ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO SİLİKANIN ÇİMENTONUN KISMİ İKAMESİ OLARAK BETONUN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Shireen Kareem Raheem BADAWANI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇANKIRI
2023

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Shireen Kareem Raheem BADAWANI tarafından hazırlanan **"Nano Silikanın Çimentonun Kısmi İkamesi Olarak Betonun Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi"** adlı tez çalışması 18/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **:** Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLİ BİNGÖL

Jüri Üyeleri **:**

Başkan **:** Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLİ BİNGÖL
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Üye **:** Doç. Dr. Cihan DOĞRUÖZ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Çankırı Karatekin Üniversitesi

Üye **:** Dr. Öğr. Üyesi Vesile Hatun AKANSEL
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ

Enstitü Müdürü

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum "**Nano Silikanın Çimentonun Kısmi İkamesi Olarak Betonun Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi**" konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan "Bilimsel İntihal Tespit Programı"yla tarandığını, "intihal içermediğini" beyan ederim. Çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (18/01/2023).

Shireen Kareem Raheem BADAWANI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO SİLİKANIN ÇİMENTONUN KISMİ İKAMESİ OLARAK BETONUN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Shireen Kareem Raheem BADAWANI

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLİ BİNGÖL

Beton, günümüzde farklı alanlarda, binalarda taşıyıcı ve dekoratif amaçlı kullanılan çok önemli bir yapı malzemesidir. Malzeme teknolojisindeki gelişmeler, binaların yapımında şekil, boyut ve tamamlanma hızı açısından uygun malzemelerin seçilmesine yansıyan geniş bir kullanım alanı sağlamaktadır. Beton, dünyada sudan sonra en çok kullanılan malzemedir. Faydaları ne kadar çok ise gezegenimize ve insan sağlığına zararları da o nispette büyüktür. Bu nedenle betona eklenen katkı maddeleri sayesinde binaların ve diğer yapıların ihtiyaç duyduğu amaçlara, gereksinimlere uygun yeni özellikler kazanmakta, çevreye ve doğaya daha az CO_2 salınımı yapmaktadır. Taze betona veya sertleşmiş betona belirli özellikler kazandırmak için çok küçük miktarlarda maddeler eklenmektedir. Bu çalışmada betona nano silikayı eklenerek betonun kazandığı özellikler ve betona etkisi incelenmiştir. Çalışmada, betonda çimentonun kısmi ikamesi (%0,5, %1,5 ve %2,5) üç farklı oranda nano silika kullanılmış ve ortaya çıkardığı etki hakkında araştırmalar yapılmıştır. Farklı oranlardaki nano silika içeren beton üzerinde çökme, hava boşluğu, Schmidt hammer çekici, basınç dayanımı, yarma dayanımı, eğilme dayanımı ve su emme ile ilgili deneyler uygulanmıştır. Bütün deneylerin sonuçlarına göre farklı oranlarda kullanılan nano silika karışımları betonun özelliğini açıkça etkilemiştir ve betonu en çok etkileyen oran ise %2,5 ortalama ile numune yaşının 28 günlük olduğu durumdur.

2023, 72 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Beton, Nanoteknoloji, Nano silika, Betonun mekanik özellikleri

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NANO SILICA AS PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT ON PROPERTIES OF CONCRETE

Shireen Kareem Raheem BADAWANI

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Başak VARLİ BİNGÖL

Concrete is a very important building material used for buildings, carrier and decorative purposes in different areas today. Contemporary development in material technology provides a wide range of uses in the construction of buildings, which is reflected in the provision of suitable materials in terms of shape, size and speed of completion. Concrete is the most used material in the world after water. The greater the benefits, the greater the harm to our planet and human health. For this reason, adding additives to concrete brings less CO_2 emissions to the environment and nature with new features suitable for the purposes and requirements of buildings and other structures. It is added in very small amounts to impart certain properties to fresh concrete or hardened concrete. In this study, the properties and effects of concrete were investigated by adding nano silica to concrete. As the aim of the study, partial substitution of cement in concrete (%0.5, %1.5 and %2.5) nano silica was used in three ratios and researches were made about its properties. Experiments were carried out on the properties of nano silica concrete of different ratios on slump, air void, Schmidt hammer hammer, compressive strength, splitting strength, flexural strength and water absorption. According to the results of all the experiments, the nano silica mixtures used were clearly affected by different ratios and the properties of the concrete, and it was determined that the age of the samples was 28 days, with an average of 2.5%, which affected the concrete the most.

2023, 72 pages

Keywords: Concrete, Nanotechnology, Nano silica, Mechanical properties of concrete

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Başak VARLİ BİNGÖL'e çalışma sürecinde bana gösterdiği yardım, destek, rehberlik ve anlayış için teşekkür ederim.

Tez çalışmasının deneysel kısmında kullanılan nano silikanın temin edilmesinde yardımcı olan ve zor şartlar altında yaptığımız çalışmalarda hiçbir zaman çalışmaktan geri durmayıp, sonsuz emek sarf eden SEKO, OLAB laboratuvarlarına ve çalışmaya verdikleri destekleri için eski Kerkük Yapı Laboratuvarı Müdürü OTHMAN SAEED'e sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Son olarak tez sürecimde bana sabır gösteren ve desteğini daima hissettiğim, uzun ve yorucu çalışmalarım boyunca her yanımda olan, maddi manevi hiçbir desteğini esirgemeyen ve tüm zorlukları benimle göğüsleyen sevgilim, arkadaşım, yoldaşım kocama ve beni bugünlere getiren sevgili anneme, saygıdeğer babama ve kardeşlerime candan ve yürekten teşekkür ederim.

Shireen Kareem Raheem BADAWANI

Çankırı, Ocak 2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **iv**
SİMGELER DİZİNİ ..... **vii**
KISALTMALAR DİZİNİ ..... **viii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ixx**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **x**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Çalışmanın Amacı **2**
1.2 Çalışmanın Alanı **3**
2. LİTERATÜR ÖZETİ **4**
3. İNŞAAT SEKTÖRÜNDE NANOTEKNOLOJİ **9**
3.1 Nanoteknolojinin Sözlük Anlamı ve Tanımı **9**
3.2 Nanoteknoloji Tarihi **11**
3.3 Nanoteknolojinin Yararları **11**
3.4 Nanoteknolojinin Kullanım Alanları **12**
3.5 Nanoteknolojinin İnşaat Sektöründe Kullanım Alanları **14**
3.5.1 Yalıtım malzemeleri **14**
3.5.2 Boyalar ve kaplamalar **15**
3.5.3 Çimento ve nanoteknoloji **16**
3.5.4 Beton ve nanoteknoloji **20**
3.5.5 Betonun mekanik özellikleri **24**
3.6 Beton Dayanımları **25**
3.6.1 Normal dayanımlı beton **26**
3.6.2 Yüksek dayanımlı beton **26**
3.6.3 Ultra yüksek dayanımlı beton **27**
3.7 Nano silika **28**
3.7.1 Nano silikanın tanımı **28**
3.7.2 Nano silikanın özellikleri **29**
3.7.3 Nano silikanın, betonun özeliklerine etkileri **29**

4. MATERYAL VE YÖNTEM 31
4.1 Kullanılan Malzemeler 31
4.1.1 Kaba agrega 31
4.1.2 İnce agrega 32
4.1.3 Çimento 33
4.1.4 Kimyasal katkı (süper akışkanlaştırıcı) 34
4.1.5 Nano silika SiO_2 35
4.2 Kalıp Hazırlama 36
4.2.1 Basınç dayanımı deney kalıpları 36
4.2.2 Yarma dayanımı deney kalıpları 36
4.2.3 Eğilme dayanımı deney kalıpları 37
4.3 Beton Karıştırma ve Hazırlama 37
4.3.1 Karışım oranı 37
4.3.2 Çimento ile ikame maddeleri karıştırma 37
4.3.3 Taze betonun dökümü ve sıkıştırılması 39
4.3.4 Kürleme 40
4.4 Beton Üzerine Yapılan Deneyler 41
4.4.1 İşlenebilirlik deneyi (Akış çökme-slump deneyi) 41
4.4.2 Betonda hava boşluğunun ölçümü 43
4.4.3 Mekanik deneyler 44
4.4.4 Betonun durabilitesi (Dayanıklılık) 50
5. BULGULAR 53
5.1 Betonun Çökme (Slump) Değerleri 53
5.2 Taze Betonda Hava Boşluğu Değerleri 54
5.3 Basınç Dayanımı Deneyi Değeri 55
5.4 Betonun Yarma Dayanımı Deneyi Değeri 56
5.5 Betonun Eğilme Dayanımı Deneyi Değeri 57
5.6 Schmidt Çekici Değeri (Schmidt Hammer) 58
5.7 Su Emme Değeri 60
6. TARTIŞMA VE SONUÇ 62
KAYNAKLAR 64
ÖZGEÇMİŞ 72

SİMGELER DİZİNİ

A	Doymuş yüzey kuru durumunun numune ağırlığı
A_c	Numunenin üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı
B	Kuru numune ağırlığı
B	Numunenin ortalama genişliği ve kırılma noktası
D	Numunenin çapı
d	Numunenin ortalama derinliği, kırılma noktasında
F_c	Basınç dayanağı
Le	Eğilme deneyinde dayak silindirler arasındaki açıklık
Ly	Yarma deneyinin numune boyu
P	Büyük hacimli yük
R	Eğilme dayanımı
SE	Su emme

KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Amerikan birleşk devletleri
ACI	American concrete institute
Al_2O_3	Alüminyum oksit
ASTM	American society for testing and materials
BS	British standards
CaO	Kalsiyum oksit
$CaSO_4$	Kalsiyum sülfat
C-S-H	Kalsiyum-silikat-hidrat
Fe_2O	Demir oksit
HSK	Hava sürükleyici katkılar
IQS	Iraqi standard specifications
KYB	Kendiliğinden yerleşen betonların
MgO	Magnezyum oksit
NS 1	%0,5 Kullanılan nano silika
NS 2	%1,5 Kullanılan nano silika
NS 3	%2,5 Kullanılan nano silika
OPC	Ordinary portland cement
RBK	Referans beton karışmı
SiO_2	Silikon dioksit
SO_3	Kükürt trioksit
TEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	Xray ringtön
YDB	Yüksek dayanımlı beton
YPB	Yüksek perfomanslı beton

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Nanoteknolojinin yaklaşımları (Bjorn *et al.* 2012) 10
Şekil 3.2 Nano ölçeği açıklayan örnekler (Cireli *et al.* 2006) 10
Şekil 3.3 Nano ölçeğin büyüklüğü ile ilgili örneklerin açıklanması (Cireli *et al*. 2006) 11
Şekil 3.4 Özgül yüzey alanı beton bileşimlerinin tane boyutu ile ilişkisi (Sobolev ve Gutierrez 2005) 24
Şekil 4.1 Kullanılan kaba agrega 31
Şekil 4.2 Kullanılan ince agrega 32
Şekil 4.3 Kullanılan MAS Çimentosu 33
Şekil 4.4 Kullanılan nano silika SiO_2 35
Şekil 4.5 Kalıpların temizlenmesi ve yağ ile yağlanması 36
Şekil 4.6 Karışımların elektrikli karıştırıcı ile karıştırılması 38
Şekil 4.7 Kullanılan dikey tamburlu mikser 39
Şekil 4.8 Mekanik vibratör 39
Şekil 4.9 Kürleme havuzu 40
Şekil 4.10 Çökme hunisi (Gambhir 2004) 41
Şekil 4.11 Taze betonun çökme şekilleri (Gambhir 2004) 42
Şekil 4.12 HSK moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları (Şahin 2013) 43
Şekil 4.13 Hava boşluğu ölçer cihazı 44
Şekil 4.14 Basınç dayanımı deney cihazı 46
Şekil 4.15 Yarma dayanımı deneyi cihazı 47
Şekil 4.16 Eğilme deneyi cihazı 49
Şekil 4.17 Schmidt çekici aleti 50
Şekil 4.18 Dijital tartı (Dijital ölçek) 52
Şekil 4.19 Elektrikli fırın işlemi 52
Şekil 5.1 Çökme - slump deneyi uygulamaları ve ölçülmesi 53
Şekil 5.2 Beton karışımlarının çökme - slump deneyi değerleri 54
Şekil 5.3 Beton karışımlarının hava boşluğu değerleri 55
Şekil 5.4 Basınç dayanımı deneyi değeri 56
Şekil 5.5 Yarma dayanımı deneyi değeri 57
Şekil 5.6 Eğilme dayanımı deneyi değeri 58
Şekil 5.7 Schmidt çekici uygulaması 59
Şekil 5.8 Scmidet çekici için geri tepme indeksi-küp basınç dayanımı eğrileri 59
Şekil 5.9 Basınç dayanımı ve çekici geri tepme R değerleri 60
Şekil 5.10 Su emme değeri 61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 İdeal klinker yüzde bileşimleri ve oksitlerin birbirine oranı (Kapkaç 2007) 17
Çizelge 3.2 Betonlarda normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı bazı özelliklerin karşılaştırılması (Büyüköztürk ve Lau. 2002) 28
Çizelge 4.1 Kaba agrega için elek analizi ve sülfat içeriği 32
Çizelge 4.2 İnce agrega için elek analizi ve sülfat içeriği 33
Çizelge 4.3 MAS çimentosunun kimyasal analizi 34
Çizelge 4.4 MAS Çimentonun fiziksel özellikleri 34
Çizelge 4.5 Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri (HMP 800) 35
Çizelge 4.6 Nano silikanın (SiO_2) özellikleri 35
Çizelge 4.7 Numunelerin adlandıran kısaltması 40
Çizelge 4.8 Hava boşluğu ölçer cihazın teknik özellikleri 44
Çizelge 4.9 R geri tepme katsayısı ve beton kalitesi (Gupta *et al.* 2015) 50
Çizelge 5.1 Çökme - Slump deneyi değerleri 53
Çizelge 5.2 Beton karışımlarda hava boşluğu değerleri 54
Çizelge 5.3 Beton karışımlarda basınç dayanımı değeri 56
Çizelge 5.4 Beton karışımlarda yarma dayanımı değeri 57
Çizelge 5.5 Beton karışımlarda eğilme dayanımı değeri 58
Çizelge 5.6 Çekici geri tepmesinin ortalaması R değerleri 60
Çizelge 5.7 Beton karışımlarda su emme değeri 61

1. GİRİŞ

Günümüzde nanoteknolojinin, inşaat mühendisliğinin bir parçası hâline gelmesi ile birlikte inşaat işlerinde kolaylıklar sağlanmaya başlanmıştır. Nanoteknoloji araştırmaları; fizik, kimya, mühendislik, biyoloji ve bilgisayar gibi temel bilimlerde önde gelen araştırmalardandır. Diğer birkaç alan da nanoteknolojinin gelişimine daha pratik çözümler katmaktadır. Başka bir deyişle sosyoloji ve insani bilimlerde bile genellikle politika yönetimi alanlarında bu konuyla ilgili bir dizi tavsiye ve araştırma çağrıları görülmektedir.

Nanoteknolojinin, inşaat mühendisliği ve diğer inşaat alanlarıyla birleştirilmesi son derece faydalıdır. Nanoteknoloji; betonun ömrünü uzatmak, çelik gibi yangına dayanıklı malzemeler oluşturmak, yapı malzemelerine "kendi kendini onarma" ve "kendi kendini temizleme" gibi nitelikler kazandırmak için kullanılabilmektedir.

Bildiğiniz gibi sudan sonra insanlar için en önemli malzemelerden biri betondur. Günümüzde dünya çapında yaklaşık 10 milyar metreküpe yakın hazır beton parçaları üretilmektedir. Dünya nüfusunun artık 8 milyar insana yaklaştığı düşünüldüğünde kişi başına yaklaşık 1,25 metreküp hazır beton düşmektedir.

İnşaat sektörünün en temel ürünü olan, evlerimizin ve iş yerlerimizin yapımında kullanılan betonların yapısı değişiklik göstermektedir. Binaların yapımında kullanılan betonların çevre dostu malzemelerle elde edilmesi dünyada birinci önceliklerdendir. Çünkü beton üretimi sırasında küresel ölçekte CO_2 emisyonu %7–8 arasında ve miktarı da 500 milyon ton civarındadır. Karbondioksit oranının düşürülebilmesi ve çimentonun daha az kullanılması için farklı katkı maddelerinin eklenmesi tercih edilmektedir.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde hızlı kentleşme, artan nüfus, güçlü ekonomik kalkınma ve inşaat faaliyetlerindeki büyümenin betona talebi artırması beklenmektedir. Bu nedenle nanoteknoloji alanındaki araştırmaların ilerlemesi hayati önem taşımakta,

özellikle de inşaat mühendisliğinde beton kullanım oranının değiştirilmesi gerekmektedir.

İnşaat mühendisliği alanında teknolojik gelişmelerin sağladığı en önemli alternatiflerden biri olan nano sayesinde sade beton gibi geleneksel malzemelerin kullanılması mümkün değildir. Bu tip eski betonların daha iyi bir hâle gelmesi betona nano malzemelerin eklenmesine bağlı olup normal betona göre daha üstün özellikler kazandırmaktadır.

Betona eklenen nano maddeler farklı amaçlarla kullanılmaktadır. İnşaat maliyetini azaltması, betonun belirli özelliklerinin daha etkin bir şekilde elde edilmesi, olumsuz hava koşullarında karıştırma, taşıma, dökme ve kürleme sırasında betonun kalitesini koruması amaçlanmaktadır.

Betonun performansını artırmak için beton yapımında sadece nano maddeler eklenmemekte, bunun yanında çeşitli kimyasal katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Beton katkı maddeleri, karışımın ana bileşeni olmadığı için günümüzde betonda kullanılmaları yüksek bir artış göstermekte ve önemi giderek artmaktadır.

1.1 Çalışmanın Amacı

Çalışmanın amacı, betonda kullanılan katkı maddeleri, nano malzemeler ve özellikle de nano silikanın; betonun mekanik özelliklerine ve durabilitesine etkilerinin detaylı bir şekilde gösterilmesidir. Çalışmada, betona nano silika maddesi eklenerek elde beton numunelerinin üzerinde Irak laboratuvarlarında deneyler uygulanmıştır. Numuneler, dünyada kullanılan ASTM ve BS standartlara göre oluşturulmuştur. Yapılan deneylerde ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çimento ikamesi olarak nano silikanın betona üç farklı oranda eklenmesi ile elde edilen numuneler ile nano silika eklenmemiş numuneler kıyaslanarak aradaki farklılıklar incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre çimentonun ikamesi nano silikayı kullanırken çökme değerini, hava boşluğunu ve su emme değerini azalttığı görülmüş; bu

nedenle yüksek dayanımlı (basınç dayanımı, yarma dayanımı, eğilme dayanımı) ve yüksek dayanıklılığa sahip beton elde edilmiştir. Çalışmada farklı nano silika oranları kullanılarak en iyisini belirlemek amaçlanmıştır.

Ayrıca çalışmada betonun performansını iyileştirme, artan direnci kontrol etme, kurumayı azaltma, ayırma vb. gibi betonun bir veya daha fazla özelliğinin düzeltildiği ve iyileştirildiği görülmüştür.

Ek olarak, olumsuz hava koşullarında çimento karıştırma, taşıma, dökme ve arıtma aşamalarında beton kalitesinin korunması, beton yapı maliyetinin düşürülmesi ve çevre dostu beton kullanarak çevrenin korunması araştırılmıştır.

1.2 Çalışmanın Alanı

Bu tez çalışmasına ait olan deneyleri Irak'ta bulunan OLAB Laboratuvarı'nda (Kerkük), SEKO Laboratuvarı'nda (Süleymaniye) ve Kerkük Yapı Laboratuvarı'nda (Kerkük) yapılmıştır. Beton karışımların malzemelerinde, agregaları Kerkük'te bulunan Kara Salım bölgesinin, çimentoyu ise Süleymaniye'de bulunan MAS Çimento Fabrikası'nın ürettiği normal portlan çimentosu kullanılmıştır.

Referans numuneleri ve farklı oranla nano silika numunelerinin sayısı toplam 132 adet olup numuneler, deneylere göre farklı şekillerde oluşturulmuştur. Numuneler, (7, 28, 56) olmak üzere üç farklı gruba günlük ve yaş olarak uygulanmıştır.

Basınç dayanımı, çökme (slump), hava boşluğu, su emme ve schmidt çekici deneyleri OLAB Laboratuvarı'nda uygulanmıştır. Eğilme ve yarma dayanımı deneyleri ise SEKO Laboratuvarı'nda çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan tüm malzemeler ise Kerkük Yapı Laboratuvarı'nda oluşturulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu konu üzerine yapılan çalışmalar, ulusal ve uluslararası literatür ve tezler araştırılmıştır. Konuyla ilgili daha önce yapılan çalışmalardan kısa ve öz olarak aşağıda bahsedilmiştir.

Osman (2013)‹ Yüksek Dayanımlı Kendiliğinden Yerleşen Betonun Basınç Dayanımı Üzerine Su-Çimento Oranı, Silis Dumanı ve Birkaç Katkı Kimyasal Çeşidi ve Miktarının Etkileri adlı bir çalışma mevcuttur. Çalışmada yüksek dayanımlı (KYB) üretiminde maksimum taneleri 16 mm boyutlu agrega olarak kullanılmıştır. Karışımlarda slamp yayılması dikkate alınarak %36,5 ve %40 su/çimento oranları için (Glenium C300) adlı süper akışkanlaştırıcı miktarı %1,37'den %2,69'a kadar değiştirilmiştir. Betonun numuneleri üzerinde basınç deneyleri 14 ve 28 günlükken uygulanmıştır. Deneylerin sonuçlarına göre silis dumanının kimyasal katkı maddeleri ile birlikte kullanıldığı durumlarda yüksek dayanımlı (KYB) olumlu etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Pekmezci ve Atahan (2014), yaptıkları çalışmada betonda kullanılan kimyasal ve nano katkı maddelerinin betonun performansına etkilerini incelemişlerdir. Hazırlanan bu çalışmada günümüzde beton uygulamalarında kullanılan nano ve kimyasal katkı maddeleri kullanım amaçlarına göre sınıflandırılmıştır. Kimyasal katkı maddelerinin beton özellikleri üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Ayrıca betonda kullanılan nanoteknoloji ve nano katkıların beton performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Özellikle nano katkıların hidratasyon kinetiği üzerindeki etkilerinin araştırılmaya devam ettiği belirlenmiştir. Buna bağlı araştırmalar nano silikanın üzerinde yoğunlaşmıştır. Betonun mekanik ve reolojik özellikleri nano silikanın hidratasyon mekanizması üzerindeki etkileri ile daha açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. Nano silika, özellikle birinci günde hidratasyon mikanizması üzerine etkilerini göstermiştir. Beton mekanik özelliklerini ve harç açısından genellikle olumlu yönde etkilediği bulunmuştur.

Torabian Isfahani ve arkadaşları (2016), nano silikanın basınç dayanımı ve dayanıklılık üzerindeki etkileri farklı su ve bağlayıcı oranlarına sahip beton üzerinde araştırılmıştır. Çalışmada farklı nano silika oranı (çimentoya göre %0,5, %1 ve %1,5) ekleneyerek basınç dayanımına etkileri ve su / bağlayıcı 0,65, 0,55 ve 0,5 oranları olarak betonun

dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki su/bağlayıcı = 0,65 durumunda basınç dayanımı önemli ölçüde iyileşirken, su/bağlayıcı = 0,5 için herhangi bir değişiklik bulunmamıştır. Artan nano silika içeriği, su emiciliği sadece su/bağlayıcı = 0,55 için azaltmıştır. Nano silika %0,5 ilavesi ile su/bağlayıcı için görünen klorür difüzyon katsayısı = 0,65 ve 0,55 göstermiştir. Direnç tüm su/bağlayıcı oranları için %0,5 nano silika ve sadece su/bağlayıcı = 0,5 için %1,5 nano silika yükseltilmiştir

Jalil ve Kahachi (2018), nano betonun çağdaş mimari üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada çeşitli nano maddeler (nano SiO_2, nano TiO_2 ve nano karbon tüplerin) betona eklenerek kullanılımıştır. Araştımaya göre nano betonun, sadece gelişmiş bir yapı malzemesi olarak değil; aynı zamanda enerji ve çaba tasarrufu bağlamında da önemli olduğu belirlenmiştir. İnşaatta ve özellikle çağdaş mimaride nano beton kullanılması olağanüstü özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir. Az miktarda nano silika ilave edilerek üretilen kendiliğinden yerleşen beton, yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip beton elde edilmesi sağlanmıştır. Bu nedenle karmaşık şekiller oluşturmak ve betonun mekanik mukavemetini geliştirmek için kullanılabilmiştir.

Durgun (2017), kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) yüksek ince tane içeriğinin, farklı boyut özelliklerine sahip olan kolloidal nano silika kullanmıştır. Kolloidal nano silika kullandığında toplam agrega içeriklerinin yükseltilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada nano silika kullanımının (KYB) karışımdaki ince malzeme miktarını toplam olarak azaltmada çok etkili, yeni bir yöntem olabileceği bulunmuştur. Onun yanı sıra nano silika kullanımının (KYB) geleneksel betona göre daha uygun boyutta, düşük elastiklik tarzı verme eğiliminde olduğu ve büyük bir oranda en iyi hâle getirildiği düşünülmüştür. Bu bakımdan, günümüzde nano silikanın, modern beton teknolojisinde betonlara hem mekanik ve elastik özellikleri hem de tazelik özelliklerine olumlu etkisi olan çok amaçlı bir malzeme olarak kullanılabileceği ve böylece özel bir beton oluşturulabileceği açıklanmıştır.

Alshammari (2018), nano silikanın gözeneklilik ve mukavemet üzerine etkisini incelemiştir. Bu araştırmada, nano silikanın gözeneklilik ve dayanım üzerindeki etkisi hem basınç dayanımı hem de gözeneklilik deneylerinde araştırılmıştır. Nano silika beş

farklı yüzde oranında (0%, 0,5%, 1%, 2%, 3%) eklenerek ve %0,4 sabit oranda silis dumanı ile numuneler yapılmıştır. Betonda kullanılan nano silikanın farklı oranları silis dumanı ile kaşılaştıtılmıştır. Sonuç olarak, nano silikanın partiküllerinin çoğunda çekirdek katmanlar gereksizdir. Çünkü yüzey tabakası gözenekliliği yeterince azaltmıştır. Deneyler sonucunda silis dumanının %4'ü ve nano silkanın numunelerine kıyasla, artan nano silika yüzdesi ile eğilme mukavemetini arttığı görülmüştür.

Servatmand ve Şimşek (2018), yaptıkları çalışmada yüksek performanslı tamir ve onarım harçlarının üretimi amacıyla dört farklı oranla çimento ağırlığının %0,5, %1, %1,5 ve %2'si kadar nano malzeme ilave etmişlerdir. Karışıma giren bağlayıcının %55'i oranında uçucu kül eklenmiştir. Karşımlara her biri için 28 günlük basınç dayanımı uygulanmıştır. Karışım için küp şeklinde üçer tane ve 50×50×50 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır. Bütün karışımlara nano silika ve nano alüminat belirli oranlarda yaklaşık olarak birbiriyle paralellik göstermiştir. Nano silika ve nano alüminat %1 oranında kullanıldığında maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Nano kalsit %0,5 oranında kullanıldığında maksimum basınç dayanımı değerini vermiştir. Sonuçlara göre nano malzemeler birbiri ile karşılığında hazırlanılan %1 nano silika numuneleri en yüksek dayanımı 97,86 MPa olarak vermiştir. Ayırca diğer taraftan %0,5 oranı ile hazırlanan nano alüminatlı numunelerin en düşük dayanımı 54,32 MPa verilmiştir.

Önder (2019), nano silika katkılı geleneksel betonların mekanik ve elastik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada öncelikle beton üç grup olarak belirlenmiştir. Bu gruplar C280, C320 ve C360 olmak üzere nano silika, geleneksel ve cüruf betona eklenerek betonun hem mekanik hem de elastik özelliklerinde ortaya çıkan değişimleri görmek hedefiyle kullanılmıştır. Her bir grup için su / çimento oranı sabit tutulup üç farklı karışım bileşimlerinden oluşan sadece cüruf, sadece nano silika ve son karışım için cüruf, nano silika ile beraber üretilmiştir. Karışımların 28 ve 120 günlük yaş olarak basınç dayanımı ve elastisite faktörü değerleri hesaplanmıştır. Karışmlarda toplam çimento miktarının %20'si cüruf çimentoyla ikame edilmiştir. Nano silika ise %1 oranında toplam çimento miktarına eklenmiştir. Ayrıca su miktarı her bir metre küpe 190 kg olarak sabit tutulmuştur. Karışımların kıvam kayıplarını önlemek amacıyla deneyler sırasında süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir. Uygulanan deneyler sonucu elde edilen değerlere göre betona

belirli oranlarda nano silika ve cüruf eklenerek karışımlarda çimentonun hidratasyon mekanizması hızlandırılmıştır. Ayrıca betona cüruf ve nano silika ilave edildiğinde genellikle elastik modül değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Mikroyapısal özelliklerin iyileştirildiği ve buna bağlı olarak yeni oluşturulan betonların mekanik ve elastik özelliklerinin iyileştirildiği gözlemlenmiştir.

Zhuang ve Chen (2019), nano silikanın betonun özelliklerine etkisini incelemiştir. Nanoteknoloji malzemelerinin betona eklenmesi giderek artan sayıda bilim insanının araştırma ilgisini çekmiştir. Bu araştırmada, nano SiO_2'nin betonun priz süresi, çökme, büzülme, dayanıklılık ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca nano beton karışımlarının, taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile ölçülen mikroyapıyı ve Xray (XRD) ile elde edilen çeşitli hidrasyon ürünlerini de içerdiğini göstermiştir. Ayrıca nano silikanın yüksek aktivitesi ve çekirdeklenmesi nedeniyle nano silika betonuna priz süresinin kısaldığını, çökmenin azaldığını ve büzülmenin iyileştirildiğini göstermiştir. Nano silikanın beton üzerindeki iyileştirme etkisi, özellikle betonun dayanıklılığını artırma açısından dikkat çekmiştir. Nano silikanın betonun üzerindeki etkileri incelemede detaylı olarak ve nano silikanın güçlendirme mekanizması mikroyapı ile açıklanmıştır.

Yetim (2021), nano silikanın çimento ve geopolimer bazlı groutlar üzerine etkisini araştırmak üzere deneysel çalışma yapmıştır. Tez çalışmasında, deneysel program üzerine nano silika farklı oranlarla %0, %0,5, %1, %1,50, %2 ve %2,5 olarak belirlenmiştir. Çimento bazlı grout için çimento ve nano silika kullanılırken, geopolimer bazlı grout için uçucu kül ve nano silika kullanılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde nano silikanın çimento üzerinde önemli bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Zemin iyileştime yöntemlerinden biri olan enjeksiyon için kullanılan grout malzemelerde nano silika kullanımı etkili yönde fayda sağlayabilmektedir.

Al Ghabban ve arkadaşları **(**2018), çimentonun kısmi ikamesi olarak çeşitli nano malzemelerin kullanılmasının yüksek dayanımlı betonun özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Farklı nano malzemeler (nano SiO_2, nano $CaCO_3$) kullanılmıştır. Tüm ikameler ağırlıkça %1, %2, %3 ve %4 olmak üzere dört farklı oranla kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, nano $CaCO_3$ ve nano SiO_2 parçacıklarının dahil edilmesinin

dolguyu artırmaya ve betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını artırmaya yol açtığını göstermiştir. Betona nano silika ilavesi durumunda nano $CaCO_3$ ile karşılaştırıldığında önemli bir performans gözlenmiştir. Sonuçta taze betonun işlenebilirliğinin nano partikül içeriğinin artmasıyla azaldığını göstermiştir.

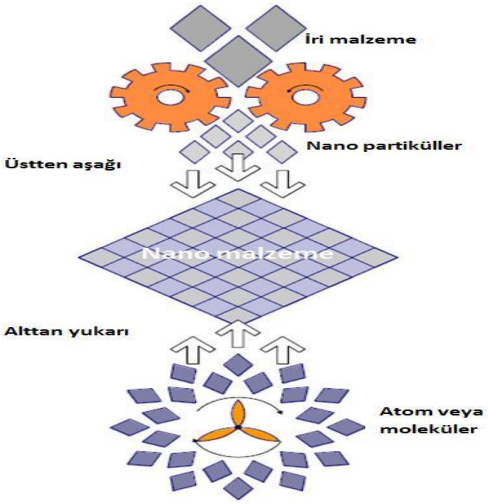
3. İNŞAAT SEKTÖRÜNDE NANOTEKNOLOJİ

3.1 Nanoteknolojinin Sözlük Anlamı ve Tanımı

Nanoteknoloji, nano ve teknoloji kelimelerinin birleşimidir. Nano kelimesi Yunancada "cüce" anlamına gelmektedir (Yardımcı 2012). Nanoteknoloji terimi, "nano metre" teriminden türetilmiştir (Joseph ve Morrison 2006). Nanoteknolojinin kökeni, fonksiyonel yapılar oluşturmak için bireysel atomların ve moleküllerin kullanılmasıdır (Gordijn 2005). Nanoteknolojinin önemi, her geçen gün artan bir araştırma alanı hâline gelmesinde, çeşitli alanlarda önemli bir gelişme olarak görülmesinde ve toplum üzerinde çok güçlü etkileri olan bir devrim olarak değerlendirilmesindedir (Mnyusiwalla *et al*. 2003).

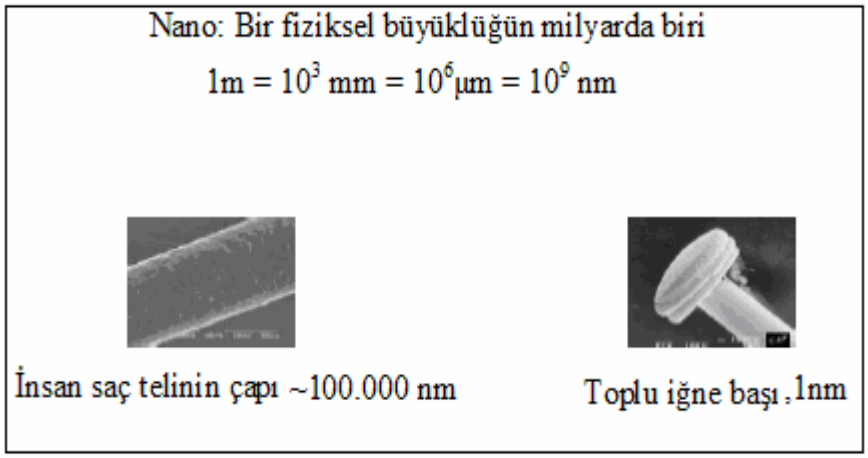
Nanoteknoloji; kimya, fizik, biyoloji gibi bilimleri ve bilgisayar, inşaat, mekanik, elektronik, uçak, havacılık, endüstri, malzeme, uzay gibi birçok mühendislik dalını birleştiren; nano ölçekte sistemlerde fonksiyonel malzemelerin, araçların ve sistemlerin üretimi ve geliştirilmesi amacıyla tüm disiplinlerin atomik ve moleküler düzeyde çalıştığı bir bilimdir. Nanoteknoloji, atomik düzeyde mühendisliktir ve çalışma alanı 1 ile 100 nano metre boyutu arasında değişen maddelerdir. Nanoteknoloji, moleküler ölçekte metrenin milyarda biri olan "nm" ($1nm = 10^{-9}$ m) olarak adlandırılan nano metrenin ölçüm birimini kullanılmaktadır (Cireli *et al.* 2006).

Nanoteknoloji “üstten aşağı (top down)” ve “alttan yukarı (bottum up)” yaklaşımları arasında ifade edileni dikkate almaktadır. “Üstten aşağı” yaklaşımı, büyük nesnelerin, maddelerin nano metre ölçeğine getirilmesidir. “Alttan yukarı” yaklaşımı ise atomsal veya moleküler seviyeden nano metre seviyesine çıkılmasıdır. Bu yaklaşım, “moleküler teknoloji” veya “moleküler üretim” olarak da bilinmektedir. Nanoteknoloji yaklaşımları aşağıdaki Şekil 3.1'de gösterilmektedir (Bjorn *et al.* 2012).

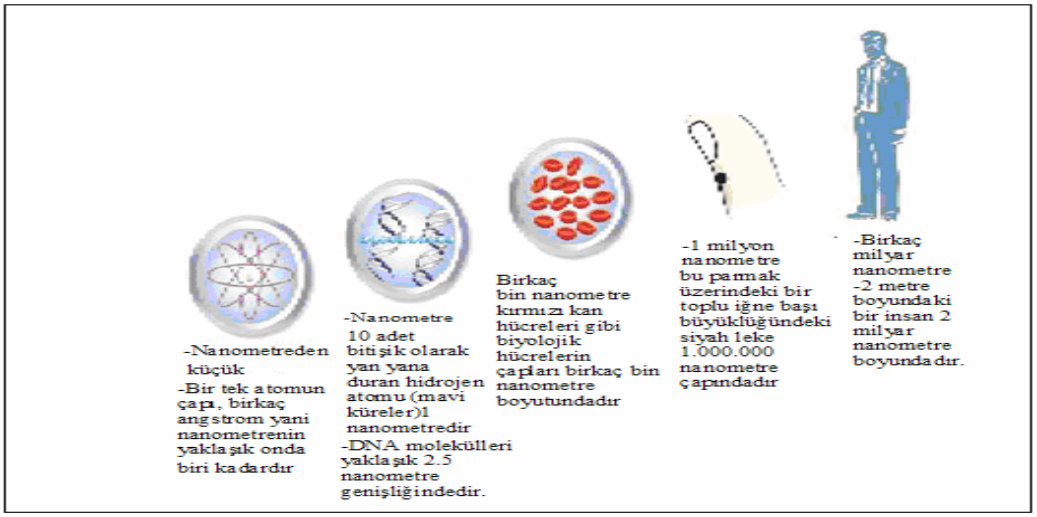


Şekil 3.1 Nanoteknolojinin yaklaşımları (Bjorn *et al.* 2012)

Nanoteknoloji, moleküller veya nano ölçekte maddeler düzeyinde ele alan bir mühendislik bilimidir. Çünkü nanoteknoloji, hem daha hafif hem de daha güçlü elektronik malzemelerin kullanıldığı ve bilim adamlarının son yıllarda umutlarını arttırmaya devam ettiği yeni bir dönem vaatetmektedir. Bilim adamları ve mühendisleri günler gittikçe daha küçük boyutlara inmeye; daha az alan kaplayan, daha az enerji tüketen ve daha hızlı çalışabilen cihazlar üretmeye odaklanmıştır. Nano metre boyutunu anlatan örnekler aşağıdaki şekillerde verilmektedir (Şekil 3.2; Şekil 3.3) (Cireli *et al.* 2006).



Şekil 3.2 Nano ölçeği açıklayan örnekler (Cireli *et al.* 2006)



Şekil 3.3 Nano ölçeğin büyüklüğü ile ilgili örneklerin açıklanması (Cireli *et al.* 2006)

3.2 Nanoteknoloji Tarihi

Ünlü Fizikçi Richard Feynman'ın 1959'da verdiği bir ders, nano ölçekli düşüncenin başlangıcı olarak kabul edilmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nden K. Eric Drexler, nanoteknoloji kavramını ilk kez önermiştir. Nanoteknoloji üzerine odaklanan Drexler, MIT laboratuvarında çalışırken biyolojik sistemlerden esinlenerek moleküler makinelerin yapılabileceğini öne sürmüş ve "Create Factories: The Age of Nanotechnology" (1986) adlı kitabını yazmıştır. Daha sonra, nanoteknolojiyi nano ölçekte ölçebilen ve inceleyebilen mikroskopların ve karbon nano kürelerin ve nano tüplerin geliştirilmesi, nanoteknolojinin yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır (Yardımcı 2012).

3.3 Nanoteknolojinin Yararları

Nanoteknolojinin yararları denince akla gelenlerden biri daha az maliyetli oluşudur. Yaşam kalitesini arttırmak konusunda önemli bir role sahip olduğu düşünülmektedir. Nanoteknoloji, maliyeti düşürerek daha fazla üretim imkânı sağlamaktadır. Tıp sektöründe kattığı artılar ile daha güvenli ve sağlıklı bir yaşam sunmaktadır. Bunlar için harcanan zaman kontrol altına alınmakta ve maliyet kaybı en az seviyelerde olacak şekilde çalışmalar yapılmaktadır. Nanoteknoloji sayesinde teknolojinin gelişim hızı artararak daha verimlişekilde kullanılmaktadır (Matthew *et al.* 2021).

Yüksek potansiyele sahip olan nanoteknoloji, kuantum fiziği yasaları ile açığa çıkmaktadır. Bu aşamada nano ölçekte kuantum fizik yasaları devreye girmektedir. Elektronik, optik, manyetik depolama, hesaplama, kataliz ve diger alanlarda yeni uygulamalara imkân sağlanmaktadır. Nanoteknoloji, genellikle genel amaçlı teknoloji olarak nitelendirilmektedir. Çünkü nanoteknoloji gerçekleştirildiğinde neredeyse hemen her sektörde ve toplumun her kesiminda önemli bir etki oluşturmaktadır (Kutucu 2010).

Nanoteknolojinin; daha sağlam ve güçlü, daha uzun ömürlü, daha hafif, daha kaliteli, daha ucuz ve daha küçük cihazlar geliştirme isteği birçok endüstride nanoteknolojinin önemini artırmıştır. Minyatürleşme olarak tanımlanabilecek bu durum, pek çok mühendislik ve teknik alanın esası olarak görülmektedir. Minyatürleştirme, kullanılan parçaların daha az yer kaplamasından çok daha büyük faydalara sahiptir. Minyatürizasyonun üretiminde daha az malzeme kullanılması, daha az enerji tüketilmesi, daha ucuz ve kolay erişilmesi, daha fazla modül ve kullanım kolaylılğı ile kendini göstermektedir (Tepe 2007).

3.4 Nanoteknolojinin Kullanım Alanları

Nanoteknoloji, hâlihazırda ve özellikle 21. yüzyılda önemli bir teknoloji olarak görülmektedir. Hastalık tespiti ve tedavisi, çevreyi izleme ve koruma, enerji üretimi ve depolanması, mahsulün üretimi, iyileştirmesi, gıda kalitesi ve karmaşık yapıların inşasında devrim yaratan gelişimiş uygulamalar sunmaktadır (Ersöz *et al.* 2018).

Seramik, metal, polimer veya kompozit sistemlerin fonksiyon olarak büyük bir gelişim sağlayan nano ölçekte malzemeler kadar nanoteknolojinin de esasını oluşturmaktadır. Nano tanelerin yaklaşık bin yıldır seramik malzeme üretiminde kullanıldığı bilinmektedir. Daha sonra bu tanelerin bilimsel hedefli kullanılması nanoteknolojiyi oluşturulmuştır. Nanoteknoloji, günlük hayatımızda birçok ürünün geliştirilmesinde kullanılmıştır. Bu tür ürünlere iyi örnekler, su geçirmez nano fiber kayak malzemeleri ve kil polimer nano kompozit tenis toplarıdır. Nanoteknoloji kullanarak geliştirilen bu ürünler, geneleksel ürünlere göre daha dayanıklı, daha uzun ömürlü, daha sağlam ve daha hafif olmaktadır (Toksöz 2010).

Nanoteknoloji, bilişim teknolojileri ve elektronik alanında uygun maliyetli, yüksek performansa sahip malzemeler ve cihazların üretimi içinyapılan uygulamalara önemli katkılar sağlamaya devam etmektedir. Nanoteknoloji sayesinde daha hızlı, daha küçük boyutta, kolay taşınabilir ve daha fazla miktarda bilgiyi yönetebilen ve depolayabilen sistemler geliştirilmiştir (Ersöz *et al.* 2018).

Nanoteknoloji, savunma sektöründe ve askerî uygulamaların birçok alanında yüksek bir potansiyel taşımaktadır. Bu alanda geliştirilmiş kamuflaj, elektronik savaş yetenekleri, daha iyi silah sistemleri ve akıllı sistemler gibi birçok konu Ar-Ge'nin yoğun olarak yürütüldüğü alanlardır (Kutucu 2010).

Enerji ve çevre alanında nanoteknolojinin verimli kullanımı ile üretim, depolama, çevre temizliği ve çevreyi kirleten olguların tespiti konularında yapılan çeşitli uygulamalar mevcuttur. Bu sayede havanın kalitesini artırması, temiz içme suyu sağlamansı, yenilenebilir enerji kaynakları geliştirilmesi sağlanmaktadır. Aynı anda içinde yaşadığımız çevreden zararlı ve toksin maddelerin uzaklaştırılması gibi uygulamaları bulunan nanoteknolojinin sürdürülebilir bir çevre yaratılmasına yardımcı olacağı anlatılmaktadır (Ersöz *et al.* 2018).

Tekstil alanında ise son yıllarda nanoteknolojinin yardımıyla üretilen ve kendi kendini ışıkla temizleyen kumaşlar önemli gelişmelerden biridir. Bu kumaşlar, hem sık yıkanmayan, mikroba karşı koruyucu hem de dayanıklı kumaşlardır (Anderson *et al.* 2016). Tekstil endüstrisindeki bir diğer önemli gelişme ise bakır şeritlerden yapılan hafif, esnek ve ince liflerin bilim adamları tarafından Güneş'ten elektrik çekip depolamak ve dokumaya dönüştürmek için geliştirilebilmesidir. Gelecekte bu liflerle dokunan kumaşlardan yapılan elbiseler sayesinde cep telefonlarının şarj edilebilmesi beklenmektedir. Belki de giyilen kıyafetler sayesinde kalp nabzı, vücut ısısı ve kan şekerinin düzenli olarak kontrol edebilmesi mümkün olacaktır (Li *et al.* 2016).

Nanoteknolojinin tıp alanında veya toplumda bilinen adıyla nano tıp alanında birçok kullanımı vardır. Hastalıkların teşhisi, tedavisi, izlenmesi ve önlenmesi gibi çeşitli amaçları bulunmaktadır. Bunun için nano ölçekli malzemeler ve nano elektronik

biyosensörler kullanılmaktadır. Kanser, diyabet, alzheimer, parkinson gibi birçok hastalığın insan sağlığını tehdit ettiği günümüzde, doğru teşhisin doğru tedaviyi verebilmek için son derece önemli olduğu bilinmektedir. Nanoteknoloji ile üretilen nano sensörler ve nano partiküller, doğru teşhis ve anında tedavi için çok önemli bir rol oynamaktadır (Ersöz *et al.* 2018).

Günümüzde nanoteknolojinin daha birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Kötü havaya, mermiye, UV ışınlarına karşı koruma sağlamak için otomotiv yüzeylerinde kullanılmakta ve birçok alanda iç-dış cephede kullanılan nano kaplamalar, donanma gemilerinin omurgalarında kullanılan seramik nano kaplamalar, elektromanyetik dalgaları engelleyen kumaşlar ve yatak takımları, nano kaplama kullanılan güneş gözlükleri, elektrostatik boşalma gibi örnekler nanoteknolojinin diğer uygulama alanlarıdır (Toksöz 2010).

3.5 Nanoteknolojinin İnşaat Sektöründeki Kullanım Alanları

Nanoteknolojinin mühendislik alanında, özellikle inşaat mühendisliği alanında birçok uygulaması vardır. Nanoteknoloji ile çimento, cam, beton ve çelik gibi çok sayıda malzeme geliştirilebilmektedir. Günümüzde nano inşaatın amacı nanoteknoloji kullanarak daha dayanıklı, güçlü, sağlıklı, emniyetli, akıllı inşaat malzemeleri üretmektedir (Alyasri 2022).

İnşaat sektöründe kullanılan yapı malzemeleri yerine yüksek performanslı malzemelerin geliştirilmesi, modellenmesi ve imalatı ile fonksiyonel, aktif, uyarlanabilir malzemeler, polimerler ve nano kompozit çimento gibi akıllı yapı malzemelerinin hayatımıza girmesi tercih edilmektedir. Bu tercihler sayesinde nano malzemelerin inşaat alanında kullanımı mümkün olmaktadır (Tepe 2007). İnşaat sektöründe nanoteknolojinin pek çok uygulamaları bulunmaktadır. Bu uygulamalar aşağıda sıralanmıştır:

3.5.1 Yalıtım malzemeleri

Nanoteknoloji yalıtım malzemeleri kullanmasının çok önemli olduğu belirlenmektedir. Gereksiz enerji tüketimini önlemek için ısı yalıtımının kullanılması olumlu bir fark yaratmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ısı yalıtımında kullanılan malzemelerde çeşitlilik sağlanmaktadır. Geri dönüşümün ön planda olduğu sürdürülebilirlik, dayanıklılık ve diğer fiziksel özellikler vb. geliştirilerek daha iyi durumda malzemeler üretilmektedir (Çöl 2020).

Isı yalıtım uygulaması; enerjiye, ısı direncine, sıcaklık etkilerine, kalınlığa, maliyete, yoğuşma suyuna vb. bağlı olarak uygulandığı yerde büyük bir fark yaratmaktadır. Bu değerler de bu özellikler ile kullanılan malzemenin cinsine göre değişiklik göstermektedir (Kozak ve kozak 2015).

Nanoteknolojiden elde edilen yalıtım malzemelerinin, geleneksel malzemelere göre iki kat daha güçlü, hafif ve dayanıklı olmasının yanında termal iletkenliği %30 daha düşüktür. Nano kaplamaların ve ince filmin en büyük özelliklerinden biri, mevcut yüzeylere uygulanarak daha iyi ve daha güçlü yalıtım sağlamasıdır (Bozsaky 2016).

3.5.2 Boyalar ve kaplamalar

Boya ve kaplama endüstrisi tüm dünyada her geçen gün büyümekte ve günümüzde sadece güzelleştirme amacına hizmet etmemektedir. Aynı zamanda değerli metalleri ve binaları korozyondan korumanın bir yoludur. Kaplama ve boyalarda kullanılan nano malzemelerden oluşturulan fonksiyonel özelliklerden biri kendi kendini temizleme işlevidir (Fierascu *et al.* 2021).

Ayrıca nano kaplama; araba boyası, numaralı gözlükler ve tıbbi, bilimsel aletler gibi hassas yüzeylerde kullanılır; üstün sertlik ve çizilme karşıtı özelliklerle koruma sağlanmaktadır (Chaudhari *et al.* 2018).

Bununla birlikte iyi kimyasal özelliklere sahip bir kaplama sistemi, kötü hava koşullarına maruz kalma veya esneklik nedeniyle iyi termal stabilizeye ve Mar direnç özelliğine sahip

olmayabilir. Bu nedenle boyalar ve kaplamalarda nanoteknolojinin kullanılması ile bu problemlerin çözülmesi beklenmektedir (Chaudhari *et al.* 2018).

3.5.3 Çimento ve nanoteknoloji

- **Çimentonun tanımı ve tarihçesi**

Çimento, suyla karıştırıldığında hamur (pasta) gibi bir kıvam sergileyen, reaksiyonlar ve hidratasyon nedeniyle küreleşen ve sertleşen, kirlendikten sonra su altında bile sertliğini, dayanıklılığını ve kararlılığını koruyan, ince öğütülmüş inorganik bir hidrolik bağlayıcıdır (Türkçimento 2021).

Dünyanın ilk çimento üretimi 1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentinde "Joseph Aspdin" tarafından ince taneli kireç taşı ve kil karışımının pişirildikten sonra öğütülmesiyle yapılmıştır. Üretilen çimentonun rengi ve özellikleri, Leeds'e yakınlarındaki Port Land adlı bir adadan getirilen doğal yapı taşlarına benzediği için adını almıştır. Çimento yeterli sıcaklıkta pişirilmediğinde bazı olumsuz (yetersiz) durumların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. 1845 yılında Isaac Johnson adlı bir İngiliz bilimci, uygun pişirim sonrasında Port Land çimentosunun özelliklerini geliştirmiştir ve bugün tüm dünyada bu yöntem kullanılmaktadır (Kapkaç 2007).

- **Çimento bileşimleri**

Çimentodaki bazı minerallerin bulunma yüzdeleri ya da oranları standartta belirtilmiştir. Örneğin reaktif kalsiyum oksit (CaO) ve reaktif silikon dioksit (SiO_2) bulunma yüzdelerinin toplamı kütle olarak minimum %50 olmalıdır. Çimentonun sertleşmesi, kalsiyum silikatın hidratasyonu nedeniyle oluşmaktadır. Farin adı verilen çimento klinkerine, CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve ham toz olarak az miktarda diğer oksitleri içeren hammadde karışımının sinterlenmesiyle hazırlanmaktadır (Yeğinobalı ve Ertün 2009).

Farin karışımında kaba un karışımı ince öğütülmeli ve mümkün olduğunca homojen olacak şekilde karıştırılmalıdır. Farinin pişirilmesi sırasında elde edilen çimento klinkeri ise kütlesi en az 2/3 oranında kalsiyum silikatlardan ($3CaO \cdot SiO_2$ ve $2CaO \cdot SiO_2$) oluşan hidrolik bir malzemedir. Geri kalanı kalsiyum, alüminyum, demir ve diğer bileşikleri içeren klinker fazlarından oluşmaktadır (Türkçimento 2021). Çimentonun içindekiler ve bileşimleri Çizelge 3.1'de gösterilmektedir (Kapkaç 2007).

Çizelge 3.1 İdeal klinker yüzde bileşimleri ve oksitlerin birbirine oranı (Kapkaç 2007)

BİLEŞENLER	**SINIR DEĞERLER**		**TİPİK BİLEŞİM %**
	% MİN	**% MAKS**	
CaO	60	67	63
SiO_2	17	25	20
Al_2O_3	3	8	6
Fe_2O_3	0,5	6	3
MgO	0,1	0,4	2
$Na_2O + K_2O$	0,2	1,3	2
SO_3	1	3	1
KIZDIRMA KAYBI	1	2	2
ÇÖZÜNMEYEN KALINTI	1	2	1

TS EN 197–1: 2012 standartlarına göre kütle olarak CaO/SiO_2 oranı 2,0'dan az olmamalıdır. MgO içeriğinin kütlesi %5,0'dan fazla olmamalıdır. Yukarıda verilen tanımları özetlemek gerekirse çimento geniş anlamda bağlayıcı görevi gören bir malzemedir (Türkçimento 2021). Hâlihazırda bu standart Irak'ta da geçerlidir.

Fakat mühendislik hedefleri için kullanılan çimento "hidrolik bağlayıcı"dır. Yani hava ve suyun etkisiyle sertleşen inorganik maddelerdir. Kirecin (CaO), SiO_2, Al_2O_3, ve Fe_2O_3 içeren malzemelerle sinterleme noktasına kadar pişirilmesi sonucu elde edilen klinker, uygun bir miktarda $CaSO_4$ türevinin eklenmesi ve öğütülmesi ile elde edilmektedir (Gonçalves ve Margarido 2015).

- **Çimentonun çeşitleri**

Her malzemede olduğu gibi çimento da kullanım yerine göre daha iyi performans gösterdiği gibi farklı oranlarda farklı malzemeler eklenerek farklı çimento türleri de elde edilmektedir. Çeşitli ülkelerde yerel standartlara göre birçok çimento çeşidinin kullanıldığı göz önüne alınmakla birlikte ortak çimento komitesi tarafından hazırlanan EN 197-1 standardı, çoğu ülke tarafından da kabul edilmekte ve "CEM Çimentosu" olarak bilinmektedir. Standarda göre çimento, içeriğine eklenen malzemenin bileşimine ve oranınna göre genel olarak 5 gruba ayrılmaktadır (Kalkan *et al.* 2016).

Çimento grupları aşağıda sıralanmaktadır:

1. Normal Portland Çimento (CEM 1): Bu grupta klinkerin maksimum %0-5 arası mineral katkı maddeleri (kalsiyum sülfat ve minör bileşenleri) ile öğütülmesi sonucunda normal Portland Çimentosu elde edilmektedir.

2. Portland Kompoze Çimento (CEM 2): Bu grupta mineral katkıların içeriği %6-35 arasındadır. Bu grubun çimentosu katkının cinsine göre "Portland Cüruflu- Puzolan Portland" olarak da bilinmektedir.

3. Yüksek Fırın Cüruflu Çimento (CEM 3): Bu grup, yüksek fırın cüruflu çimentoları kapsamaktadır. Çimentonun içeriğinde bulunan katkı maddelerinin miktarı %36-95 arasındadır.

4. Puzolanik Çimento (CEM 4): Puzolanik çimentolar bu grupta yer almaktadır. Bu türde katkı maddesi olarak cüruf veya kalker kullanılmamaktadır. Puzolan ve uçucu katkıları ile %11–55 arasında değişmektedir.

5. Kompoze Çimento (CEM 5): Bu grupta kompozite çimentolar bulunmaktadır. Cüruf (%18-50) arasında; puzolan ve uçucu kül (%18-50) miktarı belirlenen sınırlar içinde değiştirilerek birlikte eklenmektedir. Ayrıca klinker miktarları oranı %20-64 aralığında kalacak şekilde ayarlanmaktadır.

Dünya genelinde üretilen çimentoların %90'ını normal Portland çimentosu oluşturmaktadır. Portland çimentosu, her türlü beton ve harç yapımına uygundur. Çok çeşitli çimento bulunmasına rağmen hâlihazırda dünyada en çok üretilen Portland çimentosu üretimi sağlanmaktadır. Bunu yanı sırada Portland çimentolarında en uygun kayaç marnlı kalker killi kireç taşıdır (Kapkaç 2007). Ancak her yerde doğru kimyasal bileşime sahip olan kayacı bularak tek bir hammaddeden çimento klinkeri yapmak mümkün değildir.

- **Çimento Üzerine Nanoteknolojinin Etkisi**

Nanoteknolojinin çimento esaslı malzemeler için olağanüstü bir potansiyele sahip olduğu gözler önüne serilirken, öte yandan da bu teknolojinin tüm potansiyeliyle kullanılabilmesi için bazı sorunların çözülmesi gerekmektedir. Nanoteknoloji laboratuvarında üretilen ürünlerin büyük ölçekte ve uygun maliyetle uygulanabilmesi için nano boyutlu partiküllerin doğru ve yeterli dağılımı yapılması gerekenlerin başında gelmektedir (Sanchez ve Sobolev 2010).

Hidratasyonu hızlandırması için tercih edilen yöntemlerden biri nano silika, nano alüminat, nano titaniyüm veya nano çelik gibi nano partiküllerin kullanılmasıdır. Nano metre boyutlarında bu nano parçacıklar, çok büyük reaktif yüzey alanları oluştururken, ortamda birden fazla çekirdeklenme noktasının mevcut olmasını ve çekirdeklenme reaksiyonlarının hızlı başlamasını sağlamaktadır. Nano silika gibi parçacıklar, puzolanik reaksiyonla C-S-H jeli oluşumuna katkıda bulunduğundan bu nano parçacıkların çimento hamuru bileşenleri ile reaksiyona girme potansiyeli yüksek olduğu için ek çekirdek oluşumu da meydana gelmektedir (Özbora *et al.* 2013).

Çimentonun hidratasyon ürünleri, bu çekirdekler aracılığıyla kristal büyüme mekanizması oluşturmaktadır. Nano partiküllerin eklenmesi sayesinde çimento tanelerinin arasında hidratasyon ürünleri oluşmaya başladığından nano parçacık içermeyen bir referans karışıma göre çok daha kısa sürede boşluksuz bir iç yapı oluşumu gerçekleşmektedir. Bu durumda erken yaşlarda yüksek basınç dayanımına sahip olan ve daha boşluksuz birçok çimentolu malzeme elde edilebilmektedir (Alizadeh *et al.* 2011).

3.5.4 Beton ve Nanoteknoloji

- **Betonun tanımı ve tarihçesi**

Agregalar (kaba ve ince agregalar), üretim teknolojisine bağlı olarak çimento ve suyun homojen karışımından oluşan ve kimyasal, mineral katkılı veya katkısız maddeler eklenerek veya eklenmeden homojen olarak karıştırılmasından oluşmaktadır. Karıştırılma başlangıcı plastik kıvamda olmakta; şekil verilebilmekte; zamanla katılaşıp, sertleşerek dayanım kazanmaktadır ve tüketiciye taze beton olarak sunulan önemli bir yapı malzemesi türüdür (Tantawi 2015).

Betonun mutlak hacmi olarak %70'i (çakıl, mıcır, kum) agrega, %20'si su ve %10'u çimentodan oluşmaktadır. Katkı maddeleri gerekirse çimento ağırlığının %5'inden fazla olmamak üzere eklenebilmektedir (Usta 2005).

Beton, günümüzde en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Dünyadaki yıllık üretim miktarı yaklaşık 13 milyar tondur. Sadece insanlar, betondan daha yüksek oranda su tüketmektedir (Arife 2019).

Dünyanın beton üretimi ilk olarak Almanya'da 1903 yılında gerçekleştirilmiştir. Birkaç yıl sonra da Amerika Birleşik Devletleri'nde üretilmeye başlanmıştır. Birkaç yıl sonra ve özellikle 1914 yılında Amerika'da beton taşıma amaçlandığı için mikser kamyonu veya (transmikser) aracı geliştirilmiştir (Usta 2005).

1927 yılında transmikserden hemen sonra beton harç iletme pompasının aracı geliştirilerek gelişmiş patenti alınmıştır. Savaş yıllarından sonra hazır beton yapıların temel yapı ve inşaat malzemesi olarak kullanılması ve yaygınlaşması ile birlikte kısa sürede birçok ülkede hazır beton üretilip kullanılmaya başlanmıştır (Ünal ve Yurtcu 2007).

20. yüzyılın ikinci yarısında hızlanan kentleşme ve altyapı çalışmaları, daha fazla hazır beton ve beton ürünlerinin üertilmesini, yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bu nedenle beton alanında birçok gelişmiş teknoloji fark edilmiştir (Usta 2005).

- **Beton Bileşimleri**

Beton bileşimlerini agrega, çimento, su, ve katkı maddeleri oluşturmaktadır. Agrega, beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır. Agregalar; kum, kırılmış kaya veya geri dönüştürülmüş beton, moloz veya diğer malzemeler olabilmektedir (Kahraman ve Kılıç 2016).

Çimento ise betonun yaklaşık %7-14'ünü oluşturmaktadır. Çimentonun amacı betonu bağlamaktır. Ayrıca betonun içindeki su miktarı ne kadar fazla ve beton işlenebilirliği ne kadar yüksekse betonu o nispette incelir. Betona su eklendiğinde beton hidratasyonu, reaksiyon ve ardından sertleşme ile sonuçlanmaktadır. Su (6–8) aralığında bir "pH" değerine sahip olmalıdır. Betonun suyu takviye amaçlı kullanılırsa tuz içermemelidir çünkü donatıya neden olabilmektedir. Betonda katkı meddeleri işlenebilirliği artırmak için kullanılmaktadır (Tantawi 2015).

Bu katkı maddeleri, özelliklerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırabilir (Doğangün 2008):

- İşlenebilirliği artırıcı
- Hızlandırıcı
- Priz geciktirici
- Korozyondan koruyucu
- Basınç dayanımını artırıcı

- Süper akışkanlaştırıcı

- Hava sürükleyici

- Geçirimsizliği artırıcı

- **Beton Üretimi**

Çimento ile su karıştırıldıktan sonra ortaya çıkan hamur zamanla katılaşmaktadır. Bu olay beton içerisinde meydana gelmektedir. Bu sayede beton sertleşmekte ve dayanım kazanmaktadır. Betonda aranan en önemli özellik yüksek dayanımdır. Betonun dayanımını birçok faktör etkilenmektedir. Bunlar**;** geçirimsizlik, optimum agrega dağılmı, düşük su-çimento yüzdesi, yüksek kaliteli çimento, betonun sıklığı ve sertliği gibi faktölerdir. Ayrıca beton karışımın; dayanım, ekonomi ve işlenebilirlik açısından optimum bir kıvamda olması gerekmektedir. Betonun kıvamı ve yoğunluğu çeşitli yöntemler ile belirlenebilmektedir (İskenderkaptanoğlu 2009).

$1m^3$ betonun bileşimine eklenen çimento miktarı ağırlıkça "dozaj" olarak adlandırılmaktadır. Betonarmede kullanılan beton dozajı, genellikle "250-400 kg/m^3" aralığında değişmektedir. Yüksek çimento dozajı, yüksek beton dayanımı anlamına gelmemektedir. Betonun dayanımına katkı sağlayan en önemli parametre su/çimento oranıdır (Ersoy ve Özcebe 2001).

Beton dozajı sabit tutuluğunda farklı su/çimento oranları kullanılarak farklı dayanımlar elde edilebilmektedir. Aşırı artan su/çimento oranı betonun büzülmesine ve çatlamasına, boşluklu bir beton oluşmasına, dayanımın önemli bir şekilde azalmasına ve beton–donatı kenetlemesinin zayıflamasına neden olmaktadır (Doğangün 2008).

Ayrıca üretildikleri yere göre betonun iki türü bulunmaktadır. Bunlar şantiye betonu ve transmikser betonudur. Şantiye betonu, bileşenlerin karıştırılmasından sonra elde edilen betondur. Bu betonda 5 km'ye kadar dağıtım yapılması mümkündür. Çimento mikseri

veya el ile karıştırılan çeşitleri bulunmaktadır. Diğer tür transmikser betonu ise betonun şantiyede bulunan harmanlanmaktadır. Harmanlandıktan sonra karıştırılması yerine beton santralden her yere hazır olarak teslim edilmektedir. Buna önceden hazır beton veya karıştırılmış beton denilmekter (Demir 2016).

- **Beton Üzerine Nanoteknolojinin Etkisi**

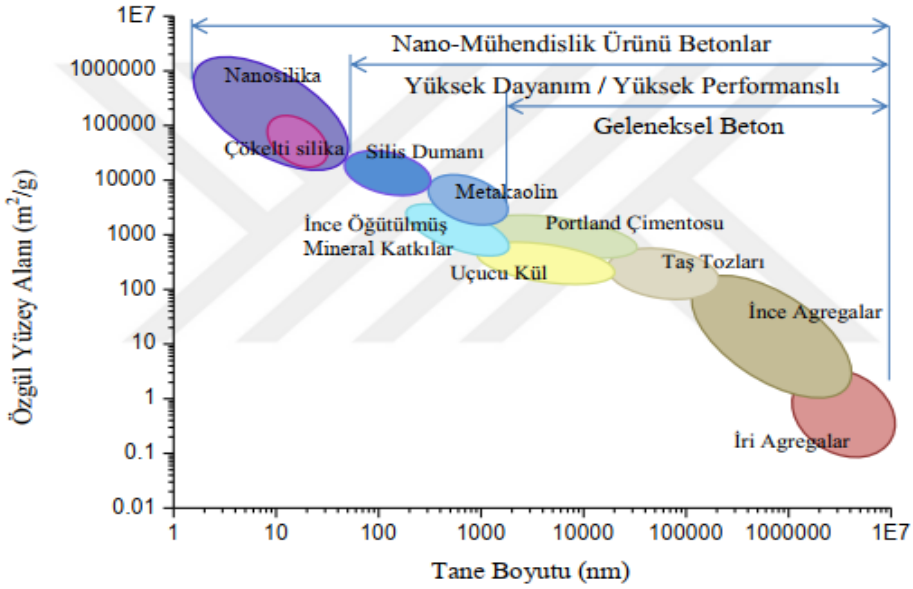
Betonda kullanılan nanoteknoloji performansını ve inşaat özelliklerini geliştirmek için çeşitli nano malzemeler eklenerek beton oluşturulmaktadır. Dünyada çeşitli nano malzeme katkılarının bulunması nedeniyle inşaatta ve özellikle beton yapımında çok çeşitli nano beton uygulamaları görülebilmektedir (Gopalakrishnan *et al.* 2011).

Böylece akıllı yapılar üretmek, yangına dayanıklı kaplamalar veya duman yutan beton oluşturmak suretiyle afetlerde bina performansının artırılması veya diğer koruyucu kullanımlar uygulanabilmektedir (Murty 2013).

Yapılan çalışmalarda nano bilim ışığında elde edilen sonuçlara göre, beton alanında ve yapı teknolojisindeki ilerlemeler dört farklı kategoride incelenebilmektedir. Bu kategoriler; nano parçacıklar, çimentolu malzemeleri olan nano mekanik modellenmesi, nanoteknoloji ile üretilmiş teknolojilere dayanan ekipmanlar ve nano film kaplama ile elde edilen sonuçlar olarak sayılabilir (Pekmezci ve Atahan 2014).

Nano bilimin ve teknolojik ekipmanların gelişimi ışığında yapılan çalışmalar sayesinde elde edilen çimentolu ürünlerin özelliklerini ve şekillendirici üzerinde en etkili parametre olan hidratasyon evrimini gözlemleme ve daha kolay inceleme imkânı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca betonun tüm fazlarının nano metre özelliklerini belirlemek de mümkün hâle gelmektedir. Nanoteknolojik maddeler, çimento esaslı hidratasyon ile tartışlığında genellikle hidratasyon kinetiğini hızlandıran bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Çimentoda kullanılan nanoteknoloji maddeleri aynı zamanda betonda da kullanılabilmektedir (Pekmezci ve Atahan 2014).

Yapılan araştırmalara göre betonda en çok kullanılan nanoteknoloji maddelerinden biri nano silikadır (SiO_2). Çimentoda kullanılan nanoteknoloji maddeleri aynı amaçla betonda da kullanılmaktadır. Bir kısmı, hidratasyon üzerinde devam edeceği çekirdekler oluşturarak (C-S-H), silika gibi reaksiyonun hızlanmasına yardımcı olmaktadır. Diğer kısmı ise puzolanik reaksiyon araçlarıyla hidratasyon kinetiğinin hızlandırılmasına yardım etmektedir. Nano taneler çok yüksek özgül yüzey alanına sahiptir. Özgül yüzey alanının bu derecede yüksek olması, önemli kimyasal reaksiyonların gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Özgül yüzey alanı beton bileşimlerinin tane boyutu ile ilişkisi aşağıdaki Şekil 3.4'te gösterilmektedir (Sobolev ve Gutierrez 2005).



Şekil 3.4 Özgül yüzey alanı beton bileşimlerinin tane boyutu ile ilişkisi ((Sobolev ve Gutierrez 2005).

3.5.5 Betonun Mekanik Özellikleri

- **Betonun basınç dayanımı**

Beton, basınç dayanımı yüksek ve yarma dayanımı düşük bir inşaat veya yapı malzemesidir. Çok düşük yarma (çekme) dayanımı olan betonlarda çoğu zaman hesaplamalarda en önemli özelliklerden biri basınç dayanımıdır. Betonun dayanımı, numunelerin yaşı, boyutları ve yükleme türü gibi özelliklere bağlıdır. Betonun standart

basınç dayanımının numunesi 28 gün süreyle suya batırılmaktadır. Numune standartlara göre küp veya silindir bir şekilde yapılmaktadır. Numunelerin boyutları dünyada bulunan standartlara göre değişmektedir. Basınç dayanımı, betonun eksenel basınç altında dayanımı olarak tanımlanıp gerilme cinsinden ve şartlar kısıtı ifade edilmektedir (İskenderkaptanoğlu 2009).

- **Betonun yarma (çekme) dayanımı**

Genel olarak taşıma kapasitesinin sınır durumunda betonun yarma dayanımı ihmal edilmektedir. Ancak kullanılabildiği sınırlı durumda çatlakları içeren ilgili hesaplamalarda betonun yarma dayanımı kullanılmaktadır ve betonun çekme dayanımı, basınç dayanımına göre çok düşüktür. Yarma dayanımı, basınç dayanımının yaklaşık olarak %10'u mertebesindedir. Betonun yarma dayanımının merkezi; silindir yarma deneyi, çekme deneyi ve kiriş eğilme deneyi gibi deneyler sonuçları ile belirlenebilmektedir (Doğangün 2008).

- **Betonun eğilme (bükülme) dayanımı**

Eğilme dayanımı, betonun çekme dayanımının dolaylı bir ölçüsüdür. Başka bir ifadeyle bir donatısız beton kirişin veya döşemenin çekme yüzeyindeki eğilmede kırılma noktasındaki maksimum gerilmenin bir ölçüsüdür. Eğilme dayanımı, yapısal elemanların tasarımı için nominal eğilme dayanımının hesaplanmasında yedek bir şekilde ihmal edilmektedir (Dhir *et al.* 2019). Betonun eğilme dayanımı; numune başarısız olana, yani eğilmeye karşı koyamayacak duruma gelene kadar numuneye harici bir yük uygulanarak test edilmektedir (Ameen *et al.* 2018).

3.6 Beton Dayanımları

Genelde betonlar dayanımlarına göre aşağıdaki gibi üç grupta sınıflandırılmaktadır (Osman 2013):

1. Normal dayanımlı beton

2. Yüksek dayanımlı beton

3. Ultra yüksek dayanımlı beton

3.6.1 Normal dayanımlı beton

Normal dayanımlı beton; üretimin kolay olması, ucuz hammadde ve işçilik temini açısından ekonomik olarak ucuz üretilebilen bir betondur. İnşaat ve yapı sektöründeki ekonomik avantajları nedeniyle bu grup betonlar günümüzde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Normal dayınımlı betonlarda çimento hamurunun agrega ara yüzeyi zayıf olduğu için kırılmalar yaşanmakta ve dayanım kayıpları agregaların kırılması ile oluşmaktadır. Basınç dayanımlarına göre normal dayanımlı betonlar 20-50 MPa arasında değişmektedir (ACI 363R 2010).

3.6.2 Yüksek dayanımlı beton

1950'lerde 34 MPa ve üstü, 1960'larda ise 41 MPa ve üstü yüksek dayanımlı beton olarak kabul edilmiştir. Ancak hâlihazırda bu değerlerin tanımları değişmiştir. Kaynaklara göre 50 MPa'ya kadar olan betonlar normal dayanımlı beton olarak kabul edilebilmektedir. Ayrıca yüksek dayanımlı betonlarda basınç dayanım değerleri için coğrafi farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin 62 MPa basınca dayanımlı betonların yaygın bir şekilde kullanıladığı bir bölgede 83 – 100 MPa arası betonlar yüksek daynımlı betonlar olarak kabul edilebilmektedir (ACI 363R 2010). Diğer bir deyişle yüksek dayanımlı beton, minimum çimento içeriği 400 kg/m^3 ve 28 günlük yaş basınç dayanımı minimum 50 MPa olan beton olarak tanımlanmaktadır (Phan 2002).

Kaynaklara göre yüksek perfomanslı beton (YPB) ve yüksek dayanımlı beton (YDB) genellikle eş anlamlı olarak kullanılabilmektedir. Fakat yüksek dayanımlı betonu yüksek performanslı betondan ayıran temel faktör mineral katkıların kullanılmasıdır. Yüksek

dayanımlı betonun en temel özelliği, erken ve yüksek bir başlangıç dayanımına ve çok yüksek bir son basınç dayanımına sahip olmasıdır. Betonun dayanımındaki esas parametreleri su/çimento oranı ve içerdiği çimentodur. Yüksek dayanımlı betonu üretmek için betondaki su/çimento oranının düşürülerek kılcal boşluğun azaltması ve daha geçirmsiz bir iç yapı oluşturulması gerekir (Özalp 2016).

Yüksek dayanımlı beton, normal dayanımlı betona kıyasla hem dayanımı üstün hem de durabilitesi yüksek olması nedeniyle dünya çapında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu nedenle normal dayanımlı betonun yerine yüksek dayanımlı beton sayesinde daha ince ve daha hassas kesitler ile aynı yükü taşımak mümkün olmaktadır (ACI 363R 2010). Yüksek dayanımlı beton; uzun açıklıklı köprülerde, yüksek binalarda, yapılarda ve otoyol viyadüklerinde kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı beton kullanmanın amacı, yapının en düşük kesit alanını ve en düşük hacmi ile en düşük ağırlığını elde edilmektedir (Kumar *et al.* 2017).

3.6.3 Ultra yüksek dayanımlı beton

Ultra yüksek dayanımlı betonlar ise özelikleri ve iç yapıları ile normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonlardan ayrıdır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda genel olarak iri agregalar yerine silis içeriğine ve sınırlı tane boyutuna sahip agregalar kullanılmaktadır. Ayrıca bu çeşit betonlarda silis dumanı, bazı nano malzemeler ve bazı kimyasal katkılar kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra ısıl sertleştirme işlemi uygulanarak iç yapı iyileştirmektedir (Büyüköztürk ve Lau 2002). Bazı kaynaklara göre ultra yüksek dayanımlı betonlar çok yüksek dayanımlı betonlar olarak tanımlanmaktadır.

Beton teknolojisindeki son gelişmeler ile birlikte ultra yüksek dayanımlı betonun üretimi daha kolay hâle gelmektedir. Ultra dayanımlı betonun üretiminde çok ince ve yüksek dayanımlı agregalar ve çok düşük su–çimento oranı ile standart imalat teknikleri kullanılarak “100 MPa” ve üzeri basınç elde edilebilmektedir (Birol ve Yavaş 2018).

Ultra yüksek dayanımlı betonda çok düşük su/çimento oranı olması ve katkı maddeleri kullanılmasından dolayı hidratasyon hızlı olmakta ve yoğun bir çimento hamuru oluşmaktadır. Ultra yüksek dayanımlı beton, çok düşük geçirimliliğe sahiptir. Ayrıca dışarıdan istenilen ölçüde suyun betona nüfuz etmesine izin vermek mümkün değildir (Reinhardt ve Weber 1998).

Ultra yüksek dayanımlı betonların içerisinde bulunan agrega sınırlı bir tane boyutuna sahiptir. Tane boyutunun maksimum 2 mm olması ve katkı meddeleri içermesi ile yüksek dayanımlı betonlardan daha çok fazla boşluklu ve geçirimsiz bir iç yapıya sahiptir. Normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı betonlar için birkaç özeliğin karşılaştırılması aşağıdaki Çizelge 3.2'de gösterilmektedir (Büyüköztürk ve Lau 2002).

Çizelge 3.2 Betonlarda normal, yüksek ve ultra yüksek dayanımlı bazı özelliklerin karşılaştırılması (Büyüköztürk ve Lau 2002)

ÖZELLİKLER	**NORMAL DAYANIMLI BETON**	**YÜKSEK DAYANIMLI BETON**	**ULTRA YÜKSEK DAYANIMLI BETON**
BASINÇ DAYANIMI (MPa)	< 50	50 – 100	100 – 150
SU / ÇİMENTO ORANI	> 4,5	0,45 – 0,30	0,30 – 0,25
KİMYASAL KATKILAR	GEREKSİZ	SU AZALTICI KATKILAR VEYA SÜPER AKIŞKANLAŞIRICI	SÜPER AKIŞKALAŞTIRICI
MİNERAL KATKILAR	GEREKSİZ	MİNERAL KATKI MADDELERİ	SİLİS DUMANI
GEÇİRİMSİZLİK (m/s)	> 10 – 12	10 – 13	< 10 – 40

3.7 Nano silika

3.7.1 Nano silikanın tanımı

Yüksek saflıkta amorf silika tozundan oluşan beyaz tüylü bir tozdur. Boyutu küçük parçacığı nedeniyle geniş spesifik yüzey alanı, güçlü yüzey adsorpsiyonu, geniş yüzey enerjisi avantajlarına sahiptir (Maheswaran *et al.* 2013).

Araştırmalara göre betonun özellikleri ve hidratasyon mekanizması üzerindeki etkileri nedeniyle en çok çalışılan ve en yaygın olarak kullanılan nano malzemelerden biridir.

3.7.2 Nano silikanın özellikleri

Nano silika (SiO_2) dağılmış parçacıklara ve yoğunluğu ise "5–100 mm" aralığında değişen ayrı bir küresel şekle sahiptir. Maksimum konsantrasyonu taneciklerinin boyutuna bağlıdır. 5 mm tanecikler ağırlık olarak %15'ini, 8 mm taneciklere sahip olan ağırlığın %30'unu ve son olarak 100 mm'lik tanecikler %50'sini oluşturmaktadır. Ayrıca nano silikanın görünümü, tanelerin boyutu ve konstrasyonuna da bağlıdır. Bu nedenle eğer taneciklerin boyutu büyükse ve konstrasyonu yüksek olursa süt renginde görülmektedir. Ancak nano silikanın taneciklerinin boyutu orta büyüklükte ise rengi opak görülmektedir. Son olarak nano silikanın taneciklerinin boyutu en küçük hâlde ise renksiz bir görünümdedir (Gündoğdu 2010).

3.7.3 Nano silikanın betonun özelliklerine etkileri

Nano silikanın %0 - %5 aralığındaki farklı oranlarda betona eklenmesi sonucunda ortaya çıkan değişik mekanik özellikler yanında su emme, boşluk dağılımı, geçirgenlik, kalorimetrik analizi, termogravimatik (TGA) analizi ve XRD gibi yöntemler ile iç yapısal ve fiziksel özellikleri de incelenebilmektedir (Durgun 2017).

Nano silika SiO_2 geniş bir yüzey alanına sahip olduğu için betonda kullanıldığında mükemmel bir performans göstermektedir. Aynı zamanda yüksek özgül yüzey olmasına rağmen betonun daha mükemmel performans göstermesini sağlamaktadır (Bagheri *et al.* 2013).

Nano silikanın; betonun priz süresi, çökme, rötre, dayanıklılık ve mekanik özelliklerine etkileri bulunmaktadır. Nano silika, çimentonun bir kısmını değiştirmek için kullanıldığında nano silikanin yüksek aktivitesi betonun hidratasyon reaksiyonunu

desteklemeye yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda nano silikanin priz süresini kısaltmaktadır (Pekmezci ve Atahan 2014).

Diğer yandan nano silika "SiO_2", betonun hidratasyon derecesini artırarak beton matrisinin gözeneklerini dolduran daha fazla C-S-H jeli üretmektedir. Öte yandan aktif olmayan nano silika "SiO_2", boşluk yerleri doldurma rolü oynamaktadır. Nano silika, daha düşük su tüketimine sahiptir ve şantiyede gereken beton miktarını azaltmaktadır (Wang *et al*. 2016).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Kullanılan Malzemeler

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ile nano silikanın farklı oranlarla betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Kullanılan tüm malzemelerin özellikleri göz önünde bulundurularak, referans karışım tasarım kodlarına ve yöntemlerine göre mükemmel veya optimal oranlar seçilmelidir.

4.1.1 Kaba agrega

Tez çalışma süresinde Kerkük'te bulunan Kara Salım adlı bölgede kullanılan kaba agrega maksimum 12 mm boyutunda kırma çakıllar ve Şekil 4.1'de görüldüğü gibi kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Kullanılan kaba agrega

Irak özelikleri No. 45- 1984 sınırlarına göre kaba agrega özellikleri, sınıflandırılması ve sülfat içeriği aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir (IQS No. 45. 1984). Kaba agrega üzerine

yapılan deneyler, Kerkük Yapı Laboratuvarı ve OLAB tarafından yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Kaba agrega için elek analizi ve sülfat içeriği

ELEK AÇIKLIĞI (mm)	KÜMÜLATİVE GEÇEN %	(IRAK ÖZELLİKLERİ NO.45-1984, BÖLGE 3) GÖRE KÜMÜLATİVE GEÇEN %
14	100	90-100
10	61	50-85
5	4	0-10
Sülfat İçeriği		
ÖZELLİK	**SONUÇ**	**IRAK ÖZELLİKLERİ (NO.45/1984)**
SO_3 %	0,0485	≤ 0,5

4.1.2 İnce agrega

Bu çalışmada kullanılan doğal kum, Kerkük'te bulunan Kara Salim bölgesinden alınmıştır ve Şekil 4.2'de gösterildiği gibi kullanılmıştır.



Şekil 4.2 Kullanılan ince agrega

Kullanılan ince agregayı Irak özellikleri No. 45-1984'e göre sınıflandırılması ve sülfat içeriği gösterilmiştir (IQS No. 45. 1984). İnce agrega üzerine yapılan deneyler, Kerkük

Yapı Laboratuvarı ve OLAB tarafından yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.2'de verilmiştir**.**

Çizelge 4.2 İnce agrega için elek analizi ve sülfat içeriği

ELEK AÇIKLIĞI (mm)	**KÜMÜLATİVE GEÇEN %**	**(IRAK ÖZELLİKLERİ NO.45-1984, BÖLGE 2) GÖRE KÜMÜLATİVE GEÇEN %**
10	100	100
4,75	92	90 – 100
2,36	75	75 – 100
1,18	64	55 – 90
0,60	52	35 – 59
0,3	22	8 – 30
0,15	4	0 – 10
0,075	2	≤ 5
SÜLFAT İÇERİĞI		
ÖZELLIK	**SONUÇ**	**IRAK ÖZELLİKLERİ (NO.45/1984)**
SO_3, %	0,059	≤ 0,1

4.1.3 Çimento

Bu çalışmada ticari olarak temin edilebilen “MAS” çimento üretim fabrikasının OPC (Ordinary Portland Cement) adlı normal portland çimentosu (CEM 1) kullanılmıştır. MAS çimento üretim fabrikası basınca göre çeşitli çimentolar üretmektedir. Bu çalışmada çimentonun basınç dayanımı 42.R MPa olan çeşidi aşağıdaki Şekil 4.3'te görüldüğü gibi kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri, Irak özellikleri No. 5 -1984’e göre uygun olduğu gösterilmiştir (IQS No. 5. 1984).



Şekil 4.3 Kullanılan MAS çimentosu

Aşağıdaki çimentonun kimyasal analizi Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca çimentonun fiziksel özellikleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Bu özellikler MAS şirketini tarafında alınmıştır.

Çizelge 4.3 MAS çimentosunun kimyasal analizi

OKSİT	**%**	**IRAK ÖZELLİKLERİNE NO 5: 1984 GÖRE SINIRLARI**
CaO	66,26	-
Fe_2O	3,73	-
SiO_2	19,11	-
Al_2O_3	6,42	-
MgO	2,58	< 5
SO_3	2,33	< 2,8
KİREÇ DOYGUNLUK FAKTÖRÜ	0,91	0,66 – 1,02
KIZDIRMA KAYBI	2,20	< 4%
ÇÖZÜNMEYEN KALINTI	0,68	<1,5 %

Çizelge 4.4 MAS Çimentonun fiziksel özellikleri

FIZIKSEL ÖZELLİKLERİ	**DENEY SONUÇLARI**	**IRAK ÖZELLİKLERİNE NO 5: 1984 GÖRE SINIRLARI**
İNCELIK, cm^2/gm	3.389,000	> 2800
AYARLAMA ZAMANI : BAŞLAMA BITIŞ	 120 dk 242 dk	 ≥ 45 dk ≤ 10 saat
BASINÇ DAYANIMI MPa 3 GÜN 28 GÜN	 25,4 48	 ≥ 20 ≥ 42,5

4.1.4 Kimyasal katkı (Süper akışkanlaştırıcı)

Beton karışımlarında işlenebilirlik ayar malzemesi olarak Construction Chemicals (HMA) firmasından satın alınan HMP 800 yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri aşağıdaki Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 Kullanılan süper akışkanlaştırıcının özellikleri (HMP 800)

ÖZELLİK	DEĞER VEYA TANIMI
ESASLI MADDE	POLİKARBOKSİLAT
YOĞUNLUK	1,04 – 1,08 kg/L
TOPLAM KLOR	MAKSİMUM %0,1
PH	5,9 -7,9
ALKALİ	5<
RENK	KAHVERENGİ

4.1.5 Nano silika SiO_2

Bu çalışmada nano silika "SiO_2" veya diğer adıyla silikondioksit nano partiküller aşağıdaki Şekil 4.4'teki gibi kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Kullanılan nano silika SiO_2

Beton katkısı olarak kullanılan nano silikanın kimyasal ve fiziksel özellikleri aşağıdaki Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Nano silikanın (SiO_2) özellikleri

ÖZELLİKLER	DEĞER VE TANIMI
MALZEME YAPISI VE FORMÜL	HİDROFİLİK SUDA ÇÖZÜNEN SiO_2
RENK	BEYAZ
YOĞUNLUK ($gm\backslash cm^3$)	2,2 – 2,6
SAFLIK	98 %
ORTALAMA PARTIKÜL ÇAPI (Nm)	20
YÜZEY ALANI (m^2/gr)	230
KAYNAK	ÇİN

4.2 Kalıp Hazırlama

Bu çalışmada deneylere bağlı olarak birkaç çeşit kalıp kullanılmıştır. Kalıp açıldıktan sonra numunenin çıkarılmasını kolaylaştırmak için tüm kalıplar aşağıdaki Şekil 4.5'teki gibi temizlenmiş ve yağlanmıştır. Kullanılan kalıp çeşitleri ve yapımı aşağıdaki şekilde sıralanabilmektedir.



Şekil 4.5 Kalıpların temizlenmesi ve yağ ile yağlanması

4.2.1 Basınç dayanımı deney kalıpları

Basınç dayanımı deneyi için kullanılan kalıplar BS 1881-101'e göre küp olarak şekillendirilmiştir (BS 1881-101 1983). Kullanılan her kalıbın ölçüleri (150 x 150 x 150) mm'dir ve kalıplar çömlek taşından üretilmiştir.

4.2.2 Yarma dayanımı deney kalıpları

Yarma mukavemeti deneyi için kullanılan kalıplar "ASTM C31/C31M"ye göre silindir olarak şekillendirilmiştir (ASTM C31/C31M 2019). Kullanılan her kalıbın ölçüleri (100x200) mm'dir. Kalıplar tarafımızca hazırlanmış olup plastikten yapılmıştır.

4.2.3 Eğilme dayanımı deney kalıpları

Eğilme dayanımı deneyi için kullanılan kalıplar "ASTM C31/C31M"ye göre prizma şeklinde yapılmıştır (ASTM C31/C31M 2019). Kullanılan her kalıbın ölçüleri (100x100x400) mm'dir. Kalıplar tarafımızca hazırlanmış olup tahtadan yapılmıştır.

4.3 Beton Karıştırma ve Hazırlama

4.3.1 Karışım oranı

ACI 211.4R.08 karışım tasarım yöntemine göre hedeflenen tasarım, gücü yüksek dayanımlı beton elde edilmek için tasarlanmıştır (ACI 211-4R 2008). Bu çalışmada tasarlanan beton karışımı için 420 kg/m^3 çimento kullanılmış ve bunun bir kısmı üç farklı oranda nano silika (%0,5, %1,5, %2,5) ikame edilerek değiştirilmiştir. Karışımlar için içerikleri sabit parametreler, sırasıyla su/çimento (0,4), kaba agrega (1100 kg/m^3), ince agrega (712 kg/m^3) ve süper akışkanlaştırıcı (2,8 kg/m^3) şeklindedir.

4.3.2 Çimento ile ikame maddeleri karıştırma

Yüksek dayınımlı betonu (YDB) üretmek için betonun iyi karıştırılması esastır. Ortalama karışımlara eklenmeden önce ikameli çimento ayrıca karıştırılmalıdır. Nano silika için özel işlem gerektiren nano tozun yüksek yüzey alanı nedeniyle, toz tipi nano için literatürde pek çok karıştırma yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemlerden biri de nano tozların çimento ile kuru karıştırılmaları ve tüm karışımlarda 10 dakika süresince elektrikli karıştırıcının kullanılmasıdır. Çimentonun nano silika ile karışımı için Şekil 4.6'da görüldüğü gibi elektrikli karıştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 4.6 Karışımların elektrikli karıştırıcı ile karıştırılması

Bu çalışmada beton karıştırmak için 60 kg kapasiteli dikey tamburlu mikser aşağıdaki Şekil 4.7'de görüdüğü gibi kullanılmıştır. Karıştırma işlemine başlamadan önce karışımın bileşenleri (kaba ve ince agregalar, çimento ve nano ölçekli silika) dijital tartar ile tartılmıştır. Beton bileşenleri yerleştirmeden önce mikserin iç yüzeyi nemden arındırılmalıdır.

Karışımın hazırlanması için aşağıdaki adımlar takip edilmelidir:

1- Suyun karıştırılması iki kısma ayrılır, ana kısım (yaklaşık %70) ayrı ayrı süper akışkanlaştırıcının (HMP 800) tamamı ile yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır.

2- Mikseri çalıştırmadan önce karışım suyunun bir kısmı (yaklaşık %25) ile birlikte iri agrega ilave edilip mikser birkaç devir (≤ 0,5 dakika) çalıştırılmış ve ardından durdurulmuştur.

3- Daha sonra bağlayıcı maddeler (önceden karıştırılmış çimento ve nano silika), ince agrega ve karışım suyunun büyük kısmı atılarak HMP 800 mikser beslenip ardından 5 dakika çalıştırılmıştır.



Şekil 4.7 Kullanılan dikey tamburlu mikser

4.3.3 Taze betonun dökümü ve sıkıştırılması

Beton karışımı küpler için üç kat, silindir ve prizma kalıplar için iki kat olarak kalıplara dökülmüş ve betonu sıkıştırmak için Şekil 4.8'deki gibi döküm sırasında mekanik bir vibratör kullanılmıştır.



Şekil 4.8 Mekanik vibratör

4.3.4 Kürleme

Tüm beton numuneleri deney yapılmadan önce kürlenmelidir. Bu nedenle numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra "ACI 308R-2"ye göre uygun bir işleme tankına veya sis odasına yerleştirilmelidir (ACI 308R-2 2008). Ayrıca numuneler farklı kısaltmalar ile Çizelge 4.7'de adlandırılmıştır.

Çizelge 4.7 Numunelerin adlandıran kısaltması

BETON KARIŞIMLARI	**NUMUNELERİN ADLANDIRAN KISALTMASI**
RBK	REFERANS BETON KARIŞMI
NS 1	%0,5 KULLANILAN NANO SILIKA
NS 2	%1,5 KULLANILAN NANO SILIKA
NS 3	%2,5 KULLANILAN NANO SILIKA

Bu çalışmada musluk suyu ile doldurulmuş bir arıtma tankı kullanılmıştır. Numuneleri 7, 28, 56 günlük yaşa kadar kürleme havuzuna aşağıdaki Şekil 4.9'da görüldüğü gibi uygulanmıştır.



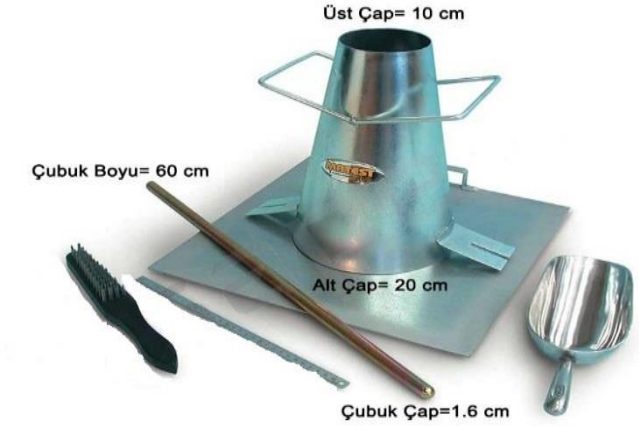
Şekil 4.9 Kürleme havuzu

4.4 Beton Üzerine Yapılan Deneyler

4.4.1 İşlenebilirlik deneyi (Akış çökme-slump deneyi)

Taze betonun yoğunlunu veya betonun akıcılık derecesini bulmak için yapılmaktadır. Kıvamını belirleyen en önemli faktör su miktarıdır (Gambhir 2004). Bu deney, "ASTM C143" standardına göre uygulanmıştır (ASTM C143 2020). Deney, hem laboratuvarda hem de sahada beton kıvamını ölçebilmektedir. Basit ve kolay uygulanabilir bir deney yöntemi olduğu için "çökme deneyi yöntemi" taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla en çok kullanılan ve en popüler test yöntemidir (Gambhir 2004).

Çökme deneyi için metaldan yapılmış üst ve alt uçları açık konik bir huni ve betonu batırmak için kullanılan yuvarlak bir çelik çubuk kullanılmaktadır. Ölçü olarak koniğin hunisinin tabanının çapı 20 cm, üst ucunun çapı 10 cm ve uzunluğu 30 cm'dir. Alt ucun yakınında, huninin duvarına dışardan bağlanan karşılıklı iki metal çıkıntı bulunmaktadır. Çökme hunisinin ölçümleri aşağıdaki Şekil 4.10'da gösterilmiştir (Gambhir 2004).

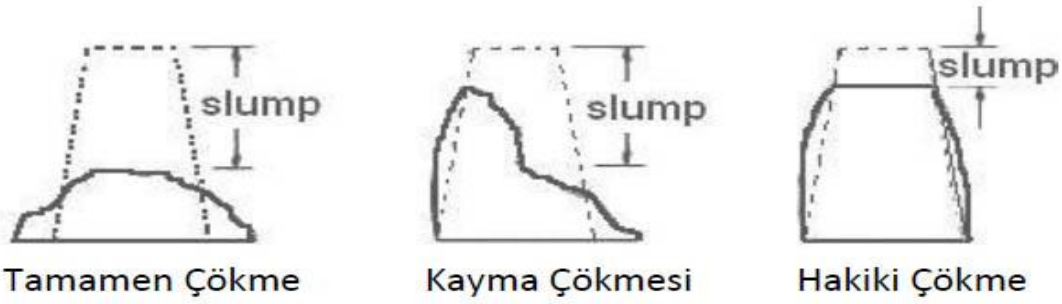


Şekil 4.10 Çökme hunisi (Gambhir 2004)

Betonda çökmenin ölçülmesi, betonun üç tabaka hâlinde huniye yerleştirilmesinden sonra huninin yavaşça dikey olarak yukarıya kaldırılıp çöken betonun yanına yerleştirilmesiyle yapılır. Taze betonun çökme değeri, çökme hunesinin üzerine yatay olarak yerleştirilen

çubuğun alt yüzeyi ile çökmüş olan betonun üst yüzeyi arasındaki mesafenin hesaplanmasıyla ortaya çıkar.

- Betonun çökmesi, aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibi taze betonun yapısına bağlı olarak farklı tarzlarda gerçekleşmektedir. Taze betonun çökme biçimleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir (Andayani ve Madenda 2016).



Şekil 4.11 Taze betonun çökme şekilleri (Gambhir 2004).

- Hakiki çökme: Betonun üst kesitinde meydana gelen kütlenin şeklinde fazla bozulma ve kırılma olmadan eşitten daha az ve aşağı yukarı eşit oldukları çökme durumu olarak tanımlanmaktadır. Bu durumuda olan çökme betonun yeterli yapışkanlığa sahip olduğunu göstermektedir.

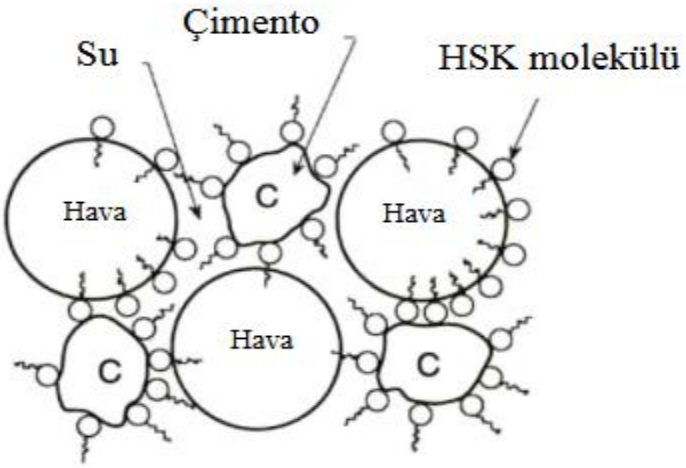
- Kayma çökme: Bir tarafında küçük diğer tarafında ise büyük bir çökme olan bir beton kütle tipidir. Bu tipte çökme, betonun kütlesinin yeterli yapışkanlığa sahip olmadığını göstermektedir. Kayma çökmesi, karışımlarda ara sıra görülmektedir. Ancak genel olarak kayma çökmesi, betonun zayıf dökülebilirliğini göstermektedir.

- Tamamen çökme: Genellikle beton karışımının içinde çok fazla su miktarı olduğu ve karışımda çok az miktarda çimento kullanıldığı anlamına gelmektedir (Andayani ve Madenda 2016).

4.4.2 Betonda hava boşluğunun ölçümü

Taze betonun hava içeriği, hava boşluk ölçer aracılığıyla ölçülmektedir. Bu "ASTM C231" standardına göre kullanılmaktadır (ASTM C231 2003). Betonda oluşan hava kabarcıkları, yüksek iç basınç nedeniyle gelişmekte olup beton yüzeyine ulaştığında bu basıncın etkisiyle yok olmaktadır. Hava Sürükleyici Katkılar (HSK), suyun yüzey gerilimini azaltmakta, mekanik deformasyonlara karşı durmakta ve kabarcık oluşumu kolaylaştırmaktadır (Nagi 2007).

Betonlarda hava kabarcıkları bağlanarak daha büyük boyutlu hava kabarcıkları oluşturabilmektedir. Sonuç olarak betondan çıkma olasılıkları daha yüksek olup mekanik darbelere ve etkilere karşı daha az dayanıklı olmaktadır (Whiting ve Nagi 1998). Betonda hava boşluklarınnın stabilitesinin hidrofilik ucun çimento taneleri üzerinde haraketsiz hâle getirilmesi ile sağlanması Şekil 4.12'de göterilmektedir (Şahin 2013).



Şekil 4.12 HSK moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları (Şahin 2013)

Hava boşluğu ölçer cihazı birçok farklı kapasitede olabilmektedir. Bu çalışmda kullanılan cihaz, aşağıdaki Şekil 4.13'te görüldüğü gibi 8 litre kapasiteli silindirik bir kazandır. 200 mm çapında kapağı olup kapağın üstünde bir basınç göstergisi, hava pompası ve yanında iki tane valften oluşmaktadır.



Şekil 4.13 Hava boşluğu ölçer cihazı

Aşağıdaki Çizelge 4.8'de bu çalışmada kullanılan hava boşluğu cihazının teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.8 Hava boşluğu ölçer cihazın teknik özellikleri

KAPASİTE	8 LİTRE
HAVA İÇERİĞİ ORTALAMASI	0-100 %
ÇAPI	20 cm
YÜKSEKLİĞİ	25 cm
CİHAZ AĞIRLIĞI	3900 kg
BETONLA DOLDURULMUŞ CİHAZ AĞIRLIĞI	19 kg
ÜRETİM YERİ	ALMANYA

4.4.3 Mekanik deneyler

Betonun özellikleri üzerinde zamanın ve ortam neminin bir fonksiyonu vardır. Bu nedenle beton üzerindeki deneyler, belirtilen veya bilinen koşullar altında yapılmalıdır. Mekanik deneyler, genel olarak tahribatlı ve tahribatsız deneyler olarak sınıflandırılabilmektedir. Bu çalışmada bütün numuneler üzerinde tahribatlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız deneyler ise beton numunelerine ait basınç dayanımlarının sonuçları başarılı olduğu için sadece Schmidt çekici deneyinde kullanılmıştır.

- **Tahribatlı deney**

➢ **Beton basınç dayanımı deneyi**

Sertleşmiş beton üzerinde yapılan en yaygın deneydir. Deney, kısmen uygulanması kolay olduğu ve kısmen de betonun istenen özelliklerinin çoğu nedeniyle niteliksel olarak basınç dayanımı ile ilgilidir (Asteris ve Mokos 2020). Genelde tek eksenli sıkıştırma deneyi için kullanılabilecek iki tür numune vardır: küp ve silindir (Felekoğlu ve Türkel 2005).

Belirli bir beton karışımının ölçülen basıncının deney yapılan numunelerin şekline göre değiştiği bilimsel olarak gözlemlenmektedir. Bu soruna bir çözüm getirmenin teorik veya matematiksel bir yolu hâlâ aranmaktadır. Bu nedenle basınç dayanma deneyi numuneleri için uygun şekil ve boyutun seçilmesinde uluslararası standartlar kendi aralarında farklılık arz etmektedir. İngiliz standartlarının küp, ABD standartlarının silindir ve İsviçre standartlarının prizma şeklinde numuneleri kullandığı görülmektedir. Irak'ta İngiliz standartları geçerlidir. Denklem (4.1) kullanılarak basınç dayanımı hesaplanmaktadır.

$$F_c = \frac{P}{Ac} \qquad (4.1)$$

F_c: Basınç dayanımı. MPa (N/mm^2)

P: En büyük yük kırılma anında ulaşılan (N)

A_c: Basınç yükünün uygulandığı numune kesit alanı (mm^2)

Küp için (BS 1881-108)'e göre numune hazırlanmıştır (BS 1881-108 1983). Kalıp ölçüsü 150×150×150 mm olarak, basınç dayanımı BS 1881-116 özelliklerine göre gerçekleştirilmiştir (BS 1881-116 1983). Betonun basınç dayanımını izlemek için farklı oranlarda nano silika eklenerek 150 mm boyutunda 36 beton küp dökülmüştür. Numunelerin yaşı 7, 28 ve 56 günlük olacak şekilde ve her yaştan her karışım için üç küp

yapılmıştır. Bu deneyi OLAB Laboratuvarı'nda bulunan CONTROLS olarak adlandırılan deney cihazı kullanılarak sıkıştırma deneyi yapılmıştır. Numunelerinden biri üzerine yapılan basınç dayanımı testinde deney makinesi, aşağıdaki Şekil 4.14'teki gibi uygulanmıştır.



(a) Kırılmadan önce (b) Kırıldıktan sonra

Şekil 4.14 Basınç dayanımı deney cihazı

- **Yarma dayanımı deneyi**

Betonun yarma dayanımını doğrudan ölçmek çok karmaşıktır. Bölünmüş yarma mukavemetini ise gerçekleştirmesi zor değildir ve diğer gerilim deneylerine göre sonuçları daha kabul edilebilirdir. Bu nedenle yarma deneyinde belirlenen dayanım, betonun gerçek çekme dayanımına daha yakındır (Gerges *et al.* 2015). Yarma deneyinde numune ASTM C496/C496M'ye göre (150x300) mm veya (100x200) mm'lik silindirik bir numune hâlinde yerleştirilerek yapılabilmektedir (ASTM C496/C496M 2017). Bir basınç dayanımı, deney makinesinin yükleme yüzeyleri arasında yatay olarak ve yük, çap boyunca silindirin kırılmasına kadar uygulanmaktadır. Denklem 4.2 göstermektedir ki eksen boyunca yük uygulandığında, silindirin dikey çapındaki bir eleman bir dikey çekme gerilimine maruz kalmaktadır.

$$\text{Çekme gerilmesi} = \frac{2p}{\pi DLy} \quad (4.2)$$

P = Numuneye gelen basınç yükü (N)

Ly = Numunenin boyu (mm)

D = Numunenin çapı (mm)

ASTM C496/C496M özelliklerine göre dolaylı çekme deneyi yapılmıştır. Betonun çekme dayanımının gelişimini izlemek için 100 x 200 mm boyutlarında 36 adet beton silindir referans karışma ait ve farklı içeriklerde nano silika eklenerek dökülmüştür. Numunelerin yaşı 7, 28 ve 56 günlüktür ve her yaştan her karışım için üç silindir yapılmıştır.

Bu çalışmada yarma (çekme) deneyi SEKO Laboratuvarı'nda bulunan ANKARIN malzeme deney cihazı ve Türkiye'de imalatı olan kullanılarak aşağıda Şekil 4.15'te gösterdiği gibi gerçekleştirilmiştir.



(a) Kırılmadan önce (b) Kırıldıktan sonra

Şekil 4.15 Yarma dayanımı deneyi cihazı

- **Eğilme dayanımı deneyi**

Numune, ortadan ve üçte bir noktasından yüklenen basit kiriş yöntemleri kullanarak yapılmakta olup ortadan yüklenen basit kiriş yöntemlerindeki numuneye orta noktasından tek bir yük uygulanmıştır. Numunede üçte bir noktasında yükü ise numunenin üzerine iki tekil yük olarak eşit aralıklarda yapılmıştır. **(**Bakar *et al*. 2022**).** Denklem 4.3 göstermektedir ki kopma modülünün hesaplanması ASTM C293'e göre (ASTM C293 2016) yapılmaktadır.

$$R = \frac{3PLe}{2bd^{2}} \qquad (4.3)$$

R: Eğilme dayanımı (MPa)

P: Deney makinesi tarafından belirtilen maksimum uygulanan yük (N)

Le: Masnet silindirler arası açıklığı (mm)

b: Numunenin ortalama genişliği, kırılma noktasında (mm)

d: Numunenin ortalama derinliği, kırılma noktasında (mm)

Eğilme dayanımı deneyi ASTM C293-02'ye göre yapılmıştır. Betonun eğilme mukavemetinin gelişimini izlemek için farklı oranlarda nano silika eklenerek 100 x 100 x 400 mm boyutlarında 36 beton prizma dökülmüştür. Çalışmanın numuneleri yaş olarak 7, 28 ve 56 günlük ve her yaştan her karışım için üç prizme olarak hazırlanmıştır.

Eğilme deneyi SEKO Laboratuvarı'nda bulunan ANKARIN malzeme deney cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın üretim ve imalat yeri Türkiye'dir ve deneyde kullanılan numuneler ile eğilme deney cihazı aşağıdaki Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



(a) Kırılmadan önce (b) Kırıldıktan sonra

Şekil 4.16 Eğilme deneyi cihazı

- **Tahribatsız deneyleri**

➢ **Schmidt çekici deneyi (schmidt hammer)**

Çoğu ülkede betonun basınç dayanımını bulmak için beton çekici veya başka bir adıyla Schmidt çekici yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu, kolay kullanımı, ucuz, taşınabilir ve gösterişli olmasından kaynaklanmaktadır. Schmidt çekici, betonun düzgün dağılımını ve basınç dayanımını kontrol etmek için kullanılan tahribatsız bir deney aracıdır (Tunçağı 2000).

Deney çekici, betonun küp şeklinde olan numunesine belirli bir kuvvetle çarpmaktadır. Dokunduğu yüzeyin sertliğine göre vurup geri dönmektedir. Algılama mekanizmasına, kaynaklara göre en az 10-15 nokta arasında ve fazlası olabilmekte; geri tepme sayısı R ölçülmekte ve cihazın iğnesinde gösterilmektedir (Ergün ve Kürklü 2005).

Geri tepme katsayısı R değeri ile ifade edilmekte, aritmetik ortalamasının toplam ∑n\n olarak hesaplanması gerekmektedir. Bulduğumuz değer, ± 5 kabul edebilenin üzerinde

ise yeniden bir ortalama hesaplanmaktadır. Yani mesela ilk hesap değeri 25 ise diğer hesap değeri 30 arasında alınmaktadır. Yeni aritmetik değeri 27,5 olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada taşınabilir Schmidt çekici (Controls – İtalya imalatı) Şekil 4.17'deki gibi kullanılmıştır.



Şekil 4.17 Schmidt çekici aleti

Geri tepme katsayısı değerinde R deneyi uygulanırken birkaç faktör etkili olmaktadır. Bunlar; çimento tipi, agrega türü, yüzey durumu ve nem içeriği, betonun kürlenmesi gibi faktörlerdir (Kumavat *et al*. 2021). Geri tepme katsayısı, şekillere göre basınç dayanımı cinsinden her bir şekil için kendisine ait çizelgelerden bulunmaktadır. Geri tepme katsayısı değerleri aşağıdaki Çizelge 4.9'da gösterilmektedir (Gupta *et al.* 2015).

Çizelge 4.9 R geri tepme katsayısı ve beton kalitesi (Gupta *et al.* 2015).

R GERİ TEPME KATSAYISI	BETON KALİTESİ
> 40	ÇOK SERT
30 – 40 ARASI	İYİ SERT
20 – 30 ARASI	SERT
< 20	ZAYIF
0	DELAMINASYONLU

4.4.4 Betonun durabilitesi (dayanıklılık)

Betonun dayanıklılığı, iç ve dış etkilere, aşınmaya veya diğer olumsuz etkilere dayanma yeteneği olarak tanımlanabilir. Başka bir ifade ile betonun veya betonarme bir yapının zamanla özelliklerini kaybetmemesidir (Kılınçkale 2003)**.**

Betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli faktör su\çimento oranıdır. Su\çimento oranı azaldıkça betonun geçirgenliği azalmaktadır. Geçirgenlik azaldıkça zararlı kimyasalların ve nemin beton üzerindeki etkisi artmaktadır. Betonun durabiltesini etkileyen çevresel faktörler ise sülfat, donma-çözülme, sürtünme, asit, klor, karbonatlaşma olarak sayılabilir. Ayrıca alkali silika reaksiyonu, alkali karbonat reaksiyonu ve gecikmiş etringit oluşumu gibi etkiler de iç faktörler olarak bilinmektedir (Baradan ve Aydın 2013).

- **Su emme**

Beton numunelerinin su emme değerlerinin tespiti için Arşimet yöntemi kullanılmıştır. ASTM C642 standardına göre belirtilen değer, tüm beton karışımlarında su emme deneyi için uygulanmıştır (ASTM C642 2022). Numuneler, her bir karışım için üç adet küp şeklinde 150 × 150 × 150 mm boyutlarında kullanılmıştır. 28 günlük yaş numunelerin üzerine uygulanmıştır.

Su emme numuneleri kür havuzunda 28 gün boyunca tutulmuştur. Fırına giren numuneler, 105°C sıcaklıkta 24 saat süresinde kurutulup numunler tartılmıştır. Sudan çıkarılan numunelerin yüzeyi kuru bir bez ile silindikten sonra numuneleri tekrar tartılmıştır. Denklem (4.4) kullaınılarak su emme değerleri hesaplanmaktadır.

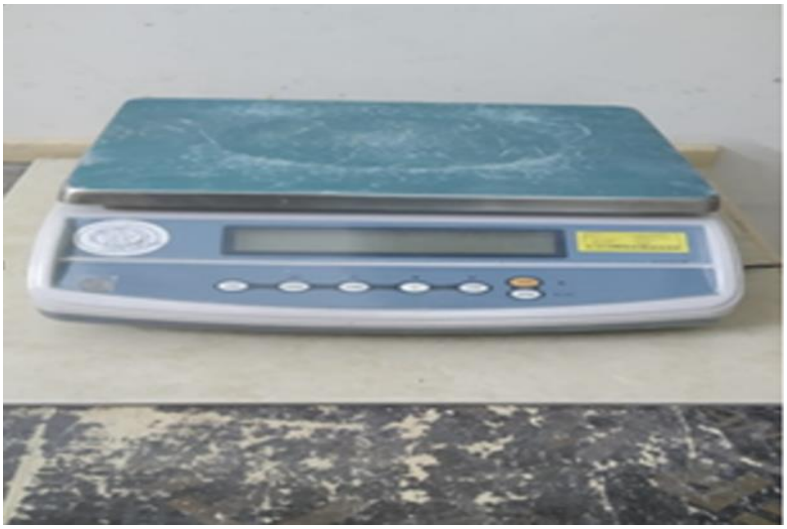
$$SE = \frac{A-B}{B} * 100 \qquad (4.4)$$

SE: Su emme

A: Doymuş yüzey kuru durumunun numune ağırlığı (kg)

B: Kuru numune ağırlığı (kg)

Aşağıdaki şekiller su emme deneyi dijital tartı Şekil 4.18'de ve elektrikli fırını Şekil 4.19'da bulunan OLAB Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.18 Dijital tartı (Dijital ölçek)



Şekil 4.19 Elektrikli fırın işlemi

5. BULGULAR

5.1 Betonun Çökme (Slump) Değerleri

Beton karışımları hazırlandıktan sonra ilk deney olan çökme (Slump) deneyi gerçekleştirilmiştir. Referans karışıma ve farklı nano silika oranları içeren karışımlara uygulanmıştır. Bütün karışımlara çökme deney aşağıdaki Şekil 5.1'de uygulandığı gibi gerçekleştirilmiştir.

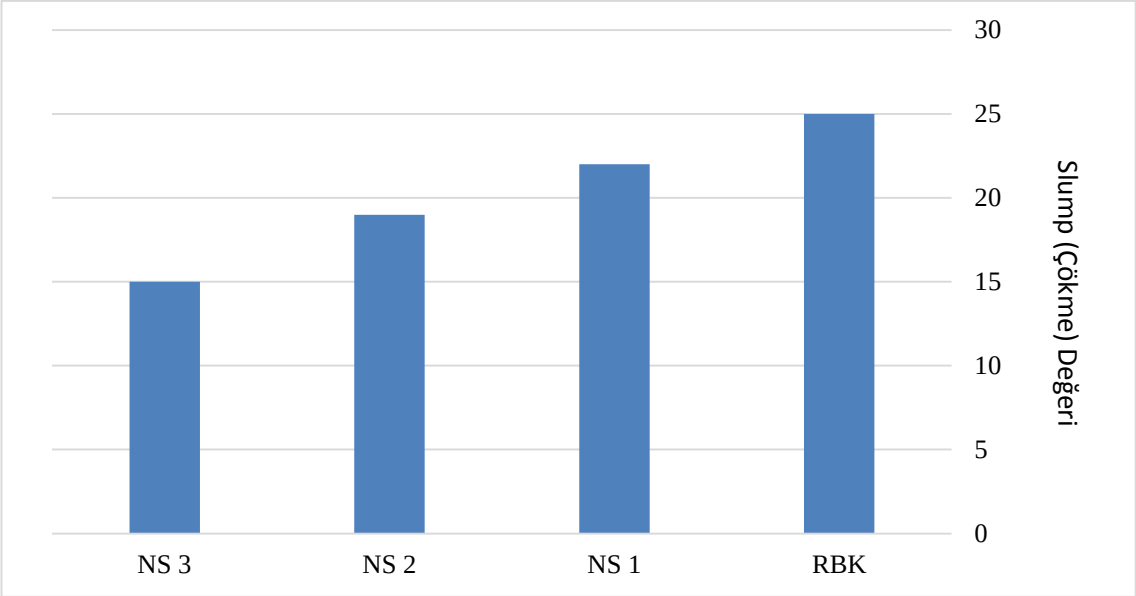


Şekil 5.1 Çökme - slump deneyi uygulamaları ve ölçülmesi

Çökme deneyi gerçekleştirildikten sonra çökme değerleri aşağıdaki Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Çökme - Slump deneyi değerleri

BETON KARIŞIMLARI	ÇÖKME (SLUMP) DEĞERİ (cm)
RBK	25 cm
NS 1	22 cm
NS 2	19 cm
NS 3	15 cm



Şekil 5.2 Beton karışımların çökme - slump deneyi değerleri

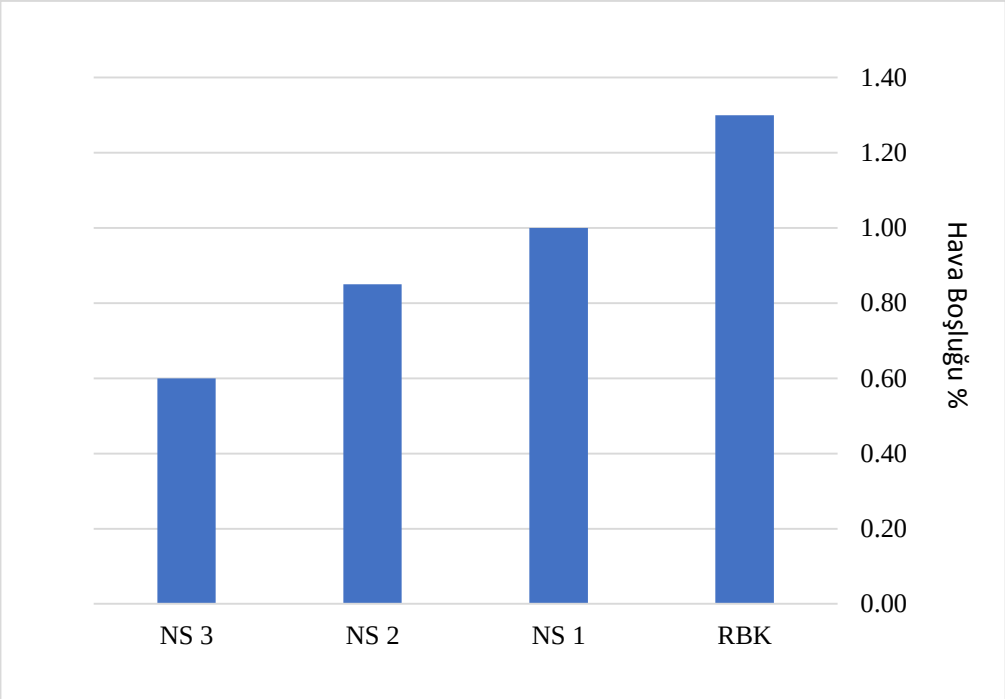
Şekil 5.2'de görüldüğü gibi çökme deneyin değerlerini not ederken referans karışımı, çökmenin değerini diğer farklı oranlarla kullanılan nano silik çökme değerlerinden daha fazla göstermiştir. Bu, nano silika içermeyen karışıma kıyasla nano karışımların düşük çökme değerine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Nano silika oranı arttıkça çökme değeri azalma göstermiştir.

5.2 Taze Betonda Hava Boşluğu Değerleri

Beton karışımlara çökme deneyi gerçekleştirildikten sonra her bir karışım için hava boşluğu değeri okunmuştur. Hava boşluğu değerleri aşağıdaki Çizelge 5.2'de görülmüştür.

Çizelge 5.2 Beton karışımlarda hava boşluğu değerleri

BETON KARIŞIMLARI	HAVA BOŞLUĞU DEĞERİ %
RBK	1,3
NS 1	1
NS 2	0,85
NS 3	0,60



Şekil 5.3 Beton karışımların hava boşluğu değerleri

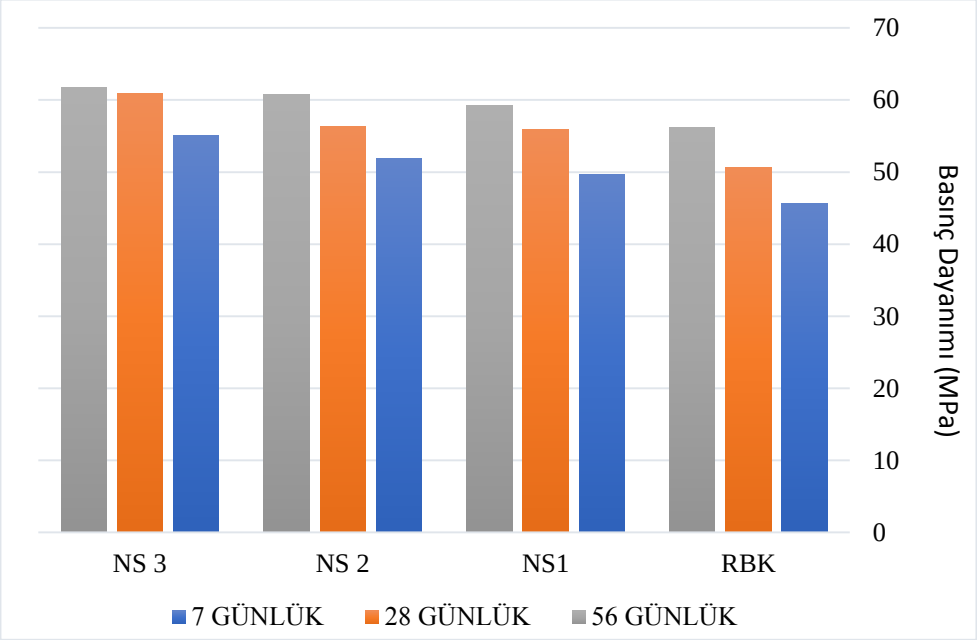
Hava boşluğu değerlerine dikkat edildiğinde referans karışımı değerinin diğer kullanılan nano silika karşımlara göre daha fazla olduğu ve Şekil 5.3'te görülmüştür. Bu, nano silikanın parçacıkların kohezyonu ve yapışması üzerinde etkili olduğunu ve karışımın bileşenleri arasındaki boşlukları azalttığını göstermiştir. Karışımlarda nano silika oranı arttıkça hava boşluğu azalma göstermiştir.

5.3 Basınç Dayanımı Deneyi Değeri

Betonların küp şeklinde olan numuneleri, basınç dayanımı deneyinde üç farklı yaş olarak (7, 28 ve 56 günlük) ve her bir karışım için üç adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. BS 1881-101'e göre numune değerlerinin ortalaması alınmış ve basınç dayanımı değerleri aşağıdaki Çizelge 5.3'te elde edilmiştir.

Çizelge 5.3 Beton karışımlarda basınç dayanımı değeri

BETON KARIŞIMLARI	BASINÇ DAYANIMI DEĞERİ (MPa)		
	7 GÜNLÜK	28 GÜNLÜK	56 GÜNLÜK
RBK	45,56	50,64	56,18
NS 1	49,65	55,91	59,28
NS 2	51,9	56,28	60,73
NS 3	55,28	60,85	61,72



Şekil 5.4 Basınç dayanımı deneyi değeri

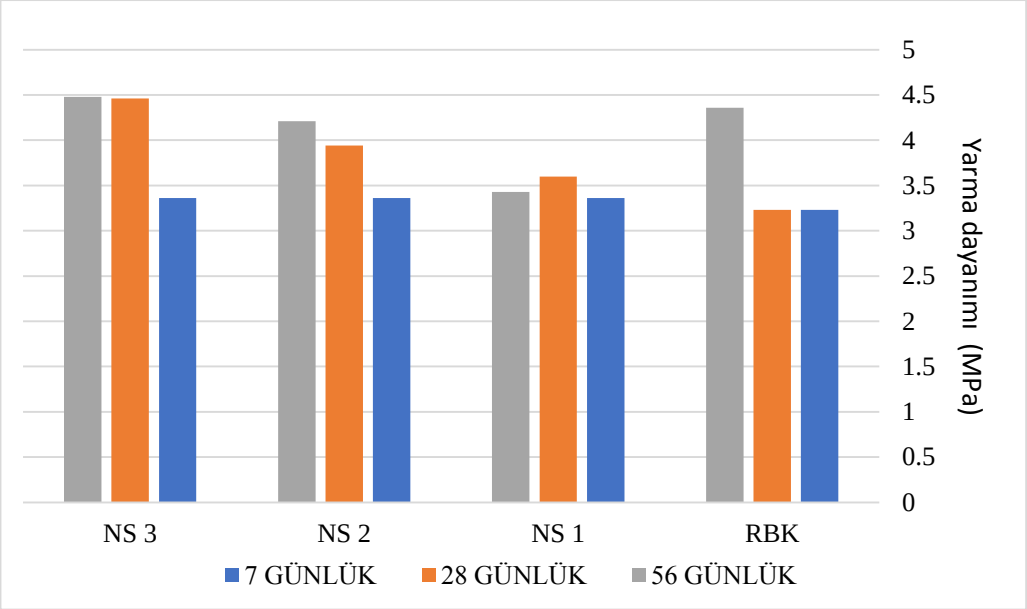
Basınç dayanımı değerlerine göre ve Şekil 5.4'te gösterildiği gibi nano silika karışımlarının değerleri refrans değerleri ile daha fazla elde edilmiştir. Bu, nano silika içeren karışımların refrans karışımına kıyasla yüksek basınç değerine sahip olduğu anlamına gelmektedir.

5.4 Betonun Yarma (Çekme) Dayanımı Deneyi Değeri

Betonların silindir şeklinde yapılan numunelerinin yarma dayanımı deneyi üç farklı yaş olarak (7, 28 ve 56 günlük) ve her bir karışım için üç adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. ASTM C496/C496M'ye göre numune değerlerinin ortalaması alınmıştır. Çizelge 5.4'te yarma dayanımı elde edilen değerler gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 Beton karışımlarda yarma dayanımı değeri

BETON KARIŞIMLARI	YARMA DAYANIMI DEĞERİ (MPa)		
	7 GÜNLÜK	28 GÜNLÜK	56 GÜNLÜK
RBK	3,23	3,23	4,36
NS 1	3,36	3,60	3,43
NS 2	3,34	3,94	4,21
NS 3	3,77	4,46	4,48



Şekil 5.5 Yarma dayanımı deneyi değeri

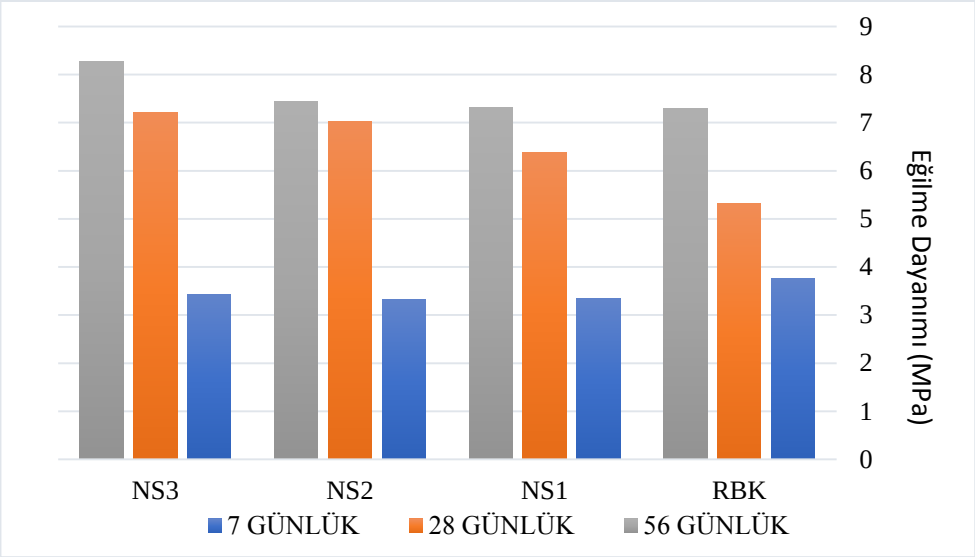
Şekil 5.5'te gösterdiği gibi yarma dayanımı değerlerine göre nano silika karışımları değerleri referans değerlerinden az bir miktar daha fazla veya birbirine çok yakın görülmüştür.

5.5 Betonun Eğilme Dayanımı Deneyi Değeri

Betonların prizma şeklinde oluşturan numunelerin eğilme dayanımı deneyi üç farklı yaş olarak (7, 28 ve 56 günlük) ve her bir karışım için üç adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. ASTM C293-02'ye göre numune değerlerinin ortalaması alınmıştır. Aşağıdaki Çizelge 5.5'te eğilme dayanımı deneyinden elde edilen değerler gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 Beton karışımlarda eğilme dayanımı değeri

BETON KARIŞIMLARI	EĞİLME DAYANIMI DEĞERİ (MPa)		
	7 GÜNLÜK	28 GÜNLÜK	56 GÜNLÜK
RBK	3,77	5,328	7,286
NS 1	3,342	6,390	7,322
NS 2	3,318	7,026	7,434
NS 3	3,42	7,216	8,271



Şekil 5.6 Eğlime dayanımı deneyi değeri

Şekil 5.6'da gösterildiği gibi çalışmada eğilme deneyi değerlerini hem referans karışımı hem de nano silika beton karışımlarının ilk haftada pek değişmediği gözlenmiştir. Ancak karışımların 28 ve 56 günlük yaş olarak değerlerinin arttığı görülmüştür.

5.6 Schmidt çekici değeri (Schmidt Hammer)

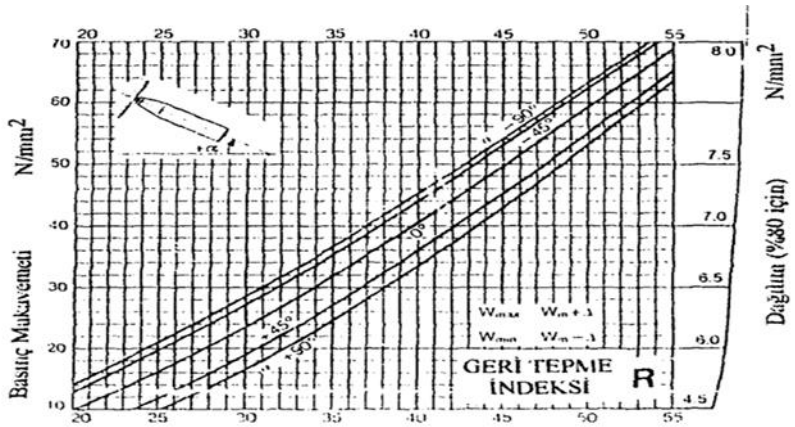
Bu deney, betonun küp şeklinde, dört farklı karışımla oluşturan ve 28 günlük yüzeylerine uygulanarak aşağıdaki Şekil 5.7'de gösterildiği gibi tek tek noktaları okunmuş ve veriler hesaplanmıştır.



a. Çekici geri tepmesinin yapılması b. Çekici geri tepmesinin okunması

Şekil 5.7 Schmidt çekici uygulaması

Çekicin geri tepmesinin ortalamasının R değerleri en az 10 noktadan ve yüzeyine dik olarak 0^o köşe derecesinde Şekil 5.8'de gösterilen küp eğrilerinde kullanılarak alınmıştır.

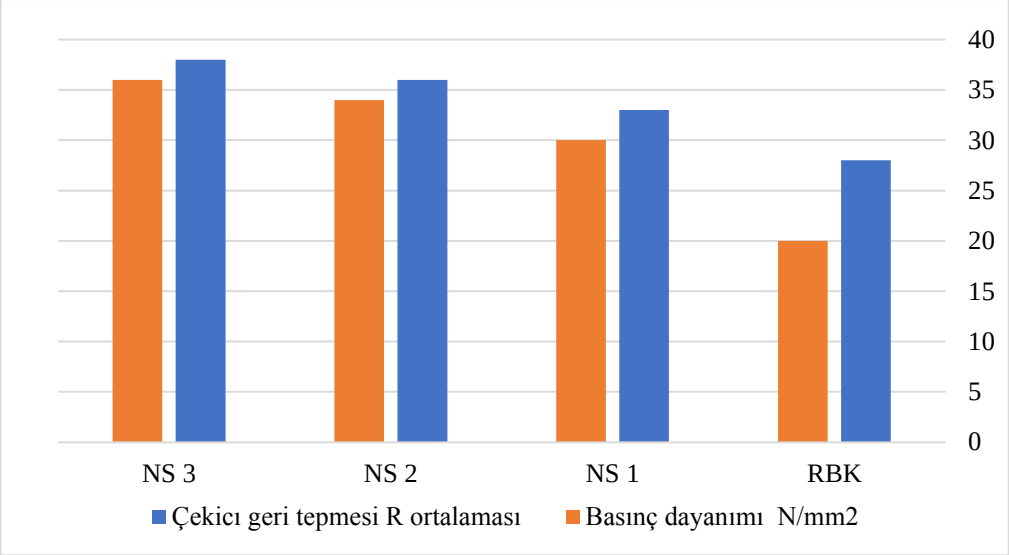


Şekil 5.8 Schmidt çekici için geri tepme indeksi-küp basınç dayanımı eğrileri

Çekicin geri tepmesinin farklı oranlardaki karışımlarda gözlenen değerleri ve basınç dayanımı aşağıdaki Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 Çekicin geri tepmesinin ortalaması R değerleri

BETON KARIŞIMLARI	ÇEKİCI GERİ TEPMESİ R ORTALAMASI	BASINÇ DAYANIMI N/mm^2
RBK	28	20
NS 1	33	30
NS 2	36	34
NS 3	38	36



Şekil 5.9 Basınç dayanımı ve çekicin geri tepme R değerleri

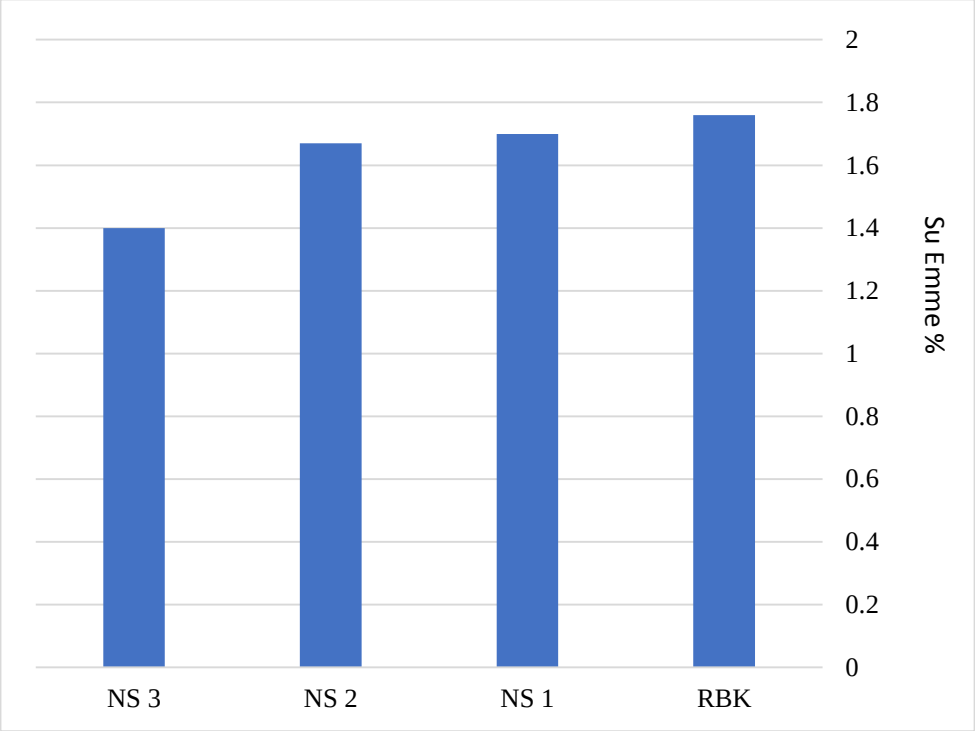
Çekicin geri tepmesini R ortalaması Şekil 5.9'da görüldüğü gibi elde edilen değerlerine göre nano silika beton karışımları refrans karışımına kıyasla daha fazla göstermiştir. Nano silika oranı arttıkça çekicin geri tepmesinin R değeri de artmıştır.

5.7 Su Emme Değeri

Bu deney, betonun küp şeklinde oluşturan dört farklı karışımıyla ve 28 günlük kalıplarda uygulanmıştır. Deney, herbir karışım için üç adet numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. ASTM C642'ye göre numune değerlerinin ortalaması alınmıştır. Çizelge 5.7'de elde edilen su emme değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 Beton karışımlarda su emme değeri

BETON KARIŞIMLARI	SU EMME %
RBK	1,76
NS 1	1,70
NS 2	1,67
NS 3	1,40



Şekil 5.10 Su emme değeri

Şekil 5.10'da, Su emme değerlerine dikkat edildiğinde referans karışım değerinin, kullanılan nano silika beton karşımlara göre az bir maiktar yüksek olduğu gözlenir. Nano silika beton karışımlardaki hava boşluklarının oranı azaldığı için nano karışımlarda su emme oranı da azalmıştır.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, referans beton karışımı nano silikalı beton karışımlar ile farklı oranlarda (%0,5, %1,5 ve %2,5) karıştırılarak özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Beton karışımlara uygulanan deneylerin analizleri ve sonuçları açıkça betounun bazı özelliklerini etkilediğini göstermiştir. Betonun özeliklerini etkileyen nano silika beton karışımların en iyisi %2,5 oranlı olanıdır.

Çökme deneyi, beton kalitesini kontrol etmenin en basit ve en iyi yollarından biridir. Betonun nano silika içeriğinin artmasıyla çökme akışının kademeli olarak azaldığı görülmüştür. Çökmenin azalma nedeni, çimentoya eklenen nano maddelerin ne kadar fazla miktarda olursa o nispette düşük akışkanlık sağlamasıdır.

Taze betonda hava boşluğunun ise referans karışımında nano silika karışımlarının değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Nano karışımlarda hava boşluklarının miktarının giderek azaldığı ve NS3 karışımının en düşük olduğu gözlenmiştir. Aslında nano silika, partiküllere bağlanıp, yapışarak karışımın bileşenleri arasındaki mesafeyi azaltmaktadır. Bu nedenle karışımdaki nano silika miktarı arttıkça hava boşluğu azalmaktadır.

Nano silikanın oranının artmasıyla betonun basınç dayanımı artırılmıştır. Basınç dayanım değerinin artmasının nedeni, nano silika oranının artmasıyla karışımın boşluklarının dolması ve betonun yoğunlunun artması olarak belirlenmiştir. Nano silika ilavesinin basınç dayanımını artırmadaki etkisinin erken yaşlarda olduğu tespit edilmiştir. Nano silika karışımlarının 56 günlükte çok etkisi bulunamamıştır. Sonuçlara göre 56 günlük numuneler, 28 günlük numunelere göre birkaç “MPa” artırılmıştır.

Nano silika oranı arttıkça yarma dayanımı da artırılmıştır. En büyük yarma (çekme) dayanımı NS3 karışımında ortaya çıkmıştır. Sonuçların birbirine çok yakın olması dikkat çekicidir. Refrans karışımın nano silika karışımlara göre yarma (çekme) dayanımı üzerinde pek etkisi gözlenmemiştir.

Eğilme dayanımı, nano silika oranının artmasıyla artırılmıştır. En büyük eğilme dayanımı NS3 kullanılan karışımda gösterilmiştir.

Schmidt hammer çekici deneyi sonuçlarına göre geri tepme sayısı, tüm numuneleri 28 günlük, tüm nano silika karışımları değerleri 30-40 aralığında görülmüştür. Bu değer; iyi, sert beton olarak tespit edilmiştir. Bu anlamda tüm nano silika beton karışımları, yüksek kaliteli veya yüksek dayanımlı beton grubu altında sınıflanmaktadır. Ancak referans karışımı, Schmidt hammer çekici değerini 28 göstermiştir. Bu değer, normal veya sert beton olarak sınıflandırılmaktadır.

Tüm nano silika karışımları, referans karışımdan daha düşük su emme özelliği göstermiştir. Nano silika beton karışımı NS3'te kullanılan su emme değerlerinin, NS1 ve NS2'den daha az olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni, artan nano silikanın çimento ile ikamesinin kimyasal reaksiyona girmesine yol açmasıdır. Bu, nano silika karışımlarının referans karışıma göre daha yoğun ve daha geçirimsiz olduğu anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

ACI 211.4R.08. 2008. Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Mater. American Concrete Institute, Pa, USA.

ACI 308R-2. 2008. Guide to Curing Concrete. American Concrete Institute, Pa, USA.

ACI 363R-10. 2010. Report on High - Strength Concrete. American Concrete Institute, Pa, USA.

Al Ghabban, A. Al Zubaidi, A. B. Jafar, M. and Fakhri, Z. 2018. Effect of nano SiO_2 and nano $CaCO_3$ on the mechanical properties, durability and flowability of concrete. In IOP conference series: materials science and engineering, 454(1): 1-10.

Alizadeh, R., Beaudoin, J. J., Raki, L., Makar, J. M. and Moudrakovski, I. 2011. CSH seeding: An approach for the nanostructural tailoring of cement based materials. In 13h International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, Spain.

Alshammari, S. 2018. The Effect of Nano Silica on Porosity and Strength. Doktora Tezi, Dayton Üniversitesi, 55 Sayfa, Dayton.

Alyasri, S. (2014). The use of nanotechnology in construction sector. Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences, 7(1): 68-80.

Ameen, K, O. Al-Sulayvani, B, J. and Al-Talabani, D, N. 2018. Investigating Flexural Strength of Beams Made With Engineered Cementitious Composite (Ecc) Under Static and Repeated Loading. 4th International Engineering Conference on Developments in Civil & Computer Engineering Applications, 56-73.

Andayani, R. and Madenda, S. 2016. Concrete Slump Classification using GLCM Feature Extraction. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 131(1): 012011.

Anderson, S. R. Mohammadtaheri, M. Kumar, D. O'Mullane, A. P. Field, M. R. Ramanathan, R. and Bansal, V. 2016. Robust nanostructured silver and copper fabrics with localized surface plasmon resonance property for effective visible light induced reductive catalysis. Advanced Materials Interfaces, 3(6): 1-39.

Arife, A. 2019. Nano Silika Kür Uygulamasının Çimento Bağlayıcılı Kompozitlerin Donma-Çözülme Direnci Üzerine Etkisinin Araştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2): 1032-1040.

Asteris, P. G. and Mokos, V. G. 2020. Concrete compressive strength using artificial neural networks. Neural Computing and Applications, 32(15): 11807-11826.

ASTM C143/C143M. 2020. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

ASTM C231/C231M. 2022. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method. ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

ASTM C293/C293M. 2016. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

ASTM C31/C31M. 2019. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

ASTM C496/C496M. 2017. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

ASTM C642. 2022. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Pa, USA.

Bagheri, A. Parhizkar, T. Madani, H. and Raisghasemi, A. M. 2013. The influence of different preparation methods on the aggregation status of pyrogenic nano silicas used in concrete. Materials and structures, 46(1): 135-143.

Bakar, M. B. C. Muhammad Rashid, R, S. Amran, M., Saleh Jaafar, M. Vatin, N. I. and Fediuk, R. 2022. Flexural strength of concrete beam reinforced with cfrp bars: A review. Materials, 15(3):1144.

Baradan, B. ve Aydın, S. 2013. Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 265-288.

Birol, T. ve Yavaş, A. 2018. Betonarme kirişlerde ultra yüksek dayanımlı beton kullanımının eğilme performansına etkisi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(1), 219-233.

Bjorn, B. Anal, K. Georgene, G. Mohammad, K. and Konstantin, S. 2012. Nanotechnology in concrete materials. Transportation Research Board (TRB), 44, Washington, USA.

Bozsaky, D. 2016. Application of nanotechnology-based thermal insulation materials in building construction. Slovak journal of civil engineering, 24(1):17-23.

BS 1881-101. 1983. Testing concrete. Method of sampling fresh concrete on site. British Standards Institute. London, United Kingdom.

BS 1881-108. 1983. Testing concrete. Method for making test cubes from fresh concrete. British Standards Institute. London, United Kingdom.

BS 1881-116. 1983. Testing Concrete. Method for determination of Compressive Strength of Concrete cubes. British Standards Institute. London, United Kingdom.

Büyüköztürk, O. and Lau, D. 2002. High performance concrete: fundamentals and application. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, US.

Chaudhari, D. Patil, T. Raichurkar, P. and Daberao, A. M. 2018. Review on Nanotechnology and Its Application in Coating Industry. International Journal of Scientific and Engineering, 9 (4): 40-43.

Cireli, A. Kutlu, B. Nurhan, O. N. A. R. ve Erkan, G. 2006. Tekstilde ileri teknolojiler. Tekstil ve Mühendis, 13(61): 7-20.

Çöl, F .2020. Isı Yalıtım Açısından Konvansiyonel Malzemelerle Nanoteknolojik Malzemelerin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydin Üniversitesi, 140 Sayfa, İstanbul.

Demir, İ. 2016. Siirt Yöresinde Farklı Santrallerde Üretilen Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Firat Üniversitesi, 108 Sayfa, Elaziğ.

Dhir, R, K. de Brito, J. Silva, R, V. and Lye, C, Q. 2019. 12-use of recycled aggregates in road pavement applications. Sustainable Construction Materials, RK Dhir, J. de Brito, RV Silva, CQ Lye, Editors. Woodhead Publishing, 451-494.

Doğangün, A. 2008. Betonarme yapıların hesap ve tasarımı: DBYBHY-2007 TS500-2000 ve Deprem yonetmeligi-2007'ye uygun. Birsen yayınevi, 758 sayfa, İstanbul.

Durgun, M. Y. 2017. Nano Silika Kullanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik Ve iç yapısal Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 232 sayfa, İstanbul.

Ergün, A. ve Kürklü, G. 2005. Mevcut betonarme yapılarda beton dayanımının belirlenmesi. Deprem Sempozyumu, 2: 23-25.

Ersoy, U. ve Özcebe, G. 2001. Betonarme Yapılar, Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti, İstanbul.

Ersöz, M. Işıtan, A. ve Balaban, M. 2018. Nanoteknoloji 1: Nanoteknolojinin temelleri. Bilal Ofset Yayınları, 274 sayfa, Denizli.

Felekoğlu, B. ve Türkel, S. 2005. Effects of specimen type and dimensions on compressive strength of concrete. Gazi University Journal of Science, 18(4): 639-645.

Fierascu, R, C. Fierascu, I. and Chican, I. E. 2021. Natural Ingredients in Functional Coatings—Recent Advances and Future Challenges. Coatings, 11(4):429.

Gambhir, M, L. 2004. Concrete Technology. Tata McGraw-Hil Publishing, Civil Engineering Series, 658 pages, New York.

Gerges, N. N. Issa, C. A. and Fawaz, S. 2015. Effect of construction joints on the splitting tensile strength of concrete. Case Studies in Construction Materials, 3, 83-91.

Gonçalves, M. C. and Margarido, F. 2015. Materials for construction and civil engineering. 1'st Edition, Cham, Switzerland: Springer.

Gopalakrishnan, K. Birgisson, B. Taylor, P. amd Attoh-Okine, N. O. 2011. Nanotechnology in civil infrastructure: a paradigm shift. Springer Science & Business Media, Heidelberg, 273 sayfa, Berlin.

Gordijn, B. 2005. Nanoethics: from utopian dreams and apocalyptic nightmares towards a more balanced view. Science and engineering ethics, 11(4): 521-533.

Gupta, P, K. Gupta, N. and Singh, A. 2015. Case study of strength evaluation of structural concrete using rebound hammer test. The Indian Concrete Journal, 89:73-82.

Gündoğdu, D. 2010. Influence of nano SiO_2 on Mechanical Properties of Mortars Containing Fly Ash.Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 93 sayfa, İstanbul.

IQS (Iraqi Standard Specifications) No. 45. 1984. Aggregate of Natural Resources Used in Concrete and Building. Central Organization for Standardization and Quality Control, Iraq.

IQS (Iraqi Standard Specifications) No. 5. 1984. Portland cement. Central Organization for Standardization and Quality Control, Iraq.

İskenderkaptanoğlu, Z. 2009. Perdeli Çerçeve Taşıyıcı Sisteme Sahip Betonarme Bir Yapının Farklı Beton Sınıflarına Göre Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 111 sayfa, İstanbul.

Jalil, W. D. A. and Kahachi, H. A. H. 2018. The Impact of Nano-Concrete in Contemporary Architecture. Wasit Journal of Engineering Sciences, 6(2): 38-45.

Joseph, T. and Morrison, M. 2006. Nanotechnology in agriculture and food. A Nanoforum report, Institute of Nanotechnology.15 sayfa, European Nanotechnology Gateway.

Kahraman, E. ve Kılıç, A. M. 2016. Agrega madenciliğinin hazır beton üretimindeki yeri. 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, 13(14), 324-329.

Kalkan, E. Yalçin, Y. Korkut, Ş, D. Tokgöz, M. ve Biber, A. 2016. Çimento Sektör Araştırması Raporu. Rekabet Kurumu. Ankara.

Kapkaç, F. 2007. Çimento Çeşitleri, Özellikleri, Hammaddeleri Ve Üretim Aşamaları. MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni, 223-232. Ankara.

Kılınçkale, F. 2003. Betonda Dayaniklilik. Türkiye Mühendislik Haberleri, 427: 32-33.

Kozak, M. ve Kozak, Ş. 2015. Su ve Isı Yalıtımının Yapılarda Emniyet ve Ekonomi Açısından Önemi. Teknik Bilimler Dergisi, 5(1): 38-47.

Kumar, A. Verma, B. and Nasrin, T. 2017. High performance concrete and its applications in civil engg. International journal of advanced research in science and engineering, 6 (2): 470-477.

Kumavat, H, R. Chandak, N, R. and Patil, I, T. 2021. Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review. Case Studies in Construction Materials, 14: e00491.

Kutucu, B. 2010. Nanoteknoloji ve Çift Duvarlı Karbon Nanotüplerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 111 sayfa, İstanbul.

Li, C. Islam, M. M. Moore, J. Sleppy, J. Morrison, C. Konstantinov, K. Dou, S.X. Renduchintala, C. and Thomas, J. 2016. Wearable energy-smart ribbons for synchronous energy harvest and storage. Nature communications, 7(1): 1-10.

Maheswaran, S. Bhuvaneshwari, B. Palani, G. S. Nagesh, R. and Kalaiselvam, S. 2013. An overview on the influence of nano silica in concrete and a research initiative. Research Journal of Recent Sciences, ISSN, 2277, 2502: 17-24.

Matthew, N, O, S. Tolulope J. A. Abayomi A, M. and Sarhan M, M. 2021. Future of Nanotechnology. International Journal of Scientific Advances, 2(2): 131-134.

Mnyusiwalla, A. Daar, A. S. and Singer, P. A. 2003. Mind the gap: Science and ethics in nanotechnology. Institute of Physics Publishing, Nanotechnology, 1(4): 9–13

Murty, B. S. Shankar, P. Baldev, R. Rath, B. B. and Murday, J. 2013. Textbook of nanoscience and nanotechnology. Springer Science & Business Media, Heidelberg, 244 sayfa, Berlin.

Nagi, M. 2007. Evaluating air-entraining admixtures for highway concrete. Transportation Research Board. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Vol. 578, 49 sayfa, Washington.

Osman, Ü. 2013. Yüksek Dayanımlı Kendiliğinden Yerleşen Beton Dayanımına Su/Ç Oranı ve Katkıların Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(2): 1-8.

Önder, E. 2019. Nano silika Katkılı Geleneksel Betonlarin Mekanik ve Elastik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 67 sayfa, İstanbul.

Özalp, F. 2016. Kür Koşulları Ve Yalıtımın Yüksek Dayanımlı Betonların Geçirimlilik, İç-Yapı Ve Mekanik Özeliklerine Etkileri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 202 sayfa, İstanbul.

Özbora, A. A. Tarhan, M. ve Engin, Y. 2013. Nanoteknolojinin Betonun Geleceğindeki Rolü. Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildirileri. Türkiye Hazır Beton Birliği Akademi Dergisi, 162: 304-312.

Pekmezci, B. Y. ve Atahan, H. N. 2014. Kimyasal ve nano katkılar: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. Hazır Beton Dergisi, Mayıs-Haziran, 4: 69-82.

Phan, L. T. 2002. High-strength concrete at high temperature-an overview. Proceedings of 6th international symposiumon utilization of high strength/high performance concrete, Leipzig, Germany, 5: 501-518.

Reinhardt, H. W. and Weber, S. 1998. Self-curing high performance concrete. International Journal of Engineering Research & Technology, 10 (4): 208-209.

Sanchez, F. and Sobolev, K. 2010. Nanotechnology in Concrete- a review. Construction and Building Materials, 24(11): 2060-2071

Servatmand, A., ve Şimşek, O. 2018. Yüksek performanslı harç üretiminde optimum nano malzeme oranlarının belirlenmesi. Politeknik Dergisi, 21(2): 327-332.

Sobolev, K., and Gutierrez, M. F. 2005. How nanotechnology can change the concrete world. American Ceramic Society Bulletin, 84(10): 14.

Şahin, Y. 2013. Hava Sürükleyici Katkıların Karakterizasyonu ve Deney Koşullarının Betonun Donma-Çözülme Hasarına Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 204 sayfa, İstanbul

Tantawi, H. 2015. Introduction to Concrete Technology. Dep. Civ. Eng. Fahad Bin Sultan Univ, 8: 143-188.

Tepe, A. 2007. Nanoteknolojide Nano Ölçekteki Yapıların Yerel Olmayan Elastisite Çerçevesinde İncelenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 114 sayfa, İstanbul.

Toksöz, A. 2010. Yerel Olmayan Elastisite Teorisinde Açı Ve Rıtz ˙yöntemlerinin Nanoteknolojiye Uygulanması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 162 sayfa, İstanbul.

Torabian Isfahani, F. Redaelli, E. Lollini, F. Li, W. and Bertolini, L. 2016. Effects of nano silica on compressive strength and durability properties of concrete with different water to binder ratios. Advances in Materials Science and Engineering.

Tunçağı, M. 2000. Yapı Denetiminde Neler Değişmeli. Türkiye Mühendislik Haberleri, 4(1): 26-29

Türkçimento. 2021. Çimento Mühendisliği El Kitabi Kalite Bölümü. Cilt III, Türkçimento yayın evi, 123 sayfa, Ankara.

Usta, H. 2005. Hazır beton sektör araştırması. Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul. 42 sayfa, İstanbul.

Ünal, O, ve Yurtcu, Ş. 2007. Betonarme Yapılarda Hazır Beton Kullanımı. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3 (1): 51-64.

Wang, L. Zheng, D. Zhang, S. Cui, H. and Li, D. 2016. Effect of nanoSiO_2 on the hydration and microstructure of Portland cement. Nanomaterials. 6 (12), 241.

Whiting, D. A. and Nagi, M. A. 1998. Manual on control of air content in concrete. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.

Yardımcı, A. 2012. Nanoteknoloji hızlı gelişiyor. In Ekonomik forum, pp. 34-39.

Yeğinobalı, A., ve Ertün, T.2009. Çimentoda standartlar ve mineral katkılar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.5. Baskı: 48 sayfa, Ankara.

Yetim, M. E. 2021. Enjeksiyon İçin Nano-Silikanın Çimento Ve Geopolimer Karışımlarına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, 94 sayfa, Gaziantep.

Zhuang, C. and Chen, Y. 2019. The effect of nano-SiO2 on concrete properties: a review. Nanotechnology Reviews, 8(1): 562-572.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı ve Soyadı : Shireen Kareem Raheem BADAWANI

Eğitim

Yüksek Lisans	Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	2020-Halen
Lisans	Kerkük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2008-2012