



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANO BOYUTLU TANECİKLERİN
KULLANIMIYLA YÜKSEK HACİMDE
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İÇEREN KATKILI
ÇİMENTO TASARIMI**

Mem ÇİFTÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Mart-2020
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mem ÇİFTÇİ tarafından hazırlanan "Nano Boyutlu Taneceklerin Kullanımıyla Yüksek Hacimde Yüksek Fırın Cürufu İçeren Katkılı Çimento Tasarımı" adlı tez çalışması 09/03/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

DECLARATION PAGE

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İPEK

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Abdülrezzak BAKIŞ

İmza





Yukarıdaki sonucu onaylarım.



TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mem ÇİFTÇİ

Tarih: 09/03/2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO BOYUTLU TANECİKLERİN KULLANIMIYLA YÜKSEK HACİMDE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU İÇEREN KATKILI ÇİMENTO TASARIMI

Mem ÇİFTÇİ

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

2020, 113 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İPEK

Dr. Öğr. Üyesi Abdulrezzak BAKIŞ

Mevcut tez çalışmasında, yüksek hacimde yüksek fırın cürufu içeren CEM III-A (%36 yüksek fırın cürufu+%64 klinker), CEM III-B (%66 yüksek fırın cürufu+%34 klinker) ve CEM III-C (%81 yüksek fırın cürufu+%19 klinker) katkıli çimentoların erken yaş dayanım gelişimi ve hidrasyon özellikleri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda %1, 2, 3 ve 4 oranlarında nano kalsit, nano SiO₂ ve nano Al₂O₃ içeren ve TS EN 197-1'e uygun olan elli sekiz karışım tasarlanmış olup, bu karışımların hem işlenebilirlik hem de 2, 7 ve 28. gün kür yaşlarında basınç dayanımları incelenmiştir. Ayrıca, seçilen sekiz karışımın kıvam, priz süreleri ve genleşme tayini deneyleri de yapılmıştır. Deney sonuçları gösterdi ki; yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça erken yaş dayanım gelişiminde düşüş gözlemlenmiştir. Hem çekirdeklenme etkisi hem de kimyasal etkinin bir neticesi olarak nano malzeme kullanımıyla erken yaş dayanım gelişimi ve artan hidrasyon reaksiyonları neticesinde ise priz sürelerinde kısalma tespit edilmiştir. Nano malzeme kullanım oranı arttıkça dayanım artışında kısmen bir azalma tespit edilmiş olup, dayanım gelişiminde en iyi sonuçlar %1-2 kullanım oranlarında saptanmıştır. Nano Al₂O₃ ve Nano SiO₂ kullanım oranı ve hacimce yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça mini çökme yayılma çaplarında azalma yani işlenebilirlikte kötüleşme gözlemlenmiştir. Nano kalsit kullanımında ise işlenebilirlikte artış tespit edilmiştir. Nano SiO₂ ve Nano Al₂O₃ çekirdeklenme etkisi ile katkı sağlarken Nano kalsit ise hem çekirdeklenme etkisi hem de kimyasal etki ile üretilen çimento harçlarının performans özelliklerine katkı sağlamıştır. %81 yüksek fırın cürufu içeren CEM III-C tipli çimentoda nano türüne bakılmaksızın %1-2 nano malzeme kullanım oranıyla CEM III-C 32.5N çimento üretilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Basınç dayanımı, mini çökme yayılma, nano malzemeler, nano Al₂O₃, nano kalsit, nano SiO₂, priz süresi, yüksek fırın cürufu.

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN OF BLENDED CEMENT WITH HIGH VOLUME GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG BY USING NANO-SIZED PARTICLES

Mem ÇİFTÇİ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Assist. Prof. Dr. Serhat DEMİRHAN

2020, 113 Pages

Jury

Assist. Prof. Dr. Serhat DEMİRHAN

Assist. Prof. Dr. Süleyman İPEK

Assist. Prof. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

In the current thesis, early-age strength development and hydration properties of CEM III-A (%36 Slag+%64 Clinker), CEM III-B (%66 Slag+%34 Clinker) and CEM III-C (%81 Slag+%19 Clinker) as blended types of cement containing high volume ground granulated blast furnace slag were investigated. For this purpose, fifty-eight mixtures containing 1%, 2%, 3% and 4% of nano calcite, nano SiO₂ and nano Al₂O₃ and also meeting the minimum requirements of TS EN 197-1 have been designed. Both of workability of these mixtures and the compressive strengths at the curing ages of 2, 7 and 28-day were examined. In addition, consistency, setting times and expansion tests of eight selected mixes were also carried out. The experimental results showed that including a higher volume of slag resulted in lower compressive strength at early ages. As a result of the combined effect of both nucleation and chemical effects, early-age strength development and shortening in setting times were observed with the use of nanomaterials. As the rate of nanomaterial usage increased, a partial decrease was observed in the increase in strength, and the best contribution to the strength development were obtained in 1-2% usage of nanomaterials. As the usage of Nano Al₂O₃ and Nano SiO₂ and replacement level of slag increased, the decrease in the diameter of the mini-slump flow, namely decrease in workability, was observed. An increase in workability has been detected in the use of nano calcite. Contribution to the performance properties of mortars has been obtained by the Nucleation effect with the usage of Nano SiO₂ and Nano Al₂O₃ while the contribution has arisen from both nucleation and chemical effects in the case of nano calcite usage. In CEM III-C type cement containing 81% blast furnace slag, CEM III-C 32.5 N cement was produced with 1-2% nanomaterial regardless of nano type.

Keywords: Compressive strength, Groung Granulated Blast Furnace Slag, nano materials, nano Al₂O₃, nano calcite, nano SiO₂, setting time, mini-slump flow.

ÖNSÖZ

Disiplini ve titiz çalışmayı elden bırakmadan öğrencilerine rahat çalışma imkanı sunan, bilgisi, tecrübesi, çözüm odaklı bakış açısı ve mütevazı kişiliğiyle çalışma şevkimi arttıran, bu tez çalışmasının her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ve başarılı bir öğrenci olmamı istemesinin yanı sıra tüm akademik çalışmalarım ve sosyal hayatımda doğruluğu, dürüst bir birey olmayı ve akademik ahlakı bana tavsiye eden kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN'a teşekkür ederim.

Tükenmez enerjisi ve çalışma şevkiyle öğrencilerine örnek bir akademisyen olan, sunuş teknikleri ve tez yazımıyla ilgili teknik bilgilerinden istifade ettiğim ve çalışmalarım da desteğini her zaman hissettiğim İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdullah MURATOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans tez jürime katılan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İPEK'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdulrezzak BAKIŞ'a teşekkür ederim.

Ders dönemi ve sonrasında tüm çalışmalarım da ilimlerimden istifade ettiğim Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim üyelerine, laboratuvar, malzeme ve diğer imkânlarından yararlandığım Batman Üniversitesi Merkezi Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜMER) Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'na ve Fernas Çimento Öğütme Tesisine (FERÇİM), FERÇİM Laboratuvar sorumluları Kalite Kontrol Şefi İzzettin PEKTAŞ'a ve Laboratuvar Şefi Abdullatif BİÇİCİ'ye teşekkür ederim.

Son olarak çalışmalarım boyunca beni hiç yalnız bırakmayan aileme ve çokça eğlenceli aynı zamanda bilgi dolu ve faydalı vakit geçirdiğim çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Muhammed Sungur DEMİR, İnş. Müh. Erkan ERDEM, İnş. Müh. Emre İRAZ, Arş. Gör. İbrahim Özgür DEDEOĞLU, Arş. Gör. Gülen TUNÇ ve Arş. Gör. Kübra ÇEVİRİM'e teşekkür ederim.

Mem ÇİFTÇİ
BATMAN-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	8
2.1. Çimento.....	8
2.2. Mineral Katkılar.....	20
2.3. Yüksek Fırın Cürufu	32
2.4. Nano Teknoloji ve Nano Malzemeler.....	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50
3.1. Materyal	50
3.1.1. Çimento.....	50
3.1.2. Mineral Katkılar.....	52
3.1.3. CEN Standart Referans Kumu	52
3.1.4. Kimyasal Katkı	53
3.1.5. Nano Malzemeler.....	54
3.1.5.1. Nano Kalsit	54
3.1.5.2. Nano Silis.....	54
3.1.5.3. Nano Alümin.....	55
3.2. Deneysel Çalışma	56
3.2.1. Karışımların Hazırlanması.....	56
3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Sıkıştırılması	62
3.2.3. Numunelerin Kalıptan Çıkarılması ve Kür Koşulları.....	63
3.2.4. Sertleşmiş Hal Özellikleri.....	64
3.2.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi	64
3.2.4.2. Le Chatelier Genleşme Tayini	65
3.2.5. Taze Hal Özellikleri.....	67
3.2.5.1. Mini Çökme-Yayıma Deneyi.....	67
3.2.5.2. Standart Kıvam Tayini	68
3.2.5.3. Priz Süresi Tayini.....	70
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	74
4.1. Araştırma Sonuçları	75
4.1.1. Basınç Dayanımı Deneyi	75
4.1.2. Le Chatelier Genleşme Tayini	86
4.1.3. Mini Çökme-Yayıma Deneyi	87

4.1.4. Kıvam, Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
5.1 Sonuçlar	97
5.2 Öneriler	98
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al_2O_3 : Alümina
 $CaCO_3$: Kalker
 CaO : Kireç
CEM I: Portland Çimentosu
CEM III: Yüksek Fırın Cürufu Çimento
CEM III/A: Yüksek klinker oranlı yüksek fırın cürufu içeren çimento
CEM III/B: Orta klinker oranlı yüksek fırın cürufu içeren çimento
CEM III/C: Düşük klinker oranlı yüksek fırın cürufu içeren çimento
cm: Santimetre
 CO_2 : Karbondioksit
CSH: Kalsiyum silikat hidrat
 CSH_2 : Alçıtaşı
 C_3S : Trikalsiyum silikat
 C_2S : Dikalsiyum silikat
 C_3A : Trikalsiyum alüminat
 C_4AF : Tetrakalsiyum alümino ferrit
 Fe_2O_3 : Ferrik oksit
GJ: Gigajoule
m: Metre
 $MgCO_3$: Magnezyum oksit
mm: Milimetre
MPa: Megapascal (N/mm^2)
nm: Nanometre
 SiO_2 : Silika
s/ç: Su ve çimento miktarının oranı
 μm : Mikronmetre

Kısaltmalar

GYFC: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
NAL: Nano Alümin
NC: Nano Kalsit
NSİ: Nano Silis
PÇ: Portland Çimentosu
TÇMB: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
YFC: Yüksek Fırın Cürufu
YOSAK: Yüksek Oranda Su Azaltıcı Kimyasal Katkı

1. GİRİŞ

Dünyada tüm milletler gelişim zorlukları ile mücadele etmekte ve bu da hızla büyüyen ekonomileri etkilemektedir. Ekonomik gelişmişliğin göstergesi, ticaret ve dış yatırıma imkan tanıyan köprü, kanal, baraj, deniz yapıları, kara yolları ve üst yapı inşaatı gibi istihdam alanlarındaki başarılı girişimlerdir. Bu nedenle günümüzde somut materyaller ve yapı malzemeleri ekonomik kalkınma için büyük önem arz etmektedir (Bilici, 2011). Ülkemiz ekonomisi için enerji çok önemli bir unsurdur. Dünya devletleri enerji kaynakları için birbirleriyle yarışmaktadırlar. Enerji günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası olup sanayileşmenin alt yapısını oluşturur (Dışişleri Bakanlığı, 2018). Gelişmekte olan ülkelerin temel hedefleri arasında ucuz, güvenli, yeterli ve temiz enerji üretmek vardır. Bunun nedeni ise enerji kaynaklarının tükenmesi, dışa bağımlılık ve fosil yakıtların iklim değişikliğine sebep olması gibi çevresel etkilerdir. Ülkemizde de tüm dünyada olduğu gibi temel sorunların başında, teknolojik gelişmeler ve nüfus artışı sonucu kişi başına düşen enerji tüketiminin ve çevre kirliliğinin artması yer almaktadır. Bu sorunlar barınma ihtiyacına yol açmakla beraber, yapı sektöründe alternatif ve sürdürülebilir malzeme üretiminin gereğini ortaya koymaktadır (Çelebi ve ark. 2001). Yapı malzemeleri sektörü için sürdürülebilirlik ile ilgili birçok strateji ve uygulamanın geliştirilmesi ve malzemelerle ilgili iyileştirmelere yönelik çalışmaların artırılması gerekmektedir. Ülkemizde kullanımı çok önemli bir hal alan sürdürülebilir alternatif yapı malzemeleri, insan ve çevre sağlığı dostu, zararsız kabul edilen ve enerji tüketimi çok az, temiz, güvenilir malzemelerdir (Eren, 2018)

Dünyadaki tüm bu gelişmeler ve artan nüfusa bağlı olarak hızla büyüyen yapılaşma, beton ve çimento ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Betonarme yapıların inşası ve bakımı çok miktarda çimento ve katkı malzeme üretimi iktiza eder. Ayrıca çimento üretiminde çevreye verilen zarar, çimentonun maliyeti gibi sorunlar bilim insanlarını alternatif bağlayıcı malzeme üzerine daha çok araştırma yapmaya itmiştir (Hatice, 2018). Yapı sektöründe sürdürülebilirlik bilincinin yayılması amacıyla alternatif yapı malzemelerinin üretimi, çevre dostu ve sürdürülebilir harç ve beton malzemeler ile ilgili bilimsel ve endüstriyel çalışmalar, 1970 enerji krizinden bu yana yapı malzemeleri alanındaki hızlı büyümeyle birlikte giderek artmıştır (Tuncer, 2014).

Her birinin kullanım alanları farklı olmak üzere yapılarda kullanılan birçok inşaat malzemesi vardır. Bunlardan bazıları kum, taş, sunta, çelik, metal, agrega, çimento ve betondur. Yapı malzemelerini iki ana gruba ayırmak mümkündür. Bunlar doğal yapı malzemeleri ve suni yapı malzemeleridir. Kil, kum, kaya, ahşap vb. gibi doğal yollarla temin edilebilen malzemeler ve çimento, beton, seramik, tuğla, cam gibi suni malzemeler inşaat sektöründe çokça kullanılmaktadır (Kökmen, 2018). Beton, dünya genelinde sudan sonra kullanımı en yaygın olan bir yapı malzemesi olup betonarme yapıların ayrılmaz bir parçasıdır (Öncü ve ark., 2006). Betonun tahmini yıllık tüketiminin 10 milyar m³'ün üzerinde olduğu tahmin edilmektedir (ABD Jeolojik Araştırma Enstitüsü). Betonun yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılığı, ekonomik olması, verimliliği, yüksek yangın direnci, porozitesi ve imalatının yerinde yapılabilmesi çokça tercih edilme sebeplerinden bazılarıdır. Beton sadece binalarda değil, karayollarında, deniz yapılarında, köprü ve barajlarda, hızlı tren ve metro istasyonlarında, atık su arıtma tesislerinde, beton santrallerinde ve nükleer santrallerde de kullanılmaktadır. Beton, estetik görünüm için kolayca şekil verilebilen bir yapı malzemesi olup taşıyıcı elemanlar gibi yapının önemli bölümlerinde kullanılır. İklim değişikliği ve çevresel koşullardan etkilenen beton, büyük yüklemeler ve deprem etkisi altında da zamanla bozulmalara maruz kalabilir. Betonun çeşitli etkenlerden kaynaklı bu hasarlardan korunabilmesi için fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin dikkate alınıp iyi analiz edilmesi ve tasarımının bu analizlere göre yapılması gerekmektedir (Erdoğan, 2013). Teknik şartnamelere göre bir yapının hizmet ömrü 50-100 yıl arasında değişmektedir. Bu hizmet ömrünün tamamlanabilmesi için beton tasarımının ilgili şartnamelerde belirtildiği gibi yapılması büyük önem arz etmektedir.

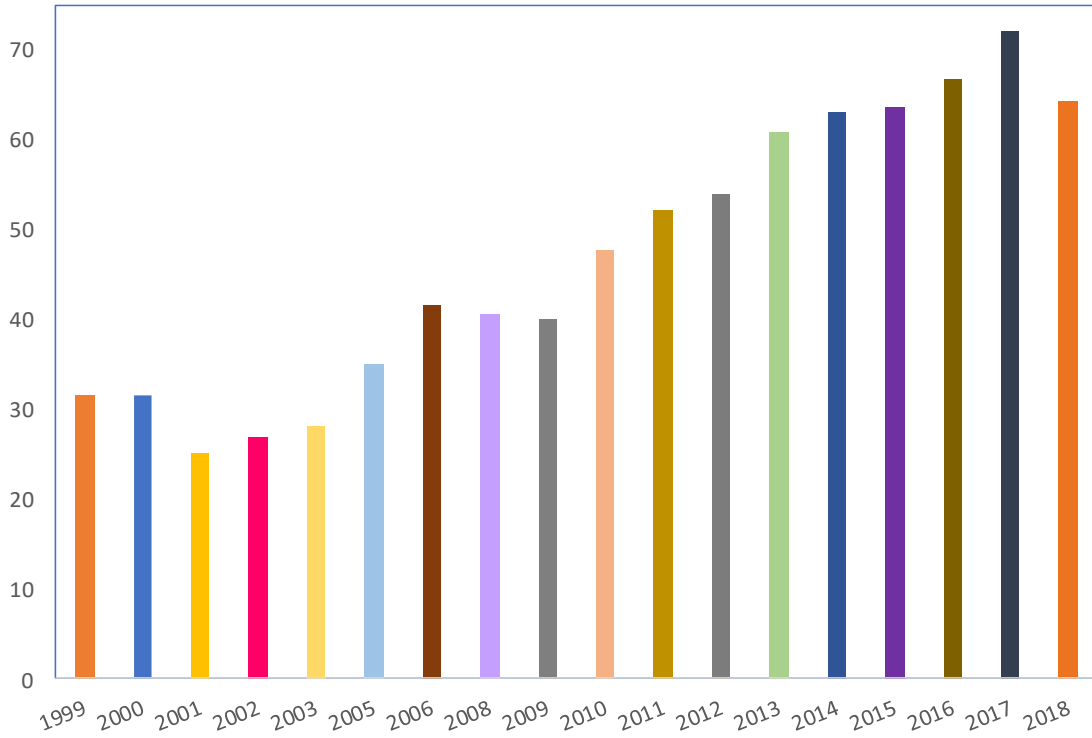
Bir yapının tercih edilme sebepleri arasında dayanım, dayanıklılık, ekonomik ve estetik olması gibi parametreler yer alır. Betonun basınç taşıma gücünün yani dayanımının yanında dayanıklılığın (durabilite) da yüksek olması çok önemlidir. Durabilite genel tabiriyle çevresel etkilere, iç ve dış etkenlere bağlı hasar ve bozulmalara karşı betonun gösterdiği direnç olarak tanımlanır (Kaya ve ark., 2015). Betonarme yapıların inşasından önce yapının maruz kalacağı bozulmalar ve betona zarar verebilecek çevresel etkilerin tespiti çok önemlidir. Bu bağlamda standartlarda belirtildiği üzere kullanılacak çimento tipi, miktarı, su/çimento (s/ç) oranı gibi beton bileşimiyle ilgili tedbirler dikkate alınmalıdır. Beton, çimento, agrega, kimyasal ve mineral katkıları ve su gibi bileşenlerden meydana gelir. Çimento dışında diğer

bileşenlerinin kolayca temin edilebildiği ve bakım masraflarının az olduğu beton oldukça ekonomik ve kolay üretilebilen bir yapı malzemesidir (Aytekin, 2018). Betonun en önemli yapı taşı olan çimento, yüksek üretim maliyetine sahip olup çevreye olumsuz etkileri vardır. Günümüzde en önemli çevre sorunlarından bir tanesi çimento üretiminden kaynaklanan karbon dioksit (CO₂) salınımlarıdır. Çimento endüstrisinde CO₂ emisyonuna sebep olan unsulardan bazıları şunlardır (Engin, 2013):

- CaCO₃ ve MgCO₃ gibi karbonatların 700 °C-900 °C sıcaklığında kalsinasyonu.
- Ocakta klinker üretimi için kullanılan yakıtlar. (Geleneksel yakıtlar, alternatif fosil yakıtlar veya biyoyakıtlar)
- Çimento üretim tesisinde yapılan ısıtma işlemleri.
- Tesiste harcanan enerji için tesisin genelinde kullanılan yakıtlar.

Çimento üretimi, tesislerde denetlenerek ve kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Çimento üretiminde farklı aşamalarda atmosfere salınımı gerçekleşen CO₂ miktarı temelde “girdiler yöntemi” ve “çıktılar yöntemi” olarak bilinen iki yöntemle belirlenebilmektedir. Girdiler yöntemi, tüketilen hammadde miktarı ve karbonat içeriği gibi parametreleri esas alırken, çıktılar yöntemi ise üretilen klinker miktarının ve fırın atığı tozların hacmini hesap için dikkate alır (WBCSD, 2011).

Günümüzde atmosfere salınan CO₂ gazının %5-8'inin çimento üretim fabrikalarından kaynaklandığı bilinmektedir (Tekin, 2016). Çimento üretimi her ton için 4 GJ enerji gerektirir. 1 ton klinker üretimi için hammadde tüketimi veya fosil yakıtlardan kaynaklanan 0.83-0.85 ton CO₂ emisyonu gerçekleşmektedir (Dığış, 2015). Ayrıca 1 ton çimento üretimi sonucu atmosfere 6.3 miligram 10 mikrondan daha küçük parçacık salınımı gerçekleşmektedir. Her yıl çok sayıda ölümün ozon tabaksına zarar veren ve küresel ısınmaya neden olan bu parçacıklardan kaynaklandığı bilinmektedir (Bilici, 2011). Örneğin ülkemizde 2001 yılındaki çimento üretimi 30 milyon ton iken bu rakam %140 artarak 2018 yılında 72 milyon ton olmuştur (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği). Türkiye’de toplam yurtiçi çimento satışı ise 1999 yılında 31 milyon ton iken, 2017 yılında bu sayı 72 milyon tona yükselmiş, 2018 yılında ise 64 milyon ton olmuştur (TÇMB, 2019).



Şekil 1.1. Türkiye’de toplam yurtiçi çimento satışı (Milyon ton, TÇMB)

Çizelge 1.1. Çimento üretiminde ülkelerin sıralaması (Cembureau, 2018)

Çimento Üretimi (Milyon ton)								
Ülke	2001	2008	2010	2011	2013	2015	2016	2017
Çin	661.0	1388.4	1881.9	2063.2	2420.0	2350.0	2410.0	2316.0
Hindistan	102.9	185.0	220.0	240.0	280.0	270.0	290.0	280.0
ABD	88.9	86.3	65.2	68.6	77.4	83.4	85.9	88.5
Brezilya	39.4	51.6	59.1	63.0	70.0	72.0	60.0	54.0
Türkiye	30.0	51.4	62.7	63.4	72.7	71.4	75.4	80.6
Rusya	28.7	53.5	50.4	56.1	72.0	69.0	56.0	58.0
Endonezya	31.1	38.5	39.5	45.2	56.0	65.0	63.0	69.0
Güney Kore	52.0	51.7	47.4	48.2	47.3	63.0	55.0	62.6
Japonya	79.5	67.6	56.6	56.4	57.4	55.0	56.0	55.2
Suudi Arabistan	20.0	37.4	42.5	48.0	57.0	55.0	61.0	63.0
Meksika	33.2	37.1	34.5	35.4	34.6	39.8	40.8	46.1
Almanya	32.1	33.6	29.9	33.5	31.5	31.1	32.7	34.0
İtalya	39.8	43.0	34.4	33.1	23.1	20.8	19.3	19.3
Fransa	19.1	21.2	18.0	19.4	17.5	15.6	15.9	16.9
Güney Afrika	8.4	13.4	10.9	11.2	14.9	14.0	13.6	13.6
Kanada	12.1	13.7	12.4	12.0	12.1	12.5	11.9	12.7
Arjantin	5.5	9.7	10.4	11.6	11.9	12.2	10.9	12.2
İngiltere	11.9	10.5	7.9	8.5	8.5	9.6	9.4	9.4
Avustralya	6.8	9.4	8.3	8.6	8.6	9.3	9.4	9.8

Görüldüğü üzere ülkemiz, çimento üretiminde Avrupa'da ilk sıradayken, dünya devletleri arasında 5. sırada yer almaktadır. Sonuç olarak çimento üretimi küresel sürdürülebilirlik açısından ciddi çevresel bir sorundur. Dünya genelinde sürdürülebilir bir kalkınmanın gereği olarak, çimentonun üretiminden kaynaklanan hammaddelerin ve enerjinin tüketilmesi ile doğaya yüksek hacimde CO₂ salınımı gibi sorunları en aza indirmek için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Çevre kirliliği, iklim değişikliği ve küresel ısınma konularında uygulanması gereken kuralları içeren Kyoto Protokolü 2005 yılında Birleşmiş Milletlerin gözetimi altında dünya devletleri tarafından kabul edilmiştir. Bu protokol, atmosfere salınan ve sera etkisine sebebiyet veren CO₂, metan, ozon, azot oksit gibi gazların salınım oranlarının belli bir seviyeye çıkması durumunda, protokolü imzalayan ülkelere yaptırım uygulamak ve bu oranı düşürmek amacıyla imzalanmıştır. Daha sonra 37 ülkenin katılımıyla Kyoto Protokolü 1. Taahhüt Dönemi (2008-2012) ve 2012 yılında gerçekleştirilen konferans ile 2. Taahhüt dönemi (2012-2020) yürürlüğe girmiştir. Bu protokol ile özellikle gelişmiş ülkelerdeki büyük çimento fabrikaları da sorumluluk olarak CO₂ salınımlarını azaltmak üzere temelde üç başlıktan oluşan çalışmalar yapmaktadırlar:

- Elektrik enerjisi ve termal enerjinin verimliliği
- Biyokütle atık kullanımının artırılmasıyla alternatif yakıt üretimi
- Klinkere ikame edilecek katkı malzeme kullanımının artırılması (Kyoto, 2012).

Buna bağlı olarak CO₂ salınımlarını azaltmak için çimento üretiminde kullanılan klinker oranının düşürülmesi gerekmektedir. Bundan dolayı çimentoya ilave edilecek malzeme arayışı son yıllarda daha çok önem kazanmıştır (Tekin 2014). Klinker oranının az tutulduğu çimento üretimi, CO₂ salınımı yapmayan katkı malzemelerinin çimento yerine kullanılmasıyla mümkündür. Bir üretici gözüyle bakıldığında katkılı çimentolar fabrika kapasitesini de arttırabilmektedir. Günümüzde tek bileşen kullanmak yerine, 3-4 bileşen katkılı çimento üretimiyle CO₂ salınımlarının azaltılması daha yaygındır (Dayı, 2006). Ülkemizde çokça bulunan doğal puzolanların çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılmasıyla birlikte katkılı çimentolar beton teknolojisinde sıkça yer almaktadır. Çimento endüstrisinde katkılı çimento üretiminin giderek önem kazandığı günümüzde, çimento içerisine ilave edilecek mineral katkının miktarı ve cinsiyle alakalı olarak çimento içerisindeki işlevinin incelenmesiyle ilgili araştırmalar da yaygınlaşmaya başlamıştır. Ülkemizde de geçerli olan “Yaygın Çimentoların Özellik,

Bileşim ve Uygunluk Standardında (TS EN 197-1)” çimentolar 5 ana gruba ayrılmıştır. Bunlardan ilki CEM-I normal portland çimentosunu, CEM-II, CEM-III, CEM-IV ve CEM-V ise katkıli çimentoları ifade etmektedir. Bu standartta özellikleri tanımlanmış mineral katkılar, klinker miktarının düşürülüp aynı oranda çimentoya eklenmesiyle çevre dostu bir üretime imkan tanır. CO₂ emisyonunu azaltıcı bir etki yapan bu katkıların ayrıca betonun durabilitesine önemli faydalar sağladığı bilinmektedir (Demirhan, 2012). Çelik fabrikalarının atığı yüksek fırın cürufu, ferro krom tesislerinin yan ürünü silis dumanı ve termik santral atığı uçucu kül bu mineral katılardan bazılarıdır. Her ne kadar çevre dostu mineral katkılar çimento üretiminde çokça tercih edilse de bu katkıli çimentolarla hazırlanan harçlarda veya betonlarda erken yaş dayanım problemleri ortaya çıkabilmektedir (Nas, 2015).

Ülkemizde, demir çelik fabrikalarından yılda yaklaşık 2.400.000 ton granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) çıkmaktadır. Öğütülmüş GYFC, betonda işlenebilmeyi arttırmakta, terlemeyi, hidrasyon ısısını ve su geçirimsizliğini azaltmaktadır. Ayrıca çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılmasıyla çimentonun mekanik ve durabilite (dayanıklılık) özelliklerine katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, mineral endüstriyel atık katılardan olan yüksek fırın cürufunun çimento üretiminde yüksek hacimlerde kullanılması ile çimento ve betonda erken yaşlarda mukavemetlerde azalmalara neden olmakta, bu nedenle TS EN 197-1 standardında her ne kadar CEM III tipli çimento üretiminde %95 oranına kadar GYFC kullanımına izin verilse de ülkemizdeki katkıli çimento üretimlerinde GYFC kullanım oranları çok daha düşük seviyelerde kalmıştır. Son yıllarda erken yaş dayanım probleminin çözümüyle ilgili bilimsel çalışmalar da yapılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda nano teknolojinin yapı malzemeleri sektöründe kullanımı giderek artmakta ve nano malzeme kullanımı yapıların performans özelliklerinde göz ardı edilmeyecek katılarda bulunmaktadır. Nano malzeme kullanımı katkıli çimento harçlarının taze ve sertleşmiş özelliklerinin iyileştirilmesi, erken yaş dayanım probleminin giderilmesi, dayanıklılık ve mekanik özelliklerde iyileştirmeyle performans ve verimliliğin artırılması gibi önemli avantajlar sağlamaktadır (Demirhan, 2017)

Mevcut yüksek lisans tezinin amacı; yerli ve doğada yüksek oranda bulunan nano boyutlu kalsit ile ticari olarak temin edilebilen nano silis ve nano alümin kullanılarak olabilecek en yüksek hacimde yüksek fırın cürufu içeren çimento tipinin

aktivasyonunun artırılarak erken yaş yüksek dayanım kazanan CEM III A/B ve C tipi katkılı çimento türlerinin standarda (TS EN 197-1) uygun bir şekilde tasarlanmasıdır. Bu kapsamda cürufun aktivasyonu nano boyutlu tanecik kullanımı ile arttırılarak, erken yaş daha yüksek dayanımlı cüruf katkılı CEM III A-B-C tipi çimentoların üretilebilmesi için gerekli çalışmaların yapılması amaçlanmıştır. Hedeflenen amaçlar doğrultusunda mevcut olan öğütülmüş yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliklerini önemli ölçüde etkileyeceği düşünülen faktörler tespit edilecek ve geliştirilecektir. Bu şekilde hazırlanan GYFC katkılı çimentoların standartlarda istenen özellikleri sağlayıp sağlamadığı ilgili standartlara uygun bir şekilde test edilecek ve bu aşamada başarılı sonuçlar veren karışımlar tespit edilecektir. Bu amaç doğrultusunda, TS EN 197-1’de belirtilen çimento karışım oranları esas alınarak başta TS EN 196-1’e göre üretilecek çimento harçlarının dayanım testleri olmak üzere ayrıca mini çökme-yayıma test cihazıyla, üretilecek çimento hamurlarının yayılma çapları incelenecektir. Bu amaç doğrultusunda 58 karışımın tasarlanması ve bu karışımlara göre de belirtilen taze özellikler ile mekanik özelliklerin değerlendirilmesi ön görülmektedir. Ayrıca üretilecek 8 karışım için standart kıvam tayini, priz başlama ve sona erme süresi tayini ile Le Chatelier deneyi (Genleşme Tayini) gerçekleştirilecektir. Üretilecek olan karışımların tüm taze ve sertleşmiş özelliklerin tespiti TS EN 197 ve TS EN 196’da belirtilen şekliyle olacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılacak olan çalışmalar ve geliştirilecek yöntemlerle, cürufun aktivasyonunu arttıracak nano boyutlu malzemelerin tespit edilmesi neticesinde çimento üretiminde yüksek hacimde endüstriyel atık olan öğütülmüş GYFC kullanılarak,

- Mevcut duruma kıyasla doğal kaynakların daha az tüketildiği ve çevrenin korunmasına katkı sağlayan daha ekonomik çimento türlerinin elde edilmesi;
- Elde edilen yeni katkılı çimento türlerinin kullanımı ile uzun dönemde nihai amaç uzun servis ömürlü ve durabilitesi yüksek yapıların inşa edilmesi gibi pek çok muhtemel sonuç bu tez konusunun en önemli çıktıları olarak sıralanabilir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Çimento

Çimento genel tabiriyle taş, kum, agrega gibi yapı malzemelerini birbirine bağlayarak yekpare ve sert bir kütle oluşmasını sağlayan, hem havada hem de suda sertleşebilmesiyle hidrolik özelliğe sahip güçlü bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Ülkemizde ve Avrupa’da tüm standart ve yönetmelikler betonarme yapılar için yaklaşık 100 yıllık bir hizmet ömrü öngörür. Ancak mekanik yükler ve deprem yükleri altında çevresel faktörlerin de etkisiyle yapıların 20-30 yıl içerisinde bozulmalara maruz kaldığı tecrübe edilmiştir. Betonarme yapıların kısa hizmet ömrü için önemli etkilere sahip olan çimento, kötüleşen üst ve alt yapıların bakım ve onarımının yapılması için gereklidir (Hatice, 2018). Çimentonun taşıdığı nitelikler, betonun performansı, dayanımı, dayanıklılığı ve kalitesi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Beton ve harç özelliklerine doğrudan etki eden çimento, özellikle betonun basınç dayımı özelliği üzerinde de önemli etkilere sahiptir (Bozgeyik, 2019).

Kimyasal yapısı itibariyle çimentolar organik ve inorganik çimentolar olarak sınıflandırılabilir. Organik çimentolar, geoteknik çalışmalarda, yol yapımlarında veya asfalt üretiminde kullanılan bitümlü malzemelerdir (kauçuk, katran, asfalt vb). İnorganik çimentolar, kireç, alçı ve portland çimentosudur (Ulugöl, 2015). Çimento dışı bağlayıcı maddelerden olan kireç, tarihte bilinen en eski bağlayıcıdır. Kireç gibi çimento dışı bağlayıcılarda katılma kısa, dayanım kazanma ise çok daha uzun sürebilmektedir. Ayrıca çimento hem havada hem de suda priz alabilen kuvvetli bir hidrolik bağlayıcı olduğundan günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Kireç ise hava bağlayıcı bir malzemedir (Baradan ve ark., 2012).

TS-EN 197-1 çimento standardına göre çimento, su ile temas ettiğinde hidratasyon reaksiyonları ve oluşan ürünler nedeniyle priz alıp sertleşen ve hamur oluşturan, sertleştikten sonra su altında da dayanım ve kararlılığını koruyan ince öğütülmüş inorganik bir malzemedir. Başka bir tanıma göre çimento, hammaddeleri kalker (kireçtaşı) ve kil olan, suyla birlikte harç oluşturup kum, çakıl, tuğla gibi malzemeleri yapıştırmada kullanılan bir bileşiktir (Ishak, 2015). Çimento, hidrolik bir bağlayıcı olarak betonda agrega, ince kum ve diğer malzemeleri birbirine bağlar.

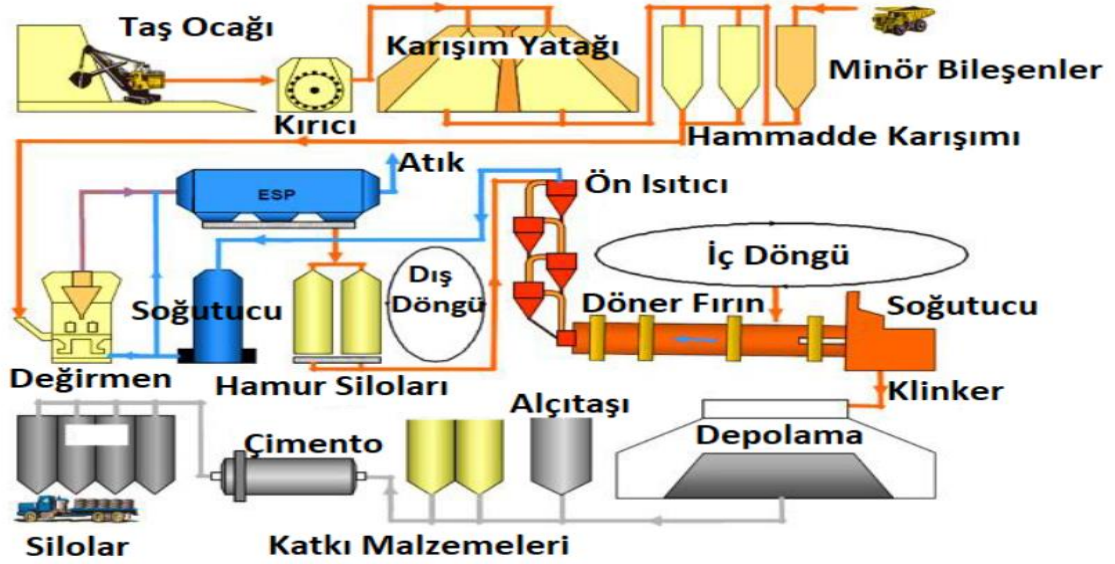
Portland çimentosu ise klinkerin yaklaşık %3-5 civarında alçıtaşı ile beraber öğütülmesiyle üretilen katkısız hidrolik bağlayıcıdır. Alçıtaşı ani prizi engellemek için kullanılır. Klinker üretiminde kullanılan kalker, marn ve kil gibi doğal malzemelerin düşük maliyetli olması ve yaygın bulunabilmesi, portland çimentosunu son yıllardaki en ekonomik yapı malzemelerinden biri haline getirmiştir. Portland çimentosuyla üretilen beton dünyada en yaygın kullanılan inşaat malzemesidir (Atan, 2015).

Klinker üretimi, döner fırınlarda hammaddelerin öğütülmesi ve homojenize edildikten sonra pişirilmesiyle gerçekleşir. Kil, marn ve kalker gibi ana hammaddeler başta olmak üzere, demir cevheri, boksit (alümina) ve silis kumu gibi malzemeler öğütülerek döner fırına gönderilir. Öğütülen hammaddeler kalsinasyon olarak bilinen pişirme işleminden sonra karıştırılır. Pişirme işlemi, kalsiyum karbonat (CaCO_3) yani kalkerden CO_2 uzaklaştırması sonucu kalsiyum oksit (kireç, CaO) oluşturmak amacıyla gerçekleştirilir. Daha sonra kalsiyum oksite diğer öğütülmüş hammaddelerin eklenmesiyle önceden kalsine edilmiş malzemeler sıcaklık arttıkça fiziksel ve kimyasal değişimlere uğrayarak kısmi erime geçirir ve tekrar birleştiklerinde topaklar halinde yeni kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminatlar oluşur. Tüm işlemlerin ardından elde edilen kaya gibi sert malzemeye klinker adı verilir ve portland çimentosu üretmek için az miktarda alçıtaşı ile beraber öğütülür. Portland çimentosuna çeşitli katkı malzemelerinin eklenmesiyle farklı çimento tipleri üretilir (Mintus ve ark., 2006).

Esas olarak klinker için dört ana oksit vardır. Bunlar; kireçtaşı (CaO), silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksittir (Fe_2O_3). Bu oksitler klinkerdeki alit (Ca_3SiO_5), belit (Ca_2SiO_4), celit ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) ve ferrit ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$) ana bileşiklerini oluştururlar. Klinkerin %95'ini oluşturan bu oksitler dışında magnezyum, sodyum, potasyum, titanyum, fosfor ve manganez oksitler de klinkerin bünyesinde bulunan diğer oksitlerdir. (Popovichs ve ark., 1992). Klinker üretim aşamaları şu şekilde özetlenebilir (Schneider, 2015):

- Taşocaklarından hammadde temini (kalker, kil)
- Hammaddelerin kırılması ve ufaltılması
- Bileşenlerin harmanlanması
- İnce freze
- Pişirme

- Son frezeleme
- Paketleme ve taşıma



Şekil 2.1. Çimento üretim şeması (Bozgeyik, 2019)

Konkasörler yardımıyla kırılan hammaddeler homojenize edilir ve harmanlanır. Böylece Fransızcada un anlamına gelen farin adı verilen bir malzeme oluşur ve farin değirmenlerinde öğütülür. 1500 °C sıcaklığında döner fırına aktarılan farin, sıcaklığın giderek artmasıyla çimento oksitlerini oluşturur. Reaksiyona giren bu oksitler yanma, sinterleme ve soğuma aşamalarından sonra zamanla çimentonun ana bileşenlerini meydana getirirler ve böylece sert, koyu renkli 1-25 mm çaplı klinker üretimi tamamlanmış olur. Klinker üretildikten sonra yaklaşık %3-5 oranında alçıtaşıyla beraber öğütülerek CEM-I portland çimentosu üretilir. Diğer katkılı çimentolar ise klinker ve alçıtaşının beraber öğütülmesi sırasında mineral katkıların ilave edilmesi sonucu elde edilir. Klinker üretim aşamalarında gerçekleşen reaksiyonlar Çizelge 2.1.'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Klinker üretiminde gerçekleşen reaksiyonlar (Wang ve ark., 2006)

Reaksiyon	Etki	Reaksiyon yeri	Reaksiyon	Sıcaklık (°C)
MgCO ₃ ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma Fırın	$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$	550-960
CaCO ₃ ayrışması	Ayrışma Kalsinasyon	Ön ısıtma Fırın	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$	550-960
β -C ₂ S oluşumu	Geçiş	Fırın	$2CaO + SiO_2 \rightarrow \beta-Ca_2SiO_4$	600-1300
C ₄ AF oluşumu	Geçiş	Fırın	$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$	1200-1280
C ₃ A oluşumu	Geçiş	Fırın	$3CaO + Al_2O_3 \rightarrow Ca_3Al_2O_6$	1200-1280
C ₃ S oluşumu	Yanma Sinterleme	Fırın	$\beta-Ca_2SiO_4 + CaO \rightarrow Ca_3SiO_5$	> 1280
Erimiş faz oluşumu	Yanma Sinterleme	Fırın	$Klinker_{katı} \rightarrow Klinker_{sıvı}$	> 1280
Klinkerin katılaşması	Soğuma	Fırın Soğutucu	$Klinker_{sıvı} \rightarrow Klinker_{katı}$	150-200

Kalsiyum oksit (CaO) ve silisyum dioksit (SiO₂), klinkeri oluşturan ana malzemelerdir. Klinkerin üretiminde pişme sıcaklığını azaltmak için alüminyum oksit (Al₂O₃) ve demir oksite (Fe₂O₃) ihtiyaç vardır. Kalker ve kil ayrı ayrı kullanıldığında da bu malzemeler üretilbilir veya ikisini de barındıran marn kullanımıyla da elde edilebilir. Böylece kireç kalkerden; silisyum dioksit, demir oksit ve alüminyum oksit de kilden üretilmiş olur. Eğer kilden elde edilen malzemeler yeterli değilse karışıma bir miktar demir cevheri veya kuvars kumu eklenebilir. Klinker üretiminde döner fırına gönderilen kalker (CaCO₃) oranının %75-80 arasında olması daha uygundur (Yalçın, 2006).

Portland çimentosunun ihtiva ettiği malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı isimleri ve kısaltmaları mevcuttur. Tipik bir portland çimentosunun oksit kompozisyonu Çizelge 2.2.'de verilmektedir.

Çizelge 2.2. Portland çimentosundaki oksitler (Baradan, 2012)

Oksit	Yaygın ismi	Sembol	Ağırlıkça (%)
CaO	Kireç	C	63
SiO ₂	Silika	S	22
Al ₂ O ₃	Alümina	A	6
Fe ₂ O ₃	Ferrik oksit	F	2.5
MgO	Magnezya	M	2.6
K ₂ O	Alkali	K	0.6
Na ₂ O	Alkali	N	0.3
SO ₃	Sülfür oksit	S	2
CO ₂	Karbondioksit	C*	-
H ₂ O	Su	H	-

Klinker hammaddelerin pişirilmesiyle ortaya çıkan oksitlerin oluşturduğu bileşiklerden oluşmaktadır ve harçların mekanik ve kimyasal özellikleri bu oksit oranlarına bağlıdır.

Oksitler çimento özelliklerini doğrudan etkileyecek bileşikler oluşturmak amacıyla döner fırında reaksiyona girerler. Bu bileşikler; trikalsiyum silikat (C₃S), dikalsiyum silikat (C₂S), tetrakalsiyum alümino ferrit (C₄AF) ve trikalsiyum alüminattır (C₃A). Döner fırında belli sıcaklıklarda ortaya çıkan oksitlerin daha yüksek sıcaklıklarda birleşmesi sonucu oluşan bu bileşikler “çimentonun ana bileşenleri” olarak kabul edilir. Karmaoksitler olarak bilinen bu bileşenlerin özellikleri Çizelge 2.3.’de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Portland çimentosundaki majör bileşenler (Lyons, 2006)

	Silikatlar		Alüminatlar	
Kimyasal Formül	3CaO.SiO ₂	2CaO.SiO ₂	3CaO.Al ₂ O ₃	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Ana bileşen	Trikalsiyum Silikat	Dikalsiyum Silikat	Trikalsiyum Alüminat	Tetrakalsiyum Alüminoferrit
Sembol	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon hızı	Orta	Az	Yüksek	Orta
Mineral adı	Alit	Belit	Celit	Ferrit
Hidratasyon ısısı (kalori/g)	120	62	207	100
İlk gün dayanımı	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Nihai dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Portland çimentosu bünyesinde ani prizi engellemek amacıyla kimyasal formülü CaSO₄.2H₂O ve kısa gösterimi CSH₂ olan ağırlıkça %3-5 oranında alçıtaşı da yer almaktadır. Diğer bileşenler C₃S, C₂S, C₃A ve C₄AF ise Portland çimentosunda sırasıyla %50, %25, %12 ve %8 oranında bulunmaktadır (Erdoğan, 2013). Ana bileşenlerin özellikleri ve görevleri ise şu şekilde özetlenebilir (Demirer, 2009):

C₃S: Hızlı priz alma, erken/nihai dayanım. Saf olmayan katı halde bir bileşik olan alit, klinkerde en önemli mineral olarak bilinir ve ikincil oksitlerden MgO ve Al₂O₃ ile modifiye halde bulunur. Çimentoya kalıcı bağlayıcılık özelliği kazandıran bileşendir ve çimentoda bağlayıcılık özelliği üzerinde hem erken hem ileri yaşlarda her zaman etkilidir. Su ile reaksiyonunda ortaya çıkan hidratasyon ısısı orta düzeydedir ve çimentoda erken dayanım sağlar.

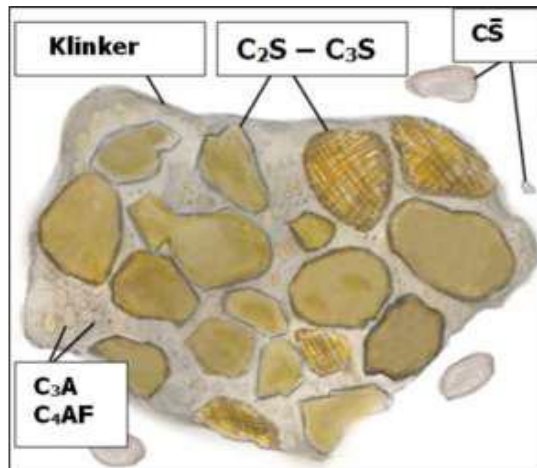
C₂S: Yavaş priz alma ve yavaş dayanım kazanma, yavaş ısı değişimi. Farklı kristal yapılarda bulunabilen belitin en çok bilinen türü β-C₂S olup stabil bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı çimentonun erken dayanımı üzerinde etkin olmayıp nihai dayanımı üzerinde daha çok etkindir. Su ile yavaş reaksiyon veren belitin hidratasyon ısısı düşüktür. Çimentonun bağlayıcılığı üzerinde ileri yaşlarda etkisini gösterir.

C₃A: Ani priz (alçıtaşı kullanım nedeni), sıcaklıkta hızlı artış, hızlı priz ancak nihai mukavemette düşüş, sülfata karşı dirençsiz. Çimentoda en fazla %15 oranında

bulunan trikalsiyum alüminat, prizmatik kristal yapıda bir bileşiktir. Çimento karakteristiği üzerinde etkisi vardır ve akışkanlık sağlar. Çimento dayanımı üzerinde etkin değildir. Su ile çok hızlı reaksiyon verdiği için hidrasyon ısı çok yüksektir ve çimentoda erken priz sağlar. Bu etkisinden dolayı klinkere az miktarda alçıtaşı eklenir.

C_4AF : Yavaş sertleşme ve çimentoya gri renk verme. C_4AF oranı arttıkça çimento koyuluğu artmaktadır. Mukavemet üzerinde etkili olan C_4AF , su ile etkili bir reaksiyon vermez. Bundan dolayı çimento bağlayıcılığı üzerinde az bir etkiye sahiptir.

Portland çimentosunun en reaktif iki bileşeni C_3S ve C_3A 'dır. C_2S 'nin reaksiyonu ise çok daha yavaştır. Çimentoya ilave edilen alçıtaşı, C_3A reaksiyonlarını yavaşlatır. Çimentoda erken mukavemetin sağlanması için C_3S 'in yüksek miktarda bulunması gerekir. C_2S erken dayanım sağlamazken uzun vadede mukavemete katkısı yüksektir. Çimentoda demir ve alüminyum eriyikleri ise aliti oluşturan reaksiyonları hızlandırmaktadır (Erdoğan, 2009). Ana bileşenlerin çimentoya dayanım ve durabilite özellikleri açısından etki edebilmesi için harçlarda belli miktarlarda yer alması gerekmektedir. Çimento harçlarının üretiminden sonra matris içerisindeki ana bileşenlerin miktarları X ışını floresans yöntemi (XRF), X ışını kırınımı yöntemi (XRD) veya Bogue formülleri yardımıyla çimento analizlerinin yapılması sonucu tespit edilebilir. Çimento harçlarının mekanik ve durabilite özelliklerine ana bileşenlerin katkısı farklı olmaktadır. Mukavemet için kalsiyum silikatlar (C_3S ve C_2S) önemliyken, trikalsiyum alüminat (C_3A) harcın durabilite özellikleri açısından önemlidir (Erdoğan, 2007).



Şekil 2.2. Klinker ve Karmaoksitler (Ulugöl, 2015)

Portland çimentosunun içeriğinde majör bileşenlerin yanında düşük oranlarda bulunan minör bileşenlerin varlığını da göz ardı etmemek gerekir. Örneğin magnezyum oksit Portland çimentosunun içeriğinde çok az yer kaplar fakat %5 oranında kristal magnezya, çimento sağlamlığını önemli ölçüde etkiler. Etkisi serbest kireç etkisine benzer ve çimento sağlamlığını azaltır. Ayrıca alkaliler harç içerisinde silikatlarla reaksiyona girerek genleşme ve buna bağlı olarak çimento hamurunda çatlamalara sebebiyet verebilir. Minör bileşenlerin olumlu etkileri de söz konusudur. Örneğin kalsiyum sülfat bileşenleri, çimentodaki kuruma süresinin dengelenmesini, kurumadan kaynaklanan büzölmelerin önlenmesini sağlamaktadır. Bundan dolayı çimento içerisindeki minör bileşen oranlarının standartta belirtildiği şekilde %0-5 oranında tutulması gerekir (Atan, 2015).

Günümüzde halen yürürlükte olan TS 197-1 çimento standardına göre 5 ana kategoride toplam 27 farklı çimento tipi mevcuttur. 5 ana çimento tipi şu şekilde adlandırılmaktadır:

- CEM-I: Portland Çimentosu
- CEM-II: Portland Katkılı/Kompoze Çimento
- CEM-III: Portland Yüksek Fırın Cüruf Katkılı Çimento
- CEM-IV: Puzolanik Çimento
- CEM-V: Kompozit Çimento

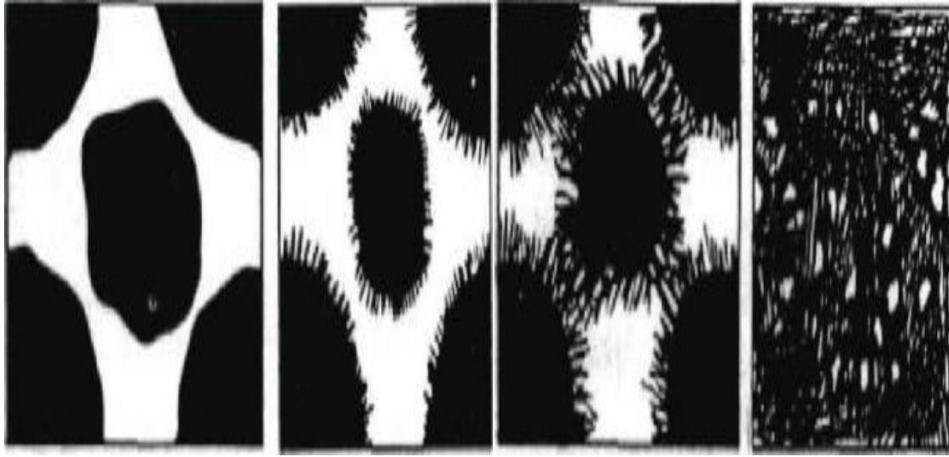
CEM-I, klinker oranı en az %95 olan katkısız (alçıtaşı hariç) portland çimentosuyken, CEM-II tip çimento grubunda katkıları %6-35 oranında değişmektedir ve isimlendirmeler kullanılan mineral katkı türüne göre yapılmaktadır. CEM-III grubundaki çimentolarda mineral katkı olarak kullanılan cürufun miktarı %36-95 arasında değişebilmektedir. CEM-IV grubundaki çimentolarda cüruf veya kireç taşı kullanılmazken, uçucu kül ve diğer puzolanlar %11-55 oranında yer alır. CEM-V grubundaki çimentolara belirtilen sınırlara göre %18-50 oranında cüruf, uçucu kül ve diğer puzolanlar eklenir ve toplam katkı miktarı oranı %20-64 arasında sabit tutulur.

Çizelge 2.4. Çimento standardında tanımlı 27 farklı çimento tipi (TS EN 197-1)

Ana Tipler	27 ürüne ait işaret (Genel Çimento Tipleri)		Bileşim (kütlece ³⁾ % olarak)										Minör İlave Bileşen	
			Ana Bileşenler											
			Klinker K	Yüksek Fırın Curufu S	Silis Dumanı D ^{b)}	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist T	Kalker			
Doğal P	Doğal Kalsine Edilmiş Q	Silissi V				Kalkersi W	L	LL						
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-Curufulu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21- 35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland-Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland-Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland-Kompoze Çimento ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	←----- 6 - 20 -----→										0-5
CEM II/B-M		65-79	←----- 21 - 35 -----→										0-5	
CEM III	Yüksek fırın Curufulu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzolanik Çimento ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11 - 35 -----→						-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36 - 55 -----→						-	-	-	0-5
CEM V	Kompoze Çimento ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18 - 30 -----→			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←----- 31 - 50 -----→			-	-	-	-	0-5	

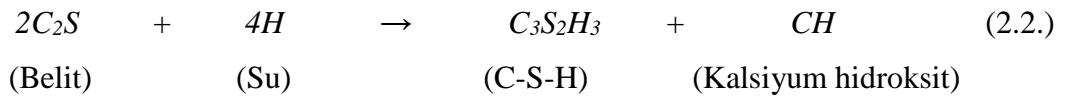
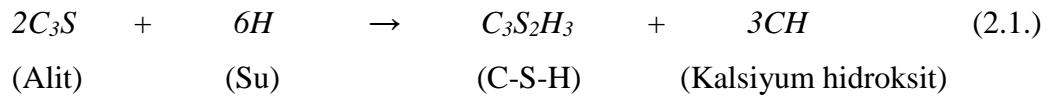
Çimentolar çeşitli harf ve semboller kullanılarak isimlendirilirler. Örneğin bir çimento torbasının üzerinde yer alan CEM-II/A-S/42.5R ibaresinde A harfi, %6-20 arasında değişen mineral katkı oranını ifade etmektedir. (Silis dumanı istisna olarak %10 ile sınırlandırılmıştır). S harfi bu mineral katkının cüruf olduğunu belirtirken, R harfi bu tip çimentonun erken yaş dayanımının yüksek olduğunu belirtir. 42.5 ise Mpa cinsinden çimentonun nihai dayanımı anlamına gelmektedir. Ayrıca bu çimento tipleri dışında sülfata dayanıklı çimentolar, beyaz portland çimentosu, düşük hidratasyon ısıllı çimentolar gibi özel çimentolar da mevcuttur (Bozgeyik, 2019)

Çimento suyla temas ettiğinde çimento hamurunda egzotermik reaksiyonlar gerçekleşir. Hidratasyon adı verilen bu kimyasal reaksiyonlar, çimento hamurunda sertleşmeye (priz) sebebiyet vermekte yani dayanım kazandırmaktadır. Harç ve betonun arzu edilen özellikleri doğrudan ana bileşiklerin hidratasyonuna bağlıdır. Hidratasyon tepkimeleri belirli bir zaman içerisinde olup bitmez, sürekli ve malzeme ömrü boyunca devam eder. Çimento prize başlandığı andan itibaren dayanım kazanmaya başlar ve çimentoda nihai dayanımın yaklaşık %90'ı 28 gün içerisinde kazanılır (Koçak, 2008).



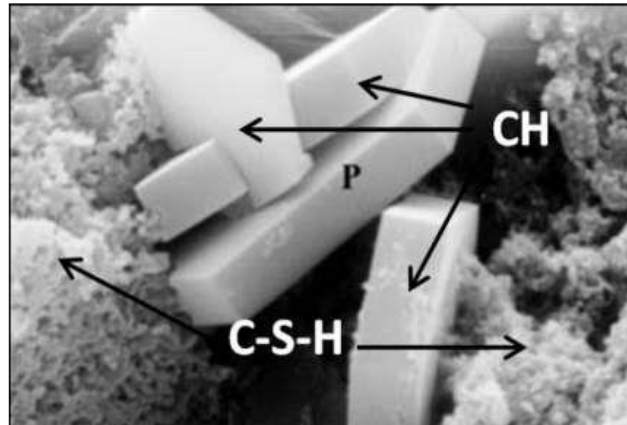
Şekil 2.3. Hidratasyonun şematik gösterimi (Nas, 2012)

Çimentodaki ilk sertleşme kalsiyum silikatların (C_3S ve C_2S) hidratasyonu ile gerçekleşir. Bağlayıcı ürünlerin çoğu bu iki ana bileşenin hidratasyonu ile ortaya çıkar. C_3S ve C_2S 'in suyla girdiği reaksiyonlar ve reaksiyon ürünleri kısaltılmış halleriyle aşağıda gösterilmiştir (Erdoğan, 2007):



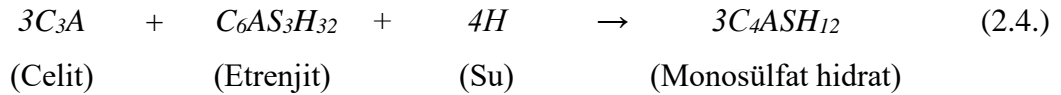
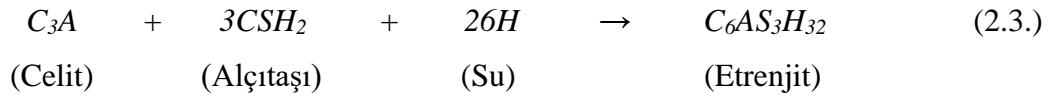
Bu iki silikat reaksiyonunun farkı, alitin belite göre daha fazla kireç içermesi ve dolayısıyla alitin tepkime hızının belitin tepkime hızına göre daha yüksek olmasıdır. Fakat iki bileşen de çimentonun bağlayıcılık özelliğine doğrudan etki eden bileşenlerdir.

C_2S 'in dayanıma ve bağlayıcılık özelliğine etkisi erken yaşlarda az iken daha sonra yüksek seviyelere çıktığı bilinmektedir. C_3S ise erken ve büyük yaşlarda dayanıma büyük katkı vermektedir (Aytekin, 2018). Reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan ürünler aynıdır fakat sayıları ve reaksiyona girilen su molekülü miktarları farklıdır. Kısaca CH olarak gösterilen $Ca(OH)_2$ ürünü sönmüş kireç olup, alitin hidratasyon reaksiyonu sonucu 3 adet, belitin reaksiyonu sonucu 1 adet oluşmuştur. Bu reaksiyonlar sonucunda çimento partikülleri üzerinde oluşan $C_3S_2H_3$ hidratasyon ürünü ise kısaca CSH olarak gösterilen iplik şeklinde uzayan bir bağ tabakasıdır ve “tobermorit jel” olarak bilinir. Kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu oluşan CSH jelleri ile birlikte dayanım hızlı bir şekilde artar. Bu süreçte kür işlemi uygulanarak hidratasyon sürekliliği için uygun sıcaklık ve su sağlanmalıdır. CSH jeli, çimento hamurunda dayanımı sağlayan asıl etkindir. CSH jelleri ne kadar fazlaysa mukavemet de o kadar yüksektir. Çimento partikülleri, CSH jelleri oluşuktan sonra hacimce yaklaşık 2 kat büyür ve böylece çimento-agrega karışımından oluşan harç içindeki boşluklar kapanmaya başlayarak dayanımda artış gözlenir. Silikatların hidratasyonu sonucu oluşan diğer ürün CH, kristal yapıdadır ve dayanıma katkısı yoktur veya çok azdır. Ayrıca CH, sülfat saldırısına karşı dirençsizdir. Dolayısıyla sülfatlı ortamlarda çözünüp boşluklu bir yapı oluşumuna dolayısıyla büyük dayanıklılık problemlerine neden olabilir. Önlem olarak puzolanik katkı malzemesi olan granüle yüksek fırın cürufu gibi malzemeler çimento harcı içerisine eklenerek, cürufun sönmemiş kireç (CaO) ile tepkime vermesi ve ilave CSH jellerinin oluşumu sağlanabilir. Böylece CaO'nun suyla birleştiğinde çözünme riski azaltılmış olur. Puzolan kullanımıyla birlikte CH da tepkimeye sokularak ilave CSH jeli oluşumu ve geçirimsiz bir yapıyla dayanımı daha yüksek bir karışım elde edilebilir.

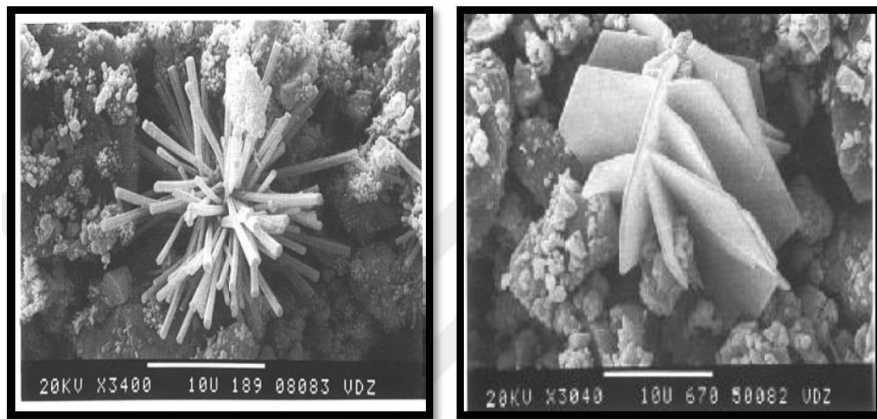


Şekil 2.4. Çimento hamurunda sönmüş kireç CH ve CSH jelinin SEM görüntüsü (Ulugöl, 2015)

C_3A hidratasyonu kristalleşmeden dolayı çok hızlı olup yüksek ısı açığa çıkarır ve kalsiyum alümino hidratların oluşumuna sebep olur. Hızlı hidratasyon sonucu çimento hamurunda yeterli dayanım sağlanmasına imkan tanımayan “ani priz” olayı gerçekleşir. Az miktarda alçıtaşı kullanımıyla bu sorun ortadan kalkar. Alçıtaşı kullanımının fazla olduğu durumlarda alçı suyla reaksiyona girerek çimento hamurunda geçici prize neden olur. Bu olaya “yalancı priz” adı verilir. Karıştırma işlemi devam ederse bu sorun ortadan kalkar. C_3A ile alçıtaşının birleşmesi sonucu “etrenjit” adı verilen 31 su moleküllü yüksek hacimli bir bileşik oluşur. Taze betonda zararsız bir bileşik olan etrenjit, sertleşmiş çimento harcında ilerleyen yaşlarda ortamda sülfat bulunduğu C_3A ve sülfatın tepkime vermesiyle oluşur ve harçta çatlamalara sebebiyet verebilir. C_3A 'nın hidratasyonu şu şekilde gerçekleşir (Yeğinobalı, 1999):



Makarna çubuğu görünümündeki etrenjit kristalleştikten sonra hacimce genişlemeye yol açar. Ortamdaki sülfat zamanla azaldığında hidratasyonu devam etmekte olan C_3A etrenjitle tepkimeye girer ve etrenjit zamanla monosülfat hidrata dönüşür. Çimento harcı bünyesinde ilerleyen yaşlarda ortaya çıkan monosülfat hidrat kristali, harç priz aldıktan sonra ortamda sülfat olduğunda etrenjite dönüşerek çimento harcında çatlamalara sebebiyet verebilir (Aruntaş, 1996)



Şekil 2.5. Monosülfat hidrat ve etrenjit kristalleri (Griesser, 2002)

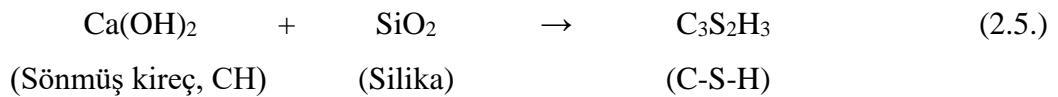
C_4AF bileşeninin hidratasyonu C_3A 'ya göre yavaş gerçekleşip C_3A hidratasyonu ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca C_4AF tepkimeleri hızlı gerçekleşmediğinden ani prize yol açmaz. C_3A hidratasyon tepkimelerinde alümina yerine demiroksit reaksiyona katılır. Ortamdaki sülfat yoğunluğuna bağlı olarak alçıtaşıyla tepkimeye giren C_4AF hidratasyonunda etrenjit ve monosülfat hidrata benzer bileşikler oluşmaktadır (Neville, 2006). Kısaca C_4AF ve C_3A bileşiklerinin hidratasyon reaksiyonları çimentonun bağlayıcılık özelliği üzerinde etkili değildir veya çok az olumsuz etkileyebilir. Esasen bağlayıcılık özelliği çimentoda C_3S ve C_2S bileşikleri tarafından sağlanır.

Çimento priz aldıktan sonra sertleşme süreci tamamlanmış olur. Fakat hidrate olmamış taneciklerin varlığıyla birlikte hidratasyon, çimento tanelerinin tepkimeye girebileceği su olduğu müddetçe yavaşlayarak devam eder ve soğuma süreci başlar. Bu şekilde çimento hidratasyonu yıllarca devam edebilir (Dayı, 2006).

2.2. Mineral Katkılar (Puzolanlar)

Günümüzde alternatif hammadde ihtiyacı ve çimento üretiminde çevreye verilen zarar da göz önüne alınarak yüksek kalitede yüksek dayanımlı ve dayanıklı çimento üretimi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Bu çimentoların üretilebilmelerinde esas görevi mineral katkıları yerine getirmektedir. Özellikle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, pirinç kabuğu külü, tras, volkanik tüf, diatomit gibi mineral katkıların farklı oranlarda çimentoya ikame edilmesiyle çevreye verilen büyük zararların önüne geçilmiş ve dayanım ve dayanıklılık açısından olumlu gelişmeler gözlemlenmiştir. Böylece mineral katkıları çimento üretiminde puzolanik aktiviteleri, boşlukları doldurma, harçlarda dayanım ve dayanıklılıkla ilgili birçok özelliği iyileştirmede ikincil bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Mineral katkıların kullanımıyla beraber atmosfere salınan CO_2 gazı salınımlarının azaltılmasının yanında, taze harçlarda işlenebilirlik artmakta, ayrışma ve terleme azalmakta, hidratasyon ısısı düşmektedir. Sertleşmiş harçlarda ise ileri yaşlardaki dayanım artmakta, sünme ve büzülme eğilimi azalmaktadır. Mineral katkıları en çok harcın dayanıklılığını iyileştirmektedir. Asit ve sülfat saldırılarına karşı dirençli, donma-çözülme hasarına karşı etkili ve donatı korozyonu riskinin daha az olduğu çimento üretimine olanak tanır (Tekin, 2005).

Çimento katkı malzemelerinin büyük bir çoğunluğu puzolanik özelliğe sahip malzemelerden oluşmaktadır. Puzolan, tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan fakat uygun ortam sıcaklığında ve uygun nemin bulunduğu ortam şartlarında C₃S ve C₂S ana bileşenlerinin hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan sönmüş kireç (CH) ile tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan ve ilave CSH jellerinin oluşmasını sağlayarak çimentoda dayanım, bağlayıcılık ve işlenebilirlik gibi özellikleri iyileştiren, yapısında yüksek oranda silis (SiO₂) ve alüminli bileşen (Al₂O₃) içeren ince öğütülmüş bir yapı malzemesi olarak tanımlanır (Mindess, 1981). Çimento özelliklerine olumlu yönde etki eden ve portland çimentosundan daha ucuz olan puzolanlar, çimento harcında portland çimentosu yerine ağırlıkça yüksek oranlarda kullanılabilir ve böylece alternatif ve daha ekonomik çimento harçlarının üretimine olanak tanır. Çimento hammaddelerinde yüksek oranda bulunan SiO₂ ve Al₂O₃ bileşenlerin varlığı, puzolanların çimento ve kireç ile kolay tepkime vermesine yol açar. Bu tepkime sonucunda ek CSH jelleri oluşturan puzolanlar, bağlayıcılık özelliği kazanmakla birlikte, çimentoda sönmemiş kireçle (CaO) de tepkime verebilir ve böylece CaO'nun suda çözünmesinin önüne geçilmiş olur (Güneşli, 2008). Bir puzolanın çimentoda gösterdiği reaksiyon şu şekildedir (Vitruvius, 1999):



Milattan yaklaşık 100 önce eski Roma zamanında Napoli kentinin yakınlarındaki Pozzuoli kasabasında, Vezüv volkanik dağının eteklerinde elde edilmiş olan “camsı volkanik toprak” bilinen ilk puzolandır. Puzolan terimi de Pozzuoli kasabasından gelmektedir (Ün, 2007). Yüksek miktarda silis ve alüminli bileşenlerin yanında yapısında az miktarda alkaliler ile magnezyum oksit, kalsiyum oksit ve demir oksit bileşiklerini de bulunduran puzolanlarda SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ oranı minimum %70 olmalıdır (Kıvrak, 2012). Puzolanların bağlayıcılık özelliği kazanabilmeleri için (Erdoğan, 2004);

- Amorf yapıda olup içeriğinde silika ve alümina oranının yüksek olması,
- Saf halde çok ince boyutta olması veya öğütülüp en az çimento tanecikleri kadar ince boyutlara getirilmiş olması gerekmektedir.

Puzolanik özelliğe sahip malzemelerin büyük çoğunluğu volkanik orijinlidir ve bu malzemeler TS-25'te "tras" olarak isimlendirilmiştir. Kaynakları her ne olursa olsun puzolanların esas bileşeni silistir ve %40-90 arasında bulunabilir. Reaktif silis oranı ise ağırlıkça %25'ten az olmamalıdır (Korkmaz, 2010). Çimento yerine ilave edilen mineral katkıların kullanım oranı genellikle %10-50 aralığındadır (Kıvrak, 2012). İnce öğütülen puzolanlar, çimentoda 3 farklı şekilde kullanılırlar (Dayı, 2006):

- Çimento hamurundaki boşluklara nüfuz ederek dayanıklılığı arttırmada,
- Kalsiyum hidroksitle karıştırılıp katkı çimento üretiminde,
- Doğrudan harç karışımına ilave edilerek bağlayıcı olarak kullanılabilirler.

Hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan C-S-H jelleri, çimento partiküllerinin yaklaşık 2 kat büyümesine neden olur. Bu büyüme çimentodaki boşlukları doldurmakta ve dayanımı ve dayanıklılığı yüksek harçlar elde edilmektedir. Bu oluşumda puzolanlar çok önemli bir etkiye sahiptirler. Harç dayanımlarının yaklaşık %90'a yakın kısmı 28 günde kazanılır ancak bu durum mineral katkı çimentolarda farklılık gösterebilir. Puzolanlı çimentoda hidratasyon süreci 28 günün sonunda aktif olarak devam etmektedir. 90 günlük harçlarda, normal harçlara göre puzolan ilaveli harçların daha dayanımlı olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise sönmüş kirecin ilerleyen yaşlarda puzolanın alüminli ve silisli bileşikleriyle reaksiyona girmesi sonucu C-S-H üretim sürecinin devam ediyor olmasıdır. Esas dayanım parametresi C-S-H jellerinin oluşmaya devam etmesi, çimentoda dayanım ve makro veya kapiler boşlukların kapanma eğiliminin önemli ölçüde artmasını sağlamaktadır (Erdoğan, 2013). Puzolanlar çimento üretiminin ikinci safhasında devreye girdiklerinden birim klinkere karşılık üretilen çimento miktarını da arttırmaktadır. Böylece enerji tasarrufuna imkan tanır. Ayrıca fabrika bacalarından çıkan zehirli gazların seyreltilmesini sağlar (Demirer, 2009). Puzolanların çimento üretiminde kullanılmasının olumlu etkileri şu şekilde özetlenebilir (Atakay, 2006):

- Kıvam ve işlenebilirliği arttırmaları.
- Kalsiyum oksitle tepkimeye girerek kirecin suda çözülmesinin önüne geçerler. Ayrıca sönmüş kireçle tepkimeye girerek çimento harcının dayanımını arttırmaları.
- Hidratasyon ısını düşürürler ve kütle betonlarında oluşabilecek çatlakları önlerler.
- Sülfat hücumu, klor etkisi, donma-çözülme hasarı ve alkali-silika reaksiyonuna karşı dayanıklılık sağlarlar.
- Sertleşmiş çimento harcında büzülme ve terlemeyi önlerler.
- Çimentonun maliyetini düşürürler ve enerji tasarrufu sağlarlar. Ayrıca CO₂ salınımını önemli ölçüde azaltırlar.
- Çimento harcındaki boşlukları doldurarak daha az geçirimli bir yapı oluşmasını sağlarlar.

Puzolanların olumlu katkılarının yanında, çimento hamuruna olumsuz etkileri de olabilir (Dallı, 2017):

- Erken yaş dayanım problemi oluştururlar.
- Çimento harcındaki su ihtiyacını arttırmaları.
- Soğuk havalarda prizi geciktirirler.
- Portland çimentosuyla üretilen betonların dökümü +5 °C’de mümkün iken, puzolanlı çimentoyla üretilen betonların dökümü için hava sıcaklığının en az 8 °C olması gerekmektedir.

Puzolanik aktivite indeksi

Bir çimento karışımı içerisinde hidrate olmuş kireç ile puzolanın birbiriyle nasıl etkileşim içerisinde olacağına yönelik özellik “puzolanik aktivite” ile açıklanmaktadır. Kalsiyum hidroksit ve puzolanın bünyesindeki alümina silikatlar arasında oluşup bağlayıcılık özelliği ve dayanım kazandıran hidratasyon ürününün olduğu kimyasal reaksiyon ve bu reaksiyonların hızı “puzolanik aktivite” olarak tanımlanır. Puzolanik aktivite, reaksiyon ürünlerinin kazandırdığı bağlayıcılık özelliğinin bir ölçütüdür. Ayrıca sulu ortamda sönmüş kireçle tepkimeye girme ve sertleşme kapasitesi olarak da ifade edilir (Massazza, 1989). İlave C-S-H jel üretimiyle çimentonun mekanik özellikleri ve dayanımı üzerinde etkili olan puzolanlar, puzolanik aktivite indeksi ile

karakterize edilir (Erdoğan, 2004). Çimento üretiminde kullanılacak bir puzolanın, optimum seviyede puzolanik aktiflik göstermesi gerekmektedir. TS 25 standardına uygun biçimde oksit bulundurması gereken puzolanlarda, puzolanik aktivite arttıkça reaksiyon hızı artmakta ve dolayısıyla karışımın kalitesi de artmaktadır. Puzolanik aktivitesi yüksek bir puzolan çimento harcında kullanılacak iyi bir puzolan olarak ifade edilir. Bir puzolanın puzolanik aktifliği, tanelerinin inceliğine, amorf yapıda olmasına ve $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının uygun seviyelerde olmasına bağlıdır (Erdoğan, 2009). Puzolanın puzolanik aktifliğinin, standartlarda belirtilen sınır değerinin üstünde olup olmadığı yapılan bazı testlerle belirlenir. TS EN 450-1 ve ASTM C 311 aktivite seviyesini ölçmek için kullanılacak malzemelerin miktarlarını, basınç dayanımının ölçülmesini ve testlerin nasıl yapılacağını baz alan standartlardır. Bu yöntemde kontrol numuneler ve test numuneleri hazırlanarak basınç dayanımları karşılaştırılır ve bir “dayanım aktivite indeksi” belirlenir. Katkı malzemesinin puzolan olarak adlandırılabilmesi için bu dayanım aktivite indeksi belli bir sınırın üstünde olmalıdır (Erdoğan, 1997). Aktivite indeksi, puzolanlı harç numunesinin ortalama basınç dayanımının A, kontrol harç numunesinin ortalama basınç dayanımına oranının yüzde cinsinden ifadesidir (ASTM C 111):

$$\text{Aktivite indeksi} = (A/B) \times 100 \quad (2.7.)$$

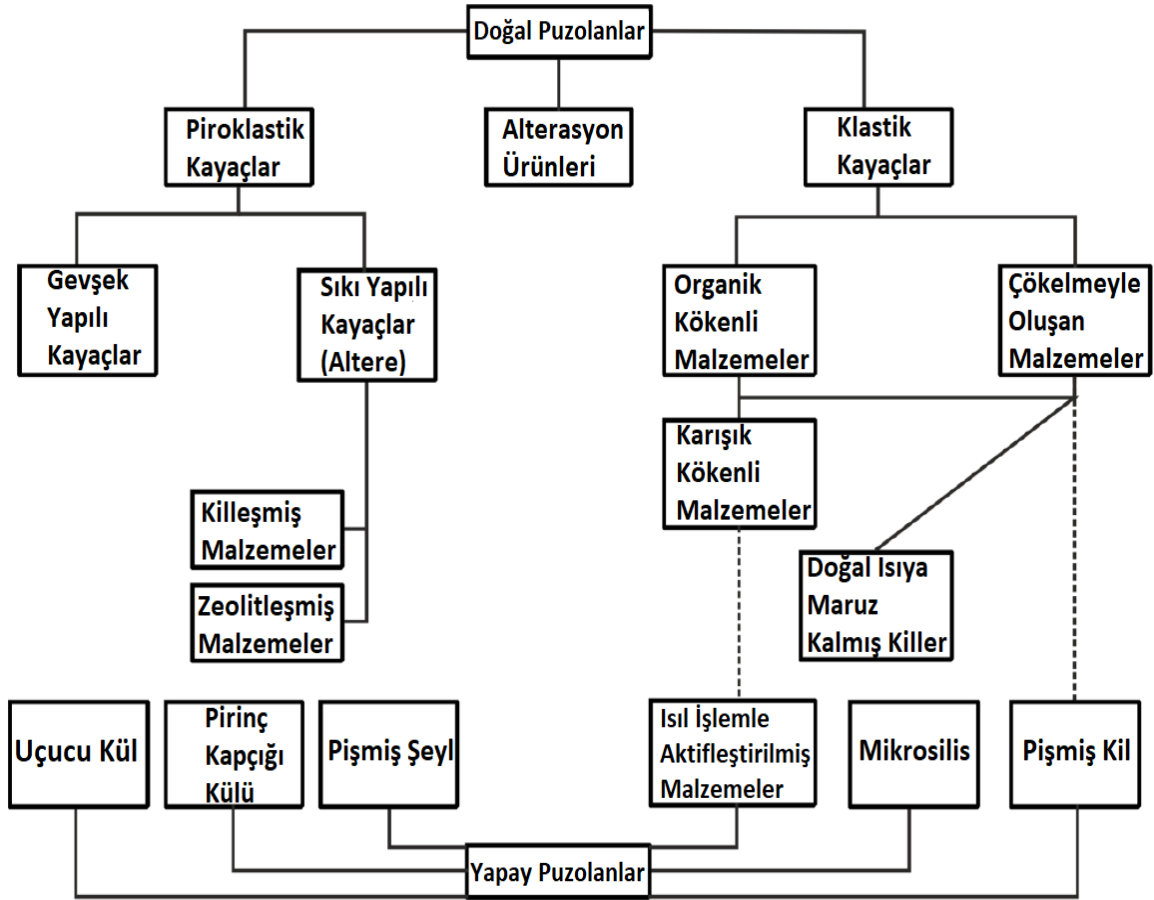
Burada; A: Puzolanlı harç numunesinin ortalama basınç dayanımı

B: Kontrol harç numunesinin ortalama basınç dayanımıdır.

Puzolanın dayanım aktivite indeksi ASTM C 618 standardına göre en az %75, TS 25 standardına göre ise en az %70 olması beklenir. İyi bir puzolanın, açık renkli ve homojen yapıda, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının, alkali oranının ve camsı faz miktarının fazla, kil minerallerinin az olduğu, konsolide, ortalama $2-2.3 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip, kimyasal bileşiminde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ oranının %80 civarında, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ miktarının %5, çözünmeyen malzeme oranının %80, $\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının en fazla %8, Fe_2O_3 oranının en fazla %6 ve kızdırma kaybının maksimum %8 olduğu söylenebilir (Eren, 2018). Puzolanik aktifliği belirleyen bazı etkenler vardır. Bu etkenler şu şekilde özetlenebilir (Shi, 2001):

- Atom yapısı
- Kimyasal Bileşim
- Kalsinasyon
- Aktivasyon

Puzolanları oluşum şekillerine göre “doğal puzolanlar” ve “yapay puzolanlar” olarak iki ana kategoriye ayırmak mümkündür. Doğal puzolanlar, genellikle ülkemizde “tras” adıyla bilinen volkanik kökenli volkanik cam, volkanik kül, tüf, pomza gibi malzemeler veya bir su bitkisinin kalıntıları olan diyatomitler ile bazı pişirilmiş kil ve şeyllerdir. Yapay puzolanlar ise genellikle ısıtma işlemi neticesinde elde edilmiş endüstriyel yan ürünler olarak bilinen yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül gibi fabrika atıklarıdır (Ulus, 2006). Puzolanların sınıflandırılmasında en yaygın olan Massazza'nın sınıflandırma sistemidir. Bu sistemde puzolanların kökenleri esas alınmıştır.



Şekil 2.6. Puzolanların sınıflandırılması (Massazza, 1998)

Doğal puzolan ve bilhassa tras kaynakları bakımından ülkemiz oldukça zengin bir ülkedir. Özellikle Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz bölgelerinde tras kaynakları oldukça fazladır. İnce öğütülebilme yeteneğine sahip olan doğal puzolanlar, bu sayede çimento hamurunda oluşan mikro boşluklara kolayca girip çimentonun dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirmektedirler. Ayrıca çimento hamurunda kıvam artırıcı olarak da kullanılabilen doğal puzolanlar, işlenebilirliği arttırmaktadır. Ancak doğal puzolanlar, çimento özgül yüzeyini artırarak çimentonun suya olan ihtiyacını da arttırmaktadır (Tuncer, 2014). Doğal puzolanlar; kırıntı taşları, Beyaz İtalyan Toprakları ve piroklastik kayalar (tras, volkanik tüfler, diyatomit, bazı killer ve zeolitli malzemeler) olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlar hem saf halde hem de öğütülerek çimento üretiminde kullanılabilirler (Yıldız, 2006). Doğal puzolanlar ısı işlem görmüş ve volkanik orijinli olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Çoğu volkanik orijinli piroklastik yapıdaki doğal puzolanlar, volkanik patlamalar sonucu volkan bacasından fırlayan parçacıkların oluşturduğu yataklardan elde edilirler. Genelde iyi bir doğal puzolan açık renktedir. Oksit bileşimi çimentoyla benzerlik gösterdiği için pişirmeye ihtiyaç duymadan direkt olarak çimento üretimine katılabilirler. Böylece termik enerji kullanımını azaltılarak enerji tasarrufu sağlanır (Hatice, 2018). Doğal puzolanların aktivitesi ve kimyasal yapısı bölgeden bölgeye değişim göstermektedir. Genellikle doğal puzolanların özgül kütlesi 2-2.35 g/cm² arasında değişmektedir (Akgül, 2006).



Şekil 2.7. Volkanik orijinli doğal puzolanlar; pomza, volkanik cam ve tuf (Akgül,2006)

Endüstriyel uygulamalar sonucunda fabrikaların atığı olarak oluşan ve tek başlarına bağlayıcılık özelliği bulunmayıp çimento harcı içerisinde su ile reaksiyona girip bağlayıcılık özelliği kazanan silis ve alümin içerikli yan ürünlere “yapay puzolan” adı verilir. En çok bilinen türleri yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanıdır.

Pirinç kabuğu külü, özellikle Hindistan, Çin ve Pakistan gibi Asya ülkelerinde kullanımı yaygın olan başka bir yapay puzolandır (Kılıç, 2013). Bazı yapay puzolanlardaki oksit kompozisyonları şu şekildedir:

Çizelge 2.5. Bazı yapay puzolanların oksit oranları (Atakay, 2006)

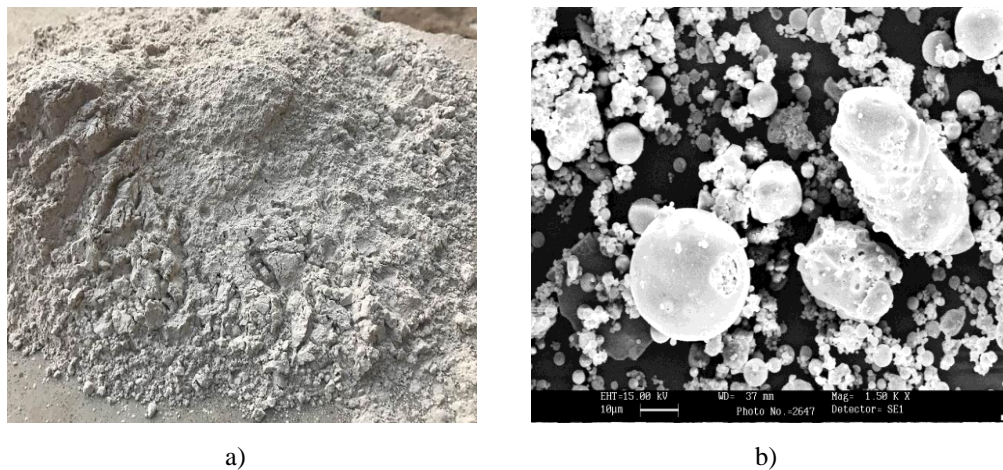
Yapay Puzolan	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Alkali (%)
Uçucu Kül	51.5	23.9	6.1	10.5	2.4	3.1
Yüksek Fırın Cürufu	40.2	11	0.8	34.5	9.4	3.6
Silis Dumanı	93.7	0.3	0.6	0.3	0.3	0.6

Elektrik santrallerinde yanma olayları sonucunda oluşan atıklar dışında, baca gazlarıyla atmosfere bırakılan yanmamış toz yakıt ve zerreleri, küller, ağır metaller gibi yabancı maddeler de mevcuttur. Yakma tesisinin türüne göre yakıtta bulunan mineral malzemeler kül ve cüruf olarak veya bacadaki gazlarla beraber ortamdan sürüklenerek uzaklaşırlar (Aruntaş, 2006). Çimento endüstrisinde en çok kullanılan puzolanik malzemelere ait özellikler, oluşum şekilleri, kullanım alanları gibi bilgiler aşağıda açıklanmıştır.

Uçucu kül

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmede yakıt olarak kullanılan pulverize kömürün yakılması sonucu elde edilen atık malzemelerdir. Linyitin yakılması sonucu ortaya çıkan ve bünyesinde CaO miktarı, SiO₂ miktarına göre daha fazla bulunan kalkerli atık malzeme “C tipi uçucu kül”, taş kömürün yakılması sonucu elde edilen ve SiO₂ oranı daha fazla olan atık malzemeler ise “F tipi uçucu kül” olarak adlandırılır (Akkaya, 2013). ASTM C 618 standardına göre SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ oranı en az %70, hidrate olmamış kireç (CaO) oranı %10’dan daha düşük olan uçucu küller F sınıfındadır. SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ toplamı %50’den çok olup reaktif CaO miktarı %10’dan fazla olan uçucu küller ise C sınıfındadır. Ayrıca TS EN 197-1 standardında belirtilen bileşen yüzdelere bağlı olarak tanımlanmış reaktif silis miktarı en az %25 olup CaO miktarı %5’ten az olan V sınıfı, reaktif silis miktarı %25’ten çok ve CaO oranının %5’ten fazla olduğu W sınıfı uçucu küller de mevcuttur. C sınıfı uçucu kül

hem bağlayıcı hem de puzolanik özellik gösterirken, F sınıfı uçucu kül puzolanik özellik gösterir (Korkmaz, 2010) Amorf yapıda, çoğunlukla silis ve alüminli bileşen içeren uçucu külün içeriğinde az miktarda kalsiyum oksit, magnezyum oksit, karbon ve demir oksit bileşikleri de vardır. Boyutları 0.5 – 150 µm arasındadır. Koyu ve açık gri renkte olabilirler (Tohumcu, 2011). 1937 yılından itibaren her çeşit beton üretiminde kullanılmaya başlanmıştır ancak kütle betonlarında daha çok tercih edilmektedir. Betonda hidrasyon ısını düşürdüğünden kütle betonları üretmede kullanılan çimentolarda kullanılırlar (Sakai, 2005). Uçucu küller çimento miktarının %20-30'u arasında karışımda kullanılabilirler. Normal şartlarda küresel şekilli olan uçucu küller sürtünmeyi azaltarak su ihtiyacını da %7'ye kadar azaltabilirler. Fakat günümüzde bazı uygulamalarda 1 birim çimento yerine 2 birim kül kullanılabilir. Böyle bir durumda su ihtiyacı artmaktadır (Dede, 2008). Uçucu küller taze karışımlarda su ihtiyacını azaltarak işlenebilirlikte iyileştirmeler yapar. Su kaybını önlediğinden ortamda hidrasyonun devamlılığını sağlayan suyun bulunmasını sağlar. Portland çimentosu yerine kullanılan kül, çimento miktarını azalttığı için hidrasyon ısını düşürür fakat taze harçta priz süresini geciktirir. Ayrıca karbonatlaşmaya karşı harcın savunmasız kalmasına neden olabilir (Coşkun, 2009). Bir katkı maddesi olarak uçucu küller, beton yüzeyini temizler ve işlenebilirliği artırırlar. Ayrıca su geçirgenliğini azaltarak sertleşmiş harçlarda büzülme önlerler. Boşlukları doldurarak ve kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girip C-S-H jelleri oluşturan uçucu kül, dayanıma katkı sağlar. Çimento oranını düşürdüğünden alkali-silika reaksiyonuna karşı daha dirençli bir harç elde edilmesine olanak tanır (Mercan, 2007). Uçucu külün puzolanik etkinliği inceliğine ve kimyasal bileşimine bağlıdır (Gündeşli, 2008).



Şekil 2.8. Uçucu kül a) Fiziksel görüntüsü, b) SEM görüntüsü (Demirhan, 2017)

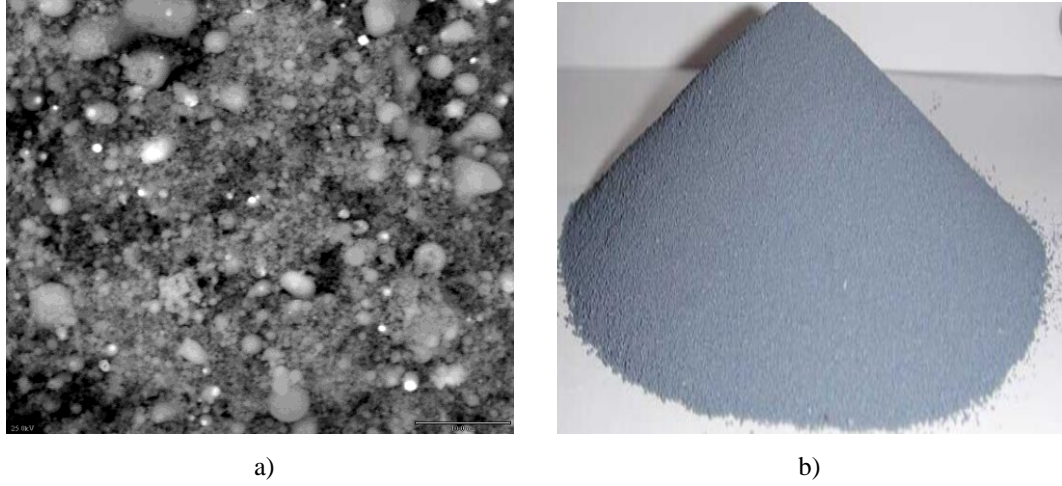
Yüksek fırın cürufu

Bölüm 2.3'te detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Silis Dumanı

Saf kuvarsın kömür ve odun parçacıklarıyla yaklaşık 2000 °C sıcaklıkla indirgenme tepkimesi gerçekleştirmesi ile açığa çıkan silisyum gazının havayla temas etmesi neticesinde hızlı bir şekilde yoğunlaşması, amorf yapıda, içeriğinde yüksek miktarda silika bulunduran, çok ince taneli toz halinde SiO₂ oluşturur. Bu malzemeye “silis dumanı” adı verilir (Malhotra, 1992). Silisyum metali, ferrosilis alaşımları ve silikon üretim reaksiyonları esnasında endüstriyel yan ürün olarak açığa çıkan silis dumanı, 2200-2300 kg/m³ aralığında özgül ağırlığa sahip, siyah beyaz renk arasında, boyutları çimento taneciklerinden yaklaşık 100 kat küçük ve 0.1-0.2 µm aralığında değişen yüksek puzolanik aktiviteye sahip atık bir malzemedir (Kandil, 2014). Silis dumanının beton katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği ilk kez Norveç Teknoloji Enstitüsü'nde 1950 yılında yapılan araştırmayla kanıtlanmıştır. Amorf yapıda olması, içeriğinde %85-98 aralığında silika içermesi ve boyutlarının çok küçük olması sebebiyle puzolanik aktifliği çok yüksek olan silis dumanı, çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılmaktadır (Mehta, 1986). Çimento tasarımlarında ve beton katkı maddesi olarak da kullanılabilen silis dumanı genellikle karışımda çimento miktarının %10'u kadar ilave edilir (Sümer, 2012). Çimento üretiminde ağırlıkça %7-10 oranında silis dumanı katkısı, ilk 72 saatte hidrasyon ısısında bir artışa sebep olabilir. Ancak sonraki günlerde silis dumanı katkılı çimentolarda hidrasyon ısısı, silis dumanı kullanılmayan çimentolara göre %8-10 kadar daha düşüktür (Dinçer, 2013). Silis dumanı, çimento arayüzünde oluşan boşlukları doldurarak terlemeyi azaltır ve agrega tanelerinin altında oluşabilecek su birikintilerini önler. Böylece daha kompakt bir yapı oluşturmakla beraber çimento hamuru ile agrega arasındaki aderansı arttırmaktadır (Akçaözoğlu, 2007). Terlemeyi azaltan silis dumanı, yüzeyden buharlaşacak suyun daha geç yukarı çıkmasına dolayısıyla plastik büzülmeyle oluşacak çatlakların artmasına yol açmaktadır. Bundan dolayı silis dumanlı harç ve betonlarda priz süreci başlayana kadar kür koşullarına çok dikkat etmek gerekir (Almaz, 2010). Çimento taneleri arasına kolayca yerleşebilen silis dumanı tanecik dağılımını iyileştirmektedir ancak büyük yüzey alanına sahip olduğundan harçlarda su ihtiyacını da arttırmaktadır. Bu durumlarda işlenebilirliği

arttırmak amacıyla süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılması gerekir (Esen, 2013). Ayrıca silis dumanı ince boyutta ve yüksek reaktiviteye sahip bir malzeme olduğundan 100 Mpa'dan yüksek dayanımlı karışımlarda erken yaşta yüksek mukavemet elde etmek için süperakışkanlaştırıcıyla beraber kullanılmalıdır. Çünkü silis dumanı da erken yaş dayanım problemi oluşturmaktadır (Duman, 2010).



Şekil 2.9. Silis Dumanı a) SEM görüntüsü, b) Fiziksel görüntüsü (Susman, 2018)

Pirinç kabuğu külü

Ülkemizde de tarımsal faaliyetleri yapılan pirincin üretimi sonunda oluşan pirinç kabukları yakılarak “pirinç kabuğu külü” oluşmaktadır. Yavaş ve hızlı soğutma yöntemleriyle elde edilirler. Yavaş soğutmada kristal yapılı, hızlı soğutmada ise amorf yapılı pirinç kabuğu külü oluşmaktadır. Amorf yapılı pirinç kabuğu külü, büyük özgül yüzeye sahip olup yüksek puzolanik aktivite gösterdiğinden çimento endüstrisinde kullanılır (Eren, 2018). Hasadı yapılan pirincin toplam miktarının %20'si kadar kabuk açığa çıkmaktadır. Kabuklar yaklaşık 500 °C'de yakılarak pirinç kabuğu külü oluşmaktadır. Bu kabuklar amorf yapıda olup içeriğinde yüksek oranda silika bileşenleri bulundurmaktadır. Bu özelliğinden dolayı puzolanik aktifliği çok yüksek bir katkı malzemesidir. Pirinç kabuğu külünün kullanıldığı ilk malzemeler kerpiç bloklar ve tuğlalardır (Mazlum, 1989).



Şekil 2.10. Pirinç kabuğu külü (Aygün, 2019)

2.3. Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

Çelik, doğada yaklaşık %5 oranında bulunan en yaygın dördüncü metal olarak bilinen demirin, karbon ve bazen krom, nikel gibi elementlerle oluşturduğu bir alaşımdır. Özgül ağırlığı 7.8 g/cm^3 olan demir elementi, yaklaşık $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de erir ve doğada magnetit, pirit, limonit ve spathik demir cevheri şeklinde bulunur. Magnetit (Fe_3O_4) ve hematit (Fe_2O_3) gibi demir cevherleri, demir elementi elde edebilmek için kok kömürü ve kireç taşının pişirildiği yaklaşık $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki döner fırınlarda ısıtılarak oksijenden ve silis, alümin, fosfor, mangan, kükürt gibi bazı yabancı maddelerden arındırılır. Ortaya çıkan malzemeye “yüksek fırın cürufu (YFC)” adı verilir ve demir-çelik fabrikalarından çıkan bir yan ürün olarak karşımıza çıkar (Tokyay, 2003). Demir cevherlerinin ergitilmesiyle özgül ağırlığı daha fazla olan dökme demir altta kalır. Oluşan YFC, hafifliğinden dolayı döner fırınlarda demirin üzerinde oluşmaktadır. Bu işlemden yakıt olarak kok kömürü kullanılır ve arıtma işlemi için ocağa kireç taşı eklenir. Kömürden gelen karbon ve demir cevherindeki oksijen tepkimeye girerek karbon monoksit gazı açığa çıkarır. Dipte eriyik haldeki demir, onun üzerinde ise SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , S , MnO içeren cüruf kalır. YFC, silika, alümina ve kireç içermektedir (Siddique, 2008). 1970 yıllarında üretilen çeliğin yarısı atık halindeyken bu oran günümüzde %4 civarındadır. Artan çelik üretimiyle beraber elde edilen cüruf miktarı da artmaktadır. Çimento endüstrisinde farklı kullanım alanlarına sahip olan cüruf, iki şekilde elde edilebilir. Çelik eğer geleneksel metotlarla üretilirse, ortaya çıkan cüruf kristal yapıya sahiptir. Puzolanik özellik göstermeyen bu cüruflar dolgu malzemesi olarak çeşitli alanlarda kullanılırlar. Modern yöntemlerle üretilen çelik ise amorf yapıya sahiptir ve puzolanik aktiviteleri yüksektir. Dolayısıyla çimento üretiminde

kullanılmaları daha uygundur. Cürufklar arasında kullanım alanı en fazla olan modern metotlarla elde edilmiş yüksek fırın cürufudur (Gündeşli, 2008). Dünyada her yıl 100 milyon tona yakın YFC, dökme demir ekstraksiyonu sonucu oluşmaktadır. Ancak ortaya çıkan cürufun tamamı bağlayıcılık özellik göstermez. Sadece bir kısmı bağlayıcılık özellik gösteren granüle halde yüksek fırın cürufudur (Erdoğan, 2007).

YFC'nin tercih edilme sebepleri arasında yüksek dayanımı, su emme yüzdesinin düşük olması ve ateşe dayanıklı olması yer alır (Yılmaz, 2014). Ayrıca taze harçlarda işlenebilirliği artırıp terlemeyi azaltan YFC, sertleşmiş harçlarda suya karşı geçirimsiz bir yapı oluşturarak sülfat hücumlarına karşı dayanıklılık sağlar. YFC, hidrasyon ısısını düşürerek prizi geciktirir (Kaya, 2010).

Cüruf, demir cevherlerinin ergitilmesi işleminden sonra yaklaşık 1500 °C sıcaklığa sahiptir. Cürufun soğutma işlemi için 3 yöntem mevcuttur ve bu yöntemler sonucunda 3 farklı cüruf elde edilebilir. Soğutma işlemi yavaş gerçekleşirse kristal yapıda kalsiyum silikat içeren cüruf elde edilir. Doğal ortamda soğumaya bırakılarak oluşan bu cürufa "havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu" adı verilir. Bazalta benzer özellikler gösterdiğinden agrega olarak kullanılabilir. Ayrıca dolgu malzemesi olarak yol kaplamalarında, kagir yapılarda ve yalıtım malzemelerinde de kullanılabilir (Ulugöl, 2015).



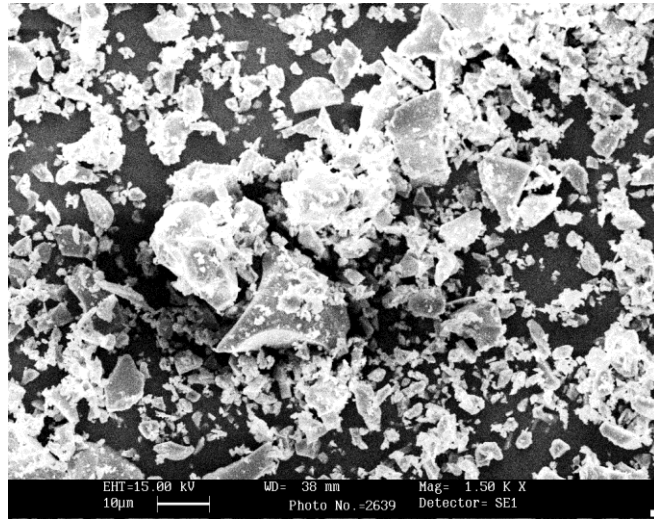
Şekil 2.11. Agrega olarak kullanılan havada soğutulmuş cüruf (Ulugöl, 2015)

İkinci yöntemde su, basınçlı hava ve buhar kullanılarak cürufun içerisine buharın hapsolmesi sağlanır ve cürufda gözenekli bir yapı oluşur. Bu yöntemle oluşan cüruf "genleştirilmiş yüksek fırın cürufu" olarak bilinir. Bu cüruf türünde de soğuma yavaş gerçekleştiğinden kristal yapı hakimdir ve hafif beton üretiminde agrega olarak kullanılabilir (Ulugöl, 2015)

Cüruf hızlı şekilde soğutulursa, akışkanlığında hızlı bir azalma gözlenir ve kristal yapı oluşmaz. Amorf yani camsı bir yapıya sahip hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren “granüle yüksek fırın cürufu” elde edilir.

Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GYFC)

Hızlı soğumanın sağlandığı yöntemle oluşan GYFC, yaklaşık 1500 °C'deki cürufun soğuk ortama aniden bırakılması veya suya daldırılması, cürufa yüksek basınçlı su püskürtülmesi, hava granülasyonu yöntemi gibi metotlarla oluşur. Soğuma çok hızlı gerçekleştiğinden viskozitede artış gözlenir ve atomlar kristal yapı oluşturmadan camsı yapı oluşur. Kurutulup ince öğütülen amorf yapıdaki GYFC, sönmüş kireçle (CH) tepkimeye girerek hidrolik bağlayıcı bir malzeme olur (Dallı, 2017). GYFC tanelerinin 4-15 mm'lik kaba kısımları hafif betonların agregası olarak, 4 mm'den küçük kısmı ise çimento üretiminde mineral katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Erdoğan, 2006). Öğütülmüş GYFC kullanılarak üretilen çimentolarda klor ve su geçirimsizliği düşüktür. Ayrıca GYFC donma-çözülme hasarından kaynaklı soyulmalara karşı dirençli bir yapı oluşturur (Topgül, 2016).



Şekil 2.12. GYFC'nin SEM görüntüsü (Demirhan, 2017)

GYFC beyaza yakın bir renkte ince öğütülmüş haldedir. Portland çimentosu karışıma gri renk verirken, GYFC katkılı çimentolarda daha açık ve parlak bir renk hakimdir. GYFC katkılı çimentoyla hazırlanan harçlar daha pürüzsüz bir yüzeye sahip

olmaktadır (Siddique, 2008). GYFC'nin fiziksel özellikleri Çizelge 2.6.'da verilmektedir.

Çizelge 2.6. GYFC'nin fiziksel özellikleri (Siddique, 2008)

Fiziksel Özellik	Değer
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.9
Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)	1200
Özgül Yüzey Alanı (m ² /kg)	425-470
Fiziksel form	Beyaz toz

Esasen kalker orijinli bir malzeme olan GYFC, içeriğinde oranı en az %95 olan SiO₂ + Al₂O₃ + CaO + MgO bileşiklerinden oluşmaktadır. Bu bileşikler GYFC'de serbest halde değil, alüminosilikat mineralleri şeklinde yer alır. GYFC portland çimentosuyla aynı fakat farklı oranda ana bileşenlere sahiptir (Siddique, 2008). Çizelge 3.1.'de GYFC'ye ve portland çimentosuna ait kimyasal özellikler verilmektedir. Görüldüğü üzere GYFC ve portland çimentosu kimyasal olarak birbirine benzemektedir. GYFC'nin kimyasal yapısı puzolanik özelliklerini doğrudan etkiler. Alkali oranı yüksek bir GYFC, iyi bir hidrolik bağlayıcı olarak bilinir. CaO/SiO₂ değeri arttıkça puzolanik aktivite de artmaktadır. Ancak CaO oranı sınır değerinin üstüne çıktığında tane dağılımı güçleşeceğinden aktivite azalabilir. Sabit CaO/SiO₂ değerinde Al₂O₃ artışı, puzolanik aktifliği de arttırmaktadır (Mehta, 1999).

GYFC, suyun bulunduğu ortamda sönmemiş kireçle tepkimeye girip bağlayıcı malzeme olarak, klinker ve alçıtaşıyla beraber öğütülüp CEM-III tipi mineral katkı çimento üretiminde veya beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilir. ASTM standardına göre GYFC, çimentolarda %65 oranına kadar bulunabilir. Piyasadaki puzolanlı çimentolarda ise GYFC oranı maksimum %50 ile sınırlı kalmıştır. GYFC, CEM-II Portland Katkılı/Kompoze çimento tipinde %35'e kadar, CEM-III YCF katkı çimento tipinde ise %95'e kadar yer alabilmektedir (TS EN 197-1, 2002).

Çimento üretiminde GYFC kullanmanın bazı çevresel, ekonomik ve teknik avantajları vardır. Çevresel avantajları ile ilgili yapılan bilimsel araştırmalar gösteriyor ki %65 oranında GYFC içeren 1 ton çimento üretimi için gerekli enerji, 1 ton portland çimentosunun üretimi için gerekli enerjinin yaklaşık yarısı kadardır. GYFC ilavesiyle cüraf miktarı kadar klinkerin çimento üretiminde eksiltmesi ve klinkere olan ihtiyacın

azalması, klinker üretim sürecinde çevreye verilen zararın minimuma indirilmesine olanak tanır. Farinin döner fırınlarda pişirilmesiyle ortaya çıkacak CO₂ miktarının ve kullanılan yakıt tüketiminin azaltılması, inşaat bakım-onarım masraflarının en aza indirilmesi, GYFC kullanımının çevresel ve ekonomik avantajları arasında yer alır (Tokyay, 2009).

GYFC'nin çimento üretiminde bir katkı malzemesi olarak kullanılmasının teknik avantajları şu şekilde özetlenebilir (Siddique, 2008):

- İşlenebilirliği arttırırlar. GYFC, pürüzsüz bir yapıya sahip olduğundan ve geç reaksiyon verdiği için çimento karışımlarında su ihtiyacını azaltır. Su kaybını önleyen GYFC, çimento hamurunda su kaybına bağlı rötre çatlaklarını önleyerek dayanıma katkı sağlar.
- Kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek C-S-H jeli oluşturan GYFC, bu sayede boşlukları azaltarak dayanımda artış sağlarken, sönmemiş kireci bağladığı için ilerleyen yaşlarda hacim genişlemesiyle ve sülfat etkisiyle çatlaklara yol açabilecek etrenjit oluşumunu önler. Böylece etrenjit sülfat hasarını da azaltmış olur.
- GYFC, çimento hamurunun daha boşluksuz ve geçirimsiz bir yapıya sahip olmasını sağlar. Bu sayede su ve suyla beraber çimento hamuru bünyesine zararlı kimyasalların geçişini önler. Donma-çözülme hasarı, sülfat hücumu, klor ve asit saldırısı, alkali silika reaksiyonu, gecikmiş etrenjit oluşumu gibi birçok olumsuz duruma karşı çimento hamurunun korunmasını sağlayarak dayanıklılığı arttırır.
- GYFC priz süresini uzatır, hidrasyon ısını düşürür. Böylece sıcak havalarda kütle betonlarının dökülmesini kolaylaştırır.
- Çimento karışımlarında terlemeyi azaltarak plastik büzülme ve oturma çatlaklarını önler.

GYFC kullanımının bazı dezavantajları da olabilir. Priz süresini uzatan GYFC'nin, erken prizin istendiği soğuk hava koşullarında kullanılması tavsiye edilmez. Ayrıca GYFC çimento hamurunda erken yaşlarda dayanım problemi oluşturur. Bundan dolayı son yıllarda bilimsel çalışmalara konu olmuş "Nanoteknoloji" erken yaş dayanımı yüksek çimento tasarımları için önemli bir çalışma alanı olmuştur. Bu

çalışmadaki çimento tasarımında kullanılan “Nano Malzemeler” son yıllarda katkı çimento üretiminde kullanılan nano boyuttaki taneciklerdir.

2.4. Nanoteknoloji ve Nano Malzemeler

Malzemelerin çeşitli yöntemlerle analiz edilerek saptanan özellikleri ve davranış şekilleri o malzemenin mikro yapısıyla doğrudan ilgilidir. Bilim insanları bu düşünceden yola çıkarak alternatif malzeme tasarımlarıyla ilgili çalışmalar yapmaktadırlar. Bundan dolayı günümüzde temel malzemedeki ziyade tasarım sonucu elde edilen malzemeler daha çok tercih edilmeye başlanmıştır (Schwartz, 2006).

Çimento esaslı kompozitler, milimetrik veya daha küçük boyuttaki taneciklerden oluşur. Bundan dolayı birçok dayanıklılık problemiyle karşı karşıya kalan çimento kompozitleri, geçirimli bir yapıya sahip olmaktadır. Ayrıca çok fazlı ve zaman içerisinde dayanım kazanma özelliğine sahip kompozitler, aşınma ve bozulmalara karşı dirençsiz olmakta ve zaman içerisinde daha büyük dayanım/dayanıklılık kaybı yaşayabilmektedir. Küçük boyutlardaki bozulmalar zamanla daha büyük kayıplara yol açmaktadır. Sonuç olarak çimento esaslı kompozitlerin performansı, yapısındaki küçük boyutlu taneciklerin davranış ve özelliklerine bağlıdır denilebilir (Demirhan, 2017). Bundan dolayı son yıllarda literatürde sıkça karşılaştığımız “nano teknoloji” ile mikro yapıdaki boşluklar ve hidrasyon ürünlerinin nano düzeyde çalıştırılması konusu, çimento esaslı kompozitlerin sürdürülebilirliği açısından önemli çalışma alanlarından bir tanesi olarak kabul edilmektedir. Nanoteknoloji terimi malzemelerin, yapıların ve bazı diğer öğelerin moleküler veya atomik ölçekli üretimini ifade etmektedir. Biyomekanik, elektronik, makine ve inşaat mühendisliği gibi birçok sektörde kullanılan nano malzemelerle, çimento esaslı yapı malzemelerinin dayanıklılık ve mekanik özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır (Dündar, 2016). ABD Ulusal Nanoteknoloji Girişimi (NNI) nanoteknoloji terimini şu şekilde ifade etmektedir:

- 1-100 nm (1 nm = 10^{-9} m) aralığında tane boyutuna sahip nano ölçekteki malzemeleri ve bunlarla ilgili teknolojik gelişmeleri kapsayan bir terimdir.
- Nanoteknoloji, küçük boyutlu malzemelerden dolayı yeni özellikte yapılar oluşturur.
- Atomik ölçekte kontrol ve davranış mekanizması geliştirir.

Nano ölçeğin çok ufak olduğunu anlayabilmek için küçük bir oyuncak topun yarıçapı ile dünyanın yarıçapı kıyas edilebilir. Topun yarıçapı 1 nm kabul edilirse, buna kıyasen dünyanın çapı yaklaşık 1 m olacaktır. Başka bir örnek verecek olursak, insan saçının 1 teli yaklaşık 80.000 nm genişliğindedir. Nano ölçeğe sahip bu tür malzemelere “nano malzeme” veya “nano parçacık” adı verilmektedir (Birgisson ve ark., 2012). Nano malzemeleri doğal ve yapay nano malzemeler olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Doğal nano malzemeler, insan gücüyle herhangi bir işlem yapılmadan doğada hazır bulunan malzemelerdir. İnsan eliyle üretilmiş nano malzemeler ise yapay nano malzemelerdir ki nanoteknoloji bu tür malzemeleri kapsar (Filipponi, 2007). Malzemelerin akma dayanımı, ergime sıcaklığı ve dayanımı gibi mekanik özellikleri malzemenin dış kuvvetler altındaki etkisine ve moleküler yapısına bağlıdır. Bundan dolayı bir malzemenin nano fazı, kütle fazından farklı özellik gösterebilir. Çünkü nano ölçekte yerçekimi kuvveti malzemenin partikül kütlelerinin düşüklüğünden dolayı önemsiz kabul edilir. Nano ölçekte elektromanyetik kuvvetler etkindir. Bu kuvvetler ise nesnelere arasındaki itme ve çekme kuvvetlerine bağlı olup malzemenin moleküler davranışını belirlemede önemli rol oynar. Çok geniş yüzey alanına sahip olduğundan nano partiküller, malzemenin reaktivitesini artırır. Nano ölçekteki bu özellikler, çimento esaslı kompozitlerde makro yapıyı etkileyen önemli faktörlerdendir. Böylece nanoteknoloji ile çimento endüstrisinde malzemelerin doğası değiştirilebilmekte ve alternatif malzeme üretimi gerçekleştirilebilmektedir. İlerde nanoteknoloji ile kömür atomları kullanılarak elmas bazlı materyaller, bakterilerden daha ufak boyutta karmaşık yapılar elde edilebilecektir (Phoenix ve ark., 2003).

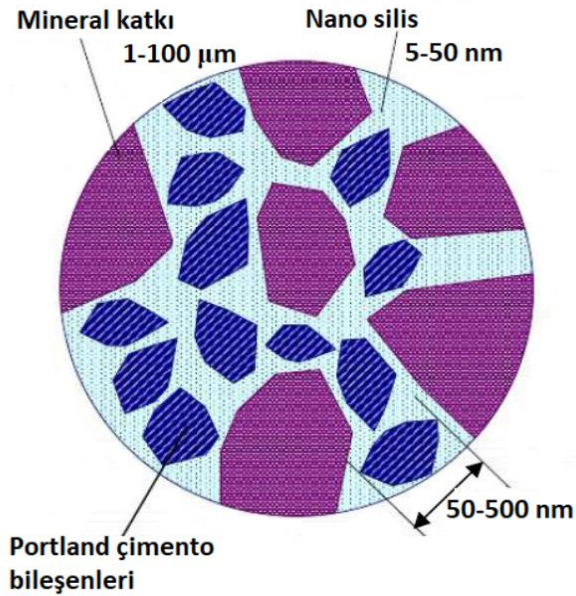
Nano Malzemelerin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanılması

Son yıllarda araştırmacıların ilgi odağı haline gelen nanoteknolojinin, çimento esaslı kompozitlerde de sıkça kullanıldığı görülmektedir. Nanoteknolojinin literatürde çimento esaslı sistemlerdeki uygulama alanları şöyledir (Raki ve ark., 2010):

- C-S-H jelinin nano ölçekte incelenmesi ve değiştirilmesi
- Karbon nano tüp ilaveli çimento esaslı yapı malzemeleri
- Katkıların beton karışımı içerisine kontrollü bir şekilde eklenmesi
- Nano malzeme içeren çimento harçları

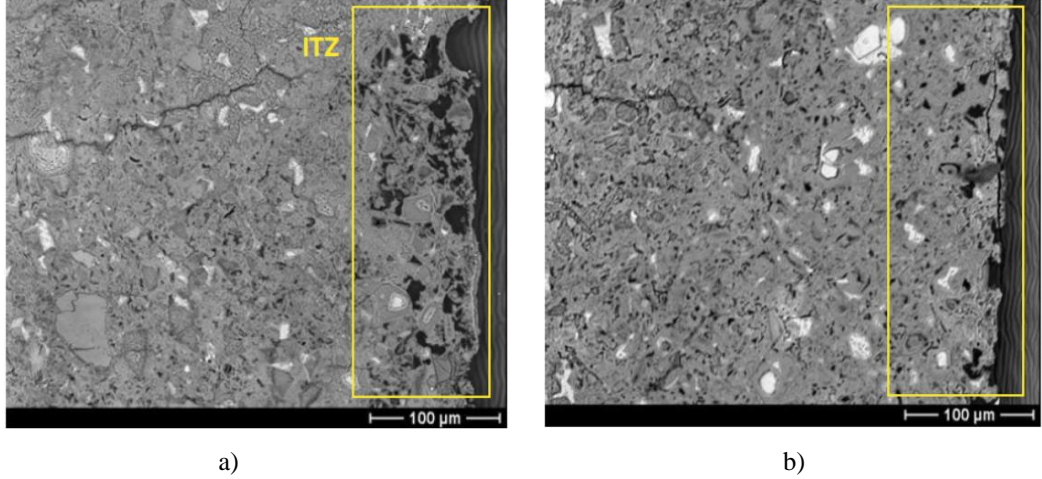
Nano malzemeler çimento sistemlerinde dayanımı arttırmak (Campillo ve ark., 2007; Jo ve ark., 2007; Sanchez ve İnce, 2009) dayanıklılığı iyileştirmek (Cardenas ve Struble, 2006), karışıma kendini temizleyebilme, anti-mikrobiyal nitelik, kirlenmeyi azaltma gibi fotokatalitik özellikler kazandırmak (Lackhoff ve ark., 2003), çimento harcının buğu önleyici özellik (Diamanti ve ark., 2008) ve algılayıcı özellik (Hui ve ark., 2004) gibi yeni fonksiyonlar kazanmasını sağlamak için kullanılırlar. Nano malzemeler çimento sistemlerinde hidrasyonu farklı şekillerde etkilemektedir. Hidratasyon ürünlerinin daha kolay elde edilebilmesi için yeni alanlar oluşturan nano malzemeler, matris içerisinde tane boyut dağılımını ve boşluk oranını da değiştirmektedir. Nano malzemelerin çimento sistemlerinde kullanılmasının avantajları şu şekilde özetlenebilir (Demirhan, 2017; Dünder, 2016; İlkentapar, 2017):

- Mukavemeti, dayanıklılığı ve mikroyapıyı iyileştirerek çimento esaslı kompozitlerde performans özelliklerini artırırlar.
- Nano tanecikler, çimento harcında veya beton karışımlarında ilave C-S-H jelleri üreterek daha kompakt bir yapı oluşmasını sağlar ve bu sayede karışım içerisinde oluşabilecek nano çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini engeller.



Şekil 2.13. Çimento, puzolan ve nano malzeme içeren bir kesit (Sobolev, 2006)

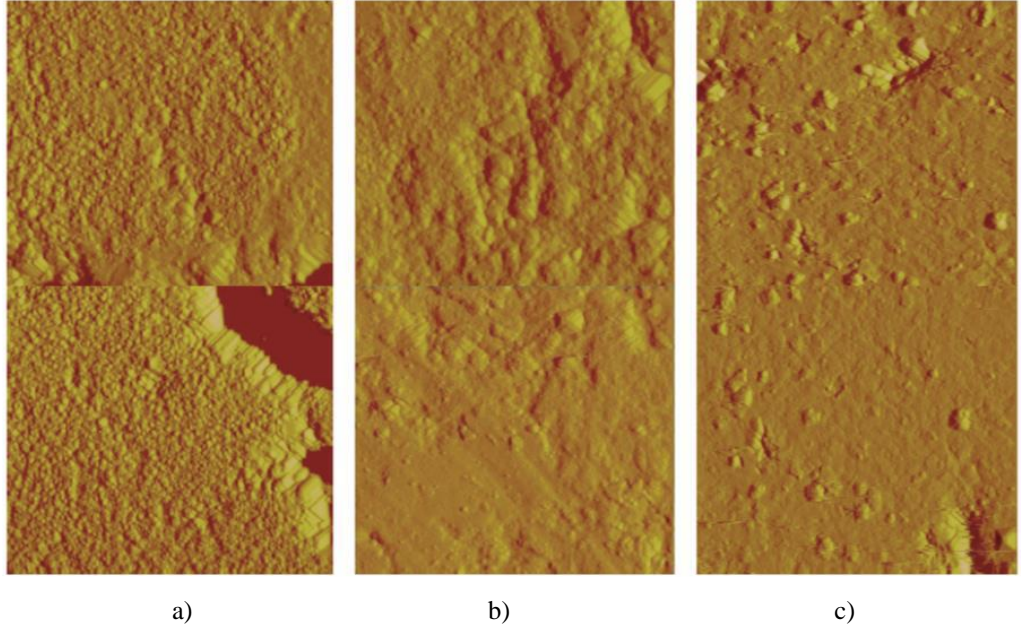
- Nano partiküllerin kütlesinin çok küçük olması, nano ölçekteki gözeneklerin kapanmasını sağlar. Böylece diğer harç bileşenlerinin dolduramadığı boşluklar dolularak büyük parçacık salınımlarının azaldığı, geçirimsizliği az bir yapı oluşur.



Şekil 2.14. a) Kontrol agrega numunesi ve b) Nano malzeme ile kaplanmış agrega numunesi (Sanfilippo ve ark., 2010)

- Çimento harcında hidrasyon reaksiyonları için katalizör görevi gören nano tanecikler, yüzey alanı/hacim oranı çok yüksek, muazzam kimyasal reaktiviteye sahip malzemelerdir ve hidrasyon ürünlerinin kolay bir şekilde üretilmesini sağlar. Hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırıp, erken yaşlarda yüksek dayanım elde edilmesine katkıda bulunur. Ayrıca sertleşmiş harçta mikroyapıyı iyileştirerek basınç dayanımını artırır. Nano malzemelerin bu tür etkileri, yüksek hacimde puzolan içeren çimento karışımlarının erken yaş dayanım problemini gidermektedir. (Raki ve ark., 2010; Lee ve Kurtis, 2012).
- Nano malzemeler mineral katkılarla beraber kullanılarak, portland çimentosunun üretiminde atmosfere salınan CO₂ gazının elimine edilmesini sağlar. Son yıllarda CO₂ emisyonlarından dolayı düşük klinker-yüksek puzolan oranına sahip çimento üretimi daha önemli bir hal almıştır. Yüksek miktarda puzolan içeren çimento sistemlerinde en büyük dezavantaj olarak göze çarpan erken yaş dayanım problemi, nanotanecik ilavesiyle telafi edilebilir. Ayrıca çimentoda klinker oranının azaltılmasını sağlayan nano tanecikler, çimento üretiminde masrafların azaltılmasını sağlar. Sisteme eklenen nanomalzemelerin maliyeti de klinker oranının azaltılmasıyla dengelenebilir.

- Nano malzeme ilaveli çimento sistemleriyle üretilen betonların yüzeyleri çok düzgün ve daha pürüzsüz olmaktadır. Ayrıca daha kompakt ve düzenli bir mikro yapı elde edilir. Nitekim yapılan bir çalışmada mineral katkıli betonun yüzeyinin kontrol numuneye kıyasen daha pürüzsüz, nano malzeme ilaveli betonun yüzeyinin ise en pürüzsüz ve düzenli olduğu görülmüştür. (Özyıldırım ve Zegetosky, 2010).



Şekil 2.15. AKM görüntüleri a) referans numunesi, b) puzolanlı numune, c) nano malzeme katkıli numune (Özyıldırım ve Zegetosky, 2010)

Çimento sistemlerinde nano malzeme kullanımı daha gelişmiş çalışmalarını gerektiren bazı dezavantajlara da yol açabilir. Bu dezavantajlar şöyle sıralanabilir (Dündar, 2016):

- Nano malzemeler yüksek su emme kapasitesine sahip olduğundan su ihtiyacını arttırmaktadırlar.
- Nano taneciklerin çimento matrisi içerisinde düzgün dağılması için yüksek enerjiye ihtiyaç vardır.
- Büyük yüzey alanlarına sahip nano malzemeler, yüksek reaktiviteye sahip olduklarından yüksek hidrasyon ısısına yol açmaktadır. Bu dezavantajı gidermek için yüksek oranda puzolan kullanımıyla çimento oranı azaltılabilir. Ayrıca karışıma bazı kimyasal malzemeler de ilave edilebilir.

- Nano malzemelerin çimento esaslı kompozitlerde kullanılmasıyla ilgili uygulama bazı zorluklar ortaya çıkabilir. Bu zorlukların başında nano malzemelerin üretimi gelmektedir.

Nano malzemelerin üretilmesi

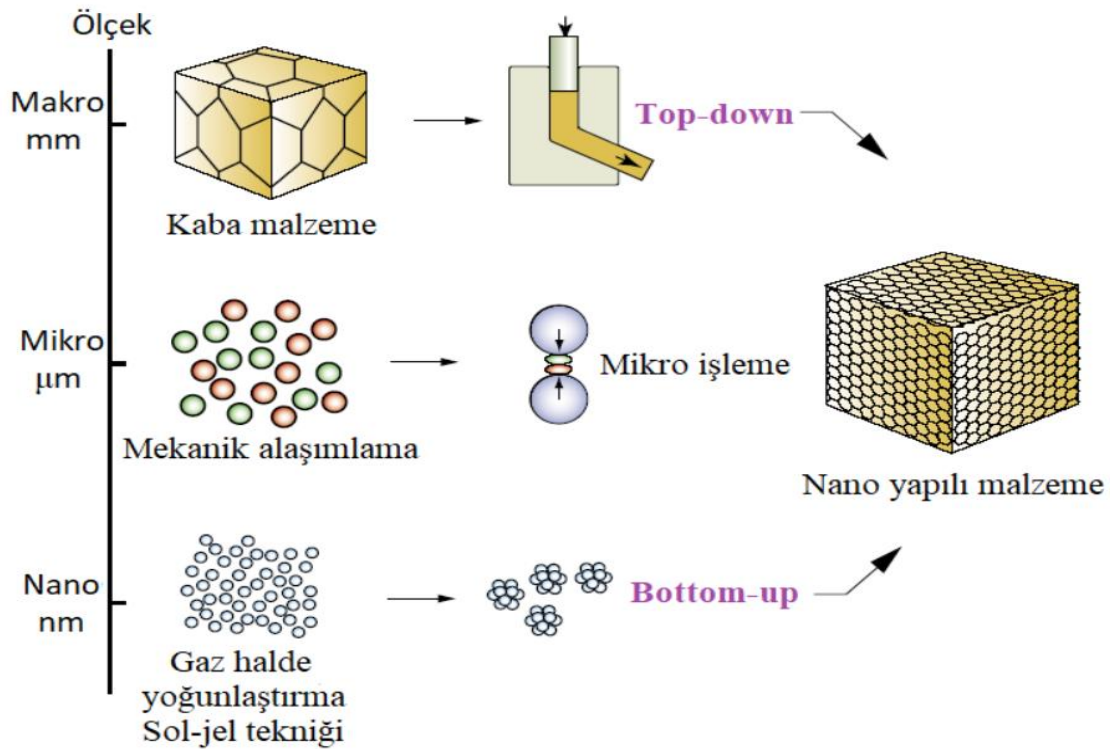
Nano ölçekteki parçacıklar, makro boyuttaki parçacıklara göre farklı davranış sergileyebilir. İstenen spesifik davranışın sergilenebilmesi için hem nano boyutta çalışmak hem de tanecikleri topaklaşma eğilimi göstermeden dağıtmak gerekir. Bu bağlamda oluşturulan aglomera çözeltileri içerisinde partiküllerin homojen biçimde çözülebilmesi ve nano taneciklerin üretimi sırasında birbirlerine yapışmadan ayrılmalarının sağlanması için geliştirilen bazı teknikler vardır. Bunlar (Tsuzuki ve ark., 2004);

- Gaz halde yoğunlaştırma işlemi
- Sıvı halde çökeltme işlemi
- Sol-jel tekniği
- Hidrotermal sentez gibi tekniklerdir.

Nanoteknoloji, bottom-up (aşağıdan yukarıya) ve top-down (yukarıdan aşağıya) olmak üzere iki çeşit üretim tekniğini dikkate alır. Bu yöntemlerin seçimi ise malzemenin uygun olup olmadığına ve maliyetine bağlıdır. Bottom-up yöntemi ile nano malzemeler genellikle biyolojik süreçlerle doğal yollardan elde edilir. Bottom-up yöntemine en güzel örnek DNA çift sarmalının yapısıdır. Bu yöntemde atom ve moleküller düzenli bir oluşum içerisine girerler. Malzemeler moleküler veya daha alt birimindeki bileşenlerinden geçirilerek doğal yollarla üretilirler. Atomik düzeyde nano taneciklerin yeniden tasarlanması esasına dayanan Bottom-up tekniği “moleküler nano teknoloji” olarak bilinir (Demirhan, 2017). Bottom-up yaklaşımı malzemenin fazına göre sınıflandırılır. Bunlar; katı, sıvı ve gaz faz tekniği olarak bilinir (Kayır, 2010). Bottom-up yaklaşımıyla üretilen malzemeler, Top-down yaklaşımıyla üretilen nano malzemelere kıyasen daha düzgün yapıdadır. Bu yöntemle üretilen nano kristallerin atomik ve moleküler birimde dizilimi mükemmel olup üniform bir yapı oluşur. Fakat nano malzemelerin bu yaklaşıma yeteri kadar ayak uyduramaması, uygulamadaki

zorluklar ve üretim maliyetlerinin fazlalığı bottom-up tekniğinin en önemli dezavantajları arasında yer alır (Demirhan, 2017)

Top-down tekniği, büyük ölçekli parçacıkların küçük ölçekli parçacıklara indirgenmesi esasına dayanır. Atomik ölçekteki oluşumları dikkate almaz. Malzemelerin atomik birimde boyutsal özelliklerine ve orijinal yapısına müdahale etmeden nano boyuttaki parçacıklara dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntemde malzemelerin atomik özellikleri korunduğundan ve nano malzemeler küçük boyutta olmalarına rağmen büyük yüzey alanına sahip olduklarından normal boyuttaki taneciklere göre çok daha yüksek performans gösterebilmektedirler (Demirhan, 2017). Ayrıca ucuz olması, büyük ölçekli üretime imkan vermesi ve 2-20 nm partikül boyutlarına kadar inebilmesi, Top-down yaklaşımın diğer avantajları arasında yer alır. Ancak bu yöntemle düzensiz taneciklerin üretilme ihtimali ve öğütme esnasında yabancı maddelerin taneciklere karışma riski vardır. Öğütme işlemi ise bilyalı değirmen aracılığıyla veya fotolitografi tekniğiyle gerçekleştirilir (Filipponi ve ark., 2007).

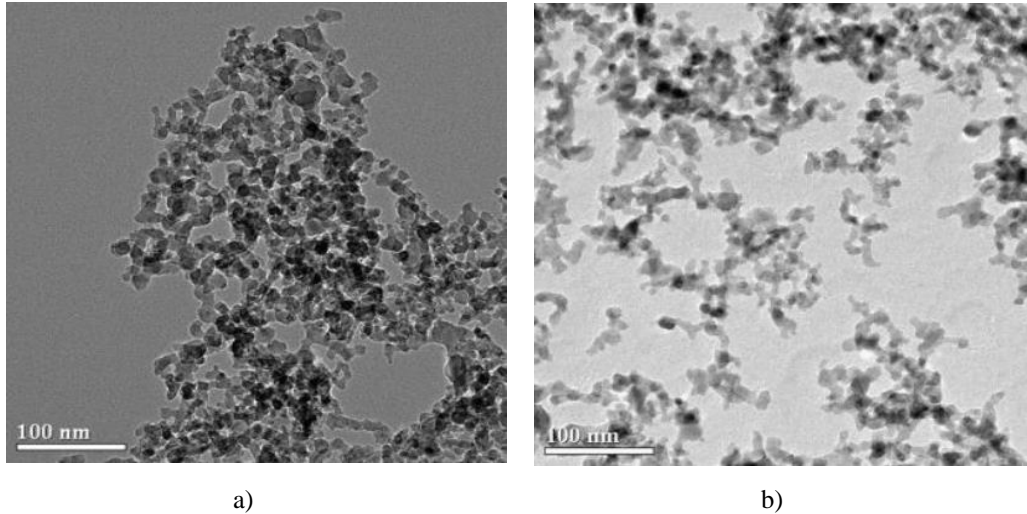


Şekil 2.16. Nano malzemelerin üretim şeması

Nano taneciklerin çimento matrisi içerisinde üniform ve homojen bir şekilde dağıtılması, hidrasyonu etkileyen önemli faktörlerdendir. Aynı nano malzemelerin deneysel çalışmalarda çimento matrisi içerisinde farklı özellikler göstermesi, nano taneciklerin dağıtım metodu ile ilgilidir (Muzenski, 2015). Zayıf Van der Waals kuvvetlerine sahip nano taneciklerin topaklaşma eğilimi göstermeden matris içerisinde dağılımın sağlanması için geliştirilen bazı teknikler vardır. Bunlar (Lomboy, 2014);

- Ultrasonifikasyon yöntemi
- Kayganlaştırıcı yüzey aktif madde (Sümfaktan) kullanımı
- Mekanik öğütme tekniğidir.

Sümfaktan kullanımı, nano tanecikler arasında kimyasal itme kuvveti sağlar fakat çimento kompozitlerinde bazı performans kayıplarına yol açabilmektedir. Bundan dolayı yüksek enerji katmanlarında titreşim etkisi oluşturan ultrasonifikasyon yöntemi, literatürde en çok tercih edilen yöntemdir. Mekanik öğütme tekniğine kıyasen, ultrasonifikasyon yöntemi kullanılarak matris içerisinde dağıtılan nano taneciklerle ilgili yapılan çalışmalarda, erken yaş dayanımında ve hidrasyonu ürünlerinde artış gözlemlenmiştir (Kawashima ve ark., 2014).

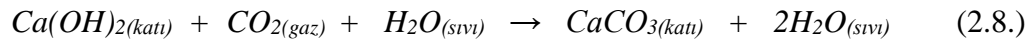


Şekil 2.17. Nano alüminin matris içerisinde dağılımının SEM görüntüsü a) ultrasonifikasyondan önce, b) ultasonifikasyondan sonra (Demirhan, 2017)

Literatürde daha çok nano silis (SiO₂) ve nano titan (TiO₂) üzerine yapılan çalışmalar göze çarpmaktadır. Bunun yanında nano kalsit (CaCO₃), nano alümin (Al₂O₃), nano demir (Fe₂O₃) ve nano kil ile ilgili yapılan birçok çalışma mevcut olduğundan sadece bu tez çalışması kapsamında kullanılan nano malzemeler irdelenecektir.

Nano Kalsit (CaCO₃)

Nano CaCO₃ (NC), doğada yüksek oranda bulunan kalkerden (CaCO₃) ve kireç taşından elde edilmektedir. Kalker, doğadan hazır olarak temin edilebildiği gibi, organik ve inorganik maddelerden arındırılmış saf su çözeltisinde kirecin CO₂ ile tepkime vermesiyle yapay olarak da üretilebilir. Oluşan tepkime şu şekildedir (Pour ve Moghadam, 2014):

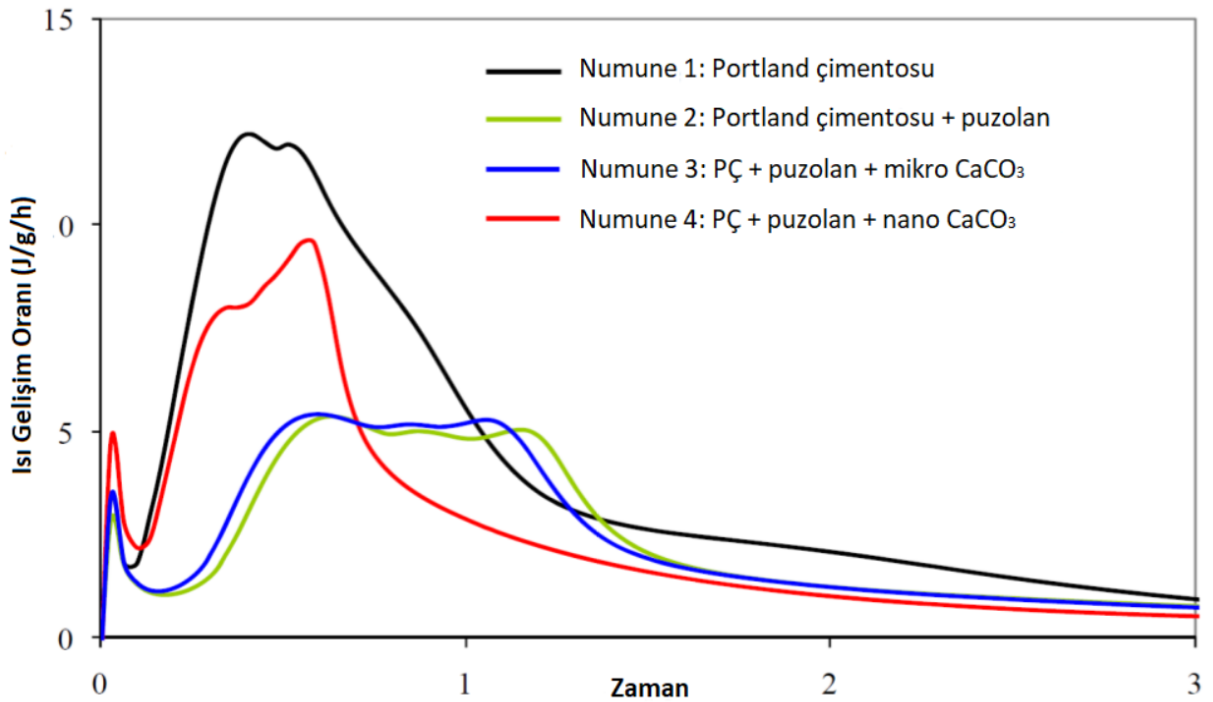


NC, ortalama 15-40 nm tane çapına sahip, spesifik yüzey alanı 24-32 m²/g değerine kadar ulaşabilen bir malzemedir. NC'nin tane boyutu 50-120 nanometreye kadar inebilmektedir. NC ve bu tez çalışması kapsamında kullanılan diğer nano malzemelere ait SEM görüntüleri bölüm 3.1.5'te verilmektedir.

Çimento kompozitlerinde NC kullanımının etkilerinin incelendiği çalışmalar son yıllarda ağırlıkta olup literatürde NC ile ilgili kısıtlı bilgiler mevcuttur. Yapılan birçok çalışma, NC'nin çimento sistemlerinde erken dayanım ve hidrasyon hızı üzerinde pozitif bir etki yaptığını ortaya koymaktadır. Bu etki ile çimento karışımlarının mekanik özellikleri iyileştirilmektedir (Silvestre ve de Brito, 2016). Yüksek oranda puzolan içeren çimento kompozitleriyle ilgili çalışmalarda, mikro CaCO₃ içeren karışımlara kıyasen, nano CaCO₃ içeren karışımların hidrasyon oranlarının daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir (Sato ve Beaudoin, 2006; Sato ve Beaudoin, 2007). Hidrasyon oranında artış sağlayan NC'nin erken yaşlarda basınç dayanımını da iyileştirdiği yapılan deneysel çalışmayla kanıtlanmıştır (Ramachandran ve Zhang, 1986). Ayrıca doluluk oranını arttırarak sertlik sağlayan NC, elastisite modülünü de arttırmaktadır (Sato ve Beaudoin, 2011). NC, erken yaşlardaki olumlu katkısının yanında, yüksek yaşlarda da

çimento karışımına süneklilik kazandırarak eğilme şekil-değiştirme kapasitesini arttırmaktadır (Yeşilmen ve ark., 2015).

%50 oranında puzolan içeren çimento karışımlarında, mikro ve nano CaCO_3 'ün hidratasyon ısısı üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada NC ilaveli kompozitin, hidratasyon ısısı oluşum hızının daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 2.18). NC'nin bu etkisinin özellikle erken yaşlarda dayanıma katkı sağlayan C_3S ana bileşeni üzerinde olduğu ifade edilmiştir (Raki ve ark., 2010).



Şekil 2.18. NC'nin hidratasyon hızına etkisi (Raki ve ark., 2010)

Nano kalsitin, nano silis ve nano alümin gibi maliyetli nano malzemelere göre daha çok tercih edilmesinin sebepleri arasında, yüksek miktarda bulunabilmesi ve daha ekonomik olması yer almaktadır. Özellikle çimento karışımlarının erken yaş dayanımının önem arz ettiği çalışmalarda daha çok tercih edilmektedir.

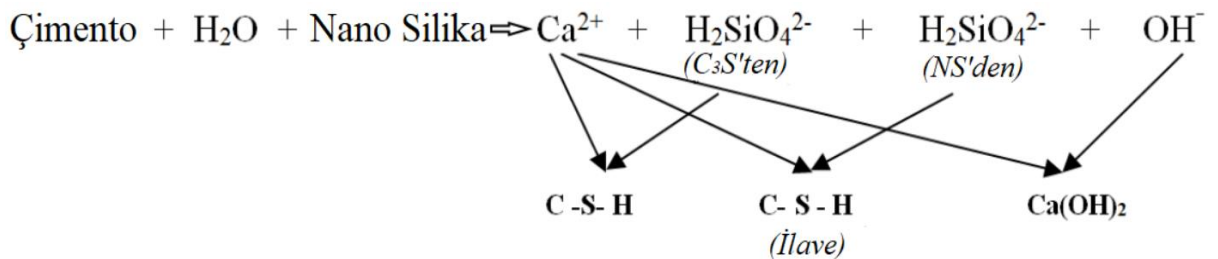
Nano Silis (SiO_2)

Nano silis (NS), genel olarak mikronize edilmiş silika kumlarından üretilen bir nano malzemedir. Nano malzemeler grubu içerisindeki en yaygın malzeme olan NS,

günümüzde çimento bazlı karışımların geçirgenlik ve mekanik özellikleri üzerindeki pozitif etkisini incelemek üzere araştırmacılar tarafından sıkça kullanılmaktadır. Her ne kadar NS'nin çimento hamurunda dayanım ve dayanıklılığa etkisi, silis dumanının etkisiyle benzerlik gösterse de yapılan bazı çalışmalar, NS ilaveli karışımların erken dayanımının daha fazla çıktığını ortaya koymaktadır. Bunun sebebi ise NS'nin çok daha yüksek reaktiviteye sahip olmasıdır (Qing ve ark., 2007). Ayrıca NS, çimento tanecikleri arasındaki boşlukları doldurarak yoğunluğu yüksek ve daha az su talep eden karışım tasarımına imkan tanır. Daha yoğun karışımlar, daha az gözenekli bir yapıda olduğundan basınç dayanımı da daha yüksek çıkmaktadır (Zapata ve ark., 2013). Bu avantajların sağlanması için NS taneciklerinin çimento karışımı içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmasına özen gösterilmelidir. Yapılan bazı çalışmalar, NS taneciklerinin çimento bazlı kompozitlerde üç farklı etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Gaietero ve ark., 2008);

- i. Çimento hamurunun gözenekliliğini azaltma,
- ii. Puzolanik reaksiyon sonucu sönmüş kireci (CH), C-S-H jellerine dönüştürme,
- iii. C-S-H jelinde silikat zincirlerinin boyunu uzatarak iç yapının değiştirilmesini sağlama.

Bu üç etki sonucunda sertleşmiş çimento hamurunun mikro yapısının iyileştiği, dış etkenlere karşı daha dirençli bir yapı oluştuğu rapor edilmiştir. Çimento tanecikleri ile temas eden NS, $H_2SiO_4^{2-}$ bileşiği ve Ca^{2+} iyonunun birleşmesi sonucu ilave C-S-H jelleri oluşturur. Oluşan ilave C-S-H jelleri suda çözünerek çimento tanecikleri arasındaki boşlukları doldurur ve daha yoğun bir şekilde C-S-H jel oluşumuna sebebiyet verir.



Şekil 2.19. NS içeren çimento bazlı karışımların reaksiyon kinematığı

NS, hidrasyon kinetiğini de etkilemektedir. Nitekim NS ilaveli çimento karışımlarında hidrasyon süreci boyunca oluşan C-S-H jelleri ve CH miktarı gibi parametreler dikkate alınarak yapılan çalışmalarda, NS'nin erken yaşlarda hidrasyon hızını ve hidrate olmuş faz miktarını arttırdığı, sertleşmiş hamurda ise ilerleyen yaşlarda ilave C-S-H jeli oluşumunu desteklediği ortaya çıkmıştır. Çalışmalar sonucunda, NS ilavesinin özellikle erken yaşlarda çimento hamurunun basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir (Hou ve ark., 2012; Tobon ve ark., 2012; Madani ve ark., 2012; Ltifia ve ark., 2011).

Muazzam kimyasal reaktiviteye sahip NS tanecikleri, yüksek özgül yüzey alanları sayesinde çimento hamurunda puzolanik aktivite indeksini arttırmakta, ayrıca CH ile tepkimeye girip ilave C-S-H jelleri üreterek dayanıma katkı sağlamaktadır (İlkenntapar, 2017). NS, karışımdaki çimento miktarını da azaltmaktadır. Ancak taneciklerin bir yığın oluşturacak şekilde birleşmesini engellemek amacıyla NS kullanımının %10'u geçmemesi tavsiye edilmektedir. Nano taneciklerin boyutu, süperakışkanlaştırıcı miktarı, s/ç oranı ve kür koşulları gibi birçok faktörden etkilenebilen numuneler, karışım oranlarına dikkat edilerek optimum düzeyde tasarlanmalıdır (Rashad, 2014).

NS taneciklerinin süperakışkanlaştırıcı kimyasallar ile olumlu etkileşim göstermemesi ve çimento hamurunun işlenebilirliğini azaltması, çimento bazlı karışımlarda NS kullanımının olumsuz etkileri arasında gösterilebilir. Bu olumsuz durumun, NS tanecikleri ve çimento hamurunda çözünmüş alkalilerin etkileşimi sonucu oluşan su tutma kapasitesi yüksek jellerden kaynaklandığı ifade edilmektedir (Berra ve ark., 2012).

Nano Alümin (Al_2O_3)

Son derece yüksek reaktiviteye sahip nano alümin (NA), kompozit malzemelerin yanı sıra kataliz uygulamalarında, biyomedikal araştırmalarda, şeffaf iletken sıvılarında, aşınmaya dayanıklı parça üretiminde, özelliklerini iyileştirmek üzere ısı transfer sıvılarında ve ambalaj malzemelerinde de kullanılabilen bir nano malzemedir.

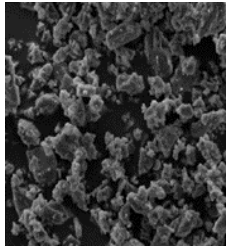
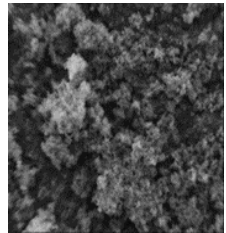
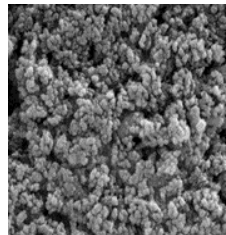
Çimento esaslı kompozitlerde hidratasyonu etkileyen iki ana kimyasal, nano silis ve nano alümindir. NS, daha çok mukavemet özelliklerinde ön plana çıkan bir nano malzeme olarak bilinir. NA ise çimento karışımının priz mekanizmasını kontrol altında tutarak, çimento hamurunun prize başlama süresini hızlandırır (Norhasri ve ark., 2017). Özgül yüzey alanı çok yüksek olan NA, çimento hamurunda CH ile tepkimeye girerek C-A-H jelleri oluşturmaktadır. Bu tepkimenin hızı ve oluşacak ürün miktarı, NA'nın özgül yüzey alanıyla ve saflık derecesiyle orantılı olarak artmaktadır (Jo ve ark., 2007).

Literatürde NA kullanılarak yapılmış çalışmalar diğer nano malzemelere kıyasen oldukça azdır. NA'nın çimento karışımlarında performansa etkisi NS kadar olmasa da (He ve Shi, 2008) yapılan bazı çalışmalar, çimento esaslı kompozitlerde NA kullanımının basınç dayanımını arttırdığını ifade etmektedir (Li ve ark., 2006; Shekari ve Razzaghi, 2011). Aynı çalışmalarda kompozitin işlenebilirliğinde azalmalar gözlenirse de NA'nın, kompozitte çekme ve basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirdiği, klor geçirimsizliği ve su emme kapasitesi gibi durabilite özelliklerinde ise iyileştirmelere olanak tanıdığı rapor edilmiştir (Razzaghi ve ark., 2011). Çimento hamurunda poroziteyi azaltan ve ara yüz yoğunluğunu arttıran NA, elastisite modülünü de belli bir oranda arttırmaktadır (Li ve ark., 2006; Li ve ark., 2007).

Bazı çalışmalar ise NA'nın basınç dayanımına katkısının yok denecek kadar az olduğunu ifade etmektedir (Nazari ve ark., 2010). Literatürde NA ile yapılmış çalışma sayısının oldukça az olmasının temel nedeni, NA'nın basınç dayanımına çok az katkıda bulunmasıdır. Farklı oranlarda NA içeren numunelerle yapılan bir çalışmada, tüm yaşlarda hemen hemen aynı basınç dayanımı test sonuçlarına ulaşılmıştır (Barbhuiya ve ark., 2014; Behfarnia ve Salemi, 2013). Fakat çalışmalar, NA'nın elastisite modülünü arttırdığını ve çimento esaslı kompozitlerin dayanıklılık özellikleri üzerinde olumlu etkilerinin de bulunduğunu ifade etmektedir.

Nano malzemelerin çimento karışımının taze özelliklerine (akma dayanımı, işlenebilirlik, plastik viskozite) ve sertleşmiş hal özelliklerine (basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, elastisite modülü) etkileri Çizelge 2.7.'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.7. Çimento kompozitlerinin taze ve sertleşmiş özelliklerine nano malzemelerin etkisi (Demirhan, 2017)

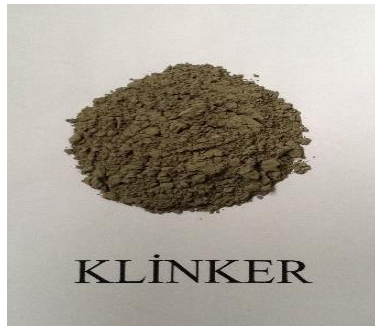
Nano Tipi	SEM Görüntüsü	Taze Özellikler	Sertleşmiş Özellikler	Erken Yaş Dayanımı	Hidratasyon Hızı/Oranı	Priz Süresi	Mikroyapı (Geçirimsizlik)	Dayanıklılık
CaCO ₃		→	↑	↑	↑	↓	↑	↑
SiO ₂		↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑
Al ₂ O ₃		↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑

3. MATERYAL VE YÖNTEM

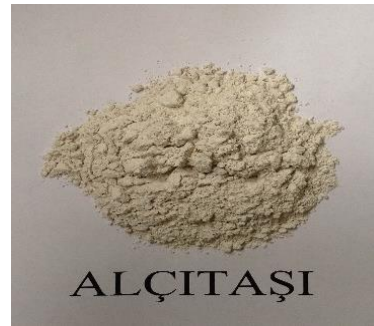
3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Ticari olarak satılan CEM I tipi çimentolarda genel olarak %5 minör ilave bileşen oranında kalkerli (CaCO_3) malzemeler kullanıldığı için mevcut çalışmada kullanılan nano boyutlu kalsitin (CaCO_3) etkisini tam olarak incelemek adına CEM I çimentosu direkt olarak standarda (TS EN 197-1) uygun bir şekilde laboratuvar şartlarında üretilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Fernas Çimento Öğütme ve Paketleme Tesisinden (FER-ÇİM) (Şekil 3.1-e) temin edilen klinker malzemesi (Şekil 3.1-a) %5 oranında alçıtaşı (Şekil 3.1-b) ile birlikte küçük değirmende (Şekil 3.1-c) öğütülerek CEM I çimentosu (Şekil 3.2-a) elde edilmiştir. Üretilen çimentonun standarda uygun incelik aralığında olup olmadığı öğütme işleminden hemen sonra blaine özgül yüzey alanı tespit cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.1-d). Çimento ve alçıtaşının hem fiziksel özellikleri hem de kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1’de verilmiştir.



a) Klinker



b) Alçıtaşı



c) Değirmen



d) Blaine Cihazı



e) FERÇİM çimento üretim fabrikası

Şekil 3. 1. Malzeme, cihaz ve diğer görüntüler

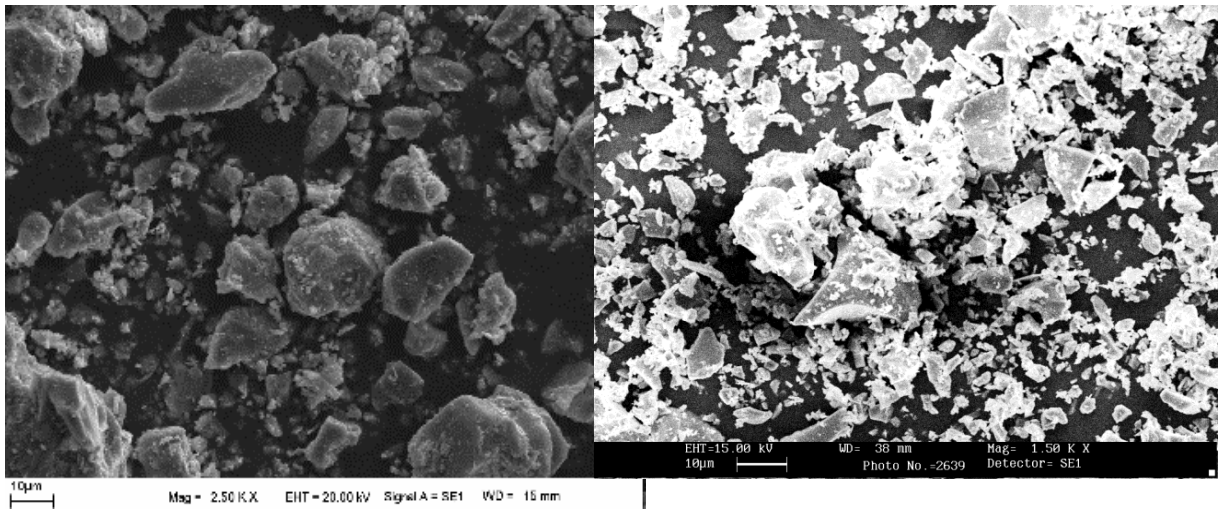
Çizelge 3.1. Klinker, Yüksek fırın cürufu ve Nano malzemelerin kimyasal bileşenleri

Kimyasal Malzeme Kompozisyonu (%)	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	Alçıtaşı	Nano Kalsit	Nano SiO ₂	Nano Al ₂ O ₃
CaO	61.36	37.43	30.93	56.01	1.10	0.00
SiO ₂	20.41	39.62	1.53	0.63	86.99	0.10
Al ₂ O ₃	5.34	10.62	0.59	0.13	1.19	98.48
Fe ₂ O ₃	3.10	1.40	0.52	0.22	0.53	0.43
MgO	3.48	6.11	0.69	0.54	0.11	0.54
SO ₃	2.57	0.79	44.07	0.04	0.21	0.06
Na ₂ O	0.37	0.27	0.05	0.03	0.66	0.04
K ₂ O	0.94	0.96	0.05	0.01	0.01	0.00
Kızdırma Kaybı	2.15	2.80	21.57	42.39	9.20	0.35
Fiziksel Özellikler						
Özgül Ağırlık, gr/cm ³	3.24	2.9	2.32	-	-	-
Blaine Özgül Yüzey Alanı, cm ² /gr	3092	3451	-	-	-	-
BET Yüzey Alanları, m ² /kg	-	-	-	7.4	162.3	32.5
Ortalama Tane Çapı, nm	-	-	-	1630	15	20

3.1.2. Mineral Katkılar

Bu çalışmada mineral katkı olarak Karabük Demir-Çelik Fabrikası'ndan temin edilen yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı 3.21 g/cm^3 , Blaine özgül yüzeyi $3451 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir. Demir kütlelerinin yüksek fırında eritilip artırılmasıyla elde edilen cürufun bir anda soğutulması ile elde edilen yüksek fırın cürufu, TS-EN 197-1 standardına göre kütlece minimum %67 oranında $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{SiO}_2)$ toplamını içermelidir. Ayrıca $(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ oranı 1'den büyük olmalıdır.

Yüksek fırın cürufuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.1.'de verilmiş olup, yüksek fırın cürufuna ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü de Şekil 3.2-b'de verilmiştir.



a) Çimento SEM Görüntüsü

b) Yüksek Fırın Cürufu SEM Görüntüsü

Şekil 3.2. Bağlayıcı malzeme SEM görüntüleri (Demirhan, 2017)

3.1.3. CEN Standart Referans Kumu

Mevcut tez çalışması kapsamında üretilen tüm harç karışımlarında TS EN 196-1'e göre kullanılması zorunlu olan standart referans kumu (CEN standart referans kumu) FER-ÇİM'den temin edilmiştir. CEN referans kumu SiO_2 oranı minimum %98

olan, yuvarlak tanecikli doğal silisli kumdur. Referans kumun fiziksel görüntüsü Şekil 3.3'te ve tane boyutu dağılımı ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3. CEN standart referans kumu

Çizelge 3.2. CEN Standart Referans Kumunun tane boyutu dağılımı

Kare göz açıklığı (mm)	2.00	1.60	1.00	0.50	0.16	0.08
Elekten geçen %	100	93 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	13 ± 5	1 ± 1

Standartta belirtildiği üzere, CEN standart referans kumu, (1350 ± 5) gramlık ambalajlarda tutulmalı ve en az 1350 g numune ile yapılan elek analizinde belirlenen tane büyüklüğü Çizelge 3.2.'ye uygun olmalıdır. Ayrıca kum tanelerinin deney zamanından önce ufalanmaması, rutubetten ve kirlilikten özenle korunarak saklanması gerekmektedir.

3.1.4. Kimyasal Katkı

Deneysel çalışmalarda, SİKA Yapı Kimyasalları tarafından üretilmekte olan polikarboksilik esaslı yeni nesil yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı (YOSAK) kullanılmıştır (Glenium 51). Sıvı halde bir kimyasal katkı olan YOSAK'ın özgül ağırlığı yaklaşık 1.05 g/cm^3 'tür. YOSAK'a ait fiziksel görüntü Şekil 3.4'te verilmiştir.

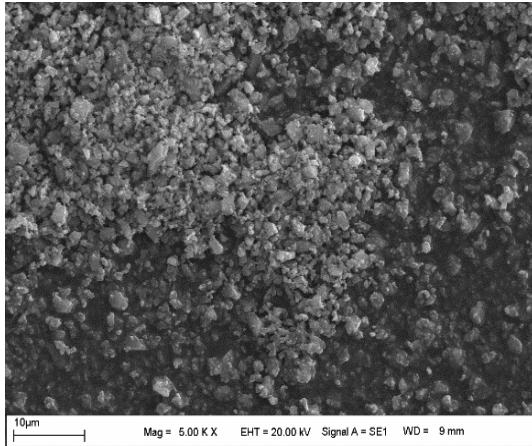


Şekil 3.4. Yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı (YOSAK)

3.1.5. Nano Malzemeler

3.1.5.1. Nano Kalsit (CaCO_3)

Bu çalışma kapsamında kullanılan nano kalsit, Niğtaş Mikronize Kalsit Tic. San. Ltd. şirketinden temin edilmiştir. Nano kalsit malzemesinin ortalama tane boyutu 1630 nanometre (nm) olup, bu malzemenin %70'inin tane çapı 2 mikron (μ)'dan küçüktür. Nano kalsite ait SEM ve fiziksel görüntü Şekil 3.5'te verilmiş olup, diğer fiziksel özellikler ve kimyasal bileşenler Çizelge 3.1.'de verilmiştir.



a) Nano kalsit SEM görüntüsü



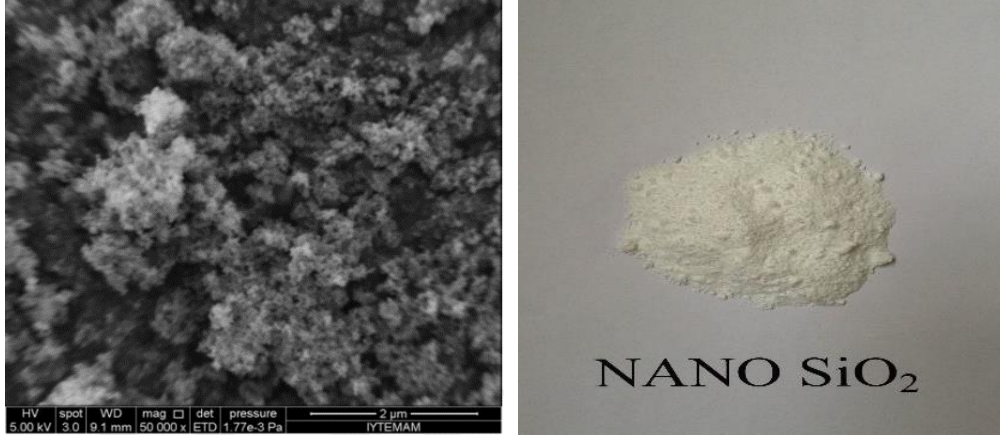
b) Nano kalsit fiziksel görüntüsü

Şekil 3.5. Nano Kalsit görüntüleri (Demirhan, 2017)

3.1.5.2. Nano Silis (SiO_2)

Ortalama tane çapı 15 nm olan Nano Silis (NS) Grafen kimyasal endüstrisinden elde edilmiş olup, küresel morfolojik yapıya sahiptir. Çizelge 3.1.'de kimyasal

kompozisyonları verilen NS, kütlece yaklaşık %99.5 silika içermektedir. Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı $162.3 \text{ m}^2/\text{kg}$ olan NS'nin SEM görüntüsü Şekil 3.6.'da verilmiştir.



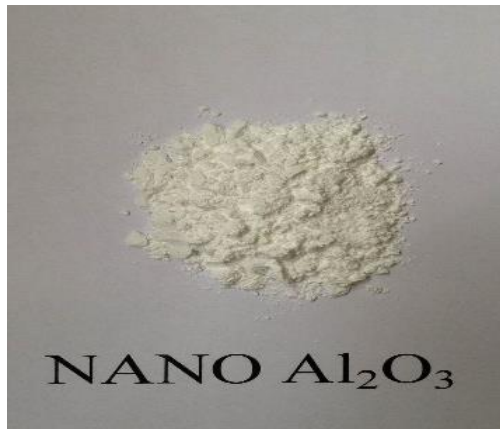
a) Nano silis SEM görüntüsü

b) Nano silis fiziksel görüntüsü

Şekil 3.6. Nano silis görüntüleri (Demirhan, 2017)

3.1.5.3. Nano Alümin (Al_2O_3)

Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı $32.5 \text{ m}^2/\text{kg}$ ve ortalama tane çapı 20 nm olan Nano Alümin (NA) Grafen kimyasal endüstrisinden alınmıştır. Kütlece %99.9 Al_2O_3 içeren NA'ya ait kimyasal bileşenler Çizelge 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Nano alümin fiziksel görüntüsü

3.2. Deneysel Çalışma

3.2.1. Karışımların Hazırlanması

TS-EN 197-1 standardında belirtilen oranlara göre ilgili standartta ifade edilen özelliklerdeki CEM I normal portland çimentosu ve CEM III – A / B / C YFC katkıli çimento tipleri üretilmiştir. Burada CEM III – A tipi çimento en yüksek klinker ve en düşük YFC oranını ifade ederken, CEM III – C tipi çimento en düşük klinker oranı ve en yüksek YFC oranını belirtmektedir.

YFC katkıli bu tip çimentoların üretimi için dışardan hazır alınan portland çimentosu yerine, FERÇİM sahasından alınan klinker ve alçıtaşının değirmende öğütülmesi sonucu üretilen CEM-I 42.5 N tipli portland çimentosu kullanılmıştır. Standartta belirtilen oranlarda çimento miktarı azaltılıp, aynı oranda YFC eklenerek CEM III – A / B / C tipi çimentolar üretilmiştir.

Yüksek hacimde YCF içeren katkıli bu tip çimentoların nano malzemeler eklenerek aktivasyon durumunun inceleneceği bu çalışmada, üretilen karışımların bileşen tablosu Çizelge 3.3.'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. Üretilen karışımların bileşen tablosu

Karışım #	Notasyon	Klinker (%)	Karışım Oranları								
			Klinker (gr)	GYFC (%)	GYFC (gr)	Minör (Nano) (%)	Minör (Nano) (gr)	Alçıtaşı (%4.5) (gr)	Su (gr)	Referans Kumu (gr)	YOSAK
1	CEM I	100.0	450.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.3	225.0	1350.0	0.0
2	CEM I_NC_1	99.0	445.5	0.0	0.0	1.0	4.5	20.0	225.0	1350.0	0.0
3	CEM I_NC_2	98.0	441.0	0.0	0.0	2.0	9.0	19.8	225.0	1350.0	0.0
4	CEM I_NC_3	97.0	436.5	0.0	0.0	3.0	13.5	19.6	225.0	1350.0	0.0
5	CEM I_NC_4	96.0	432.5	0.0	0.0	4.0	18.0	19.4	225.0	1350.0	0.0
6	CEM I_NAL_1	99.0	445.5	0.0	0.0	1.0	4.5	20.0	225.0	1350.0	1.8
7	CEM I_NAL_2	98.0	441.0	0.0	0.0	2.0	9.0	19.8	225.0	1350.0	2.0
8	CEM I_NAL_3	97.0	436.5	0.0	0.0	3.0	13.5	19.6	225.0	1350.0	2.3
9	CEM I_NAL_4	96.0	432.0	0.0	0.0	4.0	18.0	19.4	225.0	1350.0	2.5
10	CEM I_NSI_1	99.0	445.5	0.0	0.0	1.0	4.5	20.0	225.0	1350.0	1.8
11	CEM I_NSI_2	98.0	441.0	0.0	0.0	2.0	9.0	19.8	225.0	1350.0	2.6
12	CEM I_NSI_3	97.0	436.5	0.0	0.0	3.0	13.5	19.6	225.0	1350.0	5.0
13	CEM I_NSI_4	96.0	432.0	0.0	0.0	4.0	18.0	19.4	225.0	1350.0	8.0

Çizelge 3.3. Üretilen karışımların bileşen tablosu (Devam)

Karışım #	Notasyon	Karışım Oranları									
		Klinker (%)	Klinker (gr)	GYFC (%)	GYFC (gr)	Minör (Nano) (%)	Minör (Nano) (gr)	Alçıtaşı (%4.5) (gr)	Su (gr)	Referans Kumu (gr)	YOSAK
14	CEM III-A	64.0	288.0	36.0	162.0	0.0	0.0	13.0	225.0	1350.0	0.0
15	CEM III-A_NC_1	63.0	283.5	36.0	162.0	1.0	4.5	12.8	225.0	1350.0	0.0
16	CEM III-A_NC_2	62.0	279.0	36.0	162.0	2.0	9.0	12.6	225.0	1350.0	0.0
17	CEM III-A_NC_3	61.0	274.5	36.0	162.0	3.0	13.5	12.4	225.0	1350.0	0.0
18	CEM III-A_NC_4	60.0	270.0	36.0	162.0	4.0	18.0	12.2	225.0	1350.0	0.0
19	CEM III-B	34.0	153.0	66.0	297.0	0.0	0.0	6.9	225.0	1350.0	0.0
20	CEM III-B_NC_1	33.0	148.5	66.0	297.0	1.0	4.5	6.7	225.0	1350.0	0.0
21	CEM III-B_NC_2	32.0	144.0	66.0	297.0	2.0	9.0	6.5	225.0	1350.0	0.0
22	CEM III-B_NC_3	31.0	139.5	66.0	297.0	3.0	13.5	6.3	225.0	1350.0	0.0
23	CEM III-B_NC_4	30.0	135.0	66.0	297.0	4.0	18.0	6.1	225.0	1350.0	0.0
24	CEM III-C	19.0	85.5	81.0	364.5	0.0	0.0	3.8	225.0	1350.0	0.0
25	CEM III-C_NC_1	18.0	81.0	81.0	364.5	1.0	4.5	3.6	225.0	1350.0	0.0
26	CEM III-C_NC_2	17.0	76.5	81.0	364.5	2.0	9.0	3.4	225.0	1350.0	0.0
27	CEM III-C_NC_3	16.0	72.0	81.0	364.5	3.0	13.5	3.2	225.0	1350.0	0.0
28	CEM III-C_NC_4	15.0	67.5	81.0	364.5	4.0	18.0	3.0	225.0	1350.0	0.0

Çizelge 3.3. Üretilen karışımların bileşen tablosu (Devam)

Karışım #	Notasyon	Karışım Oranları									
		Klinker (%)	Klinker (gr)	GYFC (%)	GYFC (gr)	Minör (Nano) (%)	Minör (Nano) (gr)	Alçıtaşı (%4.5) (gr)	Su (gr)	Referans Kumu (gr)	YOSAK
29	CEM III-A	64.0	288.0	36.0	162.0	0.0	0.0	13.0	225.0	1350.0	0.0
30	CEM III-A_NAL_1	63.0	283.5	36.0	162.0	1.0	4.5	12.8	225.0	1350.0	0.0
31	CEM III-A_NAL_2	62.0	279.0	36.0	162.0	2.0	9.0	12.6	225.0	1350.0	0.0
32	CEM III-A_NAL_3	61.0	274.5	36.0	162.0	3.0	13.5	12.4	225.0	1350.0	0.0
33	CEM III-A_NAL_4	60.0	270.0	36.0	162.0	4.0	18.0	12.2	225.0	1350.0	0.2
34	CEM III-B	34.0	153.0	66.0	297.0	0.0	0.0	6.9	225.0	1350.0	0.0
35	CEM III-B_NAL_1	33.0	148.5	66.0	297.0	1.0	4.5	6.7	225.0	1350.0	0.0
36	CEM III-B_NAL_2	32.0	144.0	66.0	297.0	2.0	9.0	6.5	225.0	1350.0	0.0
37	CEM III-B_NAL_3	31.0	139.5	66.0	297.0	3.0	13.5	6.3	225.0	1350.0	0.0
38	CEM III-B_NAL_4	30.0	135.0	66.0	297.0	4.0	18.0	6.1	225.0	1350.0	0.0
39	CEM III-C	19.0	85.5	81.0	364.5	0.0	0.0	3.8	225.0	1350.0	0.0
40	CEM III-C_NAL_1	18.0	81.0	81.0	364.5	1.0	4.5	3.6	225.0	1350.0	0.0
41	CEM III-C_NAL_2	17.0	76.5	81.0	364.5	2.0	9.0	3.4	225.0	1350.0	0.0
42	CEM III-C_NAL_3	16.0	72.0	81.0	364.5	3.0	13.5	3.2	225.0	1350.0	0.2
43	CEM III-C_NAL_4	15.0	67.5	81.0	364.5	4.0	18.0	3.0	225.0	1350.0	0.6

Çizelge 3.3. Üretilen karışımların bileşen tablosu (Devam)

Karışım #	Notasyon	Klinker (%)	Karışım Oranları								
			Klinker (gr)	GYFC (%)	GYFC (gr)	Minör (Nano) (%)	Minör (Nano) (gr)	Alçıtaşı (%4.5) (gr)	Su (gr)	Referans Kumu (gr)	YOSAK
44	CEM III-A	64.0	288.0	36.0	162.0	0.0	0.0	13.0	225.0	1350.0	0.0
45	CEM III-A_NSİ_1	63.0	283.5	36.0	162.0	1.0	4.5	12.8	225.0	1350.0	0.0
46	CEM III-A_NSİ_2	62.0	279.0	36.0	162.0	2.0	9.0	12.6	225.0	1350.0	0.5
47	CEM III-A_NSİ_3	61.0	274.5	36.0	162.0	3.0	13.5	12.4	225.0	1350.0	1.9
48	CEM III-A_NSİ_4	60.0	270.0	36.0	162.0	4.0	18.0	12.2	225.0	1350.0	3.7
49	CEM III-B	34.0	153.0	66.0	297.0	0.0	0.0	6.9	225.0	1350.0	0.0
50	CEM III-B_NSİ_1	33.0	148.5	66.0	297.0	1.0	4.5	6.7	225.0	1350.0	0.0
51	CEM III-B_NSİ_2	32.0	144.0	66.0	297.0	2.0	9.0	6.5	225.0	1350.0	0.8
52	CEM III-B_NSİ_3	31.0	139.5	66.0	297.0	3.0	13.5	6.3	225.0	1350.0	2.5
53	CEM III-B_NSİ_4	30.0	135.0	66.0	297.0	4.0	18.0	6.1	225.0	1350.0	5.0
54	CEM III-C	19.0	85.5	81.0	364.5	0.0	0.0	3.8	225.0	1350.0	0.0
55	CEM III-C_NSİ_1	18.0	81.0	81.0	364.5	1.0	4.5	3.6	225.0	1350.0	0.0
56	CEM III-C_NSİ_2	17.0	76.5	81.0	364.5	2.0	9.0	3.4	225.0	1350.0	1.5
57	CEM III-C_NSİ_3	16.0	72.0	81.0	364.5	3.0	13.5	3.2	225.0	1350.0	3.2
58	CEM III-C_NSİ_4	15.0	67.5	81.0	364.5	4.0	18.0	3.0	225.0	1350.0	5.8

İlgili her bir karışım TS-EN 196-1 standardında ifade edildiği üzere aşağıda belirtilen şekilde hazırlanmıştır:

- Su ve çimento hassas terazi yardımıyla tartıldı. Su, dereceli kap yardımıyla ölçülüyorsa, ± 1 ml hassasiyetle ölçüm yapılmalıdır.
- Harç mikser yardımıyla mekanik olarak karıştırıldı.
- Mikserin çalışması ve durdurulması arasında geçen zamanda, farklı karıştırma aşamaları olabilir ve bu süreler ± 2 saniye ile sınırlı kalmalıdır.
- Su ve çimento kaybı yaşamaksızın karışım oranlarına göre kullanılacak bağlayıcı malzemeler karıştırma kabına konuldu.
- Su ve bağlayıcı malzeme karıştırma kabında birbirine temas eder etmez mikser düşük hıza getirilerek çalıştırıldı ve başlangıç zamanı kaydedildi. 30 saniye düşük hızda karıştırma işlemine devam edildikten sonra CEN referans kumu karışım kabına eksiksiz ve kesintisiz bir şekilde aktarıldı ve mikser yüksek hıza getirilerek karıştırma işlemine 30 saniye daha devam edildi.
- Mikser 90 saniye durduruldu. İlk 30 saniyede kabın çeperlerine yapışan harç, sıyırıcı kullanılarak kabın ortasına toplandı.
- Mikser çalıştırıldı ve yüksek hızda karıştırma işlemi 60 saniye daha devam ettirildi (Şekil 3.8).



a) Suyun eklenmesi



b) Çimentonun eklenmesi



c) Karıştırma işlemi



d) Referans kumu ilavesi

Şekil 3.8. Karışımların hazırlanması

Bu çalışmada üretilen karışımlar, belirtilen standartlara dikkat edilerek 5 litre karıştırma kapasiteli mikser (Şekil 3.9) yardımıyla hazırlanmıştır.



Şekil 3.9. 5 litre kapasiteli karıştırıcı (Mikser)

3.2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Sıkıştırılması

TS-EN 196-1 standardında ifade edildiği üzere, basınç dayanımı deney numuneleri 40 x 40 x 160 mm ölçülerinde kiriş numuneleri olmalıdır. Üretilen taze harç numuneleri, ilgili standartta belirtildiği üzere aşağıda ifade edilen şekilde, boyutları 40 mm x 40 mm x 160 mm olan kalıplara yerleştirilmiş (Şekil 3.10-a) ve sıkıştırılmıştır (Şekil 3.10-b).

- Karışım hazırlandıktan hemen sonra taze harç, kiriş numuneleri hazırlamak üzere kalıplara boşaltıldı.
- Her bir deney numunesi için, harç doldurma başlığı ve kalıp, sarsma tablasına sıkı bir şekilde tutturuldu.
- Her tabakası yaklaşık 300 g olmak üzere harç, kalıba iki tabaka şeklinde dolduruldu. İlk harç tabakası kepçe yardımıyla kalıba birkaç kademedede aktarıldı.
- Büyük yayıcı yardımıyla ilk harç tabakası, aynı kalınlıkta olmak üzere yayıldı. Büyük yayıcının çıkıntı bölümleri, harç doldurma başlığının üst kısmına tutturuldu ve büyük yayıcı mümkün olduğunca düşey tutturularak harç tabakası boyunca ileri ve geri hareket ettirildi. Daha sonra sarsma cihazına 60 düşü yaptırılarak birinci harç tabakası sıkıştırıldı.

- İkinci tabaka, birinci tabakanın üzerine aktarılarak küçük yayıcı yardımıyla yayıldı. Ardından sarsma cihazı 60 defa daha düşürülerek ikinci harç tabakası sıkıştırıldı.
- Kalıp ve harç doldurma başlığı dikkatli bir şekilde sarsma tablasından çıkartıldı. Kalıptan taşan harç, zaman kaybetmeden metal master yardımıyla sıyrılarak alındı. Yine master yardımıyla numune yüzeyi daha düzgün hale getirildi.
- Kalıp tabanı ve yan yüzeylerine yapışan harç temizlendi.
- Kalıplar işaretlenerek geçirimsiz bir plaka ile üst yüzeyleri kapatıldı.



a) 40 x 40 x 160 mm prizma şekilli kalıp



b) Sarsma tablası

Şekil 3.10. Numunelerin hazırlanması

3.2.3. Numunelerin Kalıptan Çıkartılması ve Kür Koşulları

Üst yüzeyi plaka ile kapatılmış kalıplar TS EN 196-1 standardına uygun olarak vakit kaybetmeden kür dolabına alındı (Şekil 3.11). İki çekmecedan oluşan kür dolabının üst çekmecesinde numuneler kalıp halinde bekletildi. 24 saat sonra numunelere zarar gelmeyecek şekilde özel aletler veya kauçuk/plastik çekiç yardımıyla kalıp sökme işlemi gerçekleştirildi. Kalıptan çıkarılan numuneler işaretlenerek, içerisinde 20 °C su bulunan kür dolabının alt çekmecesindeki kaba daldırıldı. Burada numuneler deney gününe kadar (2, 7, 28 gün) muhafaza edildi. Deneyin uygulanacağı yüzeylerde oluşan su birikintileri temizlendi.



Şekil 3.11. Kür dolabı

3.2.4. Sertleşmiş Hal Özellikleri

Üretilen karışımların sertleşmiş durumdaki özelliklerini belirlemek üzere, TS-EN 196-1 standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. 40 x 40 x 160 mm ebatlarında kiriş numunelere 2, 7 ve 28 günlük kür uygulandıktan sonra basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla numuneler basınç testine tabi tutulmuştur.

3.2.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Standartta belirtildiği üzere basınç dayanımı test cihazı, uygun kapasite ve yükleme hızına sahip olmalı ve cihaz düşey eksenini ile üst başlık ve alt yüzey merkezleri çakışmalıdır. Ayrıca cihazın gösterge paneli, yük boşaltıldıktan sonra da numunenin kırılmaya başladığı yük değerini göstermeye devam etmelidir.

Deney numuneleri temizlendikten sonra numunelere 2000 kN kapasiteli test cihazında (Şekil 3.12) standarda uygun olarak basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Basınç dayanımı aşağıdaki bağlantı yardımıyla hesaplanır (TS-EN 196-1):

$$R_c = F_c / A_c \quad (3.1)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı ($MPa = N/mm^2$)

F_c : Kırılma anındaki maximum yük (N)

A_c : Yükleme plakalarının alanı ($40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} = 1600 \text{ mm}^2$)



Şekil 3.12. Basınç dayanımı test cihazı

3.2.4.2. Le Chatelier Genleşme Tayini

Le Chatelier deneyinde kullanılacak cihaz, standartta belirtilen ölçülere uygun, çubuk göstergelerine sahip ve pirinçten üretilmiş olmalıdır. Cihaz yaklaşık 300 g ağırlık altında ciddi deformasyonlar oluşturmayacak şekilde tasarlanmalı ve çubuk göstergeler arasındaki mesafe yaklaşık 17 mm olmalıdır. Cihaz üzerinde her kalıp için alt ve üst yüzeylerde birer cam plaka bulunmalı ve bu plakalar kalıp yüzeyinden daha geniş olmalıdır. Kalıbın üzerine gelecek olan plakalar minimum 75 g kütleye sahip olmalıdır (Şekil 3.13).

Le Chatelier numuneleri üretildikten sonra deney için su sıcaklığını 30 dakikada kaynama sıcaklığına ulaştıracak ısıtıcı su kabı ve numunelerin yerleştirileceği bir kür dolabı gereklidir. Le Chatelier cihazı yardımıyla genleşme tayini şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Deney aynı çimento karışımından üretilen iki numune üzerinde aynı anda yapıldı.
- Standart kıvamda çimento harcı üretildi.
- Yağlanmış Le Chatelier kabı, yağlanmış olan plaka üzerine yerleştirildi ve üretilen harç, sıkıştırma işlemi yapılmaksızın kalıba aktarıldı.

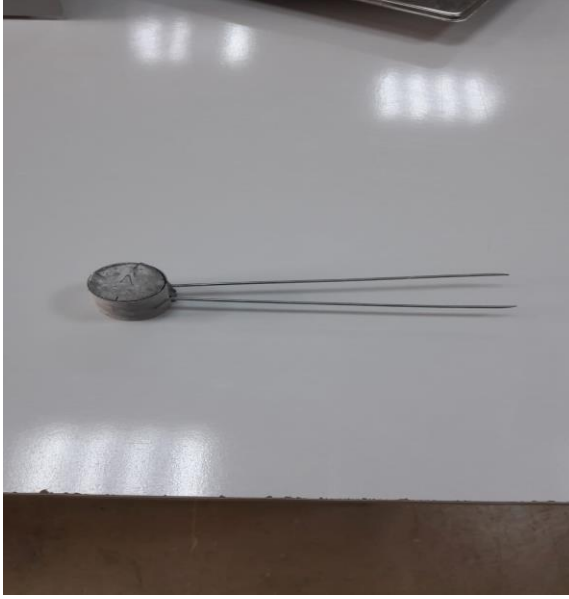
- Kalıbın üst seviyesi de yine yağlanmış diğer bir cam plaka ile örtüldü. Cihaz hemen kür dolabına alındı ve burada 24 saat bekletildi.
- 24 saat sonra gösterge uçları arasında ölçülen ilk mesafe (A), en yakın 0.5 mm'ye yuvarlatılarak kaydedildi. Sonra kalıp, su banyosuna alınarak yaklaşık 30 dakika boyunca kaynama sıcaklığına kadar ısıtıldı ve burada yaklaşık 3 saat bekletildi.
- 3 saat kaynama süresi sonunda gösterge uçları arasında ölçülen ikinci mesafe (B), en yakın 0.5 mm'ye yuvarlatılarak kaydedildi.
- Ardından kalıp, yaklaşık 20 °C ilk sıcaklığına dönmesi için soğumaya bırakıldı ve gösterge uçları arasında ölçülen üçüncü mesafe (C) de en yakın 0.5 mm' ye yuvarlatılarak kaydedildi.
- Tüm mesafeler kaydedildikten sonra (C-A) farkları hesaplandı. (C-A) farkının iki değerinin ortalaması alınarak en yakın 0.5 mm'ye yuvarlatıldı ve böylece genleşme tayini tamamlandı. B ve C ölçümlerinin benzer olabildiği bazı durumlarda deney süresini kısaltmak için (B-A) farkları da kullanılabilir.
- Genleşme tayini deneyi esasen, çimento hamurunda serbest kalsiyum ve magnezyum oksit bileşiklerinin hidrasyonu sonucunda ortaya çıkması muhtemel genleşme riskinin değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır.



a) Harcın hazırlanması ve kalıplara aktarılması



b) Kalıbın yüzeylerinin cam plakayla kapatılması



c) 24 saat bekletilmiş numune



d) Numunenin su tankında kaynatılması

Şekil 3.13. Le Chatelier Deneyi

3.2.5. Taze Hal Özellikleri

İşlenebilirlik ve reolojik faktörlerden olan plastik viskozite ile akma dayanımı (eşik gerilmesi), üretilen deney karışımlarını etkileyen taze hal özelliklerindedir. Karışımların taze özellikleri, harcın kalıba yerleşebilme durumunu, akışkanlığını ve geçiş özelliklerini etkilemektedir. İşlenebilirlik, uzun yıllardan beri hala üzerinde çokça çalışmanın yapıldığı taze harç özelliklerinden olup, genel tabiriyle minimum enerji harcayarak harcın taşınıp yerleştirilmesi işlemi olarak ifade edilir. Ayrıca harcın sıkışabilirlik özelliklerini, kıvamını ve akışkanlığını ifade eden işlenebilirlik, yapılan çalışmalar sonucunda yeni harç ve beton türlerinin bulunmasına yardımcı olmuştur.

Bu çalışmada taze harcın işlenebilirlik özelliklerinin belirlenebilmesi için hazırlanan 58 karışım üzerinde mini çökme-yayılma deneyi yapılmıştır.

3.2.5.1. Mini Çökme-Yayılma Deneyi

Taze karışımların işlenebilirlik özelliklerini belirlemede yaygın bir yöntem olarak kullanılan bu deney, harcın deformasyon hızının gözlemlenmesini ve malzemenin mini çökme-yayılma test cihazındaki kol yardımıyla 25 defa tabana

düşürülmesi sonucu harcın yayılmasıyla oluşan dairesel şeklin çapının ölçülmesini sağlar. ASTM C 1437 standardında belirtildiği üzere bu test için üzerinde bir vida yardımıyla dikey olarak tutturulmuş çevirme kolu ve yaklaşık 255 mm (10 inç) uzunluğundaki tabla üzerinde konik çökme-yayılma aparatı bulunan demir çerçeveye sahip mini-çökme yayılma cihazı kullanılır (Şekil 3.14). Yayılma tablası üzerine yerleştirilen çökme-yayılma aparatı mikserde karıştırılan ve sıkıştırma işlemi yapılmamış harçla dolduruldu ve sıkıştırıldı. Harcın üst yüzeyi düzleştirildikten sonra çökme-yayılma aparatı çıkartıldı ve kol 25 defa çevrilerek harca 25 düşüş yaptırıldı. Tabla üzerinde yayılan harcın çapı iki noktadan ölçülerek ortalama “mini çökme-yayılma çapı” belirlendi. Standarda göre %10 daha düşük yayılma çapları aynı işlenebilirlik özelliğinde kabul edilir. Bundan dolayı kontrol numunelerinin yayılma çaplarından %10 azaltılarak bir alt limit belirlendi. Tüm karışımların belirlenen alt limite göre çökme-yayılma çapına sahip olması gerekmektedir. Bu limitin altında çıkan değerler, karışıma yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı (YOSAK) eklenmesiyle alt limitin üzerine çıkartılır. Böylece standart çimento harcının hedeflenen işlenebilirliği için gerekli olan YOSAK miktarı belirlenmiş olur.



Şekil 3.14. Mini çökme-yayılma test cihazı

3.2.5.2. Standart Kıvam Tayini

Standart kıvam tayini ve priz süresi tayini, Vicat aletleri olarak bilinen cihazlar yardımıyla gerçekleştirilir (Şekil 3.15). Deney prensipleri ve dikkat edilecek hususlar “TS-EN 196-3” standardında belirtilmiştir. Kıvam tayini için standart kıvam sondasına

ihtiyaç duyulur. Sonda, dik silindir şeklinde ve korozyona dayanıklı olarak tasarlanan, etkili uzunluğu 50 mm ve çapı 10 mm olan bir metaldir. İlgili tayinler için, hareketli parçaların toplam kütesinin 300 g olması gerekir. Parçaların hareketi ise tam düşey şekilde olmalı ve Vicat cihazlarının eksenini, sonda eksenineyle çakışmalıdır. Çimento hamurunun yerleştirildiği vicat kalıbı sert lastikten üretilmiş olmalı ve derinliği 40 mm, üst çapı 70 mm, alt çapı 80 mm olan kesik koni şeklinde tasarlanmış olmalıdır. Aynı zamanda vicat kalıbı yeterince sağlam olmalı ve vicat kalıbından daha geniş minimum 2.5 mm kalınlığında düz cam plaka üzerine yerleştirilmelidir.

Standartta belirtildiği üzere ilgili tayinler için çimento hamurunun karıştırılması işlemlerine dikkat etmek gerekmektedir. Fakat referans yönteme göre aynı sonuçları verdiği bilinen başka bir karıştırma metodu ile de çimento hamurlarının karıştırma işlemleri gerçekleştirilebilir.

Üretilen çimento hamurları, önceden hafifçe yağlanmış taban plakası üzerine yerleştirilen vicat kalıbına hızlıca alınır. Fazla miktarda kalıba yerleştirilen bu çimento hamurlarına herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmamalıdır. Kalıptan taşan fazla çimento hamuru yavaş testere hareketiyle alınarak düz bir yüzey elde edilir.

İlgili standarttaki deney prensipleri, çimento hamurlarının karıştırılması ve kalıba doldurulması işlemleri gerçekleştirildikten sonra öncelikle standart kıvam tayini yapılmıştır:

- Kıvam tayini için Vicat cihazına yerleştirilen sonda, cam taban plakasının üzerine kadar indirildi ve vicat cihazı üzerindeki gösterge sıfıra ayarlandı.
- Sonda yavaşça yukarı kaldırıldı ve duruş konumunda bekletildi.
- Çimento hamurunun seviyesi ayarlanarak Vicat kalıbına yerleştirildi. Ardından taban plakası üzerine alınan Vicat kalıbı sondanın altında, sondanın konumuna göre merkezlendi.
- Sonda yavaşça aşağı indirilerek hamur ile temas ettirildi. Hareket eden parçaların aşağı hızla inmemesine dikkat edilmelidir. Bunun için sonda birkaç saniye tutulduktan sonra hareket eden parçalar serbest bırakıldı. Böylece sondanın kendi ağırlığıyla düşey hareket ederek çimento hamurunun merkezine

girmesi sağlandı. Sondanın serbest bırakılması, sıfır başlangıç zamanından 4 dakika sonra olmalıdır.

- Sondanın batması işlemi tamamlandıktan sonra veya sonda serbest bırakıldıktan 30 saniye sonra (hangi durum daha önce ise) okuma yapıldı ve kaydedildi.
- Sondanın alt yüzeyi ile cam plaka arasındaki mesafe okundu. Ardından hamurun içerdiği su miktarı ile birlikte kaydedildi. Sonda batırılıp çıkartıldıktan sonra temizlendi.
- Deney farklı oranlarda su içeren çimento hamurları kullanılarak tekrar ettirildi. Sonda alt yüzeyi ve taban plaka arasındaki mesafe 6 ± 1 mm olduğunda hamur standart kıvama gelmiş olur. Standart kıvama gelen çimento hamurunun standart kıvamı için gerekli su muhtevası kaydedildi ve bir sonraki deneylere bu su içeriğindeki hamurlarla devam edildi.



a) Vicat aleti ve standart kıvam sondası



b) Sondanın hamur içerisine daldırılması

Şekil 3.15. Standart kıvam tayini

3.2.5.3. Priz Süresi Tayini

Priz süresi ve genişleme tayininin (Le Chatelier) yapılabilmesi için çimento deney metotlarının yer aldığı “TS-EN 196-3” standardındaki deney prensipleri dikkate

alınır. Bu standartta belirtildiği üzere deney için uygun laboratuvar koşullarının sağlanması gerekmektedir. Priz süresinin belirlenmesi ve genleşme tayini için çimento hamurunun standart (normal) kıvamda olması gerekmektedir. Çimento hamurunun standart kıvamda olup olmadığı, yapılacak “standart kıvam tayini” ile belirlenir. Priz süresi, standart kıvamdaki çimento hamuru içerisine daldırılacak iğnenin daha önceden belirlenmiş bir derinliğe kadar batırılmasını gözlemlemek suretiyle tayin edilir. Genleşme tayini ise standart kıvamdaki hamurun hacimsel genleşmesinin, bağıl hareket edebilen iki iğne yardımıyla belirlenmesi sonucu yapılır. Çimento hamuru, içerisine daldırılan sondaya karşı belirli bir direnç gösterebilir. Bunun için çimento hamurunun optimum su muhtevasının tayini önem arz etmektedir. Çimento hamuru için gerekli su miktarının tayini, farklı oranlarda su muhtevasına sahip hamurların içine sondanın batırılması denemeleri yapılarak gerçekleştirilir. Bu deneyler için gerekli materyaller şunlardır:

- 1 g doğrulukta hassas ölçüm yapabilen dijital terazi
- Hacim ölçümünü %1 doğrulukta gerçekleştirebilen dereceli mezür veya bütet
- TS-EN 196-1 standardına uygun mikser.

Bu deney, priz başlama süresi ve priz sonu süresinin tayini olmak üzere iki aşamada gerçekleştirildi (Şekil 3.16). Priz başlama süresi tayini, sondanın çıkarılıp yerine etkili uzunluğu 50 mm, çapı 1.13 mm olan silindirik iğnenin yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir:

- Vicat cihazına yerleştirilmiş iğne, cam plakanın üzerine indirildi ve gösterge sıfıra ayarlandı. Hareketli parçaların toplam kütesinin 300 g olmasına dikkat edilmelidir.
- İğne yavaşça yukarı kaldırılır ve duruş konumunda bekletildi.
- Standart kıvamdaki çimento hamuruyla dolu vicat kalıbı üst yüzeyi düzleştirilerek kür dolabına yerleştirildi.
- Belli bir süre sonra kür dolabından alınan kalıp, iğnenin altına gelecek şekilde cihaza yerleştirildi ve iğne hamurla temas edinceye kadar yavaşça aşağı doğru indirildi.
- Hareket eden parçaların hızlı düşüşünü önlemek amacıyla iğne birkaç saniye tutulduktan sonra parçalar serbest bırakıldı ve iğne hamur içerisine daldırıldı.

İğne hamura battıktan sonra veya iğne serbest bırakıldıktan 30 saniye kadar sonra (hangi durum önceyse) göstergede okuma yapıldı.

- İğne ucu ve cam plaka arasındaki mesafe sıfır başlangıç zamanından itibaren geçen süre ile birlikte kaydedildi. İğnenin aynı hamura daldırılma işlemi, batırıldığı noktalar arasındaki mesafe en az 10 mm olacak şekilde 10 dakikalık uygun zaman aralıkları ile tekrar ettirildi. Her defasında hamurun kür dolabına alınması gerekmektedir. Ayrıca iğne batırılıp çıkartıldıktan sonra temizlenmelidir.
- Başlangıç zamanından itibaren iğne ucu ve cam plaka arasındaki mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen süre en yakın beş dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedildi.



a) Vicat aleti ve priz başlama test iğnesi



b) İğnenin hamur içerisine batırılması



c) Deneyin 15 dk aralıklara tekrar edilmesi



d) Priz almaya başlayan numunenin son hali

Şekil 3.16. Priz başlama süresi tayini

Priz sonu süresinin tayini ise cam plaka üzerindeki vicat kalıbının ters çevrilmesi suretiyle gerçekleştirilir (Şekil 3.17). Çimento hamurunun başlangıçta cam plaka ile temas eden yüzeyi üzerinde priz sonu süresinin tayini gerçekleştirilmiş olur. Tayin için kullanılacak iğne küçük batmaların daha iyi gözlemlenmesi için iğne bağlantı halkası ile birlikte cihaza tutturulur (Şekil 3.16). Priz sonu süresi tayini için daha önceki tayinler için ifade edilen işlemler uygulandı fakat zaman aralıkları 30 dakikaya kadar çıkartıldı. Başlangıç zamanından itibaren iğnenin ilk 0.05 mm battığı an, en yakın on beş dakikaya yuvarlatılarak priz sonu süresi olarak bulundu.



a) Vicat cihazı ve priz sona erme test iğnesi



b) Prizi tamamlanan numunede halka izinin kaybolması



c) Priz almış numunenin son hali

Şekil 3.17. Priz sona erme süresi tayini

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Mevcut tez kapsamında standarta uygun bir şekilde üretilen ilgili numunelerin hem taze özellikleri hem de sertleşmiş özellikleri incelenmiştir.

Giriş kısmında hedeflenen amaca uygun bir şekilde hazırlanmış olan çimento bazlı harçlar/hamurlar Materyal ve Yöntem kısmında belirtilen içerik ve yöntemle üretilmiş ve bu amaç doğrultusunda üretilen numunelerden; (i) TS EN 196-1'e uygun olarak üretilen 58 adet harç numunelerinin aynı işlenebilirlik özelliklerine sahip olması maksadıyla ASTM C 1437'ye göre mini çökme yayılma testi uygulanmış ve muadil işlenebilirlik için ihtiyaç duyulan süperakışkanlaştırıcı miktarı belirlenmiştir, (ii) Yüksek hacimde yüksek fırın cürufu içeren çimento hamurlarının priz alma süresi zaman dilimi olarak çok uzun olacağından ve ölçümü zorlaştıracağından dolayı sadece CEM I ve CEM III-A'dan seçilen çimento hamurlarından üretilen numunelerle 8 adet karışımın kıvam, priz başlama ve priz sona erme süreleri incelenmiştir, (iii) Standart kıvamda üretilen 8 karışımın Le Chatelier deneyi ile hacimsel genleşmeleri incelenmiştir ve son olarak (iv) TS EN 197-1'e uygun oranlarda hazırlanmış 58 adet çimento harcı, basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.

Tez kapsamında yapılan ve yukarıda belirtilen tüm bu testlerden/deneylerden elde edilen sonuçlar bu kısımda/bölümde irdelenmiştir. Mevcut bölüm, tez çalışmasının amaç ve kapsamına uygun bir şekilde aşağıda maddeler halinde belirtildiği üzere iki ana başlık altında ele alınmıştır.

❖ Taze Özellikler

- a. Mini Çökme Yayılma Deneyi
- b. Kıvam, Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri

❖ Sertleşmiş Özellikler

- a. Çimento Harcı Basınç Dayanımı
- b. Le Chatelier Genleşme Deneyi

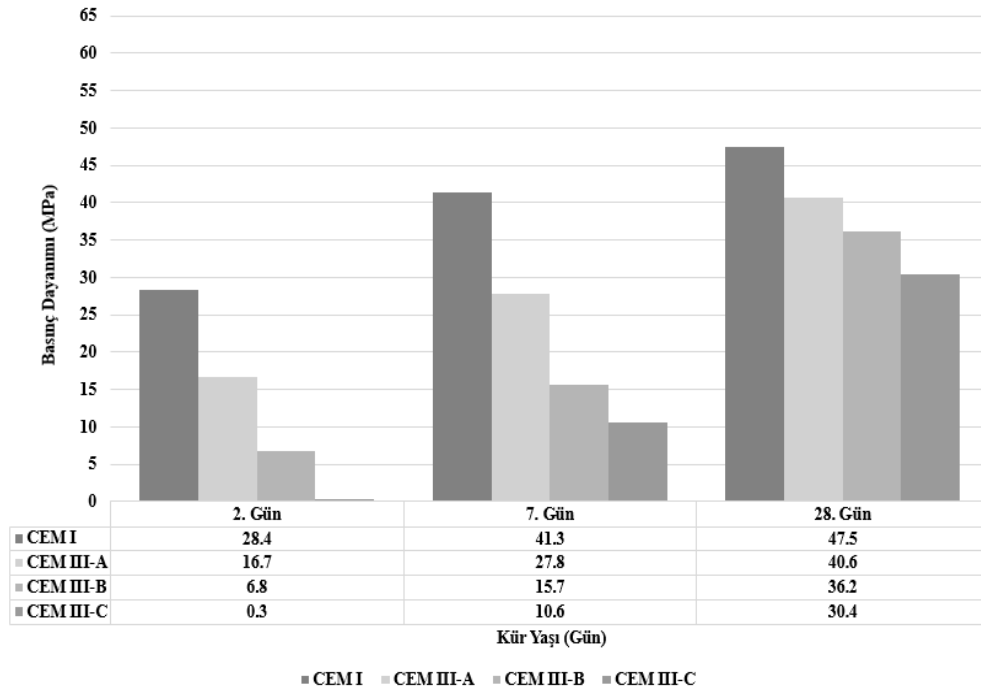
4.1. Araştırma Sonuçları

4.1.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Mevcut tez çalışması kapsamında pek çok parametre incelendiğinden dolayı karışıklığa mahal vermemek adına bu kısım (i) *Yüksek fırın cürufu kullanım oranının etkisi*, (ii) *Nano tipi etkisi* ve (iii) *Nano malzeme kullanım oranı etkisi* başlıkları altında tartışılacaktır.

i) Yüksek Fırın Cürufu Kullanım Oranının Etkisi:

Tez kapsamında belirlenmiş elli sekiz karışımda her karışım grubu için minimum yüksek fırın cürufu kullanım oranı sırasıyla %0 (CEM I), %36 (CEM III-A), %66 (CEM III-B) ve %81'dir (CEM III-C). Yüksek fırın cürufu kullanım oranına göre çimento harçlarının 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarındaki gelişim Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere YFC kullanım oranı arttıkça erken yaş ve ileri yaş dayanım gelişiminde azalma/düşüş gözlemlenmiştir. Her ne kadar YFC kısmen hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olsa da puzolanik özelliği daha etkilidir. Nispeten daha düşük çimento kullanım oranları daha düşük hidrasyon ürünleri ile neticelendiğinden ve puzolanik reaktivite, hidrasyon reaksiyonlarından sonra gerçekleştiğinden dolayı YFC kullanım oranı arttıkça erken yaş dayanım gelişiminde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. 28 günlük standart basınç dayanımına göre $F_{CEM III-A}/F_{CEM I}$, $F_{CEM III-B}/F_{CEM I}$ ve $F_{CEM III-C}/F_{CEM I}$ oranları sırasıyla 0.85, 0.76 ve 0.64 olarak elde edilmiştir.



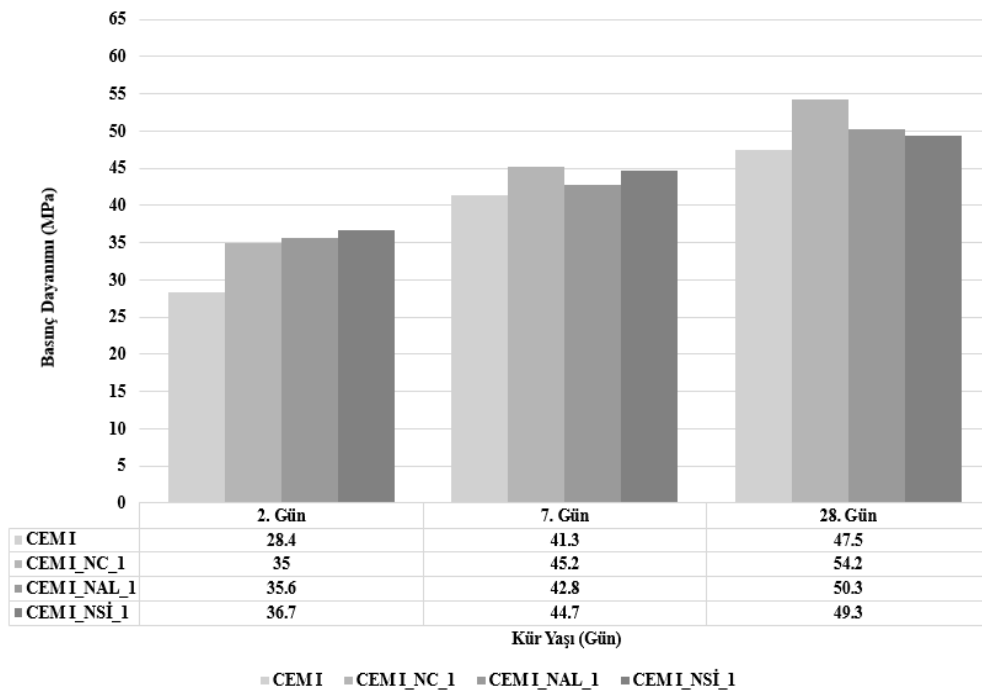
Şekil 4.1 YFC kullanım oranına göre basınç dayanımı gelişimi

ii) Nano Tipi Etkisi:

YFC *içermeyen* karışımlarda 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı gelişimi kullanılan nano tipine göre değişkenlik göstermiş olup, YFC içermeyen %1 nano malzeme katkılı harçların basınç dayanımı gelişimi Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere YFC içermeyen tüm karışımlarda nano tipine ve kür yaşına bakılmaksızın tüm nano malzeme kullanımlarında basınç dayanımında gelişim gözlemlenmiştir. NAL ve NSİ, hem C_3S ’nin hidratasyon hızını artırdığından (Björnström ve Ark., 2004; Sobolev ve Ark., 2009; Sobolev ve Ark., 2005; Norhasri ve Ark., 2017; Barbhuiya ve Ark., 2014) hem de hidratasyon neticesinde oluşan kalsiyum hidroksitler ile reaksiyona girdiğinden dolayı 2 günlük kür yaşlarında en yüksek gelişim gözlemlenmiş olup, kontrol karışımına kıyasen dayanıma katkıları sırasıyla %25.4 ve %29.2 olarak belirlenmiştir. NC kullanılan karışımlarda ise C_3S ’nin hidratasyon hızını etkilemesine ilave olarak CEM I içerisindeki alüminat fazı ile de reaksiyona girerek karbo-alüminatlı ilave hidratasyon ürünlerini oluşturmuştur (Zaitri ve Ark., 2014; Dale ve Ark., 2015). Bunun bir neticesi olarak 28 günlük basınç dayanımı gelişiminde en fazla katkı NC kullanımında gözlemlenmiş olup, %14’tür.

NAL ve NSİ’ye kıyasla NC içeren harçlarda 28 günlük basınç dayanımında daha çok gelişimin elde edilmesi, NSİ ve NAL’ın topaklaşmalarından kaynaklandığı

söylenbilir. Çimento içindeki %5.34 (Bkz. Çizelge 3.1) oranındaki Al_2O_3 ile NC'den oluşacak reaksiyonların dayanıma olan katkısı, NSİ ve NAL'ın hidrasyon neticesinde oluşan CH ile tepkimeye girerek dayanıma vereceği katkısından çok daha düşük olacağı düşünüldüğünde 28 günde NSİ ve NAL ile üretilen karışımlarda daha yüksek dayanım sonucunun gözlemlenmesi gerekir. Bu durum NSİ ve NAL içeren karışımlarda topaklaşma oluştuğu ihtimalini doğurmaktadır.

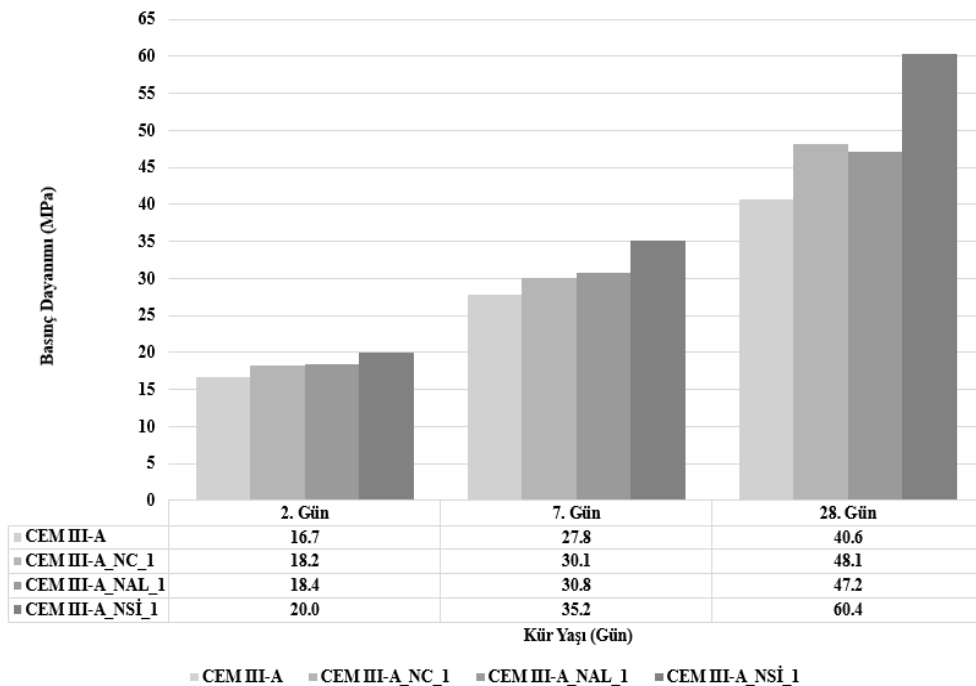


Şekil 4.2 YFC içermeyen karışımlarda nano tipinin basınç dayanımı gelişimi

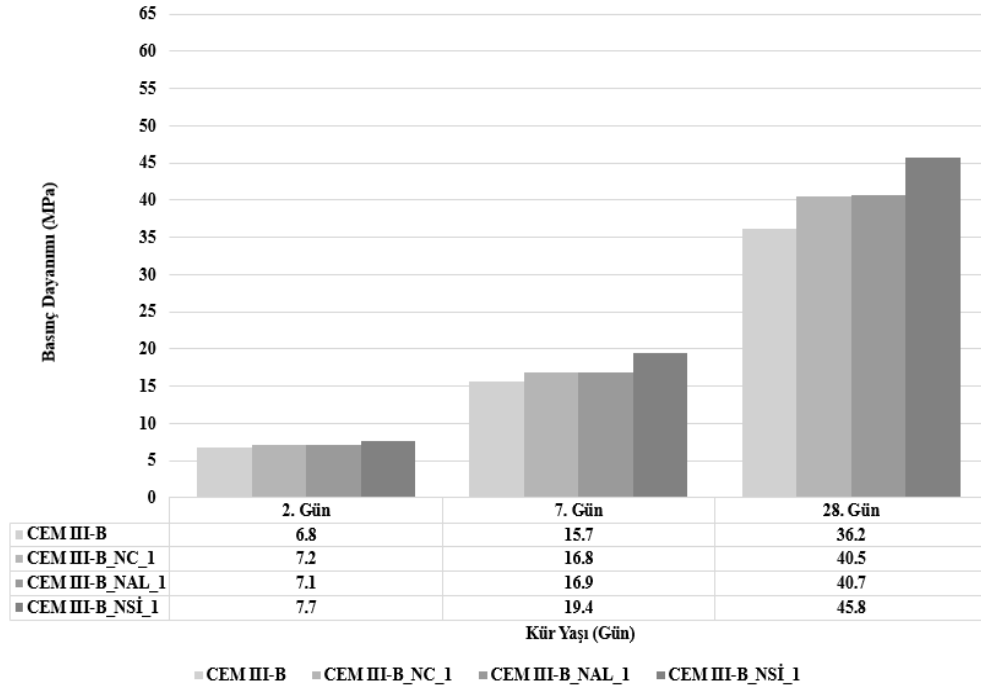
YFC *içeren* karışımlarda 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı gelişimi kullanılan nano tipine ve YFC kullanım oranına göre farklılık göstermiş olup, YFC içeren %1 nano malzeme katkılı harçların basınç dayanımı gelişimi Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere tüm YFC kullanım oranlarında 2 günlük dayanım gelişimleri tüm nano malzemeler için birbirine yakın olarak gözlemlenmiş olsa da ileriki yaşlar için en yüksek dayanım gelişimi %48.8 oranında NSİ kullanılan karışımlarda saptanmıştır (Qing ve Ark., 2007; Indumathi ve Ark., 2011; Bai ve Ark., 2014). Azalan çimento kullanım oranı nedeniyle hidrasyon ürünü olarak oluşan kalsiyum hidroksit miktarı azaldığından NAL ve NSİ'nin dayanıma katkıları kısıtlı kalmıştır. Nano kalsitin ise CEM I'deki alüminat fazına ilave olarak YFC'deki alüminat fazıyla da reaksiyona girmesi Nano kalsit kullanımından kaynaklı olarak dayanıma katkı oranını artırmış olup

(Sato ve Daillo, 2010), pek çok kür yaşlarında katkı oranı NAL ile denk seviyelerdedir. YFC kullanım oranına bakılmaksızın tüm nano malzeme kullanımlarında dayanım gelişimine katkı sağlanmış olup, %19 oranında çimento içeren yani %81 YFC kullanım oranına sahip olan standart karışımlarda CEM III-C 32.5N tipi çimento üretilmiştir. Bir ton klinker üretiminde yaklaşık bir metreküp karbondioksit gazı doğaya salındığı gerçeği göz önünde bulundurulduğunda bu oran yani %81 YFC kullanılması ile doğa dostu bir çimento üretimi mümkün kılınmıştır.

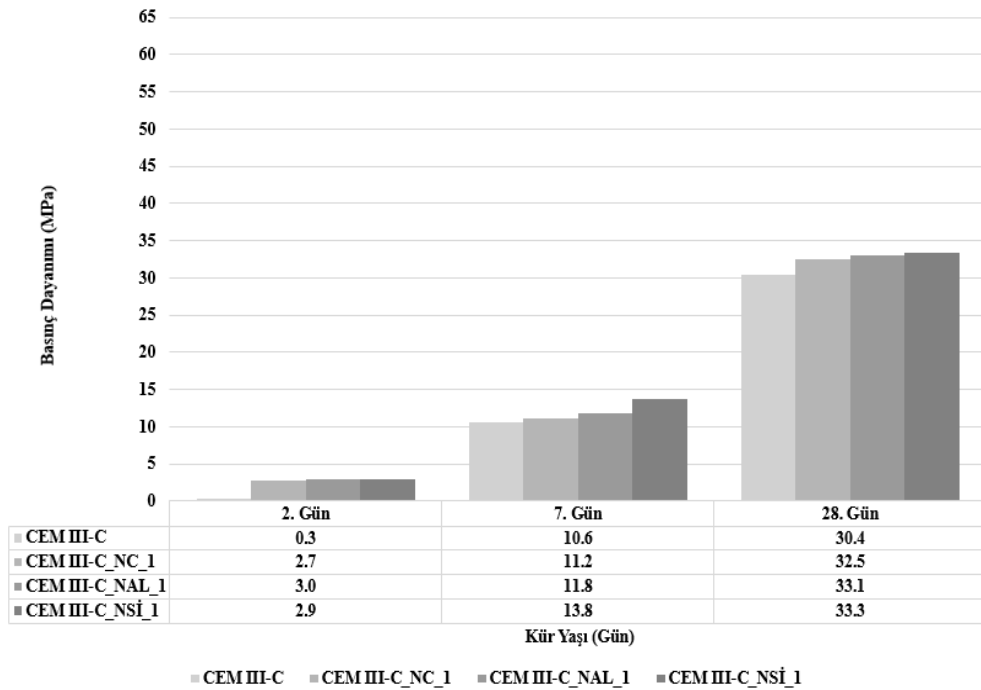
Yukarıda belirtilenlere ilave olarak YFC kullanım oranı arttıkça NC'nin daha fazla dayanım gelişimine katkı sağlaması beklenirken çok az katkı sağlaması YFC içerisindeki Al_2O_3 'ün miktarca çok az olması (%10.62, Bkz. Çizelge 3.1) durumundan kaynaklanmaktadır. YFC'ye kıyasla F tipi uçucu külde daha yüksek oranda alüminat fazı olduğundan dolayı kimyasal etki ile dayanıma katkı çok daha yüksek seviyelerdedir. Dolayısıyla, YFC içerisindeki düşük alüminat fazı, NC'nin hidrasyon ürünleri miktarına katkısını azaltmıştır (Shaikh ve Anwar, 2019).



a)



b)



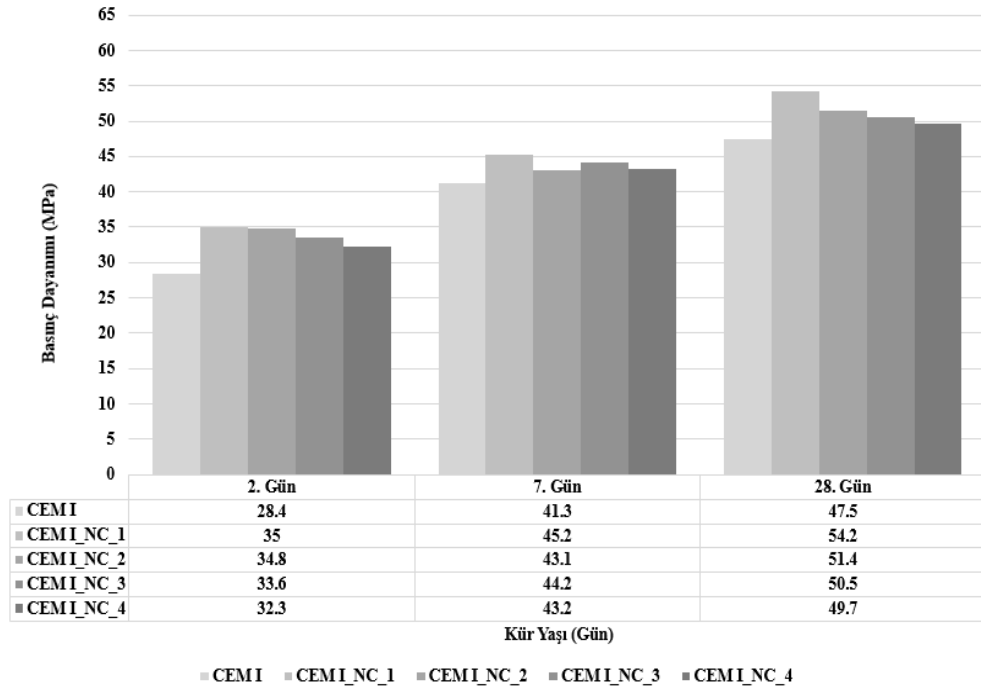
c)

Şekil 4.3 Farklı oranlarda YFC içeren karışımlarda nano tipinin basınç dayanımı gelişimi

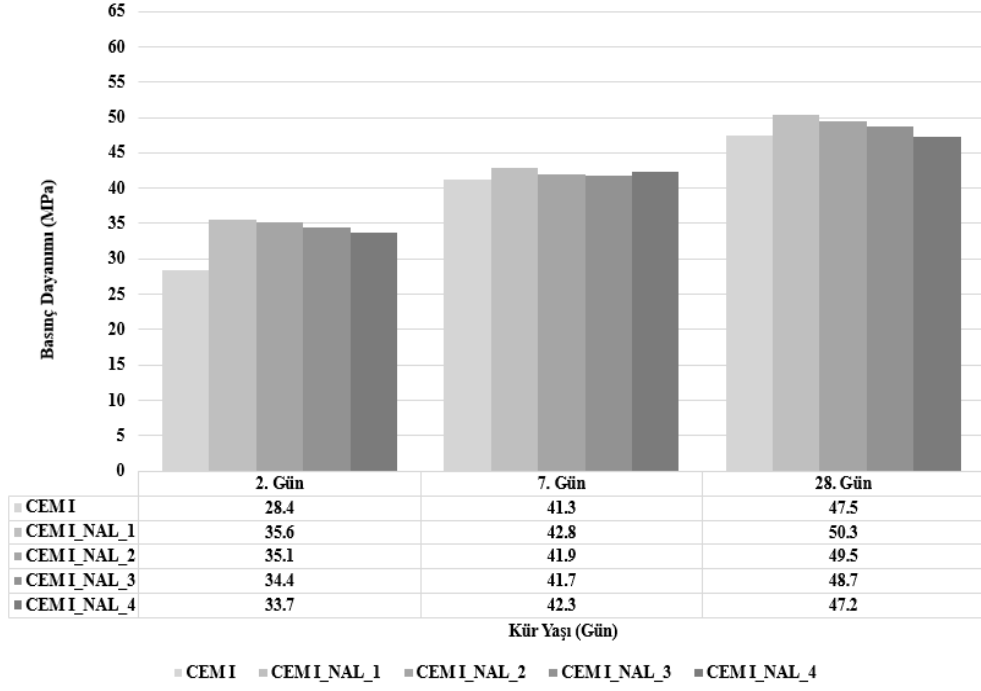
a) CEM III-A & %1 Nano, b) CEM III-B & %1 Nano, c) CEM III-C & %1 Nano

iii) Nano Malzeme Kullanım Oranı Etkisi:

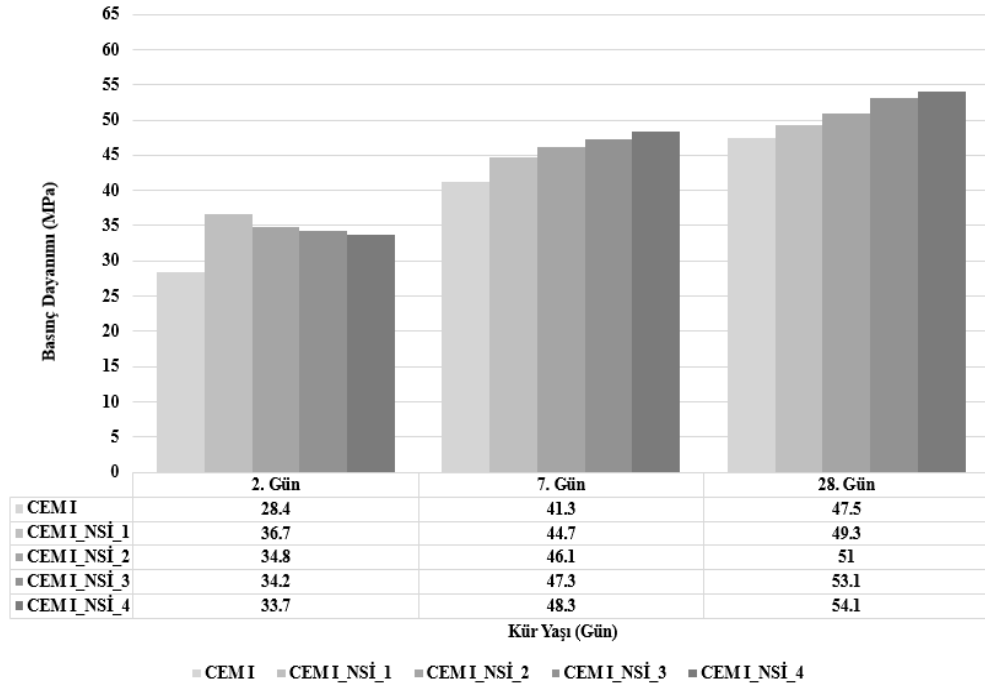
Nano malzeme kullanım oranı arttıkça basınç dayanımı gelişiminde meydana gelen değişimler Şekil 4.4, Şekil 4.5 Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere, genel olarak YFC kullanım oranına bakılmaksızın nano malzeme kullanım oranı arttıkça basınç dayanımı gelişiminde kısmi bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum hem nano malzemelerdeki topaklaşmadan hem de seyreltme etkisinden (dilution effect) dolayı gözlemlenmiş olabilir. Özellikle nano malzemeler yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olduğundan dolayı belli bir oranının üzerinde kullanıldıklarında filler görevi görüp, hidrasyon ürünü olarak dayanıma katkı sağlayamamaktadırlar. Literatürde kullanım oranı değişkenlik göstermekle birlikte pek çok çalışmada nano kullanım oranı %1-2 arasında önerilmiş olup (Yang ve Ark., 2018; Demirhan ve Ark., 2019; Hussain ve Sastry, 2014; Shaikh ve Supit, 2014), mevcut tez çalışmasında da en yüksek dayanım gelişimi %1-2 oranında nano malzeme kullanım oranlarında gözlemlenmiştir.



a)

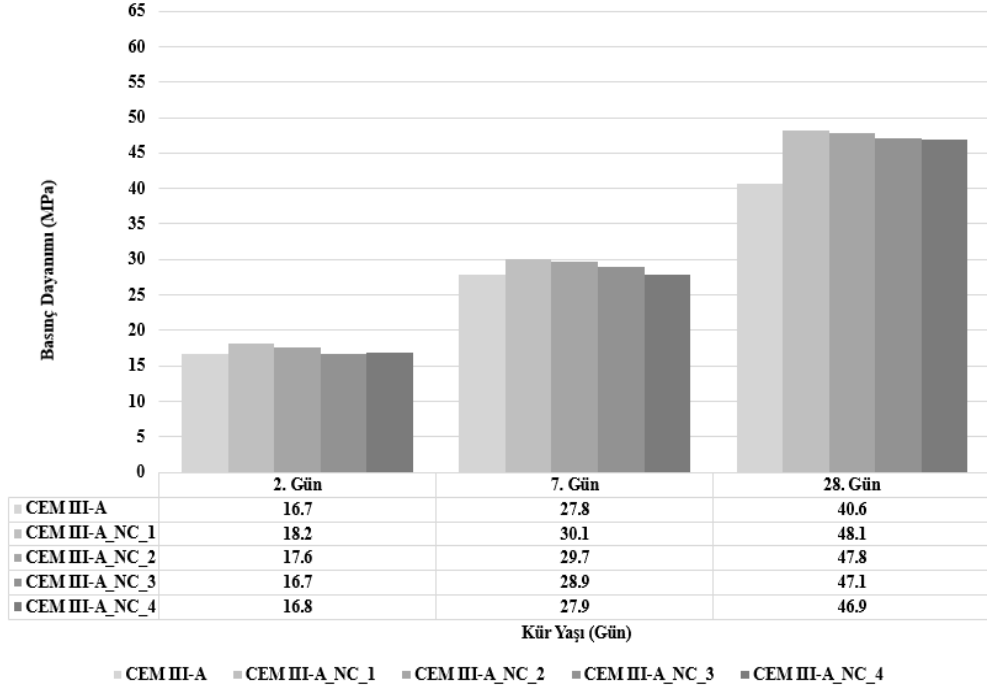


b)

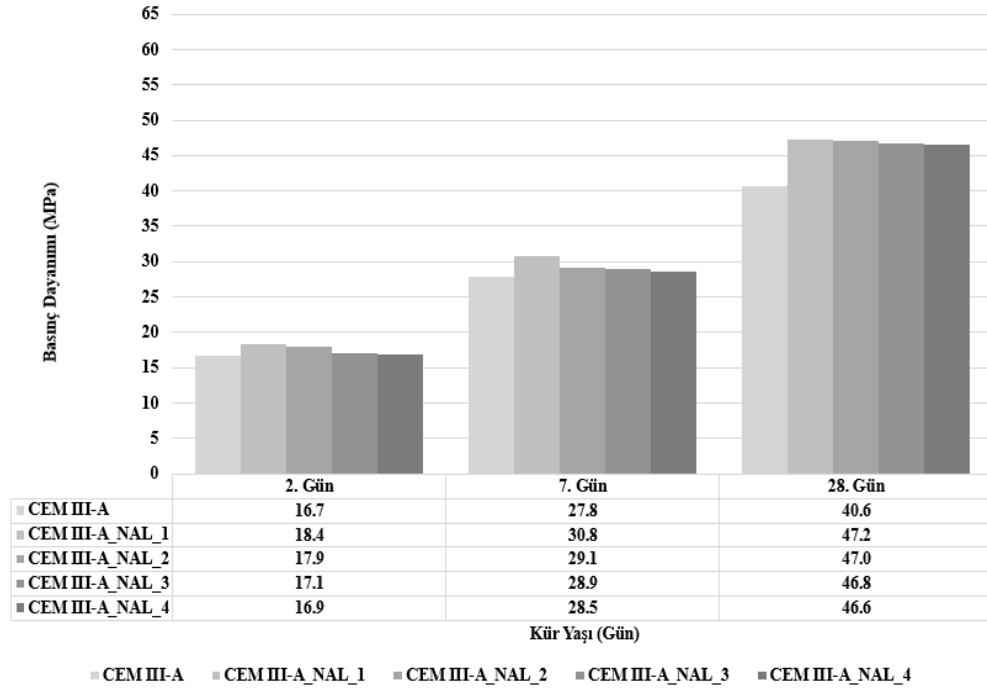


c)

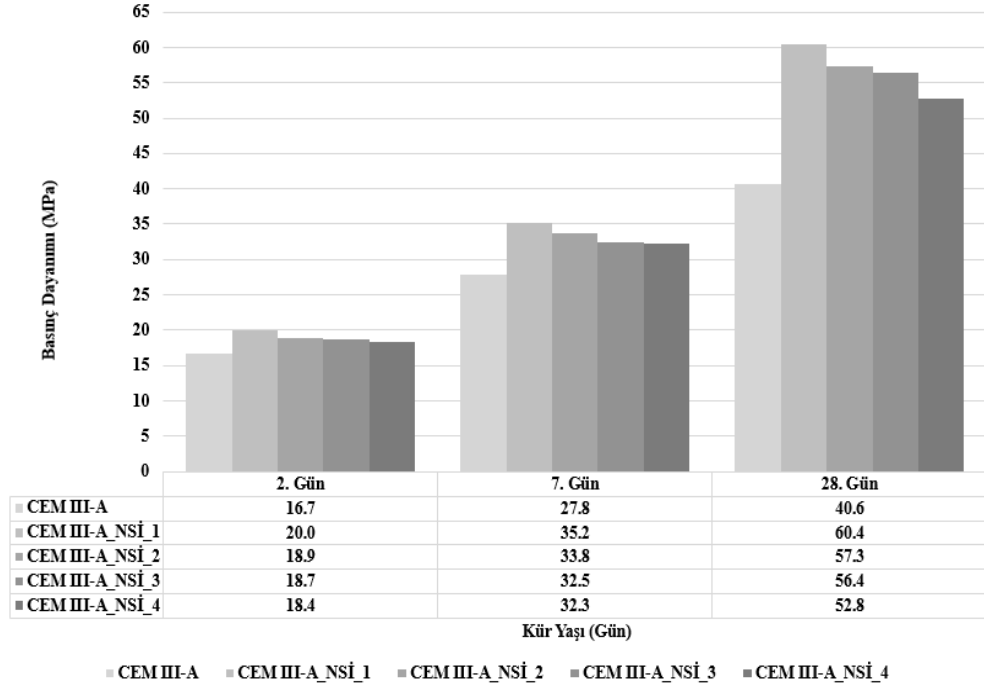
Şekil 4.4 YFC içermeyen CEM I tipli çimento harçlarında %1, %2, %3 ve %4 oranlarında a) NC, b) NAL ve c) NSİ kullanımının dayanım gelişimine etkisi



a)

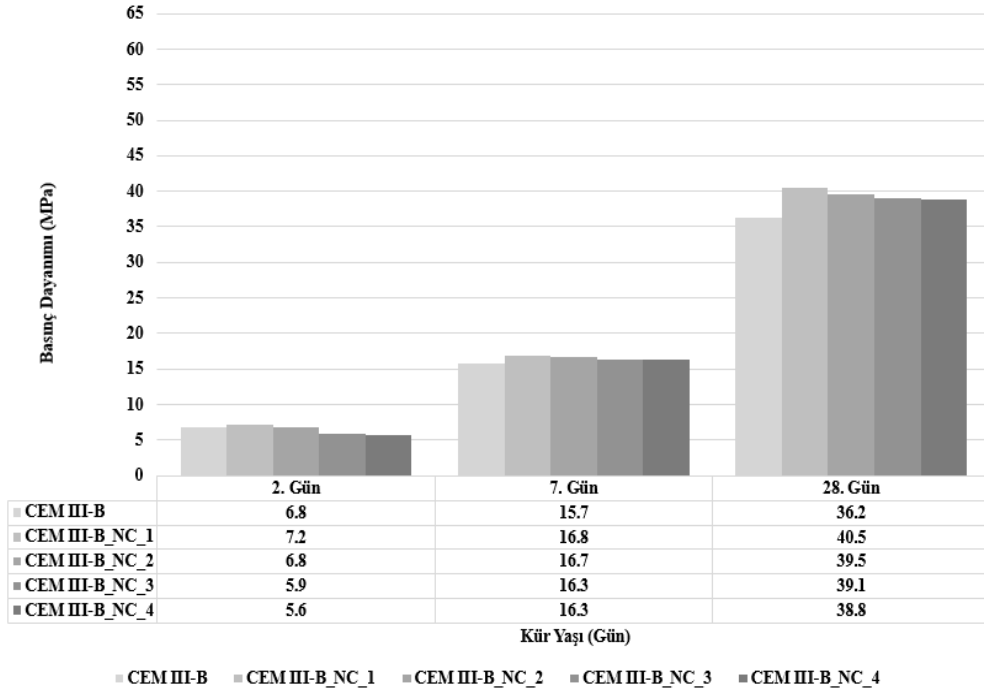


b)

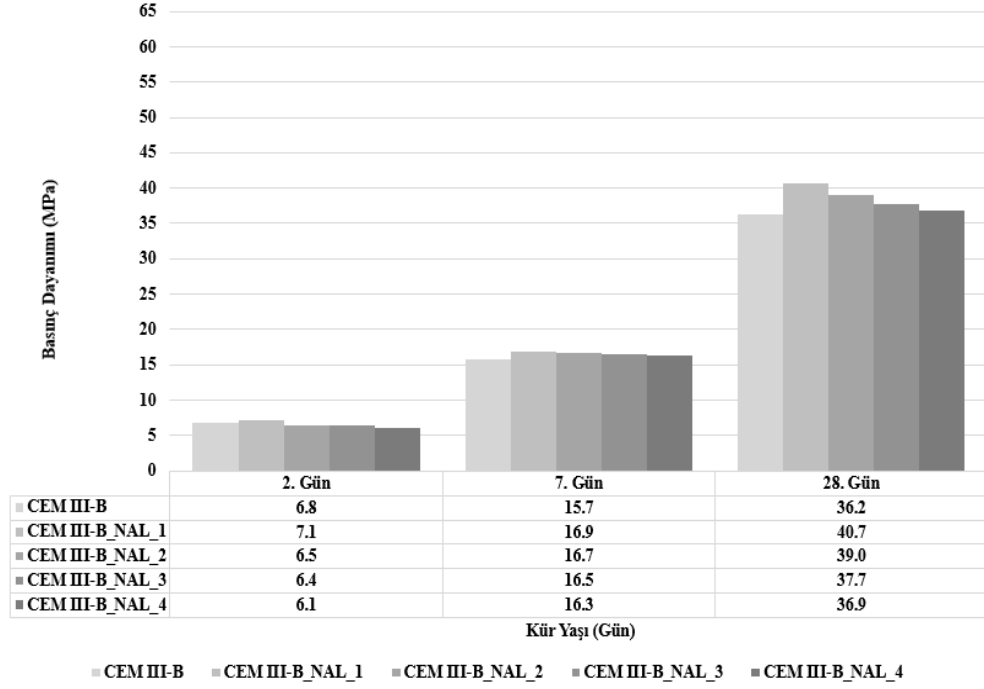


c)

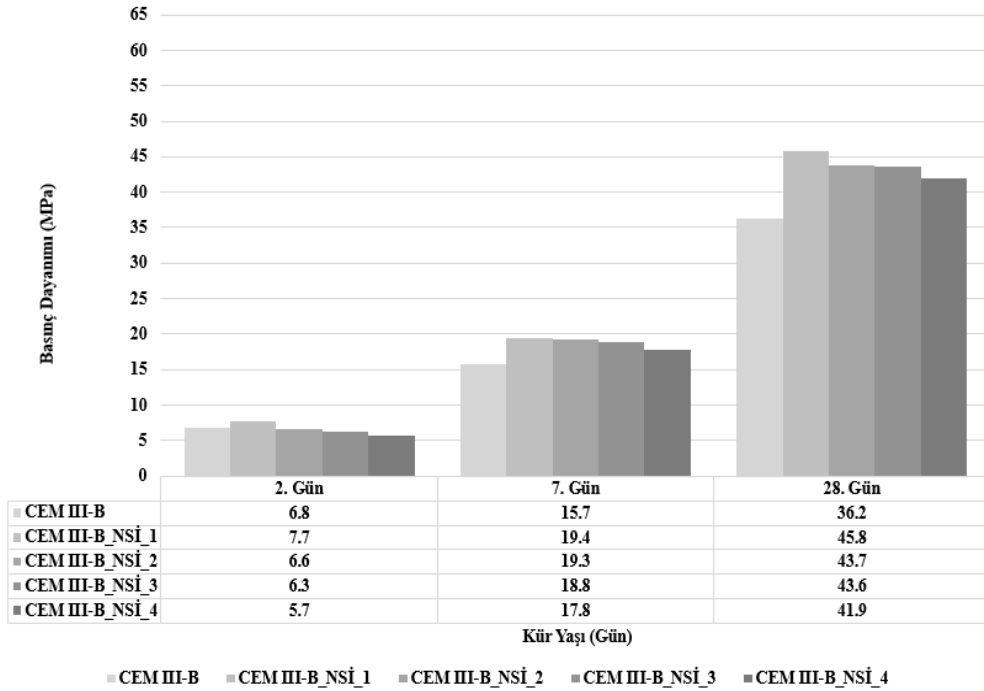
Şekil 4.5 CEM III-A tipli çimento harçlarında %1, %2, %3 ve %4 oranlarında a) NC, b) NAL ve c) NSİ kullanımının dayanım gelişimine etkisi



a)

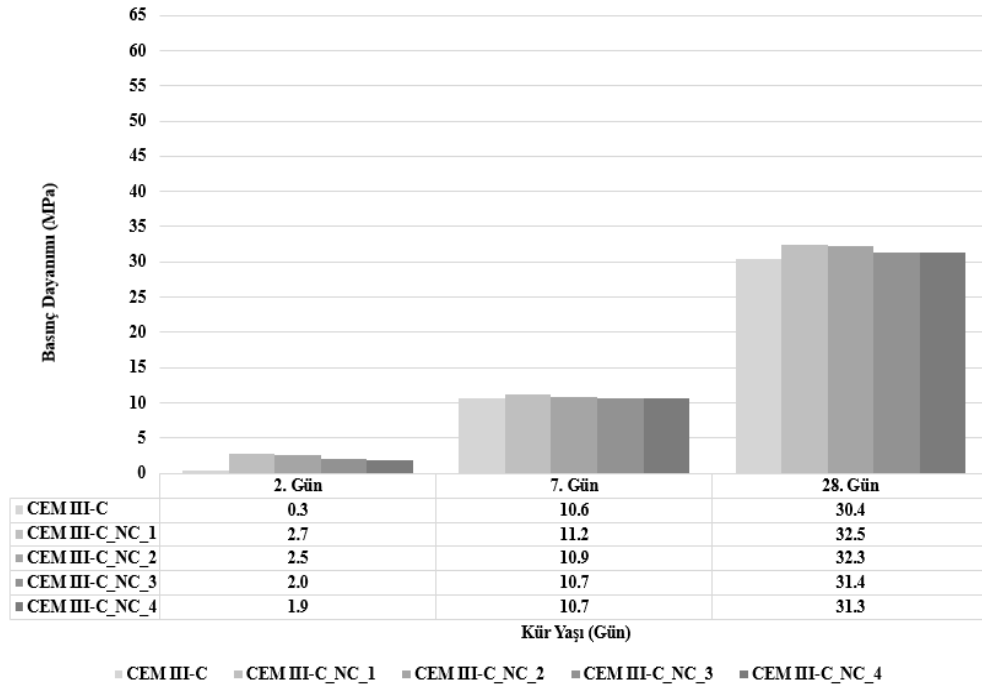


b)

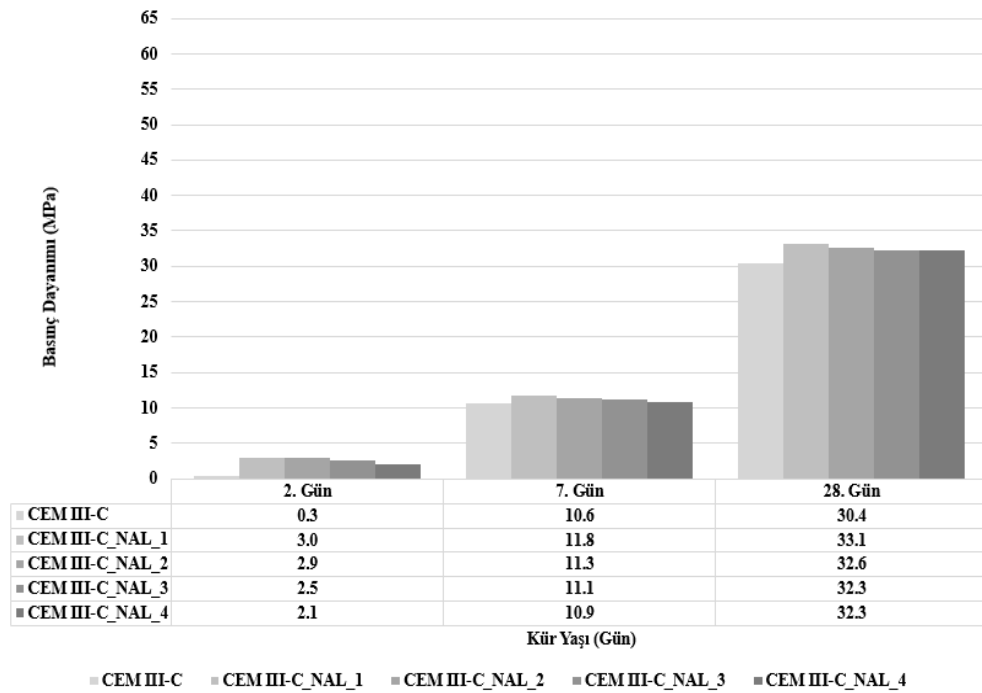


c)

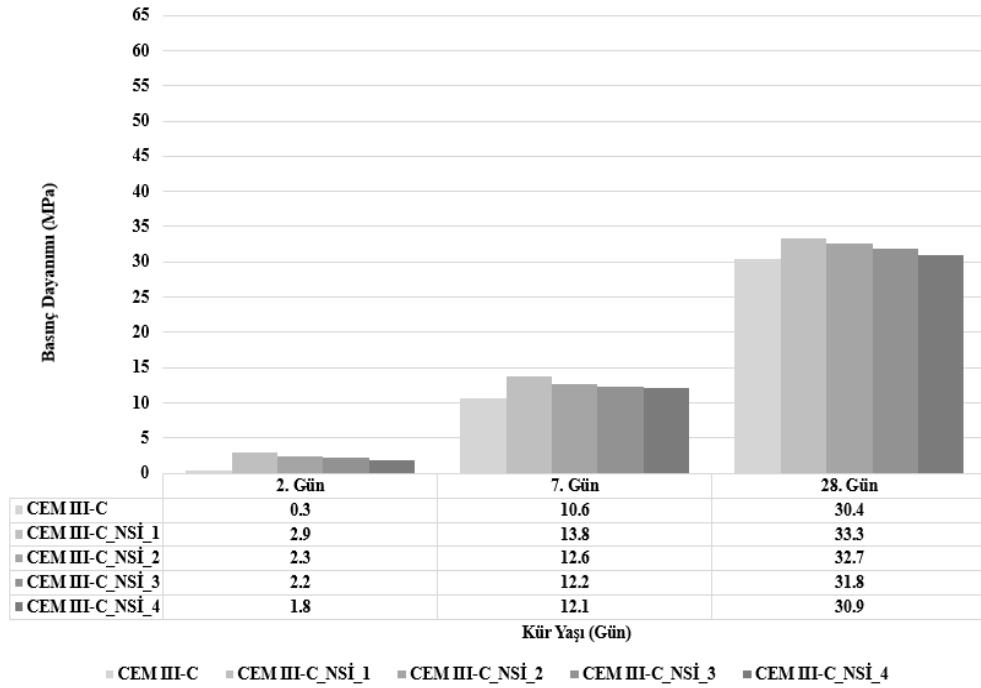
Şekil 4.6 CEM III-B tipli çimento harçlarında %1, %2, %3 ve %4 oranlarında
a) NC, b) NAL ve c) NSİ kullanımının dayanım gelişimine etkisi



a)



b)



c)

Şekil 4.7 CEM III-C tipli çimento harçlarında %1, %2, %3 ve %4 oranlarında a) NC, b) NAL ve c) NSİ kullanımının dayanım gelişimine etkisi

4.1.2. Le Chatelier Genleşme Deneyi

TS EN 196-3'e göre standart kıvamda hazırlanmış olan çimento hamurlarının Le Chatelier hacim genleşmesi deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiş olup, standartta belirtilen çubuklar arası mesafe ölçümlerine ilave olarak numune çaplarındaki değişimler de kontrol edilmiştir. Nano malzeme içermeyen CEM I ve CEM III-A içeren çimento hamurlarında 0.5 mm'lik bir genleşme gözlemlenmiş olup, nano malzeme içeren çimento hamuru numunelerinde genleşme saptanmamıştır.

Çizelge 4.1. Le Chatelier çimento hamuru hacim genleşmesi tayini

Karışım #	Karışım Kodu	Deney Öncesi Ölçülen Mesafe, cm	Deney Sonrası Ölçülen Mesafe, cm	Deney Öncesi Ölçülen Çap, cm	Deney Sonrası Ölçülen Çap, cm
1	CEM I_0	2.20	2.25	2.95	3.00
2	CEM I_NC_1	1.65	1.65	2.95	2.95
3	CEM I_NAL_1	0.90	0.90	2.90	2.95
4	CEM I_NSI_1	0.90	0.90	3.00	3.00
5	CEM III-A_0	0.85	0.90	2.95	2.95
6	CEM III-A_NC_1	0.65	0.65	3.00	3.00
7	CEM III-A_NAL_1	0.50	0.50	3.00	3.00
8	CEM III-A_NSI_1	0.70	0.70	3.00	3.00

4.1.3. Mini Çökme-Yayılma Deneyi

Değişimlerin olduğu karışımlarda grafik gösterimi daha uygun olmasına rağmen mevcut çalışmada özellikle NC içeren karışımlarda YOSAK kullanımı sıfır olduğundan grafik çizimi yapılamamış dolayısıyla mini çökme-yayılma testi için sonuçlar sadece çizelge üzerinden tartışılmıştır.

Nano malzemeler çok küçük tane boyutuna sahip olduğundan dolayı yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptirler. Bu durum nano malzemelerin kullanılmış olduğu karışımlarda işlenebilirlik problemi oluşturmakta ve üretilen harçların kıyaslanmasını mümkün kılmamaktadır. Üretilen 58 adet çimento harcı numunelerinin aynı işlenebilirliğe yakın tutulması için mini çökme yayılma deneyi yapılmıştır. Üretilen harçların aynı işlenebilirliğe gelmesi için kullanılan süperakışkanlaştırıcı miktarı ve yayılma çapları CEM I, CEM III-A/B/C (NC içeren), CEM III-A/B/C (NAL içeren) ve CEM III-A/B/C (NSİ içeren) için sırasıyla Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelgede görüldüğü üzere, nano tanecik içermeyen CEM I, CEM III-A, CEM III-B ve CEM III-C karışımlarının yayılma çapı sırasıyla 16.5 cm, 19.5 cm, 18.5 cm ve 18 cm olarak ölçülmüştür. YFC kullanım oranı arttıkça çimento kullanım oranındaki azalmadan kaynaklı seyreltme etkisinin bir neticesi olarak işlenebilirlikte iyileşme yani yayılma çapında artış gözlemlenmiştir ama çok yüksek hacimde YFC kullanım oranında ise artan özgül yüzey alanı nedeniyle yayılma çapının artışında bir azalış gözlemlenmiştir (Tokyay, 2016; Deb ve Ark., 2014; Collins ve Sanjayan, 1998; Collins ve Sanjayan, 1999).

NC içeren karışımlarda yayılma çapında artış ve NSİ içeren karışımlarda işlenebilirlikte en fazla kötüleşme gözlemlenmekle birlikte NAL ve NSİ içeren karışımlarda yayılma çapında düşüş meydana geldiğinden kontrol karışımının işlenebilirliğine denk getirmek için farklı miktarlarda YOSAK kullanılmıştır. NC yapısı itibarıyla hidrofobik bir özelliğe sahip olup, yayılma çapında artış yani işlenebilirlikte iyileşme ile neticelenmiştir (Turgut ve Ogretmen, 2019; Turgut, 2018). NC kullanım oranı arttıkça yayılma çapında artışta bir azalma gözlemlenmiştir. Buna ilave olarak;

NC, NAL ve NSİ'ye kıyasla daha büyük tane boyutuna sahip olup, aynı su/bağlayıcı oranında daha fazla yayılma sergilemiştir. NC'nin işlenebilirliğe olumlu katkısı YFC kullanım oranına bakılmaksızın tüm NC içeren karışımlarda gözlemlenmiştir. NAL ve NSİ çok yüksek Brunauer-Emmett-Teller (BET) yüzey alanı değerlerine sahip olduğundan yayılma çapında düşüş gözlemlenmiş olup (Nazari ve Ark., 2010; Elkady ve Ark. 2013; Gowda ve Ark., 2017), kullanım oranı arttıkça YOSAK kullanım miktarı da artmıştır. En yüksek YOSAK kullanım oranı %4 oranında NSİ içeren CEM I karışımında saptanmıştır.

Çizelge 4.2. Mini çökme yayılma çapları ve YOSAK miktarı [NC, NAL ve NSİ içeren CEM I]

Karışım #	Notasyon	YOSAK Miktarı*, gr	YOSAK Sonrası Mini Çökme Yayılma Çapı, cm	Alt Limit**, cm -%10
1	CEM I	0	16.5	14.85
2	CEM I_NC_1	0	19.5	
3	CEM I_NC_2	0	18.7	
4	CEM I_NC_3	0	18.8	
5	CEM I_NC_4	0	17.2	
6	CEM I_NAL_1	1.8	17.5	
7	CEM I_NAL_2	2.02	17.6	
8	CEM I_NAL_3	2.25	16.6	
9	CEM I_NAL_4	2.48	16.5	
10	CEM I_NSİ_1	1.8	17	
11	CEM I_NSİ_2	2.55	16.2	
12	CEM I_NSİ_3	5	16	
13	CEM I_NSİ_4	8	17.5	
* 450 gr bağlayıcı içeren standart çimento harcının hedeflenen işlenebilirliği için gerekli olan miktarı ifade etmektedir.				
** İlgili standart, kontrol karışımına kıyasen %10 daha düşük yayılma çaplarını aynı işlenebilirlik olarak kabul etmektedir.				

Çizelge 4.3. Mini çökme yayılma çapları ve YOSAK miktarı [NC içeren CEM III-A/B/C]

Karışım #	Notasyon	YOSAK Miktarı*, gr	YOSAK Sonrası Mini Çökme Yayılma Çapı, cm	Alt Limit**, cm -%10
14	CEM III-A	0	19.5	17.6
15	CEM III-A_NC_1	0	19.8	
16	CEM III-A_NC_2	0	20.1	
17	CEM III-A_NC_3	0	20.3	
18	CEM III-A_NC_4	0	20.2	
19	CEM III-B	0	18.5	16.7
20	CEM III-B_NC_1	0	18.7	
21	CEM III-B_NC_2	0	18.7	
22	CEM III-B_NC_3	0	18.9	
23	CEM III-B_NC_4	0	19.0	
24	CEM III-C	0	18.0	16.2
25	CEM III-C_NC_1	0	18.4	
26	CEM III-C_NC_2	0	18.5	
27	CEM III-C_NC_3	0	18.8	
28	CEM III-C_NC_4	0	19.1	

* 450 gr bağlayıcı içeren standart çimento harcının hedeflenen işlenebilirliği için gerekli olan miktarı ifade etmektedir.

** İlgili standart, kontrol karışımına kıyasen %10 daha düşük yayılma çaplarını aynı işlenebilirlik olarak kabul etmektedir.

Çizelge 4.4. Mini çökme yayılma çapları ve YOSAK miktarı [NAL içeren CEM III-A/B/C]

Karışım #	Notasyon	YOSAK Miktarı*, gr	YOSAK Sonrası Mini Çökme Yayılma Çapı, cm	Alt Limit**, cm -%10
29	CEM III-A	0	19.5	17.6
30	CEM III-A_NAL_1	0	19.5	
31	CEM III-A_NAL_2	0	19.3	
32	CEM III-A_NAL_3	0	18.2	
33	CEM III-A_NAL_4	0.2	17.9	
34	CEM III-B	0	18.5	16.7
35	CEM III-B_NAL_1	0	18.5	
36	CEM III-B_NAL_2	0	18.0	
37	CEM III-B_NAL_3	0	17.2	
38	CEM III-B_NAL_4	0	16.7	
39	CEM III-C	0	18.0	16.2
40	CEM III-C_NAL_1	0	17.4	
41	CEM III-C_NAL_2	0	17.0	
42	CEM III-C_NAL_3	0.2	16.3	
43	CEM III-C_NAL_4	0.6	17.0	
* 450 gr bağlayıcı içeren standart çimento harcının hedeflenen işlenebilirliği için gerekli olan miktarı ifade etmektedir.				
** İlgili standart, kontrol karışımına kıyasen %10 daha düşük yayılma çaplarını aynı işlenebilirlik olarak kabul etmektedir.				

Çizelge 4.5. Mini çökme yayılma çapları ve YOSAK miktarı [NSİ içeren CEM III-A/B/C]

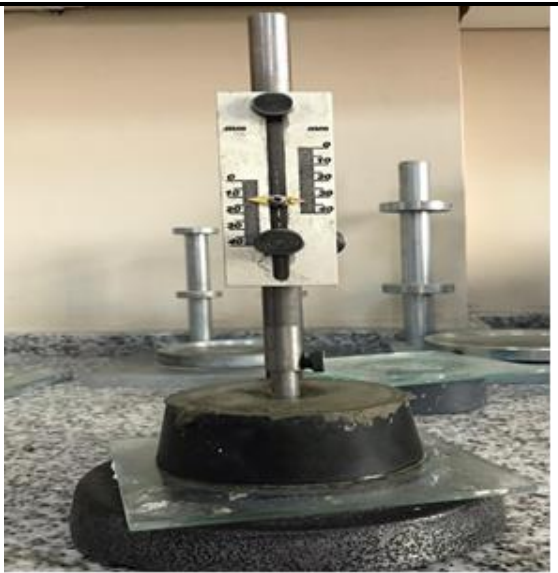
Karışım #	Notasyon	YOSAK Miktarı*, gr	YOSAK Sonrası Mini Çökme Yayılma Çapı, cm	Alt Limit**, cm -%10
44	CEM III-A	0	19.5	17.6
45	CEM III-A_NSİ_1	0	18.0	
46	CEM III-A_NSİ_2	0.5	17.7	
47	CEM III-A_NSİ_3	1.9	17.8	
48	CEM III-A_NSİ_4	3.7	18.1	
49	CEM III-B	0	18.5	16.7
50	CEM III-B_NSİ_1	0	17.5	
51	CEM III-B_NSİ_2	0.8	16.7	
52	CEM III-B_NSİ_3	2.5	16.8	
53	CEM III-B_NSİ_4	5.0	16.7	
54	CEM III-C	0	18.0	16.2
55	CEM III-C_NSİ_1	0	16.7	
56	CEM III-C_NSİ_2	1.5	16.3	
57	CEM III-C_NSİ_3	3.2	16.3	
58	CEM III-C_NSİ_4	5.8	16.7	
* 450 gr bağlayıcı içeren standart çimento harcının hedeflenen işlenebilirliği için gerekli olan miktarı ifade etmektedir.				
** İlgili standart, kontrol karışımına kıyasen %10 daha düşük yayılma çaplarını aynı işlenebilirlik olarak kabul etmektedir.				

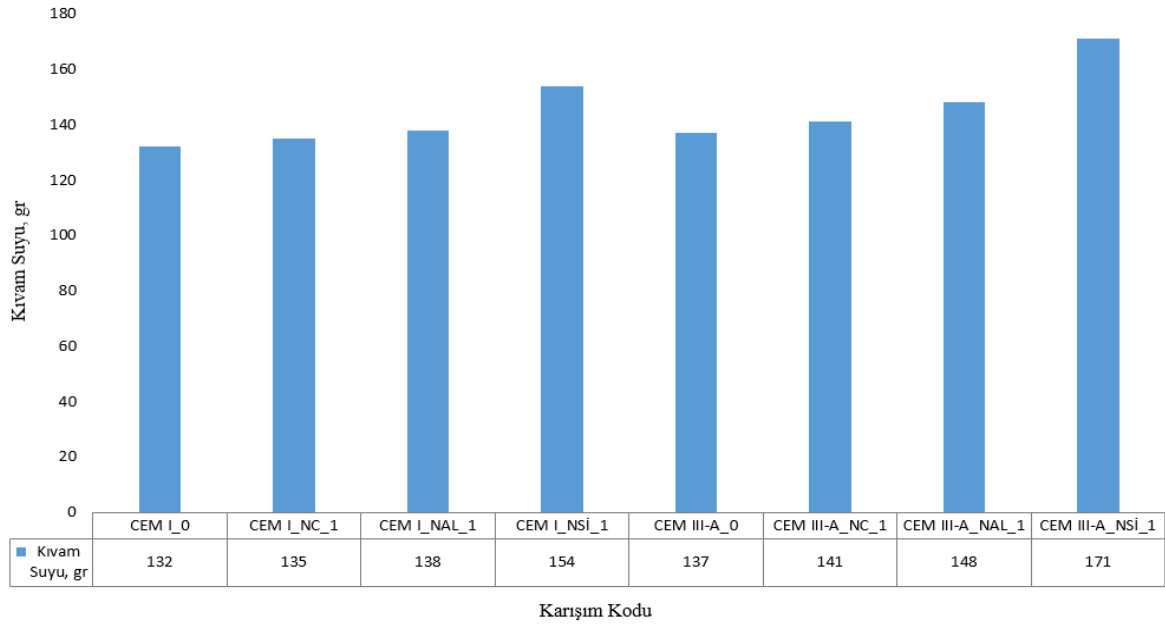
4.1.4. Kıvam, Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri

Daha önce de belirtildiği üzere mineral katkı kullanım oranı arttıkça priz süresinde uzama meydana geldiğinden ve mevcut çalışmada çok yüksek hacimde (%81) YFC kullanıldığından dolayı priz sürelerinin tayini sorun teşkil edeceğinden dolayı yalnızca CEM I ve CEM III-A çimentolarından oluşan 8 adet karışım seçilmiş olup; kıvam, priz süresi başlama ve priz süresi sona erme deneyleri bu karışımlar için yapılmıştır. Kıvam ve priz süreleri deney sonuçları sırasıyla Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.6’da görüldüğü üzere YFC kullanılan karışımlarda bağlayıcı malzeme blaine değeri artışı nedeniyle su ihtiyacı artmış olup, kıvam suyunda %3.8 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Tüm karışımlarda nano malzeme kullanımıyla toplam bağlayıcı malzemenin (çimento+YFC+nano malzeme) özgül yüzey alanı arttığından tüm nano tiplerinde çimento tipi gözetmeksizin kıvam suyunda artış saptanmıştır. En düşük artış NC ve en yüksek artış ise NSİ kullanımında gözlemlenmiş olup, sırasıyla %2.3 (CEM I_NC_1) ve %24.8 (CEM II-A_NSİ_1) oranında tespit edilmiştir. Bu durum nano boyutlu taneciklerin özgül yüzey alanlarındaki farklılıktan dolayı oluşmuştur.

Çizelge 4.6. Standart kıvam tayini sonuçları

Karışım #	Karışım Kodu	Kıvam Suyu, gr	Kıvam Suyu, %	Standart Kıvamdaki Numune
1	CEM I_0	132	26.4	
2	CEM I_NC_1	135	27.0	
3	CEM I_NAL_1	138	27.6	
4	CEM I_NSİ_1	154	30.8	
5	CEM III-A_0	137	27.4	
6	CEM III-A_NC_1	141	28.2	
7	CEM III-A_NAL_1	148	29.6	
8	CEM III-A_NSİ_1	171	34.2	



Şekil 4.8. Hazırlanan karışımların kıvam suyu



Çimento hamuru priz sürelerinin verildiği Çizelge 4.7’de görüldüğü üzere YFC kullanım oranı artışıyla birlikte priz başlama ve sona erme sürelerinde uzama gözlemlenmiştir (Thomas ve Ark., 2018; Yalçınkaya ve Yazıcı, 2017; Hardjito ve Ark., 2008; Rao ve Rao, 2015). Priz süresi, oluşan hidrasyon ürünlerine bağlı olarak değiştiğinden dolayı YFC kullanım oranı arttıkça geciken puzolanik reaksiyonun bir neticesi olarak hem priz başlama hem de priz sona erme sürelerinde uzama saptanmıştır. Nano boyutlu malzemeler çimento bazlı malzemelerle birlikte kullanıldığında *çekirdeklenme etkisi* olarak tanımlanan etki ile C_3S ’in reaksiyon hızını artırmakta ve *kimyasal etki* olarak da bilinen etki ile de sadece NC hem çimento hem de mineral katkı malzemesindeki alüminat fazı ile tepkimeye girerek hemi- ve mono- karbo alüminatları oluşturarak daha fazla hidrasyon ürününün oluşumu ile neticelenmektedirler. Hem çekirdeklenme etkisi hem de kimyasal etkinin bir neticesi olarak CEM I içeren karışımlarda nano malzeme kullanımıyla priz başlama ve sona erme sürelerinde belirgin düzeyde bir kısalma saptanmıştır (Sumesh ve Ark., 2017; Polat ve Ark., 2019; Gowda ve Ark., 2017). Hem çekirdeklenme hem de hidrasyon neticesinde oluşan sönmüş kireçle reaksiyon gösterdiğinden dolayı priz sürelerindeki en fazla kısalma NSİ içeren karışımlarda gözlemlenirken en az kısalma ise NC kullanılan karışımlarda gözlemlenmiştir. CEM III-A tipli çimentoda CEM I’e benzer durumlar gözlemlenmiş olup, nano malzeme kullanımı ile priz sürelerinde kısalma olmuştur. Yukarıda

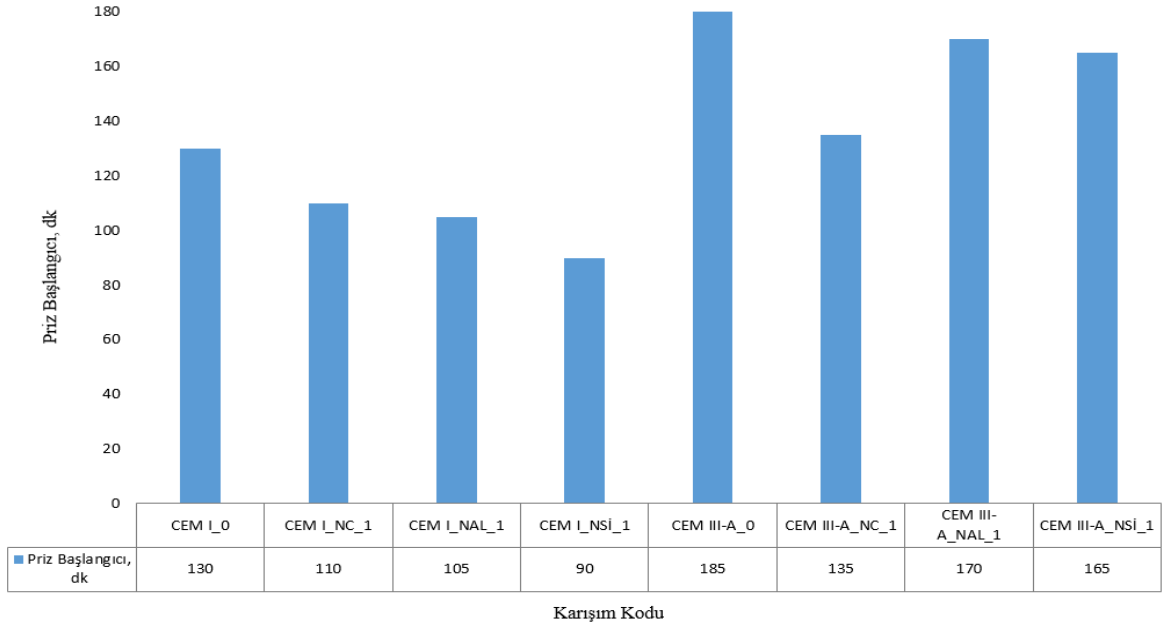
belirtilenlere ilave olarak, NC kullanılan karışımlarda çekirdeklenme etkisine ilave olarak kimyasal etki de olduğundan NC'li YFC kullanılan karışımların priz süresindeki kısalma NC'li CEM I'dekinden daha fazladır. Çünkü YFC kullanımıyla matris içerisinde artan alüminat fazı nedeniyle NC kimyasal etki neticesinde daha fazla hidrasyon ürünü oluşturarak priz süresinde daha fazla kısalma ile neticelenmiştir.

Yukarıda belirtilen durumun bir neticesi olarak, NSİ ve NAL'ye kıyasla, NC'nin mineral katkılı çimento tiplerinde artan alüminat fazından kaynaklı olarak daha etkili olarak performansa katkı sağladığını söyleyebiliriz. YFC içerisindeki alüminat fazı F tipi uçucu küle kıyasla daha az olduğundan YFC içeren karışımlardaki kimyasal etki uçucu küllü karışımlara kıyasla daha az oluşur sonucunu da vermektedir (Cao ve Ark., 2019).

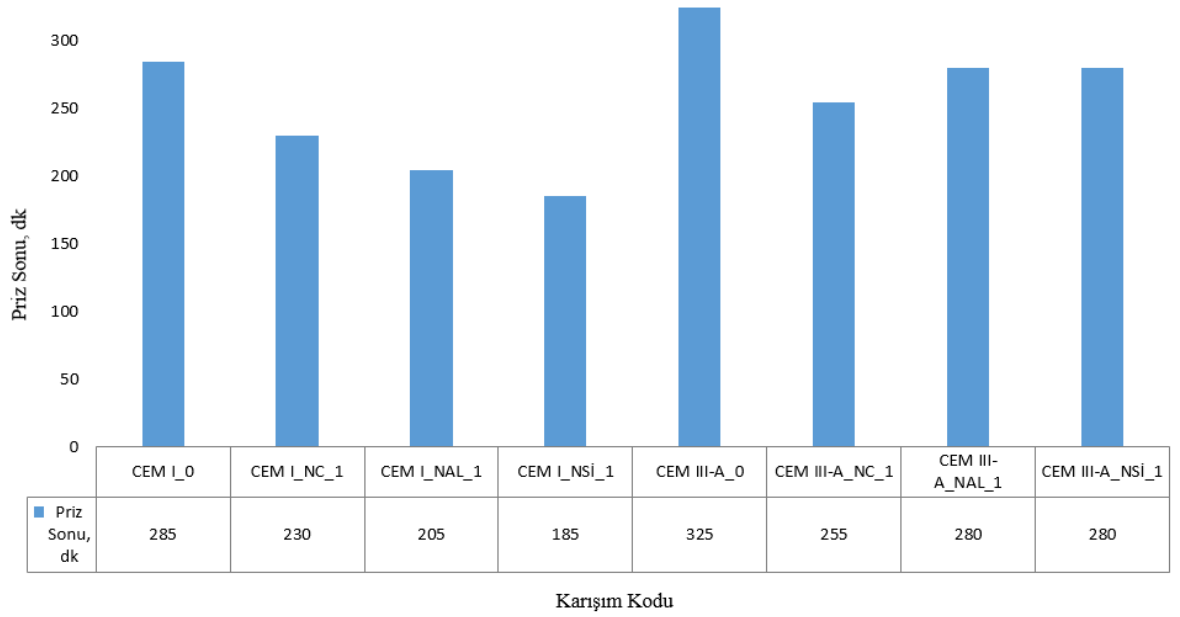
Mineral katkı türü ve bağlayıcı malzeme olarak çimento içerisindeki kimyasal bileşenlere bağlı olarak nano malzeme tipinin seçiminin büyük önem arz ettiğini de ayrıca belirtmekte fayda bulunmaktadır.

Çizelge 4.7. Priz başlama ve sona erme süreleri

Karışım #	Karışım Kodu	Priz Başlangıcı, dk	Priz Sonu, dk	Priz Başlangıcı	Priz Sonu
1	CEM I_0	130	285		
2	CEM I_NC_1	110	230		
6	CEM I_NAL_1	105	205		
10	CEM I_NSİ_1	90	185		
14	CEM III-A_0	185	325		
15	CEM III-A_NC_1	135	255		
30	CEM III-A_NAL_1	170	280		
45	CEM III-A_NSİ_1	165	280		



Şekil 4.9. Hazırlanan karışımların priz başlama süreleri



Şekil 4.10. Hazırlanan karışımların priz sona erme süreleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Çimentonun dayanım performansı oluşan hidrasyon ürünlerine doğrudan bağlı olup, dayanım gelişimi de bu doğrultuda değişkenlik göstermektedir. Çimentonun karbondioksit salınımını azaltmak ve çimento bazlı malzemelerin performansını artırmak için çimento yerine ikame edilmek üzere puzolanik özelliğe sahip uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi pek çok endüstriyel yan ürün kullanılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda hem *doğa dostu daha yeşil bir çimento* hem de oluşan puzolanik reaksiyonlarla da dayanıma ek katkı sağlayarak çimento bazlı malzemenin performansına katkı sağlanmaktadır. Yüksek hacimde mineral katkı kullanımında erken yaş dayanım problemi gerçekleştiğinden dolayı belli bir ikame oranının üstüne çıkılmaması TS EN 197-1’de belirtilmiştir. Yüksek hacimde mineral katkı kullanılması nedeniyle oluşan erken yaş dayanım gelişiminin ve performans özelliklerinin incelenmesi maksadıyla hem taze hem de sertleşmiş çimento harcı deneyleri mevcut tez çalışması kapsamında yapılmıştır. Bu maksatla, hedeflenen program doğrultusunda yapılan tüm deneysel sonuçların ışığında aşağıda maddeler halinde verilen sonuçlar çıkarılabilir.

- ❖ Genel olarak NAL ve NSİ taneciklerinin kullanım oranı arttıkça işlenebilirlikte kötüleşme yani çimento harcı yayılma çapında azalma oluşurken NC kullanılan karışımlarda ise işlenebilirlikte iyileşme gözlemlenmiştir.
- ❖ NC’in hidrofobik kimyasal yapısı nedeniyle en iyi işlenebilirlik özellikleri NC kullanılan karışımlarda tespit edilmiştir.
- ❖ Tüm nano malzemelerde kıvam suyu kullanım oranı artmış olup, en düşük oran (nispeten daha büyük tane boyutuna sahip olduğundan) NC içeren karışımlarda elde edilmiştir.
- ❖ YFC kullanım oranına bakılmaksızın nano malzeme kullanımıyla tüm karışımların priz başlama sürelerinde kısalma tespit edilmiştir.
- ❖ YFC kullanım oranı arttıkça priz başlama ve sona erme sürelerinde uzama gözlemlenmiştir.
- ❖ YFC kullanım oranı arttıkça erken yaş dayanım gelişiminde kötüleşme gözlemlenmiştir.

- ❖ YFC içermeyen nano katkılı çimento harçlarında hem çekirdeklenme etkisi (NC, NAL ve NSİ) hem de kimyasal etkinin (sadece NC) bir neticesi olarak tüm kür yaşlarında dayanıma katkı sağlanmıştır.
- ❖ Nano malzeme kullanım oranı arttıkça dayanım gelişiminde artışta bir azalış tespit edilmiştir. En yüksek performans katkısı nano tipine bakılmaksızın %1-2 kullanım oranlarında elde edilmiştir.
- ❖ Genel olarak, YFC içermeyen karışımlarda NAL ve NSİ taneciklerinin dayanıma katkı etkisi yüksek iken YFC içeren karışımlarda ise NC taneciklerinin etkisi daha yüksek seviyede gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

Mevcut deneysel çalışmanın makro düzeyde yapılan deney ve analizlerinin SEM ve TGA/TDA analizleri aracılığıyla mikro/nano düzeyde de yapılması mevcut tez kapsamındaki deneysel sonuçların teyid edilmesi önerilmektedir.

Her bir nano malzemenin çimento bazlı malzemenin hidrasyon özelliklerine katkısı farklı şekil ve düzeyde olduğu için hem diğer nano malzemelerin hem de diğer mineral katkıların kombine edilerek incelenmesi literatürde büyük bir açığı kapatacaktır.

KAYNAKLAR

Activity Report 2013. Cembureau, 2014.

Atan, M. C. (2015). *Using Cappadocia Tuff As A Natural Pozzolan In The Cement Production*. <https://doi.org/10.1145/3132847.3132886>, Yüksek Lisans Tezi.

Aygün, T. (2019). *Siltli Bir Zeminin Kireç Ve Pirinç Kabuğu Külü İle İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi

Aytekin, M. (2018). *Sepiyolit İçeren Çimento Esaslı Bağlayıcılarla Üretilen Harçların İşlenebilirlik, Dayanım Ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi.

Akçaözoglu, K. (2007). *Silis Dumani İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı Ve Birim Kısalma Üzerindeki Etkisi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Akgül, E. (2006). *Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Akkaya, B. (2013). *Eren Enerji Termik Santrali Uçucu Küllerinin Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.

Almaz, Z. (2010). *Metakaolin ve Silis Dumani İçeren Harç Karışımlarının Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Aruntaş, H. Y. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 21, (2006).

ASTM C 150, "Specifications for Portland Cement", American Society for Testing Materials, 2015.

ASTM C 618, "Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", American Society for Testing and Materials, 2012.

Atakay, O. (2006). *Uçucu Küllerin Katkılı Çimento Üretiminde Kullanılması-Tane İnceliği ve Katkı Miktarının Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Bai, P., Sharratt, P., Yeo, T. Y. and Bu, J. (2014). A facile route to preparation of high purity nanoporous silica from acid-leached residue of serpentine. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14(9), 6915-6922.

Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A.U., Beton. DEU, 334, 2012.

- Barbhuiya, S., Mukherjee, S. and Nikraz, H. (2014). Effects of nano-Al₂O₃ on early-age microstructural properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, (52), 189-193.
- Behfarnia, K. and Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 4(8), 580-584.
- Belaguru, P. and Chong, K., *Nanotechnology and Concrete: Research Opportunities*. Proceedings of ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives, November 7, 2006, Denver, USA.
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A.E., Sebastiani, M., 2012. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 35: 666-675.
- Birgisson, B., *Nanotechnology in Concrete Materials*, Transportation Research Board, 2012.
- Bilici, Z. (2011). *Rheological Properties Of Engineered Cementitious Composites Containing Fly Ash*, Yüksek Lisans Tezi.
- Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L. and Panas, I. (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*, 392(1), 242-248.
- Bozgeyik, M. B. (2019). *Experimental Evaluation And Modelling Of The Compressive Strength Of Concretes Produced With Different Strength Classes Of Cement*, Yüksek Lisans Tezi.
- Bulut, Ü. ve Tanaçan, L. (2009). *Perlitin Puzolanik Aktivitesi*. İ.T.Ü Dergisi " Mimarlık, Planlama, Tasarım", 8(1), 81-89.
- Campillo, I., Guerrero, A., Dolado, JS., Porro, A., Ibanez, JA., Goni, S., 2007. Improvement of initial mechanical strength by nanoalumina in belite cements. *Materials Letters*, 61 (8–9): 1889–1892.
- Cao, M., Ming, X., He, K., Li, L., & Shen, S. (2019). Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review. *Materials*, 12(5), 781.
- Cardenas, HE., Struble, LJ., 2006. Electrokinetic nanoparticle treatment of hardened cement paste for reduction of permeability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (4): 554–560.
- Cembureau, Association Européenne du Ciment (The European Cement Association), Activity Report, Brussel, 2018.
- Chong, J. Z., Sutan, N. M. and Yakub, I. (2012). Characterization of early pozzolanic reaction of calcium hydroxide and calcium silicate hydrate for nanosilica modified cement paste. *UNIMAS EJ. Civil Engineering*, 12(4), 6-10.

Collins, F., & Sanjayan, J. G. (1998). Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na₂CO₃. *Cement and Concrete Research*, 28(5), 655-664.

Collins, F., & Sanjayan, J. G. (1999). Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and concrete research*, 29(3), 459-462.

Collins, F. G., & Sanjayan, J. G. (1999). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and concrete research*, 29(3), 455-458.).

Coşkun, İ. (2009). *Uçucu Kül ve Volkanik Cüruf Katkılı Betonların Bazı Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

Çelebi, G. ve Aydın, A.B., (2001). “Sürdürülebilir Mimarlık Yaklaşımında Yapı Malzemelerinin İrdelenmesi”, IV. Ulusal Ekoloji ve Çevre Kongresi, Bodrum, 457 – 464.

Dale, P.B., A. Ahmad, B. Tim, Z.J. Scott, L. Didier, A.P. Max, S. Taijiro, E.S. Paul, T. Jussara, W.J. Weiss, Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete, *Constr. Build. Mater.* 75 (2015) 1–10.

Dayı, M. (2006). *Doğal Ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Dallı, K. (2017). *Farklı Kalıp Yağlarının Yapay Puzolan Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonlardaki Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi.

Deb, P. S., Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design* (1980-2015), 62, 32-39.

Demirhan, S. (2012). *Kireçtaşı Tozunun Lif Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitlerin Reolojik Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi.

Demirhan, S. (2017). *Nano Malzemeler İle Modifiye Edilmiş Yüksek Performanslı Hibrid Lif Donatılı Betonlar*, Doktora Tezi.

Demirhan, S., Turk, K., & Ulugerger, K. (2019). Fresh and hardened properties of self consolidating Portland limestone cement mortars: Effect of high volume limestone powder replaced by cement. *Construction and Building Materials*, 196, 115-125.

Demirhan, S., Yıldırım, G., Banyhussan, Q. S., Koca, K., Anıl, Ö., Erdem, R. T., & Şahmaran, M. (2019). Impact behaviour of nanomodified deflection-hardening fibre-reinforced concretes. *Magazine of Concrete Research*, 1-23.

Dığış, A. (2015). *Mineral Katkı Olarak Kullanılan Öğütülmüş Doğal Zeolitin Harç Özelliklerine Etkisi*, Doktora Tezi.

Dışişleri Bakanlığı. (2018). Fası 15-Enerji.

Dündar, B. (2016). *The Effect Of Nanosilica On The Properties Of Pumice Incorporated Blended Cements*, Yüksek Lisans Tezi.

Dede, E. (2008). *Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Harçların Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Demirer, A. (2009). *Çimento Katkısı Olarak Kullanılan Farklı Doğal Puzolanların (Tras) Elektrokinetik ve Yüzey Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi,

Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

Dışişleri Bakanlığı. (2018). “Fası 15-Enerji.” *TC. Dışişleri Bakanlığı, Avrupa Birliği Başkanlığı*.

Diamanti, MV., Ormellese, M., Pedferri, M., 2008. Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. *Cement and Concrete Research*, 38 (11): 1349–1353.

Diğer, A. (2013). *Pomza, Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonların Durabilite Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.

Duman, R. (2010). *Silis Dumanının Betonun Performansına ve Klor Geçirimsizliğine Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Elkady, H., Serag, M. I., & Elfeky, M. S. (2013). Effect of nano silica de-agglomeration, and methods of adding super-plasticizer on the compressive strength, and workability of nano silica concrete. *Civil and Environmental Research*, 3(2), 21-34.

Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracıbaşı, S., Çimento Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim. Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 2013.

Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., “Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri”, 2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu Bidiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 263-275, 12-13 Nisan 2007.

Erdoğan, T. (2004) *Concrete materials with questions and answers: cements, aggregates, water*. Turkey Ready Mixed Concrete Association Publications. İstanbul, Turkey.

Erdoğan, T. Y. (2013, Mart). Beton. *İnce Taneli Durumdaki Doğal Puzolan Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi*, 184. Ankara: Odtü Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını.

Erdoğan, T. Y., *Material of Construction*. Ankara, METU Press Publishing Company, 2009.

- Erdoğan, T., Beton. ODTÜ Yayıncılık, 2007.
- Erdoğan, T., Materials of Construction. METU, 2007.
- Erdoğan, T.Y. (2003). *Portland Çimentoları ve Diğer Çimento Türleri*, Beton, 11-61, 634-639. Ankara: METU Press.
- Erdoğan, T.Y., (2013). *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.
- Erdoğan, T.Y., Admixture for Concrete, Middle East Technical University, Ankara, 1997.
- Erdoğan, E. (2006). *Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 48,97.
- Eren, D. (2018). *Puzolanların Puzolanik Aktivitelerinin Çimento Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi.
- Esen, S. (2013). *Silis Dumanı Katkılı Ağır Betonların Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Filipponi, L., Sutherland, D., *Nanotechnology: A Brief Introduction*. Interdisciplinary Nanoscience Center, 2007.
- Gaietero, J.J., Campillo, I., Guerrero, A., 2008. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cement and Concrete Research*, 38: 1112-1118.
- Gowda, R., Narendra, H., Rangappa, D., & Prabhakar, R. (2017). Effect of nano-alumina on workability, compressive strength and residual strength at elevated temperature of Cement Mortar. *Materials Today: Proceedings*, 4(11), 12152-12156.
- Griesser, A. (2002). *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures*, Doctoral Thesis, Swiss Federal Institute Of Technology, 16.
- Gündeşli, U. (2008). *Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Hardjito, D., Cheak, C. C., & Ing, C. H. L. (2008). Strength and setting times of low calcium fly ash-based geopolymer mortar. *Modern applied science*, 2(4), 3-11.
- Hatice, Ş. (2018). *Bayburt Taşı Olarak Bilinen Tüflerin Çimento Üretiminde Mineral Katkı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi.

He, X. and Shi, X. (2008). Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 207(1), 13-21.

Hou, P., Wang, K., Qian, J., Kawashima, S., Kong, D., Shah, S.P., 2012. Effects of colloidal nanoSiO₂ on fly ash hydration. *Cement and Concrete Research*, 34: 1095-1103.

Hui L., Xiao H.G. and Ou J.P., *A Study on Mechanical and Pressure-Sensitive Properties of Cement Mortar with Nanophase Materials*, *Cement and Concrete Research*, 2004, No.34(3), pp.435-438.

Hussain, S. T., & Sastry, G. K. (2014). Study of strength properties of concrete by using micro silica and nano silica. *International journal of research in Engineering and technology*, 3(10), 2321-7308.

Indumathi, P., Shabhudeen, S. P. and Saraswathy, C. P. (2011). Synthesis and characterization of nano silica from the Pods of Delonix Regia ash. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2(4), 421-426.

Ishak, S. A. & Hashim, H. Low carbon measures for cement plant - A review. *J. Clean. Prod.* 103, 260–274 (2015).

İlkentapar, S. (2017). *Yüksek Oranda Doğal Puzolan Katkılı Çimentoların Hidratasyon, Hamur İç Yapısı Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Nanotanecik İlavesinin Etkisi*, Doktora Tezi.

Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G. H. and Park, J. B. (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1351-1355.

Kandil, U. (2014). *Uçucu Kül ve Silis Dumanı İçeren Betonların Geçirimsizlik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Karakurt, C. (2008). *Çimento Üretiminde Doğal Zeolit ve Volkanik Tüflerin Endüstriyel Atıklarla Birlikte Kullanılmasının Beton Performansı Üzerine Etkileri*, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı, 6.

Kökmen, Z. (2018). *Influence Of Powder And Emulsion Polymer Addition On Strength And Capillary Properties Of Cement Mortars*, Yüksek Lisans Tezi.

Kawashima, S., Seo, J. W. T., Corr, D., Hersam, M. C. and Shah, S. P. (2014). Dispersion of CaCO₃ nanoparticles by sonication and surfactant treatment for application in fly ash–cement systems. *Materials and Structures*, 47(6), 1011-1023.

Kaya, H. (2010). *Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Betonda Su/Çimento Oranının Etkinlik Katsayısına ve Kırılma Parametrelerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kaya, T., Karakurt, C., Bayazit, Y., (2015). *Kalsine edilmiş bentonitin çimento harçlarında puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilirliği*, 2. Uluslararası Sürdürülebilir Yapı Sempozyumu, Ankara.

Kayır, Y. Z. and Baççıl E. G., *Nanoteknoloji Nedir?* 15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 2010.

Kılıç, Y. (2013). *Kalsine Kırmızı Çamurun Puzolanik Aktivite ve Betonun Renklendirme, Mineraloji ve Fiziksel Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kıvrak, S.O. (2012). *Çeltik Sapı ve Kavuzu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Beton Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Koçak, Y. (2008). *Çimento-Puzolan Etkileşiminde Moleküler ve Elektrokinetik Davranışların Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Korkmaz, S. (2010). *Bazı Yapay Puzolanların Harçların Basınç Dayanımlarına Ve Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kosmatka, S. H., and Wilson, M.L. (2011), *Design and Control of Concrete Mixtures* (15th edition).

Köleli, Y. ve Ülgür, S. Z. (2015). *TR63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu*. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı. (E. Z. Budak ve F. Gökşen Derleyiciler) Hatay, Kahramanmaraş, Osmaniye.

Kuleli, Ö., *Çimento Mühendisliği El Kitabı*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2009.

Küçükyıldırım, E. (2013). *Kimyasal ve Isıl İşlem Görmüş Klinoptilolit Zeolitinin Puzolanik Aktivitesinin ve Katkılı Çimentolardaki Performansının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

Kyoto Protokolü, 1. Taahhüt Dönemi, (2008-2012)

Kyoto Protokolü, 2. Taahhüt Dönemi, (2013-2020)

Lackhoff, M., et al., *Photocatalytic Activity of Semiconductor-Modified Cement-Influence of Semiconductor Type and Cement Ageing*. *Applied Catalysis B-Environmental*, 2003, No.43(3), pp.205-216.

Lackhoff, M., Prieto, X., Nestle, N., Dehn, F., Niessner, R., 2003. Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement-influence of semiconductor type and cement ageing. *Applied Catalysis B: Environmental*, 43 (3): 205–216.

Lee, B.Y., Kurtis, K.E., 2012. Proposed, acceleratory effect of tio2 nanoparticles on belite hydration: preliminary results. *Journal of the American Ceramic Society*, 95 (1): 365-368.

Li, H., Zhang, M. H. and Ou, J. P. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292-1301.

Liu, Z., Erhan, S. Z., 2005. Preparation, characterization and mechanical properties of epoxidized sybean oil/clay nanocomposites. *Polymer*, 46: 10119-10127.

Ltiffa, M., Guefrechb, A., Mounangab, P., Khelidj, A., *Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behavior of cement mortars*. Proc. Eng., No. 10, 2011, pp. 900-905.

Lyons, A. in *Materials for Architects and Builders* (Third Edition) 48–95 (2006).

Doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-075066940-5/50030-7>

Madani, H., Bagheri, A., Parhizkar, T., *The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement*. Cement and Concrete Research, No. 42, 2012, pp. 1563-1570.

Malhotra, V. M., Carrette, G. G. and Sivasundaram, V., “Role of Silica Fume in Concrete: A Review,” *Advances in Concrete Technology*, CANMET-Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 1992, pp.925- 991.

Massazza, F., *Puzzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları*, Seminer, TÇMB, Ankara, 1989, 41-79.

Mazlum F., *Pirinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul, 1989.

Mehta, K., *Advancements In Concrete Technology*. Sf:73, 1999.

Mehta, P. K., “Condensed Silica Fume,” *Cement Replacing Materials*, Vol.3, SurreyUniversity Press, 1986, pp.136, 137.

Mercan, N. (2007). *Uçucu Kül Katkısıyla Üretilen Harçların Dayanım Ve Dayanıklılığının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Mindess, S., Young, J.F., "Concrete", Prentice-Hall, New Jersey, 1981.

Mintus, F., Hamel, S. & Krumm, W. Wet process rotary cement kilns: Modeling and simulation. *Clean Technol. Environ. Policy* 8, 112–122 (2006).

Nas, M., (2015), "Zeolit ve Metakaolin İçeren Betonların Bazı Dayanım ve Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Nas, S. (2012.). *Portland Çimento ve Uçucu Kül İkameli Çimentoların Hidratasyon Gelişimleri ile Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. F. and Khademno, A. (2010). Influence of Al₂O₃ nanoparticles on the compressive strength and workability of blended concrete. *Journal of American Science*, 6(5), 6-9.

Norhasri, M. M., Hamidah, M. S. and Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 13(3), 91-97.

Neville, A. M. (2006). *Properties of Concrete*. 8-18,78. İngiltere: Pearson Education Limited.

Norhasri, M. M., Hamidah, M. S. and Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 13(3), 91-97.

Ozyildirim, C. and Zegetosky, C. (2010). Exploratory investigation of nanomaterials to improve strength and permeability of concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 214(2), 1-8.

Öncü, M.E., Karakaş, A.S., Kavak, M.T., (2006). *Katkı maddesi kullanılarak yüksek performanslı beton üretimi.*, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi, 2006/2

Phoenix, C., Treder M., *Safe Utilization of Advanced Nanotechnology*. Center for Responsible Nanotechnology, 2003.

Polat, R., Demirboğa, R., & Karagöl, F. (2019). Mechanical and physical behavior of cement paste and mortar incorporating nano-CaO. *Structural Concrete*, 20(1), 361-370.

Popovics, S., "Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing", Second Edition, Noyes Publications, USA, 1992.

Pour, G.T. and Moghadam, S.M.M., *Optimization on Nano Calcium Carbonate Production Process Using Taguchi Method*, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 2, No: 1, 2014.

Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*, 21(3), 539-545.

Raki L., Beaudoin J, Alizadeh R., Makar J, Sato T., *Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology*. Materials, 2010 (3), pp. 918-942.

Raki, L., Beaudoin, J., Alizadeh, R., Makar, J., Sato, T., 2010. Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. Materials (3) 918-942.

Ramachandran, V. S., *Concrete Admixtures Handbook*, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, U.S.A., 1995.

Rao, G. M., & Rao, T. G. (2015). Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(11), 3067-3074

Rashad, A. M. (2014). A comprehensive overview about the effect of nano-SiO₂ on some properties of traditional cementitious materials and alkali-activated fly ash. *Construction and Building Materials*, 5(2), 437-464.

Shaikh, F. U., & Supit, S. W. (2014). Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Construction and building materials*, 70, 309-321.

Shaikh, F., U., A., and Anwar, H., Effect of nano silica on compressive strength and microstructures of high volume blast furnace slag and high volume blast furnace slag-fly ash blended pastes, *Sustainable Materials and Technologies*, 17, 2019

Sakai, E., Miyahara, S., Ohsawa, S., Lee, S. H. & Daimon, M. Hydration of fly ash cement. *Cem. Concr. Res.* 35, 1135–1140 (2005).

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

Sanchez, F., Ince, C., 2009. Microstructure and macroscopic properties of hybrid carbon nanofiber/silica fume cement composites. *Composites Science and Technology*, 69 (7–8): 1310–1318.

Sanfilippo, J., Muñoz, J., Tejedor, M., Anderson, M. and Cramer, S. (2010). Nanotechnology to manipulate the aggregate-cement paste bond effects on mortar performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 214(2), 29-33.

Sato, T. and Beaudoin, J. J. (2011). Effect of nano-CaCO₃ on hydration of cement containing supplementary cementitious materials. *Advances in Cement Research*, 23(1), 33-43.

Sato, T.; Beaudoin, J.J., 2006. The Effect of nano-sized CaCO₃ addition on the hydration of OPC containing high volumes of ground granulated blast-furnace slag, pp. 355-366. *In Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete Through Science and Engineering*, 11–13 September 2006, Québec City, Canada.

Sato, T.; Beaudoin, J.J., 2007. The Effect of nano-sized CaCO₃ addition on the hydration of cement paste containing high volumes of fly ash pp. 1-12. *In Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement*, 8–13 July 2007, Montreal, Canada.

- T. Sato, F. Daillo, Seeding effect of nano-CaCO₃ on the hydration of tricalcium silicate, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2141 (2010) 61–67.
- Schneider, M. (2015). Process technology for efficient and sustainable cement production. *Cement and Concrete Research*. 28 (A): 14-23.
- Schwartz, M., 2006. *Emerging Engineering Materials: Design, Processes, Applications*. Technomic Publishing Co., USA ISBN No. 1-56676-314-2.
- Sharma, P., Tyagi, D. Effect of blended fly ash and superplasticizer on strength of cement. *New Build. Mater. Constr. World* 16, (2011).
- Shekari, A. H. and Razzaghi, M. S. (2011). Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete. *Procedia Engineering*, 1(4), 3036-3041.
- Shi, C. and Day, R., Comparison of Different Methods For Enhancing Reactivity of Pozzolans, *Cement and Concrete Research*, 31, 813- 818, 2001.
- Silvestre, J., Silvestre, N. and de Brito, J. (2016). Review on concrete nanotechnology.
- Siddique, R. (2008). *Waste materials and by-products in concrete*. *Waste Materials and By-Products in Concrete*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74294-4>
- Sobolev, K. (2006). *Nanomodification of cement*. NSF workshop on nanomodification of cementitious materials, Portland cement concrete and asphalt concrete. Florida:USA.
- Sobolev, K., Flores, I., Torres-Martinez, L. M., Valdez, P. L., Zarazua, E. and Cuellar, E. L. (2009). Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials. *Nanotechnology In Construction*, 3(1), 139-148.
- Sobolev, K. and Gutiérrez, M. F. (2005). How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14.
- Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., & Alnahhal, M. F. (2017). Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar—A review. *Construction and Building Materials*, 148, 62-84.
- Susman, H. (2018). *İlave Malzemeler 1. Mineral Katkılar (Puzolanlar) Sunumu*. <https://slideplayer.biz.tr/slide/15066422/>
- Sümer, B. (2012). *Silis Dumanı Katkılı Betonlarda Polipropilen Lif Kullanımının Beton Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Teizer, J., Venugopal, M., Teizer, W. and Felkl, J. (2011). Nanotechnology and its impact on construction: bridging the gap between researchers and industry professionals. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(5), 594-604.

Tekin, D. (2014). *Farklı İnceliklerdeki Mineral Katkılı Çimentoların Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tekin, İ. (2005,Ağustos). *Çimento Harçlarının Porozitesinin Bilgisayarlı Tomografi İle Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

The World Business Council for Sustainable Development Publication. İsviçre, Mayıs 2011. (WBCSD, 2011)

Thomas, S., Kalarikkal, N., Pious, C. V., Ahmad, Z., & Haponiuk, J. T. (2018). Behavior of Cement Composites with Micro and Nano Mineral Admixtures. In *Functionalized Engineering Materials and Their Applications* (pp. 23-32). Apple Academic Press.

Tobon, J.I., Paya, J.J., Borrachero, M.V., Restrepo, OJ., 2012. Mineralogical evolution of Portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength. *Construction and Building Materials*, 36: 736-742.

Tohumcu, İ. (2011). *Silis Dumanı Ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Farklı Kür Koşullarının Basınç Dayanımına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Tokyay ve Erdoğan, 'Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar', TÇMB/AR-GE, Ankara, 975-8136-03-08, 2003.

Tokyay, M., Erdoğan, K., Cüruflar ve Cürüflü Çimentolar. TÇMB, 2009.

Tokyay, M. (2016). *Cement and concrete mineral admixtures*. CRC Press.

Topgül, S. S. (2016). *Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

TS 25, "Doğal Puzolan (Tras) – Çimento ve Betonda Kullanılan – Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri", Türk Standartları Enstitüsü, Aralık 2008

TS EN 197-1 – Çimento – Bölüm 1. TSE, Mart 2002.

Tsuzuki, T., McCormick, P.G., 2004. Mechanochemical synthesis of nanoparticles. *Journal of Materials Science*, 39: 5143–5146.

Tuncer, E. (2014, Mart). *Gümüşhane Yöresi Volkanik Kayaçların Puzolanik Aktivitesinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 13-14,16-20,24.

Turgut, P., & Ogretmen, A. (2019). Optimum limestone powder amount in mortars with over silica fume. *Epitoanyag-Journal of Silicate Based & Composite Materials*, 71(2).

Turgut, P. (2018). Production of block by using fly ash, lime and glass powder. *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences-Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 413-418.

Ulugöl, H. (2015). *Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Çimentonun Mekanik Ve Durabilite Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi.

Ulus, H. (2006). *Erzincan ve Nevşehir Yöresi Pomzalarının Çimentolu Sistemlerde Kullanılabilirliği*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 21-22,41-42.

Ün, H., Yapı Malzemeleri Ders Notları, PAÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli, 2007.

Vitruvius, Pollio, Ten Books on Architecture, Translated by Ingrid D. Rowland, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1999.

Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*, 21(3), 539-545.

Wang, A., Zhang, C. & Sun, W. Fly ash effects: II. The active effect of fly ash. *Cem. Concr. Res.* 34, 2057–2060 (2004).

Wang, K. and Lomboy, G. R. (2014). Nanoparticle modified concrete materials: opportunities, challenges and prosperities. Proceedings of the First International Conference on Construction Materials and Structures. *Construction Materials and Structures*, 16(6), 28-52.

Yalçın, H. ve Gürü, M. (2006). *Çimento ve Beton*. 17-22,44,59,73,242. Ankara: Palme Yayıncılık.

Yalçınkaya, Ç., & Yazıcı, H. (2017). Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 144, 252-259.

Yang, H., Che, Y., & Leng, F. (2018). High volume fly ash mortar containing nano-calcium carbonate as a sustainable cementitious material: microstructure and strength development. *Scientific reports*, 8(1), 1-11.

Yeğınobalı, A. (2003). Çimentoda Yeni Standardlar ve Mineral Katkılar, *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 426, 10-20.

Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M. H., Şahmaran, M., Yıldırım, G. and Lachemi, M. (2015). Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 76(6), 170-179.

Yıldız, E. (2006, Mart). *Farklı Tipteki Puzolanların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 79.

Yılmaz, Y. (2014). *Beton Üretiminde Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Kullanılmasının Etkileri ve Maliyet Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Zhang, M. H., Islam, J. and Peethamparan, S. (2012). Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 650-662.

Zaitri R., M. Bederina, T. Bouziani, Z. Makhloufi, M. Hadjoudja, Development of high performances concrete based on the addition of grinded dune sand and limestone rock using the mixture design modelling approach, *Constr. Build. Mater.* 60 (2014) 8–16.

Zongjun, Li., (2011), *Gelişmiş beton teknolojisi*. ISBN: 978-0-470-43743-8

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mem ÇİFTÇİ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Batman/06.05.1995
Telefon : +90 541 847 3359
Faks : -
e-mail : ciftcimem@gmail.com

EĞİTİM

Derece		Bitirme Yılı
Lise	: Ziya Gökalp Anadolu Lisesi/Batman	2013
Üniversite	: Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü/Şanlıurfa	2017
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü/Batman	2020
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2019	Mac-Pet İnşaat	Petrol Sondaj Sahası Düzenleme/Saha Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Yapı malzemeleri/Çimento kompozitleri/Nano teknoloji

YABANCI DİLLER

İngilizce (B2)

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

-

YAYINLAR

-