T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

FARKLI ORANLARDA NANO TİTANYUM İÇERİKLİ GEOPOLİMER HARÇLARIN MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

RİFAT TATAR

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Hamit ÖZTÜRK

İstanbul - 2025

TEZ TANITIM FORMU

Yazar Adı Soyadı : Rifat TATAR

Tezin Dili **:** Türkçe

Tezin Adı **:** Farklı Oranlarda Nano Titanyum İçerikli Geopolimer Harçların Mikro Yapı ve Mekanik Özeliklerinin İncelenmesi.

Enstitü **:** İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı **:** İnşaat Mühendisliği

Tezin Türü **:** Yüksek Lisans

Tezin Tarihi **:** 12.06.2025

Sayfa Sayısı **:** 108

Tez Danışmanları **:** Dr. Öğr. Üyesi Hamit ÖZTÜRK

Dizin Terimleri **:** Geopolimer, Alkali aktive edilmiş harçlar, Nano titanyum, Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, Donma-çözünme, Durabilite, Fraktal analiz

Türkçe Özet **:** Bu çalışma, çevre dostu yapı malzemeleri geliştirme amacıyla, farklı oranlarda (%0, %1 ve %2) nano titanyum dioksit (TiO_2) katkısının geopolimer harçların mikro yapı, mekanik dayanım ve durabilite özellikleri olumlu yönde geliştirdiğini ortaya koymuştur.

Dağıtım Listesi **:**
1. İstanbul Gelişim Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne
2. YÖK Ulusal Tez Merkezine

İmzası

Rifat TATAR

T. C.
İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

FARKLI ORANLARDA NANO TİTANYUM İÇERİKLİ GEOPOLİMER HARÇLARIN MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

RİFAT TATAR

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Hamit ÖZTÜRK

İstanbul – 2025

BEYAN

Bu tezin hazırlanmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğu, kullanılan verilerde herhangi tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez olarak sunulmadığını beyan ederim.

Rifat TATAR

…/…/2025

İSTANBUL GELİŞİM ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Rifat TATAR'ın 'Farklı oranlarda nano titanyum içerikli geopolimer harçların mikro yapı ve mekanik özeliklerinin incelenmesi' tez çalışması, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği anabilim dalı, İnşaat Mühendisliği bilim dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Başkan *Prof. Dr. Savaş ERDEM*

İmza

Üye *Dr. Öğr. Üyesi Hamit ÖZTÜRK*
(Danışman)

İmza

Üye *Doç. Dr. Anıl NİŞ*

ONAY
Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.
... / ... / 2025

İmzası
Prof. Dr. İzzet GÜMÜŞ
Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, bağlayıcı olarak %50 oranında uçucu kül, %50 oranında yüksek fırın cürufu, alkali aktivasyon için sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit oranı 2.5, sodyum hidroksit molaritesi ise 14M seçilerek bağlayıcı oranının %0, %1 ve %2 oranında nano titanyum eklenerek oluşturulan geopolimer numunelerin ve nano katkısız numunelerin C(kontrol) mikro yapıları ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Numunelerin 28, 56, 90 gün ve donma-çözünme için 90 günlük kür süreleri tamamlanan numunelere UPV (ultrases geçiş hızı), su emme kapasitesi, eğilme dayanımı, basınç dayanımı testleri ile SEM (Taramalı elektron Mikroskopu), EDS (Enerji Dağılımı Spektroskopisi) ve 3D bilgisayarlı tomografi görüntüleri incelenmiştir. Sonuç olarak Yapılan çalışma sonucunda, %2 oranında nano titanyum katkısı içeren geopolimer numunelerin en yüksek ultrases geçiş hızı, en düşük su emme oranı ve en yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Eğilme dayanımı açısından hem %1 hem de %2 nano katkılı numuneler yüksek performans göstermiş olup, aralarındaki farkın düşük olması nedeniyle ekonomik açıdan %1 nano katkılı numunelerin tercih edilmesi önerilmektedir. Mikro yapı analizleri, nano parçacıkların gözenekleri doldurarak iç yapıyı yoğunlaştırdığını ve C-S-H ile N-A-S-H jellerinin oluşumuna katkı sağladığını göstermektedir. Donma-çözülme çevrimleri sonrasında en fazla dayanım kaybı kontrol numunesinde gözlenirken, nano katkılı numunelerde bu kayıp önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca, 3D tomografi analizleri nano katkıların boşluk yapısını inceltttiğini, makro boşluk oranını azalttığını ve daha dayanıklı bir yapı sağladığını ortaya koymuştur. Genel olarak, nano titanyum katkısının Geopolimer yapıların mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiği ve çevresel etkilere karşı dirençlerini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Alkali aktive edilmiş harçlar, Nano titanyum, Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, Donma-çözünme, Durabilite, Fraktal analiz

SUMMARY

In the study carried out within the scope of this thesis, 50% fly ash, 50% blast furnace slag were used as binders, sodium silicate and sodium hydroxide were used for alkali activation. The sodium silicate and sodium hydroxide ratio was selected as 2.5, sodium hydroxide molarity was selected as 14M, and the C (control) microstructures and mechanical properties of geopolymer samples formed by adding nano titanium to the binder ratio at 1% and 2% and samples without nano additives were investigated. UPV (ultrasound transmission rate), water absorption capacity, bending strength, compressive strength tests and SEM (Scanning electron Microscope), EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) and 3D computerized tomography images of the samples, which were completed with 28, 56 and 90 days of freeze-thaw curing periods, were examined. As a result, it was determined that geopolymer samples containing 2% nano titanium additive had the highest ultrasound transmission speed, lowest water absorption rate and highest compressive strength values. In terms of flexural strength, both 1% and 2% nano additive samples showed high performance, and since the difference between them was low, it is recommended to prefer 1% nano additive samples from an economic perspective. Microstructure analyses show that nano particles fill the pores, densify the internal structure and contribute to the formation of C-S-H and N-A-S-H gels. While the highest strength loss after freeze-thaw cycles was observed in the control sample, this loss was significantly reduced in nano additive samples. In addition, 3D tomography analyses revealed that nano additives thinned the void structure, reduced the macro void ratio and provided a more durable structure. In general, it was concluded that nano titanium additive improved the mechanical and physical properties of geopolymer structures and increased their resistance to environmental effects.

Keywords: Geopolymer, Alkali activated mortars, Nano titanium, Fly ash, Blast furnace slag, Freeze-thaw, Durability, Fractal analysis

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **i**
SUMMARY ..... **ii**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
KISALTMALAR ..... **v**
SİMGELER ..... **v**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **vii**
ÖNSÖZ ..... **ix**
GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM
GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Geopolimerler Tanımı Ve Tarihçesi 4
1.1.1. Geopolimerlerin Kimyası ve Üretimi 8
1.1.2. Geopolimerlerin Kullanım Alanları 13
1.1.3. Geopolimerlerin Avantajları 15
1.2. Bağlayıcı Malzemeler 16
1.2.1. Uçucu Kül 16
1.2.2. Yüksek Fırın Cürufu 17
1.2.3. Alkali Aktivatörler 18
1.3. Durabilite 23
1.4. Nano Malzemeler 25
1.5. Literatür Taraması 26
1.5.1. Geopolimerlerin Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri 30
1.5.2. Nano Titanyum- TİO2 32
1.5.3. Donma Çözünme 34

İKİNCİ BÖLÜM
MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Geopolimer Harç Numunelerinin Hazırlanması 36
2.1.1. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar 37
2.1.2. Kullanılan Ekipmanlar ve Döküm Kalıpları 42
2.1.3. Numunelerin Karışım Oranı 43
2.1.4. Alkali Solüsyon Hazırlığı 44
2.1.5. Nano TİO2 Homojen Dağılımı ve Eklenmesi 44
2.1.6. Numunelerin Hazırlanması ve İsimlendirilmesi 45
2.2. Yapılan Deneyler 49
2.2.1. Ultrases Geçiş Hızı (UPV) 49

2.2.2. Su Emme Kapasitesi 49
2.2.3. Eğilme Dayanımı 50
2.2.4. Gerilme-Deplasman Deneyi 51
2.2.5. Basınç Deneyi 52
2.2.6. SEM ve EDS Analizi 53
2.2.7. Donma-Çözünme Döngüleri 54
2.2.8. 3D Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleri 55
2.2.9. Dijital Çatlak Analizi 55

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Deney Sonuçları 58
3.2. Su Emme Kapasitesi Deney Sonuçları 59
3.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları 60
3.4. Gerilme-Deplasman Deney Sonuçları 62
3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları 64
3.6. SEM ve EDS Analizleri Sonuçları 65
3.7. Donma-Çözünme Sonuçları 73
3.8. 3D Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerinin İncelenmesi ve Fraktal Analizleri 75
3.9. Dijital Çatlak Analizi Sonuçları 78

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 84
KAYNAKÇA 86
ÖZGEÇMİŞ 93

KISALTMALAR

OPC	**:**	Geleneksel Portland Çimentosu
FA	**:**	Uçucu Kül
YFC	**:**	Yüksek Fırın Cürufu
MK	**:**	Metakolin
GGBS	**:**	Öğütülmüş Granül Yüksek Fırın Cürufu
GPC	**:**	Geopolimer Beton
SEM	**:**	Elektron Taramalı Mikroskop
EDS	**:**	Enerji Dağılım Spektrumu
C-S-H	**:**	Kalsiyum Silika Hidrat
NP	**:**	Nano Partikül
SS	**:**	Sodyum Silikat
SH	**:**	Sodyum Hidroksit

SİMGELER

CO_2	**:**	Karbondioksit
TiO_2	**:**	Titanyum dioksit
Na2SİO3	**:**	Sodyum Silikat
NaOH	**:**	Sodyum Hidroksit
Si	**:**	Silisyum
Al	**:**	Alüminyum
SiO_2	**:**	Silisyum Dioksit
Al_2O_3	**:**	Alüminyum Oksit
Fe_2O_3	**:**	Demir Oksit

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. Alkali aktivasyonu ve Geopolimer gelişimi (Pacheco-Torgal, 2015).....5
Tablo 2. Sodyum hidroksit özellikleri.....22
Tablo 3. Numunelerin karışım oranları, kür süreleri ve toplam numune sayısı.....37
Tablo 4. F sınıfı uçucu kül.....39
Tablo 5. Süperakışkanlaştırıcı.....40
Tablo 6. Geopolimer numunelerin karışım ağırlıkları ve isimlendirilmesi.....43
Tablo 7. Numunelerin nano katkı yüzdeleri ve kür süreleri.....44
Tablo 8. Kontrol numuneleri karışım miktarları.....45
Tablo 9. Nano katkılı numunelerin karışım miktarları.....47
Tablo 10. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri (m/s).....58
Tablo 11. Numunelerin su emme sonuçları (%).....59
Tablo 12. Numunelerin 28, 56, ve 90 gün sonra eğilme dayanımı (MPa).....61
Tablo 13. Numunelerin basınç dayanımı sonuçları (MPa).....65
Tablo 14. Numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç dayanımları (MPa).....73
Tablo 15. Donma-çözünme deneyine tabii tutulan numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı değerleri (m/s).....74
Tablo 16. Numunelere ait fraktal boyut ve kırılma yayılma enerjileri.....76
Tablo 17. Numunelere ait dijital görüntü işlemi yoluyla mikro ve makro boşluk analiz sonuçları.....82

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Yayın sayısı ile yıl arasındaki ilişki. 2
Şekil 2. Roma Pantheon Tapınağı 5
Şekil 3:Poli (siatların) yapıları 10
Şekil 4. Geopolimerizasyon için kavramsal model (Duxson, 2007) 11
Şekil 5. Geopolimer beton üretim şeması 12
Şekil 6. Alkali ile aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası 14
Şekil 7. İtalya'daki Jübile Kilisesi 32
Şekil 8. 2 mm elekten geçirilmiş kum 38
Şekil 9. Uçucu kül 39
Şekil 10. Yüksek fırın cürufu 40
Şekil 11. Süperakışkanlaştırıcı 41
Şekil 12. Solüsyon gramajlarının hazırlanması 42
Şekil 13. Döküm kalıpları 300*50*15 mm (a), 160*40*40 mm (b), 40*40*40 mm (c) 43
Şekil 14. Numunelerin kalıplara dökülmesi ve vibrasyonun görseli 46
Şekil 15. 24 saatlik bekleme süresine bırakılan kontrol numunelerin görseli 46
Şekil 16. Nano katkılı numunelerin kalıplara dökülmesi ve vibrasyonun görseli 48
Şekil 17. 24 saatlik bekleme süresine bırakılan nano katkılı numunelerin görseli 48
Şekil 18. Eğilme deneyi gösterim şeması 51
Şekil 19. Gerilme-deplasman grafiği görseli 51
Şekil 20. Basınç deneyi gösterim şeması 52
Şekil 21. SEM cihazı (Taramalı Elektron Mikroskobu) 54
Şekil 22. 3D Tomografi tarama cihazı 55
Şekil 23. Fraktal boyutun kutu yöntemiyle hesaplanması 56
Şekil 24. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri (m/s) 59
Şekil 25. Numunelerin su emme sonuçları (%) 60
Şekil 26. Numunelerin 28, 56 ve 90 gün sonra eğilme dayanımı (MPa) 61
Şekil 27. C, T1 ve T2 numunelerin 28 günlük gerilme-deplasman grafikleri 62
Şekil 28. C, T1 ve T2 numunelerin 56 günlük gerilme-deplasman grafikleri 63
Şekil 29. C, T1 ve T2 numunelerin 90 günlük gerilme-deplasman grafikleri 63
Şekil 30. Numunelerin basınç dayanım sonuçları (MPa) 65
Şekil 31. Kontrol numunelerin SEM iç yapı görüntüleri 67
Şekil 32. Nano ikameli geopolimer numunelerin SEM iç yapı görüntüleri %1 nano titanyum numunesi 67
Şekil 33. Nano ikameli geopolimer numunelerin SEM iç yapı görüntüleri %2 nano titanyum numunesi 68
Şekil 34. Kontrol numunelerin EDS sonuçları 70
Şekil 35. Nano ikameli geopolimer numunelerin EDS sonuçları. %1 nano titanyum numunesi 71

Şekil 36. Nano ikameli geopolimer numunelerin EDS sonuçları. %2 nano titanyum numunesi 72
Şekil 37. Numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç dayanımları (MPa).....73
Şekil 38. Numunelerin donma-çözünme sonrası basınç dayanım kayıpları (%).....74
Şekil 39. Donma-çözünme deneyine tabii tutulan numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı değerleri (m/s).....75
Şekil 40. C numunesine ait 3D tomografi görüntüsü.....76
Şekil 41. T1 numunesine ait 3D tomografi görüntüsü.....77
Şekil 42. T2 numunesine ait 3D tomografi görüntüsü.....77
Şekil 43. C numunesine ait fraktal boyutu.....78
Şekil 44. T1 numunesine ait fraktal boyutu.....78
Şekil 45. T2 numunesine ait fraktal boyutu.....78
Şekil 46. C numunesine ait çatlak haritası.....80
Şekil 47. T1 numunesine ait çatlak haritası.....80
Şekil 48. T2 numunesine ait çatlak haritası.....81
Şekil 49. C numunesine ait 3D boşluk görüntüsü.....82
Şekil 50. T1 numunesine ait 3D boşluk görüntüsü.....83
Şekil 51. T2 numunesine ait 3D boşluk görüntüsü.....83

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca her an yanımda olup, bana güç ve ilham veren, sevgisi ve desteğiyle bu süreci daha anlamlı kılan kıymetli eşim Tuğba Baştürk Tatar Öğretmen'e, bana kattığı her şey için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca bilgi, deneyim ve desteğiyle yanımda olan, her aşamada yol gösterici katkılarda bulunan değerli danışmanım Dr. Hamit Öztürk'e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında verdikleri teknik destek ve moral motivasyonla yanımızda olan Doç. Dr. Anıl Niş'e ve Dr. Yasin Paşa'ya içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 123M665 Numaralı proje ile desteklenmiştir. Projeye verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Rifat TATAR

GİRİŞ

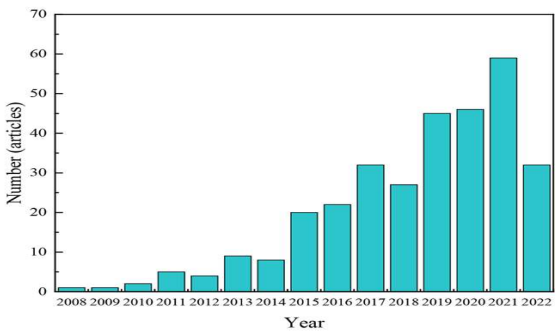
Günümüzde, geleneksel Portland çimentosu (OPC), üretilen beton için en temel hammadde olarak kabul edilmeye devam etmektedir. Çimento üretiminin, toplam antropojenik karbondioksit emisyonlarının %8'inden ve bina inşaatıyla ilişkili karbon emisyonlarının %36'sından sorumlu olduğunu belirtmek önemlidir (Cuesta vd., 2022). Bu nedenle alternatif düşük karbonlu bağlayıcıların üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilikçi bir düşük karbonlu bağlayıcı olarak Geopolimerler artık araştırılmaktadır (Davidovits, 1994). Beton teknolojisi, yapı malzemelerinin sürdürülebilir gelişimi bağlamında daha fazla enerji verimliliği, uzun ömürlü dayanıklılık ve düşük yaşam döngüsü maliyeti sunar. Ayrıca, bağlayıcı kaynakları geliştirirken sürdürülebilir bir şekilde yetişmek ve genişlemek son derece önemli ve gereklidir. Bunun nedeni, OPC üretiminin özellikle yüksek bir karbondioksit emisyonuna yol açmasıdır (Dheyaaldin vd., 2023). CO_2 emisyonlarını azaltmak amacıyla OPC bileşeninin geopolimer üretimi olarak bilinen inorganik bir polimer ile değiştirilmesi olasılığı, ayrıca çimento yerine uçucu kül (FA), metakaolin (MK), öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu (GGBS) ve şeker kamışı küspesi ve pirinç kabuğu külü (RHA) gibi atık tarım ürünlerinin birincil malzeme olarak kullanılması ve böylece ürün ve prosesler için gerekli olan alüminosilikatın sağlanması olasılığı araştırılmaktadır (Sukhoon & Hyeong-ki, 2017), (Leon vd., 2022).

Geopolimer kompozitler, kireç ve portland çimentosu inşaat malzemelerinin izinden giden üçüncü nesil inşaat malzemeleridir (Yadollahi & Benli, 2017). Geopolimer, çevresel açıdan olumlu ve sürdürülebilir özelliklere sahip yeni bir teknik bağlayıcı malzemedir (Dehghani vd., 2021). Geopolimer kompozitler, hammaddesi alüminosilikat malzemeler açısından zengin olan ve yüksek alkali aktifli çözeltilerle sentezlenerek yeni bir mühendislik bağlayıcısı olarak üretilmektedir (Yadollahi vd., 2015). Alüminosilikat bileşimi bol miktarda bulunan atık malzemeler, alkali aktivatör çözeltisiyle birleştirilerek inşaat sektörü için devrim niteliğinde bir inorganik polimer ve çimento alternatifi olan geopolimer oluşturuluyor (Köksal vd., 2022).

Geopolimer üretimi sırasında karbondioksit emisyonu miktarında daha fazla azalma olduğundan daha temiz ve çevre dostu bir işlem uygulanmaktadır. Geopolimerkompozitlerin üretiminde tutarlılık; kürleme süresi, kürleme sıcaklığı,

su-bağlayıcı oranı, alkali aktivatör oranı ve alkali aktivatörün molaritesi gibi çok çeşitli parametrelerden etkilenir. Alkali aktivatör çözeltisi, geopolimer kompozitin kompozisyonunu belirleyen birincil bileşendir. Potasyum ve sodyum hidroksit, silikat ve karbonatlar, kullanılabilecek en yaygın alkali aktivatör solüsyonlarıdır. Bu solüsyonlar suda çözünür. Geopolimer kompozitlerin üretimiyle ilişkili bir dizi çevresel fayda vardır. Portland çimentosunun hazırlanmasıyla karşılaştırıldığında, geopolimer kullanımı karbondioksit emisyonlarında %80'lik bir azalmayla sonuçlanır (Bayrak vd.,2023) .

Geopolimer beton (GPC) teknolojisi, OPC bazlı beton teknolojisine kıyasla çok sayıda teknolojik avantaja sahiptir. Bu avantajlar arasında erken yaşta mukavemet, sülfat saldırısına karşı iyi direnç ve gelişmiş kimyasal direnç yer alır. Geopolimer teknolojisi, tüm bu faktörlerin bir sonucu olarak inşaat için daha pratik bir seçenektir (Shi vd., 2021). Bu malzemeye olan ihtiyacın artması ve geopolimerlerin iyileştirilmiş performansının değerlendirilmesi amacıyla çok çeşitli katkı maddeleri ile özelliklerinin geliştirilmesi araştırmacıların temel ilgi alanlarından biridir. Araştırmacılar çabalarının çoğunu geopolimerin mekanik özelliklerini ve mikro yapısal özelliklerini incelemeye odakladılar. Dahası, çeşitli katkı maddelerinin bu özellikleri etkileme yeteneğine sahip olduğunu keşfettiler. Nanomalzemeler, diğer katkı maddeleriyle karşılaştırıldığında, geopolimerin mekanik mukavemetini ve uzun vadeli dayanıklılığını artıran bir dizi faydaya sahiptir. Sonuç olarak, nanomalzemeler sıklıkla geopolimerlerde ve diğer polimer türlerinde dolgu maddesi olarak kullanılır (Köksal vd., 2022). Şekil 1'de görüldüğü üzere nano-güçlendirilmiş geopolimerler üzerine giderek artan miktarda araştırma yürütülmektedir (Dheyaaldin vd., 2023).



Şekil 1. Yayın sayısı ile yıl arasındaki ilişki

Geopolimerlerin özelliklerini iyileştirmek amacıyla nano-silika (NS), nano-titanya (NT) ve nano-alümina (NA) kullanımı önemlidir. Gözenek yapısını rafine ederek ve reaksiyon sürecini değiştirerek nanomalzemeler geopolimerlerin mekanik mukavemetlerini ve dayanıklılığını artırabilir ve genel olarak bu başarılmıştır. Çimento esaslı malzemelerdeki nanomalzemeler üzerine çok sayıda değerlendirme yapılmış olmasına rağmen, geopolimerlerdeki nanopartiküllerin en son uygulama ilerlemelerinin daha fazla incelenmesi gerekmektedir (Dheyaaldin vd., 2023).

Bu çalışmada, nano TiO_2-geliştirilmiş geopolimerlerde kullanılan öncüllerin, karışım yüzdesinin ve nanomalzemelerin özelliklerini ele almaktadır. Bu tezin amacı, nano-geliştirilmiş geopolimerlerin araştırma ve uygulaması için yön sağlamaktır. Daha sonra, nanomalzemenin varlığının geopolimerlerin mikro yapısal özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemek için EDS, XRD ve 3D tomografi görüntüleri kullanılacaktır. Bu nitelikler arasında gözeneklilik, aderans ve mikro çatlaklar bulunur. Bu arada, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı gibi mekanik özelliklerin yanı sıra donma-çözülme direnci gibi dayanıklılık özellikleri de incelenecektir.

BİRİNCİ BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Geopolimerler Tanımı Ve Tarihçesi

Geopolimer kelimesi Yunanca kökenli “GEO” terimi silika ve alümina oranı yüksek jeolojik yer, toprak ya da endüstriyel atık malzeme (Yüksek Fırın Cürufu, Uçucu Kül vb.), “POLİMER” kelimesi (çok parçalı tekrar eden birleşim monomer zinciri) kelimelerinin birleşmesiyle “GEOPOLYMER” ya da “JEOPOLYMER” olarak 1970’lerde Josepth Davidovits tarafından isimlendirilmiştir. Geopolimerler, 1978'de Fransız bilim insanı Joseph Davidovits tarafından "jeokimya" veya "jeosentez" adı verilen süreçler sonucu oluşan mineral polimerler olarak tanımlanmıştır. Geopolimerizasyon, silika ve alümina içeren minerallerin alkali çözeltide kimyasal olarak etkileşime girerek, yeni ve dayanıklı materyaller oluşturmasını sağlayan bir reaksiyon sürecidir. Bu süreç, özellikle alkali aktivatörler (soydum silikat $Na_2SİO_3$, sodyum hidroksit NaOH) reaksiyona girmesiyle oluşan amorf yapılı bağlayıcıdır.

Geopolimer, amorf alkali alümina silikatları tanımlamak için kullanılır. Geliştirilme sürecinde, inorganik polimerler, alkali ile aktive edilmiş çimento, alkali bağlı seramikler, jeo çimento, toprak çimento ve hidro seramikler gibi çeşitli terimler kullanılmıştır. Bu terimler, tekrar eden sialat monomeri (-Si-O-Al-O-) içeren ve benzer başlangıç bileşenleriyle üretilen bağlayıcı malzemeleri ifade etmektedir. Geopolimer, kireç ve Portland çimentosundan sonra üçüncü nesil bağlayıcı olarak adlandırılır (Sumesh vd., 2017). Alternatif çimentolar içerisinden alkali aktiveli çimentolar, magnezya çimentoları ve sülfoalüminat çimentoları Portland çimentolarıyla karşılaştırılmaktadır (Phair, 2006).

Antik mimarinin gözlemcileri, orijinal yapılar ile modern onarımlar arasındaki kalite farkından etkilenmiştir. Son araştırmalar, antik harçların ve betonların modern betonlardan daha dayanıklı olmasının nedenlerini incelemiştir. Çalışmalar, bu malzemelerin çoğunun geopolimerik beton olduğunu ve bu betonların birçok modern amaç için uygun olabileceğini ortaya koymuştur (Davidovits, 1987).

Geopolimer beton, doğal mineraller (volkanik cam, volkanik tüf, kalsine kil) veya endüstri atıkları (uçucu kül, yüksek fırın cürufu) yapay atıkların alkali aktivasyonu ile çimento gibi bağlayıcılık özelliği kazanan inorganik polimerlerdir. Antik Mısırlıların ve Romalıların geopolimer benzeri malzemeler kullanmış olabilecekleri düşünülmektedir. Piramitlerin kesme taş yerine dökülmüş taşlar olduğu araştırılmaktadır. Romalılar puzzolan adı verilen volkanik kül ve kireç karışımıyla dayanıklı beton yapılar inşa etmişlerdir. Şekil 2'de görülen Roma Pantheon Tapınağı MS 125 yılında inşa edilmiş ve hala ayakta durmaktadır.



Şekil 2. Roma Pantheon Tapınağı

1939 yılında Feret çimento harcına çüruf ikame ederek bir çalışma yapmıştır. Akabinde bir yıl sonra Purdon ise alkali-cüruf karışımı üzerine çalışmaya başlamıştır (Torgal, 2015). Tablo 1'de alkali aktivatörlerin ve Geopolimerlerin gelişimi listelenmiştir.

Tablo 1. Alkali aktivasyonu ve Geopolimer gelişimi (Pacheco-Torgal, 2015)

Tarih	Çalışma	Yazar
1939	Çimentoda cüruf kullanılması	Feret

1940	Alkali-cüruf birleşiminin kullanılması	Purdon
1959	Alkalin çimentoların teorik esasları ve gelişimi	Glukhovsky
1965	Bileşen olarak doğal maddelerin kullanılmasıyla "alkalin çimentolar" adının ilk kez kullanılması	Glukhovsky
1986	Sentetik Melit cüruflarının aktivasyonu	Malolepsy ve Petri
1989	Cürufun alkali aktivasyonu	Talling ve Brandstetr
1990	Cüruflu çimentoların aktivasyonu	Wu ve diğ.
1991	Hızlı piriz alan alkali-aktive bağlayıcılarının geliştirilmesi	Roy ve diğ.
1993	Cüruf çimentosu	Roy ve Malek
1994	Alkalin bağlayıcılar	Krivenko
1995	Alkaliler ile aktive edilmiş cürufun mikro yapı incelemeleri	Wang ve Scrivener
1996	Alkaliler ile aktive edilmiş cürufların dayanımı, geçirimliliği ve boşluk yapısı	Shi
1997	Alkaliler ile aktive edilmiş cürufların kinetik çalışmaları	Fernández-Jiménez Puertas
1998	Alkali aktive edilmiş uçucu küllerin mikro yapısı	Katz
1999	Geopolimer sistemlerin kimyası ve teknolojisi	Davidovits
2000	Alkaliler ile aktive edilmiş uçucu kül-cüruf çimentosu	Puertas
2001-2002	Alkaliler ile aktive edilmiş cüruflu beton	Bakharev
2003	Atıkların bertaraf edilmesi	Palomo
2004	Zeolit oluşumu	Grutzeck
2008	Geopolimerlerin tek başına kullanımı	Hajimohammadi ve diğ.
2009	Geopolimerlerin yapısı, üretimi, özellikleri ve uygulama alanları	Provis ve Van Deventer

Victor Glukhovsky 1950'lerde zeolit oluşmasının temel yapısını açıklamaya çalışmış yaptığı çalışmalarla geopolimer kimyasının temelini atmış ve bunlara "Toprak silikatları" olarak adlandırmıştır. 1976 yılına gelindiğinde ise Joseph Davidovist "Mineral polimerler ve bunların üretim yöntemi" başlığında bir patent almıştır. 1980 yılına gelindiğinde ise yangına dayanıklı kaplama ve seramikler üretilmeye başlandı. İlk büyük yapı Avustralya'da yol kaplamalarında denenmeye başlandı. 2000 yılına gelindiğinde ise Avustralya da Toowooba Şehir Köprüsü tamamen geopolimer betondan inşa edildi. Avrupa ve Çin çeşitli araştırma enstitüleri ve binalar geopolimer yapı elemanları kullanarak binalar inşa edilmektedir. Günümüzde geopolimer kullanımı, çevre dostu inşaat malzemeleri üretimi, atık yönetimi, enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik alanlarında giderek artmaktadır.

Genel olarak;

1. **İnşaat Sektörü:**

- **Beton Üretimi:** Geopolimerler, beton üretiminde kullanılabilir ve çevre dostu alternatifler olarak, karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir. Geleneksel betonun yerine kullanılan geopolimer betonlar, daha yüksek dayanım ve korozyon direncine sahip olabilir.
- **Yapısal Uygulamalar:** Geopolimerler, binaların, köprülerin, yolların ve altyapı projelerinin inşasında kullanılabilir. Ayrıca, agresif çevre koşullarına karşı dayanıklılıkları nedeniyle deniz yapılarında tercih edilebilir.

2. **Atık Yönetimi:**

- **Atık Stabilizasyonu ve Depolama:** Geopolimerler, tehlikeli atıkların ve metal atıkların depolanması veya stabilizasyonunda kullanılabilir. Özellikle ağır metal içeren atıkların geopolimerler ile stabil hale getirilmesi, çevresel zararın azaltılmasına yardımcı olur.
- **Atık Malzemelerin Kullanımı:** Endüstriyel atıklardan (örneğin, uçucu kül, çimento atıkları, çelik endüstrisi atıkları) geopolimer üretimi mümkündür. Bu hem atıkların geri dönüşümünü sağlar hem de yeni malzeme üretiminde kullanılan doğal kaynakları azaltır.

3. **Enerji Verimliliği ve İzolasyon:**

- **Isı İzolasyonu:** Geopolimerler, düşük ısı iletkenliğine sahip materyaller olarak enerji verimliliğini artırabilir. Binalarda ısı yalıtımı için kullanılabilirler.
- **Alev Almazlık Özellikleri:** Geopolimerlerin yangına karşı yüksek direnç göstermesi nedeniyle, yangın güvenliği sağlayan malzeme olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır.

4. **Sürdürülebilirlik ve Çevre Dostu Uygulamalar:**

- **Düşük Karbon Salınımı:** Geopolimerler, Portland çimentosu üretimindeki yüksek enerji tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmak için ideal bir alternatiftir. Bu, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir adım olabilir.
- **Geri Dönüşüm ve Yeşil Yapılar:** Geopolimerler, geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilebilir ve yeşil bina standartlarına (örneğin, LEED) uygun projelerde kullanılabilir.

5. **Diğer Kullanım Alanları:**

- **Elektriksel ve Termal Uygulamalar:** Bazı geopolimerler, elektriksel ve termal iletkenlik gibi özel özelliklere sahip olabilir ve bu özellikler, özellikle elektronik ve enerji üretim sektörlerinde kullanılabilir.
- **Sanat ve Dekorasyon:** Geopolimerler, mimari yapılar ve dekorasyon ürünlerinde de kullanılabilmektedir. Estetik açıdan şekil verilebilir ve dayanıklı olurlar.

1.1.1. Geopolimerlerin Kimyası ve Üretimi

Geopolimerler, doğal veya endüstriyel alümino-silikat bileşenlerinin alkali aktivasyonu yoluyla oluşturulan inorganik polimerlerdir. Geleneksel Portland çimentosundan farklı olarak, kireç taşı ve kilin yüksek sıcaklıkta kalsinasyonu yerine, geopolimerler düşük sıcaklıkta kimyasal reaksiyonlarla sertleşir. Geopolimerler, inorganik Poli-kondenzasyon reaksiyonları sonucunda oluşan alumino-silikat bağlayıcılardır. Bu süreç geopolimerizasyon olarak adlandırılır ve sonucunda üç boyutlu tekto-aluminosilikat ağları oluşur (Davidovist, 2008).

Genel kimyasal formülleri şu şekildedir.

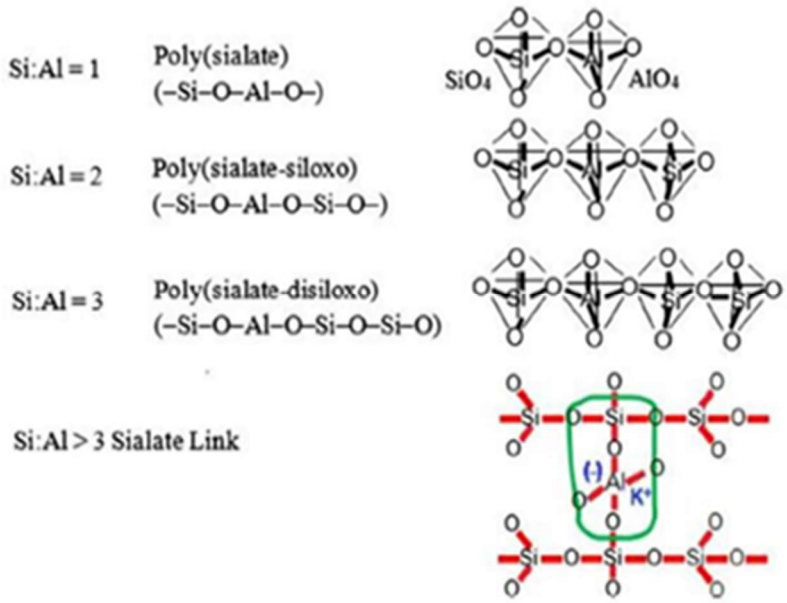
$$Mn[-(SiO2)z-AlO2]n.wH2O$$

- **M**: Alkali veya toprak alkali katyonu (Na^+, K^+, Ca^{2+} vb.),
- **n:** Poli-kondenzasyon derecesi,
- **z**: 1, 2, 3

Davidovits'e (2008) göre, Si/Al oranı, geopolimerlerin yapısını ve özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Beton uygulamalarında yaygın olarak kullanılan geopolimer malzemeler genellikle 2 ila 3,5 arasında bir Si/Al oranına sahiptir. Bu orana bağlı olarak, geopolimer yapıları üç temel gruba ayrılabilir:

1. Poli(sialat) (Si/Al ≈ 1)
    - Temel yapı birimi [-Si-O-Al-] zincirlerinden oluşur.
    - Mekanik dayanımı düşüktür, ancak yüksek kimyasal stabiliteye sahiptir.
2. Poli(sialat-silikat) (Si/Al ≈ 2)
    - Yapıda ekstra silikat birimleri bulunur ([-Si-O-Al-O-Si-]).
    - Yüksek mukavemetli ve dayanıklı yapı malzemeleri için uygundur.
3. Poli(sialat-disilikat) (Si/Al ≥ 3)
    - Daha fazla serbest silika içerir ([-Si-O-Al-O-Si-O-Si-]).
    - Daha amorf ve camsı yapıya sahiptir, mekanik özellikleri gelişmiştir.

Bu oranlar, geopolimerlerin sertleşme süresi, dayanıklılığı ve kimyasal direncini belirleyen kritik faktörlerdir.

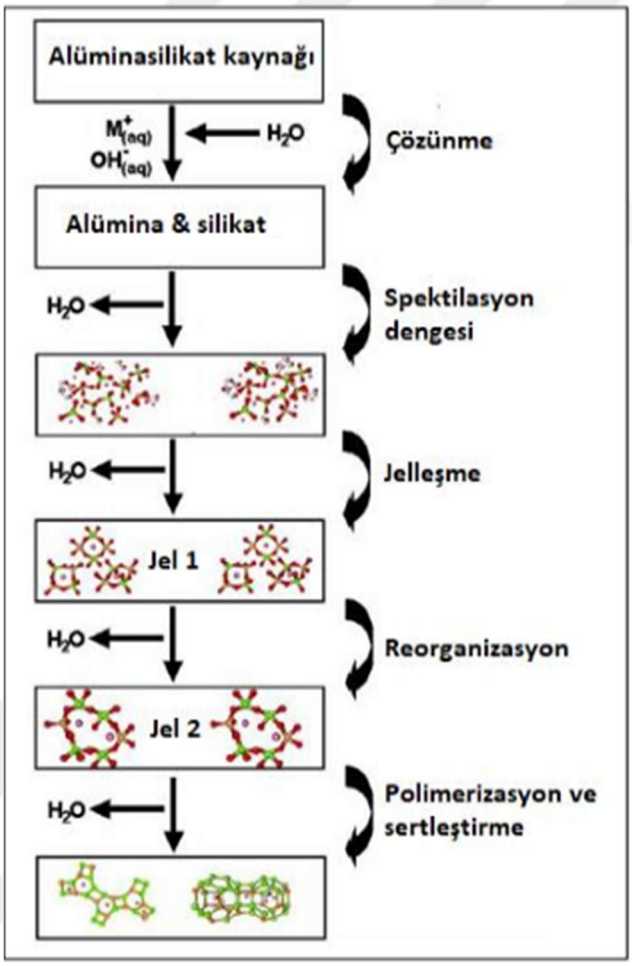


Şekil 3:Poli (siatların) yapıları

(Duxson vd., 2007), Geopolimer reaksiyonunun beş temel aşamadan oluştuğunu öne sürmüştür:

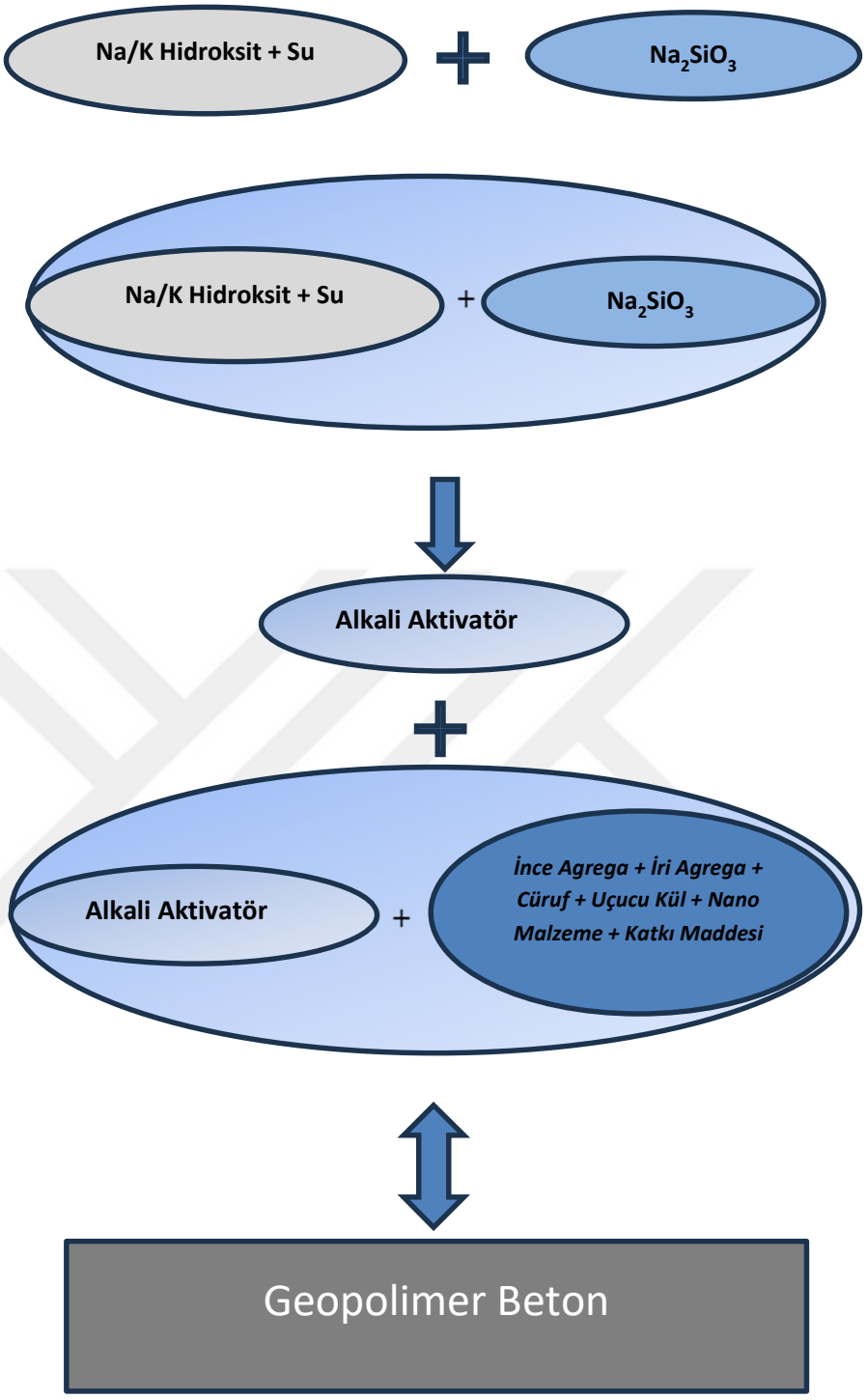
1. **Çözünme:** Alkali iyonların etkisiyle kaynak malzeme çözünerek silikat ve alüminat türleri açığa çıkar.
2. **Alüminosilikat Çözeltisi Oluşumu:** Çözünmüş türler, spektilasyon dengesi aşamasında birbirine karışarak alüminosilikat çözeltisini oluşturur. Bu süreçte su açığa çıkar.
3. **Jelleşme:** Yüksek pH ortamında, konsantre çözelti geopolimer jeli oluşturur.
4. **Jel Ağının Yeniden Düzenlenmesi:** Gözenek yapısı ve mikro yapı gelişerek nihai sertleşmeye hazırlanır.
5. **Üç Boyutlu Geopolimer Oluşumu:** Son aşamada stabil, sert ve dayanıklı bir geopolimer ağı meydana gelir.

Bu süreç, geopolimerlerin mekanik ve kimyasal özelliklerini belirleyen temel mekanizmayı açıklar (Duxson vd., 2007).



Şekil 4. Geopolimerizasyon için kavramsal model (Duxson, 2007)

Geopolimerizasyon süreci, alümino-silikat bileşimi, alkali aktive edici çözümler ve kür koşulları gibi faktörlerden etkilenir. Amorf silis ve alümina miktarı, çözünme oranı ve fiziksel özellikler reaksiyon verimliliğini belirler. Alkali çözeltinin bileşimi ve su/bağlayıcı oranı, geopolimerin sertleşme mekanizmasını etkiler. Kür koşulları, özellikle düşük kalsiyum içeren F-tipi uçucu küllü geopolimerlerde dayanım açısından kritik öneme sahiptir. Geopolimerler, alkali çözeltilerle aktive edilen alümino-silikat tozlarının reaksiyonu sonucu bağlayıcı jeller oluşturur. Bu jellerin içinde reaksiyona girmeyen katı parçacıklar ve su içeren gözenekler bulunur. C-S-H jellerinden farklı olarak, geopolimer bağlayıcılardaki su kimyasal yapının ayrılmaz bir parçası değildir. Geopolimerlerin üç boyutlu ağı, alüminat tetrahedrondaki negatif yüklerin alkali iyonlarla dengelenmesiyle oluşur ve mekanik dayanım ile kimyasal kararlılığı belirler.



Şekil 5. Geopolimer beton üretim şeması

1.1.2. Geopolimerlerin Kullanım Alanları

Geopolimer betonunun priz alma ve fiziksel dayanıklılık özelliklerindeki belirsizlikler, dünya çapında yaygınlaşmasını engellemektedir. Ancak Avustralyalı araştırmacı Peter Duxson, Melbourne'de ticari olarak geopolimer E-crete betonunu kullanmaya başlamıştır. Geopolimer beton, basınç dayanımı, rötre ve yangın dayanımı gibi özelliklerde çimentolu betona göre üstün olmasına rağmen, fiziksel dayanıklılığı zamanla netleşecektir. Ayrıca, mevcut üretim koşullarında çimentolu betona göre %10–15 daha pahalıdır (Zeybek, 2009).

Geopolimer malzemeler, doğru alkali çözeltilerle kullanıldığında yüksek basınç dayanımları, yüksek sıcaklık ve yangın direnci gibi avantajlar sunar. Ayrıca, asit saldırılarına karşı da yüksek direnç gösterirler. Bu malzemelerin özellikleri, SiO_2/Al_2O_3 oranı, alkali aktifleştirici yoğunluğu, kür süresi, kür sıcaklığı, su/katı oranı ve pH değeri gibi parametrelerden etkilenir. Geopolimerler, dekoratif taşlar, ısı yalıtım malzemeleri, refrakter malzemeler ve radyoaktif atıkların muhafazası gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Geopolimer betonlar, karbondioksit emisyonlarını azaltması ve yüksek fırın cürufu ile üretilen türlerinin erken dayanımlarının yüksek olması gibi avantajlarla araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Son yıllarda uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufundan üretilen geopolimerlerin özellikleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, geopolimer betonlarda lif kullanımı, tokluk ve darbe dayanımını artırmaktadır. Davidovits, geopolimer malzemelerinin uygulanma biçiminin, kimyasal bileşenler ve polisialattaki Si/Al atomik oranı tarafından belirlendiğini özetlemiştir. Bu oran, geopolimerizasyon sürecini ve son ürünün özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir (Davidovits, 1999). Geopolimer teknolojisinin kullanılmasıyla, Portland çimentosu kullanılmadan alkali aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası 1989 yılında Rusya Federasyonu'nun Lieptsk kentinde inşa edilmiştir (Almutairi vd., 2021).



Şekil 6. Alkali ile aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası

Genel olarak;

1. İnşaat ve Yapı Malzemeleri

- Beton ve Harç Üretimi: Geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak kullanılır, yüksek dayanım ve düşük karbon salınımı sağlar.
- Prefabrik Elemanlar: Kiriş, panel, döşeme ve duvar elemanları gibi prefabrik yapı elemanlarında kullanılır.
- Yüksek Performanslı ve Hafif Betonlar: Hafif ve yüksek dayanımlı yapılar için uygundur.

2. Altyapı ve Ulaşım

- Karayolu ve Köprü İnşaatları: Yüksek aşınma ve çevresel dayanıklılığı sayesinde kullanılabilir.
- Demiryolu Traversleri: Dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması nedeniyle demiryolu yapımında tercih edilir.
- Havaalanı Pistleri ve Otoparklar: Yüksek basınç dayanımı ve düşük su emme özelliği sayesinde avantaj sağlar.

3. Endüstriyel Uygulamalar

- Yangına Dayanıklı Malzemeler: Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı nedeniyle fırın ve ocak kaplamalarında kullanılır.
- Kimyasal Dayanımlı Zemin Kaplamaları: Asit ve bazlara dayanıklı yüzey kaplamalarında yer alır.
- Atık Stabilizasyonu: Radyoaktif ve ağır metal içeren atıkların bertarafında bağlayıcı olarak kullanılır.

4. Çevre ve Sürdürülebilirlik Uygulamaları

- Atık Yönetimi: Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kırma seramik gibi sanayi atıklarının değerlendirilmesi için kullanılır.
- CO_2 Azaltımı: Geleneksel çimentoya göre daha düşük karbon ayak izi bırakarak çevreci bir çözüm sunar.
- Su ve Kanalizasyon Altyapısı: Kimyasal ve biyolojik korozyona dayanıklı boru ve kanal kaplamalarında uygulanır.

5. Savunma ve Havacılık

- Balistik ve Zırhlı Yapılar: Yüksek mukavemetli kompozit malzeme olarak savunma sanayinde kullanılır.
- Havacılık ve Uzay Uygulamaları: Hafif ve ısıya dayanıklı seramik esaslı malzemelerde yer alır.

Geopolimerler, sürdürülebilir, dayanıklı ve çevre dostu olmaları nedeniyle inşaat, altyapı, endüstri ve çevre mühendisliği gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.1.3. Geopolimerlerin Avantajları

Geopolimer çimentolar, geleneksel Portland çimentosundan farklı olarak yüksek sıcaklık fırınlarına ihtiyaç duymadan üretilir. Bu sayede üretim süreci daha düşük enerji tüketimi gerektirir ve büyük sermaye yatırımları olmadan gerçekleştirilebilir. Doğal alkali-siliko-alüminatlar ve alümino-silikatlar, geopolimerik hammaddelerin elde edilmesini sağlar ve bu kaynaklar dünya genelinde yaygın olarak bulunur. Avrupa programı kapsamında yürütülen GEOCISTEM, geopolimer çimentoların endüstriyel gelişimini teşvik ederek, toksik atıkların uzun vadeli tutulmasına yönelik uygun maliyetli çözümler sunmaktadır. Bu teknoloji, çimento üretimi sırasında enerji

tüketimini azaltarak çevresel etkileri minimize eder. Düşük CO_2 emisyonuna sahip geopolimer çimentoların inşaat sektöründe yaygın kullanımı, çimento ve beton endüstrilerinin neden olduğu karbon salınımını %80 oranında azaltabilir. 2015 yılı Küresel İklim Anlaşmalarına göre, Portland klinker üretimi ile atık kül ve granül cürufun harmanlanması sayesinde, yeni düşük CO2 çimentolu malzemelerin ihtiyacı karşılanabilir (Davidovits, 1994).

1.2. Bağlayıcı Malzemeler

1.2.1. Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürün yakılması sırasında enerji santrallerinde oluşan ince, toz benzeri bir atık maddedir ve yüksek silis, alüminyum oksit, demir oksit gibi bileşikler içerir. Beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanıldığında, betonun dayanımını, kimyasal direncini, işlenebilirliğini artırır, su geçirmezliğini iyileştirir ve ısıl genleşmeyi azaltır. Ayrıca, inşaat projelerinde toprak iyileştirme ve asfalt üretiminde de kullanılabilir. Uçucu kül, atık olarak bertaraf edilmek yerine geri dönüştürülerek çevresel etkileri azaltır ve sürdürülebilir inşaat malzemeleri üretimine katkı sağlar.

Uçucu kül, çimento miktarını azaltmak ve betonun dayanıklılığını artırmak amacıyla beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Uthaman vd., 2018). Nanomalzemeler, uçucu kül içeren çimento harçlarının zayıflıklarını gidermede etkili olmuştur (Vanitha vd., 2021). Yüksek sıcaklıkların geopolimer numuneleri üzerindeki etkileri, 300, 600 ve 900 °C'de incelenmiştir. 300 °C'de, silis dumanı içeren numuneler, F-tipi uçucu kül ile değiştirilmesi nedeniyle daha düşük basınç dayanımı artışı göstermiştir. F-tipi uçucu kül, polimerizasyon için yüksek sıcaklıkta kürleme gerektirir (Niş & Altındal, 2021).

(Öztürk & Kılınçkale, 2023) Kontrol numuneleri ve Uçucu kül ikameli hazırladıkları beton numunelere donma çözünme döngüleri ve 28, 56 ve 90 günlük kürleme sürelerinden sonra yapılan deney ve analizler sonucu uçucu kül ikameli numuneler uzun kür sürelerinde daha iyi performans sağladığı, C-S-H jellerinde artışın olduğunu, uzun vadede sürekli bir dayanım kazandığını ve gözenekliliğin azaldığını, mukavemetin arttığını gözlemlemiştir. Bu sonuçlara dayanarak uçucu kül içeren

betonların soğuk hava koşullarında ve deniz yapılarında yapı elemanı olarak kullanımı uygun bir seçenek olabileceği düşünülmektedir (Öztürk & Kılınçkale, 2023).

1.2.2. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu, çelik üretimi sırasında meydana gelen ve ekonomik değeri olan bir yan üründür. Çelik üretiminde, 1 ton çelik başına yaklaşık 250 kg (çeliğin %25'i kadar) cüruf oluşur. Ereğli Demir Çelik Fabrikası'nda yılda yaklaşık 600.000 ton yüksek fırın cürufu üretilmektedir. Bu cüruf, çeşitli sektörlere satılmakta olup, en yaygın kullanımı inşaat sektöründedir. Cüruf, beton agregası, tuğla ve briket yapımı, asfalt agregası, yalıtım malzemeleri üretimi, çimento sanayi, cam üretimi, tarım, çevre uygulamaları, blok yapımı ve prefabrik elemanlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Cüruflar, elenmiş olarak veya doğrudan kullanılabilir. Cürufun kullanım alanları iki ana kategoriye ayrılabilir: doğrudan kullanım ve öğütülmüş kullanım. Doğrudan kullanım alanları arasında yalıtım, beton agregası, hafif dolgu malzemesi ve hafif beton bulunur. Öğütülmüş cüruf kullanımı ise çimento üretimi, beton agregası, harç enjeksiyonu, cam sanayi ve zemin stabilizasyonu gibi çeşitli inşaat ve sanayi alanlarını kapsamaktadır (Erdoğan, 1993).

Yüksek fırın cürufu, demir çeliği üretimi sırasında yüksek fırınlarda meydana gelen bir yan üründür. Bu cüruf, demir cevherinin kömürle birlikte yüksek sıcaklıkta eritilmesi sırasında oluşur ve baca gazlarından ayrılarak toplanır. Kimyasal olarak, yüksek fırın cürufu genellikle kalsiyum oksit (CaO), silika (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) içerir. Fiziksel olarak, ince granüler bir yapıya sahip olup, toz halinde bulunur ve genellikle granülometrisi iyi olan bir malzemedir. Yüksek fırın cürufunun en yaygın kullanım alanı beton ve çimento üretimidir. Çimento üretiminde, cüruf, klinker yerine kullanılarak daha düşük enerji tüketimi sağlar ve çevreye olan olumsuz etkileri azaltır. Ayrıca, beton üretiminde, cüruf katkı maddesi olarak kullanıldığında, betonun dayanımını, kimyasal direncini, su geçirmezliğini artırır ve ısıl genleşmeyi azaltır. Bu özellikler, betonun daha dayanıklı olmasını sağlar ve uzun ömürlü yapılar inşa edilmesine olanak tanır. Yüksek fırın cürufu ayrıca, toprak iyileştirme projelerinde de kullanılabilir. Özellikle inşaat sektöründe, toprak stabilizasyonu sağlamak amacıyla, bu malzeme toprağın taşıma kapasitesini artırmak ve suyun geçişini kontrol etmek için kullanılır. Cüruf, asfalt üretiminde de katkı

maddesi olarak yer alabilir ve asfaltın dayanımını artırarak daha az enerji ile asfalt üretimi yapılmasını sağlar. Ayrıca, yol yapımında ve diğer altyapı projelerinde, dolgu malzemesi olarak kullanılarak maliyetlerin düşürülmesine yardımcı olur. Çevresel faydaları açısından, yüksek fırın cürufu atık bir malzeme olduğu için, geri dönüştürülmesi çevre dostu bir uygulamadır. Cüruf kullanımı, doğal kaynakların tüketimini azaltır, çimento üretimindeki karbon emisyonlarını düşürür ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltır. Bu şekilde, atık bir malzeme olan cüruf, sürdürülebilir inşaat uygulamalarına katkı sağlar. Yüksek fırın cürufu, demir çelik sanayisinin bir yan ürünü olarak, geri dönüştürülüp kullanıldığında hem ekonomik hem de çevresel açıdan büyük avantajlar sağlar. Beton, çimento, asfalt ve toprak iyileştirme gibi geniş bir kullanım yelpazesinde yer alan bu malzeme, inşaat sektöründe çevre dostu ve dayanıklı çözümler sunar.

1.2.3. Alkali Aktivatörler

Günümüzde, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na2SiO3) ya da potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K2SiO3) çözeltileri, geopolimer beton ve harç üretiminde yaygın olarak kullanılan alkali aktivatörlerdir. Alkali aktiveli bağlayıcılar, mekanik dayanım ve çevresel faydalarıyla geleneksel Portland çimentonun yerini alabilecek uygun bir alternatiftir (Matalkah vd., 2022). En yaygın alkali aktivatörler sodyum ve potasyum hidroksitleridir. Alkali aktivasyon çalışmalarında 5 mol/kg H2O'yu aşan konsantrasyonlar yaygın olarak kullanılır. Sodyum hidroksit, klor alkali işlemiyle üretilir ve çevresel etkileri, özellikle sera gazı emisyonları ve kullanılan cıva bileşenleri açısından önemlidir. Modern membran hücreleri, bu üretim sürecini daha verimli hale getirmektedir. Potasyum hidroksit ise KCI elektrolizi ile üretilir. Konsantre alkali hidroksit çözeltilerinin aşındırıcı özellikleri ve viskozitesi, alkali silikat çözeltilerine göre daha düşük olup, bu da avantaj sağlar. Alkali hidroksitler gibi sodyum ve potasyum silikatlar da alkali aktivasyonda en çok kullanılan aktivatörler olarak bilinmektedir. (Shi & Day, 2001), doğal puzolanların reaktivitesini artırmak için üç farklı yöntem uygulamışlardır: mekanik aktivasyon (uzatılmış öğütme), termal aktivasyon (yüksek sıcaklıkta kürleme) ve kimyasal aktivasyon (Na2SO4 ve CaCl2 gibi aktivatörler kullanma). Bu yöntemler, %80 doğal puzolan ve %20 hidrate kireç karışımının reaktivitesini

incelemişlerdir. Sonuçlar, tüm üç aktivasyon yönteminin puzolanik reaksiyonları ve dayanım gelişimini artırdığını göstermiştir. Ancak, mekanik aktivasyon nihai dayanım üzerinde önemli bir etkisi olmadığı, termal aktivasyonun ise dayanımı azalttığı bulunmuştur. Kimyasal aktivasyon ise dayanımı etkin bir şekilde artırmıştır. Kimyasal aktivatörlerin, ek ekipman ve enerji ihtiyacı olmadan, doğal puzolan öğütülürken veya beton karıştırılırken eklenebileceği vurgulanmıştır, bu da maliyetleri daha düşük tutmaktadır (Shi & Day, 2001). Bir çalışmada Kaolin (granit kayaçlardan elde edilen ve bazı seramik ve porselenlerin yapımında kullanılan bir kil türü) ve alkali aktivatörlerin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen kaolin bazlı geopolimerlerin özellikleri incelenmiştir. Kaolin ve alkali aktivatörler, 0,60-1,20 aralığında katı-sıvı oranları (Al2O3/Na2O mol oranı 0,63-1,27) ve 0,16-0,36 aralığında sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı (SiO2/Na2O mol oranı 3,19-3,67) ile hazırlanmıştır. Sonuçlar, basınç dayanımının Al2O3/Na2O ve Na2SiO3/NaOH oranlarından etkilendiğini ve dayanımın yaşla birlikte arttığını göstermiştir. (Heah vd., 2012).

Geri dönüştürülmüş kil tuğla tozu/ince toprak tozu bazlı ile sodyum hidroksit aktiveli harç numuneleri belirli oranlarda karıştırılarak hazırlanmış normal Portland çimentosu (OPC) olası kullanımı için mekanik ve dayanıklılık performansı araştırılmıştır. Numuneler sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonlarının (8, 10, 12, 14 ve 16 M) etkileri incelenmiştir. Yapılan deney ve analizler sonucu alkali aktiveli numunelerin OPC numunelere göre en iyi performansı (su emme oranı, mekanik dayanım) alkali aktive 12 M sahip numune göstermiş ve alkali aktiveler beton numuneleri iyileştirmiştir (Niş vd., 2021).

1.2.3.1. Sodyum Silikat

Sodyum silikat, genellikle "sodyum silika" olarak da bilinir ve kimyasal formülü Na_2SiO_3 olan bir inorganik bileşiktir. Su, silika (SiO_2) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) veya sodyum hidroksit (NaOH) gibi bileşiklerin reaksiyonu sonucu üretilir. Sodyum silikat, suyla çözünebilen veya çözünebilen, genellikle cam benzeri bir yapıya sahip bir madde olarak bilinir. Çoğunlukla su camı veya sıvı cam olarak adlandırılır ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

Sodyum Silikatın Özellikleri:

- Genellikle beyaz veya şeffaf, yoğun bir sıvı formda bulunur.
- Çok iyi bir bağlayıcıdır ve çoğunlukla yüksek sıcaklık ve kimyasal direnç gerektiren durumlarda kullanılır.
- Alkalin özelliklere sahiptir, yani pH'ı yüksektir.
- Suyu emebilir ve kuruduğunda sert, cam benzeri bir yapı oluşturur.

Sodyum Silikatın Kullanım Alanları:

1. **Beton ve İnşaat Sektörü:**
    - Sodyum silikat, özellikle betonun dayanıklılığını artırmak için kullanılır. Betona katıldığında, suyun buharlaşmasına yardımcı olur ve daha dayanıklı, sert yüzeyler oluşturur. Ayrıca, su geçirmezlik özellikleri sağlar ve bu nedenle beton yüzeylerini suya karşı korumak amacıyla sıklıkla kullanılır. Sodyum silikat ayrıca, betonun daha hızlı kurumasını sağlar ve mikro çatlakları önler.
2. **Temizlik ve Yüzey Koruma:**
    - Temizlik ürünlerinde, özellikle endüstriyel temizlikte ve yağ çözücülerde kullanılır. Ayrıca, ahşap ve taş yüzeylerde koruyucu bir kaplama olarak kullanılabilir. Yüzeylere uygulandığında, su geçirmez ve kir tutmaz bir tabaka bırakır.
3. **Cam Üretimi:**
    - Sodyum silikat, cam üretiminde kullanılır. Camın üretimi için temel bileşenlerden biri olan sodyum silikat, silika ve sodyum oksidin birleşimiyle yüksek sıcaklıklarda eritilir. Camın dayanıklılığını artırmada önemli bir rol oynar.
4. **Yangın Yalıtımı:**
    - Sodyum silikat, yangın yalıtım malzemelerinde de kullanılır. Yüksek sıcaklıkları dirençli hale getiren bu bileşik, yangına dayanıklı malzemelerin üretimi için kullanılır. Ayrıca, bu madde yangın yalıtımı sağlamak amacıyla yapı malzemelerine eklenir.

5. **Kalıp ve Reçine Endüstrisi:**
    - Sodyum silikat, döküm ve kalıp endüstrisinde kalıp bağlayıcı olarak kullanılabilir. Bu bağlayıcı, kalıpların sertleşmesine ve dayanıklı hale gelmesine yardımcı olur. Ayrıca, bazı reçine ve boyaların üretiminde de kullanılır.

6. **Su Arıtma:**
    - Sodyum silikat, su arıtma işlemlerinde flokülasyon ve koagülasyon için kullanılır. Su içindeki katı maddelerin, kirleticilerin ve bakterilerin arıtılması için bu bileşikler kullanılarak çökelme sağlanabilir.
7. **Tarımda Kullanımı:**
    - Tarım sektöründe, özellikle toprak yapısını iyileştirmek ve pH'ı düzenlemek amacıyla sodyum silikat kullanılabilir. Ayrıca, bazı bitki koruma ürünlerinde de yer alır.
8. **Piroteknik ve Patlayıcı Ürünler:**
    - Sodyum silikat, patlayıcılar ve havai fişeklerde kullanılan bazı kimyasal bileşiklerin üretiminde kullanılır. Yangınla ilgili ürünlerde stabiliteyi artıran özellikler sunar.

1.2.3.2. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit (NaOH), yaygın olarak kostik soda olarak bilinen, güçlü bir alkali bileşiktir. Beyaz renkte, kuru ve kristal formda bulunan bu madde, su ile kolayca çözünerek alkalin bir çözeltinin oluşmasına neden olur. Sodyum hidroksit, endüstriyel kullanımı oldukça yaygın olan bir kimyasal bileşiktir ve çok çeşitli alanlarda kullanılır. Tablo 2'de teknik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Sodyum hidroksit özellikleri

Özellik	Sodyum Hidroksit
Kimyasal Formül	NaOH
Molar Kütle	39,9971 gram / mol
Görünüm	Beyaz, mumsu, opak
Koku	Kokusuz
Yoğunluk	2.13 gram / cm^3
Erime Noktası	323°C
Kaynama Noktası	1.388°C
Suda Çözünürlük	418 gram / litre

Sodyum Hidroksitin Kullanım Alanları:

1. **Kimya Endüstrisi:**
    - Sodyum hidroksit, asidik bileşiklerin nötralize edilmesinde kullanılır ve özellikle asit baz tepkimelerinde önemli bir rol oynar. Aynı zamanda sabun yapımında da temel bileşendir.
2. **Kâğıt ve Hücre Pamuğu Üretimi:**
    - Kâğıt üretiminde, odun liflerinden lignin ve diğer organik maddeleri ayırmak için kullanılır. Aynı şekilde, tekstil sektöründe hücre pamuğu üretimi için de kullanılır.
3. **Su Arıtma:**
    - Sodyum hidroksit, suyun pH seviyesini artırmak ve asidik kirleticileri nötralize etmek için su arıtma tesislerinde kullanılır.
4. **Petrol Rafinerisi:**
    - Petrol rafinerilerinde, asidik gazları nötralize etmek ve yağların rafine edilmesi sırasında kullanılır.

5. **Temizlik ve Yüzey Temizliği:**
    - Endüstriyel temizlikte, özellikle yağların ve organik kirlerin temizlenmesinde kullanılır. Ayrıca, tıkanmış boruları açmak için de etkilidir.
6. **Gıda Endüstrisi:**
    - Sodyum hidroksit, gıda üretiminde bazı işlemlerde kullanılır. Örneğin, zeytinlerin işlenmesi ve şeker pancarından şeker elde edilmesi gibi işlemler için kullanılır.
7. **Kimyasal Sentez:**
    - Çeşitli kimyasal bileşiklerin üretimi için de kullanılır, örneğin plastik, deterjan, boyar maddeler ve ilaçlar.

1.3. Durabilite

Durabilite kelime anlamı bakımından bir malzemenin veya yapının çevresel etkilere karşı dayanıklılığını ifade eder. Yapı mühendisliğinde beton, çelik, ahşap gibi malzemelerin dış ve iç etmenlerde mekanik ve kimyasal etkilere karşı dayanımını koruması anlamına gelmektedir. Genel olarak yapı inşaatlarında beton çelik ve diğer kompozit yapı malzemelerini etkileyen faktörler arasında kimyasal dirençleri (klorür saldırıları, sülfat saldırıları, alkali-silika reaksiyonları), fiziksel faktörler (donma-çözünme, aşınma, erozyon, su geçirgenliği), mekanik etmenler (sürekli yük altında kalma, hesaplanmayan yükler) ve çevresel faktörler (karbonatlaşma, UV ışınları, sıcaklık) bulunmaktadır.

Yapı elemanlarında meydana gelen bozulmaların geri dönüşümleri ve onarımları maliyet açısından ciddi ekonomik değeri vardır (Alexander vd., 2010).

Donatı korozyonu betonarme yapıların dayanıklılığını olumsuz etkileyen en önemli faktörlerden biridir ve en yaygın nedeni klorürlerin etkisidir. Klorürler beton örtüsüne sızarak çelik donatıya ulaşır ve burada korozyon süreci başlar. Bu bağlamda, beton örtüsünün kalitesi ve kalınlığı, yapıların ömrünü belirleyen temel parametrelerdir. Donma-çözülme etkisi, korozyonun hızını artırarak daha yüksek korozyon oranlarına yol açar ve bu etki beton karışımının özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Beton örtüsü kalınlığının korozyona karşı belirgin bir etkisi ise yoktur

(Niş vd., 2019). Deniz suyu koşullarında Geopolimer betonlar normal betonlara göre daha yüksek mukavemet, süneklik ve dayanıklılık göstermiştir. Bu nedenle sıradan beton yerine yapısal elemanlarda geopolimer betonlar kullanılabilir (Niş vd., 2019).

Genel olarak;

1. Beton Durabilitesini Etkileyen Faktörler

1.1. Çevresel Faktörler

- **Donma-Çözülme Döngüleri:** Beton içerisindeki suyun donup genleşmesi mikro çatlaklara yol açarak dayanım kaybına neden olabilir.
- **Sıcaklık Değişimleri:** Yüksek sıcaklıklarda su kaybı nedeniyle rötre çatlakları oluşabilir.
- **Karbonatlaşma:** Atmosferdeki karbondioksitin betona nüfuz ederek çimento hamurundaki kalsiyum hidroksiti kalsiyum karbonata dönüştürmesi, betonun pH'ını düşürerek donatı korozyonuna neden olabilir.

1.2. Kimyasal Faktörler

- **Sülfat Saldırısı:** Sülfat içeren toprak veya su, çimento hamurunda genleşen bileşiklerin oluşmasına neden olarak çatlaklara yol açabilir.
- **Asit Saldırısı:** Betonun yüzeyine etki eden asitler, kalsiyum bileşiklerini çözerek betonun bütünlüğünü bozabilir.
- **Klorür Penetrasyonu:** Deniz suyu veya buz çözücü tuzlar nedeniyle beton içindeki donatının korozyona uğramasına yol açar.

1.3. Mekanik Faktörler

- **Aşınma ve Erozyon:** Beton yüzeyinin aşırı yük, sürtünme veya su akışı nedeniyle aşınması.
- **Yük ve Darbe Etkileri:** Trafik, deprem veya diğer mekanik etkiler nedeniyle betonun dayanım kaybı yaşaması.

2. Betonun Durabilitesini Artırma Yöntemleri

2.1. Malzeme Seçimi

- **Düşük Su/Çimento Oranı:** Daha yoğun ve geçirimsiz bir beton matrisi sağlar.

- **Mineral Katkılar:** Uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler, betonu daha dayanıklı hale getirir.
- **Kimyasal Katkılar:** Su azaltıcı, hava sürükleyici ve sülfat dirençli katkılar kullanılarak beton performansı artırılabilir.

2.2. Üretim ve Kürleme

- **İyi Karışım Tasarımı:** Homojen ve dayanıklı bir yapı elde etmek için uygun bileşen oranlarının belirlenmesi.
- **Uygun Kürleme:** Betonun nemini koruyarak dayanım gelişimini desteklemek ve çatlamaları önlemek.

2.3. Yapısal Önlemler

- **Kaplama ve Sızdırmazlık Malzemeleri:** Beton yüzeyinin su ve kimyasal maddelere karşı korunması.
- **Yeterli Örtü Betonu:** Donatının korunması için yeterli beton örtüsü bırakılması.

3. Beton Durabilitesinin Önemi

- Yapıların servis ömrünü uzatır.
- Bakım ve onarım maliyetlerini azaltır.
- Sürdürülebilirliği artırarak çevresel etkileri minimize eder.

Genel olarak, dayanıklı beton üretimi için doğru malzeme seçimi, uygun tasarım, kontrollü üretim ve iyi inşaat uygulamaları gereklidir.

1.4. Nano Malzemeler

Nano silika (SiO_2), Alümina (Al_2O_3), Titanyum oksit (TiO_2), Karbon Nanotüpler (CNT), Nanotellür (TeO_2), Nano Çinko Oksit (ZnO) nano bazlı betonun ve kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan nanomalzemeler arasındadır (Norhasri vd., 2017). Nanomalzemelerin kısmen değiştirilmiş çimento kompozitine ve geopolimer harçlara dahil edilmesi yapı malzemesi olarak kullanılması önemli bir potansiyele sahiptir ve gün geçtikçe gelişmektedir (Sumesh vd., 2017). Nanopartiküllerin kullanımıyla çevre koşullarına dayanıklı, uzun ömürlü, hafif beton üretimi ve çimento

esaslı malzemelerin ömrünü uzatmak mümkün olmuştur (Utsev vd., 2022). Çalışmalar gösteriyor ki nanoteknolojilerin ve ilgili nanomalzemelerin jeoteknik mühendisliği, yapısal mühendislik, donatı gibi inşaat malzemeleri ve ilgili alanlar dahil olmak üzere genel mühendislik disiplinlerinde potansiyelini ortaya koymuştur. Çimento gibi temel malzemelere belirli nanoparçacıkların eklenmesi, dayanıklılık ve yüksek performans gibi önemli özellikleri artırmaktadır (Utsev vd., 2024).

1.5. Literatür Taraması

Nanomalzemelerin eklenmesi çimento oranını azaltır ve bağlayıcı özelliğini iyileştirir. Nanomalzemelerin ultra ince partikülleri dolgu maddesi gibi davranarak mikro gözeneklerin oluşumunu azaltır, yoğun bir beton üretir (Norhasri vd., 2017). Nanoparçaların çimento harçlarına eklenmesiyle özgül yüzey alanlarının büyüklüğü nedeniyle işlenebilirliği azaltmış, priz süresini kısaltmıştır. Ancak nanomalzemeler $Ca(OH)_2$ ile puzolanik reaksiyona girerek C-S-H jeli üretmiş gözenekleri doldurarak mikro yapıyı iyileştirmiştir. Nanobetonlar sürdürülebilir kalkınma, enerji tasarrufu, ekonomik fayda ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamıştır. Bunların yanı sıra nanomalzeme miktarının fazla olması düzensiz dağılım agromerat oluşumu ve yetersiz sıkışma ile zayıf bölgeler oluşturarak dayanıklılığı olumsuz etkiler (Onaizi vd., 2021). Nano-Al_2O_3, nano-TiO_2 ve nano-$CaCO_3$ gibi silis içermeyen nanomalzemelerin kullanımı, puzolanik reaksiyonu teşvik etmiştir. Küçük miktarlarda nano katkı eklenmesi, çimento harçlarının mekanik dayanımını sürekli olarak artırmıştır. Nano katkılar, çimento harçlarının geçirgenlik özelliklerini iyileştirerek daha dayanıklı yapı malzemeleri oluşturmuştur (Vanitha vd., 2021). Nanomalzemelerin eklenmesi, geopolimerlerin kimyasal saldırılara karşı direncini önemli ölçüde artırmıştır (Matalkah vd., 2022). Nano silika (SiO_2) betonun dayanıklılığını artırmak için kullanılan nano silika, betonun mikro yapısının güçlendirilmesine yardımcı olur. Ayrıca, erken yaşta dayanım kazancı sağlar ve betonun su geçirmezliğini artırır. Nano alüminyum oksit (Al_2O_3), çimento ve beton karışımlarında kullanılarak mekanik özellikleri iyileştirir. Aşınma direncini artırır ve betonun dayanıklılığını güçlendirir. Karbon nano tüpler (CNT), betonun mekanik özelliklerini iyileştiren ve dayanıklılığını artıran nanomalzemelerdir. Ayrıca, bu malzemeler, betonun daha hafif ve sağlam olmasını sağlar. Nanotellür (TeO_2),

özellikle güneş enerjisi uygulamalarında kullanılan bir malzemedir. İnşaat sektöründe, güneş panellerinin verimliliğini artırmak ve enerji verimliliği sağlamak amacıyla kullanılır. Nanokompozitler, nano boyuttaki malzemelerin, plastikler, polimerler veya beton gibi diğer malzemelerle birleşerek güçlendirilmesidir. Bu malzemeler, yapısal özellikleri artırmak ve malzeme ömrünü uzatmak için kullanılır. Nano titanyum oksit(TiO_2), beton ve kaplama malzemelerinde, yüzeylerin kendiliğinden temizlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, UV ışınlarına karşı dayanıklılık sağlayarak dış cephelerin daha uzun süre dayanmasını sağlar. Nano çinko oksit(ZnO**)**, kaplama malzemelerinde kullanılarak yüzeylerin daha dayanıklı hale gelmesini sağlar. Ayrıca, inşaat malzemelerinin UV ışınlarından korunmasına yardımcı olur. Nano karbon siyahı(CB) beton ve asfalt karışımlarında kullanılan nano karbon siyahı, malzemenin dayanıklılığını artırır ve su geçirmezliğini sağlar. Ayrıca, betonun sıcaklık direncini de artırır. Nano Tüplü Polimerler (Polymeric Nanotubes) bu malzemeler, polimer matrislerle birleştirilerek dayanıklılık ve elastikiyet sağlamak için kullanılır. Beton ve asfalt gibi malzemelerin ömrünü uzatır ve performansını artırır. Nano seramikler, dayanıklı kaplamalar ve yüzeyler oluşturmak için kullanılır. Beton ve metal yapılar üzerinde uygulandığında, yüzey aşınmasına karşı daha dirençli hale gelir (Harilal vd., 2020).

Uthaman ve arkadaşları yaptıkları elektrokimyasal ölçümler sonrası öncelikle Beton Karışımları :

- **FA:** %40 uçucu kül içeren beton.
- **FAC:** %40 uçucu kül + %2 nano-$CaCO_3$ içeren beton.
- **FAT:** %40 uçucu kül + %2 nano-TiO_2 içeren beton.
- **FATC:** %40 uçucu kül + %1 nano-$CaCO_3$ + %1 nano-TiO_2 içeren beton.

Korozyon Sonrası Beton Ekstraktları

- FAC betonunda pH düşüşü en az seviyede gerçekleşmiştir.
- FAC, homojen ve tamamen hidratlanmış bir mikro yapı sergilemiştir.
- Makro ve mikro gözenekler ile korozyon ürünleri bulunmamıştır.

Klor İyonu Penetrasyonu

- FAC betonundaki klor iyonu penetrasyon derinliği önemli ölçüde daha düşüktür.
- Bu durum, klor iyonu saldırısına karşı gelişmiş direnç gösterdiğini kanıtlamaktadır. Sonuçlarına ulaşmışlardır (Uthaman vd., 2019).

Uçucu kül ve cüruf bazlı geopolimer betonlarının (FAGPC-SGPC) mekanik ve kısa dönem dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. Geopolimer betonlar için kullanılan alkalin çözeltinin, sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımından oluştuğu belirtilmiştir. Normal Portland Çimentosu (OPC) betonları da karşılaştırma amacıyla üretilmiştir. SGPC, FAGPC ve OPC numuneleri, sırasıyla kükürt asidi, magnezyum sülfat ve deniz suyu çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Dayanıklılık testlerinde görsel inceleme ve ağırlık değişimi değerlendirilmiştir. Mekanik dayanım testleri (basınç, dilimsel gerilme, eğilme) kimyasal saldırılardan önce ve sonra yapılmıştır. Sonuçlar, SGPC'nin daha güçlü ve dayanıklı olduğunu, AFP'nin ise OPC'ye göre daha iyi dayanıklılık gösterdiğini ancak daha düşük mekanik performans sergilediğini göstermektedir (Niş vd., 2018).

Nano silika hacmi %2 olarak belirlenen ve yüksek fırın cürufu bazlı kendi kendine yerleşen alkali ile aktive edilmiş betonun darbe direnci üzerindeki etkileri test edilmiş. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri analiz edilmiş, basınç, çekme ve eğilme dayanımları incelenmiş çıkan sonuçlara göre darbe direnci, enerji yutma kapasitesi, eğilme dayanımı artmıştır ancak basınç dayanımı ve elastisite modülünde kısmi olarak azalma görülmüştür (Niş vd., 2021).

Çimentonun %2 ağırlığında nano-titanyum ve nano-kalsiyum karbonat eklenerek, betonun nanofaz modifikasyonu yoluyla eksikliklerin giderilmesi yani: Daha hızlı hidratasyon, Erken yaş dayanımı, Uzun vadeli basınç ve yarılma çekme dayanımı, Korozyona karşı yüksek elektriksel direnç, Daha düşük klor iyon penetrasyonu, Karbonlaşma derinliği ve biyofilm oluşumunun azaltılması gibi betonun birçok özelliklerini iyileştirmiştir. Nano-faz modifiye edilmiş beton, kültür ve mikroskobik tekniklerle yapılan antibakteriyel aktivite değerlendirmelerinde belirgin bir iyileşme göstermiştir (Uthaman vd., 2018). Bu nanomalzemeler, boşlukları dolduran bir dolgu maddesi gibi hareket ederek çimento matrisindeki kristal boyutunu küçültür. Hem nano-SiO_2 (NS) hem de nano-TiO_2 (NT), kalsiyum hidroksit (CH)

kristalleşme merkezleri olarak işlev görmektedir. Çimento pastası-agrega ara yüzeyindeki kalsiyum hidroksit kristallerinin boyutlarını küçülterek ara yüzeyin mekanik gücünü artırır. Nano-SiO_2 ve nano-TiO_2, C-S-H jelindeki boşlukları doldurarak betonun yapısını iyileştirir (Ren vd., 2018). NP'leri (nanopartiküller), çimento hidratasyonunu hızlandırarak betonun erken dayanımını iyileştirebilir ve soğuk hava koşullarında inşaat süreçlerini daha verimli hale getirebilir (Sargam vd., 2021).

(Niş vd., 2018) Nano silikanın uçucu kül esaslı geopolimer betonların (GPC) dayanıklılığına etkisi araştırılmıştır. İki tip düşük kalsiyumlu uçucu kül ile nano silika içeren ve içermeyen GPC numuneleri üretilmiş ve sıradan Portland çimento betonu (OPC) ile karşılaştırılmıştır. Numuneler, sülfürik asit, magnezyum sülfat ve deniz suyu gibi kimyasal çözeltilere maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, nano silika eklemenin FAGPC betonlarının dayanıklılığını artırdığını ve kimyasal saldırılara karşı OPC betonundan daha üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Sülfürik asit, en tehlikeli kimyasal ortam olarak belirlenmiştir (Niş vd., 2018).

Çimento ve çimento ağırlığının %20 oranında F tipi uçucu kül ile ikame edilen numunelere yine çimento ağırlığının %1'i oranında nano Al_2O_3 (NA), nano TiO_2 (NT) ve nano $CaCO_3$ (NC) malzemeler harçlara eklenmiş kübik ve prizmatik numuneler hazırlanıp 28 günlük kür süresinden sonra yapılan testler sonucu (ultrasonik darbe hızı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı) nanomalzemeler harçların gözenekliliğini azaltarak mikro yapıyı iyileştirdi, nanomalzeme içeren uçucu kül-çimento harçları, nanomalzeme içermeyenlere kıyasla daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir (Öztürk vd., 2022).

Savaş erdem ve arkadaşları mühendislik çimentolu kompozitlerde (ECC) karışım oranları %0,5, %1, ve %1,5 $TİO_2$ ve AL_2O_3 nanopartiküllerini kullanarak oluşturdukları numunelerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik darbe hızı (UPV) gibi mekanik özelliklerini incelemiş sonuçlar nanopartiküllerin konsantrasyonunun basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Mikroyapısal analizler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı spektroskopi (EDS) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ECC numuneleri 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılarak yüksek sıcaklıkların mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. %1

TiO_2 ve %1,5 Al_2O_3 içeriği, numunelerin basınç dayanımını sırasıyla %19,6 ve %20,2 oranında artırmıştır. 800 °C'de ise bu artış sırasıyla %26,24 ve %34,56 olarak kaydedilmiştir. Bu bulgular, TiO_2 ve Al_2O_3 nanopartiküllerinin mekanik performansını ve yüksek sıcaklık direncini artırmada etkili katkılar sağladığını ortaya koymaktadır (Erdem & Ziada, 2023).

Nanokalsit (NCa) içeriğinin (bağlayıcı kütlesinin %0,5, %1 ve %1,5) mühendislik çimentolu kompozitlerin (ECC) mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı (UPV) ve eğilme dayanımı testleri uygulanmış, ayrıca mikroyapısal incelemeler için SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Nanokalsit içeriğinin ECC'nin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirdiğini En iyi performans, bağlayıcı kütlesinin %1'i nanokalsit ile modifiye edilen (1 NCa) seride elde edilmiştir. NCa katkısı, ECC'nin sünekliğini artırarak süper altyapılar için uygunluk sağlamıştır. Fraktal boyut, NCa içeriğine bağlı olarak %5,77, %13,31 ve %10,57 artmıştır. Basınç dayanımı sırasıyla %2,17, %6,92 ve %4,64, eğilme dayanımı ise %9,24, %29,01 ve %16,87 oranında yükselmiştir. UPV değerlerinde de %1,93, %3,44 ve %2,75 artış gözlemlenmiştir. Genel olarak, nanokalsit katkısı, ECC'nin mekanik performansını ve mikroyapısal özelliklerini iyileştirmiştir (Erdem vd., 2022).

Farklı oranlarda (%1, %2 ve %3 çimento ağırlığına göre) kolloidal nano-silika partiküllerinin hafif çimentolu kompozitlerin mekanik, termal ve dayanıklılık özelliklerine etkisini incelemiştir. Mekanik dayanım, mikro sertlik, gözenek yapısı, ısıl iletkenlik, su geçirgenliği ve klorür penetrasyonu analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, nano-silika ilavesinin basınç dayanımını %45,4'e kadar artırdığını, su geçirgenliğini %51,2 ve klorür göçünü %48,2 azalttığını göstermiştir. 3D X-ışını BT, dijital görüntü analizi ve 3D fraktal analizler, nano-silika içeriğinin artmasıyla yoğun ve daha dirençli ara yüzlerin oluştuğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, 3D görüntüler, nano-silika kümelerinin iyi bağlandığını ve bunun taşıma kapasitesini artırırken ısı akışını azalttığını doğrulamıştır (Erdem vd., 2021).

1.5.1. Geopolimerlerin Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri

1. Mekanik Özellikler

- **Basınç Dayanımı:** Aktivasyon yöntemi, kür koşulları ve ham madde bileşimine bağlı olarak yüksek dayanım gösterebilir.
- **Eğilme Dayanımı:** Geleneksel çimento bazlı harçlara kıyasla daha yüksek süneklik sağlayabilir.
- **Elastisite Modülü:** Materyalin sertliği ve yük altında deformasyon kabiliyeti belirlenir.
- **Aşınma Direnci:** Yüzey dayanımı yüksek olup mekanik aşınmaya karşı dirençlidir.
- **Donma-Çözülme Dayanımı:** Düşük gözeneklilik sayesinde çevresel etkilere karşı dayanıklı olabilir.
- **Yüksek Sıcaklık Direnci:** Yüksek sıcaklıklarda yapısal bütünlüğünü koruyabilir ve çimento bazlı malzemelerden daha iyi performans gösterebilir.

2. Mikro Yapı Özellikleri

- **Gözenek Yapısı:** Daha homojen ve düşük kapiler boşluk içeriğine sahiptir.
- **Kristal Yapı:** Ana bileşen olarak amorf ve yarı kristal alüminosilikat fazları içerir.
- **Bağlanma Mekanizması:** Alkali aktivasyon sonucu oluşan geopolimer jelleri (N-A-S-H veya C-A-S-H) ile dayanıklı bir yapı oluşturur.
- **Yoğunluk ve Geçirgenlik:** Düşük su emme ve geçirgenlik özellikleri sayesinde kimyasal dayanımı yüksektir.
- **Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri:** Daha yoğun ve bağlanmış bir mikro yapı sergiler.
- **X-Işını Difraksiyonu (XRD) ve Spektroskopi Analizleri:** Geopolimerleşme derecesini ve oluşan fazları belirlemek için kullanılır.

3. Dayanıklılık Özellikleri

- **Asit ve Sülfat Direnci:** Kimyasal etkilere karşı yüksek direnç gösterir.
- **Klorür ve Karbonatlaşma Direnci:** Çelik donatı ile kullanıldığında daha düşük klorür penetrasyonu sağlar.

- **Termal Kararlılık:** 800-1000°C'ye kadar stabil yapısını koruyabilir.
- **Radyoaktif ve Ağır Metal Bağlama Kapasitesi:** Atık yönetiminde kullanılabilir.

Genel olarak, geopolimer harçlar, yüksek mekanik dayanım, düşük gözeneklilik, iyi kimyasal direnç ve üstün sıcaklık dayanımı gibi özellikler sunarak sürdürülebilir ve dayanıklı bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

1.5.2. Nano Titanyum- TİO2

Kimyasal formülü titanyum oksit (TiO_2). Doğada titanya olarak bilinir ve doğada rutil, anataz, brookit minarellerinde ve en çok ilmenit cevherinde vardır. Titanyum oksit kendi kendini temizleme özelliği olduğundan yeşil yapı malzemelerine katkıda bulunur örnek verecek olursan İtalya'daki Jubilee Kilisesi'nde $TİO_2$ katkılı beton kullanılmıştır. $TİO_2$ betonda kullanıldığında erken yaş mukavemetini artırır ve beton yüzeyinde sert bir tabaka oluşturarak geçirimsiz bir tabaka sağlar (Norhasri vd., 2017) , (Sanchez & Sobolev, 2010).



Şekil 7. İtalya'daki Jübile Kilisesi

Yapılan deneyler sonucu numunelere eklenen TiO_2 NP'leri (nanopartikülleri) 200°C'ye kadar basınç dayanımını, 400°C'ye kadar elastisite modülünü korudu (Reches vd., 2017). $TİO_2$ eklenen beton numuneler yapılan deneyler sonucu daha fazla

hidrat ürettiği ve basınç dayanımının arttığı görülmüştür (Sun vd., 2020). Portland çimentosuna nano TiO_2 eklenmesiyle hidratasyon ürünü arttı ve NOX (azot oksit, azot monoksit) giderme verimliği artmıştır (Amor vd., 2016).

30 nm boyutundaki nano-TiO_2, matrisin gözenekliliğini azaltarak geopolimer macununun daha yoğun bir yapıya sahip olmasını sağlamıştır. TiO_2'nin mikro yapısal iyileştirmeleri, köprüleme etkisine bağlanmıştır ve Yang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar, nano-TiO_2'nin C-S-H ve C-S-A-H oluşumunu artırdığını göstermiştir. Nano-TiO_2 için en uygun dozajın max %5 olduğu belirlenmiştir (Matalkah vd., 2022). Çimentoya Nano-Titanyum (NT) ilavesinin betonun malzeme ve yapısal düzeydeki etkileri incelenmiştir. Test sonuçlarına göre, %1,0 NT ilavesi ile basınç dayanımında %17,91 ve yarılma çekme dayanımında %46,29 artış sağlanmıştır. Ancak, %1,0 NT'yi aşan ilavelerde bu artış oranı önemli ölçüde azalmaktadır. Beton karışımına %0,5, %1,0 ve %1,5 NT ilavesi sırasıyla basınç dayanımında %11,8, %17,9 ve %15,2; yarılma çekme dayanımında ise %30,3, %46,3 ve %41,3 artış sağlamıştır. Bu sonuçlar, %1,0 NT içeriğinin betonun performansını en iyi şekilde artıran optimum seviyeyi oluşturduğunu göstermektedir (Mustafa vd., 2022). Nano-TiO_2, kalsiyum hidroksit (CH) kristallerinin boyutunu küçültür ve CH'nin yüzey alanını artırır. Bu yüzey alanı artışı, CH'nin CO_2 ile daha fazla reaksiyona girmesine neden olur, böylece CO_2 alımı artar (Moro vd., 2021). NT (Nano titanyum TiO_2) belirli oranda geopolimer harçlara eklenmesi, erken yaşta çimentonun hidratasyonunu hızlandırmak, puzolanik reaksiyonunu teşvik etmek ve uzun zincirli, yüksek Al/Si oranına sahip C-S-H formasyonunu oluşturmak gibi üç önemli rol üstlenir (Ma vd., 2016). Geopolimer harç numunelerinde NT (nano titanyum TiO_2) karışımlarında en iyi basınç dayanımı yüzdesi %1,5, eğilme dayanımı için en iyi oran %1, korozyon hızı için ise %1,5 olarak test edilmiştir (Sobhy vd., 2022). TiO_2 partikül süspansiyonları, methylene blue dekolorizasyon testi ve hızlandırılmış biyolojik bozulma testi ile ışık olmadan bile antifungal aktivite gösterdi (Loh vd., 2018). Nano teknoloji, betonun performansını önemli ölçüde iyileştirme ve daha sürdürülebilir, gelişmiş çimento bazlı kompozitler geliştirme potansiyeline sahip bir alan olarak dikkat çekmektedir. Bu teknoloji, betonun mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini güçlendirebilir, bu da gelecekte beton malzemelerinin daha verimli ve dayanıklı hale gelmesini sağlayacaktır. Nano-TiO_2, özellikle betonun kendi kendini temizleme özelliği üzerinde etkili olmuş ve

çevreyi temizleme konusunda ek faydalar sunmaktadır. Bu fotokatalitik özellik sayesinde, nano-TiO_2 içeren beton, araç ve endüstriyel emisyonlardan kirleticilerin (NOx, karbon monoksit, VOC'ler, klorofenoller ve aldehitler gibi) bozulmasını sağlar. "Kendi kendini temizleyen" ve "kirletici giderici" betonlar, şu anda Avrupa ve Japonya'da bina cepheleri ve yol yüzey kaplamalarında kullanılmaktadır. Örnek olarak, Roma'daki Jubilee Kilisesi ve Milano dışındaki 230 metrelik bir yol yüzeyi nano-TiO_2 içeren betonla kaplanmıştır. Ayrıca, bazı araştırmalar, nano-TiO_2'nin Portland çimentosunun erken yaş hidratasyonunu hızlandırabileceğini, basınç ve eğilme dayanımını artırabileceğini ve betonun aşınma direncini geliştirebileceğini göstermektedir. Bu özellikler, nano-TiO_2'nin beton endüstrisindeki kullanımını daha da cazip hale getirmektedir (Sanchez & Sobolev, 2010).

1.5.3. Donma Çözünme

Beton yapıların gözeneklerinden ve kılcal boşluklarından suyun beton içerisine nüfus etmesi, imalat aşamasında reaksiyona girmeyen su moleküllerinin hapsolması sonucu içerdeki su moleküllerinin basınç farkından dolayı su moleküllerinin donması, sıcaklık farkı ile de tekrar çözünmesi olayına donma-çözünme, tekrar etmesine de donma-çözünme döngüsü denilmektedir. Beton gözeneklerinde bir miktar suyu her zaman bulunur ve bu su donma donarken yaklaşık %9 oranında hacmen genişler (Ramachandran, 1995).

Deniz yapılarında veya tuz içeren su ile sürekli temas eden betonda dış hasarda oluşabilir. Beton içerisine giren çözücü tuzlar (sodyum klorür NaCl, kalsiyum klorür $CaCl_2$) donma sıcaklığını düşürerek daha fazla donma-çözünme döngüsü oluşturur. Deniz suyunda bulunan sülfat iyonları (SO_4^{2-}) beton içerisinde kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ile reaksiyona girer ve etrenjit oluşturur. Klorür (Cl^-) iyonları ise koruma tabakasını bozar donatı ile etkileşime girerek oksitlenme oluşturur. Oluşan korozyon ürünü (pas) hacim olarak genişler ve betonun çatlamasına parçalanmasına neden olur.

Donma-çözülme hasarı iç donma ve tuz birikmesinden kaynaklanabilir. Direnç, yeterli hava boşluğu sistemi, düşük su çimento oranı ve uygun katkı maddeleri ile artırılabilir. Beton dayanımı ve kürleme uygulamaları da koruma sağlar uçucu kül ve cürufun tuz direncini azaltabileceği belirtilmiştir. Donma sırasında yeterli hacim

olmadığından suyun boş alanlara taşınması gerekir aksi takdirde hidrolik ve ozmotik basınç hasara yol açabilir.

Farklı oranlarda nano katkılı ve kontrol geopolimer numuneler donma-çözünme döngülerine maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı test edilmiştir. Yapılan deney sonucu nano içerikli numunelerin basınç dayanımı kaybı kontrol numunelerin basınç dayanım kaybına kıyasla daha düşük olduğunu belirtilmiştir (Behfarnia & Salemi, 2013).

AA-YFC (alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cüruflu beton) betonları boşluk çözeltisinin daha düşük donma noktası ve farklı boşluk yapısı nedeniyle OPC betonlarına göre daha iyi donma çözülme dayanıklılığına sahiptir. Aktivatör türü donma noktasını etkiler; potasyum karbonat ile -36 °C sodyum karbonat ile- 2,1 °C'ye ulaşır. Ayrıca AA-YCF betonları daha fazla jel boşluğuna OPC betonları ise daha fazla kapılar boşluğa sahiptir (Shi vd., 2006).

(Öztürk vd., 2022), çimentonun %20 oranında uçucu kül ikameli ve kontrol numuneleri hazırlayarak 28, 56 ve 90 günlük kür sonrası uçucu kül ikameli numuneler ve kontrol numenleri ıslatma-kurutma veya donma-çözülme döngülerine maruz bırakılmıştır. 90 günlük kür sonrası, uçucu kül içeren numuneler, puzolanik reaksiyon sonucu oluşan CSH jeli sayesinde daha düşük gözeneklilik ve daha iyi yapışma göstererek kontrol numunelerinden üstün performans sergilemiştir. Ancak, donma-çözülme döngülerinde erken yaşlarda kontrol numuneleri daha iyi performans göstermiştir. Puzolanik reaksiyonların tamamlanması için en az 90 gün gereklidir, bu da uçucu kül katkılı betonları soğuk hava ve deniz yapıları için uygun bir seçenek haline getirebilir (Öztürk & M. Kılınçkale, 2022).

İKİNCİ BÖLÜM

MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Geopolimer Harç Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri olan bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül yapay puzolanları aktive etmesi için sodyum silikat ($Na2SiO3$) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak %0, %1, %2 (6 gram, 12 gram) nano $TİO_2$ içeren küp ve prizma numuneler yapılan çalışmamızın doğruluğunu artırmak içinde şahit numuneleri üretilmiştir. Geopolimer numunelerin üretiminde bağlayıcı malzeme olarak %50 oranında F-tipi uçucu kül ile %50 oranında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılması tercih edilmiştir. Bu oranların seçilmesinin temel nedeni, %100 F-tipi uçucu kül kullanıldığında numunelerin sertleşme süreci için mutlaka ısı kürüne ihtiyaç duyması, diğer yandan %100 cürufla hazırlanan numunelerde ise priz süresinin oldukça kısa olması ve işlenebilirliğin düşük seviyede gerçekleşmesidir. Bu iki malzemenin eşit oranda kullanılması hem işlenebilirliği artırmakta hem de kürleme ihtiyacını azaltmaktadır. Bu sayede, numuneler ısı kürüne gerek kalmadan yalnızca laboratuvar ortamında bekletilerek dayanım kazanabilmiştir.

Alkali aktivatör olarak sodyum bazlı bileşenler tercih edilmiştir. Bunun sebebi ise sodyum bazlı aktivatörlerin, potasyum bazlılara kıyasla daha ekonomik olmasıdır. Bu yaklaşım sayesinde hem maliyet avantajı sağlanmış hem de çevresel koşullarda dayanıklı geopolimer yapı malzemeleri elde edilmiştir. Bu üretim yöntemi, sürdürülebilirlik açısından da önemli katkılar sunmaktadır. Bu tez kapsamında çimentosuz beton üretmek için %50 F tipi uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Tasarlanan su/bağlayıcı oranı 0,5 olup, süperakışkanlaştırıcı olarak ağırlığın %1'i oranında polikarboksilik eter esaslı MasterGlenium 450 (eski adı GLENIUM ACE 450) uygulanmıştır. Karışımlara geopolimer çimento ağırlığının %1 ve %2 oranında tek nanomalzeme şeklinde nano titanyum ilave edilmiştir. Tüm numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp, ardından 28, 56 ve 90 gün boyunca ortam sıcaklığında %95 bağıl nemde kürlenmiştir ve planlanan kür süresi sona erdikten sonra amaçlanan deneyler yapılmıştır.

Donma-çözülme döngüleri için her karışım serisinden ayrıyeten birer seri harç numuneler üretilmiştir ve 90 günlük kürün ardından 60 donma çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır.

Tablo 3. Numunelerin karışım oranları, kür süreleri ve toplam numune sayısı

Numune serisi	Uçucu Kül (%)	Y.F.Curufu (%)	S/B	Nano Titanyum	Kür Süresi Gün	Toplam Numune Sayısı
C	50	50	0.5	0	28, 56 ve 90	24
T1	50	50	0.5	1	28, 56 ve 90	24
T2	50	50	0.5	2	28, 56 ve 90	24
C-D	50	50	0.5	0	90(donma-çözülme)	6
T1-D	50	50	0.5	1	90(donma-çözülme)	6
T2-D	50	50	0.5	2	90(donma-çözülme)	6

2.1.1. Kullanılan Malzemeler ve Ekipmanlar

Yapılan bu çalışmamızda geopolimer numunelerimizde: agrega ve dolgu malzemesi olarak 2mm elekten geçirilmiş kum, bağlayıcı olarak; yüksek fırın cürufu ve uçucu kül, alkali aktivesi için; sodyum silikat ($Na2SiO3$) ve sodyum hidroksit (NaOH), kolay işlenebilirlik ve su oranını azaltmak için; süperakışkanlaştırıcı, nano dolgu içinde; $TİO_2$ kullanılmıştır.

2.1.1.1. Kum

İçerisinde kil, silt bulunmayan su ile temizlenmiş ve 2 mm elekten geçirilmiş her set karışım için hazırlanan 1253 gram ince kum. Şekil 8'de görseli verilmiştir.



Şekil 8. 2 mm elekten geçirilmiş kum

2.1.1.2. F Sınıfı Uçucu Kül

Kömür yakıtlı termik santrallerde kömürün tam yanmasıyla ortaya çıkan yan ürün uçucu kül olarak isimlendirilir. Yanma sırasında kül ve gazlar yükselir bacadan çıkmadan önce elektrostatik veya mekanik filtreler tarafından tutulur. Filtrelerden ayrılan kül nem kapmaması için torbalanarak çimento fabrikalarına gönderilir. Her set karışım için özel saklama koşullarında tutulan 278 gram F sınıfı uçucu kül özellikleri aşağıda Tablo 4'te verilmiştir. Şekil 9'da görseli verilmiştir.

Tablo 4. F sınıfı uçucu kül

Kimyasal Özelikler		**Deney Yöntemi**	**Standart Sınır Değerleri (%)**	**F Sınıfı Uçucu Kül (%)**
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$		TS EN 196-2	> 65	90,5
Reaktif SiO_2		TS EN 197-1	> 22	62,7
Kızdırma Kaybı		TS EN 196-2	< 5	3,5
Toplam Alkali Muhtevası		TS EN 196-2	< 5,5	2,9
Reaktif CaO		TS EN 197-1	< 11	1.55
MgO		TS EN 196-2	< 4,5	1,59
Sülfirik Anhidrit		TS EN 196-2	< 3,5	0,3
Serbest CaO			< 2,6	0,1
Klorür		TS EN 196-2	< 0,1	0,02
Fiziksel Özelikler				
Priz (dk)	Başlangıç	TS EN 196-3	150	190
	Sonu		200	250
Aktivite Endeksi (%)	28. Gün	TS EN 196-1	> 70	71,6
	90. Gün		> 80	82
İncelik (45 µ üstü) (%)		TS EN 451-2	< 40	20,2
Yoğunluk (kg/m^3)		TS EN 196-6	2,015 < Değer < 2,465	2.25



Şekil 9. Uçucu kül

2.1.1.3. Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu demir çelik fabrikalarında demir-çelik üretimi sırasında yüksek fırınlarda demir cevheri, kömür ve kireçtaşı eritilirken metal olmayanlar cüruf olarak ayrılır. Cüruf odasından çıkartılan ürün hava ya da su ile soğutulur. Soğutulan bu ürün cam benzeri ince granüller elde edilir ve daha sonra değirmende öğütülerek yüksek fırın cürufu (GBFS) torbalara paketlenir. Her set

karışım için özel saklama koşullarında tutulan 278 gram yüksek fırın cürufu. Şekil 10' da görseli verilmiştir.



Şekil 10. Yüksek fırın cürufu

2.1.1.4. Süperakışkanlaştırıcı

Geopolimer numunelerin priz reaksiyonlarından önce küp ve prizma numune kalıplarına rahatça işleyebilmek için MasterGlenium 450 (eski adı GLENIUM ACE 450) polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltıcı, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkısı 40 gram hazırlanan alkali solüsyona katılarak karıştırılmıştır. Tablo 5'te teknik özellikleri ve Şekil 11'de görseli verilmiştir.

Tablo 5. Süperakışkanlaştırıcı

ÖZELLİK	SÜPERAKIŞKANLAŞTIRICI
Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Opak
Yoğunluk	1,04-1,08 kg/litre
Klor içeriği % (EN480-10)	<0,1
Alkali İçeriği % (EN480-12)	<0,3



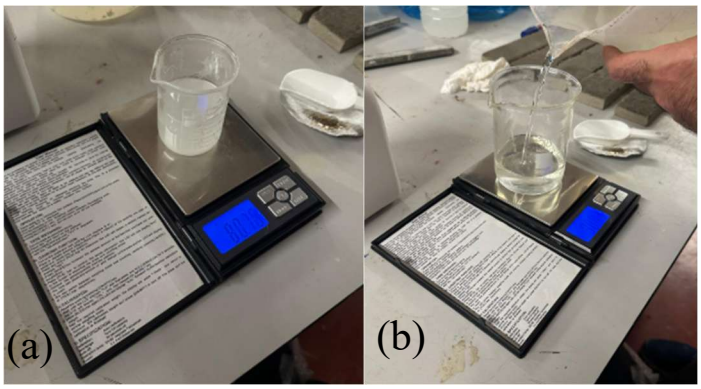
Şekil 11. Süperakışkanlaştırıcı

2.1.1.5. Nano Malzeme

Yapılan çalışmamızda geopolimer numunelerimizin mikro yapılarını iyileştirmek ve boşluk oranını azaltarak mekanik özelliklerini artırmak için geopolimer bağlayıcı ağırlığının %1 ve %2 oranında (6 gram, 12 gram) nano TiO_2 kullanılmıştır.

2.1.1.6. Kullanılan Alkali Aktivatörler

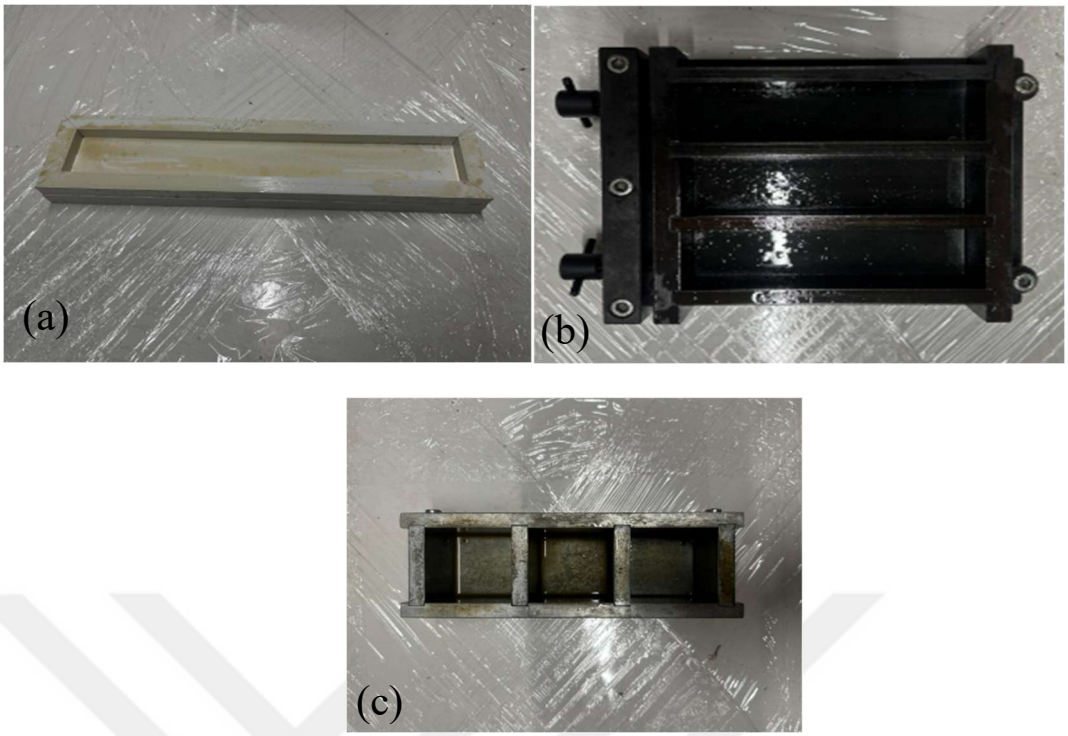
Geopolimer numunelerimizde puzolanik aktiviteyi başlatması için 198 gram Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) ve 80 gram Sodyum Hidroksittir (NaOH) kullanılmıştır. 198 gram sodyum silikat + su karışımı (a), 80 gram sodyum hidroksit (b) görselinde gramajların hazırlanması gösterilmiştir.



Şekil 12. Solüsyon gramajlarının hazırlanması

2.1.2. Kullanılan Ekipmanlar ve Döküm Kalıpları

Kum hazırlamak için; 2mm çapa sahip elek, kum ve bağlayıcı maddelerin kütlelerini ölçmek için 30kg'lık tartı, nanomalzemeler ve alkali solüsyonların kütlelerini ölçmek ve hazırlamak için 0.01 gr. hassasiyetli terazi, nanomalzemelerin ve solüsyonların agromerat (topaklanma) oluşumunu engellemek ve homojen dağılması için; dakika / devir kontrolü yapılan hassas laboratuvar mikseri, kalıp öncesi numunelerin karıştırılması için dakika / devir kontrolü yapılan laboratuvar mikseri, solüsyonlar ve sıvılar için; çeşitli beher ve numune kapları, toz malzemeler için ; laboratuvarda kullanılan el kürekleri ve numunelerin kaplardan rahat ve zarar görmeden çıkarılması için kalıp yüzeylerine sürülen kalıp yağı kullanılmıştır. Hazırlanan geopolimer harçlarımız için özel yapım 300*50*15 mm ölçüsünde prizma kalıbı (a), 160*40*40 mm ölçüsünde prizma kalıbı ve 40*40*40 mm ölçüsünde küp numune kalıpları kullanılmıştır.



Şekil 13. Döküm kalıpları 300*50*15 mm (a), 160*40*40 mm (b), 40*40*40 mm (c)

2.1.3. Numunelerin Karışım Oranı

Hazırlanan altı farklı nano karışım oranına sahip numunelerimizde bağlayıcı olarak sadece ½ oranında uçucu kül ve ½ oranında yüksek fırın cürufu, ¼ oranında alkali solüsyon kullanılmıştır. Tabloda isimlendirilen C serisi kontrol numunelerini T serileri ise nano katkılı numunelerdir. Tablo 6'da karışım miktarları, Tablo 7'de nano katkı yüzdeleri ve kür süreleri verilmiştir.

Tablo 6. Geopolimer numunelerin karışım ağırlıkları ve isimlendirilmesi

Numune Serisi	Kum gr.	Y.F. Cürufu gr.	Uçucu Kül gr.	Na_2SiO_3 gr.	NaOH gr.	TiO_2 gr.	Katkı gr.
C	1253	278	278	198	80	0	40
T1	1253	278	278	198	80	6	40
T2	1253	278	278	198	80	12	40
C-D	1253	278	278	198	80	0	40
T1-D	1253	278	278	198	80	6	40
T2-D	1253	278	278	198	80	12	40

Tablo 7. Numunelerin nano katkı yüzdeleri ve kür süreleri

Numune Serisi	$TİO_2$%	Kür Süresi(gün)
C	0	28, 56 ve 90
T1	1	28, 56 ve 90
T2	2	28, 56 ve 90
C-D	0	90 Donma- Çözünme
T1-D	1	90 Donma- Çözünme
T2-D	2	90 Donma- Çözünme

2.1.4. Alkali Solüsyon Hazırlığı

Alkali solüsyonu hazırlanırken iki farkı aktivatör kullanılmış sodyum hidroksit ve sodyum silikattır. Sodyum hidroksiti aktifleştirmek için daha önceki çalışmalarda genellikle 9M, 12M, 16M ve 18M molariteye sahip hidroksit çözeltiler kullanılmıştır. Bu çalışmamızda 14M molariteye sahip çözelti kullanılmıştır. 14M molariteyi oluşturmak için 0.737 litre suyun içine 560 gram sodyum hidroksit NaOH (40 g/mol) karıştırıldı. Karışımda kimyasal çözünmeden dolayı ekzotermik ısı açığa çıktığı için bir süre bekletildi. Bu bekletilmeyle sıcaklığın düşürülmesinin temel sebebi puzolan karışımla anlık ve hızlı prizinin gerçekleşmesi engellemektir. Kontrol numuneleri için (C) ilk önce 1000 ml'lik beher içerisine 198 gr. sodyum silikat (Na_2SiO_3), ekzotermik ısısı düşürülen 80 gr. sodyum hidroksit (NaOH) ve 40 gr. süperakışkanlaştırıcı (MasterGlenium 450) katkı eklenerek 5 dakika boyunca çırpıcı mikseriyle karıştırılmıştır.

2.1.5. Nano TİO2 Homojen Dağılımı ve Eklenmesi

Nano katkılı numuneler için işlem sırası ilk öncelikle 1000 ml beher içerisine 198 gr. sodyum silikat (Na_2SiO_3), 40 gr. 40 gr. süperakışkanlaştırıcı (MasterGlenium 450) ve T1, T2 seri numaralı numuneleri için (T1=6 gr. T2=12 gr.) nano titanyum ($TİO_2$) eklenerek agromerat oluşturmaması için karıştırıcı mikserin devri ayarlanmış

20 dakika çırpıcı mikseriyle karıştırılmış daha sonra ise karışıma ekzotermik ısısı düşürülmüş 80 gr. sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi eklenerek 2 dakika boyunca çırpıcı mikseri ile karıştırılmıştır.

2.1.6. Numunelerin Hazırlanması ve İsimlendirilmesi

2.1.6.1. Kontrol Numunelerinin Hazırlanması

Alkali solüsyonu hazırlamak için 198 gr. sodyum silikat, 80 gr. sodyum hidroksit (ısısı düşürülmüş) ve 40 gr. akışkanlaştırıcı çırpıcı mikserde hazırlandı. Bu hazırlık sırasında 278 gr. uçucu kül ve 278 gr. yüksek fırın cürufu mikser haznesine konularak 2.5/saniye devrinde 90 saniye boyunca karıştırıldı. Daha sonra bu karışıma 60. saniye ile 80. Saniye arasında 1253 gr. kum eklenerek 125. Saniyeye kadar karıştırıldı. 125. saniyede hazırlanan alkali solüsyon eklendi ve 150. saniyeye kadar karıştırıldı. Tablo 8' de karışım miktarları verilmiştir.

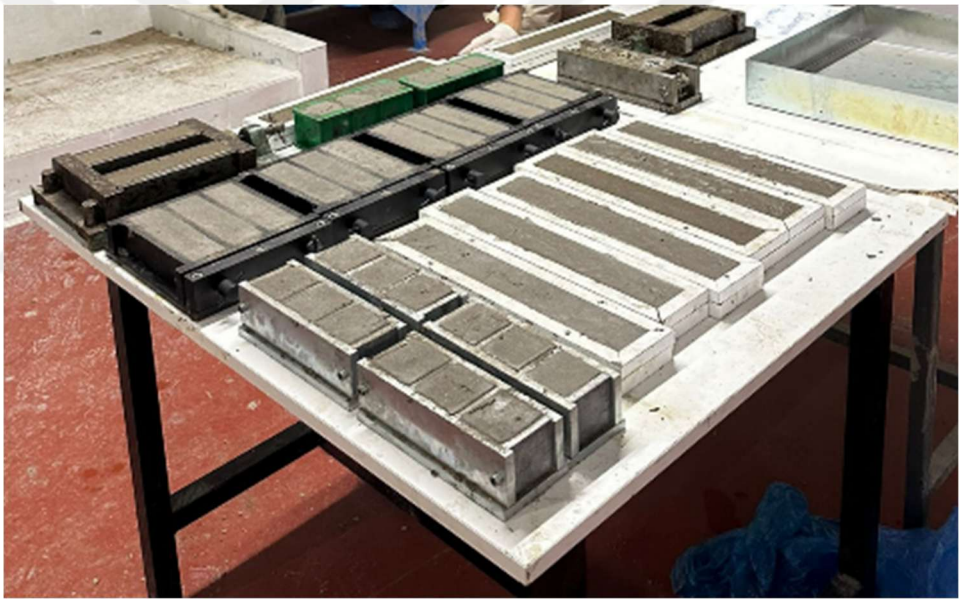
Tablo 8. Kontrol numuneleri karışım miktarları

Kullanılan Malzeme	Gram
Sodyum Silikat	198
Sodyum Hidroksit	80
Akışkanlaştırıcı Katkı (Master Glenium ACE 450)	40
Yüksek Fırın Cürufu	278
Uçucu Kül	278
2 mm Elekte Elenmiş Kum	1253

Homojen karışım hazneden alınarak yüzeyi temizlenmiş ve yağlanmış olan küp ve prizma kalıplarına el küreğiyle konulup şişleme ve tokmakla vibrasyonu yapıldı (Şekil 14). Yüzey pürüzlüğü için üzeri mastarlanan numuneler 24 saatlik bekleme süresi için oda sıcaklığında bırakıldı (Şekil 15).



Şekil 14. Numunelerin kalıplara dökülmesi ve vibrasyonun görseli



Şekil 15. 24 saatlik bekleme süresine bırakılan kontrol numunelerin görseli

2.1.6.2. Nano TiO_2 Katkılı Numunelerin Hazırlanması

Alkali solüsyonu hazırlamak için 198 gr. sodyum silikat, 40 gr. akışkanlaştırıcı ve T1, T2, T1D, T2D (T1, T1D= 6 gr., T2, T2D= 12 gr.) seri numaralı nano katkılar her seri üretimde istenilen gram eklenerek 20 dakika boyunca çırpıcı mikserde karıştırdıktan sonra karışıma 80 gr. sodyum hidroksit eklenerek 2 dakika boyunca

karıştırıldı. Bu hazırlıkla birlikte 278 gram uçucu kül ve 278 gram yüksek fırın cürufu karıştırıcı mikser haznesine alınarak 90 saniye karıştırıldı. Daha sonra bu karışıma 60. Saniye ve 80. Saniye arasında 1253 gr. kum eklendi karışım 125. Saniyeye kadar karıştırıldıktan sonra üzerine nano eklenmiş alkali solüsyon eklenip 150. Saniyeye kadar karışıma devam edildi (Tablo 9).

Tablo 9. Nano katkılı numunelerin karışım miktarları

Kullanılan Malzeme	Gram
Sodyum Silikat	198
Sodyum Hidroksit	40
Akışkanlaştırıcı Katkı (Master Glenium ACE 450)	80
Yüksek Fırın Cürufu	278
Uçucu Kül	278
2 mm Elekte Elenmiş Kum	1253
Titanyum Oksit	6-12

Homojen karışım hazneden alınarak yüzeyi temizlenmiş ve yağlanmış olan küp ve prizma kalıplara el küreğiyle konulup şişleme ve tokmakla vibrasyonu yapıldık (Şekil 16). Yüzey pürüzlüğü için üzeri mastarlanan numuneler 24 saatlik bekleme süresi için oda sıcaklığında bırakıldı (Şekil 17).



Şekil 16. Nano katkılı numunelerin kalıplara dökülmesi ve vibrasyonun görseli



Şekil 17. 24 saatlik bekleme süresine bırakılan nano katkılı numunelerin görseli

2.1.6.3. Numunelerin Kalıptan Çıkarılması ve İsimlendirilmesi

24 saatlik bekleme süresinden sonra numuneler özel yapım olan küp ve prizma kalıplarından her kalıbın kanatları sökülerek çıkartıldı. Kalıptan çıkarılan numuneler bir gün önce hangi seri hazırlanmış ise o seri için kodlama yapılarak suda çözünmeyen kalem ile üzeri yazıldı. Küp ve prizma kontrol numunelerine C28, C56, C90 ve donma

çözünme için C-D kodlaması yazıldı. %1 (6 gr.) nano $TİO_2$ içeren küp ve prizma numunelere T1-28, T1-56, T1-90 ve donma-çözünme maruziyeti bırakılan numuneler için T1-D90 ; %2 (12 gr.) nano $TİO_2$ içeren küp ve prizma numunelere T2-28, T2-56, T2-90 ve donma-çözünme maruziyeti bırakılan numuneler için T2-D90 kodlaması yazılıp tepsilere konularak kür süreleri için oda sıcaklığında bekletilmeye ayrıldı.

2.2. Yapılan Deneyler

2.2.1. Ultrases Geçiş Hızı (UPV)

Ultrases hızı bir maddenin elastik modülleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle katı malzemelerde ultrases hızı deneyi yapılarak katı maddenin doluluk oranını, iç yapısı, gözenekliliği hakkında bize bilgi vererek bu katı maddenin mukavemeti ve elastisitesi hakkında değerlendirme yapmamızı sağlar. Testlerimiz 50*50*50 küp numunelerin her birine TS EN 12504-4 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Numuneler deneye tabi tutulmadan önce yüzeyleri pürüzsüzleştirilip kuru ve temiz hale getirildi. Daha doğru sonuçlar için UPV cihazının alıcı ve verici sensörleri jel ile kaplanarak numune yüzeyine tam olarak yapışması sağlanarak ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Aşağıdaki bağıntıda ultrases hızı formülü verilmiştir.

$$V = \frac{\imath}{t} \qquad (1)$$

Bağıntıda;

V: Ultrases Geçiş Hızı (mm/µs veya km/sn)

ı: Numune Uzunluğu (mm)

t: Ölçülen zaman (sn)

2.2.2. Su Emme Kapasitesi

Su emme kapasitesi katı bir maddenin (beton, polimerler, taş vs.) kendi ağırlığına göre ne kadar su tutabileceğini belirleyen ve genellikle gözenekli katı malzemelerde ölçülür. Bu ölçümler malzemenin su emme kapasitesini belirleyerek

porozitesini (gözeneklilik), su direnci ölçmeye yarar. Sıkı ve kristal yapıdaki malzemelerin su emme kapasitesi daha azdır. Gözenekli malzemeler daha fazla su emerler. Su emme kapasitesi malzemesin yapısına, ortamın hava koşuluna, basınç ve sıcaklığa göre değişir. Uzun süre su saldırısına maruz kalan numune su emme kapasitesi yüksek ise suyu tutması malzemenin yapısına zarar verebilir. Betonarme yapıların klorürlü suya maruz kalması ve tutması taşıyıcı sistem içerisinden donatılara sızması korozyona neden olarak donatıların oksitlenmesi ile hacminin genişlemesi sonucu sistemin zarar görmesine neden olur. Bu nedenle su emme kapasitesinin belirlenmesiyle kullanılacak malzemenin özelliklerinin belirlenmesi önemlidir.

Bu çalışma kapsamında kür süreleri tamamlanan (28, 56 ve 90 günlük) her bir set numunenin su emme kapasiteleri ölçülmüştür. Kür süresi tamamlanan numune 24 saat 20±2ºC sıcaklıkta kür havuzunda tutulmuş, daha sonra ise 0.01 gr. hassas terazi ile kütleleri belirlenmiştir. Kütleleri belirlenen numuneler su içeriğini kaybetmesi için 24 saat boyunca 100±5 ºC etüvde kurutulmaya bırakılmıştır. Etüv süresi dolan numunelerin yüzeyleri kurulandıktan sonra tekrardan hassas terazi ile tartılarak kütleleri kaydedilmiştir. Numunelerin kütlece su emme oranı aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$W_S = \frac{W_I - W_K}{W_K} \times 100 \qquad (2)$$

Bağıntıda;

Ws :Su Emme Oranı (%)

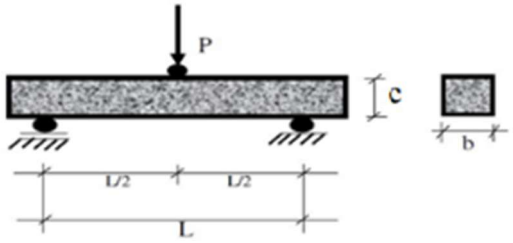
Wı :Islak Kütle Ağırlığı (gr.)

Wk :Kuru Kütle Ağırlığı (gr.)

2.2.3. Eğilme Dayanımı

Kür süreleri tamamlanan numuneler (28, 56 ve 90 günlük) TS EN 12390-5 standardına uygun olarak test yapılmıştır. 300 mm merkez açıklıklı iki mesneti bulunan test cihazına yüzeyi düzgün seçilen 350*50*15 mm boyutundaki prizma

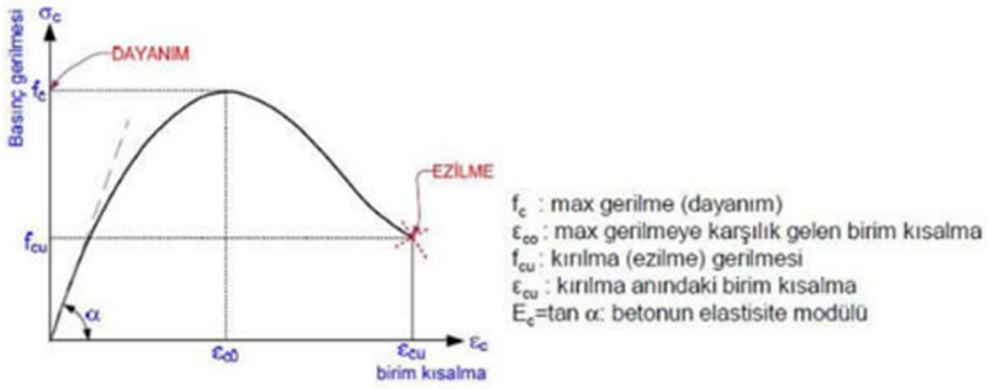
numunesi mesnetlerin eksenine dik şekilde yerleştirilerek teste başlanmıştır. İki mesnet arasındaki prizma numunenin tam ortasından kuvvet uygulanır. İki mesnet ve kuvvet uygulanan nokta dikey eksenleri simetriktir. Eğilme dayanımı ve deformasyon kontrolü 0.005 mm/sn hızda yükleme yapılarak ölçülmüştür. Şekil 18'de deney şeması verilmiştir.



Şekil 18. Eğilme deneyi gösterim şeması

2.2.4. Gerilme-Deplasman Deneyi

Gerilme-deplasman deneyi bir numunenin yük altındaki şekil değiştirme uzama-kısalma ya da yer değiştirmeyi ölçmek için yapılır. Yapılan bu deney malzemenin elastik, plastik davranışları, sünme, akma anlarındaki birim deplasman ve uygulanan nihai gerilmeleri hesaplayarak malzemenin mekanik özelliklerini belirler (Şekil 19).



Şekil 19. Gerilme-deplasman grafiği görseli

2.2.5. Basınç Deneyi

Basınç deneyi; kompozit bir malzeme olan beton numunelere laboratuvar ortamında pres makinası ile basınç uygulanarak test edilir. Beton numuneler küp ya da silindir kalıplara alınır daha sonra 3, 7, 28, 56, 90 günlük kür sürelerinden (eskitme) sonra ya da betonarme yapılardan alınan silindir numunelere pres yüzeyleri temiz ve pürüzsüz olacak şekilde pres makinasına yerleştirilerek yavaş ve kontrollü bir şekilde eksenel bir kuvvet uygulanır (şekil 20). Numunelerin yenilmeden önceki aldıkları son yük malzemenin kırılma dayanımı olarak tanımlanır. Uygulanan kuvvet (P) KN (kilo Newton) cinsinden, birim alana düşen yük ise (P/A) MPa (megapascal) olarak belirlenir. Küp numunelerimiz 50*50*50 ve prizma numunelerimizin eğilme deneyinde elde edilen 50*50*70 ± 5 (mm) numunelerimize 3000 KN kapasiteli pres makinası ile AS1012.9-1999 standartlarına uygun olarak deney yapılmıştır. Basınç dayanımı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

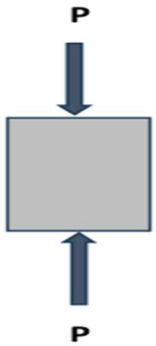
$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (3)$$

Bağıntıda;

σ : Gerilme (MPa) (N/mm^2)

P : Kuvvet (N)

A : Alan deney numunelerin pres alanı (50*50) (mm^2)



Şekil 20. Basınç deneyi gösterim şeması

2.2.6. SEM ve EDS Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı Spektroskopisi (EDS), malzemelerin yüzeyi morfolojisini ve kimyasal bileşimini analiz etmek için kullanılan deneylerdir. SEM analizinde 1cm^2 yüzey alanına sahip ince numuneler hazırlanır. Beton numuneler iletken olmadıkları için altın ya da karbon ile kaplanarak iletkenlik özelliği sağlanır. Deney numuneleri vakum ortamında çalışan cihazın tutucu tabakasına yerleştirilir. Elektron tabancasından çıkan yüksek enerjili elektronlar numuneye yönlendirilerek yüzeyden yayılan sekonder elektronlar, geri yansıyan elektronlar ve X- ışınları sinyalleri dedektör tarafından toplanır. Etkileşim sonucunda alınan sinyaller bilgisayar ortamında işlenerek dijital görüntülere dönüştürülerek yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturur. Bu görüntüler ile yüzey pürüzlülüğü, partikül dağılımı, çatlaklar ve mikro yapı incelenir (Şekil 21). EDS analizi ise bir malzemenin elementel bileşimini analiz etmek için kullanılan tekniktir. Genellikle SEM ya da TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) ile kullanılır. Malzemeye gönderile yüksek enerjili elektronlar malzeme atomlarına çarparak orbitallerdeki elektronları yerinden çıkarır ve yerinden çıkan elektronun yerine üst enerji seviyesindeki bir elektron geçerken karakteristik X-ışınları yayılır. Dedektör bu ışınları kendine özgü enerji seviyelerine göre analiz eder. Analiz sonucu malzemedeki elementleri cinsi ve oranları, elementlerin dağılımı, malzemenin homojenliği ve kimyasal bileşenleri belirlenir. 28, 56 ve 90 günlük kür süreleri tamamlanan nano katkılı ve kontrol numunelerinde yapılan basınç dayanımlarından kalan yaklaşık 1x1 cm^2 kesit alanına sahip numunelerimiz örnek olarak çıkarılmış, SEM ve EDS analizleri yapılarak mikro yapıları incelenmiştir.



Şekil 21. SEM cihazı (Taramalı Elektron Mikroskobu)

2.2.7. Donma-Çözünme Döngüleri

Özetle su molekülleri beton içerisinde donduğunda genleşerek betonda iç gerilmeler oluşturur, çözündüğünde ise bu döngü tekrar eder ve mikro çatlaklar oluşturur. Sürekli tekrar eden bu döngüyle mikro çatlaklar birleşerek büyük makro çatlaklara dönüşebilir. Sürekli tekrar eden genleşen ve büzülen betonda zamanla iç yapının bozulmasına dolayısıyla mekanik dayanımı azalır. Beton içine giren suyla birlikte klorür ve sülfatlar gibi zararlı maddelerde beton içerisine girerek korozyona ve kimyasal hasara yol açabilir. 90 günlük kür süresi olan %1, %2 nano $TİO_2$ içeren ve kontrol numuneleri 60 donma-çözünme döngüsü uygulanarak testlere tabi tutulmuştur. Her döngünün periyodu 12 saatlik donma (-20°C) ve 12 saatlik çözülmeden (20°C) oluşmaktadır. Bu amaç için donma çözülme kabinin sıcaklıkları ve periyotlarını ayarlayarak donma çözülme deneyi ASTM C666'ye göre yapılmıştır. Numunelerin üzerinde donma çözülme etkisini incelemek için deneyin öncesi ve sonrası numunelerin, ağırlık ölçümü ve ultrases geçiş hızı okumaları yapılmıştır.

2.2.8. 3D Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleri

Nano katkılı ve şahit numunelerin 60 donma-çözünme döngüleri tamamlandıktan sonra içyapı hasarlarını belirlemek amacıyla yüksek çözünürlüklü yeni nesil üç boyutlu (3D) Bilgisayarlı Tomografi cihazı kullanılmıştır. Ankara Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları'nda bulunan CT tarama cihazı kullanılmıştır. Görüntüleme işlemi sırasında, 0,75 derece açısal çözünürlük ve 0,12 µm pixel boyutu kullanılmıştır (Şekil 22).



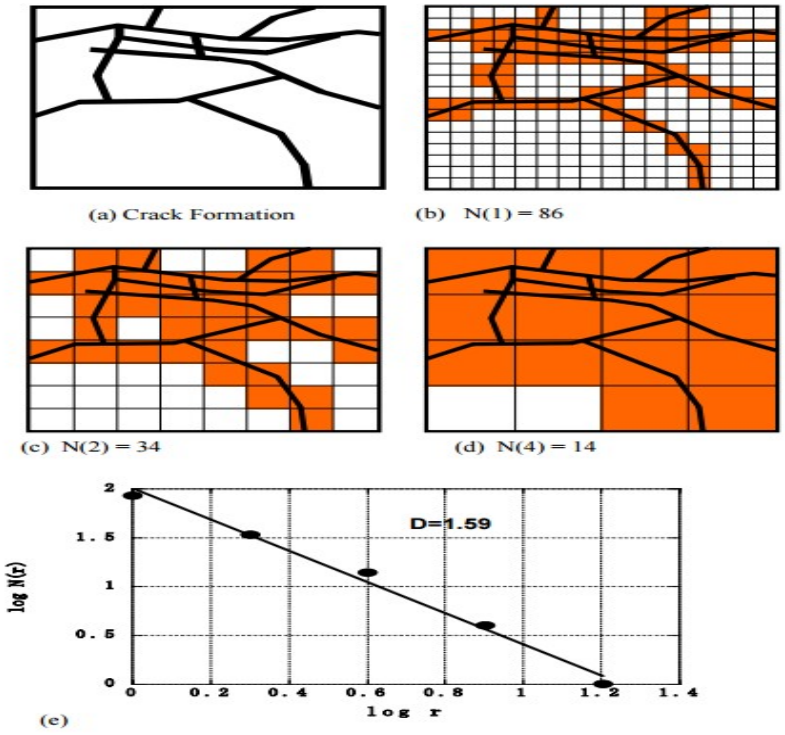
Şekil 22. 3D Tomografi tarama cihazı

2.2.9. Dijital Çatlak Analizi

Dijital çatlak analizi 3D Tomografi cihazı ile malzemelerdeki mikro ve makro çatlakların boyutu, yönü, yayılımı ve gelişimi gibi özelliklerini belirlenmesi, yapısal bütünlüğün değerlendirilmesi için kullanılan görüntüleme yöntemidir. Uygun boyutlarda tomografi cihazına yerleştirilen numuneler X-ışınları ile taranarak iç yapıları elde edilir ve 2D kesit görüntüleri birleştirilerek 3D model oluşturulur. Bilgisayarlı tomografi görüntüleme sonrası, numunelerde çatlak özelliklerini belirlemek için Image J programıyla, sırasıyla fraktal boyutu (çatlakların ne kadar dallandığı ve karmaşık yapısını belirleyen matematiksel parametre), çatlak büküklüğü (tortuosity) ve çatlak yoğunluğu hesaplanmıştır.

CT görüntüleme sonrasında, Image J programı ve Fraktal konsepti kullanılarak hasar görmüş numunelerde belirlenecek çatlak karakteristikleri sırasıyla; fraktal boyutu, çatlak büküklük miktarı (tortuosity) ve çatlak yoğunluğu bulunmuştur. Düzensiz şekillerin geometrisini tanımlamak için kullanılan fraktal boyutu en yaygın

kutu yöntemi (Box Counting) kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntemin esasında bir şeklin sınırları, üzerindeki noktalar arasındaki uzunluklar veya mesafeler kare kutular veya ağ dizeleri kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 23). Şekil 23'te görüldüğü üzere üzerinde çalışılan çatlak görüntüsüne spesifik boyuttaki (r) kutular atanır ve çatlak alanını kapsayan kutuların toplam sayısı (N) şekilde de görüldüğü üzere (N(r) ya da (N (1)) olarak belirlenir. Burada altı çizilmesi gereken noktalardan biri de çatlak alanını kapsayan kutuların toplam sayısının atanan spesifik kutuların boyutunun bir fonksiyonu olarak ifade edilmesidir. Bu işlem farklı kutu boyutları için tekrar edilir (Şekil 23 c-d) ve belirlenen kutuların sayıları (log N(r)) seçilen kutu boyutlarına (log r) karşı logaritmik ölçekte grafiklenir (Şekil 23'e).



Şekil 23. Fraktal boyutun kutu yöntemiyle hesaplanması

X-ray CT görüntüler elde edildikten sonra dijital görüntü işleme programı (Image J) kullanılarak çatlak haritaları çıkarılmış ve fraktal boyutları hesaplanmıştır. Image J programı kutu yöntemi (Box Counting) kullanarak fraktal boyutunu otomatik olarak hesaplamaktadır. Örnek olması açısından hesaplanan fraktal boyutunun yüksek

değerde olması, içyapı içinde tek geniş bir çatlak oluştuğu veya büyükçe bir çatlak alanının mevcut olduğunu temsil etmektedir. Çatlak büküklük miktarı (tortuosity) ve çatlak yoğunluğu, çatlak yapılarını karakterize etmede kullanılacak diğer parametreler olacaktır. Fraktal boyutu gibi bu iki parametre de kırılma mukavemetiyle ilişkilendirilebilir ve kırılma davranışının anlaşılmasında çok kıymetli bilgiler sağlayabilmektedir. Çatlak yoğunluğu (mm/mm^2); görüntülenecek alandaki toplam çatlak uzunluğunun görüntü alanına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Çatlak büküklük miktarı ise, Akhavan [2011] tarafından önerilen metot kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntemde gerçek çatlak görüntüsü, x-z koordinat takımındaki bir çatlak profiline dönüştürülmüştür. Bu çatlak profilinden yararlanarak, nominal çatlak uzunluğu (Xmak) ve etkili uzunluk (Le) belirlenmiştir. Xmak değerinin Le değerine oranının karesi formülü kullanılarak çatlak büküklük miktarı hesaplanmıştır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

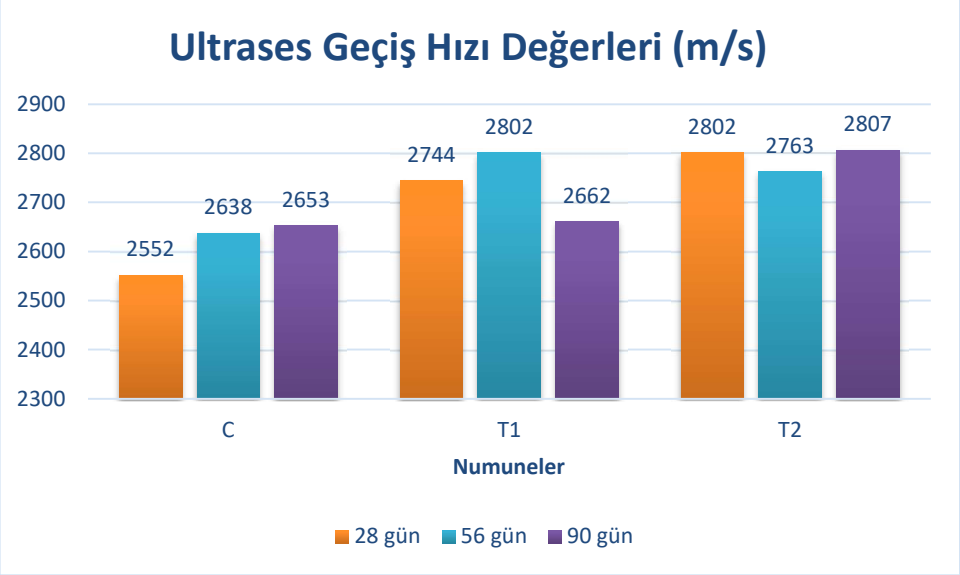
ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Deney Sonuçları

Tablo 10'da Geopolimer numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri verilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri 2552 m/s ile 2807 m/s arasında değişmektedir. Nanomalzeme içermeyen kontrol numuneleri (Kontrol) C, nano malzemeli T1,T2 numunelere göre en düşük geçiş hızına sahiptir. Bunun sebebi ise nano malzemeli numuneler daha yoğun matrise sahip olmakta ve boşluk oranı/miktarı az olduğu için ultrases geçiş hızı değerleri yüksektir. Ultrases sonuçları incelendiğinde, en düşük geçiş hızı değerleri C (Kontrol) numunesinde elde edilmiştir. Nano malzemeli numunelerden %2 $TİO_2$ içeren numune T2, diğer %1 $TİO_2$ içeren numuneye T2 göre daha yüksek geçiş hızına sahiptir ve bunun nedeni ise boşluk oranının az olmasından dolayıdır. Nanomalzeme içermeyen numunelerde kür süresi uzadıkça ultrases geçiş hızı değerleri artmakta, nanomalzeme içeren numunelerde ise kür süresi uzadıkça ultrases geçiş hızı süreleri artmakta veya azalmaktadır. Bunun nedeni ise T1 ve T2 numunelerindeki $TİO_2$ nano partikülleri genellikle reaktif bir bileşen olarak değil, dolgu veya yüzey aktif katkı maddesi olarak çalışır.

Tablo 10. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri (m/s)

Numune	28 gün	56 gün	90 gün
C	2552	2638	2653
T1	2744	2802	2662
T2	2802	2763	2807



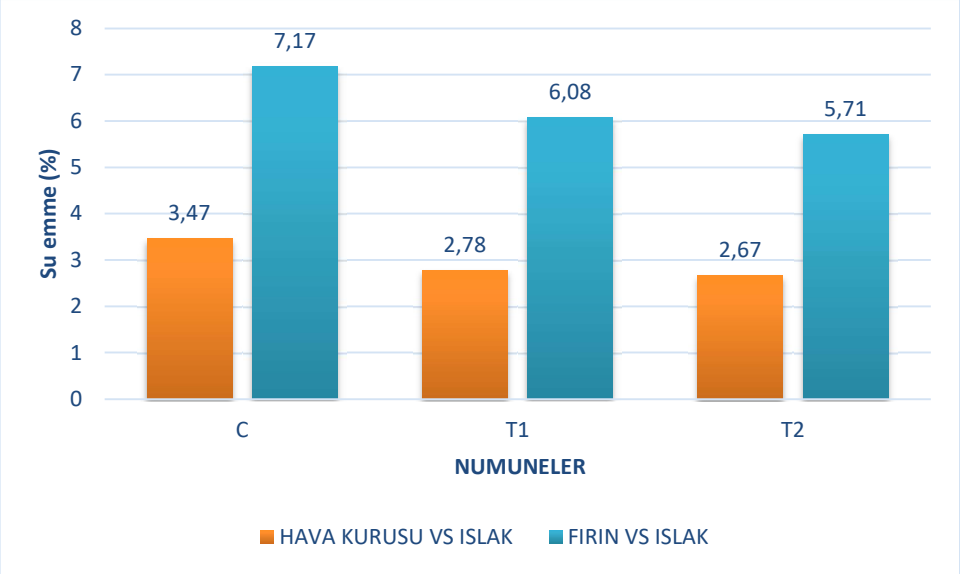
Şekil 24. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri (m/s)

3.2. Su Emme Kapasitesi Deney Sonuçları

Tablo 11'de geopolimer numunelerin su emme sonuçları verilmiştir. Sonuçlara göre, en yüksek su emme değerleri nanomalzeme içermeyen (kontrol) C numunelerinde olurken, en düşük su emme ise sırasıyla %2 TiO_2 içerikli T2, %1 TiO_2 içerikli T1 numunelerinde olmuştur. Boşluk oranının az olması dolayısıyla nano malzemeli numuneler daha düşük su emme kapasitesine sahiptir.

Tablo 11. Numunelerin su emme sonuçları (%)

Numune	Hava kurusu (g)	Islak (g)	Fırın (g)	Hava kurusu vs Islak (%)	Ortalama Fark (%)	Fırın vs Islak (%)	Ortalama Fark (%)
C1	282,74	293,30	272,9	3,73		7,48	
C2	262,1	268,9	253,04	2,59	3,47	6,27	7,17
C3	264,06	274,8	255,02	4,07		7,76	
T1-1	274,12	279,7	264,28	2,04		5,83	
T1-2	271	278,54	261,33	2,78	2,78	6,59	6,08
T1-3	296,17	302,28	285,62	2,06		5,83	
T2-1	288,49	295,42	280,3	2,40		5,39	
T2-2	270,79	279,69	263,34	3,29	2,67	6,21	5,71
T2-3	283,3	289,86	274,67	2,32		5,53	



Şekil 25. Numunelerin su emme sonuçları (%)

3.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

40X40X160 mm prizmatik boyutlara sahip numunelerde 3 noktalı eğilme dayanımı yük kontrollü olacak şekilde yüklenip dayanım değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, bu 15x50x300 mm prizma numuneleri üzerinde deformasyon kontrollü üniversal test makinesi ile 0.005 mm/sn hızla yükleme yapılarak 28, 56 ve 90 günlük numunelerin yük-deplasman grafikleri çıkarılarak nanomalzemelerin bu eğrileri ne denli değiştirdiği belirlenmiştir. Elde edilen ortalama eğilme dayanımı 3 adet 40x40x160 mm numunenin eğilme dayanımı ortalamasını göstermektedir. Tablo 12'e numunelerin ortalama eğilme dayanımı sonuçları verilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde eğilme dayanımı sonuçları da artan geopolimerizasyon reaksiyonlarından dolayı zamanla artmıştır ve en yüksek eğilme dayanımları 90. günde elde edilmiştir.

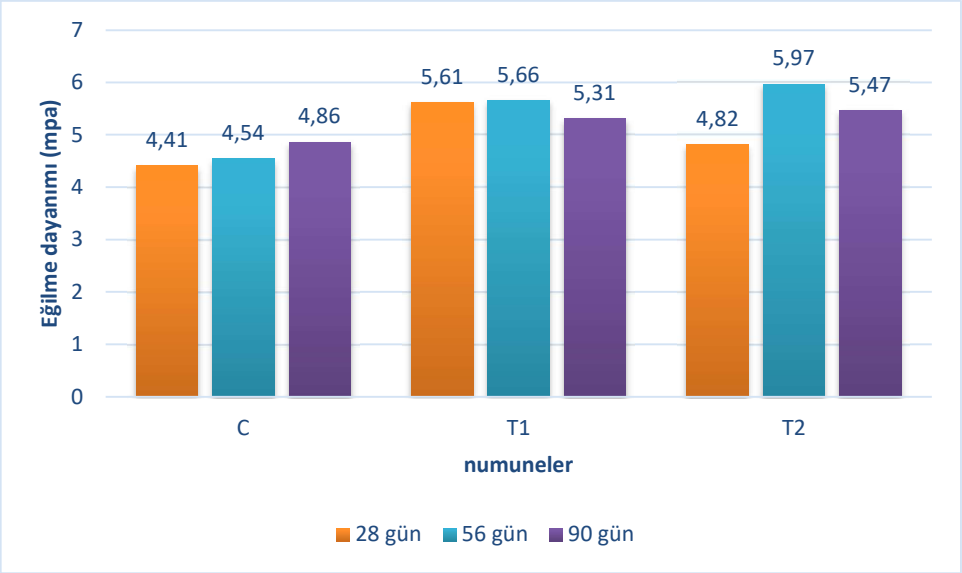
28. günde nanomalzeme kullanılmayan (kontrol) C numunesi (4,41 MPa) referans alındığında, eğilme dayanımındaki artış %1 nano-TiO_2 eklenmesi ile %27, %2 nano-TiO_2 eklenmesi ile %9,

56. günde nanosuz (kontrol) numunesi (4,54 MPa) referans alındığında, eğilme dayanımındaki artış %1 nano-TiO_2 eklenmesi ile %25, %2 nano-TiO_2 eklenmesi ile %32,

90. günde nanosuz (kontrol) numunesi (4,86 MPa) referans alındığında, eğilme dayanımındaki artış %1 nano-TiO_2 eklenmesi ile %9, %2 nano-TiO_2 eklenmesi ile %13 artmıştır.

Tablo 12. Numunelerin 28, 56, ve 90 gün sonra eğilme dayanımı (MPa)

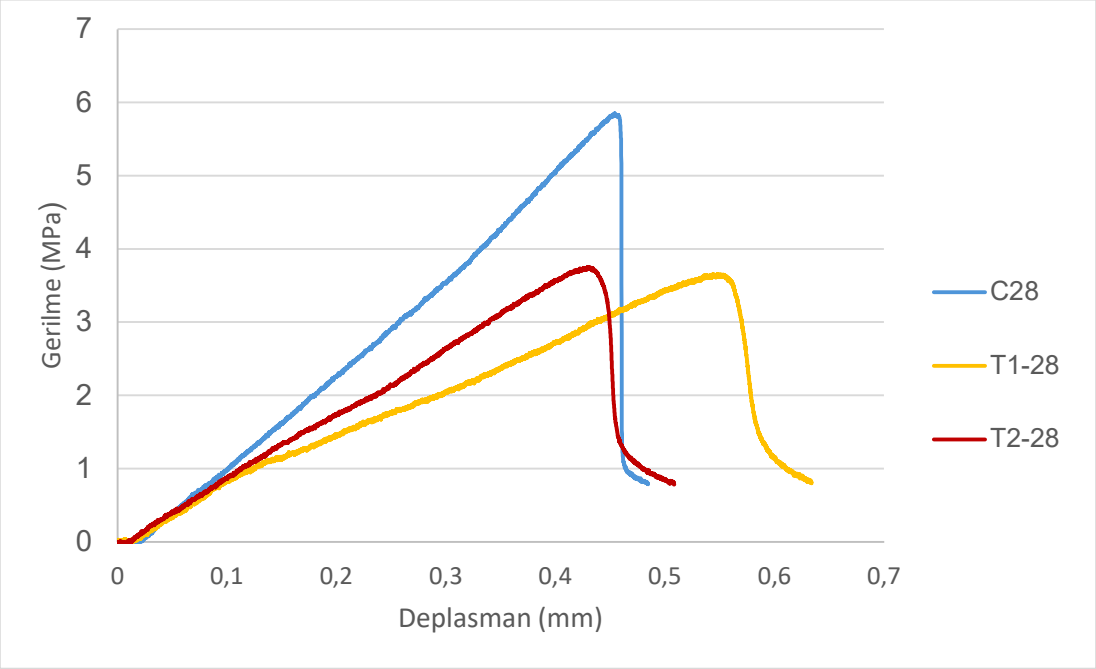
Numune	28 gün	56 gün	90 gün
C	4,41	4,54	4,86
T1	5,61	5,66	5,31
T2	4,82	5,97	5,47



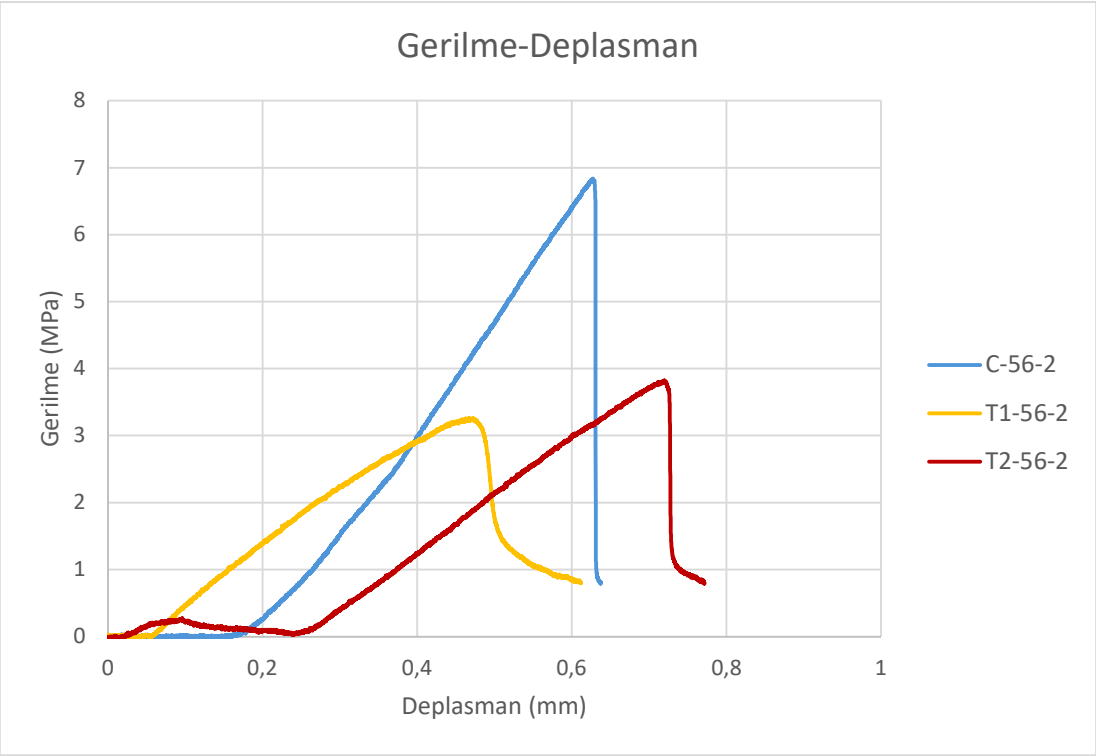
Şekil 26. Numunelerin 28, 56 ve 90 gün sonra eğilme dayanımı (MPa)

3.4. Gerilme-Deplasman Deney Sonuçları

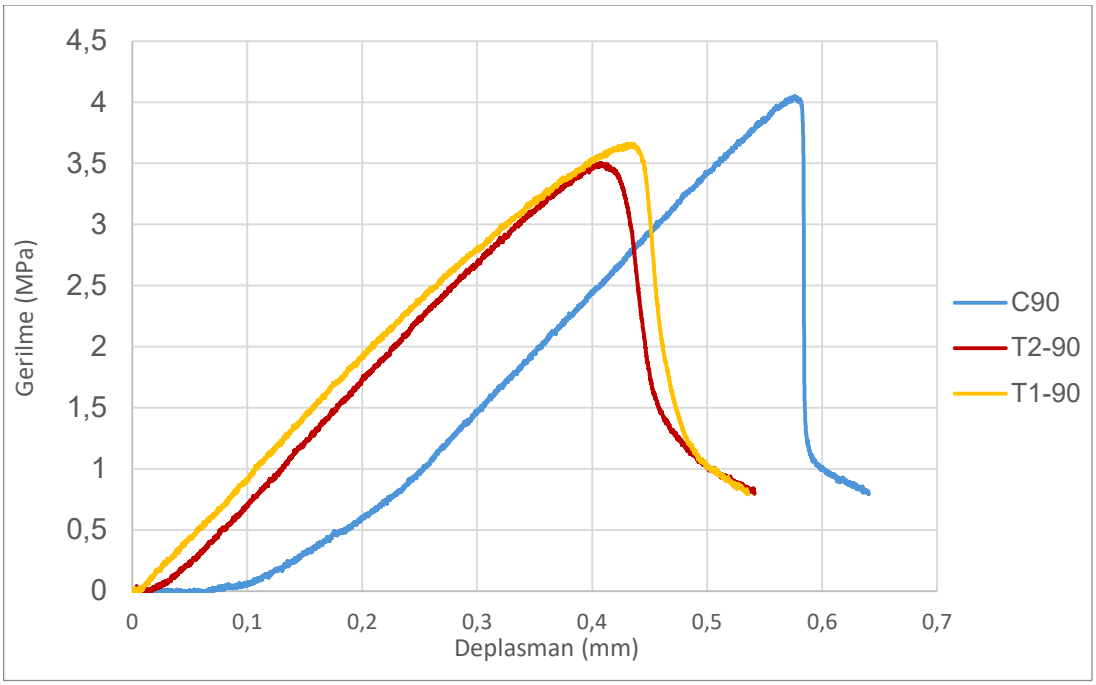
15x50x300 mm boyutlu geopolimer numunelerin 3 noktalı eğilme deneyleri Kastamonu Üniversitesi'nde yapılmış olup Şekil 27'de 28 günlük, Şekil 28'de 56 günlük ve Şekil 29'da 90 günlük kür süreleri tamamlanan numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Elde edilen gerilme-deplasman eğrilerine göre, nanomalzeme içeren numunelerin elastisite modülleri nano içermeyen (kontrol) numunelerinden daha yüksek bulunmuştur. Eğilme dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, %1 ve %2 oranlarında kullanımı geopolimer numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde pek nanomalzeme fazla bir değişikliğe sebep olmamıştır. Benzer sonuç eğilme dayanımı değerlerinde de mevcuttur. En yüksek enerji yutma kapasiteleri sırasıyla C-90 (kontrol) numunelerinde, T1-90 (%1 nano titanyum) ve en düşük enerji yutma kapasitesi de T2-90 (%2 nano titanyum) numunelerinde elde edilmiştir. Nano titanyum içeren geopolimer numuneler daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı değeri göstermesine rağmen, enerji yutma kapasitesi düşük bulunmuştur. Bunun sebebi olarak nano-titanyum tozunun reaksiyona girmemesi ve homojen olarak karışım içinde dağılamaması gösterilebilir.



Şekil 27. C, T1 ve T2 numunelerin 28 günlük gerilme-deplasman grafikleri



Şekil 28. C, T1 ve T2 numunelerin 56 günlük gerilme-deplasman grafikleri



Şekil 29. C, T1 ve T2 numunelerin 90 günlük gerilme-deplasman grafikleri

3.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

3000 kN kapasiteli press kullanılarak geopolimer karışımlarının 28, 56 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımı ASTM C39 standardına göre belirlenmiştir. Üretilen 40x40x160 mm numuneler ilk önce 3 noktalı eğilme testine tabii tutulduktan sonra kalan 2 yarım numuneler üzerinde 40x40x40 mm numuneler üzerinde basınç testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ortalama basınç dayanımı 6 yarım numunenin basınç dayanımı ortalamasını göstermektedir. Tablo 13'te üretilen numunelerin ortalama basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kür süresi arttıkça devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından dolayı numunelerin ortalama basınç dayanımı artmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde nanomalzeme eklenmesi numunelerin basınç dayanımını artırmıştır.

28. günde kontrol numunesi (27,64 MPa) baz alındığında, basınç dayanımındaki artış %1 nano-TiO_2 eklenmesi ile %20 oranında, %2 nano-TiO_2 eklenmesi ile %27 oranında artmıştır.

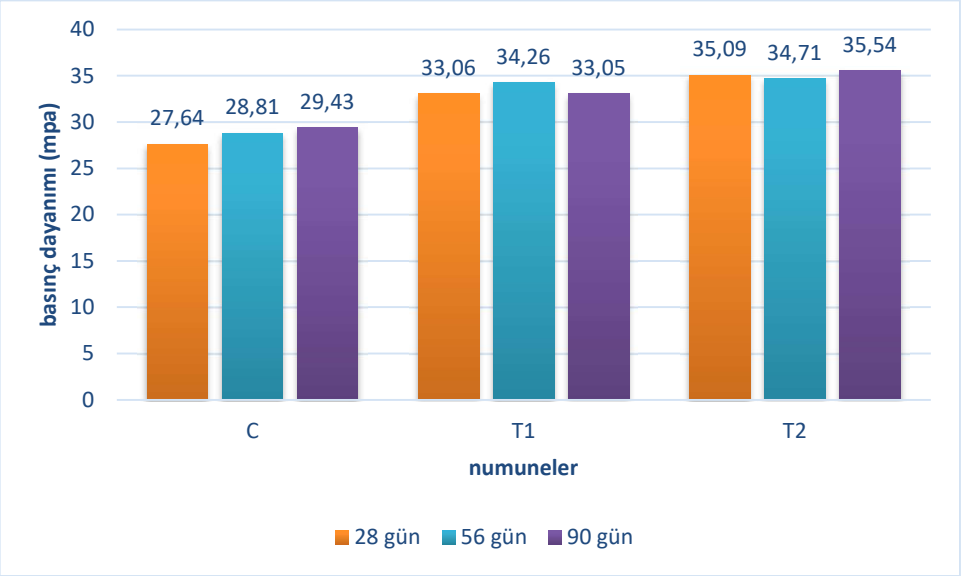
56. günde nanosuz (kontrol) numunesi (28,81 MPa) referans alındığında, basınç dayanımındaki artış %1 nano-TiO_2 eklenmesi ile %19, %2 nano-TiO_2 eklenmesi ile %20 oranında artmıştır.

90. günde nanosuz (kontrol) numunesi (29,43 MPa) referans alındığında, basınç dayanımındaki artış %1 nano-TiO_2 eklenmesi ile %12, %2 nano-TiO_2 eklenmesi ile %21 oranında artmıştır.

Nano-TiO_2 düşük dane boyutu nedeniyle boşlukları doldurup ara yüzey bölgesini iyileştirerek dayanım artışına sebep olmuştur. %2 oranında nano içeren numunelerde basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen, birçok numunede %1 oranında nano eklenmesi de dayanımı yüksek oranda arttırmıştır. Bu proje kapsamında ise nano-titanyumun %1'den %2 oranına çıkması ile basınç dayanımında %8 oranında bir dayanım artışı meydana gelmiştir.

Tablo 13. Numunelerin basınç dayanımı sonuçları (MPa)

Numune	28 gün	56 gün	90 gün
C	27,64	28,81	29,43
T1	33,06	34,26	33,05
T2	35,09	34,71	35,54

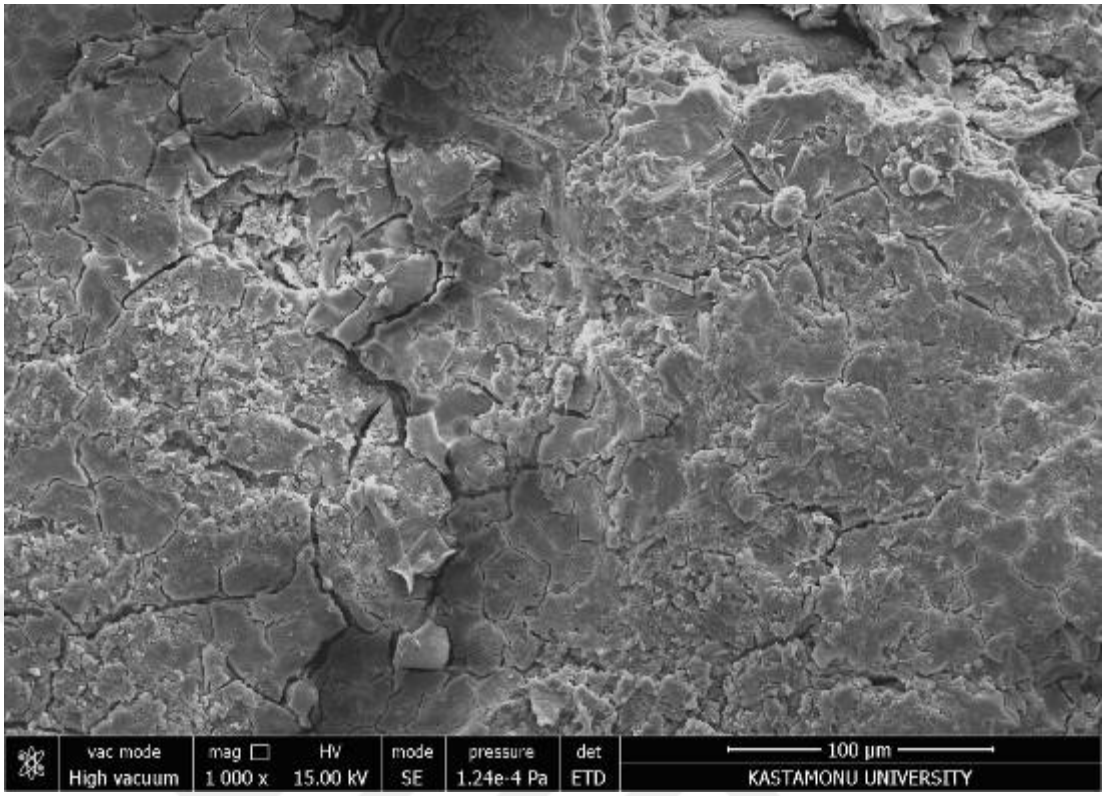


Şekil 30. Numunelerin basınç dayanım sonuçları (MPa)

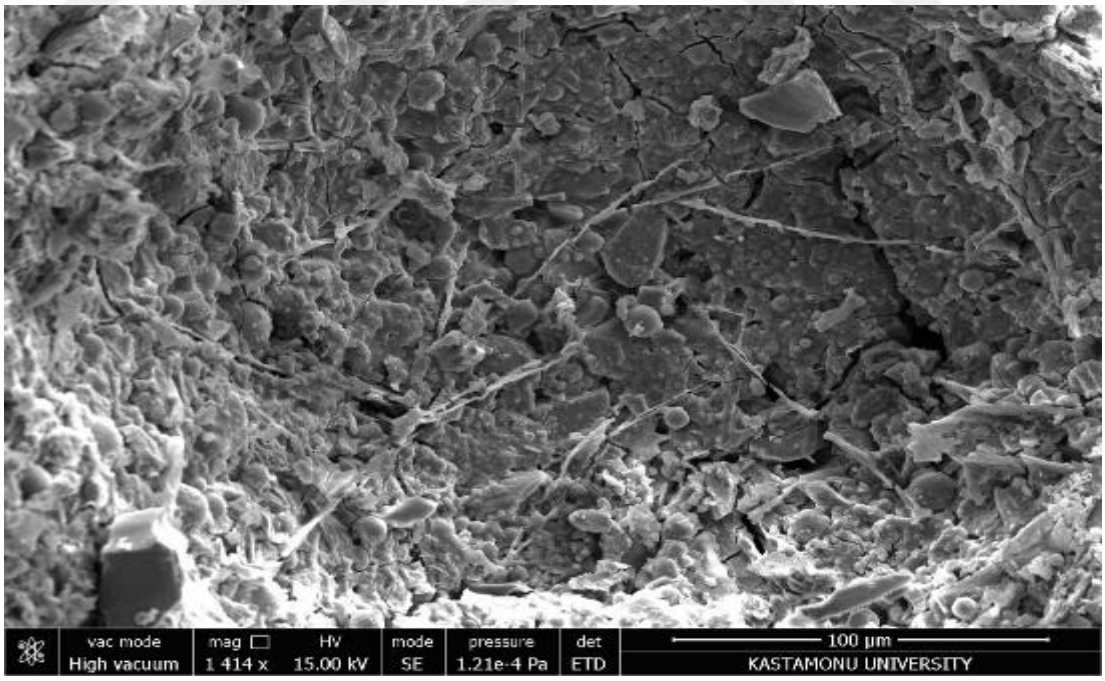
3.6. SEM ve EDS Analizleri Sonuçları

Şekil 31'de nano içermeyen geopolimer numunelerin içyapısı görülmektedir. SEM fotoğraflarına göre, kontrol numunelerinde birbiri ile bağlantılı uzun çatlaklar görülmektedir ve bu çatlaklar büzülme nedeniyle oluşan çatlaklardır. Çatlaklara ek olarak boşluklar ve gözeneklerde mikro yapıda göze çarpmaktadır. Buna ek olarak reaksiyona girmeyen küresel şekilli uçucu kül parçacıkları ve kısmi geopolimerizasyona uğramış uçucu kül parçacıkları görülmektedir. Bu da geopolimerizasyon sürecinin tamamlanmadığını göstermektedir. Ayrıca, düzensiz şekilli cüruf parçacıkları SEM mikrografında az sayıda olsa da görülmektedir. Bu da cürufların büyük çoğunluğunun geopolimerizasyona uğradığını, reaksiyona girmeyen cüruflar parçacıklarının az olduğunu göstermektedir. Şekil 32 %1 nano titanyum içeren geopolimer numunelerin içyapısını göstermektedir. Şekil 32'da homojen olarak

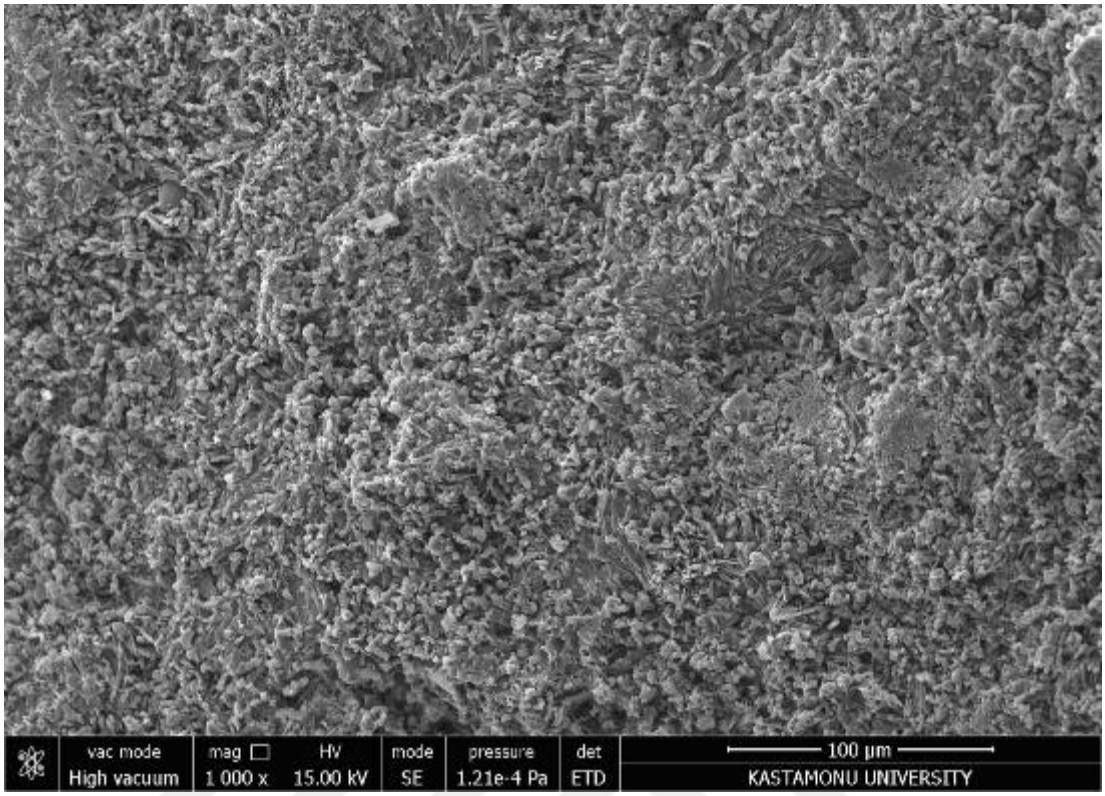
dağılmış küçük küresel nano titanyumlar gözlenmektedir. Reaksiyona girmeyen ve kısmen reaksiyona giren uçucu kül ve cüruf parçacıkları da SEM içyapısında görülmektedir. İğne şeklindeki sodyum kristalleri de geopolimerizasyon sonucu ortaya çıkmıştır. Kontrol numunesine kıyasla daha az sayıda gözenek ve boşluklar vardır, boşluklardan bazıları nano titanyum tarafından dolmaktadır. Ayrıca geniş çatlaklar gözlenmesine rağmen, bu çatlakların birbiri ile bağlantısının olmadığı yani geçirimlilik ve durabilitenin olumlu etkileneceği açıktır. Şekil 33 de ise %2 oranında nano titanyum içeren geopolimer numunelerin içyapısı görülmektedir. Neredeyse tüm boşluk ve gözeneklerin nano titanyum ile dolduğu görülmektedir. Az sayıda görülen reaksiyona girmemiş cüruf ve kül parçacıkları reaksiyon sürecinin devam ettiğini gösterirken, diğer mikro yapılara nazaran daha küçük kılcal mikro çatlaklar ve boşluklar görülmektedir. Fakat nano titanyumlar reaksiyona girmemesinden ötürü bu boşlukların geopolimerizasyon ürünü yerine nano titanyum ile dolması basınç dayanımında düşüşe yol açabilecektir. İçyapıdan da görüleceği gibi çok yoğun bir mikro yapı mevcuttur. Çatlak yoğunluğunun minimum olduğu, gözenek ve boşluk sayısında ise gözle görülür bir düşüş meydana gelmiştir. Fakat geopolimerizasyona uğramamış veya kısmen uğramış cüruf ve kül parçacıkları geopolimerizasyon sürecinin tamamlanmadığını göstermektedir.



Şekil 31. Kontrol numunelerin SEM iç yapı görüntüleri



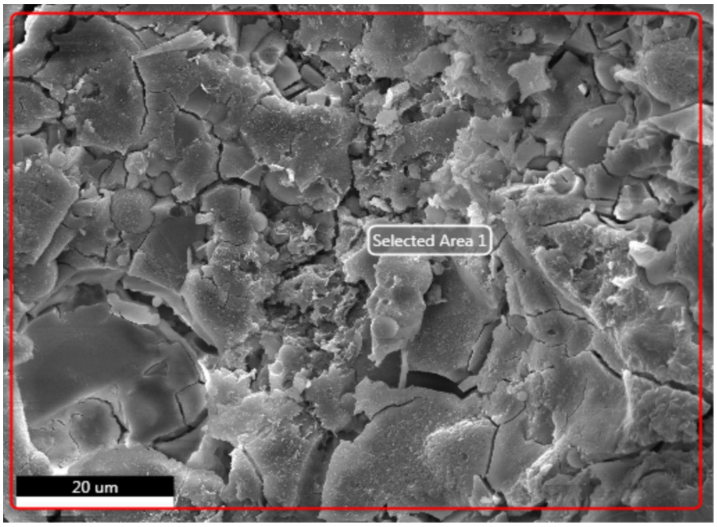
Şekil 32. Nano ikameli geopolimer numunelerin SEM iç yapı görüntüleri %1 nano titanyum numunesi

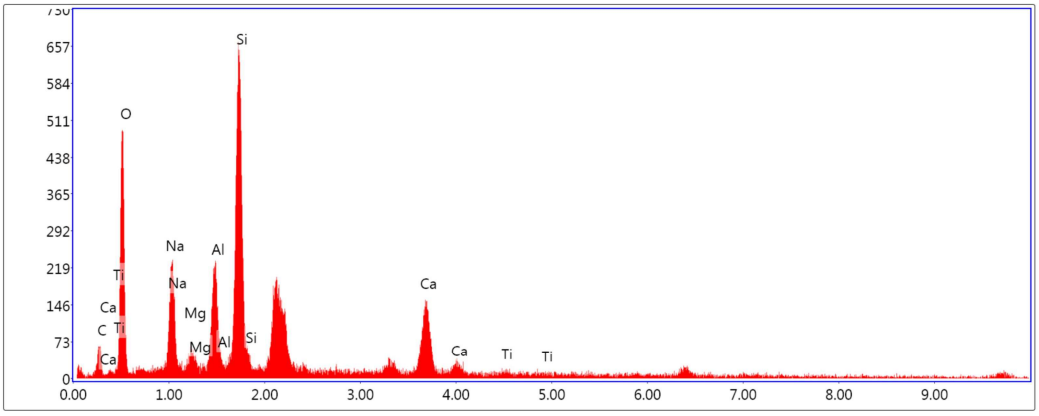


Şekil 33. Nano ikameli geopolimer numunelerin SEM iç yapı görüntüleri %2 nano titanyum numunesi

Şekil 34'te nano içermeyen kontrol numunelerin EDS sonuçlarını göstermektedir. SEM-EDS karakterizasyonu yapıldığında, oksijen (O) ve karbon (C) dışında, Na (sodyum), Al (alüminyum), Si (Silisyum) ve Ca (Kalsiyum) elementleri ana elementler olarak karşımıza çıkmaktadır. Kontrol numuneleri EDS sonuçlarına göre (Şekil 34), sodyum elementinin atomik yüzdesi %7,63, alüminyum elementinin atomik yüzdesi %4,47, silisyum elementinin atomik yüzdesi %14,26 ve kalsiyum elementinin atomik yüzdesi %5,97 bulunmuştur. Şekil 35'te ise %1 nano titanyum içeren geopolimer numunelerin EDS sonuçları görülmektedir. Sonuçlara göre, sodyum elementinin atomik yüzdesi %6,21, alüminyum elementinin atomik yüzdesi %4,63, silisyum elementinin atomik yüzdesi %13,59 ve kalsiyum elementinin atomik yüzdesi %6,28 bulunmuştur. Şekil 36'da ise %2 nano titanyum içeren geopolimer numunelerin EDS sonuçları görülmektedir. Sonuçlara göre, sodyum elementinin atomik yüzdesi %26,90, alüminyum elementinin atomik yüzdesi %0,25, silisyum

elementinin atomik yüzdesi %2,81 ve kalsiyum elementinin atomik yüzdesi %2,29 bulunmuştur. Alkali aktivatörlerdeki Si/Na ve Si/K atomik oranları geopolimerizasyon sürecini çok önemli oranda etkilemektedir. Literatürde yapılan araştırmalarda Si/Na oranının artması numunelerin basınç dayanımının artmasına sebep olmaktadır. Özellikle %2 nano titanyumunda bulunan sodyum piki çok sayıda reaktif olmayan parçacıklara işaret etmektedir. Sonuç olarak aşırı miktarda bulunan sodyum atmosferde karbondioksit ile reaksiyona girerek sodyum karbonat (Na_2CO_3) oluşumuna sebep olurlar bu da mevcut sodyum elementinin fazla olmasını açıklamaktadır. Yapılan EDS analizi sonucuna göre, C-S-H ve N-A-S-H jelleri ana geopolimerizasyon jelleri olarak karşımıza çıkmaktadır. SEM sonuçlarında da görüldüğü üzere cüruf içeriğindeki kalsiyum oksit sebebiyle hızlıca reaksiyona girerek C-S-H ve N-A-S-H jellerini oluştururken, uçucu kül ise bünyesindeki düşük kalsiyum oksitten ötürü yavaş reaksiyona girerek N-A-S-H jellerini oluşturmaktadır.

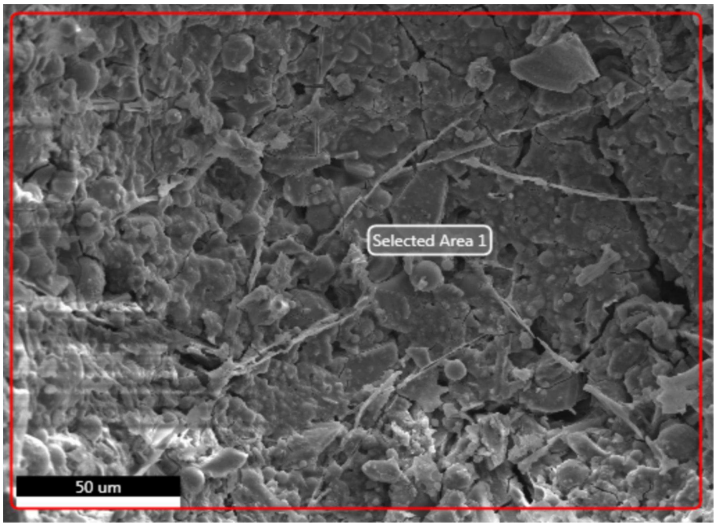


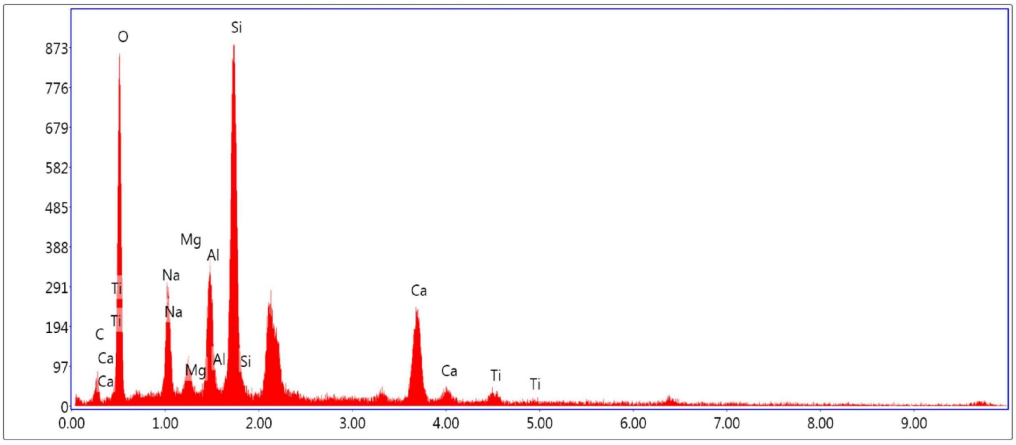


Lsec: 27.6 0 Cnts 0.000 keV Det: Octane Pro Det

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	13.19	21.40	23.18	16.63	0.03	1.1	0.95	0.2	1
O K	37.25	45.36	170.13	10.79	0.11	1.05	0.98	0.27	1
NaK	9.00	7.63	88.74	10.04	0.05	0.95	1	0.53	1
MgK	0.71	0.57	10.15	62.73	0.00	0.96	1.01	0.62	1.01
AlK	6.19	4.47	99.91	7.78	0.04	0.93	1.01	0.74	1.01
SiK	20.55	14.26	341.41	5.09	0.16	0.95	1.02	0.8	1.01
CaK	12.28	5.97	102.32	7.22	0.11	0.89	1.05	0.97	1.02
TiK	0.82	0.33	5.29	58.73	0.01	0.8	1.06	0.97	1.03

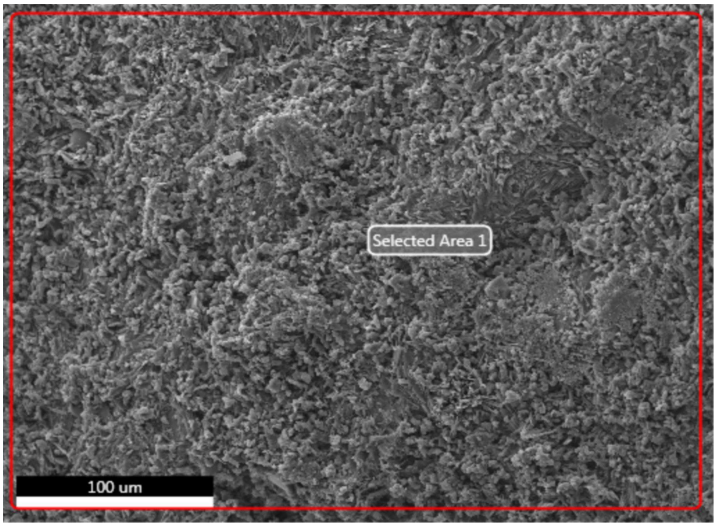
Şekil 34. Kontrol numunelerin EDS sonuçları

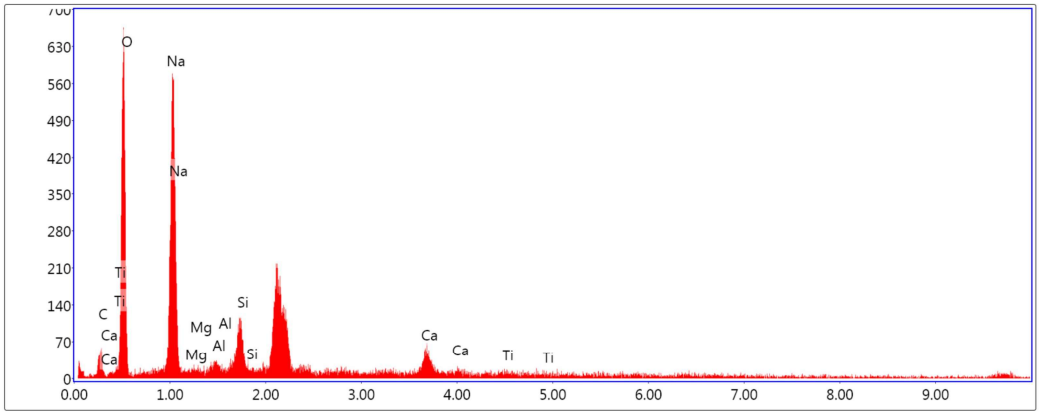




Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	10.22	16.82	27.49	16.12	0.02	1.11	0.95	0.2	1
O K	40.90	50.51	285.71	10.08	0.12	1.05	0.97	0.28	1
NaK	7.23	6.21	102.97	10.05	0.04	0.95	1	0.51	1
MgK	1.51	1.23	32.27	17.31	0.01	0.97	1.01	0.62	1.01
AlK	6.33	4.63	151.27	6.98	0.04	0.93	1.01	0.73	1.01
SiK	19.32	13.59	477.24	4.77	0.15	0.95	1.02	0.79	1.01
CaK	12.74	6.28	159.26	5.93	0.11	0.89	1.05	0.97	1.02
TiK	1.76	0.73	16.96	27.79	0.01	0.8	1.06	0.97	1.03

Şekil 35. Nano ikameli geopolimer numunelerin EDS sonuçları. %1 nano titanyum numunesi





Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	R	A	F
C K	11.09	16.87	18.58	17.60	0.03	1.1	0.97	0.27	1
O K	44.11	50.38	210.16	8.92	0.19	1.04	0.99	0.42	1
NaK	33.83	26.90	235.86	7.64	0.18	0.94	1.01	0.55	1
MgK	0.05	0.03	0.35	99.99	0.00	0.96	1.02	0.48	1
AlK	0.36	0.25	3.28	69.61	0.00	0.92	1.02	0.61	1
SiK	4.32	2.81	44.89	12.00	0.03	0.94	1.03	0.73	1.01
CaK	5.03	2.29	29.22	18.02	0.04	0.88	1.06	0.99	1.03
TiK	1.21	0.46	5.48	58.35	0.01	0.79	1.06	0.99	1.04

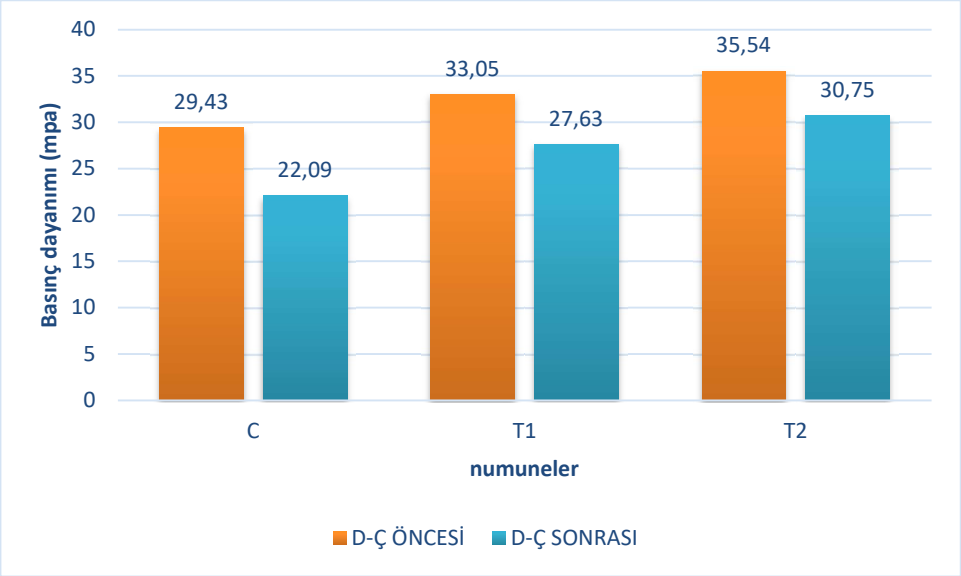
Şekil 36. Nano ikameli geopolimer numunelerin EDS sonuçları. %2 nano titanyum numunesi

3.7. Donma-Çözünme Sonuçları

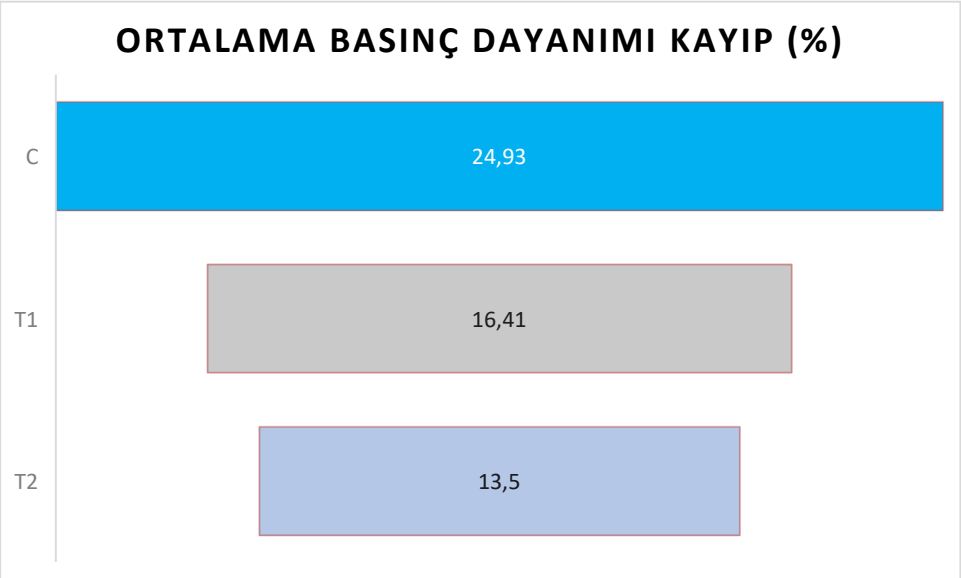
90 günlük nano katkılı 40X40X160 mm geopolimer numuneleri 60 döngülü donma-çözülme deneyine tabi tutulduktan sonra basınç dayanımlarındaki değişim Tablo 14'te gösterilmiştir. 60 donma-çözünme sonrası kontrol numuneleri donma-çözünme çevrisi öncesine göre dayanımının %24,93'ünü kaybetmiştir. Basınç dayanımı kaybı %1 nano titanyum katkılı geopolimer numunelerde %16,41 ve %2 nano titanyum katkılı geopolimer numunelerde ise %13,50 bulunmuştur. Kontrol numunelerinden sonra donma-çözünme sonrası en yüksek dayanım kaybı sırasıyla %1 ve %2 nano titanyum içeren numunelerde gerçekleşmiştir.

Tablo 14. Numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç dayanımları (MPa)

NUMUNE	DÇ-ÖNCESİ (MPa)	DÇ-SONRASI (MPa)	ORTALAMA KAYIP (%)
C	29,43	22,09	24,93
T1	33,05	27,63	16,41
T2	35,54	30,75	13,50



Şekil 37. Numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç dayanımları (MPa)

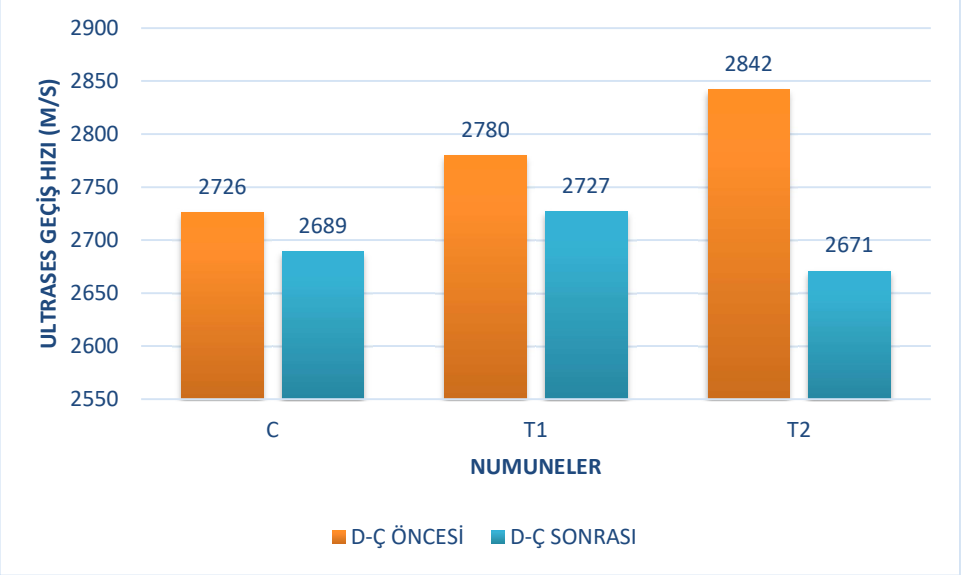


Şekil 38. Numunelerin donma-çözünme sonrası basınç dayanım kayıpları (%)

Tablo 15'te donma-çözünme deneyine tabii tutulan numunelerin donma-çözünme öncesi ve donma-çözünme sonrası ultrases geçiş hızı değerleri verilmiştir. Donma-çözünme öncesi ve sonrası numune ağırlıkları ölçülmüş olup, numunelerde donma-çözünme sonrası ağırlık kayıpları meydana gelmiştir. Numunelerde en yüksek ağırlık kaybı kontrol numunelerinde %1,29 olurken, %1 nano titanyumlu numunelerde ağırlık kaybı %1,25 ve %2 nano titanyumlu numunelerde ağırlık kaybı %0,80 olmuştur. Donma-çözünme sonucu ağırlık kaybı ile dayanım kaybı sonuçları birbirine paralel çıkmıştır.

Tablo 15. Donma-çözünme deneyine tabii tutulan numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı değerleri (m/s)

NUMUNE	DÇ-ÖNCESİ	DÇ-SONRASI
C	2726	2689
T1	2780	2727
T2	2842	2671



Şekil 39. Donma-çözünme deneyine tabii tutulan numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası ultrases geçiş hızı değerleri (m/s)

3.8. 3D Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerinin İncelenmesi ve Fraktal Analizleri

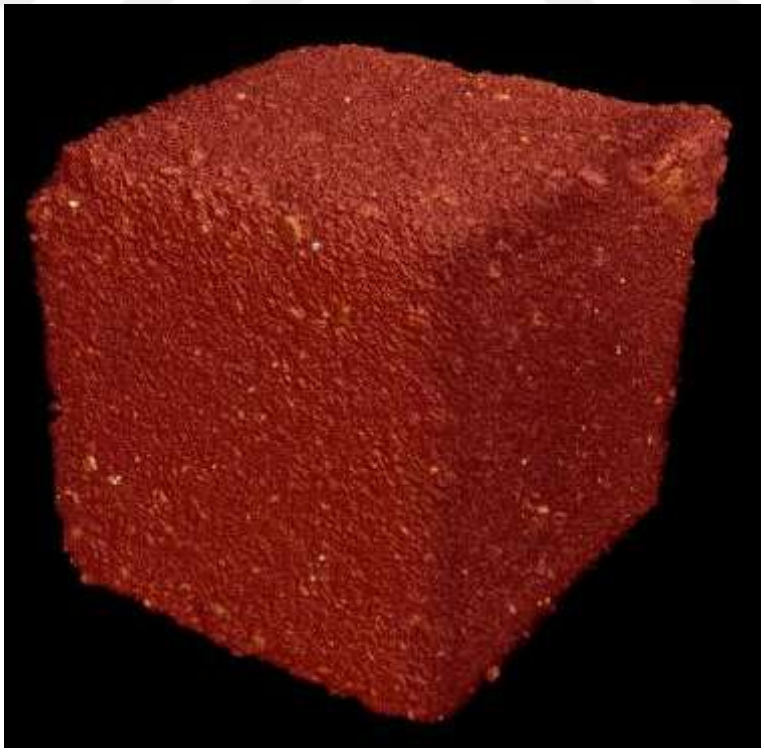
Donma-çözülme çevrimine maruz bırakılan numunelerinin içyapı hasarlarını inceleyebilmek amacıyla numunelerin bilgisayarlı tomografi çekimleri yapılmıştır. Üç farklı geopolimer kompozit prizma numuneler (referans ve tekli nano malzemeli) yükseklikleri boyunca 360 derece döndürülerek 150 mikron pixel boyutunda 480 iz düşüm görüntüleri toplanmış ve böylece iki boyutlu görüntü dizileri elde edilmiştir. Hasarsız X-ray CT sisteminden yakalanan bu görüntüler, Image J görüntü işleme programının standart özellikleri kullanılarak üç boyutlu modellere dönüştürmek için DICOM görüntülerine çevrilmiştir.

Üretilen 3D X-ray Bilgisayarlı Tomografi görüntüleri (Şekil 40, 41, 42) ve Image J dijital görüntü işleme programı kullanılarak yapılan analiz neticesinde elde edilen Fraktal boyutları (D) (Şekil 43, 44, 45) görülmektedir. Ayrıca, elde edilen fraktal boyut değerleri ve Yöntem kısmında belirtilen Guo et al. Formülasyonu kullanılarak numunelere ait kırılma yayılma enerjileri (Ws/Gf) hesaplanmıştır. Numunelere ait fraktal boyut değerleri (D) ve kırılma yayılma enerjileri (Ws/Gf) Tablo 16'da sunulmuştur.

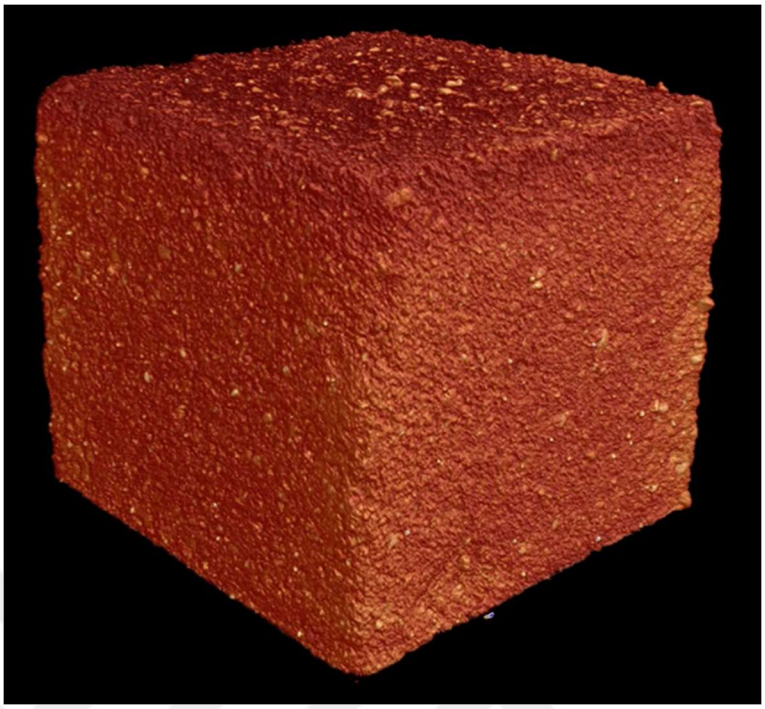
Tablo 16. Numunelere ait fraktal boyut ve kırılma yayılma enerjileri

Numune	Fraktal Boyut (D)	Ws/Gf (mm)
C	1,1562	57,3
T1	1,3039	80,5
T2	1,3652	92,7

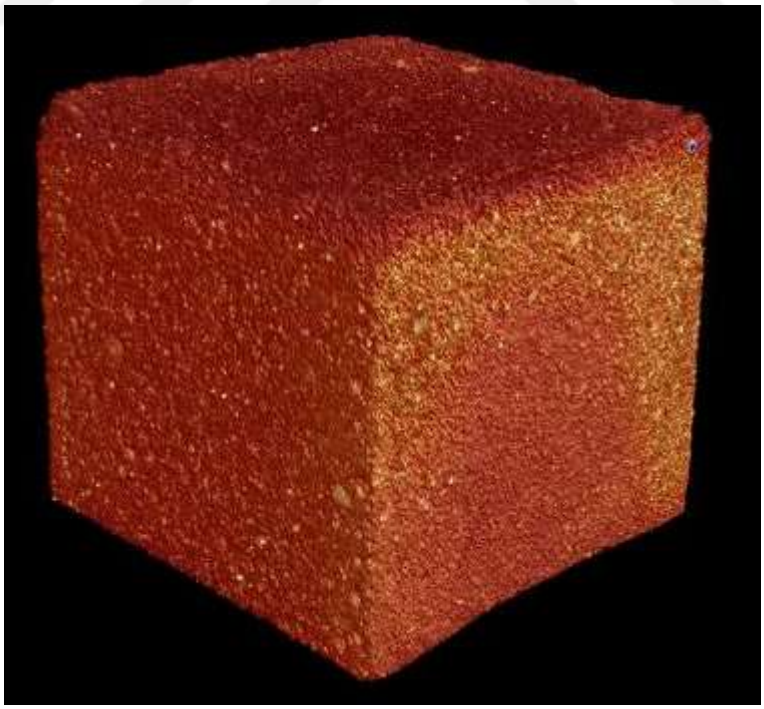
Tablo 16'da elde edilen kırılma yayılma enerjileri değerleri incelendiğinde, (Ws/Gf) değerinin kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında karışımlara nano-parçacık ilave edilmesiyle birlikte arttığı görülmektedir. Ağırlıkça %1 ve %2 nano titanyum ilaveli numunelerinin (T1 ve T2) kırılma yayılma enerjisi (Ws/Gf), kontrol numunesine (C) göre sırasıyla %40 ve %62 oranında artmıştır. Buna ilave olarak, elde edilen sonuçların donma çözülme döngüsü sonrasında numunelerde elde edilen basınç dayanımı ve ultrases değerleriyle uyumlu olduğu ve artan nano parçacık yüzdesine bağlı olarak donma çözülme sonrası basınç dayanımlarında kayıp değerlerinin önemli ölçüde azaltılabildiği görülmüştür. Artan nano titanyum yüzdesine bağlı olarak donma çözülme sonrası basınç dayanımlarındaki kayıplar önemli ölçüde azaltılabilmiştir.



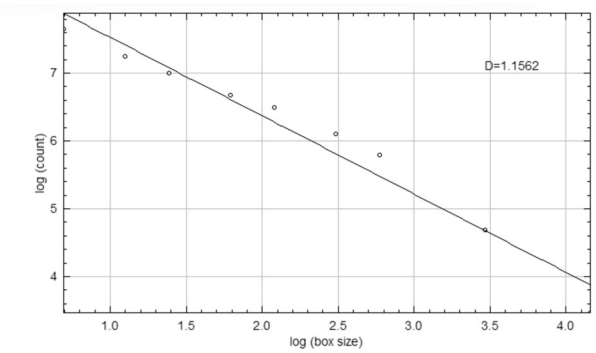
Şekil 40. C numunesine ait 3D tomografi görüntüsü



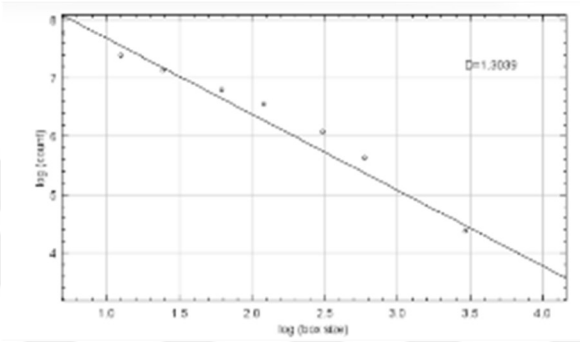
Şekil 41. T1 numunesine ait 3D tomografi görüntüsü



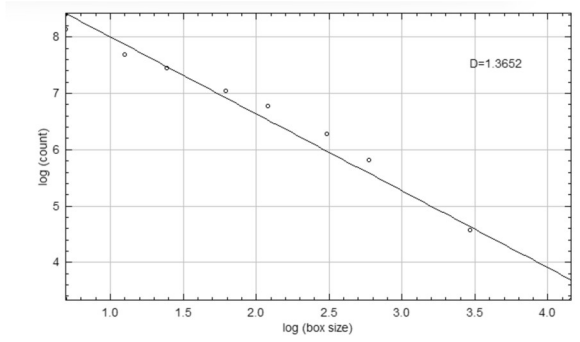
Şekil 42. T2 numunesine ait 3D tomografi görüntüsü



Şekil 43. C numunesine ait fraktal boyutu



Şekil 44. T1 numunesine ait fraktal boyutu



Şekil 45. T2 numunesine ait fraktal boyutu

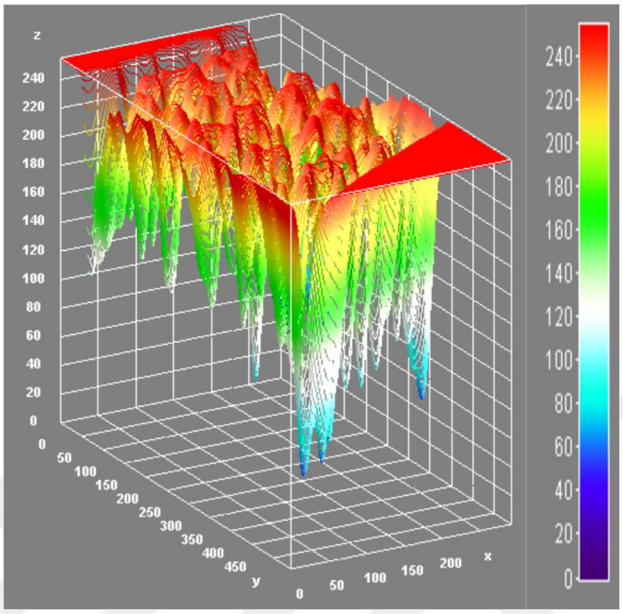
3.9. Dijital Çatlak Analizi Sonuçları

Sürekli hasar mekaniğine göre, bir kompozitin kırılma yüzeyi neden hasar uğradığının anlaşılmasında önemli bir kanıttır ve kırılmanın mikro mekanizmasını ortaya çıkarmaya yardımcı olabilir ve kompozit malzemelerin kırılma davranışının ve

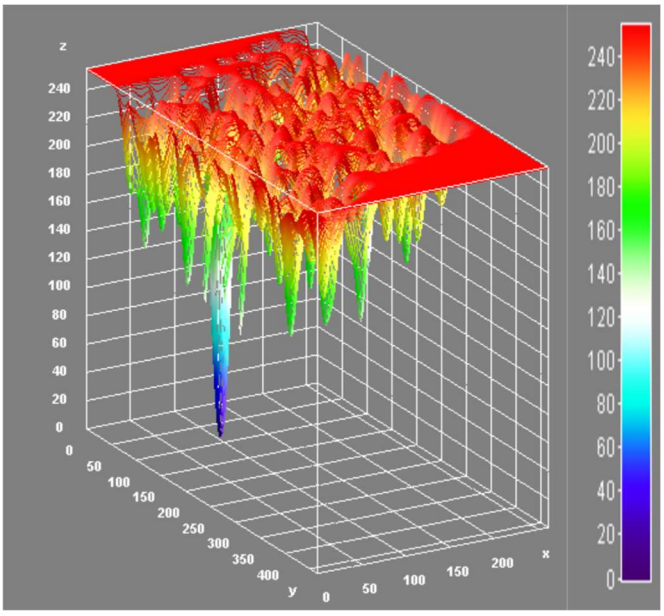
mekanik tepkisinin değerlendirilmesinde kilit bir rol oynar. Donma-çözülme döngüleri sonrası kompozitlerin kırılma yüzey pürüzlülüğünün kantitatif analizi dijital görüntü işleme analizi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey incelemesi, kompozit numunelerin hasarlı yarımlarından biri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Pürüzlülük tarama analizlerinde tarama noktaları, numune hattı boyunca her 20 μm'de bir 0,2 μm yükseklik çözünürlüğünde ve 100 μm'lik artışlarla 2 mm/s tarama hızında elde edilmiştir. Profillerin ölçüm alanı, sonuçların karşılaştırılabilir olması için tüm kompozitler için sabit tutulmuştur. Kompozitlerin üç boyutlu pürüzlülük haritaları Şekil 46, 47 ve 48'te görülmektedir. 3D pürüzlülük sonuçları incelediğinde, tüm kompozit numunelerin yüzey profilleri eksenel yönde anizotropik özellikler gösterdiği görülmektedir. Nano parçacık içeren numunelere ait yüzeylerdeki özellikler, kompozit yüzeyinin pürüzlü olmasına yol açan çok sayıda tepe ve vadiyle süreksizken, kontrol numunesinin (C) yüzeyindeki özellikler göreceli olarak daha pürüzsüzdür. Şekiller ayrıca nano parçacık ilave numunelerin yüzey dokusunun C'ye kıyasla düzensiz ve daha geniş oluklar içerdiğini göstermektedir. %1 nano titanyum içeren kompozitin genişlik ve derinliğinin yüksek olduğu bununla birlikte çatlak vb. kusurların yayılmasının daha büyük bir yüzey alanı ile daha büyük kırılma enerjisine sebep olan üst liflere ulaştığı görülebilir. Bu gözlemler göz önüne alındığında, titanyum nano-parçacıkları her bir partikülün etrafındaki daha geniş bir matris bölgesini zararlı bir şekilde etkilememiş, bu da stres dalgalarını etkili bir şekilde taşıma kabiliyeti yüksek ve daha sağlam bir genel performansa sahip daha ince bir geçiş bölgesi ile sonuçlanmıştır. Kontrol numunesi gibi tek başına göreceli olarak daha zayıf matris özellikleri, donma çözülme döngüleri altında çekme gerilmelerine maruz kaldığında daha büyük bir geçiş bölgesi bozulmasından sorumlu olabilir, çünkü ilk çatlak oluşumu sırasındaki gerilimi taşımada çok önemli bir rol oynaması beklenebilir. Elde edilen ilk bulgular, aslında nano-parçacıkların ara yüzey bölgesinde ilk geçiş bağı durumunda bir değişikliğe neden olduğunu ve genel kompozit davranışı ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olanın bu geçiş bağı değişikliği olduğunu göstermektedir.

Dolayısıyla, nano-parçacıkların uygun oranlarda hibridizasyonu matris içerisinde boşluk inceliğini iyileştirerek (pore refinement) homojenliği artırmış ve matris-nano katkı etkileşimi artırarak güçlü bir bağ ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu

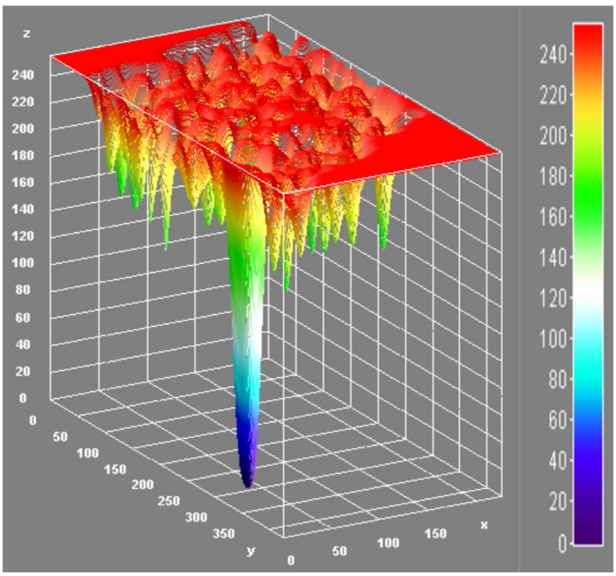
azaltılmış zayıf heterojenlikler de donma-çözülme döngüleri altında mekanik bütünlüğü ve düzensizliği iyileştirmiştir.



Şekil 46. C numunesine ait çatlak haritası



Şekil 47. T1 numunesine ait çatlak haritası

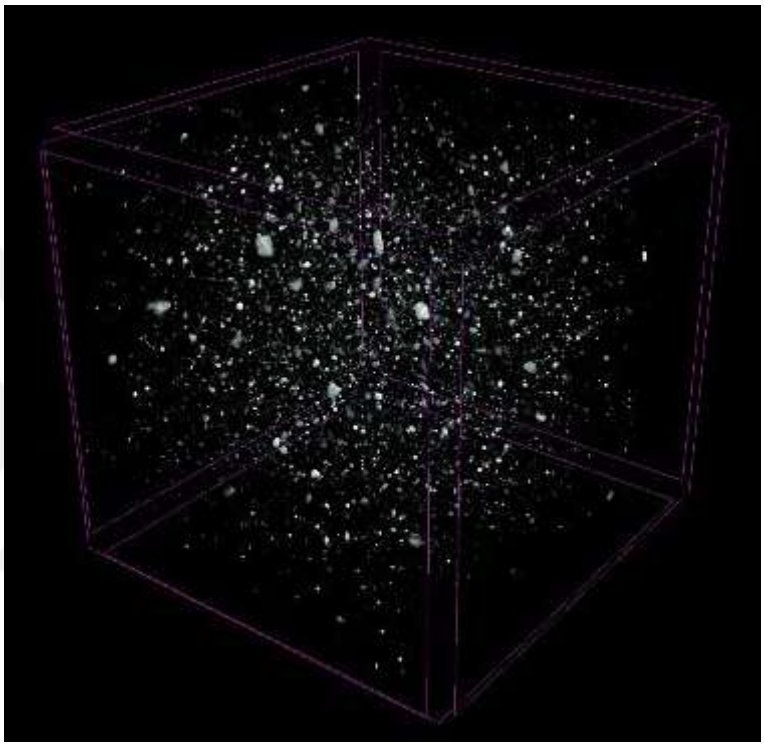


Şekil 48. T2 numunesine ait çatlak haritası

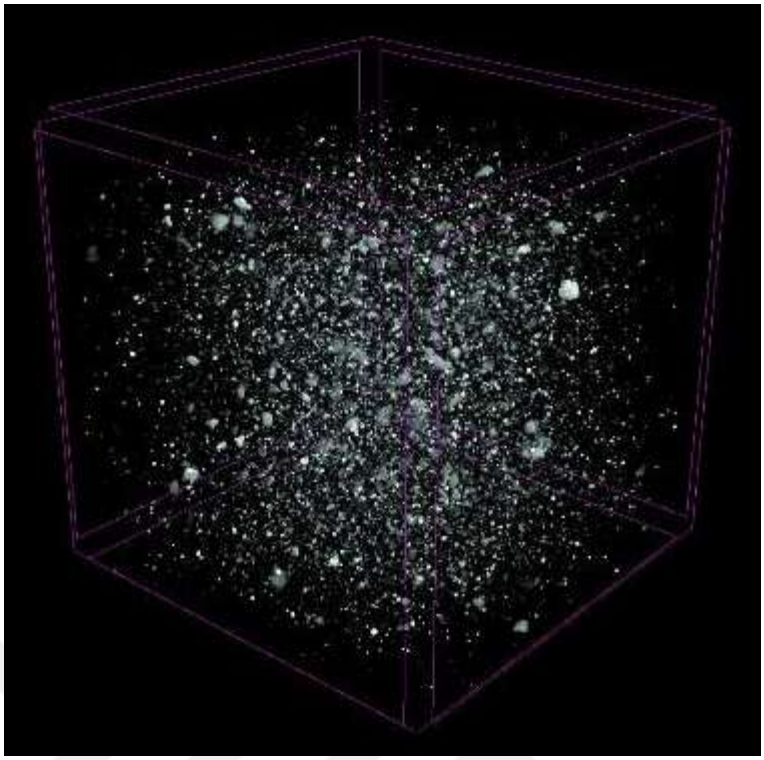
3D çatlak haritalama ve fraktal analizlerine ek olarak, donma çözülme döngüleri sonrası numunelere ait 3D dijital boşluk analizleri de gerçekleştirilerek hesaplanan toplam boşluk alanı yüzdesi (mikro ve makro boşluklar) de Tablo 17'de sunulmuştur. 3D boşluk analizleri için tomografi görüntülerinden oluşturulan iç yapı görselleri Şekil 49, 50 ve 51'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelediğinde, donma çözülme çevrimlerinin ortalama boşluk çapını büyüttüğünü ve birbirine bağlı boşlukların kümelenmesine ve kabalaşmasına neden olduğunu göstermektedir. 3D boşluk görüntüleri hava boşluğu katmanlarındaki bağlantıyı doğrulamakla birlikte, boşlukların birleşmesi neticesinde kırılma yüzeylerindeki etkin parçacıklar arası temas alanını azaltacaktır. Bunun neticesinde donma çözülme çevrimleri sırasında ortaya çıkan çekme gerilmeleri sınırlı plastik deformasyonlar yoluyla kaybolur. Boşluk analizleri test sonuçları, donma çözülme döngüleri sonrasında makro boşluklar (100 nm'den büyük gözenekler) tarafından işgal edilen gözenek hacminin yüzdesinin %1 nano titanyum içeren numunede kontrol numunesinden hem de %2 nano karışımından daha düşük olduğunu ve boşluk yapısındaki en az dejenerasyonun bu karışımda meydana geldiğini açıkça göstermektedir. Buna ek olarak, analiz sonuçları genel olarak nano parçacık içeren numuneler için boşluk inceliğindeki iyileşmenin (mikro gözeneklerin hacminin %65 daha büyük olduğu durum) gerçekleştiğini göstermektedir.

Tablo 17. Numunelere ait dijital görüntü işlemi yoluyla mikro ve makro boşluk analiz sonuçları

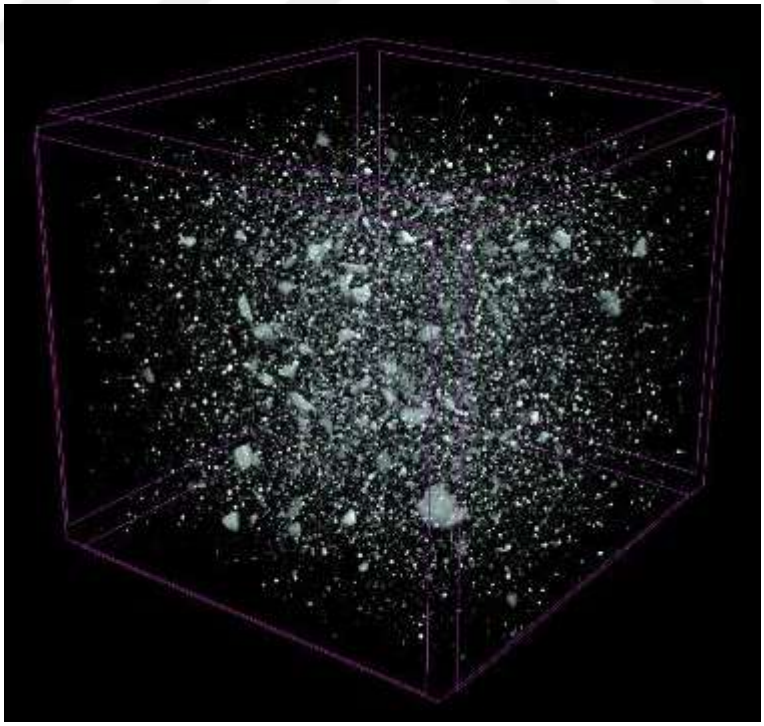
Numune	Mikro boşluklar (%)	Makro boşluklar (%)	Bağlantı yoğunluğu (1/U^3)
C	51.23	48.67	0.36
T1	62.16	37.84	0.23
T2	66.76	33.24	0.18



Şekil 49. C numunesine ait 3D boşluk görüntüsü



Şekil 50. T1 numunesine ait 3D boşluk görüntüsü



Şekil 51. T2 numunesine ait 3D boşluk görüntüsü

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- En yüksek ultrases geçiş hızı değerleri %2 nano titanyum numunesinde elde edilirken, en düşük ultrases geçiş hızı değerleri kontrol numunesinde elde edilmiştir.
- En yüksek su emme değerleri nanomalzeme içermeyen kontrol numunelerinde olurken, en düşük su emme ise %2 nano titanyum içeren geopolimer numunelerde olmuştur.
- Nanomalzeme eklenmesi ile en yüksek eğilme dayanımları sırasıyla 28 günlükte T1, T2 ve C numunelerinde 56 günlükte T2, T1 ve C numunelerinde 90 günlükte ise T2, T1 ve C numunelerinde meydana gelmiştir. Eğilme dayanımları sonuçlarına göre %1 ve %2 nano içeren numunelerdeki artış çoğu serilerde birbirine çok yakındır. Ekonomik olması açısından %1 nano içeren geopolimer serilerin kullanımı tavsiye edilmektedir.
- Nanomalzeme eklenmesi ile en yüksek basınç dayanımları %2 nano titanyum içeren geopolimer numunelerde meydana gelirken, en düşük dayanım nano içermeyen (kontrol) serilerinde meydana gelmiştir. Diğer taraftan nano-TiO_2 düşük dane boyutu nedeniyle boşlukları doldurup ara yüzey bölgesini iyileştirerek dayanım artışına sebep olmuştur. %2 oranında nano içeren numunelerde basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen %1 oranında nano eklenmesi de dayanımı yüksek oranda arttırmıştır.
- Elde edilen sonuçlara göre %2 nano titanyum katkılı numuneler en yoğun içyapıyı, kontrol numuneleri ise en zayıf iç yapıyı göstermektedir. Nano parçacıkların gözenek ve boşlukları doldurduğu görülmüştür. EDS analizi sonucuna göre, C-S-H ve N-A-S-H jelleri ana geopolimerizasyon jelleri olarak karşımıza çıkmaktadır. SEM sonuçlarında da görüldüğü üzere cüruf içeriğindeki kalsiyum oksit sebebiyle hızlıca reaksiyona girerek C-S-H ve N-A-S-H jellerini oluştururken, uçucu kül ise bünyesindeki düşük kalsiyum oksitten ötürü yavaş reaksiyona girerek N-A-S-H jellerini oluşturmaktadır.
- 60 donma-çözünme sonrası kontrol numuneleri başlangıç dayanımının %24,93'ünü kaybetmiştir. Basınç dayanımı kaybı %1 nano titanyum katkılı geopolimer numunelerde %16,41 ve %2 nano titanyum katkılı geopolimer

numunelerde ise %13,50 bulunmuştur. En yüksek dayanım kaybı kontrol numunelerinde elde edilmiştir.

- Elde edilen tomografi sonuçları neticesinde nano parçacık içeren kompozitlerde, nano parçacık ve çevreleyen matris arasında kimyasal bağ enerjisi değerlerinin nano parçacık içermeyen numunelere göre donma çözülme döngüleri altında göreceli olarak daha düşük değerlerde kaldığı gözlemlenmiştir. Bunun neticesinde kompozit içerisindeki nano parçacıkların boşluk inceliğini iyileştirdiği (pore refinement) ve bunun da makro ölçekte daha iyi bir kompozit davranışını sağladığı görülmüştür.
- 3D boşluk görüntüleri hava boşluğu katmanlarındaki bağlantıyı doğrulamakla birlikte, boşlukların birleşmesi neticesinde kırılma yüzeylerindeki etkin parçacıklar arası temas alanını azaltacaktır. Bunun neticesinde donma çözülme çevrimleri sırasında ortaya çıkan çekme gerilmeleri sınırlı plastik deformasyonlar yoluyla kaybolur. Boşluk analizleri test sonuçları, donma çözülme döngüleri sonrasında makro boşluklar (100 nm'den büyük gözenekler) tarafından işgal edilen gözenek hacminin yüzdesinin %1 nano titanyum nano parçacıkları içeren numunede hem kontrol numunesinden hem de %2 nano titanyum parçacık içeren karışımlarından daha düşük olduğunu ve boşluk yapısındaki en az dejenerasyonun bu karışımda meydana geldiğini açıkça göstermektedir. Buna ek olarak, analiz sonuçları genel olarak nano parçacık içeren numuneler için boşluk inceliğindeki iyileşmenin (mikro gözeneklerin hacminin %65 daha büyük olduğu durum) gerçekleştiğini göstermektedir.
- Elde edilen 3D boşluk analizi sonuçları incelediğinde, donma çözülme çevrimlerinin ortalama boşluk çapını büyüttüğünü ve birbirine bağlı boşlukların kümelenmesine ve kabalaşmasına neden olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

Alexander, M., Santhanam, M., & Ballim, M. (2010). Durability design and specification for concrete structures—the way forward. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, 2*(3), 95-105.

Almutairi, A., Tayeh, B., Adesina, A., Isleem, H., & M. Zeyad, A. (2021, aralık). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials, 15*, s. e00733. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733 adresinden alındı

Amor, F., Baudys, M., Racova, Z., Scheinherrov´, L., Ingrisova, L., & Hajek, P. (2016). *Contribution of TiO2 and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete, 16*.

Ayoub Dehghani , Farhad Aslani, Neda Ghaebi Panah. (2021). Effects of initial SiO2/Al2O3 molar ratio and slag on fly ash-based ambient cured geopolymer properties. *Construction and Building Materials, 293*, 123527.

Barış Bayrak, Ali Öz, Ahmet Benli, Esra Kavaz, Gökhan Kaplan, Abdulkadir Cüneyt Aydın. (2023). Physico-mechanical and shielding properties of alkali-activated slag composites incorporating cement clinker aggregate: Effect of high temperature and particle size. *Journal of Building Engineering, 67*, 105982.

Behfarnia, K., & Salemi, N. (2013). The Effects Of Nano-Silica And Nano-Silica And Nano-Alumina On Frost Resistance Of Normal Concrete. *Construction And Building Materrials*, 580-584.

Davidovist, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications.* 02100 Saint-Quentin, France.

Davidovits, J. (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference. *ACI Concrete International*, *9*, s. 12-23.

Davidovits, J. (1994). GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journal of Materials Education, 16*, 91-139.

Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cement. . *International Conference on Alkaline Cements And Concretes*, (s. 131-149). KİEV Ukraine.

Davidovits, J. (1999). Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology.

Duxson, P., Ferna´ndez-Jime´nez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo , A., & Deventer, J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *ADVANCES IN GEOPOLYMER SCIENCE & TECHNOLOGY, 42*, 2917-2933.

Erdem, S., & Ziyada, M. (2023). Strain hardening green cementitious composites reinforced with nanoparticles: Mechanical and microstructural properties and high temperature effect. *Case Studies in Construction Materials, 20*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02033 adresinden alındı

Erdem, S., Blankson, M., & Ezgi, G. (2021). Micro-Mechanical and 3D Fractal Analysis, Durability, and Thermal Behaviour of Nano-Modified Cementitious Lightweight Composites for Building Facades. *Buldings, 11*(3). doi:10.3390/buildings11030085

Erdem, S., Tammam, Y., Ziada, M., & Lezcano, R. (2022). Investigation of the Mechanical, Microstructure and 3D FractalAnalysis of Nanocalcite-Modified Environmentally Friendlyand Sustainable Cementitious Composites. *BUILDINGS, 12*(1), 2-18. https://www.researchgate.net/publication/357516051_Investigation_of_the_Mechanical_Microstructure_and_3D_Fractal_Analysis_of_Nanocalcite-Modified_Environmentally_Friendly_and_Sustainable_Cementitious_Composites adresinden alındı

Erdoğan, T. (1993). Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması* (s. 48-71). içinde ANKARA: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şube Yayınları.

Fuat Koksal, Oguzhan Yavuz Bayraktar, Burak Bodur, Ahmet Benli, Gokhan Kaplan. (2022). Insulating and fire-resistant performance of slag and brick powder based one-part alkali-activated lightweight mortars. *Structural Concrete Journal of The fib, 24*(3), 3128-3146.

Harilal, M., Anandkumar, B., Lahiri, B., George, R., Philip, J., & Albert, S. (2020). Enhanced biodeterioration and biofouling resistance of nanoparticles and inhibitor admixed fly ash based concrete in marine environments. *International Biodeterioration & Biodegradation, 155*, 105088. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105088 adresinden alındı

Heah, C., Kamarudin, H., Al Bakri, A., Bnhussain, M., Luqman, M., Nizar, I., . . . Liew, Y. (2012). Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials, 35*, 912-922. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.102 adresinden alındı

Jinyan Shi, Baoju Liu, Zhihai He, Yuanchun Liu, Junyi Jiang, Tianyu Xiong, Jiawei Shi. (2021). A green ultra-lightweight chemically foamed concrete for building exterior: A feasibility study. *Journal of Cleaner Production, 288*, 125085.

Liu, J., Li, Q., & Xu, S. (2015). Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials, 101*(1), 892-901. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.149 adresinden alındı

Loh, K., Gaylarde, C., & Shirakawa, M. (2018). Photocatalytic activity of ZnO and TiO2 'nanoparticles' for use in cement mixes. *Construction and Building Materials, 167*, 853-859. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.103 adresinden alındı

Ma, B., Li, H., Li, X., Mei, J., & Lv, Y. (2016, EYLÜL 30). Influence of nano-TiO2 on physical and hydration characteristics of fly ash–cement systems. *Construction and Building Materials, 122*, 242-253. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.087 adresinden alındı

Mahmood Hunar Dheyaaldin, Mohammad Ali Mosaberpanah, Jinyan Shi, Radhwan Alzeebaree. (2023). The effects of nanomaterials on the characteristics of aluminosilicate-based geopolymer composites: A critical review. *Journal of Building Engineering, 73*, 106713.

Matalkah, F., Ababneh, A., & Aqel, R. (2022, HAZİRAN 20). Effects of nanomaterials on mechanical properties, durability characteristics and microstructural features of alkali-activated binders: A comprehensive review. *Construction and Building Materials, 336*, 127545. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127545 adresinden alındı

Mehrzad Mohabbi Yadollahi, Ahmet Benli, Ramazan Demirboğa. (2015). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials, 94*, 767-774.

Moro, C., Francioso, V., & Velay-Lizancos, M. (2021). Impact of nano-TiO2 addition on the reduction of net CO2 emissions of cement pastes after CO2 curing. *Cement and Concrete Composites, 123*, 104160. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104160 adresinden alındı

Mustafa, T., Hariri, M., Nader, M., & Montaser, W. (2022). Enhanced shear behaviour of reinforced concrete beams containing Nano-Titanium. *Engineering Structures, 257*, 114082. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114082 adresinden alındı

Niş, A., & Altındal, İ. (2021). Compressive Strength Performance of Alkali Activated Concretes under Different Curing Conditions. *Periodica Polytechnica Civil*

Engineering, 65(2), 565-565. https://hdl.handle.net/11363/4880 adresinden alındı

Niş, A., Alzeebaree, R., Çevik, A., Mohammedameen, A., & Gülşan, M. (2019). Mechanical performance of FRP-confined geopolymer concrete under seawater attack. *Advances in Structural Engineering, 23*(6). https://doi.org/10.1177/1369433219886964 adresinden alındı

Niş, A., Alzeebaree, R., Mawlod, A., & Mohammedameen, A. (2021, mayıs 18). Using of recycled clay brick/fine soil to produce sodium hydroxide alkali activated mortars. *Advances in Structural Engineering, 24*(13), 2996-3009. https://doi.org/10.1177/13694332211015742 adresinden alındı

Niş, A., Eren, N., & Çevik, A. (2021). Effects of nanosilica and steel fibers on the impact resistance of slag based self-compacting alkali-activated concrete. *Ceramics International, 47*(17), 23905-23918. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.099 adresinden alındı

Niş, A., Gülşan, M., Alzeebaree, R., Rasheed, A., & Kurtoğlu, A. (2019, haziran 30). Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber. *Construction and Building Materials, 211*, 271-283. https://scholar.google.com.tr/citations?view_op=view_citation&hl=tr&user=GCHNQWYAAAAJ&citation_for_view=GCHNQWYAAAAJ:WF5omc3nYNoC adresinden alındı

Niş, A., Gülşan, M., Humur, G., Alzeebaree, R., & Çevik, A. (2018, ağustos 11). Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolymer concrete. *Ceramics International, 44*(11), 12253-12264. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.009 adresinden alındı

Niş, A., Kurtoglu, A., Alzeebaree, R., Aljumaili, O., Gulsan, M., Humur, G., & Cevik, A. (2018, ağustos). Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Advances in concrete construction, 6*(4), 345. https://www.techno-press.org/fulltext/j_acc/acc6_4/acc0604002.pdf adresinden alındı

Norhasri, M., Hamidah, M., & Fadzil, A. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials, 133*, 91-97. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005 adresinden alındı

Norhasri, M., Hamidah, M., & Fadzil, A. (2017, mayıs 25). Applicationsofusingnanomaterial inconcrete:Areview. *ConstructionandBuildingMaterials, 133*(91-97).

Onaizi, A., Huseien, G., Lim, N., Amran, M., & Samadi, M. (2021). Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: A comprehensive review. *Construction and Building Materials, 36*, 124850. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124850 adresinden alındı

Öztürk, H., & Kılınçkale, F. (2023). The effect of wetting-drying / freezing-thawing cycles on properties of non-air entrained fly ash substituted cement-based composites. *Ceramics International, 49*(7), 10993-11004. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.11.294 adresinden alındı

Öztürk, H., & M. Kılınçkale, F. (2022). The effect of wetting-drying / freezing-thawing cycles on properties of non-air entrained fly ash substituted cement-based composites. *Ceramics International*, 10993-11004. doi:10.1016/j.ceramint.2022.11.294

Öztürk, H., Erdem, S., & Ziada, M. (2022). Effect of Adding Nano Materials to Fly Ash Supplemented Cement-Based Composites. *1st International Conference on Engineering.* Konya: Natural and Social Sciences.

Phair, J. (2006). Green chemistry for sustainable cement production and use. *Green Chemistry*(9), 763-780.

Ramachandran, V. (1995). Concrete Admixtures. *Noyes Publications*.

Reches, Y., Thomson, K., Helbin, M., Kosson, D., & Sanchez, F. (2017, temmuz 27). Agglomeration and reactivity of nanoparticles of SiO2, TiO2,Al2O3,Fe2O3,. *Construction and Building Materials, 167*, 860-873.

Ren, J., Lai, Y., & Gao, J. (2018, HAZİRAN 30). Exploring the influence of SiO2 and TiO2 nanoparticles on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials, 175*, 277-285. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.181 adresinden alındı

Revilla-Cuesta Víctor, Skaf Marta, Santamaría Amaia, Romera Jesús M, Ortega-López Vanesa. (2022). Elastic stiffness estimation of aggregate–ITZ system of concrete through matrix porosity and volumetric considerations: explanation and exemplification. *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 22*(2), 16449665.

Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials, 24*(11), 2060-2071. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014 adresinden alındı

Sargam, Y., & Wang, K. (2021). Hydration kinetics and activation energy of cement pastes containing various nanoparticles. *Composites Part B: Engineering, 216*, 108836. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108836 adresinden alındı

Shi, C., & Day, R. (2001). Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans. *Cement and Concrete Research, 31*(5), 813-818. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00481-1 adresinden alındı

Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes.* CRC Press. https://books.google.com.tr/books/about/Alkali_Activated_Cements_and_Concretes.html?id=h8oO7R98z_kC&redir_esc=y adresinden alındı

Sobhy, C., Tawfik, T., El Hafez, G., & Faried, A. (2022, HAZİRAN). Insights on the influence of nano-Titanium dioxide and nano-Zinc oxide on mechanical properties and inhibiting of steel reinforcement. *Case Studies in Construction Materials, 16*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01017 adresinden alındı

Sukhoon Pyo, Hyeong-Ki Kim. (2017). Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder. *Construction and Building Materials, 131*, 459-466.

Sumesh, M., Alengaram, U., Jumaat, M., Mo, K., & Alnahhal, M. (2017, Eylül 1). Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar – A review. *Construction and Building Materials, 148*, 62-84. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.206 adresinden alındı

Sumesh, M., Alengaram, U., Jumaat, M., Mo, K., & Alnahhal, M. (2017, eylül 1). Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar – A review. *Construction and Building Materials, 148*, 62-84. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.206 adresinden alındı

Sun, J., Cao, X., Xu, Z., Yu, Z., Zhang, Y., Hou, G., & Shen, X. (2020). Contribution of core/shell TiO2@SiO2 nanoparticles to the hydration of. *Construction and Building Materials, 223*, 117-127.

Torgal, F. (2015). Introduction to Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 1-16. https://doi.org/10.1533/9781782422884.1 adresinden alındı

Uthaman, S., George, R., Vishwakarma, V., Harilal, M., & Philip, J. (2019). Enhanced seawater corrosion resistance of reinforcement in nanophase modified fly ash concrete. *Construction and Building Materials, 221*, 232-243.

Uthaman, S., Vishwakarma, V., George, R., Ramachandran, D., Kumari, K., & Preetha, R. (2018). Enhancement of strength and durability of fly ash concrete in seawater environments: Synergistic effect of nanoparticles. *Construction and Building Materials, 187*, 448-459. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.214 adresinden alındı

Utsev, T., Tiza, T., Mogbo, O., Singh, S., Chakravarti, A., Shaik, N., & Singh, S. (2022). Application of nanomaterials in civil engineering. *Materials Today: Proceedings, 62*(8), 5140-5146. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.480 adresinden alındı

Utsev, T., Tiza, T., Mogbo, O., Singh, S., Chakravarti, A., Shaik, N., & Singh, S. (2024). Application of nanomaterials in civil engineering. *Materials Today: Proceedings, 115*, 96-115.

Vanitha, N., Revathi, T., Gopalakrishnan, R., & Jeyalakshmi, R. (2021). Effect of TiO2, Al2O3 and CaCO3 nano-additives in singular, binary and ternary forms on the mechanical, thermal and microstructural propertites of fly ash supplemented cement matrix. *Materials Today: Proceedings, 47*(4), 871-879. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.088 adresinden alındı

Víctor Revilla-Cuesta, Flora Faleschini, Carlo Pellegrino, Marta Skaf, Vanesa Ortega Lopez. (2022). Simultaneous addition of slag binder, recycled concrete aggregate and sustainable powders to self-compacting concrete: a synergistic mechanical-property approach. *Journal of Materials Research and Technology*, 1886-1908.

Yadollahi Mehrzad Mohabbi, Benli Ahmet. (2017). Stress-strain behavior of geopolymer under uniaxial compression. *Computers and Concrete, 20*(4), 381-389.

Zeybek, O. (2009). Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: Tatar Rifat
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	:
Telefon	:
Faks	:
E-mail	:

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet Tarihi**
Yüksek lisans	İstanbul Gelişim Üniversitesi	2025
Lisans	K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi	2019
Ön lisans	İstanbul Gelişim Üniversitesi	2016
Lise	Elbistan Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**

Yabancı Dil

Yayınlar

Hobiler