



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİTİN NANOMETRİK
VE MİKRONİZE FARKLI TANE BOYUTUNA
SAHİP TANECİKLERLE
AKTİVASYONUNUN İNCELENMESİ**

Mustafa ENSARİOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**TEMMUZ-2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa ENSARİOĞLU tarafından hazırlanan “Genleştirilmiş Perlitin Nanometrik ve Mikronize Farklı Tane Boyutuna Sahip Taneciklerle Aktivasyonunun İncelenmesi ” adlı tez çalışması 29/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Nihat ATMACA

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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.

Mustafa ENSARİOĞLU

29.07.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİTİN NANOMETRİK VE MİKRONİZE FARKLI TANE BOYUTUNA SAHİP TANECİKLERLE AKTİVASYONUNUN İNCELENMESİ

Mustafa ENSARİOĞLU

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Serhat DEMİRHAN

2021, 91 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Doç. Dr. Nihat ATMACA

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

Dünyada yaklaşık olarak 6700 milyon ton olan perlit rezervinin üçte ikisi ülkemizde bulunmaktadır. Volkanik kökenli olan perlit ısıtma işlemi sonrası hacimce genişmekte ve geliştirilmiş perlit olarak isimlendirilmektedir. Yüksek oranlarda silika ve alüminyumdan oluşan (genleştirilmiş) perlit çimento yerine ikame edilebilecek puzolanik özelliğe sahip bir yapı malzemesidir. Puzolanik malzemelerin yüksek hacimlerde çimento yerine ikame edilmesinde erken dönem dayanım gelişimi problemleri oluşmaktadır. Genleştirilmiş perlitin erken dönem taze ve sertleşmiş özelliklerinin reaktiviteleri yüksek ve yüksek özgül yüzey alanı/hacim oranına sahip olan nano ve mikronize kalsit mineralleriyle incelenmesinin önemli olacağı düşünülmüştür. Ayrıca, çimentoya ikamesi ile ilgili çalışmaların yetersiz olduğundan ve Devlet Planlama Teşkilatının yayınları incelendiğinde perlit madeni ile ilgili çalışmaların yetersiz olduğu ve gerekli arge çalışmalarının yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Bu sebeple rezervi bol olan yerli kaynaklarımızın bilimsel araştırmalara daha fazla konu olması için perlit ve beraberinde nano teknolojiyle; çimentonun işlenebilirliği, kararlılığı ve basınç dayanımına olan etkileri üzerinde detaylı bir şekilde deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, %0, %6 ve %18 oranında geliştirilmiş perlit ve %5 oranında nano ve mikronize kalsit içeren dokuz farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Nano ve mikronize kalsit ile modifiye edilmiş ve farklı oranlarda geliştirilmiş perlit içeren harç numuneleri için (i) taze ve erken dönem özellikleri olarak mini çökme yayılma deneyi, kıvam, priz başlama ve sona erme süreleri ve hacim genişmesi (Le Chatelier Metodu) deneyleri/analizleri ve (ii) sertleşmiş özellik olarak ise 7, 28 ve 120 günlük kür yaşları için birim ağırlık, basınç dayanımı ve ultrases dalgası hızı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar perlitin harçların erken dönem ve sertleşmiş özelliklerini olumsuz etkilediğini ve nano/mikronize kalsit ikamesiyle genel olarak iyileşmeler elde edildiğini göstermiştir. Nano kalsit nispeten daha yüksek yüzey alanına sahip olduğu için mikronize kalsite kıyasen taze ve sertleşmiş özelliklere daha fazla katkı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Mineral Katkı, Genleştirilmiş Perlit, Nano Kalsit, Mikronize Kalsit

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATING ACTIVATION OF EXPANDED PERLITE WITH DIFFERENT GRAIN SIZE OF NANOMETRIC AND MICRONIZED PARTICLES

Mustafa ENSARİOĞLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF EDUCATION OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN CIVIL ENGINEERING**

Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

2021, 91 Pages

Jury

Dr. Öğr. Üyesi Serhat DEMİRHAN

Doç. Dr. Nihat ATMACA

Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY

Approximately two-thirds of perlite, which has approximately 6700 million tons of reserves in the world, is found in our country. Perlite, which is of volcanic origin, expands in volume after heat treatment and then it is called as Expanded Perlite. Expanded perlite, containing high proportions of silica and alumina, is a construction material with pozzolanic properties that can be replaced by cement. Due to the substitution of pozzolanic materials for cement in high volumes, early-age strength development problems occur. It was thought that it would be important to examine the early-age fresh and hardened properties of expanded perlite with nano and micronized calcites having high reactivity and high specific surface area/volume ratio. In addition, it was understood that the studies on the substitution of perlite for cement and the publications of the State Planning Organization were insufficient and thus the necessary R&D studies should be carried out. For this reason, a detailed experimental study has been carried out on the effects of perlite and nano technology on the fresh and hardened properties of cement mortars in order to make our domestic resources with high reserves more subject to scientific research. For this purpose, nine different mortar mixtures containing 0%, 6% and 18% expanded perlite and 5% nano and micronized calcite were prepared. For mortar samples containing expanded perlite at different rates and modified with nano and micronized calcite, tests/analyses for mini-slump flow, consistency, initial and final setting times, dimensional stability (Le Chatelier Method), unit weight, and also compressive strength and ultrasound wave velocity tests for the curing ages of 7, 28 and 120 days were carried out. Experimental results showed that perlite adversely affects the early and hardened properties of mortars and improvements were, in general, obtained with nano/micronized calcite substitution. Since nano calcite has a relatively higher surface area, more contribution is made to the fresh and hardened properties compared to micronized calcite.

Keywords: Mineral Admixture, Expanded Perlit, Nano Calcite, Micronized Calcite

TEŞEKKÜR

İnsanız geçmiŐimizi unutturuz, geleceği ise hiç bilmeyiz. Öncelikle yüksek lisans serüvenimizi hakkı ile sona erdiren Rabbime Őükürler olsun.

Akademik ahlakı ve adaletiyle bizlere örnek olan araŐtırmalarındaki çalıŐkanlıęı ve titizliğiyle öğrencilerine bilimi aŐılayan danışman hocam Sayın Dr. Serhat DEMİRHAN'a maddi ve manevi destekleri için teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez jürime katılan ve tez içeriğinin daha da gelişmesi hususunda desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Nihat ATMACA ve Dr. Öğr. Üyesi Hasan OKTAY'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalıŐmamda hem deneysel çalışmalarda hem de öncesinde emeği geçen Batman üniversitesindeki tüm hocalarıma, destekleriyle beni yalnız bırakmayan arkadaşım BarıŐ ÖZ'e, Fernas imento Öğütme Tesisine (FERÇİM), FERÇİM Laboratuvar Sorumlusu kimyager İzzettin PEKTAŐ'a ve Laborant Abdullatif BİÇİCİ'ye, Batman Üniversitesi Merkezi Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (BÜMER) teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her alanında olduğu gibi yüksek lisans çalıŐmamda da beni destekleyen aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	10
1.1. Amaç ve Kapsam	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	12
2.1. Puzolanlar	12
2.1.1. Doğal Puzolanlar.....	13
2.1.2. Yapay Puzolanlar	16
2.1.3. Puzolanik Reaksiyon.....	19
2.1.4. Puzolanik Aktivite	20
2.1.5. Puzolanların Betonun Taze ve Sertleşmiş Özelliklerine Etkisi	23
2.2. Perlit.....	25
2.2.1. Genleşmiş Perlit (GP)	26
2.2.2. Perlitin Tipik Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	28
2.2.3. Perlitin Kullanımı	29
2.2.4. Perlitin Yapısal Uygulamaları	30
2.2.5. Perlitin Betondaki Taze ve Sertleşmiş Özelliklerine Etkisi.....	31
2.2.6. Perlitin Puzolanik Reaktivitesi.....	32
2.3. Nano Malzemeler.....	33
2.3.1. Nano Malzemelerin Türleri	36
2.3.2. Nano Kalsit (NC)	40
2.3.3. Mikronize Kalsit (MC)	49
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	58
3.1. Materyal	58
3.1.1. Çimento.....	58
3.1.2. Genleştirilmiş Perlit	59
3.1.3. CEN Standart Referans Kumu	60
3.1.4. Kimyasal Katkılar	61
3.1.5. Nano Kalsit	61
3.1.6. Mikronize Kalsit	62
3.1.7. Karışım Suyu	64
3.2. Deneysel Çalışma	64
3.2.1. Karışımların Hazırlanması	65
3.2.2. Laboratuvar Deneyleri	67

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	72
4.1. Taze Özellikler.....	72
4.1.1. Kıvam, Priz Süresi ve Genleşme Tayini (Le Chatelier Metodu).....	72
4.1.2. Akışkanlaştırıcı Miktarı ve Mini Çökme Yayılma Çapı.....	75
4.2. Sertleşmiş Özellikler.....	76
4.2.1. Numune Birim Ağırlıkları	76
4.2.2. Basınç Dayanımı.....	77
4.2.3. Ultra Ses Dalgası Hızı (UPV).....	80
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
5.1 Sonuçlar	82
5.2 Öneriler	83
KAYNAKLAR	84



SİMGELER VE KISALTMALAR

BPC: Beyaz Portland Çimentosu

NA: Nano Alümin

NS: Nano Silis

UK: Uçucu Kül

UPV: Ultrasonik geçiş hızı deneyi

C-S-H: Kalsiyum Silika Hidrat

PÇ: Portland Çimentosu

PER: Perlit

GP: Genleşmiş Perlit

MC: Mikronize Kalsit

NC: Nano Kalsit

YFC: Yüksek fırın cürufu

GYFC: Granüle yüksek fırın cürufu

SA: Süper akışkanlaştırıcı

ASTM: Amerikan Malzeme Standartları Birliği

CH: Sönmüş Kireç

XRD: X ışını kırınımı

SEM: Taramalı elektron mikroskobu

DPT: Devlet Planlama Teşkilatı

MTA: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

1. GİRİŞ

Dünyada en çok tüketilen yapı malzemelerinin başını çimento çekmektedir. Çimento doğal kaynakların yüksek oranda enerji sarfiyatı neticesinde elde edilmekte olup, her bir ton klinker üretimi için yaklaşık olarak 1 m³ karbondioksit gazı doğaya salınmaktadır. Ekolojik faydalarına ilave olarak hem doğal kaynakların muhafaza edilmesi hem de enerji tüketiminin azaltılması için çimento yerine puzolanik özelliğe sahip olan mineral katkıları ikame edilmektedir. İkame edilen mineraller en düstriyel yan ürün olabildiği gibi doğal puzolan da olabilmektedir.

Perlit, dünyada 6700 milyon ton rezerve sahip olup, bu rezervin yaklaşık %66'sı ülkemizde bulunmaktadır. Çimentonun daha ekolojik ve daha ekonomik bir hale dönüştürülmesi için bu tür puzolanik malzemelerin yüksek rezerve sahip olması ve özellikle perlitin kimyasal yapı olarak puzolanik reaktiviteyi sürdüren yüksek oranda silis ve alümin içermesi, perletin çimento yerine ikame edilmesi durumunu daha da teşvik etmektedir.

Genleştirilmiş perlit, perlitin ısı işlem görmesiyle elde edilmektedir. Yüksek poroziteye sahip olup, yüksek hacimde çimento yerine ikame edildiğinde taze ve sertleşmiş özelliklerde ciddi problemleri doğurmaktadır. Özellikle yüksek hacimli ikame oranlarında hem taze özellikler hem de sertleşmiş özellikler olumsuz şekilde etkilenmektedir. Başta sertleşmiş özellikler olmak üzere genleştirilmiş perlit ikamesi nedeniyle oluşan bu problemlerin iyileştirilmesi ve/veya tamamen giderilmesi büyük önem arz etmektedir.

Kalsit minerali kireçtaşı formasyonları içerisinde en reaktif ve bağlayıcı malzemenin alüminat fazıyla yüksek sinerjiye sahip bir yapı malzemesidir. Ülkemizde birkaç firma tarafından nano ve/veya mikronize boyutta kalsit mineralleri üretimleri bulunmakta olup, yüksek özgül yüzey alanı/hacim oranı nedeniyle artan reaktif özelliklerinden dolayı yüksek hacimde puzolanik malzeme içeren çimentolarda meydana gelen ve yukarıda belirtilen problemlerinin giderilmesi/iyileştirilmesi için büyük bir imkân sağlamaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Mevcut yüksek lisans tezinin amacı; genleştirilmiş perlit mineralinin farklı oranlarda çimento yerine ikame edilerek nano ve mikronize boyutlu kalsit mineraliyle

aktivasyon özelliklerinin incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda dokuz farklı karışım TS EN 197-1'e göre hazırlanmıştır. Karışımlarda, geliştirilmiş perlit ikame oranları %0, %6 ve %18 oranlarında tercih edilirken nano ve mikronize kalsit ikame oranı ise minör ilave bilşen oranında olacak şekilde %5 olarak tercih edilmiştir.

Nano ve mikronize kalsit ile modifiye edilmiş ve farklı oranlarda geliştirilmiş perlit içeren harç numunelerinin hem taze hem de sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Taze özellik olarak (i) priz süresi ve (ii) mini-çökme yayılma çapı belirlenmiş ve sertleşmiş özellik olarak ise (i) bir günlük kür yaşı için birim ağırlık, 7, 28 ve 120 günlük kür yaşları için ise (ii) basınç dayanımı ve (iii) ultrasonik ses dalgası hızı değerleri belirlenmiştir.

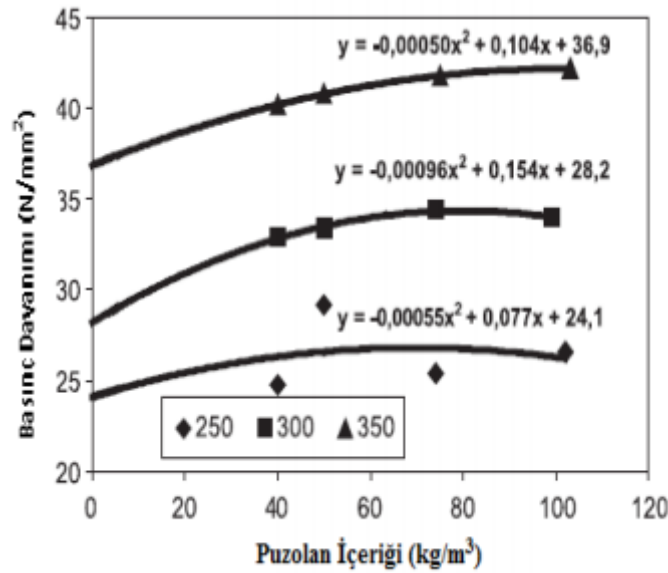


2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Puzolanlar

Puzolan ASTM C 618'e göre kendi içinde çok az çimentolu değere sahip olan (yani bağlayıcılık özelliği az) veya hiç olmayan silisli ve alüminli malzemelerdir. İnce taneli yapıya getirildiğinde ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştiğinde bağlayıcı özellik kazanır veya bağlayıcılık özelliğini iyileştirir.

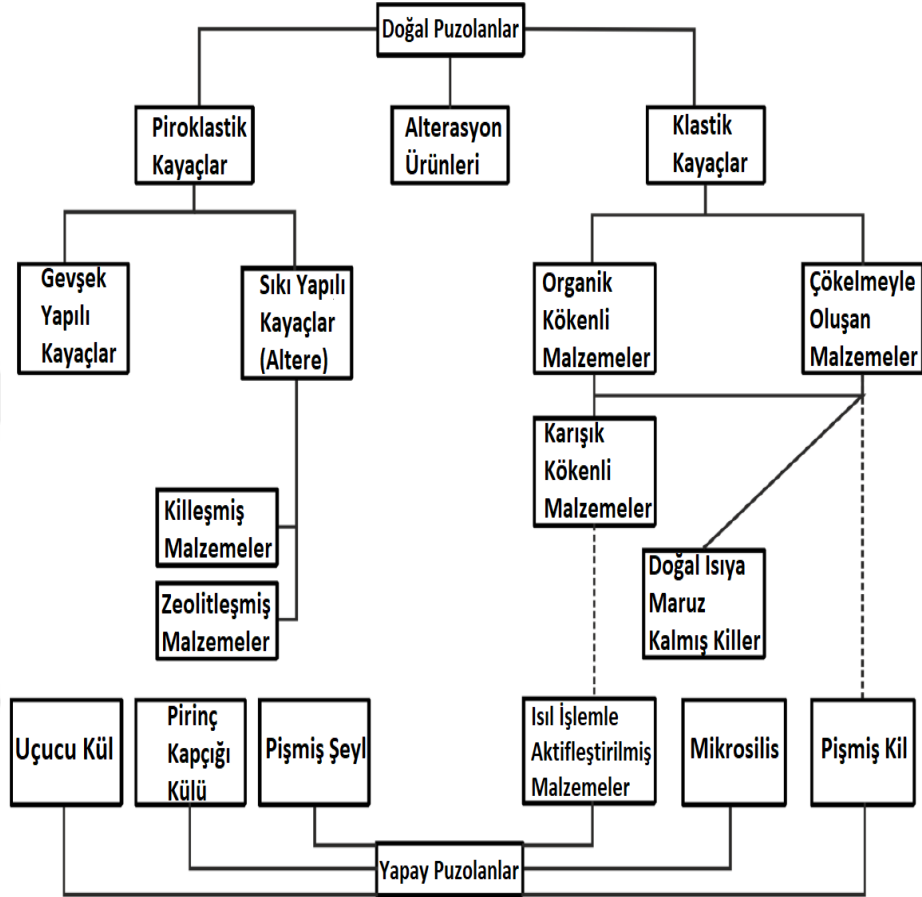
İnce daneli bir şekilde öğütülen puzolanlar çimentolarda 3 ayrı şekilde kullanılabilirler: Çimento hamurundaki boşlukları doldurarak dayanıklılığı iyileştirmede, Kalsiyum hidroksitle beraber karıştırılıp katkı çimento üretiminde ve doğrudan harç karışımına ilave edilerek bağlayıcı olarak kullanılabilirler (Dayı, 2006).



Şekil 2.1. Betondaki puzolan içeriği ve beton dayanımı arasındaki ilişki (Pekmezci ve Akyüz, 2004)

Şekil 2.1. deki çalışma incelendiğinde ortaya çıkan sonuçlarda puzolan miktarı ne az nede fazla olmalıdır, az olduğunda da fazla olduğunda da istediğimiz dayanımı yakalayamadığımızı görmekteyiz. Buradan optimum orandaki puzolan miktarını bulup kullandığımız zaman basınç dayanımında istediğimiz iyileştirmeyi elde edebilme sonucuna varabiliriz.

Puzolanik malzemeler için detaylı sınıflandırmayı Şekil 2.2’de görüldüğü gibi 1993 yılında Massazza tarafından puzolanları daha iyi anlamak için malzemelerin kaynağına göre sınıflandırma şeması hazırlanmıştır.



Şekil 2.2. Puzolanların Sınıflandırılması (Massazza, 1993)

Puzolanlar, doğal olarak meydana gelen malzemeler (Volkanik kökenli malzemeler ile diyatomlu topraklar) ve yapay malzemeleri (silis dumanaı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü vb.) kapsar (Gani ve diğerleri, 1997). Puzolanların kapsadığı doğal puzolanlar 2.1.1. Bölümünde ve yapay puzolanlar 2.1.2 bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1.1. Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar TS EN 197-1'e göre genellikle uygun kimyasal ve mineralojik bileşimli ve "Puzolanların esasen büyük bir oranla reaktif silisyum dioksitten (SiO_2) ve

alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluştuğunu. Geriye kalan kısmı ise demir oksit(Fe_2O_3) gibi diğer oksitleri barındırır. Standartta belirtildiği gibi sertleşme için reaktif kalsiyum oksit oranını ihmal edebiliriz. Puzolanda bulunan reaktif Silisyum dioksit(SiO_2) miktarı ağırlıkça %25'ten az olmamalıdır'' maddesine uygun volkanik maddeler veya tortul kayalardır.

Doğal puzolanların çoğu piroklastik (volkanik) kökenlidir. Opalin tortulları, şeyller, bazı killer, tuf ve volkanik küller örnek olarak verilebilir. Doğal olarak oluşabilen veya bir işleme işleminin bir parçası olarak yapılması gereken kalsinasyon sırasında kil mineralleri, sıradan sıcaklıklarda kireçle isteyerek reaksiyona giren amorf veya düzensiz bir alüminosilikat yapısı oluşturmak için ayrışır. Doğal puzolanlar, çimentolarda kullanılmak üzere genellikle çimento inceliği seviyelerine kadar öğütme gerektirir (Ramachandran ve diğerleri, 2001).

Doğal puzolanların aktivitesi ve kimyasal yapısının farklı bölgelerde değişim göstermektedir. Genelde doğal puzolanların yoğunluğu $2-2.35 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişebilmektedir (Akgül, 2006).

Doğal puzolanlar, özelliklerine bağlı olarak volkanik orjinli doğal puzolanlar ve doğal kalsine edilmiş puzolanlar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Volkanik puzolanlar, volkanik patlamaların lav ve küllerinden oluşur (Snellings ve diğerleri, 2012).

Volkanik Orjinli Doğal Puzolanlar

Ergimiş olan mağmanın alüminli silikadan oluşan lavların patlayıp şiddetli bir şekilde püskürmesiyle meydana gelen ve yüksek puzolanik aktiviteye sahip olan kayalardır. Volkanik cam ve volkanik tuf, tras gibi çeşitleri vardır (Ünal, 2007). Perlit, pomza ve vitrik kül gibi doğada bulunan işlem görmemiş malzemeler volkanik doğal puzolanlara örnek olarak gösterilebilir (Snellings ve diğerleri, 2012).

Akgülün 2006 yılında yaptığı bir çalışmada volkanik orjinli doğal puzolanlardan pomza, volkanik cam ve tufün fiziksel görüntüleri Resim 2.1'deki gibidir.



Pomza

Volkanik Cam

Tüf

Resim 2.1. Volkanik orijinli doğal puzolanlar; pomza, volkanik cam ve tüf (Akgül,2006)

Volkanik camlardan olan perlitin yapısı, betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisi ve perlitin puzolanik reaktivitesi Bölüm 2.2 de daha detaylı bir şekilde inceleyeceğiz.

Doğal Kalsine Edilmiş Puzolanlar

Doğal kalsine edilmiş puzolanlar TS EN 197-1'e göre "Puzolanların esasen büyük bir oranla reaktif silisyum dioksitten (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluştuğunu. Geriye kalan kısmı ise demir oksit(Fe_2O_3) gibi diğer oksitleri barındırır. Standartta belirtildiği gibi sertleşme için reaktif kalsiyum oksit oranını ihmal edebiliriz. Puzolanda bulunan reaktif Silisyum dioksit(SiO_2) miktarı ağırlıkça %25'ten az olmamalıdır" maddesine uygun, ısı ile işleme aktifleştirilmiş volkanik orijinli malzemeler, killer, şistler ve tortul kayalardır.

Kil mineralleri kristal yapıya sahip olduğundan ham durumda puzolanik özelliğe sahip değildirler. Kil ve şeyl 700-900°C de ısı ile işlemden geçirildikten sonra kil ve şeyl standartlara uygun puzolanik özellik kazanırlar. Isıl işlem kilin ve şeylin kristal yapısını bozar ve hemen hemen amorf alüminli silis yapısına getirir.

Diatomitler, pişirilmiş kil, pişirilmiş şeyl ve zeolitler ısı ile işlem görmüş doğal puzolanlara örnek olarak gösterilebilir (Snellings ve diğerleri, 2012).

2.1.2. Yapay Puzolanlar

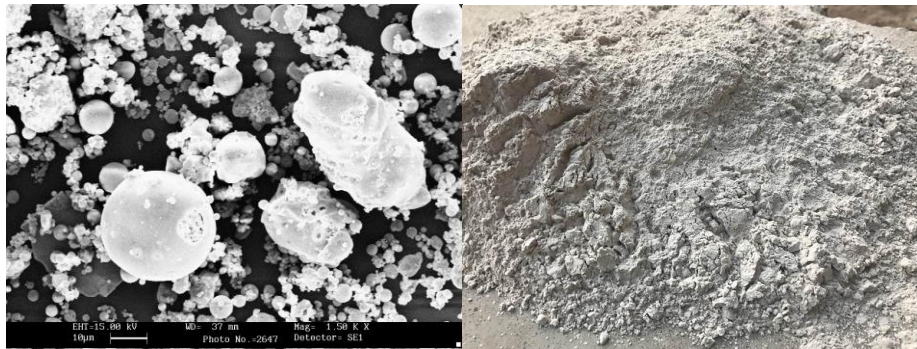
Türkiye, çimento sektöründe yaygın olarak kullanılan büyük doğal puzolan yataklarına sahiptir ve yan ürün olarak yapay puzolan üreten birçok endüstriyel tesise sahiptir.

Yapay puzolanlar ikinci tip, endüstriyel yan ürünler olarak elde edilen puzolanlardır. Yapay puzolanların en yaygın örnekleri: Uçucu küller (enerji santrallerinde kömür yakan kömürden yapılan ince katı parçacıklar), silis dumanı (Silikon metal veya Silikon alaşımlarının imalatında elde edilen ince yan ürünler) ve granüle edilmiş kumlama cürufıdır (Erdoğan, 1997).

Uçucu Küller

TS EN 197-1' e göre uçucu külün elde edilme yöntemi; pülverize kömür yakılan fırınlardan atılan baca gazındaki toz taneciklerinin elektrostatik veya mekanik olarak çöktürülmesiyle oluşur. Uçucu küllerin silissi olan çeşitlerinde puzolanik özellikler mevcuttur, kalkersi olan çeşitlerinde ise hem puzolanik özelliği hemde hidrolik özellikleri mevcut olabilir.

Resim 2.2'de uçucu küllerin fiziksel görünümü ve taramalı elektron mikriskoğundaki(SEM) görüntüsünü görmekteyiz.



(b)

(a)

Resim 2.2. Uçucu külün a) Fiziksel görüntüsü ve b) SEM görüntüsü (Demirhan, 2017)

Uçucu küller 1937 yılından günümüze kadar her türlü beton üretiminde ilgili standartlara uygun bir şekilde kullanılmış olup kütle betonlarında diğer tür betonlara

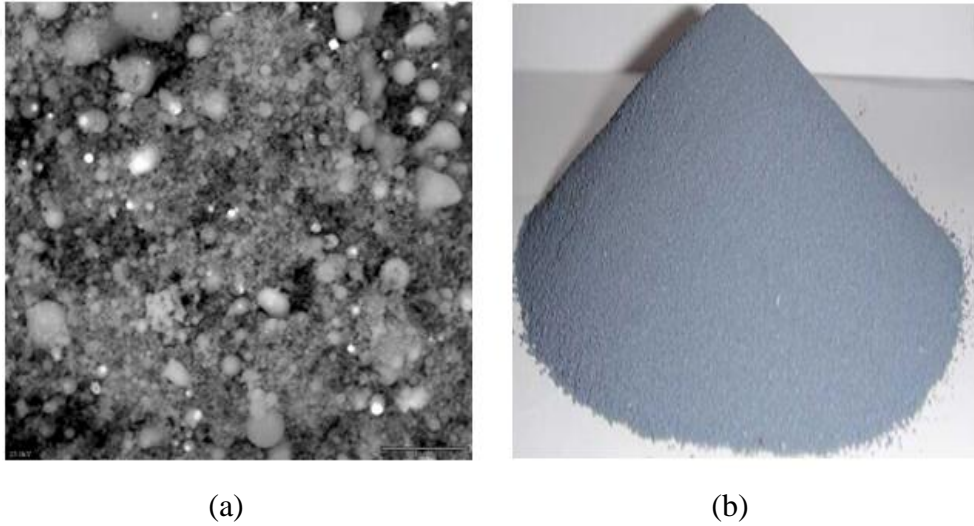
göre daha çok tercih edilmektedir. Kütle betonlarda daha çok tercih edilmesinin sebebi ise betondaki hidratasyon ısısını düşürmesidir. (Sakai, 2005).

Silis Dumanı

TS EN 197-1' e göre silis dumanı, silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi esnasında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle beraber elektrik ark fırınlarında indirgenmesinden oluşur ve ağırlık oranının en az %85'i kadar amorf(düzensiz kristal yapısı) silisyum dioksit içeren çok ince küresel taneciklerdir.

Saf haldeki kuvars malzemesinin kömür ile odun parçacıklarıyla yaklaşık olarak 2000°C sıcaklığa indirgenme tepkimesi oluşturması ile ortaya çıkan silisyum gazının hava ile teması neticesinde seri bir şekilde yoğunlaşmasıyla amorf yapıda ve içeriğinde yüksek miktarda silika bulunduran çok ince taneli toz halinde Silisyum dioksit (SiO_2) oluşur. Oluşturulan bu materyale silis dumanı denir (Malhotra ve diğerleri, 1992).

Susmanın 2018'de yayınladığı sunumda silis dumanının SEM görüntüsü ve Fiziksel görüntüsü Resim 2.3'te görülmektedir.



Resim 2.3. Silis Dumanının a) SEM görüntüsü ve b) Fiziksel görüntüsü (Susman, 2018)

Yüksek Fırın Cürufu

Demir üretme tesislerinde atık malzeme olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufu (YFC) döner fırınlarda demirden daha hafif olmasından ham demirin üzerinde oluşur.

Yakıt olarak kok kömürü ile demir filiz gangi kullanılır akabinde arıtma işlemi için ocağa kireç taşının eklenmesiyle oluşan atıklar yüksek fırın cürufunu meydana getirir (Tokyay ve Erdoğan, 2003).

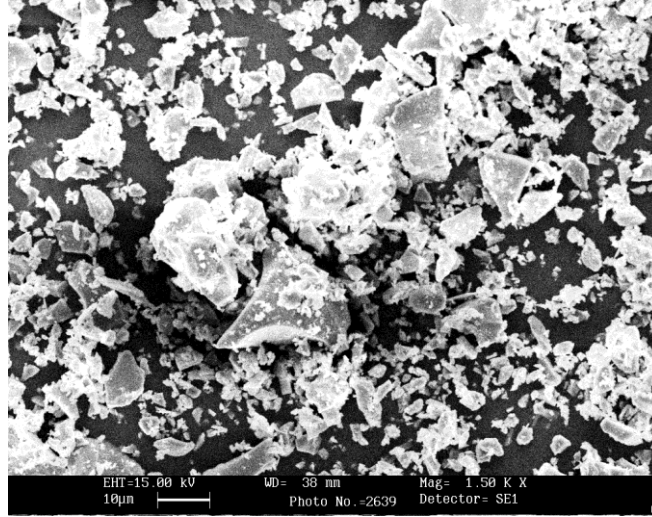
YFC'nin içeriğinde kömürün yanmasıyla gelen karbon ve demir cevherinde bulunan oksijen tepkimeye girip karbon monoksit gazını açığa çıkarır ve dipte eriyik haldeki demir, onun üzerinde ise SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , S , MnO bulunur (Siddique, 2008).

Cüruflar, demir cevherinin ergitilmesi işleminin ardından yaklaşık olarak 1500 °C sıcaklıkta bulunurlar. Yavaş bir şekilde soğutma uygulanırsa kristal yapıda kalsiyum silikat içeren cüruflar meydana gelir. Normal hava koşullarında soğumaya bırakılınca havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu elde edilir. Resim 2.4'te görüldüğü gibi bazalt taşına benzer özellikler göstermesi sebebiyle agrega olarak dolgu malzemesi olarak kullanılabilir ve yol kaplamalarında, kagir yapılarda, yalıtım malzemelerinde de kullanılabilir (Ulugöl, 2015).



Resim 2.4. Agrega olarak kullanılan havada soğutulmuş cürufun görüntüsü (Ulugöl ve diğerleri, 2015)

Yüksek sıcaklıktaki cüruf: soğuk ortama aniden bırakılması veya suya daldırılması, yüksek basınçlı su püskürtülmesi ve hava granülasyonu yöntemleriyle ani bir şekilde soğutulmaya maruz bırakılınca akışkanlığında hızlı bir azalma olur ve yavaş soğuma sırasında gerçekleşen kristal yapı oluşmaz, amorf yani camsı bir yapıya sahip hidrolik bağlayıcılık özelliği bulunan ve Resim 2.5'te SEM görüntüsü verilen "granüle yüksek fırın cürufu" elde edilir.

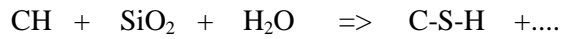


Resim 2.5. GYFC'nin SEM görüntüsü (Demirhan, 2017)

2.1.3. Puzolanik Reaksiyon

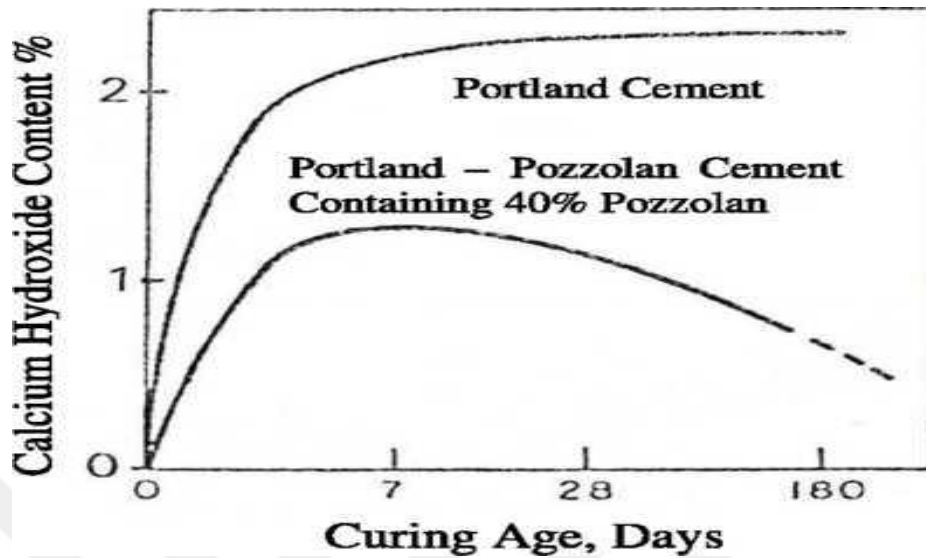
ACI komisyonun 1994 yılının haziran ayındaki ‘‘Doğal Puzolanların Betonda Kullanımı’’ yayınına göre nemli koşullar altında ince tanelere ayrılmış puzolanların sönmüş kireç (CH) ile kimyasal reaksiyonlarına puzolanik reaksiyon denir.

Puzolanların kompozisyonu oranlarının yüksek olması sebebiyle silis ve alüminen oluşur diyebiliriz. Öğütülerek ince taneli hale getirilen puzolanlar söndürülmüş kireç ve su ile karıştırıldığında puzolan-kireç-su arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Kalsiyum hidroksit(CH), silis ve su arasındaki reaksiyonlar, portland çimentosunun hidrasyonuna benzer bir şekilde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren kalsiyum-silika-hidrat(C - S - H) jellerinin oluşmasını sağlamaktadır. İnce öğütülmüş olan puzolanın silikasıyla kalsiyum hidroksitin nemli ortamdaki kimyasal reaksiyonu aşağıdaki gibi gösterilebilir (Erdoğan, 2003):



ACI komisyonun 1994 yılının haziran ayındaki ‘‘Doğal Puzolanların Betonda Kullanımı’’ yayınına göre bu reaksiyon Şekil 2.3'te görüldüğü gibi hem serbest sönmüş

kirecin (CH) miktarında bir azalmaya hem de C-S-H jellerinin büyük boşlukları kapatarak makro boşluktan mikro boşluğa dönüştüreceği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.3. Zamana göre sönmüş kireç(CH) Oranı (ACI komisyonu “Doğal Pozzolanların Betonda Kullanımı” yayını Haziran 1994)

2.1.4. Puzolanik Aktivite

Puzolan ikame edilmiş çimento içerisinde hidratlanmış sönmüş kireç ile puzolan içeriğindeki alümina silikatlar arasındaki çimentoda gerçekleşen bağlayıcılık ve dayanımı artıran hidrasyon ürününün oluşturduğu reaksiyonların kapasitesini ve hızını ifade eden özelliğe puzolanik aktivite denir. Puzolanik aktivite reaksiyon sonucundaki ortaya çıkan ürünlerin kazandırdığı bağlayıcılık özelliğinin ve sulu ortamda sönmüş kireç(CH) ile tepkimeye girme, sertleşme kapasitesi olarak ifade edilebilir (Massazza, 1989).

Puzolanik aktiviteyi belirlemek için bazı etkenler; Atom yapısı, Kimyasal Bileşim, Kalsinasyon ve Aktivasyon’dur (Shi ve diğerleri, 2001).

Puzolanların aktivitesi puzolanların heterojen yapısı ve hidrasyonun karmaşık yapısı nedeniyle iyi anlaşılammıştır (Erdoğan, 1996); bununla birlikte, aktivitesini etkileyen önemli faktörler şu şekilde sıralanabilir (Erdoğan, 2002):

- Bir puzolanın aktivitesi, “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” içeriği veya reaktif madde miktarı ile doğru orantılıdır.

- Kimyasal olarak, reaktif olabilmesi için puzolanik materyalin amorf bir yapıya sahip olması gerekir.
- Puzolanik partiküller sönmüş kireç(CH) ile reaksiyona girecek kadar ince olmalıdır.

Bir puzolanın aktivitesi esas olarak kısa vadede yüzey alanına ve uzun vadede kimyasal ve mineralojik bileşimine bağlıdır. Kimyasal, fiziksel ve mekanik testler olarak gruplandırılabilen puzolanik aktivitenin belirlenmesi için önerilen birkaç test yöntemi vardır, ancak bu testlerin hiçbiri tamamen tatmin edici kabul edilmez (Erdoğan, 1996).

ASTM C311'e göre doğal bir puzolan veya uçucu külün puzolanik aktivitesi, %20 puzolan ve %80 PÇ karışımı ile hazırlanan test numunelerinin harç küpü basınç dayanımının %100 PÇ tarafından hazırlanan numuneleri kontrol etme oranı olan mukavemet aktivite endeksini bularak belirlenir. Harç küpleri üzerindeki testler 7 günlük, 28 günlük ve her iki süreçte yapılabilir. Mukavemet aktivite endeksi şu şekilde hesaplanır (Erdoğan, 1997):

$$\text{Kuvvet aktivite endeksi (SAI)} = (A / B) \times 100$$

burada:

A: Test karışımı küplerinin ortalama basınç dayanımı ve

B: Kontrol karışımı küplerinin ortalama basınç dayanımını verir.

TS 25 standartlarına göre SAI en az 70 ve ASTM C 618'e göre, SAI en az 75 olmalıdır. Bu mekanik testin ana farkı, test numunelerinin düşük erken mukavemet kazanım oranlarıdır, ancak bu yöntem son kullanıcılar açısından en anlamlı yöntemdir. Puzolanlarla ilgili standart testler aşağıda listelenmiştir:

- TS EN 450-1: Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri
- TS 25: Doğal Puzolan (Tras) – Çimento ve Betonda Kullanılan – Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri
- ASTM C 618: Kömür Uçucu Kül ve Betonda Mineral Katkı Maddesi Olarak Kullanılan Ham veya Kalsine Doğal Puzolan için Standart Şartname

- ASTM C 311: Portland Çimento Betonunda Mineral Katkı Olarak Kullanılmak üzere Uçucu Kül veya Doğal Puzolanların Örneklenmesi ve Test Edilmesi için Standart Test Yöntemleri
- ASTM C 593: Kireç ile Kullanım İçin Uçucu Kül ve Diğer Puzolanlar için Standart Şartname

Puzolanların yüksek aktiviteye sahip olduğu yüksek SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve alkali miktarı, yüksek camsı faz miktarı, büyük özgül yüzey gibi özellikleri ile deneysel çalışmalar neticesinde belirlenmiştir:

Malzemenin puzolanlığının ispatı için puzolanik aktivite deneylerinin standartlardaki oranları vermesi gerekmektedir. Bahsi geçen standart deneyler hem doğal hem de yapay puzolanlarda mekanik ve kimyasal deneylerdir. Mekanik deneyler hazırlanan harçların üzerinde uygulanan eğilme ve basınç dayanımı deneyleridir.

Puzolanlardaki kimyasal deneyler ise çimento karışımlarındaki puzolanların su ile yaptığı hidrasyon sonunda çözültide oluşan Kalsiyum Hidroksit (Ca(OH)_2)'i bulmaya dayanır. Ayrıca puzolanların reaktivitesini spektrofotometrik ve kalorimetrik yöntemleri ile de bulabiliriz. Puzolanik maddeleri değerlendirmenin birçok yolu vardır bunlardan biri de puzolan içeren çimento hamurundaki özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle de gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) – emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir (Mazsazza, 1989).

Tablo 2.1. TS 25 standartına göre trasta bulunması gerekli olan özellikler (Mazsazza, 1989).

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az %70
MgO	En çok %5
SO_3	En çok %3
Rutubet	En çok %10

2.1.5. Puzolanların Betonun Taze ve Sertleşmiş Özelliklerine Etkisi

Puzolanlar beton içinde çimento ağırlığının bir kısmı ile farklı oranlarda kullanılırlar. Çimento ağırlığının %15 ile %40'na kadar bu oran önerilmektedir (Prince, 1975; Şimşek, 2004).

Puzolanlar optimum (en verimli) ölçülerde beton içeriğinde kullanıldıklarında aşağıdaki sonuçları vermeleri beklenir;


- İşlenebilirliği iyileştirmeleri
- Sülfat saldırısına karşı direnci arttırmaları
- Hidratasyon ısısını düşürmeleri
- Alkali – agrega reaksiyonunun zararlı etkisini azaltmaları
- Isıl büzülme azaltmaları ve
- Maliyeti düşürmeleri beklenir.

Puzolanların çimento içerisindeki oranı fazla kullanıldığında zararlı etkileri doğurabilir bunlardan bazıları;











- Su ihtiyacını artırabilir (işlenebilirliği azaltması)
- Donma ve çözülme karşı direnci düşürebilirler
- Sertleşme ve dayanım kazanma hızını azaltabilirler ve
- Kuruma büzülmesini artırabilirler (Prince, 1975; Şimşek, 2004).

Bazı puzolanların taze beton özellikleri ve sertleşmiş haldeki betonun özellikleri üzerine etkilerini Tablo 2.2 ve 2.3 te görmekteyiz.

Tablo 2.2. Puzolanların taze betondaki özelliklere etkileri (Ünal, 2007).

	 Azalır	 Hiç/Az Etki	Uçucu kül	Curuf	Silika Dumanı	Doğal Puzolan
	 Artar	 Değişir				
Su ihtiyacı						
İşlenebilirlik						
Terleme, Ayrışma						
Hava miktarı						
Hidratasyon Isısı						
Priz süresi						
Masterlanma						
Pompalanabilirlik						
Plastik büzülme çatlakları						

Tablo 2.3. Puzolanların sertleşmiş betondaki özelliklere etkileri (Ünal, 2007).

	 Azalır	 Hiç/Az Etki	Uçucu kül	Curuf	Silika Dumanı	Doğal Puzolan
	 Artar	 Değişir				
Dayanım kazanma hızı						
Sürtünme dayanımı						
Donma-çözülme buz çözücü tuzlara karşı dayanım						
Kuruma büzülmesi, sinme						
Geçirimlilik						
Alkali Silika Reaksiyonu						
Kimyasal dayanıklılık						
Karbonatlaşma						
Beton rengi						

2.2. Perlit

Perlit puzolanlar bölümünde detayları verilen volkanik orjinli doğal puzolanlardandır. Yurdumuz perlit rezervi bakımından zengin olup hemen hemen her bölgemizde perlit bulunmaktadır. Perlit Resim 2.6'daki görselinde olup Devlet planlama teşkilatının sekizinci kalkınma planından alınan bilgilere göre asidik yapıdaki camsı bir volkanik kayadır. Perlitin adı inci anlamına gelen perle kelimesinden türetilmiştir, çünkü bazı kaya türleri genellikle inci parlaklığına sahip küçük yuvarlak kütlelere ayrılır.



Resim 2.6. Perlit görseli (Perlite.net)

Perlit yarı kararlıdır ve volkanik patlamalar sonucu oluşup oluşumu genellikle 50 milyon yıldan daha gençtir ve Tersiyer veya Kuaterner Çağında meydana gelmişlerdir (Gunning ve diğerleri, 1994). Resim 2.7'de görüldüğü gibi perlit yüzeyde oluşmaktadır bundan dolayı kolay bir şekilde çıkarılmaktadır.



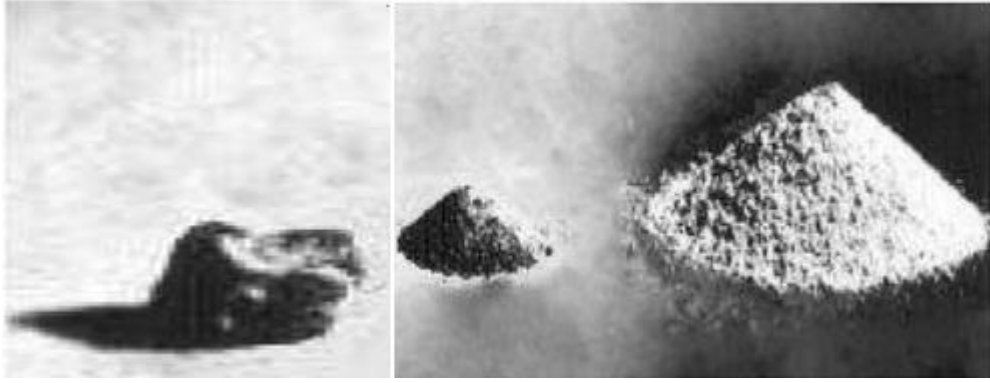
Resim 2.7. Perlit Madeni (www.perlite.net)

2.2.1. Genleşmiş Perlit (GP)

Perlitin nispeten yüksek yüzde iki ile altı su içeriği onu obsidiyen hidratlı volkanik kül ve süngertaşı gibi diğer sulu volkanik camlardan ayırır. Perlit cam yapısı içinde kimyasal bağ ile tutulan bu su, son derece düşük kütle yoğunluğuna sahip hücresel bir malzeme oluşturmak için ısıtmayla genişler (Gunning, 1994).

Perlit yumuşama aralığında uygun bir noktaya ısıtıldığında, orijinal hacminin yirmi katına kadar genişler, çeşitli uygulama taleplerine hitap eden son derece düşük kütle yoğunluğuna sahip bir hücresel malzeme oluşturur (www.scholar.com).

Perlitin genleşme prosesi, ısının çok dikkatli bir şekilde verilmesini ve daha sonra partinin ısı bölgesinden çıkarılmasını gerektirir. Partikül, genellikle döner bir yatay veya sabit dikey buharda yumuşama noktasının (871 °C) üzerinde yeterince hızlı bir şekilde ısıtılmalıdır, böylece yapısındaki birleşik su buharlaşır. Oluşan buhar, yumuşatılmış malzemeyi genişletmek için hareket eder, yapının gözenekliliğini artırır ve orijinal yoğunluğu azalır, böylece kaya sayısız küçük kabarcıklar oluşturacak şekilde genişler. Nihai ürün, genişletilmiş perlit olarak adlandırılır (Yüksel, 1997). Resim 2.8'deki aynı perlit ağırlığı için perlit üretiminin üç aşaması (www.perlite.org) buharlaştırmadan sonra hacimdeki büyük artışı göstermektedir (Yüksel, 1997).



Resim 2.8. Genleştirilmiş Perlit (www.perlite.org)

Genleşmiş perlit, genellikle son derece düşük kütle yoğunluğu, yüksek parlaklık, yüksek emilim, düşük termal ve akustik iletkenlik ve yanmazlık özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir. Herhangi bir belirgin sağlık tehlikesinin olmaması da kullanım oranını arttırmaktadır. Genleşmiş perlitin kimyasal analizi Tablo 2.4'de gösterilmiştir (Gunning, 1994).

Tablo 2.4. Genleştirilmiş Perlitin Tipik Kimyasal Analizi (Gunning, 1994)

Bileşim	İçerik(%)	Bileşim	İçerik(%)
SiO ₂	71.0 -75.0	FeO	0.0 - 0.1
Al ₂ O ₃	12.5 -18.0	Cr	0.0 - 0.1
Na ₂ O	2.9 - 4.0	Ba	0.0 - 0.05
K ₂ O	0.5 - 5.0	PbO	0.0 - 0.03
CaO	0.5 - 2.0	NiO	İhmal edilebilir
Fe ₂ O ₃	0.1 - 1.5	Cu	İhmal edilebilir
MgO	0.02- 0.5	B	İhmal edilebilir
TiO ₂	0.03- 0.2	Be	İhmal edilebilir
H ₂ O	2.0 - 5.0	Serbest Silika	0.0 - 0.2
MnC>2	0.0 - 0.1	Toplam Klorürler	0.0 - 0.2
SO ₃	0.0 - 0.2	Toplam Sülfatlar	Yok

2.2.2. Perlitin Tipik Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Maden Tetkik ve Arama genel müdürlüğünden alınan bilgilere göre perlit genellikle açık gri renktedir; ancak bazen siyah, açık yeşil veya kahverengi olabilir. Ham perlitin rengi ne olursa olsun, genişletilmiş perlit her zaman beyazdır.

Perlit bilgisi başlığı altında (www.perlite.org) sitesinden alınan bilgilere göre perlit, karakteristik eşmerkezli veya kavisli soğan kabuğu kırıklarına sahiptir. Gözenekli doğa, absorpsiyon ve absorbtivite özellikleri kazanmasını sağlar. Perlitin fiziksel özellikleri Tablo 2.5'de kısa bir şekilde özetlenmiştir. Tablo 2.6'da ham perlitin kimyasal anazi gösterilmektedir.

Tablo 2.5. Perlitin Fiziksel Özellikleri (www.perlite.org)

Renk	:	Beyaz, gri, Siyah
Serbest Nem, Maksimum	:	0.5%
pH	:	6.5 - 8.0
Spesifik yer çekimi	:	2.2 - 2.4
Toplu Yoğunluk	:	32-400 kg/m ³
Yumuşama Noktası	:	871-1093°C
Erime Noktası	:	1260-1343°C
ÖZİSİSİ	:	0.2 cal/g°C
Termal İletkenlik (24°C)	:	0.04-0.06 W/mK

Tablo 2.6. Ham Perlitin Tipik Kimyasal Analizi (www.perlite.org)

Bileşik	İçerik (%)		Bileşik	İçerik (%)	
Silisyum Dioksit	SiO ₂	73.8	Klor	Cl	<0.0005
Alüminyum oksit	Al ₂ O ₃	13.9	Krom	Cr	<0.007
Sodyum oksit	Na ₂ O	4.7	Bakır	Cu	<0.0015
Potasyum oksit	K ₂ O	4.3	Galyum	Ga	<0.05
Kalsiyum oksit	CaO	0.9	Kurşun	Pb	<0.001
Demir oksit	Fe ₂ O ₃	0.9	Manganez	Mn	<0.3
Magnezyum oksit	MgO	0.3	Molibden	Mo	<0.002
Su	H ₂ O	<1.0	Nikel	Ni	<0.02
Arsenik	As	<0.001	Sülfür	S	<0.2
Baryum	Ba	<0.1	Titanyum	Ti	<0.1
Boron	B	<0.01	Zirkonyum	Zr	<0.003

2.2.3. Perlitin Kullanımı

Perlitin geliştirilmesi yöntemi 1928 yılında keşfedilmiştir. Ancak, genişletilmiş perlit 1945 yılına kadar yaygın olarak kullanılmamıştır. Perlit, II. Dünya Savaşı'ndan sonra inşaat sektöründeki gelişmelerin hız kazanması ile birlikte diğer hafif malzemeler gibi pazar payı kazanmaya başlamıştır. Türkiyede Erzincan Perlit Maden İşletmesinde (www.erper.com.tr) perlitin güncel birim fiyatı 50 TL/Ton dur.

Parçalanmış ve istenilen ebatlardaki perlitin bazı temel kullanım alanları Devlet Planlama Teşkilatının Sekizinci beş yıllık kalkınma planına göre aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Bazı asitlere ve alkalilere karşı dayanıklılığı nedeniyle kanalizasyon borularının imalatında,
- İç ve dış sıvaların üretiminde,
- Suya maruz kalan yapılar, çatı ve terasların su yalıtımı, yüzme havuzlarının inşaatlarında,
- Demiryolu traverslerinde,
- Aşındırıcı endüstride,
- Su arıtma merkezlerinde,
- Karayollarında asfalt dolgu maddesi olarak,

- Dökümhanelerde silika kaynağı, metal temizleyici veya cüruf pıhtılaştırıcısı olarak kullanılır.

Genleştirilmiş perlitin kullanımı genellikle inşaat, peyzaj ve endüstriyel uygulamalar olarak kategorileştirilebilir. Yapısal uygulamaları 2.2.4. başlığı altında detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.2.4. Perlitin Yapısal Uygulamaları

Isı veya ses yalıtımı, hafifliği veya yangına dayanıklılığı nedeniyle genleştirilmiş perlit genellikle inşaat uygulamalarında kullanılır. Perlitin inşaat sektöründeki ana kullanım alanları aşağıda maddeler şeklinde açıklanmıştır (Gunning, 1994):

- Akustik fayans ve duvar kaplaması
- Hafif beton agregası
- Kalafatlama bileşikleri
- Yalıtım malzemesi
- Boru izolasyon kaplamaları
- Alçı agregası ve tekstüre
- Boyayı tekstüre etme
- Ateşe dayanıklı ürünler
- İzolasyonlu çatı kaplama bileşikleri
- Ateşe dayanıklı kaplamalar
- Hafif çimento dolgu maddesi
- Baca astarları

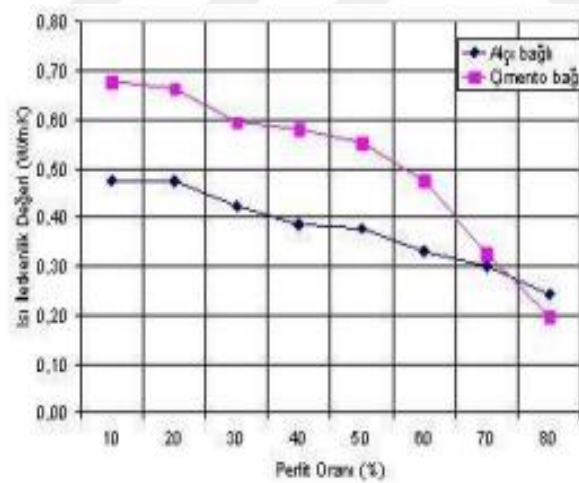
Ağırlıklı olarak çatı, duvar, kapı içleri ve tavanlarda kullanılan fiber, perlit ve perlit-alçı formlu levhalardan oluşan yalıtım levhaları, perlitin en büyük pazarını oluşturmaktadır. Agregat olarak perlitin kullanılmasıyla üretilen çeşitli alçı sıva yalıtım levhaları da pazarlanmaktadır. Bu da düşük ısı iletkenliği ve daha fazla kurulum kolaylığı avantajına sahiptir. Avrupa'da geliştirilen yeni bir ürün olan alçı elyaf levha perlit içerir ve Standart alçı duvar levhasının ideal bir alternatifi olarak kullanılabilir (Gunning, 1994).

Çalışmalar ayrıca, genişletilmiş perlit portland çimentosu ile karıştırıldığında puzolanik reaksiyonlar oluşturduğunu göstermiştir (Urhan, 1987 ve Erdem, 1997). Ayrıca, perlit tozunun önemli bir puzolanik etkiye sahip olduğunu gösteren bazı çalışmalar ile belirlenmiştir (Yu ve diğerleri, 2002).

2.2.5. Perlitin Betondaki Taze ve Sertleşmiş Özelliklerine Etkisi

Perlitin Taze ve Erken Yaş Özelliklerine Etkisi

Bulgurcu 2009'da yaptığı çalışmada Şekil 2.4'te görüldüğü gibi %10 ile %80 e kadar genişletilmiş perlitin beton içerisinde kullanımı ile betonun ısı iletkenlik değerinin azaldığını tespit etmiştir bu sebepten betonun termal özelliği gelişmiştir. Betonun birim hacim ağırlığında azalma görülmüş bu sayede ölü yük ağırlığından tasarlanan yapı kurtulmuştur. Hazırlanan aynı numunelerin basınç ve eğilme dayanımları azalırken su emme kapasitesi artmıştır (Bulgurcu, 2009). Dayanımdaki bu düşüşü azaltabilmek için düşük su/ç oranıyla beraber mineral ve kimyasal katkı kullanılması gerekir (Gesöglü ve diğerleri, 2004).



Şekil 2.4. Isıl iletkenlik-Perlit oranı (Bulgurcu, 2009)

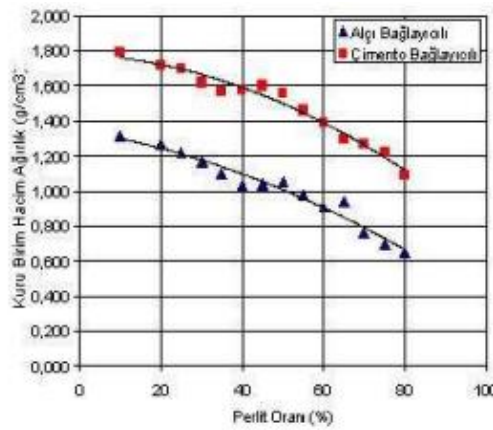
Perlitin Sertleşmiş Özelliklerine Etkisi

Perlitin ilavesiyle betonun sertleşmiş özellikleri ile ilgili yapılan bir çalışmada $CaCl_2$ ve Na_2SO_4 katkılarının dayanımı artırdığı gözlemlenmiş ve süre olarak 91.ve 180.günlerde gelişmenin daha iyi görülebileceği bulunmuştur (Bulut, 2011). Bulut tarafından 2011 yılında yapılan aynı çalışmada kür sıcaklığının artırılmasıyla elde

edilen sonuçların normal koşullarda elde edilen sonuçlara göre daha kötü çıkması nedeniyle normal şartlarda kürlenmesi uygun görülmüştür.

Gökçe ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada beş farklı hafif agrega karışımı ele alınmış olup karışımdaki ince agreganın miktarı arttıkça ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı artmıştır (Gökçe ve diğerleri, 2010).

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi karışımlara perlit ilave edilince karışımın kuru ağırlığı düşmektedir.



Şekil 2.5. Perlit oranı-Kuru birim Hacim Ağırlığı (Bulgurcu, 2009)

2.2.6. Perlitin Puzolanik Reaktivitesi

Yapılan bir çalışmada perlitin öğütülmesinde güçlük çekilse de yüksek puzolanik aktivitesinden dolayı çimentonun özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Taban, 2010; Turanlı, 2004). Urhan (1991)'de yaptığı çalışmasına göre kristalli yapıların düzgün ve sık olması çözünmeleri zorlaştırır ama camsı(amorf) yapılarda atomlar hem sık değil hemde düzgün halde değildirler. Perlitinde camsı yapısının olması nedeniyle yüksek oranda amorf silika içermesi puzolanik aktivitesini olumlu etkiler. Kireç ve puzolanlı karışımların mukavemetinde kireç/puzolan oranı önemlidir. Eğer harçta kireç yetersiz olursa hidrasyon ürünleri boşlukları kapatmada ve parçacıkları bağlamada yetersiz olabilir ve dayanımı düşürür. Tam tersi kireç fazla olursa bu sefer bağlayıcılık özelliği gösteremeyecek ve serbest şekilde kalarak harcın dayanımını düşürecektir. Lea 1970'te yaptığı bir çalışmada hazırladığı karışımlardaki kireç/puzolan oranının $\frac{1}{2}$ olarak seçtiği harcın $\frac{1}{4}$ oranına göre sürekli olarak yüksek dayanım gösterdiğini gözlemlemiştir.

Perlitin içeriğinde yüksek oranda bulunan ve puzolanik tepkimede temel elementlerden biri olan silis taneciklerinin amorf(camsı) haldeki kristal yapısı puzolanik reaktiviteyi olumlu bir şekilde etkiler (Bulut, 2011).

Perlit gibi içeriğinde bol miktarda silis ve alümine sahip olan killerin yapısı kristalli olduğundan puzolanik aktiviteye sahip olamamaktadır. Ama killeri 700~900 °C arasında ısıtılma tabii tutarsak ince taneli hale gelerek kristal yapısı bozulur ve yarı amorf yapıya sahip olur böylece puzolan olarak kullanılabilir (Şadoğlu, 2020). Şadoğlu 2020 de yaptığı aynı çalışmada Erzincan perlitinin puzolanik özelliklerinden $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının %86 olduğunu, puzolanik aktivite indeksinin 7.günde %78 ve 28.günde %80 olduğunu tespit etmiştir.

2.3. Nano Malzemeler

Yapı malzemelerinden olan beton günümüzde en çok rağbet gören ve performansının iyileştirilmesi için üzerinde yoğun bir şekilde deneysel çalışmaların yapılmış ve yapılmakta olduğu en önemli malzemedir. Çok fazlı ve zamana bağlı olarak dayanım kazanan ve kompozit olan betonun bozunma mekanizması (dayanım ve dayanıklılıktaki kayıp) nano boyuttan makro boyuta doğru bir şekilde gerçekleşir ve her küçük boyuttaki bozunma bir üst boyuttaki bozunma performansını etkilemektedir (Jennings ve diğerleri, 2008; Sanchez ve diğerleri, 2009; Sanchez ve Borwankar, 2010).

Doğada bulunan ham haldeki malzemelerin farklı yöntemlerle analiz edilip bulunan özellikleri ve davranışları o malzemenin en küçük düzeydeki parçacık yapısıyla doğrudan ilgilidir. Bilim adamları bu düşünceden esinlenip alternatif malzeme tasarımları ile ilgili sayısızca çalışmalar yapmaktadırlar. Bu sebepten ötürü günümüzde ham malzemedan ziyade çalışma sonucu tasarlanan malzemeler daha çok rağbet görmeye başlamıştır (Schwartz ve diğerleri, 2006). Tasarımlar nanoteknoloji ile gerçekleştirilir ve ABD Ulusal Nanoteknoloji Girişimi (NNI) tasarımlarda kullanılan nanoteknolojiyi aşağıdaki şekilde ifade ediyor:

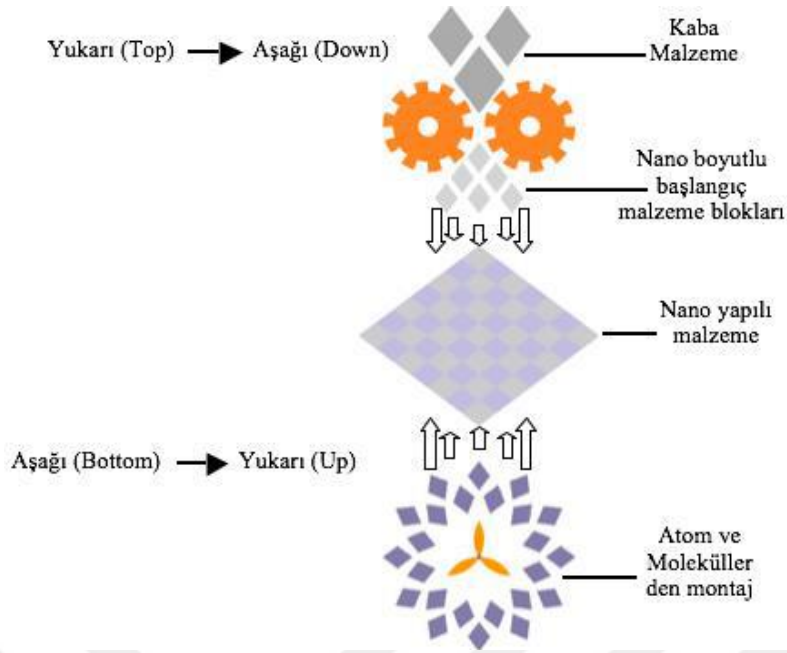
- Nanoteknoloji 1 ile 100 nano metre ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) aralığında dane boyutundaki nano ölçekli malzemeleri ve bunlar ile ilgili teknolojik gelişimleri kapsar.
- Nanoteknoloji ile üretilen tasarımlar ile yeni özelliklere sahip yapılar oluşturulabilir.

- Nanoteknoloji ile beraber atomik ölçekte denetim(davranış) mekanizması geliştirir.

Genelde nanoteknoloji kullanılan malzemelerin temel işlevlerinin ve performanslarının iyileştirilmesi için malzemelerin nanometrik boyutta ($1 \text{ m} = 10^9 \text{ nm}$) belirlenmesi, kontrolü ve yeniden üretimi şeklinde tanımlanabilir (Roco, 2011).

Nano boyutlu tanelerin insan gözüyle algılanabilmesi için örnek olarak insanlardaki saçın sadece 1 teli yaklaşık olarak 80.000 nm genişliğinde gözlemlenmiştir. Nano boyuta sahip yapı malzemelerine “nano malzeme” adı verilmektedir (Birgisson ve diğerleri, 2012). Nano boyutlu malzemeleride doğal ve yapay nano malzemeler olarak iki gruba ayırabiliriz. Doğal olan nano malzemelerin insan gücüne ihtiyacı yoktur ve herhangi bir işleme maruz kalmadan doğada hazır bir şekilde bulunurlar. Tasarım sonucu elde edilmiş olan nano malzemeler ise yapay nano malzemelerdir ve nano teknoloji bu malzemeleri kapsar (Filipponi, 2007).

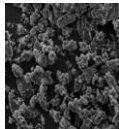
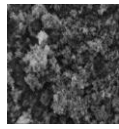
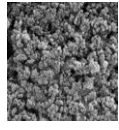
Nano malzemelerin üretimi ise iki şekilde gerçekleşir. Birincisi yukarıdan aşağıya (Top-Down) ve ikincisi ise aşağıdan yukarıya (Bottom-up) yaklaşımı ile üretilirler (Sanchez ve Sobolev, 2010). Top-down yani yukarıdan aşağıya üretim yaklaşımında, malzemelerin boyut olarak kendine has özelliklerine atomik düzeyde müdahalenin yapılmadığı ve buna bağlı olarak özelliklerinin korunur. Bu yaklaşımda Şekil 2.6’te görüldüğü gibi nano ölçekli taneciklere dönüştürmek veya büyük malzemedan küçük malzemelere ayrıştırma işlemi yapılır. Yukarıdan aşağıya yaklaşımından farklı olarak Bottom-up yani aşağıdan yukarı yaklaşımındaysa Şekil 2.6’te görüldüğü gibi malzeme atomik ya da moleküler düzeyden başlanıp belirli işlemlerle tasarlanır.



Şekil 2.6. “Top-Down” ve “Bottom-Up” yaklaşımlarına göre nano taneçiklerin üretilmesi (Sanchez ve Sobolev, 2010).

Demirhan tarafından 2017 yılında yapılan bir çalışmada Tablo 2.7’de çimento kompozitlerindeki nano malzeme etkilerini; nano kalsit, nano silis ve nano alüminin sem görüntüleri, taze ve sertleşmiş özelliklere etkileri , erken yaş dayanımını nasıl etkilediği hidrasyon hızını, priz süresinin nasıl etkilediğini, geçirimsizliği ve dayanıklılığını nasıl etkilediğini görmekteyiz.

Tablo 2.7. Nano malzemelerden olan nano kalsit, nano silis ve nano alüminin çimento kompozitine etkileri (Demirhan, 2017)

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

2.3.1. Nano Malzemelerin Türleri

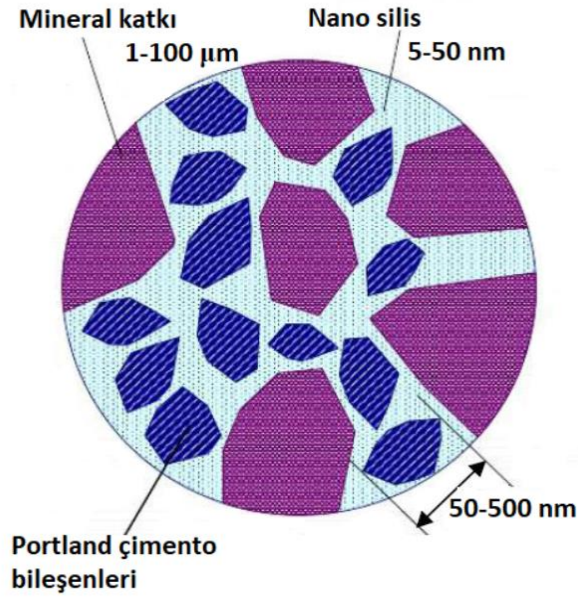
Yapılan literatür taramasında nano malzemelerden nano silis(SiO_2), nano titan(TiO_2), nano kalsit(CaCO_3), nano alümin(Al_2O_3), nano demir(Fe_2O_3) ve nano killer ile ilgili çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Çalışmamızda nano kalsit kullandığımızdan dolayı yukarıda bahsi geçen nano malzemeleri kısa bir şekilde özetleyerek NC ile ilgili daha detaylı araştırmalar ayrı bir başlık altında 2.3.2 kısmında toparlanmıştır.

Nano Silis (NS)

Bütün nano malzemeler içinden çimento ve betonda performansı iyileştirmek için kullanılan ve en geniş kullanım alanı olan nano silistir(SiO_2). Puzolanik aktivitesi ile beraber boşluk doldurma etkisinde gösteren bir malzemedir (Singh ve diğerleri, 2013). Nano silis ile ilgili yapılan çalışmalarda, kendiliğinden yerleşen, ultra yüksek dayanımlı, lifli ve kendiliğinden yerleşen, petrol kuyu, alkali aktif cüruf betonu ve çimento harçlarında, çimentoya ikame edilen nano silis oranı değişkendir. Nano silis için bu değişken genelde optimum değerleri %0.6'ın üstünde %5'in altında şeklinde ifade edilmiş olup ve söz konusu 0.6 ile 5 arasındaki yüzde oranlarında diğer oranlara göre daha iyi performanslar elde edilmiştir. Nano silisin iyileştirmede etki ettiği mekanik özelliklerinde yüksek puzolanik aktivitesini, hidrasyonu destekleyerek mikroyapıyı iyileştirmesine ve filler etkisine bağlanmıştır (El-Gamal ve diğerleri, 2017; Sadeghi ve diğerleri, 2013; Zhang ve diğerleri, 2017; Wu ve diğerleri, 2017-2016; Shih ve diğerleri, 2006; Behfarnia ve diğerleri, 2017; Nazari ve diğerleri, 2011; Beigi ve diğerleri, 2013; Ltifi ve diğerleri, 2011).

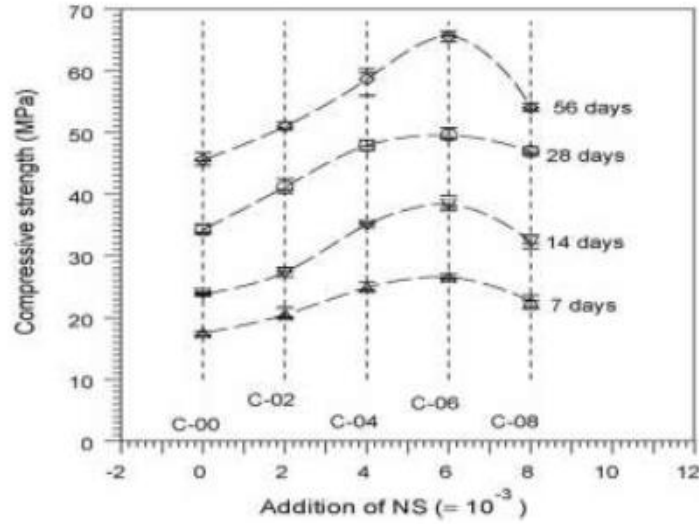
Nano silisin çimento karışımlarındaki etkilerini ve sem görüntüsünü 2017 yılında Demirhan tarafından yapılan çalışmadan aldığımız Tablo 2.7'de görmekteyiz.

Şekil 2.7'da Sobolev tarafından 2006 yılında yapılan bir çalışmada üretilen bir numunedeki kesitte mineral katkı, nano silis ve portland çimento bileşenlerinin görünümü.



Şekil 2.7. Çimento, mineral katkı ve nano silis içeren bir kesit (Sobolev, 2006)

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi Shih tarafından yapılan bir çalışmada kontrol numunesi ve sırasıyla %2, %4, %6 ve %8 nano silis içeren karışımların 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarını gözlemlediğimizde nano silisin %6 oranındaki ikamesi basınç dayanımını maksimum seviyelere getirmiştir.



Şekil 2.8. Farklı nano silis oranları ile elde edilen 7, 14, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları (Shih ve diğerleri, 2006)

Nano silis parçacıklarının süperakışkanlaştırıcı gibi kimyasallar ile pozitif etkileşim göstermediği ve karışımın işlenebilirliğini azalttığı, üretilen çimento bazlı karışımlarda nano silis kullanımının negatif etkileri olduğu gösterilebilir. Gösterilen bu negatif durum nano silis taneciklerini ve çimento pastasındaki çözülmüş alkalilerin

etkileşimi sonucuyla oluşan su tutma kapasitesi yüksek jellerden kaynaklandığı belirtilmektedir (Berra ve diğerleri, 2012).

Nano Titanyum (NT)

Nano Titanyum(TiO_2) beyaz renkli ve parlak bir görünüme sahip olup nanoteknolojide en fazla kullanılan maddelerin başında gelir. NT'nin düşük maliyetli olması ve kolay kullanılabilmesi ve de toksik etki göstermemesi gibi özellikleri bulunduğundan ön plana çıkan bir maddedir. NT ile üretilen malzemeler kendi kendini temizleme, kir tutmama ve parlak yüzeye sahip olurlar. İnşaat sektöründe yansıtıcı özellikli betonlar, kendi kendini temizleyen boya ve pencere camı üretiminde kullanılır (Turunç, 2019). Bozoğlu tarafından 2012 yılında yapılan araştırmada yapı malzemelerinde kullanılan bazı nano malzemeleri Tablo 2.8'de görmekteyiz.

Tablo 2.8. Yapılarda kullanılan bazı nano malzemeler (Bozoğlu Demirdöven ve Arditi, 2012).

<i>Nanomalzemeler</i>	<i>Yapı Malzemeleri</i>	<i>Beklenen Faydalar</i>
Karbon Nanotüpler CNT	Beton Seramik Cihazlar (NEMs/Nano elektro mekanik, MEMs/Mikro elektro mekanik) Güneş pili	Sağlamlık, Çatlamayı önleme Geliştirilmiş mekanik ve temel özellikler Sağlık izleme Öz-algılama Etkili elektron iletimi
SiO_2 (silisyum dioksit) nano parçacıklar	Beton Seramik Cam	Mekanik mukavemete katkı Soğutma Işık iletimi Ateşe dayanıklılık ve tutuşmazlık Yansıma önleme
TiO_2 (titanyum dioksit) nano parçacıklar	Beton Cam Güneş pili	Hızlı hidrasyon Hidrasyon düzeyini arttırma Kendi kendini temizleme Süper su emicilik Buğulanma önleme Kirlenmeye direnci Elektrik üretimi
Fe_2O_3 (demir III oksit) nano parçacıklar	Beton	Kompresif gücü arttırma Aşınmaya dayanıklılık

Nano Alümin (NA)

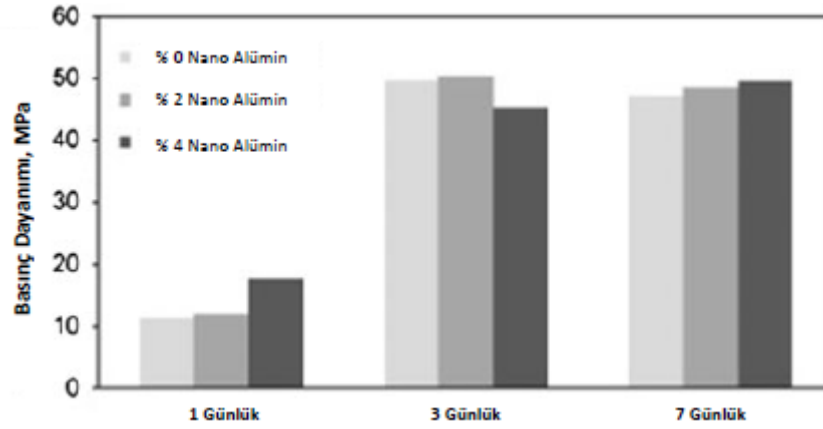
Nano alümin yüksek reaktiviteye sahip olup kompozit(çimento-beton) malzemelerinin dışında aktif olarak kataliz tatbikinde, biyomedikal alanlarda, şeffaf geçirgen sıvılarda, aşınma direncine sahip parça tasarımında, özellikleri iyileştirmek üzere ısı iletken sıvılarında ve ambalajlarda da kullanılan bir nano malzemedir. Nano alüminin çimento karışımlarındaki etkilerini ve sem görüntüsünü 2017 yılında Demirhan tarafından yapılan çalışmadan aldığımız Tablo 2.7’de görmekteyiz.

Karışımlarda çimentodaki hidrasyonu etkileyen iki temel kimyasal nano silis ve nano alümin olduğunu söyleyebiliriz. Mukavemeti iyileştiren nano malzemelerden NS diğer nano malzemelere kıyasla daha ön plandadır. Priz sürecinde ise NA diğer nano malzemelerin önüne geçmekte olup prizi hızlandırır (Norhasri ve diğerleri, 2017). NA’nın özgül yüzey alanı yüksek olup çimentoda CH ile tepkimeye girerek C-A-H jellerini oluşturur. Tepkimenin hızı ve ortaya çıkacak C-A-H miktarı NA kimyasalının özgül yüzey alanına ve saflık derecesine göre orantılı olarak artar (Jo ve diğerleri, 2007).

Yapılan araştırmalara göre NA ile kullanılan çalışmaların diğer nano malzemeli çalışmalara göre oldukça az yer kaplamaktadır. Çimentolarda yapılan tetkiklere göre NA’nın performansı NS kadar etkili değilse de (He ve Shi, 2008) bazı araştırmalarda çimento karışımında NA’nın basıncı artırdığı gözlemlenmiştir (Li ve diğerleri, 2006; Shekari ve Razzaghi, 2011). Yapılan benzer çalışmada çimento karışımının işlenebilirliği azalmış olsa da NA’nın karışımda çekme dayanımı ve basınç dayanımı gibi mekanik performansları iyileştirdiği, su emme kapasitesi ve klor geçirimsizliği şeklindeki durabilite özelliklerinin geliştiği gözlemlenmiştir (Razzaghi ve diğerleri, 2011). NA çimento karışımında arayüz yoğunluğunu arttırdığı, poroziteyi düşürdüğü ve de elastisite modülünü arttırdığı gözlemlenmiştir (Li ve diğerleri, 2007).

Literatürdeki bazı araştırmalarda NA’nın basınç dayanımına etkisinin çok az olduğunu göstermektedir (Nazari ve diğerleri, 2010). Basınç dayanımına etkisinin az olmasından dolayı literatürde de NA ile ilgili yapılan bilimsel araştırmalar azdır. NA’nın oranları değişken tutulup hazırlanan numunelerle yapılmış olan bir çalışmada, erken dayanım dahi tüm yaşlardaki basınç testlerinin sonucu yakın çıkmıştır (Barbhuiya ve diğerleri, 2014; Behfarnia ve Salemi, 2013). Ama yapılan araştırmalar sonucunda NA elastisite modülünü ve çimento karışımında dayanıklılık özelliklerini olumlu etkilediğini göstermektedir.

Barbhuiya tarafından 2014 yılında Şekil 3.9’da görüldüğü gibi hazırlanan karışımlara %0, %2 ve %4 oranlarında nano alümin ikame etmiş ve basınç dayanımlarını gözlemlemiştir.



Şekil 2.9. %0, %2 ve %4 oranlarında NA ikame edilen çimento karışımlarının basınç dayanımları (Barbhuiya ve diğerleri, 2014).

Nano Demir (NF)

Nano demirin betondaki kullanımı ile Tablo 2.8’de görüldüğü gibi kompresif gücü artırma ve aşınma dayanıklılığını geliştirmesi beklenir.

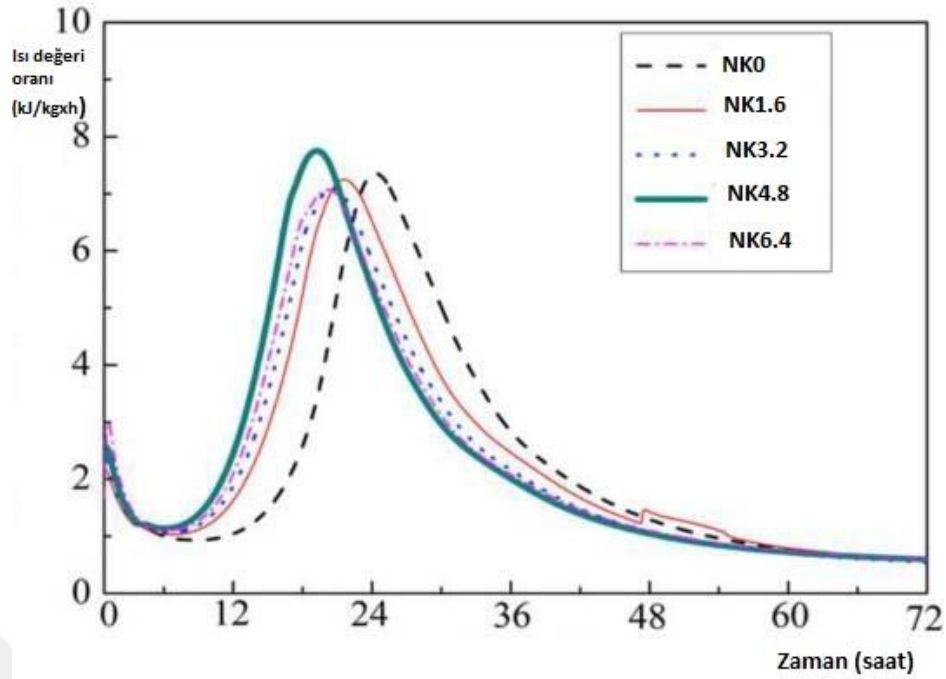
2.3.2. Nano Kalsit (NC)

Nano Kalsitin elektron mikroskop görüntüsü materyal ve metot kısmında Resim 3.2’de gösterildiği gibidir. Nano malzemelerin genelde 100 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)’den daha küçük parçacık boyutuna sahip malzemeler olarak bilindiği ve daha büyük boyutlu malzemelerinde yapısında önemli iyileştirmelerde bulunabilirler (Gao ve diğerleri, 2018). Nano parçacıkların çimento gibi kompozitlere ikame edilmesi kompozitin mekanik özelliklerini ve dayanıklılıklarını iyileştirebilir (Silvestre ve diğerleri, 2016; Farzadnia ve diğerleri, 2013; Han ve diğerleri, 2015). NC inşaat sektöründe önemli paya ve kullanıma sahip materyallerdendir. Mikro kalsit(MC) ve daha büyük taneli kalsitler ile karşılaştırıldığında; NC’nin ince parçacıklara ve daha geniş spesifik alana sahip olduğu bu sebeplede çimento karışımında hidrasyon işlemi, işlenebilirliği, mekaniğini ve dayanıklılığını daha fazla etkileyip iyileştirdiği gözlemlenebilir. NC’nin

hidratasyonu, hidrasyon sonucu ürünleri, işlenebilirliği, mekaniği ve dayanıklılığını ile ilgili literatür taramasını alt başlıklar halinde gösterilmiştir.

NC'nin Hidratasyonu

NC'nin çimentodaki hidrasyon durumu; içeriğine, parçacık boyutuna ve kristal yapısı ile ilgilidir (Camiletti ve diğerleri, 2013; Jayapalan ve diğerleri, 2013; Wu ve diğerleri, 2016). Sato, 2011 ve 2018'de yaptığı çalışmalarda NC'nin içeriği ve parçacık boyutunun çimento karışımındaki hidrasyonu üzerindeki etkisini irdelemiştir ve C₃S'nin indüksiyon periyodunda çimento hidrasyonunu çekirdeklenme etkisiyle hızlandırmasından dolayı karışımlarda NC 50 ile 120 nm aralığında kullanımının önemli etkilerinin olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca CaCO₃ içeriğinin yükselmesiyle beraber NC'nin hızlanma etkisi daha belirgin hale gelip C₃A ve C₄AF'nin hidrasyonun maksimum noktasına ulaşır. Bu olaya benzer sonuçlar Şekil 2.8'de gösterilmektedir (Wu ve diğerleri, 2016). Grafiğin dengeli ve maksimum seviyeli görünümü C₃A ve C₄AF'lerin hidrasyonu ile kısaldır. Bu durum NC'nin yüksek yüzey enerjisi nedeniyle C₃S suda çözündüğünde kalsiyum iyonlarının NC yüzeyine absorbe edilebilmesi ve böylelikle C₃S çevresindeki kalsiyum iyonlarının konsantrasyonunun azalmasına neden olmasıdır. Bu sebeple NC C₃S'nin reaksiyonunu hızlandırmak için uygundur. Ek olarak NC içerisinde yer alan karbonat iyonları, C₃A ile reaksiyona girip mono karbo alüminatlar oluştururlar (Makar ve diğerleri, 2012; Wu ve diğerleri, 2012). Ayrıca NC C₃S ile reaksiyona girip C-S-H jeli ve Ca(OH)₂'yi oluşturabilir ve buda erken ve yüksek hidrasyon ısını doğurabilir. NC'nin seyreltme etkisini Şekil 2.10'da görmekteyiz ağırlık olarak %4,8 NC içeren ve boyut olarak 15-105 nm aralığında olan karışımın daha yüksek ve daha erken hidrasyon ısısına sahip olduğu gözlemlenmektedir (Wu ve diğerleri, 2016). Oluşan bu hal ile NC'nin seyreltme etkisinin MC'ye (MC %10 kullanıldığında bu değere ulaşılmıştır) karşı daha iyi performans gösterdiğini görmekteyiz (Vance ve diğerleri, 2013).



Şekil 2. 10. NC'nin ultra yüksek dayanımlı betondaki hidrasyon ısı değeri ve hızını gösteren bir çalışma (Wu ve diğerleri, 2016).

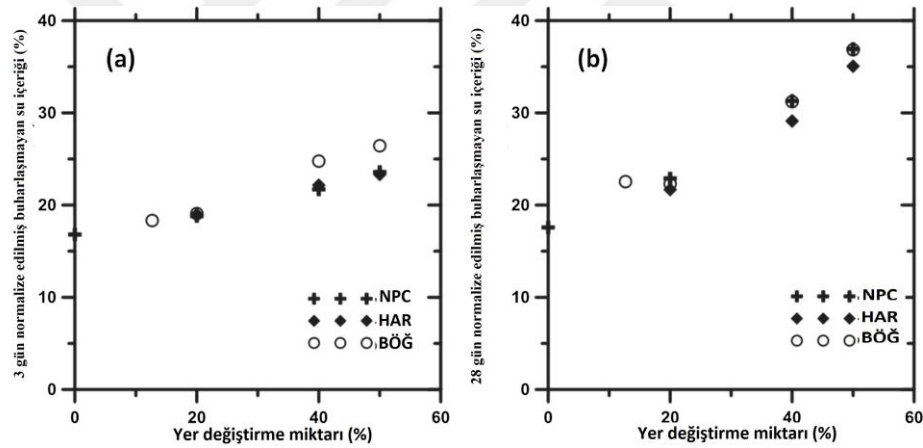
NC'nin Hidrasyon Ürünleri

NC ikame edilmemiş olan ve kireçtaşı içermeyen çimentodaki hidrasyon ürünlerinin kalsiyum-silikat-hidrat(C-S-H), etrenjit($C_6AS_3H_{32}$), monosülfat(SO_4) ve kalsiyumhidroksit $Ca(OH)_2$ 'dir. Bazı çalışmalarda PÇ'ye kireçtaşı tozu ikamesiyle monosülfat(SO_4)'ın yerine mono karbonat(CO_3) oluşumu ile sonuçlanmıştır (De ve diğerleri, 2011; Menendez ve diğerleri, 2003). Birde çimento karışımlarına kireç taşı eklenmesiyle oluşan etrenjitin azaldığı gözlemlenmiştir (Aashay ve diğerleri, 2016). Oluşan hidrasyon ürünlerinin üzerinde filler etkisinin az olmasından dolayı (Wang ve diğerleri, 2018) hidrasyon ürünlerinin çekirdeklenme etkisi, seyreltme etkisi ve kimyasal etkisi alt başlıklar halinde detaylıca açıklanacaktır.

Çekirdeklenme Etkisi:

Kireçtaşının çimentodaki malzemelerle ortaya çıkardığı hidrasyon ürünlerinin üzerindeki etkisi ikame edilen kireç taşının boyutuna bağlıdır. Buharlaşmayan su içeriğinin miktarı ile çimento karışımlarındaki hidrasyon derecesi belirlenebilir. Örnek bir çalışmadaki çimento karışımlarının 3. ve 28. Gün sonucunda elde edilen

buharlaşmayan su miktarı bulunup Şekil 2.11’de gösterilmiştir (Aashay ve diğerleri, 2016). PÇ cüruf ile kireçtaşı tozunun birlikte öğütülerek karıştırılması sonucunda elde edilen karışımlarının 3 günlük buharlaşmayan su miktarı değeri, sadece PÇ ile cüruf karışımlarından büyük olduğu gözlemlenmiştir ancak 28 günlük sonuç incelenince kireçtaşının karışıma eklenmesi durumu buharlaşmayan su miktarı değeri üzerinde çok az etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Kireçtaşının çekirdeklenme etkisi ile çimentonun erken yaşlardaki hidrasyon derecesinin iyileştirdiğini söyleyebiliriz. Birde kireçtaşı tanelerinin boyutları CH’ya etkisi irdelenmiştir. Karışımlarda 15 μm boyutunda kireçtaşı kullanılması ile CH miktarı içerisinde kireçtaşı olmayan karışımlardaki sonuçlar ile benzerdir. Karışımlardaki tane boyutu yaklaşık olarak 0,7 μm ile 3 μm boyutuna indirilince CH içeriği 1 günlük periyotta daha yüksek sonuç vermektedir (Vance ve diğerleri, 2013).



Şekil 2. 11. (a) 3 günlük ve (b) 28 günlük, klinker değiştirme seviyesinin bir fonksiyonu olarak klinker faktörüne göre normalize edilmiş buharlaşmayan su içeriği. Şekildeki NPC: NPC+ Cürufu, HAR: NPC’nin kireçtaşı ve cürufu harmanlanmasını ve BÖĞ: NPC’nin kireçtaşı ve cürufu birlikte öğütülmesini gösterir (Aashay ve diğerleri, 2016).

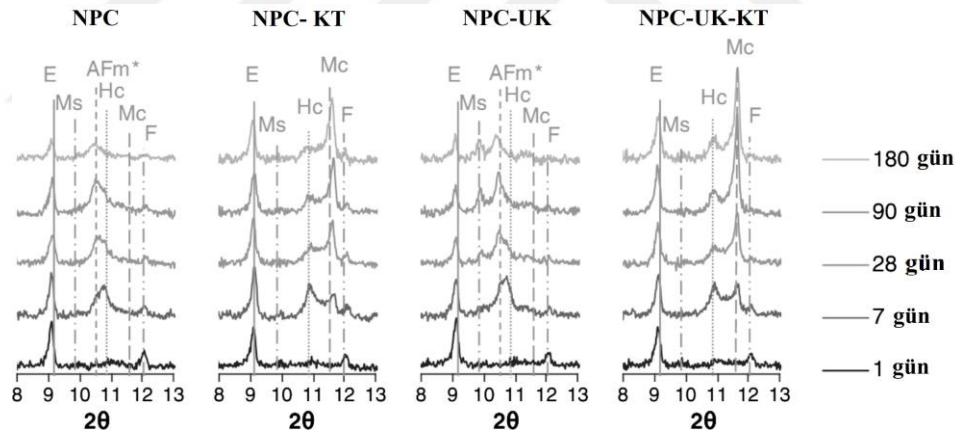
Seyreltme Etkisi:

Kireçtaşının çimento üzerindeki kullanımıyla hidrasyon ürünleri üzerindeki seyreltme etkisi genelde kireçtaşının miktarına bağlıdır. Kireçtaşı ve kuvars tozu gibi ayrı mineral tozlarının çimento karışımlarındaki hidrasyon ürünleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasıyla; mineral tozu içeren karışımlarda hidrasyon derecesinin daha yüksek

olmasına rağmen çimento klinkeri oranı az olduğundan CH içeriği nispeten düşüktür. Mineral tozu oranı %30 ve %40 olarak kullanıldığında 1 günlük periyot diliminde bu durumun daha da belirgin olduğu görülmektedir (Johanna ve diğerleri, 2014).

Kimyasal Etkisi:

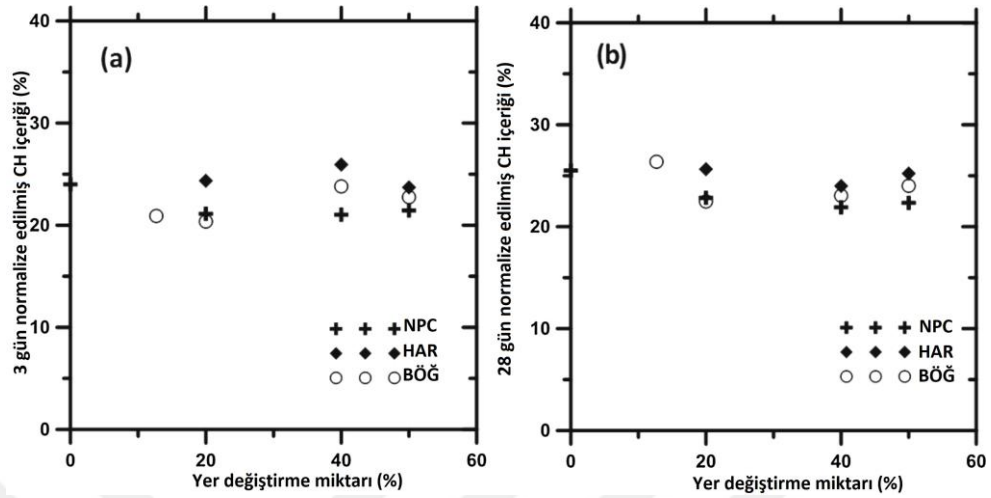
Çimentoda kullanılan kireçtaşının parçacık boyutu, miktarı ve tamamlayıcı katkı maddeleri kimyasal etkisini değiştiren unsurlar olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi XRD verileri, kireçtaşı tozunun çimento bazlı malzemelere ikame edilmesinde alüminat fazının CaCO_3 ile tepkimeye girip mono ve hemi karbonat oluşturuyor (De ve diğerleri, 2011). Sonuçlarda 7. Günden sonra hemi karbonata karşılık gelen tepe noktasını tespit edilmiştir. Arkasından hemi karbonatın zirve değerinden düşmesi ile mono karbonatta yükseliş başlamıştır. Kireçtaşı tozu içeren normal portland çimento karışımında kalsiyum hemi karboalüminatın erken yaşlarda ortaya çıktığını ve 28 günden sonra kalsiyum mono karboalüminata dönüştüğü bulunmuştur (Ipavec, 2011).



Şekil 2. 12. 1 ile 180 gün arasında test edilen farklı karışımlar için XRD sonuçları burada Etrinjit (E), monosülfat (Ms), sülfat ve karbonat içeren hidroksi-AFm (AFm*), hemi karbonat (Hc), mono karbonat (Mc) ve ferrit (F) ile gösterilip tepe noktaları gözlemlenmiştir (De ve diğerleri, 2011).

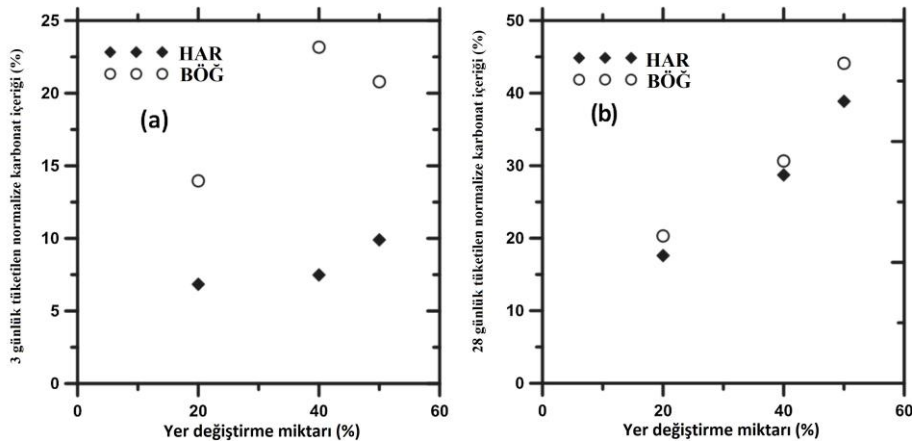
Kireçtaşı tozunun parçacık boyutuyla kimyasal etkisinin tespit edilebilmesi için kireçtaşı ile harmanlanmış ve beraberinde öğütülmüş karışımların üzerindeki etkisini incelemek için yapılan çalışmada normalize edilmiş CH içerikleri Şekil 2.13'de gösterildiği gibi sonuç vermiştir. Kireçtaşı tozunun beraber öğütülmesi veya harmanlanarak karıştırılması normalize edilmiş CH içerikleri üzerindeki etkisi çok

azdır. Beraberinde karbon tüketiminin ölçülüp kireçtaşı ile karıştırılmış çimento karışımındaki kimyasal etkisi irdelenmiştir (Aashay ve diğerleri, 2016).



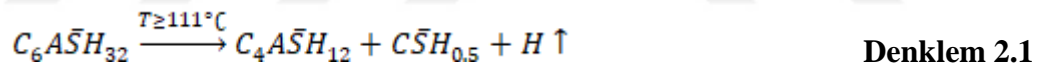
Şekil 2. 13. (a) 3 günlük ve (b) 28 günlük klinker ikame seviyesinin bir fonksiyonu olarak çizilen klinker faktörüne göre normalize edilmiş CH içeriği oranı. Şekildeki NPC: NPC+ Cürufu, HAR: NPC'nin kireçtaşı ve cürufu harmanlanmasını ve BÖĞ: NPC'nin kireçtaşı ve cürufu birlikte öğütülmesini gösterir (Aashay ve diğerleri, 2016).

Çalışmada 3. ve 28. günün sonunda harmanlanmış ve öğütülmüş NPC, kireçtaşı tozu ve cürufun sistemlerinde harcanılan karbonat içeriğini Şekil 2.14'te görmekteyiz (Aashay ve diğerleri, 2016). Şekil 2.13 a'yı incelediğimizde 3. gün sonunda harmanlanmış NPC, kireçtaşı tozu ve cürufu içeren karışımda harcanılan karbonatın yaklaşık %5'i iken, öğütülmüş haldeki NPC, kireçtaşı tozu ve cürufun karışımda karbonatların %10'undan fazlasının harcadığı görülüyor. Bu durum birlikte öğütülmüş NPC, kireçtaşı tozu ve cürufun karışımlardaki kireçtaşının daha ince parçacıklardaki boyutu ile açıklanabilir. Ama 28. gün sonuçları kontrol edildiğinde karbonat harcanımı birlikte öğütülmüş NPC, kireçtaşı tozu ve cürufu karışımlarda ve harmanlanmış NPC, kireçtaşı tozu ve cürufu karışımlarda benzer olduğu görülmektedir. Bu durumda ileri yaşta kireçtaşı tozunun gecikmiş reaksiyonu ve yüksek tüketim oranı parçacık boyutu büyük olan alüminat fazları ile reaksiyona girmesi haliyle açıklanabilir.



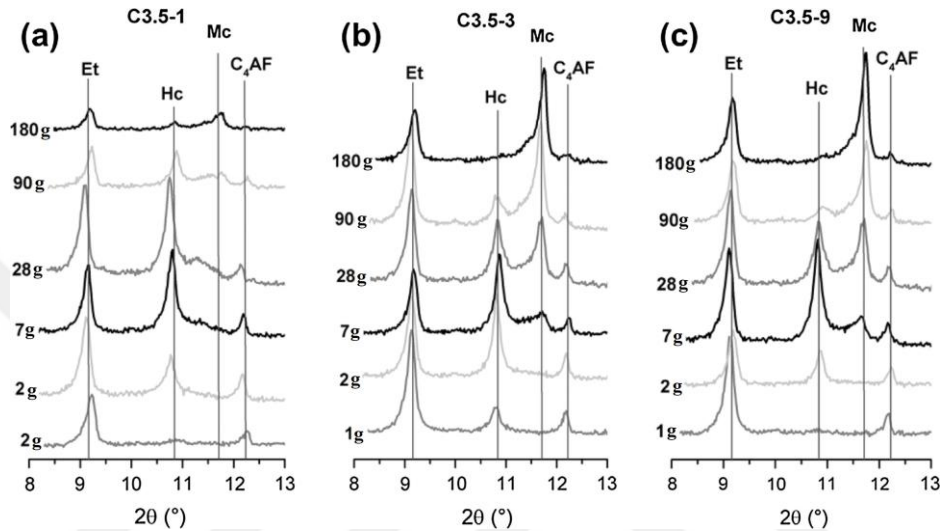
Şekil 2. 14. Klinker faktörüne göre normalize edilmiş harcanan karbonat içeriği: (a) 3 günlük ve (b) 28 günlük klinker ikame seviyesinin bir fonksiyonu olarak işaretlenmiştir.

Yapılan bir çalışmada karbo alüminatın termal ayrışma tepkimeleri Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3'te verilmiştir. Termal koşullar altında kalsiyum sülfü alüminatın ayrıştığını denklemlerde görüyoruz (Vladimfr ve Otokar, 1975). Kalsiyum karboalüminat sülföalüminata benzer bir şekilde molekül yapılarına sahiptir. Termal analiz anında kalsiyum karbonat yeniden üretilir ise kalsiyum karbonat oranının yükselmesiyle beraber kalsiyum karboalüminatın tüketimi ihmal edilme durumuna getirilebilir.



Hem kalsiyumhidroksit içeriği hem de karboalüminat içeriği kireçtaşının miktarının durumuyla etkilenebilmektedir ve 7. gün sonunda karışımdaki normal portland çimentosunun %5'ni kireçtaşı ile değiştirmek normalize edilen CH içeriğini düşürdüğü tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada 28.gün sonunda NPC ve uçucu kül karışımında bulunan %5 uçucu kül ile kireçtaşının değiştirilmesi durumunda da sonunda normalize edilen CH içeriğini düşürdüğü tespit edilmiştir. Kalsiyum hemi karboalüminatı oluşumunun CH içeriğini düşürdüğünden dolayı oluşumun CH'ı tüketebileceğini ortaya koymuştur (De ve diğerleri, 2011). Yapılan bir başka çalışmada kireçtaşı miktarının çimento karışımlarında karboalüminat içeriğine etkisi araştırılıp Şekil 2.15'te görüldüğü gibi %3, %9 kireçtaşı tozu içeren karışımların %1 kireçtaşı tozu içeren karışıma göre hem karbonat yoğunluğunun daha fazla olduğu sonucuna

ulaşmıştır (Zajac ve diğerleri, 2014). %1 kireçtaşı tozu içeren karışımda monokarbonat oluşumu gecikmiş ve ana tepe noktası yaklaşık olarak $11,3^\circ$ olarak tespit edilmiştir. Bu durumun muhtemelen hemikarbonat ve monokarbonat arasında meydana gelen bileşimden kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Runcevski ve diğerleri, 2012). Monokarbonatın tüm karışımlarda kademeli olarak arttığını ve monokarbonat oluşumunun oranı en düşük %1 kireçtaşı tozu içeren karışımda olduğu görülmektedir (Zajac ve diğerleri, 2014).



Şekil 2. 15. Çimentoların hidrasyonuna farklı oranlarda kireçtaşı miktarının etkisi: (a) C3.5-1 %1 oranda, (b) C3.5-3 %3 oranda ve (c) C3.5-9. %9 oranda kireçtaşı tozunu gösterir ve de Etrinjit (Et), hemikarbonat (Hc), monokarbonat (Mc) ve ferrit fazın (C4AF) ana zirveleri gözlemlenmiştir (Zajac ve diğerleri, 2014)

Yapılan çalışmalarda kireçtaşı ve tamamlayıcı katkı malzemelerinin arasında oluşan sinerjik etki kireçtaşı içeren çimentolu karışımların hidrasyon ürünlerini de etkilemektedir. Kireçtaşı ve cüruf arasında oluşan sinerjik etkinin miktarını ölçebilmek için karbonat tüketimini ve hem-monokarbonat içeriğini belirlemek gerekiyor (Damidot ve diğerleri, 2011). Çimento klinkerinin ikame seviyesinin artırılmasıyla karbonat tüketiminin artması gözlemlenmiş olup tüketimin artmasıyla hem-monokarbonat içeriğide artmıştır. Bu durumun nedeni cürufta bulunan reaktif alüminanın kireçtaşı tozunun reaktivitesini artırması söylenebilir (Aashay ve diğerleri, 2016).

NC'nin İşlenebilirliğe Etkisi

Hazırlanan çimentolu karışımlarda NC'nin işlenebilirlik özelliğini etkileyen faktörler NC'nin içeriği ve parçacık boyutu ile ilgilidir. Yapılan çalışmalarda hazırlanan karışımların akma gerilimi ve viskozite parçacık boyutu artar ise işlenebilirlikte artış eğilimi gösterir (Liu ve diğerleri, 2012; Shaikh ve Supit, 2015; Ge ve diğerleri, 2014). Ama NC'nin parçacık boyutu ve içeriğini birlikte ele alınca işlenebilirlik üzerindeki birlikteki etkileri ayrı ayrı olan etkisinden farklılık gösterebilir. Çimento karışımlarının suya olan ihtiyacının iki temel nedeninde biri çimento parçacıklarının arasında oluşan kılcal boşlukları kapatma ikincisi çimento parçacıklarının yüzey kısmında suyun emilmesi (Wu ve diğerleri, 2016). NC'nin işlenebilirlikte iki mekanizması var olup bunlardan birincisi boşluklarda bulunan suyun nano parçacıklar ile ikame edilmesi yani seyreltme etkisi, ikincisi ise daha ince NC parçacıklarının çimento parçacıkları arasındaki boşluğu kapatıcı etkisi ile daha geniş bir yüzey alanı ve de yüksek enerjisi sebebi ile yüzeyde maximum su emilimi yani filler etkisi göstermesi ön plana çıkmaktadır. Anlatılan bu iki mekanizmada parçacık boyutu ve NC'nin içeriği ile etkilenir ve bundan dolayı içeriğin artması ile akışkanlık değişebilir (Camiletti ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2016).

NC'nin Çimentodaki Mekanik Özelliklerine Etkisi

NC içerikli çimento karışımlarının mekaniğini esas olarak nano malzemenin içeriğine bağlıdır. NC'nin 15-40 nm boyutunda çimentoda %2'lik bir ağırlıkla karışıma eklenince başta eğilme dayanımı artarken sonra azalır. Erken yaşlarda çimentolu kompozitlerin orta açıkğını ve yer değiştirmesini önemli bir seviyede iyileştirir. Nano kalsitin C-S-H oluşumunu hızlandırdığı bu yüzden kullanımının elverişli olduğu söylenebilir (Yeşilmen ve diğerleri, 2016). Çimento karışımında kullanılan NC'ni artmasıyla basınç dayanımı başlangıçta artış gösterirken sonrasında azalmalar gösterebilir (Liu ve diğerleri, 2012; Wu ve diğerleri, 2016, 2017; Ge ve diğerleri, 2014). Önce artış sonra azalış olmasının nedenini incelendiğinde NC'nin hidratasyon süresini hızlandırdığını C_3S ve C_3A ile reaksiyona girerip C-S-H ve karboalüminatlar oluşturmasıdır. Ama karışımda NC fazla kullanıldığında seyreltme etkisi oluşup daha etkili olur. Birde NC birikmesi olduğunda MC'den farklı olarak basınç dayanımını

azaltır (Kenai ve diğeri, 2004; Lertwattanaruk ve diğeri, 2018; Turk ve Nehdi, 2018). Başka bir çalışmada NC'nin fazla eklenmesinden dolayı yoğunlaşan karışım hidrasyon ürünlerinin oluşması için kullanılır alan bırakmadığı gözlemlenmiştir (Wu ve diğeri, 2016). NC'nin çimentolu karışımlara dahil edilmesi genelde erken yaş dayanımını artırabilir ve de tamamlayıcı katkıların eklenmesiyle ileri yaş dayanımları için katkıda bulunabilir (Yang ve diğeri, 2018).

NC'nin Çimentodaki Dayanıklılığa Etkisi

NC içeren çimentolu karışımların asit hücumuna karşı gösterdiği direnci ve üzerindeki etkileri ile ilgili çalışma yeterince bulunmamaktadır. Çimentoda su emiciliği ve klorür geçirgenliği gibi bazı dayanıklılık testlerinde NC'nin çimentolu karışıma katılması ile matrisi yoğunlaştırıp gözenekleri azaltabilir (Shaikh ve Supit, 2015). Sızdırmayı azalttığından asit hücumuna karşı direnci artırabilir veyahut asit hücumunun bulunduğu yerlere kısmi olarak ilave edilebilir.

NC'nin çimento karışımlarına ilave edilmesiyle yüksek sıcaklığa sahip bir ortamda basınç dayanımı, basınç tokluğu ve eğilme özelliklerini iyileştirebilir (Gao ve diğeri, 2018; Gao ve Li, 2015; Gao ve Zhao, 2017). Fakat 800 °C yi geçerse kalsiyum karbonatın ayrışmasıyla dayanıklılık azalır.

2.3.3. Mikronize Kalsit (MC)

Mikronize kalsit genelde hazırlanan çimento karışımlarında çimento ile beraber öğütülmüş veya sonrada içine ilave edilerek harmanlanmış şekilde kullanılır. Nano kalsite göre boyutunu kıyas edersek ($1 \mu\text{m} = 10^{-5} \text{ m} \Rightarrow 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) yaklaşık olarak 1nm nin 1000 kat daha büyüklüğündeki parçacıklardan oluşur. MC'nin puzolanik aktiviteye sahip olmadığını ve de Ca(OH)_2 ve CaO gibi alkalilerle tepkimeye giremediğine rağmen MC'nin çimento karışımlarına ilavesi ile hidrasyon süreci ile taze ve sertleşmiş kıvamlı çimento karışımlarının mekaniğine etkisi vardır. Bundan dolayı MC'nin çimentonun kendi taneciklerine kıyasen daha küçük parçacıklarda bulunması çimento karışımındaki hidrasyon sürecini, hidrasyon kinetiğini ve de mikro düzeydeki yapıları etkileyebilir (Wang ve diğeri, 2018; Vance ve diğeri, 2013; Medjigbodo ve diğeri 2018). MC'nin hidrasyonu, hidrasyon sonucu

ürünleri, işlenebilirliği, mekaniği ve dayanıklılığını ile ilgili literatür taramasını alt başlıklar halinde gösterilmiştir.

MC'nin Hidratasyon Süreci

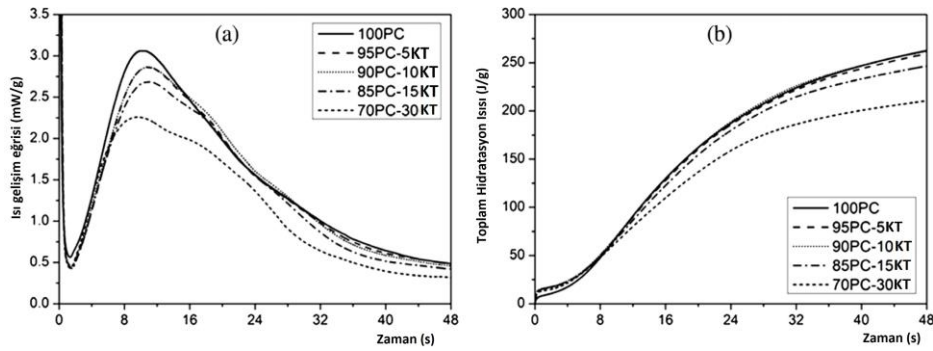
MC'nin nano kalsite oranla özgül alanı ve yüzey enerjisi düşüktür, ama makro kalsite göre parçacık boyutlarının inceliğinden dolayı özgül alanıda yüzey enerjiside makro kalsite göre daha büyüktür. Bu boyut ve kristal yapısında bulunan farklılıklardan dolayı hidratasyon süreci, hidratasyon ürünleri nano kalsitin gösterdiği etkilerden farklı olur. Cao tarafından 2019 yılında yapılan bir çalışmada gördüğümüz gibi Tablo 2.9'da, MC'nin çimento karışımındaki hidratasyonun üzerine etkilerini gösteriyor. İncelen tabloda MC'nin hidratasyon sürecindeki etki mekanizmasını, parçacık boyutu, içeriğini ve kristal yapısını literatür taramasındaki diğer çalışmaların sonucunu göstermektedir.

Tablo 2.9. MC'nin çimento karışımındaki hidratasyonun üzerine etkileri (Cao ve diğerleri, 2019)

Yazar (Tarih)	Bağlayıcı Türü		Partikül Boyutu (μm)		Blaine İnceliği (cm^2/g)		Ana Etki mekanizması
	İçerik Oranı (wt.%)	Hacimsel Oran (vol. %)	Kireçtaşı Tozu	Portland Çimentosu	Kireçtaşı Tozu	Portland Çimentosu	
Bonavetti ve diğerleri, 2001	20% KT + (80%) PÇ	-	$D_{61} = 13.2$	$D_{90} = 26.6$	7100	2850	Kimyasal Etki
Poppe ve diğerleri, 2005	(0-67%) KT+ (33-100%) PÇ	-	$D_{50} \approx 10$	$D_{50} \approx 17$ (CEM I 42.5R); $D_{50} \approx 18$ (CEM I 52.5); $D_{50} \approx 10$ (CEM I 52.5 HSR LA)	5260	2810 (CEM I 42.5R); 2860 (CEM I 52.5); 4180 (CEM I 52.5 HSR LA)	Çekirdeklenme Etkisi, Kimyasal Etki
Ye ve diğerleri, 2007	(33-43%) KT + (57-67%) PÇ	-		-	5260	4200 (CEM I 52.5)	Çekirdeklenme Etkisi
Lothenbach ve diğerleri, 2008	PC4: (4%) KT + (96%) PÇ	-	Ortalama Partikül Boyutu=4	-		4130 (PÇ); 4290 (PC4)	Kimyasal Etki
Weerdt ve diğerleri, 2011	(0-5%) KT + (0-35%) UK + (65-100%) PÇ	-	$D_{50} = 4$	$D_{50} = 11$	8100	4500	Kimyasal Etki
		(0-10%) KT +	D_{50} (Kireçtaşının ortalama)	D_{50}			Çekirdeklenme

Bentz ve diğerleri, 2012	-	(30–40%) UK + (55–100%) PÇ	partikül boyutu) = 4.4, 16.4; Nano-LS (nm): 50–120	(ortalama partikül boyutu) \approx 20	-	4760	Etkisi, Kimyasal Etki
Vance ve diğerleri., 2013	-	(0–40%) KT + (0–10%) UK/MK + (50–100%) PÇ	D ₅₀ (ortalama partikül boyutu) = 0.7, 3, 15	D ₅₀ \approx 10	-	-	Çekirdeklenme Etkisi (0.7 ve 3 μ m KT); Kimyasal Etki
Zajac ve diğerleri., 2014	%15 oranında kireçtaşı içeren laboratuvar çimentosu, %1, %3, %9 oranlarında kireçtaşı içeren ticari çimento	-	D ₅₀ = 8 (Laboratuvar çimentosu içindeki kireçtaşı)	-	7000 (Laboratuvar çimentosu içindeki kireçtaşı)	-	Çekirdeklenme Etkisi, Kimyasal Etki
Thongsanitgarn ve diğerleri, 2014	(0–30%) KT + (0–30%) UK + (70–100%) PÇ; (0–15%) KT + (85–100%) UK	-	Maksimum partikül büyüklüğü: 5.20	-	-	-	Çekirdeklenme Etkisi, Kimyasal Etki (5 μ m); Seyreltme Etkisi (20 μ m)
Bentz ve diğerleri., 2015	0–10%) KT + (0–20%) UK+ (75–100%) PÇ	-	D ₅₀ = 1.58 (İnce KT); D ₅₀ = 15.7 (İri KT); D ₅₀ = 7.11 (Mermertozu); D ₅₀ = 3.09 (Sturcal F); D ₅₀ = 1.59 (HT Sturcal F)	D ₅₀ = 10.6 (CEM III); D ₅₀ = 9.85 (Beyaz Çimento); D ₅₀ = 11.9 (CEM I/II)	-	4810 (CEM III); 3970 (Beyaz Çimento); 3730 (CEM I/II)	Çekirdeklenme Etkisi (ince KT ve kalsit KT) Kimyasal Etki (ince KT); Seyreltme Etkisi (ince ve iri KT)

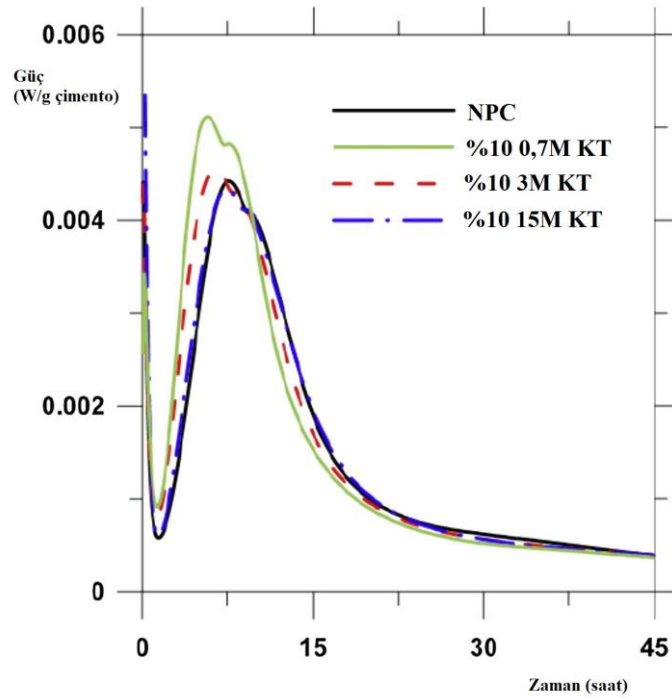
Mikronize kalsitlerin çimentoya ilavesiyle hazırlanan karışım ile normal PÇ ile elde edilen karışımın ısı gelişim eğrisi arasında önem arzedecek farkın olmadığı Thongsanitgarn tarafından 2014'te yapılan çalışmada Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Normal PÇ ile elde edilen karışımın maksimum hidrasyon ısı 3,0 Mw/g olduğu ve kireçtaşının arttırılmasıyla değerin azaldığı görülmüştür. MC parçacıkları ilave edilen karışımların 48 saatlik hidrasyon ısı değerinin normal portland çimentosu ile elde edilen değerden daha düşük olduğu Şekil 2.16'da görülmektedir ve de kireçtaşı miktarının artmasına paralel olarak azalma meydana gelmektedir (Thongsanitgarn ve ark., 2014).



Şekil 2. 16. Kontrol numunesi ile beraber ortalama 20 μm boyutundaki kireçtaşı tozu içeren karışımların a) ısı gelişim eğrisi b) toplam hidrasyon ısı (Thongsanitgarn ve diğerleri, 2014)

Partikül boyutu:

MC'nin partikül boyutu karışımın fiziksel (filler, seyreltme ve çekirdeklenme etkisi) ve kimyasal özelliklerini etkiler. Çimentolu karışımlarda çimentonun boyutundan daha büyük kireçtaşı tozu kullanılırsa MC'nin ana etkisi filler etkisi olur. MC alkali ortamda kum ve iri agregalar arasında bulunan boşluğu doldurabilir ve hidrasyon sürecine katılamayabilir. Ama çimento tanelerinden daha ince MC eklendiğinde hidrasyon ısını, ısının salınım hızını ve hidrasyon ürünlerinde farklılık gösterir. Yapılan bir çalışmada çimento hidrasyonunda kireçtozu parçacıklarının boyutu araştırılmış ve üç farklı boyutta kireçtaşı tozu kullanılmış olup Şekil 2.17'de görüldüğü gibi ortalama parçacık boyutu en küçük olan kireçtaşı kullanımıyla kalsiyum silikatın hidrasyon sürecini hızlandırmış ve hidrasyon zirversini artırmıştır (Vance ve diğerleri, 2013). Bu durumda ince olan kireçtaşı tozunun büyük özgül alanı ve yüzey enerjisine sahip olduğu ve bu özelliklerin çekirdeklenme etkisi olarak bilinen C-S-H oluşumu ve iyileştirilmesi için ek çekirdeklenme alanı sağlamıştır (Poppe ve Schutter, 2005; Ye ve diğerleri, 2007; Bentz ve diğerleri, 2015; Thongsanitgarn ve diğerleri, 2014; Vance ve diğerleri, 2013; Zajac ve diğerleri, 2014).



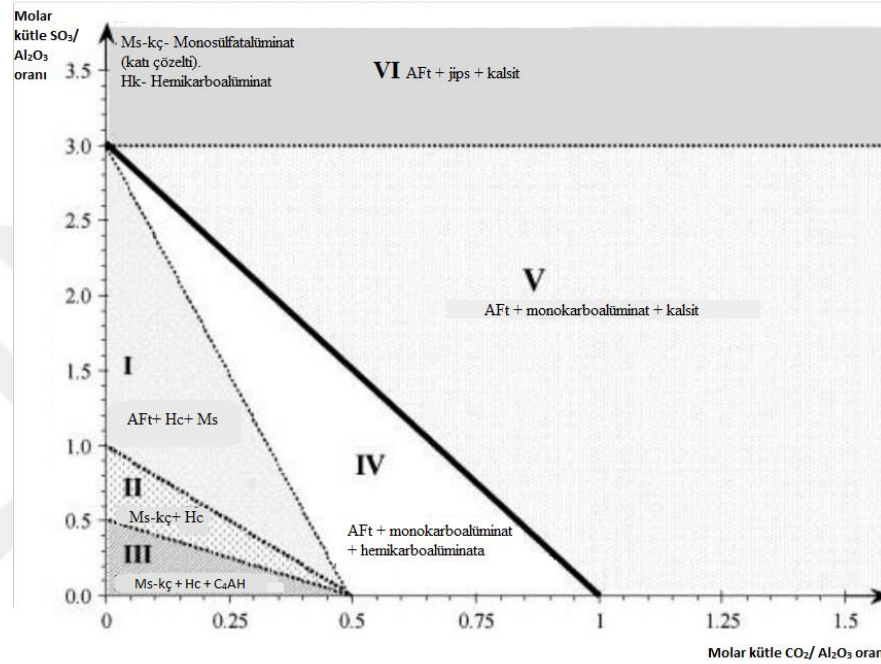
Şekil 2.17. 3 farklı partikül boyutu ile ısı salınım hızı arasındaki etki (Vance ve diğerleri, 2013)

Hazırlanan çimentolu karışımlarda biraz daha büyük partikül boyutu yaklaşık olarak 15 μm - 27 μm aralığından kullanılırsa sereltme etkisi ön plana çıkar (Vance ve diğerleri, 2013; Thongsanitgarn ve diğerleri, 2014; Bentz ve diğerleri, 2015). Karışımda kireçtaşı tozunun büyük olduğu karışımda ısı yayma oranı normal portland çimentosunununkinden yüksek olduğu biliniyor fakat toplam hidrasyon ısı Şekil 2.17'de gösterildiği gibi daha düşük olabilmektedir (Vance ve diğerleri, 2013).

İçeriği:

MC'nin içeriği çimento hidrasyonu üzerinde ana etki mekanizmalarından biridir. Çimentolu karışımda MC'nin içeriği artınca çekirdeklenme etkisinde artar sebebiyse C-S-H jellerinin ve akümülatif hidrasyon için yeni çekirdeklenme bölgelerinin sağlanabilmesidir. Çekirdeklenme bölgesi artınca ısı yayma oranında artar. MC içeriğinin kimyasal etki üzerindeki etkileri; hemi ve mono karboalüminat oluşumu esas olarak kinetiğine bağlı olması ve kalsiyum karbonatın çözünme oranının az olup çimentodaki alüminat içeriğinin de düşük olmasıdır (Zajac ve diğerleri, 2014). Yapılan başka bir çalışmada Şekil 2.18'de görüldüğü gibi MC'nin kimyasal etkileri tespiti için bazı nicel bağlar ile kimyasal tepkime denklemlerine göre hesaplanabilir (Matschei ve diğerleri, 2006). I., II. ve III. Bölgelerin kesikli çizgilerle ayrılması bölgelerdeki

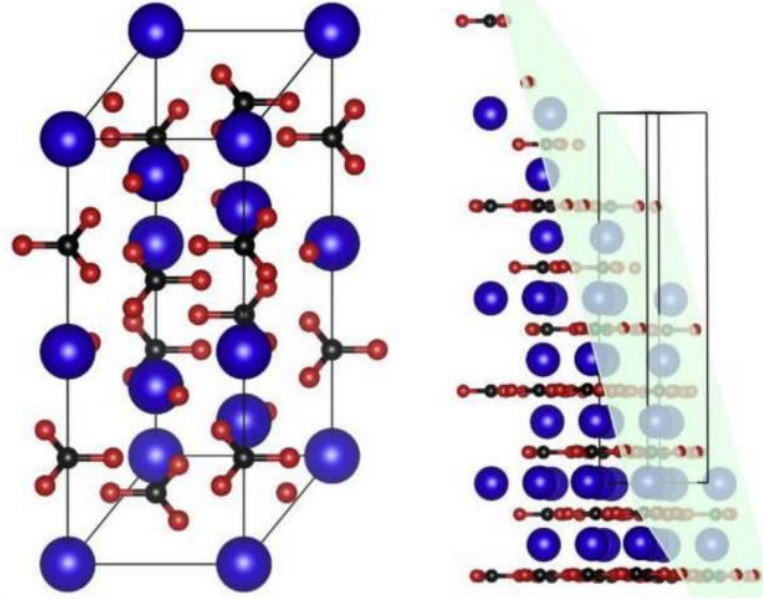
hidratların yarı kararlı fazlar olduğunu gösterir ve bölgelerdeki sınırlara göre karboalüminat içeriği sülfatın, karbonatın ve alüminatın içeriğinden etkilenmiştir. I. ve IV. bölgelerde kalsit yoktur bu da mevcuttaki kalsitin tamamen kalsiyum karbonat ve trikalsiyum alüminat (C_3A) ile reaksiyonuna girdiğini gösterir. Ancak V. ve VI. bölgelerde kalsitin çimento danelerinin arasındaki boşluğu doldurmak için dolgu görevi görür. Seyreltme etkisi MC'nin içeriğinin fazla olduğu durumda artış (Wang ve diğerleri, 2018).



Şekil 2. 18. 25 °C'de C_3A , $Ca(OH)_2$ ve değişen sülfat (SO_3/Al_2O_3) ve karbonat oranlarından oluşan hidratlı bir karışımın hesaplanan faz toplulukları (molar birimler) (Matschei ve diğerleri, 2007)

Kristal Yapısı:

Kireçtaşı tozlarının değişik kristal yapılarına sahip olması hidrasyon üzerindeki etkileri değiştirebilir. Yapılan bir çalışmada Aragonit ve kalsitin çimento hidrasyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır; kalsitin hidrasyon tepkimelerini hızlandırdığı görülürken aragonitin hızlandırdığı görülmemiştir. Kalsitin düzlemsel konfigürasyonunu Şekil 2.19'da görmekteyiz. C-S-H jelindeki CaO yüzeyine benzer olan Ca ve O atomlarıyla meydana gelir. (Bentz ve diğerleri, 2017). Aragonitin ise yüzeyinde Ca atomu tek mevcuttur. Ama kalsitin hidrasyon sürecini geliştirmede aragonite benzer olan çözünme süreci kimyasal etki sürecinde farklı olmayabilir (Bentz ve diğerleri, 2015).



Şekil 2. 19. Soldaki şekil kalsitin birim hücre görünümünü gösterir sağdaki ise düzlemdeki görünümünü gösterir Görselliğin daha iyi kavranabilmesi için atom yarıçaplar büyütülmüştür (Ca: büyük mavi yuvarlaklar, C: küçük siyah yuvarlaklar ve O: küçük kırmızı yuvarlaklar olarak gösterilmiştir) (Bentz ve diğerleri, 2017)

MC'nin İşlenebilirliği

Tazen betonun işlenebilirliği kullanılan malzemelerin parçacık boyutu, içeriği ve yüzey yapısı ile ilişkilidir. Kireçtaşı tozunun parçacık boyutlarını ne kadar düşürürsek o kadar viskozitesinde artışlar meydana gelir ama parçacık boyutları çimento danelerinin boyutlarından büyük olursa filler etkisi göstereceğinden çimento taneciklerine eşit veya daha küçük parçacıklı kireçtaşı tozu eklenmelidir (Felekoğlu, 2017). Yapılan çalışmalarda ortalama tane boyutu 20 μm 'dan küçük olarak ilave edilmiş kireçtaşı tozlarıyla hazırlanmış olan kendiliğinden yerleşen betonun ayrışma direncinin ve işlenebilirliğinin artması gözlemlenebilir (Felekoğlu, 2017; Bosiljkov; 2003; Lertwattanaruk ve diğerleri, 2017). Felekoğlu tarafından 2017'de yapılan çalışmaya göre Blaine inceliği $4430 \text{ cm}^3/\text{g}$ olan kireçtaşı tozunun yayılma akışını düşürdüğünü ve daha ince $5380 \text{ cm}^3/\text{g}$ 'lik Blaine değerine sahip olan kireçtaşı tozunun yayılma akışı artmıştır. Kireçtaşı tozunun saflığıda taze karışımda işlenebilirliği etkileyebilir (Chowaniec, 2012).

MC'nin Mekanik Özellikleri

Çimentolu karışımlarda ilave edilen MC'nin parçacık boyutu, içeriği ve de yüzey yapısından mekanik özellikleri etkilenir. Kireçtaşı tozunun parçacık boyutu azaldıkça erken yaş dayanımının arttığı gözlemlenmiştir (Kenai ve diğerleri, 2004; Vance ve diğerleri, 2013; Bosiljkov, 2003, Lertwattanaruk ve diğerleri, 2018). Ama ileri yaşlarda basınç dayanımını düşürebilir çünkü seyreltme etkisi hidrasyon işleminin sonlarında filler ve çekirdeklenme etkisinden daha etkili olabilir (Kenai ve diğerleri, 2004). Kireçtaşı tozunun içeriğinin artırılmasıyla eğilme basınç dayanımında azalmalar meydana gelebilir (Kenai ve diğerleri., 2004; Vance ve diğerleri, 2013; Bosiljkov, 2003, Lertwattanaruk ve diğerleri, 2018, Turk ve Nehdi, 2018). İlave edilen kireçtaşı tozunun bağlayıcılığı bulunmadığından ve kireçtaşı tozunu arttırdığımızda çimento miktarı azalacağından mukavemetin düşebilir. İçerik değişim oranı artınca seyreltme etkisi kendini daha fazla gösterir ve s/ç oranını artırarak düşük dayanıklılığa sebebiyet verir.

MC'nin Dayanıklılığı

Beton yapı malzemesi olarak çok kullanıldığından bazı durumlarda asit hücumuna maruz kalabilir. Hidrasyon işleminde üretilmiş olan Ca(OH)_2 asit iyonlarıyla tepkimeye girip ağırlık kaybı meydana getirebilir buda mukavemetin düşmesine sebebiyet verebilir. Çimento karışımlarına ilave edilen kireçtaşı tozu ağırlık kaybını düşürebilir (Lertwattanaruk ve diğerleri, 2018; Ghrici ve diğerleri, 2007). MC'lerin çimento karışımındaki oranı arttırılırsa veya parçacık boyutları düşürülürse oluşturulan karışımda Ca(OH)_2 miktarı azalacağından asit hücumuna karşı direnç sergileyebilir ve de daha ince kullanılan kireçtaşı tozu filler etisiyle yoğun karışım sağlayabilir (Lertwattanaruk ve diğerleri, 2018).

Yapılan bazı çalışmalarda kireçtaşı tozu ilave edilmiş çimento karışımlarında yüksek sıcaklığa karşı direnci düşürebilir bunun nedeni 800-900 °C'lerde kalsiyum karbonatın ayrışması olup basınç dayanımını ve ultra ses dalga geçiş hızını azaltabilir (Arioz, 2007; Ma ve diğerleri, 2015).

Yapılan çalışmalarda MC'nin filler etkisi haricinde parçacık boyutu, içeriği ve kristal yapısının hidrasyon sürecini etkilediğini görmekteyiz. Betonun taze haldeyken işlenebilirliği MC'nin filler etkisi, parçacık boyutu ve içeriğinden etkilendiğini

görmekteyiz. MC'nin Hidratasyon sürecini ve işlenebilirliği etkilediği için karışımın mekaniğini ve dayanıklılığında etkilediğini söyleyebiliriz.

Kısaca yapılan literatür taramasında MC ile NC arasındaki farkları özetlersek: hem MC hem NC'de filler etkisi, seyreltme etkisi, çekirdeklenme etkisi ve kimyasal etki ile hidratasyon sürecini, işlenebilirliği, mekaniği ve dayanıklılığı etkileyebilir. Bu özellikler kireçtaşının hem nano boyuttaki hemde mikronize boyuttaki içeriğinden, parçacık boyutundan ve morfolojisinden etkilendiğini görmekteyiz. Yapılan çalışmalarda NC'nin i MC'ye göre daha etkili olduğu görülmekte olmasına rağmen NC'nin matris içindeki birikme durumu MC'den fazla olduğu gözlemlenmiş olup bunun nedeni NC'nin yüksek yüzey enerjisi ve daha geniş alana sahip olduğudur (Cao ve ark., 2019).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Genelde kayaçlar konusunda yapılan araştırmalar bazı aşamalardan oluşmaktadır. İlgili aşamalardan birincisi örneklerle ön fizibilite çalışması yapmak ve fizibilite çalışmasından toplanan bilgilerle ayrıntılı bir planlama yapmak ve ilgili planlama dahilinde kayaçlarla ilgili çalışmaları gerçekteştirmektir (Ulusay ve Hudson 2007).

Perlit madeni yatakları ÷lkemizde bol miktarda bulunduğunu ve yüzeyde bulunmasından dolayı kolay bir şekilde çıkarılıp işletildiğini, kayaçların bulunduğu yerleri, rezerv miktarlarını ve ÷lkemizdeki bazı işletmeleri literatür taraması kısmında açık bir şekilde belirttik. Tez çalışmamızda doğal puzolan olan perlitin çimento hamuruna ikame edilerek çimentoya etkilerini detaylı bir şekilde irdeleyeceğiz. Bu bölümde ilgili deneylerde kullandığımız materyaller sırasıyla; çimento, perlit, agregalar, kimyasal katkılar ve nano malzemelerdir.

3.1.1. Çimento

Tez kapsamında üretilen tüm karışımlarda ve deneylerde ÇİMSA tarafından üretilen Beyaz Portland Çimentosu (BPC) kullanıldı. BPC EN 197-1 (2012) standartına uygundur. Karışımlarda BPC'nin CEM I 52.5 R tipi kullanıldı. BPC dünyada birçok ÷lkede tercih edilmesi ile Türkiyede diğer çimentolara göre yüksek dayanımlıdır. Üstün dayanım karakteristiği ile gri çimentolara kıyasen erken dayanım vermekte ve özellikle prekast üreticileri BPC'yi tercih eder. Yapı kimyasalları sektöründe yüksek yapışma mukavemeti ile renginin beyazlığı nedeniyle tercih edilir. Deneylerde kullanılan BPC'nin özgül ağırlığı $3,09 \text{ gr/cm}^3$, Blaine (özgül yüzey alanı) değeri $4412 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olarak bulunmuştur. BPC'nin kimyasal bileşenleri Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. Beyaz portland çimentosu ve deneylerde kullanılan nano malzemelerin kimyasal bileşenleri

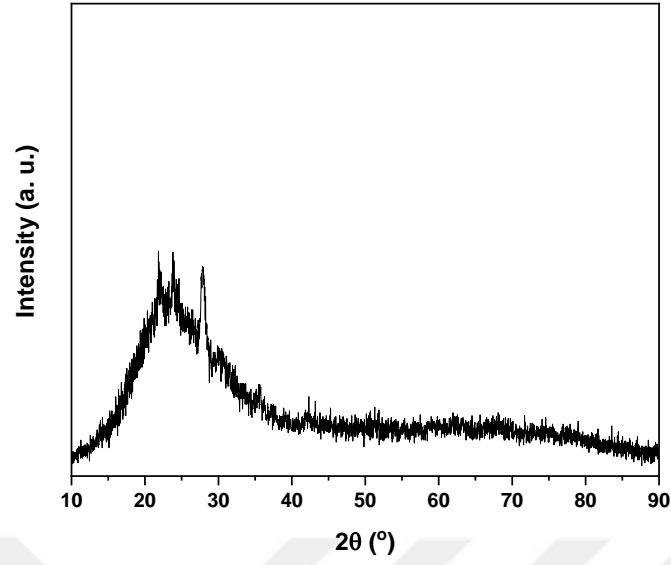
Kimyasal Kompozisyon	Beyaz Çimento	Nano Kalsit	Mikronize Kalsit
CaO (%)	65,7	55,4	55,98
SiO ₂ (%)	21,6	0,4	0,28
Al ₂ O ₃ (%)	4,05	0,03	0,19
Fe ₂ O ₃ (%)	0,26	0,05	0,02
MgO (%)	1,3	0,5	0,75
SO ₃ (%)	3,3	0,04	0,03
K ₂ O (%)	0,77	0,01	-
Na ₂ O (%)	0,19	0,03	-
Kızdırma Kaybı (%)	3,2	43,5	42,75
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	25,9	0,48	0,49
BET Yüzey Alanı, m ² /kg	-	7,4	3,45
Özgül Yüzey Alanı, cm ² /gr	4412	-	-

3.1.2. Genleştirilmiş Perlit

Bu araştırmada kullanılan genleştirilmiş perlit İper İnş. San. Ve Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Genleştirilmiş perlit Fernas Çimento Öğütme Tesisi (FERÇİM)'de yardımıyla ASTM standartlarına uygun olarak öğütülmüştür. Çalışmada kullandığımız genleştirilmiş perlitin kimyasal bileşenleri Tablo 3.2. de verilmiştir. Perlitin XRD analizi Şekil 3.1. de verilmiştir.

Tablo 3.2. Perlitin kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşen	Perlit
SiO ₂	75.93
Al ₂ O ₃	9.67
Fe ₂ O ₃	1.16
CaO	0.55
MgO	0.04
Na ₂ O	0
K ₂ O	5.2
SO ₃	0.05



Şekil 3. 1. Perlitin XRD kristal yapı diyagramı

3.1.3. CEN Standart Referans Kumu

Üretilen karışımlarda TS EN 196-1 standartına uygun Resim 3.1’de gösterilen CEN standart kumu kullanılmıştır. Kumun elek analizi Tablo 3.3 de verilmiştir.



Resim 3.1. CEN Standart Kumu

Tablo 3.3. CEN standart kumu elek analizi

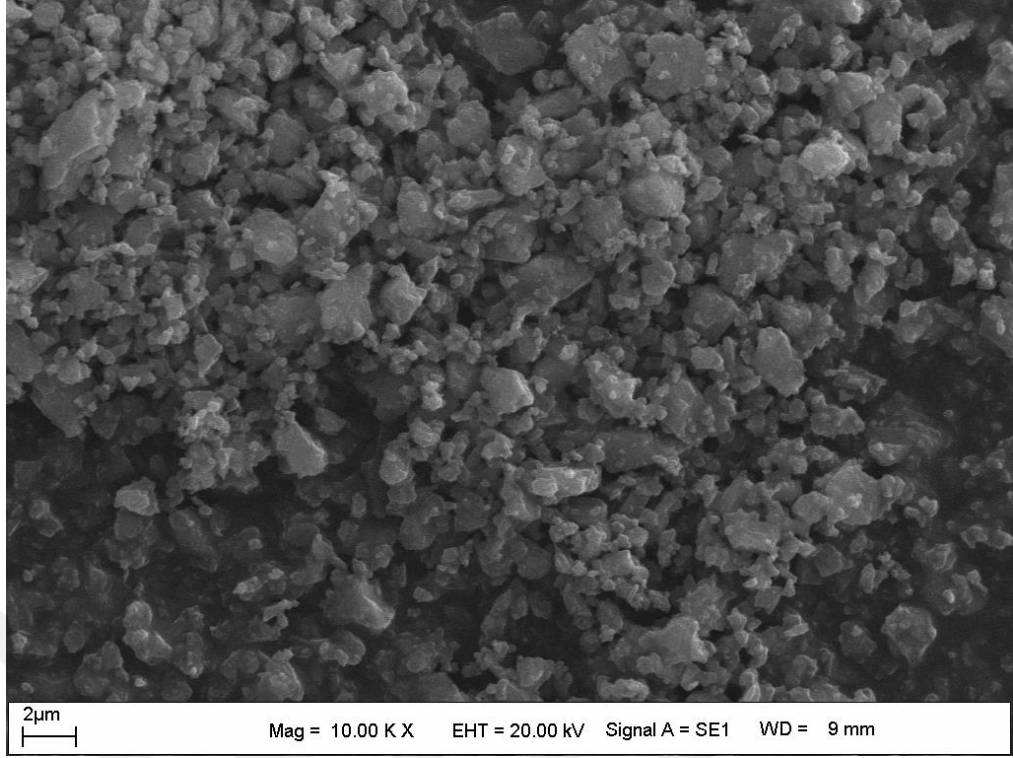
Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)
2.00	0
1.60	7
1.00	33
0.50	67
0.16	87
0.08	99

3.1.4. Kimyasal Katkılar

Ayrışmaya sebebiyet vermeden ve su/çimento oranını artırmadan işlenebilirliği artırmak için yüksek oranda su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı (SA) beton katkısını kullanmaya ihtiyaç doğmuştur. Bu yüzden hazırlanan karışımlarda TS EN-934-2: T3.1/3.2/7 standartlarına uygun MasterGlenium 51 BASF Türk Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti tarafından temin edilmiştir. MasterGlenium 51 teknik özellikleri: ph değeri 6-7, özgül ağırlığı 1,082-1,142 kg/lt, görünümü kahverengidir.

3.1.5. Nano Kalsit

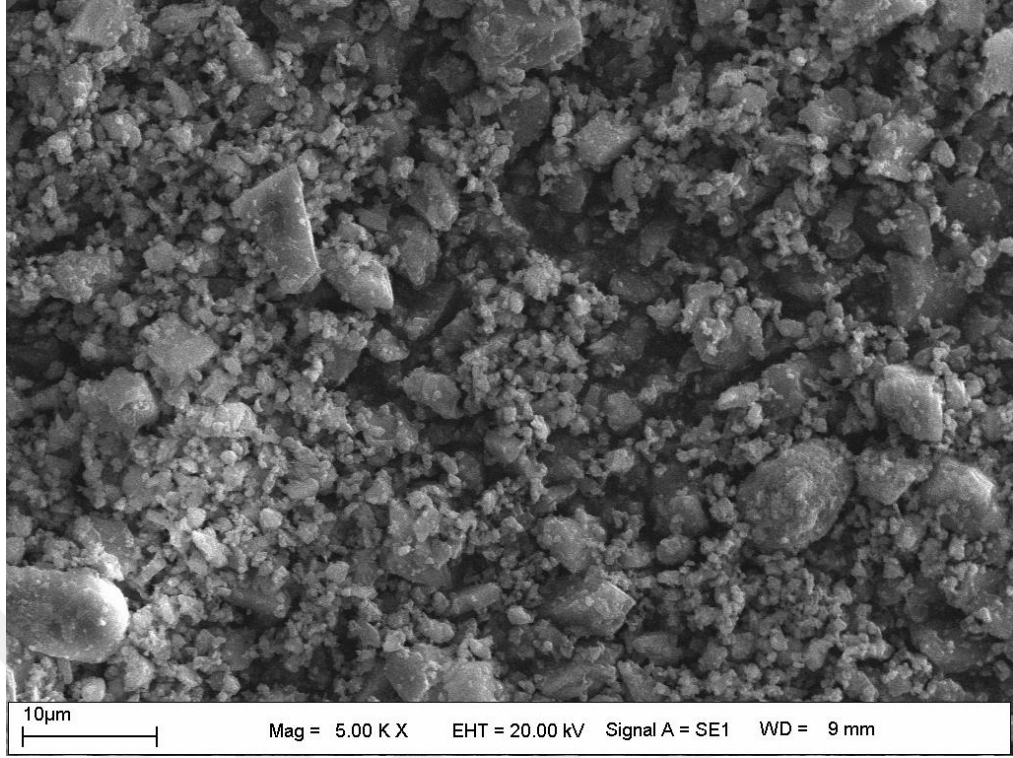
Mevcut çalışmada kullanılan nano boyutlu kalsit Niğde ilimizde bulunan Niğtaş A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Kimyasal analizi Tablo 3.1’de verilmiştir. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüsü aşağıdaki resimde gösterilmiştir.



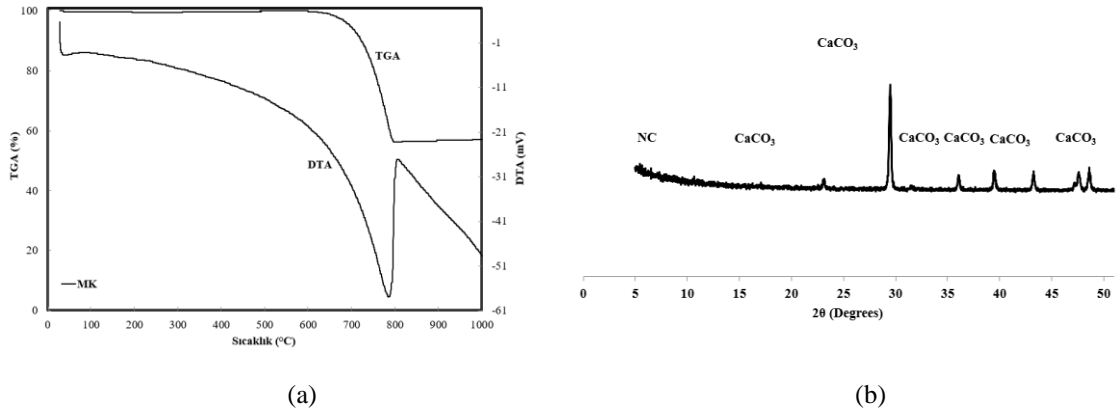
Resim 3.2. Nano CaCO₃ Geçirimli Elektron Mikroskop Görüntüsü

3.1.6. Mikronize Kalsit

Fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1’de verilen Mikronize Kalsit (MC) Niğtaş A.Ş.den alınmıştır. MC’ye ait SEM görüntüsü ve TGA/DTA&XRD analizi sonuçları sırasıyla Resim 3.3 ve Şekil 3.2’de verilmiştir.



Resim 3. 3. Mikronize kalsit SEM görüntüsü



Şekil 3. 2. Mikronize kalsitin (a) TGA-TDA eğrisi ve (b) XRD kristal yapı diyagramı

Şekil 3.2. a'da görüldüğü gibi TGA/DTA analizinden elde edilen sonuçlara göre MC'nin beklenen tipik majör zirvesi yaklaşık olarak 800 °C'de tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.2. b'de görüldüğü gibi XRD diyagramında ağırlıklı olarak kalsit kristal fazına sahip olduğunu XRD diyagramında elde edilen sonuçlarda kalsit zirvelerinin daha

küçük zirvelerde olduğu gözlemlenmiştir (Wang ve diğerleri, 2006; Yang ve diğerleri, 2008).

3.1.7. Karışım Suyu

Karışım suyu Batman su şebekesine ait içme suyu kullanılmış olup Batman Üniversitesi yapı laboratuvarında bulunan ölçekli cam deney tüpleri kullanılarak çimento malzemesine ilave edilmiştir.

3.2. Deneysel Çalışma

Tez çalışmasındaki 9 farklı karışımın üretimi, deneyleri ve gözlemlenmesi Batman Üniversitesi Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜMER) İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında yapılmıştır.



Resim 3.4. Çalışmalarımızın hazırlandığı Yapı Malzemeleri Laboratuvarı

Deneysel çalışma başlığını karışımların hazırlanması ve laboratuvar deneyleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanıp yazılmıştır.

3.2.1. Karışımların Hazırlanması

Karışımların üretimleri sırasında kullanılacak olan malzemelerin hem kimyasal hem de fiziksel özellikleri materyal kısmında detaylı bir şekilde verilmiştir. Tez çalışmasında üretilen 9 karışımın içeriğindeki malzeme oranları Tablo 3.4. te verilmiştir. Bu karışımlar Resim 3.5.te görüldüğü gibi değirmende harlanıp standartlara uygun olan karışım hazırlama kabında üretilip gözlemlenmiş ve deney için hazırlanmıştır.



Resim 3.5. Malzemeleri harmanladığımız değirmen ve karışım hazırlama kabı

Üretilen çimento hamurlarını yağlanmış olan ebatları 40 mm x 40 mm x 160 mm prizma şeklindeki kalıplara doldurularak sarsma cihazında TS EN 196-1 standartlara uygun bir şekilde sıkıştırılıp yüzeyini spatula ile düzleştirdik. Kalıplardan numune sökümünü 24 saat sonra Resim 3.6.te görüldüğü gibi çıkardık.



Resim 3.6. Numunelerin Kalıptan Sökülmesi

Kalıplardan sökülen numuneler Resim 3.7.da görüldüğü gibi kür havuzunda bekletilip 7, 28, 120 gün sonunda upv testi ve basınç dayanımları için hazır hale getirilmişlerdir.



Resim 3.7. Kür havuzunda bekletilen numunelerimiz

Tablo 3.4.e baktığımızda ilk 3 karışımımız kontrol numunesi olarak kullanılmış olup karışıma perlit ilave edilmemiştir. İlk 3 karışımında sadece nano malzemelerin tane boyutları değişkenlik göstermiş olup diğer değişkenler sabit tutulmuştur. Tablo 3.4. teki 4-5-6 nolu karışımlarda perlit oranı çimento oranının %6'sına denk gelecek şekilde hazırlanmış olup aynı zamanda nano malzemelerinde değişken olarak kullanıldığı karışımlardır. Tablo 3.4. teki 7-8-9 nolu karışımlarda da perlit oranı çimento oranının %18'ine denk gelecek şekilde hazırlanmış olup aynı zamanda nano malzemelerinde değişken olarak kullanıldığı karışımlardır.

Karışım malzeme oranlarının verildiği Tablo 3.4'te görüldüğü gibi 9 karışım harf ve sayılardan oluşmuş bir notasyon ile gösterilmiştir ve karışımlardaki bileşenler de verilen yüzdelere göre ağırlıkça olarak karışımlara dâhil edilmiştir. Hazırlanan notasyonlar ile karışımlarda kullanılan malzemelerin oranları daha rahat bir şekilde aksettirilmiştir. Örnek vermek gerekirse C100_PER0 kodlu karışımda Çimento miktarı

%100, perlit miktarı %0 ve kalsit miktarı %0 olarak kullanıldığını görmekteyiz. Tüm karışımlarda kullanılan harflerin karşılıkları:

- **SA:** Kimyasal Katkı oranı
- **C:** Çimento oranı
- **PER:** Perlit oranı
- **MC:** Mikronize kalsitin (MC) oranını göstermektedir (Tablo 3.4. te detayları verilmiştir).
- **NC:** Nano kalsitin (NC) oranını göstermektedir (Tablo 3.4. te verilmiştir).

Tablo 3.4. Karışımlarda kullanılan malzeme oranları (Ağırlıkça, %)

Mix #	Karışım Kodu*	CEM I, %	Perlit, %	Su/Çimento Oranı	NC, %	MC, %	SA, gr
1	C100_PER0	100	0	0,5	-	-	-
2	C100_PER0_MC	95	0	0,5	-	5	-
3	C100_PER0_NC	95	0	0,5	5	-	-
4	C94_PER6	94	6	0,5	-	-	0,16
5	C94_PER6_MC	89	6	0,5	-	5	0,19
6	C94_PER6_NC	89	6	0,5	5	-	0,23
7	C82_PER18	82	18	0,5	-	-	1,37
8	C82_PER18_MC	77	18	0,5	-	5	1,55
9	C82_PER18_NC	77	18	0,5	5	-	1,55

* Karışımların notasyonunda gösterim olarak rahatlık olsun diye bağlayıcı malzeme yerine ikame edilen NC ve MC oranları gösterimde çıkarılmamıştır ama ikame edilen oran kadar bağlayıcı malzemeden üretim aşamasında çıkarılmıştır.

3.2.2. Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneylerinde çimento karışımlarında değişken olarak kullanılan geliştirilmiş perlit ve kalsit minerallerine göre harçların numunelerinin yayılma çapı, kıvam ve priz süreleri, UPV testleri (7, 28, 120 günlük), basınç dayanımları (7, 28, 120 günlük) ve Le Chatelier genleşme-hacim değişimi deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1. Yayılma Çapı Deneyi

Hazırlanan karışımların sahip oldukları kıvamı (işlenebilirliği) öğrenmek için TS EN 1015-3 standartına uygun bir şekilde laboratuvar ortamında Resim 3.8.de gösterilen yayılma tablası deneyini gerçekleştirdik. Deneyin yapılışı: karıştırma kabından aldığımız harcı yayılma tablası üzerindeki kalıba yarısı dolacak şekilde yerleştirdik

ardından tokmak ile Resim 3.5.te görüldüğü gibi 25 kez vurduk sonra kalıbın diğer kısmı doldurup tekrar 25 kez vurduk. Kalıbın üst yüzeyini mala yardımı ile temizleyip düzelttikten sonra kalıbı çıkardık. Deney aletinin kolu standartta belirtildiği gibi saniyede 1 kez çevirmek üzere 25 sefer çevirdik ve yayılan harcın çapını 2 farklı eksende kumpas yardımı ile ölçüp 2 değerın ortalamasını aldık. Aynı işlemi tüm karışımlarımız için uyguladık ve kayıt altına aldık. Sonuçlarını bölüm 4'te değerlendirdik.

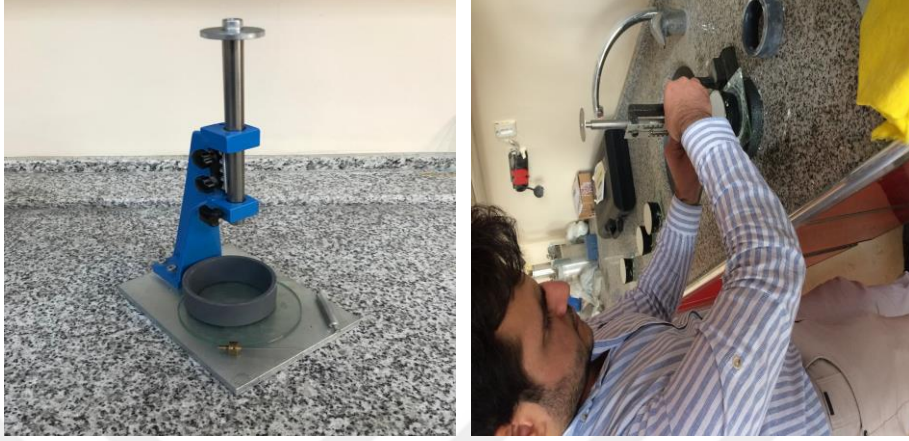


Resim 3.8. Yayılma tablası cihazı

3.2.2.2. Kıvam Suyu ve Priz Süreleri Deneyi

Çimento hamurunun normal kıvama gelmesi için kıvam suyu miktarı vicat deneyi ile belirlenir. Deney, TS EN 196-3'e göre yapılmıştır. Deneyin yapılışı: çimento hamurunu vicat deneyini gerçekleştirmek için cihazda bulunan halkayı ve cam yüzeyi yağladıktan sonra halkayı harç ile doldurup spatula yardımı ile yüzeyini temizledik. Deney için vicat cihazında bulunan iğneyi taban plakasının üzerine kadar indirip ölçekli göstergeyi sıfır okunacak şekilde ayarladık. İlk etapta standartta belirtildiği gibi 125 gr su ile başladık ve akabinde normal kıvamı yakalayana kadar su miktarını azar azar artırdık. Sondayı kendi ağırlığında bırakıp çimento harcına batmasını gözlemledik. Dört dakika serbest bırakılan iğne çimento hamurunda normal kıvam için 5 ile 7 mm arasına kadar batmış olması gerekir. Resim 3.9.de görüldüğü gibi vicat cihazı ile kıvam suyu tayini ve priz süreleri tayinini gerçekleştirdik. Normal kıvama gelene kadar su

miktarlarını tüm karışımlarımız için ayrı ayrı kaydettik. Hazırlanan harcın normal kıvamda olabilmesi için ne kadar su içermesi gerektiğini vicat aleti yardımıyla belirlemiş olup sonuçları Bölüm 4’te değerlendirdik.



Resim 3.9. Kıvam suyu ve priz başlangıcı-sonu için kullanılan Vicat cihazı

Priz süresi deneyi için de TS EN 196-3 standardı uygulanarak vicat cihazından yararlanılır. Vicat cihazına takılmış olan iğneyi taban plakasının üzerine indirip ölçekli göstergiyi sıfıra ayarladık. Sonra iğneyi yukarı kaldırıp sabitledik. Vicat kalıbını standart kıvamdaki çimento hamuru ile doldurup spatula yardımı ile düzelttik. Vicat iğnesi kalıptaki çimento yüzeyine temas edinceye kadar yavaşça indirilip sabitledik ve kolu serbest bırakıp çimento hamuru içindeki ilerlemesini gözlemleyip okuma yaptık. İğne ile taban plakası arasındaki mesafe 4 ± 1 mm oluncaya kadar geçen süre hesaplanıp priz başlangıç süresi olarak kaydettik. Sonra priz sonu süresini tayin etmek için kalıbı ters çevirdik. Priz sonu süresi için üretilen iğneyi taktıktan sonra standartlarda belirli olan yarım saatte bir iğneyi serbest bırakarak 0,05mm’ye kadar battığı an priz sonu süresi olarak kaydedip sonuçları Bölüm 4’ te değerlendirdik.

3.2.2.3. Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyi

Hazırlanan karışımların 7, 28, 120 gün sonundaki basınç dayanımlarını ölçmeden önce ultrasonik geçiş hızı (UPV) test cihazı ile alıcı ve verici arasından geçen ultrases dalgalarını ölçtük. UPV cihazının gösterdiği sonuçlar ile çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımı hakkında direkt bir ilişki yoktur. Fakat çimento esaslı malzemelerin mikroyapısal yoğunluğunu gösterir. Yoğunluğu az yani boşlukları fazla olan bir numunede ultrasesin numunenin bir yüzeyinden diğer yüzeyine ulaşma süresi daha uzundur. Deneyin yapılışı: numunelerin yüzeyleri pürüzsüz hale getirildi ve ölçümleri yapılırken numunenin altına bir aparat yerleştirdiğimiz sensörler aynı seviyelere gelsin ve doğru sonuç alalım. Ölçülecek alanlara önce özel bir jel sürdük Resim3.10.da görüldüğü gibi akabinde cihazda bulunan sensörleri yerleştirip ölçümlerimizin sonucunu kaydettik ve numunenin yoğunluğu hakkında bilgi aldık ve Bölüm 4'te değerlendirdik.



Resim 3.10. Ultrasonik geçiş hızı (UPV) test cihazı

3.2.2.4. Le Chatelier Deneyi

Hazırlanan karışımlarda çimento hamuru içeriğinde fazla miktarda serbest kireç (CaO) veya magnezyum oksit (MgO) bulununca genişleme sebebiyet vermektedir. Çimentonun içerisindeki serbest kireç ve magnezyum oksitin su ile reaksiyonları çimento hamuru veya beton sertleştikten aylar sonra meydana geldiğinden genişleme iç gerilmelere ve çatlaklara sebebiyet vermektedir bu yüzden genişleme tespitini Le Chatelier cihazı yardımıyla TS EN 196-3 standartına uygun bir şekilde gerçekleştirdik. Deneyin yapılışı: deney için kıvam tayinindeki su oranlarıyla karışım hazırlandı.

Hazırlanan karışımdan iki adet numune alıp yağladığımız Le Chatelier kalıbına yerleştirdik spatula ile üst yüzeyini ayarlayıp iki cam taba arasında 1 gün uygun şartlarda beklettik. Ardından 24 saat süre sonunda gösterge uçları arasındaki mesafeyi ölçtük ve kaydettik. Sonra kalıbı 30 dakika boyunca kaynama derecesindeki su banyosunda beklettik. Kaynama süresi sonunda gösterge uçları arasındaki mesafeyi ölçüp kayıt altına aldık. İki değer arasındaki fark genleşme değerini vermekte olup standartlara göre genleşme değeri 10mm den küçük olmalıdır. Resim 3.11.da görüldüğü gibi Le Chatelier Deneyini yaptık ve sonuçlarını Bölüm 4’te değerlendirdik.



Resim 3.11. Le Chatelier cihazı ile genleşme deneyi

3.2.2.5. Basınç Dayanımı

Hazırlanan numuneler kalıplardan çıkarılıp kür havuzunda 7, 28 ve 120 gün süreyle bekletilip Batman’da bulunan FerÇim çimento öğütme tesisinde otomatik basınç dayanım test presi cihazında basınç dayanımları Resim 3.12.de görüldüğü gibi kayıt altına alınmış olup sonuçlar Bölüm 4’te değerlendirilmiştir.



Resim 3.12. Basınç Dayanımlarının Ölçümü

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm, nano ve mikronize kalsit ile modifiye edilmiş ve farklı oranlarda Genleştirilmiş Perlit (GP) içeren harç numunelerinin hem taze hem de sertleşmiş özelliklerinin incelendiği analizlerin/deneylerin sonuçlarını içermektedir. Birinci alt bölümde; taze ve erken yaş özellikleri olarak (i) kıvam deneyi, priz süresi (priz başlama ve priz sona erme süreleri) ve genleşme tayini ve (ii) akışkanlaştırıcı miktarı ve mini-çökme yayılma çapı sonuçları değerlendirilirken, ikinci alt bölümde ise; sertleşmiş özellik olarak (i) numune birim ağırlıkları, (ii) basınç dayanımı ve (iv) ultrases dalgası hızı sonuçları değerlendirilmiştir.

4.1. Taze Özellikler

4.1.1. Kıvam, Priz Süresi ve Genleşme Tayini (Le Chatelier Metodu)

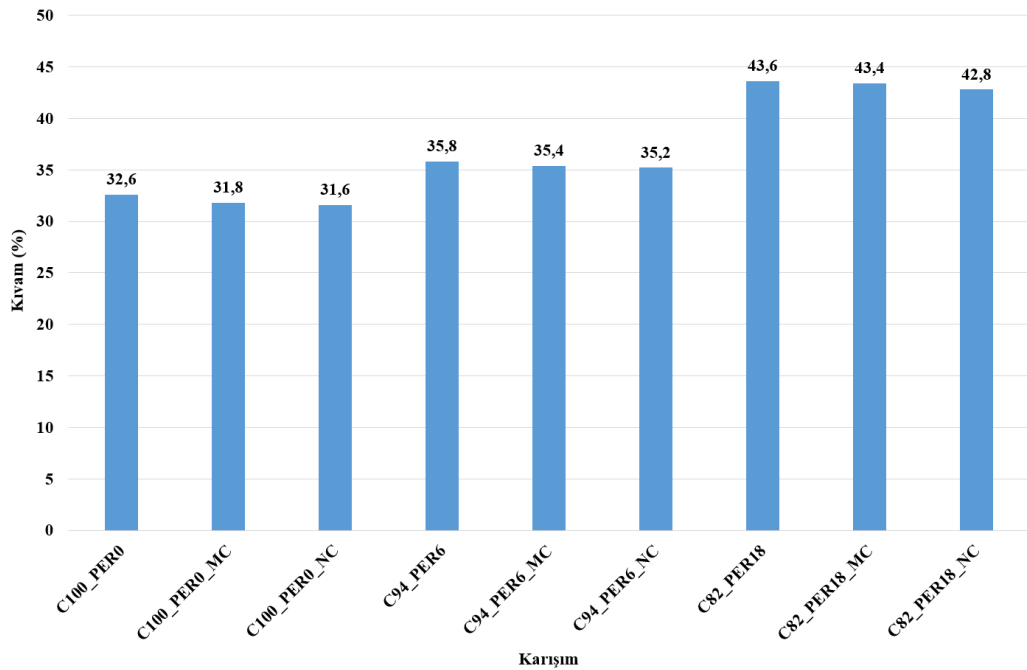
Genleşme tayini (Le Chatelier Metodu), kıvam, priz başlama süresi ve priz sona erme süresi ölçümleri TS EN 196-3'e (2017) göre yapılmış olup, deney sonuçları sırasıyla Tablo 4.1, Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.1'de görüldüğü üzere GP ikame edilen karışımlarda hacimce genleşme gözlemlenmemiş olup (Erdem ve diğerleri, 2007), GP içermeyen kontrol karışımlarında ise standart aralık (en fazla 10 mm) dâhilinde bir genleşme gözlemlenmiştir. Kontrol karışımlarında gözlemlenen kısmî genleşme ise çimento içerisindeki serbest CaO ve MgO'dan kaynaklanmaktadır. TS EN 196-3'e (2017) göre en fazla 10 mm'ye (1 cm) kadar genleşmeye izin verilmekte olup, mevcut çalışmada GP ikamesiyle hacim genleşmesi durumunun izin verilebilir aralıkta olduğu gözlemlenmiştir.

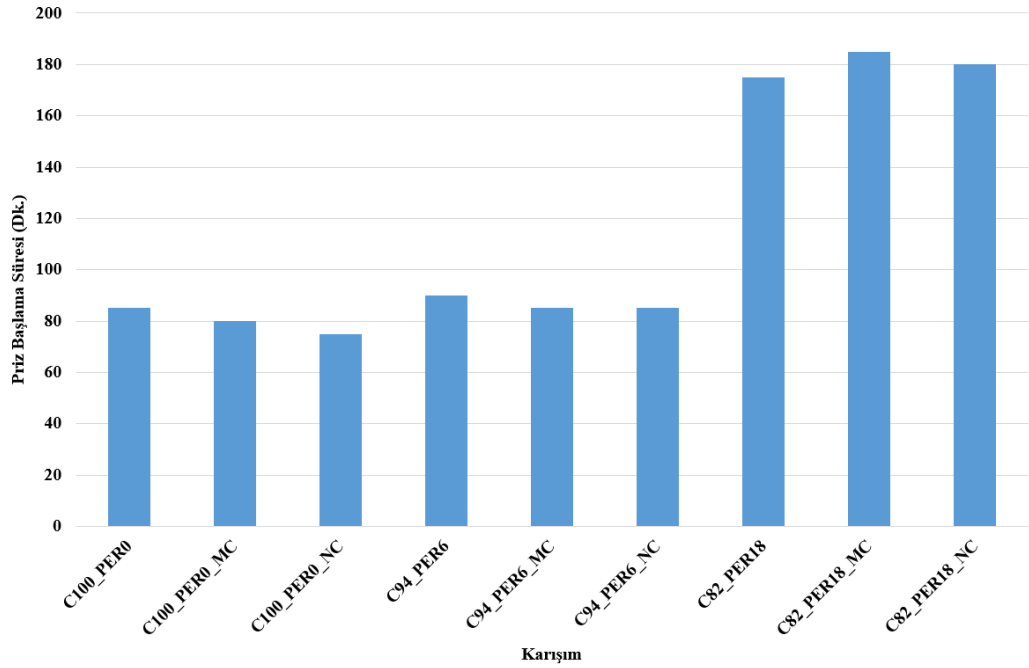
Tablo 4.1. Çimento hamuru genleşme tayini sonuçları

Karışım Kodu	A (Başlangıç, cm)	B (Bitiş, cm)	B-A (Fark, cm)
C100_PER0	4,5	4,7	0,2
C100_PER0_MC	2,6	2,7	0,1
C100_PER0_NC	2,1	2,1	0,1
C94_PER6	2,5	2,5	-
C94_PER6_MC	2,6	2,7	-
C94_PER6_NC	1,1	1,1	-
C82_PER18	2,4	2,4	-
C82_PER18_MC	1,1	1,1	-
C82_PER18_NC	1,9	1,9	-

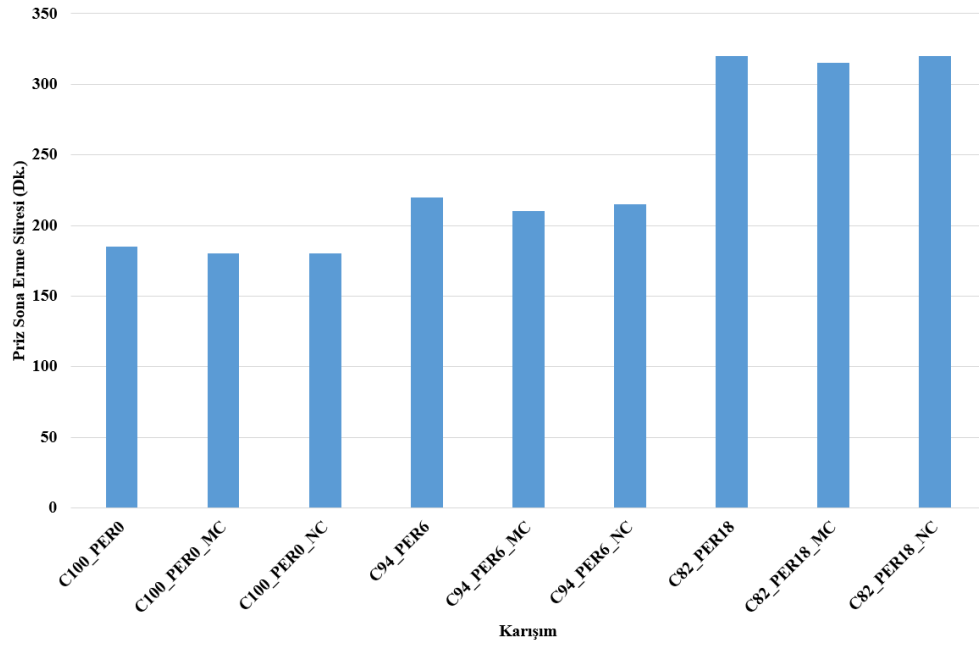
Üretilen harç numunelerine göre belirlenen kıvam suyu oranı (%) Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere GP ikame oranı arttıkça kıvam suyu miktarı da artmıştır. Bu durum, GP’nin yüksek seviyedeki porozitesine ve boşluk oranından kaynaklı oluşan yüksek özgül yüzey alanının bir neticesidir (Esfandiari ve diğerleri, 2019). GP’nin %6 oranında ikame edildiği karışımlar ile kontrol karışımlarının kıvam suyu oranı birbirine çok yakın olup, ikame oranı %18’e çıkınca su ihtiyacında da artış gözlemlenmiştir. Kalsit hidrofobik bir yapıya sahip olduğu için (Turgut, 2018; Turgut ve diğerleri, 2019; Demirhan, 2020) hem nano hem de mikronize kalsit kullanımı ile kıvam suyunda kısmî bir azalma gözlemlenmiştir.

**Şekil 4.1.** Kıvam Suyu Oranları

Priz başlama ve sona erme süreleri sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere, GP ikamesi klinker kullanım oranını azalttığından dolayı, genel olarak, priz başlama ve sona erme sürelerinde uzamalar gözlemlenmiştir (Erdem ve diğerleri, 2007). Nano ve mikronize kalsit ikameli karışımlarda ise priz başlama ve sona erme sürelerinde kısmî bir azalma gözlemlenmiştir. Basınç dayanımı bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmış olan GP'nin düşük hidrasyon mekanizması nedeniyle kalsit kullanımıyla birlikte priz başlama ve sona erme sürelerinde belirgin düzeyde bir gelişme tespit edilmemiştir.



Şekil 4.2. Priz başlama süreleri



Şekil 4.3. Priz sona erme süreleri

4.1.2. Akışkanlaştırıcı Miktarı ve Mini Çökme Yayılma Çapı

Mevcut çalışmada, üretilen taze çimento harçlarının mini çökme yayılma çaplarının belirlenmesi ASTM C1437'ye (2020) göre yapılmıştır. ASTM C1437'de, referans karışımı mini çökme yayılma çapının $\pm\%10$ kadarlık farkı aynı işlenebilirlik olarak kabul edildiği için mevcut çalışmada da GP kullanımından dolayı meydana gelen işlenebilirlik kaybı, $\pm\%10$ 'luk sınır değerleri yakalanıncaya kadar akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Mevcut çalışmada üretilen harçların mini çökme yayılma çapları ve $\pm\%10$ sınır değerleri yakalanıncaya kadar kullanılan akışkanlaştırıcı miktarları Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.2'de görüldüğü üzere, GP kullanımı ile yayılma çaplarında düşüş elde edilmiş (Bageri ve diğerleri, 2021; Lanzón ve diğerleri, 2008) ve GP kullanımıyla birlikte su ihtiyacında artış gözlemlenmiştir (El Mir ve diğerleri, 2017). Bu durum, GP'nin geniş yüzey alanına ve gözenekli yapıya sahip olmasının bir sonucu olmakla birlikte, GP'nin daha yüksek oranlarda (%18) çimento yerine ikame edilmesiyle işlenebilirlik kötüleşmiş ve yeterli işlenebilirliğe ulaşmak için de GP ikameli karışımlarda su ihtiyacı artırmıştır (Sabet ve diğerleri, 2013; Karein ve diğerleri, 2018)). Bir diğer ifadeyle, gözenekli yapıya sahip olması nedeniyle su emme kapasitesi ve ince gözenekli agregaya benzer su emme yeteneği, eklendiği karışımların su ihtiyacını artırmıştır (Sabet ve diğerleri, 2013; Esfandiari ve diğerleri, 2019).

Tablo 4.2. Mini çökme yayılma çapı ve akışkanlaştırıcı miktarı

Karışım	Mini Çökme Yayılma Çapı, cm	Akışkanlaştırıcı, gr
C100_PER0*	11,94	0
C100_PER0_MC*	11,86	0
C100_PER0_NC*	11,79	0
C94_PER6	10,82	0,16
C94_PER6_MC	10,79	0,19
C94_PER6_NC	10,93	0,23
C82_PER18	10,75	1,37
C82_PER18_MC	10,78	1,55
C82_PER18_NC	10,74	1,55

*GP içermeyen referans kontrol karışımları

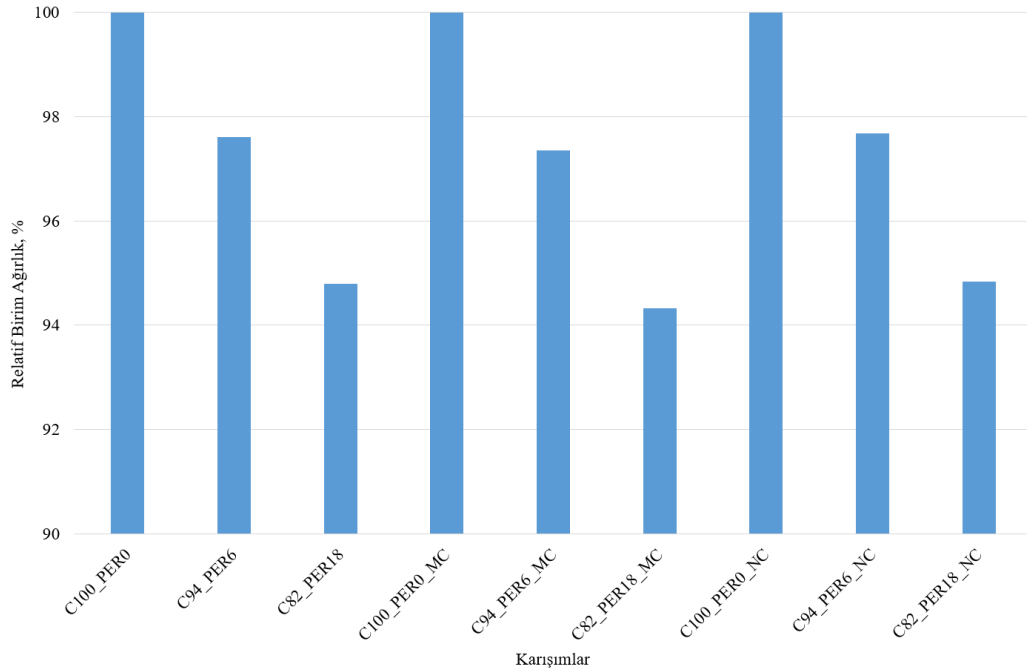
4.2. Sertleşmiş Özellikler

4.2.1. Numune Birim Ağırlıkları

Birim ağırlık, çimento esaslı malzemelerin üretiminde kullanılan bileşenlere doğrudan bağlı olan bir özellik olup, kullanılan bileşenlerin özgül ağırlıklarının nispeten küçük veya büyük olma durumuna göre değişkenlik göstermektedir. Çimento yerine ikame edilen bağlayıcı malzeme nispeten daha düşük özgül ağırlığa sahip ise birim ağırlıkta düşüş gözlemlenirken, daha büyük özgül ağırlığa sahip olan bağlayıcı malzeme ise birim ağırlıkta artış gözlemlenir.

Bir günlük prizmatik harç numunelerinin relatif birim ağırlık değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, nano veya mikronize kalsit içeriklerine bakılmaksızın, tüm karışım grupları için kontrol karışımlarına kıyasen GP'nin kullanım oranı arttıkça birim ağırlık değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum, GP'nin kullanılan çimentoya kıyasen daha düşük bir özgül ağırlık değerine sahip olmasının bir neticesi olup (Esfandiari ve diğerleri, 2019; Demirboğa ve diğerleri, 2001), GP'nin çimento yerine ikame edilme oranı artışıyla birlikte birim ağırlıktaki düşüş oranı da artmıştır (Demir ve diğerleri, 2008). Kontrol karışımlarına kıyasen, en düşük birim ağırlık değerleri %18 oranında çimento yerine ikame edilen GP'li karışımlarda gözlemlenirken en yüksek birim ağırlık değerleri ise %6 oranında çimento yerine ikame

edilen GP'li karışımlarda gözlemlenmiştir. Ayrıca, bağlayıcı malzeme yerine ikame edilen nano ve mikronize kalsit birbiriyle kıyas edildiğinde birim ağırlıkta belirgin düzeyde herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.4. Relatif birim ağırlık değerleri

4.2.2. Basınç Dayanımı

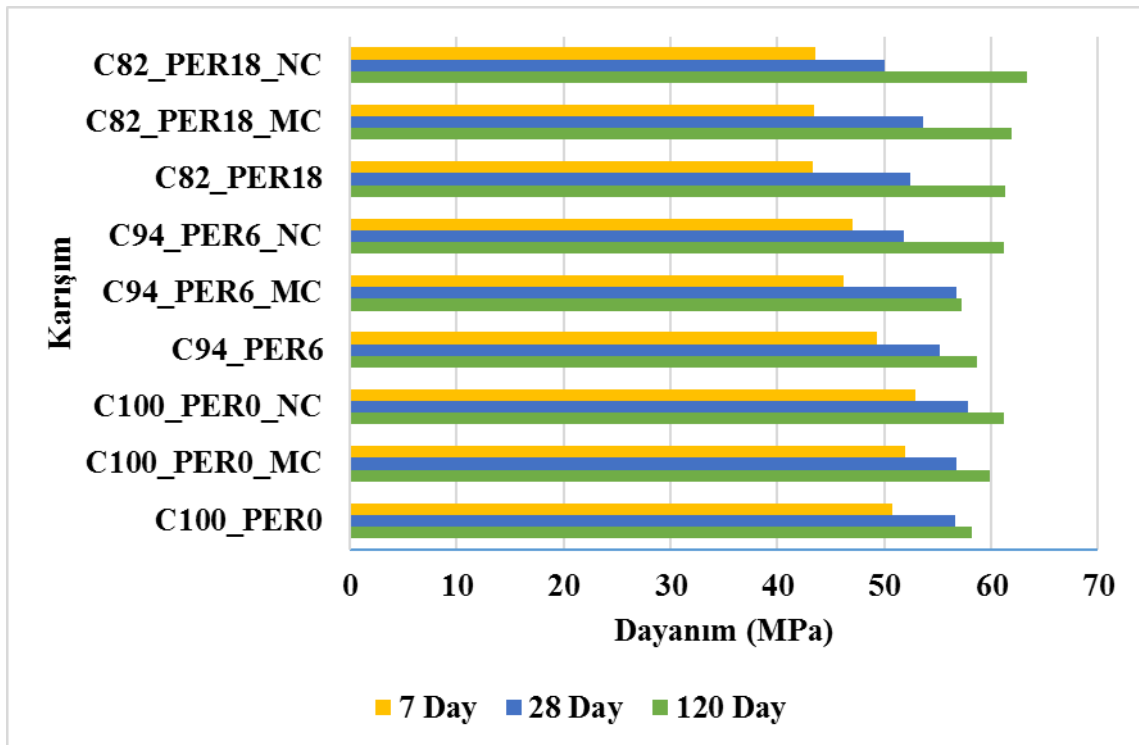
Harç numunelerinin 7, 28 ve 120 günlük kür yaşları için ortalama basınç dayanımları ve 7 günlük kür yaşına göre 120 günlük kür için basınç dayanımı gelişimi grafikleri sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir. Her ne kadar bazı çalışmalarda GP kullanımı ile birlikte basınç dayanımında belirgin düzeyde artışlar elde edilmiş olsa da (Kotwica ve diğerleri, 2017) Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, 28 günlük kür yaşına kadar, mevcut çalışmada GP'nin çimento yerine ikame edilmesi basınç dayanımında düşüş ile neticelenmiştir. Artan GP kullanım oranıyla birlikte basınç dayanımında tespit edilen bu düşüşün nedeni GP'nin erken dönemdeki çok düşük olan puzolanik aktivitesinden kaynaklanmaktadır (Torres ve diğerleri, 2009; Demir ve diğerleri, 2008). GP içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımları 50,10-56,80 MPa aralığında değişkenlik gösterirken 120 günlük basınç dayanımları ise 57,30-63,40 MPa aralığında değişkenlik göstermiştir. 28 günlük kür yaşı için en düşük basınç dayanımı değerleri GP'nin çimento yerine %18 oranında ikame edildiği karışımlarda gözlemlenmiştir.

Ayrıca, GP'nin çimento yerine %18'e kadar ikame edilmesi 28 günlük kür yaşına kadar basınç dayanımında önemli bir azalmaya sebebiyet vermemiş olup (kontrol karışımına kıyasen basınç dayanımında 28. günde %7.4 oranında bir azalma gözlemlenmiştir), 120 günlük kür yaşlarında ise artış ile neticelenmiştir (Karein ve diğerleri, 2018). Bu sonucu destekler nitelikte, El Mir ve Nehme (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, GP'nin dayanım gelişimine olan katkısı 400. günde bile belirgin düzeyde olduğu rapor edilmiştir. Nano ve mikronize kalsit içermeyen karışımlar için %6 ikame oranında 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında azalma oranları sırasıyla %3,0 ve %2,6 iken %18 ikame oranında ise 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarındaki azalma oranları sırasıyla %14,8 ve %7,4 olarak tespit edilmiştir. 120 günlük kür yaşında ise nano ve mikronize kalsit içermeyen karışımlar için %6 ve %18 ikame oranları için sırasıyla %0,9 ve %5,1 oranında artış gözlemlenmiştir. Mineral katkıları, çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımını dolgu etkisi, seyreltme etkisi ve puzolanik reaksiyonlar olmak üzere üç temel etki mekanizmasıyla etkilemektedir (Wild ve diğerleri, 1996). Şekil 4.5'te verilen sonuçlar GP'nin 28 günlük kür yaşına kadar farklı düzeylerde seyreltme etkisi gösterdiğini ve 28 günlük kür yaşından sonra ise dolgu etkisi ve puzolanik reaksiyonlarla mikroyapısal gelişime katkı sağladığını göstermektedir. Bir diğer ifadeyle, şekilde verilen sonuçlara dayanarak, tüm ikame oranlarında 28 günlük kür yaşlarında seyreltme etkisinin baskın etki olduğu ve GP içeren harçların kontrol karışımlarının basınç dayanımına ulaşamadığı tespit edilmiştir (Ramezianpour ve diğerleri, 2014). Belirtilen açıklamalara ilave olarak, Şekil 4.5'te görüldüğü üzere GP'nin %6 oranında ikame edildiği harçların basınç dayanımları 28 günlük kür yaşı için kontrol karışımlarına ulaşmaktadır. Bu durum, yani ideal oranın %6 olması durumu, Esfandiari ve Loghmani (2019) tarafından da daha öncesinden tespit edilmiş olup, mevcut çalışmanın sonuçlarını teyit eder niteliktedir.

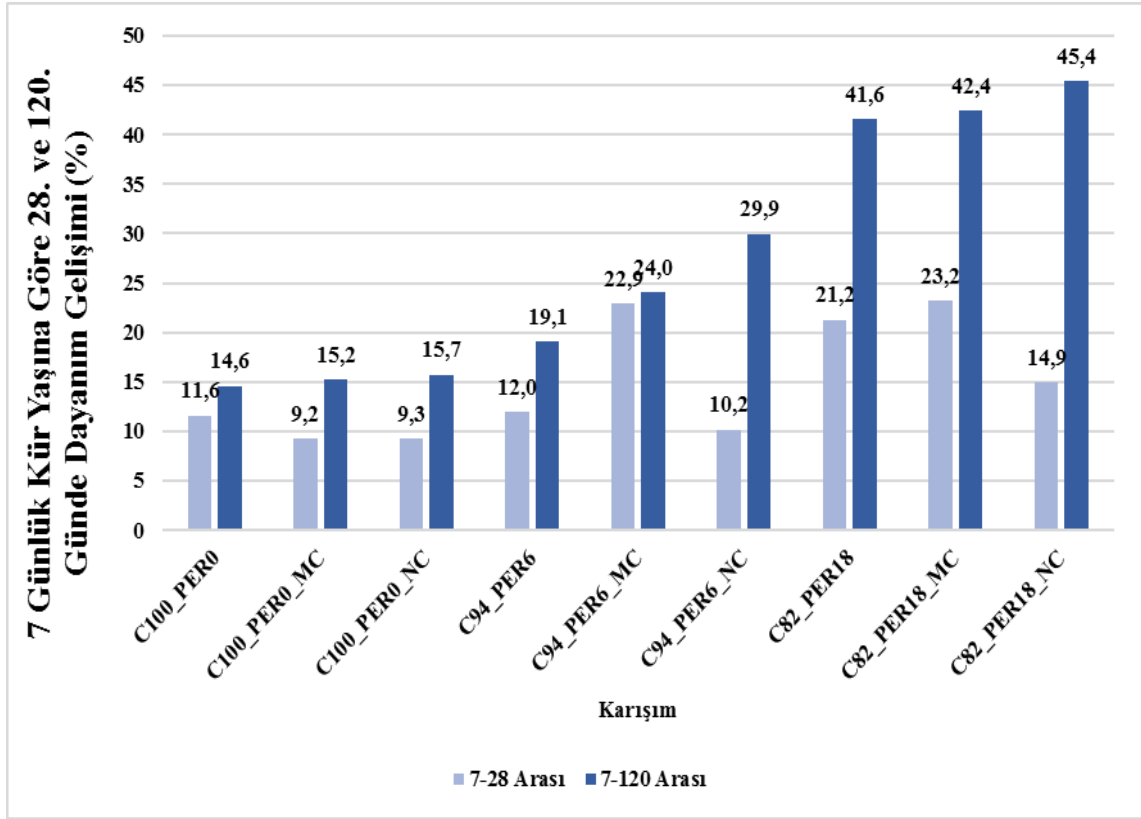
Hem nano hem de mikronize kalsitin C_3S 'nin hidrasyon mekanizmasını artırmasına (çekirdeklenme etkisi, seeding/nucleation effect) ilave olarak bağlayıcı malzemenin alüminat fazları ile reaksiyona girerek (kimyasal etki, chemical effect) ilave hidrasyon ürünleriyle dayanıma katkı sağlamaktadır (Demirhan, 2020). Bu durum, yani kalsit ile bağlayıcı malzemenin alüminat fazları arasındaki sinerji, özellikle puzolanik malzemenin kristal yapısına doğrudan bağlıdır. 7 günlük basınç dayanımlarına kıyasen 120 günlük basınç dayanımı gelişimini gösteren Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, genel olarak, nano ve mikronize kalsitin ikame edildiği karışımlarda dayanım gelişimine katkı sağlanmış olup, en yüksek katkı nano kalsit ile elde edilmiştir.

Mikronize kalsite kıyasen nano kalsitin yüzey alanı/hacim oranı yani özgül yüzey alanı çok daha yüksek olduğundan dolayı hidrasyon mekanizmasına olan katkısı da daha yüksek olmuştur. Nano ve mikronize kalsitin kullanıldığı kontrol (perlit içermeyen) karışımlarındaki mevcut kısmi artış ise özellikle kimyasal etkinin bir neticesi olup, kullanılan beyaz çimentoda düşük miktarda alüminat fazının bulunmasından kaynaklanmaktadır (Bknz Tablo 3.1.) (Çiftçi, 2021; Demirhan, 2020). Belirtilen açıklamalara ilave olarak, GP'nin son derece düşük bir yoğunluğa sahip olması da, GP ile üretilen harçların dayanımını önemli düzeyde etkilemektedir (Torres ve diğerleri, 2009).

7 günlük basınç dayanımlarına kıyasen 28 günlük basınç dayanımı gelişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, özellikle geliştirilmiş perlitin karma suyunu emmesinden kaynaklı (yani boşluklu yapısı nedeniyle çok su emdiği için efektif su/bağlayıcı oranını değiştirdiğinden) ve diğer önceki bölümlerde belirtilen durumlardan dolayı dayanım gelişimi 28-120 kür yaşları arasında daha anlamlı bir sonuç verirken 7-28 kür yaşları arasında ise değişim düzensiz çıkmaktadır. Bu durum, geliştirilmiş perlit çok su emdiğinden ve efektif su/bağlayıcı oranını dramatik düzeyde etkilediğinden dolayı doğrudan çimento yerine ikame edilmesinin uygun olmadığını da göstermektedir.



Şekil 4.5. 7, 28 ve 120 günlük kür yaşları için basınç dayanımı değerleri



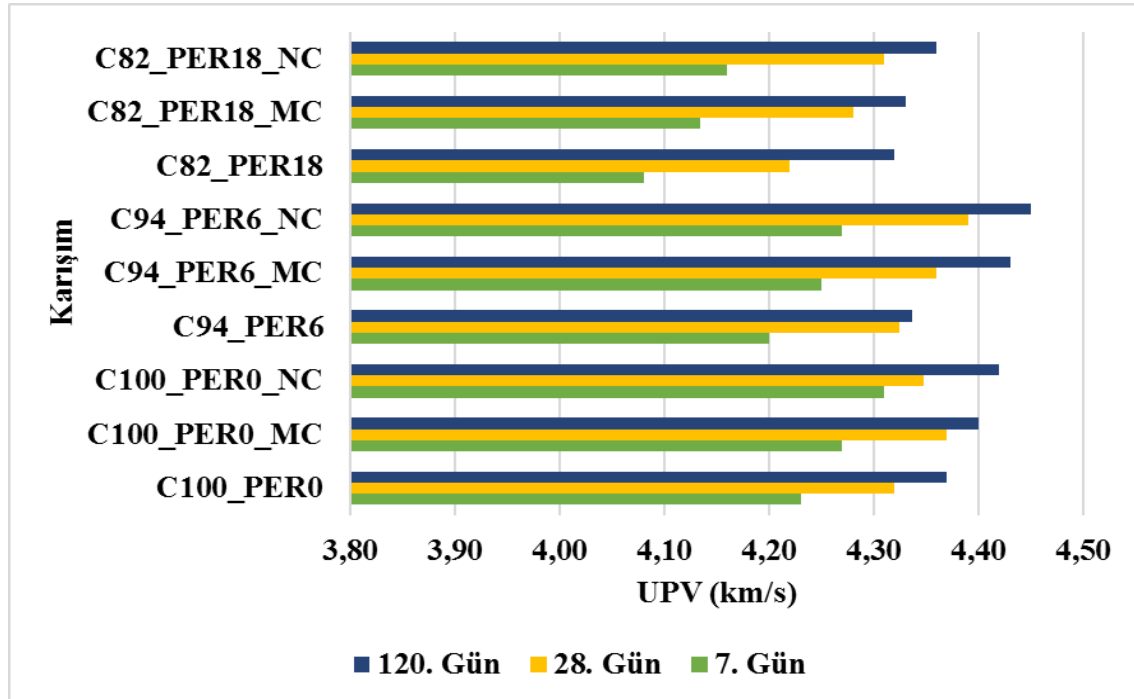
Şekil 4.6. 7 Günlük Kür Yaşına Göre 28. ve 120. Günlük Dayanım Gelişimi (%)

4.2.3. Ultra Ses Dalgası Hızı (UPV)

Tüm karışımların 7, 28 ve 120 günlük UPV sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, karışımlarda GP ikame oranı arttıkça artan porozite ve boşluklu yapının bir neticesi olarak UPV değerlerinde de azalma gözlemlenmiştir. GP ve nano/mikro kalsit ikame oranına bakılmaksızın tüm karışımların UPV sonuçları en az 4,08 km/s ve en fazla da 4,45 km/s olarak tespit edilmiştir. Malhotra'ya (1976) göre UPV sonuçları 3,66-4,58 km/s arasında olan çimento bazlı malzemelerin dayanıklılıkları “iyi” olarak sınıflandırılmaktadır (Demirhan, 2020). Bu nedenle, perlit ikame oranına bakılmaksızın tüm karışımlardan elde edilen UPV sonuçlarına göre tasarlanan karışımların “iyi” olduğu kanısına varılmıştır.

UPV deney sonuçları, kimyasal etki neticesinde oluşan ilave hidrasyon ürünlerine ek olarak filler görevi de gören nano ve mikro boyutlu kalsit minerallerinin boşluk mikroyapısını da iyileştirdiğini göstermiştir. Nispeten daha yüksek UPV değerleri, yüksek hızlı ultrasonik dalgaların geçmesi için daha yoğun ve daha kenetlenmiş bir mikro yapı sağladığı için bu sonuç filler etkisi ile doğrudan ilişkilidir (El Mir ve diğerleri, 2017). Nitekim kalsit içermeyen karışımlara kıyasen daha yüksek UPV sonuçları nano ve mikro kalsit içeren karışımlarda tespit edilmiş olup, en iyi sonuçlar az bir farkla da olsa nano kalsit içeren karışımlarda elde edilmiştir. Bu durum, basınç dayanımı kısmında belirtilen nedenlere dayandırılabilir. Ayrıca, UPV değeri artan kür yaşıyla birlikte artmış olup, bu durum, çimento hamurundaki çatlak ve boşlukların bağlayıcı malzemelerin hidrasyon gelişimi ile oluşan hidrasyon ürünlerine, minerallerin filler etkisine ve ilave hidrasyon ürünleri tarafından doldurmasıyla açıklanabilir (Demirhan, 2020).

Yukarıda belirtilenlere ilave olarak, şekilde görüldüğü üzere, her ne kadar 120 günlük numunelerin UPV sonuçları birbirine çok yakın tespit edilmişse de nano/mikronize kalsit içeren %6 GP ikameli karışımların UPV sonuçları en iyi çıkmıştır. Bu sonuç, basınç dayanımı kısmında da belirtildiği üzere, %6 ikame oranının mikroyapısal gelişim için en uygun ikame oranı olduğunu destekler niteliktedir.



Şekil 4.7. 7, 28 ve 120 günlük UPV deney sonuçları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Farklı oranlarda geliştirilmiş perlit içeren dokuz farklı karışımın taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine yapılan deneysel çalışmada elde edilen verilere göre aşağıda verilen sonuçlara varılabilir:

- Genleştirilmiş perlitin (GP) çimento yerine ikame edilmesiyle Le Chatelier Metoduna göre hacim genişmesi 0, 1 ve 2 mm ile sonuçlandığından izin verilebilir aralıkta (standartlara göre maximum 10 mm) tespit edilmiştir.
- GP'nin porozitesinin yüksek olması ve boşluk oranından kaynaklı oluşan özgül yüzey alanı artışının bir neticesi olarak GP kullanım oranı arttıkça işlenebilirlikte kötüleşme gözlemlenmiş ve standart kıvam suyu miktarında ve Tablo 4.2.de görüldüğü gibi akışkanlaştırıcı kimyasal kullanım oranında 1,55 gr'a kadar artış elde edilmiştir.
- Kalsit içeren karışımların işlenebilirliğinde (mikronize kalsitte %0,67 ve nano kalsitte ise %1,27 oranlarında) kısmî iyileşmeler tespit edilmiştir.
- Nano ve mikronize kalsit kullanımıyla priz sürelerinde (kontrol numunelerinde mikronize kalsitte %6,25 ve nano kalsitte ise %13,33 oranında) kısmî bir kısalma gözlemlenmiş olup, GP kullanım oranı %6 ikamesiyle %5,88 uzama ve %18 ikamesiyle %105 lik bir uzama saptanmıştır.
- Nano veya mikronize kalsit kullanımına bakılmaksızın, kontrol karışımlarına kıyasen GP'nin kullanım oranı artışıyla birlikte prizmatik harç numunelerinin birim ağırlık değerlerinde azalma gözlemlenmiştir (GP'nin %6 ikamesinde %2,38 oranında azalma ve GP'nin %18 ikamesinde ise %5,2 oranında azalma).
- Kalsit minerali içermeyen karışımlarda GP kullanım oranı artışı, genel olarak, 7 ve 28 kür yaşları için basınç dayanımında düşüş ile neticelenmiş olup, 120 günlük kür yaşında ise bu durum %6 ve %18 ikame oranları için sırasıyla %0,9 ve %5,1 oranında artış ile neticelenmiştir.

- Karışımlarda GP kullanım oranı arttıkça artan porozite ve boşluklu yapının bir neticesi olarak UPV değerlerinde de azalma gözlemlenmiştir.
- Kür yaşına bakılmaksızın tüm karışımlarda elde edilen UPV değerleri 3,66 km/s'den daha yüksek çıktığı için tüm karışımlardan elde edilen UPV sonuçlarına göre tasarlanan karışımların “iyi” olduğu tespit edilmiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada perlitin puzolanik özellikleri ve perlitli katkılı çimentoların bazı temel özellikleri incelenmiştir. Farklı incelik değerleri ve kompozisyonlar kullanılarak çalışmalara devam edilmelidir.

Çalışmada kullanılan Kalsit'e alternatif malzemeler değerlendirilip perlit ile olan aktivitesi ve dayanıklılık özellikleri incelenmelidir. Özellikle doğrudan perlit ile aktivasyon özelliklerinin incelenmesi önerilmektedir.

Kalsit ile aktive edilen çimentolu sistemlerde sülfat direnci olumlu yönde iyileşeceğinden dolayı üretilen çimentoların sülfata karşı direnci gibi dayanıklılık özelliklerini belirlemek için daha ileri düzeyde çalışmalar yapılmalıdır.

Perlit katkılı çimentolarla hazırlanan taze ve sertleşmiş betonun özellikleri de belirlenmelidir.

KAYNAKLAR

- Aashay, A., Gaurav, S., Narayanan, N., 2016, Ternary blends containing slag and interground/blended limestone: hydration, strength, and pore structure, *Constr. Build. Mater.* (102), 113–124.
- ACI Committee 232, “Use of Natural Pozzolans in Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 91, No. 4, pp. 410-426, July-August, 1994.
- Akgül, E. (2006). *Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
Ankara, 975-8136-03-08.
- Arioz, O., 2007, Effects of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire Safety J.*, (42), 516–522.
- ASTM C 311, “Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in portland-Cement Concrete,” *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.
- ASTM C 618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in portland Cement Concrete,” *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.
- ASTM C1437. (2020) Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
- Bageri, B., Ahmed, A., Al Jaber, J., Elkhatatny, S., & Patil, S. (2021). Effect of perlite particles on the properties of oil-well class G cement. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 199, 108344.
- 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.
- Basic Perlite Information and Data, Web Page of The Schundler Company, <http://www.schlunder.com>.
- Behfarnia, K. and Rostami, M., (2017). Effects of Micro and Nanoparticles of SiO₂ on the Permeability of Alkali Activated Slag Concrete, *Constr. Build. Mater.*, Vol:131, pp:205–213.
- 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.
- Beigi, M.H., Berenjian, J., Lotfi Omran, O., Sadeghi Nik, A., and Nikbin, I.M., (2013). An Experimental Survey on Combined Effects of Fibers and Nanosilica on The Mechanical, Rheological, and Durability Properties of Self-Compacting Concrete, *Mater. Des.*, Vol:50, pp:1019–1029.
- Bentz, D. P., Ardani, A., Barrett, T., Jones, S. Z., Lootens, D., Peltz, M. A., ... & Weiss, W. J., 2015, Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete, *Construction and Building Materials*, (75), 1-10.
- Bentz, D. P., Ferraris, C. F., Jones, S. Z., Lootens, D., & Zunino, F., 2017, Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance, *Cement and Concrete Composites*, 78, 43-56.
- 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.

- Bosiljkov, V.B., 2003, SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler, *Cem. Concr. Res.*, (33), 1279
- Bozoğlu Demirdöven, J. ve Arditi, D. (2012). Yapılarda ve Yapım Yönetiminde Nanoteknoloji Uygulamaları. 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, Urla-İzmir, 1-12.
- Bulgurcu, H., Genleşmiş Perlit İçeren Çimento ve Alçı Bağlayıcılı Yapı Malzemelerin Isıl ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Sivas, 24-27 Haziran 2009.
- Bulut, Ülger, and Leyla Tanaçan. "Perlitin puzolanik aktivitesi." *İTÜDERGİSİ/a* 8.1 (2011).
- Camiletti, J., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L., 2013, Effects of nano-and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete, *Materials and Structures*, 46(6), 881-898.
- Camiletti, J., Soliman, A.M., Nehdi, M.L., 2013, Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete, *Mag. Concr. Res.*, (65), 297–307.
- 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.
- Chowanec, O., 2012, Limestone Addition in Cement. Ph.D. Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland
- Çiftçi, M., & Demirhan, S. (2021). Effect of nano type and slag replacement level on cement mortars. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 482-496.)
- Damidot, D., Lothenbach, B., Herfort, D., Glasser, F.P., 2011, Thermodynamics and cement science, *Cem. Concr. Res.* 41 (7), 679–695.
- Dayı, M. (2006). Doğal Ve Yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demir, I., & Baspınar, M. S. (2008). Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash–lime–gypsum mixture. *construction and Building Materials*, 22(6), 1299-1304.
- Demir, I., & Baspınar, M. S. (2008). Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash–lime–gypsum mixture. *construction and Building Materials*, 22(6), 1299-1304.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., & Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1627-1632.
- Demirhan, S. (2017). Nano Malzemeler İle Modifiye Edilmiş Yüksek Performanslı Hibrid Lif Donatılı Betonlar, Doktora Tezi.
- Demirhan, S. (2020). Combined Effects of Nano-Sized Calcite and Fly Ash on Hydration and Microstructural Properties of Mortars. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(6), 1051-1067.
- DPT, “Sekizinci Bes Yıllık Kalıkınma Planı, Madencilik Özel ihtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III (Pomza-Perlit-Vermikülit,Flogopit,Genleşen Killer) Çalışma Grubu Raporu “, Ankara,2001.
- El Mir, A., & Nehme, S. G. (2017). Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 156, 507-517.

- El-Gamal, S.M.A., Hashem, F.S., and Amin, M.S., (2017). Influence of Carbon Nanotubes, Nanosilica and Nanometakaolin on Some Morphological-Mechanical Properties of Oil Well Cement Pastes Subjected to Elevated Water Curing Temperature and Regular Room Air Curing Temperature, *Constr. Build. Mater.*, Vol:146, pp:531–546.
- Erdem, T. K., Meral, Ç., Tokyay, M., & Erdoğan, T. Y. (2007). Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 13-21.
- Erdem, T. K., Meral, Ç., Tokyay, M., & Erdoğan, T. Y. (2007). Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 13-21.
- Erdoğan, T.Y., *Beton*, Middle East Technical University Press, Ankara, 2003.
- Esfandiari, J., & Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement*, 147, 106846.
- Esfandiari, J., & Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement*, 147, 106846.
- Esfandiari, J., & Loghmani, P. (2019). Effect of perlite powder and silica fume on the compressive strength and microstructural characterization of self-compacting concrete with lime-cement binder. *Measurement*, 147, 106846.
- Farzadnia, N., Abang Ali, A.A., 2013, Demirboga, R. Characterization of high strength mortars with nano alumina at elevated temperatures, *Cem. Concr. Res.*, (54), 43–54.
- Felekoglu, B., 2007, Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), *Resour. Conserv. Recycl.*, (51), 770–791.
- Filipponi, L., Sutherland, D., *Nanotechnology: A Brief Introduction*. Interdisciplinary Nanoscience Center, 2007.
- GANI, M. S. J., “Cement and Concrete”, Faculty of Engineering Monash University Clayton, Victoria, Australia, 83-90 (1997).
- Gao, D., Li, H., 2015, Compressive stress-strain relationship of fiber and nano sized materials reinforced concrete after exposure to high temperature, *China Civ. Eng. J.* (10), 10–20.
- Gao, D., Zhao, L., Chen, G., 2017, Compressive stress-strain relationship of fiber and nanosized material reinforced concrete in high temperature, *China Civ. Eng. J.* (9), 46–58.
- Gao, D., Zhao, L., Chen, G., 2018, Flexural behavior of fiber and nanoparticle reinforced concrete at high temperatures, *Fire Mater.*, (42), 725–740.
- Ge, Z., Wang, K., Sun, R., Huang, D., Hu, Y., 2014, Properties of self-consolidating concrete containing nano-CaCO₃. *J. Sustain. Cement-Based Mater.* (3), 191–200.
- Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E., Shrinkage Cracking of Lightweight Concrete Made with ColdBonded Fly Ash Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 34, 1121-1130, 2004
- Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M., 2007, Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements, *Cem. Concr. Compos.*, (29), 542–549
- GÖKÇE, H. Süleyman, Gökhan DURMUŞ, and Osman ŞİMŞEK. "Alternatif Karışım Oranlarında Üretilen Doğal Perlit Agregalı Hafif Betonların Su/Çimento Üzerindeki Etkileri." *Politeknik Dergisi* 13.1 (2010): 55-63.

- Gunning, D.F., Eng, P., McNeal & Associates Consultants Ltd., "Perlite Market Study for British Columbia", 1994.
- Han, T., Wang, H., Jin, X., Yang, J., Lei, Y., Yang, F., Yang, X., Tao, Z., Guo, Q., Liu, L., 2015, Multiscale carbon nanosphere–carbon fiber reinforcement for cement-based composites with enhanced high-temperature resistance, *J. Mater. Sci.*, (50), 2038–2048.
- 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.
- Ipavec, A., Gabrovšek, R., Vuk, T., Kaučič, V., Maček, J., & Meden, A., 2011, Carboaluminate Phases Formation During the Hydration of Calcite-Containing Portland Cement, *Journal of the American Ceramic Society*, 94(4), 1238-1242.
- Jayapalan, A.R., Lee, B.Y., Kurtis, K.E., 2013, Can nanotechnology be ‘green’? Comparing efficacy of nano and microparticles in cementitious materials, *Cem. Concr. Compos.*, (36), 16–24
- Jennings, H. M., Bullard, J. W., Thomas, J. J., Andrade, J. E., Chen, J. J. and Scherer, G. W. (2008). Characterization and modeling of pores and surfaces in cement paste. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), 5-29.
- 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.
- Karein, S. M. M., Joshaghani, A., Ramezani-pour, A. A., Isapour, S., & Karakouzian, M. (2018). Effects of the mechanical milling method on transport properties of self-compacting concrete containing perlite powder as a supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 172, 677-684.
- Kenai, S., Soboyejo, W., Soboyejo, A., 2004, Some engineering properties of limestone concrete, *Mater. Manuf. Process*, (5), 949–961.
- Kotwica, Ł., Pichór, W., Kapeluszná, E., & Różycka, A. (2017). Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner production*, 140, 1344-1352.
- Lanzón, M., & García-Ruiz, P. A. (2008). Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1798-1806.
- Lea, F. M., (1970). *The chemistry of cement and concrete*, 3rd Edition, Edward Arnold.
- Lertwattanaruk, P., Sua-iam, G., Makul, N., 2018, Effects of calcium carbonate powder on the fresh and hardened properties of self-consolidating concrete incorporating untreated rice husk ash. *J. Clean. Prod.*, (172), 3265–3278.
- Lertwattanaruk, P., Sua-iam, G., Makul, N., 2018, Effects of calcium carbonate powder on the fresh and hardened properties of self-consolidating concrete incorporating untreated rice husk ash. *J. Clean. Prod.*, (172), 3265–3278.
- 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.
- Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y. and Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60(3), 356-359.
- Liu, X., Chen, L., Liu, A., & Wang, X., 2012, Effect of nano-CaCO₃ on properties of cement paste, *Energy Procedia*, (16), 991-996.

- Lothenbach B., Scrivener K.L., Hooton, R.D., Supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.*, 41 (12) (2011) 1244–1256.
- Ltifi, M., Guefrech, A., Mounanga, P., and Khelidj, A., (2011). Experimental Study of the Effect of Addition of Nano-silica on the Behaviour of Cement Mortars, *Procedia Eng.*, Vol:10, pp:900–905.
- Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., He, K., 2015, Mechanical properties of concrete at high temperature—A review, *Constr. Build. Mater.*, (93), 371–383.
- Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü, “Dünya’da ve Türkiye’de Perlit”, Ankara, 1990.
- Makar, J.M., Beaudoin, J.J., Trischuk, K., Chan, G.W., Torres, F., 2012, Effect of n-CaCO₃ and metakaolin on hydrated Portland cement, *Adv. Cem. Res.* (24), 211–219.
- Malhotra, V. M., Carette, 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.
- Malhotra, V.M., 1976. Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods, ACI Monographe No.9. American Concrete Institute Monograph, United States.
- Massazza F, 1993. Pozzolanic cements. *Cement and Concrete Composites*, 15, 185-214.
- Massazza, F., *Puzzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları*, Seminer, TÇMB, Ankara, 1989, 41-79.
- Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P., 2007, The role of calcium carbonate in cement hydration, *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551-558.
- Medjigbodo, G., Rozière, E., Charrier, K., Izoret, L., Loukili, A., 2018, Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin, *Constr. Build. Mater.*, (183), 114–126.
- Menendez, G., Bonavetti, V., Irassar, E.F., 2003, Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag, *Cem. Concr. Compos.*, (25), 61–67.
- Mining & Milling, American Perlite Company, <http://www.perlite.net/apc/index.html>.
- Nazari, A. and Riahi, S., (2011). The Effects of Cr₂O₃ Nanoparticles on Strength Assessments and Water Permeability of Concrete in Different Curing Media, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol:528, No:3, pp:1173–1182.
- 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.
- Pekmezci BY, Akyüz S, 2004. Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 12, 2175-9.
- Perlite Info , Web Page of Incon Corporation, <http://www.perlite.info/indexes/main.html>.
- Perlite.net, Web Page of Redco II, <http://www.perlite.net>.
- Poppe, A., De Schutter, G., 2005, Cement hydration in the presence of high filler contents, *Cem. Concr. Res.* (35), 2290–2299.
- Prince, W.H., “Puzolans – A Rview”, *ACI Journal*, Detroit, 225 – 232 (1975).;
- ŞİMŞEK, O., “Beton ve Beton Teknolojisi”, Seçkin Yayınevi, Ankara, (2004).
- RAMACHANDRAN, V. S., BEAUDOIN, JAMES J., “Concrete Admixtures Handbook”, Noyes Publication, New Jersey, 42-47 (2001).

- Ramezaniapour, A. A., Karein, S. M. M., Vosoughi, P., Pilvar, A., Isapour, S., & Moodi, F. (2014). Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 66, 222-228.
- Roco, M. C. (2011). The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(2), 427-445.
- Sabet, F. A., Libre, N. A., & Shekarchi, M. (2013). Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*, 44, 175-184.
- Sadeghi, N.A. and Lotfi Omran, O., (2013). Estimation of Compressive Strength of Self-Compacted Concrete with Fibers Consisting Nano-SiO₂ Using Ultrasonic Pulse Velocity, *Constr. Build. Mater.*, Vol:44, pp:654–662.
- 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 Borwankar, A. (2010). Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement-based composites exposed to a decalcifying environment. *Materials Science and Engineering*, 527(13), 3151-3158.
- Sanchez, F., Sobolev, K., “Nanotechnology in Concrete-A Review”, *Construction and Building Materials*, 2010, No.24, pp.2060-2071
- Sanchez, F., Zhang, L. and Ince, C. (2009). Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber/cement composites. *Nanotechnology In Construction*, 3(2), 345-350.
- Sato, T., Beaudoin, J.J., 2011, Effect of nano-CaCO₃ on hydration of cement containing supplementary cementitious materials, *Adv. Cem. Res.*, (23), 33–43.
- Sato, T., Diallo, F., 2018, Seeding effect of nano-CaCO₃ on the hydration of tricalcium silicate. *Transportation research record, J. Trans. Res. Board.*, (2141), 61–67.
- Schwartz, M., 2006. *Emerging Engineering Materials: Design, Processes, Applications*. Technomic Publishing Co., USA ISBN No. 1-56676-314-2.
- Shaikh, F.U.A., Supit, S.W.M., 2015, Chloride induced corrosion durability of high volume fly ash concretes containing nano particles, *Constr. Build. Mater.* (99), 208–225.
- 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.
- Shih, J.Y., Chang, T.P., and Hsiao, T.C., (2006). Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol:424, no:1–2, pp:266–274.
- Silvestre, J., Silvestre, N., de Brito, J., 2016, Review on concrete nanotechnology. *Eur. J. Environ, Civ. Eng.*, (20), 455–485.
- Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M. and Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials*, 4(7), 1069-1077.
- Snellings, R., Mertens, G., Elsen, J. (2012). Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 74, 211-278
- Sobolev, K. (2006). Nanomodification of cement. NSF workshop on nanomodification of cementitious materials, Portland cement concrete and asphalt concrete. Florida:USA.
- Susman, H. (2018). İlave Malzemeler 1. Mineral Katkılar (Puzolanlar) Sunumu. <https://slideplayer.biz.tr/slide/15066422/>

- Şadoğlu, Erol, and Ümit Çalik. "Permeability of high plasticity clayey soil stabilized with lime and perlite." *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35.2 (2020): 551-561.
- Taban, S. Farklı Oranlarda Zeolitik Tüf Katkısının Beton Özellikleri ve Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkilerinin Araştırılması. Diss. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W., Chaipanich, A., & Poon, C. S., 2014, Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size, *Construction and Building Materials*, (66), 410-417.
- TOKYAY ve ERDOĞDU, 2003, 'Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar', TÇMB/AR-GE,
- Torres, M. L., & García-Ruiz, P. A. (2009). Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), 114-119.
- TS 25, "Doğal Puzolan (Tras) – Çimento ve Betonda Kullanılan – Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri", Türk Standartları Enstitüsü, Aralık 2008
- TS EN 450-1, 2005. Uçucu Kül – Betonda Kullanım İçin- Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 35s.
- TSE. "TS EN 1015–3, Methods of test for mortar for masonry–Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)." (2000): 1-8.
- Turanlı, L. U. T. F. U. L. L. A. H., B. U. R. A. K. Uzal, and F. Bektas. "Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans." *Cement and Concrete Research* 34.12 (2004): 2277-2282.
- 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*, vol.24, no.3, 413-418.
- Türk, K., Nehdi, M.L., 2018, Coupled effects of limestone powder and high-volume fly ash on mechanical properties of ECC, *Constr. Build. Mater.*, (164), 185–192.
- Turuñ, Sezgi. Nanoteknolojik yapı malzemelerinin Türk yapı sektöründe kullanımı. Yayınlanmamış yüksek lisans tezi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- Ulugöl, H. (2015). Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Çimentonun Mekanik Ve Durabilite Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi.
- Urhan, S., (1991). Silisin alkali ortamda çözünmesine etki eden faktörler, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*, 28, 286, 15-21, Ankara.
- Urhan, S., "Alkali Silica and Pozzolanic Reactions in Concrete. Part 2: Observations on Expanded Perlite Aggregate Concretes", *Cement and Concrete Research*, Volüme 17, pp. 465-477, 1987.
- ÜN, H., PAÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Ders Notları, Denizli, 2007.
- Vance, K., Aguayo, M., Oey, T., Sant, G., Neithalath, N., 2013, Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin, *Cem. Concr. Compos.* (39
- Vladimfr, S., Otokar, V., 1975, Thermal decomposition of ettringite under hydrothermal conditions, *J. Am. Ceram. Soc.*, 357–359.

- Wang, X. Y., 2018, Analysis of hydration and strength optimization of cement-fly ash-limestone ternary blended concrete, *Construction and Building Materials*, (166), 130-140.
- Weerdt, D. K., Haha, M.B., Le Saout, G., Kjellsen, K.O., Justnes, H., Lothenbach, B., 2011, Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash, *Cem. Concr. Res.*, (41), 279–291.
- Wild, S., Khatib, J. M., & Jones, A. (1996). Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and concrete research*, 26(10), 1537-1544.
- Wu, Z., Khayat, K.H., and Shi, C., (2017). Effect of nano-SiO₂ particles and curing time on development of fiber-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete, *Cem. Concr. Res.*, Vol:95, pp:247–256.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K.H., and Wan, S., (2016). Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultrahigh strength concrete (UHSC), *Cem. Concr. Compos.*, Vol:70, pp:24–34.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K.H., Wan, S., 2016, Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC), *Cem. Concr. Compos.*, (70), 24–34.
- 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, *Sci. Rep.*, (8), 16439.
- Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., & Taerwe, L., 2007, Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94-102.
- Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M.H., Sahmaran, M., Yıldırım, G., Lachemi, M., 2015, Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites, *Cem. Concr. Res.*, (76), 170–179.
- Yu, L.-H., Ou, H., Lee, L.-L., “Investigation on Pozzolanic Effect of Perlite Powder in Concrete”, *Cement and Concrete Research*, pp. 1-4, 2002.
- Yüksel, Ö., *Sanayi Madenleri*, Kozan Offset, Ankara, 1997.
- Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., & Lothenbach, B., 2014, Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Composites*, (46), 99-108.
- Zhang, P., Wan, J., Wang, K., and Li, Q., (2017). Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review, *Constr. Build. Mater.*, Vol:148, pp:648–658.