasında köprü vazifesi görmekte hem de çimento hidratasyon ürünleri

arasında iyi bir bağ oluşturmaktadır (Şekil 2.7). Polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı kullanılmasıyla CNT'lerin kümeleşmeleri iyileştirilmiş olduğu, fakat CNT'ler düşük yoğunluk ve yüksek yüzey alanına sahip olduğundan fiberlerin matris içerisindeki homojen olmayan dağılımları kaçınılmazdır (Gay *et al.* 2010).

Çimento esaslı malzemelerde, nanopartiküller ilavesi sayesinde, hidrasyon ürünleri çimento tanelerinin arasında oluşmaya başladığı için nanopartikül içermeyen bir referans karışıma göre çok daha boşluksuz bir içyapının oluşumu kısa sürede gerçekleşmekte olup erken yaşta yüksek basınç dayanımına sahip, daha boşluksuz çimento esaslı malzemelerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır (Björnström *et al.* 2004).

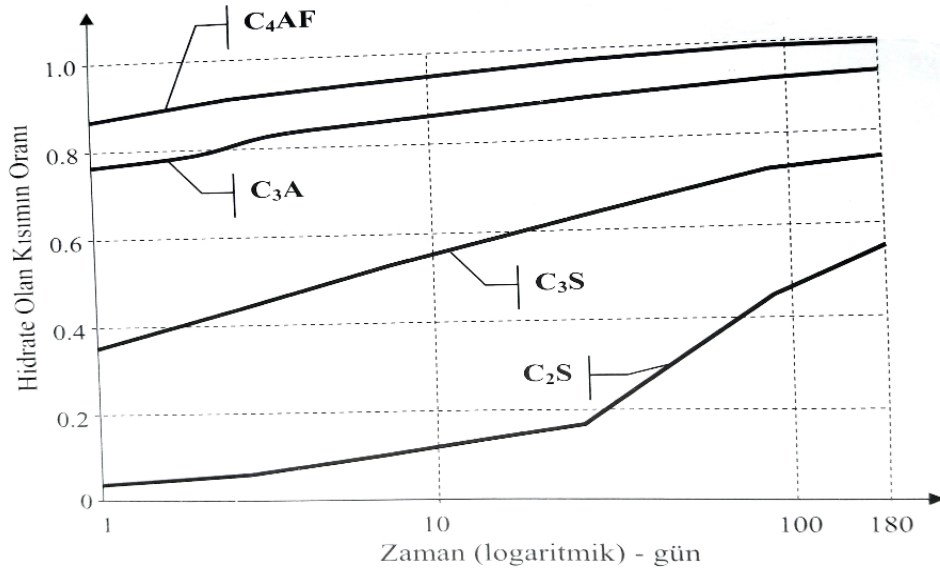
Ağırlıkça %0.2 oranında CNF kullanması durumunda Portland çimentosu kompozitlerinde yarmada çekme dayanımında %22 oranında bir artış ile sonuçlanmıştır. Su bağlayıcı oranına bağlı olarak terleme suyuyla CNT'lerin taşınması bazen kopozitin yüzeyinde CNF'lerin kümeleşmesi ile oluşmuş gözenekli bir tabaka ile neticelenebilmektedir (Gay *et al.* 2010). Morsy *et al.* (2011), yaptıkları çalışmada, homojen olarak matris içine dağılan çok duvarlı CNT'lerin (ağırlıkça) düşük oranlarda %0.02 oranında CNT eklenmesiyle kontrol numunesine göre, basınç dayanımında %29 artış gösterdiğini ifade etmiştir. Çok duvarlı CNT'lerin daha küçük boyutlarda kullanılmasıyla daha yüksek basınç dayanımları elde edip, nano düzeydeki gözenek alanları daha etkili bir şekilde doldurmaktadır (Balav, 2016). CNT'ler olağanüstü mekanik dayanım, esneklik, elektrik, kimyasal reaktif, optik aktiflik ve ısı iletkenlik gibi özelliklere sahiptirler.

2.6. Hidratasyon Isısı

Çimentoyu oluşturan bileşik maddelerin herbirinin su ile kimyasal reaksiyona girmesi ile hidrasyon olayının başlaması sonucu açığa çıkan ısının toplamına "hidratasyon ısı" denir. Hidratasyon ısısının açığa çıkan hızı, çimento bileşenleri ile su arasında yer alan kimyasal reaksiyonların hızına bağlıdır (Baradan vd 2015).

Çimento esaslı malzemelerin hacimce %60-%70'i agregalardan oluşmasına rağmen, çimento hamuru betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Çimento su ile birleşir birleşmez her anabileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve hidrasyon sonunda her anabileşen tarafından değişik hidrasyon ürünleri oluşmaktadır (Erdoğan 2010).

Karma oksit adı verilen ve çimentonun birçok özelliğini belirleyen bu bileşenlerden en önemlileri; trikalsiyum silikat ($C_3S=3CaO.SiO_2$), dikalsiyum silikat ($C_2S=2CaO.SiO_2$), trikalsiyum alüminat ($C_3A=3CaO.Al_2O_3$) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($C_4AF=4CaO.Al_2O_3$). Bu anabileşenlerin her biri su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve hidrasyon sonucunda her anabileşen tarafından değişik hidrasyon ürünleri oluşmaktadır.



Şekil 2.8. Çimento bileşenlerinin hidrasyonlarının zamana bağlı gelişimi

Şekil 2.8'den karma oksitlerin hidrasyon hızlarının birbirinden oldukça farklı olduğu görülebilir. C₃A ve C₄AF büyük oranda ilk günde hidrate olurken, C₃S 'nin hidrasyonu C₂S'e kıyasla oldukça hızlıdır. Bu nedenle çimentonun erken yaşlardaki dayanımının gelişiminde baskın öge iken, ilerleyen yaşlardaki dayanım gelişimi büyük

oranda C_2S bileşimine bağlıdır. C_3A ve C_4AF 'nin çimento hamurunun dayanımına önemli bir katkısı bulunmamaktadır. Kalsiyum oksitlerin su ile yaptıkları reaksiyonlar sonucu oluşan kalsiyum silikat hidrateler (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidratelerin (C-A-H) değişik ürünlerine jel denilmektedir (Baradan vd. 2010).

Hidratasyon, ya anhidre fazın tükenmesi (iyi kürlenmiş, s/ç oranı nispeten yüksek), ya suyun anhidre bölgeye erişememesi (çok yoğun ve yüksek oranda floküle sistem) veya gerekli suyun bulunmaması (çok düşük s/ç oranlı betonlar) hallerinde sona ermektedir (Pekmez 2006). Çimento bileşiklerinin tam olarak hidrate olması için uzun bir süre gerekmektedir. Örnek olarak; hidratasyon 28. gününde tanecik yüzeylerinde hidratasyon penetrasyon derinliği 4µm, 1 yılın sonunda ise 8 µm kadardır. 50 µm çapında bir klinkerin tam olarak hidrate olması için yaklaşık 5 yıl gerekmektedir (Yalçın 2006).

Çimento hamurunda az miktarda nano malzeme homojen bir şekilde dağıtıldığında, nano malzemelerin daha yüksek yüzey enerjilerinden dolayı çimentonun hidrate olmuş ürünleri nano malzemeler üzerine çökelmektedir. Nano malzemeler üzerine hidratasyon ürünlerinin çekirdeklenmesi ile çimento hidratasyonu ilerlemekte ve hızlanmaktadır (Björnström *et al.* 2004).

Said *et al.* (2012), yaptıkları çalışması sonucunda, çimento esaslı malzemelerde NS kullanılmasıyla hidratasyon ısısında ilk 15 saatte en fazla artış %3 oranındaki karışımda elde edildiği ifade edilmiştir. NS taneciklerinin boyutu çok küçük olduğundan dolayı hidratasyon ısısını hızlandırdığı görülmektedir. Bu artış NS rölünün puzolanik veya dolgu maddesi etkileri ile sınırlı olmadığını, aynı zamanda çok ince yapısı nedeniyle hidratasyon ısısını hızlandırdığını göstermektedir.

Çimento hamurunda NS eklenmesiyle C-S-H içeriğinde artış ve C-H miktarında da düşüş olmuştur. Lu *et al.* (2006), yaptıkları çalışmada, NS kullanması ile C-H miktarında azalma, hidratasyon ısısı ve kimyasal olarak bağlanmış su miktarında artış olduğunu ifade etmiştir. Senff *et al.* (2012a), %5.2 oranında NT kullanılması durumunda çimento harcının hidratasyon ısısını artırmış ve akışkanlığını azaltmıştır.

Nano-CaCO₃ kullanılması ile hidrasyon ısısı gelişimini önemli ölçüde hızlandırmakta ve C₃S hidrasyonunun başlama periyodunu kısaltmaktadır (Sato *et al.* 2010). Çimento esaslı kompozitlerde nano malzeme kullanılması durumunda, nano malzemeler küçük boyutlarda olduğu için ilk saatlerde hidrasyon ısısını hızlanmaktadır.

2.7. Basınç Dayanımı

Beton basıç dayanımı yüksek ve çekme dayanımı düşük gevrek bir yapı malzemesidir. Basınç dayanımına kıyasla küçük olan çekme dayanımı betonarme hesaplarda genellikle dikkate alınmadığından, üzerinde durulan en önemli özelliği basınç dayanımıdır. Bu nedenle, basınç dayanımı bilindiği takdirde, çekme ve eğilme dayanımlarının büyüklükleri hakkında da bilgi edilebilmektedir (Ararat 2015).

Beton, kompozit ve gevrek bir malzeme olmasıyla kendine özgü davranışı, zaman ve yük geçmişi ile ilişkilidir. Betonun mekanik özelliklerinden bahsedildiğinde ön plana çıkan betonun basınç dayanımı ve deformasyonudur. Tüm mekanik dayanımları (basınç, çekme, eğilme, kayma ve burulma) arasında en önemli en değeri ve en büyük olan basınç dayanımıdır. Betonun basınç dayanımı “eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti, betonda oluşan maksimum gerilme” olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan 2010).

Beton ve harçlarda nano malzemelerin kullanılmasıyla taze ve sertleştirilmiş koşullardaki fiziksel, mekanik ve mikroyapı özelliklerini önemli derecede iyileştirmektedir (Senff *et al.* 2012). Nano boyutta kullanılan malzemeler, çimento esaslı malzemelerin, işlenebilirlik, dayanım ve durabilitesini geliştirerek, erken yaşlarda basınç dayanımı ve elektrik direncini artırmaktadır (Zahedi *et al.* 2015; Rong *et al.* 2015; Mohseni *et al.* 2015; Patil *et al.* 2016). NS eklenmesiyle hem hidrasyon kinetiğinde hem de hamurun mikro yapısında başlangıç hidrasyon oranında, puzolanik reaksiyon sonucunda hamur içinde oluşan C-S-H jelleri miktarına artış, porozitede azalma, ve C-S-H jelinin mekanik özelliklerinde meydana gelen iyileşmeler gibi önemli gelişmeler meydana gelmektedir (Gaitero *et al.* 2010). NS ile üretilen numunelerde

mikro boyutta silis dumanına kıyasen yaklaşık iki kat daha yüksek rijitlikte C-S-H jelleri elde edilmektedir. Portland çimentosu harcında süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile NS kullanılmasıyla basınç dayanımı olarak 1. ve 28. günlerde sırasıyla 63,9 MPa ve 95,9 MPa basınç dayanımı değeri, ve 28. günde de eğilmede çekme dayanımı olarak 23,5 MPa dayanımı elde edilmiştir (Hosseini *et al.* 2010). Kür yaşlarına kıyasen nano malzemelerin etkisi erken yaşlarda, özellikle ilk üç günde, daha çok belirgindir. Shih *et al.* (2006), tarafından BET ve MIP deneyler ile yapılan çalışmada NS ile üretilen Portland çimentosu kompozitleri daha sağlam, yoğun ve istikrarlı bir yapıya sahip olduğunu ifade etmiştir.

Berra *et al.* (2012), NS eklenmesiyle çimento hamurunun basınç dayanımı 3 ve 28 günlük numunelerde yaklaşık olarak %17-41 ve %20-25 oranlara kadar artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Sobolev *et al.* (2009), %0.25 oranında NS kullanılmasıyla 28 günlük numunelerin basınç dayanımında %10, eğilmede çekme dayanımında ise %25 oranında bir artış gözlemlendiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda, NS içeren harçların basınç dayanımı, silis duman içeren harçlara göre, tüm oranlarda 7 ve 28 günlük numunelerde yüksek çıkmaktadır. %10 oranında NS kullanılan bir çalışmada, kontrol numunesine göre 28 günde %26 oranında artış gösterirken, silis dumanı içeren numunelerde ise %15 oranında artış göstermiştir (Hui *et al.* 2004).

Li *et al.* (2006), çimento esaslı harçlarda ortalama tane boyutu 150 nm olan NA'dan %5 oranında kullanılmasıyla elastisite modülünde 28 günde yaklaşık %143 oranında artış gözlenirken, basınç dayanımında ise çok belirgin değişme göstermediğini ifade etmiştir. NA'nın %5 oranından daha az kullanılması durumunda harçların elastisite modüllerinde artış gözlenirken %5'ten çok kullanıldığında NA taneciklerinde kümeleşme meydana gelmekte ve bunu neticesi olarak ara yüzeyde etkili olmayan bir yoğunlaşma ve haliyle elastisite modülünde de bir azalma meydana gelmektedir. Arefi *et al.* (2011), %1 ve %3 oranında NA kullanılması durumunda kontrol numunelerine göre, basınç dayanımında sırasıyla %44.23 ve %63.38, çekme dayanımında sırasıyla %49.1 ve %81.4 ve eğilme dayanımında ise sırasıyla %47.7 ve %70 oranlarda artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Oltulu *et al.* (2013), çimento ağırlığının %1.25'i kadar tekli NS ve ikili NA

kombinasyonların kullanması durumunda, kontrol numunelerine göre çimento harçlarının basınç dayanımlarında, %7 ile %32 arasında artış meydana geldiğini rapor etmişlerdir.

NF kullanımında, hem basınç dayanımında hem de eğilmede çekme dayanımında iyileşmeler gözlenmiştir. NS ve NF nano taneciklerinin kullanılmasıyla daha yüksek basınç dayanımı ve eğilmede çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir (Li *et al.* 2004). Kendiliğinden temizlenme özelliğine ilave olarak, NT'nin Portland çimentosunun basınç ve eğilmede çekme dayanımı ve betonunu aşınma direncinin gelişmesine katkı sağlayıp, erken yaş hidrasyonunu hızlandırdığı ifade edilmiştir (Li *et al.* 2007; Jayapalan *et al.* 2010). Fan *et al.* (2004), Portland çimentosu hamurunun dayanım gelişiminde sentetik nano-ZrO₂ katkısının etkisini incelediği çalışmada, kontrol numunelerine göre porozite ve geçirimsilikte azalma, basınç dayanımında artış ve çimento hamurunun mikro-yapısında iyileşmeler meydana gelmiştir.

NK parçacıkları kullanılmasıyla çimento esaslı malzemelerin mekanik performansında gelişme, klor geçirimsiliğine karşı direncinde artış, geçirimsilik ve rötrede azalma elde edilmiştir (Morsy *et al.* 2009). Al-Salami *et al.* (2013), nano metakaolin kullanımı ile çimento esaslı malzemelerin mikroyapısının, normal çimentoya kıyasla daha yoğun, kompakt ve uniform olduğunu ifade etmiştir. Morsy *et al.* (2011), %6 oranında nano kil içeren harcın kontrol numunesine göre basınç dayanımının %18 oranında daha yüksek olduğu, %6 oranında NMK ve %2 oranında CNT içeren harcın basınç dayanımının %29 arttığını ifade etmişlerdir. Farzadnia *et al.* (2013), %2 oranında nano kil kullanılmış ve kontrol numunelerine göre basınç dayanımında %24 artış meydana geldiğini ifade etmiştir. Al-Salami *et al.* (2013), %10 oranında NMK kullanımı ile kontrol numunesine göre basınç dayanımında %50 ve eğilme dayanımında %36 artış meydana geldiğini söylemiştir.

Karbon nano tüpler ve karbon nano fiberler çimento esaslı malzemelerde, çekme dayanımını, sünekliğini artırmak ve dayanıklılığını iyileştirmek için kullanılmaktadır. Makar *et al.* (2005), homojen olarak matris içine dağılan çok duvarlı CNT'lerin düşük

oranlarda (ağırlıkça %0.025) oranında kullanmasıyla kontrol numunelerine göre bağlayıcı malzemelerin eğilme dayanımında ve rijitliklerinde artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Başka bir çalışmada da ağırlıkça %1 oranında CNT kullanmasıyla hem basınç hem de eğilme dayanımında artış gözlemlendiğini ifade etmişlerdir (Li *et al.* 2005). CNT'lerin optimum miktarı, ağırlıkça yaklaşık %0.048 oranında kullanılmasıyla bağlayıcı matriste önemli ölçüde eğilme dayanımı iyileşmesi gözlemlenmiştir (Metaxa *et al.* 2010), Ağırlıkça %0.2 oranında CNT kullanılması durumunda kontrol numunesine göre Portland çimentosu kompozitlerinde yarmada çekme dayanımında %22 oranında bir artış göstermiştir.

2.8. Yüksek Sıcaklık

Beton bir çok yapı malzemesine kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzemedir. Yüksek sıcaklık altındaki beton belirli bir süre için önemli bir zarar görmez ve zehirleyici gaz çıkarmaz. Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd 2010).

Beton bir bütün olarak düşünüldüğünde, genellikle içindeki sertleşmiş çimento hamuru ve agrega gibi bileşenlerin termel genleşmelerinin birbirinden farklı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, betondaki sıcaklık değişimleri, içerisindeki bileşenlerde birbirinden farklı hacim değişimlerine, çatlak oluşumuna ve çimento esaslı malzemelerin dayanımının azalmasına neden olmaktadır.

Çimento hamuru %70-80 tabakalı C-S-H jeli, %20 Ca(OH)_2 ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşmaktadır (Zhang *et al.* 2002). Sertleşmiş çimento hamurundaki serbest su yaklaşık olarak 100-200°C civarında buharlaşır. Sıcaklık 250°C'ye çıkınca, kılcal çatlaklar oluşur ve çekme dayanımında düşüşler meydana gelmektedir. Sıcaklık 300°C'ye çıkınca, alüminli ve demir oksitli bileşenlerin yapısındaki suyu kaybederek normal şartlarda buharlaşmayan bağlı suların uçması nedeniyle hasarın mertebesi artar, sıcaklık 400°C'ye çıkınca Ca(OH)_2 'in sönmemiş kirece (CaO)'e dönüşü ve beton hacminde %33 azalma görülmektedir. Genel olarak beton kısa süren (birkaç saat) ve

sıcaklık 600°C'yi geçmeyen yangınlarda donatılardan daha iyi bir dayanıklılık gösterir. Ancak sıcaklık 600°C'yi aşınca C-S-H yapısının tahrip olur ve beton dayanımının yarısını kaybeder. Sıcaklık 800°C'ye çıkması halinde, hidratelerin içinde bulunan suyu kaybetmesi sonunda dayanımındaki azalma %80'e varabilir ki bu da yapının yıkılmasına yol açmaktadır (Heikal *et al.* 2013 ; Baradan vd 2015).

Yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki mikro çatlakların varlığı, sertleşirken oluşan rötrenin sonucudur. Bu çatlaklar yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla ilerlerler. Bunların bazıları 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda yok olurlar, sonuçta az miktarda ama daha büyük çatlaklar oluşur. Anhidrit tanelerin etrafındaki mikro çatlaklar da bu sıcaklıkta gelişir. 300°C civarında çimento fazını geçerler ve agregaları çevrelerler. Sıcaklık 500°C'nin üzerindeyken, çatlaklar çimento hamurunda gelişir, boyutları 0.01mm'den büyüktür ve artık çatlaklar gözle görülebilir (Kızılkant 2004).

Beton teknolojisinde yüksek yüzeye alanına sahip olan nano parçacıklar, çimento esaslı malzemelerin yapısal özelliklerini iyileştirmektedir. Bu malzemelerin davranışı esas olarak arayüzeydeki kimyasal reaksiyonlardan etkilenmektedir. Çimento esaslı malzemelerde nano malzemelerin kullanımı ile yüksek sıcaklıklara karşı iyi direnç göstererek taze ve sertleşmiş koşullardaki davranışını olumlu yönde etkilenmektedir (Senff *et al.* 2009). Çimento esaslı malzemelerde nano malzeme kullanması, normal betonlara göre beton ve harçların yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını artırdığı, ısı iletkenliğinin azalttığı ve yangına karşı yüksek direnç gösterdiği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Farzadnia *et al.* (2013b), yüksek sıcaklıkta nano-titanyumun etkisinin araştırmak için, %1, %2 ve %3 oranlarda NT kullanması durumunda kontrol numunesine göre, basınç dayanımı %14 artmış olup, elastisite modülü ve 600°C'ye kadar enerji yutma özelliğini artırdığını belirtmişlerdir. Demirboğa *et al.* (2003b), harcın basınç dayanımı ve ısı iletkenliği üzerine mineral katkıların etkisini incelemiştir. Silis dumanının, uçucu külün ve YFC'ünü katılması ile karışımın ısı iletkenliğinin azaldığını ifade etmiştir. Heikal *et*

al. (2014), nano-SiO₂ ve yüksek fırın curufu kullanılarak elde edilen numunelerin, kontrol numunelerine göre yangına karşı yüksek direnç gösterdiğini ve basınç dayanımını artırdığını belirtmiştir. %30-%60 oranlarda yüksek fırın curufu ve %4 oranında NS kullanılmasıyla diğer kompozitlere göre yangın direncinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Sarshar *et al.* (1993), normal çimento hamuru ile %30 oranında uçucu kül kullanarak çimento harcının yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını araştırması sonucunda basınç dayanımında kontrol numunelerine göre 450°C'de %88 artış, %600°C'de %73 artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Nadeem *et al.* (2013), yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento esaslı malzemelerde MK kullanarak çimento harcının basınç dayanımını araştırmıştır. Basınç dayanımlarında, 200°C sıcaklıkta %8-9, 400°C'ye çıkınca %16 ve sıcaklık 600-800°C'ye çıkınca %46-80 arasında azalmalar meydana geldiğini belirtmiştir. En önemli basınç kaybı ise 400°C den sonra meydana geldiğini ortaya koymuştur.

2.9. Donma-Çözülme

Soğuk iklim koşullarında, çimento esaslı malzemelerin kalıcılığını tehdit eden en önemli etkenlerden biri donma-çözülme olayıdır. Betonun donma-çözülme tekrarları sonucunda meydana gelen zarar, boşluklarındaki suyun donmadan önce ve donma süresi boyunca oluşturduğu basınç farklılığı ile doğrudan ilgilidir. Betonda donma-çözülme olayı taze ve sertleşmiş olmak üzere ikiye ayrılır.

2.9.1. Taze betonda donma-çözülme etkisi

Beton taze halde iken suya doygun haldedir. Çimento ve su arasındaki reaksiyonlar devam edebildikçe su azalacaktır. Diğer taraftan, beton karıştırıldıktan sonra hemen don etkisine maruz kalırsa, su donarken hacmi yaklaşık %9 oranında artar. Beton henüz plastik kıvamda olduğundan bu hacim artışı nedeniyle buzun boşluklarla hareketine engel olamaz. Buz oluşumu sonucunda taze beton bünyesinde katı taneciklerin hareketi

ile kütle transferi meydana gelir ve su beton bünyesinde yeniden dağılıp, buz kütlelerinin büyümesini sağlar.

Taze beton donduğunda iri agrega taneleri ve çimento harcı ara yüzeyi bağlayan kütle transferi nedeniyle bozulur. İri agrega taneciklerinin özgül ağırlıkları betona kıyasla büyük olduğundan, ısıyı çimento harcından daha iyi iletirler. Beton donmaya başlayınca, agregalar daha çabuk soğur. Düşük sıcaklıklardaki bölgelerde bağlı basıncın daha düşük olmasına bağlı olarak su daha soğuk olan agregalara doğru ilerler. Agregaya yüzeyine ulaşan su donup, büyüyen bir su filmi tabakası oluşturur. Buz filmi hacimsel olarak büyüyünce genişleme sonucu agrega taneleri çimento matrisinden kolayca ayrılabilir.

Donan taze betonda hidrasyon için gerekli su azaldığında betonun prizinin geciktiği, hatta ani donmalarda hidrasyonun tamamen durduğu gözlenir. Hava sıcaklığı yükselmeye başlayınca, buzlar çözülür ve hidrasyon kaldığı yerden devam eder. Buz tarafından bloke edilmiş hava kabarcıklarının ortaya çıkması sonucunda, taze beton bünyesinde boşluklar ortaya çıkması ile betonun homojenliği ve aderans özellikleri de bozulmaktadır. Bu nedenle, soğuk iklim koşullarında beton dökülürken, betonun donmasına karşı önlemlerin alınması ve yeterli dayanıma ulaşılan kadar taze betonunu korunması gerekmektedir (Baradan 2010).

2.9.2. Sertleşmiş betonda donma-çözülme etkisi

Sertleşmiş ve suya doygun haldeki bir beton don etkisinde kalınca, çimento harcının içindeki kapılar boşluklardaki su donar ve genişler. Çözülmeyi takip eden yeniden donma sonunda bu genişleme miktarı kümülatif olarak artar. Bu nedenle, peş peşe donma-çözülme olaylarının etkisi, çözülmenin meydana gelmediği uzun süreli don etkisine kıyasla çok daha kuvvetlidir. Genişleme sonucu oluşan gerilmelerin betonun çekme dayanımını aşması halinde betonda; kabuk atma, çatlama, ufalanma şeklinde bozulmalar meydana gelmektedir.

Tekrarlı donma-çözülme sonucunda meydana gelen hasar, taze veya erken yaştaki beton üzerinde daha fazladır. Sertleşmiş beton içindeki suyun donması sırasında iki hidrolik basınç kaynağı meydana gelmektedir; (1) suyun donup yaklaşık olarak %9 oranında hacim genişmesi, (2) jel boşluklarından difüze olan suyun küçük buz kütlelerine dönüşümüdür. Betonun donma dayanıklılığını belirlemek için ASTM C666'de iki deney yöntemi tarif edilmiştir. Bu yöntemlerin ikisinde de hızlı dondurma uygulanır. Ancak birinde donma-çözülme su içinde, diğesinde ise donma havada, çözülme su içinde gerçekleşmektedir (Baradan 2010).

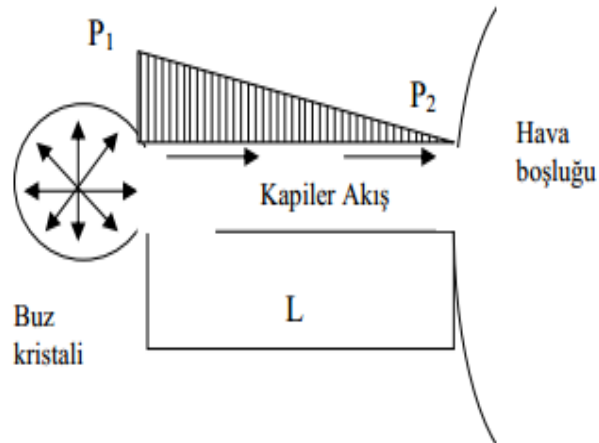
Çimento yerine nano malzeme kullanılması durumunda, bu parçacıkların yüksek yüzey alanı ve filler gibi davranışlarından dolayı çimento esaslı kompozitlerin içerisindeki kılcal boşlukları doldurarak geçirgenliği azaltır ve böylece çimento esaslı malzemelerin yapısını iyileştirerek donma-çözülmeye karşı daha dirençli ve dayanıklı malzeme elde edilmesini sağlamaktadır. Çimento esaslı malzemelerin donma-çözülme etkisine karşı direnç göstermesi, malzemelerin dayanımı, doyma derecesi ve gözenek sistemi gibi bir çok parametrelere bağlıdır. Çünkü, çimento ürünlerinin performansını etkileyen parametrenin başında $Ca(OH)_2$ olduğu bilinmektedir (Çolak vd 2003).

Dursun, (2005), yaptıkları çalışmada, farklı tür puzolan kullanarak beton ve harç numunelerinin dayanımı ve donma dayanıklılıklarını incelemişlerdir. Çimento yerine %6 oranında cüruf, %8 oranında tras kullanması durumunda, numunelerin daha yüksek basınç ve çekme dayanımına sahip oldukları ve donma-çözülmeye karşı daha iyi dayanıklılık gösterdiklerini ifade etmiştir. Fan *et al* (2015), çimento ağırlığının %3 ve %5 oranında NKK kullanmasıyla çimento harcın basınç dayanımı, donma-çözülme davranışı, ve elektrik direncini çok daha etkilendiğini ve antifriz kullanımı ile donma-çözülme çevrim sayısını çok yakından ilişkisi olduğunu belirtmiştir. Şahin vd (2003b), donma-çözülmeye maruz kalan betonun basınç dayanımına etki eden en önemli parametrenin su/çimento oranı olduğunu tespit etmiştir.

Betonda meydana gelen donma-çözülme olayı çeşitli mekanizmalarla ve teorilerle açıklanmıştır. Bunların en önemlileri, kapılar boşluklarda donma nedeniyle hidrolik

basıncın oluşması, donma başladıktan sonra jel suyunun kapiler boşluklara doğru yayılması, ısı etki gibi lokal gelişmelerin neden olduğu farklı şekil değiştirmeler ve çözeltilerin kapiler boşluklardaki kısmi donmasından kaynaklanan osmatik basınçtır (Şahin *et al.* 2003; Basheer *et al.* 2006). Bu mekanizmalar çimento esaslı malzemelerin doygunluk derecesini, porozitesini, permeabilitesini, maksimum agrega tane çapını, hamurun hava içeriğini, ısı özellikleri ve diğer çevresel etkileri kapsamaktadır. Bu teorilerin her bir kısaca aşağıda açıklanmıştır.

Hidrolik basınç teorisi: Bu mekanizma, Powers (1945-1953) tarafından yapılan çalışmalarda, çimento hamurundaki kapiler boşlukları içerisindeki su çok soğuk hava koşullarında buza dönüşebilmektedir. Kapiler boşlukların içerisindeki suyun tamamı bir anda buz haline dönüşemediğinde, boşluk içerisindeki suyun bir miktarının donması ve hacim genişemesi oluşturması nedeniyle boşluk içerisinde henüz donmamış durumda olan suyu kapiler boşluk dışında çıkmaya zorlamaktadır. Bu gerilmeler genellikle hidrolik basınç olarak ifade edilmektedir (Fagerlund, 1997). Betonda hidrolik basınç mekanizması Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

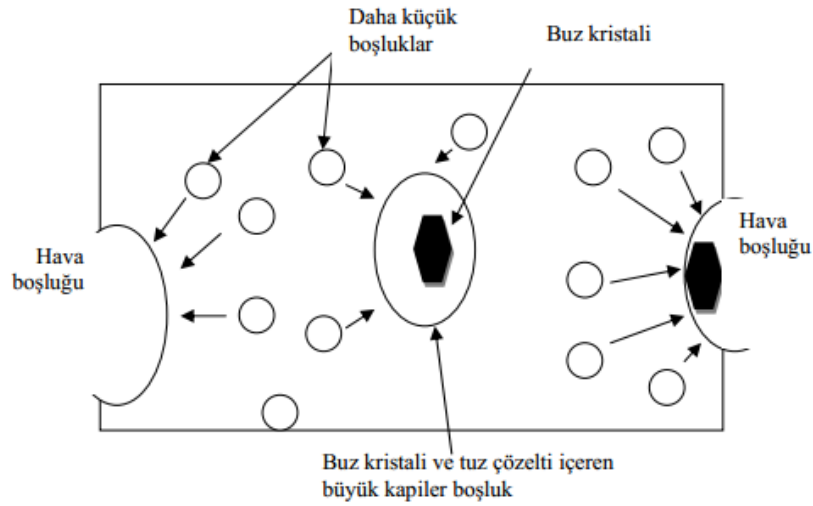


Şekil 2.9. Donma-çözülmede hidrolik basınç teorisi

Litvan teorisi; Litvan (1973) Modeli'ne göre, donma başladığı zaman, kapiler boşluktaki suyun donması yüzünden düşük enerji durumu ve jel boşluklardaki suyun soğumuş olması yüzünden yüksek enerji durumu arasında termodinamik bir dengesizlik

oluşur. Bu enerji farklılığı sonucu su düşük enerji seviyesine doğru hareket ederek kapiler boşluklarda yer bulamazsa, iç basınç oluşur ve sistemin genişlemesine sebep olur. Litvana göre, beton hasarı, oldukça büyük bir boşluktan yüzeye göç eden su için uzak olduğunda veya soğuma hızı çok yüksek olduğunda oluşur. Her iki durumda da göç eden suyun önünde buz engel olursa, büyük gerilmeler oluşur. Bu su çözülme esnasında boşluğa geri dönmez, dolayısıyla donma-çözülme etkisi çevrim sayısı arttıkça artmaktadır (Chan 2006; Carlos 2008).

Osmatik basınç teorisi: Bu teoride, su donduğu zaman boşluğun konsantrasyonu artarak diğer boşluklardan bu boşluklara su geçişi olmaktadır. Konsantrasyonu dengelemek için buz oluşan küçük boşluklardan büyük boşluklara doğru su geçişi olur (Şekil 2.10). Böylelikle büyük boşluklarda oluşan buzun kütlesi büyür ve boşluk hacmini tamamen doldurduktan sonra basınç uygulanır ve sonunda hamurda çatlaklar oluşmaktadır (Chan 2006).



Şekil 2.10. Donma-çözülmede osmatik basınç teorisi

Kapalı kap modeli; Bu model, Fagerlund (1994-1997) tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde, betonun duvarları geçirimsiz olan küre şeklindeki birim hücrelerden meydana geldiği, donabilen su ile donmayan suyun toplamından oluşarak ve buharlaşabilir suyun tamamının orta boşlukta toplandığı kabul edilmektedir. Bu model, hidrolik basınç

mekanizmasının özel bir durumu olup, sadece arasındaki fark ise, hücre duvarlarının geçirimsiz olması ve kapalı kaptaki suyun yalnızca bulunduğu yerde donduğunun kabul edilmesidir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölüm, Materyal ve Yöntem kısmından oluşmaktadır. Materyal kısmında çalışmanın amacı doğrultusunda kullanılan çimento, karışım suyu, standart kum, halloysit nano kil, nano-SiO₂, nano-CaO, SAK maddesi ve diğer malzemeler ile çalışmalarda kullanılan deney aletleri ve ölçüm cihazları hakkında bilgi verilmektedir. Yöntem kısmında ise agrega özelliği, harçların karışım hesaplarının belirlenmesi ve yapılacak deneysel çalışmaların yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

3.1. Materyal

3.1.1. Deneylerde kullanılan Malzemeler

3.1.1.a. Çimento

Bu çalışmada, Aşkale Çimento Fabrikasının 2017 yılında üretmiş olduğu TS EN 197-1'e uygun Normal Portland Çimentosu (CEM 1 42.5-R) kullanılmıştır. Çimentonun fabrikada yaptırılan fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de, kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

32 Mikron elekte kalıntı (%)	11.72
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3708
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3.10
Priz Başlangıcı (dk)	155
Priz Sonu (dk)	205
Su İhtiyacı (%)	30.4
Hacim Genleşmesi (mm)	9.7
2 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	24.9
28 Günlük Basınç Dayanımı (N/mm ²)	54.5

Çizelge 3.2. Çimentosunun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşenleri	Oran (%)
SiO ₂ (%)	18.35
Al ₂ SiO ₃ (%)	4.02
Fe ₂ O ₃ (%)	2.65
MgO (%)	3.47
CaO (%)	64.07
Çözünmeyen kalıntı (%)	0.88
SO ₃ (%)	2.94
Kızdırma kaybı (%)	2.87
NaO ₂ (%)	0.21
K ₂ O (%)	0.79
Serbest CaO (%)	2.31

3.1.1.b. Agrega

Çalışmada harç numuneleri için agrega olarak, standart kum kullanılmıştır. Limak firması tarafından üretilen TS EN 196-1 standardına uygun CEN Standart Kumu kullanılmıştır. CEN Standart Kumu yuvarlak taneli olup doğal silis kumundan oluşturmaktadır. SiO₂ miktarı en az %98 düzeyindedir. Maksimum tane boyutu 2 mm olan bu kumun tane büyüklüğü dağılımı TS EN 196-1 standardındaki elek analizi sonuçlarıyla uyumlu olmalıdır. Bu amaçla harç deneyleri için CEN standart kumu 1350 gr ağırlığında paketler halinde piyasaya sunulur ve her bir paket TS EN 196-1 ve 196-9 standardındaki yukarıda belirtilen koşulları sağlamalıdır. CEN referans kumun tane dağılımı Çizelge 3.3'de, verilmiştir.

Çizelge 3.3. CEN Standart kumunun tane büyüklüğün dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	Elekte kalan kümülatif toplam (%)	Analiz sonuçları
2.00	0,00	0.00
1.60	7±5	6.78
1.00	33±5	32.60
0.50	67±5	68.04
0.16	87±5	87.52
0.08	99±1	99.50



Şekil 3.1. Standart kumu (1350 gr)

3.1.1.c. Karışım suyu

Karışımlarda TS EN 1008'e uygun, asit reaksiyonu göstermeyen, fazla tuz, sülfat, yağ, endüstri atıkları ve organik madde gibi betonun dayanımı ve dayanıklılığını etkileyecek madde içermeyen, Atatürk Üniversitesi, Kimya Mühendiliği Bölümü Laboratuvarından temin edilen saf su kullanılmıştır.

3.1.1.d. Kimyasal katkı maddesi

Nano malzemelerin karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak için Greace Yapı Kimyasalları firmasının ürettiği ADVA Flow 375N adlı ürün kullanılmıştır. Bu ürün yüksek oranda su azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcı (SAK) özellik sağlayan beton katkıdır. Özellikle mükemmel akışkanlık istenen beton karışımlarının üretimi için karışım sırasında katkının performansına, elde edilecek karışımların kıvamına ve ayrışmaya karşı direncine bağlı olarak ayarlanmıştır. Bu katkının özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. SAK maddesinin özellikleri

Adı	ADVA Flow 375N
Kimyasal yapı	Modifiye polimer esaslı sentetik karboksilet
Renk	Sarımsaktan açık kahverengi sıvı
Yoğunluk (g/ml)	1.075
PH değeri	6.3
Alkali Miktarı (%Na ₂ O eşdeğeri olarak)	EN fazla %7
Suda çözülebilir klorür yüzdesi	Maksimum %0,10 klorür içermez
Dozaj	Tavsiye edilen katkı dozu bağlayıcı ağırlığının %0,5'i ile %2'i arasındadır.
Bakım şartı	Sıcaklık +5°C'den yukarıda tutulur.

3.1.1.e. Nano malzemeler

Bu çalışmada harç numunelerde kullanılacak nano-CaO ve halloysit nano-kil ürünleri ALDRICH chemistry firmasından ve nano-SiO₂ ürünü ise ABCR “Specialty Chemicals for Research, Development and Production” firmasından temin edilmiştir. Üretici firmadan alınan nano malzemelerin, özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Nano-CaO’in özellikleri

Formül	CaO
Molekül ağırlığı (gr/mol)	56,08
Yoğunluk (gr/cm ³)	3,300
Yüzey alanı (m ² /gr)	≥ 90
Erime noktası noktası (°C)	2850
Kaynama noktası noktası (°C)	2850
Ortalama partikül çapı (nm)	100

Çizelge 3.6. Nano-SiO₂'in özellikleri

Formül	SiO ₂
Molekül ağırlığı (gr/mol)	60.08
Yoğunluk (gr/cm ³)	2.4
Yüzey alanı (m ² /gr)	130
Erime noktası (°C)	>1600
Kaynama noktası (°C)	2230
Ortalama partikül çapı (nm)	5-15

Çizelge 3.7. Halloysit nano-kil'in özellikleri

Formül	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ . 2H ₂ O
Molekül ağırlığı (gr/mol)	258.16
Yoğunluk (gr/cm ³)	1.8-2.6
Yüzey alanı (m ² /gr)	64
Renk	Beyaz
Ortalama partikül çapı (nm x µm)	30-70 x 1-3

**Şekil 3.2.** Nano-CaO



Şekil 3.3. Nano-SiO₂



Şekil 3.4. Halloysit nano-kil

3.1.1.f. Diğer malzemeler

Numunelerin kalıplara yapışmasını önlemek için kalıp yağı (Sika Seprol) ve kür için kirece doygun su ortamının sağlanmasında söndürülmüş torba kireci kullanılmıştır.

3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler

3.1.2.a. Harç karıştırıcı

Deneylerde TS EN 196-1’de belirtilen özelliklere sahip Şekil 3.5’de verilen mikser kullanılmıştır. Bu mikser 10 litre kapasite hacmine sahip, 280 devir/dakika karıştırma hızına kadar çıkabilen laboratuvar tipi harç karıştırıcı mikseridir.



Şekil 3.5. Deneylerde kullanılan harç karıştırıcı mikseri

3.1.2.b. Numune kalıpları

Çalışmada TS EN 12390-1’e uygun 50x50x50 mm boyutunda üçer küpten oluşan çelik kalıpları kullanılmıştır. Kalıplara ait fotoğraflar Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6. 5x5x5 cm'lik numune kalıpları

3.1.2.c. Vibrasyon masası

Üretilen harçlar, TS EN 12390-2 standartlarına uygun, en düşük frekans 40 Hz (dakikada 2400 devir) olan vibrasyon masasında şişlenerek yerleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Vibrasyon masası

3.1.2.d. Press

Sertleşmiş beton deneylerinden, numunelerin basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında bulunan ELE marka AUTO TEST 3000 tipinde 300 ton



Şekil 3.10. Ultrases hız ölçüm cihazı

3.1.2.f. Fırın

Numunelerin yüksek sıcaklıklarda ısıtılması için, Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında bulunan 1100°C sıcaklık kapasiteli, 5°C/dakika - 12°C/dakika olmak üzere farklı sıcaklık artış ısıtma hızına sahip yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Yüksek sıcaklık fırını

3.1.2.g. Donma-çözülme cihazı

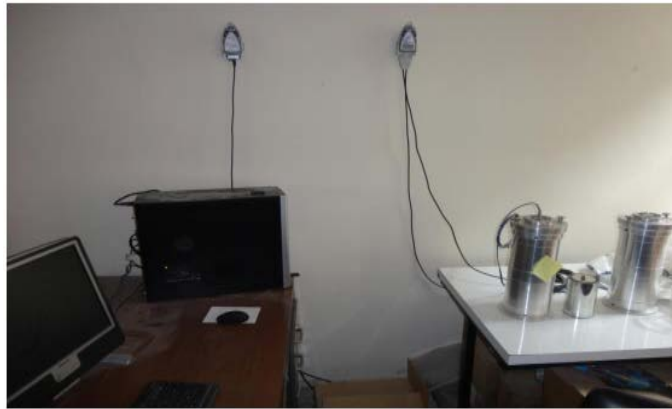
Bu alet ASTM C666 standardına uygun olarak donma-çözülme çevirimi yapmaktadır. Numuneler yerleştirildikten sonra istenen sıcaklık değerleri, süreleri ve çevirim sayısı ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.12. Donma-çözülme cihazı

3.1.2.h. İzotermal kalorimetre

Üretilecek karışımların hidrasyon ısılarının tespiti için TS EN 196'e uygun yarı Adyabatik Yöntem-İzotermal kalorimetre kullanılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. İzotermal kalorimetre deney düzeneği

3.2. Yöntem

3.2.1. Akışkanlaştırıcı türü ve miktarı

Çalışmada kullanılacak akışkanlaştırıcı türü ve miktarına karar verebilmek için çimento ve katkıının nano malzemeler ile uyum sağlayıp sağlamasından dolayı yapılan literatür bilgisinden ve deneylerden hareketle seçilmiştir. Beton ya da harçlarda süperakışkanlaştırıcı katkısı (SAK) kullanması ile akışkanlığını arttırmaktadır. Ancak düşük su/çimento oranlarına sahip yüksek performanslı betonlar başlangıçtaki yüksek işlenebilirliklerini kısa süre sonra kaybederek, hızlı çökme kaybı gösterebilmektedir. Bu durum, akışkanlaştırıcı ve çimentonun reolojik olarak uyumsuz olması durumunda gerçekleşmektedir.

3.2.2. Karışım tipleri ve numune kodlama

Çalışmada karışım tiplerinin içerisinde kontrol numuneleri, K olarak gösterilmiştir. Tekli nano malzeme içeren harçlar için nano-SiO₂, nano-CO, halloysit nano-kil sırasıyla, NS, NC ve HNK olarak, ikili nano malzeme içeren harçlar için sırasıyla; NC+HNK ve NC+NS olarak gösterilmiştir (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8. Deneysel çalışmada kullanılan karışımlar ve karışımların kodlanması

Karışım Tipi	Numune Kodlama
Kontrol numune (Referans)	K
Halloysit Nano-kil %1	HNK 1%
Halloysit Nano-kil %3	HNK 3%
Halloysit Nano-kil %5	HNK 5%
Nano-CaO %1	NC 1%
Nano-CaO %3	NC 3%
Nano-CaO %5	NC 5%
Nano-CaO %0.5+ Halloysit Nano-kil %0.5	NC+HNK %0.5
Nano-CaO %1.5+ Halloysit Nano-kil %1.5	NC+HNK %1.5
Nano-CaO %2.5+ Halloysit Nano-kil %2.5	NC+HNK %2.5

Çizelge 3.8. (devam)

Nano-SiO ₂ %1	NS %1
Nano-SiO ₂ %3	NS %3
Nano-SiO ₂ %5	NS %5
Nano-CaO %0.5+ Nano-SiO ₂ %0.5	NC+NS %0.5
Nano-CaO %1.5+ Nano-SiO ₂ %1.5	NC+NS %1.5
Nano-CaO %2.5+ Nano-SiO ₂ %2.5	NC+NS %2.5

3.2.3. Seçilen parametreler ve seviyeler

Çalışmadaki ana parametreler, farklı nano malzemelerdir. Çimentonun karma oksitlerini oluşturan iki oksidin tozu ve halloysite nano-kil seçilmiştir. Bunlar nano-SiO₂ (NS), nano-CaO (NC) ve halloysite nano-kil (HNK)'dir. Kimyasal katkı olarak ise, çimento esaslı malzemelerde yaygın olarak kullanılan sıvı şeklinde bulunan süperakışkanlaştırıcı (ADVA FLOW) seçilmiştir. Nano malzemelerin tekli ve ikili kombinasyonları kullanımlarının çimento harçlarının özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Malzeme oranlarının seviyeleri ise, yapılan literatür çalışmalardan hareketle, %1, %3 ve %5 olarak belirlenmiştir. Bu oranlar nano malzemelerin tekli ve ikili kullanımlarında sabit tutulmuştur. Örnek olarak, %3 oranında nano malzeme içeren bir harç, iki farklı nano malzeme içeriyorsa her iki nano malzeme de %1.5 oranında kullanılmıştır.

Yukarıda belirtilen parametre ve seviyeleri ile, her defasında bir faktörü değiştirerek deney yapma yöntemine göre, 16 grup harç numunesi üretilmiştir. Bu gruplardan bir tanesi referans (K) nano malzeme içermeyip yalnızca kimyasal katkı maddeleri ile üretilmiştir. Karışım hesabı kimyasal katkısız duruma göre yapılmıştır. Nano malzeme miktarları bağlayıcı oranının tekli kullanımında %1, %3 ve %5, ikili kullanımında ise %0.5, %1.5 ve %2.5 oranlarında çimento miktarı ile ikame edilerek kullanılmıştır. Sonuçta tüm grupların bağlayıcı miktarı (1237.1 gr/cm³) sabit tutularak sonuçların karşılaştırılmasıyla incelenmiştir.

3.2.4. Harçların karışım miktarları ve hazırlanması

Çalışmada, harçların su/çimento oranı, karıştırma şekilleri ve içerdikleri nano malzemelerin miktarına bağlı olarak literatürden elde edilen bilgiler ve yapılan ön deneylerden hareketle çimento, kum oranı 1:2.5 olarak kullanılmıştır. %6.2, %8.7 ve %12.4 oranlarında SAK ve su/çimento oranı ise 0.38 olarak seçilmiştir. Harç karışım miktarları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Karışımlar hazırlanırken harç karıştırma mikseri kullanılmıştır. Harçların karışımı için malzeme miktarları ağırlık olarak alınıp yeterli miktarda taze beton harcı hazırlanmıştır. Bunun için, karışımı oluşturan malzemelerin muhtemel malzeme zayıatları düşünülerek yaklaşık %10 daha büyük oranda üretim gerçekleştirilmiştir. Harçların üretimi için yapılan çalışmada, karışım oranları belirlenen malzemeler 0.1 gr hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra mikserde konulmuştur.

Nano malzemelerin, çimento esaslı kompozitlerin içerisinde homojen bir şekilde dağılabilmesi amacıyla, literatür çalışmalardan (Rong *et al.* 2015) hareketle aşağıdaki karıştırma yöntemi takip edilmiştir. İlk etapta karışım suyunun bir miktarı nano malzeme ile cam şişede çalkalanarak el yardımıyla iyice 3-5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından su+SAK, sonra cam şişedeki nano malzeme mikserde konulmuş, ardından çimento ilave edilip 3 dakika boyunca (ilk 15 sn yavaş) orta hızla karıştırılmıştır. Sonra mikserde kum eklenip 3 dakika daha orta hızla karıştırılmıştır. Daha sonra mikseri durdurup etrafı temizlenmiştir. En son tüm malzemeler 3 dakika boyunca yüksek hızla karıştırılıp, böylece toplam 9 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır.

Hidratasyon ısı ölçümleri için yarı adyabatik yöntemde belirtilen karışım oranları ile harç numuneleri üretilmiştir. TS EN 196-9’de belirtildiği gibi uygun olarak 360 gr bağlayıcı (çimento+nano malzeme), 1080 gr CEN standart kumu ve 180 gr su ile temel karışımlar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.9. Harç numunelerin karışım miktarları

Numune Kodu	Su (gr)	Çimento (gr)	HNK (%)	NC (%)	NS (%)	SAK (%)	Kum (gr)
K	470.1	1237.1	0	0	0	5.0	3092.8
HNK %1	470.1	1224.7	12.4	0.0	0.0	6.2	3092.8
HNK %3	470.1	1200.0	37.1	0.0	0.0	8.7	3092.8
HNK %5	470.1	1175.3	61.9	0.0	0.0	12.4	3092.8
NC %1	470.1	1224.7	0.0	12.4	0.0	6.2	3092.8
NC %3	470.1	1200.0	0.0	37.1	0.0	8.7	3092.8
NC %5	470.1	1175.3	0.0	61.9	0.0	12.4	3092.8
NC+HNK %0.5	470.1	1224.7	6.2	6.2	0.0	6.2	3092.8
NC+HNK %1.5	470.1	1200.0	18.6	18.6	0.0	8.7	3092.8
NC+HNK %2.5	470.1	1175.3	30.9	30.9	0.0	12.4	3092.8
NS %1	470.1	1224.7	0.0	0.0	12.4	6.2	3092.8
NS %3	470.1	1200.0	0.0	0.0	37.1	8.7	3092.8
NS %5	470.1	1175.3	0.0	0.0	61.9	12.4	3092.8
NC+NS %0.5	470.1	1224.7	0.0	6.2	6.2	6.2	3092.8
NC+NS %1.5	470.1	1200.0	0.0	18.6	18.6	8.7	3092.8
NC+NS %2.5	470.1	1175.3	0.0	30.9	30.9	12.4	3092.8

3.2.5. Üretilen harçların yerleştirme yöntemi ve kürü

Karıştırma mikserinde her sefer bir gruptaki malzeme konulmuş olup, karıştırma sonrası elde edilen harçlar 5x5x5 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. Yerleştirme yöntemi, tüm numunelerin hem standart hem de en iyi şekilde yerleşmesinin sağlanabilmesi için, ASTM C 109'den hareketle sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Karışımlar 5x5x5 cm'lik küp kalıplara iki kademe şişlenerek (birinci kademe 15 sn, ikinci kademe ise 20 sn) doldurulduktan sonra masa tipi vibratör yardımıyla kalıplara yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Kalıpların içi daha önceden yağlanmış olup harç yerine yerleştirmesinin akabinde mala ile üst yüzeyler düzeltilerek etiketlenmiştir. Numuneler laboratuvar ortamında nemli havlu ile örtülüp kapalı olarak 24 saat bekletilmiştir. Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilen numunelerin kalıpları söküldükten sonra, kirece doymun hale getirilmiş ve sıcaklığı 20±2°C olan kür havuzuna konulmuştur. Her gruptan

numuneler 7, 28 ve 60 gün kürde kaldıktan sonra çıkarılarak laboratuvar şartlarında deneylere tabi tutulmuştur.

3.2.6. Deneylerde yugulanan yöntemler

3.2.6.a. Hidratasyon ısısı

Harçların hidratasyon ısısı gelişimini takip etmek için her karışım tipinden birer adet numune üzerinde TS EN 196-9'da belirtildiği gibi deney yapılmıştır. Deney sıcaklığı 20°C'de sabitlenmiş bir odaya yerleştirilen yarı adyabatik deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi, Şekil 3.13'de verilmiştir. Taze harç numunesi, harç kutusuna konulduktan sonra, kalorimetreye yerleştirilmiş, (deney numunesinin karıştırma ve yerleştirmesi için geçen süre 6 dakikadan fazla olmamalıdır) ve harçtaki çimentonun hidratasyonu sonucunda, artan sıcaklıklar 48 saat boyunca, her sıcaklık okumasının zamanı saat ve dakika olarak kaydedilmiştir. Bir bilgisayara bağlanmış olan veri toplayıcısı, alıcılardan topladığı verileri bilgisayara iletmıştır. Deneyin amacı ilk bir kaç gün boyunca çimento hidratasyon ısısının sürekli olarak ölçülmesidir. Yarı adyabatik yöntemi, kalorimetreye taze oluşturulan harç numunesinin yerleştirmesiyle meydana gelen sıcaklık yükselmesine göre yayılan ısı miktarını tayin edilmesine dayanır. Yerleştirilen taze harç numunesinin sıcaklık artışı, referans numune sıcaklığı ile karşılaştırılacaktır. Kalorimetre kabı ile ilgili bilgiler TS EN 196-9'da bulunmaktadır. Numune kabı 800 cm³ hacme sahip, kalorimetre cihazının içerisine yerleştirilecek şekilde ebatlara sahiptir. Hidratasyon ısısının hesaplanmasında aşağıda verilen formüller kullanılmaktadır.

$$Q = A + B, \quad A = \frac{c}{mc} \theta t, \quad B = \frac{1}{mc} \sum_0^t \alpha_i \times \theta_i \times \Delta t_i$$

Q: Numunelerin her gramı için joule cinsinden hidratasyon ısısı

A: Kalorimerede toplanan ısı

B: Atmosfere yayılan ısı kaybı

c : Kalorimetrenin toplam ısı kapasitesi, ($J.K^{-1}$),

$c = 0.8(m_c + m_s) + 3,8m_w + 0.5m_b + \mu$ 'den hesaplanır.

m_c : Bağlayıcı kütlesi, gr

m_s : Kumun kütlesi, gr

m_w : Suyun kütlesi, gr

m_b : Boş harç kutusunun kapağıyla birlikte kütlesi, gr

μ : Boş kalorimetrenin ısı kapasitesi, gr

θt : Verilen zamanda referans kalorimetre ile deney kalorimetresi arasındaki fark, (kelvin)

αi : Kalorimetrenin ısı kaybı kapasitesi ($j.h^{-1} k^{-1}$)

t_i : Hidratasyon süresi, saat

Çalışmada kullanılan kalorimetreye ait programlar üzerinden otomatik hesaplamalar yapılmaktadır. SIRIUS programı yardımıyla veriler kaydedilip ve CEMTECH programı yardımıyla da hidratasyon ısı hesaplanmakta ve gerekli grafikler ise geçen zamana bağlı olarak çizilmektedir.

3.2.6.b. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri erken (7 gün), standart (28 gün) ve ileri yaşlarda (60 gün) testleri yapılmıştır. Bu deney 300 ton kapasiteli ELE 1487-1-1001 tipinde bir hidrolik presle gerçekleştirilmiş olup, yükleme hızı deneyler esnasında 90 Mpa/sn ($kgf/cm^2/sn$) olacak şekilde sabitlenmiştir. Numune kırıldığında presin dijital göstergesinden kırılma yükü ve basınç dayanımı değerleri okunmuştur. Sonuçlar her grup için üç numunenin aritmetik ortalaması alınarak Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir. Betonun basınç dayanımı aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır. $\sigma = Port/AO$,

Formülde;

Port= kırılan numunenin ortalama kırılma yükü (kg/cm^2), AO= Numunenin yük uygulanan yüzey alanı (cm^2), σ = Basınç dayanım (kg/cm^2)'dir.

3.2.6.c. Ultrases hız ölçüm cihazı (UPV)

Bu deney, sesin katı madde içinde yol alma süresinin saptamasına dayanır. Titreşme frekansı 20 kHz'den fazla olan ses dalgalarına ultrases dalgalar denir. Betonun bir yüzeyinden gönderilen UPV dalgaları beton içinde ilerlerken beton içinde bulunan boşluklara rastlarlar. Bu dalgalar boşluk kenarına gelince karşı tarafa geçemediğinden, boşluğun etrafını dolaşacaktır. Ultrases hızının azalması, betonun boşluk olduğunu göstermekte olup, buna bağlı olarak dayanımı da düşmektedir. Verici ve alıcının malzemeye tam olarak yapışması şarttır.

UPV deneylerinde, İnşaat Mühendislik Yapı Malzemeleri Bölümü laboratuvarında mevcut dijital ultrases hız ölçüm cihazı kullanılmıştır. UPV tespiti yapılırken, daha net ve doğru sonuçlar elde etmek için numunenin ölçüm yapılacak aletin başlıklarını bir fırça ile temizleyerek ultrases jeli sürülmüş ve her bir numune için en az üç okuma yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır. UPV ölçümleri ASTM C 597'deki esaslara göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.6.d. Donma-çözülme

Bu çalışmada ASTM C666'ye uygun hızlı donma-çözülme metodundan B prosedürü uygulanmıştır. Bu yöntemde numune havada dondurmakta ve suda çözdürülmektedir. 30 donma-çözülme çevrimleri (+4°C)'den (-18°C)'ye düşürülecek ve (-18°C) den (+4°C)'ye 2 saatten az ve 5 saatten fazla olmayacak şekilde yapılmıştır. 30 donma-çözülme çevrimi sonunda basınç dayanımları, UPV hızları ve su emme oranları belirlenerek ve daha önce yapılmış olan kontrol numuneler sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2.6.e. Yüksek sıcaklık

5x5x5 cm şeklinde hazırlanmış olan deney numunelerin 250, 500 ve 750°C sıcaklıklarda 3 saat süreyle yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur. Isıtma işleminin başlatılmasından 24 saat sonra sıcaklığı oda sıcaklığına düşen numunelere UPV değerleri, su emme oranları ve basınç dayanımları uygulanmış sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma kısmında sunulmuştur.

3.2.6.f. Su emme tayini

Su emme deneyi için, etüvde kurutulan numuneler 24 saat $20\pm 2^\circ\text{C}$ kür havzunda bekletildikten sonra, sudan çıkarılarak üzerindeki su havlu ile alınıp ve tartılarak ıslak ağırlığı bulunmuştur. Islak ağırlık ile kuru ağırlığın farkı alınarak kuru ağırlığa bölünmüş ve ağırlıkça yüzde olmak üzere, su emme oranları bulunmuştur. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

Numunelerin su emme yüzdeleri de şu formül yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\text{Su emme} = \frac{W_d - W_0}{W_0} \cdot 100$$

W_d : numunenin suya doygun durumunda havadaki ağırlığı,

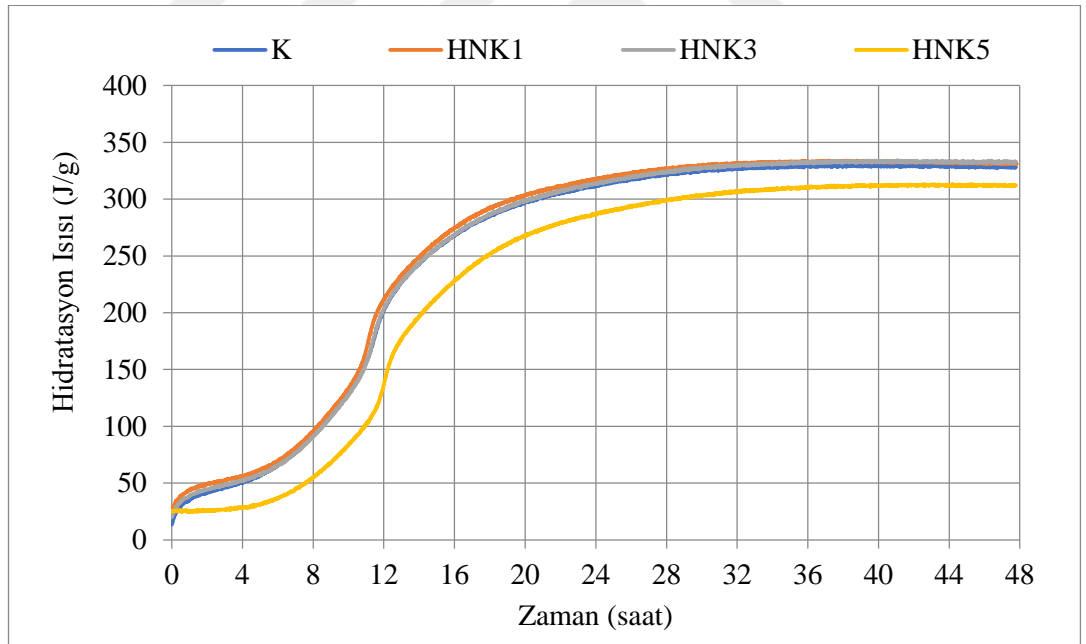
W_0 : numunenin 24 saat $105\pm 5^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuş ağırlığı,

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölüm, deneylerde elde edilen bulguları ve bulgulardan hareketle yapılan değerlendirmeleri içermektedir. Yapılan deneylerin sonuçları ayrı ayrı başlıklar altında verilmiştir.

4.1. Hidratasyon ısısı

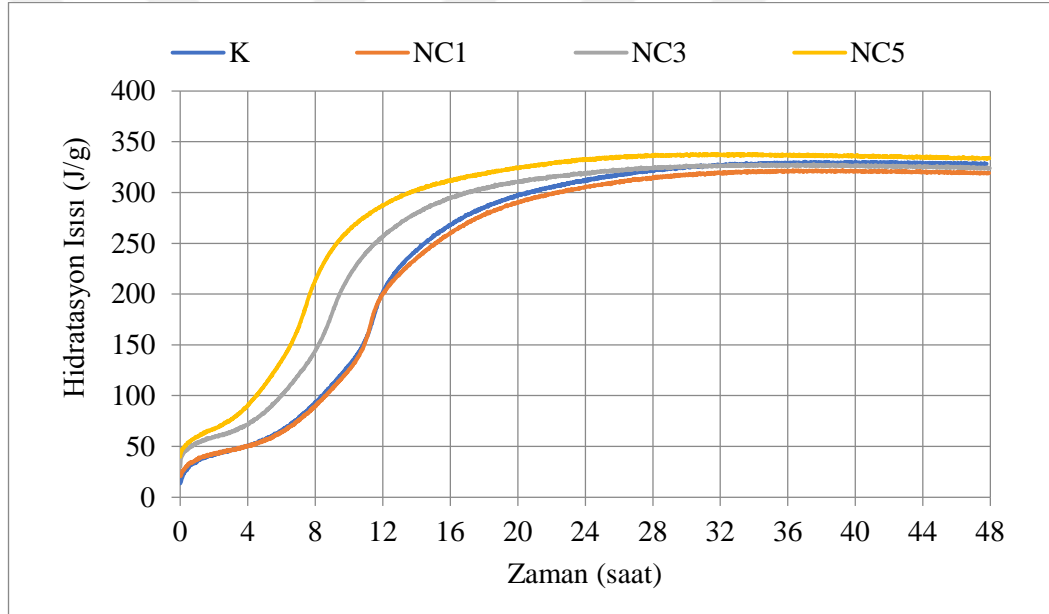
Çalışmada farklı oranlarda tekli ve ikili olarak kullanılan nano malzemeler ile TS EN 196'a göre üretilen harç numunelerinde yapılan hidratasyon ısısı deney sonuçları Şekil 4.1-4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.1. HNK'in ilk 48 saatlik zamanda hidratasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 1% ve %3 oranlarda HNK kullanılması durumunda kontrol numunesi ile yaklaşık paralel bir sonuç gösterdiği, %5 oranında kullanılması durumunda kontrol numunesine göre 48 saat sonunda yaklaşık %4.9 oranında hidratasyon ısısını

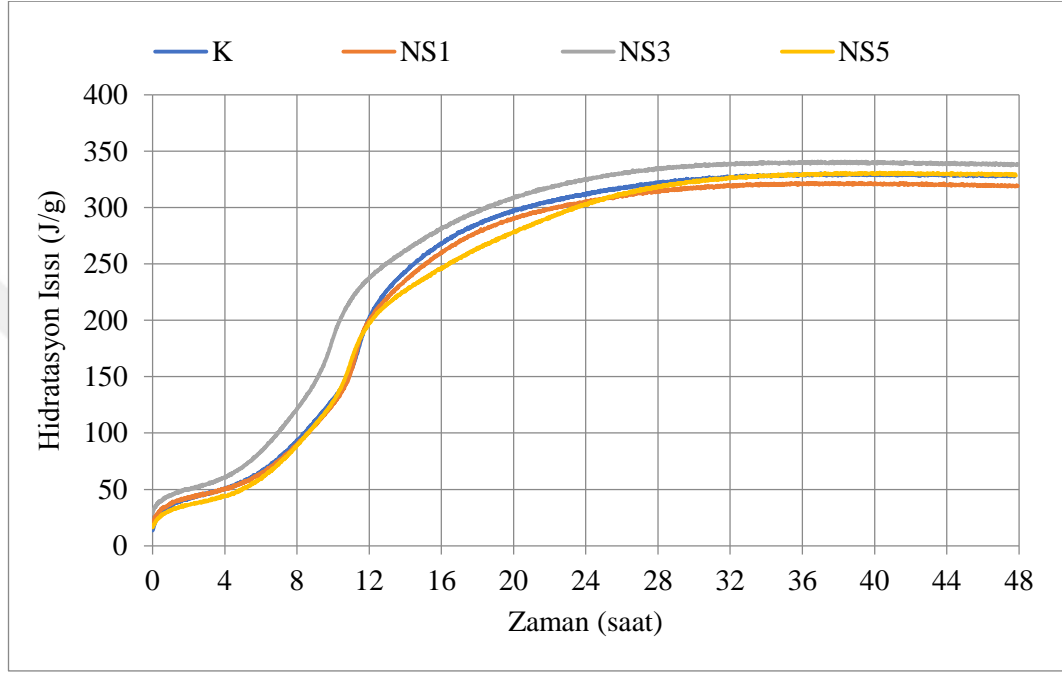
düşürdüğü görülmektedir. HNK kullanımı ile hidrasyon ısısının çok az miktarda da olsa artmasının nedeni, düşük miktarda HNK kullanması durumunda çimento ile reaksiyona girince, kil taneleri içerisinde bulunan suyun çimento taneleri tarafından emilip reaksiyonun devam etmesi ve hidrasyon ısısı üretmesi olarak değerlendirilmiştir. HNK oranı arttıkça, çimento miktarında azalma olduğundan dolayı hidrasyon ısısında düşüş meydana geldiği düşünülmektedir. Muhtemelen pozolanik reaksiyon daha ileriki yaşlarda gerçekleştiği için (basınç dayanımı sonuçlarına istinaden) ısı ileriki yaşlarda kontrol numunesinin hidrasyon ısısına yaklaşmıştır (John *et al.* 2011; Farzadnia *at al.* 2013)



Şekil 4.2. NC'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması

Nano-CaO'in hidrasyon ısısını kontrol numunelerine göre karşılaştırıldığında, ilk 4-24 saat arasında belirgin bir artış göstermiştir. Katkı oranı arttıkça bu belirginliğin daha da arttığı görülmektedir. Sonuç olarak 48 saat sonunda %1 ve %3 oranında nano-CaO kullanması durumunda kontrol numunesine göre çok az düşüş göstermesine rağmen %5 oranında ise yaklaşık olarak %1.8 oranında hidrasyon ısısını arttırdığı gözlenmiştir. Bu karışımda hidrasyon ısısını önemli bir kısmı ilk 24 saatlik zamanında gerçekleştiği

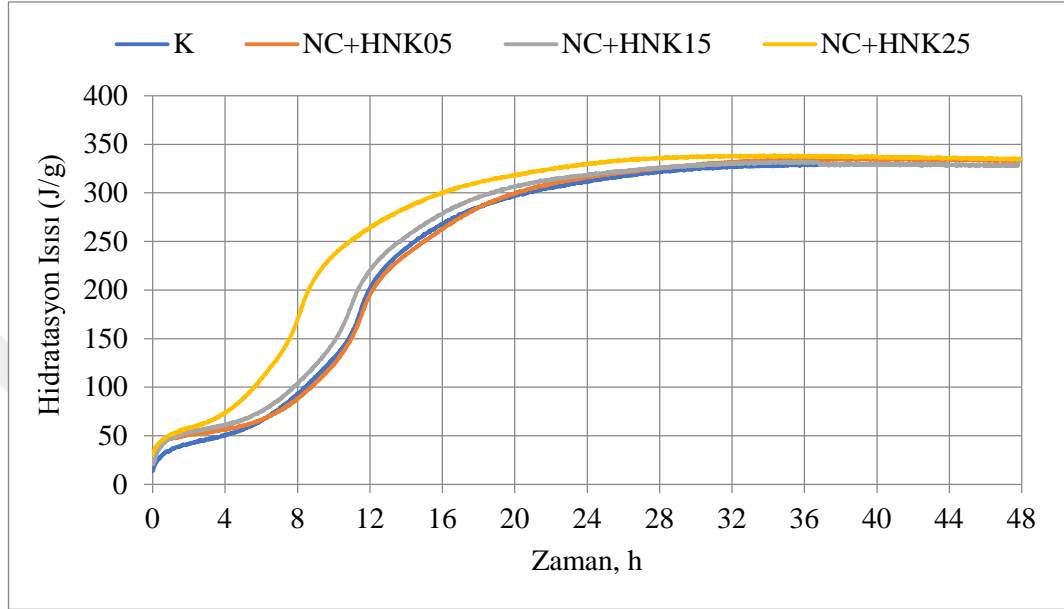
görülmektedir. CaO'in özgül yüzeyinin çimentoya göre fazla olmasından dolayı kimyasal reaksiyonlar hızlı gerçekleşmektedir ve dolayısıyla hidrasyon ısısını artırmaktadır (Polat *et al.* 2013).



Şekil 4.3. NS'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması

Nano-SiO₂'in hidrasyon ısısına etkisi kontrol numunelerine göre kıyaslandığında, %1 oranında kullanılması durumunda 48 saat sonunda azaldığı, %5 oranında kontrol numunesi ile paralel sonuç gösterdiği ve %3 oranında ise ilk 4-15 saatleri arasında belirgin bir artış gerçekleştiği, zaman ilerledikçe bu artış %0.6'e kadar çıktığı görülmektedir. Said *et al.* (2012) yaptıkları çalışmada %3 oranında NS kullanılmasıyla ilk 15 saatte en fazla artış gösterdiğini belirtmiştir. Hidrasyon ısısını artmasını nedeni NS küçük boyutlarda olduğu ve çimento ile karıştırıldıktan sonra hidrasyon ısısı hızlandırdığı bilinmektedir. Bu artışın yalnızca NS'in puzolanik etkisinden olmadığını, çünkü puzolanik reaksiyon çoğunlukla yeterli portlandit oluşumundan sonra gerçekleştiğini belirtmiştir. Aksakal *et al.* (2010) nano silis %5 oranında kullanılması durumunda hidrasyon ısısının azaldığını, bunun nedeni olarak silisin puzolanik özellik

gösterdiğinden kaynaklandığını ve optimum nano-SiO₂ oranının %3 olduğunu ifade etmiştir.



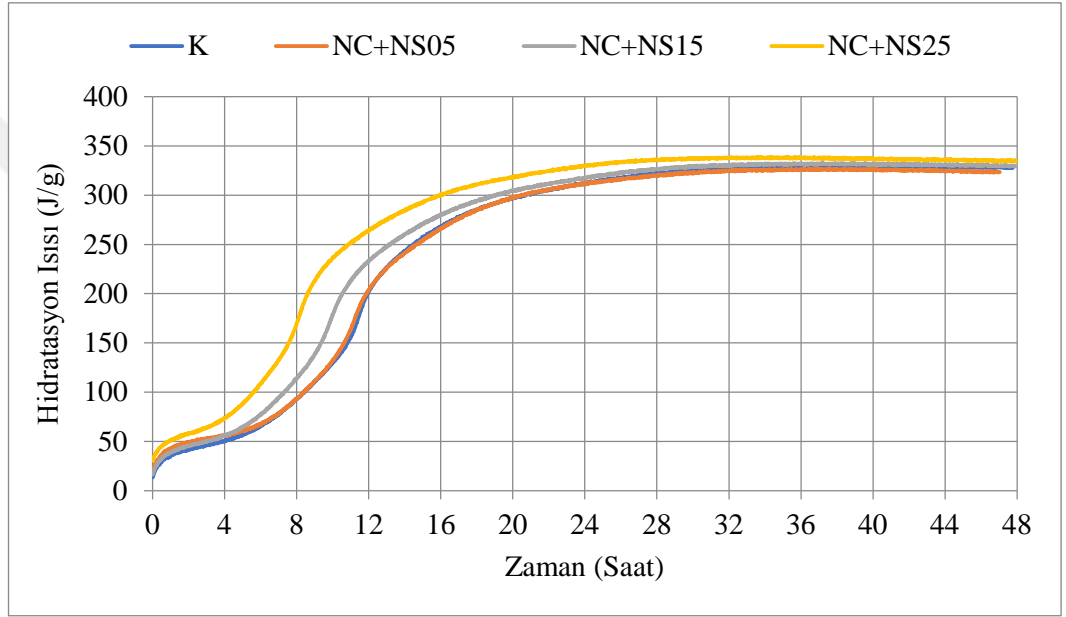
Şekil 4.4. NC+HNK'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması

%0.5, %1.5 ve %2.5 oranlarında NC+HNK ile üretilen harçların hidrasyon ısıları kontrol numunelerine göre ilk 4-20 saatleri arasında nano malzeme oranına bağlı olarak ciddi bir artış göstermiştir. Sonuç olarak 48 saat sonunda %1.5 oranında kontrol numunelerine göre paralellik gösterirken, %0.5 ve %2.5 oranında ise yaklaşık olarak %1.8 oranında artış göstermiştir.

Şekil 4.1 ve 4.2'de görüldüğü gibi, HNK ve NC ayrı ayrı kullandığında en düşük sonuç %5 HNK ve en yüksek sonuç ise %5 NC'de gerçekleşmiştir. Fakat, ikili kullanımda NC oranı artmasıyla HNK'in hidrasyon ısısının büyük ölçüde etkilendiği Şekil 4.4'den görülmektedir.

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi NC+NS ile üretilen harçların %1, %3 ve %5 oranlarda çimento yerine kullanılmasıyla kontrol numunelerine kıyasla, ilk 24 saatlik zamanda

belirgin bir artış gösterdiği, karışımda katkı oranı arttıkça bu belirginliğin daha da arttığı görülmektedir. Sonuç olarak 48 saat sonunda kontrol numunelerine göre %0.5 oranında NC+NS kullanması durumunda kontrol numunelerine göre çok az düşüş (%1.5 oranında) göstermesine rağmen, %3 ve %5 oranlarda ise yaklaşık olarak %1.8 ve %1.5 oranlarda hidrasyon ısını arttırdığı tespit edilmiştir. En yüksek artış 48 saat sonunda ise %2.5 NC+NS karışımında %1.8 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.5. NC+NS'in ilk 48 saatlik zamanda hidrasyon ısısının kontrol numunesi ile karşılaştırılması

NC ve HNK birlikte kullanıldığında, HNK'in %1 ve %3 karışımındaki oranlara göre önemli bir fark olmamasına rağmen, %2.5 oranındaki NC+HNK karışımı %5 oranındaki tekli HNK ile karşılaştırıldığında, ikili karışımda daha yüksek hidrasyon ısısı elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni olarak, NC ikili karışımı büyük miktarda etkilediği diğer taraftan puzolanik reaksiyonundan kaynaklandığı düşünülebilir.

NC ve NS birlikte kullanıldığında, katkıların oranına bağlı olarak hidrasyon ısısını artırmıştır. %2.5 oranındaki NC+NS, tekli karışım grupları ile karşılaştırdığında, NC+NS birlikte kullanılması durumunda, NC'in kimyasal reaksiyonu hızlandırdığı, NS'e göre NC karışımı daha fazla etkilediği Şekil 4.5'den görülmektedir.

Kullanılan her iki nano malzemede, nano boyutta olduğundan ve puzolanik reaksiyon için malzemeler ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$) hazır bulunduğundan hidrasyon ısı nano malzemenin oranına bağlı olarak hidrasyon ısını artırdığı düşünülmektedir.

4.2. Basınç Dayanımı Nano malzeme İçeren Harçların Özelliklerine Etkisi

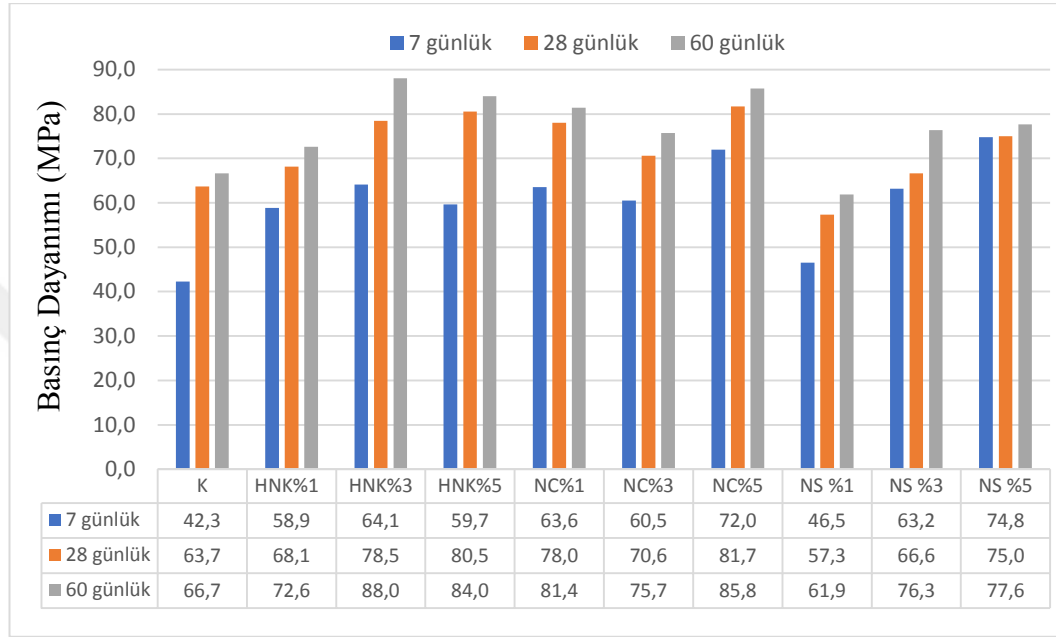
4.2.1.a. Nano malzemelerin tekli kullanımı

Nano malzemelerin tekli kullanımı ile üretilen harç numunelerin erken (7 gün), standart (28 gün) ve ileri (60 günlük) basınç dayanımları deney sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Üretilen harç numunelerden her deney için 3'er adet numune alınarak basınç dayanımına tabi tutulup ortalama değerleri alınmıştır.

Harç numunelerde %1, %3 ve %5 oranlarında HNK kullanılması durumunda, kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, basınç dayanımı değerleri sırasıyla 7 günlük numuneler için %39.3, %51.6 ve %41.1, 28 günlük numuneler için %7.0, %23.2 ve %26.5 ve 60 günlük numuneler için ise %8.9, %32.1 ve %26.1 oranlarında arttığı tespit edilmiştir. Karışımda, tekli HNK içeren harçların basınç dayanımı tüm oranlarda kontrol numunelerine göre artış göstermiştir. HNK'in basınç dayanımı erken yaşlardan ileri yaşlara doğru gittikçe malzemelerin oranı ve kür süresine bağlı olarak dayanımı artmaktadır. En yüksek dayanım ise %3 oranında 60 günlük HNK'li numunede gözlenmiştir. Dayanım artışı, HNK'in nano boyutta ve yüksek yüzey alanına sahip olduğu, çimento esaslı malzemelerin bünyesinde filler gibi davrandığı ve gözenekleri doldurarak kompakt bir yapıyı oluşturduğundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, kil içindeki silika (SiO_2) ortamdaki sönmüş kireç (hidrate ürünler arasında) ile reaksiyona girince, C-H'i azaltarak C-S-H'i oluşturduğu ve bu reaksiyon sonucunda malzeme yapısı daha sağlam ve gevrek olduğu (Farzadnia *et al.* 2013) zamanla puzolanik etkilerinden dolayı erken yaşlara göre ileri yaşlarda yüksek dayanım kazandığı tespit edilmiştir.

HNK'in zamanla tüm yaşlarda artış göstermesi literatür çalışmaları (Heikal *et al.* 2016; Farzadnia *et al.* 2013) ile uyumlu çıkmıştır. Heikal *et al.* (2016) yaptığı çalışmasında

%1 oranda NK kullanılmasında basınç dayanımı zamanla artış gösterdiğini ifade etmiştir. Farzadnia *et al.*(2013) çimento esaslı harçlarda %2 ve %3 oranında HNK kullanması ile basınç dayanımında sırasıyla %24 ve %56 artış olduğunu belirtmiştir.



Şekil 4.6. Tekli karışımlara ait 7, 28 ve 60 günlük harç numunelerin basınç dayanımı değerleri

%1, %3 ve %5 oranlarda NC ile üretilen numunelerin basınç dayanımları kontrol numunelerine göre 7 günlük numunelerde sırasıyla, %50.4, %43.1 ve %70.3, 28 günlük numunelerde, %22.5, %10.9 ve %28.3 ve 60 günlük numunelerde %22.1, %13.6 ve %28.7 oranlarda artış gösterdiği tespit edilmiştir. Tekli kullanılan NC'in sonuçlarında, tüm oranlarda kontrol numunelerine göre artış göstermiştir. Artış oranları erken yaşlara göre ilerleyen yaşlarda yüksek çıkmıştır. En yüksek dayanım ise %5 oranında NC içeren 60 günlük numunelerde 85.8 MPa olarak gerçekleşmiştir. (Polat *et al.* 2013) çalışmasında %2.5, %5.0 ve %7.5 oranlarında nano-CaO kullanması sonucunda basınç dayanımlarının arttığını ifade etmiştir.

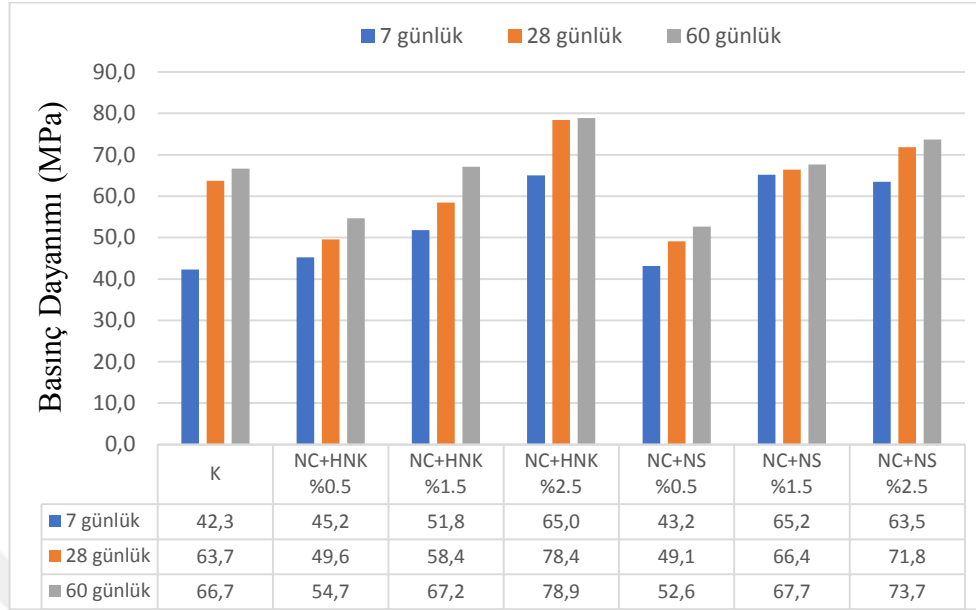
%1, %3 ve %5 oranlarda NS ile üretilen numunelerin 7 günlük basınç dayanımları kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %10, %49.5 ve %76.9 oranında arttığı, 28 günlük

numunelerde %1 orandaki karışımda %10 azalma göstermesine rağmen, %3 ve %5 karışımlarda sırasıyla %4.6 ve %17.8 oranında arttığı tespit edilmiştir. 60 günlük numunelerin basınç dayanımlarına bakıldığında kontrol numunelerine göre %1 orandaki karışım için %7.2 oranında azalma göstermiş olup, %3 ve %5 karışımlar için sırasıyla %14.5 ve %16.5 oranlarda artırdığı tespit edilmiştir. NS tekli kullanıldığında, tüm yaşlarda (ileri yaşlarındaki %1 oranı hariç) dayanımı artmaktadır. %3 ve %5 oranlarda NS içeren grupların erken yaşlara göre ilerleyen yaşlarda nano malzeme oranı artıkça dayanımı da artmıştır. Bu sonuçlar NS'li malzemelerin puzolanların gösterdiği etkiye benzer şekilde, zaman ilerledikçe dayanımdaki artış daha da belirginleştirdiğini göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı %5 oranında NS içeren 7, 28 ve 60 günlük numunelerde sırasıyla 74.8, 75.0 ve 77.6 MPa çıkmıştır.

Bir çok araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar sonucunda, NS erken yaşlara göre ilerleyen yaşlarda oranına bağlı olarak dayanımı arttığı rapor edilmiştir (Said *et al.* (2012), Aleem *et al.* (2014), Madandoust *et al.* (2015) ve Rong *et al.* (2015).

4.2.1.b. Nano malzemelerin ikili kullanımı

Nano malzemelerin kombinasyonu olarak üretilen harç numunelerin 7, 28 ve 60 günlük basınç dayanımları Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. İkili karışımlara ait 7, 28 ve 60 günlük harç numunelerin basınç dayanımı değerleri

NC+HMK birlikte kullanılması durumunda, kontrol numunelerine göre (%2.5 grubu hariç), %0.5 ve %1.5 oranları için 28 ve 60 günlük numunelerde düşme eğilimi görülmektedir. NC+HMK %2.5 karışımı için tüm yaşlarda (7, 28 ve 60 gün, sırasıyla) kontrol numunelerine göre sırasıyla %53.8, %23.1 ve %18.3 oranlarda artış gözlenmiştir.

İkili NC+NS içeren numunelerin sonuçları incelendiğinde, 28 ve 60 günlük numunelerin %0.5 grubu hariç, %1.5 ve %2.5 içeren numunelerin tüm yaşlarında nano malzeme oranı ve kür süresine bağlı olarak, kontrol numunelerine göre basınç dayanımı artmıştır. Artış oranları erken yaşlara göre ilerleyen yaşlarda daha yüksek çıkmaktadır. En yüksek basınç dayanım ise 60 günlük numunelerin %2.5 NC+NS grubunda sırasıyla %50.1, %12.8 ve %10.6 oranlarda artış gözlenmiştir (7, 28 ve 60 günlük).

NC+HMK ve NC+NS birlikte kullanılması durumunda, puzolanik etkilerinden dolayı daha yoğun C-S-H yapılarını meydana getirdikleri, gözeneklerini doldurarak kompakt bir yapı oluşturdukları, hemde puzolanik reaksiyon sonucunda çimento hamuru içinde oluşan C-S-H miktarını artırdıkları, dolayısıyla porozitenin azaldığı ve nihayetinde (su

emme deneyinden elde edilen) basınç dayanımını zamana bağı olarak artırdıkları görülmektedir.

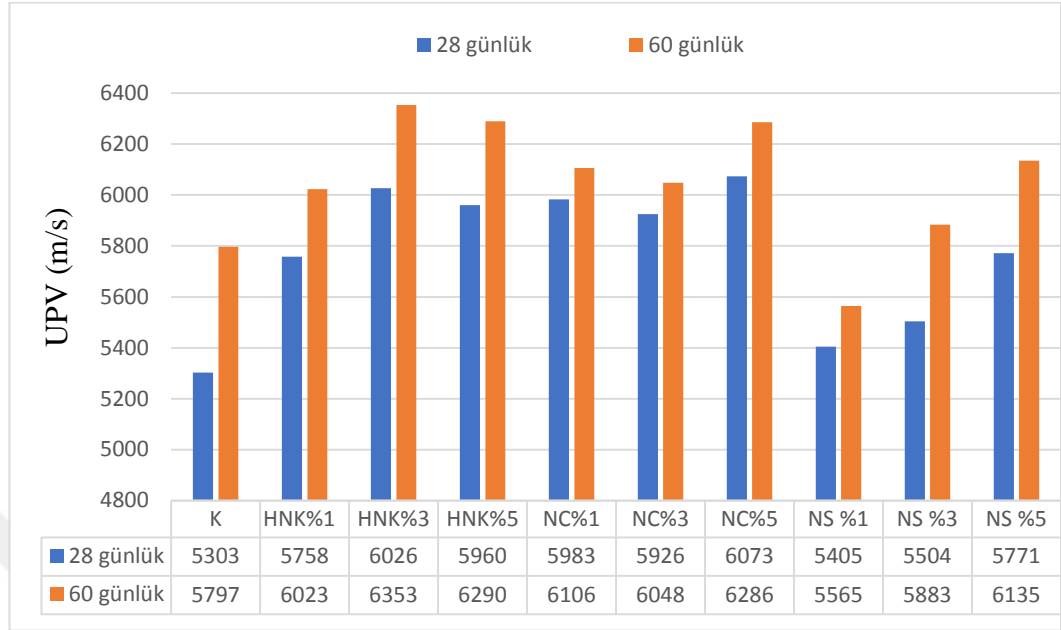
4.2.2. UPV

Karışımlara ait UPV sonuçları Şekil 4.8'de verilmiştir. Çimento esaslı malzemelerde genelde yoğunluğu yüksek olan karışımların UPV değerleride yüksek olmaktadır ve paralel özellik göstermektedir (Erdoğan, 2010).

HNK içeren numunelerin UPV değerleri kontrol numunelerine göre artmıştır. Artışlar %1, %3 ve %5 HNK içeren 28 günlük numunelerde sırasıyla %8.6, %13.6 ve %12.4, 60 günlük numunelerde %3.9, %9.6 ve %8.5 oranlarda gözlenmiştir.

NC kullanılan numunelerin UPV değerleri tüm karışımlarda katkı oranına bağı olarak artmaktadır. Karışımındaki NC oranı arttıkça UPV değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Bu artışlar kontrol numuneleri ile karşılaştırdığında %1, %3 ve %5 NC için 28 günlük UPV değerleri sırasıyla %12.8, %11.7 ve %14.5, 60 günlük numunelerde sırasıyla, %5.3, %4.3 ve %8.4 oranlarda artış olduğu gözlenmiştir.

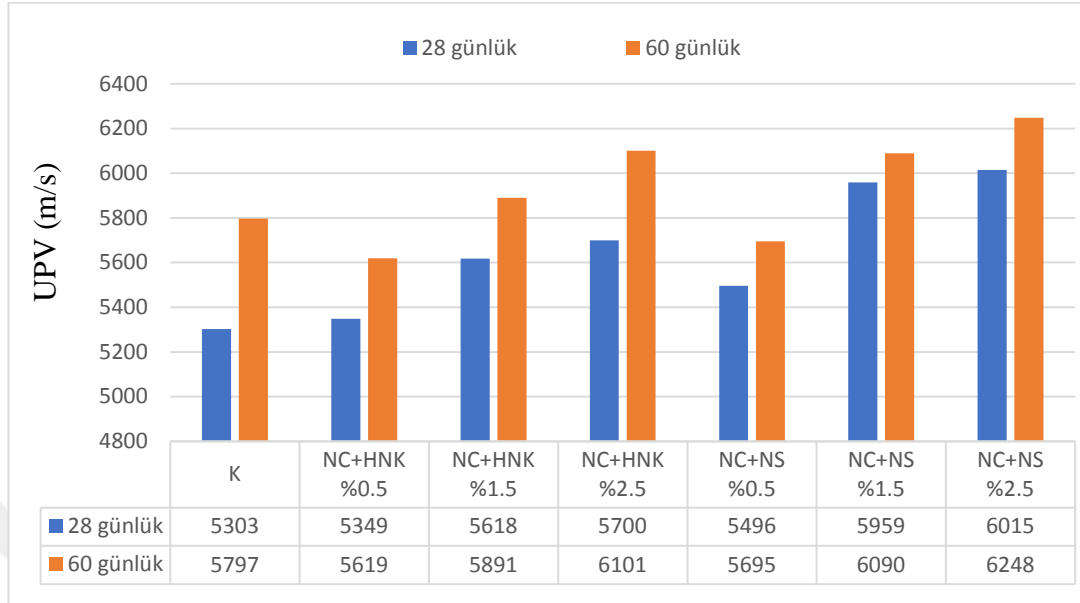
NS içeren numunelerin UPV değerlerine bakıldığında, 60 günlük numunelerin %1 oranındaki NS hariç, diğer tüm numunelerde, kontrol numunelerine göre artış göstermiştir. Bu sonuç 28 günlük numunelerde, %1, %3 ve %5 NS kullanması durumunda sırasıyla, %1.9, %3.8 ve %8.8 oranlarda artış olduğu, 60 günlük numunelerinde ise %1.5 ve %5.8 oranında artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.8. Tekli karışımlara ait 28 ve 60 günlük numunelerin UPV değişimi

Tekli kullanılan nano malzemelerin sonuçları incelendiğinde, kontrol numunelerine göre tüm grupların UPV değerleri yüksek çıkmaktadır. Bunun muhtemel nedeni (Bölüm 4.2.1’de açıklandığı gibi) nano malzemelerin yüksek yüzeylerde sahip oldukları, beton bünyesinde filler gibi davrandıkları, betonun içyapısını iyileştirip, kılcal ve çok ince boşlukları doldurarak kompakt bir yapıya neden oldukları söylenebilir. Tekli nano malzemelerin UPV sonuçları ile basınç dayanım sonuçları karşılaştırdığında yaklaşık benzer sonuç verdiği görülmektedir.

%0.5, %1.5 ve %2.5 oranlarında ikili NC+HNK içeren grupların 28 günlük UPV değerleri, kontrol numunelerine göre, %0.9, %5.9 ve %7.5 oranlarda artış, 60 günlük numunelerde ise %0.5 NC+HNK hariç, diğer karışımlarda sırasıyla, %1.6 ve %5.2 artış olduğu gözlenmiştir. %0.5 oranında NC+HNK içeren numunelerin UPV değeri %3.1 oranında azaldığı görülmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. İkili karışımlara ait 28 ve 60 günlük numunelerin UPV değişimi

İkili NC+NS içeren grupların UPV sonuçlarına bakıldığında, %0.5 oranındaki 60 günlük NC+NS grubu hariç, diğer tüm gruplarda kontrol numunelerine göre, arttığı görülmektedir. Artışlar, %0.5, %1.5 ve %2.5 oranlarında NC+NS kullanıldığında 28 günlük numunelerde sırasıyla %3.6, %12.4 ve %13.4, 60 günlük numunelerde ise %5.0 ve %7.8 oranlarında olduğu gözlenmiştir. Buradan da ikili karışımın UPV değerleri basınç dayanımına benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

Numunelerde bir yüzeyinden gönderilen dalgalar boşluk kenarına gelince, boşluğun etrafını dolaştıkları için alınan mesafe artmakta ve hız azalmaktadır. Çimento esaslı malzemelerde, boşluklar ve çatlaklar ses dalgasının yolunu uzatarak düzensiz sonuçlar vermektedir (Kewalramani *et al.* 2005). Yani ultrases hızının azalması, çimento esaslı malzemelerin boşluklu olduğunu göstermekte, buna bağlı olarak dayanımı da düşük olduğu bilinmektedir.

Nano malzeme ile üretilen harç numuneler tekli veya birlikte kullanılması durumunda, malzemelerin nano boyutta ve yüksek yüzey alanına sahip oldukları, çimento esaslı malzemelerin bünyesinde dolgu maddesi olarak kullanıldıkları, porozitesinin azaltması

ile daha yoğun C-S-H yapılarının meydana getirdikleri ve gözeneklerini doldurarak kompakt bir yapı oluşturduklarından dolayı UPV sonuçları yüksek çıkmaktadır (Fan *et al.* 2015). UPV deneyi, çimento esaslı malzemelerin kompakt yapısını ve kalitesini değerlendirmek, kusurlarını belirlemek, çatlak dağılımını tahmin etmek için kullanılmaktadır.

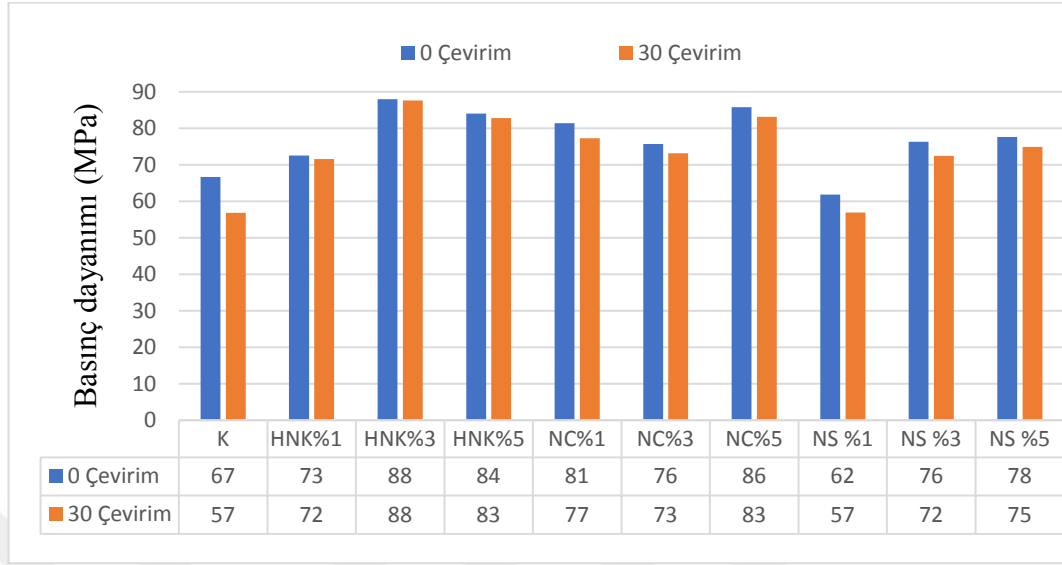
4.3. Donma-Çözülmenin Nano Malzeme İçeren Harçların Özelliklerine Etkisi

4.3.1. Basınç dayanımı

Harç numuneler 60 gün kür süresini tamamladıktan sonra 30 donma-çözülme (D-Ç) çevrimine maruz bırakılmıştır. D-Ç öncesi (0-çevrim) ve sonrası (30-çevrim) basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.

30 D-Ç çevrimine maruz kalan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, tekli ve ikili nano malzeme kullanılan tüm grupların basınç dayanımlarında düşüş meydana gelmiştir. D-Ç çevrimi sonucunda nano malzeme içeren tüm karışımların basınç dayanımlarındaki düşüş miktarı, kontrol numunelerine göre daha azdır. Kontrol numunelerindeki azalma %14.7 iken nano malzeme içeren karışımlarda yaklaşık %0.5-%7.9 arasında değişmektedir.

D-Ç’den sonra, %1, %3 ve %5 oranlarında tekli HNK içeren numunelerin basınç dayanımları D-Ç öncesine göre sırasıyla %1.3, %0.5 ve %1.4, NC içeren numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %5.0, %3.3 ve %3.1 oranlarda düşüş gözlenmiştir. Aynı katkı yüzdelerinde NS’li numuneler ise basınç dayanımlarındaki düşüş oranlarının %7.9, %5.1 ve %3.5 olduğu görülmektedir. Görüldüğü gibi, NS ve NC oranı arttıkça harçlarda meydana gelen hasarlar azalmaktadır.



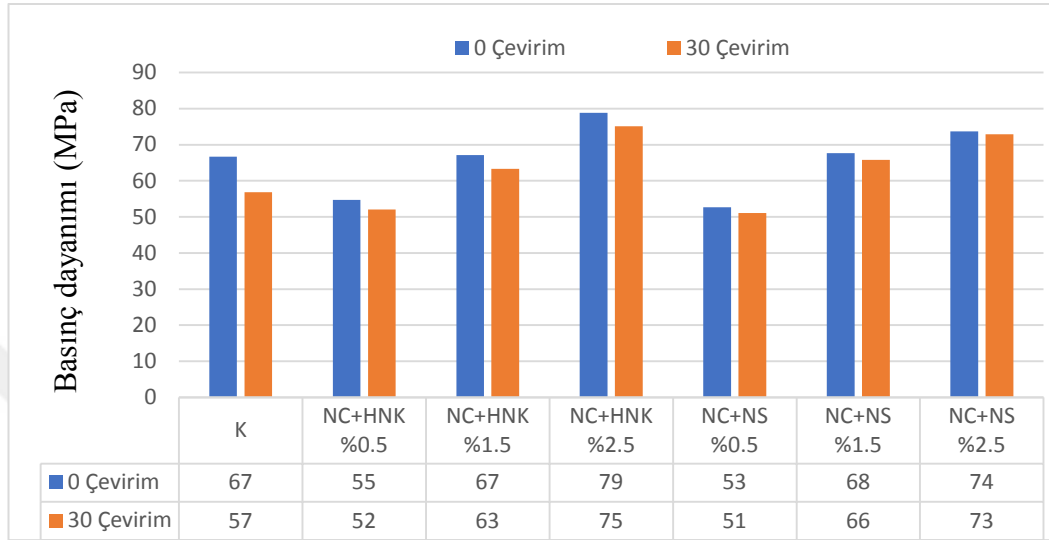
Şekil 4.10. 0 - 30 Donma-çözülme çevrimine maruz kalan tekli nano malzeme içeren numunelerin basınç dayanımı değerleri

İkili karışımlarda, %0.5, %1.5 ve %2.5 NC+HNK içeren grupların D-Ç çevrimleri neticesinde basınç dayanımlarında sırasıyla %4.9, %5.7 ve %4.7 oranında düşüş gözlenmiştir ve aynı katkı oranlarına sahip NC+NS içeren numunelerin basınç dayanımları sırasıyla %3.0, %2.9 ve %1.1 oranlarında düşüş olduğu görülmektedir. İkili karışımlarda en az düşüş %1.1 ile NC+NS grubunda görülmekte olup, diğer tüm gruplarda D-Ç önce elde edilen dayanım değerlerine göre çok az düşüş gözlenmiştir.

Nano malzeme kullanılan harç numunelerin D-Ç'ye karşı kontrol numunelerine göre çok daha dirençli olduğu görülmektedir. Çimento esaslı malzemeler, D-Ç'den sonra bünyesinde bulundurduğu kapiler ve daha büyük boşluklardaki suyun donması neticesinde zarar görmektedir.

Donma-çözülme öncesi basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında, nano malzeme ile üretilen harçlarda dayanımın daha yüksek olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı arttıkça, kılcal boşlukları doldurarak geçirgenliği ve boşluk oranının azaldığı bilinmektedir (Dursun *et al.* 2005). Bu nedenle, daha az boşluklu ve bünyesinde daha az

su bulunduran nano malzeme ile üretilen harçların mikroyapısı kompakt ve daha yoğun olduğundan D-Ç neticesinde daha az dayanım kaybı göstermiştir.



Şekil 4.11. 0-30 donma-çözülme çevrimine maruz kalan ikili nano malzeme içeren numunelerin basınç dayanımı değerleri

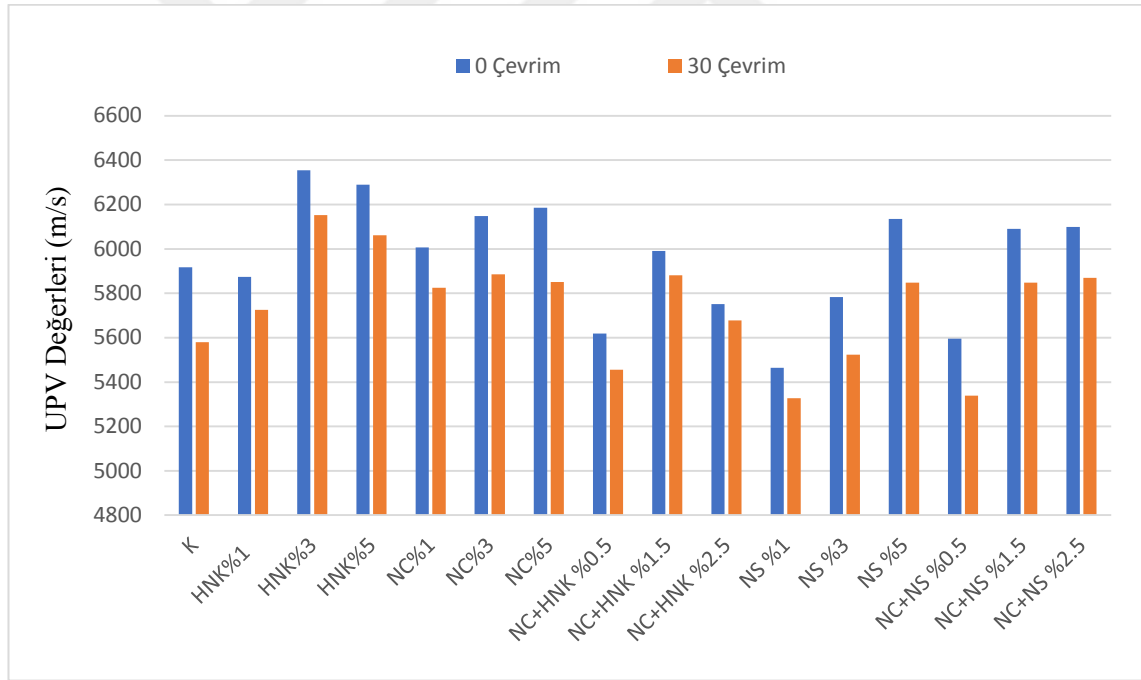
Fan *et al.* (2015), %3 ve %5 oranında NKK kullanılmasıyla, kontrol numunelerine göre basınç dayanımı ve donma-çözülmeye karşı direncini arttırdığı, D-Ç'den sonra basınç dayanımında çok az düşüş gösterdiğini belirtmiştir. Mohammed *et al.* (2017), %10, %15 ve %20 oranlarında kalsinit kil (KK) kullanarak 300 D-Ç çevrim sonrası, harcın fiziksel, mekanik ve termal özelliklerini artıştırması sonucunda, %10 oranında kil kullandığında, kontrol numunelerine göre harcın basınç dayanımında sırasıyla %15.93 ve %17.41 oranlarında düşüş olduğunu ifade etmiştir. Dursun *et al.* (2005), çimento yerine cürfun %6 ve trasın %8 oranlarında pozulan kullanılması durumunda, kontrol numunelerine göre daha yüksek çekme ve basınç dayanımlara sahip oldukları ve D-Ç'ye karşı daha iyi dayanıklılık gösterdiğini ifade etmiştir.

4.3.2. UPV

Donma-çözülme sonucunda elde edilen UPV değerleri incelendiğinde, Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, 30 D-Ç çevrimden sonra tüm karışımlarda çok az düşüş meydana

gelmiştir. 30 D-Ç çevrimden sonra nano malzeme içeren tüm karışımların UPV değerlerindeki düşüş miktarı, kontrol numunelerine göre genelde daha düşüktür. Kontrol numunelerindeki düşüş %5.7 iken, diğer nano malzeme içeren karışımlarda yaklaşık %1.3 ile %5.4 arasındadır.

Nano malzeme ile üretilen harç numunelerde %1, %3 ve %5 oranlarda HNK içeren karışımların UPV değerleri D-Ç öncesine göre sırasıyla %2.5, %3.2 ve %3.6, NC içeren numunelerde sırasıyla %3.0, %4.3 ve %5.4 ve NS içeren numunelerde sırasıyla %2.5, %4.5 ve %4.7 oranlarda düşüş meydana gelmiştir. Nano malzemeler tek başına kullanıldığında, 30 D-Ç çevrimi sonucunda, basınç dayanımı ve UPV değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu, tüm gruplarda daha iyi performans sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.12. Tekli ve ikili nano malzeme içeren numunelerin 0-30 donma-çözülme çevrim sonrasındaki UPV değerlerinin değişimi

%0.5, %1.5 ve %2.5 oranlarda ikili NC+HNK ve NC+NS içeren karışımlarda en fazla düşüş, %0.5 oranında nano malzeme kullanılan karışımlara ait olup, düşüş oranları sırasıyla %2.9 ve %4.6'dır. D-Ç çevrimleri sonucunda iç yapıda kılcal çatlaklar ve

boşluklar meydana geldiği için UPV değerleri D-Ç sonrası azalmıştır. Dikkat çeken nokta ise nano malzeme içeren karışımlardaki azalma, kontrol gruplarından daha azdır. Buda, nano malzemelerin iç yapısında daha az boşluk bulduklarını ve daha az zarar gördüklerini ifade ettiği düşünülmektedir.

4.3.3. Su emme

Su emme deneyleri genellikle çimento esaslı malzemelerin boşluklardaki hacmini gösterir. Nano malzemelerin tekli veya ikili kullanımı, türü, ince boyutlarda (nano boyut) olması, malzemelerin oranı ve miktarına bağlı olarak su emme oranını etkilemektedir. 30 donma-çözülme çevrimi sonucundaki su emme değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelgeden görüldüğü gibi donma-çözülme öncesi durumda nano malzemeler ile üretilen harçlarda (tekli ve ikili), su emme miktarı kontrol numunelerine göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Donma-çözülme sonrası için su emme açısından incelendiğinde tüm gruplarda, donma-çözülmenin öncesine göre su emme miktarlarında artma meydana gelmesine rağmen nano malzemelerin birlikte kullanıldığı karışımlarda daha az bir artış olduğu görülmektedir.

Donma-çözülme öncesine göre su emme miktarlarındaki artış sırasıyla, K, HNK %1, HNK %3, HNK %5, NC %1, NC %3, NC %5, NC+HNK %0.5, NC+HNK %1.5, NC+HNK %2.5, NS %1, NS %3, NS %5, NC+NS %0.5, NC+NS %1.5, NC+NS %2.5 için %10.6, %10.7, %19.3, %13.6, %23.4, %20.8, %14.0, %7.3, %8.0, %9.0, %6.5, %9.3, %5.0, %7.1, %6.5, %10.2 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Karışım tiplerine göre 0-30 donma-çözülme çevrimi sonrası su emme değerleri

Karışım Tipi	Su emme oranı (%)	
	0-Çevrim	30-Çevrim
K	7.6	8.4
HNK %1	7.4	8.2
HNK %3	6.8	8.1
HNK %5	7.3	8.3
NC %1	6.5	8.0
NC %3	6.4	7.8
NC %5	6.9	7.9
NC+HNK %0.5	7.4	8.0
NC+HNK %1.5	7.0	7.6
NC+HNK %2.5	6.7	7.3
NS %1	7.1	7.6
NS %3	6.8	7.4
NS %5	6.6	6.9
NC+NS %0.5	7.1	7.6
NC+NS %1.5	6.7	7.2
NC+NS %2.5	6.6	7.3

Tüm numunelerde D-Ç sonrası, donma-çözülme öncesine göre su emme oranları artmıştır. Su emme artmasının nedeni, tekrar D-Ç'ye maruz kalan numunelerin mikro gözenekli boyutunun genişmesi, yeni mikro çatlaklar ortaya çıkıp büyüyerek numunelerin iç yapı hasarını artırarak su emmesini artmasına neden olmalıdır. Mohammed *et al.* (2017), %15 ve %20 oranında kalsinit kil kullanması sonucunda kontrol numunelerine göre, D-Ç öncesi ve sonrası su gözenekliğine sırasıyla %8.16 ve %13.4, su emmesinde ise %2.7 ve %7.67 oranlarda artış gösterdiğini ifade etmiştir. Assaedi *et al.* (2016), %2 oranında nano-kil kullanması sonucunda kontrol numunelerine göre betonun porozitesinde %7.1, su emmesinde %17 oranında azalma meydana geldiğini ifade etmiştir. Bunun nedeni de, nano-kil parçacıkların boşluklarda dolgu maddesi olarak davrandığını ifade etmiştir. Tavakoli *et al.* (2013), çimento ağırlığının %1.5 ve %3 oranında NS kullanmasıyla kontrol numunelerine göre betonun su emme oranını azaldığını tespit etmiştir. Sadrmomtazi *et al.* (2009), %0.5 ve %1.5 oranında NS

kullanmasıyla kontrol numnelerine göre su emme oranını %4.3 ve %6.15 oranlarında azaldığını bulmuştur. Esmaili *et al.* (2013), %3, %5 ve %7 oranlarda NS kullanılması durumunda, kontrol numnelerine göre su emmesinde sırasıyla %16.5, %28.9 ve %30.8 oranlarda düşüş gösterdiğini ifade etmiştir.

4.4. Yüksek Sıcaklıkların Nano Malzeme İçeren Harçların Özelliklerine Etkisi

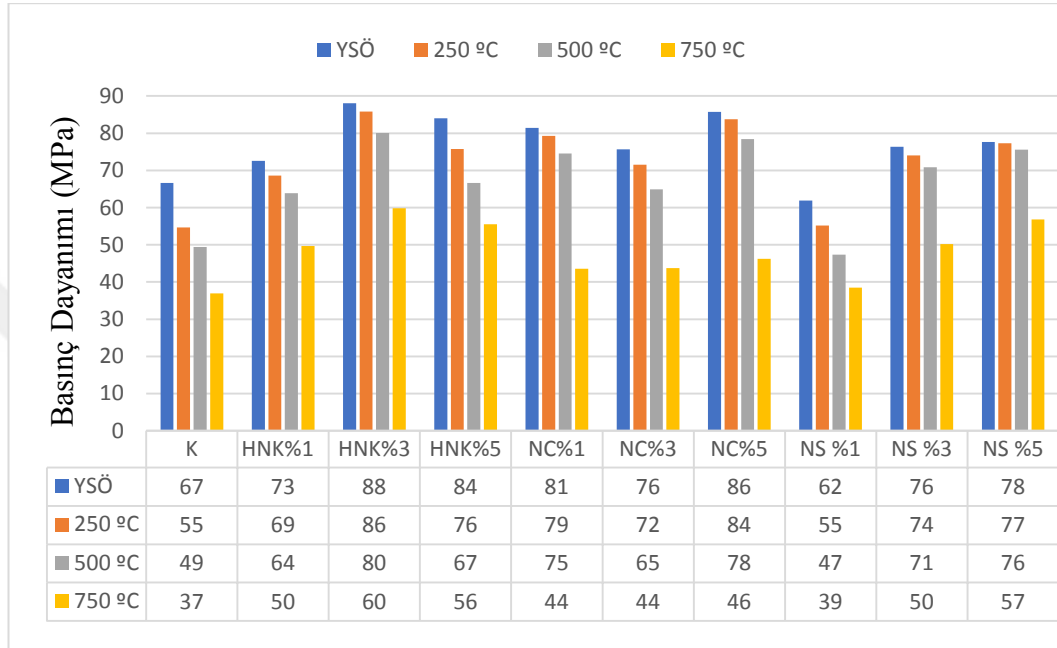
Kür havuzunda 60 gün boyunca standart kür edilen harç numuneler, kür süresi bitince havuzdan çıkarılmıştır. Tüm numuneler yüksek sıcaklık fırınında 250, 500 ve 750°C'de 3 saat süreyle tabi tutulmuştur. Tekli ve ikili nano malzeme içeren harç numunelerin su emme oranları, UPV ve basınç dayanımı deneyleri yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası yapılarak aşağıda değerlendirilmiştir.

4.4.1. Basınç dayanımı

Yüksek sıcaklıklara maruzkalan numunelerin basınç dayanım sonuçları Şekil 4.13 - Şekil 4.14'de verilmiştir. Kontrol numunelerinin 250, 500 ve 750°C sıcaklıklar sonrası dayanım kaybı sırasıyla %18.0, %25.9 ve %44.6 olduğu, HNK kullanılması durumunda %1 HNK için sırasıyla %5.4, %12.0 ve %31.6, %3 HNK için sırasıyla %2.5, %9.1 ve %32.0 ve %5 HNK için %9.8, %20.7 ve %33.9 oranlarda dayanım kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir.

NC kullanılması durumunda aynı sıcaklıklarda %1 NC için sırasıyla %2.6, %8.4 ve %46.5, %3 NC için %5.5, %14.3 ve %42.2 ve %5 NC için %2.3, %8.6 ve %46.1 oranlarda dayanım kaybı olduğu ve NS kullanılması durumunda aynı sıcaklıklarda %1 NS için sırasıyla %10.9, %23.5 ve %37.8, %3 NS için %3.0, %7.2 ve %34.3 ve %5 NS için %0.4, %2.7 ve %26.8 oranlarda dayanım kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımı olumsuz yönde etkilemiş olup, sıcaklık arttıkça basınç dayanımı azalmıştır.

Basınç dayanımı değerleri kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, 750°C'ye kadar meydana gelen en fazla dayanım kaybı tekli nano malzeme içeren %1 ve %5 NC grubunda sırasıyla %46.5 ve %46.1 oranlarda görülmektedir.

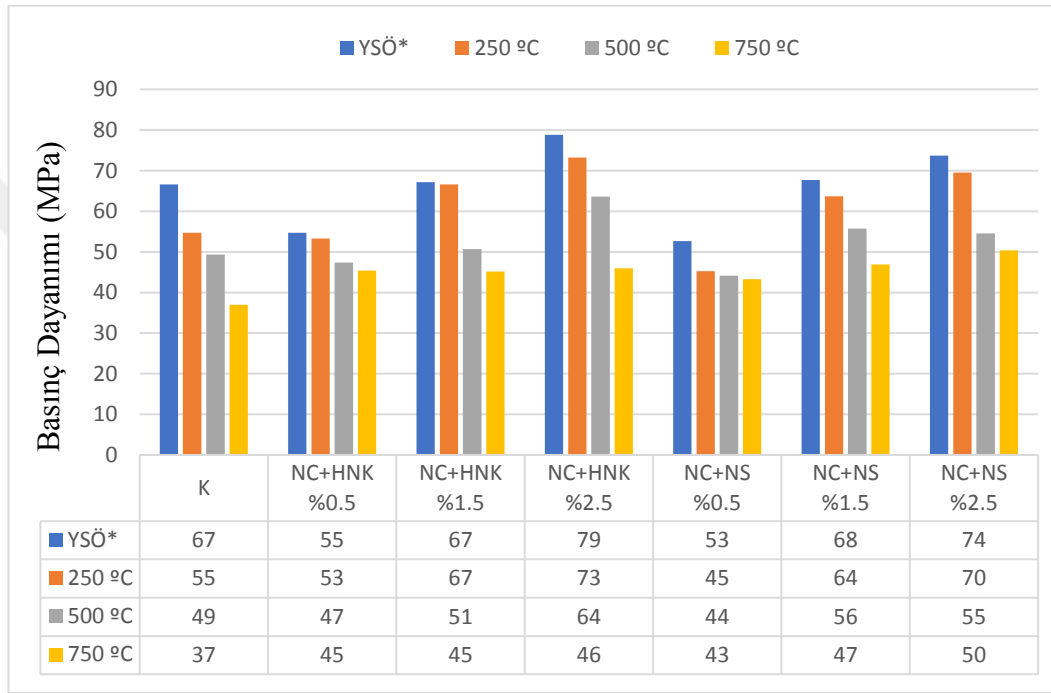


Şekil 4.13. Tekli nano malzeme içeren numunelerin 250, 500 ve 750°C sıcaklıklardaki basınç dayanımı değişimi (YSÖ*=Yüksek Sıcaklık Öncesi)

Çimento hamurunda bulunan bileşenlerden biri ise Ca(OH)_2 dir. Ca(OH)_2 'in sönmemiş kirece (CaO) dönüşmesi 400°C civarında oluşur. Bu olayın sonucunda yaklaşık %33 civarında bir büzülme meydana gelmektedir. Kısa sürede büzülen ve genişleyen beton içinde meydana gelen parazit gerilmeler iç hasarın büyümesine neden olup, CaO 'in su ile yaptığı reaksiyon sonucunda oluşan Ca(OH)_2 yaklaşık %90 hacim artışı meydana getirmektedir. Böylece sıcaklık arttıkça, NC içeren numuneler daha fazla hasar görmekte olup, kırıklar ve çatlaklara neden olmaktadır. Polat *et al.* (2013, 2015), CaO esaslı genişleyen katkıların betonun dayanımını artırdığı ve kuruma rötresini azalttığını belirtmiştir.

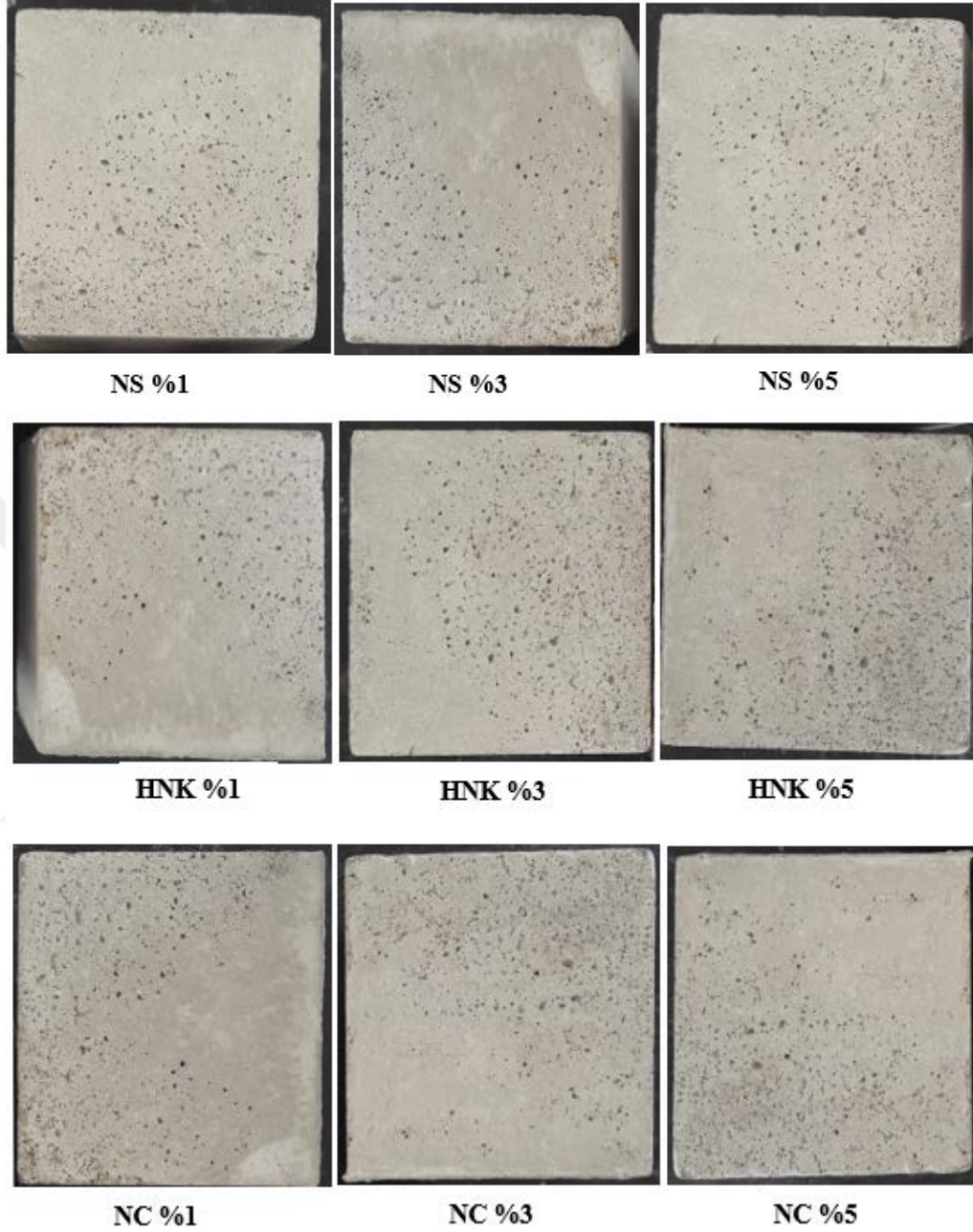
İkili karışımlarda NC+HNK kombinasyon olarak kullanılması durumunda 250, 500 ve 750°C sıcaklıklar sonrası dayanım kaybı %0.5 NC+HNK için sırasıyla %2.5, %13.4 ve

%16.9, %1.5 NC+HNK için %0.8, %24.5 ve %32.7 ve %2.5 NC+HNK için %7.1, %19.3 ve %41.8 oranlarda olduğu ve NC+NS kombinasyonu aynı sıcaklıklarda %0.5 NC+NS için sırasıyla %14.1, %16.2 ve %17.8, %1.5 NC+NS için %5.9, %17.7 ve %30.7 ve %5 NC+HNK için %5.7, %25.9 ve %31.6 oranlarda dayanım kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.14. İkili nano malzeme içeren numunelerin 250, 500 ve 750°C sıcaklıklardaki basınç dayanımı değişimi (YSÖ*=Yüksek Sıcaklık Öncesi)

Basınç dayanımı değerleri kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında 750°C'ye kadar meydana gelen en fazla dayanım kaybı ikili nano malzeme içeren (%2.5 NC+HNK) grubunda %41.8 olarak görülmüştür. NC içeren karışımda görüldüğü gibi, NC tek başına kullanıldığında, diğer nano malzemelere göre çok yüksek dayanım kaybı göstermiştir. NC, HNK ile birlikte kullanılması durumunda, Ca(OH)_2 'in CaO 'e dönüşmesi ve büzülme özelliğinden dolayı HNK'li numuneleri olumsuz yönde etkilediği ve sıcaklık artmasıyla fazla hasara uğradığı görülmektedir.



Şekil 4.15. 500°C den sonra numuneler üzerinde görülen beyazlaşmalar

Farklı nano malzemelerle üretilen harç numuneler 250°C’de 3 saat bekledildikten sonra fırından çıkarıldığında şekilsel herhangi bir tahribata uğramamıştır. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi 500°C’de ısı işlemi uygulanmış numunelerin yüzeyinde beyazlaşmalar ve dayanımı düştüğü görülmüştür. Bu renk değişiminden harçtaki Ca(OH)_2 ’in sönmemiş kirece dönüştüğü anlaşılmaktadır.

**K****HNK %5****NS %1****NC %1****NC %5**

Şekil 4.16. 750°C den sonra numuneler üzerinde görülen çatlaklar

Sıcaklık 500-750°C'ye çıkınca, harçların basınç dayanımlarında yüksek düşüşler meydana geldiği görülmektedir. 750°C'deki yüksek sıcaklıklara maruz kalan (tekli nano malzeme içeren) numuneler üzerinde şekilsel tahribatlar özellikle çatlaklar ve kırıklar olduğu Şekil 4.16'dan görülmektedir.

Yüksek sıcaklık etkisi basınç dayanımı olumsuz yönde etkilemiş olup sıcaklık arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Yüksek dayanımlı harç ve betonlar yüksek sıcaklık etkisinden daha fazla hasar görmektedir. Bu durum, yüksek dayanımlı harç ve betonların geçirimsizliğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Betonun bu geçirimsiz yapısı, suyun buharlaşarak dışarı çıkmasına engel olup, oluşan hidrostatik basınç nedeniyle betonun patlayarak parçalanmasına yol açmaktadır.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan çimento esaslı malzemeler ilk ısıtma boyunca kararsız bir bileşendir, çünkü sıcaklık etkisi ile önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Bu dönüşümlerde, 100-150°C'de sıcaklıklarda kılcal ve jel boşluklarındaki su buharlaşır. 150-250°C'de katı fazlarda meydana gelen büzülme, kılcal çatlakların oluşması ve çekme dayanımının düşmesine neden olur. 250-300°C'de alüminli ve demir oksitli bileşenlerin bünyesindeki suyun kaybı ve basınç dayanımında düşüş meydana gelir. Sertleşmiş çimento hamuru 400°C'de Ca(OH)_2 sönmemiş kirece (CaO)'e dönüşmesi sonucunda yaklaşık %33 bir hacim azalması meydana gelir. 400 ile 600°C arasındaki yüksek sıcaklıklarda boşluk sisteminin tamamen kuruması, hidrasyon ürünlerinin ayrışması ve C-S-H jellerinin bozulması ve basınç dayanımında yaklaşık %80 azalma meydana geldiği görülmektedir (Baradan vd. 2015). Çimento esaslı malzemeler maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve süresi yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak değiştiği, bu etki çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımını belirgin bir şekilde azalttığı ve mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği bir çok araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.

Poon *et al.* (2003), yaptığı çalışmada, metakaolin içeren harçların yüksek sıcaklıklarda maruz kaldığı ve çimento harcın basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalttığını tespit etmiştir. Bu çalışmada, çimento harçlarda kontrol numunelerine göre 200°C'de %2-8, 400°C'de %5-8, 600°C'de %54-68 ve 800°C'de ise %85-90'a varan dayanım kayıplarının olduğunu belirtmiştir. Nadeem *et al.* (2013), sıcaklık artışıyla çimento harcının basınç dayanımı azalmakta olup, kontrol numunelerine göre 200°C'de %8-9, 400°C'de %16 ve 600 ile 800°C'de %46-%80 arasında basınç dayanımında düşüşler meydana geldiğini belirtmişlerdir. Heikal *et al.* (2014), %30-60 oranlarında

YFC ve %4 oranında NS kullanılması durumunda, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, diğer kompozitlere göre yangına karşı direncinin daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır.

4.4.2. UPV

250, 500 ve 750°C'deki sıcaklıklara maruz kalan nano malzeme içeren numunelerin UPV değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin UPV sonuçları incelendiğinde, ses geçiş hızı 250°C'ya kadar önemli bir değişiklik görülmemiş, buna rağmen en fazla düşüş oranı tekli kullanılan %5 NC, %5 NS ve %3 HNK için sırasıyla %7.1, %6.3 ve %4.8 oranlarda gözlenirken, birlikte kullanılan numunelerde en fazla düşüş %2.5 NC+HNK ve %0.5 NC+NS gruplarında sırasıyla %6.9 ve %10.4 oranlarda gözlenmiştir.

500°C sıcaklıklarda tüm gruplarda azalma devam etmekte olup, tekli nano malzeme içeren karışımlarda kontrol numunelerine göre en fazla düşüş %3 HNK, %1 ve %3 NS için sırasıyla %18.0, %21.2 ve %23.4 oranlarda gösterirken, %2.5 NC+HNK ve %2.5 NC+NS içeren karışımlarda sırasıyla %33.4 ve %20.8 oranlarda düşüş görülmektedir (Çizelge 4.2).

750°C'den sonra tüm numunelerde ani düşüşleri artmaktadır. En fazla düşüş tekli nano malzeme içeren karışımlarda kontrol numunelerine göre %5 NC ve %3 HNK içeren gruplarda sırasıyla %37.8 ve %34.4 oranlarda, ikili nano malzeme içeren karışımlarda %34.1 ve %34.5 oranlarda, sırasıyla %0.5 NC+HNK ve %0.5 NC+NS gruplarında gözlenmiştir.

750°C sıcaklıklarda çimento hamuru ile agrega arasındaki termal uyumsuzluk sonucu sıcaklığın etkisi ile çatlaklar oluşmuş ve toplam boşluk miktarı artmıştır. Karışımlarda sıcaklık artmasıyla UPV hızı azalmakta olup, bu durum sıcaklığın etkisiyle harçlardaki boşluk oranının artması olarak değerlendirilebilir.

Çizelge 4.2. 250, 500 ve 750°C yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin UPV değerleri

Karışım Tipi	Yüksek Sıcaklık Öncesi	250 °C	500 °C	750 °C
K	5797	5576	4854	4065
HNK%1	6023	5752	5051	4132
HNK%3	6353	6047	5208	4167
HNK%5	6290	6024	5263	4202
NC%1	6106	5756	5319	3968
NC%3	6048	5898	5747	4098
NC%5	6286	5837	5814	3908
NC+HNK %0.5	5619	5319	4717	3704
NC+HNK %1.5	5891	5747	4951	3968
NC+HNK %2.5	6101	5682	4065	4132
NS %1	5565	5319	4386	3788
NS %3	5883	5556	4505	4098
NS %5	6135	5747	5263	4202
NC+NS %0.5	5695	5102	4587	3731
NC+NS %1.5	6090	5898	5435	4237
NC+NS %2.5	6248	5814	4951	4348

Sıcaklık artışıyla UPV hızı kayıplarında özellikle 500-750°C arasında en büyük ölçüde tekli nano malzeme içeren numunelerde görülmektedir. Nano malzeme kullanılması durumunda, çimento esaslı malzemelerin bünyesindeki gözenekleri ve boşlukları doldurarak, daha yoğun ve daha kompakt yapıya sahip olmasından dolayı, sıcaklık arttıkça numuneler daha fazla hasar görmektedir. Yüksek dayanımlı harç ve betonlar yüksek sıcaklık etkisinden daha fazla hasar görmekte olup, bu durum, yüksek dayanımlı harç ve betonların geçirimsizliğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

4.4.3. Su emme

Tekli ve ikili nano malzemelerle üretilen ve yüksek sıcaklıklarda maruz kalan harç numunelerin su emme değerlerinin değişimi incelenmiş, deney sonuçları Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. 250, 500 ve 750°C yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin su emme değerleri

Karışım tipi	Yüksek Sıcaklık Öncesi Su Emme Değerleri, (%)	Yüksek Sıcaklık Sonrası Su Emme Değerleri, (%)		
		250°C	500°C	750°C
K	7.6	8.9	11.7	13.1
HNK%1	7.4	8.6	11.5	12.8
HNK%3	6.8	8.2	11.4	12.6
HNK%5	7.3	7.6	11.2	12.0
NC%1	6.5	8.3	10.3	12.9
NC%3	6.4	7.6	10.5	12.6
NC%5	6.9	7.7	10.2	12.7
NC+HNK %0.5	7.4	8.5	11.3	12.8
NC+HNK %1.5	7.0	7.7	9.8	11.2
NC+HNK %2.5	6.7	7.1	10.4	12.5
NS %1	7.1	8.4	11.1	12.9
NS %3	6.8	7.2	10.9	12.3
NS %5	6.6	6.6	11.0	11.9
NC+NS %0.5	7.1	8.6	11.3	11.8
NC+NS %1.5	6.7	7.8	10.7	12.4
NC+NS %2.5	6.6	7.9	10.3	12.1

250 ve 500°C'de yüksek sıcaklıklara maruz kalan tekli nano malzeme içeren gruplarda en yüksek su emme oranı, %1 HNK içeren karışımda sırasıyla %8.6 ve %11.5 ve 750°C'de ise %1 NC içeren karışımda %12.9 oranında olduğu tespit edilmiştir. İkili karışımlarda en yüksek su emme oranı 250°C'de %0.5 NC+NS grubunda %8.6, 500°C'de %0.5 NC+HNK grubunda %11.3 ve 750°C'de %0.5 NC+HNK grubunda %12.8 oranında olduğu görülmüştür.

Genel olarak, nano malzeme kullanılması durumunda çimento esaslı malzemelerin dayanıklılığını artıran fonksiyonların en önemlisi çimento esaslı malzemelerin boşluk yapısını iyileştirmesi ve dolayısıyla geçirimsizliğini azaltmasıdır. Nano malzemeler yüksek yüzey alana sahip ve çok ince taneli olması nedeni ile, çimento hamuru-agrega arayüzü ve çimento içindeki boşlukları doldurarak, kılcal boşlukların azalmasını sağlamaktadır. Bu yüzden 250°C'ye kadar, nano malzeme içeren numunelerin iç yapısı

daha sağlam ve daha geçirimsiz olduğu ve farklı boşluklar bulunmadığı için su emmeleri kontrol numunelerine göre az çıkmaktadır. Fakat 500°C'den sonra nano malzeme içeren karışımların su emme miktarları kontrol numunelerine göre daha yüksek oranda arttığı görülmüştür.

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan tekli nano-CaO içeren numunelerin su emme miktarlarındaki artış tüm sıcaklıklarda diğer karışımlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



5. SONUÇLAR

1. Nano malzeme içeren harç numunelerin hidrasyon ısı sonuçlarına bakıldığında, tekli NC kullanılması durumunda kontrol numunesine göre ilk 4-24 saat arasında belirgin bir artış göstermiştir. 48 saat sonunda %1 ve %3 oranlarda kontrol numunelerine göre çok az düşüş göstermesine rağmen %5 oranında hidrasyon ısını artırmıştır. HNK kullanılan karışımların hidrasyon ısıları %1 ve %3 oranlarında kontrol numuneleri ile yaklaşık paralel sonuç gösterirken %5 oranında düşürmüştür. %1 oranında NS kullanılmasıyla hidrasyon ısını azaldığı, %5 oranında kontrol numune ile paralel sonuç gösterdiği ve %3 oranında ise hidrasyon ısını artırmıştır.
2. NC+HNK ve NC+NS birlikte kullanılması durumunda, ilk 24 saatte kullanılan nano malzeme oranına bağlı olarak katkı oranı arttıkça hidrasyon ısı belirgin olarak artmıştır. 48 saatlik süre boyunca hidrasyon ısını artışı devam etmiştir fakat karışımlar zamanla birbirine yakın değerler vermiştir. 48 sonunda bakıldığında %0.5 NC+NS içeren grubunda çok az düşüş gösterirken %1.5 NC+HNK içeren grubunda kontrol numunesi ile paralellik göstermiştir ve diğer gruplarda nano malzeme oranına bağlı olarak hidrasyon ısı artmıştır.
3. Tekli HNK, NC ve NS içeren karışımların, kullanım oranı ve kür süresine bağlı olarak tüm yaşlarda (7, 28, 60 gün), kontrol numunelerine göre (%1 oranında NS içeren grubu hariç), basınç dayanımları genel olarak artmıştır. %3 HNK ve %5 NC içeren numuneler tüm yaşlarda ve oranlarda basınç dayanımları sırasıyla 88.0 MPa ve 85.8 MPa'a çıkan en yüksek gruplardır. %1 oranında NS içeren numunelerin basınç dayanımları yalnızca 7 günlük numunelerde kontrol numunesine göre yüksek iken, diğer yaşlarda ve oranlarda kontrol numunesi ve diğer katkı karışımlardan düşük çıkmaktadır.
4. Basınç dayanımı sonuçları UPV için de geçerli olup, basınç dayanımını artıran nano malzemelerin türü ve miktarı UPV hızını da arttırdığı, ancak kontrol numunelere göre UPV hızlarının değişim oranının basınç dayanımındakinden biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

5. İkili kullanımlarda %0,5 oranında nano malzeme eklenmesi durumunda kontrol numunelerine göre tüm yaşlarda düşük dayanım göstermiştir. Fakat katkı miktarının artmasıyla dayanım artmıştır. NC+HNK olan gruplar NC+NS'li gruplardan daha yüksek dayanım göstermiştir. UPV sonuçları için de basınç dayanımına yaklaşık benzer sonuçlar elde edilmiştir.
6. 30 donma-çözülme çevrimi sonrası tüm grupların basınç dayanımlarında donma-çözülme öncesine göre az düşüş görülmektedir. Tekli nano malzeme içeren karışımlarda %3 HNK, %5 NC, %5 NS daha yüksek dayanım gösterdiği, ikili karışımlarda ise %2.5 NC+HNK ve %2.5 NC+NS gruplarında donma-çözülme öncesine göre D-Ç'ye karşı en iyi sonuç vermiştir. Ayrıca D-Ç deneyinden sonra yapılan UPV deneyi değerleri de basınç dayanımına benzer şekilde yaklaşık aynı sonuçlar vermiştir.
7. 250°C sıcaklıkta tüm karışımlar şekilsel herhangi bir tahribata uğramamış, fakat kontrol numunelerine göre basınç dayanımında ve UPV değerlerinde az miktarda düşüş meydana gelmiştir. 500°C'ye çıkınca numunelerin üzerinde beyazlaşmalar gözlemlenirken basınç dayanımında da yüksek düşüşler görülmüştür. Sıcaklık 750°C'yi bulduğunda, tüm harç numunelerin dayanımında büyük kayıplar görülmüş olup, numuneler üzerinde şekilsel tahribatlar özellikle çatlaklar ve kırıklar meydana geldiği net görülmektedir. En yüksek dayanım kayıpları tekli %1 ve %5 NC içeren grubunda %46.5 ve %46.1, ikili %2.5 NC+HNK içeren karışımında ise %41.8 olarak görülmektedir.
8. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin UPV değerleri, sıcaklık arttıkça basınç dayanımlarına genelde paralel şekilde azalmaktadır. Farklı sıcaklıklara maruz kalan numunelerin su emme oranları sıcaklık artışıyla artmıştır.
9. Tüm bu deneyler dikkate alındığında harç numunelerde halloysit nano-kil, nano-SiO₂ ve nano-CaO'in tekli ve ikili kullanımı ile, numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmiştir.

KAYNAKLAR

- Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M., 2016. Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 4 (1), 19-28.
- Anwar Hossain, K. M., 2006. Macro-and microstructural investigations on strength and durability of pumice concrete at high temperature. *Journal of materials in civil engineering*, 18 (4), 527-536.
- Al-Salami, A. E., Morsy, M. S., Taha, S., & Shoukry, H., 2013. Physico-mechanical characteristics of blended white cement pastes containing thermally activated ultrafine nano clays. *Construction and Building Materials*, 47, 138-145.
- Ali, M. M., & Mullick, A. K., 1998. Volume stabilisation of high MgO cement: Effect of curing conditions and fly ash addition. *Cement and Concrete Research*, 28 (11), 1585-1594.
- Arefi, M. R., Javeri, M. R., & Mollaahmadi, E., 2011. To study the effect of adding Al₂O₃ nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of cement mortar. *Life Science Journal*, 8 (4), 613-617.
- Andersen, M.M., Molin, M., 2007. NanoByg – a survey of nanoinnovation in Danish construction.
- Aleem, S. A. E., Heikal, M., & Morsi, W. M., 2014. Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica. *Construction and Building Materials*, 59, 151-160.
- Basheer, L., & Cleland, D. J., 2006. Freeze–thaw resistance of concretes treated with pore liners. *Construction and Building Materials*, 20 (10), 990-998.
- Balaguru, P., & Chong, K., 2006. Nanotechnology and concrete: Research opportunities. *Proceedings of ACI Sessions on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives*, 15-28.
- Barbhuiya, S., Mukherjee, S., & Nikraz, H., 2014. Effects of nano-Al₂O₃ on early-age microstructural properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, 52, 189-193.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010. Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık. Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, Kavacık, İstanbul.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Aydın, S., 2015. Beton. Döküz Eylül Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi Yayını, Çamdibi, İzmir.
- Bozkaya, Y., A. Ü. İleri Teknolojiler Araştırma Birimi Nanoteknoloji Bilim Dalı. <http://www.itab.anadolu.edu.tr/itab/pdf/nylp.pdf> 17 Aralık 2013.
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E., & Sebastiani, M., 2012. Effect of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 35, 666-675.
- Birgisson, B., Mukhopadhyay, A. K., Geary, G., Khan, M., & Sobolev, K., 2012. Nanotechnology in Concrete Materials: A Synopsis. *Transportation Research E-Circular*, E-C170.

- Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L., & Panas, I., 2004. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*, 392(1), 242-248.
- Carlos, C., 2008. Microscopic observations of internal frost damage and salt scaling. PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- Chan, C., 2006. Effect of deicing chemicals on the strength and deterioration of concrete. Master's Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Çolak, A., 2003. Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, 33(4), 585-593.
- Demirboğa, R., & Gül, R., 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 33 (5), 723-727.
- Du, H., Du, S., & Liu, X., 2014. Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 73, 705-712.
- Elvin, G., 2005. Nanotechnology and Design. 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction, RILEM Proceedings pro045: Nanotechnology in Construction, Spain.
- Erdoğan, Y.T., 2010. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını, Ankara.
- Farzadnia, N., Abdullah, A. Ali, A., Demirboga, R., & Anwar, M. P., 2013. Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars. *Cement and concrete research*, 48, 97-104.
- Fan, Y., Zhang, S., Kawashima, S., & Shah, S. P., 2014. Influence of kaolinite clay on the chloride diffusion property of cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, 45, 117-124.
- Fan, Y., Zhang, S., Wang, Q., & Shah, S. P., 2015. Effects of nano-kaolinite clay on the freeze–thaw resistance of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 62, 1-12.
- Fan, Y., Zhang, S., Wang, Q., & Shah, S. P., 2016. The effects of nano-calcined kaolinite clay on cement mortar exposed to acid deposits. *Construction and Building Materials*, 102, 486-495.
- Janković, K., Stanković, S., Bojović, D., Stojanović, M., & Antić, L., 2016. The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 147-156.
- Jayapalan, A., Lee, B., Fredrich, S. ve Kurtis, K., 2010. Influence of additions of anatase TiO₂ nanoparticles on early-age properties of cement-based materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2141, 41-46.
- Hakamy, A., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M., 2015. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 78, 174-184.
- Heidari, A., & Tavakoli, D. (2013). A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles. *Construction and Building Materials*, 38, 255-264.
- Heikal, M., El-Didamony, H., Sökkary, T. M., & Ahmed, I. A., 2013. Behavior of composite cement pastes containing microsilica and fly ash at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 38, 1180-1190.

- Heikal, M., Ali, A. I., Ismail, M. N., & Ibrahim, S. A. N., 2014. Behavior of composite cement pastes containing silica nano-particles at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 70, 339-350.
- Heikal, M., & Ibrahim, N. S., 2016. Hydration, microstructure and phase composition of composite cements containing nano-clay. *Construction and Building Materials*, 112, 19-27.
- Hui, L., Hui-Gang, X., Jie, Y. ve Jinping, O., 2004. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35 (2), 185–189.
- Hosseini, P., Booshehrian, A. ve Farshchi, S., 2010. Influence of nano-SiO₂ addition on microstructure and mechanical properties of cement mortars for ferrocement. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2141, 15-20.
- Ibrahim, E. E., Chipara, D. M., Thapa, R., Lozano, K., & Chipara, M., 2012. Raman spectroscopy of isotactic polypropylene-halloysite nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 12.
- Itim, A., Ezziane, K. and Kadri, El-H., 2011. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. *Construction and Building Materials*, 25, 3603–3609.
- Gaitero, J., Campillo, I., Mondal, P. ve Shah, S., 2010. Small changes can make a great difference. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2141, 1-5.
- Gay, C., & Sanchez, F., 2010. Performance of carbon nanofiber-cement composites with a high-range water reducer. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2142), 109-113.
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M., 2010. Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*, 41(8), 673-677.
- Givi, A. N., Rashid, S. A., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M., 2011. The effects of lime solution on the properties of SiO₂ nanoparticles binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*, 42 (3), 562-569.
- Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., & Shah, S. P., 2013. Modification of cement-based materials with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, 36, 8-15.
- Kamble, R., Ghag, M., Gaikwad, S., & Panda, B. K., 2012. Halloysite nanotubes and Applications: A Review. *Journal of Advanced Scientific Research*, 3(2).
- Kewalramani, M.A. and Gupta R., 2005. Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks. Civil Engineering Group, Birla Institute of Technology and Science, Pilani, Rajasthan-333 031, India
- Kızıllkanat A.B., (2004). Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Land, G., & Stephan, D., 2015. Controlling cement hydration with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, 57, 64-67.
- Land, G., & Stephan, D., 2012. The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement. *Journal of Materials Science*, 47(2), 1011-1017.

- Leydecker, S., *Nano Materials in Architecture: Interior Architecture and Design*, 189 syf., Birkhauser Verlag AG, Almany, 2008.
- Liu, X., Chen, L., Liu, A., & Wang, X., 2012. Effect of nano-CaCO₃ on properties of cement paste. *Energy Procedia*, 16, 991-996.
- Li, G. Y., Wang, P. M., & Zhao, X., 2005. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 43(6), 1239-1245.
- Li, G., 2004. Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1043–1049.
- Lura, P., Bentz, D.P., Lange, D.A., Kovler, K., Bentur, A. and Breugel, K., 2003. Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates.
- Makar, J. M., Margeson, J.ve Luh, J., 2005. Carbon nanotube/cement composites – early results and potential applications. *Proceedings of 3rd International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications*, Vancouver, 1-10
- Madandoust, R., Mohseni, E., Mousavi, S. Y., & Namnevis, M., 2015. An experimental investigation on the durability of self-compacting mortar containing nano-SiO₂, nano-Fe₂O₃ and nano-CuO. *Construction and Building Materials*, 86, 44-50.
- Metaxa, Z., Konsta-Gdoutos, M., & Shah, S., 2010. Carbon nanofiber-reinforced cement-based materials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2142), 114-118.
- Morsy, M. S., Alsayed, S. H., & Aqel, M., 2011. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 25(1), 145-149.
- Mohseni, E., Miyandehi, B. M., Yang, J., & Yazdi, M. A., 2015. Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-TiO₂ on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 84, 331-340.
- Mukharjee, B. B., & Barai, S. V., 2014. Influence of nano-silica on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 55, 29-37.
- Mohammed, S., 2017. Processing, effect and reactivity assessment of artificial pozzolans obtained from clays and clay wastes: A review. *Construction and Building Materials*, 140, 10-19.
- Morsy, M. S., Alsayed, S. H., & Aqel, M., 2010. Effect of elevated temperature on mechanical properties and microstructure of silica flour concrete. *International journal of civil & environmental engineering*, 10 (1), 1-6.
- Nazari, A., & Riahi, S., 2011. Al₂O₃ nanoparticles in concrete and different curing media. *Energy and Buildings*, 43(6), 1480-1488.
- Nadeem, A., Memon, S. A., & Lo, T. Y., 2013. Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin mortar at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 38, 338-347.
- Oltulu, M., & Şahin, R., 2013. Effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: a comparative study. *Energy and Buildings*, 58, 292-301.

- Patel, K., 2012. The use of nanoclay as a constructional material. *Int. J. Eng. Res. Appl.(IJERA)*, 2(4), 1382-1386.
- Polat R., 2013. Genleştirilmiş perlit agregası, nano ve mikro boyutta CaO ve MgO ve kil'in yüksek mukavemetli betonların otojen rötreleri üzerindeki etkisi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Atatürk Üniversitesi, Erzurum
- Polat, R., Demirboğa, R., & Khushefati, W. H., 2015. Effects of nano and micro size of CaO and MgO, nano-clay and expanded perlite aggregate on the autogenous shrinkage of mortar. *Construction and Building Materials*, 81, 268-275.
- Pourjavadi, A., Fakoorpoor, S. M., Khaloo, A., & Hosseini, P., 2012. Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles. *Materials & Design*, 42, 94-101.
- Pekmezci, B.Y., 2006. Yüksek Performanslı Çimentolu Ürünlerin Otojen Rötre Özellikleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Poon, C. S., Azhar, S., Anson, M., & Wong, Y. L., 2003. Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 83-89.
- Phoo-ngernkham, T., Chindaprasirt, P., Sata, V., Hanjitsuwan, S., & Hatanaka, S., 2014. The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Materials & Design*, 55, 58-65.
- Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., & Rongshen, C., 2007. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and building materials*, 21(3), 539-545.
- Raki, L., Beaudoin, J., Alizadeh, R., Makar, J., & Sato, T., 2010. Cement and concrete nanoscience and nanotechnology. *Materials*, 3(2), 918-942.
- Rong, Z., Sun, W., Xiao, H., & Jiang, G., 2015. Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 56, 25-31.
- Said, A. M., Zeidan, M. S., Bassuoni, M. T., & Tian, Y., 2012. Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*, 36, 838-844.
- Sadrmomtazi, A., Fasihi, A., Balalaei, F., & Haghi, A. K., 2009. Investigation of mechanical and physical properties of mortars containing silica fume and nano-SiO₂. In *Proceedings of the Third International Conference on Concrete and Development*, Tehran, Iran (pp. 27-29).
- Sanchez, F., & Sobolev, K., 2010. Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060-2071.
- Supit, S. W. M., & Shaikh, F. U. A., 2015. Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. *Materials and structures*, 48(8), 2431-2445.
- Sarshar, R., & Khoury, G. A., 1993. Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures. *Magazine of concrete research*, 45(162), 51-61
- Schwartzentruber, A., Philippe, M. and Marchese, G., 2004. Effect of PVA, glass and metallic fibers and of an expansive admixture on the cracking tendency of ultrahigh strength mortar. *Cement & Concrete Composites*, 26, 573–580

- Sato, T. ve Diallo, F., 2010. Seeding effect of nano-CaCO₃ on the hydration of tricalcium silicate. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2141, 61-67.
- Seventekin, N., Özdoğan, E. ve Demir, A., Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 3, 2006, 159-163.
- Stefanidou, M., & Papayianni, I., 2012. Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. *Composites Part B: Engineering*, 43(6), 2706-2710.
- Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D., & Repette, W. L., 2009. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2487-2491.
- Senff, L., Hotza, D., Lucas, S., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A., 2012. Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars. *Materials Science and Engineering: A*, 532, 354-361.
- Singh, L. P., Bhattacharyya, S. K., & Ahalawat, S., 2012. Comparative Mineralogical and Morphological Aspects of CSH Using Silica Nanoparticles. In 4th International Symposium on Nanotechnology in Construction.
- Shaikh, F. U. A., Supit, S. W. M., & Sarker, P. K., 2014. A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes. *Materials & Design*, 60, 433-442.
- Şahin, R., Demirboğa, R., Uysal, H., & Gül, R., 2003. The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete. *Cement and concrete research*, 33(8), 1245-1249.
- Tavakoli, D., & Heidari, A., 2013. Properties of concrete incorporating silica fume and nano-SiO₂. *Indian Journal of Science and Technology*, 6(1), 3946-3950.
- Teizer, J., Venugopal, M., Teizer, W., & Felkl, J., 2011. Nanotechnology and its impact on construction: bridging the gap between researchers and industry professionals. *Journal of Construction Engineering and management*, 138(5), 594-604.
- TS EN 196-9. Temmuz 2011, Çimento deney yöntemleri- Bölüm 9: Hidratasyon ısı yarı adabatik yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, Bakanlıklar, Ankara.
- TS EN 12390-1. 2013. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri.
- TS EN 12390-2. 2010. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2 : Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması.
- TS 706 EN 12620+A1, 2009. Beton agregaları, TSE, Ankara.
- TS EN 197-1. 2012, Çimento-Bölüm 1 : Genel Çimentolar- Bileşim Özellikler ve Uygunluk Kriterleri.
- TS EN 1008. 2003, Beton- Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları.
- Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K., 2014. Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983-991.

- Wei, J., & Meyer, C., 2014. Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay. *Journal of Materials Science*, 49(21), 7604-7619.
- Yalçın, H. ve Gürü, M., 2006. Çimento ve beton. Palme Yayıncılık, Ankara.
- Zhang, M. H., & Islam, J., 2012. Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag. *Construction and Building Materials*, 29, 573-580.
- Zahedi, M., Ramezani pour, A. A., & Ramezani pour, A. M., 2015. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*, 78, 354-361.
- Zhu, W., Bartos, P. J., & Porro, A., 2004. Application of nanotechnology in construction. *Materials and Structures*, 37(9), 649-658.



ÖZGEÇMİŞ

Abdul wakil QARLUQ 2005’de Abu Osman Taluqani Lisesini bitirdi. 2010 yılında Jowzjan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji ve Maden Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2014 yılında Türkiye Bursları Programı kapsamında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı.

