BORON (B) MİKRO TOZU MODİFİYELİ YENİ NESİL ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA ALTERNATİF AKIMIN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Alper TUNCA

Danışman
Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2026

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BORON (B) MİKRO TOZU MODİFİYELİ YENİ NESİL ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA ALTERNATİF AKIMIN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Alper TUNCA

Danışman
Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Alper TUNCA tarafından hazırlanan "Boron (B) mikro tozu modifiyeli yeni nesil çimento esaslı harçlarda alternatif akımın etkilerinin araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 08 / 05 / 2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	**:** Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU	
		İmza
Başkan	**:** Prof. Dr. Osman GENCEL Bartın Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakultesi	**……..……**
Üye	**:** Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bolvadin MYO	**……..……**
Üye	**:** Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ Afyon Kocatepe Üniversitesi, İscehisar MYO	**……..……**

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... /..... /..... tarih ve
……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

…….
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

08 / 05 / 2026

İmza

Alper TUNCA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORON (B) MİKRO TOZU MODİFİYELİ YENİ NESİL ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA ALTERNATİF AKIMIN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Alper TUNCA
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. İsmail Hocaoğlu

Bu araştırmada, farklı oranlarda (%0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1) boron mikron tozu (BMT) ikame edilen çimento esaslı harçlarda BMT'nin harç iç sıcaklığına, nem içeriğine, mekanik dayanımına ve mikro yapısına etkilerini araştırmak amaçlanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, BMT içermeyen ve sırasıyla %0,25, %0,50 ve %1 oranında BMT içeren harçların priz bitiş süreleri yaklaşık olarak 191, 86, 273, 299 ve 301 dakika olarak ölçülmüştür. Harçlardaki nem içerikleri incelendiğinde, BMT oranının artırılmasının daha fazla tepe noktalarının oluşmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, daha çok C-S-H jeli oluştuğunu göstermektedir. Bilindiği üzere, soğuk hava koşullarında ya da tarihi yapıların onarımı gibi hızlı tamirat gerektiren durumlarda ek önlemlerin alınması zorunludur. Bu nedenle, BMT modifiyeli harçlardaki hidratasyon tepkimelerinin (bir yenilik olarak alternatif akım AC, 30V) uygulanarak) daha da hızlandırılabileceği düşünülmüştür. Harçlarda çimento yerine ağırlıkça 0,25% BMT ikame edildiğinde ve AC uygulandığında priz başlangıç süresinde önemli bir değişiklik gözlenmediği, nihai priz süresinde ise belirgin bir azalma (108 dakika) meydana geldiği rapor edilmiştir. Ayrıca, %0,75 BMT ilavesiyle, hem AC uygulanan hem de uygulanmayan numunelerde sürdürülebilirliğin önemli ölçüde iyileştirilebileceği rapor edilmiştir.

2026, ix + 44 sayfa

Anahtar Kelimeler: Alternatif akım, Boron mikro tozu, Hızlı priz, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ALTERNATIVE CURRENT ON BORON (B) MICRO POWDER MODIFIED NEW GENERATION CEMENT BASED MORTARS

Alper TUNCA

Afyon Kocatepe University

Institute of Science

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Supervisor: Assoc. Prof. İsmail HOCAOĞLU

In this research, it was aimed to investigate the effects of boron micron powder (BMP) incorporated at different ratios (0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1%) on the internal temperature, moisture content, mechanical strength, and microstructure of cement-based mortars. According to the findings obtained, the final setting times of the mortars containing 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1% BMP were measured as approximately 191, 86, 273, 299, and 301 minutes, respectively. Examination of the moisture content of the mortars revealed that increasing the BMP ratio led to the formation of more pronounced peak values. This observation indicates the formation of a greater amount of C-S-H gel. As is well known, additional measures are required under cold weather conditions or in situations requiring rapid repair, such as the restoration of historical structures. Therefore, it was hypothesized that the hydration reactions in BMP-modified mortars could be further accelerated by applying alternating current (AC, 30 V) as an innovative approach. When 0.25% BMP was incorporated in place of cement and AC was applied, no significant change was observed in the initial setting time; however, a notable reduction (108 minutes) occurred in the final setting time. Furthermore, with the addition of 0.75% BMP, sustainability was found to increase significantly in both AC-applied and non-applied specimens.

2026, ix + 44 pages

Keywords: Alternating current, boron Micron powder, Rapid setting, Sustainability.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU' na, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Alper Tunca

Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
RESİMLER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ 2
2.1 Kavramsal Çerçeve 2
2.1.1 Nano-Bor 2
2.1.2 Nano-Borun Çimento Esaslı Sistemlerde Davranışı 3
2.1.3 Nano-Bor Modifiyeli Yeni Nesil Çimento Esaslı Harçlar 4
2.1.4 Alternatif Akım ve NB' nin Çimento Esaslı Sistemlerde Etkisi 5
2.1.5 İlgili Araştırmalar 6
3. MATERYAL ve METOT 9
3.1 Araştırmanın Modeli 9
3.2 Araştırmanın Çerçevesi ve Örneklemi 10
3.3 Verilerin Elde Edilmesi 11
3.4 Bileşenler 12
3.5 Harç Numunelerinin Hazırlanması 14
3.6 Yapılan Deneyler 15
4. BULGULAR 16
4.1 Boron Mikron Tozu ve Alternatif Akım Uygulamasının Hidratasyon Sıcaklığına Etkisi 16
4.2 Boron Mikro Tozu ve Alternatif Akım Gerilim Yoğunluğunun İç Sıcaklığa Etkisi 19
4.3 Farklı Boron Mikro Tozu Oranlarında Harçlardaki Yüzey Nem Analizi 20

4.4 Bor Mikron Tozu İçeriği ve Alternatif Akım Uygulamasının Eğilme Dayanımına Etkisi 21
4.5 Boron Mikro Tozu İçeriği ve Alternatif Akım Uygulamasının 7 Günlük Basınç Dayanımına Etkisi 23
4.6 Boron Mikro Tozu İçeriği ve Alternatif Akım Uygulamasının 28 Günlük Basınç Dayanımına Etkisi 24
4.7 Mikroyapı Analizi 26
4.8 Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi Analizi 28
4.9 Sürdürülebilirlik Analizi 30
4.10 X-Işını Difraksiyon Analizi Sonuçları 32
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 35
6. KAYNAKLAR 37
ÖZGEÇMİŞ 44

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	
CaO	Kalsiyum oksit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
SiO_2	Silisyum dioksit
MgO	Magnezyum oksit
Fe_2O_3	Demir(III) oksit
K_2O	Potasyum oksit
Na_2O	Sodyum oksit
TiO_2	Titanyum dioksit
SO_3	Kükürt trioksit

Kısaltmalar	
AC	Alternatif akım
ACIS	Elektriksel empedans spektroskopisi
BMT	Bor mikron tozu
C-H	Kalsiyum hidroksit
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
EDX	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
H-BN	Hegzagonal bor nitrür
MPa	Megapaskal
NB	Nano bor
NM	Nano metre
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
µm	Mikro metre

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 BMT'nin XRD analizi (a), Dou vd. (2014) (b), ve Singh vd. (2016) (c) tarafından yürütülen çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması. 13

Şekil 3.2 BMT'nin TEM ve EDX analiz sonuçları. 14

Şekil 4.1 BMT içeriğine göre harçların hidratasyon ısı değişimleri (a), ilk tepe oluşum zamanı (b) ve ikinci tepe oluşum zamanı (c). 17

Şekil 4.2 BMT içeriğine ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak harçların hidratasyon ısı değişimleri. 18

Şekil 4.3 Farklı gerilme yoğunlukları uygulamalarına bağlı olarak harçların hidratasyon ısı değişimleri. 20

Şekil 4.4 BMT'nin ilk C-S-H jel oluşum süresi üzerindeki etkileri. 20

Şekil 4.5 Farklı BMT içeriklerine sahip harçlarda tepe oluşum sürelerinin ve bağıl nem değerlerinin karşılaştırılması. 21

Şekil 4.6 BMT içeriğine ve AC uygulamasına bağlı olarak 7 gün kürlenmiş harçların eğilme dayanımı. 22

Şekil 4.7 28 gün kürlenmiş harçların eğilme dayanımı, BMT içeriğine ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak. 23

Şekil 4.8 7 günlük kürlenmiş harçların basınç dayanımının BMT içeriği ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak değişimi. 24

Şekil 4.9 BMT içeriğine ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak 28 gün kürlenmiş harçların basınç dayanımı. 25

Şekil 4.10 TEM analizinden elde edilen görüntüler (a- %0 BMT, b- %0 BMT-AC, c- %0,75 BMT, d- %0,75 BMT-AC, e- %1 BMT, f- %1 BMT-AC). 27

Şekil 4.11 Harçların EDX analizi (a- %0 BMT, b- %0 BMT Alternatif Akım, c- %0.75 BMT, d- %0.75 BMT Alternatif Akım, e- %1 BMT, f- %1 BMT Alternatif Akım). 29

Şekil 4.12 BMT içeriğine (a-%0, b-%0,75, c-%1, d-%0-%0,75 ve %1, e-%0-E-%0,75-E ve %1-E) ve AC uygulamasına bağlı olarak harçların XRD analizi. 33

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Çimentonun içeriği ve bileşenleri. 13

Çizelge 3.2 BMT'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Nanografi, 2026). 14

Çizelge 3.3 1m^3 Harç üretiminde kullanılan malzemeler. 15

Çizelge 4.1 28 gün kürlenmiş harçlardaki Ca/Si ve CaO/(SiO_2+CaO+Al_2O_3) oranlarının karşılaştırılması. 30

Çizelge 4.2 28 gün kürlenmiş harçlardaki Ca/Si ve CaO/(SiO_2 +CaO+Al_2O_3) oranlarının karşılaştırılması. 32

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 Çimento, kırılmış kum ve BMT'nin bir görüntüsü. 12

Resim 3.2 Harçlar üzerinde yapılan deneyler (a – taze halde, b – sertleştikten sonra).. 15

1. GİRİŞ

Dünya genelindeki en büyük bor rezervlerine sahip ülkeler; Türkiye (%73), Rusya (%7,7), Amerika Birleşik Devletleri (%6,2), Şili (%3,2), Peru (%1,7), Sırbistan (%1,6), Bolivya (%1,5), Kazakistan (%1,2) ve Arjantin'dir (%0,7) (Eti Maden 2024). En önemli bor ürünleri arasında kolemanit, tinkal ve uleksit yer almaktadır. Buna ek olarak, borik asit, perboratlar ve pentahidratlar gibi rafine bor ürünleri de üretilmekte, kullanılmakta ve ticareti yapılmaktadır (Eti Maden 2024). Teknolojinin olağanüstü ilerleyişi, çimento esaslı kompozit malzemeler üzerine çalışan bilim insanlarını heyecanlandırmaktadır. Bilindiği üzere, nano malzemeler son derece ince öğütülmeleri sayesinde çimento esaslı kompozitler içerisinde homojen bir şekilde dağılmakta ve bu durum, malzemenin özelliklerinin geliştirilmesinde oldukça etkili olmaktadır. Yeni nesil malzemeler sayesinde yalnızca mekanik dayanım artırılmakla kalmayıp, aynı zamanda malzemenin dayanıklılık özellikleri de geliştirilebilmektedir. Çimento esaslı kompozitlerde tercih edilen başlıca nano malzemeler; nano lifler, nano grafen oksit, nano karbon, nano silika, nano titanyum dioksit, nano çinko oksit, nano bor (NB), BMT, nano magnezyum oksit gibi teknolojik ürünlerdir (Hocaoğlu 2022, Nanografi 2026).

Soğuk hava koşullarında beton dökümü sırasında ek önlemler alınması kritik öneme sahiptir. Zira düşük sıcaklıklar hidratasyon sürecini olumsuz etkileyerek priz süresini uzatabilir ve sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini zayıflatabilir. Önceki çalışmalar, bor katkısının çimento sistemlerinde hidratasyon sıcaklığını artırarak priz süresini azalttığını ortaya koymuştur (Borax 2025). Ancak soğuk hava koşullarında, hidratasyonun kesintisiz devam etmesi için ek önlemler almak, priz ve mekanik özelliklerin korunması açısından gereklidir. Bu nedenle, bu çalışmada BMT'nin çimento esaslı harçların hidratasyon sıcaklığı üzerindeki etkileri ve katkı dozajının belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, BMT katkısı içeren harçlara farklı gerilim şiddetlerinde alternatif akım (AC) uygulanarak priz süresinin hızlandırılıp hızlandırılamayacağı araştırılmış, böylelikle literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir. Literatür taramalarına göre, BMT katkılı harçlarda AC uygulamasına dair sınırlı sayıda çalışma bulunduğundan, bu araştırma bu alana yenilik getirme potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kavramsal Çerçeve

2.1.1 Nano-Bor

Bor ürünlerinin dünya çapındaki ticaret hacmi yaklaşık 20 milyar dolardır. Bu hacmin %25'lik kısmı; hava yastıkları, süper iletkenler, savunma sanayi, mıknatıslar ve metalurjik malzemeler tarafından oluşturulmaktadır (Dünya Gazetesi 2018). Günümüzde 1 kg nano bor üretim maliyeti yaklaşık 2000 dolardır. Ancak teknoloji geliştikçe bu maliyetlerin yakın gelecekte azalması beklenmektedir. Yeni ortaya çıkan bir nanomalzeme olan NB, son zamanlarda hem kapsamlı şekilde araştırılmakta hem de farklı alanlarda uygulanmaktadır. Grafen yapısına benzer şekilde, NB iki boyutlu kristal yapıya sahip, katmanlı bir malzemedir (Mokhtara vd. 2017). NB, bor elementinin nano ölçekli formunu ifade etmekte olup genellikle 1–100 nm aralığında parçacık boyutuna sahip bor esaslı nanomalzemeleri kapsamaktadır. Çimento esaslı sistemlerde en yaygın kullanılan formu hegzagonal bor nitrür (h-BN) nanosheet ve nanoparçacıklarıdır. H-BN, altıgen kristal yapıya sahip, iki boyutlu tabakalı bir malzeme olup grafene benzer atomik düzlem yapısı göstermektedir (Golberg vd. 2010).

NB' nin kristal yapısı, bor ve azot atomlarının sp^2 hibritleşmesi ile oluşan güçlü kovalent bağlara dayanmaktadır. Bu yapı, yüksek elastisite modülü ve yüksek mekanik rijitlik sağlamaktadır. Song vd. (2010) h-BN nano lehvaların elastisite modülünün yaklaşık 0,8–1,0 TPa seviyesinde olduğunu bildirmiştir. Bu değerler, nano-borun mikro takviye elemanı olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Song vd. 2010).

Zhi vd. (2009), h-BN nano lehvalarının yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğunu ve ısı transferi gerektiren kompozit sistemlerde etkin şekilde kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu özellik, elektriksel kür uygulamalarında oluşan ısının daha homojen dağılmasına katkı sağlayabilecek potansiyele işaret etmektedir.

Bir diğer yandan Lee vd. (2010), NB' nin yüksek yüzey enerjisine sahip olduğunu ve bu nedenle çekirdeklenme merkezi olarak davranabildiğini göstermiştir. Yüksek yüzey alanı, çimento hidratasyon reaksiyonlarında kristal büyümesini etkileyebilecek önemli bir parametre olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte NB parçacıkları yüksek yüzey enerjileri nedeniyle aglomerasyon eğilimi gösterebilmektedir. Kim vd. (2012), uygun dispersiyon teknikleri uygulanmadığında NB' nin topaklanma eğilimi gösterebileceğini ve bunun kompozit performansını olumsuz etkileyebileceğini rapor etmiştir.

2.1.2 Nano-Borun Çimento Esaslı Sistemlerde Davranışı

NB çimento hidratasyon sürecine etkisi çoğunlukla fiziksel mekanizmalar üzerinden gerçekleşmektedir. Literatürde NB katkısının kapiler boşlukları doldurarak mikro yapıyı yoğunlaştırdığı ve gözenek dağılımını iyileştirdiği belirtilmektedir. Ayrıca çekirdeklenme etkisi sayesinde C–S–H jel oluşum hızının da artabileceği rapor edilmiştir. Bu mekanizmalar erken yaş dayanım artışı ile ilişkilendirilmektedir (Wang vd. 2018, Bhojaraju vd. 2025). Ayrıca NB katkısının agrega–matris arayüzü üzerinde iyileştirici etki oluşturduğu ve ITZ bölgesinde mikro çatlak gelişimini sınırlayabildiği de bildirilmiştir. Bu durum özellikle eğilme dayanımı üzerinde olumlu etki ortaya koymaktadır (Ghazanlou vd. 2021). Mikroyapısal analizlerde NB katkılı sistemlerde daha yoğun C–S–H jel oluşumu ve daha düşük Ca/Si oranı gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bu sonuçlar NB' nin mikro yapı modifikasyonu yoluyla dayanım artışına katkı sağladığını göstermektedir (Wang vd. 2018).

NB; yüksek mekanik dayanımı (Palanivel vd. 2016, Kim vd. 2017), mükemmel ısıl iletkenliği (Wang vd. 2018), yüksek elektriksel direnç seviyesi (Li vd. 2015) ve olağanüstü ısıya dayanıklılığı (Pakdel vd. 2014) sayesinde; işleme teknolojileri, elektronik, havacılık ve takviyeli kompozitlerde önemli potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, araştırmacılar NB'nin çimento esaslı kompozitlere entegrasyonunu da incelemişlerdir.

Yapılan deneysel çalışmalar, %1 NB içeren betonların basınç dayanımında %64'e kadar, tokluğunda ise %200'e varan artışlar sağladığını göstermiştir (Rafiee vd. 2013). He (2015) tarafından yapılan çalışmada, 5 mikron boyutunda %1 NB katkısı ile mekanik dayanımda yaklaşık %6,59 oranında artış elde edilmiştir. Ayrıca, 5 mikron boyutunda %1 NB içeren betonların %20 NaCl çözeltisine maruz bırakıldığı dayanıklılık testinde, NB içermeyen betonlara kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sergilediği de tespit edilmiştir. Wang vd. (2018), NB'nin çimento pastasındaki pul pul ayrılma ve dağılma davranışlarını incelemiş ve %0,003 oranında NB katkısının, 7 günlük kür sonrası basınç dayanımında %13, çekme dayanımında ise %8'lik artış sağladığını bildirmiştir. Liu vd. (2022), NB katkısının priz süresi üzerindeki etkisini araştırmış ve NB'nin ilk priz süresini yaklaşık %6,44, nihai priz süresini ise %5,05 oranında azalttığını belirtmiştir. Aynı zamanda, mikroyapı analizlerinde NB'nin C-S-H jel oluşumunu artırdığı saptanmıştır. Günder vd. (2020) ise, NB'nin van der Waals bağlarını kuvvetlendirdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuç, NB'nin oldukça yüksek yüzey alanına sahip olmasıyla ilişkilendirilmiştir. Wang vd. (2017), %0,3 NB katkısının çimento sistemlerinde eğilme dayanımını %42,80 oranında artırdığını ve bunun NB'nin boşlukları doldurması ve daha yoğun C-S-H jel oluşumu ile ilişkili olduğunu ifade etmiştir.

2.1.3 Nano-Bor Modifiyeli Yeni Nesil Çimento Esaslı Harçlar

NB katkılı çimento esaslı harçlar, mikro ve nano ölçekte yapı mühendisliği prensipleri ile tasarlanan yeni nesil kompozit sistemler olarak değerlendirilmektedir. Bu sistemlerde temel amaç, hidratasyon kinetiğini kontrol etmek, erken yaş dayanımı artırmak ve mikro yapıyı yoğunlaştırmaktır (Bhojaraju vd. 2025).

NB katkısının düşük dozajlarda erken yaş hidratasyon ısısını artırabildiği, buna bağlı olarak erken dayanım gelişimini hızlandırabildiği rapor edilmiştir. Bununla birlikte yüksek dozajlarda parçacık topaklanmasının mekanik performansı olumsuz etkileyebileceği belirtilmektedir (Mao Mydin vd. 2025).

NB modifiyeli sistemlerde gözenek yapısının iyileştiği, mikro yapı yoğunluğunun arttığı ve mekanik dayanım değerlerinde belirgin artış sağlandığı bildirilmektedir. Bu durum dolgu etkisi ve çekirdeklenme mekanizması ile açıklanmaktadır (Wang vd. 2018, Ghazanlou vd. 2021).

2.1.4 Alternatif Akım ve NB' nin Çimento Esaslı Sistemlerde Etkisi

Alternatif akım (AC), yönü ve büyüklüğü zamanla periyodik olarak değişen elektrik akımı türü olarak tanımlanmaktadır (Wang vd. 2019). AC uygulamalarında akımın yönü belirli bir frekansta tersine dönmekte olup bu durum iyon hareketliliğini ve elektrik alan dağılımını etkilemektedir. İletken veya yarı iletken ortamlarda AC uygulanması sonucunda Joule ısınması meydana gelmekte ve hacimsel ısı üretimi gerçekleşmektedir (Wang vd. 2019). Çimento esaslı sistemler hidratasyon süreci boyunca iyonik iletkenlik göstermektedir. Taze çimento hamurunda çözünmüş iyonların varlığı elektrik alan uygulandığında akım iletimine olanak sağlamaktadır. Bu özellik, AC uygulamasının çimento matrisinde kontrollü ısıl yükselme oluşturabilmesini mümkün kılmaktadır (Wang vd. 2019).

AC uygulaması literatürde yaygın olarak elektriksel empedans spektroskopisi (ACIS) yöntemi ile hidratasyon sürecinin izlenmesinde kullanılmaktadır. ACIS yöntemi, sinüzoidal gerilim uygulanarak sistemin frekansa bağlı empedans cevabının ölçülmesine dayanmaktadır. Bu yöntem sayesinde çimento hidratasyonunun farklı evreleri elektriksel parametreler üzerinden takip edilebilmektedir (Sosa Gallardo vd. 2021).

Hidratasyon sürecinde elektrik alanın uygulanması iç sıcaklık artışına neden olabilmekte ve bu durum hidratasyon kinetiğini etkileyebilmektedir. Elektriksel ısıtma sonucu erken yaş hidratasyon hızının arttığı ve priz süresinin kısalabildiği bildirilmektedir (Yang vd. 2023). Çimento esaslı sistemlerde AC uygulamasının erken yaş reaksiyon hızını artırdığı, ancak uygulama parametrelerine bağlı olarak mikro yapı üzerinde farklı etkiler oluşturabileceği belirtilmektedir. Elektrik alanın etkisi gerilim seviyesi, uygulama süresi ve numune geometrisi gibi değişkenlere bağlı olmaktadır (Wang vd. 2019, Yang vd. 2023).

2.1.5 İlgili Araştırmalar

Son yıllarda bor ve bor türevlerinin, özellikle nano boyuttaki formlarının, çimento esaslı kompozitlerin mekanik, fiziksel ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri kapsamlı biçimde araştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar, NB katkısının dayanım gelişimi, hidratasyon kinetiği, priz süresi ve elektriksel özellikler üzerinde önemli etkiler oluşturabileceğini ortaya koymaktadır. Konu ile ilgili literatürde yapılan bazı araştırmalar aşağıda sunulmuştur.

Rafiee vd. (2013), betona ağırlıkça %1 oranında NB ilavesinin basınç dayanımını %64'e kadar artırdığını ve malzemenin tokluğunda yaklaşık %200 oranında iyileşme sağladığını bildirmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, nano boyuttaki bor partiküllerinin matriste mikro çatlak ilerlemesini sınırlayarak enerji yutma kapasitesini artırdığı şeklinde yorumlanmıştır. Benzer şekilde He (2015), yaklaşık 5 µm boyutunda ve %1 oranında NB katkısının betonun mekanik dayanımında %6.59'luk bir artış sağladığını belirlemiştir. Ayrıca, %20 NaCl çözeltisine maruz bırakılan numunelerde NB katkısının durabilite performansını iyileştirdiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, NB'nin hem mekanik hem de çevresel etkilere karşı dayanım açısından olumlu katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Wang vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çimento hamuruna oldukça düşük bir oranda (%0.003) NB eklenmesinin dahi 7 günlük kür sonunda basınç dayanımını %13, çekme dayanımını ise %8 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Bu durum, nano katkıların çok düşük dozajlarda dahi nükleasyon etkisi ve boşluk doldurma mekanizması sayesinde dayanım gelişimine katkı sağlayabildiğini göstermektedir. Öte yandan Wang vd. (2017), %0.3 oranındaki NB ilavesinin eğilme dayanımını %42.80 oranında artırdığını ve bu artışın NB'nin boşlukları doldurarak daha yoğun bir C-S-H jeli oluşumunu teşvik etmesinden kaynaklandığını ifade etmiştir. Zhang vd. (2018) ise %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında NB kullanımının 28 günlük eğilme dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %19.5, %18.06 ve %17.53 oranlarında artırdığını belirlemiştir. Bununla birlikte, %1'in üzerindeki NB kullanımının erken yaş (3 günlük) basınç

dayanımında azalmaya neden olabileceği rapor edilmiştir. Bu durum, yüksek dozajlı bor katkılarının hidratasyon sürecini geciktirebileceğine işaret etmektedir.

Bor içeren mineral katkılara yönelik çalışmalarda da benzer şekilde yaşa bağlı dayanım farklılıkları gözlemlenmiştir. Örklemez vd. (2024), çimento yerine %20 oranında BMT ikamesinin 7 günlük eğilme dayanımını düşürdüğünü, ancak 28 günlük kür sonunda %2.46 oranında artış sağladığını bildirmiştir. Bu sonuç, puzolanik veya mineral katkıların erken yaşta dayanım kaybına neden olabileceğini, ancak ilerleyen kür sürelerinde ikincil hidratasyon ürünleri sayesinde dayanımı artırabileceğini göstermektedir.

Hidratasyon ve priz süresi üzerine yapılan çalışmalar, bor ve türevlerinin çimento kimyası üzerindeki etkilerinin dozaja ve kimyasal forma bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Liu vd. (2022), NB katkısının ilk priz süresini yaklaşık %6.44, son priz süresini ise %5.05 oranında azalttığını ve C-S-H jellerinin oluşumunu artırdığını tespit etmiştir. Bu durum, NB'nin nükleasyon merkezleri oluşturarak hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırabileceğini düşündürmektedir. Günder vd. (2020) ise NB'nin yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle çimento esaslı sistemlerde Van der Waals etkileşimlerini belirgin biçimde artırdığını belirtmiştir. Artan yüzey etkileşimleri, matris içinde daha kompakt bir yapı oluşumuna katkı sağlayabilmektedir.

Buna karşın Davraz (2015) ile Bullerjahn vd. (2019), borat iyonlarının $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek kalsiyum borat hidrat fazları oluşturduğunu ve bu fazların klinker parçacıklarının yüzeyini kaplayarak hidratasyonu geciktirdiğini açıklamıştır. Bu durum borun rötar etkisi oluşturabileceğini ve özellikle yüksek dozajlarda erken yaş dayanımını olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Öte yandan Bhojaraju ve Ouellet-Plamondon (2025), bor nitrür nanotüplerinin çimento hidratasyonunu artırdığını ve C-S-H jeli oluşumunu hızlandırdığını bildirmiştir. Bu sonuç, borun farklı kristal yapıları ve nano morfolojilerinin hidratasyon kinetiği üzerinde farklı mekanizmalarla etkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

Elektriksel kür ve iletkenlik bağlamında gerçekleştirilen çalışmalar da bor türevlerinin potansiyelini ortaya koymaktadır. Hocaoğlu (2022), çimento esaslı harçlarda alternatif akım kullanılarak uygulanan elektriksel kürün priz süreleri ve hidratasyon gelişimi üzerindeki etkilerini incelemiş; özellikle zeolit ve grafen oksit katkılı harçlarda akım uygulamasının mikro yapı ve dayanım gelişimine etkilerini değerlendirmiştir. Bezugly vd. (2011) ile Li vd. (2015) ise bor nanotüpleri ve nano-hekzagonal bor nitrür partiküllerinin yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olduğunu ve bu özelliğin kompozit malzemelerin elektriksel direnci ile ısınma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Bu bulgular, bor türevlerinin kendiliğinden ısınabilen veya elektriksel kür uygulanabilen akıllı beton sistemlerinde kullanılabileceğine işaret etmektedir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Araştırmanın Modeli

Bu çalışma, BMT katkısı ile erken yaşta uygulanan elektriksel kürün (AC); çimento esaslı harçlarda fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemektedir. Araştırma modeli, sürdürülebilir ve hızlı kürlenebilen yeni nesil kompozit malzemelerin geliştirilmesi amacıyla malzeme bileşimi ile kür koşullarının optimize edilmesine dayanmaktadır. Deneysel tasarım iki temel bağımsız değişken üzerine kurgulanmıştır: birincisi, çimento ağırlığı yerine ağırlıkça %0 (kontrol), %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 oranlarında BMT ikamesiyle oluşturulan beş farklı harç karışımı; ikincisi ise taze harç numunelerine hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırmak amacıyla 0V, 30V, 40V ve 50V gerilim değerlerinde uygulanan alternatif akım kürüdür. Araştırma süreci üç aşamada yürütülmüştür: ilk aşamada çimento ve BMT'nin karakterizasyonu gerçekleştirilmiş; BMT'nin morfolojik ve kimyasal yapısı XRD (X-Işını Kırınımı), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDX (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi) analizleri ile belirlenmiş, harç karışımları su/çimento oranı 0.70 ve 300 kg/m³ dozaj sabit tutularak hazırlanmış ve BMT topaklanmayı önlemek amacıyla öncelikle karışım suyunda disperse edilmiştir. İkinci aşamada taze harç özellikleri incelenmiş; numuneler elektriksel olarak yalıtılmış 40×40×160 mm boyutlu kalıplara yerleştirilerek 24 saat süreyle belirlenen akım şiddetlerinde AC uygulanmıştır. Hidratasyon ısısı değişimleri sıcaklık sensörleri aracılığıyla, priz süreleri ve C-S-H jeli oluşum kinetiği ise nem içeriği değişimleri üzerinden sürekli olarak izlenmiştir. Üçüncü aşamada ise sertleşmiş harçların mekanik performansı ve mikroyapısal değişimleri değerlendirilmiş; 1 günlük elektriksel veya standart kür sonrasında kalıptan çıkarılan numuneler 7 ve 28 gün süreyle kireçli suda kürlenmiş, eğilme ve basınç dayanımları ASTM C348 standardına uygun biçimde test edilmiş, mekanik sonuçları desteklemek ve iç yapıda meydana gelen faz değişimlerini (C-S-H, CH, C_3S vb.) incelemek amacıyla seçilen numuneler üzerinde SEM, EDX ve XRD analizleri tekrarlanmış; son olarak basınç dayanımı verileri ile malzeme içerikleri kullanılarak gömülü CO_2 (embodied CO_2) hesaplamaları yapılmış ve elde edilen bulgular doğrultusunda sürdürülebilirlik analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2 Araştırmanın Çerçevesi ve Örneklemi

Bu araştırmanın çerçevesi, BMT katkısı ile erken yaşta uygulanan AC'nin çimento esaslı harçların hidratasyon davranışı, mekanik performansı, mikroyapısal gelişimi ve sürdürülebilirlik göstergeleri üzerindeki etkilerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesine dayanmaktadır. Çalışma, malzeme mühendisliği ve yapı malzemeleri alanında deneysel tasarım ilkesine uygun olarak kurgulanmış olup, bağımsız değişkenler olarak BMT ikame oranı ile uygulanan elektriksel kür gerilim şiddeti belirlenmiş; bağımlı değişkenler ise iç sıcaklık değişimi, priz süreleri, nem içeriği, eğilme ve basınç dayanımları, mikroyapısal faz gelişimi (C-S-H, CH, C_3S vb.) ve gömülü CO_2 (embodied CO_2) değerleri olarak tanımlanmıştır. Araştırma, laboratuvar ölçeğinde kontrollü deney koşullarında yürütülmüş ve malzeme bileşimi ile elektriksel kür parametrelerinin optimizasyonu üzerinden hızlı kürlenen ve çevresel etkisi azaltılmış yeni nesil harçların geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda çalışma, taze ve sertleşmiş durum özelliklerini birlikte ele alan çok aşamalı bir deneysel çerçeveye sahiptir.

Tez çalışmasında, CEM I 42.5R çimentosu, maksimum 4 mm tane boyutuna sahip kırma kum ve farklı oranlarda çimento yerine ikame edilen BMT kullanılarak harç numuneleri üretilmiştir. Deneysel tasarım doğrultusunda çimento ağırlığının %0 (kontrol), %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 oranlarında BMT ile ikame edilmesiyle beş farklı karışım serisi hazırlanmış; her seri için ayrıca 0 V (kontrol), 30 V, 40 V ve 50 V AC uygulaması gerçekleştirilmiştir. Numuneler 40 mm × 40 mm × 160 mm boyutlarında elektriksel olarak yalıtılmış kalıplarda üretilmiş ve deney grupları, BMT oranı ile elektriksel kür uygulamasına göre alt gruplara ayrılmıştır. Tüm numuneler sabit su/çimento oranı (0.70) ve 300 kg/m^3 çimento dozajı esas alınarak hazırlanmış olup, böylece değişkenler arası karşılaştırmaların yapılması sağlanmıştır. Bu yapılandırma sayesinde, farklı BMT oranları ve gerilim seviyelerinin harçların erken yaş ve ileri yaş performansı üzerindeki etkileri sistematik ve karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir.

3.3 Verilerin Elde Edilmesi

Bu araştırmada veriler, deneysel tasarım doğrultusunda laboratuvar ortamında kontrollü koşullar altında gerçekleştirilen ölçüm ve analizler aracılığıyla elde edilmiştir. Veri toplama süreci, taze harç özelliklerinin belirlenmesi, erken yaş hidratasyon davranışının izlenmesi, sertleşmiş harçların mekanik performansının ölçülmesi, mikro-yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi ve sürdürülebilirlik göstergelerinin hesaplanması olmak üzere çok aşamalı bir yapıda yürütülmüştür.

Erken yaş verileri kapsamında, numunelerin iç sıcaklık değişimleri kalıp içerisine yerleştirilen sıcaklık sensörleri aracılığıyla 24 saat boyunca sürekli olarak kaydedilmiştir. Bu ölçümler sayesinde hidratasyon ısısı gelişimi, birinci ve ikinci pik oluşum zamanları ile priz süreleri dolaylı olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bağıl nem sensörleri kullanılarak numunelerin yüzey nem değişimleri izlenmiş; nem eğrilerinde gözlenen negatif pik noktaları üzerinden C-S-H jeli oluşum zamanları değerlendirilmiştir. Elektriksel kür uygulanan serilerde, farklı gerilim seviyeleri altında sıcaklık ve nem verileri eş zamanlı olarak kaydedilmiş ve kontrol grupları ile karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

Sertleşmiş harçlara ilişkin mekanik veriler, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda standartlara uygun olarak gerçekleştirilen eğilme ve basınç dayanımı deneyleri ile elde edilmiştir. Eğilme dayanımı testleri sonrasında kırılan prizmatik numunelerden elde edilen yarım parçalar üzerinde basınç dayanımı deneyleri uygulanmış ve sonuçlar MPa cinsinden kaydedilmiştir. Tüm deneyler aynı çevresel koşullarda gerçekleştirilmiş ve ölçümler sistematik olarak veri tablolarına aktarılmıştır.

Mikroyapısal veriler ise seçilen temsili numuneler üzerinde gerçekleştirilen X-Işını Kırınımı (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) analizleri aracılığıyla elde edilmiştir. XRD analizleri ile faz bileşenleri ve hidratasyon ürünleri belirlenmiş; SEM görüntüleri yardımıyla boşluk yapısı, mikro-çatlak oluşumu ve C-S-H jeli dağılımı gözlemlenmiştir. EDX analizleri

sonucunda elde edilen elementel bileşim değerleri kullanılarak CaO/SiO_2 ve $CaO/(SiO_2 + CaO + Al_2O_3)$ oranları hesaplanmış ve mikroyapısal yoğunluk ile ilişkilendirilmiştir.

Sürdürülebilirlik değerlendirmesi kapsamında ise 28 günlük basınç dayanımı sonuçları ile EDX analizlerinden elde edilen elementel veriler kullanılarak gömülü CO_2 (embodied CO_2) değerleri hesaplanmış; CO_2/fc oranı üzerinden çevresel performans analizi yapılmıştır. Tüm veriler sayısal ortamda düzenlenmiş, grafik ve tablolar aracılığıyla görselleştirilmiş ve istatistiksel karşılaştırmalar yoluyla yorumlanmıştır. Bu kapsamlı veri elde etme süreci, BMT oranı ve elektriksel kür uygulamasının çimento esaslı harçların performansına olan etkilerinin çok boyutlu ve güvenilir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

3.4 Bileşenler

Bu tez çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak, Türkiye'de Çimsa fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır ve söz konusu çimento TS EN 197-1 (2012) standardına uygundur. Çimentoya ait bazı kimyasal bileşim ve fiziksel özellik sonuçları Çizelge 3.1'de sunulmuştur. Deneysel çalışmalarda agrega olarak maksimum dane çapı 4 mm olan ve özgül ağırlığı 2.65 olarak belirlenen kırma kum tercih edilmiş, karışım suyu olarak ise Bolvadin (Afyonkarahisar) şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çimento, kırma kum ve BMT ait görseller Resim 3.1'de verilmiştir.

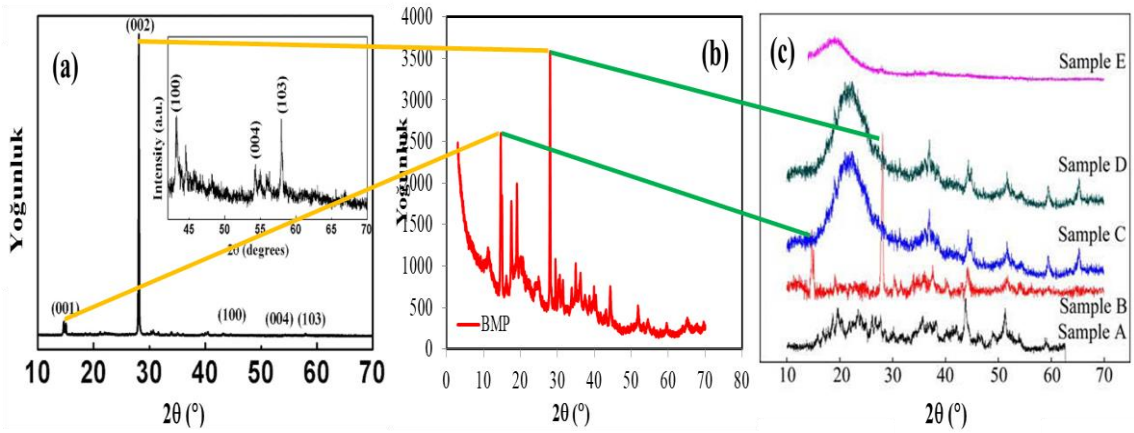


Resim 3.1 Çimento, kırılmış kum ve BMT'nin bir görüntüsü.

Çizelge 3.1 Çimentonun içeriği ve bileşenleri.

Bileşenler	Çimento içeriği, %
CaO	62.5
Al_2O_3	4.62
SiO_2	20.6
MgO	1.93
Fe_2O_3	3.57
K_2O	1.03
Na_2O	0.29
TiO_2	0.39
SO_3	4.81

Bu çalışmada kullanılan BMT, Türkiye merkezli Nanografi firmasından temin edilmiştir (Nanografi 2026). BMT'ye ait kristal yapı analizleri X-Işını Kırınımı (XRD) yöntemi ile gerçekleştirilmiş olup, analiz sonuçları Şekil 3.1'de sunulmuştur. Yapılan XRD incelemelerinde, BMT'nin 2θ = 14,61° [118.1] ve 2θ = 27,95° açılarında karakteristik pikler oluşturduğu gözlenmiştir. Elde edilen kırınım desenleri, Dou vd. (2014) ve Singh vd. (2016) tarafından rapor edilen BMT sonuçları ile karşılaştırılmış ve literatür verileriyle uyumlu olduğu doğrulanmıştır. BMT'ye ilişkin elementel bileşim sonuçları ile temel fiziksel özellikler Çizelge 3.2'de ayrıntılı olarak sunulmuştur.

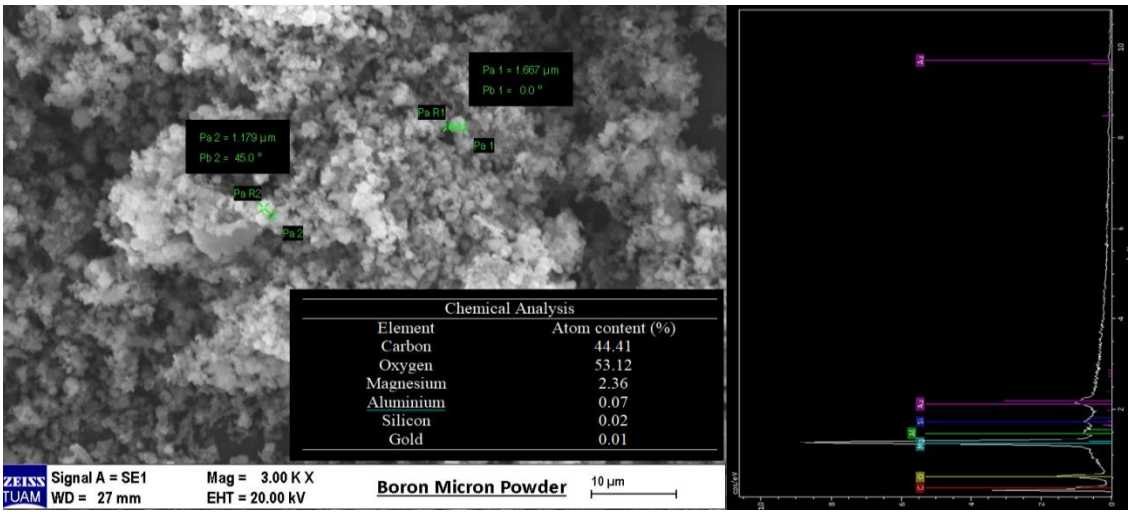


Şekil 3.1 BMT'nin XRD analizi (a), Dou vd. (2014) (b), ve Singh vd. (2016) (c) tarafından yürütülen çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması.

Çizelge 3.2 BMT'nin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri (Nanografi, 2026).

Saflık, %	**Renk**	**Ortalama Parçacık Boyutu (µm)**		**Gerçek Yoğunluk (g/cm^3)**	
99.95	Siyah	1-2		1.7	
Element Analizi (%)					
B	Al	Mn	Fe	Ca	Cr
99.95	0.11	0.045	0.015	0.001	0.01

BMT'ye ait morfolojik ve elementel özelliklerin belirlenmesi amacıyla SEM ve EDX analizleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 3.2'de sunulmuştur. SEM görüntülerinde, BMT'nin mikron mertebesinde (yaklaşık 1179 µm ve 1667 µm boyutlarında) parçacıklar içerdiği gözlemlenmiştir. EDX analiz sonuçlarında ise Karbon (C), Oksijen (O), Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al) ve Silisyum (Si) elementlerine karşılık gelen karakteristik pikler tespit edilmiştir. Analiz spektrumunda gözlenen altın (Au) pikinin, SEM incelemesi öncesinde numune yüzeylerinin iletkenlik sağlamak amacıyla altın ile kaplanmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.



Şekil 3.2 BMT'nin TEM ve EDX analiz sonuçları.

3.5 Harç Numunelerinin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan harç karışımı; 300 kg/m^3 çimento dozajı ve 0,70 su/çimento oranıyla hazırlanmıştır. İlk aşamada, kırma kum ve çimento mekanik karıştırıcıda iyice karıştırılmıştır. Bu sırada, BMT'nin topaklanmasını önlemek amacıyla BMT, ayrı bir

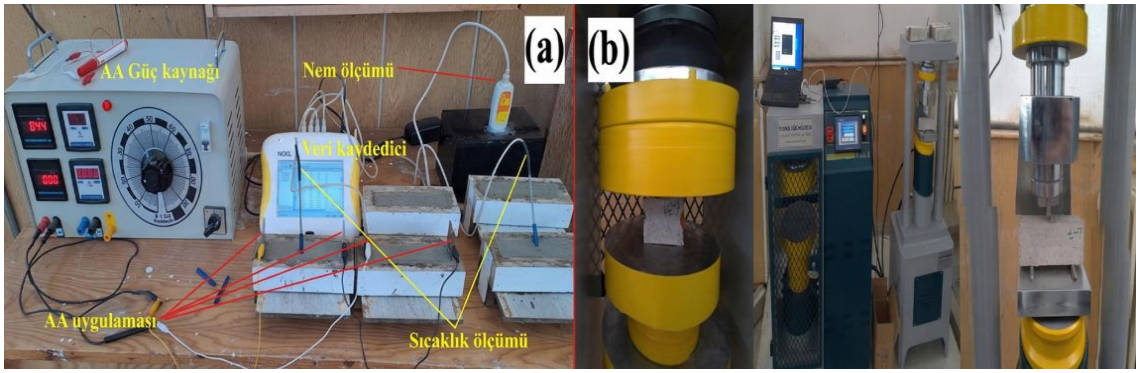
kapta su ile karıştırılmıştır. Elde edilen sıvı karışım, yavaş yavaş kuru karışıma ilave edilerek toplamda 3 dakika boyunca karıştırma yapılmıştır. 1 m^3 harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları Tablo 2.3'te sunulmuştur. Harçlar, 40 mm × 40 mm × 160 mm boyutlarında elektriksel olarak izole edilmiş kalıplara dökülmüştür.

Çizelge 3.3 $1m^3$ Harç üretiminde kullanılan malzemeler.

BMT, %	Çimento, kg/m^3	Kum, kg/m^3	BMT, kg/m^3	Su, lt/m^3
0	300.00	1100	-	210.00
0.25	299.25	1100	0.75	209.47
0.50	298.50	1100	1.50	208.95
0.75	297.75	1100	2.25	208.42
1	297.00	1100	3.00	207.90

3.6 Yapılan Deneyler

Taze harç numuneleri, 30V alternatif akıma (AC) bir gün boyunca maruz bırakılmıştır. Akım uygulanan ve kontrol grubu olan numunelere, iç sıcaklık ölçüm sensörleri yerleştirilmiş ve 24 saat boyunca dakikada bir veri kaydı yapılmıştır. Harç nem içerikleri belirli seriler için izlenmiş ve karşılaştırmalı analizler için kayıt altına alınmıştır. İlk günün sonunda numuneler kalıptan çıkarılmış ve BS EN 12390-2 (2019) standardına göre 7 ve 28 gün boyunca kürlenmiştir. Eğilme ve basınç dayanımları ise ASTM C348 (2014) standardına uygun şekilde test edilmiştir. Ayrıca, seçilen numuneler üzerinde mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizinde, küçük numune parçaları altınla kaplanmış ve 10.000x büyütmede görüntülenmiştir. Yapılan testler Resim 3.2'de gösterilmektedir.



Resim 3.2 Harçlar üzerinde yapılan deneyler (a – taze halde, b – sertleştikten sonra).

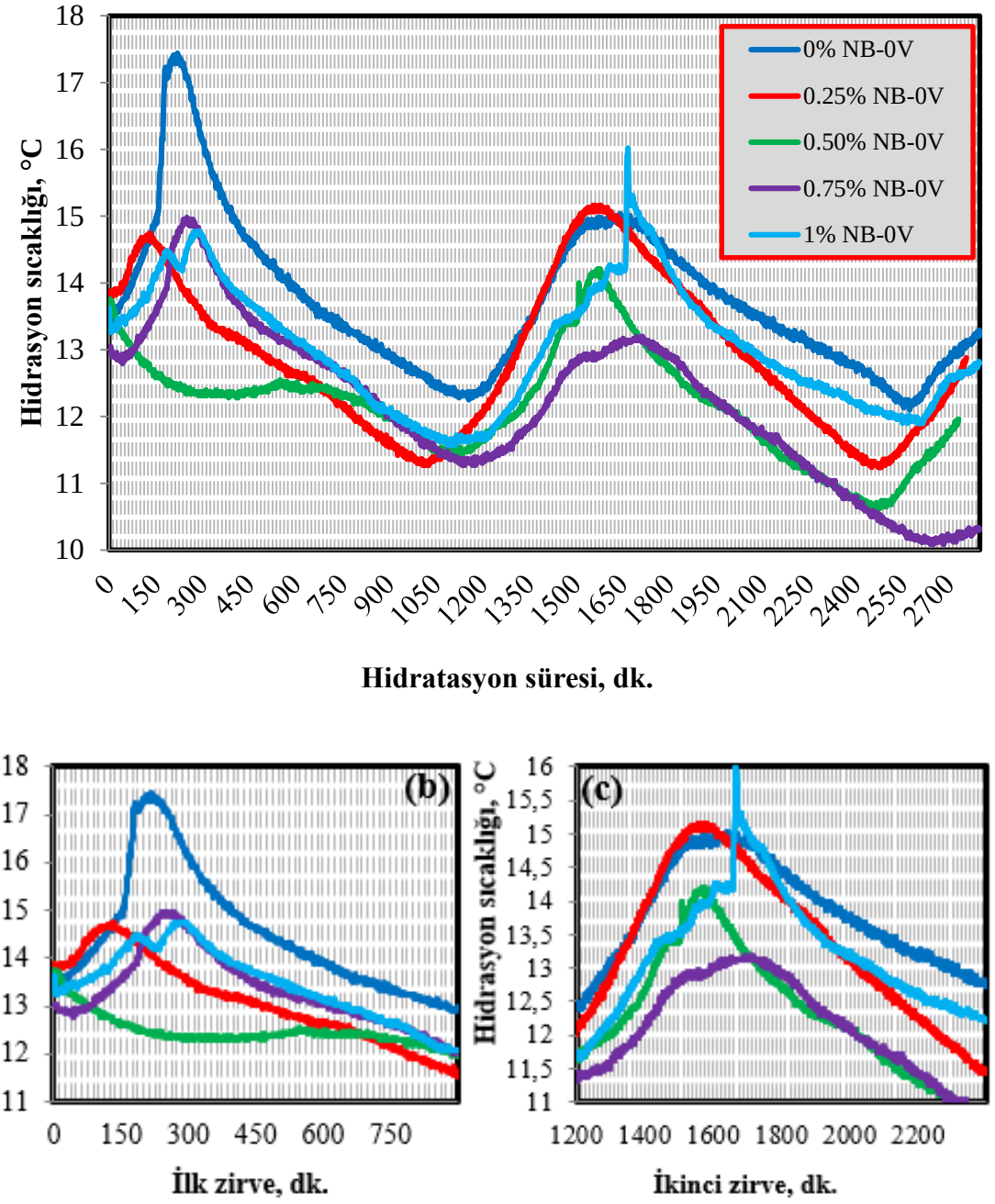
4. BULGULAR

4.1 Boron Mikron Tozu ve Alternatif Akım Uygulamasının Hidratasyon Sıcaklığına Etkisi

Şekil 4.1'de BMT ve AC uygulamalarının harçlardaki sıcaklık değişimleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Tüm serilerde, BMT katkısının başlangıç hidratasyon sıcaklığında iç sıcaklığı düşürdüğü tespit edilmiştir. Çimentonun %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında BMT ile yer değiştirilmesi durumunda, referans numuneye kıyasla ilk sıcaklık zirve noktalarında sırasıyla 2,69 °C, 4,80 °C, 2,46 °C ve 2,69 °C'lik sıcaklık azalmaları gözlenmiştir.

Daha önce yapılan araştırmalar, çimento esaslı sistemlerdeki ilk sıcaklık zirvesinin genellikle priz bitiş süresi ile örtüştüğünü göstermektedir (Hu vd. 2014, Kosmatka vd. 2016, Xia vd. 2023). Bu çalışmada, BMT katkısı içeren harçların priz bitiş süreleri sırasıyla yaklaşık olarak şu şekilde bulunmuştur: %0 BMT için 191 dakika, %0,25 BMT için 86 dakika, %0,50 BMT için 273 dakika, %0,75 BMT için 299 dakika ve %1 BMT için 301 dakika. Özellikle %0,50 ve %1 BMT katkılı harçlardaki priz süresindeki gecikmeler, literatürde belirtildiği üzere, borat iyonlarının $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek kalsiyum borat hidratları oluşturması ve bu yapıların çimento klinker tanelerini kaplayarak hidratasyon sürecini yavaşlatmasıyla açıklanabilir (Davraz 2015, Bullerjahn vd. 2019, Jianglin vd. 2022).

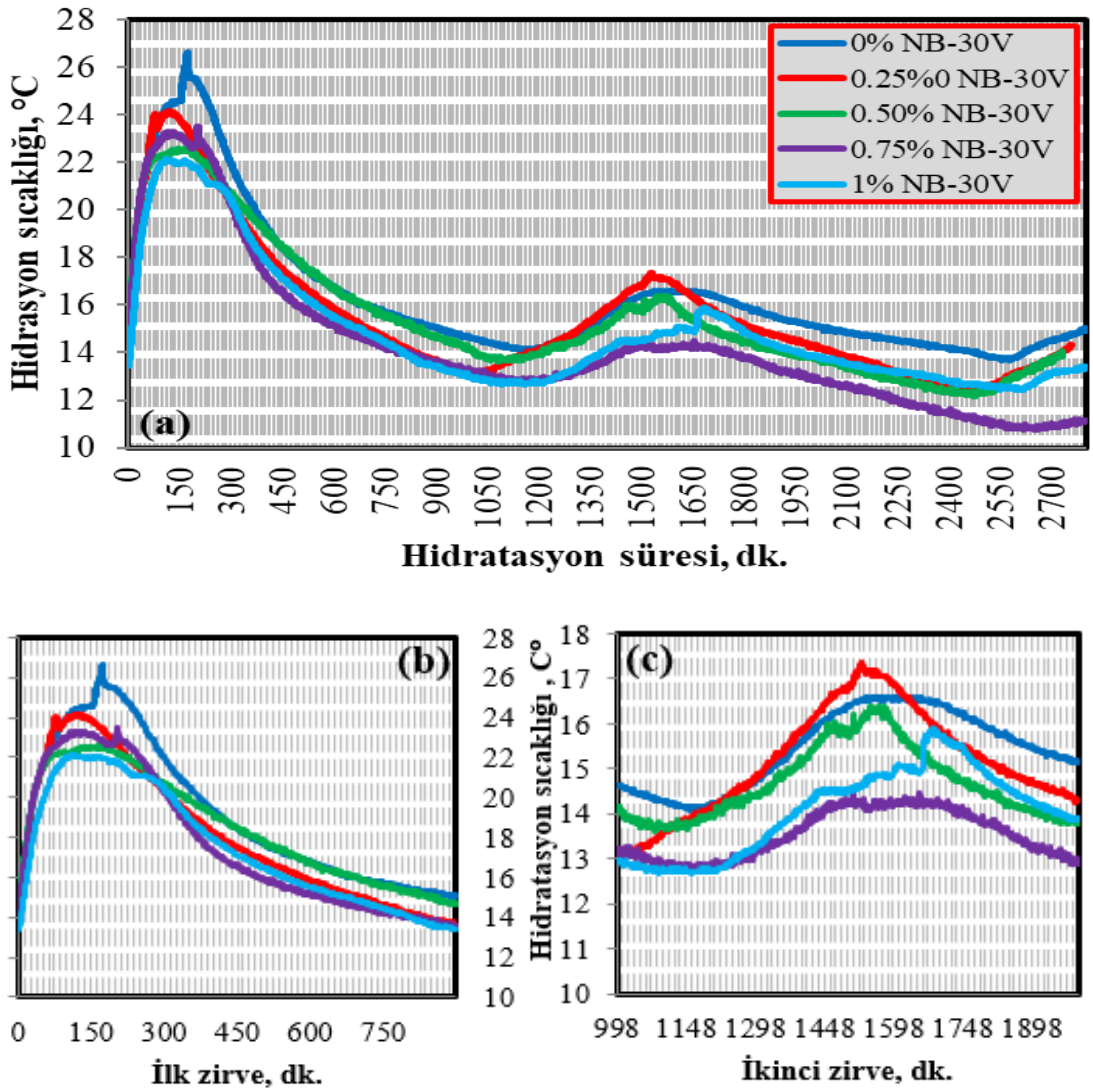
Bu çalışmanın öne çıkan yeniliklerinden biri, çimentonun %0,25'inin BMT ile yer değiştirilmesi durumunda ikinci sıcaklık zirvesinin diğer BMT katkılı harçlara göre daha erken gerçekleşmesidir. Bu durum, erken C-S-H jeli oluşumunun BMT'nin düşük dozajdaki harçlarda daha erken gerçekleştiğine işaret etmektedir. Bu etki, BMT'nin dolgu/nükleasyon etkisi veya yüzey etkileşimleri yoluyla erken hidratasyonu hızlandırmasıyla açıklanabilir (Pramanick vd. 2020).



Şekil 4.1 BMT içeriğine göre harçların hidratasyon ısı değişimleri (a), ilk tepe oluşum zamanı (b) ve ikinci tepe oluşum zamanı (c).

Bu çalışmanın yenilikçi yönlerinden bir diğeri de hidratasyon sıcaklıklarını artırmak ve priz süresini daha da kısaltmak amacıyla, farklı BMT içeriğine sahip harçlara AC uygulanmasıdır. Şekil 4.2'de, AC uygulaması altında farklı BMT oranlarına sahip harçların iç sıcaklık değişimleri sunulmuş ve bu sayede erken yaş hidratasyon davranışları hakkında önemli veriler elde edilmiştir. AC uygulamasıyla birlikte, referans

numunenin iç sıcaklığının yaklaşık 12 °C arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.2). Bununla birlikte, çimentonun %0,25'i BMT ile değiştirildiğinde, AC uygulaması sonucu hem birinci hem de ikinci sıcaklık zirvelerinde iç sıcaklık değerleri, %0,50, %0,75 ve %1 BMT oranlarına sahip harçlardan daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, BMT'nin yüksek elektriksel iletkenliğiyle açıklanabilir (Bezugly vd. 2011, Pramanick vd. 2020, Avcı vd. 2023). Özellikle %1 BMT içeren ve AC uygulanan harçta, birinci sıcaklık zirvesindeki sıcaklık değerleri diğer BMT oranlarına göre daha düşüktür. Bu durumun, BMT'nin yüksek su emme kapasitesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Avcı vd. 2023).



Şekil 4.2 BMT içeriğine ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak harçların hidratasyon ısı değişimleri.

4.2 Boron Mikro Tozu ve Alternatif Akım Gerilim Yoğunluğunun İç Sıcaklığa Etkisi

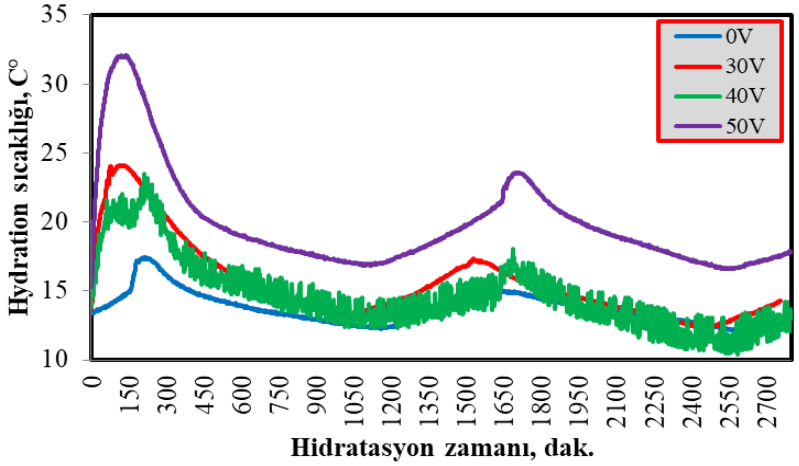
Şekil 4.3, %0,25 BMT içeren harçlarda hidratasyonun başlamasından itibaren yaklaşık iki gün boyunca iç sıcaklık değişimini göstermektedir. Ayrıca bu şekilde, harçlara uygulanan farklı AC gerilim şiddetlerinin (0V, 30V, 40V ve 50V) hidratasyon sıcaklıkları üzerindeki etkisi de karşılaştırılmıştır.

İlk sıcaklık zirvesine ulaşma süresi sırasıyla yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde ölçülmüştür:

- 0 V AC: 178 dakika,
- 30 V AC: 86 dakika,
- 40 V AC: 88 dakika,
- 50 V AC: 89 dakika.

Bu bulgular doğrultusunda, AC uygulamasının priz süresini yaklaşık 90 dakika kadar kısalttığı anlaşılmıştır. Bununla birlikte, uygulanan gerilim yoğunluğunun (30–50 V arası) priz süresi üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı da gözlemlenmiştir. Diğer yandan, uygulanan gerilim seviyesi arttıkça harcın iç sıcaklığında genel bir artış meydana gelmiştir. Örneğin, 50V gerilim uygulaması, harcın başlangıç sıcaklığına kıyasla iç sıcaklıkta yaklaşık 16,13 °C'lik bir artış sağlamıştır. Daha ilginç bir bulgu ise, ikinci sıcaklık zirvesine ulaşma süresinin, uygulanan gerilim yoğunluğu arttıkça uzamasıdır (Şekil 4.3). Bu durum, C-S-H jellerinin daha yavaş oluşmasına neden olmaktadır (Bhojaraju ve Ouellet-Plamondon 2025).

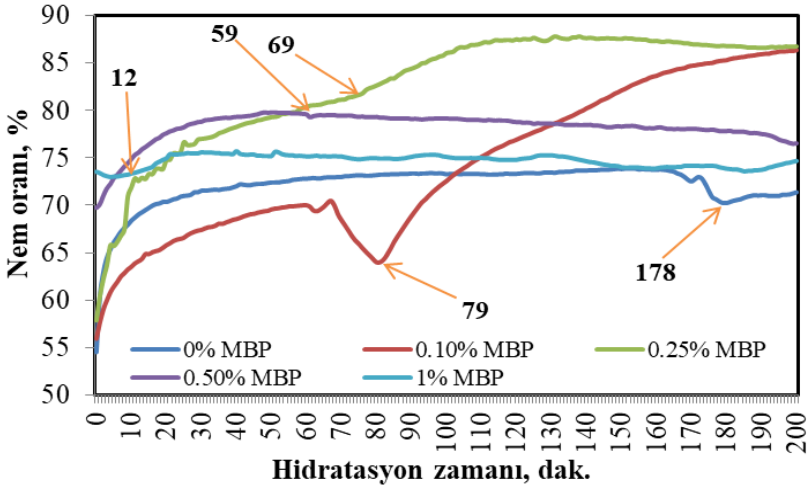
Buna karşın, %0,25 BMT katkılı harca 30V akım uygulandığında, ikinci sıcaklık zirvesine ulaşma süresi, akım uygulanmayan numuneye göre daha kısa olmuştur. Bu nedenle, BMT katkılı harçlar için optimum akım yoğunluğunun 30V olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.3 Farklı gerilme yoğunlukları uygulamalarına bağlı olarak harçların hidratasyon ısı değişimleri.

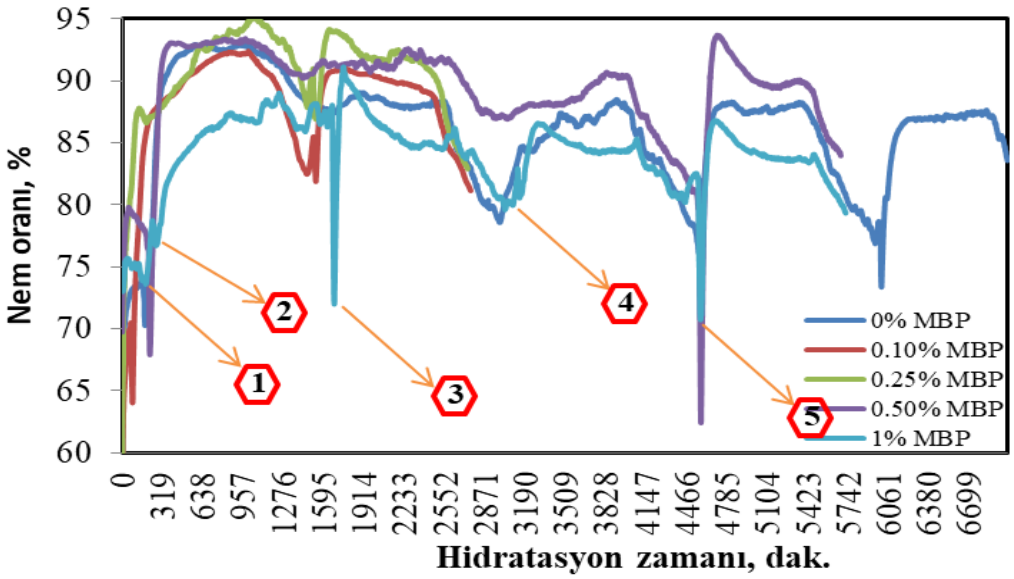
4.3 Farklı Boron Mikro Tozu Oranlarında Harçlardaki Yüzey Nem Analizi

Daha önce yapılan çalışmalar, harç ve betonun ilk ve son priz sürelerinin belirlenmesinde nem ölçümünün güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Çimento esaslı malzemelerde, bağıl nemin en düşük negatif değerlere ulaştığı noktalar, genellikle C–S–H jel oluşumunun başladığı zamanla örtüşmektedir (Hocaoğlu 2022). Şekil 4.4, yaklaşık ilk hidratasyon günü boyunca, %0, %0,25, %0,50 ve %1 BMT katkılı harçlardaki nem içeriği eğrilerini göstermektedir. BMT oranı arttıkça, ilk negatif zirveye ulaşma süresi kısalmıştır. Bu bulgu, BMT'nin hidratasyon sürecinde yüksek su emme kapasitesine sahip olmasıyla açıklanabilir (Avcı vd. 2023).



Şekil 4.4 BMT'nin ilk C-S-H jel oluşum süresi üzerindeki etkileri.

Bu çalışmada ayrıca BMT katkılı harçlarda ilk C-S-H jel oluşum zamanı incelenmiş ve BMT oranlarının, oluşan C–S–H jel miktarı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, %1 BMT katkılı harç, bağıl nemin en erken minimum değere ulaştığı numunede gerçekleşmiştir. Ancak dikkat çekici şekilde, bu seride sonraki zirve noktaları diğer BMT oranlarına sahip harçlara kıyasla daha geç meydana gelmiştir. Örneğin, 1670. dakikadaki üçüncü zirvede, bağıl nem yaklaşık %72,76 ile en düşük seviyeye ulaşmış, bu da C–S–H jellerinin en fazla bu noktada oluştuğuna işaret etmektedir. Aynı eğilim dördüncü zirvede de devam etmiştir. İlginç şekilde, beşinci negatif pik neredeyse tüm serilerde aynı zaman diliminde meydana gelmiştir. Buna ek olarak, en düşük bağıl nem değeri (%62,94), %0,50 BMT katkılı harçta gözlenmiştir. Bu durum, bu oranla hazırlanan harçta belirli bir zaman diliminde C–S–H jel oluşumunun daha fazla gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.5 Farklı BMT içeriklerine sahip harçlarda tepe oluşum sürelerinin ve bağıl nem değerlerinin karşılaştırılması.

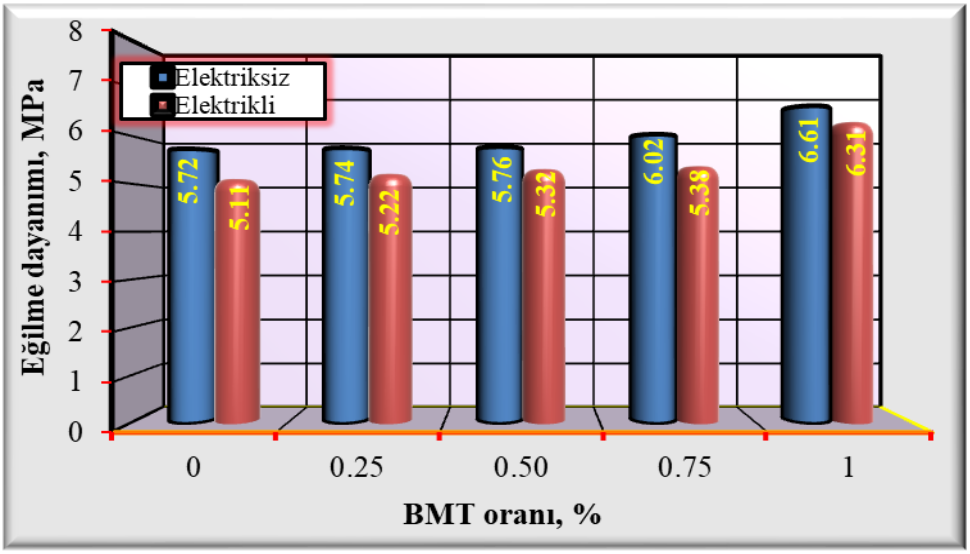
4.4 Bor Mikron Tozu İçeriği ve Alternatif Akım Uygulamasının Eğilme Dayanımına Etkisi

Şekil 4.6, farklı oranlarda BMT içeren harçların 7 günlük kür süresi sonrası eğilme dayanımlarını, alternatif akım (AC) uygulanıp uygulanmadığı durumlara göre karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

Yedi gün süreyle kürlenmiş harçlarda;

- %0,10 BMT katkısı → yaklaşık %0,34,
- %0,25 BMT katkısı → %0,69,
- %0,50 BMT katkısı → %5,24,
- %1 BMT katkısı → %15,55 oranında eğilme dayanımı artışı sağlamıştır.

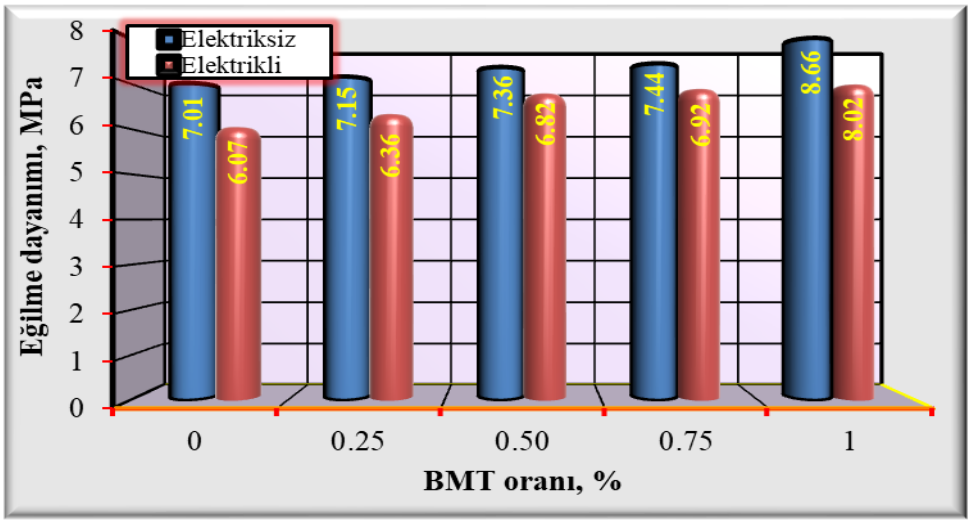
Bu artışlar, BMT parçacıklarının harç içerisindeki mikro boşlukları doldurarak ve nükleasyon etkisi göstererek mekanik dayanımı iyileştirmesiyle açıklanabilir (Bhojaraju ve Ouellet-Plamondon 2025). Ancak dikkat çeken bir durum ise, AC uygulanan harçlarda eğilme dayanımında hafif bir azalma gözlemlenmesidir. Bu durum, AC'nin hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırmasına rağmen, aynı zamanda mikroyapıda bozulmalara neden olabileceğini göstermektedir. Yine de, %1 BMT katkılı harçlarda, AC uygulanmasına rağmen eğilme dayanımında yaşanan azalma, diğer BMT oranlarına göre daha düşük seviyede kalmıştır. Bu da yüksek BMT katkısının AC uygulamasının olumsuz etkilerini kısmen telafi ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.6 BMT içeriğine ve AC uygulamasına bağlı olarak 7 gün kürlenmiş harçların eğilme dayanımı.

Şekil 4.7, 28 gün boyunca kürlenmiş ve elektrik akımı uygulanmış veya uygulanmamış harçların eğilme dayanımı değerlerini karşılaştırmaktadır. Çimentonun ağırlığına göre %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında BMT katkısı yapılması, referans harca kıyasla sırasıyla yaklaşık %1,99, %4,99, %6,13 ve %23,53 oranlarında eğilme dayanımı artışı

sağlamıştır. Zhang vd. (2018), %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında NB katkısı içeren betonların mekanik özelliklerini araştırmış; bu katkıların 28 günlük eğilme dayanımlarını sırasıyla %19,5, %18,06 ve %17,53 oranlarında artırdığını rapor etmişlerdir. Tüm BMT oranları için, 28 gün kür uygulanan harçlarda gözlemlenen eğilme dayanımı artışları, 7 günlük numunelere göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Örklemez vd. (2024), çimentonun %20'sinin BMT ile değiştirilmesinin, 7 günlük kür sonrası eğilme dayanımını düşürdüğünü, ancak 28 günlük kür sonrası yaklaşık %2,46 oranında bir artış sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, çalışmanın genel bulgularına göre, elektrik akımı uygulaması, tüm serilerde eğilme dayanımında azalmaya neden olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.7).

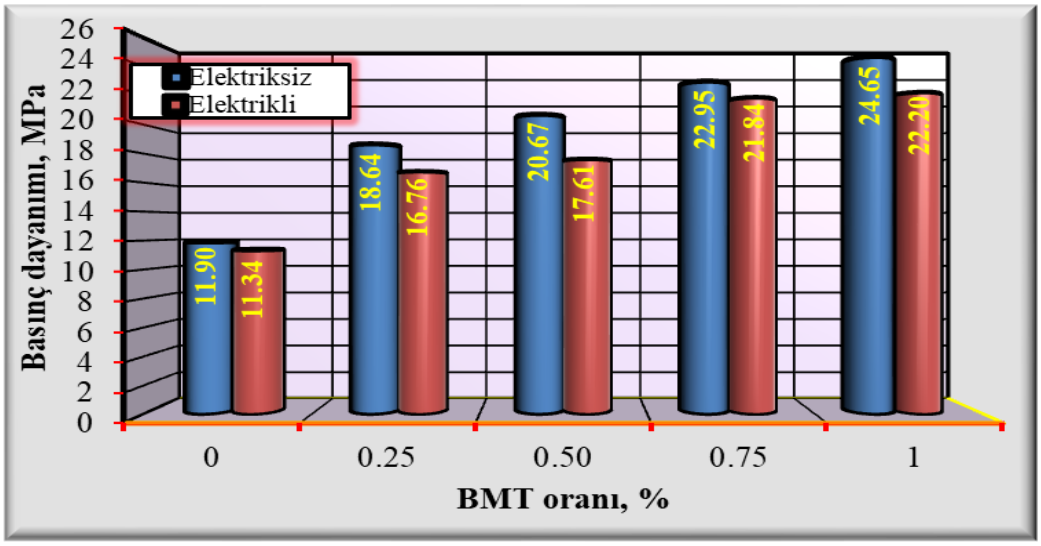


Şekil 4.7 28 gün kürlenmiş harçların eğilme dayanımı, BMT içeriğine ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak.

4.5 Boron Mikro Tozu İçeriği ve Alternatif Akım Uygulamasının 7 Günlük Basınç Dayanımına Etkisi

Şekil 4.8, farklı oranlarda BMT içeren harçların 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarını hem AC uygulanmış hem de uygulanmamış numuneler üzerinden karşılaştırmaktadır. Ayrıca, bu harçlara bir gün boyunca alternatif akım uygulanmış, ardından kalan 6 gün boyunca kireç' e doygun suda kür işlemi gerçekleştirilmiştir. Çimentonun yerine sırasıyla %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 BMT konulduğunda, referans numuneye kıyasla 7 günlük basınç dayanımlarında yaklaşık olarak %56,63, %73,69, %92,60 ve %107,14 oranlarında artışı sağlamıştır. Zhang vd. (2018), betonlara %1, %3 ve %5 NB katkısı

uygulanmasının, 3 günlük basınç dayanımını referans numuneye göre sırasıyla %20,04, %29,80 ve %30,80 oranında azalttığını, ancak ilerleyen yaşlarda dayanım artışı gözlemlemişlerdir. Aynı çalışmada, %1'in üzerindeki NB katkılarının çimento esaslı sistemlerde olumsuz mekanik etkilere yol açabileceği ifade edilmiştir. Wang vd. (2018), yalnızca %0,003 oranında NB katkısıyla çimento pastalarının 7 günlük basınç dayanımında %13 artış sağlandığını bildirmiştir. Diğer yandan Rafiee vd. (2013), %1 NB katkısı ile çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımının %64'e kadar artırılabileceğini rapor etmiştir. Bu çalışmada ise, AC uygulaması genel olarak 7 günlük basınç dayanımını bir miktar düşürdüğü gözlenmiştir. Örneğin, %1 BMT katkılı harçta, AC uygulanan numuneler ile uygulanmayanlar karşılaştırıldığında, yaklaşık %9,93 oranında dayanım düşüşü tespit edilmiştir. Buna karşın, çimentonun %1'inin BMT ile değiştirilip aynı zamanda AC uygulandığında, referans numuneye göre yaklaşık %86,55 oranında basınç dayanımı artışı meydana gelmiştir.

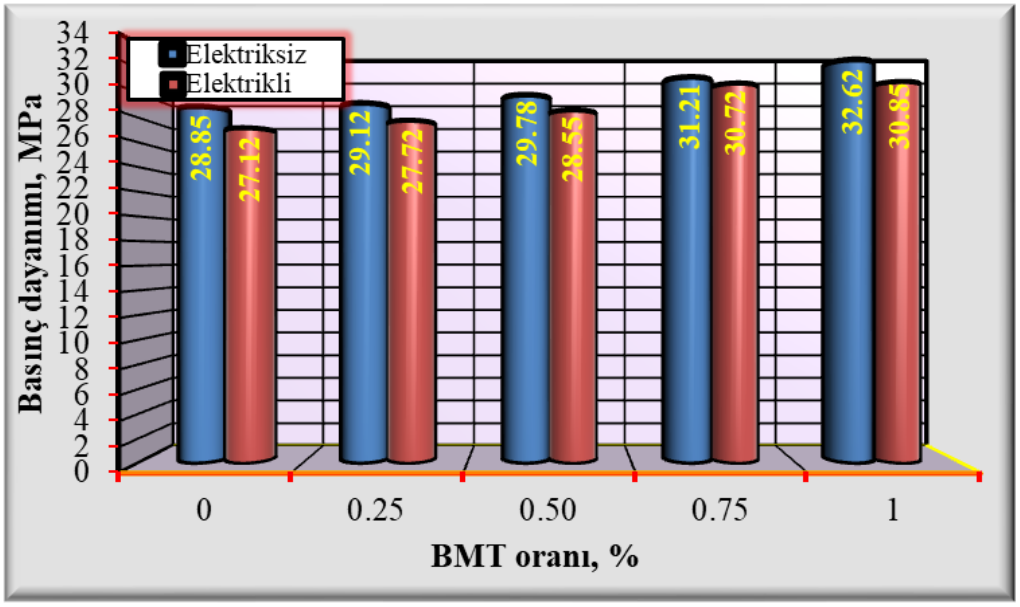


Şekil 4.8 7 günlük kürlenmiş harçların basınç dayanımının BMT içeriği ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak değişimi.

4.6 Boron Mikro Tozu İçeriği ve Alternatif Akım Uygulamasının 28 Günlük Basınç Dayanımına Etkisi

Şekil 4.9, farklı BMT oranlarına sahip harçların, bir gün süreyle AC uygulanmış veya elektrik akımı uygulanmamış sonrasında 27 gün boyunca kireçli suda kürlenmeleri sonrası elde edilen basınç dayanımlarını karşılaştırmaktadır. Çimentonun sırasıyla %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 oranında BMT ile yer değiştirilmesi sonucu, referans

numuneye kıyasla yaklaşık olarak %0,93, %3,22, %8,18 ve %13,06 oranlarında 28 günlük basınç dayanımı artışı meydana gelmiştir. Ancak, BMT katkılı harçlarda 28 günlük dayanım artışı, 7 günlük numunelere kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Bu durum, BMT'nin hidratasyonun erken evrelerinde daha baskın bir puzolanik reaksiyon göstermesiyle açıklanabilir (Fang vd. 2023). Bu reaksiyonlar, C–S–H jel oluşumunun hızlanmasına katkı sağlamaktadır (Bhojaraju ve Ouellet-Plamondon 2025, Harikrishnan vd. 2025). Wang vd. (2018), %0,003 oranında bor nitrür nano yaprak katkısı ile 28 günlük çimento pastalarının basınç dayanımında %13 oranında artış elde edildiğini rapor etmişlerdir. Bir diğer yandan Zhang vd. (2018) ise, %1 NB içeren betonların 28 günlük basınç dayanımında yaklaşık %5,16 oranında iyileşme sağlandığını bildirmiştir. Bu çalışmanın bulguları, literatürdeki bu sonuçlarla örtüşmektedir. Öte yandan, bu çalışmanın özgün katkılarından biri, BMT katkılı harçlara AC uygulanmasının etkisini incelemesidir. Elde edilen sonuçlara göre, çimentonun %0,75 ve %1 oranında BMT ile değiştirilip AC uygulandığında, 28 günlük basınç dayanımlarında referans harca kıyasla sırasıyla yaklaşık %6,48 ve %6,93 oranlarında artış sağlanmıştır. Her ne kadar AC uygulaması, BMT içeriği aynı olan numunelerin dayanımını hafif şekilde azaltmış olsa da; bu etkinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu, zira AC uygulamasının hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırdığı belirlenmiştir.



Şekil 4.9 BMT içeriğine ve alternatif akım uygulamasına bağlı olarak 28 gün kürlenmiş harçların basınç dayanımı.

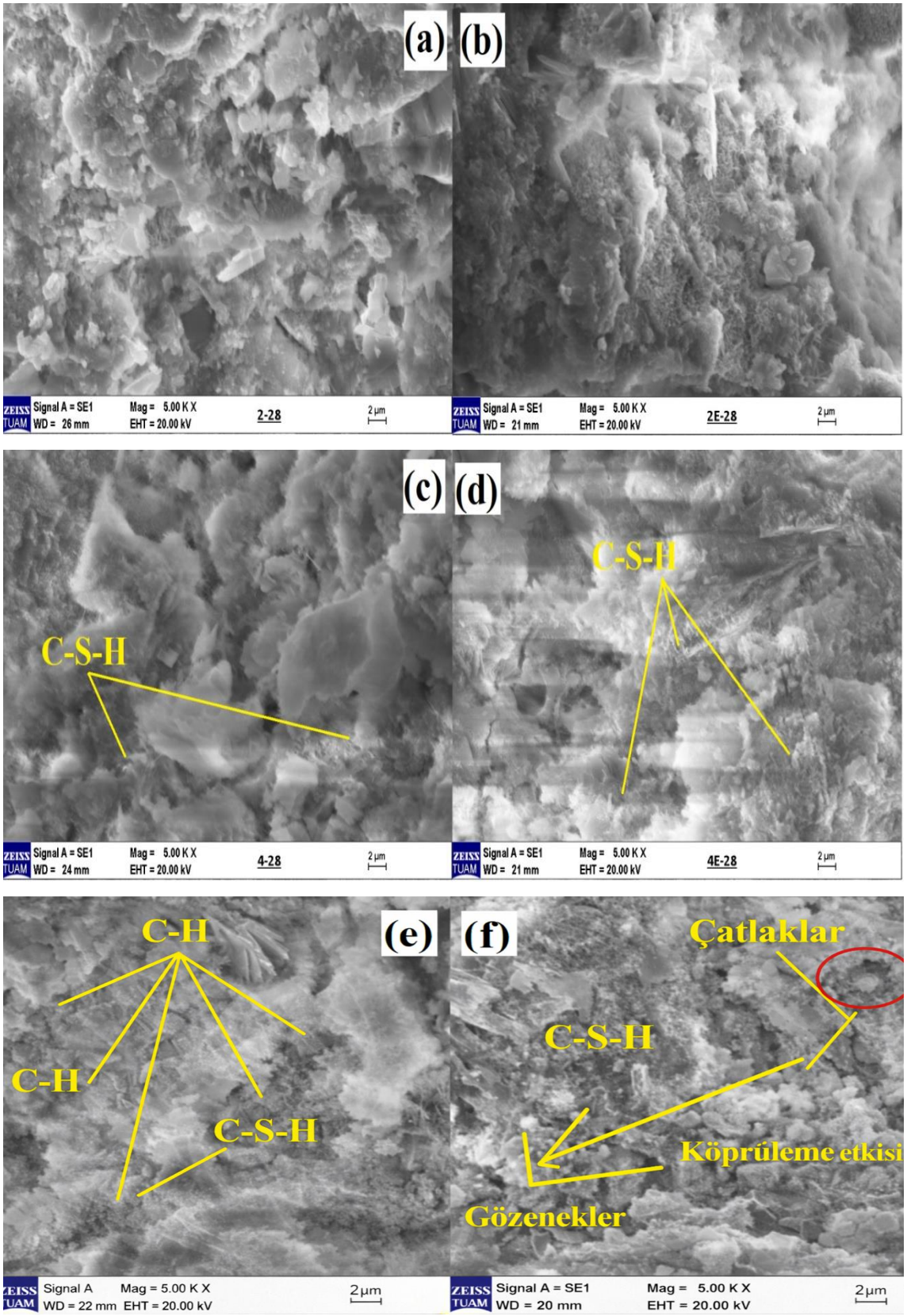
4.7 Mikroyapı Analizi

SEM incelemesi aracılığıyla, çimento esaslı malzemelerin iç morfolojisi ortaya konulabilmektedir. Bu sayede mikro boşluk dağılımı ve hidratasyon ürünlerinin gelişimi hakkında değerli bilgiler elde edilebilir (Zhang vd. 2018).

Resim 3.10, çimentonun sırasıyla %0, %0,75 ve %1 oranında BMT ile ikame edildiği harçların, hem AC uygulanmış hem de uygulanmamış hâllerdeki mikroyapısal özelliklerini göstermektedir. BMT içermeyen (referans) harca AC uygulandığında, iç yapıda bazı bozulmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.10 (a)'da referans numunede geniş boşluklar tespit edilmiş olmakla birlikte, AC uygulanmayan bu numunenin iç yapısı, Şekil 4.10 (b)'de gösterilen AC uygulanmış numuneye kıyasla daha yoğun bir yapı sergilemiştir. Şekil 4.10 (c), %0,75 BMT katkılı harçlarda C–S–H jellerinin morfolojisini ve dağılımını ortaya koymaktadır. Bu olgu, şu şekilde açıklanabilir: nano boyuttaki bor partikülleri, çimento matrisindeki nano ölçekli boşluklara nüfuz ederek, mikroyapının daha yoğun ve kompakt hâle gelmesini sağlamaktadır (Rafiee vd. 2013). Ancak, %0,75 BMT katkılı ve AC uygulanmış numunelerde, AC uygulanmamış numunelere göre daha az C–S–H jel oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.10 (d)).

Bu durum, elektrik akımının bazı negatif mikroyapısal etkileri olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca; ağırlıkça %1 BMT içeren harçlarda, C–H (kalsiyum hidroksit) ve C–S–H gibi hidratasyon ürünlerinin yoğun biçimde oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.10 (e)).

Bununla birlikte, AC uygulanan %1 BMT katkılı harçlarda, mikroyapı içerisinde mikro çatlakların oluştuğu da gözlemlenmiştir (Şekil 4.10(f)). Ancak dikkat çekici şekilde, BMT parçacıklarının bu çatlaklar içerisinde köprüleme etkisi göstererek çatlakları doldurduğu da tespit edilmiştir (Şekil 4.10 (f)). Zhang vd. (2018), nano bor katkısı ile modifiye edilen betonların mikroyapısal özelliklerinin iyileştirilebileceğini belirtmiştir. Bu çalışma, önceki araştırma sonuçları ile uyumlu olduğu, SEM analizinden elde edilen bulguların ise, mekanik dayanım testleriyle de tutarlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.10 TEM analizinden elde edilen görüntüler (a- %0 BMT, b- %0 BMT-AC, c- %0,75 BMT, d- %0,75 BMT-AC, e- %1 BMT, f- %1 BMT-AC).

4.8 Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi Analizi

Enerji Dağılımlı X-Işını (EDX) analizi, harç ve beton gibi çimento esaslı sistemlerde hidratasyon ürünlerini oluşturan elementlerin oranlarını belirlemede etkili bir yöntemdir.

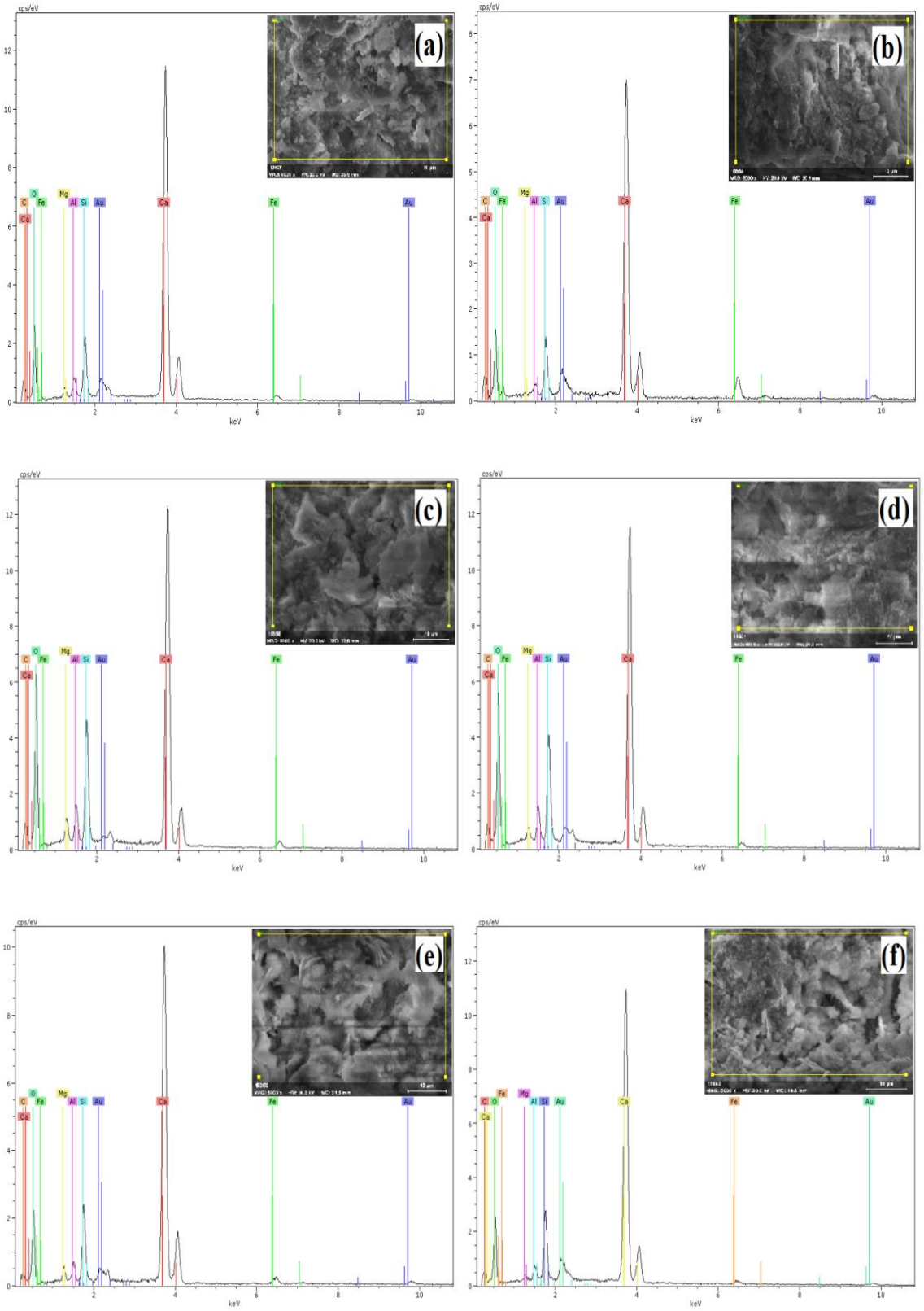
Şekil 4.11, AC uygulanmış ve AC uygulanmamış ve 28 gün kürlenmiş BMT katkılı ve referans harçların EDX analizine ait tepe (pik) sonuçlarını sunmaktadır.

Çimento bazlı sistemlerde Ca (kalsiyum), Si (silisyum) ve Al (alüminyum) elementleri, boşluk oranının azaltılması, mekanik dayanımın artırılması ve mikroyapının iyileştirilmesi üzerinde en etkili elementler olduğu kabul edilmektedir (Hu 2020). Hu (2020), çimento esaslı malzemelerde yapılan EDX analizlerine dayanarak, düşük CaO/SiO_2 oranlarının, daha yoğun C–S–H jel oluşumuna yol açtığını ve bunun sonucunda mekanik dayanımın iyileştirilebileceğini rapor etmiştir.

Benzer şekilde, Xiao vd. (2020), daha düşük $CaO/(SiO_2 + CaO + Al_2O_3)$ oranlarının, yoğun mikroyapılar oluşturduğunu gözlemlemişlerdir.

Bu çalışmada EDX analizlerinden elde edilen CaO/SiO_2 ve $CaO/(SiO_2 + CaO + Al_2O_3)$ oranları Çizelge 4.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. AC uygulanmayan harçlarda, BMT içeriği arttıkça CaO/SiO_2 ve $CaO/(SiO_2 + CaO + Al_2O_3)$ oranların azaldığı, AC uygulanan numunelerde ise, elektrik akımı uygulanmayan numunelere kıyasla bu oranların daha yüksek çıktığı gözlemlenmiştir.

EDX analizlerinden elde edilen bu bulgular, çalışmada daha önce gerçekleştirilen SEM, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testleriyle de tutarlılık göstermektedir.



Şekil 4.11 Harçların EDX analizi (a- %0 BMT, b- %0 BMT Alternatif Akım, c- %0.75 BMT, d- %0.75 BMT Alternatif Akım, e- %1 BMT, f- %1 BMT Alternatif Akım**).**

Çizelge 4.1 28 gün kürlenmiş harçlardaki Ca/Si ve CaO/(SiO_2+CaO+Al_2O_3) oranlarının karşılaştırılması.

Alan	BMT%- AC uygulaması	CaO (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO/SiO_2	CaO/(SiO_2 +CaO+Al_2O_3)
Alan 1	0%-BMT-0V	33.47	3.86	1.16	8.67	0.86
Alan 2	0%-BMT-40V	32.94	3.42	0.62	9.63	0.89
Alan 3	0.75%-BMT-0V	36.71	6.99	1.85	5.25	0.80
Alan 4	0.75%-BMT-40V	32.07	5.23	1.00	6.13	0.83
Alan 5	1%-BMT-0V	24.99	6.28	2.12	3.97	0.74
Alan 6	1%-BMT-40V	25.51	5.86	2.08	4.35	0.76

4.9 Sürdürülebilirlik Analizi

Doğal kaynakların sürekli tükenmesi, sürdürülebilir yapı malzemelerinin kullanımını zorunlu kılmaktadır (Zhang vd. 2023). Buna ek olarak, çimento üretimi, küresel ölçekte yıllık insan kaynaklı CO_2 emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumludur (Lehne ve Preston 2018, IEA 2021). Çimento, bir kompozit içerisindeki bileşenler arasında yaklaşık 631 kg/m^3 ile ikinci en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olup; bu nedenle gömülü karbon (emilmiş karbon) ve enerji tüketimi açısından en büyük paya sahiptir (Hammond ve Jones 2011). Buna karşılık, kum, yaklaşık 1278–1420 kg/m^3 aralığında en yüksek birim hacim ağırlığına sahip olmasına rağmen, birim kütle başına gömülü karbon ve enerji değeri oldukça düşüktür (0,0024 kg CO_2-eşd./kg ve 0,1 MJ/kg) (Hammond ve Jones 2011). Ancak, literatürde hidratasyon süreci boyunca çevreye salınan CO_2 miktarını inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Xiao vd. (2021), betonun eşdeğer CO_2 (eCO_2) değerlerinin, basınç dayanımıyla güçlü biçimde ilişkili olduğunu rapor etmiştir. Benzer şekilde, Hammond ve Jones (2011) da basınç dayanımı ile eCO_2 arasında doğrusal bir ilişki kurmuştur. Bir diğer yandan Topçu ve Sofuoğlu (2020), çimento esaslı kompozit malzemelerde sürdürülebilirlik ile basınç dayanımı arasında bir bağıntı kuran bir formül geliştirmiştir (Denklem 1). Bu formülde, gömülü CO_2 değeri şu şekilde hesaplanmıştır:

$$Cf = \frac{(gömülü\ CO^2)}{f_c} \quad (1)$$

EDX analizlerinde, elementler genellikle ağırlıkça yüzde olarak raporlanmaktadır. Çimento esaslı malzemelerdeki CO_2 içeriği, esas olarak kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) ve magnezyum karbonat ($MgCO_3$) gibi karbonat minerallerinden kaynaklanmaktadır. Bu

nedenle, CO_2 içeriği hesaplanırken Ca ve Mg element içeriklerine dayanılmaktadır. Kalsiyum kaynaklı ve Magnezyum Kaynaklı CO_2 hesaplamaları aşağıda sunulmuştur.

Kalsiyum Kaynaklı CO_2 Hesaplaması:

İlk olarak, çimento esaslı malzemelerdeki kalsiyum içeriği (Ca ağırlık yüzdesi, wt.%) belirlenir. Bu değer, daha sonra CaO eşdeğerine dönüştürülür (Denklem 2):

$$CaO(\%) = Ca(\%) \times \left(\frac{m_{CaO}}{m_{Ca}}\right) \quad (2)$$

Ardından, CaO'nun CO_2'ye dönüşümü hesaplanır (Denklem 3):

$$CO_2(\%)_{Ca} = CaO(\%) \times \left(\frac{m_{CO_2}}{m_{CaO}}\right) \quad (3)$$

Magnezyum Kaynaklı CO_2 Hesaplaması:

Benzer şekilde, Mg (magnezyum) içeriğine dayalı CO_2 miktarı da hesaplanır (Denklem 4):

$$\mathrm{MgO}(\%) = \mathrm{Mg}O(\%) \times \left(\frac{mMgO}{mMg}\right) \quad (4)$$

Daha sonra, MgO'nun CO_2'ye dönüşümü gerçekleştirilir (Denklem 5):

$$CO_2(\%)_{Mg} = MgO(\%)x\left(\frac{mCO_2}{mMgO}\right) \quad (5)$$

Toplam Gömülü CO_2 Hesabı:

Son aşamada, toplam gömülü CO_2 (emilmiş CO_2) miktarı, Denklem 6 kullanılarak hesaplanır:

$$Gömülü_{Co2} = CO_2Ca + CO_2Mg \quad (6)$$

Bu formülde:

- Cf → sürdürülebilirlik katsayısını,
- Emilmiş CO_2 → malzemeye ait toplam gömülü CO_2 miktarını,
- fc ise → harçların 28 günlük basınç dayanımını temsil eder.

CO_2/fc oranının düşük olması, daha yüksek sürdürülebilirlik düzeyine işaret etmektedir (Xiao vd. 2021). Tablo 4.2'de görüldüğü üzere, hem AC uygulanan hem de uygulanmayan harçlarda sürdürülebilirlik açısından optimum BMT içeriğinin %0,75 olduğu belirlenmiştir.

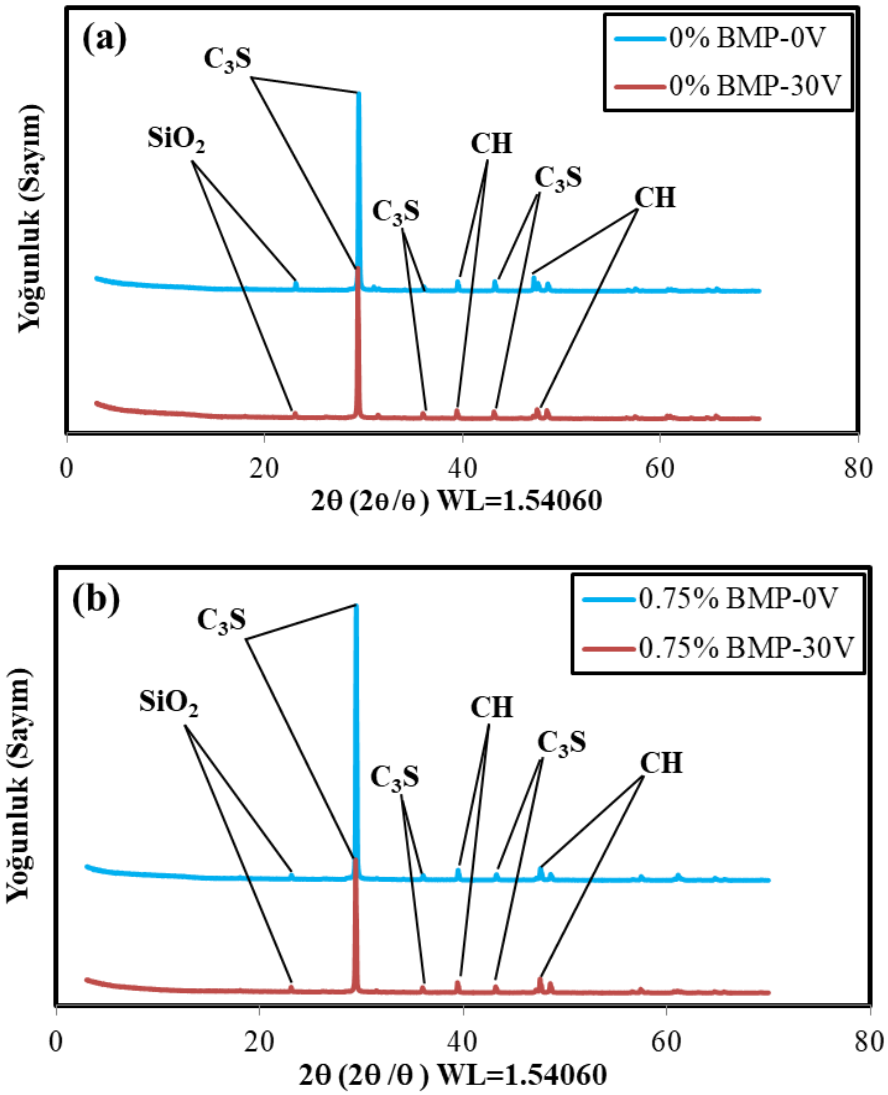
Çizelge 4.2 28 gün kürlenmiş harçlardaki Ca/Si ve CaO/(SiO_2 +CaO+Al_2O_3) oranlarının karşılaştırılması.

Alan	BMT%- AC uygulaması	CO_2 (kg)	fc (MPa)	CO_2/fc (kg/MPa)
Alan 1	0%-BMT-0V	37.40	28.85	1.29
Alan 2	0%-BMT-40V	36.10	27.12	1.33
Alan 3	0.75%-BMT-0V	30.76	31.21	0.98
Alan 4	0.75%-BMT-40V	30.40	30.72	0.99
Alan 5	1%-BMT-0V	43.50	32.62	1.33
Alan 6	1%-BMT-40V	35.80	30.85	1.16

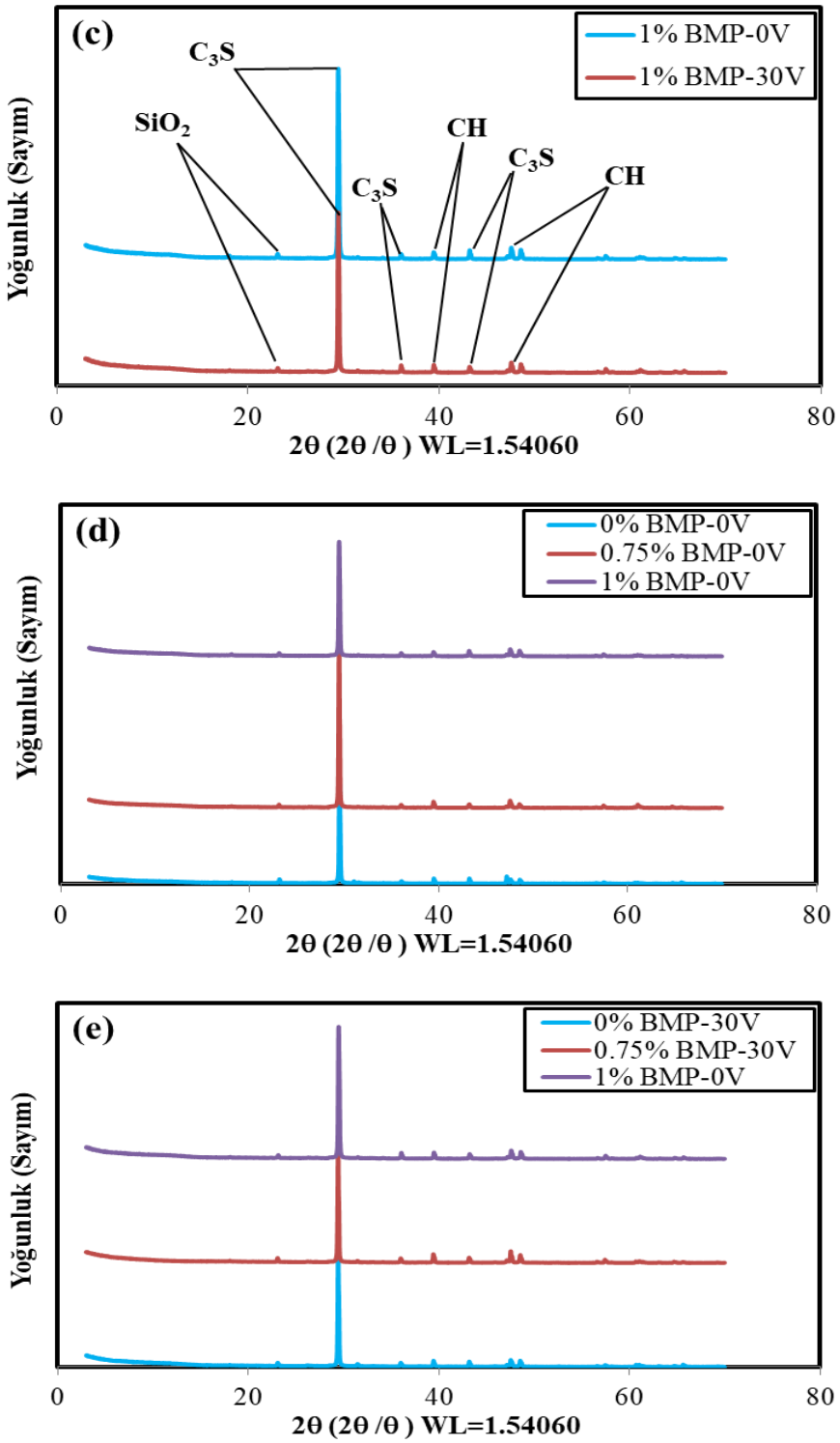
4.10 X-Işını Difraksiyon Analizi Sonuçları

Farklı BMT oranlarına sahip harç numuneleri üzerinde, AC uygulanmış ve uygulanmamış durumlarına göre XRD analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.12). Tüm serilerde yaklaşık olarak 22,06°, 29,48°, 34,91°, 38,59°, 42,26° ve 47,12° açılarında belirgin difraksiyon pikleri gözlemlenmiştir. Bu zirveler sırasıyla SiO_2, C_3S, C_3S, CH, C_3S ve CH fazlarına karşılık gelmektedir (Zhang vd. 2018). Öte yandan, Fang vd. (2023), $2\theta \approx 29°$ civarında nano yapılı C–S–H jel fazlarının oluştuğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmada ise, tüm BMT katkı oranları için AC uygulandığında, özellikle erken yaş dayanımının kazanılmasında etkili olan C_3S fazının oluşumunda azalma gözlemlenmiştir (Şekil 4.12(a-b-c)). Bununla birlikte, en yüksek C–S–H jel piklerinin, çimentonun %0,75'inin BMT ile ikame edildiği durumda oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.12(d)). Bu durum, BMT'nin mikroyapıdaki boşlukları doldurmasıyla ilişkilendirilebilir. Daha önceki çalışmalarda çimento esaslı kompozit malzemelerde, %1'e kadar NB katkısının C–S–H jel oluşumunu artırabileceği bildirilmiş olsa da (Rafiee vd. 2013, Zhang vd. 2018), bu çalışmada özellikle %0,75 BMT içeren harçlarda CH ve C–S–H fazlarının artışı, nispeten yüksek su/çimento oranına bağlanmaktadır. BMT'nin yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle, daha fazla su

emmesi, C–S–H jel oluşumunun gecikmesine ve sınırlanmasına neden olmuştur. Ancak bu durum, hidratasyon ürünlerinin yapı içerisinde daha yoğun ve homojen dağılmasını sağlayarak, sertleşmiş çimento pastasının mikroyapısını geliştirmiş ve dayanımını artırmıştır. Tüm AC uygulanmış serilerde, hidratasyon ürünlerine ait difraksiyon piklerinin, akım uygulanmayan numunelere kıyasla daha düşük yoğunlukta olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, BMT içeriği arttıkça, AC uygulaması durumunda daha belirgin C–S–H jel fazı pikleri oluşmuştur. Bu bulgu, SEM analizinden elde edilen sonuçlarla da tutarlılık göstermektedir (Şekil 4.12(e)).



Şekil 4.12 BMT içeriğine (a-%0, b-%0,75, c-%1, d-%0-%0,75 ve %1, e-%0-E-%0,75-E ve %1-E) ve AC uygulamasına bağlı olarak harçların XRD analizi.



Şekil 4.12 (Devamı) BMT içeriğine (a-%0, b-%0,75, c-%1, d-%0-%0,75 ve %1, e-%0-E-%0,75-E ve %1-E) ve AC uygulamasına bağlı olarak harçların XRD analizi.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada, farklı oranlarda BMT (%0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1) içeren taze harçlar üzerine çeşitli gerilim seviyelerinde (0 V, 30 V, 40 V ve 50 V) AC uygulanmış ve ardından bu numunelerin hidratasyon sıcaklıkları, nem içerikleri, mekanik performansları ve mikroyapısal özellikleri sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Çimentonun BMT ile sırasıyla %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 oranlarında ikame edilmesi, harçların birinci sıcaklık zirvesine ulaşma anındaki iç sıcaklıklarını sırasıyla 2,69 °C, 4,80 °C, 2,46 °C ve 2,69 °C oranlarında azaltmıştır.
- Sırasıyla %0, %0,25, %0,50, %0,75 ve %1 BMT içeren harçların priz bitiş süreleri 191, 86, 273, 299 ve 301 dakikalarda gerçekleşmiştir.
- BMT katkısı ile AC uygulamasının sinerjik etkisi, priz süresinde önemli düzeyde kısalma sağlamıştır. Özellikle, %0,25 BMT içeren harçların son priz süreleri; 0V, 30V, 40V ve 50V AC altında sırasıyla 178, 86, 88 ve 89 dakika olarak kaydedilmiştir. Özetle, AC uygulaması priz süresini ortalama 90 dakika kadar öne çekmiş, ancak gerilim seviyesinin priz süresi üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı da belirlenmiştir.
- 40mm × 40mm × 160mm boyutlarındaki BMT katkılı harçlar için uygulanması gereken optimum akım şiddetinin 30V olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Harçların nem içerikleri incelendiğinde, %1 BMT katkılı harçların üçüncü negatif nem pik noktasında en yoğun C–S–H jellerinin oluştuğu gözlenmiştir.
- Çimentonun %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında BMT ile değiştirilmesi, referans harca göre 7 günlük basınç dayanımlarında sırasıyla %56,63, %73,69, %92,60 ve %107,14 oranlarında artış sağlamıştır.
- AC uygulanmayan harçlarda, BMT içeriğinin artması ile CaO/SiO_2 ve $CaO/(SiO_2+CaO+Al_2O_3)$ oranlarının düştüğü görülmüştür. Bu elde edilen daha düşük oranlar, daha yoğun C–S–H jel oluşumuna işaret etmektedir. Buna karşılık, AC uygulanan harçlarda bu oranlar, elektrik akımı uygulanmayan numunelere kıyasla daha yüksek değerler almıştır.

- Sürdürülebilirlik açısından optimum BMT içeriğinin, hem AC uygulanan hem de uygulanmayan harçlar için %0,75 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda, bu araştırmadan elde edilen bulguların beton karışımlarında ve gerçek şantiye koşullarında uygulanabilirliğinin test edilmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

ASTM C348, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement, ASTM Int West Conshohocken, PA. 2014. www.astm.org

Avci A, Eker A A, Bodur M S, Candan Z, 2023, Water Absorption Characterization Of Boron Compounds-Reinforced PLA/flax Fiber Sustainable Composite, International Journal of Biological Macromolecules, 233, 123546.

Bezugly V, Kunstmann J, Grundkötter-Stock B, Frauenheim T, Niehaus T, Cuniberti G, 2011, Highly Conductive Boron Nanotubes: Transport Properties, Work Functions, and Structural Stabilities. ACS Nano, 5, 4997–5005.

Bhojaraju C, Ouellet-Plamondon C M, 2025, Boosting Cement Hydration With Boron Nitride Nanotubes, Cement and Concrete Composites, 157, 105894.

Bullerjahn F, Zajac M, Skocek J, Ben Haha M, 2019, The role Of Boron During The Early Hydration Of Belite Ye'elimite Ferrite Cements, Construction and Building.

BS EN 12390-2, 2019, Testing hardened Concrete Making And Curing Specimens For Strength Tests.

Chen M, Zhong H, Chen L, Zhang Y, Zhang M, 2021, Engineering Properties And Sustainability Assessment Of Recycled Fibre Reinforced Rubberised Cementitious Composite, Journal of Cleaner Production, 278, 123996.

Davraz M, 2015, The Effect Of Boron Compound To Cement Hydration And Controllability Of This Effect, Acta Physica Polonica A, 128, 26–33.

Dou Z H, Zhang T A, Shi G Y, Peng C, Wen M, He J C, 2014, Preparation And Characterization Of Amorphous Boron Powder With High Activity, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24, 1446–1451.

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, Geleceğin minerali ve malzemesi: Bor ve Borofen III. STM Think Tech. 2024, https://thinktech.stm.com.tr/uploads//docs/2024-yili-pdf leri/1707810302_stmgeleceginmineralivemalzemesibor3.pdf

Fang Y, Zhang L, Li L, Zhao M, Wang Q, Mei Y, 2023, Preparation of Nano-Sized C-S-H and Its Acceleration Mechanism on Portland Cement Hydration at Different Temperatures. Materials 16, 3484.

Garg N, Shrivastava S, 2023, Mechanical, Durability And Sustainability Assessment Of Rendering Mortar With Synergistic Utilisation Of Recycled Concrete And Ceramic Insulator Fine Aggregates. Journal of Building Engineering, 76, 107269.

Ghazanlou S I, Ghazanlou, S I, Ashraf W, 2021, Improvement in The Physical And Mechanical Properties Of The Cement-Based Composite With The Addition Of Nanostructured BN–Fe3O4 reinforcement. Scientific Reports, 11,1.

Golberg D, Bando Y, Huang Y, Terao T, Mitome M, Tang C, Zhi C, 2010, Boron Nitride Nanotubes And Nanosheets, In ACS Nano 4, 2979–2993.

Günder D, Watanabe K, Taniguchi T, Witte G, 2020, Van der Waals Bound Organic/2D Insulator Hybrid Structures: Epitaxial Growth of Acene Films on hBN(001) and the Influence of Surface Defects, ACS Applied Materials & Interfaces, 12, 38757–38767.

Hammond G P, Jones C I, 2008, Embodied Energy And Carbon in Construction Materials, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, 161, 87–98.

Harikrishnan V V J, Ikram M M, Herkel S, Meng W, Khater A, Johnson K, Boul P, Lou M, vd., 2025, Hexagonal Boron Nitride Reinforced Quick-Setting Multifunctional Cement, Oxford Open Materials Science, 5,1.

Hendriks C A, Worrell E, Price L, Martin N, Ozawa Meida L, de Jager D, Riemer P, 1999, Emission Reduction Of Greenhouse Gases From The Cement Industry, Greenhouse Gas Control Technologies 4, 939–944.

Hocaoğlu İ, 2022, Investigation Of The Effect Of Current in Zeolite-Graphene Oxide Additives Of Mortar And Development Of A Novel Method For Determining The Setting Time. Journal of Building Engineering, 46, 103803.

Hocaoğlu İ, 2025, Accelerating C-S-H Gel Formation Times on Blast Furnace Slag and Zinc Oxide Nanoparticle Modified Eco-Friendly Mortars with Direct Electrical Curing, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 49, 6149–6170.

Hu C, 2014, Microstructure and Mechanical Properties Of Fly Ash Blended Cement Pastes, Construction and Building Materials, 73, 618–625.

Hu J, Ge Z, Wang K, 2014, Influence of cement Fineness And Water-To-Cement Ratio On Mortar Early-Age Heat Of Hydration And Set Times, Construction and Building Materials, 50, 657–663.

Hu W, Cheng W C, Wang L, Xue Z F, 2022, Micro-Structural Characteristics Deterioration Of İntact Loess Under Acid And Saline Solutions And Resultant Macro-Mechanical Properties, Soil and Tillage Research, 220, 105382.

Jan R, May P, Bell A P, Habib A, Khan U, Coleman J N, 2014, Enhancing The Mechanical Properties Of Bn Nanosheet–Polymer Composites By Uniaxial Drawing. Nanoscale, 6, 4889–4895.

Kim K K, Hsu A, Jia X, Kim S M, Shi Y, Dresselhaus M, Palacios T, Kong J, 2012, Synthesis And Characterization Of Hexagonal Boron Nitride Film As A Dielectric Layer For Graphene Devices, ACS Nano, 6, 8583–8590.

Kim S H, Shin G H, Kim B K, Kim K T, Yang D Y, Aranas, C, vd., 2017, Thermo-Mechanical İmprovement Of Inconel 718 Using Ex Situ Boron Nitride-Reinforced Composites Processed By Laser Powder Bed Fusion, Scientific Reports, 7, 14359.

Lee C, Li Q, Kalb W, Liu X-Z, Berger H, Carpick R W, Hone J, 2010, Frictional Characteristics of Atomically Thin Sheets. www.sciencemag.org

Li Y, Yin J, Wu H, Deng H, Chen J, Yan Y, Liu X, Huang Z, Jiang D, 2015, Enhanced Electrical Resistivity in SiC–BN Composites With Highly-Active BN Nanoparticles Synthesized Via Chemical Route, Journal of the European Ceramic Society, 35, 1647–1652.

Li Z, Di S, 2017, The Microstructure and Wear Resistance of Microarc Oxidation Composite Coatings Containing Nano-Hexagonal Boron Nitride (HBN)

Particles, Journal of Materials Engineering and Performance, 26, 1551–1561.

Liu J, Li Y, Jin C, Lin H, Li H, 2022, Effect And Mechanism Analysis Of Hydroxylated Nano-Boron Nitride On Workability And Multi-Scale Mechanical Properties Of Cement Paste, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 22, 122.

Mokhtar M M, Abo-El-Enein S A, Hassaan M Y, Morsy M S, Khalil M H, 2017, Mechanical Performance, Pore Structure And Micro-Structural Characteristics Of Graphene Oxide Nano Platelets Reinforced Cement, Construction and Building Materials, 138, 333–339.

Mydin M A O, Sor N H, Taqieddin Z N, Isleem H F, Abdullah M M A B, Awoyera P O, vd., 2025, Effect of Varying Nano-Boron Nitride Content On Foamed Concrete Containing Titanium Dioxide Nanoparticles, Scientific Reports, 15, 1.

Örklemez E, İlkentapar S, Durak U, Gülçimen S, Uzal N, Uzal B, vd., 2024, Characterizing Boron-Enhanced One-Part Alkaline-Activated Mortars: Mechanical Properties, Microstructure And Environmental Impacts, Construction and Building Materials, 426, 136078.

Pakdel A, Bando Y, Golberg D, 2014, Nano Boron Nitride Flatland, Chemical Society Reviews, 43, 934–959.

Palanivel R, Dinaharan I, Laubscher R F, Davim J P, 2016, Influence of Boron Nitride Nanoparticles On Microstructure And Wear Behavior of AA6082/TiB2 Hybrid Aluminum Composites Synthesized By Friction Stir Processing, Materials & Design, 106, 195–204.

Pramanick A, Dey P P, Das P K, 2020, Microstructure, Phase And Electrical Conductivity Analyses Of Spark Plasma Sintered Boron Carbide Machined With WEDM, Ceramics International, 46, 2887–2894.

Provis J L, 2020, Analytical Investigation Of Phase Assemblages Of Alkali-Activated Materials in CaO-SiO2-Al2O3 systems: The Management Of Reaction Products And Designing Of Precursors. Materials & Design, 194, 108975.

Rafiee M A, Narayanan T N, Hashim D P, Sakhavand N, Shahsavari R, Vajtai R, Ajayan P M, 2013, Hexagonal Boron Nitride And Graphite Oxide Reinforced Multifunctional Porous Cement Composites. Advanced Functional Materials, 23, 5624–5630.

Saggar R, Porwal H, Tatarko P, Dlouhý I, Reece M J, 2015, Boron Nitride Nanosheets Reinforced Glass Matrix Composites, Advances in Applied Ceramics, 114, 26–33.

Singh B, Kaur G, Singh P, Singh K, Kumar B, Vij A, vd., 2016a, Nanostructured Boron Nitride With High Water Dispersibility For Boron Neutron Capture Therapy OPEN. Scientific Reports, 6, 35535.

Song L, Ci L, Lu H, Sorokin P B, Jin C, Ni J, Kvashnin A G, vd., 2010, Large Scale Growth And Characterization Of Atomic Hexagonal Boron Nitride Layers, Nano Letters, 10, 3209–3215.

Song S H, Park K H, Kim B H, Choi Y W, Jun G H, Lee D J, vd., 2013, Enhanced Thermal Conductivity Of Epoxy-Graphene Composites By Using Non-Oxidized Graphene Flakes With Non-Covalent Functionalization. Advanced Materials, 25, 732–737.

Sosa Gallardo A F, Provis J L, 2021, Electrochemical Cell Design And İmpedance Spectroscopy Of Cement Hydration, Journal of Materials Science, 56, 1203–1220.

Topçu İ B, Sofuoğlu T, 2021, Properties of Geopolymers Produced With Sugar Press Filter Waste And Fly Ash Under Certain Curing Conditions, Journal of Building Engineering, 44, 102938.

Trojanová Z, Drozd Z, Minárik P, Lukáč P, Kasakewitsch A, 2016, Influence of Texture On The Thermal Expansion Coefficient of Mg/BN Nanocomposite, Thermochimica Acta, 644, 69–75.

TS EN 197-1 2012, Cement-stage 1: general cements—component, TSE, Ankara, Turkey.

Wang H, Hu L, Cao P, Luo B, Tang J, Shi F, Yu J, Li H, Jin K, 2019, The Application Of Electrical Parameters To Reflect The Hydration Process Of Cement Paste With Rice Husk Ash, Materials, 12, 7.

Wang T, Wang M, Fu L, Duan Z, Chen Y, Hou X, Wu Y, Li S, Guo L, Kang R, Jiang N, Yu J, 2018, Enhanced Thermal Conductivity of Polyimide Composites with Boron Nitride Nanosheets, Scientific Reports 8, 1557.

Wang W, Chen S J, Basquiroto De Souza F, Wu B, Duan W H, 2018, Exfoliation and Dispersion Of Boron Nitride Nanosheets To Enhance Ordinary Portland Cement Paste, Nanoscale, 10, 1004–1014.

Wang Y, An M zhe Yu Z, ruo Han S, Ji W. Yu, 2016, Durability of Reactive Powder Concrete Under Chloride-Salt Freeze–Thaw Cycling, Materials and Structures, 50, 18.

Worrell E, Price L, Martin N, Hendriks C, Meida L O, 2001, Carbon Dioxide Emissions From The Global Cement Industry, Annual Review of Energy and the Environment, 26, 303–329.

Xia W, Cui S ai, Zhu L xi, Li, W, kang Woody Ju J wen, Wang, X wei, 2023, Effects Of Nano-Silica Modification On Early Age Hydration Process in Winter Construction Of Tunnel Engineering, Construction and Building Materials, 408, 133804.

Xiao R, Ma Y, Jiang X, Zhang M, Zhang Y, Wang Y, Huang B, He Q, 2020, Strength, Microstructure, Efflorescence Behavior And Environmental Impacts Of Waste Glass Geopolymers Cured At Ambient Temperature. Journal of Cleaner Production, 252, 119610.

Yang Z, Xie Y, He J, Wang F, Zeng X, Ma K, Long G, 2023, Influence of Direct Electric Curing On The Hydration And Microstructure Of Cement Paste Excluding Ohmic Heating, Construction and Building Materials, 369, 130546.

Yi M, Shen Z, Zhao X, Liang S, Liu L, 2014, Boron Nitride Nanosheets As Oxygen-Atom Corrosion Protective Coatings, Applied Physics Letters, 104, 14.

Yu X, Professor Nie Xu M, Member Xiaohua Li C, Member Jaehyung Ju C, Member Yong Tao C, He Q, 2015, The Study of Comprehensive Reinforcement

Mechanism of Hexagonal Boron Nitride on Concrete.

Zhang W, Han B, Yu X, Ruan Y, Ou J, 2018, Nano Boron Nitride Modified Reactive Powder Concrete, Construction and Building Materials, 179, 186–197.

Zhi C, Bando Y, Tang C, Kuwahara H, Golberg D, 2009, Large-scale Fabrication Of Boron Nitride Nanosheets And Their Utilization İn Polymeric Composites With İmproved Thermal And Mechanical Properties, Advanced Materials, 21, 2889–2893.

İnternet Kaynakları

1- https:// https://nanografi.com/popular-products/, 10.03.2026.

2- https://www.dunya.com/sirketler/kablo-uretiminde-nano-bor-donemi-haberi-412494 2018, 10.03.2026

3- https://www.borax.com/news-events/may-2025/boron-for-cement, 10.09.2025.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alper Tunca
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar – 26/03/1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta) : 0 555 562 06 73 / alpertunca09@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Emet Anadolu Lisesi Kütahya (2008 – 2009)
: Necati Özen Anadolu Lisesi Uşak (2009 – 2012)
Lisans : Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, (2012– 2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İSG Uzmanlığı (2018-2020)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Taşpınar Yapı İnş.Ltd.Şti. (2016–2017)
: Ertürk Yapı Mimarlık İnş.Ltd.Şti. (2017-2020)
: Tunca Müh. Ve Mim.İnş.Ltd.Şti.(2020 – Devam Ediyor)

Yayınları (SCI ve diğer) : Tunca A, Hocaoğlu İ, 2026, Nano bor modifiyeli yeni nesil harçlarda ilk çatlak oluşumunun geciktirilmesi, Mühendislik Bilimlerinde Araştırma, Metodoloji ve Yenilik 2026 – I, 33-45.