

**NANO-SİLİKA MODİFİYELİ ÇİMENTO
ESASLI HARÇLARDA ALTERNATİF AKIMIN
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre TUNÇÖZ

Danışman

Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU

NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANABİLİM DALI

Nisan 2026

Bu tez çalışması 24. Fen Bil. 27 numaralı proje ile Bap tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO-SİLİKA MODİFİYELİ ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA
ALTERNATİF AKIMIN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Emre TUNÇÖZ

Danışman

Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ

Nisan 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Emre TUNÇÖZ tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17 / 04 / 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

Başkan : Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. İsmail HOCAOĞLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Bolvadin MYO

Üye : Doç. Dr. Abdul Vahap KORKMAZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
İncehisar 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 çalışmada;

- 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.

17 / 04 / 2026

İmza

Emre TUNÇÖZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO-SİLİKA MODİFİYELİ ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA ALTERNATİF AKIMIN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Emre TUNÇÖZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. İsmail HOCAOĞLU

Bu tez çalışmasında nano silika (NS) modifiyeli çimento esaslı harçlarda alternatif akımın etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. Ayrıca çimento esaslı harçlarda NS ilavesinin ilk çatlak oluşum süresine etkisi araştırılmıştır. Bu amaca ulaşmak için, çimento yerine ağırlıkça %0, %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 NS içerikli 4cm x 4cm x 16cm ebatlarında harç numuneleri üretilmiştir. Harçların hidratasyon sıcaklığı ve nem oranları (%) bir gün boyunca dakikada bir kaydedilerek çeşitli karşılaştırmalar yapılmıştır. Literatürde hidratasyonun erken döneminde NS'nin çimento esaslı kompozit malzemenin hidratasyon sıcaklığına olan etkilerinin incelendiği sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Bu boşluğu doldurmak için, harçlar hazırlandıktan hemen sonra (hidratasyonun ilk aşamasında) her numunenin orta noktasına sıcaklık ölçerler (sensörler) yerleştirilerek ve NS'nin hidratasyon sıcaklığına etkisi incelenmiştir. Ayrıca, kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerinin oluşum süresini tahmin etmek amacıyla seçilmiş numunelerde nem ölçümleri yapılmıştır. Sertleşmiş harçlarda ise eğilme dayanımı, basınç dayanımı, piezoelektrik testler, SEM, EDX, XRD analizleri ve sülfat saldırısı testleri gerçekleştirilmiştir. Harçlarda çimentonun %1'inin NS ile değiştirilmesi ve 40V Alternatif Akım (AC) uygulanmasının, priz bitiş süresini (PBS) 316 dakika kısaltabileceği ve 7 günlük basınç dayanımını ise %154,15 oranında artırabileceği sonucuna varılmıştır. Çimento esaslı harçlara sırasıyla %0,1, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında NS ilavesi ve 28 günlük kürlenme süresi sonucunda referans numuneye göre basınç dayanımında yaklaşık olarak sırasıyla yaklaşık %1,60, %4,98, %12,51 ve %29,72 oranında artış sağlandığı gözlenmiştir. Bir diğer önemli bulgu; NS'nin ilk

çatlağın oluşumunu geciktirmesidir. Çimento yerine %1 NS ilave edildiğinde ilk çatlak oluşumunun 8 saniye geciktiği gözlenmiştir. Bu dönem, deprem anında can güvenliğinin sağlanması açısından kritik olabileceği değerlendirilmiştir. Sülfat saldırısı testi sonucunda, %1 NS içeren harcın basınç dayanımının, referans harca (%0 NS içerikli) göre yaklaşık %20 daha yüksek olduğu rapor edilmiştir.

2026, x + 36 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çatlak oluşum süresini geciktirme, Hızlı kürlenme, Kendiliğinden ısınma, Harç, Nano-silika.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ALTERNATING CURRENT ON NANO-SILICA MODIFIED CEMENT BASED MORTARS

Emre TUNÇÖZ

Afyon Kocatepe University

Institute of Science

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Supervisor: Assoc. Prof. İsmail HOCAOĞLU

This thesis aims to investigate the effects of alternating current on nano-silica (NS) modified cement-based mortars. In addition the study investigated, the effect of NS addition on the time of first crack occurrence in cementitious mortar. For this purpose, 4cm x 4cm x 16cm mortar specimens were produced with NS contents of 0%, 0.10%, 0.25%, 0.50%, and 1% by weight instead of cement. The hydration temperature and moisture content (%) of the mortars were recorded every minute for one day, and various comparisons were conducted. However, it has been realized that a limited number of studies have examined the effects of NS on hydration temperature during the early age of hydration. To address this gap, temperature sensors were placed at the midpoint of each specimen immediately after the mortars were prepared (at the initial stage of hydration), and the effect of NS on the hydration temperature was investigated. Additionally, moisture measurements were conducted for selected specimens to estimate the formation time of calcium silicate hydrate (C-S-H). In hardened mortars, flexural strength, compressive strength, piezoelectric tests, SEM, EDX, XRD analyses, and sulfate attack tests were performed. It was concluded that replacing 1% of the cement with NS in mortars and applying 40V Alternative Current (AC) could shorten the final setting time (PBS) by 316 minutes and increase the 7-day compressive strength by 154.15%. It was observed that adding NS to cement-based mortars at rates of 0.1%, 0.25%, 0.50%, and 1%, respectively, and curing them for 28 days, resulted in an increase in compressive strength of approximately 1.60%, 4.98%, 12.51%, and 29.72%, respectively, compared to the reference sample. Another key finding is that NS delays

the formation of the first crack. It was observed that when 1% NS was added instead of cement, the first crack formation was delayed by 8 seconds. This period may be critical in ensuring life safety during an earthquake. As a result of the sulfate attack test, it was observed that the compressive strength of the mortar containing 1% NS was approximately 20% higher than that of the reference mortar (0% NS content).

2026, x + 36 pages

Keywords: Delaying crack formation time, Rapid cure, Self-heating, Mortar, Nano-silica.

TEŐEKKÖR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. İsmail HOCAOğLU' na ve yardımlarını esirgemeyen Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı hocalarıma içtenlikle teőekkr ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teőekkr ederim.

Emre TUNÇÖZ
Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	2
3. MATERYAL ve METOT	4
3.1 Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler	4
3.2 Çimento Esaslı Harçların Hazırlanması.....	6
3.3 Yapılan Deneyler	6
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	9
4.1 NS ve AC'nin Hidratasyon Sıcaklığına Etkileri.....	9
4.2 NS'li Harçların Nem Oranlarının Karşılaştırılması.....	11
4.3 NS ve AC'nin Eğilme Dayanımına Etkileri	12
4.4 NS ve AC'nin 7 Günlük Basınç Dayanımına Etkileri.....	14
4.5 NS ve AC'nin 28 Günlük Basınç Dayanımına Etkileri.....	16
4.6 Harçlarda Çatlak Başlama Süresinin Piezoelektrik Ölçümlerle Tahmini.....	17
4.7 NS İçeriğinin Harçlarda Durabilite Üzerindeki Etkileri	19
4.8 Harçlarda Mikro İncele Analizleri	21
4.9 Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDX) Sonuçları	23
4.10 X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi.....	27
5. SONUÇLAR.....	28
6. KAYNAKLAR.....	30
ÖZGEÇMİŞ.....	36

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
Ca	Kalsiyum
CaO	Kalsiyum oksit
CaO ₂	Kalsiyum peroksit
C-S-H	Kalsiyum-Silikat-Hidrat
Fe	Demir
Fe ₂ O ₂	Mikromolar
K ₂ O	Potasyum oksit
MgO	Magnezyum oksit
Na	Sodyum
Na ₂ O	Sodyum oksit
Na ₂ SO ₄	Sodyum sülfat
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum dioksit
SiO ₃	Silisyum trioksit
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım
EDX	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
PBS	Priz bitiş süresi
MPa	Megapascal
NS	Nano silika
Ppm	Milyonda bir oran
RFID	Radyo frekansı ile tanımlama
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	X-ışını kırınımı
WL	Dalga boyu

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Çimento, kırma kum ve NS'nin görünümü.	4
Şekil 3.2 Kırma kumun elek analizi sonuçları ve ASTM C778–13 standardına uygunluğu (ASTM C778-13 2012).	5
Şekil 3.3 NS'nin XRD analizi ve Sun ve ark. tarafından yapılan çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	5
Şekil 3.4 NS modifiyeli harç üzerine AC uygulanması.	7
Şekil 3.5 Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler.	8
Şekil 4.1 Harçların NS oranına göre iç sıcaklık değişimi ve priz bitiş süresi karşılaştırması.	9
Şekil 4.2 Harçların NS içeriğine ve AC uygulamasına göre sıcaklık değişimleri.	11
Şekil 4.3 NS'nin nem üzerine etkileri ve PBS'nin tahmini.	12
Şekil 4.4 Harçların PBS'sinin sıcaklık ve nem ölçümleri ile tahmin edilmesinin karşılaştırılması.....	12
Şekil 4.5 NS içeriği ve AC uygulamasına bağlı olarak 7 günlük kürlenmiş harçların eğilme dayanımı.....	13
Şekil 4.6 28 günlük kürlenmiş harçların NS oranı ve AC işlemine bağlı eğilme dayanımları.	14
Şekil 4.7 Değişen NS ve AC İşlemleriyle 7 Gün Boyunca Kürlenmiş Harçların Basınç Dayanımları.	15
Şekil 4.8 28 günlük kürlenmiş harçların NS ve AC'ye bağlı olarak basınç dayanımları.	16
Şekil 4.9 Harçlarda titreşim ölçümü ile ilk çatlak oluşum süresinin tahmini (a- %0 NS, b- %0 NS (AC), c- %0,10 NS, d- %0,10 NS (AC), e- %0,25 NS, f- %0,25 NS (AC), g- %0,50 NS, h- %0,50 NS (AC), i- %1 NS, j- %1 NS (AC))......	18
Şekil 4.10 Harçların NS içeriğine bağlı dayanıklılık test sonuçları.	20
Şekil 4.11 Dayanıklılık testi sonrası %0 NS (a) ve %1 NS içeren harçlarda piezoelektrik test uygulaması.	21

Şekil 4.12 Harçların SEM analizleri (a-0% NS-28d, b-0% NS-28d-E c-0.50% NS-28d, d- 0.50% NS-28d-E, e- 1% NS-7d, f- 1% NS- 7d-E, g- 1% NS-28d, h- 1% NS-28d-E).....	22
Şekil 4.13 Harçların EDX analizleri (a-0% NS-28d, b-0% NS-28d-E c-0.50% NS-28d, d- 0.50% NS-28d-E, e- 1% NS-7d, f- 1% NS- 7d-E, g- 1% NS-28d, h- 1% NS-28d-E).....	24
Şekil 4.14 Harçların NS içeriğine, AC uygulamasına ve kürlenme süresine bağlı olarak XRD analizleri.	27

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Çimentonun içeriği ve bileşenleri.....	4
Çizelge 3.2 NS'nin fiziksel özellikleri ve element analizi [8].....	6
Çizelge 3.3 1 m ³ harç üretiminde kullanılan çimento, kırma kum, su ve NS miktarları. 6	
Çizelge 4.1 Harçların NS ve AC içeriğine bağlı olarak PBS ve sıcaklık değerlerinin artışı.	11
Çizelge 4.2 AC uygulaması ve NS katkısına bağlı olarak 7-28 günlük kurlenmiş harçlarda Ca/Si ve CaO/(SiO ₂ +CaO+ Al ₂ O ₃) oranlarının karşılaştırılması.	26

1. GİRİŞ

Son depremler ve hızlı teknolojik gelişmeler, bilim insanlarını yapısal performansı iyileştirmek için yeni çimento bazlı malzemeler ve alternatif yöntemler keşfetmeye yöneltmiştir (Nilimaa 2023). Bilindiği üzere, mükemmel parçacık boyutlarından dolayı nano malzemeler çimento esaslı kompozit malzemeler içerisinde oldukça iyi dağılırlar ve bu da onları kompozit malzemenin özelliklerini geliştirmede oldukça etkili hale getirir (Ghafari vd. 2016, Alsafar 2014). Ek olarak, nanomalzemeler mekanik mukavemeti önemli ölçüde artırabilir ve malzemenin dayanıklılığını da iyileştirebilir (Chuah vd. 2014, Chintalapudi ve Pannem 2020, Hocoğlu 2024). Çimento bazlı sistemlerde en sık kullanılan nanomalzemeler arasında nano lifler, nano karbon, nano grafen oksit, nano silika, nano titanyum dioksit ve nano çinko oksit yer almaktadır (Hocoğlu 2024, Nano-particles 2024). Bu malzemeler kompozit çimento esaslı kompozit sistemlerin mikro yapı, dayanıklılık, aşınma direnci, sertlik, çatlak direnci, kimyasal direnç vb. gibi özelliklerini geliştirilebilmektedir iyileştirebilir (Seifan vd. 2022, Nik ve A. Bahari 2011).

Bu tez çalışmasında NS modifiyeli çimento esaslı harçlarda alternatif akımın etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. Ayrıca çimento esaslı harçlarda NS ilavesinin ilk çatlak oluşum süresine etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Nano-silika, yüksek yüzey alanı ve reaktif özellikleri nedeniyle çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Debbarma vd. 2022). Collepardi vd. (2005) tarafından yürütülen bir çalışmada, çimentolu malzemelerin performansının büyük ölçüde kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri veya çimento ve agrega parçacıkları arasındaki ara yüz geçiş bölgesindeki nanometre ölçeğindeki gözenekler gibi nanometre ölçeğindeki katı parçacıklara bağlı olduğu sonucuna belirlenmiştir (Collepardi vd. 2005). Ayrıca Collepardi vd. (2005) nanometre ölçekli parçacıkların veya boşlukların etkilediği tipik özelliklerin arasında mukavemet, dayanıklılık, çekme özellikleri ve aderansın yer aldığını da ortaya koydular. Ancak nano ölçekli SiO₂ parçacıkları, yüksek yüzey enerjileri nedeniyle kümeleşme eğilimindedir. Bu da kümeleşme ve aglomerasyon gibi sorunlara neden olabilmektedir (Z. Rong ve diğ. 2020). Bu sebeple nano boyuttaki SiO₂ genellikle düşük miktarlarda kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte, El-Didamony (2017), %1'e kadar nano boyutlu SiO₂'nin dahil edilmesinin Portland çimentosunun kimyasal ve mühendislik özelliklerini artırabileceği sonucuna varılmıştır (Didamony 2017).

Öte yandan, silis dumanı, uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanların çimento esaslı kompozitler üretmek için kullanılması, klinker tüketimini azaltarak CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu mineral katkı maddeleri ayrıca yapıların dayanıklılığını ve mekanik mukavemetini de artırdığı bilinmektedir. Son yıllarda, çimento harçlarında ve betonda nanomalzemelerin ve puzolanların birlikte kullanılmasına yönelik araştırmalar artmıştır. Bunlar arasında sürdürülebilirliğe katkısı nedeniyle NS en önemli malzeme olarak ortaya çıkmıştır (García-Taengua vd. 2015). Yapılan araştırmalarda NS içeren beton karışımları daha homojen ve yoğun bir yapı sergilemiştir. Ayrıca, Gaitero vd. (2008) %6 NS içeren çimento hamurunun kalsiyum sızma oranını önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir. Ancak, NS içeren çimento esaslı malzemelerin dayanıklılık özellikleriyle ilgili araştırmalar sınırlı kalmıştır. Çünkü önceki çalışmaların çoğu öncelikli olarak dispersiyon sorunlarına ve çimento esaslı malzemelerin taze durumlarındaki özellikleri üzerindeki etkilere odaklanmıştır.

Bazı çalışmalara göre, bir beton karışımına %3,8 NS eklenmesi ile su penetrasyon derinliğinin yaklaşık %45 oranında azaldığı belirtilmiştir (Ji 2005). Buna ilave olarak, Kong ve diğerleri tarafından yapılan araştırma (Gong vd. 2012), %1'e kadar NS eklenmesinin harcın klorür penetrasyonuna karşı direncini artırdığını bulmuştur. NS gibi nanopartiküller, çimentolu malzemelere entegre edildiğinde hidrasyon kinetiğini hızlandırabilmektedir. Hidrasyon reaksiyonlarının erken aşamalarında hızlanması, daha yoğun C-S-H jellerinin hızla oluşmasını sağlamaktadır. Bu etki özellikle soğuk havalarda yapılan betonlamalarda ve hızlı onarım gerektiren inşaat projelerinde büyük avantaj oluşturmaktadır. Önceki çalışmalar NS'nin hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırdığını göstermiştir. Bu tez çalışmanın amacı, NS modifiyeli harçların erken hidrasyon fazında AC uygulanması yoluyla iç sıcaklığını artırarak hidrasyon reaksiyonlarının hızlandırılmasıdır. Ayrıca bu çalışmada, basınç dayanımı testleri sırasında harçlara titreşim sensörleri bağlanarak NS'nin harçlarda ilk çatlak oluşumu süresine olan etkisini incelenerek yenilikçi bir yaklaşım ortaya konulmuştur.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Tez çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun CEM-I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmuştur. İnce agrega olarak maksimum tane boyutu 4 mm olan kırma kum kullanılmıştır. Karışım suyu olarak Bolvadin içme suyu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çimento, kırma kum ve NS Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

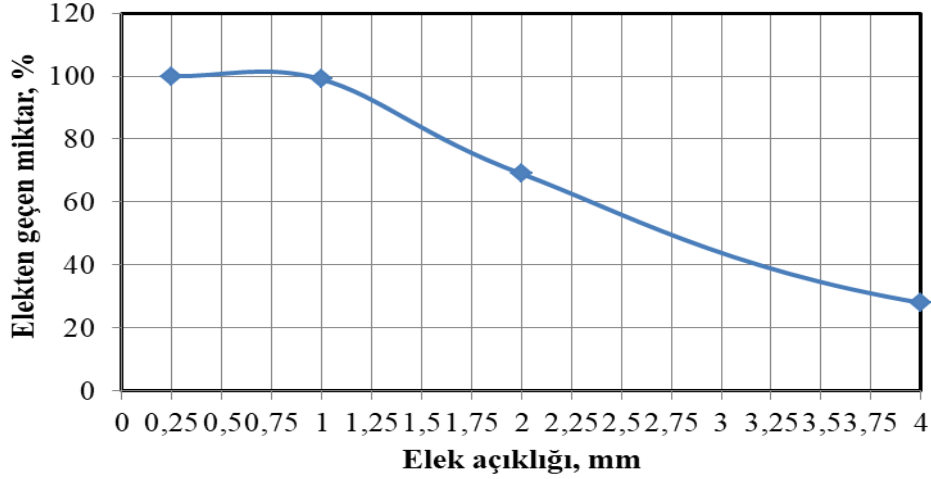


Şekil 3.1 Çimento, kırma kum ve NS'nin görünümü.

Çizelge 3.1 Çimentonun içeriği ve bileşenleri.

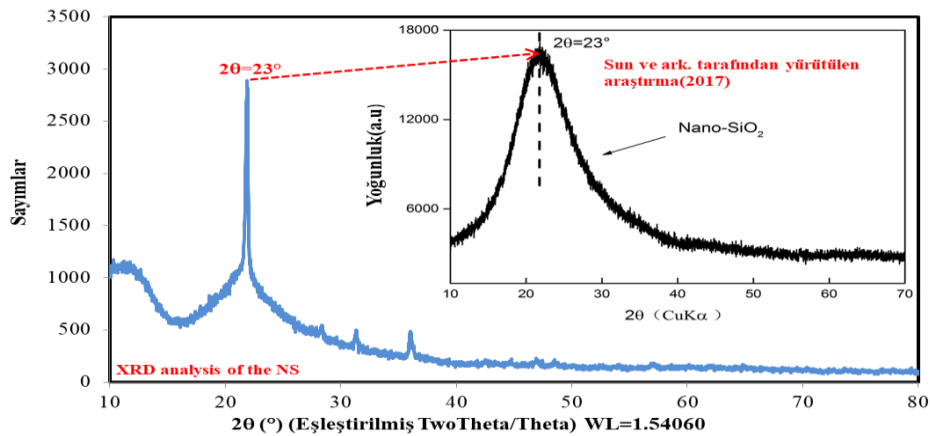
Bileşenler	Çimento içeriği, %
CaO	63.5
Al ₂ O ₃	4.72
SiO ₂	19.6
MgO	1.91
Fe ₂ O ₃	3.56
K ₂ O	1.05
Na ₂ O	0.34
TiO ₂	0.41
SO ₃	4.91
Özgül ağırlık	3.10
Ateşleme kaybı	1.54
Özgül Yüzey, cm ² /g	3051
İncelik, cm ² /g	3307
Ateşleme Kaybı	1.95
28 günlük basınç dayanımı, MPa	40.38

Kırma kumun özgül ağırlığı 2.67 olarak ölçülmüştür. Kırma kumun elek analizi sonuçları Şekil. 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Kırma kumun elek analizi sonuçları ve ASTM C778-13 standardına uygunluğu (ASTM C778-13 2012).

Deneylerde kullanılan NS, Nanografi şirketi tarafından tedarik edilmiştir (Nanografi 2025). Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, NS için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Sun vd. (2017), NS için XRD analizinde $2\theta = 23^\circ$ 'de bir tepe gözlemlenmiştir (Şekil 3.3). Benzer şekilde bu çalışmada da aynı derecede zirve tespit edilmiştir. Bu sonuç, deneylerde kullanılan nano-malzemenin NS olduğunu kanıtlamaktadır. NS'nin bazı fiziksel özellikleri ve element analiz sonuçları Çizelge 3.2'de sunulmuştur (Nanografi 2025).



Şekil 3.3 NS'nin XRD analizi ve Sun ve ark. tarafından yapılan çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılması (J. Sun ve diğ. 2017).

Çizelge 3.2 NS'nin fiziksel özellikleri ve element analizi [8].

Safılık , %	Renk	Özgül yüzey alanı (m ² /g)	Gerçek yoğunluk (g/cm ³)
99.50	Beyaz	150-550	2.2
Element Analizi (%)			
Fe	Ca	Ti	Na
0.002	0.007	0.012	0.003

3.2 Çimento Esaslı Harçların Hazırlanması

Harç karışım hesabı yapılırken, 1 m³ harcın çimento içeriğini temsil eden 300 kg/metreküp çimento dozajı ve sabit su-çimento oranı (0,50) kullanılmıştır. Karıştırma işlemi üç aşamadan oluşturulmuştur: ilk olarak kuru karışım (çimento ve agrega) birleştirilmiştir. Bu arada su ve NS ayrı ayrı karıştırılmıştır. Son olarak kuru ve sıvı karışımlar birleştirilerek harç üretimi gerçekleştirilmiştir. NS harçlara %0, %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 konsantrasyonlarında dâhil edilmiştir. Bir metre küp harcın bileşen oranları Çizelge 3.3' de sunulmuştur. Harç üretiminin hemen ardından hazırlanan harçlar 4cm x 4cm x 16cm boyutlarındaki elektriksel yalıtımlı kalıplara yerleştirilmiştir.

Çizelge 3.3 1 m³ harç üretiminde kullanılan çimento, kırma kum, su ve NS miktarları.

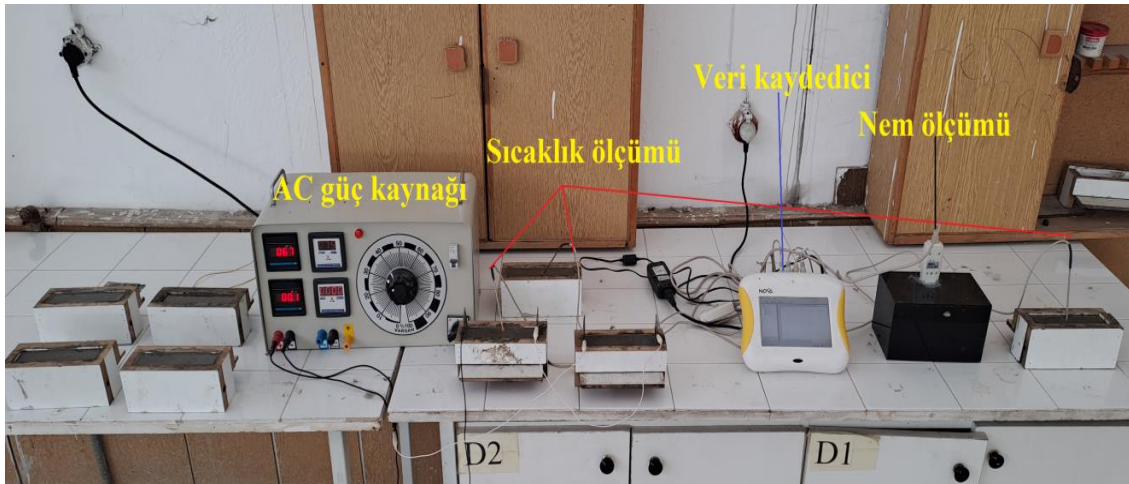
NS, %	Çimento, kg/m ³	Kum, kg/m ³	NS, kg/m ³	Su, lt/m ³
0	300	815	-	150.00
0.1	299.70	815	0.30	149.85
0.25	299.25	815	0.75	149.62
0.50	298.50	815	1.50	149.25
1	297	815	3	148.50

3.3 Yapılan Deneyler

Harçlara iki farklı deney prosedürü uygulanmıştır. İlki harçlar tazeyken, diğeri ise harçlar sertleştikten sonra gerçekleştirilmiştir. Harçlar kalıplara yerleştirildikten hemen sonra bazı serilere 40V AC gerilim uygulanmıştır. Bu amaçla harçların uçlarına iki adet elektrot yerleştirilmiştir. Harçlar taze durumdayken (hidratasyonun başlangıç aşamasında), elektrik akımı uygulanan ve uygulanmayan numunelerin tam ortasına

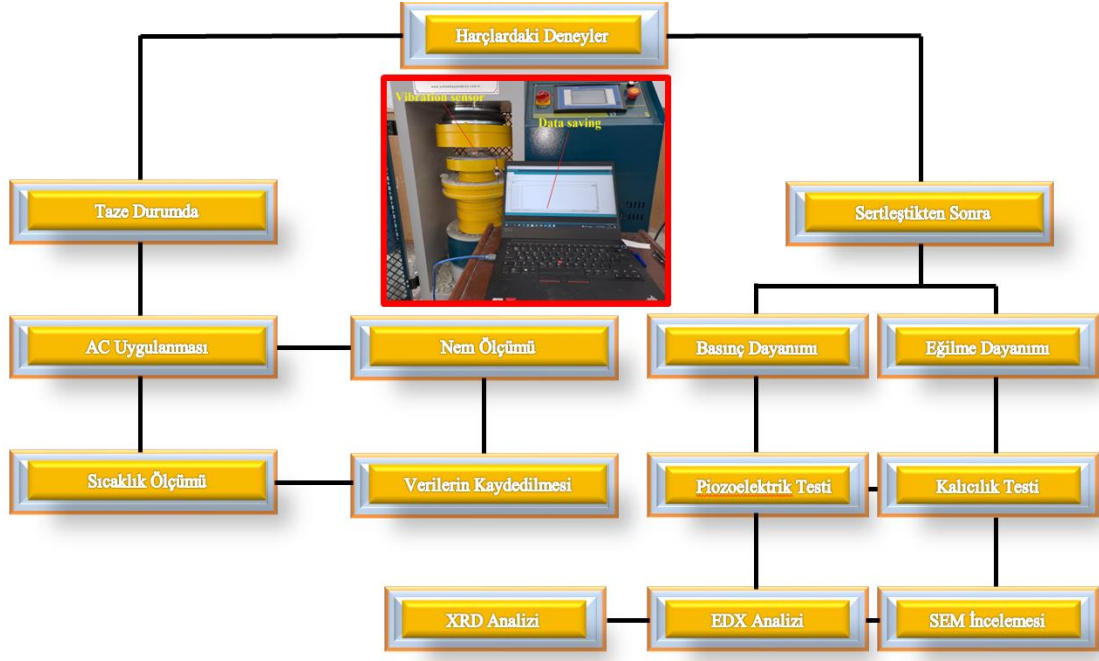
saplama tipi sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir. Harçların hidratasyon sıcaklık değerleri her dakikada bir veri kaydedici kullanılarak kaydedilmiştir. Ayrıca AC uygulaması yapılmayan harçların nem oranları da dakikada bir veri kaydediciye kaydedilmiştir.

Harçlar sertleştikten sonra (24 saat sonra), BS EN 12390-2'ye uygun olarak 7 ve 28 gün boyunca $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 'de kürlenmiştir (BS EN 12390-2 2019). Daha sonra kürlenmiş numuneler eğilme ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur (ASTM C348 2014). 28 gün kürlenmiş bazı numunelere piezoelektrik testleri uygulanmıştır. Bu amaçla, basınç dayanımı testi sırasında harçlara titreşim sensörleri yerleştirilmiştir. Özel bir yazılım kullanılarak harçlarda oluşan titreşim potansiyelleri saniyede elli ölçüm yapılmış ve veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Taze ve sertleştirilmiş harçlar üzerinde yapılan deneylerin genel görünümü Şekil 3.4'te sunulmuştur. Harçlarda ilk çatlak oluşum sürelerinin tahmin edilebilmesi için titreşim verilerinden elde edilen grafiklerle basınç testi sonuç grafikleri üst üste çakıştırılarak sonuçların doğrudan karşılaştırılabilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.4 NS modifiyeli harç üzerine AC uygulanması.

Kireçle doyurulmuş suda 28 gün boyunca kürlenmiş %1 NS ilaveli harçlar, daha sonra 90 gün boyunca %10'luk bir Na_2SO_4 çözeltisinde bekletilmiştir (ASTM C 1012-04 2004). Çözelti her 15 günde bir değiştirildi. Böylece numuneler 180 gün boyunca sülfat saldırısına maruz bırakıldı. Daha sonra numunelere eğilme ve basınç dayanımı testleri uygulanarak dayanım kayıpları raporlanmıştır. Bu çalışmada yapılan deneylerin özeti Şekil 3.5'te sunulmuştur.

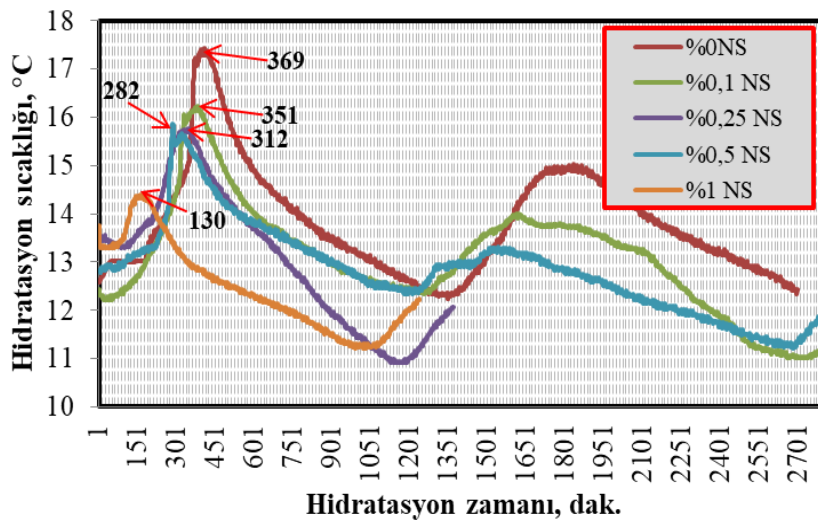


Şekil 3.5 Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1 NS ve AC'nin Hidratasyon Sıcaklığına Etkileri

NS ve AC uygulamasının harçlardaki sıcaklık değişimlerine olan etkilerinin karşılaştırması Şekil 4.1'de sunulmuştur. Sonuçlar harçtaki NS içeriğinin artmasının tüm serilerde iç sıcaklığın azalmasına yol açtığını göstermektedir. Ancak NS içeriği arttıkça ilk sıcaklıkların ilk pik değerine ulaşması için gereken sürenin azaldığı gözlenmiştir. Önceki çalışmalar, çimento esaslı malzemelerde ilk tepe zamanının genellikle priz son aşamalarına (Priz bitiş süresine) karşılık geldiğini göstermiştir (Kosmatka vd. 2016, Hu vd. 2014, Xia vd. 2023). Bu çalışmada, çimento yerine %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 NS kullanıldığında PBS'nin referans harçtan sırasıyla 18, 57, 87 ve 239 dakika daha erken gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu sonucu etkileyen temel faktör, hidratasyon suyunun bir kısmını emen NS'nin yüksek yüzey alanına sahip olmasıdır. Buna ek olarak, Zhang vd. (2020), NS içeren betonun hidratasyon sıcaklıklarını araştırmış ve betonların PBS'lerini tahmin etmiştir. Betondaki NS oranının artması ile hidratasyon sıcaklığının azaldığını ve priz süresinin geciktiğini gözlemlemişlerdir (Zhang vd. 2020). Yapılan bu çalışmada çimento yerine %1 NS ilave edilmesi sonucunda iç sıcaklığın referans harca göre yaklaşık 3 °C daha düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 4.1 Harçların NS oranına göre iç sıcaklık değişimi ve priz bitiş süresi karşılaştırması.

Bu çalışmanın yeniliği, hidrasyon sıcaklıklarını artırmak ve priz süresini daha da kısaltmak için değişen NS içerikli harçlara AC uygulanmasıdır. Şekil 4.2, AC uygulamasına tabi tutulan farklı NS içerikli harçlardaki iç sıcaklık değişimlerini gözlemleyerek, bunun erken yaş hidrasyon davranışı üzerindeki etkisine dair fikir vermek amaçlanmıştır. Şekil 4.2 incelendiğinde %0,10 NS içeren harcın iç sıcaklığında önemli bir artış (yaklaşık 7 °C) gözlenmemiştir. Diğer NS katkılı harçların iç sıcaklıklarının referans harca yakın veya daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

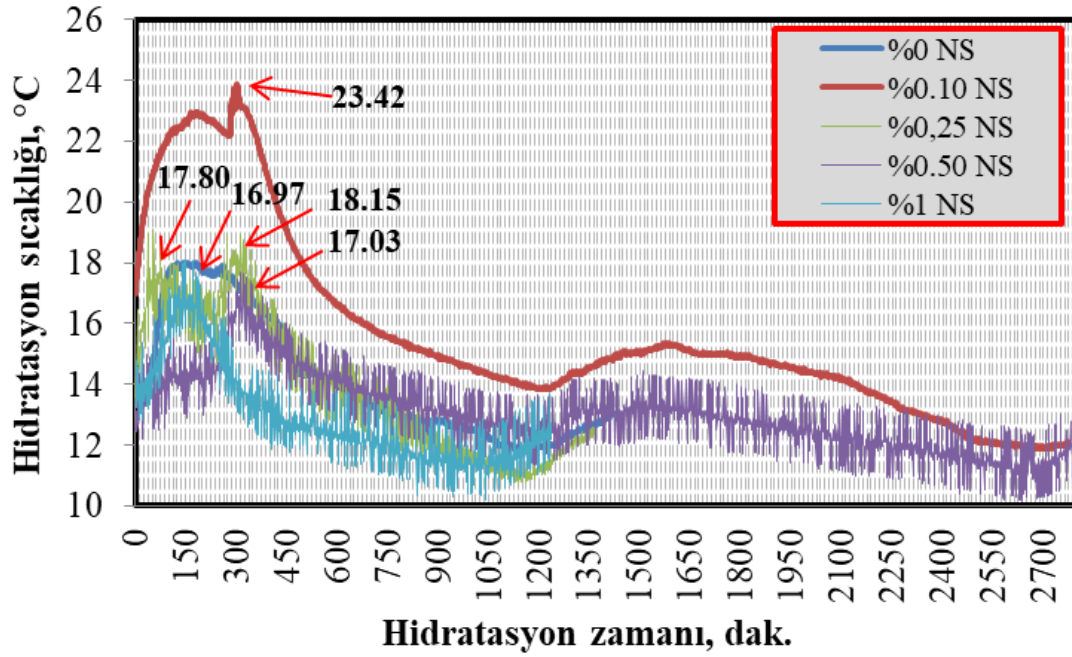
Bu durum şu şekilde açıklanabilir: NS taze harç içerisinde elektron akışını sağlamakta ve bunun sonucunda da yüksek elektriksel iletkenlik elde edebilmektedir (Zhang vd. 2007). Dolayısıyla %0,10 NS içeren taze harçta, sudaki NS parçacıkları elektrik akımı iletimini artırarak harcın iç sıcaklığının artmasına neden olmuştur. Ancak harçtaki NS oranı arttıkça, NS tarafından daha fazla hidrasyon suyu emilimi nedeniyle iç sıcaklıkta azalma gözlenmiştir.

Ek olarak, harçtaki NS oranındaki artış ısı iletkenliğinin azalmasına neden olmuştur. Saleh vd. (2024), %1, %2 ve %3 NS içeriğine sahip betondaki ısı iletkenliğinin sırasıyla yaklaşık %41,80, %51,15 ve %65,57 oranında azalabileceği sonucuna varmıştır.

AC ile uygulanan harçlarda elde edilen PBS sonuçlar, yukarıda belirtilen bulguları desteklemektedir (Şekil 4.2). Çizelge 4.1, harçların PBS ve sıcaklık artışlarındaki değişimleri NS içeriği ve AC uygulamasına bağlı olarak göstermektedir.

Çizelge 4.1'teki verilerin incelenmesi hem NS katılmasının hem de AC uygulamasının harçların PBS'sinde önemli bir kısaltmaya yol açtığını ortaya koymaktadır.

Ayrıca, AC uygulaması tüm serilerde önemli sıcaklık artışlarına neden olmuştur (Çizelge 4.1). Örnek olarak, hem çimentonun ağırlıkça %1 NS ile değiştirilmesi hem de AC uygulanması sonucunda priz süresinin 306 dakika kısaltıldığı, iç sıcaklığın ise yaklaşık 4 °C arttığı gözlenmiştir. Çizelge 4.1'ten elde edilen bir diğer sonuç ise harç içerisindeki NS içeriğinin artmasıyla iç sıcaklık artışlarının azalmasıdır.



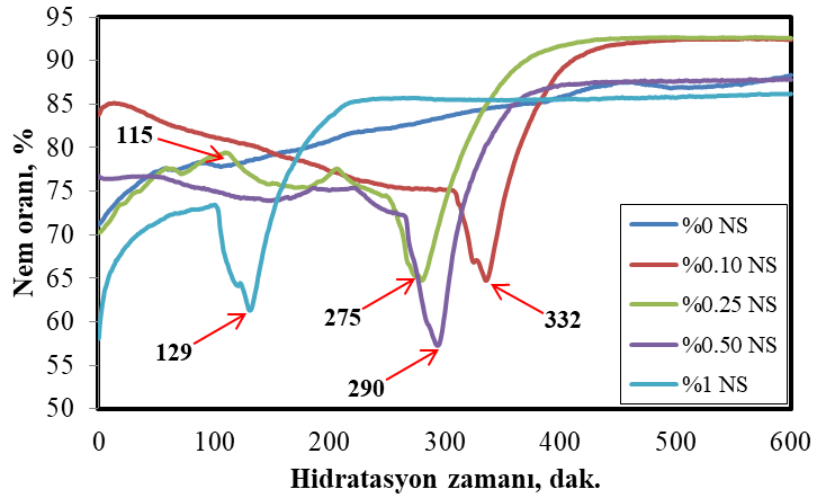
Şekil 4.2 Harçların NS içeriğine ve AC uygulamasına göre sıcaklık değişimleri.

Çizelge 4.1 Harçların NS ve AC içeriğine bağlı olarak PBS ve sıcaklık değerlerinin artışı.

NS, %	PBS-0V (min.)	PBS-40V (min.)	Hidratasyon sıcaklığı artışı- 0V (C°)	Dahili sıcaklık artışı- 40V (C°)
0	399	263	4.56	4.77
0.10	351	174	3.68	6.37
0.25	312	143	1.98	4.18
0.50	282	94	1.78	4.12
1	130	83	0.80	3.94

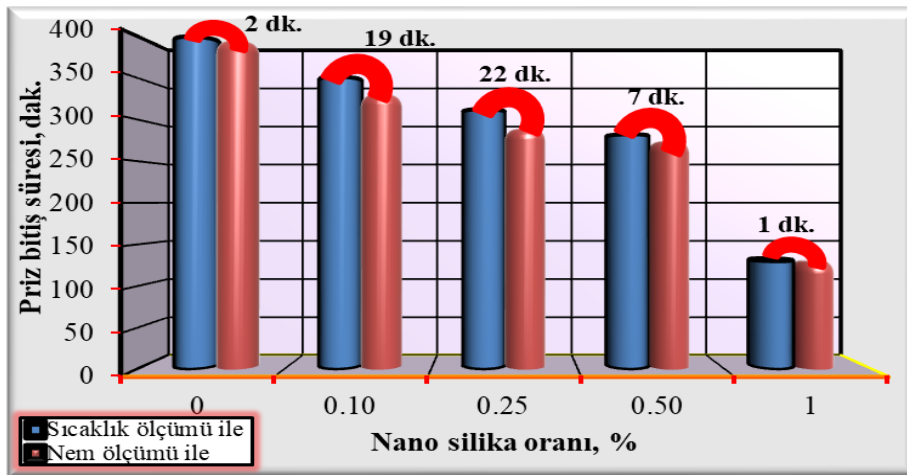
4.2 NS'li Harçların Nem Oranlarının Karşılaştırılması

Önceki çalışmalar, nem ölçümünün çimento esaslı malzemelerin başlangıç ve PBS' sini belirlemek için güvenilir bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Hocaoğlu 2022). Özellikle nem içeriği eğrisindeki ilk negatif tepe başlangıç priz süresine karşılık gelirken, ikinci negatif tepe PBS' yi gösterir (Hocaoğlu 2022). Bunun nedeni, C-S-H jellerinin bu belirli dakikalarda oluşmasıdır (Hocaoğlu 2022). Şekil 4.3, hidratasyonun başlangıcından itibaren yaklaşık bir gün boyunca %0, %0,10, %0,25, %0,50 ve 1 NS içeren harçların nem içeriği eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.3 NS'nin nem üzerine etkileri ve PBS'nin tahmini.

Harçların PBS' sinin sıcaklık ve nem ölçümleri ile tahmin edilmesine ilişkin karşılaştırmalar Şekil 4.4'de sunulmuştur. Bu çalışma ile önceki çalışmalar arasındaki bir diğer fark ise sıcaklık ve nem ölçümlerine göre belirlenen priz tamamlanma sürelerinin karşılaştırılmasıdır. Hemen hemen tüm serilerde, sıcaklık ve nem ölçümleri ile elde edilen PBS yaklaşık olarak aynı dakikalarda meydana geldiği gözlenmiştir. Ancak sıcaklık ölçümü ile elde edilen PBS' nin nem ölçümü ile elde edilen PBS' ye göre daha geç gerçekleştiği gözlenmiştir.

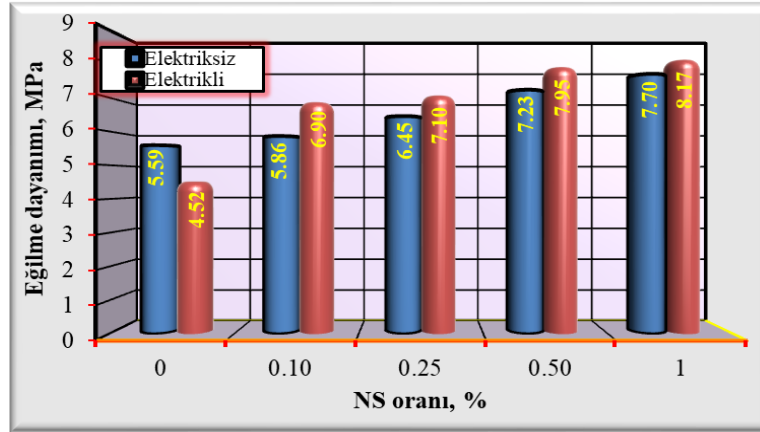


Şekil 4.4 Harçların PBS'sinin sıcaklık ve nem ölçümleri ile tahmin edilmesinin karşılaştırılması.

4.3 NS ve AC'nin Eğilme Dayanımına Etkileri

Şekil 4.5, AC uygulaması göz önünde bulundurularak, değişen NS içeriğine sahip 7 gün kürlenmiş harçların eğilme dayanımlarının karşılaştırmaktadır. Tüm serilerde NS

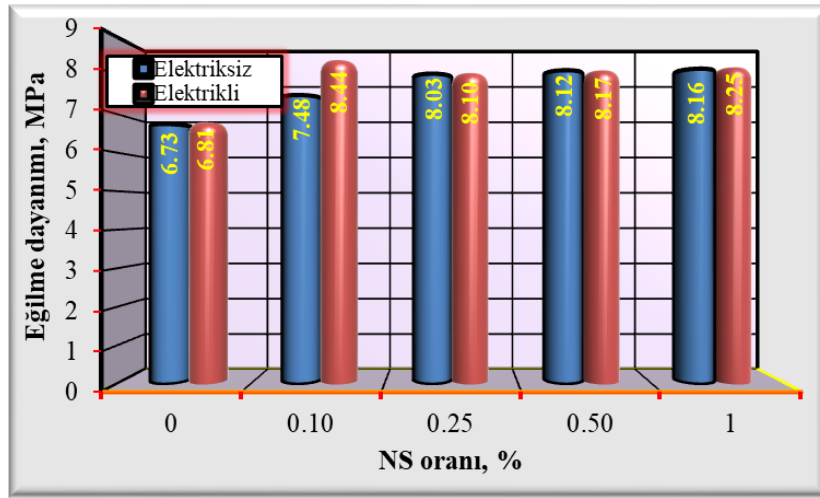
içeriğinin artırılmasının harçların eğilme dayanımını iyileştirdiği görülmüştür. Çimento yerine ağırlıkça %0,10, %0,25, %0,50 ve %1,00 oranlarında NS ilave edilmesiyle harçların eğilme dayanımı referans numuneye göre sırasıyla yaklaşık %4,83, %15,38, %29,33 ve %37,74 oranında artmıştır. Garg vd. (2021), çimentonun %1 NS ile değiştirilmesinin harçların eğilme dayanımında %12'lik bir artışa yol açtığını bulmuştur. Xia vd. (2023), %1 NS içeren betonda eğilme dayanımında %17'lik bir artış gözlemlenmiştir. Qing vd. (2007), çimentolu sistemlere NS eklenmesiyle 7 günlük eğilme dayanımının yaklaşık %16-%43 oranında artabileceği sonucuna varmıştır. Bu çalışma ile önceki araştırmalar arasındaki temel fark, AC'nin eklenmesinin NS içeren harçların 7 günlük eğilme dayanımında hafif bir artışa yol açmasıdır. Çimento yerine ağırlıkça %0,10, %0,25, %0,50 ve %1,00 oranlarında NS ilave edilmesi ve AC uygulanması sonucunda, referans numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla yaklaşık %23,43, %27,01, %42,21 ve %46,15 oranında artış sağlanmıştır. Ancak 7 günlük kürlenme süresi sonunda NS içermeyen harca elektrik akımı uygulanmasının eğilme dayanımını azalttığı sonucuna varılmıştır. Bu durumun, AC'nin harcın iç yapısını hidrasyonun erken aşamalarında bozabilme ihtimalinden kaynaklandığı düşünülmektedir. NS içeren harçlarda AC uygulanması, mekanik dayanımın artırılmasında büyük etken olan C-S-H jellerinin daha erken oluşması ile açıklanabilir.



Şekil 4.5 NS içeriği ve AC uygulamasına bağlı olarak 7 günlük kürlenmiş harçların eğilme dayanımı.

28 gün boyunca kürlenmiş harçların eğilme dayanımlarının karşılaştırılması Şekil 4.6'da sunulmuştur. Çimento esaslı harçlara sırasıyla %0,1, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında NS ilavesi ve ardından 28 günlük kürlenme süresi sonucunda referans numuneye göre eğilme dayanımında sırasıyla yaklaşık %11,14, %19,31, %20,65 ve %21,24 oranında

artış sağlanmıştır. Stefanidou (2012), NS'nin %1 ila %2 arasında değişen miktarlarda eklenmesiyle en yüksek eğilme mukavemeti değerlerinin elde edilebileceğini belirtmiştir. Qing vd. (2007), çalışmalarında NS içeren çimento esaslı malzemelerin eğilme mukavemetinin 28 günlük kürlenme süresinden sonra yaklaşık %26 ila %88 oranında artabileceği sonucuna varmıştır. Bu çalışmada, AC'ye maruz kalan harçların, AC uygulaması yapılmayan harçlara kıyasla daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, bir gün boyunca elektriksel kürlenme (AC) uygulanmasının, ardından kalan 27 gün boyunca konvansiyonel kürlenmenin (kireçle doyurulmuş su ile) uygulanmasının, NS katkılı harçların eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Ancak eğilme dayanımı, bir gün elektrik kürlenme (AC) ve ardından altı gün kireçle doyurulmuş suda kürlenene kadar artmamıştır. Bu sonuca dayanarak, AC uygulamasından sonra kısa süreli kürlenmenin (kireçle doyurulmuş su ile) uzun süreli kürlenme işleminden daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

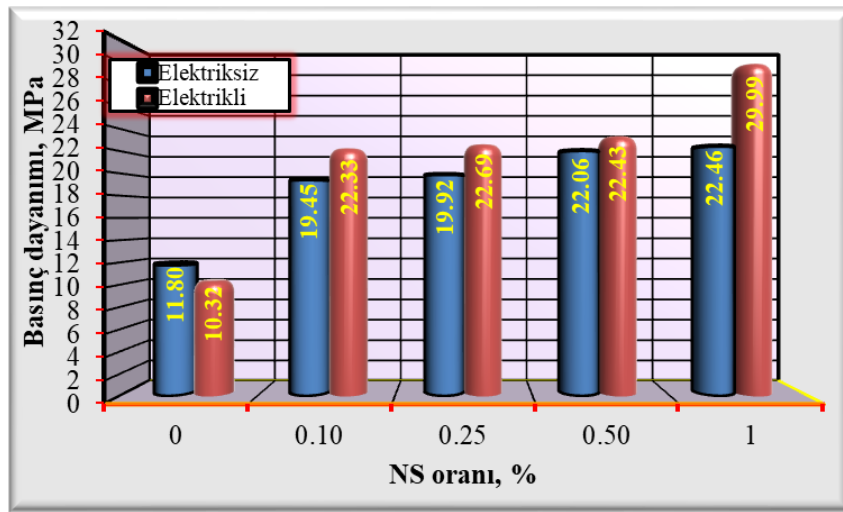


Şekil 4.6 28 günlük kürlenmiş harçların NS oranı ve AC işlemine bağlı eğilme dayanımları.

4.4 NS ve AC'nin 7 Günlük Basınç Dayanımına Etkileri

Şekil 4.7, AC uygulamasının varlığına bağlı olarak 7 gün boyunca kürlenene NS içeren harçların basınç dayanımlarını karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Çimento esaslı harçlara %0,1, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında NS eklenmesi ve ardından 7 günlük bir kürlenme süresinin, basınç dayanımında referans numuneye kıyasla sırasıyla yaklaşık %64,83, %68,81, %86,94 ve %90,33'lük artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bazı çalışmalar NS'nin çimento esaslı malzemelerde basınç dayanımına etkisini artırmıştır.

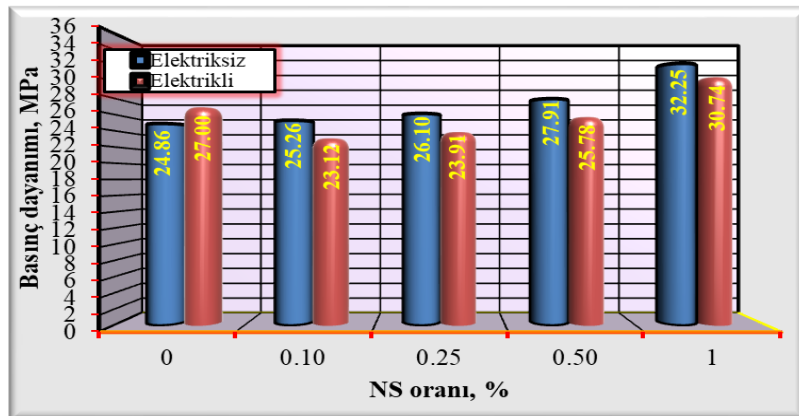
Xia vd. (2023), çimentolu sistemlerde mekanik mukavemette en yüksek artışın %2 NS eklenerek elde edilebileceği sonucuna varmıştır. Xia vd. (2023), 7 günlük kürlenmeden sonra %2 NS ile modifiye edilmiş betonun basınç mukavemetinin referans numunesinden yaklaşık 1,26 kat daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Stefanidou (2012), %0,5 ila %2 aralığında NS içeren çimentolu malzemelerin 7 günlük basınç dayanımının yaklaşık %25 oranında arttığını bildirmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde bildirilen bulguları desteklemektedir. Bununla birlikte bu çalışmada, NS modifiyeli harçların 7 günlük kürlenmeden sonra basınç dayanımında çok daha fazla artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir; NS'nin yüksek yüzey alanına sahip olması nedeniyle hidrasyon suyunun bir kısmını emmesidir. Ayrıca; su-çimento oranının azaltılması (NS'nin su emmesi yoluyla) mekanik dayanımın artmasına neden olmuştur. Bir diğer faktör ise NS'nin hidrasyonun erken aşamalarında puzolanik aktiviteyi artırmasıdır (Aggarwal vd. 2015). Bu tez çalışmasının yeniliği, 7 günlük kürlenme sonrası NS modifiye edilmiş harçların mekanik dayanımına AC'nin etkisinin incelenmesidir. Genel olarak, çimentonun NS ile değiştirilmesi, harçtaki NS içeriğinin artırılması ve AC uygulanması sonucunda 7 günlük basınç dayanımında artışa neden olduğu gözlenmiştir. Çimento esaslı harçlara sırasıyla %0,1, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında NS ilavesi ve ardından bir günlük elektrik kürlenme işlemi ile ve kalan 6 günlük kireç suda kürlenmesi sonucunda, referans numuneye kıyasla basınç dayanımında yaklaşık olarak sırasıyla yaklaşık %89,23, %92,28, %90,08 ve %154,15 oranında artış sağlanmıştır.



Şekil 4.7 Değişen NS ve AC İşlemleriyle 7 Gün Boyunca Kürlenmiş Harçların Basınç Dayanımları.

4.5 NS ve AC'nin 28 Günlük Basınç Dayanımına Etkileri

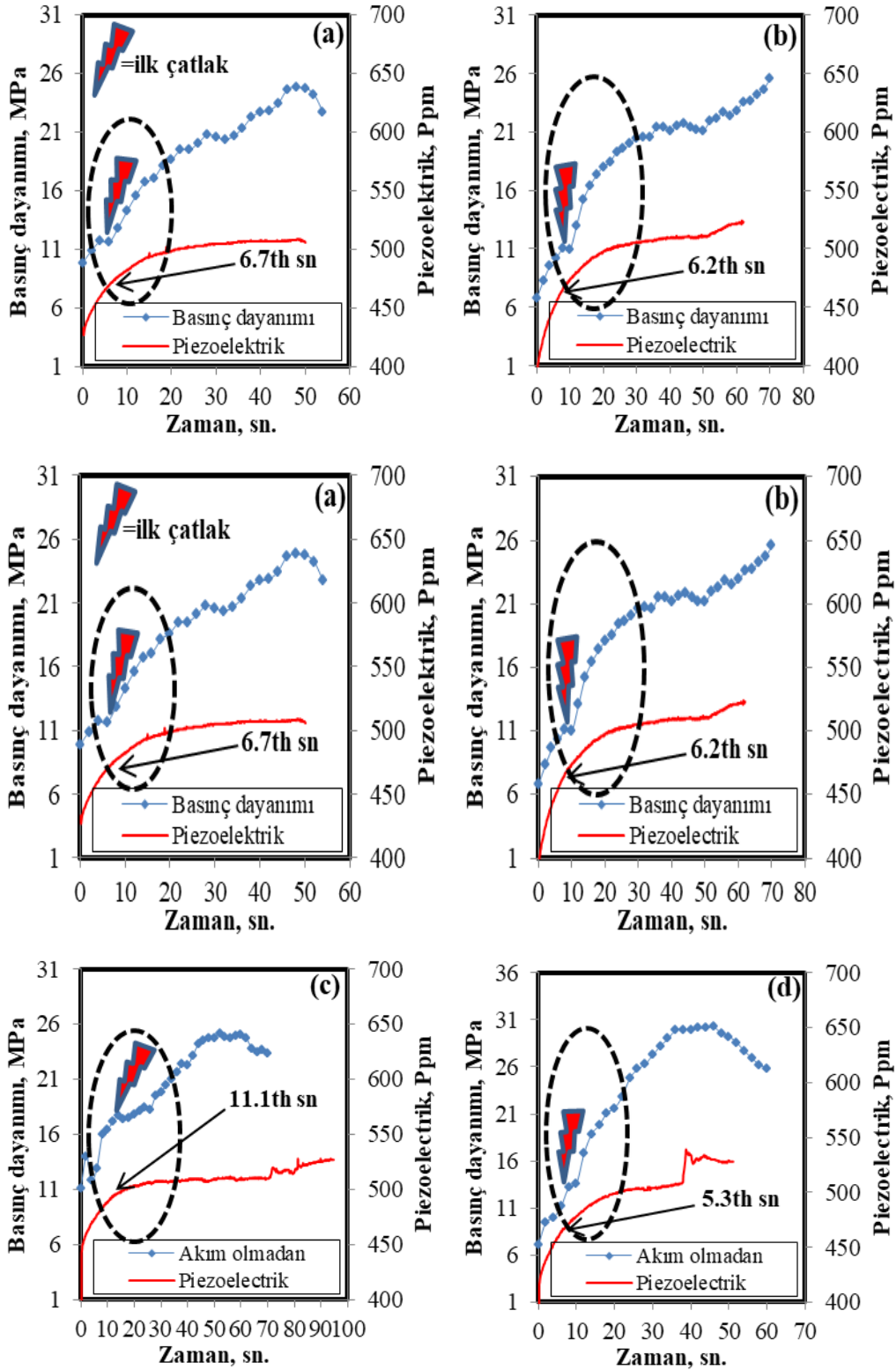
Şekil 4.8, AC uygulamasına bağlı olarak 28 gün boyunca kürlenmiş NS içerikli harçların basınç dayanımlarını karşılaştırmak için oluşturulmuştur. Çimento esaslı harçlara sırasıyla %0,1, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında NS ilavesi ve 28 günlük kürlenme süresi sonucunda referans numuneye göre basınç dayanımında yaklaşık olarak sırasıyla yaklaşık %1,60, %4,98, %12,51 ve %29,72 oranında artış sağlandığı gözlenmiştir. Ancak; 28 gün kürlenmiş NS modifiyeli harçlarda, daha yüksek NS içeriğine bağlı olarak basınç dayanımındaki artış, 7 gün kürlenmiş harçlardaki kadar belirgin olmamıştır. Bunun nedeni, NS'nin hidrasyonun ilk günlerinde daha fazla puzolanik reaksiyon göstermesi (Aggarwal vd. 2015) ve bunun da C-H ve C-S-H jellerinin daha hızlı oluşmasına yol açmasıdır (Tobón vd. 2012). Qing vd. (2007), çimentolu sistemlere NS eklenmesinin 28 günlük basınç dayanımının %17 ile %41 arasında artırabileceğini belirtmiştir. Öte yandan, Li (2004), 28 gün boyunca kürlenmiş harçlara NS eklenmesiyle %13,8 ila %26 arasında bir basınç dayanımı artışı gözlemlemişlerdir. Garg vd. (2021), sırasıyla %0,5, %0,75, %1,0 ve %1,25 NS içeren harçların basınç dayanımında, 28 günlük geleneksel kürlenmeden (kireçle doyurulmuş suda) sonra %15, %19, %22 ve %21 oranında artışlar gözlemlediler. Bu çalışmanın sonuçları daha önce yapılan araştırmaların sonuçlarıyla örtüşmektedir. Önceki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada AC'nin etkisi araştırılmıştır. Referans harçta (NS içermeyen) AC uygulaması ile 28 gün kireçli suda kürlendiğinde basınç dayanımında artış gözlenirken, NS içeren harçlarda basınç dayanımında azalma tespit edilmiştir. Bu nedenle, bir günlük elektrik kürüne maruz bırakılan harçların uzun süreli (28 gün veya daha fazla) geleneksel kür işlemine tabi tutulması önerilmemektedir.



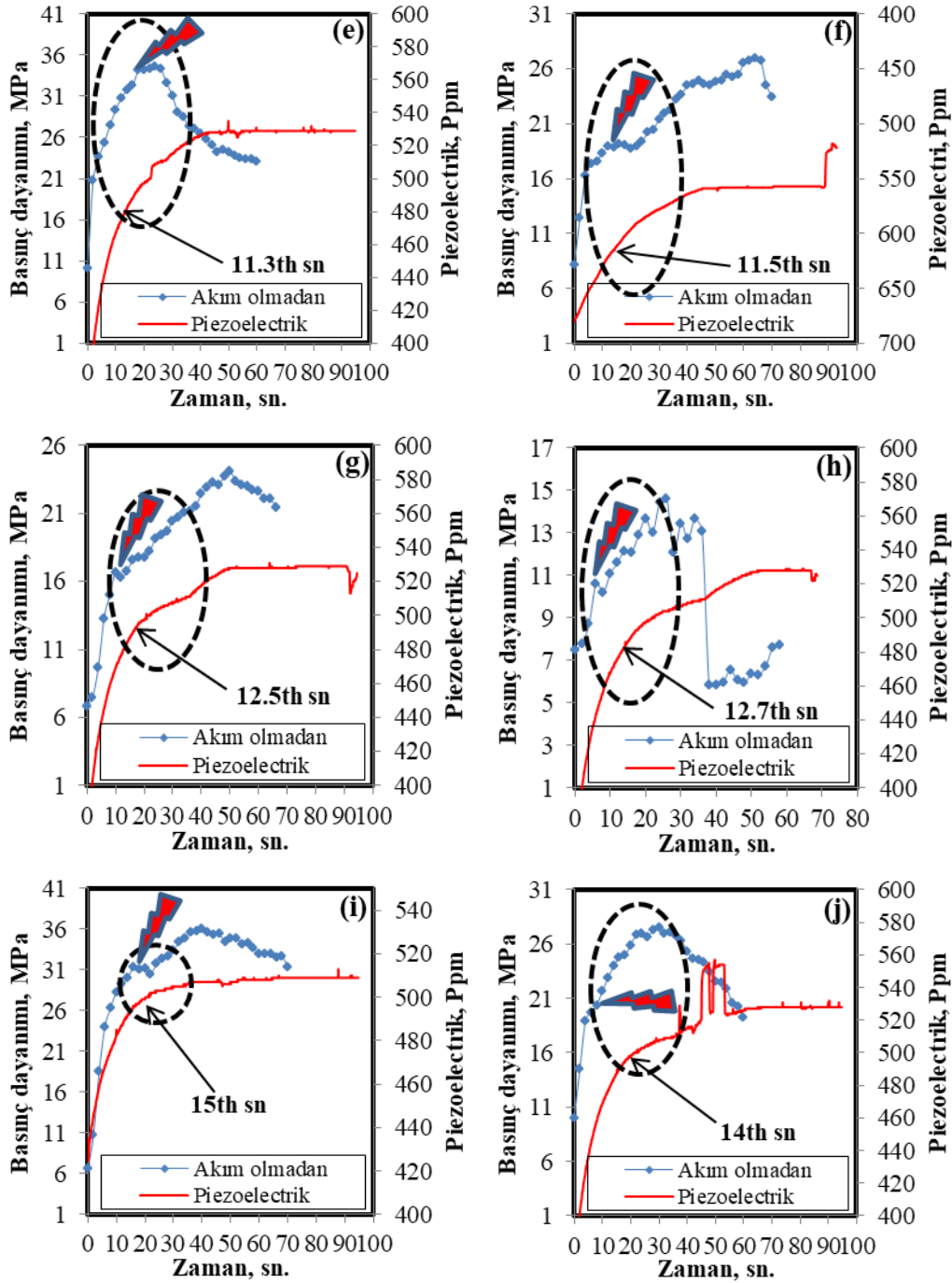
Şekil 4.8 28 günlük kürlenmiş harçların NS ve AC'ye bağlı olarak basınç dayanımları.

4.6 Harçlarda Çatlak Başlama Süresinin Piezoelektrik Ölçümlerle Tahmini

Son yıllarda, büyük depremler bina stokunun güvenliği konusunda endişelere yol açmış olup, bu da depremlerden etkilenen ülkelerin ekonomileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Bir depremden sonra, orta veya şiddetli hasarlı binalar görsel incelemeler yoluyla tespit edilebilmektedir. Ancak, hafif hasarlı binaların betonlarında oluşan mikro çatlaklar çoğu zaman tespit edilememektedir. Özellikle, bu çatlakların mafsallaşma bölgelerinde oluşması, sonraki bir depremde yapının çökmesine önemli ölçüde neden olabilmektedir. Ayrıca, bir depremden hemen sonra, her ev sahipleri yaşadığı yapılarının hasar görüp görmediğini merak etmektedirler. Geleneksel hasar değerlendirme yöntemleri (sertleştirilmiş betondan numune alma, yapısal sistemin X-ışını görüntülemesi ve sismik performans analizleri) zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu durum bilim insanlarını alternatif yöntemler aramaya yöneltmiştir. Bazı çalışmalarda, beton basınç testi sırasında numuneye yerleştirilen titreşim sensörleri aracılığıyla betondaki çatlak oluşum sürelerinin tespit edilebileceği belirlenmiştir (Li vd. 2019, Ai vd. 2016, Dixit ve Bhalla 2018, Hoccoğlu 2024). Örneğin, Xu vd. (2010) piezoelektrik sensörlerini betonun içerisine yerleştirmişler ve betonda meydana gelen hasarları incelemiştir. Divsholi ve Yang (2014), betondaki hasarı tespit etmek için piezoelektrik sensörler kullanan yenilikçi bir yaklaşım önermiştir. Önceki çalışmaların aksine, bu araştırma NS ve AC uygulamasının ilk çatlak oluşumu süresi üzerindeki etkisini incelemektedir. Şekil 4.9'da farklı numunelerin basınç dayanımı testi sırasında titreşimlerdeki meydana gelen değişimler gözlenmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde NS içermeyen harçlarda AC uygulamasının çatlak oluşum süresini kısalttığı görülmektedir. Bu nedenle, geleneksel çimento esaslı malzemelerde AC kullanılması deprem anında daha az güvenliğe yol açabileceği düşünülmüştür. Ayrıca, AC'nin NS katkılı harçlarda ilk çatlağın oluşma süresini önemli ölçüde uzatmadığı da gözlenmiştir (Şekil 4.9). AC uygulaması yapılmayan harçlarda, çimento yerine eklenen kullanılan NS oranı arttıkça ilk çatlak oluşum süresi önemli oranda geciktiği gözlenmiştir. Örnek olarak çimento yerine %1 NS ilave edildiğinde ilk çatlağın oluşma süresi yaklaşık 8 saniye gecikmiştir (Şekil 4.9a, Şekil 4.9j). Bu dönem, deprem anında can güvenliğinin sağlanması açısından kritik olabilir. Ayrıca teknolojik araçlar (titreşim sensörleri, nesnelerin interneti vb.) kullanılarak deprem sırasında çimento sistemlerindeki hasar miktarı uzaktan da izlenebilmektedir (Johann vd. 2017).



Şekil 4.9 Harçlarda titreşim ölçümü ile ilk çatlak oluşum süresinin tahmini (a- %0 NS, b- %0 NS (AC), c- %0,10 NS, d- %0,10 NS (AC), e- %0,25 NS, f- %0,25 NS (AC), g- %0,50 NS, h- %0,50 NS (AC), i- %1 NS, j- %1 NS (AC)).

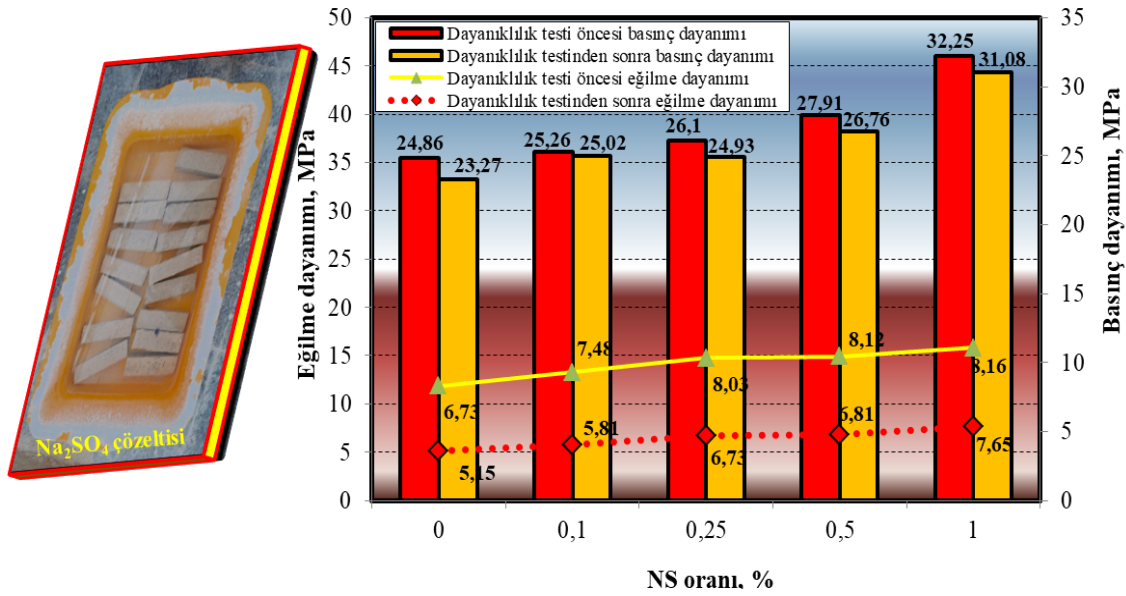


Şekil 4.9 (Devamı) Harçlarda titreşim ölçümü ile ilk çatlak oluşum süresinin tahmini (a- %0 NS, b- %0 NS (AC), c- %0,10 NS, d- %0,10 NS (AC), e- %0,25 NS, f- %0,25 NS (AC), g- %0,50 NS, h- %0,50 NS (AC), i- %1 NS, j- %1 NS (AC)).

4.7 NS İçeriğinin Harçlarda Durabilite Üzerindeki Etkileri

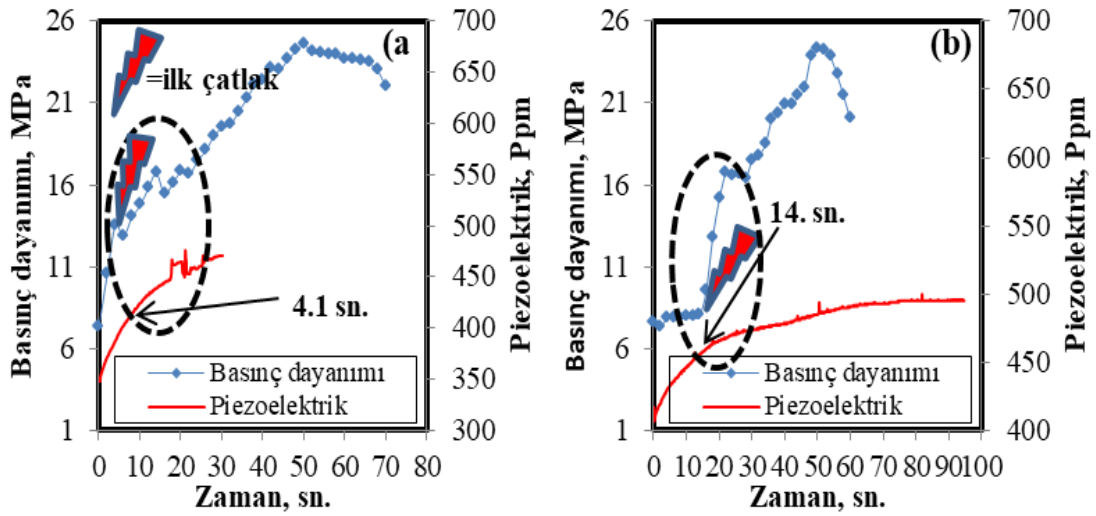
Şekil 4.10' dan görüleceği üzere %0, %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 NS içeren harçlarda sülfata dayanıklılık testleri yapılmış ve eğilme dayanımında sırasıyla %23,47, %22,32,

%16,18, %16,13 ve %6,25 oranında azalma tespit edilmiştir (Şekil 4.10). Ayrıca, %0, %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 NS katkılı harçlarda dayanıklılık deneyine tabi tutulan numunelerin basınç dayanımlarında, sülfata dayanıklılık deneyine tabi tutulmayan aynı bileşime sahip NS katkılı harçlara göre sırasıyla %6,39, %4,90, %4,48, %4,12 ve %3,62 oranında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.10). Harç içeriğindeki NS oranının artması ile, Na₂SO₄ (sülfat) saldırısına karşı direncinin artırdığı da gözlemlenmiştir. Örnek olarak, sülfata dayanıklılık testi sonuçları incelendiğinde, %1 NS içeren harcın basınç dayanımının, referans harcın basınç dayanımından yaklaşık %20 daha yüksek olmuştur.



Şekil 4.10 Harçların NS içeriğine bağlı dayanıklılık test sonuçları.

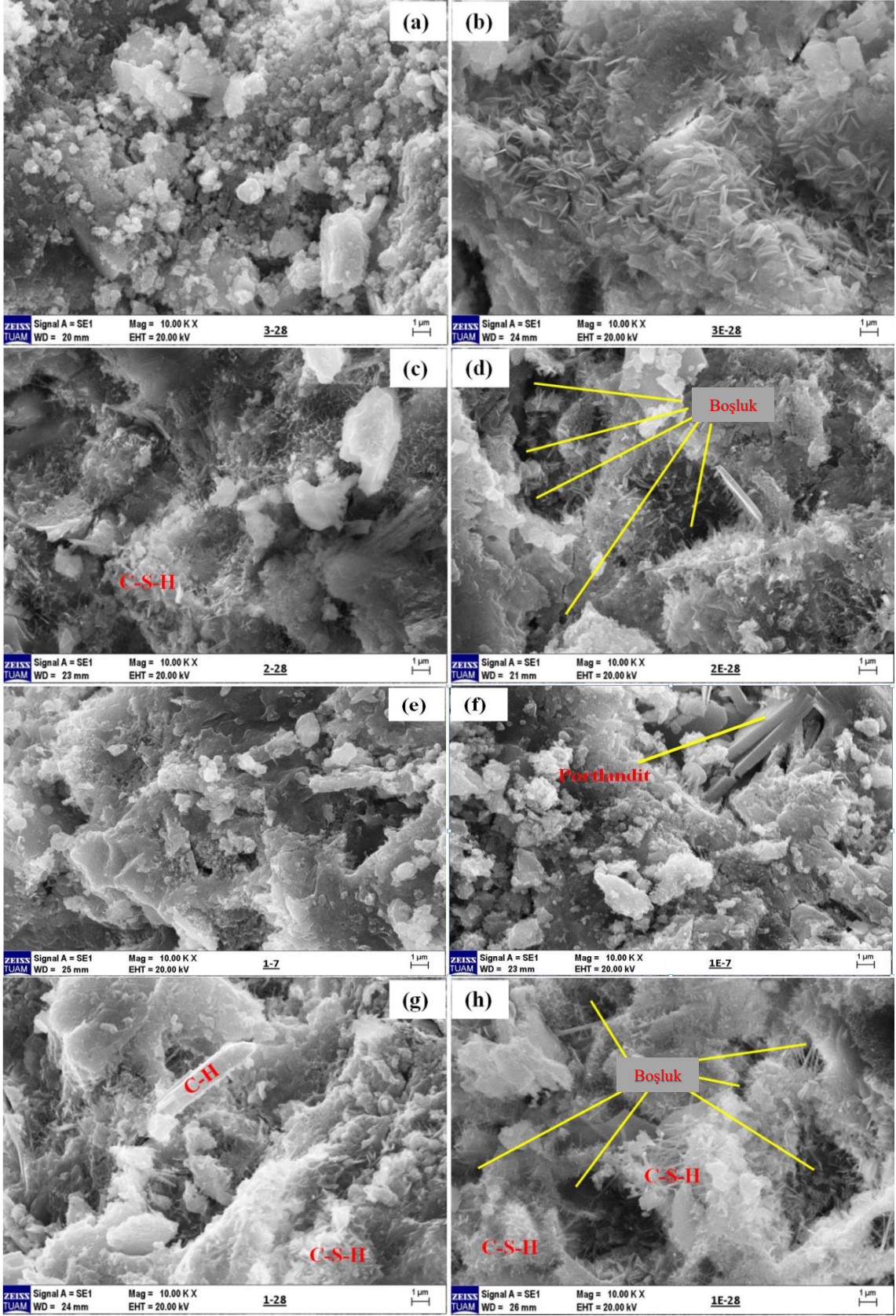
Şekil 4.11, 90 gün boyunca sülfat saldırısına maruz bırakıldıktan sonra piezoelektrik test sonuçlarına göre %0 NS ve %1 NS içeren harçların ilk çatlak oluşum sürelerini karşılaştırmaktadır. %1 NS içeren harçta ilk çatlak oluşum süresinin geciktiği sonucuna varılmıştır. Sülfata dayanıklılık testi sonucunda %0 NS içeren harçta ilk çatlağın, sülfat saldırısına maruz kalmayan harca göre dayanıklılık testinden 2,6 saniye sonra oluştuğu raporlanmıştır. Ancak %1 NS içeren harçta, ilk çatlak oluşumuna kadar geçen süre, sülfat dayanıklılık testi yapılmayan harca göre sadece yaklaşık bir saniye kısalmıştır. Bu sonuca dayanarak, NS'nin dayanıklılık sorunları olduğunda bile deprem güvenliğine katkı sağlayabileceği değerlendirilmiştir. Sülfat dayanıklılık testinden elde edilen sonuçlar, çalışmanın diğer bölümlerinden elde edilen bulgularla örtüşmektedir.



Şekil 4.11 Dayanıklılık testi sonrası %0 NS (a) ve %1 NS içeren harçlarda piezoelektrik test uygulaması.

4.8 Harçlarda Mikro İncele Analizleri

Çimento esaslı malzemelerin SEM analizi, malzemenin mikro yapısının, mikro boşlukların varlığının ve hidrasyon ürünlerinin oluşumunun belirlenmesine olanak tanımaktadır (Hu vd. 2022). Şekil 4.12’de %0, %0,50 ve %1 NS içeren harçların, AC uygulaması yapılan veya yapılamayan koşullardaki mikro yapısal analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.12a ve Şekil 4.12b incelendiğinde, çimentonun %0 NS içeren harçlara AC uygulanması sonucunda daha yoğun bir mikro yapının oluştuğu görülmüştür. Ancak %0,50 NS içeren harçlara AC uygulanmasının daha gözenekli bir yapı ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.12c, Şekil 4.12d). Çimento yerine %1 NS ilave edilerek 7 gün kürlenmiş harçların mikro yapısı incelendiğinde, AC uygulanan numunenin, AC uygulanmayan numuneye göre daha yoğun bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.12e, Şekil 4.12f). Hu (2014), bu boşlukların aralıklı gözenekler olarak tanımlandığını belirtmiştir. C-H ve C-S-H bağlarının oluşumu, %1 NS içeren ve 28 gün boyunca kürlenmiş harçlarda gözlemlenmiştir (Şekil 4.12g). Bu, NS'nin Ca(OH)_2 ile puzolanik reaksiyonu ile açıklanabilir (Gatero vd. 2008). Şekil 4.12h, AC uygulamasından sonra %1 NS içeren 28 günlük kürlenmiş harcın mikro yapısında C-S-H jellerinin oluşmasına rağmen, mikro yapısal bozulmanın da tespit edildiğini göstermektedir. SEM analizinden elde edilen sonuçlar, mekanik dayanım testlerinden elde edilen bulguları doğrulamaktadır.



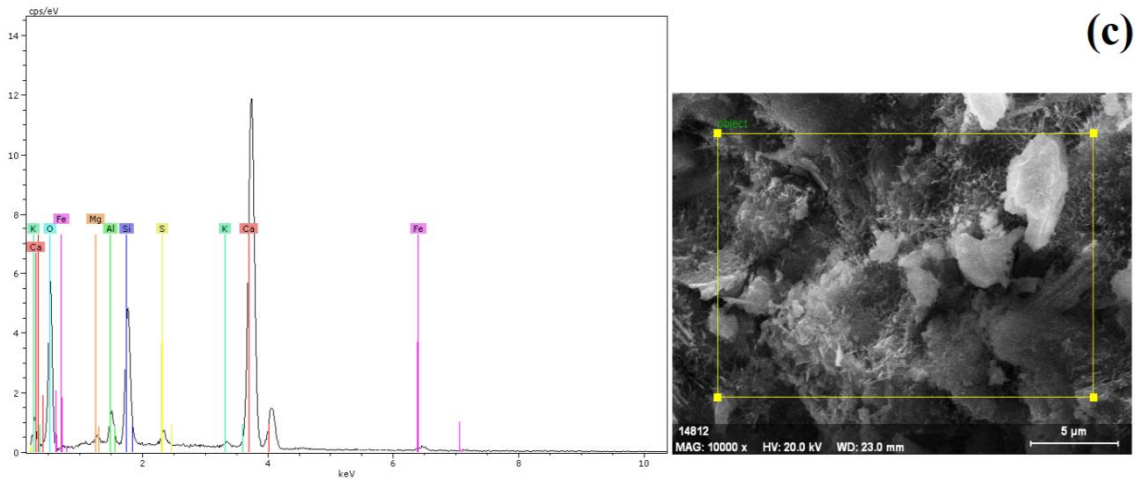
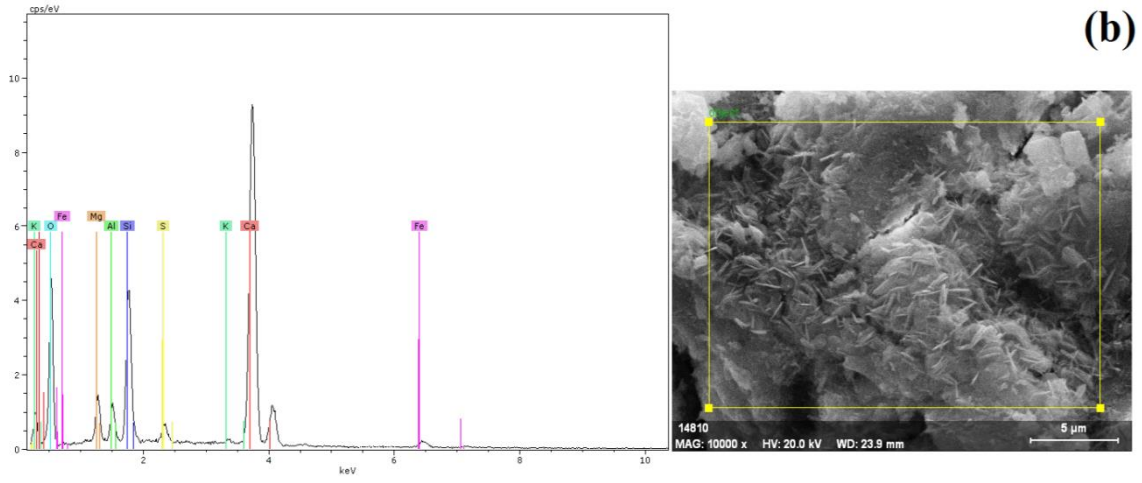
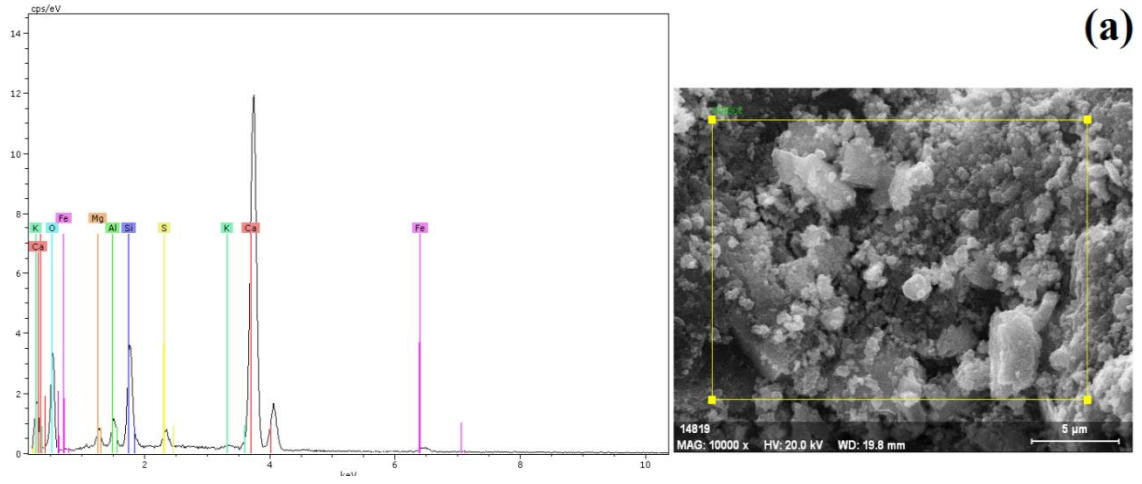
Şekil 4.12 Harçların SEM analizleri (a-0% NS-28d, b-0% NS-28d-E c-0.50% NS-28d, d- 0.50% NS-28d-E, e- 1% NS-7d, f- 1% NS- 7d-E, g- 1% NS-28d, h- 1% NS-28d-E).

4.9 Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDX) Sonuçları

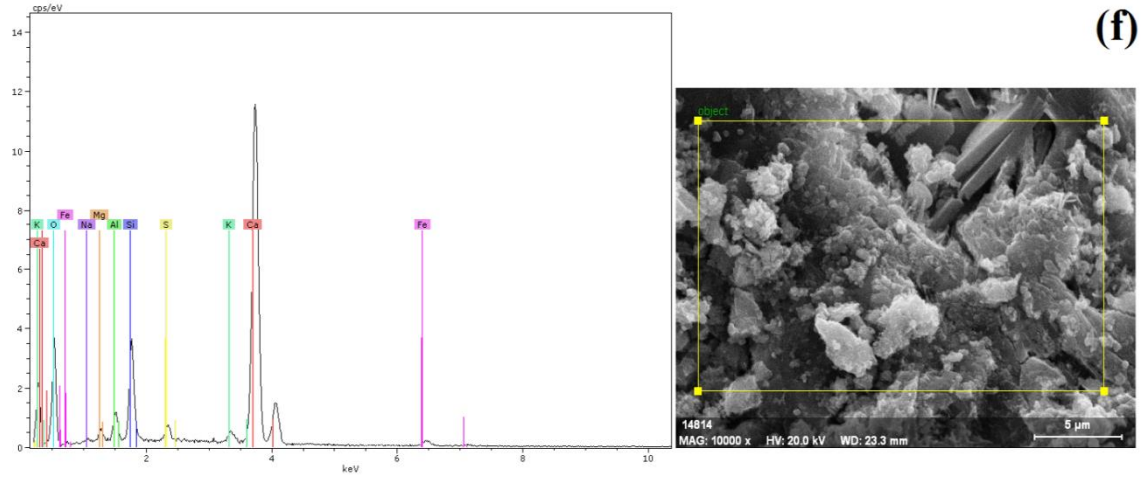
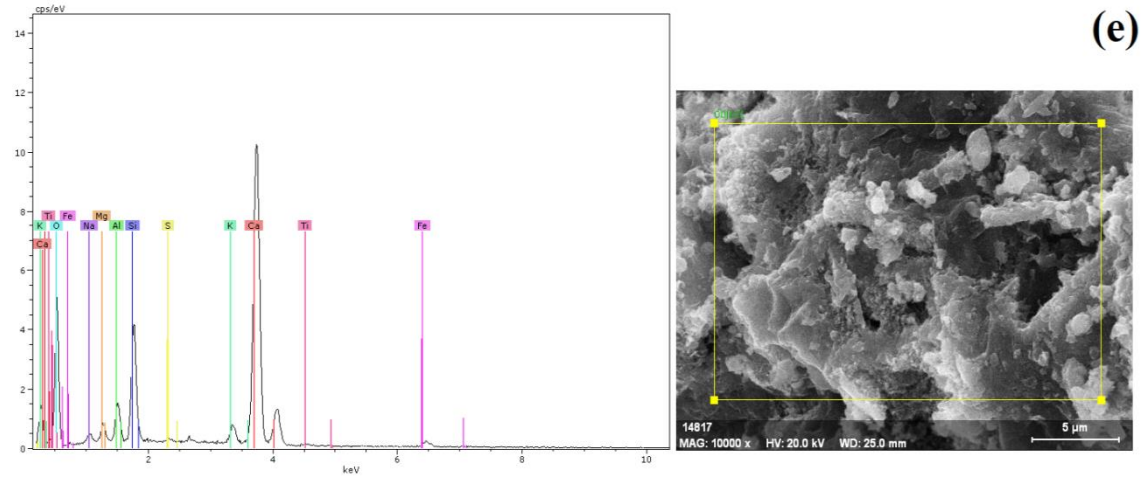
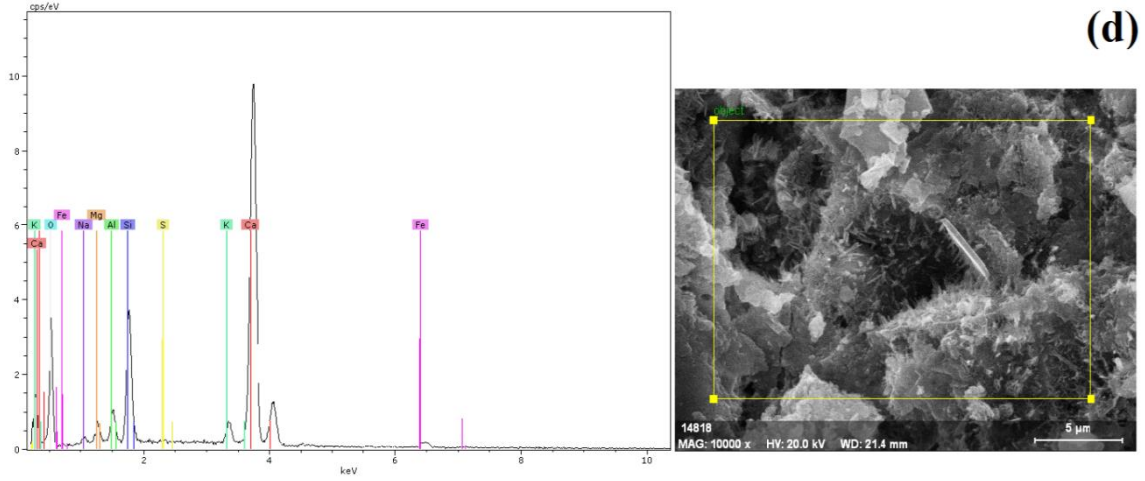
Çimento esaslı malzemelerin EDX analizi, hidrasyon sonucu oluşan elementlerin ve bu elementlerin oranlarının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, NS, kür süresi ve AC uygulamasına dayalı element oluşumu değerlendirmek amacıyla çeşitli serilerde EDX analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13). Çimento esaslı malzemelerin mekanik mukavemet ve dayanıklılık özellikleri açısından en etkili elementler Ca ve Si'dir (Hu 2014).

Birçok çalışma, EDX analizine dayanarak CaO/SiO₂ oranındaki azalmanın daha fazla C-S-H jeline yol açabileceğini bildirmiştir (Hu 2014). Çizelge 4.2'te, kürlenme süresi ve AC uygulama koşullarına bağlı olarak değişen NS içerikli harçların CaO/SiO₂ oranları karşılaştırılmaktadır. Çizelge 4.2 incelendiğinde, %0, %0,5 ve %1 NS içeren harçlar için EDX analizinden (alan ölçümü ile) elde edilen CaO/SiO₂ oranlarının sırasıyla 3,22, 2,36 ve 1,99 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar harçtaki NS içeriği arttıkça C-S-H jellerinin miktarının da arttığını göstermektedir. 1 gün elektriksel kür, kalan 27 gün ise geleneksel kür uygulanan %0 NS içerikli harcın CaO/SiO₂ oranı 2,09 olarak hesaplanmıştır. AC'ye tabi tutulan NS içeren harçlarda, AC uygulaması yapılmayan harçlara kıyasla daha yüksek CaO/SiO₂ oranları elde edildi (Çizelge 4.2). Bu sonuca dayanarak, AC'nin 28 gün kürlenmiş numunelerde C-S-H yapısını bozabileceği sonucuna varılabilir. Buna karşın, 7 gün kürlenmiş AC uygulanmış harçta daha düşük CaO/SiO₂ oranı elde edildi (Çizelge 4.2).

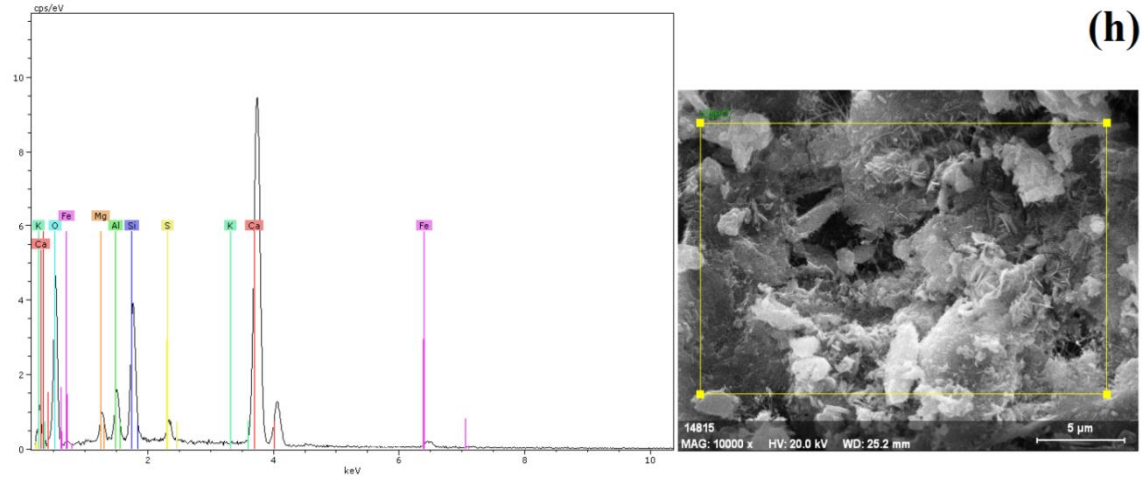
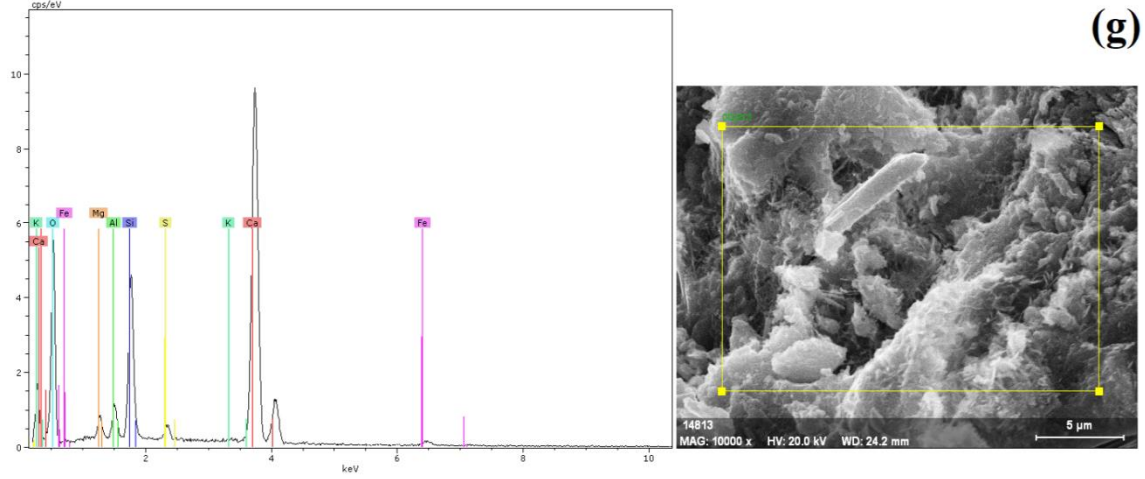
Önceki çalışmalar, C-S-H jellerinin oluşumunun yalnızca CaO ve SiO₂'den değil aynı zamanda Al₂O₃'ten de etkilendiğini göstermektedir (Xiao vd. 2022). Xiao vd. (2020), çimento esaslı malzemelerde EDX analizi ile belirlenen CaO/(SiO₂ + CaO + Al₂O₃) oranının daha düşük değerlerinin daha yoğun bir mikro yapıya ve C-S-H jellerinin artan oluşumuna yol açabileceği sonucuna varmıştır. Çimento yerine %0, %0,5 ve %1 NS kullanıldığında, harçların CaO/(SiO₂ + CaO + Al₂O₃) oranları sırasıyla 0,70, 0,65 ve 0,62 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.2). Çizelge 4.2 incelendiğinde CaO/SiO₂ oranları için elde edilen sonuçların CaO/(SiO₂ + CaO + Al₂O₃) oranları için elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.2'te elde edilen sonuçlar mekanik dayanım ve SEM görüntülerini de doğrulamaktadır.



Şekil 4.13 Harçların EDX analizleri (a-0% NS-28d, b-0% NS-28d-E c-0.50% NS-28d, d- 0.50% NS-28d-E, e- 1% NS-7d, f- 1% NS- 7d-E, g- 1% NS-28d, h- 1% NS-28d-E).



Şekil 4.13 (Devamı) Harçların EDX analizleri (a-0% NS-28d, b-0% NS-28d-E c-0.50% NS-28d, d- 0.50% NS-28d-E, e- 1% NS-7d, f- 1% NS- 7d-E, g- 1% NS-28d, h- 1% NS-28d-E).



Şekil 4.13 (Devamı) Harçların EDX analizleri (a-0% NS-28d, b-0% NS-28d-E c-0.50% NS-28d, d- 0.50% NS-28d-E, e- 1% NS-7d, f- 1% NS- 7d-E, g- 1% NS-28d, h- 1% NS-28d-E).

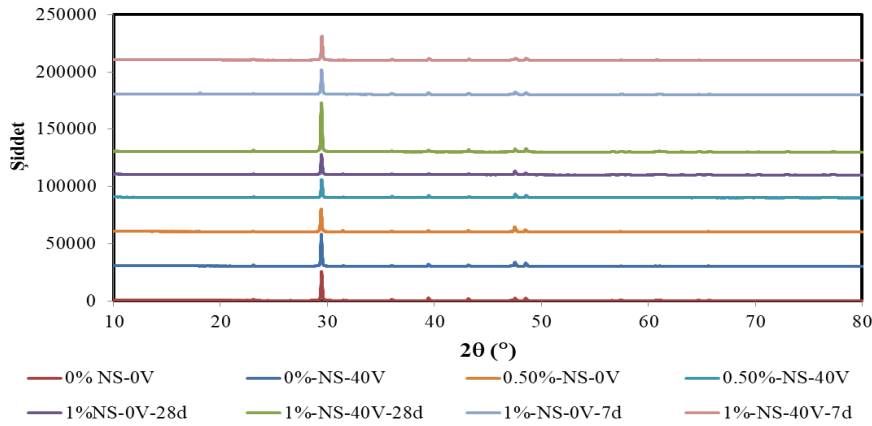
Çizelge 4.2 AC uygulaması ve NS katkısına bağlı olarak 7-28 günlük kürlenmiş harçlarda Ca/Si ve CaO/(SiO₂ +CaO+ Al₂O₃) oranlarının karşılaştırılması.

Alan	NP%-Tedavi süresi -AC	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO/SiO ₂	CaO/(SiO ₂ +CaO+Al ₂ O ₃)
Alan 1	0%-NS-28-0V	65.64	20.38	7.27	3.22	0.70
Alan 2	0%-NS-28-40V	55.36	26.38	5.68	2.09	0.63
Alan 3	0.5%-NS-28-0V	60.90	25.74	5.74	2.36	0.65
Alan 4	0.5%-NS-28-40V	63.89	23.15	5.02	2.75	0.69
Alan 5	1%-NS-7-0V	54.70	19.86	7.71	2.73	0.66
Alan 6	1%-NS-7-40V	63.41	23.57	5.24	2.69	0.68
Alan 7	1%-NS-28-0V	56.19	28.19	5.73	1.99	0.62
Alan 8	1%-NS-28-40V	56.75	23.80	8.40	2.38	0.63

4.10 X-ışını Kırınımı (XRD) Analizi

Tez kapsamında değişen NS oranlarına sahip harçlarda, elektrik akımı uygulanıp uygulanmadığı dikkate alınarak XRD analizleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.14). Ayrıca, Şekil 4.14'de %1 NS içeren harçların 7 günlük ve 28 günlük kürlenmeden sonraki XRD piklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Tüm serilerde yaklaşık 29,40 derecede pikler oluşmuştur. Bu tepeler Ca(OH)_2 'yi temsil etmektedir (Chen vd. 2024). Düşük pik yükseklikleri Ca(OH)_2 tüketimini ve C-S-H jellerinin oluşumunun arttığını göstermektedir.

Harçlara AC uygulaması yapılmadan NS ilave edilmesi ve miktarının artırılmasıyla (%0'dan %1'e) piklerin kısaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.14). Bu durum NS'nin Ca(OH)_2 ile puzolanik reaksiyonu ile açıklanabilir (Carneiro vd. 2018). Ayrıca, çimento hidratasyonundaki bu iyileşme, NS'nin çekirdeklenme etkisinden kaynaklanmaktadır (Yu vd. 2014). XRD analizi, NS'nin çekirdeklenme etkisinin erken yaşlarda daha belirgin olduğunu göstermektedir (Singh vd. 2016). Bu çekirdeklenme etkisi, basınç dayanımında orantılı olarak daha önemli iyileştirmeleri açıklayabilir. Harçlara AC uygulanmasının bir sonucu olarak, Ca(OH)_2 tepe noktasının AC uygulaması olmayan harca göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.14). Bu durum, AC uygulamasının 28 gün kürlenmiş numunelerde mikro yapıyı bozduğunu düşündürmektedir. Ancak %1 NS içeren harçlar 7 gün kürlendiğinde tam tersi sonuç elde edilmiştir. XRD analiz sonuçları tez çalışmasının diğer bölümlerindeki bulgularla örtüşmektedir.



Şekil 4.14 Harçların NS içeriğine, AC uygulamasına ve kürlenme süresine bağlı olarak XRD analizleri.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması okuyuculara bazı yenilikler sunmaktadır. Örneğin, NS katkılı çimento esaslı kompozit malzeme üretilerek, deprem anında ilk çatlak oluşum süresi uzatılabilir, bu sayede can güvenliği ve mal güvenliği sağlanabilir. Ayrıca hızlı onarım gerektiren yapı elemanlarının onarımı NS modifikasyonu ve AC uygulaması ile yapılabilir. Çalışmada elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Çimento yerine %0,10, %0,25, %0,50 ve %1 NS ilavesi ile referans harca göre PBS'nin sırasıyla 18, 57, 87 ve 239 dakika daha erken gerçekleştiği gözlenmiştir.
- Çimentonun %1 NS ile değiştirilmesi ve AC uygulanması ile priz süresinin 306 dakika kısaldığı ve iç sıcaklığın yaklaşık 4 °C arttığı bildirilmiştir.
- AC uygulamasından sonra kısa süreli kürlenmenin (kireçle doyurulmuş su ile) uzun süreli kürelemeye göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Çimento yerine ağırlıkça %0,10, %0,25, %0,50 ve %1,00 oranlarında NS ilave edilmesi ve bir gün süreyle AC uygulanması sonucunda, referans numuneye göre 7 günlük eğilme dayanımında sırasıyla yaklaşık %23,43, %27,01, %42,21 ve %46,15 oranında artışlar gözlenmiştir.
- Çimento esaslı harçlara %0,1, %0,25, %0,50 ve %1 oranlarında NS eklenmesinin, ardından bir günlük elektriksel kürlenme ve kireç suyunda 6 günlük kürlenmenin, referans numunesine kıyasla basınç dayanımında yaklaşık olarak sırasıyla yaklaşık %89,23, %92,28, %90,08 ve %154,15 oranında artış sağladığı gözlemlenmiştir.
- Referans harçta (NS içermeyen) AC uygulamasıyla 28 gün kireç suyunda kürlendiğinde basınç dayanımında artış gözlemlenmesine rağmen, NS içeren harçlarda basınç dayanımında azalma kaydedilmiştir. Bu nedenle, bir günlük elektrik küreline maruz kalan harçların uzun süreli (28 gün veya daha fazla) geleneksel kürelemeye tabi tutulması önerilmemektedir.
- NS içermeyen harçlarda AC uygulamasının çatlak oluşum süresini kısalttığı bildirilmiştir. Bu nedenle, geleneksel çimento esaslı malzemelerde AC kullanılması deprem anında daha az güvenliğe yol açabileceği değerlendirilmiştir.

- Çimento yerine %1 NS ilave edildiğinde ilk çatlağın oluşma süresinin 8 saniye geciktiği gözlemlenmiştir. Bu dönem, deprem anında can güvenliğinin sağlanması açısından kritik olabilir.
- Sülfata dayanıklılık testi sonucunda %0 NS içeren harçta, sülfat saldırısına maruz kalmayan harca göre ilk çatlağın 2,6 saniye sonra oluştuğu bildirilmiştir.
- Ağırlıkça %0, %0,5 ve %1 NS içeren harçlar için yapılan EDX analizinden (alan ölçümüyle) elde edilen CaO/SiO₂ oranlarının sırasıyla 3,22, 2,36 ve 1,99 olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, harçtaki NS oranının artması ile C-S-H jellerinin miktarının da arttığını göstermektedir.
- XRD analizi sonucunda, AC uygulaması yapılmayan harçlarda NS ilavesi ve miktarının artmasıyla (0%'dan 1%'e) piklerin kısaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum NS'nin Ca(OH)₂ ile puzolanik reaksiyonu ile açıklanabilir.

RFID sensörlerinin (titreşime duyarlı sensörlerin) çimento esaslı malzemelerin içerisine yerleştirilmesi ile, bu çalışma geliştirilebilir. Ayrıca daha yüksek oranlarda NS katkılı betonlar üretilerek çalışmanın kapsamının geliştirilebileceği değerlendirilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- Aggarwal P, Singh R P, Aggarwal Y, 2015, Use of nano-silica in cement-based materials—A review, *Cogent Engineering* 2 (1), 1078018, <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2015.1078018>
- Ai D, Zhu H, Luo H, 2016, Sensitivity of embedded active PZT sensor for concrete structural impact damage detection, *Constr. Build. Mater.* 111,, 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.094>
- Alsafar K A, 2014, Review of the use of nanotechnology in construction industry, *Int. J. Eng. Res. Dev.* 10, 67–70. <https://doi.org/10.17577/ijertconv6is01003>
- ASTM C 1012-04, 2004, Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution, ASTM International. www.astm.org.
- ASTM C348, 2014, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement. ASTM Int West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- ASTM C778–13, 2013, Standard specification for standard sand, ASTM Int. West Conshohocken, PA.
- BS EN 12390-2, 2019, Testing hardened concrete making and curing specimens for strength tests.
- Carneiro L R S, Garcia D C S, Costa M C F, Houmard M, Figueiredo R B, 2018, Evaluation of the pozzolanicity of nanostructured sol-gel silica and silica fume by electrical conductivity measurement, *Constr. Build. Mater.* 160, 252–257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.042>
- Chen J J, Ng P L, Xu L, Kwan A K H, 2024, Use of nano-silica sol in concrete: Performance and influence mechanisms, *Constr. Build. Mater.* 411, 134582. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134582>
- Chintalapudi K, Pannem R M R, 2020, An intense review on the performance of graphene oxide and reduced graphene oxide in an admixed cement system, *Constr. Build. Mater.* 259, 120598. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120598>

- Chuah S, Pan Z, Sanjayan J G, Wang C M, Duan W H, 2014, W.H. Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide, *Constr. Build. Mater.* 73, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>
- Colleparidi S, Borsoi A, Ogoumah J J O, R. Troli, M. Colleparidi, A.Q. Cursio, Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC. In: Proceedings of the 6th international congress, global construction, ultimate concrete opportunities, Dundee, UK; 5–7 July 2005.
- Debbarma K, Debnath B, Sarkar P P, 2022, A comprehensive review on the usage of nanomaterials in asphalt mixes, *Constr. Build. Mater.* 361, 129634. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129634>
- Divsholi B S, Yang Y, 2014, Combined embedded and surface-bonded piezoelectric transducers for monitoring of concrete structures, *NDT & E Int.* 65, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.03.009>
- Dixit A, Bhalla S, 2018, Prognosis of fatigue and impact induced damage in concrete using embedded piezo-transducers, *Sens. Actua. A* 274, 116–131. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.005>
- El-Didamony A H, 2017, Chemical and Engineering Properties of Blended Cement Containing Micro- and Nano-silica, *American Journal of Chemical Engineering* 5(5), 111. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20170505.13>.
- Gaitero J J, Campillo I, Guerrero A, 2008, Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles, *Cement and Concrete Research* 38, 1112–1118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.021>
- García-Taengua E, Sonebi M, Hossain K M A, Lachemi M, Khatib J, 2015, Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars. *Composites Part B: Engineering* 81, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.009>
- Garg R, Bansal M, Aggarwal Y, 2021, Experimental study on strength and microstructure of mortar in presence of micro and nano-silica, *Materials Today: Proceedings* 43,, 769–777. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.167>

- Ghafari E, Ghahari S A, Feng Y, Severgnini F, Lu N, 2016, Effect of zinc oxide and Al-Zinc oxide nanoparticles on the rheological properties of cement paste, *J. Compos. Part B* 105, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.08.040>.
- Hocaoglu 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, *J. Build. Engin*, 46, 103803. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103803>
- Hocaoğlu İ, 2024, A novel cost-effective method for self-estimation of crack occur time by piezoelectric measurement of glass powder-modified cementitious mortar, *Journal of Building Engineering* 86, 108967. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108967>
<https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1824822>
- Hu C, 2014, Microstructure and mechanical properties of fly ash blended cement pastes, *Constr. Build. Mater.* 73, 618-625. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.009>
- Hu J, Ge Z, Wang K, 2014, K. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early-age heat of hydration and set times, *Constr. Build. Mater.* 50, 657–663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011>
- Hu W, Cheng W C, Wang L, Xue Z F, 2022, Micro-structural characteristics deterioration of intact loess under acid and saline solutions and resultant macro-mechanical properties, *Soil & Tillage Research* 220, 105382, <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105382>
- Ji T, 2005, Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂, *Cement and Concrete Research* 35, 7-1943. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004>
- Johann S, Strangfeld C, Müller M, Mieller B, Bartholmai M, 2017, RFID sensor systems embedded in concrete – requirements for long-term operation, *Materials Today: Proceed.* 4, 5827–5832. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.053>

- Kong D, Du X, Wei S, Zhang H, Yang Y, Shah S P, 2012, Influence of nanosilica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cementbased materials. *Construction and Building Materials* 37, 15-707. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.006>
- Kosmatka S H, Voigt G, Taylor P, 2016, Integrated materials and construction practices for concrete pavement: a state-of-the-practice manual. Center for Translation Research and Education, Iowa State University, 69-104. https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2019/05/IMCP_manual.pdf
- Li G, 2004, Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂, *Cem. Concr. Res.* 34 1043–1049. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.013>
- Li W, Liu T, Zou D, Wang J, Yi T H, 2019, PZT based smart corrosion coupon using electromechanical impedance, *Mech. Sys. Signal Proc.* 129, 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.04.049>
- Nano-particles. <https://nanografi.com/popular-products/>. 15 March 2025.
- Nik A S, Bahari A, 2011, Nano-particles in concrete and cement mixtures, *Appl. Mech. Mater.* 110–116, 3853–3855.
- Nilimaa J, 2023, Smart materials and technologies for sustainable concrete construction, *Developments in the Built Environment* 15, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100177>
- Qing Y, Zenan Z, Deyu K, Rongshen C, 2007, Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials* 21, 539–545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001>
- Rong Z, Zhao M, Wang Y, 2020, Effects of Modified Nano-SiO₂ Particles on Properties of High-Performance Cement-Based Comp. *Mater.* 13(3), 646. <https://doi.org/10.3390/ma13030646>
- Saleh A N, Ahmed O K, Attar A A, Abdullah A A, 2024 Impact of nano-silica (SiO₂) on thermic properties of concrete, *J Ther Eng.* 10 (3), 746–755.

- Seifan M, Mendoza S, Berenjian A, 2022, Effect of nano and micro iron oxide particles on the workability, strength and absorption rate of cement mortar containing fly ash, *European Journal of Environmental and Civil Eng.* 26, 3898- 3912.
- Singh L P, Ali D, Sharma U, 2016, Studies on optimization of silica nanoparticles dosage in cementitious system, *Cem. Concr. Compos.* 70, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.03.006>
- Stefanidou M, 2012, Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes, *Composites Part B: Engineering*, 43, 2706–2710. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.12.015>
- Sun J, Xu Z, Li W, Shen X, 2017, Effect of nano-SiO₂ on the early hydration of alite-sulphoaluminate cement, *Nanomaterials* 7, 102; doi:10.3390/nano7050102
- Tobón J I, Payá J J, Borrachero M V, Restrepo O J, 2012, Mineralogical evolution of Portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength, *Constr. Build. Mater.* 36, 736–742. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.043>
- TS EN 197-1, 2012, Cement-stage 1: general cements—component, TSE, Ankara, Turkey.
- Xia W, Cui S, Zhu L, Li W, Ju J W, Wang X, 2023, Effects of nano-silica modification on early age hydration process in winter construction of tunnel engineering, *Constr. Build. Mater.* 408, 133804. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133804>
- Xiaoa R, Jianga X, Zhanga M, Polaczyka P, Huang B, 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 and Design* 194, 108975. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108975>
- Xu D, Cheng X, Huang S, Jiang M, 2010, Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of piezoelectric sensor, *Constr. Build. Mater.* 24, 2522–2527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.004>
- Yu R, Spiesz P, Brouwers H J H, 2014, Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of ultra-high-performance concrete (UHPC) with a

low binder amount, *Constr. Build. Mater.* 65, 140–150.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063>

Zhang G, Cho H, Wang X, 2020, Effect of nano-silica on the autogenous shrinkage, strength, and hydration heat of ultra-high strength concrete, *Appl. Sci.* 10, 5202.
<https://doi.org/10.3390/app10155202>

Zhang W, Blackburna R S, Dehghani-Sanij A A, 2007, Effect of silica concentration on electrical conductivity of epoxy resin–carbon black–silica nanocomposites, *Scripta Materialia* 56, 581–584. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.12.039>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre TUNÇÖZ
Doğum Yeri ve Tarihi : ANKARA 1985
Yabancı Dili : İNGİLİZCE
İletişim (Telefon / e-posta) :

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Batıkent Lisesi (2000 – 2002)
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisi
Bölümü (2003– 2008)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens.,
Nanobilim ve Nano Mühendislik ABD, (2023 – 2026)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: ÖZALTIN HOLDİNG (2009 – 2012)
: LOTUS A.Ş. (2012 – 2015)
: SAREL İNŞAAT (2015 – 2020)
: KETEN İNŞAAT (2020 – Devam ediyor.)

Yayınları (SCI ve diğer) : Tunçöz E, Hocaoğlu İ, 2025, Effect of alternating current intensity on hydration temperature in nano silica modified fresh mortars, International Marmara Science and Social Sciences Congress, 18.